

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 กฎเกี่ยวกับกําช

9.2.1 กฎของนอยล์

9.2.2 กฎของชาร์ล

9.2.3 กฎของกําชอุดมคติ

9.2.4 สมนติฐานของอาไวกาໂດ

9.3 ทฤษฎีกลีนของกําช

9.3.1 ความเร็วระกัดส่องของกำลังส่องเฉลี่ย

9.3.2 กฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์

9.3.3 ความจุความร้อนโน้มลาร์ของกําชอุดมคติ

9.3.4 กระบวนการความร้อนคงที่ของกําชอุดมคติ

9.3.5 สมการของงานเดอร์วაลส์

9.4 เครื่องยนต์ความร้อนและกฎอุณหพลศาสตร์ข้อที่สอง

9.4.1 กระบวนการผันกลับได้

9.4.2 เครื่องยนต์ความร้อน

9.4.3 วัฏจักรการโน�ด์

9.4.4 ตู้เย็น

9.4.5 กฎอุณหพลศาสตร์ข้อที่สองและเอนไทรปี

สาระสำคัญ

1. วัดอุณหภูมิ ๑ สมดุลเชิงความร้อนกับวัดอุณหภูมิ ๑ วัดอุณหภูมิสองนั้นจะมีอุณหภูมิเดียวกัน
ก็จะอุณหภูมิคงที่คุณสมบัติที่ต่างๆ ถ้าวัดอุณหภูมิ ๒ ระบบต่างสมดุลเชิงความร้อนกับระบบที่สาม ระบบ ๒ ระบบนั้นจะสมดุลเชิงความร้อนซึ่งกันและกันด้วย
อุณหภูมิในหน่วยเดียวกันจะใช้เคลวินหรือองศาสัมบูรณ์

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

ของแข็งเมื่อได้รับความร้อนจะขยายตัว โดยการขยายตัวตามเส้นที่มีอยู่กับคุณลักษณะเฉพาะของวัสดุ ซึ่งกำหนดตามสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวตามเส้น

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

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

ปริมาณความร้อนที่ทำให้วัสดุ ๑ กิโลกรัมมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ๑ องศา เรียกว่า ความจุ
ความร้อนจำเพาะ หรือ ความร้อนจำเพาะ

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

โดยปริมาณความร้อนที่ทำให้อุณหภูมิของวัสดุเพิ่มขึ้น (หรือลดลง) คือ

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

ปริมาณความร้อนที่ทำให้สารเปลี่ยนสถานะ คือ

$$\Delta Q = mL$$

เมื่อ L คือ ความร้อนแห้งของการเปลี่ยนสถานะ

หลักของการคงตัวของพลังงานความร้อน คือ

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

การถ่ายเทอนความร้อน มี ๓ 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

อัตราการหายความร้อนของวัสดุ ในเวลา t คือ

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

ตามกฎการเย็นตัวของนิวตัน และ K เรียกว่า สัมประสิทธิ์ของการเย็นตัว

2. กฎของกําชยุคਮคิด คือ

$$PV = nRT$$

เมื่อ P คือ ความดัน V คือ ปริมาตร

n คือ จำนวนโมล

และ T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ของกําช

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

สมมติฐานของอาไวกาโดร กล่าวว่า กําชที่มีปริมาตรเท่ากันที่อุณหภูมิและความดันเดียวกัน จะมีจำนวนโมเลกุลเท่ากัน ในหน่วยເອສ້ອ คือ

$$N_0 = 6.02 \times 10^{23} \text{ โมเลกุล/กรัม-โมล}$$

เมื่อ N เป็นจำนวนโมเลกุลทั้งหมดของก๊าซภายในปริมาตร V ดังนี้

$$PV = NkT$$

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

3. ทฤษฎีจลน์ของก๊าซ คือ

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

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

4. กฎอุณหพลศาสตร์ข้อที่หนึ่ง คือ

$$du = dQ - dW$$

ซึ่งกล่าวว่า ถ้าให้ความร้อน dQ แก่ระบบทำให้เปลี่ยนจากสภาพ 1 ไปยังสภาพ 2 และระบบทำงานได้ dW ดังนั้น ผลต่างของ dQ และ dW มีค่าคงที่เสมอเท่ากับพลังงานภายในของระบบที่เปลี่ยนไป dU

ในกระบวนการอุณหภูมิกที่ งานกระทำได้ของระบบก๊าซอุณหคติ คือ

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

ในกระบวนการความดันคงที่ งานกระทำได้ของระบบก๊าซอุณหคติ คือ

$$W = P\Delta V$$

ความถูกความร้อนไม่ควรของก๊าซอุณหคติที่ความดันคงที่และปริมาณคงที่มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$C_p - C_v = R$$

ในกระบวนการความร้อนคงที่สำหรับก๊าซอุณหคติ คือ

$$PV^\gamma = \text{ค่าคงตัว}$$

พัลส์งานภายในของกําชีดูดมกติชนิดจะลดลงเดียว คือ

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

สมการของวานเดอร์วัลส์สำหรับกําชีดูดทั่วไป คือ

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

เมื่อ a และ b เป็นค่าคงที่

5. กฎอุณหพลศาสตร์ข้อที่สอง กล่าวได้เป็น 3 นัย คือ “ไม่มีกระบวนการใดที่จะสร้างเครื่องยนต์ซึ่งสามารถทำงานเป็นวุ้ยจักรจะถ่ายเทความร้อนอย่างต่อเนื่องจากแหล่งอุณหภูมิตามไปสู่แหล่งอุณหภูมิสูงกว่าได้ นอกเสียจากจะให้งานภายใต้ระบบ” หรือ “การแปลงรูปพัลส์งานเพื่อให้ผลสุดท้ายเป็นการแปลงความร้อนให้เป็นงานทั้งหมดจากแหล่งซึ่งมีอุณหภูมิเท่ากันตลอดย่อมเป็นไปไม่ได้” หรือ “กระบวนการใด ๆ ในธรรมชาติที่นำเป็นไปได้มากที่สุดคือกระบวนการการทำให้เออนไทรปีเพิ่มขึ้น หรือมีค่าคงตัว”

$$\Delta S \geq 0$$

โดยที่ $\Delta S = 0$ สำหรับกระบวนการผันกลับได้

และ $\Delta S > 0$ สำหรับกระบวนการผันกลับไม่ได้

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์ความร้อน คือ อัตราส่วนระหว่างงานสุทธิกับความร้อนที่ให้แก่เครื่องยนต์

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

สำหรับเครื่องยนต์ความร้อนซึ่งทำงานแบบวุ้ยจักรการในต์ จะมีประสิทธิภาพ

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

โดย T_1 และ T_2 คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ของแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิต่ำและแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิสูงตามลำดับ

วัตถุประสงค์

เมื่อศึกษาจนบันทึกแล้ว นักศึกษาควรมีความสามารถต่อไปนี้

1. อธิบายความหมายของกระบวนการและหลักการที่เกี่ยวข้องกับการขยายด้วย การส่งผ่านความร้อน กฎเกี่ยวกับกําชา กระบวนการอุณหภูมิคงที่ กระบวนการปริมาตรคงที่ กระบวนการความร้อนคงที่ กระบวนการผันกลับได้ กระบวนการผันกลับไม่ได้ เอนโทรปี วัฏจักรการโนร์ กฎอุณหพลศาสตร์ข้อที่สูนย์ ข้อที่หนึ่งและข้อที่สองได้
2. แสดงที่มาของทฤษฎีคลินของกําชาและการหาปริมาณทางฟิลิกส์ต่างๆ สำหรับกําชาได้
3. คำนวณหาปริมาณทางฟิลิกส์ที่เกี่ยวข้องในบทนี้อย่างน้อยครึ่งหนึ่งได้

9.1 ความร้อนและอุณหภูมิ

ความรู้สึกร้อนและเย็นเป็นความรู้สึกที่เราคุ้นเคยกันดีอยู่แล้ว ระดับของความร้อนดังกล่าวเรียกว่า อุณหภูมิ (temperature) วัตถุที่มีความร้อนสูง เรียกว่ามีอุณหภูมิสูง วัตถุที่มีความร้อนน้อย ๆ เรียกว่ามีอุณหภูมิต่ำ

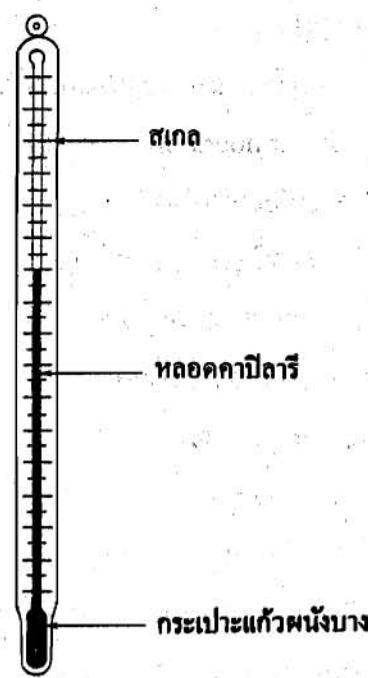
เมื่อนำวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงกว่ามาสัมผัสกับวัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า อุณหภูมิของวัตถุที่ร้อนจะลดลง และจะเดียงกันอุณหภูมิของวัตถุที่เย็นจะเพิ่มขึ้น จนในที่สุดวัตถุทั้งสองจะมีอุณหภูมิเท่ากัน จึงกล่าวได้ว่าเกิดสมดุลความร้อน (thermal equilibrium) พลังงานภายในของวัตถุแรกจะลดลง และพลังงานภายในของวัตถุหลังเพิ่มขึ้น พลังงานที่ถ่ายเทากวัตถุหนึ่งไปสู่อีกวัตถุหนึ่งเกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิ ซึ่งเรียกว่า ความร้อน ความร้อนจะถ่ายเทากับวัตถุร้อนไปยังวัตถุที่เย็นเสมอ จนกว่าอุณหภูมิจะเท่ากันจึงหยุดถ่ายเทา

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

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

เทอร์มอมิเตอร์มีหลายชนิดตามลักษณะการใช้งาน ได้แก่

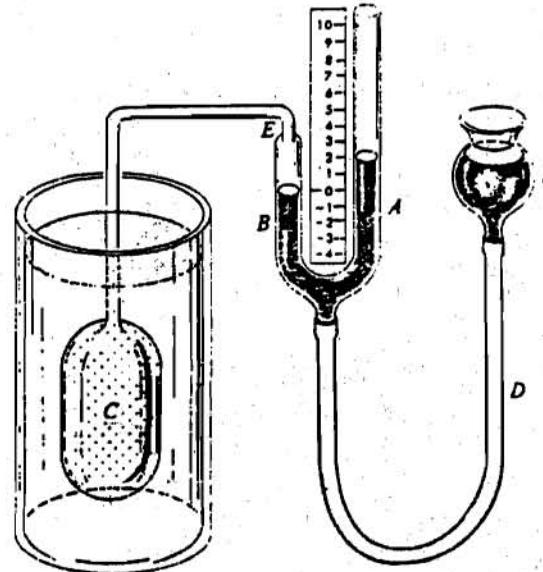
1. เทอร์มอมิเตอร์ปีรอกและเทอร์มอมิเตอร์อัลกออล์ เป็นเทอร์มอมิเตอร์ที่ใช้กันแพร่หลายมาก มีปีรอกหรืออัลกออล์บรรจุอยู่ในกระเบี้捷แก้ว ซึ่งมีผลดีมาก ๆ ต้องยุบหดตัวได้แม่นยำเพื่อบอกอุณหภูมิโดยตรง



รูปที่ 9.1 เทอร์มомิเตอร์

2. เทอร์มอมิเตอร์กําชชนิดปริมาตรคงตัว (constant-volume gas thermometer)

เป็นเทอร์มอมิเตอร์ที่ใช้วัดความกดดันของกําช เมื่อปริมาตรคงตัวจะจะอุณหภูมิเปลี่ยนไป เป็นเครื่องมือที่มีความไว แม่นยำในการวัด



รูปที่ 9.2 เทอร์มอมิเตอร์กําชชนิดปริมาตรคงตัว

โดยทั่วไปบรรจุก้าชซีเดิมในกระป๋อง C วัดความดันได้ใช้манอยเมเตอร์ประทับปลายเปิดหดต่อ A,B และ R บรรจุประทับและอ่างprototh เทอร์มอมิเตอร์ก้าชมักใช้ในสำนักงานมาตรฐานและสถาบันวิจัย มีขนาดใหญ่เทอะทะและถึงจุดสมดุลความร้อนซึ่ง

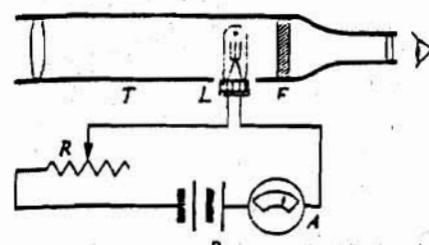
3. เทอร์มอมิเตอร์ชนิดความด้านทาน (resistance thermometer) เป็นเทอร์มอมิเตอร์วัดอุณหภูมิได้ละเอียดมากอันหนึ่ง ใช้วัสดุแพตติกินน์ ต่อสายยาวจากเทอร์มอมิเตอร์ไปยังเครื่องวัดความด้านทาน เช่น วัดสีโคนบริดจ์

4. เทอร์มอคันเปิด (thermocouple) เป็นเทอร์มอมิเตอร์ที่ใช้กันมากในงานวิจัย งานห้องปฏิบัติการ และงานวิศวกรรม ประกอบด้วยลวดโลหะ 2 ชนิด ที่ปลายซึ่งหนึ่งเชื่อมต่อกันเป็นจุดร่วมทดสอบ (test junction) ปกติใช้ร้อยต่อนี้จุ่นกับวัสดุที่ต้องการวัดอุณหภูมิ และปลายเชื่อมต่อกันอีกข้างหนึ่งเป็นจุดร่วมอ้างอิง (reference junction) สำหรับอ่านอุณหภูมิ โดยอาศัยปริมาณทางไฟฟ้า คือ แรงดึงดันไฟฟ้า (emf = electromotive force) วัดโดยเครื่องมือที่เรียกว่า ไฟเทนชิออมิเตอร์ หรือ ไวลต์มิเตอร์



รูปที่ ๙.๓ เทอร์มอคันเปิด

5. มาตรอุณหภูมิสูงเชิงแสง (Optical Pyrometer) เป็นเทอร์มอมิเตอร์ที่ใช้วัดอุณหภูมิได้สูงกว่าเทอร์มอคันเปิด และเทอร์มอมิเตอร์ชนิดความด้านทาน



รูปที่ ๙.๔ มาตรอุณหภูมิสูงเชิงแสง (Optical Pyrometer)

ประกอบด้วยถังไห้ทึค์ T ภายในมี filter F ซึ่งเป็นแผ่นแก้วสีแดง หลอดไฟฟ้า L หลอดไฟฟ้าต่อเป็นวงจรกับเบตเตอร์ B และ rheostat R และมีแอมมิเตอร์ A เมื่อจากเครื่องมือนี้ไม่ต้องนำไปแตะกับวัสดุร้อน จึงสามารถใช้วัดอุณหภูมิที่สูงกว่าจุดละลายของโลหะต่าง ๆ ได้

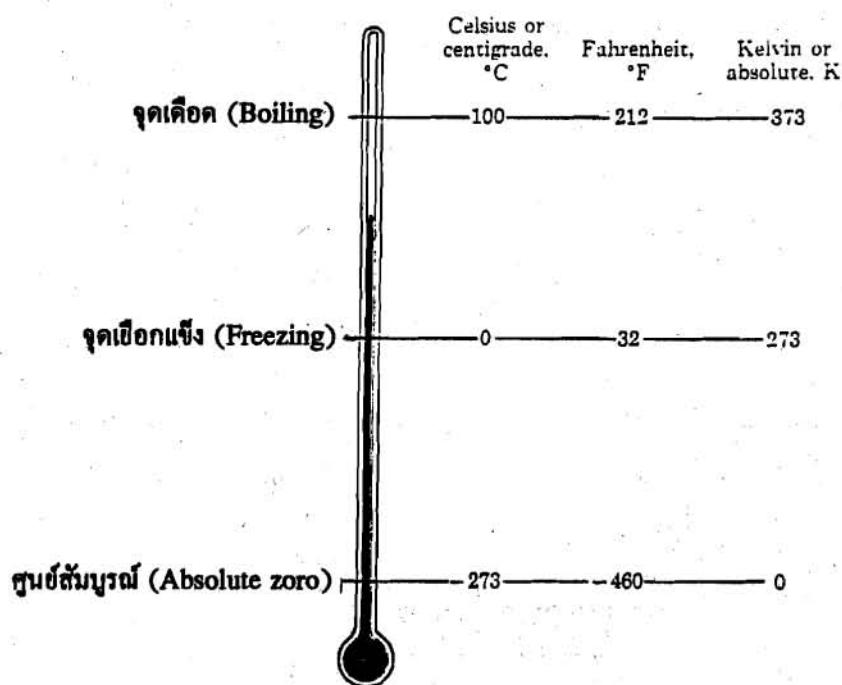
เทอร์นอมิเตอร์ที่นิยมใช้กันเพร่หภัยจะเป็นแบบสเกลเซ็บสและแบบสเกลฟาร์เคนไฮต์ องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) ตั้งขึ้นเพื่อเป็นเก๊บาร์ดิกก์แอนด์เคอร์ส เซลเซียส (Anders Celsius) นักคณิตศาสตร์ชาวสวีเดน และองค์ฟาร์เคนไฮต์ ($^{\circ}\text{F}$) ตั้งขึ้นเพื่อเป็นเก๊บาร์ดิกก์เกเบรีխ ฟาร์เคนไฮต์ (Gabriel Daniel Fahrenheit)

ความสัมพันธ์ระหว่างมาตรฐานวัดอุณหภูมิของสองระบบนี้ คือ

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

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

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



รูปที่ 9.5 จุดเดือดและจุดเยือกแข็งของน้ำ

อุณหภูมิในหน่วยเซลเซียส คือ สเกลต์เคลวิน ให้ K เป็นเคลวิน ตั้งขึ้นเพื่อเป็นเกี๊ยรดิแก่เคลวิน (Lord Kelvin) ที่อุณหภูมิ 0 K จะเท่ากับ -273.15°C และ 273.15 K จะเท่ากับ 0°C
ความสัมพันธ์ระหว่างสเกลต์เคลวินและสเกลเซลเซียส หาได้จากสูตร

$$\begin{aligned} T \text{ K} &= t^{\circ}\text{C} + 273.15 \\ &\approx t^{\circ}\text{C} + 273 \end{aligned} \quad9.2$$

เมื่อ T เป็นอุณหภูมิเคลวิน หน่วยของอุณหภูมิเคลวิน บางที่เรียกว่า องศาสัมบูรณ์ ในรูปที่ 9.5 จะเปรียบเทียบสเกลทั้ง 3 แบบ

กิจกรรม 9.1

ให้นักศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ Fahr ไฮต์กับอุณหภูมิสัมบูรณ์หรือเคลวิน

9.1.2 การขยายตัว (expansion)

ก. การขยายตัวของของแข็ง ของแข็งเมื่อได้รับความร้อนจะขยายตัว ซึ่งแบ่งได้เป็น 3 ชนิด ดังนี้

1. การขยายตัวตามเส้น (linear expansion) ความยาวที่เพิ่มขึ้น หาได้จากสูตร

$$\Delta l = \alpha l \Delta t \quad9.3$$

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) ซึ่งมีนิยามว่า เป็นความยาวที่เพิ่มขึ้นต่อความยาวเดิมของสารเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปหนึ่งองศา

ตาราง ๙.๑ 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 (ธรรมชาติ)	8.5	26
แก้ว (ไฟเบอร์กลาส)	3.3	10
แพลตตินั่ม	9.0	27
ค่อนกรีต	12	36
ตะกั่ว	29	87
ของเหลว :		
เมทิล อัลกอฮอล์		1134×10^{-6}
คาร์บอน เดตรัลคลอไรด์		581
น้ำ		210
กเดซอร์วิน		485
ปρอท		182
น้ำมันสน		900
ก้าชีไซลีน		960
แก๊ส :		
อากาศ		3670×10^{-6}
คาร์บอนไดออกไซด์		3740
ไฮโดรเจน		3660
ไฮเดรน		3665

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

$$l_1 - 1 = \Delta l$$

$$l_1 = 1 + \Delta l$$

$$= 1 + \alpha l \Delta t$$

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

ตัวอย่าง 9.1 ไม้เมตร 2 อันซึ่งทำด้วยอะลูมิเนียม และเหล็กที่อุณหภูมิ 20°C และนำมาใช้ที่อุณหภูมิ 40°C จงหาความขาวขยะที่ใช้ไม้เมตรเหล่านั้น และถ้านำมาใช้ที่อุณหภูมิ 10°C ให้หาความขาวที่อุณหภูมนี้

วิธีทำ ความเข้มของน้ำมันตรีที่อุณหภูมิ 20°C (1) = 1 m

$$\text{สัมประสิทธิ์ของการขยายตัวตามเส้นของอะลูมิเนียม} (\alpha_{Al}) = 26 \times 10^{-6} ^\circ C$$

$$\text{สัมประสิทธิ์ของการขยายตัวตามเส้นของเหล็ก} (\alpha_{Fe}) = 11 \times 10^{-6} /^{\circ}\text{C}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ความยาวของไม้เม้มต่อองศาคูณมิเนบันที่อุณหภูมิ } 40^\circ\text{C} \ L_1 &= 1(1 + \alpha\Delta t) \\
 &= (1) [1 + (26 \times 10^{-6})(40 - 20)] \\
 &= 1.00056 \text{ m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ความเข้มของน้ำมันดิบเทียบกับน้ำที่ } 40^{\circ}\text{C } l_1 &= (1)[1 + (11 \times 10^{-6})(40 - 20)] \\ &= 1.00022 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ความยาวของไม้เม็ดรองที่อุณหภูมิ } 10^\circ\text{C } l_2 &= (1)[1 + (26 \times 10^{-6})(10 - 20)] \\ &= 0.99974 \quad \text{m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ความยาวของไม้เมมตอร์เหล็กที่อุณหภูมิ } 10^\circ C \text{ ลิตร} &= (1)[1 + (11 \times 10^{-6})(10 - 20)] \\ &= 0.99989 \text{ m} \end{aligned}$$

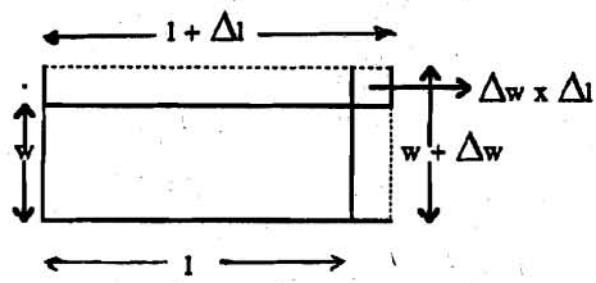
2. การขยายตัวตามพื้นที่ (area expansion) วัตถุเมื่อมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นหรือลดลงวัตถุนั้นจะมีการขยายตัว หรือหดตัวตามพื้นที่ของผิว เช่นเดียวกับตามเส้น จะได้สมการดังนี้

เมื่อ β เป็นสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวตามพื้นที่ A เป็นพื้นที่ที่อวุตถุนิ t และ A_1 เป็นพื้นที่ที่อวุตถุนิ t_1

สำหรับการขยายตัวของของแข็งที่มีเนื้อเดียวกัน จะได้ว่า

$$\beta = 2\alpha$$

ตัวอย่าง ๙.๒ งบพิสูจน์ว่าสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวตามพื้นที่ (β) สำหรับของแข็งที่มีเนื้อเดียวกัน มีค่าเท่ากับ 2α (α ก็คือสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวตามเส้น)



วิธีทำ

ให้ 1 = ความยาวของสี่เหลี่ยมด้านบน

w = ความกว้างของสี่เหลี่ยมด้านบน

A = พื้นที่ของสี่เหลี่ยมด้านบน

$$= 1w$$

Δl = ความยาวที่เพิ่มขึ้น

Δw = ความกว้างที่เพิ่มขึ้น

Δt = อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

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

$w\Delta l$ และ $1\Delta w$ = พื้นที่ด้านซ้าย ๒ ชิ้น

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

$$\begin{aligned} A_1 &= (1 + 1\alpha\Delta t)(w + w\alpha\Delta t) \\ &= 1w + w1\alpha\Delta t + 1w\alpha\Delta t + 1w\alpha^2 (\Delta t)^2 \\ &= 1w + 2w\alpha\Delta t + 1w\alpha^2 (\Delta t)^2 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\begin{aligned} \Delta A &= A_1 - A \\ &= 1w + 2w\alpha\Delta t + 1w\alpha^2 (\Delta t)^2 - 1w \\ &= 2w\alpha\Delta t + 1w\alpha^2 (\Delta t)^2 \\ &= 2A\alpha\Delta t + A\alpha^2 (\Delta t)^2 \end{aligned}$$

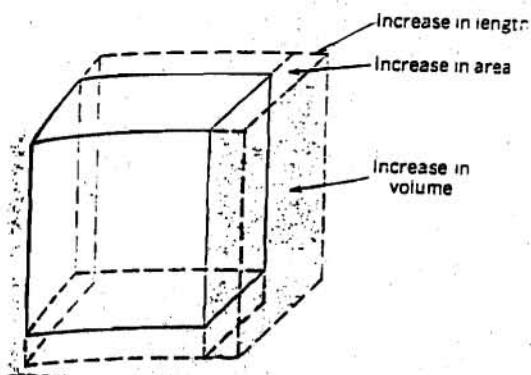
$$\therefore \Delta A = 2\alpha A \Delta t$$

$$\text{นั่นคือ } \beta = 2\alpha$$

3. การขยายตัวตามน้ำ汽 (volume expansion) จะได้สมการดังนี้

เมื่อ γ เป็นสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวตามนาสก์ โดยมี V เป็นปริมาตรที่อุณหภูมิ t และ V_1 เป็นปริมาตรที่อุณหภูมิ t_1

$$\text{สำหรับของแข็ง จะได้ } \gamma = 3\alpha$$



รูปที่ ๙.๘ การเปลี่ยนแปลงความเสื่อม, พัฒนา และปริมาณ กับอุณหภูมิ

๔. การขยายตัวของหน่วย

การขยายตัวตามบาร์กของเหลว (volume expansion of liquids) จะได้

เมื่อ γ_1 เป็นสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวตามมาตรฐานของเหลวซึ่งมีปริมาตร V ที่อุณหภูมิ t และมีปริมาตรให้ V_1 ที่อุณหภูมิ t_1 การวัดการขยายตัวของของเหลว ต้องทราบหนักกว่าปริมาตรของกําลังขยายตัวด้วย ตั้งนี้จะได้ว่า

ส่วนขยายตัวป্রากฎ = ส่วนขยายตัวจริงของของเหตุ - ส่วนขยายตัวจริงของภาระ
หรือเป็นเป็นสมการ จะได้

$$\gamma_a = \gamma_i - \gamma_c \dots 9.9$$

เชิง γ_1 - ต้นประสิทธิ์ของการขยายตัวปราการ

γ_1 = ต้นประสิทธิ์ของการขยายตัวตามบาร์กของเหตุ

γ_c = ส่วนประสิทธิ์ของการขยายตัวตามบาร์กของภาระ

ตัวอย่าง อ.๓ น้ำมีอุณหภูมิ 20°C ใส่ในภาชนะที่ทำด้วยอะลูมิเนียม ขนาด 1.00 ลูกบาศก์เมตร ตามวันนี้จะไหลดอกนามีปริมาตรเท่าไหร่ ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่ 60°C

ในตัวอย่างนี้มีวิธีทำได้ 2 วิธี คือ

วิธีที่ 1

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

$$\begin{aligned} \text{สัมประสิทธิ์ของการขยายตัวตามนาสก์ของน้ำ } \gamma_{\text{H}_2\text{O}} &= 210 \times 10^{-6} /^{\circ}\text{C} \\ \text{ปริมาตรของภาชนะที่เป็นอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิ } 60^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

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

ปริมาตรของน้ำที่อุณหภูมิ 60°C

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

จะเห็นว่า ปริมาณน้ำสันออกจากภาชนะ ได้จากผลต่างของปริมาตรน้ำกับภาชนะที่อุณหภูมิ 60°C นั่นคือ

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

วิธีที่ 2 หาสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวปูรากญี่ จะได้

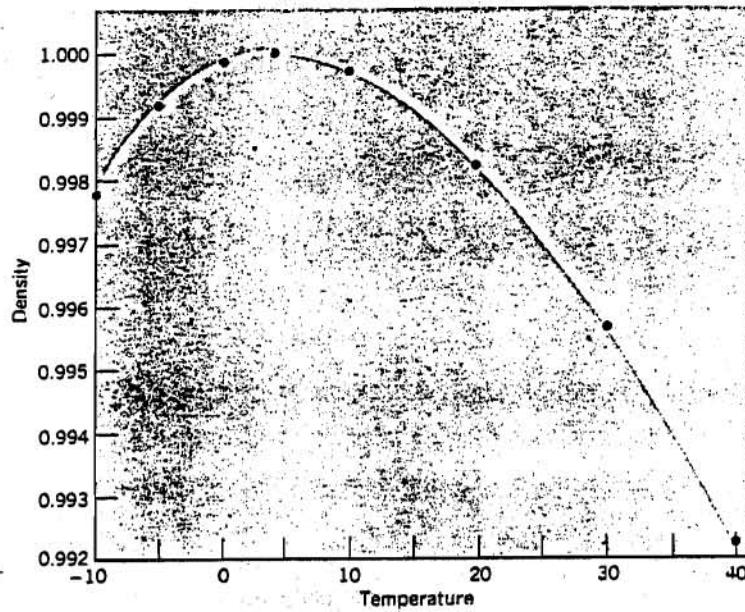
$$\gamma_a = \gamma_l - \gamma_c = 135 \times 10^{-6} /^{\circ}\text{C}$$

ปริมาณน้ำที่สันออกมา ก็คือ ปริมาตรที่เพิ่มขึ้นปูรากญี่ของน้ำ หาได้จาก

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

จะเห็นว่า ห้องส่องวิธีให้ค่าตอบเหมือนกัน แต่วิธีที่ 2 จะง่ายกว่า

การขยายตัวตามนาสก์ในธรรมชาติจะมีผลต่อความหนาแน่นของวัสดุ ความหนาแน่นจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น สำหรับน้ำจะมีข้อยกเว้น นั่นคือ น้ำจะมีปริมาตรลดลง เมื่อได้รับความร้อนตั้งแต่ ๐ ถึง 4°C ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 4°C ปริมาตรของน้ำจะเพิ่มขึ้น ดังนั้นน้ำจึงมีความหนาแน่นมากที่สุดที่อุณหภูมิ 4°C และจะลดลงไม่ว่าจะมีอุณหภูมิลดหรือเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ ๙.๗



รูปที่ 9.7 ความหนาแน่นขึ้นกับอุณหภูมิ

กิจกรรม 9.2

ให้นักศึกษาพิจารณาตาราง 9.1 ว่าค่าสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวตามปริมาตรของสารต่างๆ เป็น 3 เท่าของสัมประสิทธิ์การขยายตัวตามเส้นหรือไม่

9.1.3 ปริมาณความร้อนและพลังงานความร้อน เนื่องจากความร้อนเป็นพลังงานรูปหนึ่ง พลังงานก่อสามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้ จากแนวความคิดของ Count von Rumford และงานจากการทดลองของ James Prescott Joule จึงกำหนดหน่วยของความร้อนในระบบ SI เป็น จูล จูลซึ่งเป็นหน่วยของความร้อน พลังงาน และงาน และหน่วยความร้อนอังกฤษ เป็น บีที尤 (Btu)

สำหรับน้ำ มี 2 หน่วย คือ

1 กิโลแคลอรี่ (One kilocalorie) คือ ความร้อนที่ทำให้น้ำ 1 กิโลกรัมมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศาเซลเซียส

1 บีที尤 (One British Thermal Unit) คือ ความร้อนที่ทำให้น้ำ 1 ปอนด์ มี อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศา华arenheit

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

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

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

$$c = \frac{\Delta Q}{m\Delta t} \quad \dots\dots 9.10$$

$$\Delta Q = mc\Delta t \quad \dots\dots 9.11$$

เรา Nixon เรียก c ว่า ความร้อนจำเพาะ มากกว่า ความจุความร้อนจำเพาะ
m เป็นมวลของวัตถุ ΔQ เป็นปริมาณความร้อนที่วัตถุมีอุณหภูมิเปลี่ยนไป Δt

c มีหน่วยเป็น J/kg.K หรือ J/kg. $^{\circ}$ C

ค่าของ c ของวัตถุ แสดงไว้ในตารางที่ 9.2

ตาราง 9.2 ค่าความร้อนจำเพาะของวัตถุ (c)

วัตถุ	c หน่วย J/kg. $^{\circ}$ C
ของแข็ง :	
เหล็ก	450
ทองแดง	390
อะลูมิเนียม	900
เงิน	234
ตะกั่ว	130
แก้ว	840
ไซเดิบันคลอไรด์	880
น้ำแข็ง	2090
ไม้	1680
กระดาษ	820
อิฐ	840
คอนกรีต	880
มนุษย์ (ร่างกาย)	3470

ตาราง 9.2 (ต่อ)

วัตถุ	c หน่วย J/kg. $^{\circ}$ C
ของเหลว :	
น้ำ	4180
เมทานอล	2250
เอทานอล	2480
เอทีลีน ไกลโคอล	2380
เบนซีน	1720
ปารอท	138
ก๊าซ :	
ไอน้ำ	1970
ออกซิเจน	910
ไนโตรเจน	1040
อากาศแห้ง	1000

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

เมื่อวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงผสานกับวัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำ ความร้อนจะถ่ายเทจากวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่วัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจนกว่าอุณหภูมิจะเท่ากัน ถ้าเราสมมติว่าไม่มีพลังงานเพิ่มหรือสูญหายไปจากการยนต์ ผลลัพธ์ภายในที่ลดลงของวัตถุหนึ่งจะต้องเท่ากับพลังงานภายในที่เพิ่มขึ้นของอีกวัตถุหนึ่ง หลักของกรรมด้วยของพลังงาน จะได้ว่า

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

กิจกรรม 9.3

ให้นักศึกษาพิจารณาตาราง 9.2 ว่าค่าความร้อนจำเพาะของวัตถุใดสูงสุดและเรียงลำดับลงมาจนถึงสุด

ตัวอย่าง 9.4 ในการทดสอบเพื่อหาความร้อนจำเพาะของทองแดง ทองแดงชิ้นหนึ่งหนัก 0.051 กิโลกรัม ทำให้ร้อนครึ่งแรกที่ 100°C ในือน้ำ แล้วถูมลงในน้ำที่ 27°C มวลของน้ำในภาชนะเดียวกัน 0.10 กิโลกรัม มวลของถ้วยอะลูминียมชั้นในหนัก 0.050 กิโลกรัม ถ้วยอะลูминียมสุดท้ายเป็น 30°C ความร้อนจำเพาะของทองแดง จะเป็นเท่าใด

วิธีทำ กำหนดให้ $m_h = 0.051 \text{ kg}$, $T_h = 100^{\circ}\text{C}$
 $m_w = 0.10 \text{ kg}$, $T_c = 27^{\circ}\text{C}$
 $m_{Al} = 0.050 \text{ kg}$, $T_f = 30^{\circ}\text{C}$
 $c_{Al} = 900 \text{ J/kg.}^{\circ}\text{C}$

$$\text{ความร้อนดูด} = c_h m_h (T_h - T_f)$$

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

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

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

$$c_h = 1389/3.57$$

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

ในการเปลี่ยนสภาพของวัตถุจากของแข็งเป็นของเหลว หรือจากของเหลวเป็นก๊าซ โดยคุณภาพความร้อนที่อุณหภูมิกับที่ มีชื่อเรียกว่า การเปลี่ยนสถานะ (phase change)

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

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

ในทำนองเดียวกัน การเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นก๊าซ เรียกว่า การกลายน้ำไอ (vaporization) และอุณหภูมนี้ คือ จุดเดือด (boiling point temperature) จะได้ความร้อนแห้งของการกลายน้ำไอ (latent heat of vaporization)

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

หน่วยของความร้อนแห้ง 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 ใส่ลงในน้ำ 50 กรัมที่อุณหภูมิ 27°C ให้หา อุณหภูมิสุดท้ายเมื่อน้ำแข็งละลายหมด

วิธีทำ ในการผ่อนน้ำแข็งเสียความร้อน 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

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

ความร้อนคง = ความร้อนเพิ่ม

$$209(27 - T_f) = 209 + 3350 + 418 T_f$$

$$T_f = 8.3^{\circ}\text{C}$$

กิจกรรม 9.4

ให้นักศึกษาพิจารณาตาราง 9.3 ว่าสารใดมีจุดหลอมเหลวสูงสุดและสารใดมีจุดหลอมเหลวต่ำสุดและตรงกับปริมาณอื่นๆ ในตารางดังกล่าวเท่าใด

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

1. การนำความร้อน (heat conduction) การส่งผ่านพัฒนาความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิที่จุดสองจุดภายในเนื้อวัสดุมีค่าแตกต่างกัน เรียกว่า การนำความร้อน

พิจารณาแผ่นวัสดุหนา Δx มีพื้นที่หน้าตัด A อุณหภูมิที่หน้าตัดทั้งสองด้านไม่เท่ากัน คือ T_1 และ T_2 เมื่อ $T_2 > T_1$ วัดความร้อน ΔQ ที่ไหลผ่านตั้งจากกับหน้าตัดทั้งสองในเวลา Δt จากการทดลองพบว่า ในช่วงอุณหภูมิที่ต่างกัน $- \Delta T$ ที่กำหนดให้ จะได้ว่า ΔQ เป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับ ΔT และ A และถ้ากำหนด Δt กับ A ให้ จะได้ว่า ΔQ เป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับ $\Delta T / \Delta x$ ถ้า ΔT และ Δx มีค่าน้อย ดังนั้น

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

เมื่อให้ค่าต่าง ๆ เพ้าไกส์สูตร จะได้กฎการนำความร้อน ตามกฎของฟูเรียร์ คือ

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

ซึ่ง dQ/dt = อัตราการไหลของความร้อนผ่านพื้นที่ A

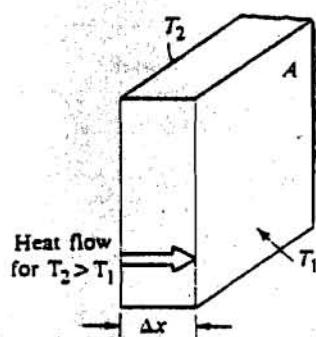
dT/dx = ค่าเกรเดียนต์ของอุณหภูมิ (temperature gradient)

= ค่าของอุณหภูมิที่ลดลงต่อหนึ่งหน่วยความยาว

k = ค่าคงที่ เรียกว่า สภาพนำความร้อน (thermal conductivity),

สารที่มีค่า k มาก จะเป็นตัวนำความร้อนที่ดี แต่สารที่มีค่า k น้อย จะเป็นตัวนำความร้อนที่เลว หรือเป็นชนวนความร้อนที่ดี

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



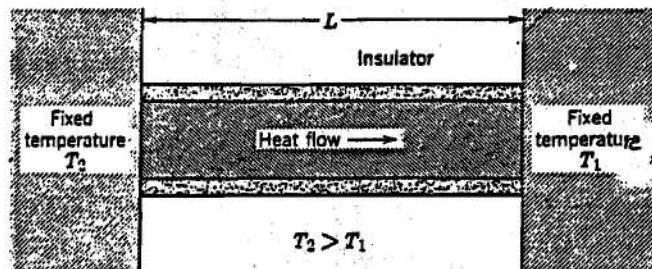
รูปที่ 9.8 การนำความร้อน

ตาราง 9.4 สภาพนำความร้อนของสาร

METAL	k, J/s.m. ^o C	SOLID	REPRESENTATIVE VALUE OF		GAS	k, J/s.m. ^o C
			k, J/s.m. ^o 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			

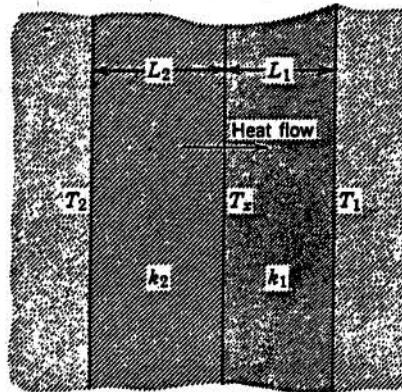
กรณีพิจารณาแกนแห่งวัตถุ (รูปทรงกระบอก) ยาว L ซึ่งด้านข้างถูกหุ้นด้วยฉนวนป้องกันการร้าวไฟฟ้าของความร้อน มีพื้นที่หน้าตัดสามเหลี่ยม A ถ้าอยู่ในสภาวะคงตัว (steady state) ดูพหุภูมิจุดหนึ่ง ๆ จะคงที่ตลอดเวลา ดังนั้น dQ/dt เท่ากันทุก ๆ หน้าตัด แต่ เพราะว่า $dQ/dt = -kA(dT/dx)$, dT/dx จะเท่ากันทุก ๆ หน้าตัดด้วย ถ้า k และ A คงที่ ดังนั้น T จะคงลงอย่างสม่ำเสมอตามความขาวของแห่งวัตถุ คือ $-dT/dx = (T_2 - T_1)/L$ เราจะได้

$$dQ/dt = -kA[T_2 - T_1]/L \quad \dots\dots 9.15$$



รูปที่ ๙.๙ การนำความร้อนของแผ่นด้านหน้าหุ้มจนวน

ตัวอย่าง ๙.๘ วัดถุงผ้าแบนทำด้วยวัสดุสองชนิดที่มีความหนา L₁ และ L₂ มีสภาพนำความร้อน k₁ และ k₂ ถ้าอุณหภูมิที่ผิวนอกเป็น T₁ และ T₂ จงหาอัตราที่ความร้อนถ่ายเทผ่านวัสดุแผ่นบางนี้



วิธีทำ

ให้ T_x = อุณหภูมิที่ผิวระหว่างวัสดุทั้งสอง

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

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

ตัวเป็นสภาวะคงตัวจะได้

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

ให้ dQ/dt เป็นอัตราการถ่ายเทความร้อน (ซึ่งเท่ากันทุก ๆ หน้าตัด)

$$\therefore [L_2/(k_2A)] \cdot (dQ/dt) = T_2 - T_x \quad \dots\dots(1)$$

$$[L_1/(k_1A)] \cdot (dQ/dt) = T_x - T_1 \quad \dots\dots(2)$$

$$(1) + (2) \left[\frac{L_2}{(k_2A)} + \frac{L_1}{(k_1A)} \right] \frac{dQ}{dt} = T_2 - T_1$$

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

ถ้าแผ่นวัสดุบางประกอบด้วยวัสดุมากกว่าสองชนิด เราจะได้

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

กิจกรรม 9.5

ให้นักศึกษาพิจารณาตาราง 9.4 ว่าสารใดมีสภาพนำความร้อนสูงสุด และสารใดมีค่าดังกล่าวต่ำสุดเท่ากันเท่าไร และแตกต่างจากสารอื่นๆ เพียงใด

2. การพาความร้อน (convection) การส่งผ่านความร้อนโดยการพาความร้อนไม่เลกุณของตัวกลางที่ได้รับความร้อนจะเป็นตัวเคลื่อนที่พาความร้อนไป เช่น เมื่ออาบน้ำอังหนีอเตาไฟ จะรู้สึกร้อน เพราะไม่เลกุณของอากาศที่ร้อนขยายตัวมีความหนาแน่นลดลง แล้วอยู่สูงขึ้นมา กระบวนการนี้ จึงทำใหรู้สึกร้อน

การพาความร้อนแบ่งตามชนิดการเคลื่อนที่ของไม่เลกุณตัวกลางได้ 2 ชนิด คือ

2.1 การพาความร้อนอย่างอิสระ (free convection) เป็นการพาความร้อนที่ไม่เลกุณของตัวกลางเคลื่อนที่ไป เพราะมีความหนาแน่นต่างกัน เช่น การเกิดลม และการระนาบของอากาศ เสียของโรงงานทางปล่องไฟ เป็นต้น

2.2 การพาความร้อนที่ถูกบังคับ (forced convection) เป็นการพาความร้อนที่ไม่เลกุณของตัวกลางถูกทำให้เคลื่อนที่โดยแรงภายนอก เช่น การระนาบความร้อนของหม้อน้ำรดยนต์ พัดลม ตู้เย็น และเครื่องปรับอากาศ เป็นต้น

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

3. การแพร่งสี (ความร้อน) (radiation) วัสดุทุกชนิดที่มีอุณหภูมิเหนือศูนย์องศาสัมบูรณ์ จะพยายามหรือแพร่งสีออกจากผิวของมันในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงคลื่นต่าง ๆ กัน รังสีที่มีผลทำให้เกิดความร้อนอยู่ในช่วงความยาวคลื่น วัดจากคลื่นแสงที่ดำเนินถึงคลื่นวิทยุ (หรือจาก 8×10^2 ถึง 10×10^{16} nm) เรียกว่า รังสีอินฟราเรด รังสีอินฟราเรดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

จะมีคุณสมบัติเหมือนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอื่น ๆ เช่น คลื่นแสง และรังสีเอกซ์เคลื่อนที่ในสูญญากาศ ด้วยความเร็วเท่ากับ 3×10^8 เมตรต่อวินาที สามารถสะท้อนและหักเหได้ แต่มีความยาวคลื่น ต่างกัน และให้ผลต่อผู้รับต่างกัน

จากการทดลองพบว่า อัตราการแผ่รังสีออกจากผิวัตตุ R แปรผันตามพื้นที่ผิว A และกำลังสี่ของอุณหภูมิสัมบูรณ์ T ของวัตตุ นั้นคือตามกฎของสเตเฟ่น

$$R \propto AT^4$$

ขณะที่วัตตุแผ่รังสีความร้อนออก จะมีการคูดคลื่นรังสีความร้อนที่วัตตุอื่นแผ่นมาด้วย ถ้าอัตราการแผ่นมากกว่าอัตราการคูดคลื่น วัตตุจะเย็นลง หรือถ้าอัตราการแผ่นน้อยกว่าอัตราการคูดคลื่น วัตตุจะร้อนขึ้น ถ้าอัตราทั้งสองเท่ากันเมื่อใด วัตตุจะมีอุณหภูมิคงที่

ถ้าวัตตุมีอุณหภูมิ T_1 ขณะที่สิ่งแวดล้อมมีอุณหภูมิ T_2

อัตราการแผ่รังสีระหว่างวัตตุกับสิ่งแวดล้อม มีค่าเท่ากับผลต่างของอัตราการแผ่และ การคูดคลื่นรังสี เป็นความสัมพันธ์ได้ว่า

$$R = kA(T_1^4 - T_2^4) \quad \dots\dots 9.16$$

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_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

$$R = 4kAT_2^3(T_1 - T_2) \quad \dots\dots 9.17$$

ถ้าอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมมีค่า T_2 คงที่ตลอดเวลาที่เกิดการแผ่รังสี

$$\therefore R = K(T_1 - T_2) \quad \dots\dots 9.18$$

เมื่อ $K = 4kAT_2^3$

ถ้า R เป็นอัตราการรายความร้อนของวัตตุ

$$R = Q/t$$

เมื่อ Q เป็นปริมาณความร้อนที่หายออกมานะในเวลา t

$$\therefore Q/t = K(T_1 - T_2) \quad \dots\dots 9.19$$

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

ตัวอย่าง 9.7 cacoterm อันหนึ่งบรรหุน้ำร้อน ซึ่งเย็นลงจาก 70°C ถึง 60°C ในเวลา 5 นาที จงหาว่าต้องใช้เวลาเท่าไหรในการเย็นตัวลงจาก 50°C ถึง 40°C ถ้าอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมเป็น 20°C ให้ความถี่ความร้อนสำเพาะของcacoterm แตะน้ำ = $c \text{ J}/\text{C}$

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

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

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

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

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

$$= 9 \text{ min}$$

9.2 กฎเกี่ยวกับกําช

9.2.1 กฎของบอยล์ (Boyle's law) ในปี ก.ศ. 2203 บอยล์ (Robert Boyle) ได้ทำการทดลองศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความกดดันกับปริมาตรของกําช พนว่า เมื่อ อุณหภูมิคงที่ความกดดันของกําชเป็นปฏิภาคกลับกับปริมาตร

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

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

เมื่อ P = ความกดดันของกําช

V = ปริมาตรของกําช

9.2.2 กฎของชาร์ล (Charles' Law) ในปี ก.ศ. 2330 ชาร์ล (Jacques Charles) ได้ทดลองโดยให้ความกดดันของกําชคงที่ พนว่า ปริมาตรจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับ อุณหภูมิสัมบูรณ์ของกําช

$$V \propto T$$

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

เมื่อ V = ปริมาตรของกําช

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์

9.2.3 กฏของกําชอุคุณคติ (ideal gas law)

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

$$\text{จากกฏของชาร์ด} \quad V \propto T$$

$$\text{ดังนั้น} \quad V \propto T/P \text{ (เมื่อมวัตถุคงที่)}$$

$$\therefore P_1V_1/T_1 = P_2V_2/T_2 \quad \dots\dots 9.22$$

สมการ (9.22) เรียกว่า กฏของกําช หรือเขียนใหม่เป็น

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

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

เมื่อ m เป็นมวลของกําช , R เป็นค่าคงที่

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

ค่าคงที่ของกําชไม่เท่ากันสำหรับกําชต่างชนิดกัน ถ้าคิดนำหนักของกําชเป็นโมลแล้ว ค่าคงที่ของกําชทุกชนิดจะเท่ากันเรียกว่า R ว่า ค่าคงที่สากลของกําช ดังนั้น สมการใหม่ที่ได้จึงเรียกว่า กฏของกําชอุคุณคติ นั่นคือ

$$PV = nRT \quad \dots\dots 9.24$$

โดยที่	P = ความกดดัน	นิวตันต่อตารางเมตร
	T = อุณหภูมิสัมบูรณ์	เคลวิน
	V = ปริมาตร	ลูกบาศก์เมตร
	n = จำนวนโมล	กิโลกรัมโมล
	R = ค่าคงที่สากลของกําช	จูดต่อกิโลกรัมโมล.เคลวิน

ดังนั้น ที่ STP (Standard temperature and pressure) ซึ่งมี $T = 273.15 \text{ K}$, $P = 1 \text{ atmosphere} = 1.01325 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ กําช 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 สมมติฐานของอาโว加โดร (Avogadro's hypothesis) อาโว加โดร (Amedeo Avogadro) นักวิทยาศาสตร์ชาวอิตาลี พบว่า กําชที่มีปริมาตรเท่ากันที่อุณหภูมิและความดันเดียวกัน จะมีจำนวนไม่เท่ากัน จำนวนไม่เท่ากันในหนึ่งกิโลกรัมโมล เรียกว่า เลขอาโว加โดร (Avogadro's number) แทนด้วย N_0 มีค่าดังนี้

$$\text{ในหน่วย SI} \quad N_0 = 6.02 \times 10^{23} \text{ โมเลกุล/กิโลกรัม-โมล}$$

ถ้าให้ N เป็นจำนวนไม่เท่ากันทั้งหมดในปริมาตรที่พิจารณา ดังนี้

$$N = nN_0$$

จากสมการของกําชอุณหคติ สมการ (9.24) เป็นไปได้ว่า

$$\begin{aligned} PV &= nRT \\ &= (N/N_0)RT \\ \therefore PV &= NkT \end{aligned} \quad \dots\dots 9.25$$

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

$$\begin{aligned} &= \frac{8.314 \times 10^3}{6.02 \times 10^{23}} \\ &= 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K} \end{aligned}$$

กิจกรรม 9.6

ให้นักศึกษาเบริญเทียนกฎต่างๆ เกี่ยวกับกําชว่าแต่ละกฎใช้ได้ถูกต้องในกรณีใดบ้าง

9.3 ทฤษฎีจลน์ของกําช

พิจารณา กําช จำนวนหนึ่งซึ่งประกอบด้วยอะตอมที่ประกอบขึ้นเป็นกําช การอธิบาย พฤติกรรมของอะตอมเหล่านี้ เราไม่จำเป็นต้องสนใจอะตอมทุกๆ ตัวที่มีอยู่ แต่จะใช้กฎของวิชา กลศาสตร์อธิบายพฤติกรรมเหล่านี้หนึ่งหน่วยที่เดียวพร้อมๆ กันในเชิงสถิติ เรียกทฤษฎีนี้ว่า ทฤษฎีจลน์ ของกําช (kinetic theory of gas) กําชที่นำมาศึกษาพฤติกรรมต่างๆ คือ กําชอุณหคติซึ่งมี ลักษณะเป็นเพียงแบบจำลองของกําชที่เราได้ดึงขึ้น เพื่อให้เราสามารถอธิบายคุณสมบัติต่างๆ ของกําชได้ถูกต้องตามที่คาดไว้ได้

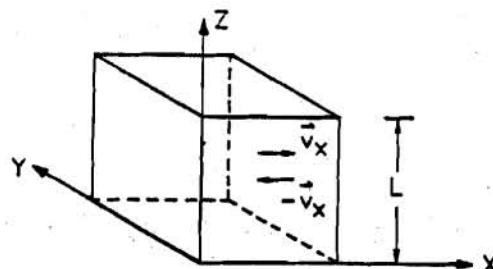
แบบจำลองของกําชอุณหคติ

1. กําชอุณหคติเป็นกําชซึ่งแรงระหว่างไม่เท่ากัน มีค่าน้อยมากตัดทิ้งได้
2. กําหนดให้ไม่เท่ากันของกําชอุณหคติเป็นมาตรฐานขนาดเสี้ยนมาก ดังนั้นพลังงาน ภายในของกําชอุณหคติเป็นพลังงานของกําชที่ส่วนมากอยู่ในรูปของความเร็ว

3. การชนกันระหว่างไม้เลกุลของก้าชอุดมคติ หรือระหว่างไม้เลกุลกับผนังภายนอกที่บรรจุเป็นแบบขีดหุ่นสัมบูรณ์ คือ พังงานถ่านก่ออนชานเท่ากับพังงานถ่านหัสซัน

4. การเคลื่อนที่ของไม้เลกุลเป็นไปตามกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน ความเร็วของแต่ละไม้เลกุลไม่จำเป็นต้องเท่ากัน แต่ถ้าว่ามีค่าคงตัว เมื่อเวลาผ่านไป เดินไม้เลกุลหนึ่งมีความเร็วอย่างหนึ่งหลังจากภูมิภาคแล้วจะมีความเร็วเพิ่มขึ้น แต่เมื่อไปชนไม้เลกุลตัวอื่นอีกความเร็วจะลดลง แม้ว่าจะไม่เป็นไปตามนี้โดยตรง เมื่อคำนึงว่ามีไม้เลกุลเหมือน ๆ กันอยู่จำนวนมาก ทำให้ไม่อาจคาดเดาการเคลื่อนที่ของไม้เลกุลตัวหนึ่งตัวใดโดยเฉพาะได้ จะนั้นจึงถือว่าค่าเฉลี่ยของภูมิศาสตร์ของไม้เลกุลเหล่านั้นเป็นหลักเปรียบเทียบในเรื่องสถิติ

9.3.1 ความเร็วรวมที่สองของกำลังสองเฉลี่ย พิจารณาไม้เลกุลของก้าชอุดมคติทั้งหมด N ในเลกุล อยู่ในภูมิภาคที่มีด้านยาวด้านละ L แต่ละไม้เลกุลมีมวล m เมื่อไม้เลกุลชนกับผนังแล้วสะท้อน จะเกิดแรงกระทำต่อผนังนั้น เนื่องจากมีไม้เลกุลจำนวนมาก แรงเข้าที่จะมีติดต่อกันไปก่อให้เกิดเป็นความกดดัน



รูปที่ 9.9 ไม้เลกุลเคลื่อนที่ในภูมิภาคที่มีความเร็ว v ชนผนังตามแกน x ด้วยความเร็ว v_x

พิจารณาไม้เลกุลที่มีความเร็ว v ซึ่งแยกเป็นความเร็วขับตามแกนได้ v_x , v_y และ v_z เมื่อไปชนผนังทางแกน x จะมีไม้เมนตัมไปทางแกน x เป็น mv_x และเมื่อสะท้อนกลับจะได้เป็น $-mv_x$ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงไม้เมนตัมทางแกน x เป็น

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

เนื่องจากการชนเกิดขึ้นต่อเนื่องตลอดเวลา ดังนั้น Δt = เวลาที่ไม้เมนตัมของก้าชเคลื่อนที่ไปและกลับ

การเปลี่ยนไม้เมนตัมนี้เกิดในเวลา

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

จากกฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 2 ของนิวตัน ที่กล่าวว่า แรงล้ำหน้าเท่ากับอัตราการเปลี่ยนโน้ม менตั้ม

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

ดังนั้นขนาดของแรงเฉลี่ย F_x ที่เกิดจากการชนของไมโครกรัมตัวหนึ่ง คือ

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

$$= \frac{mv_x^2}{L}$$

เนื่องจากแต่ละไมโครกรัมอาจมีความเร็วต่าง ๆ ได้ดังนี้ ค่า v_x ของแต่ละไมโครกรัมก็ย่อมต่างกันได้ด้วย
กำหนดให้ ในเลกุล N_1 มีความเร็ว v_{x1}

ในเลกุล N_2 มีความเร็ว v_{x2}

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

$$\overline{v_x^2} = \frac{N_1 v_{x1}^2 + N_2 v_{x2}^2 + \dots}{N}$$

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

แรงทั้งหมดที่กระทำต่อผนังที่ชนทางด้านแกน x

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

พื้นที่ของผนังที่ถูกชน

$$A = L^2$$

ความกดดัน

$$p = F/A$$

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

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

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

ในท่านองเดียวกัน

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

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

เนื่องจากไมโครกรัมมีโอกาสชนผนังทั้ง 3 ทิศ (x, y, z) เท่า ๆ กัน ได้มี

$$\text{แต่ } \overline{v^2} = \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2}$$

ดังนั้น $\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2} = (1/3)\overline{v^2}$ 9.28

$$\begin{aligned} PV &= (1/3)Nm\bar{v}^2 \\ &= (2/3)N[(1/2)m\bar{v}^2] \\ PV &= (2/3)N.E_k \end{aligned} \quad \dots\dots 9.29$$

ซึ่ง $\overline{E_k} = (1/2)m\overline{v^2}$ เป็นค่าเฉลี่ยของพลังงานจด์ของแต่ละโมเดกุล

$$\begin{aligned} \text{จาก } & PV = (2/3)N\bar{E}_k \\ \text{และ } & PV = NkT \\ \therefore & (2/3)N\bar{E}_k = NkT \\ & \bar{E}_k = (3/2)kT \quad \dots\dots 9.30 \end{aligned}$$

$$\text{ความเร็ว根ที่สองของกำลังสองเฉลี่ย } v_{\text{rms}} = \sqrt{v^2} = \sqrt{3kT/m} \quad \dots\dots 9.31$$

เนื่องจากมีไม้เดกุลอยู่เป็นจำนวนมากในก้าวปรินาตรหนึ่ง ๆ จะทำให้ค่า v_{rms} และ v ในแต่ละต่างกันมากนัก ดังนั้นในการคำนวณโดยทั่ว ๆ ไปที่เกี่ยวข้องกับไม้เดกุลจำนวนมาก ๆ อยู่ในปรินาตรใด ๆ ความกดดันไม่สูงนัก ค่า v_{rms} ถือว่าเป็นค่าเดียวกับค่า v ได้ โดยไม่ทำให้เกิดความผิดพลาดในผลลัพธ์มากนัก

ตัวอย่าง ๘.๘ ถังก๊าซใบหนึ่งมีปริมาตร ๐.๓ ลูกบาศก์เมตร บรรจุก๊าซชีเดียม ๒ ไมล์ ที่อุณหภูมิ 27°C โดยสมมติว่าชีเดียมมีพฤติกรรมเหมือนก๊าซอุคุดดี ๙๖

- ก. พลังงานภายในของระบบ
 - ข. พลังงานเฉลี่ยต่ออะตอม
 - ค. v_{rms} ของอะตอม
 - ง. v_{rms} ถ้าอุณหภูมิเท่ากับ $-30^{\circ} C$
 - จ. ถ้ากําชั่นที่บรรจุเป็นในไตรเจน ให้หา v_{rms} ของอะตอมในไตรเจนที่อุณหภูมิ $20^{\circ} C$

$$\text{วิธีทำ} \quad n = 2 \text{ mole} \quad , \quad T = 273 + 27 = 300 \text{ K}$$

$$R = 8.314 \text{ J/mole-K} , \quad k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

ก. พลังงานภายในของระบบ

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

ข. พลังงานเฉลี่ยต่ออะตอม

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

ก. v_{rms} ของอะตอม

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

ก. v_{rms} เมื่ออุณหภูมิเป็น -30°C

$$\text{จาก } v_{rms} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$$

เพราะว่า k และ m จะคงที่ สำหรับกําชีวิเดียน

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

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

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

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

$$v_{rms} (\text{ที่ } T_2 = 243 \text{ K}) = \sqrt{\frac{243}{300}} \cdot (1,368 \text{ m/s}) \\ = (0.9)(1,368) \\ = 1,231 \text{ m/s} \\ = 1.23 \times 10^3 \text{ m/s}$$

จ. ถ้าเป็นกําชในไตรเจน อุณหภูมิ 20°C

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

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

$$\therefore v_{rms} = \sqrt{\frac{3 RT}{M}} \\ = \sqrt{\frac{(3)(8.314)(293)}{(28 \times 10^{-3})}} \\ = 510.88 \text{ m/s} \\ = 511 \text{ m/s}$$

กิจกรรม 9.7

ให้นักศึกษาเปรียบเทียบ v_{rms} ของกําชในตัวอย่าง 9.8 ที่อุณหภูมิต่างกันและเมื่อ กําชต่างชนิดกัน

9.3.2 กําข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ พลังงานอาจถ่ายเทเข้าหรือออกจากระบบอุณหพลศาสตร์ได้ในรูปแบบของพลังงานความร้อนหรือพลังงานก่อ โดยอาจจะเป็นชนิดเคมีชนิดหนึ่งหรือ พร้อนกันทั้งสองชนิด การเปลี่ยนแปลงสุทธิของพลังงานความร้อนหรือพลังงานก่อ ย่อมจะมีผล ต่อพลังงานที่ระบบมีอยู่ พลังงานที่สะสมอยู่ในระบบ เรียกว่า พลังงานภายใน (Internal energy)

ถ้าให้ความร้อน Q แก่ระบบแล้วระบบมีการเปลี่ยนแปลงจากสภาวะที่ 1 ไปเป็นสภาวะที่ 2 และระบบทำงานได้ W จากการทดลองพบว่า ผลต่างของ Q และ W มีค่าคงที่เสมอไม่ว่าเส้นทางการเปลี่ยนแปลงระหว่างสภาวะที่ 1 และสภาวะที่ 2 จะเป็นอย่างไร $Q - W$ มีค่าเท่ากับการเปลี่ยนแปลงของพลังงานภายในของระบบ คือ พลังงานที่สะสมอยู่ในระบบซึ่งเป็นผลรวมของพลังงานของ พลังงานศักย์ และพลังงานรูปอื่น ๆ ทุกชนิดของระบบ จากสภาวะที่ 1 ไปยังสภาวะที่ 2 ซึ่งเป็นค่าที่ไม่ขึ้นกับกระบวนการของการเปลี่ยนแปลง

$$\Delta U = U_2 - U_1 = Q - W \quad \dots\dots 9.32$$

ถ้าระบบมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

$$dU = dQ - dW \quad \dots\dots 9.33$$

Q มีเครื่องหมายเป็น บวก เมื่อความร้อนไหลเข้าสู่ระบบ

W มีเครื่องหมายเป็น บวก เมื่อระบบทำงาน

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

กฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์เป็นกฎที่เกี่ยวกับการคงด้วยของพลังงาน กล่าวได้ว่า ใน การเปลี่ยนแปลงทางอุณหพลศาสตร์ใด ๆ พลังงานรวมกันทั้งหมดจะย่อมมีค่าคงที่ จะไม่มี พลังงานถูกสร้างขึ้นมาหรือถูกทำลาย นำมาประยุกต์กับระบบที่มีอนุภาคเป็นจำนวนมากได้ พลังงานภายในของระบบอาจแยกเป็นสองส่วนคือ งานกับพลังงานความร้อน

ถ้ากระบวนการเป็นแบบวัฏจักร (cyclic process) คือ เมื่อสิ้นสุดกระบวนการแล้วระบบ ก็กลับมาสู่สภาวะเริ่มต้น การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในจะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้น

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

งานที่ระบบกระทำได้ เท่ากับความร้อนที่ระบบดูดกลืนเข้าไป

ถ้าระบบไม่ทำงานได้โดยไม่มีคุณลักษณะความร้อนหรือพลังงานใด ๆ เลย คือ $Q = 0$ เรียกว่า กระบวนการแบบเดียบแต่ติด (adiabatic process) หรือกระบวนการที่มีความร้อนคงที่

$$\Delta U = U_2 - U_1 = -W \quad \dots\dots 9.35$$

แสดงว่า พลังงานภายในของระบบลดลงเท่ากับงานที่ระบบทำได้

ในทางอุณหพลศาสตร์ เราสนใจงานที่ได้จากการเปลี่ยนปริมาตรของสาร เช่น การทำงานของก๊าซที่ขยายตัวภายในได้ความกดดัน

พิจารณา ก๊าซบรรจุอยู่ในกระบอกสูบพร้อมถูกสูบ ก๊าซจะเป็นระบบซึ่งอยู่ในสภาวะสมดุลกับ สิ่งแวดล้อม คือ กระบอกสูบกับเหล็กให้ความร้อน เริ่มต้น ก๊าซมีความกดดัน p_1 ปริมาตร V_1

หลังจากกํา伎ได้รับความร้อน Q เกิดการขยายตัวดันถูกสูบให้เกิดต่อไปที่ได้เป็นระบบทาง ds และ กําตันมาสู่ภาวะสมดุลอีกรังหนึ่ง ซึ่งมีภาวะกดดัน p_2 และปริมาตร V_2

$$\text{งานที่กํา伎กระทำ} \quad dW = F.ds = pAds = pdV$$

เมื่อ p = ความกดดัน

A = พื้นที่หน้าตัด

dV = การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของกํา伎

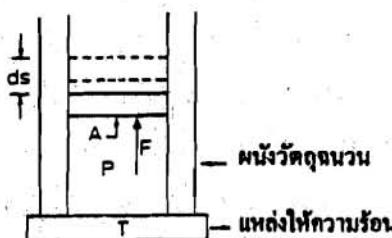
ถ้ากํา伎เปลี่ยนจาก V_1 ไปเป็น V_2

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

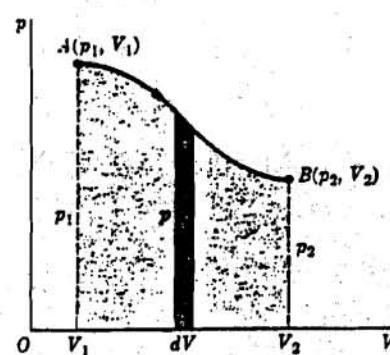
ระหว่างที่กํา伎มีการขยายตัว งานที่กระทำโดยกํา伎 หาได้จากพื้นที่ใต้กราฟในแผนภาพ $P - V$

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

แสดงว่างานไม่ได้ขึ้นอยู่กับภาวะเริ่มต้นและภาวะสุดท้ายเท่านั้น แต่ขึ้นอยู่กับเส้นทางที่กระบวนการมีการเปลี่ยนภาวะด้วย



รูปที่ 9.10 กํา伎ในระบบถูกสูบ ทำงานโดยการขยายตัว



รูปที่ 9.11 พื้นที่ใต้กราฟ คือ งานที่ระบบกระทำ

จากสมการสภาวะของกําชดูดมคติ $PV = nRT$ จะคำนวณหางานซึ่งขึ้นอยู่กับกระบวนการดังนี้

1. กระบวนการอุณหภูมิกคงที่ (isothermal process) หางานได้ดังนี้

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

2. กระบวนการความกดดันคงที่ (isobaric process) ถ้ากําชในระบบอกรูปได้รับความร้อนในขณะที่อกรูปมีความกดดันคงที่ กําชก็จะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นพร้อมกับขยายตัวทำงานดันลูกสูบให้เคลื่อนที่ไป

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

3. กระบวนการปริมาตรคงที่ (isometric process) เมื่อเราเพา กําชได้ยังไห้ปริมาตรเปลี่ยน กําชจะไม่สามารถขยายตัวออกทำงานได้ ดังนั้น งานจึงเป็นศูนย์ ($W = 0$)

9.3.3 ความถูกความร้อนในสารของกําชดูดมคติ

ความถูกความร้อนในสาร (molar heat capacity) ของสารใด ๆ คือ ปริมาณความร้อนที่สารนั้น 1 มоля อุคคลินเข้าไปเพื่อเพิ่มอุณหภูมิ 1 องศา ดังนั้นถ้าสาร 1 มоляอุคคลินความร้อน dQ เพื่อเพิ่มอุณหภูมิ dT

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

เนื่องจากการคุณลักษณะความร้อนของระบบขึ้นอยู่กับกระบวนการฯ ดังนั้นความฯ ความร้อนในแต่ละกระบวนการฯ จึงมีอยู่ 2 ชนิด คือ

1. ความฯ ความร้อนในการเมื่อปริมาตรคงที่

$$C_v = (1/n)(dQ/dT)_v \quad \dots\dots 9.41$$

2. ความฯ ความร้อนไม่ถาวรเมื่อความกดดันคงที่

$$C_p = (1/n)(dQ/dT)_p \quad \dots\dots 9.42$$

$$C_p/C_v = \gamma \quad \dots\dots 9.43$$

ถ้ากระบวนการเป็นแบบปริมาตรคงที่ ระหว่างที่มีการเปลี่ยนแปลง จะไม่มีการทำงานเกิดขึ้น $dW = 0$

จากกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์

$$dU = dQ - dW$$

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

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

ถ้ากระบวนการเป็นแบบความกดดันคงที่ จากสมการ (9.42) จะได้

$$dQ = nC_p dT \quad \dots\dots 9.45$$

จากกฎข้อที่ 1 ของอุณหพลศาสตร์

$$dU = dQ - dW$$

$$dU = nC_p dT - PdV \quad \dots\dots 9.46$$

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในขึ้นกับอุณหภูมิเท่านั้น ไม่ขึ้นกับกระบวนการ พลังงานภายในจากสมการ (9.44) จึงเท่ากับสมการ (9.46) จะได้ว่า

$$nC_v dT = nC_p dT - PdV$$

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

สมการของกําช อุณหคติ

$$PV = nRT$$

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

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

$$C_p - C_v = R \quad \dots\dots 9.47$$

สมการ (9.47) ใช้สำหรับกําช อุณหคติ

9.3.4 กระบวนการความร้อนคงที่ของกําชอุณหภูมิ

สำหรับกําชอุณหภูมิเมื่อรูบรมีการเปลี่ยนแปลงโดยมีความร้อนคงที่ (adiabatic process)

จากกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์

$$dU = dQ - dW$$

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโดยมีความร้อนคงที่ $dQ = 0$

จากสมการ (9.44)

$$\begin{aligned} dU &= nC_v dT \\ \therefore nC_v dT &= 0 - pdV \\ 0 &= nC_v dT + pdV \\ dT &= -\frac{pdV}{nC_v} \end{aligned} \quad \dots\dots(1)$$

สำหรับกําชอุณหภูมิ

$$\begin{aligned} pV &= nRT \\ pdV + Vdp &= nRdT \\ dT &= \frac{(pdV + Vdp)}{nR} \end{aligned} \quad \dots\dots(2)$$

(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

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

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

$$pV^\gamma = k$$

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

.....9.48

ตัวอย่าง 9.9 เมาก๊าซออกซิเจน 2 กรัม ไม่เกี่ยวจากอุณหภูมิ 0°C ถึง 100°C โดย ก. ปริมาตรคงที่ และ ข. ความกดดันคงที่ ความร้อนที่ให้ งานที่ได้รับ และการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของ แก๊สจะเป็นอย่างไร ถ้าออกซิเจนมีค่า $C_v = 21.1 \text{ J/g-mole.K}$ ในช่วงอุณหภูมนี้

วิธีทำ ห้องสองกรณี อุณหภูมิเปลี่ยนจาก 273 K เป็น 373 K

ก. ปริมาตรคงที่ ใช้สมการ (9.41)

$$\begin{aligned} dQ_v &= nC_v dT \\ Q_v &= \int_{T_1}^{T_2} nC_v dT \\ &= nC_v \Delta T \\ &= (2)(21.1)(373 - 273) \\ &= 4.22 \text{ kJ} \end{aligned}$$

งาน $W_v = \int_{V_1}^{V_2} pdV = 0$

พลังงานภายใน $\Delta U = Q_v - W_v$
 $= 4.22 \text{ kJ}$

ข. ความกดดันคงที่ ใช้สมการ (9.39)

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

$$\begin{aligned} dQ_p &= nC_p dT \\ Q_p &= \int_{T_1}^{T_2} nC_p dT = nC_p \Delta T \\ &= n(C_v + R)\Delta T \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_p &= nC_v \Delta T + nR\Delta T \\ &= Q_v + W_p \\ &= 4.22 + 1.66 \\ &= 5.88 \text{ kJ} \end{aligned}$$

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

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

จะเห็นว่า ΔU ทั้งสองกรณีเท่ากัน โดย U ของกําช güdem กตีปืนกับ T เท่ากันนั้น และ

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

ความถูกความร้อนในสารของกําชดูดมกติชนิดอะตอมเดียว (monatomic) เนื่องจากไม่เกิดขึ้นกับกําชเป็นส่วนของอุบัติการณ์ที่มีรูปทรงกลม ไม่มีแรงกระทำระหว่างไม่เกิด นอกจักเมื่อเกิดการชนกันเท่านั้น พลังงานศักยภาพในจีบไม่มี พลังงานภายในห้องหมุดของกําชจึงอยู่ในรูปของพลังงานจุดอ่อนห่างเดียว

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

ผลัังงานภายใน U ของก้าวอุดมคติ N ไม่แตกต น มีค่าเป็น

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

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

จากสูตร (9.44)

$$dU = nC_v dT$$

•

$$9.47) \quad C_+ = C_0 + R$$

$$\text{สมการ (9.47)} \quad C_p = C_v + R = (5/2)R$$

ค่า C_v และ C_p ดังกล่าวใช้ได้ถูกต้องสำหรับแก๊สชนิดอะตอมเดียวเท่านั้น

ถ้าเป็นก้าชานิดอะตอนกู่หรือห้ำยอะตอน ค่าพลังงาน竹筋ของก้าชมีค่านากขึ้นโดยคิดพลังงาน竹筋ที่ไม่เกิดมีการเคลื่อนที่แบบหมุนเพิ่มขึ้น

การณ์ก้าวชนิดของตอนคุ้ง จะได้

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

กรณีก้าวชนิดทางกายอะตอม จะได้

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

9.3.5 สมการของวนเดอร์วัลส์ สมการ $pV = nRT$ เป็นสมการที่ได้จากการทดลอง มีข้อบกพร่อง ใช้ได้เฉพาะแก๊สอุดมคติ เมื่อก๊านมีอุณหภูมิสูงกว่าจุดหดตอนเหตุมากพอก๊านี้ จะเป็นไปตามกฎของแก๊สอุดมคติอย่างดี แต่ก๊าซจริงที่ไกต์จุดหดตอนเหตุจะผิดไปจากกฎนี้มาก วนเดอร์วัลส์ (J.D. van der Waals) ได้พิจารณาแก้ไขปรับปรุงสมการให้ใช้สำหรับก๊าซจริง ดังนี้

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

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

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

พิจารณาสมการ (9.49) จะเห็นว่าแต่ละในเกลือมีขนาด นั้นคือ แต่ละในเกลือมีปริมาตร จำกัดค่านี้ ดังนั้นที่ว่างในภาชนะปริมาตร V จึงเหลือน้อยลงสำหรับเป็นที่ที่จะให้ในเกลือ ของกําชาดคืออนที่ไปมา ดังนั้นเทอมปริมาตรคงที่ $(V - b)$ อิกประการหนึ่งในเกลือของกําชาจะ ส่งแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน แม้แต่เพียงเล็กน้อยแต่ก็มากพอที่จะไปลดโนเมนตัมเมื่อไปชนผนัง คิดเป็นความกดดันภายในของกําชา ดังนั้นเทอมความกดดันคงที่มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น $(p + a/V^2)$

9.4 เครื่องยนต์ความร้อนและกฎอุณหพลศาสตร์ข้อที่สอง

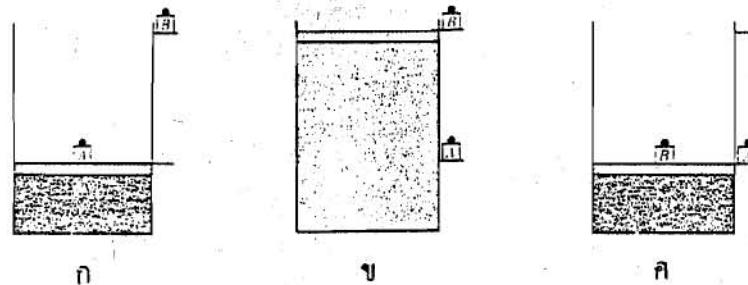
9.4.1 กระบวนการผันกลับได้ (Reversible process) คือ กระบวนการที่ระบบ สามารถจะเปลี่ยนกลับไปสู่ภาวะเริ่มต้นได้โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงสุทธิของสภาพแวดล้อม



รูปที่ 9.12 การขยายตัวและการหดตัวของกําชาแบบผันกลับได้

การขยายตัวของกําชาแสดงกระบวนการผันกลับได้ ตามรูปที่ 9.12 (ก) ณ ตำแหน่งสมดุล ความดันของกําชาเท่ากับความดันที่เกิดจากตุ้มน้ำหนักต่าง ๆ บวกกับความดันบรรยายกาศ ถ้า เอาตุ้มน้ำหนักออกหนึ่งอันโดยน้ำไปไว้ข้าง ๆ ความดันภายในจะลดลงเล็กน้อยกําชาจะขยายตัว เล็กน้อยจนกระทั่งได้สมดุลอิก เมื่อทำซ้ำ ๆ กันเช่นนี้กําชาจะขยายตัวจนได้ปริมาตรตามรูป (ข) และน้ำหนักซึ่งเดิมวางอยู่บนถุงสูญนำออกมากางไว้ข้างนอก เนื่องจากเป็นกระบวนการซึ่งเกิด ขึ้นอย่างช้า ๆ จึงอาจสมดุลกําชาคงอยู่ในสมดุลต่อเนื่องแบบสถิติ เพื่อที่จะอัดกําชาให้กลับไปสู่ ภาวะเริ่มต้น จึงเอาตุ้มน้ำหนักวางกลับบนถุงสูญที่จะอันตามเดิมโดยเอาอันที่เอาออกทิ้ง วางก่อนตามลำดับ เมื่อวางหมดแล้วกําชาจะกลับไปสู่ภาวะเริ่มต้น เป็นการควบรวมพอดีตาม รูป (ค) และไม่ทำให้สิ่งแวดล้อมเปลี่ยนแปลง จึงสรุปได้ว่า ในวิธีการที่เป็นการเปลี่ยนแปลงแบบ ผันกลับได้ ไม่สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของห้องในระบบและสิ่งแวดล้อม

กระบวนการผันกลับไม่ได้ (Irreversible process) คือ กระบวนการที่ระบบหรือสภาพแวดล้อมอย่างใดอย่างหนึ่งเท่านั้นที่อาจกลับไปสู่สภาพเดิมได้ เกิดขึ้นเมื่อระบบเปลี่ยนไปจากสภาพสมดุลมากและเกิดขึ้นในอัตราสูงมาก

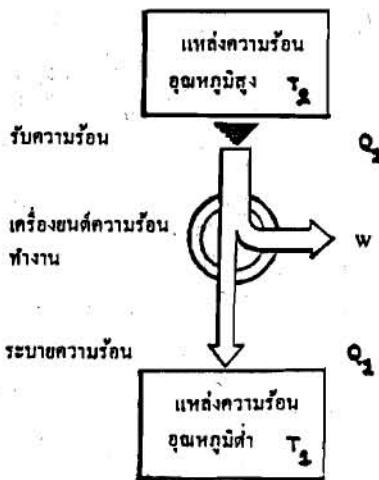


รูปที่ 9.13 การขยายตัวและการหดตัวของแก๊สแบบผันกลับไม่ได้

พิจารณาภาพที่ 9.13 (ก). ตู้น้ำหนัก A วางอยู่บนถูกสูบ และมีตู้น้ำหนัก B ซึ่งมีมวลเท่ากันวางอยู่ที่ระดับบน ถ้ายกตู้น้ำหนัก A ออกหันที่หันใด ความดันภายในจะลดลงทันที ก้าชก็จะขยายตัวอย่างรวดเร็ว ในที่สุดถูกสูบจะอยู่นิ่ง ณ ตำแหน่งนี้ และอยู่ในสมดุลด้วย ความดันและอุณหภูมินี้ ตามรูป (ข) การทำให้ก้าชกลับคืนสู่สภาพเดิมต้น อาจใช้ถูกตู้น B วางลงบนถูกสูบ ก้าชก็จะหดตัวเหลืออยู่ในสภาพเดิมต้น ตามรูป (ค) ในกระบวนการอาจจะช้า หรือไม่ช้ากับกระบวนการขยายตัวก็ได้ ก้าชจึงขยายตัวและหดตัวควบคู่กันไป แต่การทำให้ลิ่ง แวดตัวมีการเปลี่ยนแปลง สรุปได้ว่า ในวัฏจักรที่ประกอบด้วยการเปลี่ยนแปลงแบบผันกลับ ไม่ได้ แต่เพียงบางส่วน หรือทั้งหมดทุกส่วน ระบบกลับมาอยู่ในสภาพเดิมได้แต่เกิดการเปลี่ยนแปลงดาวรุนแก่สิ่งแวดตัว

9.4.2 เครื่องยนต์ความร้อน เครื่องยนต์ความร้อนทุกชนิดมีไว้ใช้งานเพื่อ วัตถุประสงค์ต่างกัน คือ การเปลี่ยนพลังงานความร้อนให้เป็นพลังงานก่อ เครื่องยนต์ความร้อน มีองค์ประกอบที่สำคัญ 3 ประการ คือ แหล่งให้ความร้อนอุณหภูมิสูง สารปฏิบัติงาน และแหล่ง รักษาร้อนอุณหภูมิค่า

เครื่องยนต์ความร้อนมีวิธีการทำงานเป็นวัฏจักร เมื่อเพาค้าชก้าชก็จะขยายตัวและทำงานได้ แต่ก็ไม่อาจขยายตัวได้เรียบไป เพราะเครื่องยนต์มีขนาดจำกัด เมื่อขยายตัวเต็มที่แล้ว จึงยัดก้าช ให้กลับคืนสู่สภาพเดิม (เริ่มต้น) และพร้อมที่จะเริ่มวัฏจักรใหม่ ทั้งนี้เพื่อจะได้รับงานสุทธิจาก เครื่องยนต์ งานที่ก้าชทำในการขยายตัวต้องมากกว่างานที่ใช้อัดก้าช ความดันในขณะอัดจะต้อง ต่ำกว่าในขณะก้าชขยายตัว นั่นคือ อุณหภูมิในช่วงอัดจะต้องน้อยกว่าอุณหภูมิในช่วงก้าชขยายตัว ดังนั้นในช่วงการอัดก้าชจึงต้องทำให้ก้าชเย็นลงโดยระบบความร้อนให้แก่แหล่งรับความร้อนที่อุณหภูมิค่า



รูปที่ 9.14 แผนภาพเครื่องยนต์ความร้อน

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

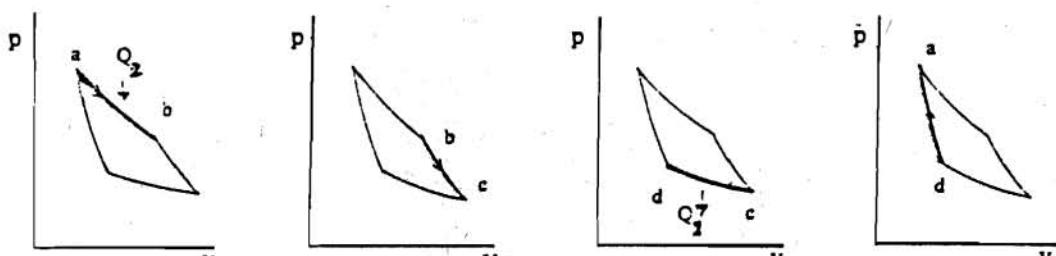
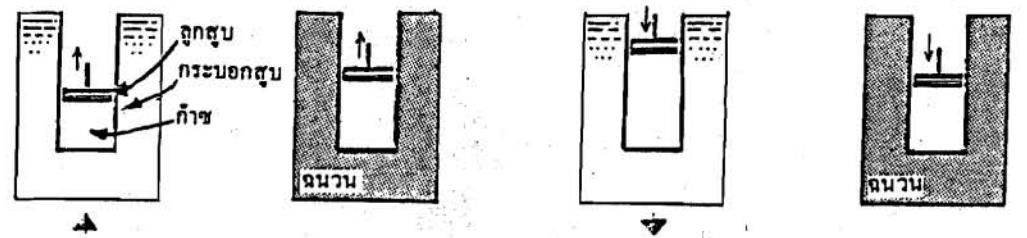
$$W = Q_2 - Q_1$$

ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (thermal efficiency) ทุของเครื่องยนต์ความร้อน มีนิยามว่า เป็นอัตราส่วนของงานสุทธิต่อความร้อนที่ให้แก่เครื่องยนต์

$$\begin{aligned} \eta &= W/Q_2 \\ &= \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2} \\ \eta &= 1 - Q_1/Q_2 \quad \dots\dots 9.50 \end{aligned}$$

เครื่องยนต์ความร้อนจะมีประสิทธิภาพสูงเมื่อ Q_1 น้อย โดยจะทำให้ปริมาณความร้อน $Q_2 - Q_1$ ซึ่งใช้ทำงานสุทธินั้นมาก ทุ มีค่าน้อยกว่า 1

9.4.3 วัฏจักร卡戎 (Carnot Cycle) ในปี พ.ศ. 2387 คาร์โนต์ (Sadi Carnot) เป็นผู้แนะนำวัฏจักรแบบผันกตัวได้ เรียกว่า วัฏจักรคาร์โนต์ ซึ่งเป็นวัฏจักรที่ประกอบด้วย กระบวนการแบบอุณหภูมิคงตัวสองกระบวนการ และกระบวนการแบบความร้อนคงตัวสองกระบวนการ



ให้งาน รับ Q_1
กําชีข่ายตัว T คงที่

ให้งาน
กําชีข่ายตัว Q คงที่

รับงาน กําช Q_2
กําชดูดตัว T คงที่

รับงาน
กําชดูดตัว Q คงที่

รูปที่ 9.15 วัฏจักรการในต์ ใช้กําชดูดคดีเป็นสารปฏิบัติงาน

ศึกษาหลักการทำงานและประสิทธิภาพของเครื่องจักรความร้อนที่ทำงานแบบวัฏจักรการในต์ โดยใช้กําชดูดคดีเป็นสารปฏิบัติงาน โดยบรรจุกําชปริมาณ n กรณีดีในระบบอุกตุน และปฏิบัติงานในช่วงอุณหภูมิ T_2 และ T_1 โดยมีขั้นตอนการทำงานดังรูปที่ 9.15 ดังนี้

1. กระบวนการอุณหภูมิกองที่ T_2 นั้นคือ $\Delta U = 0$ ช่วงจาก a ถึง b กําชรับความร้อน Q_2 จากแหล่งอุณหภูมิ T_2 และนำมายังช่วงตัวทำงาน

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

2. กระบวนการความร้อนคงที่จาก b ถึง c กําชซึ่งคงข่ายตัวไปสุดที่ c โดยอุณหภูมิติดลงจาก T_2 เป็น T_1 ทำงานได้ W_{bc}

3. กระบวนการอุณหภูมิกองที่จาก c ถึง d เริ่มอัดกําช งาน W_{cd} ซึ่งกําชรับไว้จะเปลี่ยนเป็นความร้อน Q_1 และขายออกให้แหล่งความร้อนอุณหภูมิ T_1

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

4. กระบวนการความร้อนคงที่ จาก d ถึง a ขังคงอัดกําชต่อไปโดยปืนให้กําชระบายความร้อนออก งานที่กําชรับไว้ W_{da} จะเปลี่ยนไปเป็นพัลส์งานภายใน อุณหภูมิสูงขึ้นจาก T_1

ไปเป็น T_2 และกําชกํลับคืนสู่สภาพเดิมที่ความดัน ปริมาตรและอุณหภูมิเดิมกับเมื่อเริ่มต้น จึง
คงวัฏจักรพอดี

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	$Q = \Delta U + W$
	$= 0 + (Q_2 - Q_1)$
	$= Q_2 - Q_1$
	$\eta = 1 - Q_1/Q_2$
	$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1 \ln(V_d/V_c)}{T_2 \ln(V_b/V_a)}$

ใช้กฎของบอยส์และกระบวนการอุณหภูมิกองที่ 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

$$\begin{aligned} Q_1/Q_2 &= T_1/T_2 \\ \therefore \quad \eta &= 1 - (T_1/T_2) \end{aligned}$$

แสดงว่าประสิทธิภาพของเครื่องยนต์การในตัวซึ่งใช้กําชอุณหภูมิขึ้นกับอุณหภูมิ T_2
ของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง และอุณหภูมิ T_1 ของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ

ตัวอย่าง 9.10 เครื่องยนต์ความร้อนทำงานระหว่างแหล่งความร้อนอุณหภูมิ 300 เ Kelvin และ 500 Kelvin ในแต่ละวัยัจกร เครื่องยนต์ดูดความร้อน 200 cal แล้วริจากแหล่งความร้อนที่ร้อนกว่า จงหา

ก. ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์

ข. งานกลที่ทำโดยเครื่องยนต์ในแต่ละรอบ

วิธีทำ ก. $T_2 = 500 \text{ K}$ $T_1 = 300 \text{ K}$

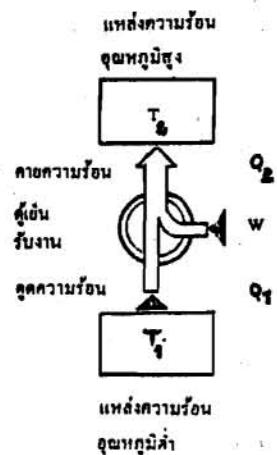
$$Q_2 = 200 \text{ cal} \quad W = ? \quad \eta = ?$$

$$\begin{aligned} \eta &= 1 - T_1/T_2 \\ &= 1 - 300/500 \\ &= 0.4 \\ &= 40\% \end{aligned}$$

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) ตู้เย็นคือเครื่องยนต์ความร้อนที่ปฏิบัติการข้อนกัน โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะดูดความร้อนออกจากบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าภายในตู้เย็นแล้วนำออกสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิสูงภายนอกตู้เย็น



รูปที่ 9.10 แผนภาพการทำงานของตู้เย็น

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

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

$$E = \frac{Q_1}{W} = \frac{Q_1}{Q_2 - Q_1} \quad \dots\dots 9.53$$

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

ประสิทธิภาพของการทำงานของตู้เย็นที่ดีควรมีค่านาก เพราะแสดงว่าเราไม่ต้องใช้งานมากในการดูดความร้อนออกไปจากภายในตู้เย็น

ตัวอย่าง 9.11 เครื่องทำความเย็นเครื่องหนึ่งมีขดลวดอยู่ที่อุณหภูมิต่ำ -13°C ก้าชัดด้วยในเครื่องควบแน่นที่อุณหภูมิ 27°C จคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การทำงานของเครื่องทำความเย็นเครื่องนี้

วิธีทำ

$$E = \frac{Q_1}{Q_2 - Q_1}$$

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

จาก

$$Q_1/T_1 = Q_2/T_2$$

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

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

$$E = \frac{T_1}{T_2 - T_1}$$

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

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

กิจกรรม 9.8

ให้นักศึกษาพิจารณาว่าเครื่องทำความเย็นตามตัวอย่าง 9.11 ทำงานแบบวัฏจักรการโน๊ตหรือไม่

9.4.5 กฏอุณหพลศาสตร์ข้อที่สองและเอนโทรปี เครื่องยนต์ความร้อนที่สร้างขึ้นในตอนแรก ๆ มีประดิษฐภาพต่ำมาก ความร้อนที่ดูดจากแหล่งที่มีอุณหภูมิสูงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ที่ถูกเปลี่ยนไปเป็นงานที่เป็นประโยชน์ แม้ว่าการออกแบบทางวิศวกรรมจะก้าวหน้าขึ้นมากก็ตาม แต่ก็ยังปรากฏว่าส่วนใหญ่ของความร้อนที่ดูดเข้ามาถูกปล่อยออกที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ โดยไม่อาจแปลงเป็นพลังงานกลที่เป็นประโยชน์ได้ ในทำงานของเดียวกันความหวังว่าจะสามารถสร้างเครื่องทำความเย็นซึ่งนำความร้อนออกจากวัตถุที่เย็นไปยังวัตถุที่ร้อนได้โดยไม่ต้องใช้งานจากภายนอก ซึ่งทั้งสองกรณีนี้บัดกับกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ เครื่องยนต์ความร้อนเพียงแต่แปลงพลังงานความร้อนไปเป็นพลังงานกลหมด โดยที่พลังงานรวมคงที่ในกระบวนการนั้น ๆ เครื่องทำความเย็นก็เช่นเดียวกัน พลังงานความร้อนก็เพียงแต่ย้ายจากวัตถุที่เย็นไปยังวัตถุที่ร้อน โดยไม่มีการสูญเสียของพลังงานในกระบวนการนั้น ๆ แต่ความประஸงค์ทั้งสองนี้จะประสบความสำเร็จไม่ได้แต่อย่างใด

ดังนั้นกฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์จะบอกเหตุผลว่าทำไมจึงไม่สามารถสร้างเครื่องมือเหล่านี้ได้จริง ๆ กฎข้อที่สองสามารถบอกได้หลายแบบ แต่ละแบบก็เน้นให้เห็นมุมต่าง ๆ กันของกฎนี้ และสามารถพิสูจน์ได้เสมอว่า คำกล่าวทั้งหมดมีความหมายเดียวกัน

เคลาชิอุส (Clausius) ได้กล่าวถึงกฎข้อที่สองไว้ว่า “ไม่มีกระบวนการใดที่จะสร้างเครื่องยนต์ซึ่งสามารถทำงานเป็นวัฏจักร จะถ่ายเทความร้อนอย่างต่อเนื่องจากแหล่งอุณหภูมิต่ำไปสู่แหล่งอุณหภูมิสูงกว่าได้ นอกเสียจากจะให้งานภายใต้แรงดันแก่ระบบ”

ข้อความนี้ทำลายความประஸงค์ที่จะสร้างเครื่องทำความเย็นที่สมบูรณ์จริง ๆ อย่างหมดสิ้น

ซึ่งให้เห็นว่าการนำความร้อนออกจากแหล่งอุณหภูมิต่ำไปสู่แหล่งอุณหภูมิที่สูงกว่า จำต้องใช้งานกายนอกเข้าไป เรายทราบแล้วว่าเมื่อแหล่งความร้อนสองอันต่อติดกัน ความร้อนจะไหลจากแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่าไปยังแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ กฎข้อที่สองนี้ยืนยันว่า ในกรณีเช่นนี้ความร้อนจะไหลจากแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิต่ำไปสู่แหล่งความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่าไม่ได้ดังนั้น จึงสามารถกำหนดพิศทางการไหลของความร้อนได้ พิศการไหลจะกลับได้ต่อเมื่อมีงานทำงานกายนอกเข้าไปช่วยเท่านั้น

เคลวิน (Kelvin) และ พลางค์ (Planck) กล่าวถึงกฎข้อที่สองในอีกแบบหนึ่งซึ่งมีความหมายอย่างเดียวกัน ดังนี้ การแปลงรูปพลังงานเพื่อให้ผลสุดท้ายเป็นการแปลงความร้อนให้เป็นงานทั้งหมดจากแหล่ง (source) ซึ่งมีอุณหภูมิเท่ากันตลอดย้อมเป็นไปไม่ได้

ข้อความนี้จะตัดความประسังใน การสร้างเครื่องยนต์ความร้อนที่สมบูรณ์ ซึ่งจะชี้ให้เห็นว่าเราไม่สามารถผลิตงานขึ้น โดยแต่เพียงดึงความร้อนจากแหล่งความร้อนเดียวได้ไม่มีส่วนหนึ่งของความร้อนที่ดึงมาเสียไปแก่แหล่งความร้อนอีกแห่งหนึ่งที่อุณหภูมิต่ำกว่าได้

เอนโทรปี (entropy) กฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์เป็นกฎของพลังงาน กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์เป็นกฎของเอนโทรปี และกระบวนการต่างๆ ที่เกิดขึ้นในธรรมชาติจะสอดคล้องกับกฎทั้งสองนั้นดังนี้

ความสัมพันธ์ระหว่างเอนโทรปีและความร้อน สามารถพิสูจน์ได้ว่าในกระบวนการผันกลับการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปี dS ความร้อนที่ดูดกลืน dQ และอุณหภูมิสัมบูรณ์ T ของระบบ มีความเกี่ยวข้องกันดังสมการ

$$dS = dQ/T \quad \dots\dots 9.54$$

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

เมื่อระบบผ่านจากสภาวะ 1 ไปยังสภาวะ 2 โดยวิธีกระบวนการผันกลับ การเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปี คือ

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 dQ/T \quad \dots\dots 9.55$$

การเปลี่ยนแปลงของ $S_2 - S_1$ ขึ้นอยู่กับสภาวะเริ่มต้นและสภาวะสุดท้ายเท่านั้นไม่ขึ้นกับกระบวนการ

การเปลี่ยนแปลงแบบความร้อนคงตัวผันกลับได้ (Reversible adiabatic process)

$$dQ = 0$$

$$S_2 - S_1 = 0 \quad \dots\dots 9.56$$

$$S = \text{constant}$$

เมื่อเออนไทรปีของระบบไม่เปลี่ยนแปลง เรียกว่า การแปลงแบบไอเซนทรอปิก (isentropic transformation)

ตัวอย่าง 9.12 น้ำแข็งมวล 1 กิโลกรัม อุณหภูมิ 0°C ถูกถ่ายเป็นน้ำที่อุณหภูมิเดียวกัน จะมีเออนไทรปีเปลี่ยนไปเท่าไร

วิธีทำ กำหนดให้การเปลี่ยนสภาวะเป็นกระบวนการผันกลับได้ และอุณหภูมิคงตัวด้วย

$$S_2 - S_1 = Q/T = mL/T$$

L = ความร้อนแห้ง = 80 kcal/kg

$$\therefore S_2 - S_1 = \frac{(1 \text{ kg})(80 \text{ kcal/kg})}{(239 \text{ K})}$$

$$= 293 \text{ cal/K}$$

$$= 1.23 \text{ kJ/K}$$

ตัวอย่าง 9.13 จงคำนวณค่าเออนไทรปีที่เปลี่ยนไปเมื่อต้นน้ำ 1 กิโลกรัมที่ 0°C ให้มีอุณหภูมิ 100°C โดยข้างในมีการเปลี่ยนสถานะ

วิธีทำ ในกรณี อุณหภูมิไม่คงที่

$$S_2 - S_1 = \int_{273}^{373} dQ/T$$

$$= \int_{273}^{373} mcdT/T$$

$$= (1000 \text{ g})(1) \ln(373/273)$$

$$= 312 \text{ cal/K}$$

$$= 1.31 \text{ kJ/K}$$

กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ในพจน์ของเออนไทรปี กล่าวได้ว่า กระบวนการใด ๆ ในธรรมชาติที่นำเป็นไปได้มากที่สุด คือ กระบวนการที่ทำให้เออนไทรปีเพิ่มขึ้นหรือมีค่าคงตัว

	$\Delta S \geq 0$9.57
ถ้า	$\Delta S = 0$	สำหรับกระบวนการผันกลับได้
	$\Delta S > 0$	สำหรับกระบวนการผันกลับไม่ได้

กิจกรรม 9.9

ให้นักศึกษาพิจารณากระบวนการในตัวอย่าง 9.12 และ 9.13 ว่าเป็นกระบวนการผันกลับได้หรือไม่

ตัวอย่าง 9.14 งดแสดงว่าในกระบวนการผันกลับไม่ได้ $\Delta S > 0$

วิธีทำ พิจารณาการเปลี่ยนของเอนไทรป์ในกระบวนการนำความร้อน ซึ่งเป็นกระบวนการผันกลับไม่ได้

สมมติให้วัดอุ 2 อันมีอุณหภูมิ T_1 และ T_2

ให้ $T_2 > T_1$ นำวัดอุทั้งสองมาสัมผัสกัน

พลังงานในรูปของความร้อนย้อนค่าจากวัดอุณหภูมิ T_2 ไปสู่วัดอุณหภูมิ T_1

ถ้า Q เป็นปริมาณความร้อนที่ถ่ายเท

การเปลี่ยนของเอนไทรป์ของวัดอุ T_2

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

การเปลี่ยนของเอนไทรป์ของวัดอุ T_1

$$\Delta S_1 = Q/T_1$$

เพราะว่าวัดอุณหภูมิ T_2 มากกว่าความร้อนออกมาก Q และวัดอุณหภูมิ T_1 ลดลงความร้อนเข้าไปทั้งหมด คือ Q

ดังนั้น การเปลี่ยนของเอนไทรป์ของระบบ 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 เอนไทรป์ของระบบใด ๆ ซึ่งผ่านกระบวนการชนิดผันกลับไม่ได้จะเพิ่มขึ้นเสมอ

สรุป

การศึกษาการถ่ายโอนความร้อนและกฎทางอุณหพลศาสตร์ สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องกับความร้อน และกระบวนการทางอุณหพลศาสตร์ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์กับการทำงานของเครื่องยนต์ความร้อน

แบบฝึกหัดที่ 9

- 9.1 ค่าจำกัดของอัตราส่วนของความดันของก๊าซ ณ จุดหดตอนละลายนองตะกั่วที่จุดไคร์ oglay ของน้ำ เมื่อกำหนดให้ก๊าซมีปริมาตรคงที่ มีค่าเท่ากับ 2.19818 ตามว่าจุดหดตอนละลายนองตะกั่วเท่ากับก๊าซใน
- ตอบ 600.45 K
- 9.2 ก. จุดเดือดปกติของออกซิเจนเหลว $= -182.97^\circ\text{C}$ ตามว่าเป็นก๊าซใน และฟาร์เรนไฮต์
 ข. ณ อุณหภูมิใดท่องศักฟาร์เรนไฮต์ และเชสเซียสอ่านได้เท่ากัน
 ค. ฟาร์เรนไฮต์และเคลวิน อ่านได้เท่ากันที่อุณหภูมิเท่าไร
 ตอบ ก. 90.18 K , -297.35°F ข. -40 ค. 574.6
- 9.3 ก. ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น ρ นิวตัน m^{-3} และปริมาตร V คือ $\rho = m/V$ จะ พิสูจน์ว่า $\gamma = -1 \frac{d\rho}{\rho} \frac{dT}{dT}$
 ข. ความหนาแน่นของเกลือหินระหว่างอุณหภูมิ -193°C และ -13°C กำหนดได้โดย สมการขั้ดเงน $\rho = 2.1680 \times (1 - 11.2 \times 10^{-3}t - 0.5 \times 10^{-7}t^2)$ จงคำนวณหา γ ณ อุณหภูมิ -100°C
 ตอบ 0.0087 K^{-1}
- 9.4 ปริมาตรที่เปลี่ยนไป ΔV ของไนโตรเจนหนึ่ง ฯ นีค่าเป็นเศษส่วนน้อย ฯ ของปริมาตรเดิม เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนจากอุณหภูมิห้อง ($T_r = 300\text{K}$) ไปยังจุดหดตอนละลายนอง T_m ดังนี้

$$\frac{\Delta V}{V} = \int_{T_r}^{T_m} \beta dT$$
 กำหนดข้อมูลตามตาราง จงคำนวณหาค่าเฉลี่ยของ $\Delta V/V$ ของไนโตรเจนสามชนิดนี้

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

ตอบ 0.066 , 0.070 , 0.060

- 9.5 ณ อุณหภูมิ 20°C ขวดแก้วใบหนึ่งมีปริมาตรถึง 5 ml หนึ่งบันก้านหลอดเท่ากับ 100 cm^3 พอดี ต่อมาบรรจุของเหลวชนิดหนึ่งถึงปิดนี้ ณ อุณหภูมิ 20°C สัมประสิทธิ์ของการขยายตัวตามนาสก์ของของเหลว = $120 \times 10^{-6} (\text{ }^{\circ}\text{C})^{-1}$ สัมประสิทธิ์ของการขยายตัวตามเส้นของแก้ว = $0.8 \times 10^{-6} (\text{ }^{\circ}\text{C})^{-1}$ พื้นที่หน้าตัดของบันก้านหลอด = 1 mm^2 และสามารถอนุ料ม่วงค่าคงตัวได้ ตามว่าของเหลวในบันก้านหลอดจะสูงขึ้นหรือต่ำลงเท่าไร เมื่ออุณหภูมิสูงถึง 40°C
- ตอบ 2.35 เมตร
- 9.6 แท่งโลหะยาว 30.0 cm . ขยายตัว 0.075 cm เมื่ออุณหภูมิเพิ่มจาก 0°C ถึง 100°C แท่งโลหะอีกชนิดหนึ่งยาวเท่ากันขยายตัว 0.045 cm . เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเท่ากันนี้แท่งที่สามยาว 30.0 cm . เข่นกัน แต่ใช้โลหะทั้งสองชนิดมาต่อปลายกัน ปรากฏว่าขยายตัว 0.65 cm ระหว่าง 0°C และ 100°C จงหาความยาวแต่ละส่วนของแท่งโลหะที่สามนี้
- ตอบ 20 cm , 10 cm .
- 9.7 สะพานเหล็กยาว 200 เมตร
- ก. ถ้าสมมติว่าเป็นสะพานช่วงเดียว ตรึงปลายข้างหนึ่งแน่นกับที่และปล่อยปลายอีกปลายหนึ่งเคลื่อนอย่างอิสระ ตามว่าระหว่างฤดูหนาว (10°C) กับฤดูร้อน (40°C) สะพานยาวต่างกันเท่าไร
- ข. ถ้าตรึงปลายทั้งสองให้แน่นอยู่กับที่ตอนฤดูร้อน ตามว่าความเห็นเป็นเท่าไรในฤดูหนาวกำหนดให้สัมประสิทธิ์การขยายตัวตามเส้นของเหล็ก = $1.1 \times 10^{-6} (\text{ }^{\circ}\text{C})^{-1}$ และ模ดูลัสของผู้งงของเหล็ก = $2.0 \times 10^{11}\text{ นิวตันต่อตารางเมตร}$
- ตอบ 6.6 cm , $6.6 \times 10^7\text{ นิวตันต่อตารางเมตร}$
- 9.8 ลวดเหล็กยาว 30 เมตร ณ อุณหภูมิ 20°C เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 520°C ลวดยาวขึ้น 19 มิลลิเมตร จงหา
- ก. สัมประสิทธิ์ของการขยายตัวตามเส้น
- ข. ความเห็นในลวดซึ่งปัจจุบันที่อุณหภูมิ 520°C แล้วปล่อยให้เย็นลงเหลือ 20°C โดยไม่ขันย้อนให้หดตัว ค่านมดูลัสของผู้งงของเหล็ก (ดูจากข้อ 7)
- ตอบ $1.27 \times 10^{-6} (\text{ }^{\circ}\text{C})^{-1}$, $1.27 \times 10^8\text{ นิวตันต่อตารางเมตร}$

9.9 แท่งเหล็กกลมยาว 40 ซม. และท่อนทองแดงกลมยาว 36 ซม. ทั้งสองแท่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน ถูกวางต่อกันแบบป้ายชนป้ายแห่งระหว่างหมุดครึ่งหนึ่ง 2 หมุด ซึ่งตอนแรกไม่มีความเดินในแท่งทั้งสองเลย ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 50°C ตามว่าความเดินในแต่ละแท่งเป็นเท่าไร สัมประสิทธิ์ของการขยายตัวตามเดินของเหล็กและทองแดง คือจากตารางที่ 9.1 นัดคุลลสของอุญงค์ของเหล็กและทองแดง เท่ากับ 2.0×10^{-11} นิวตันต่อตารางเมตร และ 1.1×10^{-11} นิวตันต่อตารางเมตร

ตอบ 9.97×10^{-7} นิวตันต่อตารางเมตร

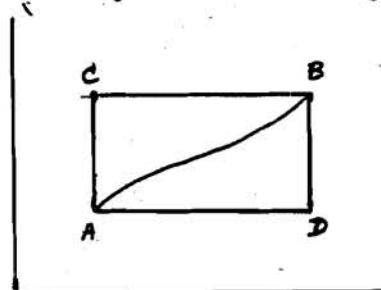
9.10 จงคำนวณค่าเฉลี่ยของพัลสั่งงานจากนี้ของไม้เลกุตของก้าชอุคนคดิชนิดอะตอมเดียวที่อุณหภูมิ 127°C

ตอบ 8.28×10^{-21} กรัม

9.11 จงคำนวณหาค่าความเร็วของรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของไม้เลกุตที่เดินที่อุณหภูมิ 40°C โดยใช้ค่าความเร็วของรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของออกซิเจน ซึ่งมีค่า 480 เมตร/วินาที ที่อุณหภูมิ 0°C โดยกำหนดให้เวลาของไม้เลกุตของอออกซิเจนและอีเดียนเป็น 32 กรัมต่อไมล์และ 4 กรัมต่อไมล์ตามลำดับ

ตอบ 1,394 เมตร/วินาที

9.12 เมื่อระบบเกิดการเปลี่ยนแปลงจากสภาพ A ไปสภาพ B ตามแนวเส้นทาง ACB ดังรูป ระบบดูดก dein ความร้อน 80 จูด และทำงาน 30 จูด



ก. ตัวระบบทำงานได้ 10 จูด จงคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ระบบดูดก dein ตามเส้นทาง ADB

ข. ตัวระบบมีการเปลี่ยนแปลงข้อนก dein จากสภาพ B ไป A ตามเส้นไปสัง BA โดยมีงานภายใต้อกกระทำ 20 จูด ระบบจะขายความร้อนออกเท่าใด

ตอบ ก. 60 จูด ข. 70 จูด

9.13 เครื่องยนต์การโน๊ตทำงานระหว่างแหล่งอุณหภูมิ 320 เกลวิน และแหล่งอุณหภูมิ 260 เกลวินที่อุณหภูมิ 320 เกลวิน เครื่องยนต์ดูดก dein ความร้อน 500 จูด งานที่ทำมีค่าเท่าไหร่ ตอบ 94 จูด