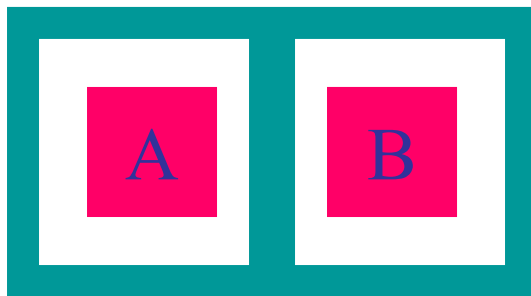


บทที่ 7 อุณหพลศาสตร์และทฤษฎีจลน์ของก๊าซ

- 7.1 อุณหภูมิและกฎอุณหพลศาสตร์ข้อที่ศูนย์
- 7.2 การขยายตัวจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ
- 7.3 การถ่ายเทความร้อน
- 7.4 คุณสมบัติและกฎของก๊าซอุดมคติ
- 7.5 ทฤษฎีจลน์ของก๊าซ

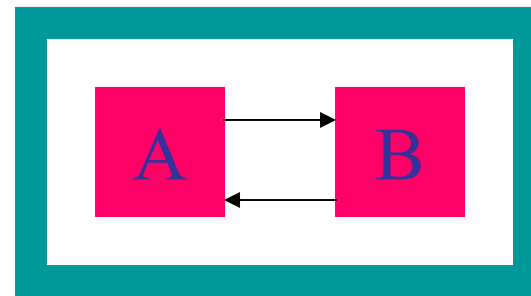
7.1.1 อุณหภูมิ

- เมื่อระบบ A อยู่ในสภาวะสมดุลทางความร้อนกับระบบ B เราอาจกล่าวได้ว่า ระบบ A และ B มีอุณหภูมิเท่ากัน



T_A

T_B



T

T

7.1.2 กฎอุณหพลศาสตร์ข้อที่ศูนย์

- ถ้า ระบบ A อยู่ในสถานะสมดุลทางความร้อนกับระบบ C
และ ระบบ B อยู่ในสถานะสมดุลทางความร้อนกับระบบ C
 \Rightarrow ระบบ A อยู่ในสถานะสมดุลทางความร้อนกับ B
- **หมายเหตุ** ระบบ C ในที่นี้ได้แก่ เครื่องมือวัดอุณหภูมิ

7.1.2 กฎอุณหพลศาสตร์ข้อที่ศูนย์ (ต่อ)

- อุณหภูมิเป็นปริมาณสเกลาร์สำหรับระบบอุณหพลศาสตร์ทุกระบบที่อยู่ในสถานะสมดุลทางความร้อน
- ระบบใดๆ 2 ระบบอยู่ในสถานะสมดุลทางความร้อนก็ต่อเมื่อมีอุณหภูมิเท่ากัน

7.1.3 การวัดอุณหภูมิ

- เทอร์โมมิเตอร์เป็นเครื่องมือวัดอุณหภูมิ T ที่ขึ้นกับคุณสมบัติทางความร้อนของสสาร X โดยความสัมพันธ์ระหว่าง T และ X มีลักษณะเป็นเชิงเส้น

$$T = aX + b$$

7.1.3 สเกลของอุณหภูมิ

1) สเกลเซลเซียส

- จุดเยือกแข็งของน้ำ 0°C
- จุดเยือกเดือดของน้ำ 100°C

2) สเกลฟาห์เรนไฮต์

- จุดเยือกแข็งของน้ำ 32°F
- จุดเยือกเดือดของน้ำ 212°F

ความสัมพันธ์ระหว่างสเกลเซลเซียสและสเกลฟาห์เรนไฮต์

$$9^{\circ}\text{F} = 5^{\circ}\text{C}$$

7.1.3 สเกลของอุณหภูมิ (ต่อ)

- 3) สเกลเคลวิน คือสเกลที่อุณหภูมิ T เป็นศูนย์เมื่อคุณสมบัติทางความร้อนของสาร X เป็นศูนย์

$$T = a X$$

เพื่อที่จะสร้างสเกลนี้ จำเป็นที่จะต้องมีจุดอ้างอิง 1 จุด โดยทั่วไปเป็นจุดที่น้ำแข็ง น้ำ และไอน้ำอยู่ร่วมกันในสถานะสมดุลทางความร้อนคือที่อุณหภูมิ $T_p = 273.16 \text{ K}$

$$\Rightarrow 273.16 \text{ K} = a X_p$$

$$\therefore T = (273.16 \text{ K}) X / X_p$$

ความสัมพันธ์ระหว่างสเกลเซลเซียสและสเกลเคลวิน

$$T_c = T - 273.15$$

ตัวอย่างที่ 7.1

โจทย์ ถ้าค่าความต้านทานของพลาคินัมเพิ่มขึ้น 1.40 เท่าระหว่างน้ำเปลี่ยนจากจุด $T_p = 273.16 \text{ K}$ เป็นที่จุดเดือด 373.16 K จงหาอุณหภูมิของพลาคินัมขณะที่น้ำเดือด

วิธีทำ คุณสมบัติทางความร้อนของสสาร X คือ ค่าความต้านทาน R

$$T = (273.16 \text{ K}) R / R_p$$

เนื่องจากโจทย์ให้มาว่า ที่จุดเดือดของน้ำ $R = 1.40 R_p$

$$\Rightarrow T = (273.16 \text{ K}) (1.40) = 382.42 \text{ K}$$

7.2 การขยายตัวจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

โดยทั่วไปขนาดของสสารจะมีการขยายตัวหรือหดตัวตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงตามลำดับ

เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น อะตอมที่ประกออบกันขึ้นเป็นสสารมีการสั่นที่มีแอมพลิจูดสูงขึ้นทำให้ระยะเฉลี่ยระหว่างอะตอมมากขึ้นไปด้วย

ในทางตรงข้ามเมื่ออุณหภูมิลดลง อะตอมที่ประกออบกันขึ้นเป็นสสารมีการสั่นที่มีแอมพลิจูดต่ำลงทำให้ระยะเฉลี่ยระหว่างอะตอมต่ำลงไปด้วย

การขยายตัวเชิงเส้น

ในของแข็ง พบว่า อัตราส่วนของความยาวที่เปลี่ยนไปต่อความยาวเดิมเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

$$\Delta L/L \propto \Delta T$$

หรือ

$$\Delta L/L = \alpha \Delta T$$

โดยที่ α คือสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวเชิงเส้น

ตัวอย่างที่ 7.2

โจทย์ ไม้บรรทัดที่ทำขึ้นด้วยเหล็กมีสเกลระดับมิลลิเมตรละเอียดภายในช่วง 5×10^{-5} มิลลิเมตร จงคำนวณหาช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสูงสุดที่จะมีได้ตามความละเอียดของช่วงสเกล

กำหนดให้ สัมประสิทธิ์ของการขยายตัวเชิงเส้นของเหล็กเท่ากับ $11 \times 10^{-6} (\text{°C})^{-1}$

วิธีทำ

$$\Delta L/L = \alpha \Delta T$$

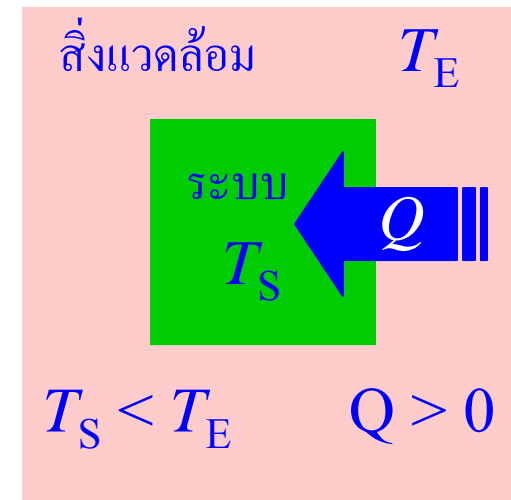
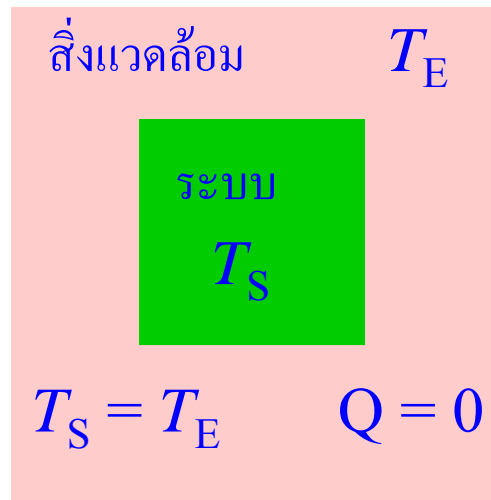
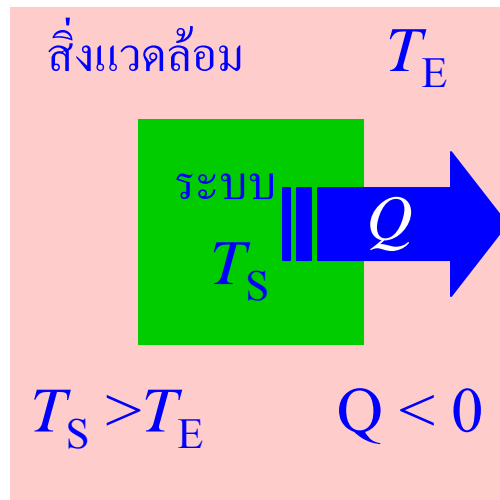
$$\Rightarrow \Delta T = \Delta L/(\alpha L)$$

$$= (5 \times 10^{-5} \text{ mm}) / [(11 \times 10^{-6} / \text{°C}) \times (1 \text{ mm})]$$

$$\approx 4.5 \text{ °C}$$

7.3 การถ่ายเทความร้อน

นิยาม ความร้อน Q เป็นพลังงานที่ถ่ายเทระหว่างระบบและสิ่งแวดล้อม
ในกรณีที่ระบบและสิ่งแวดล้อมไม่อยู่ในสภาวะสมดุลทางความร้อน
หรือในกรณีที่ระบบและสิ่งแวดล้อมมีอุณหภูมิไม่เท่ากัน



7.3 การถ่ายเทความร้อน (ต่อ)

หน่วยของความร้อน [Q]

a) จูล (J)

b) แคลอรี (cal)

$$1 \text{ cal} = 4.186 \text{ J}$$

ปริมาณความร้อน 1 cal กำหนดขึ้นมาจากปริมาณความร้อนที่ทำให้ น้ำ 1 g มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 14.5°C เป็น 15.5°C

c) British thermal unit (Btu)

ปริมาณความร้อน 1 Btu กำหนดขึ้นมาจากปริมาณความร้อนที่ทำให้ น้ำ 1 lb มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 63°F เป็น 64°F

$$1 \text{ cal} = 3.969 \times 10^{-3} \text{ Btu}$$

การดูดกลืนความร้อนและการเปลี่ยนสถานะของสสาร

- ความสามารถในการดูดกลืนความร้อนของสสารขึ้นกับความจุความร้อนจำเพาะของสสาร c

$$Q = mc(T_f - T_i)$$

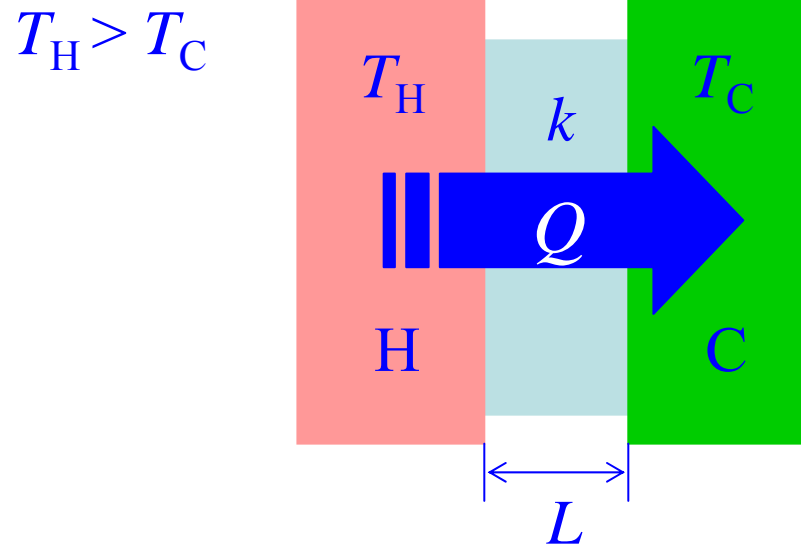
- การเปลี่ยนสถานะของสสารขึ้นกับความร้อนแฝงของสสาร
 - ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว

$$Q = mL_F$$

- ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ

$$Q = mL_V$$

กลไกในการถ่ายเทความร้อน 1: การนำความร้อน



แผ่นวัสดุสีฟ้ามีพื้นที่หน้าตัด A กว้าง L และมีค่าคงที่ของการนำความร้อน k วางอยู่ระหว่างแหล่งความร้อน H และ C ซึ่งมีอุณหภูมิ T_H และ T_C ตามลำดับ

การนำความร้อน (ต่อ)

ในกรณีที่ $T_H > T_C$ อัตราในการถ่ายเทความร้อนผ่านแผ่นวัสดุ F แปรผันโดยตรงกับพื้นที่หน้าตัด A และ ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่าง 2 แหล่งความร้อน ΔT และแปรผกผันกับความกว้างของแผ่นวัสดุ

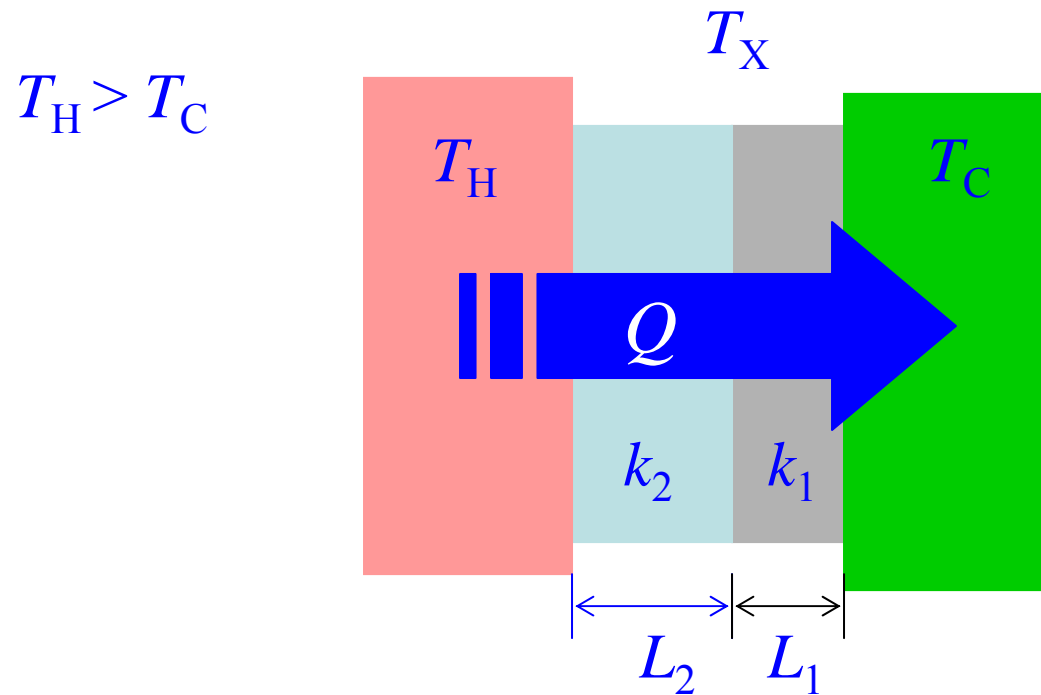
$$\begin{aligned} F &= kA(T_H - T_C)/L \\ &= A(T_H - T_C)/R \end{aligned}$$

โดยที่ $R = L/k$ เป็นค่าความต้านทานความร้อน

หน่วยของ F คือ วัตต์ ($W = J/s$)

การนำความร้อน (ต่อ)

ในกรณีที่มีแผ่นตัวนำความร้อน 2 แผ่น



การนำความร้อน (ต่อ)

อัตราในการถ่ายเทความร้อนผ่านแผ่นวัสดุทั้งสอง

$$F = k_2 A (T_H - T_X) / L_2 = k_1 A (T_X - T_C) / L_1$$

โดยที่ T_X เป็นอุณหภูมิที่ผิวสัมผัสระหว่างแผ่นตัวนำความร้อนทั้งสอง เมื่อแก้สมการข้างต้นจะได้ว่า

$$T_X = (k_1 L_2 T_C + k_2 L_1 T_H) / (k_1 L_2 + k_2 L_1)$$

แทน T_X กลับลงไปในสมการบนสุดจะได้ว่า

$$F = A (T_H - T_C) / (L_1 / k_1 + L_2 / k_2) = A (T_H - T_C) / (R_1 + R_2)$$

ตัวอย่างที่ 7.3

โจทย์ สมมติว่าเพดานบ้านประกอบด้วยแผ่นวัสดุ 2 ชั้น แต่ละแผ่นมีพื้นที่หน้าตัด 16 m^2 หนา 0.02 m ค่าความต้านทานความร้อนของแผ่นวัสดุที่มีความหนา 0.01 m เท่ากับ 1500 และ $2500 \text{ m}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$ อุณหภูมิเหนือเพดาน $T_H = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ และอุณหภูมิภายในบ้าน $T_C = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ จงหาอัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่บ้านผ่านแผ่นวัสดุนี้

วิธีทำ จากสมการอัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านแผ่นวัสดุ

$$\begin{aligned} F &= A(T_H - T_C)/(R_1 + R_2) \\ &= (16 \text{ m}^2)(50 - 25 \text{ }^\circ\text{C})/[2(1500 + 2500) \text{ m}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C} / \text{W}] \\ &= .05 \text{ W} \end{aligned}$$

กลไกในการถ่ายเทความร้อน 2: การพาความร้อน

การพาความร้อนเกิดขึ้นในกรณีของของไหลเช่น

น้ำหรืออากาศสัมผัสกับวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงกว่า

ทำให้ของไหลมีอุณหภูมิสูงขึ้น

ของไหลนั้นมีการขยายตัวออกพร้อมกับความร้อน

กลไกในการถ่ายเทความร้อน 3: การแผ่รังสี

กฎของสเตฟาน: พลั๊กซ์ของการแผ่รังสีความร้อน

$$F_r = \sigma \varepsilon A T_m^4$$

โดยที่ σ (ค่าคงที่ของสเตฟาน) = $5.6703 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

ε เป็นสัมประสิทธิ์ของการคายความร้อนของวัตถุมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1

การดูดกลืนรังสีความร้อน

ในทางตรงข้ามกับการแผ่รังสีความร้อนก็คือ การดูดกลืนรังสีความร้อน

พลังค์ของการดูดกลืนความร้อนจากสิ่งแวดล้อม

$$F_a = \sigma \epsilon A T_e^4$$

พลังค์ของการแผ่รังสีความร้อนสุทธิ:

$$F_n = F_a - F_r = \sigma \epsilon A (T_e^4 - T_m^4)$$

ตัวอย่างที่ 7.4

โจทย์ การทำแผ่นน้ำแข็ง โดยอาศัยการแผ่รังสีความร้อนในคืนหน้าหนาว

สมมติว่าในฤดูหนาวตอนช่วงกลางคืน อุณหภูมิของอากาศเหนือพื้นดิน

ประมาณ $1.84\text{ }^{\circ}\text{C}$ (275 K) แต่อุณหภูมิของอากาศในท้องฟ้า

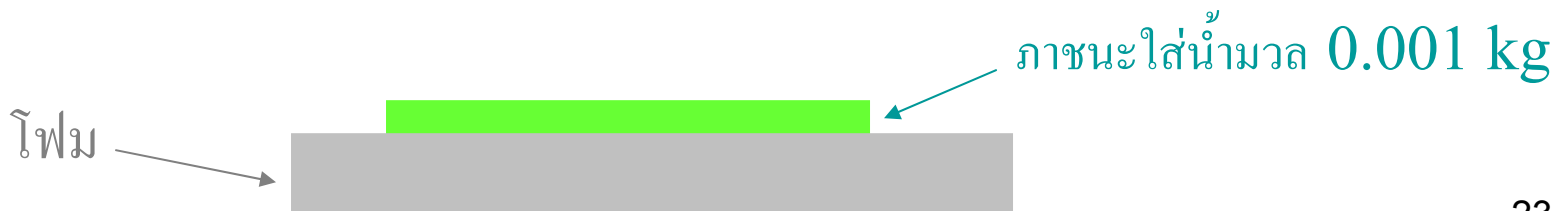
ประมาณ $-23.16\text{ }^{\circ}\text{C}$ (250 K) นำน้ำมวล 0.001 kg ใส่ภาชนะตั้ง

ทิ้งไว้ที่มีพื้นที่หน้าตัด $4 \times 10^{-4}\text{ m}^2$ จงประมาณหาเวลาที่น้ำกลายเป็นน้ำแข็ง

กำหนดให้ ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ $c = 4.2 \times 10^3\text{ J/kg}\cdot\text{K}$

ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว $L_F = 3.33 \times 10^5\text{ J/kg}$

และสัมประสิทธิ์ของการคายความร้อนของน้ำ $\varepsilon = 0.9$



ตัวอย่างที่ 7.4

วิธีทำ 1) คำนวณหาปริมาณความร้อนที่น้ำต้องคายออกเพื่อกลายเป็นน้ำแข็ง

$$\begin{aligned} Q &= mc(T_f - T_i) - mL_F \\ &= (0.001 \text{ kg})(4.2 \times 10^3 \text{ J/kg}\cdot\text{K})(-1.84 \text{ K}) \\ &\quad - (0.001 \text{ kg})(3.33 \times 10^5 \text{ J/kg}) \\ &= -7.73 \text{ J} - 333 \text{ J} \\ &\approx -340.73 \text{ J} \end{aligned}$$

จะเห็นว่าประมาณ 97.7% ในการคายความร้อนมาจากส่วนของความร้อนแฝง

ตัวอย่างที่ 7.4

2) คำนวณหาฟลักซ์ของการแผ่รังสีความร้อนสุทธิของน้ำ

$$F_n = F_a - F_r$$

$$= \sigma \varepsilon A (T_e^4 - T_m^4)$$

$$= (5.6703 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4)(0.9)(4 \times 10^{-4} \text{ m}^2) \\ \times (250^4 - 273^4)$$

$$\approx -3.36 \times 10^{-2} \text{ J/s}$$

ตัวอย่างที่ 7.4

3) คำนวณหาเวลา

$$\begin{aligned}t &= Q / F_n \\ &= (340.73 \text{ J}) / (3.36 \times 10^{-2} \text{ J/s}) \\ &\approx 10,141 \text{ วินาที}\end{aligned}$$

⇒ น้ำกลายเป็นน้ำแข็งใช้เวลาประมาณ 2.82 ชั่วโมง

7.4 คุณสมบัติและกฎของก๊าซ

คุณสมบัติของก๊าซจากการทดลอง

1. ปริมาตรของก๊าซ V เป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนโมเลกุลของก๊าซ N
2. ปริมาตรของก๊าซ V เป็นสัดส่วนผกผันกับความดันของก๊าซ P
3. ปริมาตรของก๊าซ V เป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิของก๊าซ T

สมการสถานะ

ภายใต้สมมติฐานว่า ก๊าซที่ทำการทดลองเป็นก๊าซอุดมคติ เมื่อรวมคุณสมบัติทั้ง 3 ข้อจากการทดลองจะได้สมการสถานะ

$$PV = k_B NT$$

โดยที่ k_B คือค่าคงที่ของโบลต์ซมานเท่ากับ $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K} = 8.62 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$

จำนวนโมเลกุล $N = (\text{จำนวนโมล } n) \times (\text{ค่าคงที่ของอโวกาโด } N_A = 6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1})$

$$\Rightarrow PV = nRT$$

โดยที่ $R \equiv k_B N_A = 8.31 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$

ตัวอย่างที่ 7.5

โจทย์ กระจกสูบบรรจุด้วยก๊าซปริมาตร 20 L ที่อุณหภูมิ 17 °C และที่ความดัน 15 atm ถ้าอุณหภูมิของกระจกสูบเพิ่มขึ้นเป็น 27 °C และปริมาตรของก๊าซลดลงเหลือ 15 L จงคำนวณหาความดันของก๊าซ

สมมุติว่า ก๊าซในกระจกสูบเป็นก๊าซอุดมคติ

วิธีทำ
$$nR = P_i V_i / T_i = P_f V_f / T_f$$

$$P_f = (15 \text{ atm})(300 \text{ K})(20 \text{ L}) / (290 \text{ K})(15 \text{ L})$$
$$\approx 21 \text{ atm}$$

7.5 ทฤษฎีจลน์ของก๊าซอุดมคติ

- เพื่อที่จะศึกษาระบบที่มีความซับซ้อน

นักฟิสิกส์มักจะเริ่มต้น โดยการสร้าง

แบบจำลองอย่างง่าย

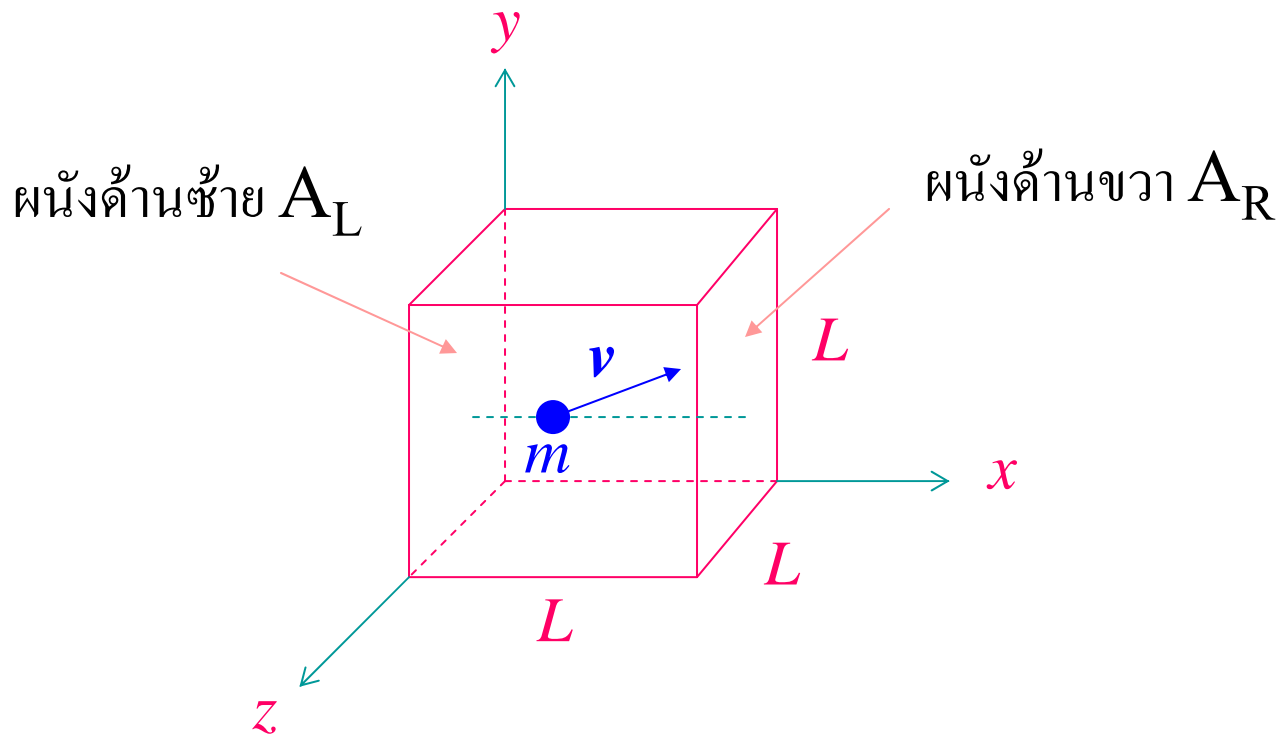
ที่สามารถให้เห็นผลของการแปรเปลี่ยนในทางกายภาพ

แบบจำลองของก๊าซอุดมคติ

1. ก๊าซประกอบด้วยอนุภาคที่เรียกว่า โมเลกุล
2. โมเลกุลของก๊าซมีการเคลื่อนที่ในทุกทิศทางที่เป็นไปได้
3. จำนวนโมเลกุลของก๊าซมีจำนวนมากมหาศาล
4. โมเลกุลของก๊าซมีขนาดน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาตรของภาชนะที่บรรจุก๊าซ
5. ไม่มีแรงภายนอกใดๆกระทำต่อโมเลกุลของก๊าซนอกเหนือจากในขณะ โมเลกุลของก๊าซชนกัน

แบบจำลองของก๊าซอุดมคติ

กล่องลูกบาศก์ที่มีความยาวของแต่ละด้านเท่ากับ L บรรจุก๊าซอุดมคติที่มีมวลโมเลกุลเท่ากับ m เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v ดังรูป



แบบจำลองของก๊าซอุดมคติ (ต่อ)

พิจารณา การชนของโมเลกุลที่ผนังด้านขวาด้วยความเร็ว v_x และสะท้อนกลับออกมาด้วยความเร็ว $-v_x$

∴ การเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของโมเลกุลในแนวแกน X ที่ผนังด้านขวา

$$\equiv \text{โมเมนตัมหลังชน} - \text{โมเมนตัมหลังชน}$$

$$= -mv_x - (mv_x)$$

$$= -2mv_x$$

สมมติว่าการชนใดๆเป็นไปตามหลักอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงเส้น

$$\therefore \text{โมเมนตัมที่โมเลกุลถ่ายเทให้ผนัง} = +2mv_x$$

แบบจำลองของก๊าซอุดมคติ (ต่อ)

เวลาที่โมเลกุลใช้ในการเคลื่อนที่ไปกลับระหว่างผนัง A_R และ $A_L = 2L/v_x$

∴ แรงเฉลี่ยที่โมเลกุลถ่ายเทให้ผนัง F_x

= (โมเมนตัมที่โมเลกุลถ่ายเทให้ผนัง)/(เวลาที่โมเลกุลใช้ในการเคลื่อนที่ไปกลับระหว่างผนัง A_R และ A_L)

$$= (2mv_x)/(2L/v_x)$$

$$= mv_x^2/L$$

แบบจำลองของก๊าซอุดมคติ (ต่อ)

สมมติว่าก๊าซในกล่องมีจำนวนโมเลกุลเท่ากับ N เพราะฉะนั้นความดันที่ผนังเท่ากับแรงเฉลี่ยของทุกโมเลกุลที่ถ่ายเทให้ผนังต่อหน่วยพื้นที่หน้าตัดของผนัง

$$\therefore p = (mv_{x1}^2 + mv_{x2}^2 + \dots + mv_{xN}^2)/L^3$$

เนื่องจาก $m = \rho L^3/N$

$$\Rightarrow p = \rho (v_{x1}^2 + v_{x2}^2 + \dots + v_{xN}^2)/N$$

ค่าเฉลี่ยของอัตราเร็วกำลังสอง $\overline{v_x^2}$

แบบจำลองของก๊าซอุดมคติ (ต่อ)

สำหรับโมเลกุลใดๆ

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$$

เนื่องจากค่าเฉลี่ยของอัตราเร็วกำลังสองในแต่ละแกนมีค่าเท่ากัน นั่นคือ

$$\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2}$$

จะได้ว่า

$$\overline{v_x^2} = \overline{v^2} / 3$$

แบบจำลองของก๊าซอุดมคติ (ต่อ)

ในที่สุดจะความดันของก๊าซที่ผนังเป็นดังนี้

$$\Rightarrow p = \rho \bar{v}^2 / 3$$

โดยทั่วไป ความดันและความหนาแน่นของก๊าซเป็นปริมาณวัดได้ ทำให้เราสามารถคำนวณหาอัตราเร็วรากที่สองเฉลี่ยของโมเลกุลของก๊าซได้

$$v_{\text{rms}} \equiv (\bar{v}^2)^{1/2} = (3p/\rho)^{1/2}$$

จาก $pV = nRT$ และมวลโมเลกุล $M = m/n$

$$\Rightarrow v_{\text{rms}} = (3RT/M)^{1/2}$$

ตัวอย่างที่ 7.6

โจทย์ จงคำนวณหาอัตราเร็วรากที่สองเฉลี่ยของโมเลกุลของก๊าซไฮโดรเจน ที่ 0.00°C และความดัน 1 บรรยากาศ ภายใต้เงื่อนไขความหนาแน่นของก๊าซไฮโดรเจนมีค่าเท่ากับ $8.99 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^3$

กำหนดให้ ความดัน 1 บรรยากาศ = 1.01×10^5 ปาสคาล

วิธีทำ ใช้สูตร

$$v_{\text{rms}} = (3p / \rho)^{1/2} = 1840 \text{ m/s}$$

พลังงานจลน์เชิงเส้นเฉลี่ย

พลังงานจลน์เชิงเส้นเฉลี่ยต่อหนึ่งโมเลกุล

$$\bar{K} = \frac{1}{2} \overline{mv^2} / N = \frac{1}{2} m \overline{v^2} / N = \frac{1}{2} m (v_{\text{rms}})^2 / N$$

$$\bar{K} = \frac{1}{2} m (3RT/M) / N$$

เนื่องจาก $m = nM = NM/N_A$ และ $R/N_A \equiv k_B$

$$\Rightarrow \bar{K} = 3k_B T/2$$

ตัวอย่างที่ 7.7

โจทย์ ก๊าซออกซิเจนและก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิห้อง 300 K มีพลังงานจลน์เฉลี่ยต่อโมเลกุลเป็นเท่าไร

สมมุติว่าก๊าซออกซิเจนที่ความดันต่ำๆมีลักษณะเป็นก๊าซอุดมคติ

วิธีทำ จากสูตรพลังงานจลน์เฉลี่ยต่อโมเลกุลจะได้

$$\bar{K} = 3k_{\text{B}}T/2 = 0.039 \text{ eV}$$

จะเห็นว่า พลังงานจลน์เฉลี่ยต่อโมเลกุลไม่ขึ้นกับมวลโมเลกุลเพราะฉะนั้นพลังงานจลน์เฉลี่ยต่อโมเลกุลของก๊าซออกซิเจนและก๊าซไนโตรเจนจึงเท่ากัน