

บทที่ 1

ระบบแมโครสโคปิก

(Macroscopic Systems)

ระบบแมโครสโคปิก หมายถึงระบบที่มีขนาดใหญ่กว่าอะตอมขึ้นไป หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นระบบที่ประกอบด้วยอะตอม หรือโมเลกุลจำนวนมากมาประกอบเข้าด้วยกันเป็นของแข็ง ของเหลวและแก๊ส หรือองค์ประกอบทางชีววิทยา ส่วนในระดับที่เล็กกว่าหรือระดับแมโครสโคปิก(microscopic level)เป็นระบบที่พิจารณาขนาดตั้งแต่อะตอมลงไปจนถึงระดับอนุภาค การพิจารณาในระดับนี้เช่น การศึกษาอะตอม นิวไคลด์(nuclei)หรือโปรตอนและนิวตรอน และการศึกษาอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น การศึกษาในระดับไมโครสโคปิกนี้ต้องใช้ทฤษฎีกลศาสตร์ควอนตัมมาอธิบายจึงจะถูกต้อง

1.1 แก๊สอุดมคติ และความน่าจะเป็น

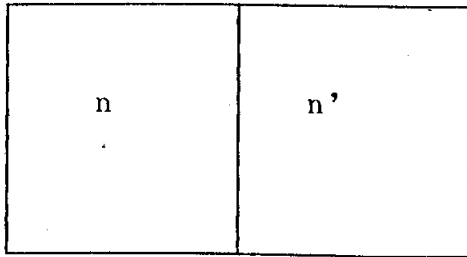
แก๊สอุดมคติ(ideal gas) หมายถึงแก๊สที่สมมุติขึ้นมาว่าเป็นแก๊สที่ประกอบด้วยโมเลกุลที่ไม่เกิดอันตรกิริยาต่อกันหรือมีน้อยจนตัดทิ้งได้ กรณีระบบที่ประกอบด้วยแก๊สชนิดเดียวกัน(identical molecules) เช่น โมเลกุลของอาร์กอน(Ar) หรือไนโตรเจน(N_2)ถ้ามีความเจือจาง(dilute)หรือจำนวนโมเลกุลต่อปริมาตรมีค่าน้อยจะมีระยะห่างระหว่างโมเลกุลมากจนทำให้อันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลมีค่าน้อย เราจึงอาจเรียกแก๊สชนิดนี้ว่าแก๊สอุดมคติ

พิจารณาแก๊สอุดมคติ N โมเลกุลที่อยู่ภายในกล่องและให้ระบบนี้เป็นระบบกึ่งระ(isolated system) หมายถึง ระบบที่ไม่มีอันตรกิริยากับระบบอื่น)แล้วปล่อยให้ไม่ให้อุณหภูมิเป็นเวลานาน สังเกตตำแหน่งของโมเลกุลแก๊สซึ่งสมมุติว่ามีโอกาสเคลื่อนที่ไปทุกทิศทางได้เท่า ๆ กันเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงแต่จะเปลี่ยนทิศเมื่อเกิดชนกับผนังกล่องซึ่งเป็นไปตามกฎการเคลื่อนที่ทางกลศาสตร์จะได้ว่า

$$n + n' = N \quad \dots \dots \dots (1.1)$$

เมื่อ n คือจำนวนโมเลกุลที่อยู่ด้านซ้ายของกล่อง n' คือจำนวนโมเลกุลที่อยู่ด้านขวาของกล่อง และ N คือจำนวนโมเลกุลทั้งหมด

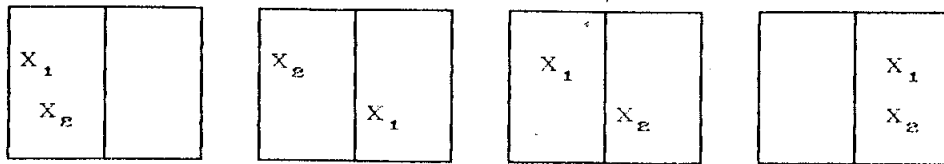
ถ้า N มีค่ามากจะพบว่า n ประมาณเท่ากับ n' โดยกรณีนี้แต่ละโมเลกุลมี



รูปที่ 1.1 กล่องซึ่งแบ่งออกเป็นสองส่วน เท่า ๆ กัน บรรจุแก๊สอุดมคติ N โมเลกุล โดย $N = n + n'$

โอกาสกระจายไปอยู่ด้านซ้ายหรือด้านขวาของกล่องเรียกว่ามี 2 วิธีที่จะเป็นไปได้ (possible configurations)

ถ้าพิจารณา 2 โมเลกุลโดยแต่ละโมเลกุลมีโอกาสอยู่ด้านซ้ายหรือด้านขวาของกล่องเท่า ๆ กันแล้วจะมีจำนวนวิธีที่เป็นไปได้ทั้งหมด $2 \times 2 = 2^2 = 4$ วิธี



รูปที่ 1.2 แสดง 4 วิธีที่แตกต่างกันที่แก๊ส 2 โมเลกุล จะกระจายอยู่ในกล่องที่แบ่งครึ่งไว้

ถ้ามีแก๊สอยู่ 3 โมเลกุล จะได้ $2 \times 2 \times 2 = 2^3 = 8$ วิธีที่จะเป็นไปได้
 ถ้ามีแก๊สอยู่จำนวน N โมเลกุล จะได้ $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^N$ วิธีที่จะเป็นไปได้
 ที่น่าสนใจ

มีอยู่ 1 วิธีที่ N โมเลกุลไปอยู่ด้านซ้ายของกล่องหมดจากจำนวนวิธีทั้งหมด 2^N วิธี ถ้าให้

$$\begin{aligned}
 P_N &= \text{เศษส่วน (fraction) ที่ } N \text{ โมเลกุลไปอยู่ที่ด้านซ้ายของกล่อง} \\
 &= \text{ความน่าจะเป็น (probability) ที่จะพบว่า มี } N \text{ โมเลกุลไปอยู่ด้าน} \\
 &\quad \text{ซ้ายของกล่อง} \\
 &= 1/2^N \qquad \dots \dots \dots (1.2)
 \end{aligned}$$

มีอยู่ 1 วิธี ที่ไม่มีโมเลกุลแก๊สไปอยู่ด้านซ้ายของกล่องเลยจากจำนวนวิธีทั้งหมด 2^N วิธี ดังนั้น ถ้าให้

$$P_0 = \text{ความน่าจะเป็นที่จะพบว่าไม่มีโมเลกุลแก๊สไปอยู่ด้านซ้ายของกล่อง}$$

โมเลกุลที่				n	n'	C(n)
1	2	3	4			
ช	ช	ช	ช	4	0	1
ช	ช	ช	ข	3	1	4
ช	ช	ข	ช	3	1	
ช	ข	ช	ช	3	1	
ข	ช	ช	ช	3	1	
ช	ช	ข	ข	2	2	6
ช	ข	ช	ข	2	2	
ช	ข	ข	ช	2	2	
ข	ช	ช	ข	2	2	
ข	ช	ข	ช	2	2	
ข	ข	ช	ช	2	2	
ช	ข	ข	ข	1	3	4
ข	ช	ข	ข	1	3	
ข	ข	ช	ข	1	3	
ข	ข	ข	ช	1	3	
ข	ข	ข	ข	0	4	1

ตารางที่ 1.1 แสดง 16 วิธีที่จะเป็นไปได้ที่แก๊ส 4 โมเลกุลจะอยู่ด้านซ้ายของกล่องซึ่งแบ่งครึ่ง ให้สัญลักษณ์ ช แทนโมเลกุลแก๊สที่อยู่ด้านซ้าย และ ข แทนโมเลกุลที่อยู่ด้านขวาของกล่อง n แทนจำนวนโมเลกุลที่อยู่ด้านซ้าย และ n' แทนจำนวนโมเลกุลที่อยู่ด้านขวาของกล่อง C(n) แทนจำนวนวิธีที่จะเป็นไปได้ทั้งหมดที่ n โมเลกุลอยู่ด้านซ้ายของกล่อง

$$p_0 = 1/2^N \dots\dots\dots(1.3)$$

ดังนั้นถ้ามีแก๊ส 4 โมเลกุลจะได้ $2^4=16$ วิธีที่จะเป็นไปได้ทั้งหมดดูตารางที่ 1.1

ดังนั้นกรณีทั่วไป

พิจารณาแก๊ส n โมเลกุลจะไปอยู่ด้านซ้ายของกล่อง จากจำนวนที่มีทั้งหมด N โมเลกุลจะมีอยู่ทั้งหมด C(n) วิธี จะได้ว่า

$$P_n = C(n)/2^N \dots\dots\dots(1.4)$$

เมื่อ C(n) คือจำนวนวิธีทั้งหมดที่โมเลกุลแก๊สจะกระจายในกล่องดังกล่าวโดยมี n โมเลกุลอยู่ทางด้านซ้ายของกล่อง

P_n คือความน่าจะเป็นที่จะพบ n โมเลกุลอยู่ด้านซ้ายของกล่อง

ตัวอย่าง พิจารณากรณีที่มีแก๊สอยู่ 4 โมเลกุล จะได้จำนวนวิธีที่จะเป็นไปได้ทั้งหมดที่ n โมเลกุลจะอยู่ด้านซ้ายของกล่องเป็น C(n) ดังตารางที่ 1.1 จงหาค่า P_n ซึ่งแสดงว่ามี n โมเลกุลจะอยู่ด้านซ้ายของกล่อง (สอดคล้องกับค่า $n'=N-n$ โมเลกุลที่อยู่ด้านขวาของกล่อง)

วิธีทำ

จากสมการที่ (1.2) $P_n = C(n)/2^N$

จะได้

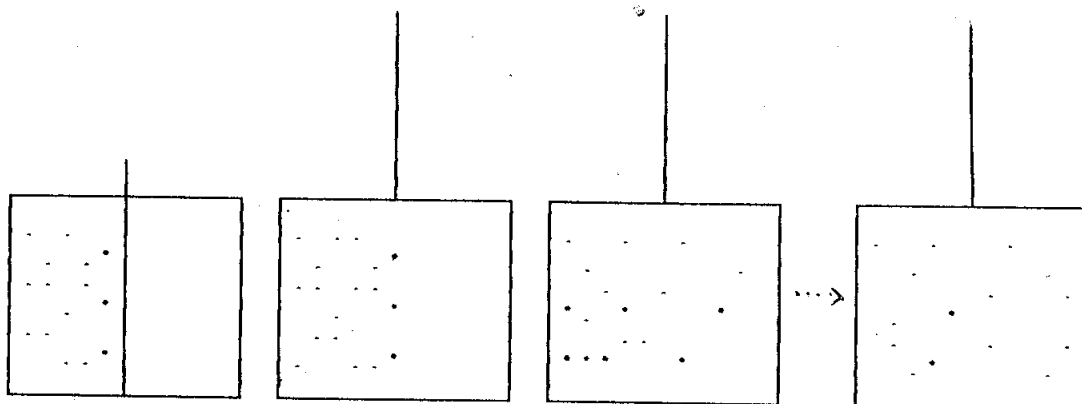
$$P_4 = P_0 = 1/16$$

$$P_3 = P_1 = 4/16 = 1/4$$

$$P_2 = 6/16 = 3/8$$

1.2 สภาพผันกลับไม่ได้และสมดุล (Irreversibility and equilibrium)

จากตัวอย่างในหัวข้อ 1.1 ถ้า N มีค่ามากกระจายอยู่ในกล่องโดยอิสระนานพอควรจนเกิดการกระจายอย่างสม่ำเสมอจะได้ค่า n ประมาณเท่ากับ n' ให้พิจารณารูปที่ 1.3 โดยสถานะเริ่มต้นโมเลกุลทั้งหมดถูกกักให้อยู่ด้านซ้ายของกล่อง ต่อมาดึงที่กั้นกึ่งกลางกล่องออก ปล่อยให้โมเลกุลทั้งหมดกระจายอย่างอิสระไปทั่วทั้งกล่อง นานพอที่จะทำให้การกระจายของโมเลกุลสม่ำเสมอทั่วทั้งกล่องสู่สถานะที่จะสัมพันธ์กันได้ดีที่สุด เราจะเรียกสภาวะเช่นนี้ว่าสภาวะสมดุล (equilibrium)



รูปที่ 1.3 เมื่อตั้งที่กั้นกลางกล่องออกให้แก๊สกระจายอย่างอิสระ จำนวนแก๊ส n โมเลกุลที่อยู่ครึ่งซ้ายของกล่องแปรเปลี่ยนไปกับเวลา t ตั้งแต่เวลาเริ่มต้นเปิด $t=0$ จนถึงเวลาเริ่มเกิดสมดุล (relaxation time) t_r

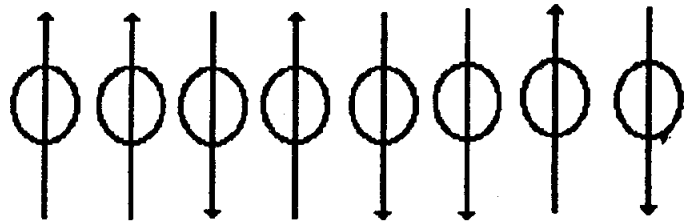
สภาพผันกลับไม่ได้ (irreversible process)

ปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ เช่นการแก่ การตาย การเผาไหม้ การนำน้ำที่ร้อนมาตั้งไว้ในสภาพตามธรรมชาติแล้วน้ำจะเย็นลง ดังกล่าวเป็นสภาพผันกลับไม่ได้ ดังนั้น กระบวนการผันกลับไม่ได้ จึงหมายถึงกระบวนการที่ปล่อยไปตามธรรมชาติแล้วไม่สามารถย้อนกลับไปในอดีตได้ ส่วนเวลาเริ่มเกิดสมดุลหมายถึงเวลาที่ระบบใช้ เริ่มจากสภาวะไม่สมดุลจนเกิดสภาวะสมดุล

1.3 ระบบสปิน (Spin systems)

คำว่าสปิน (spin) เป็นคำที่ได้มาจากทฤษฎีกลศาสตร์ควอนตัม ในการศึกษาอนุภาค เช่นอิเล็กตรอนในอะตอมมีการพิจารณาว่าอิเล็กตรอนมีการเคลื่อนที่รอบนิวเคลียสในขณะเดียวกันอิเล็กตรอนก็มีการเคลื่อนที่รอบตัวเองด้วยซึ่งทำให้เกิดโมเมนต์แม่เหล็กจากการเคลื่อนที่รอบตัวเอง (spin magnetic moment) ของอิเล็กตรอนเราให้มีขนาดเป็น μ_0 ค่าที่เกี่ยวข้องกับโมเมนต์แม่เหล็กที่เกิดจากการหมุนรอบตัวเองแต่มีทิศทางตรงกันข้ามคือโมเมนต์เชิงมุมที่เกิดจากการหมุนรอบ

ตัวเอง (spin angular momentum) สำหรับอนุภาคที่มีสปิน (spin) $1/2$ นั้น เราพิจารณาจากการวัดค่าองค์ประกอบ (จากทิศทางที่กำหนด) เช่น อิเล็กตรอน จะมีโมเมนต์เชิงมุมที่เกิดจากการหมุนรอบตัวเองเป็นไปได้ 2 ค่า คือ $+h/2\pi$ หรือ $-h/2\pi$ (เมื่อ h คือค่าคงที่ของ Planck) หรือกล่าวได้ว่าทิศทางของสปิน อาจเป็นแบบขนานหรือสวนทางกับทิศทางที่กำหนด (ตามทิศทางของสนามแม่เหล็ก ภายนอกที่ผ่านเข้ามา) ดังนั้นค่าโมเมนต์แม่เหล็กของอนุภาคที่จะเป็นไปได้จึงอาจเป็น $+\mu_0$ หรือ $-\mu_0$ หรืออาจกล่าวได้ว่าโมเมนต์แม่เหล็กนั้นอาจชี้ไปตามหรือตรงข้ามกับทิศทางที่กำหนด เพื่อความสะดวกเราจะแทนทิศทางทั้งสองนั้นด้วยทิศ "ขึ้น (up)" และ "ลง (down)" ตามลำดับ ดูรูปสมมติการเรียงตัวของอนุภาคที่มีสปิน $1/2$ ซึ่งประกอบกันเป็นระบบสปิน (spin system) ในรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 ระบบสปินที่ประกอบด้วยอนุภาคที่มีสปิน $1/2$ โดยแต่ละสปินอาจมี ทิศชี้ขึ้นหรือลงอย่างใดอย่างหนึ่ง

ระบบที่มี N อนุภาคที่มีสปิน $1/2$ ก็คล้าย ๆ กันมีแม่เหล็กอยู่จำนวน N แท่งแต่ละแท่งมีโมเมนต์แม่เหล็ก μ_0 ซึ่งอาจมีทิศชี้ขึ้นหรือลงก็ได้

ในกรณีของแก๊ส แต่ละโมเลกุลอาจเคลื่อนที่มาใกล้กันและชนกับโมเลกุลอื่น จึงมีโอกาสพบโมเลกุลนั้นได้ทั้งซ้ายหรือขวาของกล่อง ในกรณีของระบบสปินแต่ละโมเมนต์แม่เหล็กเกิดอันตรกิริยาบ้างกับโมเมนต์แม่เหล็กอื่น ๆ จึงพบว่าอาจมีทิศชี้ขึ้นหรือลง

ในกรณีของแก๊สอุดมคติในระบบอิสระในสภาวะสมดุลแต่ละโมเลกุลมีโอกาสที่เราจะพบได้ทั้งด้านซ้ายหรือด้านขวาของกล่อง เทียบกับระบบอิสระที่ประกอบ

ด้วยอนุภาคที่มีสปิน ในภาวะสมดุลเมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกผ่านเข้ามาแต่ ละโมเมนต์แม่เหล็กอาจมีทิศขึ้นหรือลงก็ได้ เราอาจใช้ n แทนจำนวนของสปิน ที่มีทิศขึ้น และ n' แทนจำนวนของสปินที่มีทิศลง ในภาวะสมดุลซึ่งเกิดสถานะ สุ่มได้ดีที่สุดจะมี n ประมาณเท่ากับ n' ประมาณเท่ากับ $N/2$ โดยจะมี n ต่าง จาก $N/2$ น้อยมากเมื่อพิจารณาการแจกแจงของพลังงานของแก๊สอุดมคติจำนวน N โมเลกุลนี้ จะได้

พลังงานรวม E ของแก๊ส = ค่าคงที่

$E =$ ผลรวมของพลังงานของแต่ละโมเลกุลแก๊ส (ละพลังงานศักย์เมื่อพิจารณาว่า มีอันตรกิริยาต่อกันน้อยมาก)

$$K.E. = \text{พลังงานจลน์ของแต่ละโมเลกุลแก๊ส}$$

$$= (1/2)mv^2$$

เมื่อ m คือมวลของแต่ละโมเลกุลแก๊ส v คือความเร็วของแต่ละโมเลกุลแก๊ส โดยที่ความเร็วของแต่ละโมเลกุลมีค่าแตกต่างกันได้แต่กรณีแก๊สอยู่ในภาวะสมดุล เราใช้ความเร็วเฉลี่ย

1.4 สมบัติของสภาวะสมดุล

(Properties of the equilibrium situation)

สมบัติของภาวะสมดุลพอจะสรุปได้ดังนี้

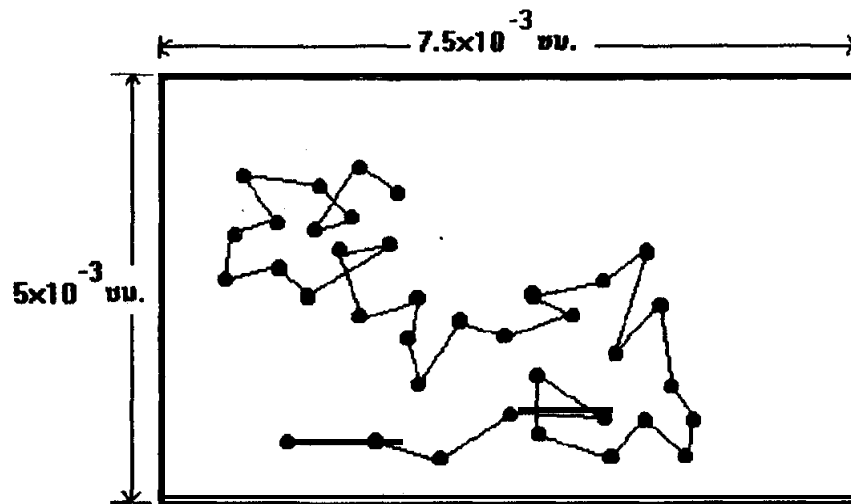
1. ในภาวะสมดุลค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์แมโครสโคปิก (ซึ่งแสดง ลักษณะสมบัติของระบบในสเกลขนาดใหญ่ เช่น n โมเลกุลอยู่ด้านซ้ายของกล่อง อุกฤษณี ความดันและปริมาตรของแก๊สทุกตัวคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปกับเวลาแต่อาจแกว่ง (fluctuations) ไปบ้างเล็กน้อยจากค่าเฉลี่ย

2. ภายใต้เงื่อนไขเฉพาะนี้อยู่ในภาวะที่จะสุ่มเชิงสถิติได้ดีที่สุดซึ่งก็ คือไม่ขึ้นกับอดีต โดยสมดุลใหม่อาจต่างไปจากสมดุลเก่า และในภาวะสมดุลของ ระบบจะถูกกำหนดด้วยพารามิเตอร์แมโครสโคปิกจำนวนน้อยมากและจะมีค่าค่อนข้างแน่นอนเมื่อเทียบกับตอนไม่สมดุล

การเคลื่อนที่แบบบราวเนียน (Brownian motion) ของอนุภาค

อนุภาคของแข็งเล็ก ๆ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 10^{-4} เซ็นติเมตร เมื่อนำมาลอยในของเหลวแล้วส่องกล้องจุลทรรศน์สังเกตุจะพบว่าอนุภาคเหล่านี้จะไม่อยู่นิ่งแต่จะเคลื่อนที่ไปเรื่อย ๆ อย่างไม่เป็นระเบียบ นักวิทยาศาสตร์ได้

เรียกการเคลื่อนที่แบบนั้นว่าการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน (Brownian motion) โดยตั้งชื่อตามผู้สังเกตพบคนแรกซึ่งเป็นนักฟิสิกส์ชาวอังกฤษชื่อบราวเนียน ในตอนแรกที่เขาพบปรากฏการณ์นี้ เขาก็ยังไม่เข้าใจ จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1905 ไอน์สไตน์ (Einstein) ได้อธิบายในรูปแบบของการเข้าสู่สมดุล อนุภาคของแข็งชนแบบสุ่มกับโมเลกุลของของเหลว เนื่องจากอนุภาคของแข็งมีขนาดเล็กการชนกับโมเลกุลของของเหลวต่อเวลาจึงค่อนข้างน้อย และอนุภาคของแข็งมีมวลน้อยเมื่อเกิดการชนกันกับโมเลกุลของของเหลวจึงมีผลต่อการเคลื่อนที่อนุภาคนี้มากจนสังเกตเห็นได้

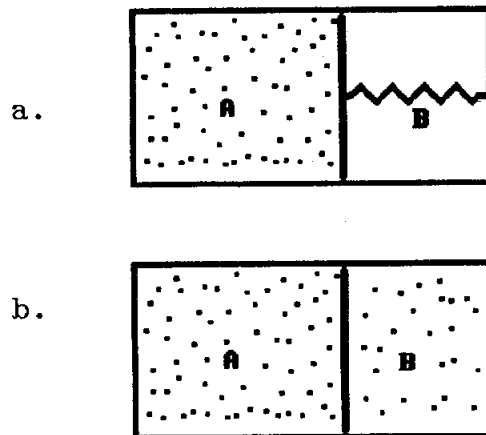


รูปที่ 1.5 การเคลื่อนที่แบบบราวเนียนของอนุภาคของแข็งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 10^{-4} ซม. แขนวลอยในน้ำ แล้วส่องกล้องจุลทรรศน์สังเกตดูการเคลื่อนที่ในเชิง 3 มิติ (อีกแกนตั้งฉากกับกระดาษ) เส้นต่อจุดเป็นแนวทางการเคลื่อนที่ทุก ๆ ช่วง 30 วินาที

1.5 ความร้อนและอุณหภูมิ (Heat and Temperature)

ระบบแมโครสโคปิกซึ่งไม่ได้้อยู่อย่างอิสระจะเกิดอันตรกิริยากับสิ่งแวดล้อม และแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อนต่อกัน ก่อนอื่นให้พิจารณารูปที่ 1.6a กล้องที่มีแก๊ส A อยู่ด้านซ้าย ให้ด้านขวาของผนังติดสปริง B ซึ่งยึดติดกับลูกสูบ เมื่อ

ปล่อยให้สปริงดันลูกสูบ ลูกสูบจะดันแก๊สที่อยู่ด้านซ้ายของกล่องไปเป็นระยะทาง แมโครสโคปิกเกิดงานแมโครสโคปิกที่สปริง B กระทำต่อแก๊ส A แต่ถ้าเราแทนสปริงด้านขวาด้วยแก๊สดังรูปที่ 1.6bแล้วจะเกิดงานแมโครสโคปิกเนื่องจากแก๊ส B ออกแรงดันหรือกระทำต่อแก๊ส A เมื่อลูกสูบเลื่อนไปได้ระยะทางแมโครสโคปิก

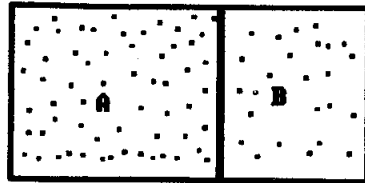


รูปที่ 1.6a ลูกสูบที่ติดสปริง B ดันแก๊ส A ที่อยู่ด้านซ้าย
1.6b แทนสปริงด้วยแก๊ส เกิดงานเมื่อลูกสูบเคลื่อนที่ได้
ระยะทางที่สังเกตได้

อย่างไรก็ตามระบบแมโครสโคปิกทั้งสองสามารถเกิดอันตรกิริยาต่อกันได้โดยไม่ต้องเกิดงานแมโครสโคปิกซึ่งเราเรียกว่าเกิดอันตรกิริยาเชิงความร้อน (Thermal interaction) ซึ่งเป็นอันตรกิริยาที่ไม่เกี่ยวข้องกับการทำงานในสเกลแมโครสโคปิก แต่พลังงานจะถูกถ่ายเทจากระบบหนึ่งไปสู่อีกระบบหนึ่งในสเกลอะตอม (atomic scale) เราจึงเรียกพลังงานที่ถูกถ่ายเทนี้ว่าความร้อน (Heat)

ที่นี้สมมติว่าลูกสูบในรูปที่ 1.6b ถูกตรึงไว้แน่นไม่ให้เคลื่อนไหวได้ กรณีนี้จะไม่มีการงานแบบแมโครสโคปิกกับอีกด้านแม้จะมีแรงกระทำต่อลูกสูบ แต่สิ่งที่จะเกิดขึ้นคืออะตอมในระบบ A จะเกิดอันตรกิริยาหรือชน (collide) กันเองและแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างกันด้วย ในทำนองเดียวกันอะตอมในระบบ B จะแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างกัน เมื่อพิจารณาที่ลูกสูบซึ่งกั้นระหว่างแก๊ส A และ

แก๊ส B อะตอมของแก๊ส A เกิดอันตรกิริยากับอะตอมของลูกสูบแล้วเกิดอันตรกิริยากับอะตอมอื่น ๆ ซึ่งอยู่ถัดไปของลูกสูบจนเกิดอันตรกิริยากับอะตอมของแก๊ส B ดังนั้นพลังงานสามารถถ่ายเทจาก A ไปยัง B (หรือจาก B ไปยัง A ก็ได้)



รูปที่ 1.7 ระบบทั่วไป 2 ระบบ A และ B ซึ่งสัมผัสกันเชิงความร้อน

พิจารณารูปที่ 1.7 แสดง 2 ระบบใด ๆ ซึ่งมีอันตรกิริยาเชิงความร้อนต่อกัน โดยอาจเป็นแก๊ส 2 ชนิด A และ B หรือ A อาจเป็นแท่งทองแดงซึ่งจุ่มลงในระบบ B ซึ่งบรรจุน้ำอยู่ เมื่อเราพิจารณาเกี่ยวกับพลังงานของระบบ ให้ E_A เป็นพลังงานทั้งหมดของระบบ A ซึ่งมีค่าเท่ากับพลังงานจลน์รวมกับพลังงานศักย์ให้ E_B พลังงานทั้งหมดของระบบ B ดังนั้นเมื่อรวมระบบทั้งสองเป็นระบบรวม (combined system) C หรือ C เกิดจาก $A + B$ และสมมติว่าหุ้มด้วยฉนวนจะได้

$$\text{พลังงานทั้งหมดของระบบรวม} = E_A + E_B = \text{ค่าคงที่} \dots (1.5)$$

ถ้าระบบ A และ B เป็นแก๊สอุดมคติที่ประกอบด้วยแก๊สชนิดเดียวกัน (เช่น ทั้ง A และ B อาจเป็นแก๊สไนโตรเจน) เมื่อเกิดสมดุลระบบรวม C มีพลังงานทั้งหมด $E_A + E_B$ ซึ่งเป็นค่ารวมของพลังงานเฉลี่ยของโมเลกุลที่เหมือนกัน (identical molecules) ใน C เมื่อให้ $(E_A)_{ave}$ เป็นพลังงานเฉลี่ยของโมเลกุลแก๊ส A และให้ $(E_B)_{ave}$ เป็นพลังงานเฉลี่ยของโมเลกุลแก๊ส B ดังนั้นในภาวะสมดุลจะได้

$$(E_A)_{ave} = (E_B)_{ave} \dots \dots \dots (1.6)$$

ถ้ามี N_A โมเลกุลในแก๊ส A และ N_B โมเลกุลในแก๊ส B จะได้

$$(E_A)_{ave} = E_A/N_A \text{ และ } (E_B)_{ave} = E_B/N_B \dots\dots\dots(1.7)$$

ดังนั้นจากสมการ(1.6)จะได้

$$E_A/N_A = E_B/N_B$$

พิจารณารูปที่ 1.8 แก๊ส A และ B ประกอบด้วยโมเลกุลแก๊สชนิดเดียวกัน สมมุติ เริ่มต้นระบบทั้งสองแยกกันอยู่และแยกกันสมดุล ถ้าให้พลังงานเริ่มต้นของระบบทั้งสองเป็น E_{A_i} และ E_{B_i} ตามลำดับซึ่งโดยปรกติแล้วมีค่าต่างกัน ซึ่งจะมีความพลังงานเฉลี่ยเป็น

$$(E_{A_i})_{ave} = E_{A_i}/N \text{ และ } (E_{B_i})_{ave} = E_{B_i}/N$$

ดังนั้นก่อนนำมาสัมผัสกันเชิงความร้อนจะมี $(E_{A_i})_{ave}$ ไม่เท่ากับ $(E_{B_i})_{ave}$ หลังจากนำมาสัมผัสกันเชิงความร้อนจะมีการแลกเปลี่ยนพลังงานต่อกัน การแจกแจงพลังงานของระบบทั้งสองจะแปรเปลี่ยนไปกับเวลาจนกระทั่งสู่ภาวะสมดุลซึ่งจะมีการแจกแจงพลังงานแบบสม่ำเสมอได้ดีที่สุด โดยจะมีพลังงานเฉลี่ยต่อโมเลกุลมีค่าเดียวกันทั้งสองระบบ ทำให้ระบบ A มีพลังงานสุดท้ายเป็น E_{A_f} และระบบ B มีพลังงานสุดท้ายเป็น E_{B_f} ดังนั้นในภาวะสมดุลสุดท้ายจะมี

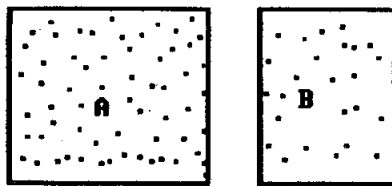
$$(E_{A_f})_{ave} = (E_{B_f})_{ave} \text{ หรือ } E_{A_f}/N = E_{B_f}/N \dots\dots\dots(1.8)$$

ตอนที่สัมผัสกันเชิงความร้อนระบบที่มีพลังงานเฉลี่ยเริ่มต้นน้อยกว่าจะได้รับพลังงานเพิ่มส่วนระบบที่มีพลังงานเฉลี่ยเริ่มต้นมากกว่าจะสูญเสียพลังงาน เนื่องจากพลังงานทั้งหมดของระบบรวม C มีค่าคงที่ จะได้

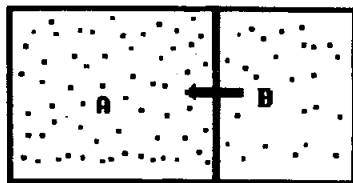
$$E_{B_f} + E_{A_f} = E_{B_i} + E_{A_i}$$

นั่นคือ $(E_{A_f} - E_{A_i}) + (E_{B_f} - E_{B_i}) = 0 \dots\dots\dots(1.9)$

หรือ $\Delta E_A + \Delta E_B = 0$



$$(E_{A_i})_{ave} < (E_{B_i})_{ave}$$



$$(E_{A_f})_{ave} = (E_{B_f})_{ave}$$

รูปที่ 1.8 แก๊สสองชนิด A และ B ซึ่งต่างประกอบด้วยโมเลกุลชนิดเดียวกัน เริ่มต้นแยกกันอยู่ a. นำมาสัมผัสกันเชิงความร้อน b. แล้วปล่อยให้สมดุล พลังงานของแก๊สแทนด้วย E พลังงานเฉลี่ยต่อโมเลกุลแทนด้วย $(E)_{ave}$

หรือ $Q_A + Q_B = 0$ (1.9a)

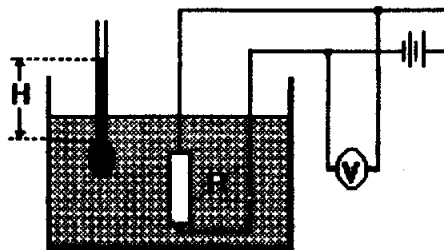
เมื่อ $\Delta E_A = Q_A$ และ $\Delta E_B = Q_B$
 เรียก Q หรือ ΔE ว่าปริมาณความร้อนที่ระบบดูดกลืนซึ่งอาจมีค่า +/- ก็ได้แล้ว
 แต่วาระบบได้รับความร้อน(+)หรือสูญเสียความร้อน(-)

อุณหภูมิ(Temperature)

กรณีทั่วไปที่ระบบ A และ B มีอันตรกิริยาเชิงความร้อนต่อกันโดยระบบทั้งสองอาจเป็นแก๊สต่างกันหรืออาจเป็น ของแข็ง ของเหลว การอนุรักษ์พลังงานตามสมการที่(1.5)ก็ยังคงเป็นจริง เมื่อเข้าสู่ภาวะสมดุลระบบทั้งสองจะมีอุณหภูมิเท่ากัน นั่นคือ

$T_A = T_B$ (1.10)

ในหน่วยมาตรฐานอุณหภูมิมีหน่วยเป็นเคลวิน(Kelvin)ใช้ตัวย่อว่า K เราเรียกอุณหภูมิ T นี้ว่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ซึ่งค่านี้มีความสัมพันธ์กับค่าพลังงานเฉลี่ยของระบบสำหรับตัวอย่างของเทอร์โมมิเตอร์ที่ใช้วัดอุณหภูมิของของเหลวภายในภาชนะให้ดูรูปที่ 1.9

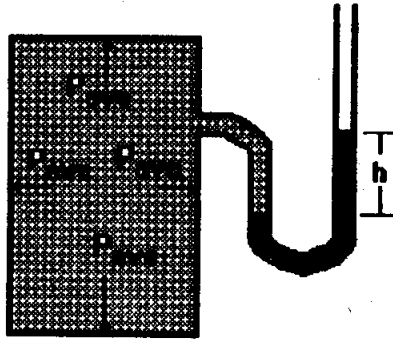


รูปที่ 1.9 เทอร์โมมิเตอร์ 2 แบบ ข้ายมือใช้ปรอท
 บรรจุในหลอดแก้วดูระยะการขยายตัว H ในหลอด
 ขวามือวัดความต่างศักย์ V

ความดันแก๊ส(Pressure of gases)

เมื่อบรรจุแก๊สใส่ถึง โมเลกุลแก๊สจะชนกับผนังทำให้เกิดแรงสູทอิทธกระทำต่อพื้นที่ผนังเกิดความดัน(pressure) P ของแก๊ส ความดันเฉลี่ย P_{avg} ของแก๊ส

อาจวัดด้วยเครื่องมือที่เรียกว่ามาโนมิเตอร์ (manometer) ดังรูปที่ 1.10 ความสูงที่แตกต่าง H ของระดับปรอททั้งสองข้างในหลอดแก้วรูปตัว U นำไปคำนวณเป็นน้ำหนักต่อพื้นที่หน้าตัดของหลอดแก้วก็คือความดันเฉลี่ยของแก๊สในถัง



รูปที่ 1.10 แก๊สที่มีความดันเฉลี่ย P_{avg} วัดได้จากมาโนมิเตอร์ซึ่งประกอบด้วยหลอดแก้วรูปตัว U บรรจุปรอท

การประมาณค่าความดัน

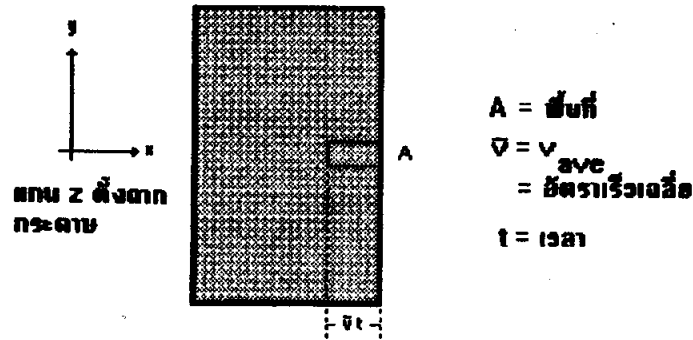
ค่าความดันเฉลี่ยที่จะหาต่อไปนี้เป็นค่าโดยประมาณซึ่งจะต่างไปจากค่าที่ถูกต้องกว่านี้ในการพิจารณาอย่างละเอียดในวิชาฟิสิกส์ความร้อน พิจารณาตามรูปที่ 1.11 แก๊สอุดมคติ N โมเลกุล แต่ละโมเลกุลมีมวล m ให้แก๊สอยู่ในภาวะสมดุลในภาชนะทรงสี่เหลี่ยมปริมาตร V ให้

$$n = \text{จำนวนโมเลกุลต่อหน่วยปริมาตร} \\ = N / V$$

เราจะพิจารณาว่า

- มีแก๊ส n โมเลกุลที่ชนกับพื้นที่ A บนผนังในช่วงเวลา t
- แก๊สแต่ละโมเลกุลมีความเร็วต่างกันแต่เราสมมติว่ามีอัตราเร็วเฉลี่ยคงที่เป็น v_{avg}

- ให้โมเลกุลแก๊สมีการเคลื่อนที่ทุกทิศทางอย่างสม่ำเสมอ ประมาณได้ว่าเฉลี่ยแล้วจะมีจำนวน $n/3$ โมเลกุลที่เคลื่อนที่ไปตามแกน x ทั้งสองด้าน ดังนั้นจะมีแก๊สจำนวน $n/6$ โมเลกุลที่เคลื่อนที่ไปตามแกน $+x$ ตรงไปยังพื้นที่ A โดยมีส่วนที่เหลือ $n/6$ โมเลกุลที่เคลื่อนที่ไปตามแกน $-x$ ตรงข้ามพื้นที่ A



รูปที่ 1.11 แสดงบริเวณที่โมเลกุลแก๊สชนกับพื้นที่ A ของผนังกล่อง

มีโมเลกุลแก๊สจำนวนหนึ่งที่เคลื่อนที่ในระยะ $(v_{ave})t$ จากพื้นที่ A จึงจะชนกับพื้นที่นี้ในช่วงเวลา t ส่วนอนุภาคที่อยู่นอกระยะนี้ก็จะไม่ชนกับพื้นที่ A ในช่วงเวลาดังกล่าว ดังนั้นจะมีจำนวนโมเลกุลโดยเฉลี่ยที่ชนกับพื้นที่ A ในเวลา t มีค่าเท่ากับ $(n/6)(A v_{ave} t)$ ถ้าเราให้ความหนาแน่นของฟลักซ์ (Flux density) เท่ากับ ϕ จะได้

$$\begin{aligned} \phi &= \text{จำนวนโมเลกุลโดยเฉลี่ยที่ชนผนังต่อพื้นที่ต่อเวลา} \\ &= n v_{ave} / 6 \end{aligned}$$

ในการหาความดันเฉลี่ยของโมเลกุลแก๊ส เราต้องหาแรงเฉลี่ยที่กระทำกับผนัง เมื่อโมเลกุลแก๊สชนผนังพลังงานจลน์ของโมเลกุลแก๊สมีค่า $(1/2)mv_{ave}^2$ ยังมีค่าคงที่ซึ่งเป็นจริงเนื่องจากระบบอยู่ในภาวะสมดุล ทำให้ขนาดของโมเมนตัมเฉลี่ยมีค่าคงที่ ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{โมเมนตัมที่เปลี่ยนไปต่อโมเลกุลแก๊สเมื่อชนผนัง} \\ &= \text{โมเมนตัมสุดท้าย} - \text{โมเมนตัมเริ่มต้น} \\ &= -mv_{ave} - mv_{ave} \\ &= -2mv_{ave} \end{aligned}$$

สอดคล้องกับกฎการอนุรักษ์โมเมนตัม ผนังได้รับโมเมนตัมเนื่องจากการชนมีค่า $+2mv_{ave}$ และจากกฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 2 ของนิวตัน แรงเฉลี่ยที่กระทำกับผนัง เท่ากับอัตราเฉลี่ยของการเปลี่ยนโมเมนตัมเมื่อโมเลกุลแก๊สชนผนัง ดังนั้น

แรงเฉลี่ยของโมเลกุลแก๊สทั้งหมดที่กระทำกับผนังต่อพื้นที่
 = ความดันเฉลี่ยของโมเลกุลแก๊สทั้งหมด = P_{avg}

หรือ

$P_{avg} =$ โมเมนตัมเฉลี่ย ($2m v_{avg}$) ที่ผนังได้รับจากการชนของแก๊สหนึ่ง
 โมเลกุล คูณด้วยจำนวนเฉลี่ยของการชนผนังต่อพื้นที่ต่อเวลา

นั่นคือ

$$P_{avg} = (2m v_{avg}) \phi = (2m v_{avg}) (n v_{avg} / 6)$$

$$= (1/3) n m v_{avg}^2 \dots \dots \dots (1.11)$$

เมื่อ พลังงานจลน์เฉลี่ยของหนึ่งโมเลกุล = K.E._{avg} = $(1/2) m v_{avg}^2$
 ดังนั้นจะได้

$$P_{avg} = (2/3) n K.E._{avg} \dots \dots \dots (1.12)$$

ข้อสังเกต

ถ้าพิจารณาว่า พลังงานทั้งหมดของแต่ละโมเลกุลเกิดจากการเคลื่อนที่ของ
 โมเลกุลเท่านั้น จะได้ว่าพลังงานเฉลี่ยของโมเลกุลก็คือพลังงานจลน์เฉลี่ยของ
 โมเลกุลนั่นเอง

การคำนวณที่ละเอียดกว่าวิธีนี้ในวิชาฟิสิกส์ความร้อนเราจะได้ความเร็วใน
 สมการที่ (1.11) เป็น v^2_{avg} ซึ่งมีค่าต่างไปจาก v_{avg}^2

สภาวะมาตรฐาน (Standard Temperature and Pressure หรือ STP)

นักวิทยาศาสตร์ได้กำหนดร่วมกันว่า ในการพิจารณาแก๊สที่สภาวะมาตรฐาน
 หมายถึงการพิจารณาแก๊สที่อุณหภูมิ (T) เท่ากับ 273.15 K (0 องศาเซลเซียส)
 และที่ความดัน (P) เท่ากับ 1.013×10^5 N/m² หรือ 1 บรรยากาศ หรือ 1
 บาร์ (bar) แก๊สทุกชนิดที่สภาวะมาตรฐานนี้จำนวน 1 กิโลโมล (kmole) จะมี
 ปริมาตร 22.4 ลูกบาศก์เมตร

เลขอาโวกาโดร (Avogadro's number)

จากการทดลองพบว่าแก๊ส 1 กิโลโมลมีจำนวน $(6.02252 \pm 0.00009) \times 10^{26}$
 โมเลกุล จึงให้เลขอาโวกาโดร (N_A) มีค่า

$$N_A = 6.02252 \times 10^{26} \text{ molecules/kmol} \dots \dots \dots (1.13)$$

ตัวอย่าง

แก๊สไนโตรเจน (N_2) จำนวนหนึ่งอยู่ในภาชนะปริมาตร 1 ลิตร ที่มีอุณหภูมิ
 ห้องและความดันบรรยากาศ แก๊สจำนวนนี้มีมวล 1.15×10^{-3} กิโลกรัม กำหนด
 ให้นำหนักอะตอม (atomic weight) ของอะตอมไนโตรเจนมีค่าเท่ากับ 14 จง

คำนวณหาจำนวนโมเลกุล, n , K.E._{ave} และ v_{ave} ของแก๊สนี้
วิธีทำ

จากสมการที่ (1.13)

$$\text{เลขอาโวกาโดร} = N_A = 6.02 \times 10^{26} \text{ molecules/kmol}$$

แก๊สไนโตรเจน มีน้ำหนักโมเลกุล (molecular weight) = $2 \times 14 = 28$
ซึ่งหมายความว่าแก๊สนี้จำนวน 1 กิโลโมลจะมีมวลประมาณ 28 กิโลกรัม ดังนั้น
แก๊สไนโตรเจน 28 กิโลกรัม มีจำนวน 6.02×10^{26} โมเลกุล จึงเทียบได้
ว่าแก๊สไนโตรเจน 1.15×10^{-3} กิโลกรัม

$$\text{มีจำนวน } (6.02 \times 10^{26} \times 1.15 \times 10^{-3}) / 28 = 2.47 \times 10^{22} \text{ โมเลกุล}$$

$$\begin{aligned} \text{จาก } n &= \text{จำนวนโมเลกุลทั้งหมดต่อปริมาตร} \\ &= N/V \end{aligned}$$

แทนค่าจะได้

$$n = (2.47 \times 10^{22}) / 10^{-3} = 2.47 \times 10^{25} \text{ โมเลกุลต่อลูกบาศก์เมตร}$$

จากสมการที่ (11)

$$P_{ave} = (2/3)n \text{ K.E.}_{ave}$$

จะได้พลังงานจลน์เฉลี่ยของหนึ่งโมเลกุล

$$\text{K.E.}_{ave} = (3/2)P_{ave}/n \quad \dots \dots \dots (1.14)$$

$$= (3/2)(1.013 \times 10^5) / (2.47 \times 10^{25}) \text{ จูล/โมเลกุล}$$

$$= 6.15 \times 10^{-21} \text{ จูล/โมเลกุล}$$

จาก

$$\text{K.E.}_{ave} = (1/2) m v_{ave}^2$$

ดังนั้น

$$v_{ave}^2 = 2 \text{ K.E.}_{ave} / m$$

เราหาค่ามวลต่อโมเลกุลหรือ m ได้จาก

$$m = M_u / N_A \quad \dots \dots \dots (1.15)$$

$$= \text{น้ำหนักโมเลกุล} / \text{เลขอาโวกาโดร}$$

$$= 28 / (6.02 \times 10^{26}) \text{ กิโลกรัม/โมเลกุล}$$

$$= 4.65 \times 10^{-26} \text{ กิโลกรัม/โมเลกุล}$$

ดังนั้นเราจะได้

$$v_{ave}^2 = [(2 \times 6.15 \times 10^{-21}) / (4.65 \times 10^{-26})] \text{ m}^2/\text{s}^2$$

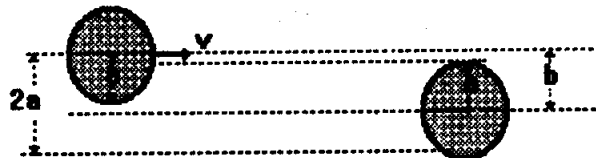
นั่นคืออัตราเร็วเฉลี่ยของโมเลกุลไนโตรเจน $v_{ave} = 514$ เมตร/วินาที

ระยะทางเฉลี่ยที่โมเลกุลแก๊สจะชนกัน (Mean free path)

นิยามว่าที่เวลาใด ๆ ให้

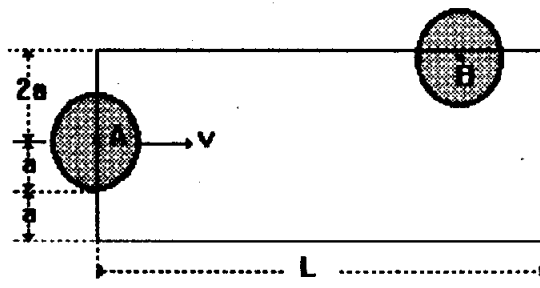
$L =$ ระยะทางเฉลี่ยที่โมเลกุลแก๊สจะชนโมเลกุลอื่น

พิจารณารูปที่ 1.12 เปรียบเหมือน B อยู่นิ่งเมื่อ A เคลื่อนที่เข้าหาด้วยความเร็วสัมพัทธ์ V



รูปที่ 1.12 แสดงการชนกัน
ระหว่างของแข็งทรงกลม 2 ลูก

ถ้าเราสมมติว่าโมเลกุลแก๊สมีลักษณะทรงกลมแบบนั้น ดังนั้นโมเลกุลแก๊ส A จะชน B (มีแรงกระทำต่อกัน) ก็ต่อเมื่อโมเลกุลแก๊สทั้งสองอยู่ในระยะที่ $b < 2a$ โดยเป็นระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของโมเลกุลแก๊สทั้งสองในแนวตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เข้าหากันดังในรูปที่ 1.12 และรูปที่ 1.13



รูปที่ 1.13 แบบจำลองการชนกันระหว่าง
โมเลกุลแก๊ส A และ โมเลกุลแก๊ส B

พิจารณารูปที่ 1.13 โมเลกุลแก๊ส A จะชนโมเลกุลแก๊ส B ได้ก็ต่อเมื่อโมเลกุล

แก๊สทั้งสองมีจุดศูนย์กลางอยู่ภายในปริมาตรที่มีพื้นที่ภาคตัดขวาง A_c ซึ่งสมมติว่าเป็นแนวปริมาตรที่ A จะเข้าชนกับ B ดังนั้น

$$A_c = \text{พื้นที่ภาคตัดขวางของการชนกันทั้งหมด} \\ = \pi(2a)^2 = 4\pi a^2$$

ดังนั้น

ปริมาตรของแนวที่โมเลกุลหนึ่งเคลื่อนที่ไปได้ระยะทาง L มีค่า $= A_c L$ เมื่อเราสมมติให้ปริมาตรนี้จุโมเลกุลที่จะถูกชนได้ 1 โมเลกุล ดังนั้น

$$(A_c L)n = 1$$

จะได้

$$L = 1/(n A_c) \dots\dots\dots(1.16)$$

ข้อสังเกต

1. ถ้า n น้อย L จะมีค่ามากทำให้การชนกันเกิดขึ้นได้น้อย
2. ถ้าเป็นแก๊สโมเลกุลเล็ก (รัศมีน้อย) ค่า L จะมาก ต้องอยู่ใกล้กันมาก จึงจะมีโอกาสชนกัน
3. ถ้า $L \gg a$ เราพอจะประมาณได้ว่าแก๊สนั้นเป็นแก๊สอุดมคติ

ตัวอย่าง

จากตัวอย่างที่แล้วให้หาค่า L ของแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิห้องกับความดันบรรยากาศ เมื่อรัศมีของโมเลกุลแก๊สนี้มีขนาด 10^{-10} เมตร

วิธีทำ

จากโจทย์เราจะได้ $a = 10^{-10}$ เมตร

ดังนั้น

$$A_c = 4\pi a^2 = 12 \times 10^{-20} \text{ ตารางเมตร}$$

และเราเคยได้ $n = N/V = 2.47 \times 10^{25}$ โมเลกุล/ลูกบาศก์เมตร

ดังนั้น

$$L = 1/(n A_c) \\ = 1/(2.47 \times 10^{25} \times 12 \times 10^{-20}) \text{ เมตร} \\ = 3.5 \times 10^{-7} \text{ เมตร}$$

ดังนั้นแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิห้องความดันบรรยากาศ เมื่อมีความหนาแน่นของแก๊ส 2.47×10^{25} โมเลกุล/ลูกบาศก์เมตร จะมีระยะทางเฉลี่ยที่โมเลกุลแก๊สจะชนกันเท่ากับ 3.5×10^{-7} เมตรซึ่งพอประมาณได้ว่าเป็นแก๊สอุดมคติ

แบบฝึกหัด

1. พิจารณาระบบอุดมคติที่ประกอบด้วย 5 สปินโดยไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกมาเกี่ยวข้อง เมื่อพิจารณาว่าระบบอยู่ในภาวะสมดุล ให้หาความน่าจะเป็นที่ n สปินจะมีทิศชี้ขึ้น ให้พิจารณาทุกกรณีคือ $n = 0, 1, 2, 3, 4$ และ 5
2. ภาชนะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยที่กั้น ส่วนแรกมีปริมาตร V_1 บรรจุแก๊สเฉื่อย อีกส่วนว่างเปล่า แล้วดึงที่กั้นออกปล่อยให้จนกระทั่งถึงภาวะสมดุลสุดท้ายซึ่งตอนนั้นโมเลกุลแก๊สจะกระจายไปทั่วภาชนะทั้งหมดซึ่งมีปริมาตร V_2
 - 2.1 พลังงานทั้งหมดของแก๊สเปลี่ยนไปหรือไม่? ใช้ผลที่ได้นี้เปรียบเทียบกับพลังงานเฉลี่ยต่อโมเลกุลในภาวะสมดุลก่อนและหลังเอาที่กั้นออก
 - 2.2 ให้หา อัตราส่วนของความดันแก๊สในภาวะสุดท้ายต่อความดันแก๊สในภาวะเริ่มต้น
3. พิจารณาแก๊สไนโตรเจน (N_2) ที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ ให้ใช้ค่าที่กำหนดให้ตามตัวอย่างในบทนี้ จงคำนวณหาจำนวนโมเลกุลโดยเฉลี่ยของแก๊สไนโตรเจนที่ชนพื้นที่บนผนัง 1 ตารางเซนติเมตรในเวลา 1 วินาที
4. พิจารณาแก๊สไนโตรเจน (N_2) ที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ ให้ใช้ค่าที่กำหนดให้ตามตัวอย่างในบทนี้คำนวณหาเวลาโดยเฉลี่ยที่โมเลกุลหนึ่งเคลื่อนที่ไปชนกับอีกโมเลกุลหนึ่ง
5. พิจารณาแก๊สที่ผสมกันที่จู่อยู่ในภาชนะอันหนึ่ง แก๊สผสมนี้ประกอบด้วยแก๊สที่มีโมเลกุลเดี่ยว (monatomic molecules) ซึ่งมีมวล m_1 และ m_2 ในภาวะสมดุลพลังงานเฉลี่ยของอะตอมใด ๆ ไม่เปลี่ยน นั่นคือพลังงานเฉลี่ยของแต่ละอะตอมมีค่าเท่ากันหรือ

$$E_{1,ave} = E_{2,ave}$$

- 5.1 ถ้าแก๊สผสมนี้อยู่ในภาวะสมดุลจงหาอัตราส่วนของอัตราเร็วโดยเฉลี่ยของโมเลกุลที่มีมวล m_1 ต่ออัตราเร็วโดยเฉลี่ยของโมเลกุลที่มีมวล m_2 (หรือ $v_{1,ave}/v_{2,ave}$)
 - 5.2 สมมติว่าโมเลกุลทั้งสองชนิดดังกล่าวในข้อ 6.1 คือ He (Helium) และ Ar (Argon) ซึ่งมีน้ำหนักอะตอมเท่ากับ 4 และ 40 ตามลำดับ ให้หาอัตราส่วนของความเร็วเฉลี่ยของอะตอม He ต่อของอะตอม Ar
6. พิจารณาแก๊สอุดมคติที่ประกอบด้วยอะตอม 2 แบบ ถ้าสมมติว่าอะตอมที่มีมวล m_1 มีจำนวนอะตอมต่อปริมาตรเป็น n_1 และถ้าอะตอมที่มีมวล m_2 มีจำนวน

อะตอมต่อปริมาตรเป็น n_2 เมื่อแก๊สนี้อยู่ในภาวะสมดุลพลังงานเฉลี่ย E_{avg} ของแต่ละอะตอมทั้งสองแบบจึงมีค่าเท่ากัน ให้ประมาณหาค่าความดันเฉลี่ย P_{avg} ของแก๊สผสมนี้ในพจน์ของ E_{avg}

7. พิจารณาภาชนะขึ้นหนึ่งซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วนเท่า ๆ กันด้วยที่กั้นกลางโดยด้านหนึ่งมีแก๊สฮีเลียม(He) 1 โมล อีกด้านเป็นอาร์กอน(Ar) 1 โมล มีการถ่ายเทพลังงานในรูปความร้อนผ่านที่กั้นกลางระหว่างแก๊สทั้งสองจนเมื่อเวลาผ่านไปนานพอที่ทำให้เกิดภาวะสมดุล ให้ความดันเฉลี่ยของแก๊สฮีเลียมและอาร์กอนเป็น P_1 และ P_2 ตามลำดับ

7.1 ให้เปรียบเทียบความดันของแก๊สทั้งสอง

7.2 จะเกิดอะไรขึ้นถ้าเอาที่กั้นกลางออก กระบวนการที่เกิดขึ้นเป็นแบบผันกลับได้หรือเป็นแบบผันกลับไม่ได้

7.3 ให้หาความดันเฉลี่ยของแก๊สในภาวะสมดุลสุดท้าย
