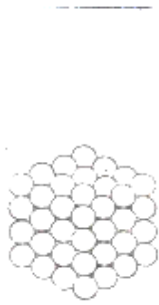


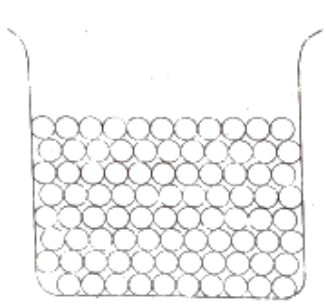
## บทที่ 5 ของแข็ง ของเหลว แก๊ส

สารต่างๆ ที่พบในธรรมชาติจะมีสถานะที่แตกต่างกันเช่น ทรายมีสถานะของแข็ง น้ำมีสถานะ ของเหลว ออกซิเจน มีสถานะเป็นแก๊ส

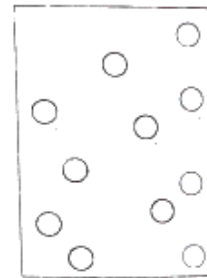
### สถานะของสาร



ของแข็ง(Solid)



ของเหลว (Liquid)



แก๊ส (Gas)

**ของแข็ง** คือสถานะของสารที่อนุภาคอยู่ชิดติดกันมากที่สุด มีความเป็นระเบียบของอนุภาคมากที่สุดมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคมากที่สุด และมีช่องว่างระหว่างอนุภาคน้อยที่สุด สารในธรรมชาติโดยทั่วไปที่มีสถานะเป็นของแข็ง ได้แก่ โลหะ สารประกอบไอออนิก และสารโคเวเลนต์บางชนิด เช่น เพชร แกรไฟต์

**ของเหลว** คือสถานะของสารที่อนุภาคอยู่ชิดติดกัน มีความเป็นระเบียบและมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาครองลงมาจากสถานะของแข็ง แต่มีช่องว่างระหว่างอนุภาคมากกว่า สารในธรรมชาติที่มักมีสถานะเป็นของเหลวได้แก่ สารประกอบโคเวเลนต์ เช่น น้ำ  $\text{CCl}_4$  น้ำมัน เป็นต้น

**แก๊ส** คือสถานะของสารที่อนุภาคอยู่ห่างกันมากที่สุด มีความไม่เป็นระเบียบมากที่สุด มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคน้อยที่สุด และมีช่องว่างระหว่างอนุภาคมากที่สุด สารที่พบในสถานะแก๊สได้แก่ธาตุหมู่ 8

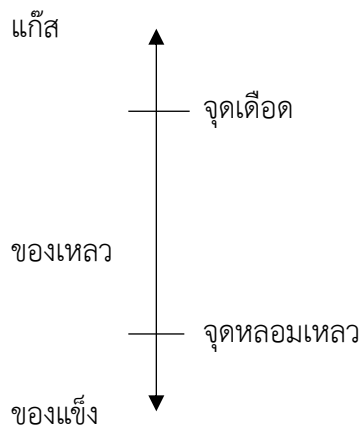
หรือแก๊สเฉื่อย แก๊สไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ ) แก๊สออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) แก๊สไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ )

สารทุกชนิดสามารถเปลี่ยนสถานะกลับไปกลับมาได้ทุกสถานะ การที่สารจะมีสถานะใดขึ้นอยู่กับชนิด

ของสาร จุดหลอมเหลว จุดเดือด และอุณหภูมิของสารนั้น ถ้าเราพูดถึงสถานะของสารโดยทั่วไปจะหมายถึงสถานะที่อุณหภูมิห้อง ( $25^\circ\text{C}$ ) ดังนั้นถ้าต้องการทราบสถานะของสารที่อุณหภูมิอื่นต้องมีการระบุอุณหภูมิ

กำกับไว้ด้วย

การพิจารณาสถานะของสารที่อุณหภูมิต่าง ๆ สารจะมีสถานะอย่างไรขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของสารเทียบกับจุดหลอมเหลว และจุดเดือดของสารนั้น การพิจารณามี 3 กรณี คือ



- 1) ถ้าสารมีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลว สารจะมีสถานะเป็นของแข็ง
- 2) ถ้าสารมีอุณหภูมิอยู่ระหว่างจุดหลอมเหลวและจุดเดือด สารจะมีสถานะเป็นของเหลว
- 3) ถ้าสารมีอุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือด สารจะมีสถานะเป็นแก๊ส

จุดหลอมเหลวอาจเรียกอีกอย่างว่าจุดเยือกแข็ง

จุดเดือดอาจเรียกอีกอย่างว่าจุดควบแน่นหรือจุดกลั่นตัว

จุดหลอมเหลว (Melting Point = mp.) คืออุณหภูมิที่ของแข็งเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลว

จุดเยือกแข็ง (Freezing Point = fp.) คืออุณหภูมิที่ของเหลวเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็ง

จุดเดือด (Boiling Point = bp.) คืออุณหภูมิที่ของเหลวเปลี่ยนสถานะเป็นแก๊ส

จุดควบแน่น (Condensing Point) คืออุณหภูมิที่แก๊สเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลว

#### สมบัติของของแข็ง

1. ปริมาตรคงที่ไม่ขึ้นอยู่กับขนาดภาชนะที่บรรจุ
2. มีรูปร่างคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามรูปร่างของภาชนะ
3. มีอนุภาคอยู่ชิดติดกันอย่างมีระเบียบ

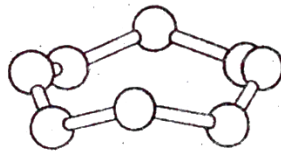
#### 4. สามารถระเหิดได้

##### การจัดเรียงอนุภาคของของแข็ง

ธาตุต่าง ๆ บางชนิดในธรรมชาติจะมีการจัดเรียงตัวของอะตอมในโมเลกุลได้หลายแบบ เราเรียกว่า อัญรูป (allotrope) ของธาตุ เช่นกำมะถันมีโครงสร้างผลึกเป็น ромบิก (rhombic) และมอนอคลินิก (monoclinic) การที่สารสามารถเปลี่ยนโครงสร้างจากแบบหนึ่งไปเป็นอีกแบบหนึ่งได้ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ และความดันค่าหนึ่ง เราเรียกอุณหภูมินี้ว่า จุดทรานซิชัน (transition point)

##### การเปลี่ยนแปลงอัญรูปของกำมะถัน

กำมะถันมีหลายอัญรูป ได้แก่ ромบิก (ออร์โทรอมบิก) มอนอคลินิก พลาสติกกำมะถัน ромบิก ( $S^\alpha$ ) มีสูตรโมเลกุลเป็น  $S_8$  ประกอบด้วยกำมะถัน 8 อะตอมต่อกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ เป็นวง 8 เหลี่ยมรูปมงกุฎ ไม่ละลายน้ำแต่ละลายในคาร์บอนไดซัลไฟด์ ( $CS_2$ ) หรือโทลูอีน ( $C_7H_8$ )



เมื่อนำมาให้ความร้อนอย่างรวดเร็วจะหลอมเหลวที่อุณหภูมิ  $113^\circ C$  แต่ถ้าให้ความร้อนอย่างช้าๆ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นกำมะถันมอนอคลินิก ( $S^\beta$ ) ที่อุณหภูมิ  $96^\circ C$  ซึ่งมีจุดหลอมเหลว  $119^\circ C$  มีสูตรโมเลกุล  $S_8$  เหมือนกำมะถัน ромบิก เมื่อหลอมเหลวจะกลายเป็นของเหลวสีเหลืองแต่ไหลได้ดี ถ้าให้ความร้อนต่อไป จนมีอุณหภูมิสูงถึง  $160^\circ C$  วง  $S_8$  จะแตกออกกลายเป็นสายยาวมีลักษณะขุ่นเหนียวและมีสีเข้มขึ้น มีสูตรโครงสร้าง  $\begin{matrix} \text{S} & & \text{S} & & \text{S} \\ \backslash & & / & & \backslash \\ & \text{S} & & \text{S} & \\ / & & \backslash & & / \end{matrix}$

เมื่ออุณหภูมิสูงถึง  $200^\circ C$  วงกำมะถัน จะแตกออกหมดต่อกันเป็นสายยาวหรืออาจม้วนพันกันไปมากลายเป็นของเหลวสีเข้มและเหนียว ถ้าเทลงน้ำเย็นทันทีเพื่อให้เย็นลงอย่างรวดเร็วจะได้กำมะถันพลาสติกซึ่งประกอบด้วยสายโซ่กำมะถันขดเป็นเกลียวแบบกันหอยแต่ไม่เสถียร มีลักษณะเป็นก้อนแข็งเหนียวไม่ละลายในตัวทำละลายทุกชนิด หลังจากนั้นกำมะถันพลาสติกจะค่อยๆ เปลี่ยนเป็นกำมะถัน ромบิกที่อุณหภูมิต่ำ แต่ถ้าไม่เทกำมะถันลงในน้ำเย็นโดยให้ความร้อนต่อกำมะถันเหลวจะมีความเหนียวลดลงเพราะสายกำมะถันมีขนาดสั้นลงจนถึงอุณหภูมิต่ำกว่า  $444.6^\circ C$  จึงเดือดกลายเป็นไอสีน้ำตาล ไอของกำมะถันจะประกอบด้วยโมเลกุลของ  $S_8$ ,  $S_4$  และ  $S_2$  ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

ลักษณะของผลึกของกำมะถัน 'กำมะถันรวมบิกจะเป็นผลึกรูปเหลี่ยมสี่เหลี่ยม ส่วนกำมะถันมอนอคลินิกมีลักษณะเป็นผลึกรูปเข็ม

นอกจากนี้ยังมีธาตุอื่น ๆ อีกหลายธาตุที่มีได้หลายรูป และมีสมบัติดังตาราง

ชื่อธาตุ	รูปต่างๆของธาตุ	ลักษณะภายนอก	จุดหลอมเหลว °C	จุดเดือด °C	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	สภาพนำไฟฟ้า
คาร์บอน	แกรไฟต์	เป็นผงหรือแผ่นดำ	3652	4827	2.25	นำ
	เพชร	ผลึกรูปเหลี่ยม	-	-	3.51	ไม่นำ
	ฟูลเลอร์รีน	รูปทรงกลม	-	-	-	ไม่นำ
ฟอสฟอรัส	ฟอสฟอรัสขาว	เป็นก้อนสีขาวหรือเหลืองเป็นผงสีแดง	44	280	1.82	ไม่นำ
	ฟอสฟอรัสแดง	เป็นเกล็ดสีดำ	590	-	2.34	ไม่นำ
	ฟอสฟอรัสดำ		610	-	2.699	นำ
กำมะถัน	รวมบิก	ผลึกรูปเหลี่ยม	113	445	2.07	ไม่นำ
	มอนอคลินิก	สี่เหลี่ยม ผลึกรูปเข็มสี่เหลี่ยม	119	445	2.07	ไม่นำ

ของแข็งที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคต่ำ จะมีความดันไอสูงเกิดการระเหิดได้ง่าย ของแข็งที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคสูง จะมีความดันไอต่ำเกิดการระเหิดได้ยาก

**ชนิดของของแข็ง** ของแข็งมีทั้งชนิดที่เป็นผลึก และไม่เป็นผลึก ของแข็งที่ไม่เป็นผลึก เราเรียกว่า ของแข็งอสัณฐาน ตัวอย่าง เช่น แก้ว ยาง พลาสติก ซีเมนต์

**ผลึก** คือ ของแข็งที่มีรูปร่างเฉพาะตัว มีรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอน มีพื้นที่ราบ และมีมุมเป็นค่าเฉพาะ ผลึกของสารแต่ละชนิดจะมีโครงสร้างที่แตกต่างกันทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของอนุภาคภายในผลึกสารบางชนิดสามารถเกิดผลึกได้หลายรูปแบบ จึงทำให้สมบัติบางอย่างที่แตกต่างกัน เช่น จุดหลอมเหลว จุดเดือด หรือความหนาแน่น เป็นต้น

## ชนิดของผลึก

ผลึกของของแข็ง แบ่งเป็น 4 ชนิด คือ

- 1. ผลึกไอออนิก (Ionic crystal)** อนุภาคของผลึกประเภทนี้จะเป็นไอออนบวกและไอออนลบเรียงตัวสลับกันไป ในลักษณะสามมิติ แข็งแต่เปราะ มีจุดหลอมเหลวและจุดเดือดสูง ขณะเป็นของแข็งไม่นำไฟฟ้า แต่เมื่อหลอมเหลวหรืออยู่ในรูปสารละลายจะสามารถนำไฟฟ้าได้ ตัวอย่างที่พบบ่อยๆ ได้แก่ สารประกอบออกไซด์ของโลหะหมู่ 1 และหมู่ 2 เกลือเฮไลด์ของโลหะของแข็ง ของเหลว แก๊ส
- 2. ผลึกโมเลกุล (Molecular crystal)** อนุภาคของผลึกประเภทนี้อาจเป็นอะตอมหรือโมเลกุลแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคอาจเป็นแรงดึงดูดระหว่างขั้วของโมเลกุล หรือเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ ผลึกประเภทนี้จะค่อนข้างอ่อนหรือนุ่ม เช่น ผลึกของไอโอดีน ( $I_2$ )
- 3. ผลึกโคเวเลนต์ร่างตาข่าย (Covalent crystal)** อนุภาคของผลึกประเภทนี้จะเป็นอะตอม มีการยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ เช่น เพชร อะตอมองค์ประกอบแต่ละอะตอมจะยึดเหนี่ยวกับอะตอมข้างเคียงสี่อะตอมด้วยพันธะโคเวเลนต์ที่แข็งแรง ผลึกประเภทนี้จะมีจุดหลอมเหลวและจุดเดือดที่สูงมากมีความดันไอต่ำและไม่ละลายในตัวทำละลายใด ๆ ตัวอย่างที่พบบ่อย ๆ คือ เพชร และแกรไฟต์
- 4. ผลึกโลหะ (Metallic crystal)** อนุภาคของผลึกประเภทนี้จะเป็นไอออนบวกที่อยู่ท่ามกลางเวเลนซ์อิเล็กตรอน แต่ละอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ได้อย่างอิสระทั่วทั้งก้อนของโลหะผลึกประเภทนี้จะมีจุดหลอมเหลวและจุดเดือดสูง ดึงให้เป็นเส้นหรือให้เป็นแผ่นได้ ตัวอย่าง ได้แก่ โลหะโดยทั่วไป เช่น เหล็ก เงิน และทองคำ เป็นต้น

## การเปลี่ยนสถานะของของแข็ง

อนุภาคของของแข็งอยู่ชิดติดกันมีพลังงานจลน์ต่ำมากเมื่อเทียบของเหลวและแก๊ส ไม่มีการเคลื่อนที่ แต่มีการสั่นสะเทือนตลอดเวลาทำให้มีการถ่ายเทพลังงานจลระหว่างอนุภาค ถ้าอนุภาคใดอยู่ที่ผิวหน้าของของแข็งและมีพลังงานจลน์สูงมากพอที่จะเอาชนะแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคข้างเคียงได้ จะหลุดออกจากของแข็งไปเป็นแก๊สได้เลย เราเรียกกระบวนการนี้ว่าการระเหิด (Sublimation) ของแข็งที่สามารถเกิดการระเหิดได้ เช่น การบูร พิมเสน ลูกเหม็น (แนฟทาลีน) น้ำแข็งแห้ง และไอโอดีน เป็นต้น

ถ้านำของแข็งมาให้ความร้อนจะทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น อนุภาคของของแข็งมีพลังงานจลน์เพิ่มขึ้น การสั่นสะเทือนของอนุภาคจะแรงขึ้นและมีการถ่ายเทพลังงานจลน์ให้แก่กันมากขึ้น เมื่อพลังงานจลน์สูงถึง

ระดับหนึ่งอนุภาคของของแข็งจะเคลื่อนที่แยกตัวห่างกัน ทำให้แรงดึงดูดระหว่างอนุภาคลดลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลว เราเรียกกระบวนการดังกล่าวนี้ว่า การหลอมเหลว (melting)

### สมบัติของของเหลว

ของเหลวคือสถานะอย่างหนึ่งของสารที่อนุภาคมีการเรียงตัวอยู่ชิดติดกัน แต่มีความเป็นระเบียบน้อยกว่าของแข็ง ระหว่างอนุภาคของของเหลวยังมีที่ว่างอยู่บ้าง ทำให้ของเหลวสามารถไหลได้ เพราะเกิดจากการที่อนุภาคข้างเคียงเคลื่อนเข้ามาแทนที่บริเวณที่ว่าง อนุภาคของของเหลวจะหมายถึงโมเลกุลถ้าเป็นสารโคเวเลนต์ เช่น  $H_2O$ ,  $C_2H_5OH$ ,  $CCl_4$  หมายถึงไอออนถ้าเป็นสารไอออนิก เช่น  $Na^+$ ,  $Cl^-$  ใน  $NaCl$ ,  $K^+$ ,  $Br^-$  ใน  $KBr$  หมายถึงอะตอมถ้าเป็นโลหะเช่น  $Na$ ,  $Fe$ ,  $Cr$

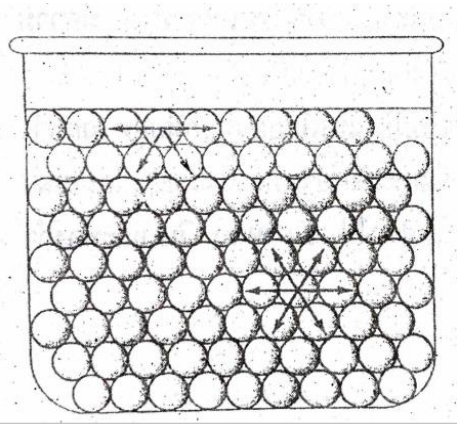
### สมบัติทั่วไปของของเหลว

- 1) มีการเคลื่อนที่หรือสั่นสะเทือนของอนุภาคตลอดเวลา
- 2) อนุภาคของเหลวแต่ละอนุภาคจะมีการกระทบกัน เคลื่อนที่หรือเลื่อนไปบนอนุภาคอื่นที่อยู่ใกล้เคียงกันอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา ทำให้ของเหลวเกิดการไหลได้และมีรูปร่างไม่แน่นอนเปลี่ยนแปลงตามภาชนะที่บรรจุ
- 3) มีปริมาตรคงที่ ไม่ขึ้นอยู่กับปริมาตรภาชนะเหมือนแก๊ส เพราะอนุภาคของเหลวอยู่ชิดติดกันไม่

สามารถบีบอัดให้เล็กลงได้อีก เช่น น้ำปริมาตร 10l จะนำไปใส่ในภาชนะขนาดเท่าใดปริมาตรก็ยังคงเป็น 10l

### ความตึงผิว

#### แรงตึงผิวของของเหลวหรือความตึงผิว (Surface. tension)



การที่อนุภาคของเหลวอยู่ชิดติดกันจึงมีแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน ถ้าแรงดึงดูดนี้เกิดกับอนุภาคที่ผิวหน้าของของเหลวก็จะทำให้เกิดแรงตึงผิวของของเหลว สารที่มีแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคสูงจะมีแรงตึงผิวมาก สารที่มีแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคต่ำจะมีแรงตึงผิวน้อย การที่สารแต่ละชนิดมีแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคต่างกันจึงมีแรงตึงผิวแตกต่างกัน การที่อนุภาคของเหลวมีแรงดึงดูดกันนอกจากจะทำให้เกิดแรงตึงผิวแล้วยังทำให้เกิดความหนืดของของเหลวด้วย

จากการศึกษาค่าแรงดึงดูดผิวของของเหลวชนิดต่างๆ พบว่าแรงดึงดูดผิวของ ปรอท > น้ำ > กลีเซอริน >

เบนซีน > เอทิลแอลกอฮอล์ > ไตเอทิลอีเทอร์

ดังนั้นแรงดึงดูดระหว่างอนุภาค และความหนืดของของเหลว ปรอท > น้ำ > กลีเซอริน > เบนซีน >

- เอทิลแอลกอฮอล์ > ไตเอทิลอีเทอร์

เมื่อนำของเหลวไปบรรจุในภาชนะ หรือเมื่อของเหลวสัมผัสกับวัสดุใดก็ตาม จะมีแรงยึดเหนี่ยวที่สำคัญเกิดขึ้น 2 ประเภท คือ

(1) แรงเชื่อมแน่น (Cohesive force) คือแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดระหว่างโมเลกุลหรืออนุภาคของสารชนิดเดียวกัน

(2) แรงยึดติด (Adhesive force) คือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล หรืออนุภาคของสารต่างชนิดกัน

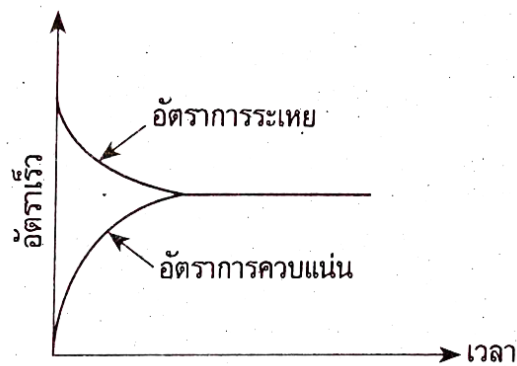
- ถ้าจุ่มหลอดคะปิลลารีปลายเปิดทั้งสองข้างลงในน้ำที่บรรจุในบีกเกอร์ จะพบว่าผิวน้ำกลางหลอดจะเว้าลง เพราะแรงเชื่อมแน่นระหว่างโมเลกุลของน้ำกับน้ำแข็งแรงน้อยกว่าแรงยึดติดระหว่างโมเลกุล  $\text{SiO}_2$  ในแก้วกับน้ำ น้ำจึงเปียกแก้ว

- ถ้าจุ่มหลอดคะปิลลารีปลายเปิดทั้งสองข้างลงในปรอทที่บรรจุในบีกเกอร์ จะพบว่าปรอทกลางหลอดจะโค้งงอขึ้น เพราะแรงเชื่อมแน่นระหว่างอะตอมของปรอทกับปรอทแข็งแรงกว่า แรงยึดติดระหว่างอะตอมของปรอทกับโมเลกุล  $\text{SiO}_2$  ในแก้ว ปรอทจึงไม่เปียกแก้ว

### การระเหย (Evaporation)

เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติสำหรับของเหลวทุกชนิด เกิดจากการที่อนุภาคของของเหลว ซึ่งอยู่ชิดติดกันมีการเคลื่อนที่ชนกันตลอดเวลา ในการชนกันของอนุภาคทำให้มีการถ่ายเทพลังงานจลน์ให้แก่ กันและกัน ถ้าอนุภาคใดมีพลังงานจลน์สูงพอที่จะเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคข้างเคียงได้และอยู่ที่ผิวหน้าของเหลวก็จะสามารถระเหยกลายเป็นไอได้ ส่วนอนุภาคที่อยู่ชั้นล่าง ๆ ถึงแม้จะมีพลังงานจลน์สูงพอก็ไม่สามารถระเหยได้ เพราะมีอนุภาคที่อยู่ล้อมทุกทิศทุกทางคอยขวางไว้ไม่ให้หลุดออกไปจากของเหลว จึงไม่สามารถระเหยได้ แต่อนุภาคที่ผิวหน้าของเหลวไม่มีอนุภาคที่ซ้อนทับอยู่ ถ้าเรานำของเหลวไปให้ความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิของเหลวจะมีอัตราการระเหยเพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มพลังงานจลน์ให้กับอนุภาคของเหลว จำนวนอนุภาคที่มีพลังงานจลน์สูงพอที่จะเอาชนะแรงดึงดูดของอนุภาคข้างเคียงได้จึงเพิ่มขึ้นทำให้อัตราการระเหยเพิ่มขึ้น ถ้านำ

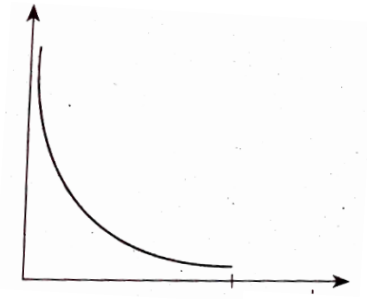
ของเหลวที่บรรจุในแก้วใบเล็กไปเทใส่กะละมังขนาดใหญ่ อัตราการระเหยจะเพิ่มขึ้นด้วย เพราะกะละมังมีพื้นที่ผิวหน้ามากกว่าแก้วมาก จำนวนอนุภาคที่ผิวหน้ามีมากขึ้นการระเหยจึงเพิ่มขึ้น ถ้าทำการทดลองหยดน้ำและแอลกอฮอล์ลงบนผิวหนังเปรียบเทียบกัน จะพบว่าผิวหนังที่หยดแอลกอฮอล์จะรู้สึกเย็นกว่าน้ำ เพราะโมเลกุลของแอลกอฮอล์มีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลน้อยกว่าน้ำมาก เมื่อโมเลกุลแอลกอฮอล์เกิดการระเหยจะมีการดูดพลังงานความร้อนจากผิวหนังเพื่อทำให้โมเลกุลมีพลังงานจลน์สูงพอที่จะเอาชนะแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลข้างเคียง ทำให้อุณหภูมิที่ผิวหนังลดลงจึงรู้สึกเย็นลง แต่แอลกอฮอล์ให้ผิวหนังรู้สึกเย็นกว่าน้ำ เพราะแอลกอฮอล์ระเหยง่ายกว่าน้ำ อัตราการระเหยสูงกว่า การดูดพลังงานความร้อนที่ผิวหนังมากกว่าจึงเย็นกว่าถ้านำน้ำบรรจุใส่ในขวดจำนวนหนึ่งแต่ไม่เต็มขวดแล้วปิดฝาขวดให้สนิทแล้วตั้งทิ้งไว้ ในตอนเริ่มต้นน้ำจะเกิดการระเหยเป็นไอเพียงอย่างเดียว เมื่อไอน้ำเกิดเพิ่มขึ้นโมเลกุลไอน้ำที่วิ่งชนน้ำจะถูกดูดติดแล้วเกิดการควบแน่นกลับมาเป็นหยดน้ำในช่วงแรกของการทดลองระดับน้ำในขวดจะลดลง เพราะอัตราการระเหยมากกว่าอัตราการควบแน่น แต่เมื่อตั้งทิ้งไว้สักพักหนึ่งระดับน้ำในขวดจะคงที่ เพราะว่า อัตราการระเหยกลายเป็นไอของน้ำจะเท่ากับอัตราการควบแน่นกลายเป็นหยดน้ำของไอน้ำในสถานะเช่นนี้เราเรียกว่าเกิดสมดุลการเปลี่ยนแปลงสถานะของของเหลว (น้ำ) เรียกว่าเป็นสมดุลแบบพลวัตหรือสมดุลไดนามิก (Dynamic Equilibrium)



จากการศึกษาสมบัติของเหลวและการระเหยของของเหลวที่ผ่านมาเราสามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ต่างๆ ได้ดังนี้



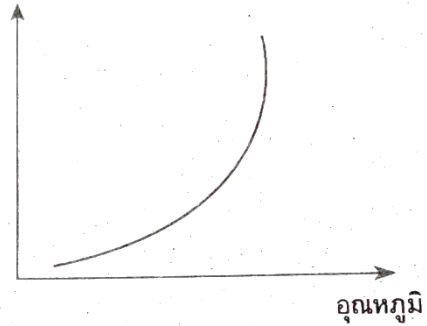
ความดันไอ



แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล

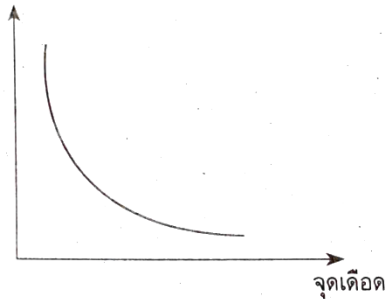
- ของเหลวที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลน้อยจะระเหยกลายเป็นไอได้ง่ายทำให้ความดันไอสูง
- ของเหลวที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลมากจะระเหยกลายเป็นไอได้ยากทำให้ความดันไอต่ำ

ความดันไอ



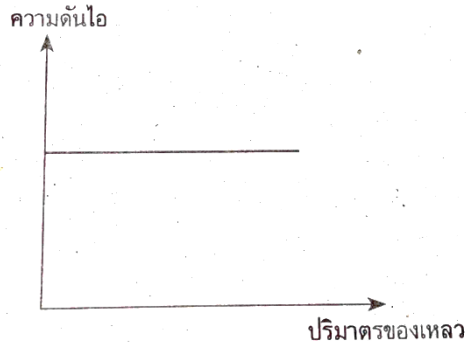
- ถ้าของเหลวมีอุณหภูมิต่ำโมเลกุลจะมีพลังงานจลน์สูง จึงกลายเป็นไอได้มากทำให้ความดันไอสูง
- ถ้าของเหลวมีอุณหภูมิต่ำโมเลกุลจะมีพลังงานจลน์ต่ำ จึงกลายเป็นไอได้น้อยทำให้ความดันไอต่ำ

ความดันไอ



-ของเหลวที่มีความดันไอสูงแสดงว่ากลายเป็นไอได้ง่าย จึงมีจุดเดือดต่ำ

-ของเหลวที่มีความดันไอต่ำแสดงว่ากลายเป็นไอได้ยาก จึงมีจุดเดือดสูง



ถ้านำน้ำ 1 ลิตรและ 2 ลิตรใส่ในกะละมังขนาดเท่ากัน อัตราระเหยกลายเป็นไอจะเท่ากัน เพราะ

จำนวนโมเลกุลน้ำที่ผิวหน้าเท่ากันทำให้ความดันไอเท่ากัน ดังนั้นความดันไอจึงไม่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณของเหลว

### ความดันไอกับจุดเดือดของของเหลว

หลังจากเรานำของเหลวใส่ภาชนะแล้วปิดฝาให้สนิท เมื่อของเหลวระเหยกลายเป็นไอโมเลกุลจะชน

ผนังภาชนะทำให้เกิดความดันไอเหนือผิวของของเหลว ถ้าให้ความร้อนกับของเหลวไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งความ

ดันที่เกิดจากไอของของเหลวเท่ากับความดันบรรยากาศขณะทดลอง ของเหลวจะเกิดการเดือดและเรียก

อุณหภูมินี้ว่าจุดเดือดของของเหลว ถ้าความดันบรรยากาศขณะทดลองเป็น 1 บรรยากาศจะเรียกว่าจุดเดือดปกติ

- ของเหลวที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลน้อยจะกลายเป็นไอได้ง่าย ทำให้ความดันไอสูงจะมีจุดเดือดต่ำ และมีความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอต่ำ

- ของเหลวที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลมากจะกลายเป็นไอได้ยาก ทำให้ความดันไอต่ำ จะมีจุดเดือดสูง และมีความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอสูง

## สมบัติของแก๊ส

โดยทั่วไปสารที่มีสถานะเป็นแก๊ส ได้แก่ ธาตุโลหะ เช่น ไนโตรเจน ( $N_2$ ) ออกซิเจน ( $O_2$ )

ไฮโดรเจน ( $H_2$ ) และธาตุหมู่ 8 ส่วนสารโคเวเลนต์มักเป็นสารที่มีมวลโมเลกุลต่ำ โมเลกุลแก๊สจะมีขนาดเล็กมาก และอยู่ห่างกันจนถือว่าไม่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกัน

**อุณหภูมิ (Temperature)** ใช้สัญลักษณ์ T หน่วยที่ใช้คำนวณคือเคลวิน (K) เท่านั้น

กำหนดอุณหภูมิในหน่วยอื่นมาให้จะต้องมีการแปลงหน่วยเหล่านั้นให้เป็นเคลวินโดยใช้สูตร ดังนี้

$$\frac{C}{5} = \frac{F - 32}{9} = \frac{R}{4} = \frac{K - 273}{5}$$

**ปริมาตร (Volume)** ใช้สัญลักษณ์ V หน่วยที่มักใช้ในการคำนวณ ได้แก่  $dm^3$ ,  $cm^3$  และ ml

โดย  $1 dm^3 = 1000 cm^3 = 1000 ml = 1000 cc. = 1000$  ลูกบาศก์เซนติเมตร = 1 (ลิตร)

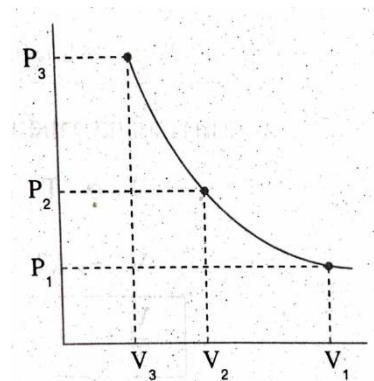
**ความดัน (Pressure)** ใช้สัญลักษณ์ P หน่วยที่มักใช้ในการคำนวณ ได้แก่

1 atm (บรรยากาศ) = 760 mmHg

= 76 cmHg

**ความสัมพันธ์ของปริมาตร ความดัน และอุณหภูมิของแก๊ส**

กฎของบอยล์ (Boyle's Law) ในปี พ.ศ. 2205 (คศ. 1662) รอเบิร์ต บอยล์ (Robert Boyle) นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษได้ทดลองศึกษาสมบัติของแก๊สได้ข้อมูลดังนี้



จากการทดลองพบว่าปริมาตรของแก๊สจะแปรผกผันกับความดัน รอเบิร์ต บอยล์จึงสรุปผลการทดลองได้  
ใจความว่า ในสภาวะที่อุณหภูมิและมวลของแก๊สคงที่ ปริมาตรของแก๊สจะแปรผกผันกับความดัน

ถ้าความดันที่กระทำต่อแก๊สในภาชนะมาก ปริมาตรแก๊สจะน้อย  
ถ้าความดันที่กระทำต่อแก๊สในภาชนะน้อย ปริมาตรแก๊สจะมาก

เราสามารถเขียนความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์จากผลการทดลองดังนี้

$$V \propto \frac{1}{P}$$

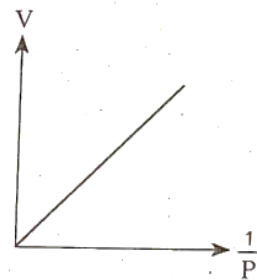
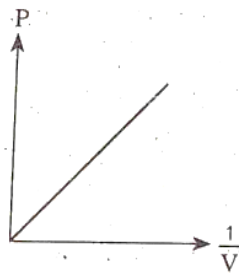
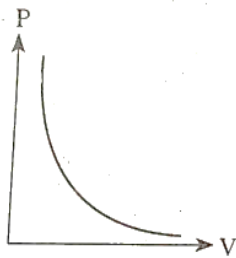
$$V = \frac{k}{P}$$

$$PV = k$$

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 = P_3 V_3 = P_4 V_4 = \dots\dots\dots P_n V_n$$

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

และสามารถเขียนกราฟจากการทดลองตามกฎของบอยล์ดังนี้



กฎของชาร์ลส์ จากส์ ชาร์ลส์ได้ศึกษาทดลองสมบัติของแก๊ส ในสภาวะที่มวลและความดันคงที่ แล้ว

พบว่า "ในสภาวะที่ความดันและมวลของแก๊สคงที่ ปริมาตรของแก๊สจะแปรผันโดยตรงกับอุณหภูมิในหน่วยเคลวิน"

ถ้าอุณหภูมิของแก๊สเพิ่มขึ้น ปริมาตรของแก๊สจะมากขึ้น  
ถ้าอุณหภูมิของแก๊สลดลง ปริมาตรของแก๊สจะลดลง

เราสามารถเขียนความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์จากผลการทดลองได้ดังนี้

$V \propto T$  โดยมวลและความดัน

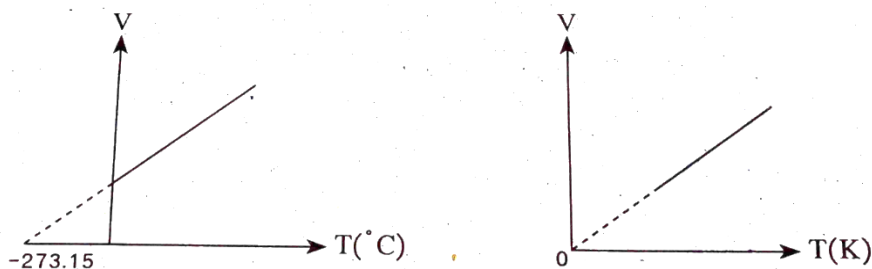
$$V = kT$$

$$\frac{V}{T} = k$$

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} = \frac{V_3}{T_3} \dots\dots = \frac{V_n}{T_n}$$

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

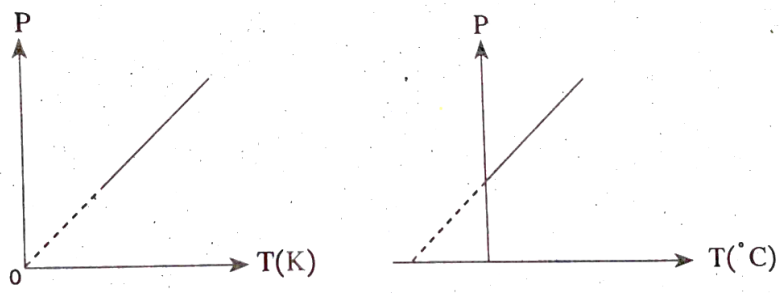
และสามารถเขียนกราฟจากการทดลองตามกฎของชาร์ลส์ได้ดังนี้



กฎของเกย์-ลูสแซก หรือกฎของอามันตัน จากการทดลองแก๊สที่มีมวลและปริมาตรคงที่พบว่า "ในสภาวะที่ปริมาตรและมวลของแก๊สคงที่ ความดันจะแปรผันโดยตรงกับอุณหภูมิเคลวิน"

ถ้าอุณหภูมิของแก๊สสูงขึ้น ความดันของแก๊สจะเพิ่มขึ้น  
 ถ้าอุณหภูมิของแก๊สลดลง ความดันของแก๊สจะลดลง

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง P และ T ตามกฎของเกย์ ลูสแซก



กราฟเส้นเต็ม (—) เกิดจากการทดลองจริง

กราฟเส้นประ (-----) เกิดจากการลากเส้นกราฟเพิ่มเติมจากผลการทดลองจริง เพราะถ้า T ต่ำมากแก๊สจะควบแน่นกลายเป็นของเหลวหรือของแข็ง จึงไม่ได้ทดลองในช่วงอุณหภูมิต่ำมาก ๆ

เราสามารถเขียนความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์จากผลการทดลองดังนี้

$$V \propto T$$

$$V = kT$$

$$\frac{V}{T} = k$$

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \dots = \frac{P_n}{T_n}$$

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$$

เมื่อปริมาตรแลลละมวลคงที่

กฎรวมแก๊ส (Comhined Gas Law) เกิดจากการรวมกฎของบอยล์ และกฎของชาร์ลส์เข้าด้วยกันดังนี้

กฎของบอยล์  $V \propto \frac{1}{P}$

กฎของชาร์ลส์  $V \propto T$

รวมกฎทั้งสอง  $V \propto \frac{T}{P}$

$$V = \frac{kT}{P}$$

$$\therefore \frac{PV}{T} = k$$

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \dots = \frac{P_n V_n}{T_n}$$

$$\therefore \boxed{\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}} \quad \text{โดยมวลคงที่}$$

**สรุปสูตรชุดที่ 1** (กฎของบอยล์, ชาร์ลส์ เกย์ - ลูสแซกและกฎรวมแก๊ส)

(1) สูตรกฎของบอยล์  $P_1 V_1 = P_2 V_2$  โดยมวลและ T คงที่

(2) สูตรกฎของชาร์ลส์  $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$  โดยมวลและ P คงที่

(3) สูตรกฎของเกย์-ลูสแซก  $\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$  โดยมวลและ V คงที่

(4) สูตรกฎรวมแก๊ส  $\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$  โดยมวลคงที่

**กฎของอาโวกาโดร** (Avogadro's Law) มีใจความว่า

"ในสภาวะที่อุณหภูมิและความดันของแก๊สคงที่ ปริมาตรของแก๊สจะแปรผันโดยตรงกับจำนวนโมลของแก๊สนั้น" เราจึงเขียนความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้ ดังนี้

$$V \propto T$$

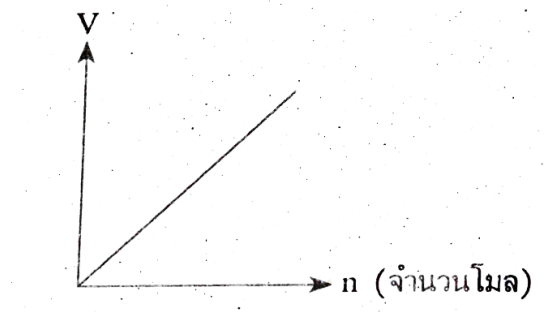
$$V = kn$$

$$\frac{V}{n} = k$$

$$\frac{V_1}{n_1} = \frac{V_2}{n_2} \dots = \frac{V_n}{n_n}$$

$$\therefore \boxed{\frac{V_1}{n_1} = \frac{V_2}{n_2}} \quad \text{โดย T และ P คงที่}$$

กราฟแสดงความสัมพันธ์ตามกฎของอาโวกาโดร



### กฎแก๊สสมบูรณ์

สมการสถานะของแก๊ส (Equation state) เกิดจากการรวมกฎของแก๊ส 3 กฎ เข้าด้วยกัน คือ กฎของบอยล์, ชาร์ลส์ และกฎของอาโวกาโดร ดังนี้

กฎของบอยล์  $V \propto \frac{1}{P}$  ; W+T คงที่

กฎของชาร์ลส์  $V \propto T$  ; W+P คงที่

กฎของอาโวกาโดร  $V \propto n$  ; W+T คงที่

รวมกฎทั้งสาม  $V \propto \left(\frac{1}{P}\right) (T) (n)$



$$V \propto \frac{nT}{P}$$

$$V \propto \frac{nRT}{P}$$

$$\therefore \boxed{PV = nRT}$$

โดย  $R = 0.082 \text{ dm}^3 \text{ atm K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$

$R$  = ค่าคงที่สากลของแก๊ส หรือ Universal Gas Constant

$R$  = จะไม่ขึ้นกับความดัน หรือ ปริมาตร หรืออุณหภูมิใด ๆ แต่จะขึ้นอยู่กับหน่วยของตัวแปร

$P, V, T$  = ที่ใช้ในการคำนวณ หน่วยที่ใช้จะต้องสอดคล้องกับหน่วยของค่า  $R$  เสมอ

$P$  = ความดันมีหน่วยเป็น atm

$V$  = ปริมาตร มีหน่วยเป็น  $\text{dm}^3$  หรือ l

$T$  = อุณหภูมิ มีหน่วยเป็น K

จากความรู้พื้นฐาน จำนวนโมล หรือ

$$\boxed{n = \frac{w}{M} = \frac{N}{6.02 \times 10^{23}}}$$

โดย  $n$  = มวลของแก๊ส

$w$  = จำนวนโมเลกุลของแก๊สมิ่หน่วยเป็นกรัม

$M$  = จำนวนโมเลกุลของแก๊สมิ่หน่วยเป็น  $\text{g mol}^{-1}$

$N$  = มวลโมเลกุลของแก๊ส

จากสูตร  $PV = nRT$  แต่  $n = \frac{w}{M}$

$$\therefore \boxed{PV = \frac{w}{M} RT}$$
 ใช้คำนวณกรณีโจทย์ถามหรือให้ข้อมูลเกี่ยวกับมวล ( $w$ ) และมวลโมเลกุล ( $M$ )

จากสูตร  $PV = \frac{w}{M} RT$

จัดรูปสมการใหม่จะได้  $P = \frac{wRT}{VM}$  แต่  $\frac{w}{V} = \frac{\text{มวล}}{\text{ปริมาตร}} = d$

$P = \frac{dRT}{M} \quad \therefore \quad d = \frac{PM}{RT}$  ใช้ในกรณีโจทย์ถามหรือให้ข้อมูลเกี่ยวกับความหนาแน่นของแก๊ส

**ข้อควรระวัง** ในการคำนวณค่า d ต้องมีหน่วย g/dm<sup>3</sup> หรือ g/l จึงจะใช้แทนค่าในสูตรได้

**การคำนวณความหนาแน่นของแก๊สในเชิงเปรียบเทียบ**

**กรณีที่ 1** แก๊สชนิดเดียวกันแต่อยู่ในสภาวะอุณหภูมิและความดันต่างกัน

แก๊สชนิดเดียวกันจะมี M เท่ากัน เมื่ออยู่ในสภาวะอุณหภูมิและความดันแตกต่างกัน ค่า T และ P จะต่างกัน

จากสูตร  $P = \frac{dRT}{M}$

แก๊สสภาวะที่ 1  $P_1 = \frac{d_1RT_1}{M} \quad \therefore \quad \frac{R}{M} = \frac{P_1}{d_1T_1} \quad \dots\dots\dots(1)$

แก๊สสภาวะที่ 2  $P_2 = \frac{d_2RT_2}{M} \quad \therefore \quad \frac{R}{M} = \frac{P_2}{d_2T_2} \quad \dots\dots\dots(2)$

แต่ (1) = (2)  $\therefore \quad \frac{P_1}{d_1T_1} = \frac{P_2}{d_2T_2}$

$$\frac{d_1T_1}{P_1} = \frac{d_2T_2}{P_2}$$

**กรณีที่ 2** แก๊สต่างชนิดกันแต่อยู่ในสภาวะอุณหภูมิและความดันเดียวกัน

สูตร  $P = \frac{dRT}{M}$

แก๊สชนิดที่ 1  $P_1 = \frac{d_1RT}{M_1} \quad \therefore \quad \frac{R}{M} = \frac{PM_1}{d_1} \quad \dots\dots\dots(1)$

แก๊สชนิดที่ 2  $P_2 = \frac{d_2RT}{M_2} \quad \therefore \frac{R}{M} = \frac{PM_2}{d_2} \dots\dots\dots(2)$

แต่ (1) = (2)  $\therefore \frac{PM_1}{d_1} = \frac{PM_2}{d_2}$  แต่  $M_1 \neq M_2$

$$\therefore \boxed{\frac{M_1}{M_2} = \frac{d_1}{d_2}}$$

สรุปสูตรชุดที่ 2  $PV = nRT = \frac{wRT}{M} = \frac{N}{6.02 \times 10^{23}}$  และ  $P = \frac{dRT}{M}$

**กฎความดันย่อยของดอลตัน (Dalton's Law of Partial Pressure)**

เมื่อเรานำแก๊สตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปมาผสมกันโดยไม่เกิดปฏิกิริยาต่อกัน ความดันรวมของแก๊สในภาชนะ จะเท่ากับความดันย่อยของแก๊สแต่ละชนิดรวมกัน และถือว่าแก๊สแต่ละชนิดภายหลังผสมจะมีปริมาตร เท่ากับปริมาตรภาชนะ

สมมตินำแก๊ส 3 ชนิดมาผสมกัน จากสูตร  $PV = nRT$

$$P = \frac{nRT}{M}$$

$$\boxed{P_T = P_1 + P_2 + P_3}$$

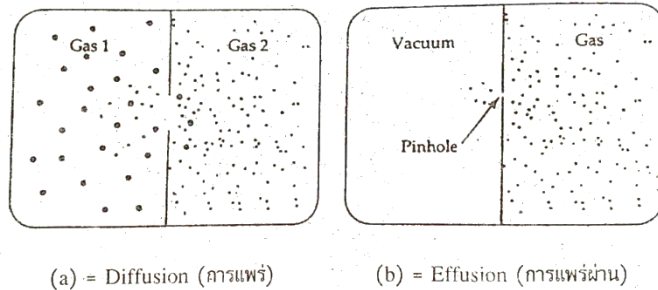
$$P_T = \frac{n_1RT}{V} + \frac{n_2RT}{V} + \frac{n_3RT}{V}$$

**การแพร่ของแก๊ส**

**กฎการแพร่ของเกรแฮม (Graham's Law of Diffusion)**

การแพร่ผ่าน (Effusion) คือ การที่โมเลกุลของแก๊สเคลื่อนที่จากบริเวณหนึ่งผ่านรูที่เล็กมาก ๆ ออกสู่ บริเวณอื่น โดยโมเลกุลไม่มีการชนกันเองเลย

**การแพร่ (Diffusion)** คือการที่โมเลกุลของแก๊สที่พุ่งกระจายจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า โดยโมเลกุลของแก๊สจะมีโอกาสชนกันตลอดเวลา



จากการทดลองนำขวดบรรจุแก๊ส  $\text{NH}_3$  และ  $\text{H}_2\text{S}$  ไปวางไว้ที่มุมห้องซึ่งไม่มีลมแล้วเปิดฝาทิ้งไว้ สักพักหนึ่งถ้าเรายืนอยู่กึ่งกลางห้องเราจะได้กลิ่น  $\text{NH}_3$  ก่อนหลังจากนั้นจึงได้กลิ่น  $\text{H}_2\text{S}$  ทั้ง ๆ ที่ไม่มีลมพัดในห้อง แสดงว่าโมเลกุลของแก๊สทั้งสองเกิดการแพร่ขึ้น  $\text{NH}_3$  แพร่ได้เร็วกว่าเพราะมีมวลโมเลกุลน้อยกว่า  $\text{H}_2\text{S}$  ถ้าเป็นแก๊สชนิดเดียวกันอัตราการแพร่และอัตราการแพร่ผ่านจะมีค่าเท่ากัน ในปี ค.ศ. 1830 โทมัส เกรแฮม (Thomas Graham) นักวิทยาศาสตร์ชาวสกอตแลนด์ ได้ศึกษาทดลองเกี่ยวกับการแพร่ของแก๊สแล้วผลการทดลองเป็นใจความว่า

"ในสภาวะอุณหภูมิและความดันคงที่ อัตราการแพร่ของแก๊สทุกชนิดจะเป็นปฏิภาคผกผันกับรากที่สองของมวลโมเลกุลหรือความหนาแน่นของแก๊สนั้น" เรียกว่ากฎการแพร่ของเกรแฮม

$$\text{อัตราการแพร่} = \frac{\text{จำนวนโมเลกุลของแก๊สที่ผ่านรูพรุน}}{\text{เวลา}} \quad \text{หรือ}$$

$$\text{อัตราการแพร่} = \frac{\text{ความดันที่ลดลง}}{\text{เวลา}}$$

เราสามารถเขียนความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์จากการแพร่ของเกรแฮมได้ว่า  $R \propto \frac{\sqrt{1}}{M}$  หรือ  $R \propto \frac{\sqrt{1}}{d}$

ดังนั้น แก๊สที่มี M หรือ d น้อยจะแพร่ได้เร็ว (R สูง)

แก๊สที่มี M หรือ d สูงจะแพร่ได้ช้า (R ต่ำ)

$$\therefore R = \frac{\sqrt{k}}{M} \quad \text{หรือ} \quad R = \frac{\sqrt{k}}{d}$$

ในการคำนวณเกี่ยวกับอัตราการแพร่ของแก๊สนั้นโดยทั่วไปจะเป็นการศึกษาอัตราการแพร่ของแก๊สใน

เชิงเปรียบเทียบระหว่างแก๊ส 2 ชนิด

$$R_1 = \sqrt{\frac{k_1}{M_1}} \quad R_2 = \sqrt{\frac{k_2}{M_2}}$$

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{\sqrt{\frac{k_1}{M_2}}}{\sqrt{\frac{k_2}{M_1}}} = \sqrt{\frac{k_1}{M_1}} \times \sqrt{\frac{M_2}{k_2}} \quad \text{ในสภาวะอุณหภูมิและความดันเดียวกันแก๊ส}$$

ทุกชนิดจะมีค่า k เท่ากัน

$$\therefore \frac{R_1}{R_2} = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}} \quad \text{ในทำนองเดียวกัน} \quad \frac{R_1}{R_2} = \sqrt{\frac{d_2}{d_1}}$$

$\text{อัตราเร็ว} = \frac{\text{ระยะทางที่แพร่ (s)}}{\text{เวลาที่ใช้แพร่ (t)}}$
--

$$R = \frac{s}{t} \quad \therefore \quad R_1 = \frac{s_1}{t_1}, \quad R_2 = \frac{s_2}{t_2}$$

$$\therefore \frac{R_1}{R_2} = \frac{\frac{s_1}{t_1}}{\frac{s_2}{t_2}} = \frac{s_1}{t_1} \times \frac{t_2}{s_2}$$

สรุปสูตรชุดที่ 3 กฎการแพร่ของเกรแฮม

$\frac{R_1}{R_2} = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}} = \sqrt{\frac{d_2}{d_1}} = \frac{s_1}{t_1} \times \frac{t_2}{s_2}$
--

โดย  $R_1, R_2$  คืออัตราเร็วของแก๊สชนิดที่ 1 และ 2 ตามลำดับ นิยมใช้หน่วย cm/s

$M_1, M_2$  คือมวลโมเลกุลของแก๊สชนิดที่ 1 และ 2 ตามลำดับ มีหน่วยเป็น g mol<sup>-1</sup>

$D_1, d_2$	คือความหนาแน่นของแก๊สชนิดที่ 1 และ 2 ตามลำดับ นิยมใช้หน่วย $\text{g/dm}^3$ หรือ $\text{g/l}$
$S_1, S_2$	คือระยะทางที่แพร่ได้ของแก๊สชนิดที่ 1 และ 2 ตามลำดับ นิยมใช้หน่วย $\text{cm}$
$T_1, t_2$	คือเวลาที่ใช้ในการแพร่ของแก๊สชนิดที่ 1 และ 2 ตามลำดับ นิยมใช้หน่วย $\text{s}$ (วินาที), $\text{min}$ (นาที)

# สรุปการคำนวณเกี่ยวกับแก๊ส

โจทย์ถามเกี่ยวกับความเร็ว

ทฤษฎีจลน์

$$E = \frac{1}{2} MV^2$$

อัตราการแพร่

$$\frac{R_1}{R_2} = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}} = \sqrt{\frac{d_2}{d_1}} = \frac{s_1}{t_1} \times \frac{t_2}{s_2}$$

โจทย์ถามปริมาณที่ไม่เกี่ยวกับความเร็ว

มวลคงที่

(1) กฎของบอยล์

(2) กฎของชาร์ลส์

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}; P \text{ คงที่}$$

(3) กฎของอามันตัน (เกย์-ลูสแซก)

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}; V \text{ คงที่}$$

(4) กฎรวมแก๊ส

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

มวลไม่คงที่

(1) กฎของอาโวกาโดร

(2) กฎความดันย่อยของดอนตัน

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3 + \dots$$

(3) สมการสภาวะของแก๊ส

$$3.1 PV = nRT$$

$$3.2 PV = \frac{WRT}{M}$$

$$3.3 PV = \frac{NRT}{6.02 \times 10^{23}}$$

$$3.4 P = \frac{dRT}{M}$$

# สรุปการคำนวณเกี่ยวกับแก๊ส

โจทย์ถามเกี่ยวกับความเร็ว

ทฤษฎีจลน์

$$E = \frac{1}{2} MV^2$$

อัตราการแพร่

$$\frac{R_1}{R_2} = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}} = \sqrt{\frac{d_2}{d_1}} = \frac{s_1}{t_1} \times \frac{t_2}{s_2}$$

โจทย์ถามปริมาณที่ไม่เกี่ยวกับความเร็ว

มวลคงที่

(1) กฎของบอยล์

(2) กฎของชาร์ลส์

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}; P \text{ คงที่}$$

(3) กฎของอามันตัน (เกย์-ลูสแซก)

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}; V \text{ คงที่}$$

(4) กฎรวมแก๊ส

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

มวลไม่คงที่

(1) กฎของอาโวกาโดร

(2) กฎความดันย่อยของดอนตัน

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3 + \dots$$

(3) สมการสถานะของแก๊ส

$$3.1 \ PV = nRT$$

$$3.2 \ PV = \frac{WRT}{M}$$

$$3.3 \ PV = \frac{NRT}{6.02 \times 10^{23}}$$

$$3.4 \ P = \frac{dRT}{M}$$





## ทฤษฎีจลน์ของแก๊ส (The Kinetic Theory of Gases)

(1) แก๊สทุกชนิดจะประกอบด้วยอนุภาคเดี่ยว ๆ ขนาดเล็กมาก เรียกว่าโมเลกุล ถ้าเป็นโมเลกุลของแก๊สชนิดเดียวกันจะมีขนาดและมวลเท่ากัน

(2) โมเลกุลมีขนาดเล็กมากจนถือว่ามีปริมาตรเป็นศูนย์ และอยู่ห่างกันมาก เราจึงสามารถบีบอัดปริมาตรแก๊สให้หดเล็กน้อยได้ง่ายมากเมื่อเทียบกับสารที่อยู่ในสถานะของแข็งและของเหลว

(3) การที่โมเลกุลของแก๊สอยู่ห่างกันมากจึงถือว่าไม่มีแรงกระทำต่อกัน ทำให้โมเลกุลของแก๊สเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ จึงทำให้แก๊สฟุ้งกระจายเต็มภาชนะเสมอ

(4) โมเลกุลแก๊สจะมีการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง และไม่มีทิศทางเคลื่อนที่ที่แน่นอน (random motion) จะมีการเปลี่ยนทิศทางเคลื่อนที่เมื่อโมเลกุลชนกันเองหรือชนผนังภาชนะเท่านั้น

(5) การที่โมเลกุลของแก๊สชนกันเองหรือชนผนังภาชนะเป็นการชนกันแบบอีลาสติก คือพลังงานจลน์รวมของโมเลกุลที่ชนกันจะมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง ถ้าโมเลกุลหนึ่งสูญเสียพลังงานจลน์ไปเท่าใด อีกโมเลกุลหนึ่งจะมีพลังงานจลน์เพิ่มขึ้นเท่านั้น ส่วนการที่โมเลกุลชนผนังภาชนะโมเลกุลยังคงมีพลังงานจลน์เท่าเดิม

(6) ความดันของแก๊สจะเกิดจากการที่โมเลกุลเคลื่อนที่ชนผนังภาชนะเท่านั้น การชนกันเองจะไม่ทำให้เกิดความดันโดยความดันจะสูง ถ้าโมเลกุลชนผนังด้วยความเร็วและความแรงสูงรวมถึงอัตราความถี่ในการชนผนังภาชนะสูง

(7) พลังงานจลน์เฉลี่ยของโมเลกุลทั้งหมดจะแปรผันโดยตรงกับอุณหภูมิหรืออาจกล่าวได้ว่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของหนึ่งโมเลกุลหรือหนึ่งโมเลกุลแปรผกผันโดยตรงกับอุณหภูมิ

$$E_k = \frac{1}{2} mv^2$$

โดย  $E_k =$  พลังงานจลน์ของโมเลกุล

$m =$  มวลของแก๊ส

$V =$  ความเร็วของโมเลกุล

(8) แก๊สทุกชนิดจะมีพลังงานจลน์เฉลี่ยเท่ากันถ้าอยู่ในสภาวะอุณหภูมิเดียวกัน

การใช้ทฤษฎีจลน์อธิบายกฎของแก๊ส

**กฎของบอยล์** ในสภาวะที่อุณหภูมิคงที่โมเลกุลของแก๊สชนิดเดียวกันจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเฉลี่ยคงที่ เมื่อทำให้ปริมาตรของแก๊สลดลง โดยมีจำนวนโมเลกุลเท่าเดิม ความหนาแน่นของแก๊สในภาชนะเพิ่มขึ้นทำให้อัตราการชนผนังภาชนะของโมเลกุลเพิ่มขึ้น ความดันของแก๊สเพิ่มขึ้น

**กฎของชาร์ลส์** เมื่ออุณหภูมิของแก๊สเพิ่มขึ้นจะทำให้พลังงานจลน์และความเร็วเฉลี่ยของโมเลกุลเพิ่มขึ้น อัตราการชนผนังภาชนะและความแรงในการชนเพิ่มขึ้น ควรจะเพิ่มความดันเพิ่มขึ้น เพื่อรักษาความดันของระบบให้คงที่ แก๊สจึงเกิดการขยายตัวเพื่อให้อัตราการชนผนังภาชนะลดลง

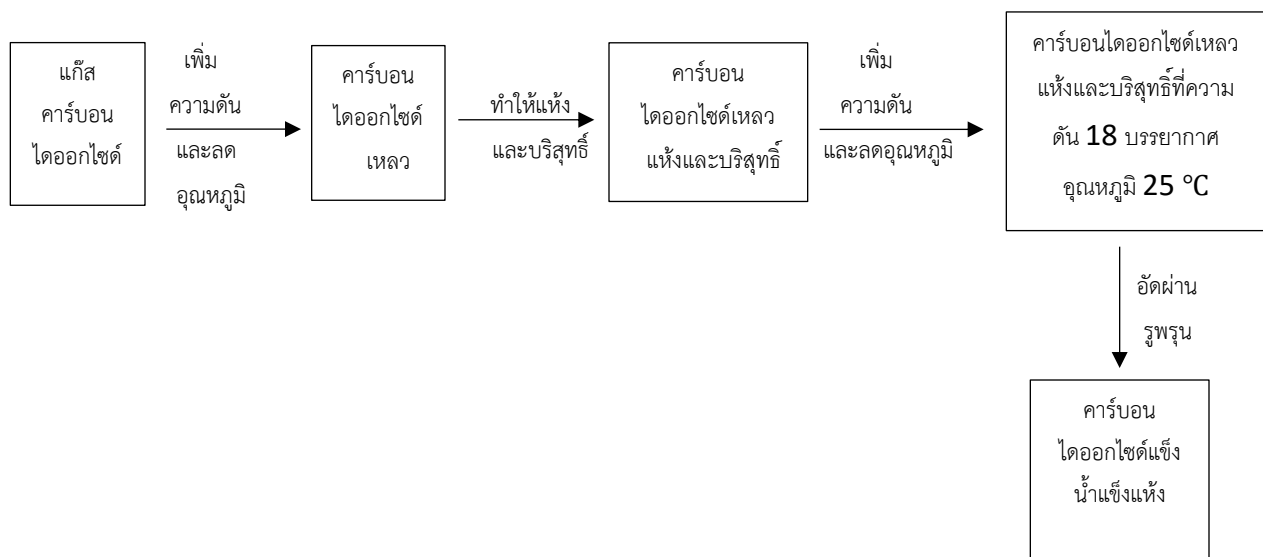
**กฎของเกย์-ลูสแซก** เมื่ออุณหภูมิของแก๊สเพิ่มขึ้น พลังงานจลน์และความเร็วเฉลี่ยของโมเลกุลเพิ่มขึ้น อัตราการชนผนังภาชนะและความแรงในการชนเพิ่มขึ้น แต่ปริมาตรภาชนะคงที่จึงเพิ่มความดันของแก๊สในระบบเพิ่มขึ้น

### เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับสมบัติของของแข็ง ของเหลว และแก๊ส

เทคโนโลยีที่ควรทราบได้แก่ เทคโนโลยีการผลิตน้ำแข็งแห้ง การทำไนโตรเจนเหลว และการสกัดสารโดยใช้ CO<sub>2</sub> ในรูปของของไหล

#### การทำน้ำแข็งแห้ง

น้ำแข็งแห้งคือคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในสถานะของแข็ง เมื่ออุณหภูมิประมาณ -79 °C กระบวนการทำน้ำแข็งแห้งเริ่มจากการนำแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มาเพิ่มความดันและลดอุณหภูมิ แล้วทำให้บริสุทธิ์และปราศจากความชื้นแล้วนำมาเพิ่มความดันและลดอุณหภูมิจนกระทั่งมีความดันประมาณ 18 บรรยากาศและอุณหภูมิประมาณ -25 °C หลังจากให้อัดคาร์บอนไดออกไซด์เหลวผ่านรูพรุนจะได้คาร์บอนไดออกไซด์คล้ายเกล็ดน้ำแข็งแล้วจึงนำมาอัดให้เป็นก้อนซึ่งเรียกว่าน้ำแข็งแห้ง (Dry ice)



## รูปแสดงแผนผังทำน้ำแข็งแห้ง

### การสกัดสารโดยใช้ CO<sub>2</sub> ในรูปของของไหล

คือเทคนิคการสกัดที่ใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในรูปของไหลสกัดสารที่ต้องการแทนตัวทำละลายที่เป็นของเหลว เช่น เฮกเซน และเอซีโตน เป็นต้น โดย CO<sub>2</sub> จะเป็นของไหลเมื่ออยู่ในสภาวะอุณหภูมิ 31 °C และความดัน 73 atm ซึ่งเรียกว่าภาวะวิกฤตยิ่งยวด มีสมบัติไหลได้ขยายตัวเต็มภาชนะได้เหมือนแก๊สละลายสารได้ทั้งที่เป็นของแข็งและของเหลว เทคนิคนี้นิยมใช้สกัดคาเฟอีนออกจากเมล็ดกาแฟแทนการใช้เมทิลีนคลอไรด์ (CH<sub>2</sub> Cl<sub>2</sub>) ซึ่งมีข้อดีคือไม่มีสารตกค้าง เพราะ CO<sub>2</sub> จะเป็นแก๊สแพร่ออกไปจากเมล็ดกาแฟ และมีการนำไปใช้สกัดน้ำมัน และสารต่าง ๆ จากสมุนไพรหลายชนิด

### การทำไนโตรเจนเหลว (Liquid Nitrogen)

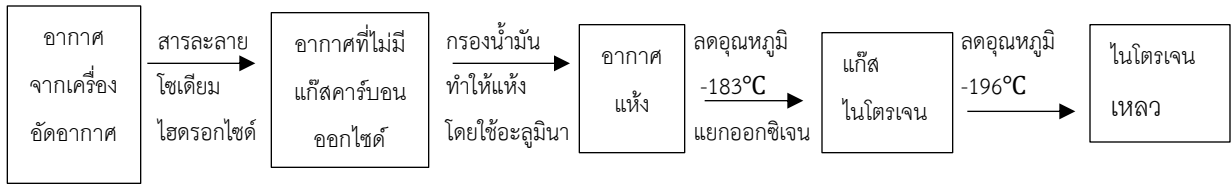
สมบัติของแก๊สไนโตรเจน

1. เป็นแก๊สไม่มีสี ไม่มีกลิ่น
2. ละลายในน้ำได้เล็กน้อย
3. เบากว่าอากาศ

**ขั้นตอนการทำไนโตรเจนเหลว** เริ่มจากการดูดอากาศเข้าเครื่องอัดแล้วผ่านอากาศลงในสารละลาย NaOH เพื่อกำจัดแก๊ส CO<sub>2</sub> หลังจากนั้นผ่านอากาศที่ได้เข้าเครื่องกรองน้ำมัน เพื่อแยกน้ำมันและดูดความชื้นโดยใช้สารดูดความชื้น เช่น อะลูมินา (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) เพื่อให้ได้อากาศแห้ง แล้วลดอุณหภูมิอากาศแห้งให้ถึง -183 °C จะทำให้ CO<sub>2</sub> เหลวแยกตัวออกมาก่อน เมื่อลดอุณหภูมิต่อจนถึง -196 °C ไนโตรเจนเหลวจะแยกตัวออกมา ส่วนแก๊สที่เหลือคือไฮโดรเจนและแก๊สเฉื่อยจะนำไปใช้ประโยชน์อย่างอื่นต่อไป

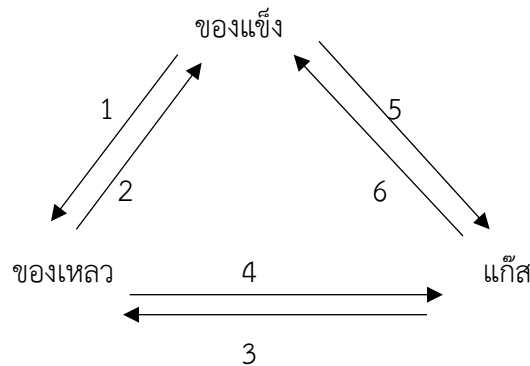
### ประโยชน์ของไนโตรเจนเหลว

1. ใช้ทำความเย็นเพื่อแช่แข็งอาหาร
2. แช่แข็งเลือด เซลล์ไขกระดูก เพื่อยืดอายุการเก็บรักษา



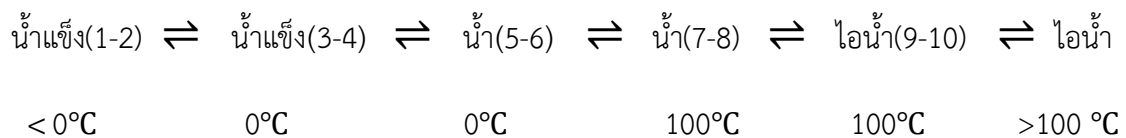
รูปแสดงแผนผังการทำไนโตรเจนเหลว

สรุปแผนภาพการเปลี่ยนสถานะของสาร



- (1) = การหลอมเหลว (Melting) = กระบวนการดูดพลังงาน
- (2) = การแข็งตัว (Freezing) = กระบวนการคายพลังงาน
- (3) = การกลายเป็นไอ (Vaporization) = กระบวนการดูดพลังงาน
- (4) = การควบแน่น (Condensation) = กระบวนการคายพลังงาน
- (5) = การระเหิด (Sublimation) = กระบวนการดูดพลังงาน
- (6) = การตกผลึก (Deposition) = กระบวนการคายพลังงาน

การเปลี่ยนแปลงสถานะของน้ำ



กระบวนการ ( 1), (3), (5), (7) และ (9) เป็นกระบวนการดูดพลังงาน

กระบวนการ ( 2), (4), (6), (8) และ ( 10) เป็นกระบวนการคายพลังงาน

