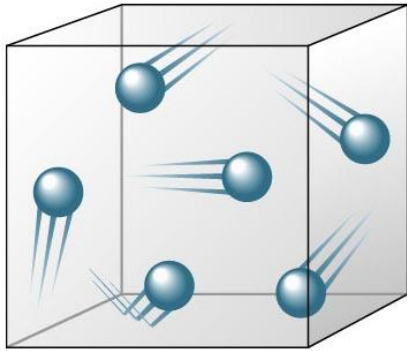
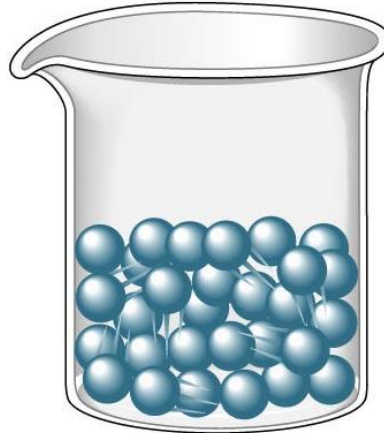


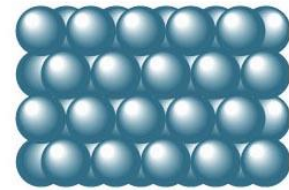
# LIQUID



Gas



Liquid



Solid

ความไม่เป็นระเบียบ (entropy) เพิ่มขึ้น

แก๊ส: เคลื่อนที่ตลอดเวลา มีแรงกระทำต่อกันน้อย

ของเหลว: เคลื่อนที่ได้ ไหลได้ มีแรงกระทำต่อกันมาก

ของแข็ง: เคลื่อนที่ไม่ได้ มีแรงกระทำต่อกันมากกว่าของเหลว

Table 1 สมบัติทั่วไปของแก๊ส ของเหลวและของแข็ง

สถานะ สมบัติ	แก๊ส	ของเหลว	ของแข็ง
ปริมาตร	ไม่แน่นอน เท่ากับภาชนะ	แน่นอน	แน่นอน
รูปร่าง	เหมือนภาชนะ	เหมือนภาชนะ	แน่นอน
ความหนาแน่น	ต่ำ	สูง	สูง
ความสามารถ ในการถูกบีบ	ถูกบีบได้ง่าย	ถูกบีบได้ เล็กน้อย	ไม่สามารถถูก บีบได้
การเคลื่อนที่ ของโมเลกุล	มีอิสระในการ เคลื่อนที่สูง	เคลื่อนที่ไปมา ได้	ไม่เคลื่อนที่ แต่ สั่นสะเทือนได้

# แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล (Intermolecular Forces)

## Intermolecular forces

แรงระหว่างโมเลกุลมีผลต่อสมบัติทางกายภาพเช่น สถานะ  
จุดเดือด และ จุดหลอมเหลว

## Intramolecular forces

แรงยึดเหนี่ยวภายในโมเลกุลหรือระหว่างอะตอมมีผลต่อ  
ความเสถียรของโมเลกุล

**Intramolecular forces** จะมากกว่า **Intermolecular forces**

ระเหยน้ำ 1 โมล ที่ จุดเดือด  $\Rightarrow 41 \text{ kJ}$

แยก O-H 2 พันธะ ในน้ำ 1 โมล  $\Rightarrow 930 \text{ kJ}$

# Intermolecular Forces

## van der Waals forces

1. แรงไดโพล-ไดโพล (Dipole-dipole)
2. แรงไดโพล-ไดโพลเหนี่ยวนำ (Dipole-induced dipole)
3. แรงลอนดอนดิสเพอร์ชัน (London-dispersion)

## Ion-dipole forces

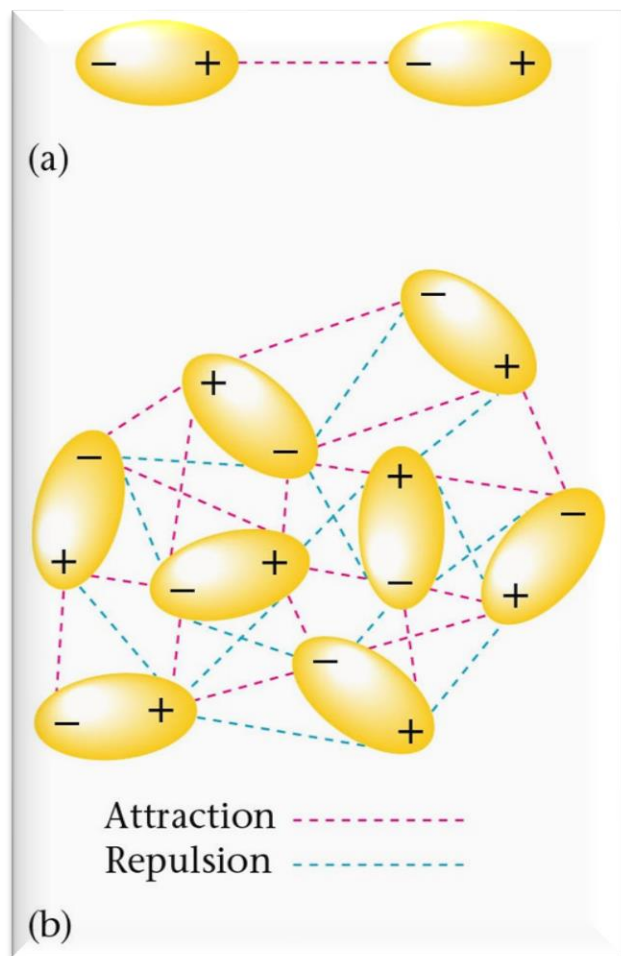
## Hydrogen bonding

# แรงไดโพล-ไดโพล (Dipole-Dipole Forces)

- แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วโมเลกุลที่มีค่าไดโพลโมเมนต์
- แรงทางไฟฟ้าสถิตอธิบายโดยกฎของคูลอมบ์
- ตัวอย่างโมเลกุลมีขั้วเช่น  $\text{HCl}$ ,  $\text{HBr}$ ,  $\text{HI}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ ,  $\text{CH}_3\text{COOH}$

แรงไดโพล-ไดโพล มีความแรงประมาณ 1% ของแรงดึงดูดจากพันธะไอออนิกและพันธะโควาเลนต์

# Dipole-Dipole Interactions



(a) Interaction of two polar molecules.

(b) Interaction of many dipoles molecules

**Fig 1** แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว จะหันขั้วชนิดต่างกันเข้าหันทัน

# แรงไอออน-ไดโพล (Ion-dipole Forces)

- แรงทางไฟฟ้าสถิต ไม่ใช่ van der Waal forces
- แรงระหว่างไอออน (บวก หรือ ลบ) กับโมเลกุลมีขั้ว
- ความแรงขึ้นกับประจุและขนาดไอออนกับขนาดของไดโพลโมเมนต์และขนาดโมเลกุล



Fig 2 แรงไอออนไดโพลของการละลาย NaCl ในน้ำ

# แรงดิสเพอร์ชัน (Dispersion Forces)

- แรงระหว่างอะตอมเดี่ยวหรือระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้ว
- มีไดโพลเหนี่ยวนำ (Induced dipole) เกิดขึ้นซึ่งเกิดจากการกระจายอิเล็กตรอนไม่สม่ำเสมอในอะตอม/โมเลกุลไม่มีขั้ว

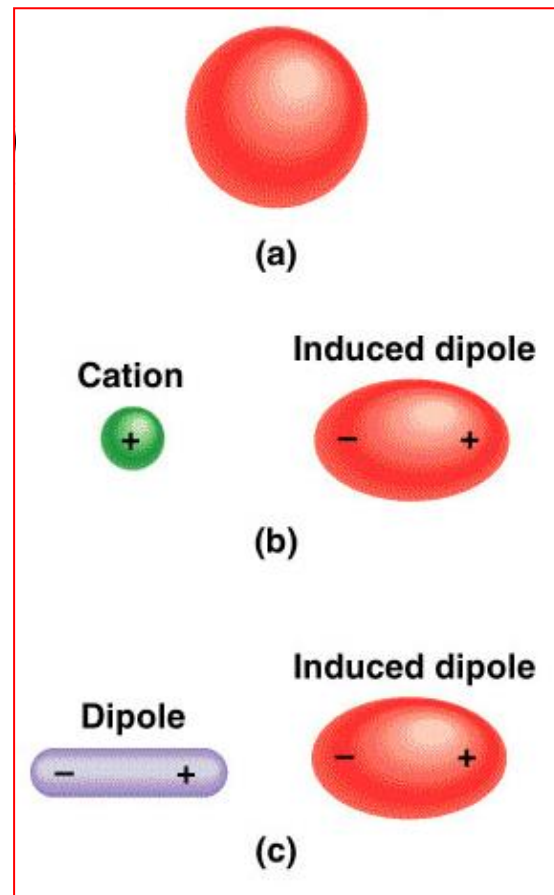
อนุภาคทุกชนิดจะมี dispersion forces (London forces) เกิดจาก

- ⇒ instantaneous dipole-induced dipole
  - ⇒ ion-induced dipole
  - ⇒ dipole-induced dipole
- } Related to polarizability  
(ความสามารถในการกระจาย  $e^-$ )





**Fig 3** การเลี้ยวเบนของลำน้ำ  
จากบิวเรตจากการเหนี่ยวนำ  
ของประจุบนแท่งยาง  
ebonite

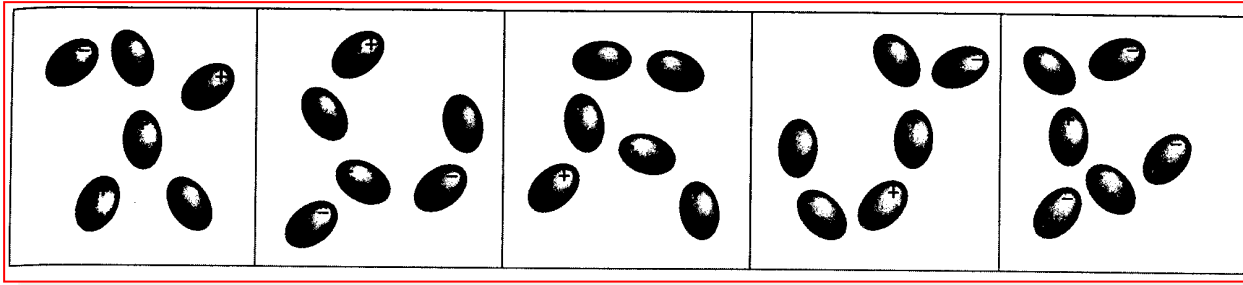


**Fig 4** แรงเหนี่ยวนำที่เกิดกับฮีเลียม (a) การกระจายสม่ำเสมอ  
(b) ถูกเหนี่ยวนำด้วยไอออนบวก และ (c) ถูกเหนี่ยวนำด้วยโมเลกุลมีขั้ว

ไดโพลเหนี่ยวนำ (Induced dipole) นอกจากจะขึ้นกับขนาดไอออนและความแรงของไดโพลแล้วยังขึ้นกับโพลาไรซาบิลิตี (Polarizability) ของอะตอมหรือโมเลกุลไม่มีขั้วด้วย

- ✓ **Polarizability** ความยากง่ายของอิเล็กตรอนในอะตอมหรือโมเลกุลไม่มีขั้วที่จะถูกเหนี่ยวนำ
- ✓ อิเล็กตรอนไม่ถูกยึดอย่างแน่นหนาโดยนิวเคลียส จะถูกโพลาไรซ์ได้ง่าย
- ✓ Fritz London (1930) เสนอว่าความแรงของดิสเพอร์ชันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่า polarizability ของอะตอมหรือโมเลกุล

He มี 2 อิเล็กตรอนอยู่ใน 1S orbital ถูกยึดไว้ค่อนข้างแข็งแรง จึงมีค่า polarizability น้อย แรงดิสเพอร์ชันน้อย จุดเดือดต่ำ (4.2 K)



**Fig 5** แรงไดโพลเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นชั่วขณะกับแก๊สไม่มีขั้ว (He)  
ในสภาพควบแน่น

**Table 2** จุดหลอมเหลวของสารประกอบไม่มีขั้วที่ขึ้นกับ Dispersion force

COMPOUND	MELTING POINT (°C)
CH <sub>4</sub>	-182.5
CF <sub>4</sub>	-150.0
CCl <sub>4</sub>	- 23.0
CBr <sub>4</sub>	90.0
Cl <sub>4</sub>	171.0

Ex.1 จงบอกชนิดของ intermolecular forces ต่อไปนี้

(ก)  $\text{HBr}$  กับ  $\text{H}_2\text{S}$  dipole-dipole forces, dispersion forces

(ข)  $\text{Cl}_2$  กับ  $\text{CBr}_4$  dispersion forces

(ค)  $\text{I}_2$  กับ  $\text{NO}_3^-$  ion-induced dipole forces, dispersion forces

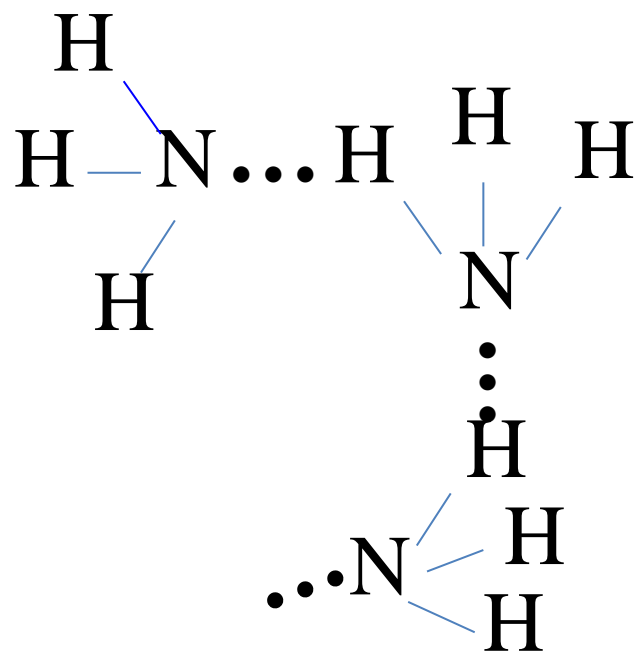
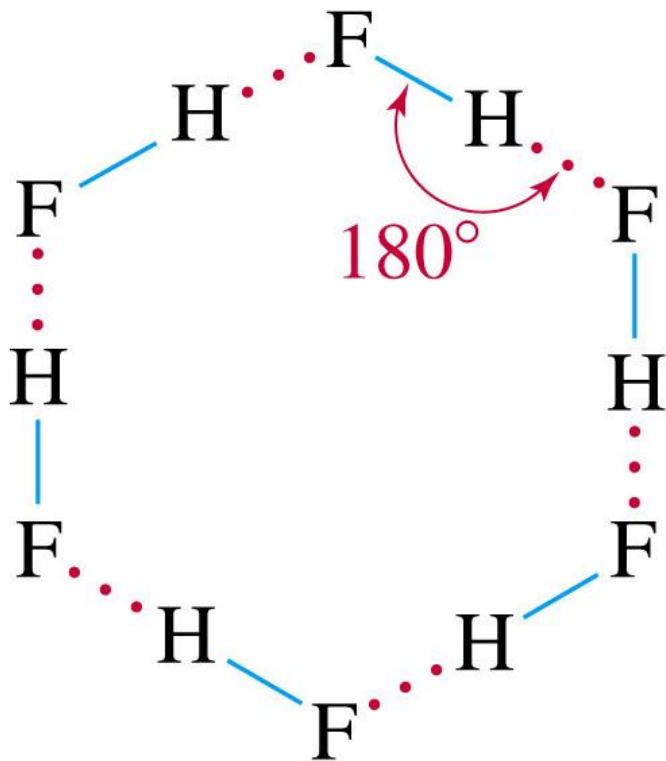
(ง)  $\text{NH}_3$  กับ  $\text{C}_6\text{H}_6$  dipole-induced dipole forces, dispersion forces

# พันธะไฮโดรเจน

## (The Hydrogen bond)

- H-bond เป็นแรงยึดเหนี่ยวไดโพล-ไดโพลชนิดพิเศษ
- พบในโมเลกุลเมื่อ H เกิดพันธะที่มีขั้ว เช่น N-H, O-H, F-H (F, O, N มี electronegativity สูง)
- พลังงานเฉลี่ยของ H-bond อาจสูงถึง 40 kJ/mol
- แนวพันธะส่วนใหญ่เป็นเส้นตรง ที่อาจเบี่ยงเบนไปไม่เกิน  $30^\circ$   
(A - H-----B - H)
- H-bond มีผลต่อจุดเดือด
- สารประกอบไฮโดรเจนของหมู่เดียวกันจุดเดือดมากขึ้นเมื่อ MW เพิ่มขึ้น ( $T_b$ :  $\text{HCl} < \text{HBr} < \text{HI}$ ) เนื่องจากแรง van der Waals

# Hydrogen Bonding in HF and NH<sub>3</sub>



➤ สารประกอบไฮโดรเจนของหมู่ 5A, 6A, 7A คำนวณ 2 เนื่องจาก H-bonding ( $T_b : H_2O > HF > NH_3$ )

➤ ความแรงของ H-bond :  $H-F > H-O > H-N$

➤ ความแรงของ H-bond ขึ้นอยู่กับแรงยึดเหนี่ยวแบบคูลอมบ์ ระหว่าง lone-pair electrons ของ electronegative atom กับ นิวเคลียสของ H

➤ จุดเดือดขึ้นกับความแรงและจำนวน H-bond ต่อ 1 โมเลกุล (HF มี 2 H-bond,  $H_2O$  มี 4 H-bond)

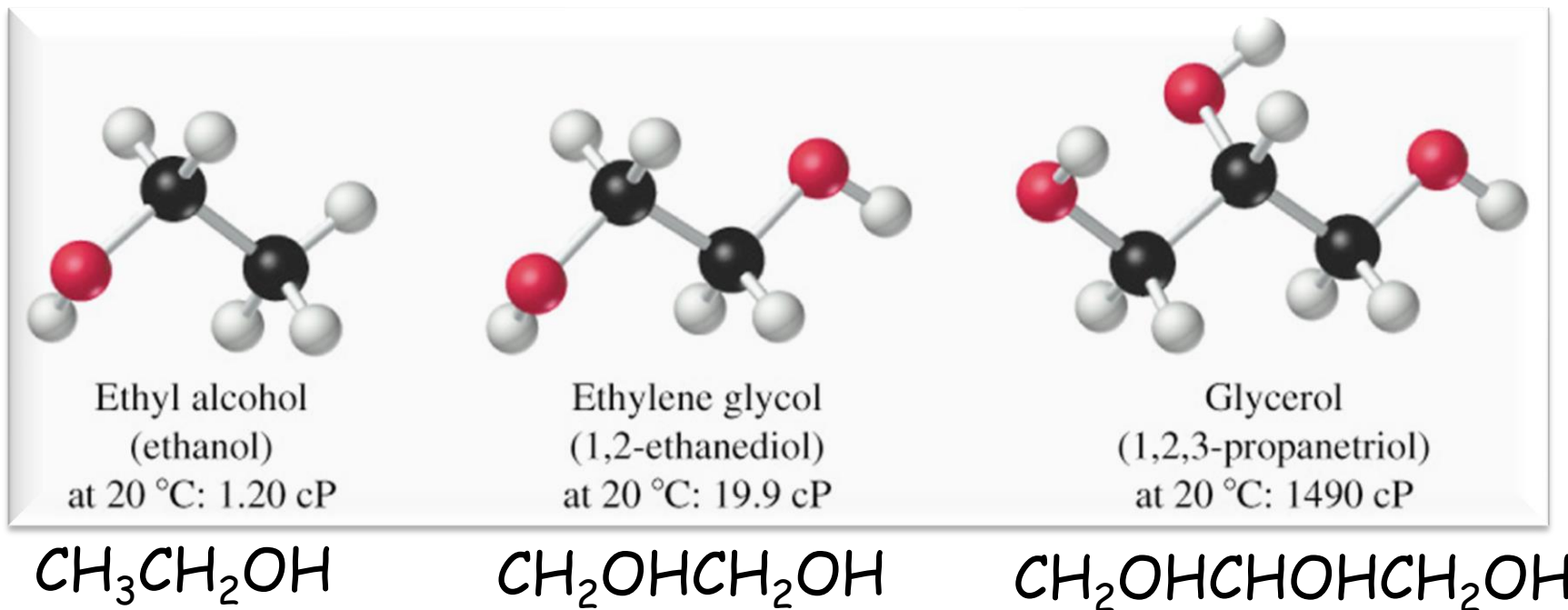
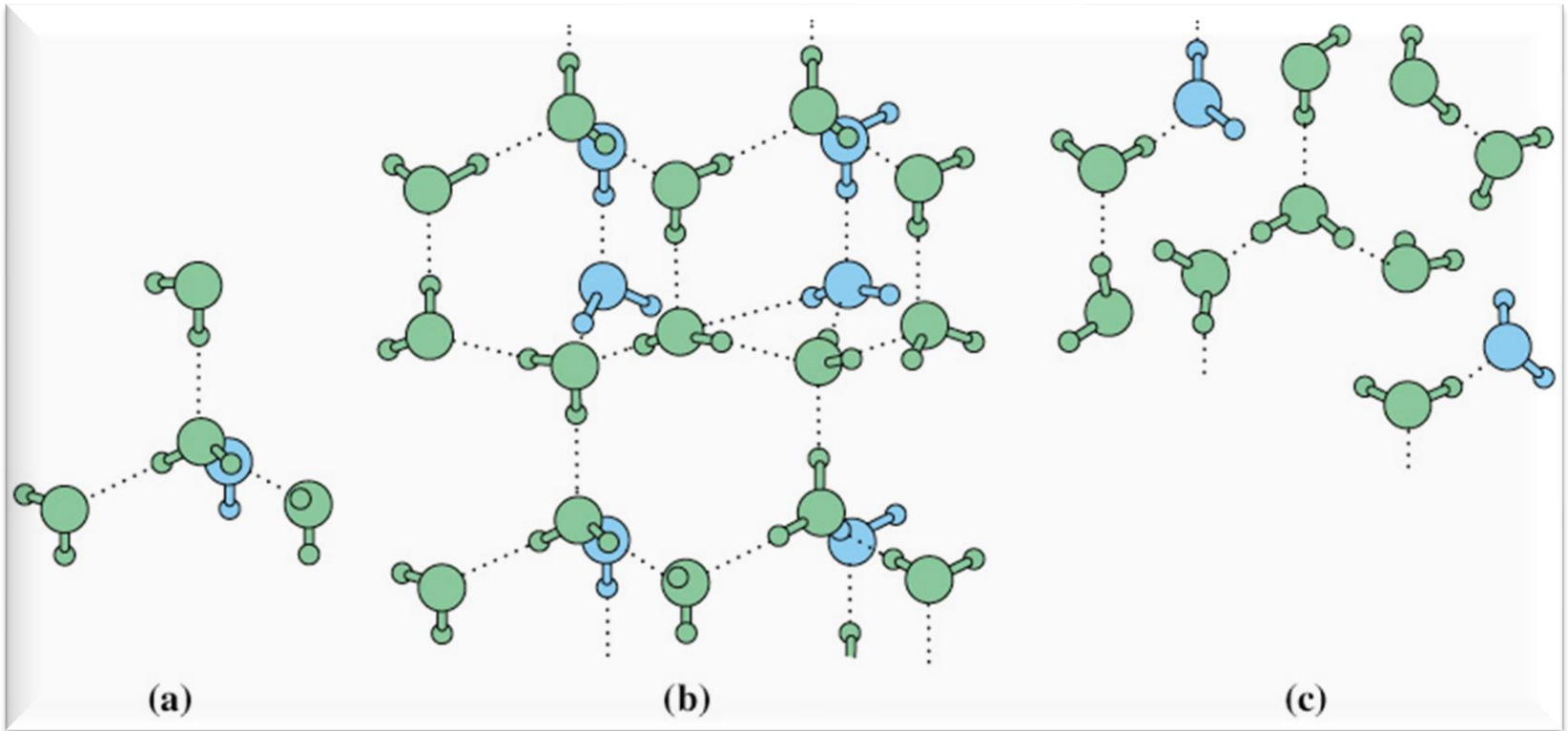


Fig 6 พันธะไฮโดรเจนที่เกิดกับสารต่างๆ

ความแรงของ H-bond มีผลต่อจุดเดือด



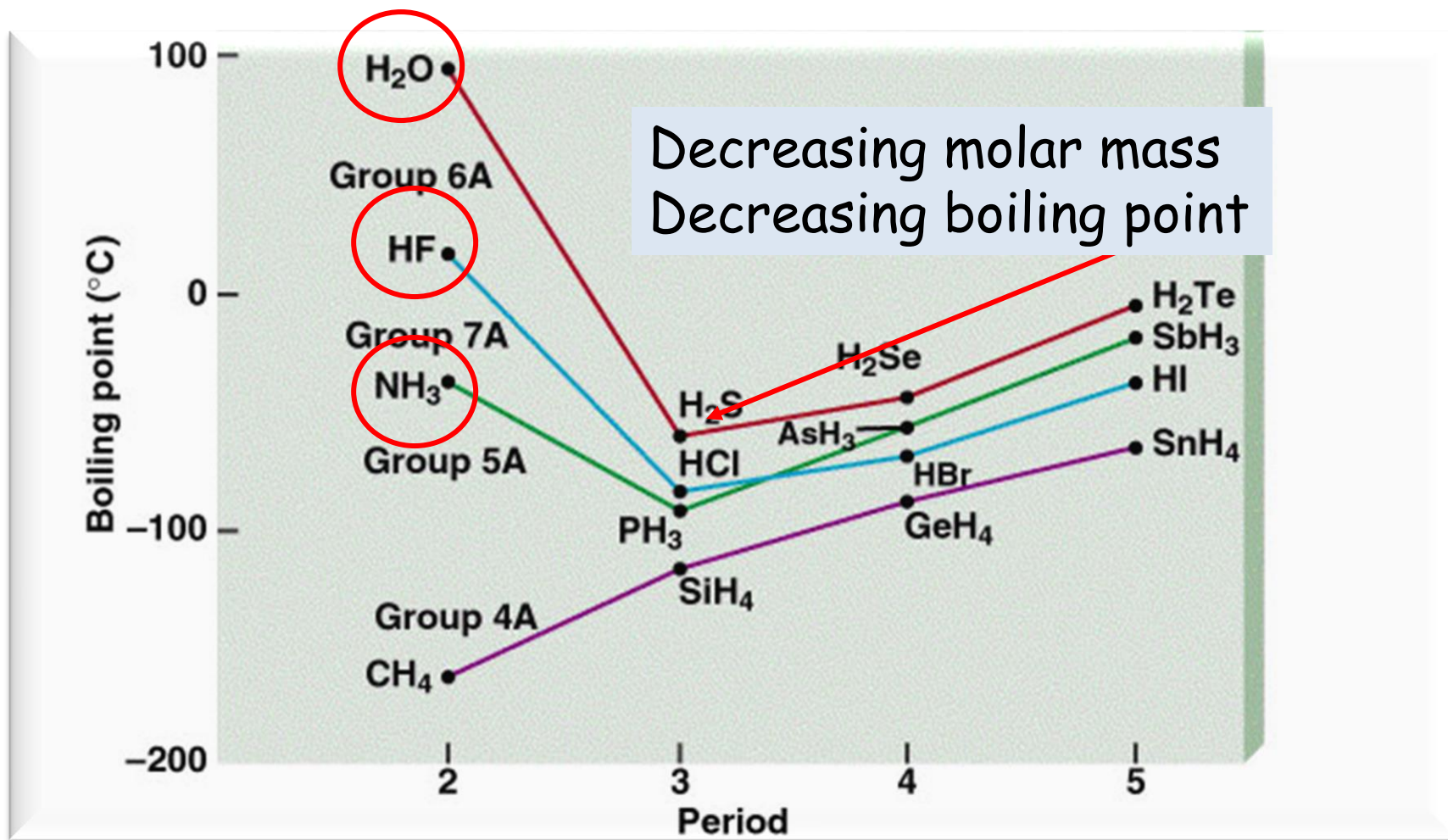
# Hydrogen Bonding in Water



around a molecule

in the solid

in the liquid



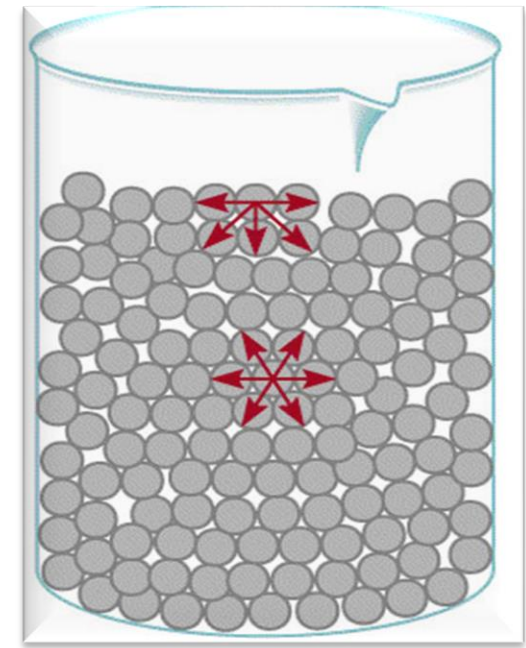
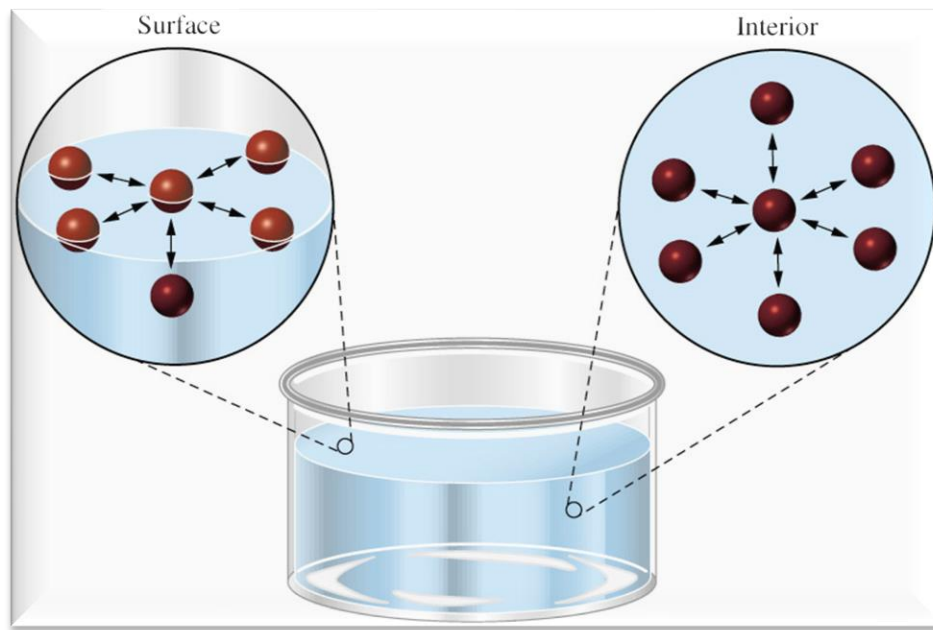
**Fig 7** จุดเดือดของสารประกอบไฮไดรด์ของธาตุหมู่ 4A, 5A, 6A และ 7A

# สมบัติของของเหลว (Properties of Liquids)

ของเหลวมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล มีปริมาตรที่ค่อนข้างแน่นอน และรูปร่างขึ้นกับภาชนะ และยังมีสมบัติอื่นต่างจากแก๊สและของแข็ง

## แรงตึงผิว (Surface tension)

- โมเลกุลภายในของเหลวถูกดึงดูดทุกทิศทางเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล โมเลกุลที่ด้านบนถูกดึงดูดลงโดยโมเลกุลที่อยู่ด้านล่าง
- แรงดึงดูดที่ผิวของของเหลวคือแรงตึงผิว
- แรงตึงผิวเป็นปริมาณของพลังงานที่ใช้ในการเพิ่มหรือยืดพื้นที่ผิวต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่



**Fig 8** แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ผิวและภายในของเหลว

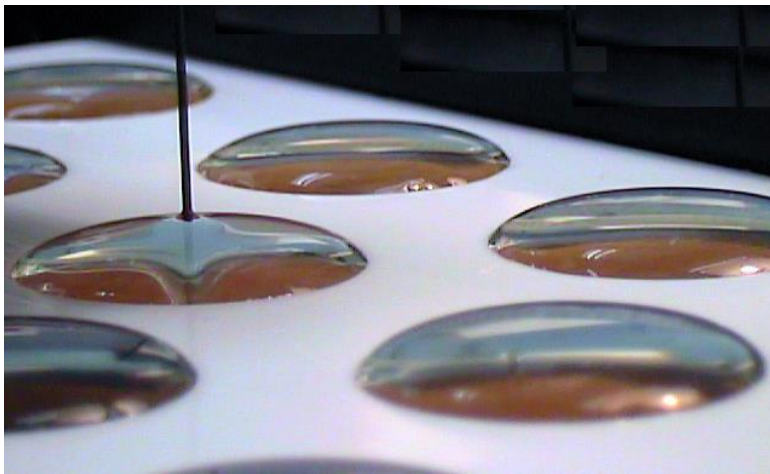
**Intermolecular forces** มาก => **Surface tension** มาก

อุณหภูมิของของเหลว ถ้าอุณหภูมิของเหลวเพิ่มขึ้น แต่ละโมเลกุลมีพลังงานจลน์เพิ่มขึ้น  
แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลน้อยลง จะทำให้แรงตึงผิวน้อยลง

การเกิดหยดน้ำบนผิวรถยนต์หรือบนผิวแอปเปิล  $H_2O$  มีขั้ว ส่วน **wax** ไม่มีขั้ว เกิดแรงยึดเหนี่ยวได้น้อยมาก แต่น้ำมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันเองมากน้ำจึงรวมตัวเป็นหยดเพื่อให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสน้อยที่สุด



# Surface tension



# Capillary Action: Cohesion vs. Adhesion

**Cohesion (cohesive force)** : แรงระหว่างโมเลกุลที่เหมือนกัน

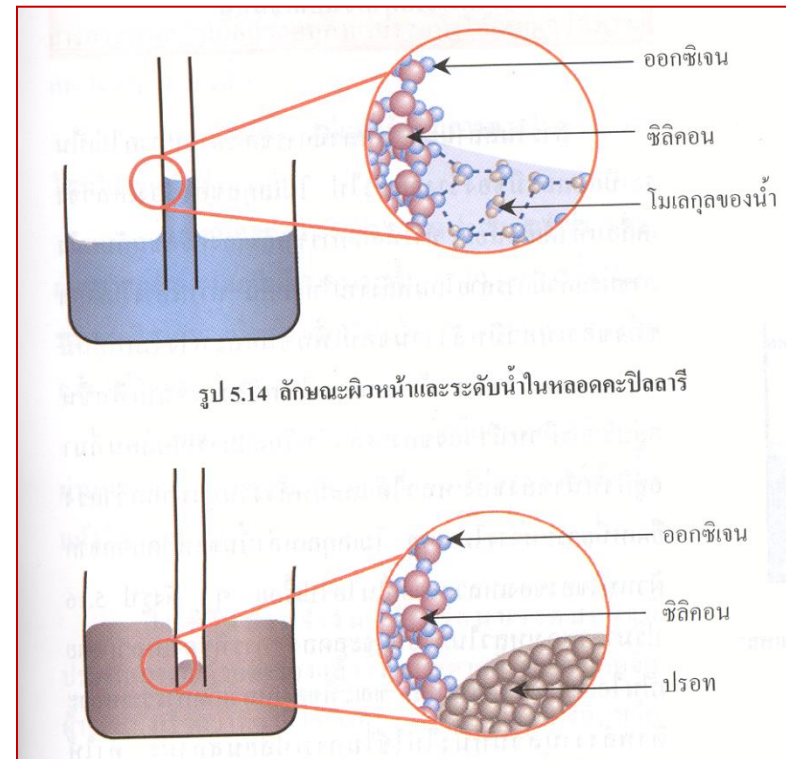
**Adhesion (adhesion force)** : แรงระหว่างโมเลกุลที่ต่างกัน

น้ำถูกดึงขึ้นในหลอดแก้ว

=> adhesion > cohesion

ปรอทถูกดึงลงใน

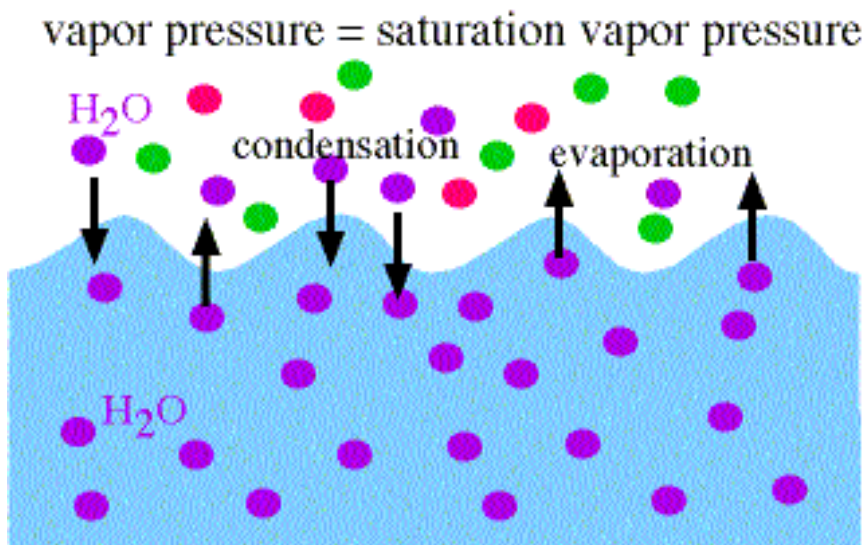
หลอดแก้ว => cohesion > adhesion



**Fig 9** (a) เมื่อแอดฮีชันระหว่างแก้วกับน้ำมากกว่าโคฮีชันระหว่างน้ำ และ (b) เมื่อโคฮีชันระหว่างปรอทมากกว่าแอดฮีชันระหว่างปรอทกับแก้ว

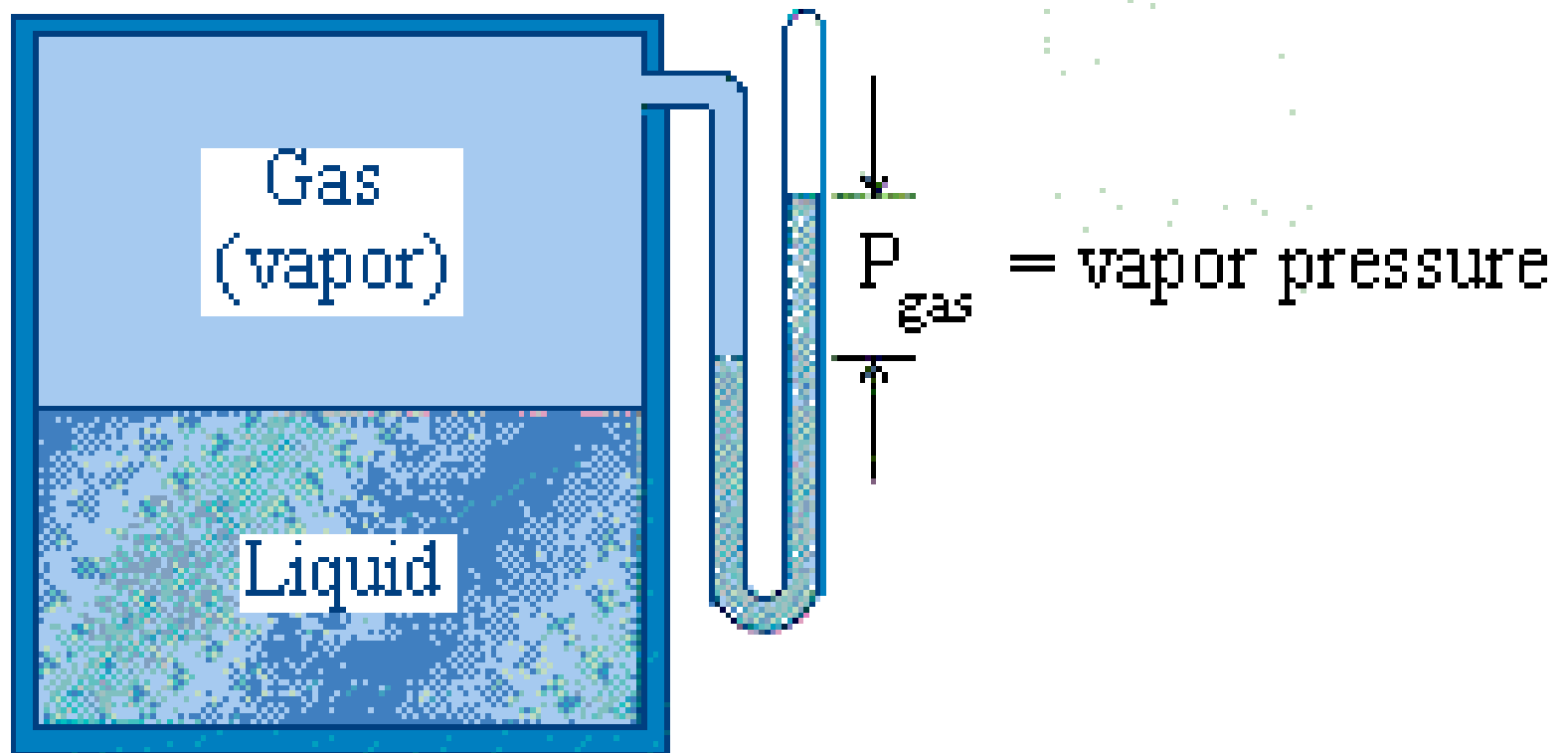
# ความดันไอ (Vapor Pressure)

ความดันไอของของเหลวเกิดจากโมเลกุลของไอของเหลวชนผนังภาชนะ และในขณะเดียวกันที่เกิดการระเหยในภาชนะปิดนั้นจะเกิดการควบแน่นด้วยเพราะไอของเหลว ที่อยู่ติดผิวหน้าของเหลวถูกดึงดูดโดยโมเลกุลที่ยังไม่ระเหย ไอของเหลวก็จะกลับไปเป็นของเหลวตามเดิมได้



เมื่ออัตราการระเหยเท่ากับอัตราการควบแน่น ความดันไอที่วัดได้เรียกว่า ความดันไอสมดุล (equilibrium vapor pressure) เรียกสั้นๆ ว่าความดันไอ

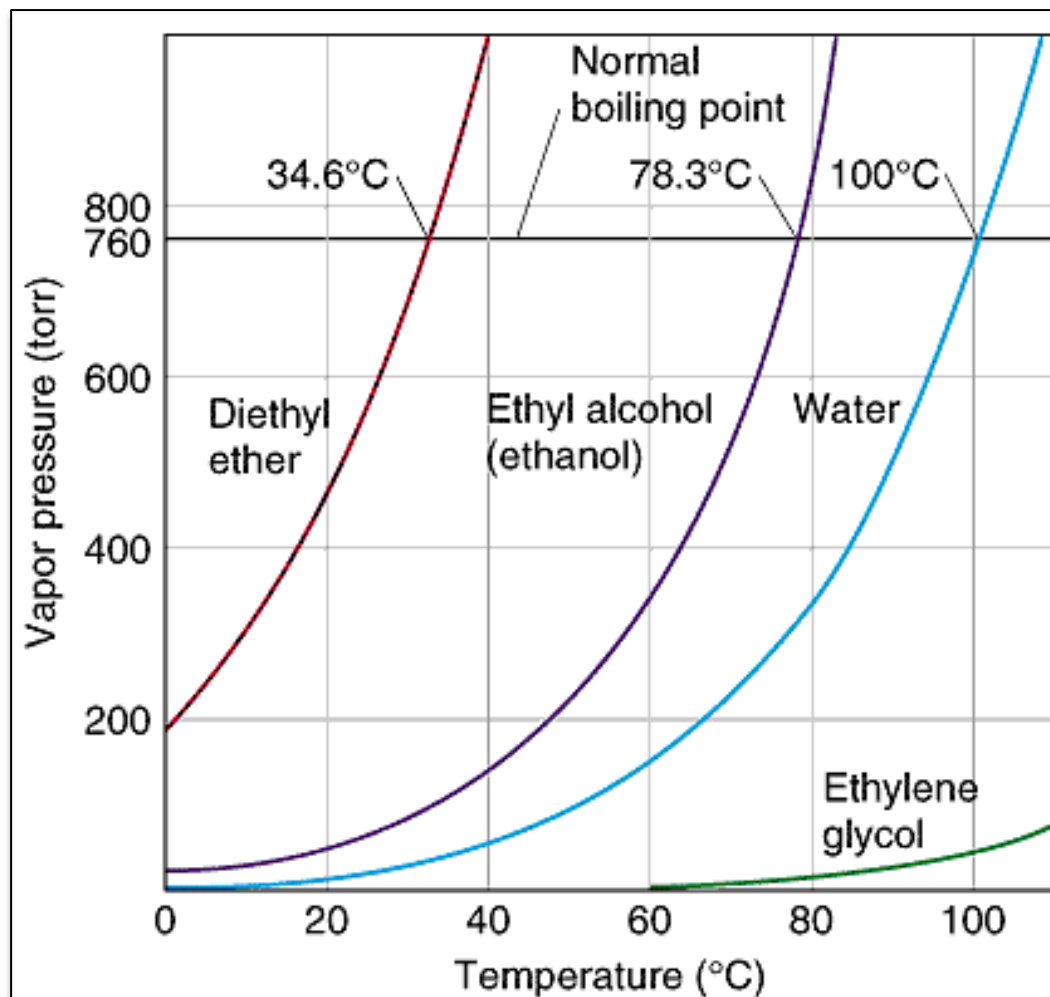
# Manometer





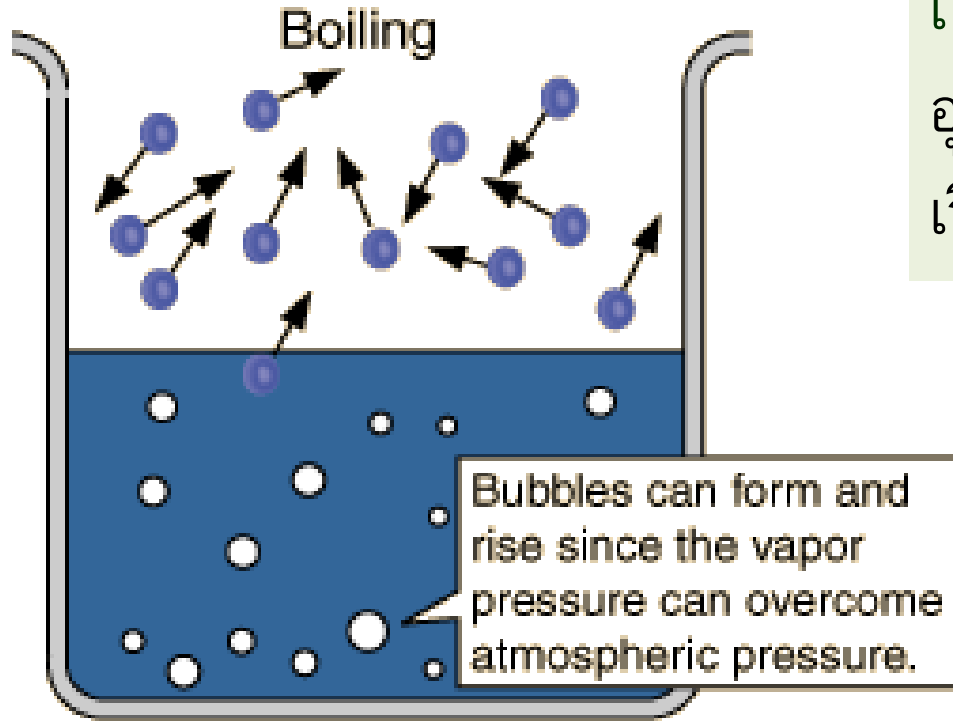
## ปัจจัยที่มีผลต่อความดันไอ

1. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของของเหลว ถ้าสารที่มีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมากความดันไอจะต่ำ เพราะโอกาสที่โมเลกุลจะชนะแรงดึงดูดกลายเป็นไอนั้นยาก
2. อุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิของระบบสูง ย่อมทำให้โมเลกุลของสารมีพลังงานจลน์สูงขึ้นโอกาสที่จะระเหยกลายเป็นไอนี้มากขึ้น ความดันไอก็จะเพิ่มขึ้น
3. สารชนิดเดียวกันที่อุณหภูมิเท่ากันย่อมมีความดันไอเท่ากัน เสมอไม่ว่าสารนั้นจะมีปริมาณมากหรือน้อยกว่ากัน นั่นคือความดันไอไม่ขึ้นอยู่กับปริมาตรของสาร
4. ความดันไอจะเกิดขึ้นที่ภาวะสมดุลเท่านั้น ดังนั้นต้องพิจารณาในระบบปิดเสมอ



สารที่มีแรงยึดเหนี่ยวสูงจะมีความดันไอต่ำ แต่มีจุดเดือดสูง

# การเดือด (Boiling)



การเดือดจะเกิดขึ้นได้เมื่อความดันไอของของเหลวมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศ อุณหภูมิขณะที่ของเหลวเดือดเรียกว่า **จุดเดือด**



**จุดเดือด** หมายถึง อุณหภูมิที่ความดันไอของของเหลวเท่ากับความดันบรรยากาศ

จุดเดือดของของเหลวใด ๆ ที่ความดัน 1 บรรยากาศ เรียกว่า **จุดเดือดปกติ**

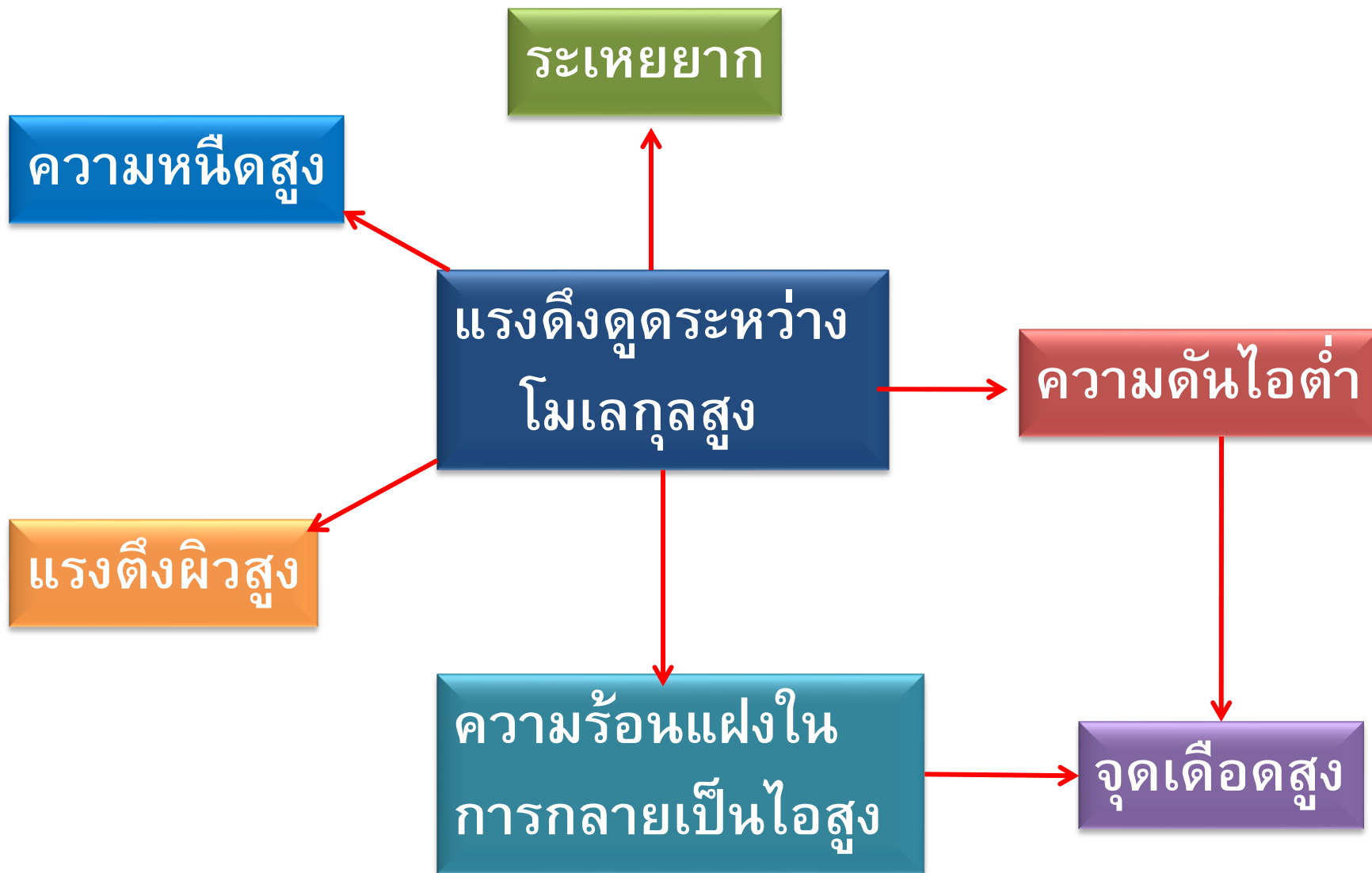
# ความหนืด (Viscosity)

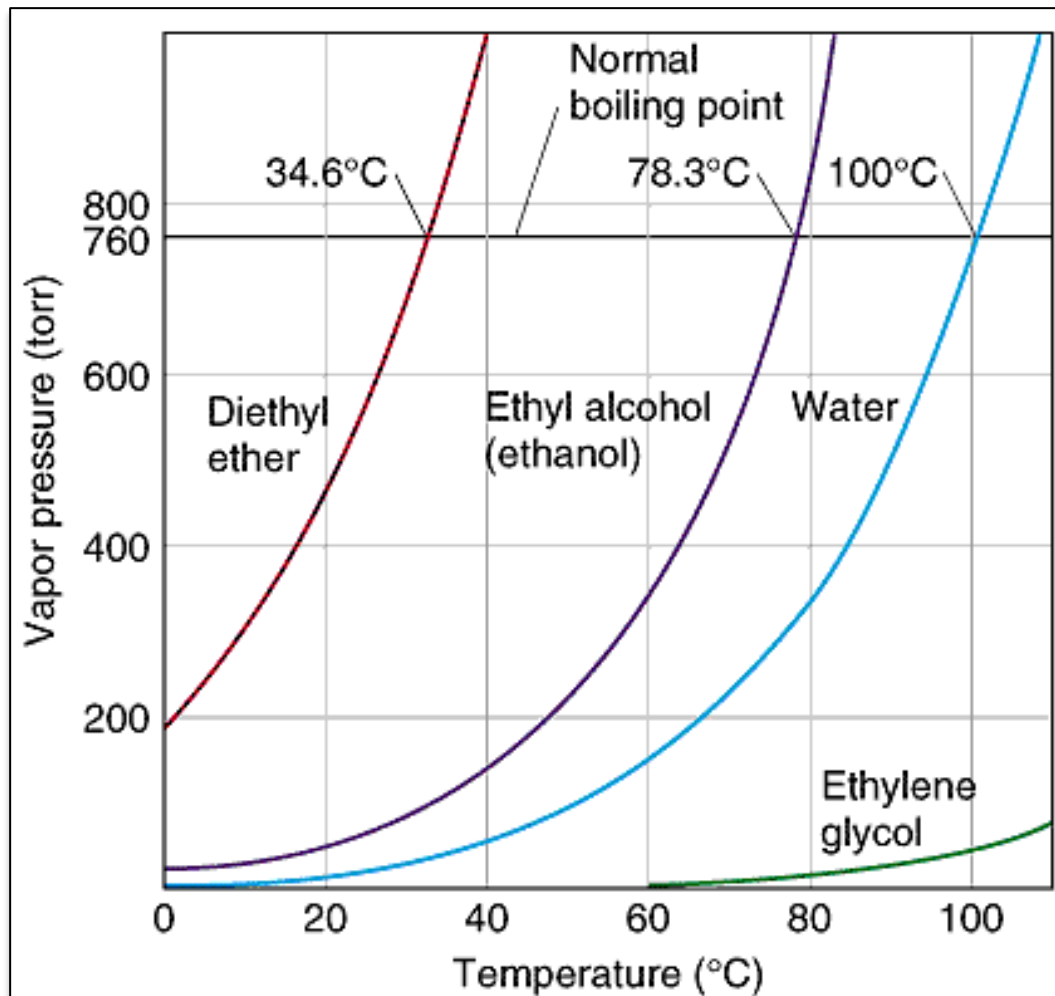
- เป็นการวัดความต้านทานการไหลของของเหลว ( $\text{N s/m}^2$ )
- ความหนืดมากสารเคลื่อนที่ได้ช้า
- ความหนืดลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น
- ส่วนใหญ่สารที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลสูงจะความหนืดสูง

ความหนืด :  $\text{Glycerol} > \text{H}_2\text{O} > \text{Ethyl ether}$   
( $1.49 > 1.01 \times 10^{-3} > 2.33 \times 10^{-4}$ )  
ผลเนื่องจากพันธะไฮโดรเจน

Table 3 ความหนืดของของเหลวบางชนิดที่ 20 °C

Liquid	Viscosity (N s/m <sup>2</sup> )
Acetone (C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O)	3.16 x 10 <sup>-4</sup>
Benzene (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> )	6.25 x 10 <sup>-4</sup>
Carbon tetrachloride (CCl <sub>4</sub> )	9.69 x 10 <sup>-4</sup>
Ethanol (C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH)	1.20 x 10 <sup>-3</sup>
Diethyl ether (C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OC <sub>2</sub> H <sub>5</sub> )	2.33 x 10 <sup>-4</sup>
Glycerol (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub> )	1.49
Mercury (Hg)	1.55 x 10 <sup>-3</sup>
Water (H <sub>2</sub> O)	1.01 x 10 <sup>-3</sup>
Blood	4 x 10 <sup>-3</sup>





สารที่มีแรงยึดเหนี่ยวสูง

Ethylene glycol >  
water > ethyl alcohol

จุดเดือดสูง

Ethylene glycol >  
water > ethyl alcohol

แรงตึงผิว

Ethylene glycol >  
water > ethyl alcohol

ความหนืด

Ethylene glycol >  
water > ethyl alcohol

ความดันไอ

ethyl alcohol > water >  
Ethylene glycol

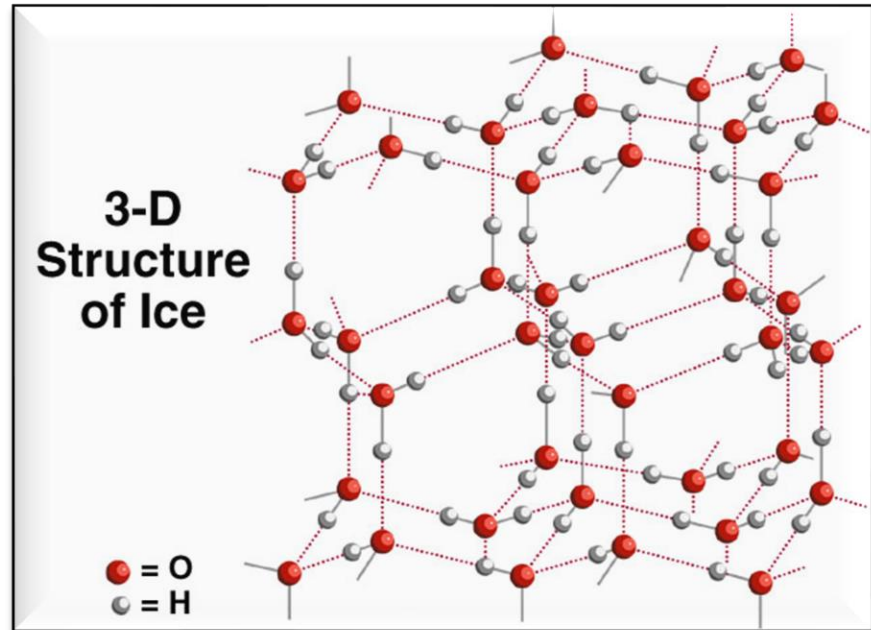
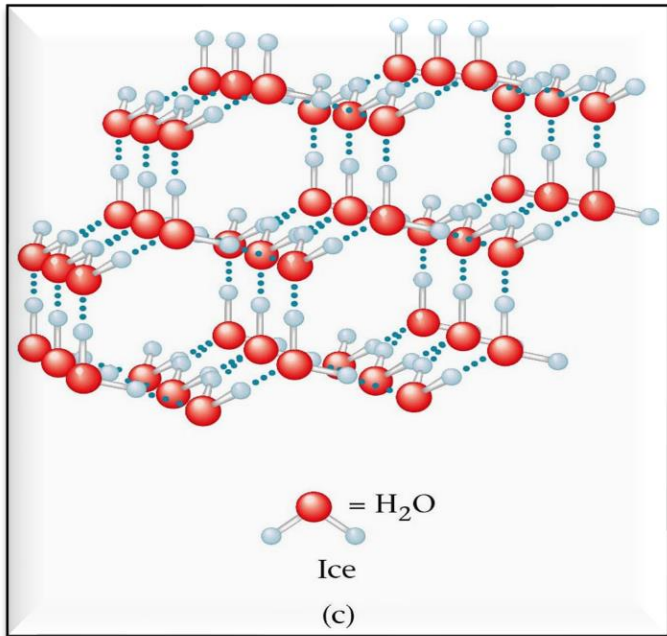
# โครงสร้างและสมบัติของน้ำ

## (The Structure and Properties of Water)

- น้ำมีความร้อนจำเพาะสูง (ดูดความร้อนหรือคายความร้อนได้มาก โดยที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยน้ำในมหาสมุทรช่วยบรรเทาอุณหภูมิอากาศ ดูดซับความร้อนในหน้าร้อน และให้ความร้อนในหน้าหนาว)
- พันธะไฮโดรเจนทำให้เกิดโครงร่าง 3 มิติ (ที่ O เกิด 2 **covalent bonds** กับ 2 H + 2 **hydrogen bonds** กับ 2 H ของโมเลกุลอื่น)
- พันธะไฮโดรเจนในน้ำแข็งทำให้เกิดโครงร่าง 3 มิติ ที่มีระเบียบมาก ทำให้เกิดปริมาตรว่างเปล่าในโครงสร้าง **ทำให้น้ำแข็งมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ** (จำนวน โมเลกุลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของน้ำมี **มากกว่า** ของน้ำแข็ง)

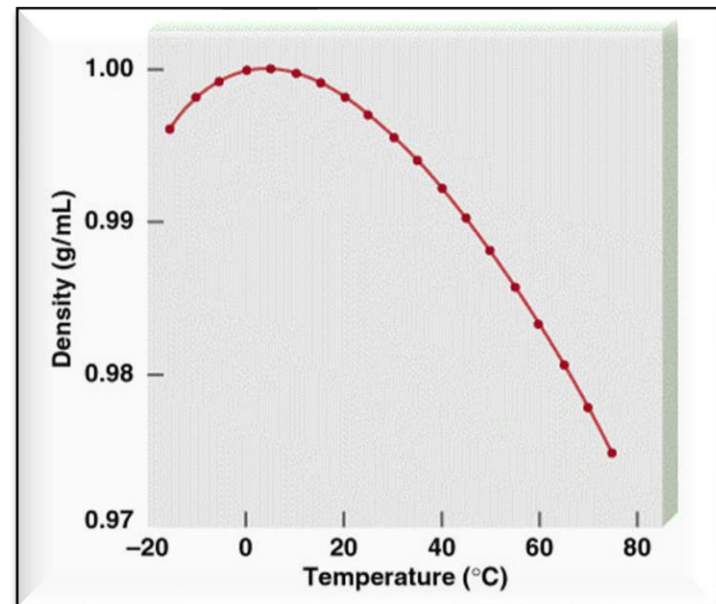
น้ำแข็งเบากว่าน้ำ ซึ่งต่างจากสารอื่นที่ของแข็งจะหนักกว่าของเหลว





**Fig 10** โครงสร้างสามมิติของน้ำแข็ง

**Fig 11** ความหนาแน่นของ  $\text{H}_2\text{O}$  ที่อุณหภูมิต่างๆ



## 2 กระบวนการที่เกี่ยวข้องกับผลของอุณหภูมิต่อ

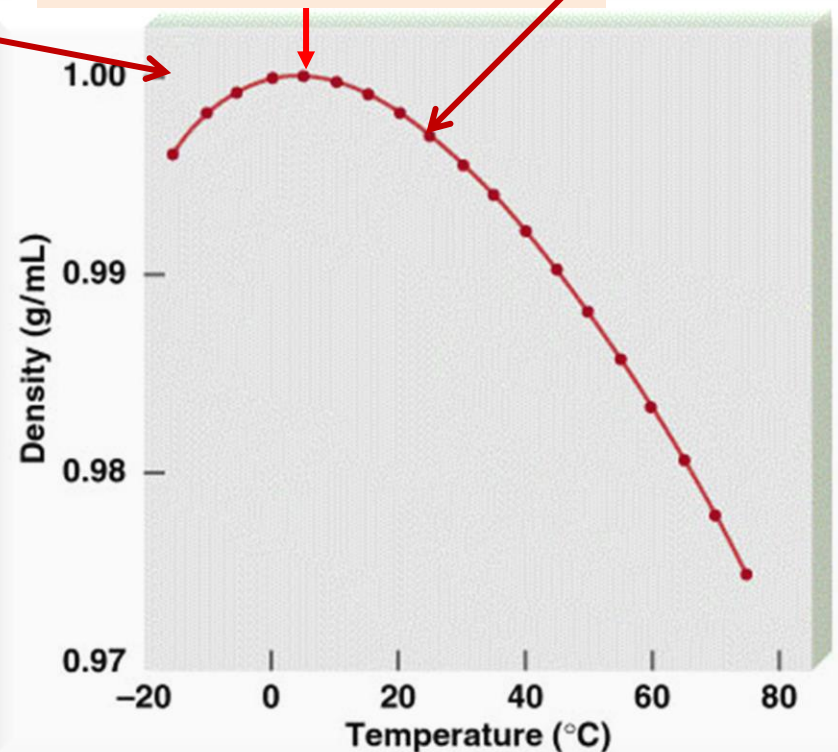
- (1) การแทรกตัวของโมเลกุลอิสระในโครงร่าง 3 มิติ
- (2) การขยายตัวเนื่องจากความร้อน

โมเลกุลจำนวนมากหลุดจาก H-bond  
แทรกตัวในช่องว่าง  $d$  น้ำเพิ่มขึ้น

0-4 °C : การแทรกตัว (1) มีอิทธิพล  
มากกว่าการขยายตัว (2) เมื่อ **เพิ่ม**  $T \Rightarrow$   
**density** **เพิ่ม**  
> 4 °C : การขยายตัว (2) มีอิทธิพลมา  
กว่าการแทรกตัว (1) เมื่อ **เพิ่ม**  $T \Rightarrow$   
**density** **ลด**

น้ำเกิดการขยายตัว  
ปริมาตรเพิ่มขึ้น  $d$  ลดลง

Maximum Density  
4 °C



ที่ 4 °C :  $H_2O$  มีความหนาแน่นสูงสุด = 1.00 g/cm<sup>3</sup>  
ที่ 0 °C :  $H_2O$  มีความหนาแน่น = 0.92 g/cm<sup>3</sup>