

คู่มือเรียนรายวิชา กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์
เพิ่มเติม ตามหลักสูตรแกนกลาง พ.ศ. 2551
(ฉบับปรับปรุง พ.ศ. 2560)



เคมี

ม.5 เล่ม 3

โดย **สำราญ พุกข์สุนทร**

กศ.ม. เขียวต้อยอันดับ 1 (เคมี)
กศ.ม. (เคมี)
Cert. in Teaching & Learning in Hi-Ed. and
Research Supervision (University of Sydney, Australia)

เนื้อหาละเอียดครบถ้วน

- ขอบแข็ง ของเหลว แก๊ส
- อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี
- สมดุลเคมี

ข้อสอบเข้ามหาวิทยาลัย
ปี 2520-ปัจจุบัน ครบทุกบท
พร้อมเฉลยครบถ้วน



คู่มือรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์

เคมี

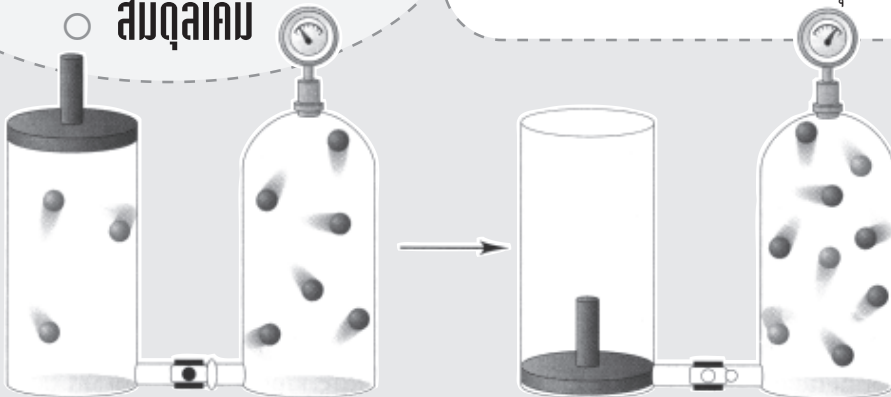
ม. 5
เล่ม 3

กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์
ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน
พุทธศักราช 2551 (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. 2560)

เนื้อหา



- ของแข็ง ของเหลว แก๊ส
- อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี
- สมดุลเคมี



เนื้อหาทุกเรื่องละเอียดสมบูรณ์ตามแนวทางสื่อ
เรียนของ สสวท. ปี2562 เกินหลักสูตร
เพื่อครอบคลุมข้อสอบเข้ามหาวิทยาลัย

ข้อสอบเข้ามหาวิทยาลัยปี 2520 ถึงปัจจุบัน
พร้อมเฉลยละเอียดครบทุกบท



สำนักพิมพ์ พ.ศ.พัฒนา

เรียบเรียงโดย

สำราญ พฤกษ์สุนทร กศ.บ. เกียรตินิยมอันดับ 1 (เคมี) กศ.ม. (เคมี)

Cert. In Teaching & Learning in Hi - Ed

and Research Supervision (University of Sydney Australia)

อาจารย์สอนวิชาเคมี สถาบันกวดวิชาหลายสถาบัน (www.utt-tutor.com)

สงวนลิขสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ (ฉบับเพิ่มเติม) พ.ศ.2558

คู่มือรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์ เคมี ม. 5 เล่ม 3

(ฉบับปรับปรุง พ.ศ. 2560)

ผู้เขียน **สำราญ พฤกษ์สุนทร**

บรรณาธิการ **อรศรี โรจน์พจนรัตน์**

ผู้ช่วยบรรณาธิการ (ศิลปกรรม) **อมรศักดิ์ บุญเรือง**

พิสูจน์อักษร **สำราญ พฤกษ์สุนทร**

พิจารณา **ใบสุวรรณ**

รูปเล่ม **อุไรพรรณ บุญเรือง**

ศิลปกรรม **สิทธิินันท์ สกฤชัยลิริวิช**

ปก **อมรศักดิ์ บุญเรือง**

ISBN 978-616-201-804-6



หนังสือเล่มนี้พิมพ์ด้วย กระดาษดีบีเอ เอ
กระดาษจากไม้ปลูก ไม่รบกวนไม้ธรรมชาติ



สำนักพิมพ์นี้เป็นสมาชิกสมาคมผู้จัดพิมพ์
และผู้จำหน่ายหนังสือแห่งประเทศไทย

แนะนำหรือวิจารณ์หนังสือเล่มนี้ได้ที่

www.thaibookrecommnd.com

จัดพิมพ์ : บริษัทสำนักพิมพ์ พ.ศ. พัฒนา จำกัด

12 ซอยหม่อมแก้ว แยก 3 ถนนพระราม 6 (ซอย 41) แขวงสามเสนใน เขตพญาไท
กรุงเทพมหานคร โทร. 02-279-6222 (อัตรา 15 คู่สาย) โทรสาร 02-279-6203

พิมพ์ที่ : เพ็ชรทรัพย์ การพิมพ์

117/22 หมู่ 5 ซอยบางไผ่พัฒนา ถนนนครอินทร์ ต. บางไผ่

อ. เมือง จ. นนทบุรี 11000

(ธนพัฒน์ สุขมงคลกุล ผู้พิมพ์ผู้โฆษณา)

เคมี

ม. 5

เล่ม 3



คำนำ

หนังสือเคมี ม.5 เล่ม 3 ที่จัดทำขึ้นใหม่นี้ ผู้เขียนได้จัดทำตามรายวิชาเพิ่มเติม กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช 2551 ฉบับปรับปรุงใหม่ พ.ศ. 2560 และผู้เขียนได้เรียบเรียงเนื้อหาตามแนวหนังสือเรียนของ สสวท. ปี 2562 แต่เนื้อหาละเอียดกว่า เพื่อช่วยให้นักเรียนเข้าใจเนื้อหาแต่ละเรื่องได้ดียิ่งขึ้น ในส่วนที่เป็นข้อสอบแต่ละบทเป็นข้อสอบเข้ามหาวิทยาลัย ปี 2520 ถึงปัจจุบัน พร้อมเฉลยละเอียด สำหรับบทที่ 7 นอกจากเรื่องแก๊สและสมบัติของแก๊สแล้วยังมีเรื่องของแข็ง และของเหลวเพิ่มให้ด้วย เพราะเนื้อหาสัมพันธ์กัน เพื่อให้นักเรียนจะได้อ่านเข้าใจยิ่งขึ้น

ก่อนเรียบเรียงหนังสือเล่มนี้ ผู้เรียบเรียงได้วิเคราะห์ข้อสอบเข้ามหาวิทยาลัยในปีที่ผ่านมา เพื่อให้รู้ว่าคุณสมบัติความรู้เรื่องใดมากน้อยแค่ไหน จะได้เป็นแนวทางในการเรียบเรียงครั้งนี้ ดังนั้นเนื้อหาบางตอนหรือบางเรื่องจึงละเอียดกว่าในหนังสือเรียนของ สสวท. ทั้งนี้ก็เพื่อให้สอดคล้องกับข้อสอบเข้ามหาวิทยาลัยทุกระบบที่ผู้เขียนได้วิเคราะห์มานั่นเอง ข้อสอบเข้ามหาวิทยาลัยของแต่ละบท แยกไว้ท้ายบท เพื่อให้นักเรียนได้เห็นแนวทางข้อสอบได้ง่ายเพื่อประโยชน์ในการสอบครั้งต่อไป การเฉลยข้อสอบเข้ามหาวิทยาลัยแต่ละบทก็เฉลยให้ละเอียด เพื่อให้นักเรียนได้รู้วิธีคิดหรือเหตุผลของการตอบแต่ละข้อ

ผู้เขียนจึงหวังอย่างยิ่งว่า นักเรียนหรือผู้ที่สนใจจะได้รับประโยชน์จากหนังสือเล่มนี้มากพอสมควร อย่างไรก็ตามเพื่อให้ได้รับประโยชน์จากหนังสือเล่มนี้อย่างแท้จริง นักเรียนควรทำข้อสอบทุกข้อด้วยตนเอง ก่อนที่จะดูคำเฉลย หากนักเรียนสงสัยหรือมีปัญหาอะไร สามารถสอบถามได้ที่ บริษัท สำนักพิมพ์ พ.ศ.พัฒนา จำกัด

ด้วยความปรารถนาดี

(สำราญ พฤษสุนทร)



สารบัญ

บทที่ 7	ของแข็ง ของเหลว แก๊ส	1
7.1	สถานะของสาร	1
7.2	การเปลี่ยนแปลงพลังงานของระบบ	3
7.2.1	พลังงานกับการเปลี่ยนสถานะ	3
7.2.2	การคำนวณหาปริมาณความร้อนในการเปลี่ยนแปลงสถานะ	6
7.3	สมบัติของของแข็ง	7
7.4	การจัดเรียงอนุภาคในของแข็ง	8
7.5	ชนิดของผลึก	15
7.6	การเปลี่ยนสถานะของของแข็ง	18
7.6.1	การหลอมเหลวและจุดหลอมเหลว	18
7.6.2	การระเหิด	18
7.7	สมบัติของของเหลว	20
7.7.1	สมบัติทั่วไปของของเหลว	20
7.7.2	แรงตึงผิวและความตึงผิว	21
7.7.3	แรงเชื่อมแน่นและแรงยึดติด	22
7.7.4	การระเหย	23
7.7.5	ความดันไอกับจุดเดือดของของเหลว	25
7.8	สมบัติของแก๊ส	28
7.8.1	สมบัติทั่วไปของแก๊ส	28
7.8.2	ปริมาตร อุณหภูมิและความดัน	28
7.8.3	ประเภทของแก๊ส	31
7.8.4	กฎต่างๆ ของแก๊ส	32

7.8.4.1 กฎของบอยล์	32
7.8.4.2 กฎของชาร์ล	36
7.8.4.3 กฎของเกย์-ลูสแซก	39
7.8.4.4 กฎของอาโวกาโดร	40
7.8.4.5 กฎรวมของแก๊ส	41
7.8.4.6 กฎของแก๊สในอุดมคติ	44
7.8.4.7 กฎความดันย่อยของดอลตัน	49
7.8.5 การแพร่ของแก๊ส	52
7.8.5.1 กฎการแพร่ของแก๊สของเกรแฮม	53
7.8.5.2 การคำนวณเกี่ยวกับกฎการแพร่ของแก๊สของเกรแฮม	55
7.8.6 ทฤษฎีจลน์ของแก๊ส	58
7.9 เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับสมบัติของของแข็ง ของเหลวและแก๊ส	63
7.9.1 การทำน้ำแข็งแห้ง	63
7.9.2 การทำไนโตรเจนเหลว	64
๘ ข้อสอบเข้ามหาวิทยาลัยปี2520 ถึง ปัจจุบัน	
บทที่ 7 ของแข็ง ของเหลว แก๊ส	66
๙ เฉลยละเอียดข้อสอบเข้ามหาวิทยาลัยปี2520 ถึง ปัจจุบัน	
บทที่ 7 ของแข็ง ของเหลว แก๊ส	79
บทที่ 8 อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี	89
8.1 ความหมายของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี	89
8.1.1 การคำนวณเกี่ยวกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี	91
8.1.2 ประเภทของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี	94
8.2 แนวคิดเกี่ยวกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี	96
8.2.1 ทฤษฎีการชนกัน	96
8.2.2 พลังงานก่อกัมมันต์	98
8.2.3 ทฤษฎีสารเชิงซ้อนที่ถูกระตุ้น	100
8.3 พลังงานกับการดำเนินไปของปฏิกิริยา	104
8.4 กลไกของปฏิกิริยา	105

8.5	พลังงานก่อกัมมันต์กับปฏิกิริยาเคมีที่มีหลายขั้นตอน	106
8.6	ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี	109
8.6.1	ผลของธรรมชาติของสารตั้งต้นที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี	109
8.6.2	ความเข้มข้นของสารกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี	111
8.6.3	พื้นที่ผิวของสารกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี	125
8.6.4	ความดันกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี	127
8.6.5	อุณหภูมิกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี	128
8.6.6	ตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวหน่วงปฏิกิริยาเคมี	130
๙	ข้อสอบเข้ามหาวิทยาลัยปี2520 ถึง ปัจจุบัน	
บทที่ 8	อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี	139
๑๐	เฉลยละเอียดข้อสอบเข้ามหาวิทยาลัยปี2520 ถึง ปัจจุบัน	
บทที่ 8	อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี	173
บทที่ 9	สมดุลเคมี	193
9.1	การเปลี่ยนแปลงที่ผันกลับได้	193
9.2	ภาวะสมดุล	196
9.2.1	ภาวะสมดุลระหว่างสถานะ	196
9.2.2	ภาวะสมดุลในสารละลายอิมิตัว	197
9.2.3	ภาวะสมดุลในปฏิกิริยาเคมี	198
9.3	การดำเนินเข้าสู่ภาวะสมดุลของระบบ	201
9.4	ค่าคงที่ของสมดุล(K)	204
9.4.1	ปฏิกิริยาเนื้อผสมกับค่าคงที่ของสมดุล	206
9.4.2	ข้อสังเกตเกี่ยวกับค่าคงที่ของสมดุล (K)	207
9.4.3	การคำนวณหาค่าคงที่ของสมดุล (K)	211
9.4.4	ค่าคงที่ของสมดุล ณ อุณหภูมิหนึ่ง	216
9.4.5	การคำนวณความเข้มข้นของสารที่ภาวะสมดุล	218
9.5	สมดุลของการละลายของสารประกอบที่ละลายได้น้อย	222
9.5.1	การคำนวณหาค่า K_{sp} และความเข้มข้นของสารละลายที่ภาวะสมดุล	224

9.5.2	ประโยชน์ของค่า K_{sp}	225
9.6	การเปลี่ยนภาวะสมดุล	226
9.6.1	หลักของเลอชาเตอลิเอร์	226
9.6.2	ผลของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นที่มีต่อภาวะสมดุล	227
9.6.3	ผลของการเปลี่ยนแปลงความดันที่มีต่อภาวะสมดุล	233
9.6.4	ผลของการเปลี่ยนอุณหภูมิต่อภาวะสมดุล	240
9.7	การใช้หลักของเลอชาเตอลิเอร์ในอุตสาหกรรม	244
9.8	ตัวเร่งปฏิกิริยากับภาวะสมดุล	248
9.9	ค่าคงที่ของสมดุลเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปัจจัยที่มีผลต่อภาวะสมดุล	249
9.9.1	ค่าคงที่ของสมดุลเมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสาร	249
9.9.2	ค่าคงที่ของสมดุลเมื่อเปลี่ยนแปลงความดัน	251
9.9.3	ค่าคงที่ของสมดุลเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ	253
9.9.4	การคำนวณหาค่าคงที่ของสมดุลเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง	257
9.10	สมดุลเคมีในสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม	258
๙	ข้อสอบเข้ามหาวิทยาลัยปี2520 ถึง ปัจจุบัน	
	บทที่ ๑ สมดุลเคมี	261
๑๐	เฉลยละเอียดข้อสอบเข้ามหาวิทยาลัยปี2520 ถึง ปัจจุบัน	
	บทที่ ๑ สมดุลเคมี	284
	บรรณานุกรม	308

สำราญ พงษ์สุนทร

เปิดทิว

★ คมมี ม. ตำบล

★ คมมี ม. 4-5-6

๖๖:

★ คมมี Entrance ทุกระบบ

สอนทางออนไลน์

ดาวน์โหลดรายละเอียดได้ที่

www.pluseducenter.com/center/sumran

สอบถามเพิ่มเติม Line : @ pluseducenter

หรือโทร 081-552-9898



7.1 สถานะของสาร

สถานะเป็นสมบัติอย่างหนึ่งของสาร ที่สามารถใช้เป็นเกณฑ์ในการจำแนกสารต่างๆ ออกได้ 3 กลุ่ม ได้แก่ แก๊ส ของเหลว ของแข็ง สถานะของสารขึ้นอยู่กับชนิดของสาร เช่น ออกซิเจน มีสถานะเป็นแก๊ส น้ำ เป็นของเหลวและเหล็กเป็นของแข็งที่ภาวะปกติ สารแต่ละชนิดในธรรมชาติส่วนใหญ่มักจะอยู่ในสถานะใด สถานะหนึ่งเพียงสถานะเดียว เช่น ทองคำ สังกะสี เหล็ก ฯลฯ อยู่ในสถานะของแข็ง ปรอท น้ำมันพืช ฯลฯ อยู่ในสถานะของเหลว ออกซิเจน ไนโตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ ฮีเลียม ฯลฯ อยู่ในสถานะแก๊ส แต่มีสารบางชนิดพบได้ทั้ง 3 สถานะในธรรมชาติ เช่น น้ำ สถานะแก๊สคือไอน้ำ สถานะของเหลวคือน้ำ และสถานะของแข็งคือน้ำแข็ง

สารทั้งหลายในธรรมชาติไม่ว่าจะอยู่ในสถานะใดก็ตาม สามารถทำให้สารเปลี่ยนสถานะได้โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เพราะสถานะของสารนอกจากขึ้นอยู่กับชนิดของสารแล้วยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิด้วย พิจารณาข้อมูลในตาราง 7.1

ชื่อสาร	สถานะของสาร (ที่ 25 °C)	จุดหลอมเหลว (°C)	จุดเดือด (°C)
อาร์กอน	แก๊ส	-189	-186
ออกซิเจน	แก๊ส	-219	-183
แอมโมเนีย	แก๊ส	-78	-33
น้ำ	ของเหลว	0	100
เอทานอล	ของเหลว	-117	78.5
ปรอท	ของเหลว	-39	357
ฟอสฟอรัส	ของแข็ง	44	280
สังกะสี	ของแข็ง	420	906
โซเดียมคลอไรด์	ของแข็ง	801	1,413

ตารางที่ 7.1 แสดงสถานะ จุดหลอมเหลวและจุดเดือดของสารบางชนิด

จากตารางที่ 7.1 เป็นสถานะของสารบางชนิดที่อุณหภูมิ 25 °C ถ้าอุณหภูมิเปลี่ยนจาก 25 °C เป็นอุณหภูมิอื่น สถานะของสารแต่ละชนิดอาจเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมได้ พิจารณาได้ดังนี้

1. ถ้าอุณหภูมิที่กำหนดให้อยู่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของสารชนิดใดสารนั้นจะอยู่ในสถานะของแข็ง
2. ถ้าอุณหภูมิที่กำหนดให้สูงกว่าจุดหลอมเหลวแต่ต่ำกว่าจุดเดือดของสารใด สารนั้นจะอยู่ในสถานะของเหลว

3. ถ้าอุณหภูมิที่กำหนดให้สูงกว่าจุดเดือดของสารใด สารนั้นจะอยู่ในสถานะแก๊ส

อาศัยข้อมูลเกี่ยวกับจุดหลอมเหลวและจุดเดือดของสารในตารางที่ 7.1 สามารถบอกสถานะของสารแต่ละชนิด ณ อุณหภูมิต่างๆ ได้

ชื่อสาร	สถานะของสารที่อุณหภูมิ (°C)					
	50	110	300	1,000	-184	-220
อาร์กอน	แก๊ส	แก๊ส	แก๊ส	แก๊ส	แก๊ส	ของแข็ง
ออกซิเจน	แก๊ส	แก๊ส	แก๊ส	แก๊ส	ของเหลว	ของแข็ง
แอมโมเนีย	แก๊ส	แก๊ส	แก๊ส	แก๊ส	ของแข็ง	ของแข็ง
น้ำ	ของเหลว	แก๊ส	แก๊ส	แก๊ส	ของแข็ง	ของแข็ง
เอทานอล	ของเหลว	แก๊ส	แก๊ส	แก๊ส	ของแข็ง	ของแข็ง
ปรอท	ของเหลว	ของเหลว	ของเหลว	แก๊ส	ของแข็ง	ของแข็ง
ฟอสฟอรัส	ของเหลว	ของเหลว	แก๊ส	แก๊ส	ของแข็ง	ของแข็ง
สังกะสี	ของแข็ง	ของแข็ง	ของแข็ง	แก๊ส	ของแข็ง	ของแข็ง
โซเดียมคลอไรด์	ของแข็ง	ของแข็ง	ของแข็ง	ของเหลว	ของแข็ง	ของแข็ง

ตารางที่ 7.2 แสดงสถานะของสารที่อุณหภูมิต่างๆ

7.2 การเปลี่ยนแปลงพลังงานของระบบ

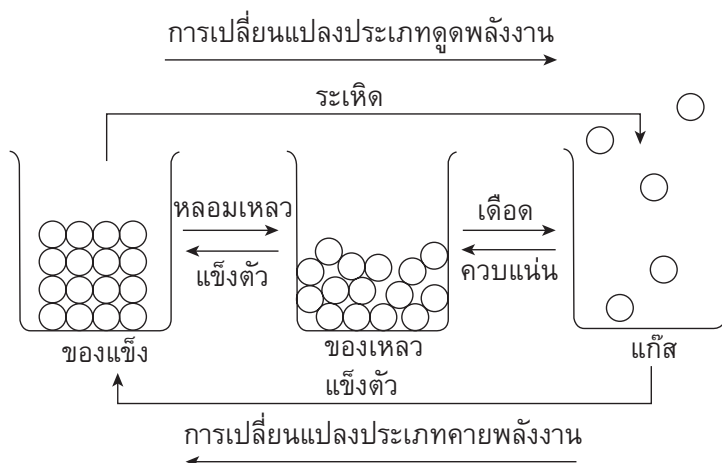
พลังงานสามารถถ่ายเทจากระบบไปสู่สิ่งแวดล้อม หรือถ่ายเทจากสิ่งแวดล้อมเข้าสู่ระบบก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับว่าระบบหรือสิ่งแวดล้อมมีระดับพลังงานสูงกว่า เพราะพลังงานจะถ่ายเทจากส่วนที่มีระดับพลังงานสูงไปยังส่วนที่มีระดับพลังงานต่ำกว่า ดังนั้นการถ่ายเทพลังงานจึงมี 2 ลักษณะ คือ

1. การเปลี่ยนแปลงประเภทคายความร้อน (Exothermic change) หมายถึง การถ่ายเทพลังงานจากระบบไปสู่สิ่งแวดล้อม เกิดขึ้นเนื่องจากสิ่งแวดล้อมมีพลังงานต่ำกว่าระบบ ตัวอย่างเช่นการจุดเทียนไขในครอบแก้วที่ปิดสนิท เมื่อจุดเทียนไขจะทำให้อุณหภูมิของระบบสูงขึ้นกว่าเดิม จึงมีการถ่ายเทพลังงานออกจากระบบไปสู่สิ่งแวดล้อม

2. การเปลี่ยนแปลงประเภทดูดความร้อน (Endothermic change) หมายถึง การถ่ายเทพลังงานจากสิ่งแวดล้อมเข้าสู่ระบบ เกิดขึ้นเนื่องจากสิ่งแวดล้อมมีพลังงานสูงกว่าระบบ ตัวอย่างเช่น โพแทสเซียมไนเตรด (KNO_3) ละลายน้ำ จะทำให้อุณหภูมิของระบบลดลง จึงมีการถ่ายเทพลังงานจากสิ่งแวดล้อมเข้าสู่ระบบ

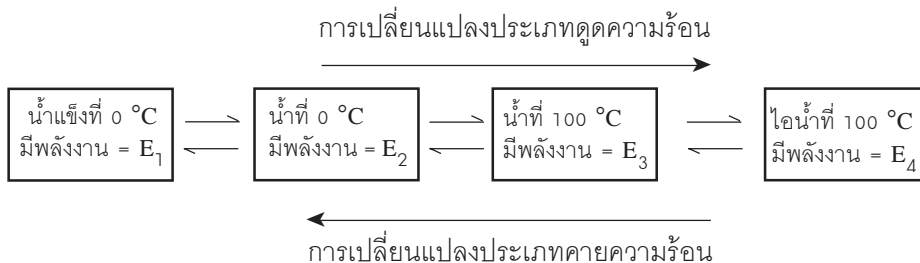
ข้อคิด การเปลี่ยนแปลงใดๆ จะเป็นการเปลี่ยนแปลงประเภทดูดหรือคายพลังงาน สามารถสังเกตได้ง่ายๆ ดังนี้คือ ให้สังเกตที่เทอร์โมมิเตอร์ซึ่งเป็นสิ่งแวดล้อม ถ้าอุณหภูมิที่อ่านได้จากเทอร์โมมิเตอร์เพิ่มขึ้น แสดงว่าเป็นการเปลี่ยนแปลงประเภทคายความร้อน แต่ถ้าลดลงแสดงว่าเป็นการเปลี่ยนแปลงประเภทดูดความร้อน หรือสังเกตโดยการสัมผัสภาชนะ ถ้าภาชนะร้อนแสดงว่าเป็นการเปลี่ยนแปลงประเภทคายความร้อน แต่ถ้าภาชนะเย็นลง แสดงว่าเป็นการเปลี่ยนแปลงประเภทดูดความร้อน ยกเว้นการทดลองที่มีการต้ม เผา หรือ แช่เย็น

7.2.1 พลังงานกับการเปลี่ยนสถานะ ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับการเปลี่ยนสถานะของสารสามารถสรุปเป็นแผนภาพได้ดังนี้



รูปที่ 7.1 การถ่ายเทพลังงานในการเปลี่ยนแปลงสถานะของสาร

ในขณะที่สารหลอมเหลวหรือเดือด อุณหภูมิของสารจะไม่เปลี่ยนแปลง ทั้งนี้เพราะพลังงานความร้อนที่สารได้รับจะนำไปใช้ในการเปลี่ยนสถานะ เช่น ในการเปลี่ยนสถานะของน้ำ ในขณะที่น้ำเดือด อุณหภูมิจะคงที่ที่ 100°C ทั้งนี้เพราะพลังงานที่เราให้จะถูกใช้ในการเปลี่ยนสถานะของน้ำที่ 100°C จากของเหลวเป็นไอ ดังนั้นไอน้ำที่ 100°C จึงมีพลังงานสูงกว่าน้ำที่ 100°C ในกรณีน้ำแข็งหลอมเหลวเป็นน้ำก็เหมือนกันจะมีอุณหภูมิคงที่ที่ 0°C จนกว่าน้ำแข็งจะหลอมเหลวหมด ทั้งนี้เพราะพลังงานที่ให้จะถูกใช้ในการเปลี่ยนสถานะของน้ำแข็งที่ 0°C จากของแข็งเป็นของเหลว ดังนั้นน้ำที่ 0°C จึงมีพลังงานสูงกว่าน้ำแข็งที่ 0°C พลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะของสาร เรียกว่า **ความร้อนแฝง**



รูปที่ 7.2 การถ่ายเทพลังงานในการเปลี่ยนแปลงสถานะของน้ำ ($E_4 > E_3 > E_2 > E_1$)

ความร้อนแฝง (Latent heat) ความร้อนแฝง คือ พลังงานความร้อนที่ใช้ไปเพื่อเปลี่ยนสถานะของสาร ความร้อนแฝงแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (Latent heat of fusion) ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว คือ ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะของสารที่มีมวลหนึ่งหน่วย จากของแข็งให้กลายเป็นของเหลวหมดพอดีโดยอุณหภูมิคงที่

กรณีการหลอมเหลวของน้ำแข็ง

จากรูปที่ 7.2 น้ำแข็งที่ 0°C มีพลังงาน = E_1

น้ำที่ 0°C มีพลังงาน = E_2

ความร้อนแฝงของการหลอมเหลวของน้ำแข็ง = $E_2 - E_1$

ความร้อนแฝงของการหลอมเหลวของน้ำแข็งเท่ากับ 334.8 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งหมายความว่าในการเปลี่ยนสถานะของน้ำแข็ง 1 กิโลกรัม ที่ 0°C ให้เป็นน้ำ 1 กิโลกรัมที่ 0°C จะต้องใช้พลังงานเท่ากับ 334.8 กิโลจูล

สารแต่ละชนิดจะมีค่าความร้อนแฝงของการหลอมเหลวไม่เท่ากัน เช่น ความร้อนแฝงของการหลอมเหลวของเนพทาลิน (ลูกเหม็น) มีค่าเท่ากับ 149 กิโลจูลต่อกิโลกรัม เป็นต้น

2. ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (Latent heat of vaporization) ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ คือปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะของของเหลวซึ่งมีมวลหนึ่งหน่วยให้กลายเป็นไอมอดพอดีโดยอุณหภูมิคงที่

กรณีการกลายเป็นไอของน้ำ

จากรูปที่ 7.2 น้ำที่ 100°C มีพลังงาน = E_3

ไอน้ำที่ 100°C มีพลังงาน = E_4

ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ = $E_4 - E_3$

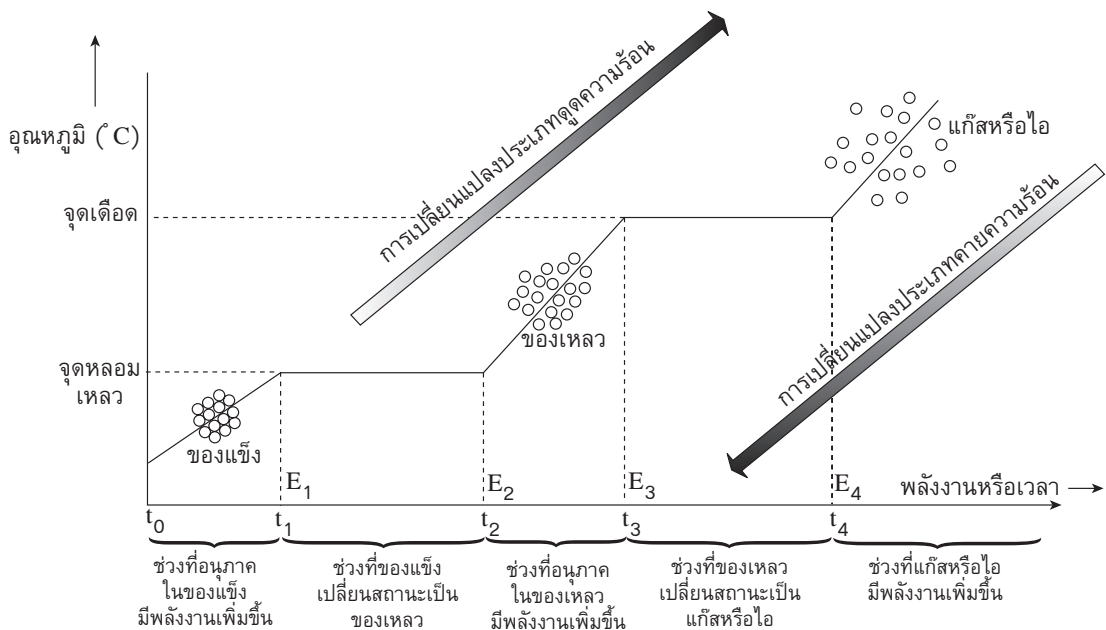
ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำมีค่าเท่ากับ 2,256 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งหมายความว่าในการเปลี่ยนสถานะของน้ำ 1 กิโลกรัมที่ 100 °C ให้กลายเป็นไอน้ำ 1 กิโลกรัมที่ 100 °C จะต้องใช้พลังงานเท่ากับ 2,256 กิโลจูล สารแต่ละชนิดจะมีค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอไม่เท่ากัน เช่น ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของเอทานอลมีค่าเท่ากับ 857 กิโลจูลต่อกิโลกรัม เป็นต้น

สาร	สูตร	ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (kJ/kg)	ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ kJ/kg	จุดหลอมเหลว (°C)	จุดเดือด (°C)
น้ำ	H ₂ O	334.8	2,256	0	100
แอมโมเนีย	NH ₃	329.41	1,376.47	-78	-33
โซเดียมคลอไรด์	NaCl	478.63	3,538.46	801	1,465
เอทานอล	C ₂ H ₅ OH	108.9	857	-115	78.5

ตารางที่ 7.3 แสดงความร้อนแฝง จุดหลอมเหลวและจุดเดือดของสารบางชนิด

ข้อสังเกต จากข้อมูลในตารางที่ 7.3 จะพบว่าสารที่มีจุดหลอมเหลวสูงกว่ามักจะมีความร้อนแฝงของการหลอมเหลวสูงกว่าด้วย และสารที่มีจุดเดือดสูงกว่าส่วนใหญ่จะมีความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอสูงกว่าด้วย

ในการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวและจากของเหลวเป็นไอของสารบริสุทธิ์สรุปได้ดังรูปที่ 7.3



รูปที่ 7.3 กราฟแสดงการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวและจากของเหลวเป็นแก๊สหรือไอของสารบริสุทธิ์ ($E_4 > E_3 > E_2 > E_1$)

จากรูปที่ 7.3

ช่วงเวลา t_0 ถึง t_1 สารอยู่ในสถานะของแข็ง มีพลังงานและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ที่เวลา t_1 ของแข็งมีพลังงาน = E_1 และเริ่มหลอมเหลวกลายเป็นของเหลว ช่วงเวลา t_1 ถึง t_2 สารอยู่ในสถานะของแข็งและของเหลว ที่เวลา t_2 ของแข็งเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวหมดพอดีและมีพลังงาน = E_2 พลังงาน $E_2 - E_1$ คือความร้อนแฝงของการหลอมเหลว ช่วงเวลา t_2 ถึง t_3 ของเหลวมีพลังงานและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ที่เวลา t_3 ของเหลวมีพลังงาน = E_3 และเริ่มเดือดกลายเป็นแก๊สหรือไอ ช่วงเวลา t_3 ถึง t_4 สารอยู่ในสถานะของเหลวและแก๊ส ที่เวลา t_4 ของเหลวเดือดกลายเป็นแก๊สหรือไหมดพอดีและมีพลังงาน = E_4 พลังงาน $E_4 - E_3$ คือความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ ช่วงเวลา t_4 ขึ้นไปแก๊สหรือไอมีพลังงานและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น

7.2.2 การคำนวณหาปริมาณความร้อนในการเปลี่ยนแปลงสถานะ

การคำนวณแบ่งออกเป็น 2 กรณี ดังนี้

1. การคำนวณหาปริมาณความร้อนในกรณีที่เป็นการเปลี่ยนแปลง ในการคำนวณใช้สูตรดังนี้

$$\Delta H = mL \quad \text{เมื่อ } \Delta H = \text{ปริมาณความร้อน, } m = \text{มวลของสาร}$$

L = ความร้อนแฝงของสาร

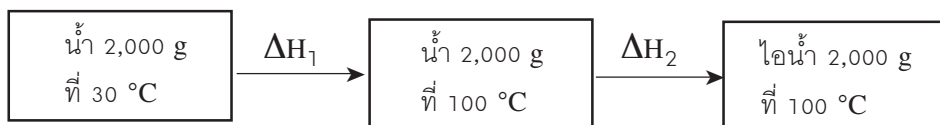
2. การคำนวณหาปริมาณความร้อนเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ในการคำนวณใช้สูตรดังนี้

$$\Delta H = mc\Delta t \quad \text{เมื่อ } \Delta H = \text{ปริมาณความร้อน, } m = \text{มวลของสาร}$$

c = ความร้อนจำเพาะของสาร, Δt = อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง

ตัวอย่างที่ 1 ถ้าต้องการทำให้น้ำ 2,000 g ที่ 30°C ความดัน 1 atm กลายเป็นไอน้ำจนหมดที่ 100°C ความดัน 1 atm จะต้องใช้ความร้อนเท่าใด (ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ = 2,256 kJ/kg และความร้อนจำเพาะของน้ำ = 4.2 kJ/kg $^\circ\text{C}$)

วิธีทำ การทำให้น้ำ 2,000 g ที่ 30°C กลายเป็นไอน้ำจนหมดที่ 100°C มีขั้นตอนดังนี้



$$\text{ปริมาณความร้อนที่ต้องใช้} = \Delta H_1 + \Delta H_2$$

$$\Delta H_1 = mc\Delta t$$

$$m = \frac{2,000}{1,000} = 2 \text{ kg, } \Delta t = 100 - 30 = 70^\circ\text{C, } c = 4.2 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta H_1 = 2 \times 4.2 \times 70 = 588 \text{ kJ}$$

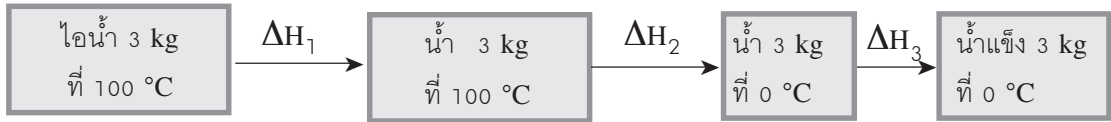
$$\Delta H_2 = mL$$

$$m = \frac{2,000}{1,000} = 2 \text{ kg, } L = 2,256 \text{ kJ/kg}$$

$$\Delta H_2 = 2 \times 2,256 = 4,512 \text{ kJ}$$

$$\therefore \text{ จะต้องใช้ปริมาณความร้อน} = 588 + 4,512 = 5,100 \text{ kJ}$$

- ตัวอย่างที่ 2** เมื่อต้องการทำให้ไอน้ำ 3 kg ที่ 100 °C กลายเป็นน้ำแข็งทั้งหมดที่ 0 °C ระบบจะคายความร้อนเท่าใด ถ้าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ = 2,256 kJ/kg ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว = 334.8 kJ/kg และความร้อนจำเพาะของน้ำ = 4.2 kJ/kg °C
- วิธีทำ** การเปลี่ยนแปลงจากไอน้ำ 3 kg ที่ 100 °C กลายเป็นน้ำแข็งที่ 0 °C มีขั้นตอนดังนี้



$$\begin{aligned}
 \text{ปริมาณความร้อนที่คายออกมา} &= \Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta H_3 \\
 \Delta H_1 = mL &= 3 \times 2,256 = \mathbf{6,768 \text{ kJ}} \\
 \Delta H_2 = mc\Delta t &= 3 \times 4.2 \times (100 - 0) \\
 &= 3 \times 4.2 \times 100 = \mathbf{1,260 \text{ kJ}} \\
 \Delta H_3 = mL &= 3 \times 334.8 = \mathbf{1,004.4 \text{ kJ}} \\
 \therefore \text{ปริมาณความร้อนที่คายออกมาเมื่อทำให้ไอน้ำ 3 kg ที่ 100 °C กลายเป็นน้ำแข็ง 3 kg ที่ 0 °C} &= 6,768 + 1,260 + 1,004.4 = \mathbf{9,032.40 \text{ kJ}}
 \end{aligned}$$

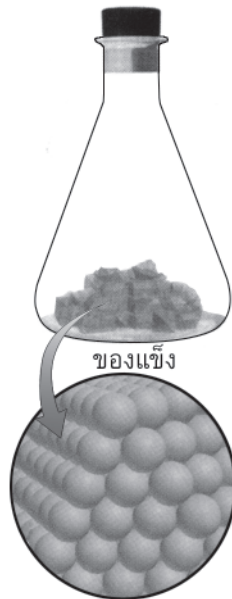
7.3 สมบัติของของแข็ง

ในธรรมชาติมีสารที่มีสถานะเป็นของแข็งที่ภาวะปกติมีจำนวนมากกว่าของเหลวและแก๊ส นอกจากนั้นสารที่มีสถานะเป็นแก๊สหรือของเหลวก็สามารถเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งได้โดยการลดอุณหภูมิและเพิ่มความดัน

สมบัติทั่วไปของของแข็ง

1. ของแข็งมีรูปร่างคงที่แน่นอน ไม่ขึ้นอยู่กับภาชนะที่บรรจุ เพราะอนุภาคภายในของแข็งเคลื่อนที่ได้ แต่มีการสั่นสะเทือนตลอดเวลา
2. ของแข็งไม่สามารถบีบอัดให้มีปริมาตรเล็กลงได้อีก เพราะอนุภาคภายในของแข็งอยู่ชิดกันอยู่แล้ว ถ้าเราใช้แรงบีบอัดมากของแข็งบางชนิดก็จะแตกหักเป็นชิ้นเล็ก ๆ
3. สารหนึ่งๆ เมื่อเป็นของแข็งจะมีความหนาแน่นมากกว่าแก๊สและของเหลว (ยกเว้นสารบางชนิด เช่น น้ำแข็ง มีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ)
4. เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแข็งมีการหดตัวและขยายตัวน้อยมาก (น้อยกว่าของแก๊สและของเหลว)
5. ของแข็งที่เป็นโลหะสามารถดึงออกเป็นเส้น หรือตีแผ่เป็นแผ่นได้
6. ของแข็งบางชนิดเป็นตัวนำความร้อนและไฟฟ้าได้ดี เช่น ทองแดง ทองคำ สังกะสีและโลหะอื่นๆ ฯลฯ บางชนิดเป็นกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิคอน บางชนิดเป็นฉนวน เช่น กำมะถัน พลาสติก ฯลฯ

7. ของแข็งที่บริสุทธิ์จะมีจุดหลอมเหลวคงที่เมื่อความดันคงที่
8. ของแข็งบางชนิดสามารถระเหิดได้ เช่น แนพทาลิน (ลูกเหม็น)
9. ของแข็งเมื่อได้รับพลังงานความร้อนสูงพอจะหลอมเหลวกลายเป็นของเหลว
10. ของแข็งไม่สามารถไหลได้



รูปที่ 7.4 การจัดเรียงอนุภาคในของแข็ง

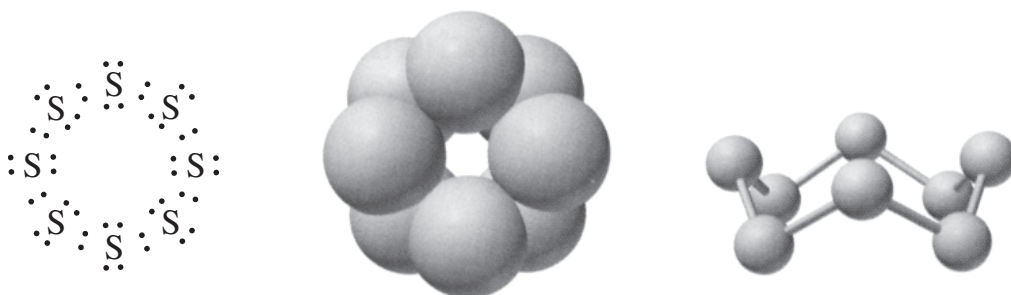
7.4 การจัดเรียงอนุภาคในของแข็ง

ของแข็งส่วนมากมีการจัดเรียงตัวของอนุภาค (อะตอม โมเลกุลหรือไอออน) อย่างมีระเบียบแบบแผนได้โครงสร้างที่เป็นรูปผลึกเรียกว่า **ของแข็งผลึก (Crystalline solid)** เช่น กำมะถัน คาร์บอน เกลือโซเดียมคลอไรด์ น้ำตาล ด่างทับทิม คอปเปอร์(II)ซัลเฟต สารส้ม เป็นต้น

ของแข็งบางชนิด เช่น กำมะถัน ฟอสฟอรัส คาร์บอน ดีบุก เป็นต้น ถึงแม้ว่าจะประกอบด้วยอะตอมชนิดเดียวกัน แต่มีได้หลายรูป แต่ละรูปมีโครงสร้างต่างกัน ดังนั้นแต่ละรูปจึงมีสมบัติบางอย่าง เช่น รูปร่างผลึก จุดหลอมเหลว จุดเดือด ความหนาแน่นต่างกัน สาเหตุที่แต่ละรูปของของแข็งบางชนิดมีโครงสร้างต่างกัน เนื่องจากการจัดเรียงโมเลกุลหรือการจัดเรียงอะตอมต่างกัน

โครงสร้างของกำมะถัน

กำมะถันเป็นอโลหะชนิดหนึ่ง หนึ่งโมเลกุลของกำมะถันประกอบด้วย 8 อะตอมต่อกันเป็นวงโดยอะตอมที่ 1, 3, 5, 7 อยู่ในระนาบหนึ่งเหนืออะตอม 2, 4, 6, 8 ซึ่งอยู่อีกระนาบหนึ่งแสดงได้โดยใช้ลูกกลมดังในรูปที่ 7.5



รูปที่ 7.5 แบบจำลองโมเลกุลของกำมะถัน (S_8)

กำมะถันมีอยู่หลายรูปเกิดขึ้นเนื่องจากโมเลกุลของกำมะถันมีการจัดเรียงตัวต่างกัน สามารถแบ่งกำมะถันออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

1. พวกที่มีรูปเป็นผลึก (Crystalline form)
2. พวกที่มีรูปไม่เป็นผลึก (Amorphous form)

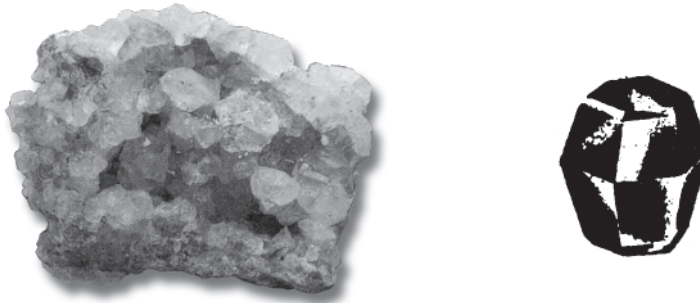
กำมะถันพวกที่มีรูปผลึก กำมะถันพวกที่มีรูปเป็นผลึกมีอยู่ 2 รูป คือ

1. **กำมะถัน rombik (Rhombic sulphur)** หรือเรียกว่า กำมะถันแอลฟา (α - sulphur หรือ S_α) เป็นรูปที่อยู่ตัวมากที่สุด (Stable) ผลึกมีลักษณะเป็นรูปเหลี่ยม (ดูรูป 7.6)

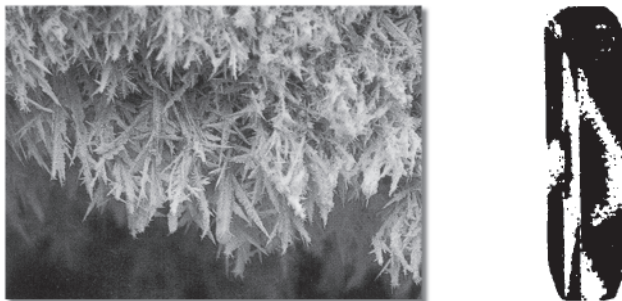
การเตรียมกำมะถัน rombik กำมะถัน rombik เตรียมได้โดยนำผงกำมะถันใส่ในหลอดทดลองแล้วเติม CS_2 เขย่าจนกระทั่งผงกำมะถันละลายหมด เทสารละลายลงบนกระจกนาฬิกาและตั้งทิ้งไว้ในตู้ควั่นเพื่อให้ CS_2 ระเหยไปจนหมด ก็จะได้ S_α ตามต้องการ หรือเตรียมโดยละลายกำมะถันในโทลูอินร้อน ๆ จนสารละลายอืดตัว กรอง เมื่อตั้งทิ้งไว้ให้เย็นลงช้า ๆ จะได้ผลึกแยกออกมา

สมบัติของกำมะถัน rombik กำมะถัน rombik มีสมบัติดังนี้

1. เป็นผลึกรูปเหลี่ยมโปร่งใสสีเหลืองอ่อน
2. มีจุดหลอมเหลว $112.8^\circ C$ และจุดเดือด $444.67^\circ C$
3. มีความหนาแน่น 2.07 g/cm^3
4. ละลายได้ใน คาร์บอนไดซัลไฟด์ (CS_2), เบนซีน (C_6H_6), โทลูอิน ($C_6H_5CH_3$) เป็นต้น แต่ไม่ละลายน้ำ
7. เสถียรที่สุดที่อุณหภูมิปกติ แต่ถ้าให้อุณหภูมิสูงกว่า $97.6^\circ C$ จะเปลี่ยนไปเป็นกำมะถันมอนอคลินิก
6. ไม่นำไฟฟ้า



รูปที่ 7.6 ผลึกกำมะถันรูปมิก



รูปที่ 7.7 ผลึกกำมะถันมอนอคลินิก

2. **กำมะถันมอนอคลินิก (Monoclinic sulphur)** หรือเรียกว่า กำมะถันพริสมติก (Prismatic sulphur) หรือกำมะถันปีต้า (β - sulphur หรือ S_β) เป็นรูปที่คงตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า 97.6°C แต่ไม่เกิน 119°C มีลักษณะผลึกรูปเข็ม (ดูรูป 7.7) S_β เมื่อตั้งทิ้งไว้ให้อุณหภูมิต่ำกว่า 97.6°C S_β จะค่อยๆ เปลี่ยนเป็น S_α และเรียกอุณหภูมินี้ว่า **Transition temperature**

การเตรียมกำมะถันมอนอคลินิก กำมะถันมอนอคลินิกเตรียมได้โดยเอาผงกำมะถันใส่หลอดทดลอง แล้วนำไปเผาให้หลอมเหลวโดยใช้ไฟอ่อนๆ ของเหลวที่ได้จะมีสีเหลืองอ่อนและใส เทกำมะถันเหลวลงในกรวยที่มีกระดาษกรอง แล้วตั้งทิ้งไว้สักครู่หนึ่ง พอสังเกตเห็นผลึกเริ่มเกิดขึ้นที่ผิวหน้าของของเหลวแล้วจึงเทกำมะถันที่ยังหลอมเหลวอยู่ในกรวยออกปล่อยให้กำมะถันที่ยังติดกระดาษกรองในกรวยเย็นจนแข็งตัวหมด ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นก็จะได้ผลึกกำมะถันมอนอคลินิกตามต้องการ หรือเตรียมได้โดยละลายกำมะถันในโทลูอีนนร้อนๆ จนสารละลายอิ่มตัว กรอง เมื่อปล่อยให้สารละลายให้เย็นลงช้าๆ จะได้ผลึกแยกออกมา

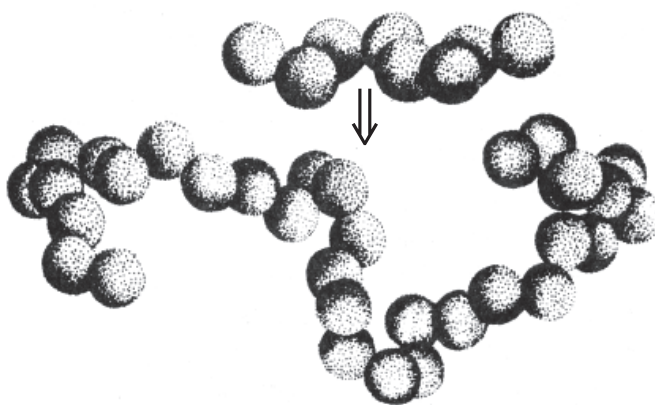
สมบัติของกำมะถันมอนอคลินิก

1. เป็นผลึกรูปเข็มโปร่งใสสีเหลืองเข้มกว่า S_α
2. มีจุดหลอมเหลว 119°C และจุดเดือด 444.67°C
3. มีความหนาแน่น 1.96 g/cm^3
4. ละลายได้ในคาร์บอนไดซัลไฟด์ โทลูอีน เป็นต้น
7. เสถียรที่อุณหภูมิสูงกว่า 97.6°C แต่ไม่เกิน 119°C
6. ไม่นำไฟฟ้า

การเผากำมะถันกับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น

เมื่อเผากำมะถัน กำมะถันจะหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 112.8°C กลายเป็นของเหลวสีเหลืองอ่อนใส เรียกว่ากำมะถันไหล หรือ กำมะถันแลมตา (Mobile Sulphur or λ - Sulphur) แต่เมื่อเผาของเหลวนี้ต่อไปของเหลวนี้จะมีสีเข้มขึ้นมีความหนาแน่นและความหนืดเพิ่มขึ้น ที่ $180 - 200^{\circ}\text{C}$ จะได้กำมะถันที่มีลักษณะเหนียวเรียกว่า กำมะถันเหนียว (Viscous sulphur or musulphur) แต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 200°C ความหนืดจะลดลงและเป็นของเหลวสีดำ และในที่สุดจะเดือดที่อุณหภูมิ 444.67°C การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวอธิบายได้ดังนี้

ในก้อนของกำมะถันประกอบด้วยโมเลกุลของกำมะถัน (S_8) และมีแรงยึดเหนี่ยวโมเลกุลเหล่านี้ไว้ด้วยกันเมื่อโมเลกุลได้รับพลังงานความร้อนโมเลกุลของกำมะถันจะมีพลังงานจลน์เพิ่มขึ้นจนกระทั่งสามารถเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลในก้อนกำมะถัน โมเลกุลก็จะเริ่มแยกตัวออกจากกันได้ กำมะถันเหลว และถ้าโมเลกุลกำมะถันได้รับพลังงานเพิ่มขึ้น โมเลกุลก็จะแตกออกเป็นสายๆ ละ 8 อะตอม (ดูรูป 7.8)



รูปที่ 7.8 แบบจำลองโครงสร้างโมเลกุลแบบสายของกำมะถัน

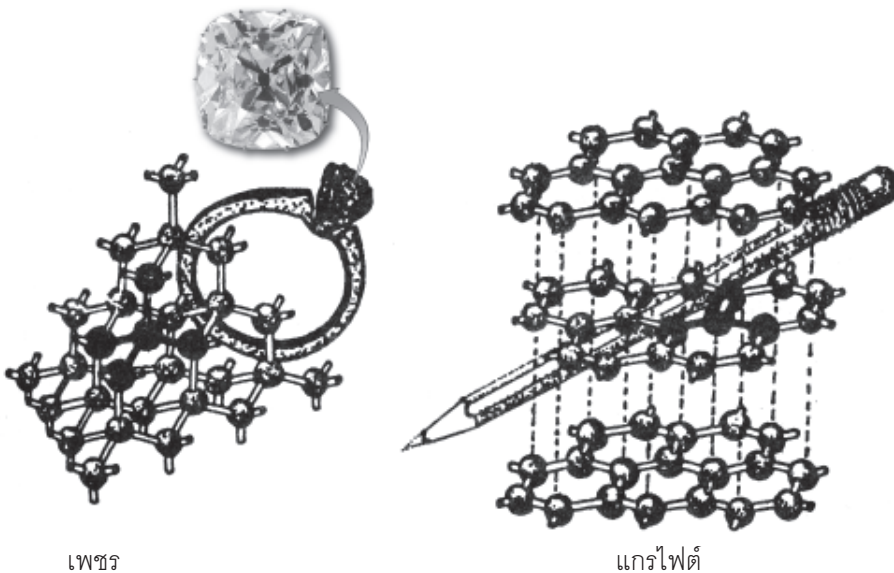
แต่ละสายก็จะต่อเข้าเป็นสายยาวทำให้กำมะถันเหลวหนืดขึ้น แต่เมื่อได้รับพลังงานมากขึ้น จะทำให้สายโมเลกุลแตกออกเป็นสายสั้นๆ ทำให้กำมะถันหนืดน้อยลงอีกครั้งหนึ่ง และเมื่อได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นอีกอนุภาคย่อยๆ ซึ่งแตกออกจากสายโมเลกุล จะแยกจากกันกลายเป็นไอ (จุดเดือดของกำมะถัน) ในขณะที่กำมะถันเดือดที่อุณหภูมิ 444.67°C ไอของกำมะถัน 1 โมเลกุลยังประกอบด้วย 8 อะตอม (S_8) แต่เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนเป็น 524°C , $1,000^{\circ}\text{C}$ และ $2,000^{\circ}\text{C}$ 1 โมเลกุลของกำมะถันจะประกอบด้วย 6 อะตอม, 2 อะตอม และ 1 อะตอมตามลำดับ (S_6 , S_2 และ S)

โครงสร้างของคาร์บอน

คาร์บอนเป็นอโลหะที่มีอยู่หลายรูปได้แก่ เพชร แกรไฟต์ และฟูลเลอรีน ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากอะตอมของคาร์บอนมีการจัดเรียงตัวต่างกัน

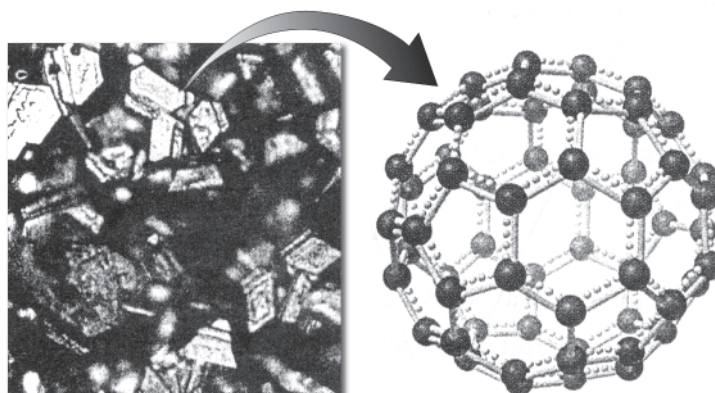
เพชร โครงสร้างของเพชรเป็นโครงผลึกร่างตาข่าย โดยอะตอมของคาร์บอนแต่ละอะตอมเกิดพันธะโคเวเลนต์กับคาร์บอนอะตอมอื่นอีก 4 อะตอม เป็นรูปทรงสี่หน้า(Tetrahedral)แบบต่อเนื่อง ดังนั้นคาร์บอนแต่ละอะตอมถูกยึดเหนี่ยวไว้อย่างแน่นเหนียวที่ไม่ได้ เพชรจึงมีความแข็งมากแต่เปราะ มีความหนาแน่น 3.51 g/cm^3 มีจุดหลอมเหลว $3,550^\circ \text{C}$ มีค่าดัชนีหักเหแสงสูง แต่ไม่นำไฟฟ้าทั้งนี้เพราะแต่ละอะตอมของคาร์บอนในเพชรใช้อิเล็กตรอนวงนอกในการยึดเหนี่ยวซึ่งกันและกันจนหมดไม่มีอิเล็กตรอนอิสระ

แกรไฟต์ โครงสร้างของแกรไฟต์ต่างจากเพชร คือมีโครงสร้างเป็นชั้นๆ ในแต่ละชั้นอะตอมของคาร์บอนแต่ละอะตอมจะเกิดพันธะโคเวเลนต์กับคาร์บอนอะตอมอื่น 3 อะตอมเป็นโครงร่างตาข่าย 2 มิติ ระหว่างชั้นก็มีแรงยึดเหนี่ยวแต่เป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ซึ่งเป็นแรงยึดเหนี่ยวที่ไม่ค่อยแข็งแรง จึงทำให้ผลึกของแกรไฟต์อ่อนไม่แข็งเหมือนเพชร ใช้ทำได้นินสอ ใช้เป็นส่วนผสมในสารหล่อลื่นได้ มีจุดหลอมเหลว $3,652^\circ \text{C}$ ความหนาแน่น 2.25 g/cm^3 และสามารถนำไฟฟ้าได้ ทั้งนี้เพราะว่าคาร์บอนอะตอมหนึ่งๆเกิดพันธะโคเวเลนต์กับคาร์บอนอะตอมอื่น 3 อะตอม แต่คาร์บอนมีอิเล็กตรอนวงนอก 4 ตัว ดังนั้นคาร์บอนทุกอะตอมในผลึกแกรไฟต์ จึงมีอิเล็กตรอนวงนอกเหลืออีก 1 ตัวที่สามารถเคลื่อนที่ได้ในผลึกแกรไฟต์ จึงทำให้แกรไฟต์นำไฟฟ้าได้



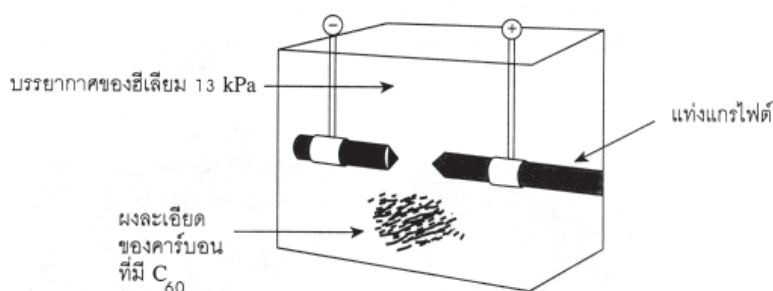
รูปที่ 7.9 แสดงแบบจำลองโครงสร้างของเพชรและแกรไฟต์

ฟูลเลอรีน ธาตุคาร์บอนนอกจากพบในรูปของเพชร และแกรไฟต์แล้ว ในปี พ.ศ.2528 นักวิทยาศาสตร์ 3 คน คือ โรเบิร์ต เคิร์ล, แฮโรลด์ โกรโต และริชาร์ด สมอลลีย์ ได้ค้นพบรูปแบบใหม่ของคาร์บอนซึ่งลักษณะเหมือนตะกร้อหรือลูกฟุตบอล และได้ตั้งชื่อว่า **ฟูลเลอรีน (Fullerenes)** ฟูลเลอรีนโมเลกุลเล็กที่สุดประกอบด้วยคาร์บอน 60 อะตอม (C_{60}) โมเลกุลของ C_{60} ประกอบด้วยรูปห้าเหลี่ยม 12 รูป และรูปหกเหลี่ยม 20 รูป โดยอะตอมคาร์บอนจะปรากฏอยู่ที่มุมของรูปเหลี่ยมเหล่านั้น เนื่องจาก C_{60} มีลักษณะเหมือนลูกฟุตบอลจึงมีเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า **บั๊กกี้บอล (Buckyball)**



รูปที่ 7.10 แสดงรูปร่างของโมเลกุลฟูลเลอรีน (C_{60})

วิธีสังเคราะห์ฟูลเลอรีนทำได้โดยนำแท่งแกรไฟต์ 2 แท่งบรรจุในบรรยากาศของฮีเลียมภายใต้ความดัน 13 kPa จากนั้นให้พลังงานความร้อนโดยใช้ electric discharge แท่งแกรไฟต์จะค่อยๆ กร่อนไป และเกิดผงละเอียดขึ้นมา พบว่า 10% ของผงละเอียดนี้คือ C_{60} และ C_{70} (ต่อมานักวิทยาศาสตร์ได้ค้นพบฟูลเลอรีนที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่า C_{60} เพิ่มขึ้นอีก เช่น C_{240} เป็นต้น)



รูปที่ 7.11 แสดงวิธีสังเคราะห์ฟูลเลอรีน

C_{60} มีมวลโมเลกุล 720 มีความหนาแน่น 1.72 g/cm^3 มีจุดหลอมเหลว 527°C (ระเหิด) ไม่นำไฟฟ้า มีเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุล 700 pm

ประโยชน์ของ C_{60} C_{60} สามารถรับอิเล็กตรอนกลายเป็นไอออนลบเมื่อรวมตัวกับโลหะแอลคาไล เช่น โพแทสเซียมเกิดสารประกอบ $K_3^+C_{60}^{3-}$ มีลักษณะเป็นผลึก และมีสมบัติเป็นตัวนำยิ่งยวดที่อุณหภูมิ 19 เคลวิน C_{60} เหมาะสำหรับการทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาเคมีเพราะ C_{60} สามารถรับหรือให้อิเล็กตรอนได้ง่าย ถ้านำอะตอมของธาตุกัมมันตรังสีใส่เข้าไปในช่องตรงกลางของ C_{60} จะได้สารที่มีประสิทธิภาพสูงในการรักษามะเร็งได้ นอกจากนี้ C_{60} ยังใช้ในอุตสาหกรรมทำแบตเตอรี่ และใช้เป็นเชื้อเพลิงในจรวดเพราะการเผาไหม้ของ C_{60} จะให้พลังงานได้มากกว่าการเผาไหม้น้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ในปัจจุบัน

โครงสร้างของฟอสฟอรัส

ฟอสฟอรัสเป็นอโลหะมีรูปที่สำคัญ 3 ชนิดคือ

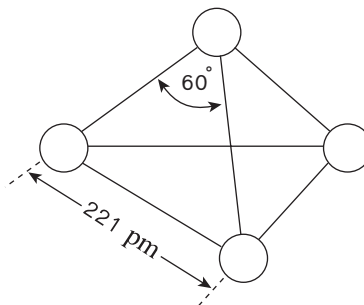
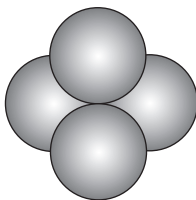
1. ฟอสฟอรัสขาวหรือฟอสฟอรัสเหลือง
2. ฟอสฟอรัสแดง
3. ฟอสฟอรัสดำ

ฟอสฟอรัสขาวหรือฟอสฟอรัสเหลือง โมเลกุลของฟอสฟอรัสขาวประกอบด้วยฟอสฟอรัส 4 อะตอม

มีสูตรโมเลกุล P_4 (ดูรูป 7.12)

สมบัติของฟอสฟอรัสขาว

1. เป็นของแข็งสีขาวหรือเหลือง
2. มีจุดหลอมเหลว 44°C
3. มีความหนาแน่น 1.82 g/cm^3
4. ไม่นำไฟฟ้า
5. ละลายน้ำได้น้อยแต่ละลายได้ในคาร์บอนไดซัลไฟด์ (CS_2)
6. ลุกติดไฟในอากาศที่ 35°C
7. มีกลิ่นคล้ายกระเทียม เป็นพิษ ถ้าหายใจเข้าไปจะเป็นโรคชากรรไกร
8. ต้มกับสารละลาย NaOH หรือ KOH ได้ PH_3

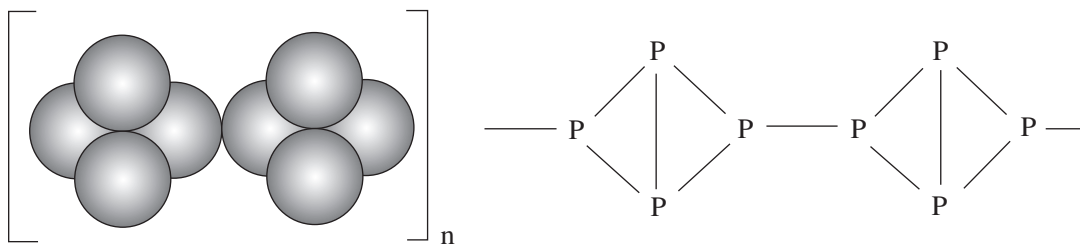


รูปที่ 7.12 แบบจำลองโมเลกุลของฟอสฟอรัสขาว

ฟอสฟอรัสแดง โมเลกุลมีโครงสร้างเป็นสายยาวคล้ายลูกโซ่ (ดูรูป 7.13) ดังนั้นโมเลกุลของฟอสฟอรัสแดงจึงมีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าโมเลกุลของฟอสฟอรัสขาว

สมบัติของฟอสฟอรัสแดง

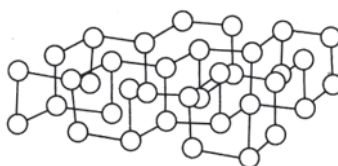
1. เป็นของแข็งสีแดง
2. มีจุดหลอมเหลว 590°C ที่ความดัน 43 บรรยากาศ
3. มีความหนาแน่น 2.34 g/cm^3
4. ไม่นำไฟฟ้า
5. ไม่ละลายในน้ำและ CS_2
6. ไม่ลุกไหม้ในอากาศ
7. ไม่ทำปฏิกิริยากับกรดหรือเบส



รูปที่ 7.13 แบบจำลองโมเลกุลของฟอสฟอรัสแดง

ฟอสฟอรัสดำ มีโครงสร้างแบบโครงร่างตาข่าย มีสมบัติดังนี้

1. เป็นของแข็งสีดำ
2. มีจุดหลอมเหลว 610°C
3. มีความหนาแน่น 2.699 g/cm^3
4. นำไฟฟ้าได้เล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น



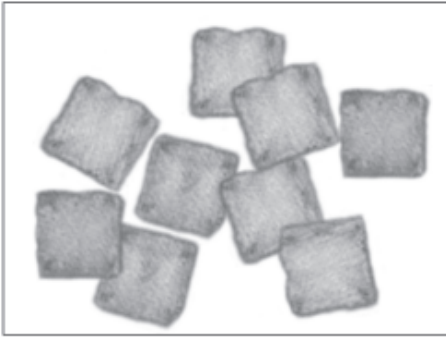
รูปที่ 7.14 แบบจำลองโครงสร้างของฟอสฟอรัสดำ

7.5 ชนิดของผลึก

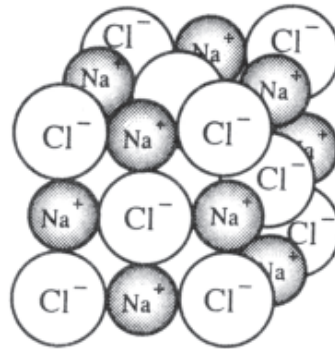
ผลึก คือ ของแข็งที่มีรูปร่างเฉพาะตัว มีเหลี่ยม มีมุม และผิวหน้าเรียบ ของแข็งที่เป็นผลึกมีหลายชนิดดังนี้

1. ผลึกโมเลกุล ผลึกชนิดนี้ประกอบด้วยโมเลกุลยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (แรงลอนดอนหรือแรงดึงดูดระหว่างขั้ว) หรือพันธะไฮโดรเจน ถ้าโมเลกุลในผลึกชนิดนี้เป็นโมเลกุลไม่มีขั้ว แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลคือแรงแวนเดอร์วาลส์ชนิดแรงลอนดอน เช่น ผลึกแอมโมเนีย น้ำแข็งแห้ง (คาร์บอนไดออกไซด์แข็ง) กำมะถัน ไอโอดีน ถ้าโมเลกุลในผลึกชนิดนี้เป็นโมเลกุลมีขั้ว แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล คือ แรงดึงดูดระหว่างขั้วหรือพันธะไฮโดรเจน เช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์แข็งแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลคือแรงดึงดูดระหว่างขั้ว (แรงไดโพล-ไดโพล) น้ำแข็ง แอมโมเนียแข็ง แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล คือ พันธะไฮโดรเจน เนื่องจากหน่วยย่อยในผลึกประเภทนี้เป็นโมเลกุล และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลไม่แข็งแรง ทำให้ผลึกประเภทนี้มีจุดหลอมเหลวต่ำ เพราะ ไม่นำไฟฟ้าหรืออาจนำได้น้อยมากในบางชนิด บางชนิดระเหิดได้ เช่น ไอโอดีน แอมโมเนีย

2. ผลึกไอออนิก ผลึกชนิดนี้ประกอบด้วยไอออนบวกและไอออนลบ ยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะไอออนิก (แรงดึงดูดระหว่างประจุไฟฟ้า) ซึ่งเป็นแรงยึดเหนี่ยวที่แข็งแรงมาก ทำให้ผลึกประเภทนี้มีจุดหลอมเหลวสูงแข็งแต่เปราะไม่นำไฟฟ้าต้องหลอมเหลวหรือละลายน้ำจึงนำไฟฟ้าได้ตัวอย่างผลึกประเภทนี้ เช่น ผลึกโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ผลึกจุนดี ผลึกสารส้ม



ผลึกโซเดียมคลอไรด์



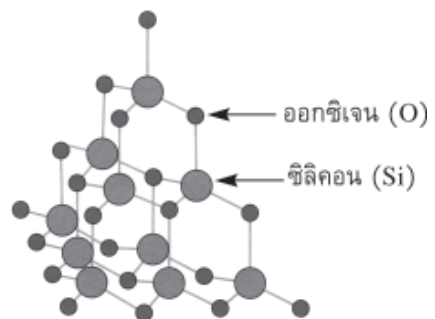
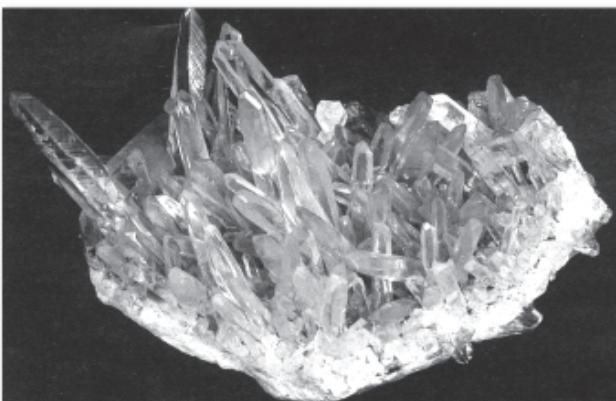
โครงสร้างผลึกของโซเดียมคลอไรด์

(รูปนี้เป็นส่วนหนึ่งในผลึก 1 ก้อนเท่านั้น
และไม่สามารถมองเห็นได้)

รูปที่ 7.15 แสดงผลึกและโครงสร้างผลึกของโซเดียมคลอไรด์

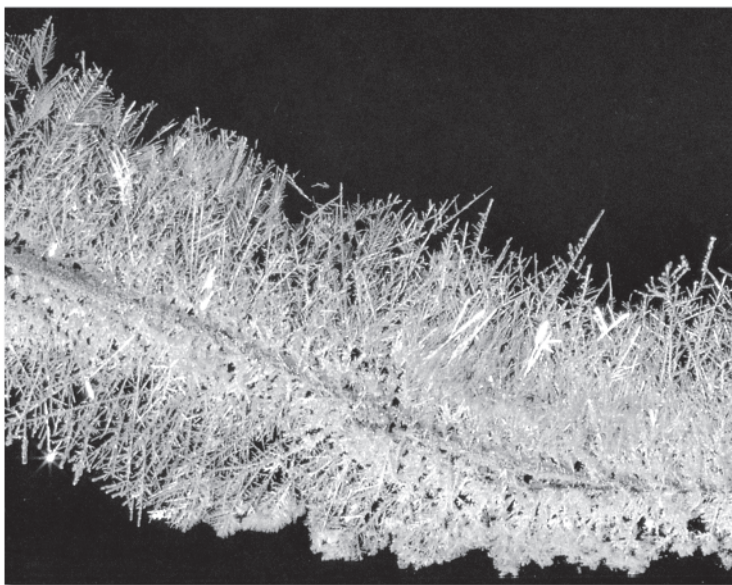
3. ผลึกโคเวเลนต์แบบโครงผลึกร่างตาข่าย ผลึกชนิดนี้ประกอบด้วยอะตอมยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะโคเวเลนต์แบบต่อเนื่อง ตัวอย่างผลึกประเภทนี้ เช่น เพชร แกรไฟต์ ซิลิคอน ฟอสฟอรัสดำ ควอตซ์ (SiO_2) คาร์บอนดำ (SiC) เป็นต้น

เนื่องจากพันธะโคเวเลนต์ระหว่างอะตอมในผลึกชนิดนี้เป็นแรงยึดเหนี่ยวที่แข็งแรงมากจึงทำให้ผลึกชนิดนี้มีจุดหลอมเหลวสูง มีความแข็งแรง (ยกเว้นแกรไฟต์) เปราะ ไม่ละลายน้ำ บางชนิดนำไฟฟ้าได้คือแกรไฟต์ บางชนิดไม่นำไฟฟ้า เช่น เพชร บางชนิดนำไฟฟ้าได้บ้าง เช่น ซิลิคอน



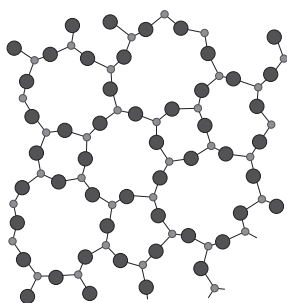
รูปที่ 7.16 แสดงผลึกและโครงสร้างผลึกของควอตซ์หรือซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2)

4. **ผลึกโลหะ** ผลึกชนิดนี้ประกอบด้วยอะตอมยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะโลหะซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรงมากอีกชนิดหนึ่ง ผลึกชนิดนี้ส่วนใหญ่มีจุดหลอมเหลวสูง นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี เหนียวสามารถตีแผ่ ออกเป็นแผ่นหรือดึงออกเป็นเส้นได้ ผิวหน้าเป็นมันวาวโลหะบางชนิดค่อนข้างอ่อนมีจุดหลอมเหลวต่ำ ได้แก่ โลหะแอลคาไล (โลหะหมู่ IA) เช่น โซเดียม (Na) โพแทสเซียม (K) เป็นต้น

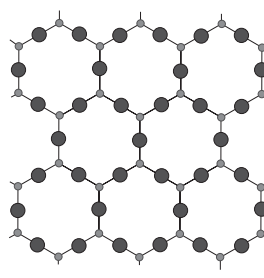


รูปที่ 7.17 แสดงผลึกของเงินซึ่งเกิดจากให้ Cu ทำปฏิกิริยากับ Ag^+

ของแข็งบางชนิดไม่มีรูปผลึกเช่น ยาง พลาสติก แก้ว ซีเมนต์ กำมะถันในรูปกำมะถันพลาสติก ของแข็งประเภทนี้เรียกว่า ของแข็งอสัณฐาน (Amorphous solid) อนุภาคภายในของแข็งประเภทนี้มีการจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ เมื่อแตกหักจะได้ชิ้นส่วนที่ไม่เป็นรูปทรงเรขาคณิต ส่วนใหญ่ไม่สามารถหาจุดหลอมเหลวที่แน่นอนได้ สำหรับควอตซ์ (SiO_2) เป็นของแข็งผลึก แต่เมื่อทำแก้ว แก้วควอตซ์ที่ได้เป็นของแข็งอสัณฐาน



แก้วควอตซ์



ผลึกควอตซ์

รูปที่ 7.18 เปรียบเทียบโครงสร้าง 2 มิติของแก้วควอตซ์กับผลึกควอตซ์

7.6 การเปลี่ยนสถานะของของแข็ง

7.6.1 การหลอมเหลวและจุดหลอมเหลว

ของแข็งเมื่อได้รับพลังงานความร้อน อนุภาคภายในของแข็งจะมีพลังงานจลน์สูงขึ้น อนุภาคจึงมีการสั่นมากขึ้น และเมื่อได้รับพลังงานความร้อนจนถึงจุดหนึ่ง อนุภาคภายในของแข็งจะมีการสั่นอย่างรุนแรง จนถึงขีดที่อนุภาคภายในของแข็งแยกออกจากกันไม่เป็นโครงผลึกอีกต่อไป และเคลื่อนที่ไปมาได้ นั่นคือของแข็งกลายเป็นของเหลว เรียกว่า **การหลอมเหลว (Melting)** ในทำนองเดียวกัน เมื่อของเหลวถูกทำให้เย็นลง อนุภาคภายในของเหลวก็จะมีพลังงานจลน์ลดลง แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคมีค่ามากขึ้นทำให้อนุภาคอยู่ติดกันมากกว่าเดิม จนไม่สามารถเคลื่อนที่ไปมาได้เพียงแต่สั่นได้เท่านั้น นั่นคือของเหลวกลายเป็นของแข็ง เรียกว่า **การแข็งตัว (Freezing)** คุณสมบัติที่ทำให้ของแข็งหลอมเหลว หรือของเหลวแข็งตัวเป็นคุณสมบัติเดียวกัน

จุดหลอมเหลว (Melting Point) คือ อุณหภูมิขณะที่ของแข็งเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลว และจุดหลอมเหลวที่ความดัน 1 บรรยากาศ เรียกว่า จุดหลอมเหลวปกติ

จุดเยือกแข็ง (Freezing Point) คือ อุณหภูมิขณะที่ของเหลวเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็ง และนักวิทยาศาสตร์กำหนดให้จุดเยือกแข็งที่ความดัน 1 บรรยากาศ เป็นจุดเยือกแข็งปกติ

หมายเหตุ จุดเยือกแข็ง และจุดหลอมเหลวของสารหนึ่ง ๆ เป็นจุดเดียวกัน เช่น น้ำมีจุดเยือกแข็งเท่ากับ 0°C และน้ำแข็งมีจุดหลอมเหลวเท่ากับ 0°C เช่นเดียวกัน

ปัจจัยที่มีผลต่อจุดหลอมเหลวของของแข็ง

1. **ความดันของบรรยากาศ** ความดันของบรรยากาศเป็นส่วนโดยตรงกับจุดหลอมเหลวของของแข็ง กล่าวคือ ถ้าความดันบรรยากาศสูง จุดหลอมเหลวจะสูง ถ้าความดันบรรยากาศต่ำจุดหลอมเหลวจะต่ำ

2. **ชนิดของของแข็ง** ของแข็งที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคสูง จะมีจุดหลอมเหลวสูงกว่าของแข็งที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคต่ำ เช่น ไทเทเนียมคลอไรด์มีจุดหลอมเหลวสูงกว่ากำมะถัน เป็นต้น

สรุปข้อความสำคัญ ๆ เกี่ยวกับการหลอมเหลว

1. จุดหลอมเหลวขึ้นอยู่กับความดันบรรยากาศ และชนิดของของแข็ง
2. ในขณะที่ของแข็งบริสุทธิ์หลอมเหลวจะมีอุณหภูมิคงที่เสมอ เมื่อความดันของบรรยากาศคงที่
3. จุดหลอมเหลวของของแข็งชนิดหนึ่ง ๆ จะมีค่าคงที่เสมอ เมื่อความดันคงที่
4. ขณะที่ของแข็งหลอมเหลว อุณหภูมิคงที่ เพราะของแข็งได้ใช้พลังงานความร้อนที่ได้รับไปเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวพลังงานความร้อนจำนวนนี้เรียกว่า ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว

7.6.2 การระเหิด (Sublimation)

การระเหิด หมายถึง การเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นแก๊สหรือไอเลยโดยไม่เปลี่ยนเป็นของเหลวก่อน ของแข็งสามารถเกิดการระเหิดได้เพราะว่า อนุภาคภายในของแข็งมีการสั่นสะเทือนตลอดเวลา ทำให้มีการถ่ายเทพลังงานเกิดขึ้น บางอนุภาคมีพลังงานต่ำลงบางอนุภาคมีพลังงานสูงขึ้น อนุภาคที่มีพลังงานสูงพอและอยู่ที่ผิวหน้าของของแข็งจะสามารถเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคในของแข็งหลุด

ออกจากของแข็งไปอยู่ในสถานะแก๊ส โดยไม่ผ่านสถานะของเหลวก่อน ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า **การระเหิด** การระเหิดจะเกิดเฉพาะที่ผิวหน้าของของแข็งเท่านั้น ถ้าใส่ของแข็งที่เกิดการระเหิดได้ เช่น แนพทาไลน์ ไอโอดีน ในภาชนะที่มีฝาปิด ไอที่เกิดจากการระเหิดก็จะอยู่บริเวณที่ว่างเหนือของแข็งภายในภาชนะนั้น เมื่อทิ้งไว้นานๆ ปริมาณไอก็จะมากขึ้น ในขณะที่มีไอเหนือของแข็ง ไอบางโมเลกุลจะตกผลึกกลับเป็นของแข็งอีก และการตกผลึกนี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณไอเหนือของแข็งมากขึ้น เมื่ออัตราการระเหิดเท่ากับอัตราการตกผลึก ปริมาณไอและปริมาณของแข็งจะคงที่ระบบจะอยู่ในภาวะสมดุลซึ่งเป็นสมดุลไดนามิก คือที่ภาวะสมดุลระบบยังไม่ได้หยุดนิ่งยังมีทั้งการระเหิดและการตกผลึกแต่เกิดในอัตราที่เท่ากัน โมเลกุลที่ยังคงอยู่ในสภาพไอทำให้เกิดความดัน และเรียกความดันไอขณะที่ระบบอยู่ในภาวะสมดุลว่า **ความดันไอของของแข็ง**

ข้อควรจำ แก๊ส (Gas) หมายถึง สารที่อยู่ในสถานะแก๊สที่อุณหภูมิห้องและความดัน 1 บรรยากาศ ตัวอย่างสารที่เป็นแก๊ส เช่น แก๊สออกซิเจน แก๊สไนโตรเจน แก๊สไฮโดรเจน เป็นต้น ส่วน ไอ (Vapour) หมายถึง สารที่อยู่ในสถานะแก๊ส ซึ่งเปลี่ยนสถานะมาจากของเหลว หรือของแข็งที่อุณหภูมิห้อง ความดัน 1 บรรยากาศ หรืออุณหภูมิและความดันอื่น ตัวอย่างไอ เช่น ไอน้ำ ไอปรอท ไอแนพทาไลน์ (ลูกเหม็น) เป็นต้น



การระเหิดของไอโอดีน



การระเหิดของน้ำแข็งแห้ง(คาร์บอนไดออกไซด์แข็ง)

รูปที่ 7.19 แสดงการระเหิดของไอโอดีนและน้ำแข็งแห้ง

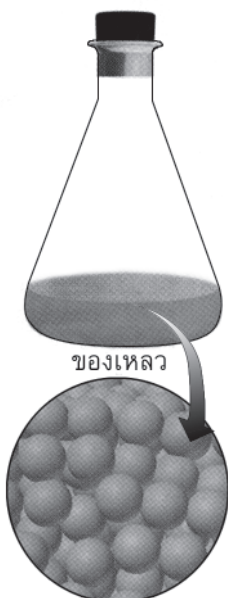
ปัจจัยที่มีผลต่อการระเหิดของของแข็ง

1. **อุณหภูมิ** อัตราการระเหิดเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิ คือ ถ้าอุณหภูมิสูงของแข็งจะเกิดการระเหิดได้เร็วขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำของแข็งจะระเหิดได้ช้าลง
2. **ชนิดของของแข็ง** ของแข็งที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคน้อยจะระเหิดได้ง่าย เช่น แนพทาลิน (ลูกเหม็น) การบูร พิมเสน ไอโอดีน ฯลฯ
3. **ความดันของบรรยากาศ** ถ้าความดันของบรรยากาศสูงของแข็งจะระเหิดได้ยาก แต่ถ้าความดันของบรรยากาศต่ำของแข็งจะระเหิดได้ง่าย
4. **พื้นที่ผิวของของแข็ง** เพราะว่าการระเหิดเกิดขึ้นเฉพาะผิวหน้าของของแข็ง ดังนั้นถ้าของแข็งมีพื้นที่ผิวมากก็จะระเหิดได้เร็ว
7. **อากาศเหนือของแข็ง** อากาศเหนือของแข็งจะต้องมีการถ่ายเทตลอดเวลา เพื่อป้องกันการอิ่มตัวของไอ

7.7 สมบัติของของเหลว

7.7.1 สมบัติทั่วไปของของเหลว

1. ของเหลวมีรูปร่างไม่แน่นอน เปลี่ยนตามภาชนะที่บรรจุของเหลวนั้น
2. ของเหลวประกอบด้วยโมเลกุลที่เคลื่อนที่อย่างไม่ค่อยเป็นระเบียบอยู่ตลอดเวลาในระยะสั้น ๆ เพราะมีช่องว่างระหว่างโมเลกุลน้อย
3. โมเลกุลของของเหลวอยู่ติดกันมากกว่าโมเลกุลของแก๊ส เพราะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลมากกว่า



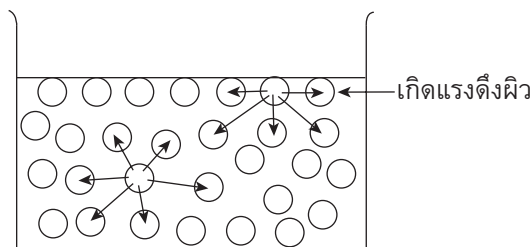
4. ปริมาตรของของเหลวเปลี่ยนแปลงน้อยมาก เมื่ออุณหภูมิและความดันเปลี่ยน
7. ของเหลวส่วนใหญ่มีความหนาแน่นมากกว่าแก๊ส แต่น้อยกว่าของแข็ง
6. โมเลกุลของของเหลวสามารถแพร่กระจายได้ แต่แพร่ได้ช้ากว่าโมเลกุลของแก๊สเพราะของเหลวมีความหนาแน่นมากจึงถูกดึงดูดโดยโมเลกุลข้างเคียง และมีบริเวณที่จะเคลื่อนที่จำกัด ต้องปะทะ โมเลกุลอื่นตลอดทาง เช่น เมื่อหยดหมึกสีน้ำเงินในน้ำ น้ำหมึกก็จะค่อย ๆ แพร่กระจายออกไป จนในที่สุดได้สารละลายของน้ำหมึก (สีน้ำเงินอ่อน)
7. เมื่อนำของเหลวสองชนิดที่ไม่ทำปฏิกิริยากันมาผสมกัน ปริมาตรรวมจะเท่ากับผลบวกของปริมาตรของของเหลวทั้งสองที่นำมาผสมกัน

รูปที่ 7.20 การจัดเรียงอนุภาคในของเหลว

8. ของเหลวมีช่องว่างระหว่างโมเลกุลน้อยมาก เมื่อเพิ่มความดันปริมาตรจะลดลงน้อยมาก จึงกล่าวได้ว่าเราไม่สามารถบีบอัดของเหลวให้มีปริมาตรลดลงได้
9. ของเหลวสามารถระเหยได้ทุก ๆ อุณหภูมิ (ดูรายละเอียดหัวข้อ 7.7.4)
10. ของเหลวเดือดได้เมื่อของเหลวที่มีความดันไอเท่ากับความดันของบรรยากาศ (ดูรายละเอียดหัวข้อ 7.7.5)
11. ของเหลวมีแรงตึงผิว (Tension force) และความหนืด (Viscosity) ทั้งนี้เพราะโมเลกุลของของเหลวอยู่ชิดกัน จึงเกิดแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน และของเหลวใดยังมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมากจะยังมีแรงตึงผิว และความหนืดมาก

7.7.2 แรงตึงผิวและความตึงผิว

ในของเหลวโมเลกุลที่อยู่ตรงกลางจะเกิดแรงดึงดูดกับโมเลกุลอื่นๆ ที่อยู่โดยรอบทุกทิศทาง แต่โมเลกุลที่อยู่บริเวณผิวน้ำของของเหลว จะถูกดึงดูดโดยโมเลกุลที่อยู่ด้านล่างและด้านข้างเท่านั้น ผลรวมของแรงดึงดูดจึงมีทิศทางลงสู่ด้านล่าง ทำให้โมเลกุลที่ผิวน้ำถูกดึงเข้าภายในของเหลว แรงดึงดูดที่ดึงโมเลกุลบริเวณผิวน้ำเข้าภายในของเหลวเพื่อให้พื้นที่ผิวของของเหลวลดลงเหลือน้อยที่สุดเรียกว่า **แรงตึงผิว (Tension force)** ดูรูปที่ 7.21



รูปที่ 7.21 การเกิดแรงตึงผิว และการเกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลภายในของเหลว

ตัวอย่างผลของการเกิดแรงตึงผิว เช่น หยดน้ำที่เกาะบนแผ่นกระจก จะมีลักษณะเป็นทรงกลม แทนที่จะแผ่ออกไปเป็นฟิล์มบางๆ เพราะลักษณะทรงกลมมีพื้นที่ผิวน้อยกว่าการแผ่ออกไปเป็นฟิล์มบางๆ นั่นเอง

ในทางตรงกันข้าม ถ้าต้องการเพิ่มพื้นที่ผิวของของเหลว เช่น จากมีลักษณะเป็นทรงกลมกลายเป็นแผ่นฟิล์มบางๆ จะต้องเพิ่มพื้นที่ผิวของของเหลว โดยโมเลกุลที่อยู่ด้านในของของเหลว จะต้องเคลื่อนที่ออกมายังผิวน้ำของของเหลว โมเลกุลที่อยู่ด้านในของของเหลวจะเคลื่อนที่มายังผิวน้ำของของเหลวได้โมเลกุลเหล่านั้นจะต้องใช้พลังงานเพื่อเอาชนะแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่อยู่รอบข้างหรือกล่าวได้ว่าต้องทำงาน งานที่ต้องใช้ในการเพิ่มพื้นที่ผิวของของเหลว 1 หน่วย เรียกว่า **ความตึงผิว (Surface Tension)** ความตึงผิว จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล ของเหลวที่มีดึงดูดระหว่างโมเลกุลแข็งแรงกว่า โมเลกุลที่ผิวน้ำจะถูกดึงดูดเข้าสู่ภายในของเหลวแรงกว่าด้วย ทำให้งานที่ใช้เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวของของเหลวหรือความตึงผิวมากตามด้วยหรือกล่าวได้ว่าของเหลวที่มีแรงตึงผิวมากจะมีความตึงผิวมากด้วย

ในทางกลับกันของเหลวที่มีแรงตึงผิวน้อยก็จะมีมีความตึงผิวน้อยด้วย เช่น ปรอทมีแรงตึงผิวและความตึงผิวสูงกว่าน้ำมาก น้ำมีแรงตึงผิวและความตึงผิวสูงกว่าเฮกเซน เพราะปรอทมีแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคเป็นพันธะโลหะซึ่งแข็งแรงมาก น้ำมีแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคเป็นพันธะไฮโดรเจนซึ่งอ่อนกว่าพันธะโลหะมากและเฮกเซนมีแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคเป็นแรงลอนดอนซึ่งอ่อนกว่าพันธะไฮโดรเจน

ชนิดของเหลว	สูตรเคมี	ความตึงผิว (N/m)	แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคที่เป็นแรงหลัก
ปรอท	Hg	0.486	พันธะโลหะ
น้ำ	H ₂ O	0.072	พันธะไฮโดรเจน
เฮกเซน	C ₆ H ₁₄	0.018	แรงลอนดอน
ไดเอทิลอีเทอร์	C ₂ H ₅ OC ₂ H ₅	0.017	แรงไดโพล-ไดโพล (แรงดึงดูดระหว่างขั้วของโมเลกุล)

ตารางที่ 7.4 ค่าความตึงผิวของของเหลวบางชนิดที่ 25 °C

ความตึงผิวของของเหลวนอกจากขึ้นอยู่กับชนิดของของเหลวแล้วยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิด้วย คือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความตึงผิวของของเหลวจะลดลงเพราะ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นพลังงานจลน์ของแต่ละโมเลกุลเพิ่มขึ้น ทำให้แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลลดลง นอกจากนี้การเติมสารบางอย่างลงในของเหลว สามารถทำให้ความตึงผิวเปลี่ยนแปลงได้ เช่น เมื่อเติมสบู่หรือผงซักฟอกลงในน้ำจะทำให้ความตึงผิวของน้ำลดลง ทำให้เสื้อผ้าเปียกน้ำอย่างรวดเร็ว และช่วยกำจัดคราบไขมันหรือน้ำมันออกจากเสื้อผ้าได้

ปรากฏการณ์ที่นักเรียนสามารถพบได้ในชีวิตประจำวันที่เกิดจากแรงตึงผิว เช่น เห็นแมลงสามารถอยู่บนผิวน้ำได้ เห็นหยดน้ำบนใบไม้ เห็นน้ำล้นขอบภาชนะที่บรรจุ ปรอทมีลักษณะเป็นหยดกลมๆเมื่ออยู่บนวัสดุที่ผิวเรียบ เป็นต้น



หยดน้ำบนใบไม้



แมลงอยู่บนผิวน้ำได้

รูปที่ 7.22 ปรากฏการณ์ที่เกิดจากแรงตึงผิว

7.7.3 แรงเชื่อมแน่นและแรงยึดติด

แรงเชื่อมแน่น (Cohesive force) คือ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคของสารชนิดเดียวกัน เช่น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของน้ำกับน้ำ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของเอทานอลกับเอทานอล เป็นต้น

แรงยึดติด (Adhesive force) คือ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคต่างชนิดกัน เช่น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของน้ำกับอนุภาคที่เป็นองค์ประกอบในหลอดแก้วที่บรรจุน้ำ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล