

ตำรา  
ฟิสิกส์สำหรับครู 2  
(Physics for Teacher 2)

สุมาลี เทียนทองดี

คณะครุศาสตร์  
มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา  
2565

## คำนำ

สำหรับตำรา ฟิสิกส์สำหรับครู 2 รหัสวิชา SCC1305 เล่มนี้ ผู้เขียนได้เขียนและเรียบเรียงขึ้น เพื่อใช้ในประกอบการจัดการเรียนการสอนในรายวิชาบังคับตามหลักสูตรศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา ซึ่งเป็นรายวิชาบังคับจำนวน 3 หน่วยกิต จำนวน 4 คาบเรียนต่อสัปดาห์ คำอธิบายรายวิชาสำหรับวิชานี้ เพื่อศึกษาเนื้อหาฟิสิกส์พื้นฐาน ได้แก่ เรื่อง อุณหพลศาสตร์เบื้องต้น แสงและทัศนศาสตร์ ไฟฟ้าและแม่เหล็ก ฟิสิกส์ยุคใหม่ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ฟิสิกส์ควอนตัม ฟิสิกส์สถานะของแข็ง รวมทั้งการนำความรู้ไปอธิบายปรากฏการณ์ทางธรรมชาติโดยใช้หลักฐานเชิงประจักษ์ การใช้ห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ตามหลักปฏิบัติสากล การประยุกต์ใช้ความรู้เพื่อการจัดการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ในระดับการศึกษาขั้นพื้นฐานให้เหมาะสมกับสภาพและบริบทของท้องถิ่น ตามมาตรฐานการผลิตครูของหลักสูตรฐานสมรรถนะ โดยผู้เขียนได้รวบรวมเอกสารสารทั้งจากหนังสือ ตำรา และแหล่งข้อมูลอื่น ๆ ที่น่าเชื่อถือ เพื่อนำมาเขียนและเรียบเรียงเหมาะสมตามคำอธิบายรายวิชา โดยแบ่งเนื้อหาออกเป็น 8 บทเรียน ประกอบด้วย บทที่ 1 อุณหพลศาสตร์เบื้องต้น บทที่ 2 แสงและทัศนศาสตร์ บทที่ 3 ไฟฟ้าสถิตและไฟฟ้ากระแส บทที่ 4 แม่เหล็กไฟฟ้าเบื้องต้น บทที่ 5 ทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษ บทที่ 6 กลศาสตร์ควอนตัมเบื้องต้น บทที่ 7 ฟิสิกส์นิวเคลียร์และกัมมันตภาพรังสี และ บทที่ 8 ฟิสิกส์สถานะของแข็ง อีกทั้งยังเพิ่มเติมกิจกรรมที่ส่งเสริมสมรรถนะสำหรับครูวิทยาศาสตร์ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการสอนของผู้ศึกษาเองได้ในอนาคต โดยได้นำผลที่ได้จากงานวิจัยและตำราของผู้เขียนเองที่ผ่านมา ช่วยในการออกแบบกิจกรรมการเรียนรู้ในตำราเล่มนี้ด้วย ผู้เขียนได้หลีกเลี่ยงคำศัพท์หรือข้อความที่เข้าใจยากและไม่ได้เน้นการพิสูจน์ทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน โดยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าตำราเล่มนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการเรียนการสอนในรายวิชาฟิสิกส์สำหรับครู 2 รวมทั้งนักศึกษาหรือบุคคลทั่วไปที่สนใจเนื้อหาวิชาฟิสิกส์พื้นฐาน

สุมาลี เทียนทองดี

กรกฎาคม 2565

# สารบัญ

	หน้า
คำนำ	(1)
สารบัญ	(3)
สารบัญภาพ	(8)
สารบัญตาราง	(9)
<b>บทที่ 1 อุณหพลศาสตร์เบื้องต้น</b>	
1.1 บทนำ	1
1.2 อุณหภูมิ	2
1.3 ผลของความร้อนที่มีต่อวัตถุ	4
1.4 การขยายตัวของของเหลว	8
1.5 ความเค้นที่เกิดจากการขยายตัวของวัตถุ	9
1.6 ปริมาณความร้อนและความจุความร้อน	11
1.7 ความร้อนกับการเปลี่ยนสถานะของสาร	13
1.8 การถ่ายโอนความร้อน	16
1.9 กฎข้อที่ศูนย์ของอุณหพลศาสตร์	21
1.10 กฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์	21
1.11 งานที่เกิดขึ้นโดยกระบวนการทางอุณหพลศาสตร์	24
1.12 กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์	30
1.13 บทสรุป	31
แบบฝึกหัด	33
เอกสารอ้างอิง	35
<b>บทที่ 2 แสงและทัศนศาสตร์</b>	
2.1 บทนำ	36
2.2 ธรรมชาติของแสง	36
2.3 การสะท้อนของแสง	37
2.4 ภาพที่เกิดจากการหักเหของแสง	46
2.5 การแทรกสอดของแสง	49
2.6 การเลี้ยวเบนของแสง	51
2.7 การโพลาไรเซชันของแสง	53

	หน้า
2.8 ปรัชญาการณัของแสง	54
2.9 ทศนอุปกรณั	58
2.10 บทสรุปร	61
แบบฝึกหัด	62
เอกสารอ้างอิง	63
<b>บทที่ 3 ไฟฟ้าสถิตและไฟฟ้ากระแส</b>	
3.1 บทนำ	66
3.2 ประจุไฟฟ้า	66
3.3 ปรัชญาการณัไฟฟ้าสถิต	68
3.4 กฎของคูลอมบ์	69
3.5 สนามไฟฟ้า	72
3.6 พลังงานศักย์ไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า	74
3.7 ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากสนามไฟฟ้าคงตัว	75
3.8 การประยุกต์ใช้หลักการของไฟฟ้าสถิต	79
3.9 กระแสไฟฟ้า	81
3.10 กฎของโอห์ม	82
3.11 แรงเคลื่อนไฟฟ้า	85
3.12 กำลังไฟฟ้า	86
3.13 การต่อตัวต้านทานไฟฟ้า	86
3.14 ตัวเก็บประจุ	88
3.15 กฎของเคอร์ชอฟ	91
3.16 ไฟฟ้ากระแสสลับ	92
3.17 วงจรไฟฟ้ากระแสสลับ RLC	97
3.18 หม้อแปลงไฟฟ้า	99
3.19 บทสรุปร	100
แบบฝึกหัด	102
เอกสารอ้างอิง	103

<b>บทที่ 4 แม่เหล็กไฟฟ้าเบื้องต้น</b>	
4.1 บทนำ	105
4.2 สนามแม่เหล็กไฟฟ้า	106
4.3 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	109
4.4 กฎของแอมแปร์	110
4.5 กฎของบีโอ-ซาวาร์ต	112
4.6 ปรัชญาการณีสอลล์	112
4.7 กฎของฟาราเดย์และเฮนรีเกี่ยวกับการเหนี่ยวนำ	114
4.8 กฎของเลนซ์	115
4.9 แสงกับการเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	116
4.10 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	117
4.11 สมการของแมกซ์เวลล์	123
4.12 สมการของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	125
4.13 พลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	130
4.14 บทสรุป	132
แบบฝึกหัด	134
เอกสารอ้างอิง	135
<b>บทที่ 5 ทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษ</b>	
5.1 บทนำ	136
5.2 ทฤษฎีสัมพัทธภาพ	136
5.3 การทดลองของไมเคิลสันกับมอร์เลย์	141
5.4 การยืดของเวลา	144
5.5 การหดสั้นของความยาว	147
5.6 ความเป็นเวลาเดียวกัน	149
5.7 สมการการแปลงแบบลอเรนซ์	150
5.8 โมเมนตัมในทฤษฎีสัมพัทธภาพ	154
5.9 แรงและพลังงานในทฤษฎีสัมพัทธภาพ	155
5.10 ทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป	157

	หน้า
5.11 บทสรุป	159
แบบฝึกหัด	160
เอกสารอ้างอิง	161
<b>บทที่ 6 กลศาสตร์ควอนตัมเบื้องต้น</b>	
6.1 บทนำ	162
6.2 ก่อนยุคกลศาสตร์ควอนตัม	162
6.3 การแผ่รังสีของวัตถุดำ	163
6.4 ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก	170
6.5 ปรากฏการณ์คอมป์ตัน	174
6.6 สมบัติความเป็นคลื่นของอนุภาค	177
6.7 ฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอน	179
6.8 หลักความไม่แน่นอน	180
6.9 สมการคลื่นของชโรดิงเจอร์	183
6.10 บทสรุป	185
แบบฝึกหัด	186
เอกสารอ้างอิง	187
<b>บทที่ 7 ฟิสิกส์นิวเคลียร์และกัมมันตภาพรังสี</b>	
7.1 บทนำ	188
7.2 ส่วนประกอบของนิวเคลียส	189
7.3 ลักษณะความเหมือนกันของนิวไคลด์	190
7.4 แรงภายในนิวเคลียส	191
7.5 สมบัติของนิวเคลียส	194
7.6 เสถียรภาพนิวเคลียร์	196
7.7 สารกัมมันตภาพรังสี	197
7.8 ครึ่งชีวิต	199
7.9 ปฏิกิริยานิวเคลียร์	203
7.10 การประยุกต์ใช้งานพลังงานนิวเคลียร์	208
7.11 บทสรุป	210
แบบฝึกหัด	211

	หน้า
เอกสารอ้างอิง	212
<b>บทที่ 8 ฟิสิกส์สถานะของแข็งเบื้องต้น</b>	
8.1 บทนำ	213
8.2 สถานะทางฟิสิกส์ของสสาร	213
8.3 พันธะในของแข็ง	216
8.4 ทฤษฎีอิเล็กตรอนอิสระของโลหะ	221
8.5 การนำไฟฟ้าในโลหะ ฉนวน และสารกึ่งตัวนำ	227
8.6 อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ	232
8.7 บทสรุป	234
แบบฝึกหัด	235
เอกสารอ้างอิง	236
<b>กิจกรรมการทดลองเสริมสมรรถนะทางด้านวิทยาศาสตร์</b>	237
บรรณานุกรม	253
ภาคผนวก (ก) คณิตศาสตร์พื้นฐานสำหรับฟิสิกส์	256
ภาคผนวก (ข) เฉลยคำตอบอย่างละเอียดบางข้อ	262
ดัชนี	269

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ค่าสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวตามเส้นของสารบางชนิด	6
1.2 แสดงความจุความร้อนจำเพาะของสารชนิดต่างๆที่ความดันคงที่	13
1.3 ความร้อนแฝงของการหลอมเหลวและการกลายเป็นไอของสารชนิดต่างๆ	15
3.1 สรุปผลการเปรียบเทียบขนาดประจุและมวลของอนุภาคต่าง ๆ	65
3.2 สภาพต้านทานไฟฟ้าของวัสดุตัวนำบางชนิด	82
7.1 ค่าครึ่งชีวิตและชนิดของการแผ่รังสีของธาตุบางชนิด	200

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 ความยาวของแท่งวัตถุเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง	5
1.2 การขยายตัวของแท่งอลูมิเนียม	10
1.3 กราฟแสดงการเปลี่ยนสถานะและอุณหภูมิของน้ำ 1 กรัม	14
1.4 การไหลของความร้อนจากอุณหภูมิสูง (T2) ไปยังอุณหภูมิต่ำกว่า (T1)	17
1.5 การอัดและขยายตัวของแก๊สในระบบปิด	22
1.6 แก๊สบรรจุในทรงกระบอกที่ความดัน P	23
1.7 แก๊สขยายตัวจากสถานะ 1 เป็นสถานะ 2	24
1.8 กราฟระหว่างความดันกับปริมาตรเมื่ออุณหภูมิตคงตัว	25
1.9 กราฟระหว่างความดันกับปริมาตรเมื่อความดันคงตัว	26
1.10 กราฟระหว่างความดันกับปริมาตรเมื่อปริมาตรคงตัว	26
1.11 กราฟระหว่างความดันกับปริมาตรเมื่อความร้อนคงตัว	28
2.1 ทางเดินของรังสีที่ทำให้เกิดภาพเสมือนหลังกระจกเงาระนาบ	38
2.2 ทางเดินของรังสีที่ทำให้เกิดภาพเสมือนหลังกระจกเงาระนาบ	38
2.3 ลักษณะภาพหลังกระจกเงาระนาบที่กลับทิศซ้ายขวากับวัตถุ	39
2.4 วัตถุที่อยู่ระหว่างกระจกเว้ากับจุดโฟกัสของกระจก	40
2.5 วัตถุอยู่ระหว่างจุดโฟกัสกับจุดศูนย์กลางของความโค้งของกระจกเว้า	40
2.6 ภาพที่เกิดจากวัตถุที่อยู่ระหว่างจุดศูนย์กลางของความโค้ง	41
2.7 ภาพที่เกิดจากวัตถุอยู่น้ำกระจกนูน	41
2.8 สามเหลี่ยมคล้ายที่เกิดจากวัตถุและภาพของกระจกเว้า	42
2.9 เล่นสำนุนและเลนส์เว้า	44
2.10 การวาดเส้นรังสีเพื่อหาตำแหน่งและชนิดของภาพจากเลนส์นูน	45
2.11 เส้นรังสีเพื่อหาตำแหน่งและชนิดของภาพจากเลนส์นูนเมื่อวัตถุอยู่ ภายในระยะความยาวโฟกัสของเลนส์	45
2.12 การวาดเส้นรังสีเพื่อหาตำแหน่งและชนิดของภาพจากเลนส์เว้า	46
2.13 รั้วการแทรกสอดจากสลิตคู่ของแสงที่มีความยาวคลื่นค่าเดียว	47
2.14 วงแหวนของนิวตัน ก) ภาพทางเดินแสง ข) รั้ววงแหวน	48

ภาพที่	หน้า
2.15 การเลี้ยวเบนของแสง	49
2.16 การใช้เกรตติงในการศึกษาของแสงเลเซอร์	50
2.17 แสงขาวผ่านเกรตติงเกิดการกระจายแสงเป็นแถบสีต่างๆ	50
2.18 ความเข้มของแสงโพลาไรซ์เมื่อผ่านแผ่นโพลาไรซ์	51
2.19 การกระจายแสงของแสงขาวเมื่อหักเหผ่านปริซึมได้เป็นแสงสีรุ้ง	53
2.20 ภาพรุ้งปฐมภูมิ และรุ้งทุติยภูมิโดยผู้เขียนเอง	54
2.21 การสะท้อนกลับหมดเมื่อมุมตกในตัวกลางของดัชนีหักเหของตัวกลางที่ไม่เท่ากัน	54
2.22 การเกิดมิราจหรือภาพลวงตา	56
2.23 การกล้องจุลทรรศน์	57
2.24 กล้องดาราศาสตร์	58
2.25 ลักษณะของนัยน์ตา	58
3.1 การทดลองตรวจสอบชนิดของประจุไฟฟ้าและแรงกระทำระหว่างประจุไฟฟ้า	66
3.2 ปรากฏการณ์ฟ้าผ่าที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า	67
3.3 แรงที่เกิดจาก (ก) ประจุที่ต่างชนิดกัน และ (ข) ประจุชนิดเดียวกัน	67
3.4 ระยะห่างของประจุที่วางห่างกันเป็นระยะทาง $r$	68
3.5 ระยะห่างระหว่างประจุ	68
3.6 ไดอะแกรมของเด็กโยนลูกบอลขึ้นไปในอากาศ	69
3.7 แรงที่เกิดจากการวางตัวของประจุ	69
3.8 แสดงทิศของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากประจุดทดสอบที่เป็นบวก	70
3.9 แสดงทิศของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากประจุดทดสอบที่เป็นลบ	71
3.10 แสดงทิศทางของสนามไฟฟ้า (ก) ประจุบวก และ (ข) ประจุลบ	71
3.11 แสดงลักษณะของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากประจุไฟฟ้าต่างชนิดกัน	72
3.12 แสดงเส้นศักย์ไฟฟ้า	73
3.13 ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากสนามไฟฟ้าที่คงตัว	74
3.14 แรงที่กระทำต่อจุดประจุเนื่องมาจากสนามไฟฟ้าที่คงตัว	74
3.15 การทดลองหยดน้ำมันของมิลลิแกน	76
3.16 แสดงการหามวลของประจุอิเล็กตรอน	76
3.17 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแวนเดอแกรฟฟ์	78

ภาพที่	หน้า
3.18 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในตัวนำไฟฟ้า	79
3.19 วงจรไฟฟ้าอย่างง่าย	83
3.20 การต่อตัวต้านทานแบบอนุกรม	84
3.21 การต่อตัวต้านทานแบบขนาน	85
3.22 ตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน	86
3.23 สัญลักษณ์ที่ใช้ในวงจร ก) ตัวเก็บประจุ ข) แบตเตอรี่ ค) สวิตช์	87
3.24 การต่อตัวเก็บประจุ (ก) แบบขนาน (ข) แบบอนุกรม	87
3.25 ความต้านทานไฟฟ้าในวงจรกระแสสลับ	90
3.26 (ก) กระแสและความต่างศักย์ (ข) มุมเฟสระหว่างกระแสกับความต้านทาน ไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ	91
3.27 ตัวเก็บประจุไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ	91
3.28 (ก) เฟสของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ที่ตัวเก็บประจุ (ข) มุมเฟสระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ที่ตัวเก็บประจุ	91
3.29 ขดลวดเหนี่ยวนำในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ	93
3.30 (a) เฟสของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ที่ขดลวดตัวนำ (b) มุมเฟสระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ที่ขดลวดตัวนำ	93
3.31 การต่อวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ RLC	95
3.32 เฟสของความต่างศักย์กับกระแสไฟฟ้าใน (ก) ตัวต้านทาน (ข) ขดลวดเหนี่ยวนำ (ค) ตัวเก็บประจุ	95
3.33 มุมเฟสระหว่างความต่างศักย์กับกระแสไฟฟ้า	96
3.34 การรวมเวกเตอร์เพื่อหาค่าความต้านทานเชิงซ้อน	96
4.1 ความเร็วของอนุภาคมีประจุที่ตั้งฉากกับทิศของสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอ	105
4.2 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	106
4.3 สนามแม่เหล็ก	107
4.4 แรงแม่เหล็ก	108
4.5 ปฏิกิริยาการแผ่รังสีฮอลล์	109
4.6 ลักษณะการตั้งฉากของทั้งสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้ากับการเคลื่อนที่	112
4.7 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปตามแกน x และการใช้กฎมือขวา	114
4.8 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	122

ภาพที่	หน้า
4.9 ตัวอย่างความสามารถในการทะลุทะลวงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	127
5.1 ผู้สังเกตสองคนมองเส้นทางของการโยนลูกบอลและได้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกัน	135
5.2 เหตุการณ์เกิดที่จุด P ถูกเห็นโดยผู้สังเกตสองคน ในกรอบ S และ S'	136
5.3 แสดงการทดลองของไมเคิลสันและมอร์เลย์	139
5.4 (ก) ทางเดินของลำแสงที่ 2 ขณะที่เครื่องวัดการแทรกสอดเคลื่อนที่ขนานกับ PM1 (ข) แสดงเวกเตอร์ความเร็วลัพธ์ของ c และ v	140
5.5 โคออร์ดิเนตของจุด P วัดจากระบบอินเนอร์เชียล S และ S'	148
6.1 แสดงโพรงซึ่งเป็นเสมือนวัตถุดำ	163
6.2 แสดงสเปกตรัมการแผ่รังสีของวัตถุดำที่อุณหภูมิต่าง ๆ	164
6.3 (ก) แผนภาพวงจรการศึกษาปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตรอน (ข) แสดงภาพของโฟโตอิเล็กตรอน	168
6.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่แสงและความต่างศักย์หยุดยั้ง	169
6.5 แสดงโฟตอน ค่าฟังก์ชันงานและพลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอน	170
6.6 แผนภาพเครื่องมือที่คอมป์ตันใช้ รังสีเอ็กซ์กระเจิงออกมาจากเป้าคาร์บอน	173
7.1 แสดงกราฟระหว่างจำนวนนิวตรอน N กับเลขอะตอม Z ของนิวเคลียสที่เสถียร	194
7.2 แสดงกราฟอัตราการสลายตัวของกัมมันตภาพรังสี	199
7.3 แสดงการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เป็นแบบลูกโซ่	203
7.4 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชัน(ก)ฟิชชัน (ข)ฟิวชัน	205
8.1 แสดงวัฏภาคของแข็งที่มีการจัดเรียงตัวแบบ ก) ผลึก ข) ออสัณฐาน	214
8.2 การจัดเรียงตัวของซลิคาแบบผลึกและอสัณฐาน	215
8.3 ผลึกของโซเดียมคลอไรด์ และซีเซียมคลอไรด์	216
8.4 โครงสร้างผลึกของเพชร	217
8.5 โครงสร้างโมเลกุลของไฮโดรเจนฟลูออไรด์	218
8.6 แบบจำลองของพันธะโลหะ	219
8.7 ก) กราฟของ E กับ n แสดงระดับกึ่งต่อเนื่องสำหรับอนุภาคในกล่อง 1 มิติ ข) การครอบครองระดับพลังงานโดยอิเล็กตรอน	222
8.8 แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่งที่ระดับอุณหภูมิ 300 เคลวิน	227
8.9 (ก) สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (ข) สารกึ่งตัวนำชนิดพี	230

# บทที่ 1

## อุณหพลศาสตร์เบื้องต้น

### (Introduction to thermodynamics)

#### 1.1 บทนำ

อุณหพลศาสตร์ เป็นการศึกษาเรื่องเกี่ยวกับความร้อนของสารที่ได้รับความร้อนแล้วจะมีลักษณะทางกายภาพหรือสภาพที่เปลี่ยนไป โดยทั่วไปแล้วความร้อนนั้นเป็นพลังงานรูปแบบหนึ่ง และอาจเกิดจากเปลี่ยนรูปมาจากพลังงานรูปอื่นตามหลักการอนุรักษ์พลังงาน เช่น พลังงานความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมี พลังงานความร้อนที่เกิดจากพลังงานไฟฟ้า โดยทั่วไปเมื่อสารได้รับพลังงานความร้อนจะทำให้โมเลกุลภายในของสารเกิดการสั่นและเคลื่อนที่ ทำให้เกิดความร้อนขึ้น วัตถุเมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการดูดกลืนความร้อน การถ่ายเทความร้อนหรือการถ่ายโอนความร้อนได้ โดยจะเกิดการถ่ายเทความร้อนจากจุดที่มีระดับความร้อนสูงหรือมีอุณหภูมิสูงไปสู่จุดที่มีระดับความร้อนหรือมีอุณหภูมิต่ำกว่าเสมอ จนกว่าจะมีอุณหภูมิเท่ากันจึงหยุดถ่ายเท เรียกว่า สมดุลความร้อน ในอุณหพลศาสตร์มีกฎที่สำคัญ ได้แก่ กฎข้อที่หนึ่ง และข้อที่สอง ซึ่งถือว่าเป็นกฎที่สำคัญมากของฟิสิกส์เลยก็ว่าได้ อย่างไรก็ตาม กฎบางข้อ เช่น ข้อที่สอง จะเป็นจริงเมื่อมองธรรมชาติแบบมหภาคเท่านั้น ในระดับจุลภาคหรือระดับอะตอม มีความน่าจะเป็นที่กฎข้อที่สองจะถูกฝ่าฝืน เพียงแต่ความน่าจะเป็นนั้นน้อยมาก จนไม่สามารถสังเกตเห็นได้ในระดับมหภาคเท่านั้น

อุณหพลศาสตร์ดั้งเดิม คือทฤษฎีแรกๆ ในช่วงต้น ค.ศ.1800 ที่ให้ความสนใจกับสถานะทางอุณหพลศาสตร์ และคุณสมบัติของพลังงานรูปแบบต่างๆ เช่น พลังงาน งาน และความร้อน ทว่าตามกฎของอุณหพลศาสตร์แล้ว ทฤษฎีทั้งหมดยังไม่สามารถอธิบายในระดับอะตอมได้ อุณหพลศาสตร์ดั้งเดิมพัฒนาขึ้นจากทฤษฎีของ โรเบิร์ต บอยล์ นักเคมี ที่ว่า “ความดัน (P) ของก๊าซปริมาณหนึ่งจะแปรผกผันกับปริมาตร (V) ของก๊าซนั้นๆ เมื่ออุณหภูมิคงตัว” ทำให้วิทยาศาสตร์ด้านอุณหภูมิจึงพัฒนาขึ้นโดยสามารถสร้างเครื่องจักรไอน้ำขึ้นได้เป็นครั้งแรกในอังกฤษโดยโทมัส ซาเวอรี ในปี ค.ศ. 1697 และโทมัส นิวโคเมน ในปี ค.ศ. 1712 กฎข้อที่หนึ่งและสองของอุณหพลศาสตร์ตั้งขึ้นในเวลาต่อมาตามลำดับราว ค.ศ. 1850 โดยอาศัยข้อมูลจากการศึกษาของวิลเลียม แรนकिन รูตต์อล์ฟ เคลาซีอุส และวิลเลียม ทอมป์สัน อุณหพลศาสตร์แบบดั้งเดิมมีข้อจำกัด ไม่สามารถ

อธิบายปรากฏการณ์หลายประเภทได้ จำเป็นต้องใช้กลศาสตร์สถิติ หรือ อุณหพลศาสตร์สถิติมาช่วยอธิบาย ตัวอย่างเช่น กฎของอุณหพลศาสตร์อาจใช้อธิบายได้ว่าปฏิกิริยาหนึ่ง ๆ จะเกิดขึ้นได้เอง แต่ไม่ได้อธิบายเกี่ยวกับเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเอาไว้ ทำให้บางครั้งผลการทดลองได้ผลไม่ตรงตามกฎของอุณหพลศาสตร์ ข้อจำกัดอีกประการหนึ่งก็คือ อุณหพลศาสตร์ไม่สามารถบอกได้ว่า งานที่เกิดขึ้นจริงในระบบจะมีค่าเท่าใด อย่างไรก็ตามอุณหพลศาสตร์ดั้งเดิมมีข้อดีตรงที่ ทฤษฎีนี้เป็นอิสระต่อทฤษฎีอะตอม ไม่ว่าทฤษฎีอะตอมจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรก็ตามก็ยังคงสามารถใช้อุณหพลศาสตร์ในการอธิบายปรากฏการณ์ธรรมชาติในระดับมหภาคได้เสมอ

## 1.2 อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิ คือ ปริมาณที่ใช้วัดและเปรียบเทียบขนาดปริมาณความร้อนของสาร โดยถ้าสารใดมีมวลและปริมาตรเท่ากันที่ค่าอุณหภูมิสูงแสดงว่าสารนั้นมีปริมาณความร้อนมากตามไปด้วย และถ้ามีอุณหภูมิต่ำแสดงว่าสารนั้นมีปริมาณความร้อนน้อย ธรรมชาติของสารจะมีการถ่ายเทจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าเสมอ โดยจะมีการถ่ายเทอุณหภูมิให้กันจนกระทั่งมีอุณหภูมิเท่ากันจึงจะหยุดการถ่ายเท เรียกสภาวะการที่สารมีอุณหภูมิเท่ากันว่า สารมีความสมดุลทางความร้อน เครื่องมือที่ใช้วัดอุณหภูมิเรียกว่า เทอร์โมมิเตอร์ มีหลักการทำงานโดยอาศัยคุณสมบัติการขยายตัวของสารเมื่อได้รับความร้อนและหดตัวเมื่อเย็นลง โดยสารที่ใช้บรรจุในเทอร์โมมิเตอร์จะต้องมีคุณสมบัติคือมีการเปลี่ยนค่าไปตามอุณหภูมิอย่างต่อเนื่อง สารที่มีคุณสมบัตินี้และที่นิยมใช้ในการบรรจุในเทอร์โมมิเตอร์ ได้แก่ปรอท แอลกอฮอล์ เป็นต้น สำหรับที่อุณหภูมิสูงหรือต่ำมากๆ จะใช้อุปกรณ์เทอร์โมคัปเปิลในการวัดอุณหภูมิ โดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงความร้อน หรืออุณหภูมิให้เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้า

### 1.2.1 หน่วยของอุณหภูมิ (Unit of temperature)

ปัจจุบันมีหน่วยสเกลซึ่งเป็นที่นิยมใช้วัดขนาดของอุณหภูมิอยู่ 3 แบบ โดยอาศัยจุดเดือดและจุดเยือกแข็งของน้ำบริสุทธิ์ที่ความดันบรรยากาศ  $1.013 \times 10^5$  ปาสคาล คือ

1. สเกลองศาเซลเซียส ( $^{\circ}\text{C}$ ) ซึ่งตั้งขึ้นเพื่อเป็นเกียรติแก่นักวิทยาศาสตร์ที่ชื่อเซลเซียส สำหรับหน่วยองศาเซลเซียสจะเป็นหน่วยที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน โดยจุดเยือกแข็งของน้ำ คือ 0 องศาเซลเซียส และจุดเดือดของน้ำ คือ 100 องศาเซลเซียส
2. สเกลเคลวิน(K) ตั้งขึ้นเพื่อเป็นเกียรติแก่นักวิทยาศาสตร์ชื่อ เคลวิน (Kelvin) เป็นหน่วยระบบสากลที่ใช้กันทั่วไป สำหรับหน่วยเคลวินนั้น จะมีจุดเยือกแข็งของน้ำอยู่ที่ 273.15 เคลวิน และมีจุดเดือดของน้ำอยู่ที่ 373.15 เคลวิน

3. สเกลองศาฟาเรนไฮต์ (°F) ตั้งขึ้นเพื่อเป็นเกียรติแก่นักวิทยาศาสตร์ชื่อ ฟาเรนไฮต์ (Fahrenheit) สำหรับหน่วยองศาฟาเรนไฮต์จะมีจุดเยือกแข็งของน้ำอยู่ที่ 32 องศาฟาเรนไฮต์ และจุดเดือดของน้ำที่ 212 องศาฟาเรนไฮต์

ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยของอุณหภูมิในหน่วยต่างๆได้จากสมการ

$$\frac{T_C}{100} = \frac{T_F - 32}{180} = \frac{T_K - 273.15}{100} \quad (1-1)$$

เมื่อ  $T_C$  คือ อุณหภูมิที่อ่านได้ในหน่วยองศาเซลเซียส (°C)

$T_F$  คือ อุณหภูมิที่อ่านได้ในหน่วยองศาฟาเรนไฮต์ (°F)

$T_K$  คือ อุณหภูมิที่อ่านได้ในหน่วยเคลวิน (K)

ในปัจจุบันในระบบหน่วยมาตรฐานสากลได้กำหนดให้อุณหภูมิในหน่วยเคลวินเป็นหน่วยมาตรฐานสากลโดยความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสัมบูรณ์ในหน่วยเคลวินแทนด้วย  $T_K$  และอุณหภูมิในหน่วยเซลเซียสแทนด้วย  $T_C$  มีความสัมพันธ์กันตามสมการดังนี้

$$T_K = T_C + 273.15 \quad (1-2)$$

โดยทั่วไปให้ง่ายต่อการคำนวณจะปัดให้เป็นตัวเลข 273 จะได้

$$T_K = T_C + 273 \quad (1-3)$$

**ตัวอย่างที่ 1.1** ผลไม้ชนิดหนึ่งจะไม่เน่าเสียเมื่อนำไปไว้ที่อุณหภูมิ 50 องศาฟาเรนไฮต์จะต้องปรับอุณหภูมิในตู้เย็นเท่าใดหน่วยองศาเซลเซียสจึงจะทำให้ผลไม้ไม่เสีย

**วิธีทำ** จากความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในหน่วยองศาเซลเซียสกับองศาฟาเรนไฮต์

$$\frac{T_C}{100} = \frac{T_F - 32}{180}$$

$$\frac{T_C}{100} = \frac{50 - 32}{180}$$

$$T_C = \frac{18 \times 100}{180}$$

$$= 10^\circ\text{C}$$

**คำตอบ** ดังนั้นจะต้องตั้งอุณหภูมิที่ 10 องศาเซลเซียส

ตัวอย่างที่ 1.2 จงหาว่าที่อุณหภูมิเท่าใดทำให้อองศาเซลเซียสมีค่าเท่ากับองศาฟาเรนไฮต์

วิธีทำ กำหนดให้ที่อุณหภูมิ X เป็นอุณหภูมิที่องศาเซลเซียสมีค่าเท่ากับองศาฟาเรนไฮต์จาก

ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในหน่วยองศาเซลเซียสกับองศาฟาเรนไฮต์

$$\begin{aligned}\frac{T_C}{100} &= \frac{T_F - 32}{180} \\ \frac{X}{100} &= \frac{X - 32}{180} \\ 180X &= 100X - 3200 \\ X &= \frac{-3200}{80} \\ &= -40^\circ\end{aligned}$$

**คำตอบ** ดังนั้นที่อุณหภูมิ  $-40$  องศาเซลเซียสจะมีค่าเท่ากับ  $-40$  องศาฟาเรนไฮต์

### 1.3 ผลของความร้อนที่มีต่อวัตถุที่เป็นของแข็ง (The effect of heat on a solid object)

เมื่อวัตถุหรือสารได้รับความร้อนจะส่งผลให้วัตถุมีอุณหภูมิสูงขึ้น จะทำให้มีลักษณะทางกายภาพที่เปลี่ยนไปได้แก่ ทำให้วัตถุขยายตัว ทำให้วัตถุเปลี่ยนสถานะ ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี ทำให้สมบัติ เช่น สมบัติแม่เหล็กและสมบัติทางไฟฟ้าเปลี่ยนไป เป็นต้น สำหรับในหัวข้อนี้จะศึกษาพฤติกรรมที่สำคัญของสารเมื่อได้รับความร้อนดังต่อไปนี้

#### 1.3.1 การขยายตัวของวัตถุเนื่องจากความร้อน

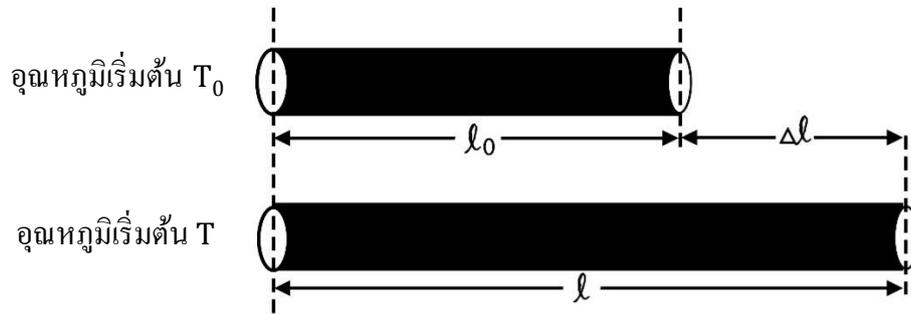
วัตถุเมื่อได้รับความร้อนนอกจากจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นแล้วยังอาจทำให้วัตถุเกิดการขยายตัว สำหรับวัตถุที่เฉลี่ยความร้อนได้ทั่วทั้งก้อน (Isotropic) เช่น แก้วและของเหลวทุกชนิดจะมีทิศทางการขยายตัวออกเท่ากันทุกทาง เนื่องจากอะตอมของวัตถุเมื่อได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นจะเกิดการสั่นไปมารอบจุดจุดหนึ่งในโครงสร้างของวัตถุ เป็นเหตุให้ระยะห่างระหว่างอะตอมเปลี่ยนแปลง โดยถ้าระยะห่างระหว่างอะตอมเพิ่มขึ้นวัตถุนั้นก็ขยายตัว แต่ถ้าระยะห่างระหว่างอะตอมลดลงวัตถุนั้นก็จะหดตัว ซึ่งการขยายตัวของสารที่เป็นของแข็งของเหลวและแก๊สจะแตกต่างกัน ในที่นี้จะอธิบายเกี่ยวกับการขยายตัวของของแข็งและของเหลว

การขยายตัวของของแข็ง โดยทั่วไปเมื่อให้ความร้อนแก่ของแข็งใดๆ ของแข็งนั้นจะขยายตัวทุกทิศทาง จึงมีผลทำให้รูปทรงของวัตถุนั้นเหมือนเดิม แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงในด้านของมิติความยาวพื้นที่ และปริมาตร โดยการขยายตัวนั้นจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของของแข็งนั้น การขยายตัวของของแข็งแบ่งการพิจารณาได้เป็น 3 แบบคือ

#### (1) การขยายตัวตามเส้น (Linear expansion)

พิจารณาจากภาพที่ 1.1 เมื่อวัตถุที่มีขนาดความยาวเริ่มต้น  $l_0$  มีอุณหภูมิเริ่มต้น  $T_0$  หลังจากนั้นได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นจนกระทั่งอุณหภูมิเป็น  $t^\circ\text{C}$  ทำให้เกิดการขยายตัวและมีความยาวเปลี่ยนไป

เป็น  $l$  โดยความยาวที่เพิ่มขึ้น  $\Delta l = l - l_0$  จากการทดลองพบว่าความยาวที่เพิ่มขึ้นจะขึ้นอยู่กับความยาวเดิม ( $l_0$ ) และเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ( $\Delta T = T - T_0$ )



ภาพที่ 1.1 ความยาวของแท่งวัตถุเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง

จากความสัมพันธ์ระหว่างความยาวเริ่มต้น ความยาวที่เปลี่ยนไปต่ออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นสามารถหาได้จากสมการ

$$\Delta l \propto l_0 \Delta T$$

$$\Delta l = \alpha l_0 \Delta T \quad (1-4)$$

กำหนดให้  $\alpha$  เป็นค่าคงตัวเฉพาะของวัตถุแต่ละชนิด มีหน่วยเป็น วินาที<sup>-1</sup> ที่เรียกว่า

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 \Delta T} \quad (1-5)$$

เมื่อนำสัมประสิทธิ์การขยายตัวมาแทนค่าด้วย  $\Delta l = l - l_0$  ในสมการที่ (1-4) จะได้ความยาวของวัตถุดังนี้

$$l = l_0 (1 + \alpha \Delta T) \quad (1-6)$$

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนตามเส้นของวัตถุหรือสารบางชนิดแสดงดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ค่าสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวตามเส้นของสารบางชนิด

สาร	$\alpha$ (ต่อองศาเซลเซียส)	สาร	$\alpha$ (ต่อองศาเซลเซียส)
ทองเหลือง	$19 \times 10^{-6}$	น้ำแข็ง	$51 \times 10^{-6}$
ทองแดง	$17 \times 10^{-6}$	ตะกั่ว	$29 \times 10^{-6}$
แก้ว	$9 \times 10^{-6}$	เหล็กกล้า	$11 \times 10^{-6}$

ที่มา: ปิยพงษ์ สิทธิคง, 2548

โดยทั่วไปวัตถุหรือสารแต่ละชนิดเมื่อได้รับความร้อนจะมีการยืดหรือขยายตัวไม่เท่ากันทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของสารนั้น

### (2) การขยายตัวตามพื้นที่ (Area expansion)

เมื่อวัตถุหรือสารได้รับความร้อนแล้วนอกจากจะมีการขยายตัวตามเส้นแล้ว ก็จะมีการขยายตัวตามพื้นที่ไปด้วย กำหนดให้วัตถุที่มีพื้นที่  $A_0$  เริ่มต้นมีอุณหภูมิเป็น  $T_0$  ถ้าได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นจนมีอุณหภูมิเป็น  $T$  องศาเซลเซียส และจะมีพื้นที่  $A$  ดังนั้นพื้นที่ที่เพิ่มขึ้นคือ  $\Delta A = A - A_0$  โดยเขียนเป็นสมการได้คือ

$$A = A_0(1 + \gamma\Delta T) \quad (1-7)$$

เมื่อ  $\gamma$  เป็นสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวตามพื้นที่ของวัตถุ ซึ่งคือพื้นที่ที่เปลี่ยนไปต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่เดิม และต่อหนึ่งองศาของอุณหภูมิของวัตถุที่เปลี่ยนไป มีหน่วยเป็นต่อองศาเซลเซียส ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) เนื่องจากการคำนวณหาพื้นที่ที่ได้มาจากผลคูณความยาวของด้าน 2 ด้าน ดังนั้นทำให้ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\gamma$  และ  $\alpha$  เป็นดังนี้

$$\gamma = 2\alpha \quad (1-8)$$

อย่างไรก็ตามถ้าต้องการจะหาพื้นที่ที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิจะสามารถหาได้จากการหาความยาวทั้งสองด้านที่เพิ่มขึ้น ทำให้ทราบพื้นที่ใหม่ จากนั้นนำมาลบกับพื้นที่เดิม จึงไม่มีการกำหนดสัมประสิทธิ์การขยายตัวของพื้นที่ สมการ (1-8) ที่ใช้หาสัมประสิทธิ์ตัวนี้ซึ่งต้องทราบค่าเฉพาะตัวของวัตถุ จึงไม่จำเป็นต้องใช้ก็ได้

### (3) การขยายตัวตามปริมาตร (Volum expansion)

การขยายตัวตามปริมาตรคือ การขยายตัวตามมวลทั้งหมดของสารหรือวัตถุเมื่อได้รับความร้อน ถ้ากำหนดให้ วัตถุที่มีปริมาตร  $V_0$  ที่อุณหภูมิเริ่มต้น  $T_0$  องศาเซลเซียส ถ้าได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นจนมีอุณหภูมิ  $T$  องศาเซลเซียส จะมีปริมาตร  $V$  ดังนั้นปริมาตรเพิ่มขึ้นคือ  $\Delta V = V - V_0$  จะได้สมการความสัมพันธ์เป็น

$$V = V_0(1 + \beta\Delta t) \quad (1-9)$$

เมื่อ  $\beta$  เป็นสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวตามปริมาตรคือ ปริมาตรที่เปลี่ยนไปต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรเดิม และต่อหนึ่งองศาของอุณหภูมิของวัตถุที่เปลี่ยนไปมีหน่วยเป็นต่อองศาเซลเซียส ( $^{\circ}\text{C}$ )<sup>-1</sup> โดยเขียนเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง  $\alpha$ ,  $\gamma$  และ  $\beta$  ได้คือ

$$\beta = 3\alpha = \frac{3}{2}\gamma \quad (1-10)$$

เนื่องจากปริมาตรกับความหนาแน่นของสารมีความสัมพันธ์กันดังนั้นแล้ว การขยายตัวของวัตถุตามปริมาตรจึงมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นโดยเมื่อปริมาตรของวัตถุเปลี่ยนทำให้ความหนาแน่นของวัตถุเปลี่ยนไปด้วยถ้ากำหนดให้

$\rho_0$  แทนความหนาแน่นของวัตถุเมื่อปริมาตรเป็น  $V_0$  เมื่ออุณหภูมิเป็น  $T_0$

$\rho$  แทนความหนาแน่นของวัตถุเมื่อปริมาตรเป็น  $V$  เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น  $T$

จาก  $\rho = m/V$  โดยที่  $m$  แทนมวลของวัตถุและ  $V$  แทนปริมาตรวัตถุดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์เป็น

$$\rho_0 = \frac{m}{V_0} \quad \text{และ} \quad \rho = \frac{m}{V}$$

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \frac{m}{V_0} \times \frac{V}{m} = \frac{V}{V_0}$$

และเนื่องจาก  $V = V_0(1 + \beta\Delta T)$  แทนค่า

$$\frac{\rho_0}{\rho} = (1 + \beta\Delta T) = \frac{V}{V_0}$$

ดังนั้นจะได้

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 + \beta\Delta T} \quad (1-11)$$

โดยสมการที่ (1-11) แสดงความหนาแน่นของวัตถุเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง

**ตัวอย่างที่ 1.3** ถ้าเหล็กเส้นที่ใช้ในการทำถนนแต่ละช่วงยาว 30 เมตร ที่อุณหภูมิประมาณ 20 องศาเซลเซียส หากอุณหภูมิสูงสุดของถนนเป็น 70 องศาเซลเซียส จะต้องเว้นระยะห่างระหว่างแผ่นคอนกรีตอย่างน้อยเท่าใด เพื่อป้องกันความเสียหายจากการขยายตัวตามความร้อน กำหนดให้สัมประสิทธิ์การขยายตัวตามเส้นของคอนกรีตเท่ากับ  $1.2 \times 10^{-5}$  ต่อองศาเซลเซียส

**วิธีทำ** ข้อมูลที่โจทย์กำหนด

$$\ell_0 = 30 \text{ m}, \quad \Delta T = 70^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C} = 50^{\circ}\text{C}$$

$$\alpha = 1.2 \times 10^{-5} ({}^{\circ}\text{C})^{-1}$$

ความยาวของวัตถุ

$$\ell = \ell_0(1 + \alpha\Delta t)$$

$$\begin{aligned} \ell &= (30 \text{ m})[1 + (1.2 \times 10^{-5} (\text{ }^{\circ}\text{C})^{-1})(50^{\circ}\text{C})] \\ \ell &= 30.018 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\text{ความยาวในส่วนที่ขยายตัว } \Delta \ell = 30.018 \text{ m} - 30 \text{ m} = 0.018 \text{ m}$$

**คำตอบ** ดังนั้น จะต้องเว้นระยะห่างระหว่างแผ่นคอนกรีตอย่างน้อยเท่ากับ 0.018 เมตร

#### 1.4 การขยายตัวของของเหลว (Liquid expansion)

นอกจากสารที่มีสถานะเป็นของแข็งจะเกิดการขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนแล้ว ของเหลวก็มีพฤติกรรมขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนเช่นกัน แต่เนื่องจากรูปร่างของของเหลวขึ้นอยู่กับภาชนะที่บรรจุของเหลว ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงที่เห็นได้ชัดเจน คือ การเปลี่ยนแปลงปริมาตรหรือการขยายตัวตามปริมาตร ดังนั้นในการพิจารณาต้องคำนึงถึงการขยายตัวของภาชนะที่บรรจุของเหลวควบคู่กันไปด้วย กำหนดให้  $\beta$  แทนสัมประสิทธิ์การขยายตัวตามปริมาตรของของเหลวซึ่งมีหน่วยเป็น  $(\text{ }^{\circ}\text{C})^{-1}$  สมการสำหรับการขยายตัวของของเหลวคือ

$$V = V_0(1 + \beta\Delta T) \quad (1-12)$$

**ตัวอย่างที่ 1.4** กระจาปะทรงกลมของมาตรวัดอุณหภูมิปรอทอันหนึ่งมีรัศมี 0.1 เซนติเมตร ส่วนก้นมีปรอทเต็มพอดี ขณะที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ถ้าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตรของปรอทเท่ากับ  $1.8 \times 10^{-4}$  ต่อองศาเซลเซียส สมมติให้แก้วมีการขยายตัวน้อยมากเมื่อเทียบกับปรอทชนิดที่แสดงอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จะอยู่ที่สูงจากขีด 0 องศาเซลเซียสอยู่เท่าใด

**วิธีทำ** หาปริมาตรของกระจาปะทรงกลม

$$V = \frac{4}{3}\pi R^3 = \frac{4}{3}\pi(0.1)^3 = 4.19 \times 10^{-3} \text{ cm}^3$$

หาค่าการขยายตัวของปรอท

$$V = V_0(1 + \beta\Delta T)$$

$$V = (4.19 \times 10^{-3} \text{ cm}^3)[1 + (1.210^{-4} (\text{ }^{\circ}\text{C})^{-1})(100^{\circ}\text{C} - 0^{\circ}\text{C})]$$

$$V = 4.24 \times 10^{-3} \text{ cm}^3$$

ส่วนขยายตัวของปรอท

$$\begin{aligned} \Delta V &= 4.24 \times 10^{-3} \text{ cm}^3 - 4.19 \times 10^{-3} \text{ cm}^3 \\ &= 8.43 \times 10^{-5} \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

เนื่องจากเทอร์โมมิเตอร์เป็นทรงกระบอก ดังนั้นส่วนขยายของปรอทจะเคลื่อนเข้าไปอยู่ใน

ส่วนนี้ ทำให้ลำปรอทสูง  $h$  คำนวณหาค่า  $h$  จาก

$$\Delta V = \pi R^2 h$$

$$8.43 \times 10^{-5} \text{ cm}^3 = \pi(0.002 \text{ cm})^2 h$$

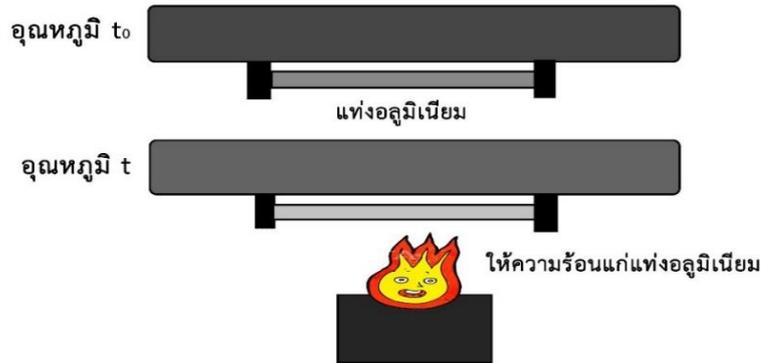
$$h = 6.71 \text{ cm}$$

**คำตอบ** ดังนั้น ขีดที่แสดงอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสจะอยู่ที่สูงจากขีด 0 องศาเซลเซียส

อยู่ 6.71 เซนติเมตร

### 1.5 ความเค้นที่เกิดจากการขยายตัวของวัตถุ (Stress of object expansion)

เมื่อสารที่มีสถานะเป็นของแข็งถูกตรึงไว้ทำให้ไม่สามารถขยายตัวหรือหดตัวได้ พิจารณาจากภาพที่ 1.2 เมื่อแท่งอลูมิเนียมถูกตรึงไม่ให้ยืดหรือหดตัวตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ เมื่อเพิ่มหรือลดอุณหภูมิให้กับแท่งอลูมิเนียม ทำให้เกิดความเค้นที่เกิดจากความร้อน (Thermal stress)



ภาพที่ 1.2 การขยายตัวของแท่งอลูมิเนียม

จากภาพที่ 1.2 ถ้าแท่งอลูมิเนียมเริ่มต้นมีความยาว  $l_0$  ที่อุณหภูมิ  $t_0$  และเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป  $t$  จะทำให้ความยาวของแท่งอลูมิเนียมเปลี่ยนไป  $\Delta l$  ถ้า  $Y$  คือค่ายังโมดูลัสยืดหยุ่นของแท่งอลูมิเนียมนี้ โดยจากสมการของยังมอดูลัส

$$Y = \frac{\text{ความเค้น}}{\text{ความเครียด}} = \frac{S}{\phi} \quad (1-13)$$

เมื่อกำหนดให้  $S$  คือ ความเค้น (stress) ซึ่งหมายถึงแรงที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัดของวัตถุ และ  $\phi$  คือ ความเครียด (strain) หมายถึง ความยาวที่เปลี่ยนไปต่อต่อยาวเดิม โดยจะได้สมการ

$$S = \frac{F}{A} \quad (1-14)$$

$$\phi = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (1-15)$$

$$Y = \frac{F/A}{\Delta l/l_0} \quad (1-16)$$

จากสมการที่ (1-14) จะได้  $\frac{\Delta l}{l_0} = \alpha \Delta T$  ดังนั้นเมื่อแทนในสมการที่ (1-16) จะได้

$$\frac{F}{A} = Y\alpha\Delta T \quad (1-17)$$

เมื่อ  $\frac{F}{A}$  คือ ความเค้นที่เกิดจากความร้อน (นิวตันต่อตารางเมตร)  
 $\alpha$  คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวตามเส้นของวัสดุต่อองศาเซลเซียส  
 $\Delta T$  คือ อุณหภูมิที่เปลี่ยนไป (องศาเซลเซียส)

**ตัวอย่างที่ 1.5** สะพานเหล็กแห่งหนึ่งมีช่วงที่ยาวที่สุด 30 เมตร กำหนดให้  $\alpha_{เหล็ก} = 1.2 \times 10^{-5} (\text{°C})^{-1}$   
 $Y_{เหล็ก} = 20 \times 10^{11}$  นิวตันต่อตารางเมตร ถ้าในฤดูหนาวอากาศมีอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส และในฤดูร้อนที่อากาศร้อนมีอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

ก. ถ้าตริงปลายข้างหนึ่งแน่นอยู่กับที่และปล่อยให้ปลายอีกข้างหนึ่งเคลื่อนอย่างอิสระจงหาความแตกต่างของความยาวของช่วงสะพาน 2 วันดังกล่าว

ข. ถ้าตริงปลายทั้ง 2 ข้างให้แน่นอยู่กับที่ในวันฤดูร้อน ความเค้นเป็นเท่าไรในวันฤดูหนาว

**วิธีทำ** (ก) จาก

$$\Delta l = l_0 \alpha \Delta T$$

$$\Delta l = (30\text{m}) \left( 1.2 \times 10^{-5} (\text{°C})^{-1} \right) (40\text{°C} - 10\text{°C})$$

$$\Delta l = 0.0108\text{m}$$

**คำตอบ** ดังนั้นความแตกต่างของความยาวของช่วงสะพานเท่ากับ 0.0108 เมตร

(ข) ความเค้นเนื่องจากความร้อน

$$\frac{F}{A} = Y\alpha\Delta T$$

$$\frac{F}{A} = (20 \times 10^{11} \text{ N/m}^2) \left( 1.2 \times 10^{-5} (\text{°C})^{-1} \right) (40 - 10) \text{°C}$$

$$\frac{F}{A} = 7.2 \times 10^8 \text{ N/m}^2$$

**คำตอบ** ดังนั้นความเค้นในวันฤดูหนาวเท่ากับ  $7.2 \times 10^8$  นิวตันต่อตารางเมตร

## 1.6 ปริมาณความร้อนและความจุความร้อน (Heat and heat capacity)

ความร้อนเป็นพลังงานรูปแบบหนึ่งซึ่งในระบบหน่วยมาตรฐานสากลพลังงานเชิงกลมีหน่วยเป็นจูล (J) ซึ่งมีค่าเท่ากับ งานที่เกิดจากการออกแรง 1 นิวตันส่งผลให้วัตถุเคลื่อนที่ 1 เมตร ซึ่งบางครั้งเรามักจะรู้จักหน่วยของความร้อน โดยเฉพาะอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิ เช่น แอร์ ตู้เย็น ในรูปแบบของหน่วย BTU (British Thermal Unit) โดยความหมายของหน่วย 1 BTU คือ ปริมาณ

ความร้อนที่ทำให้ น้ำ 1 ปอนด์มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศาฟาเรนไฮต์ โดยสามารถเปรียบเทียบกับหน่วยของความร้อนเดิม แคลอรี (Calorie) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} 1 \text{ จูล} &= 1 \text{ นิวตัน-เมตร} \\ 1 \text{ แคลอรี} &= 4.186 \text{ จูล} \\ 1 \text{ กิโลแคลอรี} &= 1000 \text{ แคลอรี} = 3.968 \text{ บีทียู} \end{aligned} \quad (1-18)$$

โดยที่ 1 แคลอรีคือ ปริมาณความร้อนที่ทำให้ น้ำ 1 กรัมมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน 1 บรรยากาศ เมื่อสารได้รับความร้อนจะทำให้ อุณหภูมิของสารเพิ่มขึ้น และถ้าได้รับความร้อนมากพอจะทำให้สารนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะ การที่สารจะมีความร้อนมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณหนึ่งของสาร ซึ่งจะมีค่าคงที่ตามแต่ละชนิดของสาร ปริมาณนี้คือ ความจุความร้อน

### 1.6.1 ความจุความร้อน (Heat capacity)

ความจุความร้อน (heat capacity) คือ ปริมาณของพลังงานความร้อนที่สารได้รับแล้วทำให้สารมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นหนึ่งหน่วยของสเกลวิน ซึ่งสารแต่ละชนิดจะมีความจุความร้อนไม่เท่ากัน เวลาที่ให้ความร้อนกับสารใดๆ ถึงแม้จะเพิ่มอุณหภูมิของสารเท่ากัน แต่ถ้าเป็นสารต่างชนิดกัน ความร้อนที่เกิดขึ้นก็จะแตกต่างกัน ซึ่งสามารถที่จะหาความสัมพันธ์ระหว่างความจุความร้อนและพลังงานความร้อนได้จาก

$$Q = C\Delta T \quad (1-19)$$

เมื่อ  $Q$  คือ ความร้อน มีหน่วยเป็น จูล

$C$  คือ ความจุความร้อน มีหน่วยเป็น จูล/เคลวิน

$\Delta T$  คือ อุณหภูมิที่เปลี่ยนไป มีหน่วยเป็น เคลวิน

### 1.6.2 ความจุความร้อนจำเพาะ (Specific heat capacity)

จากหัวข้อที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าถึงแม้ว่าจะเป็นสารชนิดเดียวกันแต่ถ้ามีขนาดหรือมวลที่แตกต่างกันก็จะมีผลต่อความร้อนที่เพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากการที่สารจะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นมากหรือน้อย นอกจากจะขึ้นอยู่กับชนิดของสารแล้วยังขึ้นอยู่กับมวลของสารด้วย จึงได้มีการกำหนดปริมาณที่มีมวลเข้ามาเกี่ยวข้อง นั่นคือ ความจุความร้อนจำเพาะ (specific heat capacity) โดยนิยามของความจุความร้อนจำเพาะคือ ปริมาณความร้อนที่ทำให้สารละลายหนึ่งหน่วยมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นหนึ่งองศาเคลวิน มีหน่วยเป็นจูล/กิโลกรัม.เคลวิน เขียนเป็นสมการได้คือ

$$c = \frac{Q}{m\Delta T}$$

$$\text{หรือ } Q = mc\Delta T \quad (1-20)$$

เมื่อ  $m$  คือ มวลของสารมีหน่วยเป็นกิโลกรัม (kg)

$Q$  คือ ปริมาณความร้อนที่สารได้รับหรือคายออกไปมีหน่วยเป็นจูล (J)

$\Delta T$  คือ อุณหภูมิมีหน่วยเป็นเคลวิน (K)

ค่าความจุความร้อนของสารบางชนิดแสดงดังตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.2 แสดงความจุความร้อนจำเพาะของสารชนิดต่างๆ ที่ความดันคงตัว

สาร	ความจุความร้อนจำเพาะ	ความจุความร้อนโมลาร์
	ระบบ SI (J/kg·K)	ระบบ SI (J/mol·K)
น้ำ (15°C)	4190	75.4
น้ำแข็ง (0°C)	2100	37.8
อะลูมิเนียม	910	24.6
ทองแดง	385	24.8
เหล็ก	470	26.3
ตะกั่ว	130	26.9
เงิน	234	25.3
ปรอท	138	27.7

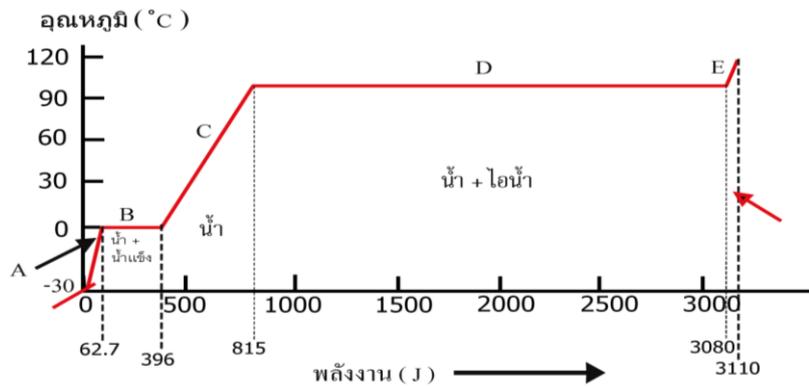
ที่มา: ปิยพงษ์ สิทธิคง, 2548.

### 1.7 ความร้อนกับการเปลี่ยนสถานะของสาร (Heat and state transition)

เมื่อมีการถ่ายเทความร้อนของสารจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งสารจะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และเมื่อมีการถ่ายเทความร้อนไปเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงจุดจุดหนึ่ง สารนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพ นั่นคือ เปลี่ยนแปลงจากสถานะหนึ่งไปเป็นอีกสถานะหนึ่ง เช่น ของแข็งกลายเป็นน้ำ และจากน้ำกลายเป็นแก๊ส เป็นต้น ปริมาณพลังงานความร้อนที่ทำให้สารหนึ่งหน่วยเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะนี้เราเรียกว่า **ความร้อนแฝง (Latent heat)**

โดยทั่วไปสถานะของสารสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 สถานะได้แก่ ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส เมื่อสารได้รับความร้อนเข้าไปหรือคายความร้อนออกมาในปริมาณที่มากเพียงพอจะทำให้

เปลี่ยนสถานะการเปลี่ยนสถานะของสารจากของแข็งเป็นของเหลวเรียกว่า การหลอมเหลว ส่วนการเปลี่ยนสถานะของสารจากของเหลวเป็นของแข็งเรียกว่า การแข็งตัว การเปลี่ยนสถานะของสารจากของเหลวเป็นแก๊ส เรียกว่า การกลายเป็นไอ การเปลี่ยนสถานะของสารจากแก๊สเป็นของเหลว เรียกว่า การควบแน่น



ภาพที่ 1.3 กราฟแสดงการเปลี่ยนสถานะและอุณหภูมิของน้ำ 1 กรัม  
ที่มา: Serway, R.A., and Jewett, J.W., 2014

พิจารณาจากภาพที่ 1.3 พบว่าเมื่อน้ำได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงคือ

1. ในช่วงอุณหภูมิ -30 องศาเซลเซียส ถึง 0 องศาเซลเซียส น้ำแข็งใช้พลังงานความร้อนใช้ในการเปลี่ยนอุณหภูมิให้สูงขึ้น
2. ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ทำให้อุณหภูมิคงที่น้ำแข็งจะใช้พลังงานความร้อนในการเปลี่ยนสถานะจากน้ำแข็งเป็นน้ำ
3. ในช่วงอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียสถึง 100 องศาเซลเซียส น้ำใช้พลังงานความร้อนใช้ในการเปลี่ยนอุณหภูมิให้สูงขึ้นถึง 100 องศาเซลเซียส
4. ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ทำให้อุณหภูมิคงที่น้ำจะใช้พลังงานความร้อนในการเปลี่ยนสถานะจากน้ำเป็นไอ
5. ที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส ไอน้ำจะรับพลังงานความร้อนต่อไปอีกทำให้อุณหภูมิของไอน้ำสูงขึ้น

ในกรณีที่ให้ความร้อนแก่สารทำให้สารมีอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงทั้งนี้เพราะสารจะให้ความร้อนที่ได้รับหรือคายออกในการเปลี่ยนสถานะเท่านั้น ความร้อนที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะของสารนี้เรียกว่า ความร้อนแฝง ถ้าความร้อนแฝงคิดต่อหนึ่งหน่วยของมวลเราเรียก ความร้อนแฝงจำเพาะ (Specific latent heat)

โดยหาความสัมพันธ์ได้จากสมการ

$$L = \frac{Q}{m} \quad (1-21)$$

$$Q = mL \quad (1-22)$$

เมื่อ  $m$  คือ มวลของสารมีหน่วยเป็นกรัม (g) หรือกิโลกรัม (kg)

$Q$  คือ ปริมาณความร้อนที่สารได้รับหรือคายออกไปมีหน่วยเป็นจูล (J)

$L$  คือ ความร้อนแฝงจำเพาะมีหน่วยเป็นจูลต่อกิโลกรัม (J/kg)

สำหรับความร้อนแฝงแบ่งตามการเปลี่ยนสถานะของสาร ได้แก่

1. ความร้อนแฝงจำเพาะของการหลอมเหลวหรือการแข็งตัว คือความร้อนที่สารใช้ในการเปลี่ยนสถานะของสารที่มีมวล 1 หน่วย จากของแข็งเป็นของเหลวหรือของเหลวเป็นของแข็งโดยที่อุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลง

2. ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอหรือการควบแน่น คือความร้อนที่สารใช้ในการเปลี่ยนสถานะของสารที่มีมวล 1 หน่วย จากของเหลวเป็นไอหรือไอเป็นของเหลวโดยที่อุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลง ตัวอย่างความร้อนแฝงของสารบางชนิดแสดงดังตารางที่ 1.3

ตารางที่ 1.3 ความร้อนของการหลอมเหลวและการกลายเป็นไอของสารชนิดต่างๆ

สาร	จุดหลอมเหลว		ความร้อนแฝง ของการ หลอมเหลว (kJ/kg)	จุดเดือด		ความร้อนแฝง ของการ กลายเป็นไอ (kJ/kg)
	K	°C		K	°C	
อิลเลียม	3.5	-269.56	5.23	4.216	-268.93	20.9
ไฮโดรเจน	13.84	-259.31	58.6	20.26	-252.89	452
ไนโตรเจน	63.18	-209.97	25.5	77.34	-195.81	201
เอทานอล	159	-114	104.2	351	78	854
ปรอท	234	-39	11.8	630	357	272
น้ำ	273.15	0.00	333	373.15	100.00	2256
กำมะถัน	392	119	38.1	717.75	444.60	326

ที่มา: ปิยพงษ์ สิทธิคง, 2548.

ตัวอย่างที่ 1.6 ต้องใช้พลังงานความร้อนกี่จูลที่ทำให้น้ำแข็ง 50 กรัม ละลายกลายเป็นน้ำจนหมด

วิธีทำ ค่าความร้อนแฝงของการหลอมเหลวของน้ำแข็งเป็นน้ำมีค่า 333 กิโลจูลต่อกิโลกรัม

ดังนั้น

$$Q = mL$$

$$Q = (50 \times 10^{-3} \text{ kg}) \left( 333 \times 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \right)$$

$$Q = 16650 \text{ J}$$

**คำตอบ** ดังนั้น จะต้องใช้พลังงานความร้อนเท่ากับ 16650 จูล

ตัวอย่างที่ 1.7 กระจ็องบรจน้ำใบหนึ่งมีน้ำ 150 กรัม ที่ 4 องศาเซลเซียสบรรจุอยู่ จากนั้นเอาชิ้นโลหะมวล 90 กรัม ที่ 100 องศาเซลเซียส ใส่งไปหลังจากถึงสภาพสมดุล อุณหภูมิของน้ำและโลหะเท่ากับ 21 องศาเซลเซียส ถ้าไม่มีการสูญเสียความร้อนให้กับกระตึก และให้ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมีค่า 1 แคลอรีต่อกรัมองศาเซลเซียส จงหา

ก. ปริมาณความร้อนที่โลหะคายออกมา

ข. ความจุความร้อนจำเพาะของโลหะ

**วิธีทำ**

ก. ปริมาณความร้อนที่โลหะคายออกมามีค่าเท่ากับปริมาณความร้อนที่น้ำรับเข้าไปในการเปลี่ยนจาก 4 องศาเซลเซียส เป็น 21 องศาเซลเซียสดังนั้น

$$\begin{aligned} Q_{\text{คาย}} &= Q_{\text{รับ}} \\ &= (mc\Delta T)_{\text{น้ำ}} \\ &= (150\text{g})(1\text{cal/g}^{\circ}\text{C})(21^{\circ}\text{C} - 4^{\circ}\text{C}) \\ &= 2550 \text{ cal} \end{aligned}$$

**คำตอบ** จะต้องใช้พลังงานความร้อน 2550 แคลอรี

ข. หาความจุความร้อนจำเพาะของโลหะจาก

$$\begin{aligned} Q &= (mc\Delta T)_{\text{โลหะ}} \\ 2550 \text{ cal} &= (90\text{g})(c)(100^{\circ}\text{C} - 4^{\circ}\text{C}) \\ c &= 0.36\text{cal/g}^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

**คำตอบ** ความจุความร้อนจำเพาะเท่ากับ 0.36 แคลอรีต่อกรัมองศาเซลเซียส

## 1.8 การถ่ายโอนความร้อน (Heat transfer)

เมื่อสารได้รับพลังงานความร้อนจะมีพฤติกรรมในลักษณะการดูดกลืนความร้อนส่งผลต่อการหดหรือการขยายตัว นอกจากนี้ยังมีพฤติกรรมอีกอย่างหนึ่งคือ การถ่ายโอนความร้อนโดยลักษณะการถ่ายโอนความร้อนมี 3 รูปแบบ ตามลักษณะการเคลื่อนที่ของตัวกลางคือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อนซึ่งไม่อาศัยตัวกลาง

### 1.8.1 การนำความร้อน (Heat conduction)

ลักษณะของการถ่ายโอนความร้อนแบบนำความร้อนคือ เมื่อสารที่เป็นตัวกลางได้รับความร้อนจะเป็นแค่ตัวกลางในการถ่ายโอนความร้อนไปเท่านั้น โดยอนุภาคของสารจะไม่มีเคลื่อนที่ตามไปด้วย โดยทั่วไปจะเกิดในสถานะของแข็ง

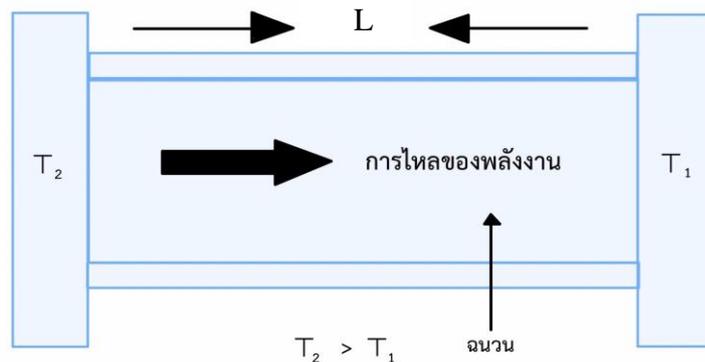
จากการทดลองพบว่าปริมาณความร้อน  $\Delta Q$  ที่ส่งผ่านจากด้านที่ร้อนกว่าไปสู่ด้านที่เย็นกว่าเมื่อเวลาผ่านไป  $\Delta t$  และ  $(\Delta Q/\Delta t)$  แปรผันตรงกับพื้นที่หน้าตัด  $A$  ความแตกต่างของอุณหภูมิ  $\Delta T$  และเป็นสัดส่วนผกผันกับความหนา  $\Delta x$  เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (1-23)$$

$$\text{หรือ} \quad \frac{dQ}{dt} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1-24)$$

สมการที่ (1-24) เรียกว่า กฎของฟูเรียร์ (Fourier's law) ค่าคงตัว  $k$  เรียกว่า สภาพนำความร้อน (Thermal conductivity) ของวัตถุ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุมีหน่วยเป็นวัตต์ต่อเมตร-เคลวิน ( $W/m \cdot k$ ) โดยเครื่องหมายลบหมายความว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงมีค่าลดลงในทิศตรงข้ามกับปริมาณการเปลี่ยนแปลงความร้อน แสดงให้เห็นว่าการนำความร้อนเป็นไปในลักษณะที่เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น อุณหภูมิจะลดลง สำหรับเกรเดียนของอุณหภูมิ  $dT/dx$  คือ ความลาดชันของอุณหภูมิ (Temperature gradient) สำหรับ  $dQ/dt$  เรียกว่า กระแสความร้อน (Heat current,  $H$ ) คือ อัตราการไหลของความร้อนผ่านพื้นที่หน้าตัด  $A$  หรือพลังงานความร้อนที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัด  $A$  ในหนึ่งหน่วยเวลามีหน่วยเป็นวัตต์ (W) ดังนั้น

$$H = \frac{dQ}{dt} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1-25)$$



ภาพที่ 1.4 การไหลของความร้อนจากอุณหภูมิสูง ( $T_2$ ) ไปยังอุณหภูมิต่ำกว่า ( $T_1$ )

ถ้าพิจารณารูปทรงกระบอกยาว  $L$  พื้นที่หน้าตัดสม่ำเสมอ  $A$  ซึ่งด้านข้างถูกหุ้มด้วยฉนวนป้องกันการรั่วไหลของความร้อนดังภาพที่ 1.4 ในสถานะคงตัว หมายถึง อุณหภูมิที่ปลายแต่ละด้านนั้นไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งพบว่า เกรเดียนของอุณหภูมิ  $dT/dx$  มีค่าคงตัวตลอดแท่งวัตถุ นั่นคือ

$$-\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (1-26)$$

แทนในสมการที่ (1-25) จะได้

$$H = \frac{dQ}{dt} = \frac{kA(T_2 - T_1)}{L} \quad (1-27)$$

จากสมการที่ (1-27) พบว่ากระแสความร้อน (H) แปรผันตรงกับผลต่างของอุณหภูมิ ( $T_2 - T_1$ ) ระหว่างปลายทั้งสองข้างและพื้นที่หน้าตัดของวัตถุ แต่จะแปรผกผันกับความยาวของวัตถุโดยถ้า วัตถุยาวมากการนำความร้อนจะน้อยลง

สำหรับแผ่นตัวกลางนำความร้อนที่ประกอบด้วยวัสดุหลายชนิดร้อนมีความหนา  $L_1, L_2, \dots$  และมีสภาพนำความร้อนเป็น  $k_1, k_2, \dots$  อัตราการถ่ายโอนความร้อนเขียนได้เป็น

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{A(T_2 - T_1)}{\sum_i \left( \frac{L_i}{k_i} \right)} \quad (1-28)$$

เมื่อ  $T_1$  และ  $T_2$  เป็นอุณหภูมิด้านนอกสุดของแผ่นตัวนำ

สารที่มีค่า  $k$  มากเป็นตัวนำความร้อนที่ดีแต่สารที่มีค่า  $k$  น้อยจะเป็นตัวนำความร้อนที่ไม่ดีหรือเป็นฉนวนความร้อน จากตารางข้างต้นจะพบว่าโลหะเป็นตัวนำความร้อนที่ดีกว่าสารอื่นๆ

**ตัวอย่างที่ 1.8** ถังใส่ น้ำแข็งทำด้วยโฟมหนา 2 เซนติเมตร ภายในบรรจุ น้ำแข็งจนเต็มถ้ากระติกนี้มีพื้นที่ทั้งหมด 0.8 ตารางเมตร นำกระติกไปตั้งไว้กลางแจ้งซึ่งมีอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน จงหาอัตราการไหลของความร้อนเข้ากระติกและมวลของน้ำแข็งที่ละลายมีค่าเท่าใด กำหนดให้สภาพนำความร้อนของโฟมเท่ากับ 0.01 วัตต์/เมตร.เคลวิน ความร้อนแฝงของการหลอมเหลวมีค่า  $3.33 \times 10^5$  จูลต่อกิโลกรัม

**วิธีทำ** หาอัตราการไหลของความร้อนเข้ากระติกจาก

$$\begin{aligned} H &= \frac{dQ}{dt} = \frac{kA(T_2 - T_1)}{L} \\ H &= \left( 0.010 \frac{W}{mK} \right) (0.80m^2) \frac{(30^\circ C - 0^\circ C)}{0.020m} \\ H &= 12W \end{aligned}$$

นั่นหมายความว่าใน 1 วินาที มีความร้อนไหลเข้ากระติก 12 จูล ดังนั้นใน 1 วัน = 86,400 วินาที

มีความร้อนไหลเข้ากระติก  $Q = 12 \times 86400 = 1.04 \times 10^6$  J

**คำตอบ** ดังนั้นความร้อนที่ไหลเข้ากระติกเท่ากับ 1.04 เมกะจูล

ให้  $m$  แทนมวลที่น้ำแข็งละลาย ดังนั้น

$$Q = mL$$

$$1.04 \times 10^6 \text{ J} = m(3.33 \times 10^5 \text{ J/kg})$$

$$m = 3.1 \text{ กิโลกรัม}$$

**คำตอบ** ดังนั้นมวลที่น้ำแข็งละลายเท่ากับ 3.1 กิโลกรัม

### 1.8.2 การพาความร้อน (Heat convection)

การพาความร้อนเป็นการถ่ายโอนความร้อนโดยโมเลกุลของตัวกลางที่ได้รับความร้อนเป็นตัวเคลื่อนที่พาไปส่วนโมเลกุลของของเหลวหรือแก๊สเมื่อได้รับความร้อนทำให้ความหนาแน่นของโมเลกุลบริเวณนั้นน้อยลง โมเลกุลเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงขึ้นและพาเอาความร้อนเคลื่อนที่ไปด้วย ส่วนโมเลกุลที่ยังไม่ได้รับความร้อนจะเคลื่อนเข้ามาแทนที่ทำให้เกิดการหมุนเวียนของความร้อนขึ้นอัตราการถ่ายโอนความร้อนโดยการพาความร้อนนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = hA(T_2 - T_1) = K(T_2 - T_1) \quad (1-29)$$

เมื่อ  $\frac{\Delta Q}{\Delta t}$  คือ อัตราการถ่ายโอนความร้อนโดยการพาความร้อนมีหน่วยเป็นวัตต์

$h$  คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของตัวกลางขึ้นอยู่กับสมบัติของของไหล อัตราเร็วรูปร่างและลักษณะการวางตัวของวัตถุ ( $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ )

$A$  คือ พื้นที่ผิวตัวกลางที่พิจารณา ( $\text{m}^2$ )

$T_2 - T_1$  คือ ผลต่างของอุณหภูมิของตัวกลาง 2 จุดที่พิจารณา (K)

สมการที่ (1-29) บางทีเรียกว่า กฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling) และค่าคงตัว  $K$  เรียกว่า สัมประสิทธิ์ของการเย็นตัว

**ตัวอย่างที่ 1.11** จงหาอัตราการถ่ายโอนความร้อนโดยการพาจากร่างกายของมนุษย์ ซึ่งอยู่ในห้องที่อากาศหนึ่งมีอุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส สมมติผิวมนุษย์มีอุณหภูมิ 34 องศาเซลเซียส และผิวภายนอกของร่างกายมีพื้นที่ 1.5 ตารางเมตร ให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนมีค่า 6 จูล/เมตร<sup>2</sup>·วินาที·องศาเซลเซียส

**วิธีทำ** จากสมการที่ (1-29)

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = hA(T_2 - T_1)$$

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = (6 \text{ J/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{C})(1.5 \text{ m}^2)(34^\circ \text{C} - 23^\circ \text{C})$$

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = 100 \text{ J/s} = 100 \text{ W}$$

**คำตอบ** ดังนั้นอัตราการถ่ายโอนความร้อนเท่ากับ 100 วัตต์

### 1.8.3 การแผ่รังสีความร้อน (Heat radiation)

การแผ่รังสีความร้อนเป็นลักษณะการถ่ายโอนความร้อนอีกรูปแบบหนึ่งที่ไม่จำเป็นต้องอาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่ เป็นลักษณะการถ่ายโอนความร้อนจากผิววัตถุโดยพลังงานความร้อนที่ถูกส่งออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วแสง และความร้อนที่แผ่ออกมานั้นไม่ต้องอาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่ วัตถุทุกชนิดที่มีอุณหภูมิมากกว่าศูนย์องศาสัมบูรณ์ สามารถแผ่รังสีได้และรับรังสีได้ โดยถ้าอัตราการแผ่รังสีความร้อนมีค่ามากกว่าการดูดกลืนความร้อนแล้ว อุณหภูมิของวัตถุจะสูงขึ้น และถ้าอัตราการแผ่รังสีความร้อนมีค่าเท่ากับ การดูดกลืนความร้อนแล้ว อุณหภูมิของวัตถุจะคงเดิมไม่เปลี่ยนแปลง โดยรังสีที่แผ่ออกมาจะอยู่ในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สำหรับอัตราการแผ่รังสีของวัตถุใดแปรผันตรงกับพื้นที่ผิวของวัตถุและกำลังสี่ของอุณหภูมิสัมบูรณ์ของวัตถุเรียกว่า กฎของสเตฟาน(Stefan's law) เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$R = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \sigma A e T^4 \quad (1-30)$$

เมื่อ R คือ อัตราการแผ่รังสีของวัตถุหรือพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ( $\frac{\Delta Q}{\Delta t}$ ) ที่แผ่ออกมาจากผิวที่วัตถุในหนึ่งหน่วยเวลามีหน่วยเป็นวัตต์

e คือ สภาวะแผ่รังสี (Emissivity) ของผิววัตถุซึ่งขึ้นกับชนิดของผิววัตถุโดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1  
 $\sigma$  คือ ค่าคงที่ของสเตฟาน-โบลซ์มาน (Stefan – Boltzmann constant) มีค่าเท่ากับ  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$

A คือ พื้นที่ผิวทั้งหมดของวัตถุที่แผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมามีหน่วยเป็นตารางเมตร

T คือ อุณหภูมิของวัตถุมีหน่วยเป็นเคลวิน (K)

สำหรับวัตถุใดๆจะพบว่าวัตถุที่มีสีดำจะดูดกลืนและแผ่รังสีความร้อนได้ดีกว่าวัตถุที่มีสีขาวและสีอื่นๆ ดังนั้นวัตถุที่สามารถดูดกลืนพลังงานทั้งหมดที่ตกกระทบผิววัตถุจะเรียกว่า “**วัตถุดำ (Black body)**” ซึ่งค่าสภาวะแผ่รังสีของผิววัตถุดำ (e) จะมีค่าเท่ากับ 1 ถ้าวัตถุมีอุณหภูมิ  $T_1$  ขณะที่สิ่งแวดล้อมมีอุณหภูมิ  $T_2$  อัตราการแผ่รังสีความร้อนสุทธิเขียนได้เป็น

$$R_{\text{สุทธิ}} = \sigma A e (T_1^4 - T_2^4) \quad (1-31)$$

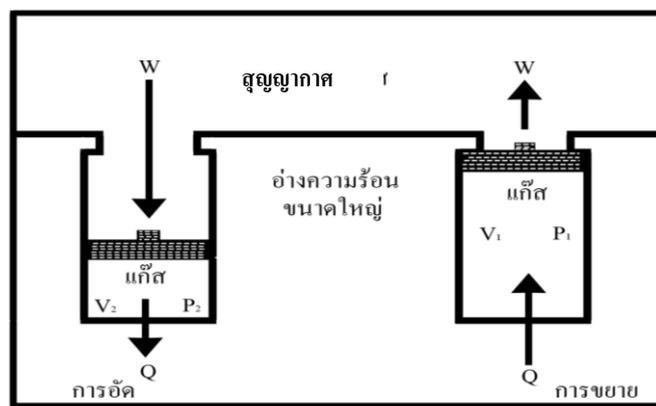
โดย  $R_{\text{สุทธิ}}$  คืออัตราการแผ่รังสีความร้อนสุทธิ โดยถ้า  $R_{\text{สุทธิ}}$  มีค่าเป็นบวกแสดงว่าวัตถุแผ่รังสีให้กับสิ่งแวดล้อม รายละเอียดจะกล่าวถึงในบทต่อไป

### 1.9 กฎข้อที่ศูนย์ของอุณหพลศาสตร์ (Zero law of thermodynamics)

กฎข้อที่ศูนย์ทางอุณหพลศาสตร์กล่าวไว้ว่า ถ้าระบบสองระบบอยู่ในภาวะสมดุลทางความร้อนกับระบบที่สามแล้ว ระบบสองระบบนี้จะสมดุลทางความร้อนซึ่งกันและกัน นั่นก็คือ กรณีให้วัตถุอยู่สามชนิด ถ้าวัตถุ A มีอุณหภูมิเท่ากับ B หรือมีสมดุลความร้อนต่อกัน และวัตถุชนิด C มีอุณหภูมิเท่ากับ B ดังนั้นวัตถุ A จะมีอุณหภูมิเท่ากับ C หรือเกิดสมดุลความร้อนต่อกันและกัน

### 1.10 กฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ (First law of thermodynamics)

กฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์เป็นกฎที่อธิบายถึงลักษณะของการอนุรักษ์พลังงานความร้อนที่จะเหมือนกับกฎการอนุรักษ์พลังงานทั่วไปที่บอกไว้ว่าพลังงานไม่สูญหายไปไหนแต่สามารถเปลี่ยนรูปแบบได้เป็นกฎที่อธิบายเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของพลังงานภายใน โดยอธิบายไว้ว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของระบบ พลังงานที่อยู่ภายในระบบจะต้องมีค่าคงตัวเสมอ



ภาพที่ 1.5 การอัดและขยายตัวของแก๊สในลูกสูบระบบปิด

พิจารณาจากภาพที่ 1.5 ถ้า  $W$  แทนพลังงานกลของระบบในรูปของการทำงานและ  $Q$  แทนพลังงานที่ให้กับระบบโดยการถ่ายเทความร้อนและ  $U$  แทนพลังงานภายในระบบ ซึ่ง  $Q$  ได้จากพลังงานที่เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในระบบรวมทั้งงานที่ทำได้ของระบบจะได้

$$Q = U + W \quad (1-32)$$

$U$  เป็นบวก (+) เมื่อพลังงานภายในระบบเพิ่มขึ้น

$U$  เป็นลบ (-) เมื่อพลังงานภายในระบบลดลง

$W$  เป็นบวก (+) เมื่อระบบทำงาน

$W$  เป็นลบ (-) เมื่อมีการทำงานเข้าสู่ระบบหรือทำงานให้แก่ระบบ

$Q$  เป็นบวก (+) เมื่อมีความร้อนไหลเข้าสู่ระบบ

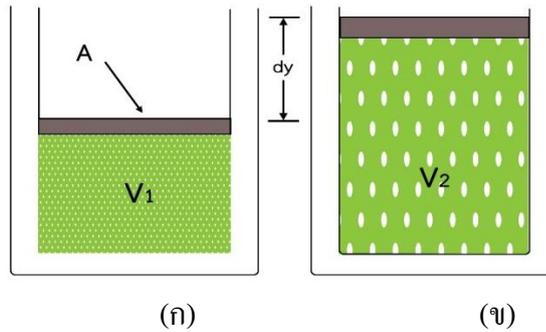
$Q$  เป็นลบ (-) เมื่อมีความร้อนไหลออกจากระบบ

โดย  $Q$ ,  $U$  และ  $W$  จะต้องมีหน่วยเดียวกัน

ในกรณีที่สถานะเริ่มต้น (1) และสถานะสุดท้าย (2) ของระบบมีการเปลี่ยนแปลงน้อยๆ จากสมการที่ (1-32) จะได้ว่า

$$dQ = dU + dW \quad (1-33)$$

กฎนี้ใช้ได้กับกระบวนการทุกกระบวนการในธรรมชาติที่ดำเนินอยู่ในสภาวะสมดุล เช่น ลูกสูบถูกอัดขยายภายในท่อปลายปิด ระบบการหมุนเวียนของแก๊ส เป็นต้น จากภาพที่ 1.6 จะแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างงานที่เกิดขึ้นในระบบมีความสัมพันธ์กับความดันและปริมาตรของแก๊ส



ภาพที่ 1.6 แก๊สบรรจุในทรงกระบอกที่ความดัน  $P$  (ก) สถานะเริ่มต้น (ข) สถานะสุดท้าย

พิจารณากระบอกสูบซึ่งบรรจุแก๊สดังรูป (ก) เป็นสถานะเริ่มต้นแก๊สมีปริมาตร  $V_1$  และมีค่าความดัน  $P$  แรงกระทำบนลูกสูบเป็น  $PA$  ถ้าลูกสูบถูกแก๊สดันออกไปได้ระยะทางสั้นๆ  $dy$  ทำให้สถานะสุดท้ายแก๊สมีปริมาตรเพิ่มเป็น  $V_2$  ดังรูป (ข) งาน  $dW$  จะเป็น

$$dW = PA dy \quad (1-34)$$

เมื่อ  $A dy = dV$  แทนปริมาตรที่เคลื่อนที่ของลูกสูบ ดังนั้น

$$dW = PdV \quad (1-35)$$

และงานทั้งหมดที่เกิดขึ้น

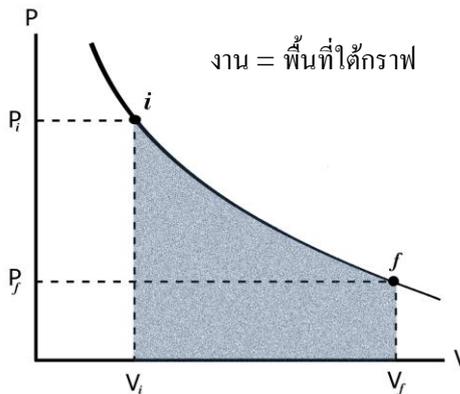
$$W = \int_{V_1}^{V_2} PdV \quad (1-36)$$

โดยที่ งานจะมีค่าเป็นบวก ( $W$  เป็น  $+$ ) เมื่อ  $V_2$  มากกว่า  $V_1$  (ระบบขยายตัว)

งานจะมีค่าเป็นลบ ( $W$  เป็น  $-$ ) เมื่อ  $V_2$  น้อยกว่า  $V_1$  (ระบบถูกอัด)

งานจะเป็นศูนย์ ( $W = 0$ ) เมื่อ  $V_2 = V_1$

งานตามสมการที่ (1-35) และ (1-36) ถ้าระบบเปลี่ยนแปลงปริมาตรจาก  $V_1$  เป็น  $V_2$  ขณะที่ความดันเป็น  $P_1$  และ  $P_2$  ตามลำดับ งานที่ได้สามารถแสดงได้ด้วยพื้นที่ใต้กราฟที่แรงเงาดังภาพที่ 1.7



ภาพที่ 1.7 แก๊สขยายตัวจากสถานะ 1 เป็นสถานะ 2

ตัวอย่างที่ 1.8 พลังงานภายในระบบเพิ่มขึ้น 25 กิโลจูล ในระหว่างที่มีการให้งานแก่ระบบ 99 กิโลจูล ในการนี้การถ่ายเทความร้อนเป็นปริมาณเท่าใด และความร้อนนี้ไหลเข้าหรือออกจากระบบ

วิธีทำ จากโจทย์  $U = +25$  กิโลจูล (พลังงานภายในระบบเพิ่มขึ้น  $U$  เป็นบวก)

$W = -99$  กิโลจูล (ทำงานให้แก่ระบบ  $W$  เป็นลบ)

$$\begin{aligned} Q &= U + W \\ Q &= 25 \text{ kJ} + (-99 \text{ kJ}) \\ Q &= -74 \text{ kJ} \end{aligned}$$

**คำตอบ** เครื่องหมาย  $Q$  ที่ได้เป็นลบแสดงว่าระบบสูญเสียความร้อนหรือความร้อนไหลออกจากระบบ 74 กิโลจูล

### 1.11 งานที่เกิดขึ้นโดยกระบวนการทางอุณหพลศาสตร์ (Work done by thermodynamics process)

ในระบบทางอุณหพลศาสตร์เมื่อมีความร้อนเกิดขึ้นจะส่งผลให้เกิดงานซึ่งการพิจารณา รูปแบบของการเกิดงานนั้นจะมีกระบวนการที่ตัวแปรหนึ่งของระบบคงที่ โดยแบ่งได้เป็น

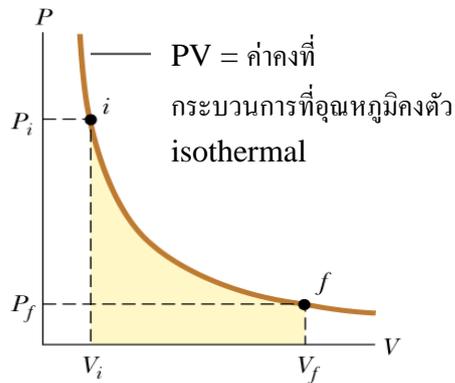
**1.11.1 กระบวนการอุณหภูมิกงตัว (Isothermal process)** คือกระบวนการที่เกิดขึ้นโดย อุณหภูมิของระบบไม่มีการเปลี่ยนแปลงสำหรับแก๊สอุดมคติเมื่ออุณหภูมิของแก๊สคงตัวจะทำให้ พลังงานภายในของแก๊สคงตัวด้วย ดังนั้นจากกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์จะได้ว่า

$$dQ = dU + dW \quad (1-33)$$

สำหรับแก๊สอุดมคติในกระบวนการอุณหภูมิกคงที่การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในระบบจะเป็นศูนย์ ( $U = 0$ ) ดังนั้นจะได้ว่า งานที่ทำได้เท่ากับความร้อนที่ดูดกลืน

$$Q = W \quad (1-34)$$

ในการเกิดกระบวนการความร้อนคงที่ตลอดกระบวนการจากสถานะเริ่มต้น (1) ถึงสถานะสุดท้าย (2) ของแก๊สอุดมคติได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับปริมาตรดังภาพที่ 1.8



ภาพที่ 1.8 กราฟระหว่างความดันกับปริมาตรเมื่ออุณหภูมิกคงตัว โดยงานที่เกิดขึ้นสามารถหาได้จากพื้นที่แรเงาใต้กราฟหางานได้ดังนี้

$$W = \int_{V_1}^{V_2} PdV$$

และจากกฎของแก๊สอุดมคติ  $P = \frac{nRT}{V}$  หรือ  $P = \frac{Nk_B T}{V}$  (ที่มาอยู่ในภาคผนวก)

งานหาได้ดังนี้

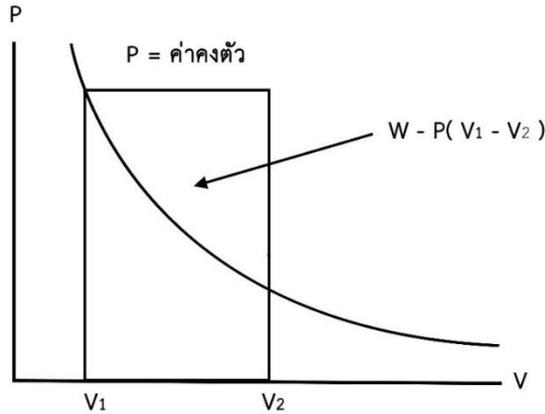
$$W = \int_{V_1}^{V_2} \frac{nRT}{V} dV = nRT \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad (1-35)$$

ในการขยายตัว  $V_2 > V_1$  และ  $W$  เป็นบวก นอกจากนั้น  $T$  คงตัว จะได้  $p_1 V_1 = p_2 V_2$  หรือ

$\frac{V_2}{V_1} = \frac{p_1}{p_2}$  ดังนั้นเราอาจเขียนงานที่อุณหภูมิกคงตัวได้เป็น

$$W = nRT \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) \quad (1-36)$$

**1.11.2 กระบวนการความดันคงตัว (Isobaric process)** คือ กระบวนการที่เกิดขึ้นโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงความดันของระบบเช่นการเกิดปฏิกิริยาเคมีภายใต้ความดันคงที่แสดงด้วยกราฟดังภาพที่ 1.9



ภาพที่ 1.9 กราฟระหว่างความดันกับปริมาตรเมื่อความดันคงตัว

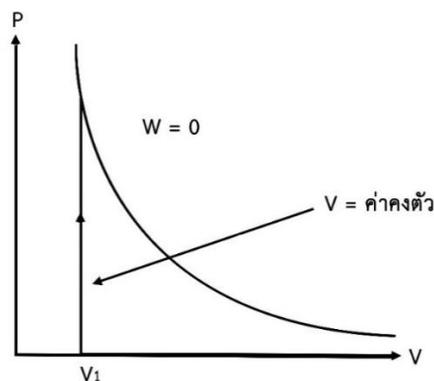
โดยงานที่เกิดขึ้นสามารถหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟ

$$W = \int_{V_1}^{V_2} \frac{nRT}{V} dV$$

เมื่อความดันคงที่ดังนั้น

$$W = P(V_2 - V_1) = P\Delta V \quad (1-37)$$

**1.11.3 กระบวนการปริมาตรคงตัว (Isometric process)** คือกระบวนการที่เกิดขึ้นโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของระบบแม้ว่าจะให้ความร้อนแก่ระบบ ตัวอย่างที่เช่น การเผากระป๋องสเปรย์ฉีดสีแล้วทำให้เกิดการระเบิดขึ้นได้ เป็นต้น ทำให้ได้กราฟดังภาพที่ 1.10



ภาพที่ 1.10 กราฟระหว่างความดันกับปริมาตรเมื่อปริมาตรคงตัว

จากกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์เป็นกระบวนการปริมาตรคงที่แสดงว่า  $\Delta V = 0$  ดังนั้นงานที่เกิดขึ้นมีค่าเป็นศูนย์

$$W = 0$$

จะได้

$$Q = \Delta U = \frac{3}{2}nR\Delta T \quad (1-38)$$

**1.11.4 กระบวนการความร้อนคงตัว (Adiabatic process)** คือ กระบวนการที่ไม่มีมีการ แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อม  $Q=0$  ถ้าให้ปริมาตรของระบบเปลี่ยนแปลง  $dV$  และอุณหภูมิของระบบเปลี่ยนแปลงเป็น  $dT$  และ  $dU$  เป็นการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในระบบ  $dU$  จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเท่านั้นเนื่องจาก  $dU = \left(\frac{3}{2}\right)nRdT = nc_vdT$  โดยนิยาม  $c_v$  คือความจุความร้อนโมลาร์ที่ปริมาตรคงตัว สามารถเขียนได้ว่า  $C_v = \frac{1}{n} \frac{dU}{dT}$  การวัดความจุความร้อนของแข็งและของเหลวมักกระทบในบรรยากาศภายใต้ความดันบรรยากาศคงตัว เรียกว่าความจุความร้อนโมลาร์ที่ความดันคงตัว  $c_p$  ดังนั้นจากกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์เราจะได้

$$dU = -dW \quad (1-39)$$

$$nc_vdT = -PdV \quad (1-40)$$

โดยจากกฎของแก๊ส  $P = \frac{nRT}{V}$  แทนค่า

$$\begin{aligned} nc_vdT &= -\frac{nRT}{V}dV \\ \left(\frac{c_v}{R}\right) \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} &= -\int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} \\ \left(\frac{c_v}{R}\right) \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) &= \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right) \\ \frac{T_2}{T_1} &= \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{R/c_v} \end{aligned} \quad (1-41)$$

จากนิยาม  $c_p = \frac{1}{n} \frac{dQ}{dT}$  และได้  $dW = pdV = nRdT$  นำไปแทนในสมการ (1-33) จะได้

$$nc_pdT = dU + nRdT \quad (1-42)$$

เมื่อหารแต่ละพจน์ด้วย  $ndT$  จะได้ว่า  $C_p = C_v + R$  หรือ

$$C_p - C_v = R \quad (1-43)$$

แทนสมการ (1-43) ในสมการ (1-41) และให้  $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$  จะได้

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{(\gamma-1)}$$

$$T_2 V_2^{(\gamma-1)} = T_1 V_1^{(\gamma-1)}$$

$$T V^{(\gamma-1)} = \text{ค่าคงที่} \quad (1-44)$$

ในทำนองเดียวกันถ้าหาความสัมพันธ์ระหว่างความดัน P และปริมาตร V จะได้

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma \quad (1-45)$$

$PV^\gamma$  เป็นค่าคงตัว

งานที่เกิดขึ้นในกระบวนการนี้โดย  $Q = 0$  และ  $W = -\Delta U$  โดยที่  $\Delta U = nc_v \Delta T$  ดังนั้น

$$W = nc_v (T_1 - T_2) \quad (1-46)$$

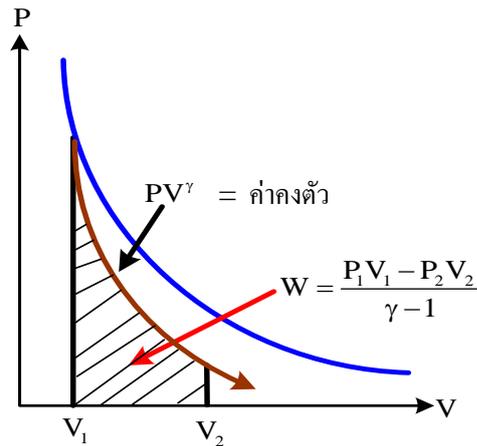
จากกฎของแก๊ส  $PV = nRT$  ดังนั้น

$$W = c_v \left( \frac{P_1 V_1}{R} - \frac{P_2 V_2}{R} \right)$$

$$W = \frac{P_1 V_1}{\gamma-1} - \frac{P_2 V_2}{\gamma-1} \quad (1-47)$$

สมการที่ (1-47) แสดงงานที่ระบบกระทำในกระบวนการอะเดียแบติกจะแสดงด้วยกราฟดังภาพที่

1.11



ภาพที่ 1.11 กราฟระหว่างความดันกับปริมาตรเมื่อความร้อนคงตัว

ตัวอย่างที่ 1.9 น้ำ 1 กรัม ปริมาตร 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร ถูกต้มให้เดือดที่ความดัน  $10^5$  นิวตันต่อตารางเมตร จนเป็นไอหมดที่มีปริมาตร 1,670 ลูกบาศก์เซนติเมตร ถ้าความร้อนแฝงจำเพาะของการเป็นไอของน้ำเท่ากับ  $2.268 \times 10^6$  จูลต่อกิโลกรัม จงหา

ก. งานที่เกิดขึ้นเป็นงานชนิดใดและมีค่าเท่าใด

ข. พลังงานภายในระบบเพิ่มขึ้นหรือลดลงเท่าใด

วิธีทำ ก. หางานที่เกิดขึ้นได้จาก

$$W = \int_{V_1}^{V_2} P dV$$

$$W = P(V_2 - V_1)$$

$$W = \left(10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right) (1670 - 1) \times 10^{-6} \text{m}^3$$

$$W = 166.9 \text{ J}$$

**คำตอบ** ดังนั้นงานที่เกิดขึ้นเป็นงานที่ทำโดยระบบมีค่าเท่ากับ 166.9 จูล (W เป็นบวก) เป็นกระบวนการความดันคงตัวและปริมาตรของระบบเพิ่มขึ้น (จากน้ำกลายเป็นไอ)

ข. จากกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์จะได้ว่า

$$Q = \Delta U + W$$

โดยที่  $Q = mL = 1 \times 10^{-3} \times 2.268 \times 10^6 = 2.268 \times 10^3 \text{ J}$  และ  $W = 166.9 \text{ J}$  แทนค่าจะได้

$$\Delta U = 2.268 \times 10^3 \text{ J} - 166.9 \text{ J}$$

$$\Delta U = 2.10 \times 10^3 \text{ J}$$

**คำตอบ** ดังนั้นพลังงานภายในของระบบเพิ่มขึ้นเท่ากับ  $2.10 \times 10^3$  จูล

**ตัวอย่างที่ 1.10** แก๊สอุดมคติมีปริมาตรเริ่มต้น 1 ลูกบาศก์เมตร ที่ความดัน  $2 \times 10^5$  นิวตันต่อตารางเมตรและอุณหภูมิ 250 เคลวิน ถูกอัดด้วยกระบวนการความร้อนคงที่ (Adiabatic process)

จนกระทั่งมีปริมาตรสุดท้ายเป็น 0.25 ลูกบาศก์เมตร (กำหนดให้  $\gamma = 1.4$ )

ก. จงหาความดันสุดท้ายและอุณหภูมิสุดท้ายของแก๊ส

ข. งานที่เกิดขึ้นเป็นงานชนิดใดและมีค่าเท่ากับเท่าใด

**วิธีทำ** ก. กระบวนการความร้อนคงที่จะได้ว่า

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma$$

$$P_2 = P_1 \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^\gamma$$

$$P_2 = (2 \times 10^5 \text{ N/m}^2) \left( \frac{1 \text{ m}^3}{0.25 \text{ m}^3} \right)^{1.4}$$

$$P_2 = 1.39 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

ความดันสุดท้ายของแก๊ส  $P_2$  มีค่าเท่ากับ  $1.39 \times 10^6 \text{ N/m}^2$

$$\text{จาก } \frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{(\gamma-1)}$$

$$T_2 = T_1 \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{(\gamma-1)}$$

$$T_2 = (250 \text{ K}) \left( \frac{1 \text{ m}^3}{0.25 \text{ m}^3} \right)^{(1.4-1)}$$

$$T_2 = 435.27 \text{ K}$$

**คำตอบ** ดังนั้น อุณหภูมิสุดท้ายของแก๊สมีค่าเท่ากับ 435.27 K

ข. งานที่เกิดขึ้นได้จาก

$$W = \frac{P_1 V_1 - P_2 V_2}{\gamma - 1}$$

$$W = \frac{(1.39 \times 10^6 \text{ N/m}^2)(0.25 \text{ m}^3) - (2 \times 10^5 \text{ N/m}^2)(1 \text{ m}^3)}{1.4 - 1}$$

$$W = 3.71 \times 10^5 \text{ J}$$

**คำตอบ** ดังนั้น งานที่ทำมีขนาด  $3.71 \times 10^5$  จูล เป็นงานที่กระทำต่อระบบ

## 1.12 กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ (Second law of thermodynamics)

หลักฐานที่ได้จากการทดลองทำให้ทราบว่า เป็นไปไม่ได้ที่จะสร้างเครื่องจักรความร้อนที่สามารถเปลี่ยนความร้อนทั้งหมดไปเป็นงานได้ นั่นคือไม่มีเครื่องจักรความร้อนใดที่มีประสิทธิภาพเป็น 100% นี่เป็นที่มาของคำอธิบายหนึ่งของกฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ กล่าวคือ “ไม่มีระบบใดที่สามารถเปลี่ยนสภาวะแบบวัฏจักร โดยดึงความร้อนจากแหล่งให้ความร้อนที่อุณหภูมิหนึ่งแล้ว

เปลี่ยนความร้อนทั้งหมดไปเป็นงานกล” คำอธิบายอีกอันหนึ่งสำหรับกฎข้อที่สองนี้ คือ ความร้อนไหลจากที่ที่ร้อนกว่าไปยังที่ที่เย็นกว่า ไม่มีการผันกลับ ซึ่งกล่าวได้ว่า “ไม่มีระบบการใดที่สามารถส่งผ่านความร้อนจากที่ที่เย็นกว่าไปยังที่ที่ร้อนกว่าด้วยตนเองได้”

### 1.12.1 วัฏจักรคาร์โนต์

ตามกฎข้อที่สอง ไม่มีเครื่องยนต์ความร้อนใดที่มีประสิทธิภาพ 100% ถ้าอย่างนั้น ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดที่เครื่องจักรสามารถมีได้จะเป็นเท่าไร คำถามนี้สามารถตอบได้ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1824 โดยวิศวกรชาวฝรั่งเศส Sadi Carnot ผู้ซึ่งคิดค้นเครื่องจักรความร้อน ในอุดมคติที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดที่เป็นไปได้ตามกฎข้อที่สอง วัฏจักรของเครื่องจักรแบบนี้เรียกว่า วัฏจักรคาร์โนต์ พิจารณาการผันกลับได้ซึ่งเกี่ยวกับทิศทางของกระบวนการทางอุณหพลศาสตร์ การเปลี่ยนงานให้เป็นความร้อนเป็นกระบวนการที่ผันกลับไม่ได้ เครื่องจักรความร้อนเป็นกระบวนการที่ตรงกันข้าม คือมันเปลี่ยนความร้อนไปเป็นงาน เพื่อให้เครื่องจักรความร้อนมีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยต้องพยายามไม่ให้มีกระบวนการผันกลับได้เกิดขึ้น

การไหลของความร้อน โดยที่มีการลดลงของอุณหภูมิเป็นกระบวนการที่ผันกลับได้ ดังนั้นในช่วงที่มีการส่งผ่านความร้อนในวัฏจักรคาร์โนต์ จะต้องมีไม่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเกิดขึ้น เมื่อเครื่องจักรดึงเอาความร้อนจาก hot reservoir ที่อุณหภูมิ  $T_H$  working substance ของเครื่องจักรจะต้องอยู่ที่อุณหภูมิ  $T_H$  ด้วย มิเช่นนั้นความร้อนอาจไหลย้อนกลับได้ ในทำนองเดียวกันเมื่อเครื่องจักรถ่ายเทความร้อนไปยัง cold reservoir ที่อุณหภูมิ  $T_C$  เครื่องจักรเองก็ต้องมีอุณหภูมิ  $T_C$  ด้วย นั่นคือทุกระบวนการที่มีการส่งผ่านความร้อน จะต้องเป็นกระบวนการที่อุณหภูมิของระบบคงตัว กระบวนการใดที่อุณหภูมิของ working substance ของเครื่องจักรมีการเปลี่ยนแปลงระหว่าง  $T_H$  และ  $T_C$  จะต้องไม่มีการส่งผ่านความร้อนเกิดขึ้นระหว่างเครื่องจักรกับแหล่งความร้อน ดังนั้นกระบวนการใดที่อุณหภูมิของ working substance เปลี่ยนจะต้องเป็น adiabatic process ประสิทธิภาพของเครื่องจักรความร้อนคาร์โนต์หาได้จาก

$$e_{\text{carnot}} = 1 - \frac{Q_C}{Q_H} = 1 - \frac{T_C}{T_H} \quad (1-48)$$

เมื่อ  $e_{\text{carnot}}$  คือ ประสิทธิภาพของเครื่องจักรคาร์โนต์

$\frac{Q_C}{Q_H}$  คือ อัตราส่วนของความร้อนที่ถ่ายเทออกไปต่อความร้อนที่ได้รับเข้ามา

$\frac{T_C}{T_H}$  คือ อัตราส่วนของอุณหภูมิที่ก๊าซถูกอัดต่ออุณหภูมิที่ก๊าซขยายตัว

จะเห็นว่าประสิทธิภาพของเครื่องจักรคาร์โนต์มีค่าขึ้นกับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนทั้งสองเท่านั้น โดยจะมีค่ามากเมื่อผลต่างของอุณหภูมิทั้งสองมีค่ามาก และประสิทธิภาพจะมีค่าสูงสุดเป็น 1 ก็ต่อเมื่อ  $T_C$  เท่ากับศูนย์องศาเคลวิน

ข้อสังเกต ไม่มีเครื่องจักรใดที่มีประสิทธิภาพมากไปกว่าเครื่องจักรคาร์โนต์ และเครื่องจักรคาร์โนต์ทุกเครื่องที่ทำงานระหว่างอุณหภูมิสองอุณหภูมิเหมือนกัน จะมีประสิทธิภาพเท่ากัน

### 1.12.2 เอนโทรปีและความไม่เป็นระเบียบ

เมื่อสารได้รับความร้อนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะโมเลกุลของสาร ทำให้ระบบที่ได้รับความร้อนจะเปลี่ยนจากสภาวะที่เป็นระเบียบ (Order) ไปสู่สภาวะที่ไม่เป็นระเบียบ (Disorder) โดยกฎข้อที่สองทางอุณหพลศาสตร์กล่าวไว้ว่า “ในระบบที่ประกอบด้วยโมเลกุลจำนวนมากถ้าระบบมีการเปลี่ยนแปลงเองระบบนั้นจะเปลี่ยนแปลงไปในสู่สภาวะไร้ระเบียบเพิ่มขึ้นหรืออย่างดีที่สุดคือไม่ลดลง ซึ่งก็คือ กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ ซึ่งปริมาณที่ใช้วัดการเปลี่ยนแปลงการไร้ระเบียบของระบบ เรียกว่า **เอนโทรปี (Entropy)** โดยการกำหนดให้เอนโทรปีเป็นการเปลี่ยนแปลงปริมาณความร้อนต่อหนึ่งหน่วยเคลวินตามสมการ

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T} \quad (1-49)$$

โดยที่  $\Delta S$  คือ เอนโทรปีมีหน่วยเป็นจูลต่อเคลวิน

$\Delta Q$  คือ ปริมาณความร้อนมีหน่วยเป็นจูล

$T$  คือ อุณหภูมิมีหน่วยเคลวิน

เมื่อระบบใดมีการเปลี่ยนแปลงโดยได้รับพลังงานความร้อนปริมาณน้อยๆ  $dQ$  ขณะที่อุณหภูมิ  $T$  จะกล่าวได้ว่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีน้อยๆ  $dS$  เป็นไปตามสมการ

$$dS = \frac{dQ}{T} \quad (1-50)$$

ถ้าหากมีการเปลี่ยนจากสภาวะที่ 1 ไปสภาวะที่ 2 จะได้ว่า การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี ( $\Delta S$ ) ดังนั้น

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T} \quad (1-51)$$

โดยถ้าระบบใดได้รับความร้อนเพิ่มขึ้น ( $Q$  เพิ่มขึ้น) และระบบมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นคงที่ ( $T$ ) แสดงว่าระบบให้เอนโทรปีมากขึ้นซึ่งมีค่าเท่ากับ  $\frac{Q}{T}$  และถ้าระบบใดได้รับสูญเสียความร้อน ( $Q$  ลดลง) และระบบมีอุณหภูมิลดลงคงที่ ( $T$ ) แสดงว่าระบบได้สูญเสียเอนโทรปีซึ่งมีค่าเท่ากับ  $\frac{Q}{T}$

จากกฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ เมื่อกล่าวถึงเอนโทรปีจะได้ว่า “กระบวนการใดๆในธรรมชาติ จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อกระบวนการนั้นทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของระบบเพิ่มขึ้นหรือคงตัว” โดยสามารถสรุปได้ว่า

$$\Delta S \geq 0 \quad (1-46)$$

โดย  $\Delta S = 0$  สำหรับกระบวนการผันกลับได้

$\Delta S > 0$  สำหรับกระบวนการผันกลับไม่ได้

### 1.13 บทสรุป

อุณหพลศาสตร์เป็นวิชาที่อธิบายเกี่ยวกับความร้อนและพฤติกรรมของสสารเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ สำหรับสเกลของอุณหภูมิตั้งแต่ในปัจจุบันมีสามสเกลคือเซลเซียส เคลวิน และฟาเรนไฮต์ สสารแต่ละชนิดจะมีความสามารถรับความร้อนได้แตกต่างกันขึ้นอยู่กับค่าคงตัวที่เรียกว่า ความจุความร้อนจำเพาะ วัตถุเมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการขยายตัวเนื่องจากความร้อนกฎทางอุณหพลศาสตร์เป็นกฎที่อธิบายเกี่ยวกับลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนกับพลังงานภายในที่อยู่ในสสารเมื่อได้รับความร้อนวัฏจักรทางความร้อนคือการเปลี่ยนแปลงที่ครอบรอบโดยการเปลี่ยนแปลงนี้จะต้องใช้กระบวนการต่างๆทางอุณหพลศาสตร์ เพื่อนำพลังงานมาใช้ในงานได้อย่างมีประสิทธิภาพซึ่งถ้ากระบวนการใดๆที่ระบบสามารถกลับสู่สถานะเริ่มต้นได้ โดยทั่วไปแล้วความร้อนนั้นเป็นพลังงานรูปแบบหนึ่ง และอาจเกิดจากเปลี่ยนรูปมาจากพลังงานรูปอื่นตามหลักการอนุรักษ์พลังงาน เช่น พลังงานความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมี พลังงานความร้อนที่เกิดจากพลังงานไฟฟ้า โดยทั่วไปเมื่อสารได้รับพลังงานความร้อนจะทำให้โมเลกุลภายในของสารเกิดการสั่นและเคลื่อนที่ทำให้เกิดความร้อนขึ้น วัตถุเมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการดูดกลืนความร้อน การถ่ายเทความร้อนหรือการถ่ายโอนความร้อนได้ โดยจะเกิดการถ่ายเทความร้อนจากจุดที่มีระดับความร้อนสูงหรือมีอุณหภูมิสูงไปสู่จุดที่มีระดับความร้อนต่ำหรือมีอุณหภูมิต่ำกว่าเสมอ จนกว่าจะมีอุณหภูมิเท่ากันจึงหยุดถ่ายเทเรียกว่า สมดุลความร้อน โดยอุณหพลศาสตร์เป็นการศึกษาที่สำคัญมาก และมีกฎที่ถือว่าสำคัญมากที่สุดในฟิสิกส์เลยก็ว่าได้ อย่างไรก็ตาม กฎบางข้อ เช่น ข้อที่สอง จะเป็นจริงเมื่อเรามองธรรมชาติแบบมหภาคเท่านั้น เมื่อพิจารณาในระดับจุลภาคหรือระดับอะตอม มีความน่าจะเป็นที่กฎข้อที่สองจะถูกฝ่าฝืน เพียงแต่ความน่าจะเป็นนั้นมีความน้อยมาก จนไม่สามารถสังเกตเห็นได้ในระดับมหภาคเท่านั้น

## แบบฝึกหัด

1. ลวดที่ยืดสะพานแห่งหนึ่งยาว 160 เมตรที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียสจงหาความยาวส่วนที่เพิ่มขึ้นของลวดเส้นนี้ในวันที่มีอุณหภูมิถึง 38 องศาเซลเซียสถ้าลวดนี้มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวตามเส้นเท่ากับ  $1.2 \times 10^{-5}$  องศาเซลเซียส<sup>-1</sup> [คำตอบ 7.3 เซนติเมตร]
2. แก้วใบหนึ่งมีปริมาตร 200 ลูกบาศก์เซนติเมตร ภายในแก้วเต็มปรอทจนเต็มที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ถ้าอุณหภูมิห้องเพิ่มเป็น 40 องศาเซลเซียส จะทำให้ปรอทล้นออกมาเท่าใดกำหนดให้สัมประสิทธิ์การขยายตัวตามปริมาตรของแก้วและปรอทเป็น  $1.2 \times 10^{-5}$  องศาเซลเซียส<sup>-1</sup> และ  $1.8 \times 10^{-5}$  องศาเซลเซียส<sup>-1</sup> ตามลำดับ [คำตอบ: 24 มิลลิเมตร<sup>3</sup>]
3. โลหะชนิดหนึ่งมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้น  $1.1 \times 10^{-5}$  องศาเซลเซียส<sup>-1</sup> และมีค่า Young's Modulus  $2 \times 10^{11}$  นิวตันต่อตารางเมตรยาว 10 เมตรและมีพื้นที่ภาคตัดขวาง 100 ตารางเซนติเมตรขณะนั้นอุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส จงหาขนาดของแรงเค้นในโลหะนี้ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 20 องศาเซลเซียส [คำตอบ:  $4.4 \times 10^5$  นิวตัน]
4. จะต้องให้พลังงานความร้อนเท่าใดแก่น้ำแข็ง 500 กรัมที่อุณหภูมิ  $-30$  องศาเซลเซียส จึงจะเป็นไอที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสให้ความร้อนแฝงการหลอมเหลว = 80 แคลอรีต่อกรัม  
 ความร้อนแฝงการกลายเป็นไอ = 540 แคลอรีต่อกรัม·องศาเซลเซียส  
 ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำแข็ง = 0.493 แคลอรีต่อกรัม·องศาเซลเซียส  
 ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ = 1 แคลอรีต่อกรัม·องศาเซลเซียส  
 ความจุความร้อนจำเพาะของไอน้ำ = 0.519 แคลอรีต่อกรัม·องศาเซลเซียส  
 [คำตอบ 419,295 แคลอรี]
5. ภาชนะหุงต้ม ชนิดหนึ่ง มีมวล 400 กิโลกรัมและมีน้ำอยู่ 180 กิโลกรัมสมมติว่า 70 % ของความร้อนจากเตาส่งให้กับภาชนะและน้ำ จงหาว่าเตาจะส่งความร้อนออกไปเท่าไรจึงจะทำให้เพิ่มอุณหภูมิของระบบจาก 5 องศาเซลเซียสเป็น 100 องศาเซลเซียสได้ถ้าความจุความร้อนจำเพาะของเหล็กเท่ากับ 460 จูลต่อกิโลกรัม·เคลวิน [คำตอบ  $1.27 \times 10^8$  จูล]
6. นำก้อนน้ำแข็งมวล 0.50 กิโลกรัม อุณหภูมิ  $-10$  องศาเซลเซียส ใสลงในน้ำ 3 กิโลกรัม อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส จงหาสถานะและอุณหภูมิสุดท้ายของของผสมนี้ กำหนดให้ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำแข็ง  $c_i$  เท่ากับ 0.50 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม·องศาเซลเซียส จุความร้อนจำเพาะของน้ำ  $c_w$  เท่ากับ 1 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม·องศาเซลเซียส ความร้อนแฝงจำเพาะของการหลอมเหลว (L) เท่ากับ 80 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม·องศาเซลเซียส [คำตอบ 5 องศาเซลเซียส]
7. วัตถุชนิดหนึ่งยอมให้ความร้อนผ่าน  $3.6 \times 10^5$  จูลใน 1 วันในพื้นที่ 1 ตารางเมตรเมื่อเกรเดียนต์ของอุณหภูมิมีก่า 1 เคลวินต่อเซนติเมตรจะมีความร้อนไหลผ่านแผ่นวัตถุนี้ที่มีพื้นที่  $0.75 \times 1.8$  ตาราง

เมตร หนา 4 เซนติเมตร ก็จุลต่อวัน ถ้าผิวด้านหนึ่งมีอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส และอีกด้านมีอุณหภูมิ 18 องศาเซลเซียส [คำตอบ  $2.21 \times 10^6$  จุลต่อวัน]

8. ในการอัดแก๊สจำนวน 1 โมลจากปริมาตร 22.4 ลิตรที่ 0 องศาเซลเซียส จนปริมาตรลดลงเหลือ 16.8 ลิตร โดยความดันแก๊สคงที่ ถ้าความดันของแก๊สคือ  $1.01 \times 10^5$  นิวตันต่อตารางเมตร จงหาว่า

ก. งานในการอัดแก๊สเป็นเท่าใด [คำตอบ - 565.6 จูล]

ข. หลังจากแก๊สถูกอัดอุณหภูมิของแก๊สเพิ่มขึ้นหรือลดลงเท่าใด [คำตอบ - 68.15 เคลวิน]

ค. ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทออกมามีค่าเท่าใด [คำตอบ - 1414 จูล]

9. แก๊ซอุดมคติ 1 ลิตรความดัน 1 บรรยากาศขยายตัวด้วยกระบวนการอุณหภูมิคงที่จนกระทั่งมีปริมาตรเป็น 2 เท่าของปริมาตรเริ่มต้นหลังจากนี้ถูกอัดจนมีปริมาตรเท่ากับปริมาตรเริ่มต้นด้วยกระบวนการความดันคงที่และถูกอัดต่อไปด้วยกระบวนการอุณหภูมิคงที่จนมีความดัน 1 บรรยากาศเท่าเดิม จงหา

ก. งานที่เกิดขึ้นทั้งหมดเป็นงานชนิดใดและมีค่าเท่าใด [คำตอบ - 15.54 จูล]

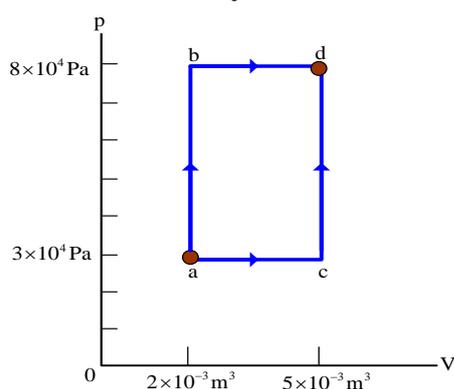
ข. ถ้าในกระบวนการความดันคงที่มีพลังงานความร้อน 50 จูลออกจากระบบจงหาพลังงานภายในของระบบที่เปลี่ยนไปทั้งหมด [คำตอบ 0.65 จูล]

10. กระบวนการทางความร้อนแสดงได้ด้วยแผนภาพ p-V ดังภาพด้านล่าง ระบบเกิดกระบวนการทางความร้อนเปลี่ยนแปลงจากสถานะ a ไปยังสถานะ d ตามเส้นทาง ab มีความร้อนไหลเข้าสู่ระบบ 600 จูล และตามเส้นทาง bd มีความร้อนไหลเข้าสู่ระบบ 200 จูล จงหา

ก. การเปลี่ยนแปลงของพลังงานภายในตามทาง ab [คำตอบ 600 จูล]

ข. การเปลี่ยนแปลงของพลังงานภายในตามทาง abd [คำตอบ 560 จูล]

ค. ปริมาณความร้อนที่ไหลเข้าสู่ระบบตามทาง acd [คำตอบ 650 จูล]



ภาพที่ 1.12 สำหรับคำถามข้อ 10

## เอกสารอ้างอิง

- คณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2549). **ฟิสิกส์ 1**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่ง  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เชิญโชค ศรขวัญ และคณะ, มหาวิทยาลัยมหิดล. (2546). **ฟิสิกส์ทั่วไป 1**. กรุงเทพฯ: คณะ  
วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล.
- ปิยพงษ์ สิริทิตง. (2548). **ฟิสิกส์ระดับอุดมศึกษา เล่ม 2**. กรุงเทพมหานคร: วิรัตน์ เอ็ดดูเคชั่น จำกัด  
ยัง และ เฟรดแมน. (2548). **ฟิสิกส์ระดับอุดมศึกษา เล่ม 2**. (แปลจาก **University Physics with  
Modern Physics** โดย ปิยพงษ์ สิริทิตง). กรุงเทพมหานคร: เพียร์สัน เอ็ดดูเคชั่นอิน โด  
ไชน่า.
- สุชาติ สุภาพ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. (2558). **ฟิสิกส์ทั่วไป**. กรุงเทพฯ:  
สำนักพิมพ์ทริปเฟล็ด เอ็ดดูเคชั่น.
- สุมาลี เทียนทองดี. (2560). **การสอนแบบเพียร์ในวิชาฟิสิกส์ Peer instruction in Physics**.  
กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ ศูนย์สื่อและสิ่งพิมพ์แก้วเจ้าจอม มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา.
- Bellance, J, and Brandt, R. (2010). **21<sup>st</sup> Century Skills Rethinking How Students Learn**.  
Solution Tree Press.
- Halpern, A. (2011). **Schaum's outlines 3,000 Solved Problems in Physics**. New York: The  
McGraw-Hill Companies, Inc.
- Serway, R. A., and Jewett, J. W. (2014). **Physics for Scientists and Engineers with Modern  
Physics 9<sup>th</sup> ed**. Belmont: Brooks/Cole-Thomson Learning.
- Serway, R.A., Vuille, C., and Hughes, J. (2015). **College Physics 10<sup>th</sup> ed**. Stamford: Cengage  
Learning.
- Thornton, T.S., and Rex, A. (2013). **Modern Physics for Scientists and Engineers 4<sup>th</sup> ed**.  
Boston: Brooks/Cole- Cengage Learning.
- Young, H.D., and Freedman, R.A. (2016). **Sear's & Zemansky's University Physics with  
Modern Physics 14<sup>th</sup> ed**. Essex: Pearson Education Limited.

## บทที่ 2

### แสงและทัศนศาสตร์

(Light and optics)

#### 2.1 บทนำ

ในบทเรียนแสงและทัศนศาสตร์สามารถแบ่งเป็นสองส่วนหลักใหญ่ๆ คือ การศึกษาการเคลื่อนที่ของแสง โดยใช้แนวคิดเรื่อง รังสีแสง เรียกว่า ทัศนศาสตร์เชิงเรขาคณิต ซึ่งแนวคิดนี้สามารถนำไปใช้อธิบายคุณสมบัติการสะท้อนและหักเหของแสงได้ ส่วนที่สองเป็นการศึกษาที่เรียกว่า ทัศนศาสตร์เชิงกายภาพ วิธีนี้สามารถใช้อธิบายการแทรกสอดและการเลี้ยวเบนของแสงได้ นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้อธิบายปรากฏการณ์ที่ซับซ้อนมากขึ้นได้อีกด้วย เช่น โพลาริเซชันของแสง เป็นต้น สำหรับการที่แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเป็นคลื่นตามขวางทำให้มีสมบัติทั้งการสะท้อน การหักเห การเลี้ยวเบน การแทรกสอด เช่นเดียวกับคลื่นตามขวางทั้งหลาย แต่จุดเด่นของสมบัติของแสงคือ นำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างกว้างขวางทางด้านทัศนศาสตร์ เช่น การสร้างกล้องจุลทรรศน์ กล้องดาราศาสตร์ เป็นต้น ในบทถัดไปเราจะกล่าวถึงการเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแสงให้ละเอียดมากขึ้น ทั้งนี้ในบทนี้ส่วนท้ายบทเรียนจะมีการยกตัวอย่างกิจกรรมการทดลองเพื่อให้ผู้ที่ศึกษาเข้าใจทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการจัดการเรียนการสอนเรื่องแสงและทัศนศาสตร์ได้ต่อไปในอนาคต

#### 2.2 ธรรมชาติของแสง (Nature of light)

การที่มนุษย์มองเห็นสิ่งต่างๆ ได้ เป็นเพราะสิ่งนั้นสะท้อนแสงเข้าสู่ย่นตาเรา เซอร์ไอแซกนิวตัน (Sir Isac Newton) ได้ตั้งทฤษฎีขึ้นมาอธิบายเกี่ยวกับแสงและการมองเห็นว่า แสงเป็นอนุภาค ที่ส่งออกมาจากแหล่งกำเนิดแสง โดยแสงเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงออกไปจากแหล่งกำเนิดแสงนั้น แสงจะทะลุผ่านวัตถุโปร่งใสและสะท้อนกลับจากผิววัตถุทึบแสง เมื่ออนุภาคเหล่านี้กระทบหรือสะท้อนเข้าสู่ย่นตาจะทำให้เกิดการมองเห็นขึ้น

ต่อมาฮอยเกนส์ (Christiaan Huygens) ได้เสนอแนวคิดว่าแสงเป็นคลื่นและตั้งทฤษฎีคลื่นแสงขึ้น ทฤษฎีนี้อธิบายกฎการสะท้อนและกฎการหักเหของแสงได้ แต่ยังไม่เป็นที่ยอมรับในขณะนั้น ภายหลัง โทมัส ยัง (Thomas Young) และเฟรสเนล (Augustin Jean Fresnel) ได้ทดลองพบการแทรกสอดและการเลี้ยวเบนของแสง การทดลองของยังเกี่ยวกับการแทรกสอดของแสงสามารถ

วัดความยาวคลื่นของแสงได้ ซึ่งอธิบายได้ด้วยทฤษฎีคลื่นแสง และเป็นที่ยอมรับกันจนถึงปัจจุบัน การแทรกสอดและการเลี้ยวเบนของแสงช่วยให้วัดอัตราเร็วของแสงได้ โดยไมเคิลสัน (Albert Michaelson) และมอร์เลย์ (Edward Morley) ใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า ไมเคิลสัน อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ (Michaelson interferometer) ทดลองวัดอัตราเร็วของแสง ซึ่งได้ผลใกล้เคียงกับค่าที่ยอมรับในปัจจุบัน คือ  $3 \times 10^8$  m/s ในสุญญากาศหรือในอากาศโดยประมาณ ต่อมาในปี พ.ศ.2416 แมกซ์ เวลล์ (James Clerk Maxwell) เสนอทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นมา ผลจากการคำนวณพบว่า อัตราเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าเท่ากับอัตราเร็วของแสง จึงเป็นการสนับสนุนว่าแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง แต่ทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกซ์เวลล์ใช้อธิบายปรากฏการณ์บางอย่างของแสง เช่น ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกไม่ได้ (จะกล่าวถึงในบทที่ 6)

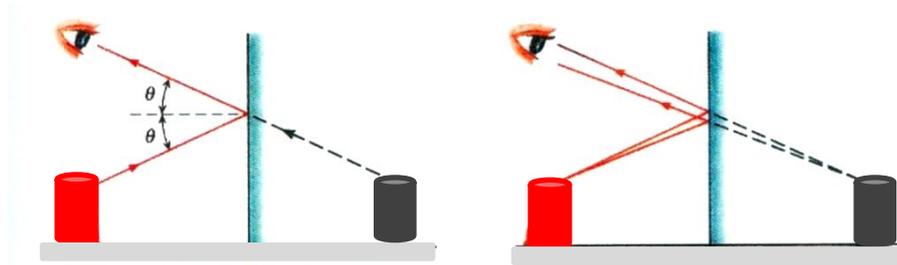
ต่อมาในปี พ.ศ.2448 ไอน์สไตน์ (Albert Einstein) ได้ตั้งทฤษฎีขึ้นมาอธิบายว่าแสงเป็นก้อนพลังงานที่เรียกว่า โฟตอน (Photon) และพลังงานของโฟตอนจะขึ้นกับความถี่ ถ้าความถี่ของโฟตอนสูงพอทันทีที่แสงตกกระทบผิวโลหะ โฟตอนของแสงจะถ่ายทอดพลังงานให้อิเล็กตรอนทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากอะตอมของโลหะนั้นได้ การพิจารณาว่าแสงเป็นคลื่นหรือเป็นโฟตอนขึ้นอยู่กับปรากฏการณ์ของแสงที่ต้องการอธิบาย เช่น การอธิบายการสะท้อนและการหักเหของแสงต้องพิจารณาว่าแสงเป็นคลื่นและใช้ทฤษฎีคลื่นของแสงอธิบาย แต่การอธิบายปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกต้องพิจารณาให้แสงเป็นโฟตอนจึงจะอธิบายได้ถูกต้องสมบูรณ์ ในปัจจุบันเป็นที่ยอมรับกันว่าแสงมีสมบัติคู่ (Dual properties) คือ แสงเป็นได้ทั้งคลื่นและอนุภาคในเวลาเดียวกัน แต่ในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะปรากฏการณ์ที่อธิบายได้โดยแนวคิดที่ว่าแสงเป็นคลื่นเท่านั้น

## 2.3 การสะท้อนของแสง (Reflection)

### 2.3.1 กระจกเงาระนาบ (Mirror)

เมื่อมีวัตถุอยู่หน้ากระจกเงาระนาบจะมีรังสีของแสงกระจายออกจากวัตถุไปตกที่ผิวกระจกด้วยมุมตกกระทบที่มีค่าต่าง ๆ กันเป็นจำนวนมาก จึงมีรังสีสะท้อนออกจากผิวกระจกในทิศทางทำมุมสะท้อนต่าง ๆ กันเป็นจำนวนมากเช่นเดียวกัน และเป็นไปตามกฎการสะท้อนของแสง พิจารณารังสีที่มีทิศทำมุมตกที่ผิวกระจกเป็นมุมตก  $\theta$  แล้วสะท้อนทำมุม  $\theta$  กับผิวกระจกเข้าสู่ตา รังสีที่เข้าสู่ตาเป็นแสงจริง โดยผู้สังเกตจะมีความรู้สึกรังสีว่าแสงจริงนี้มีทิศทางมาจากเบื้องหลังกระจกดังภาพที่ 2.1 (ก) ที่แสดงด้วยเส้นประจะเรียกว่า แสงเสมือน ถ้าพิจารณารังสีสองรังสีที่ออกจากจุดหนึ่งของวัตถุไปตกลงบนผิวกระจกคนละจุด ดังภาพที่ 2.1 (ข) ก็จะมีรังสีสะท้อนสองรังสีเข้าสู่ตา เมื่อต่อแนวรังสีสะท้อนทั้งสองรังสีไปทางเบื้องหลังกระจกรังสีที่ต่อออกไปนี้เป็นแสงเสมือนที่จะไปตัดกันที่จุด ๆ หนึ่งเบื้องหลังกระจก และจะเกิดภาพของจุดบนวัตถุขึ้นที่จุดตัดนี้ ในทำนองเดียวกันรังสีอื่น ๆ จากจุดเดียวกันของวัตถุเมื่อไปตกบนกระจกก็จะมีแสงเสมือนของมันไปตัดกันที่จุดเกิดภาพหลัง

กระจกจุดเดียวกันนี้เช่นกันทุกรังสี ภาพที่เกิดขึ้นเบื้องหลังกระจกนี้ เรียกว่า ภาพเสมือน (Virtual image) เพราะเกิดจากแสงเสมือนไปตัดกันทำให้เกิดภาพเสมือนที่จุดตัดนี้



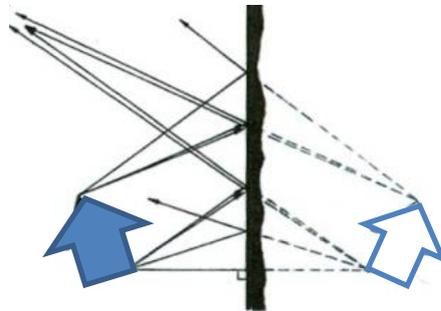
(ก) รังสีตามกฎการสะท้อนแสง

(ข) รังสีที่ทำให้เกิดภาพ

ภาพที่ 2.1 ทางเดินของรังสีที่ทำให้เกิดภาพเสมือนหลังกระจกเงาระนาบ

สำหรับจุดอื่น ๆ ของวัตถุก็จะมีรังสีจำนวนมากออกจากจุดนั้น ไปตกบนผิวกระจก ทำให้เกิดภาพเสมือนของจุดนั้นหลังกระจก จุดภาพเหล่านั้นจะเรียงต่อกันไปจนกลายเป็นภาพเสมือนของวัตถุอยู่หลังกระจก และเนื่องจากลักษณะการเกิดภาพของแต่ละจุดของวัตถุจะเป็นไปในลักษณะที่คล้ายกันทุกจุด ดังนั้นการเขียนเส้นแสดงทางเดินของรังสีที่ออกไปจากจุดใดจุดหนึ่งบนวัตถุเพียงสองรังสีไปสะท้อนที่กระจกจนเกิดรังสีเสมือนไปตัดกันเกิดภาพเสมือนของจุดนั้น ๆ หลังกระจก ก็จะสามารถหาดำแหน่งภาพของจุดอื่น ๆ บนวัตถุได้

จุดที่สายตาเรามองเห็น



ภาพที่ 2.2 ทางเดินของรังสีที่ทำให้เกิดภาพเสมือนหลังกระจกเงาระนาบ

สำหรับภาพที่ 2.2 รังสีตกจากจุดบนและจุดล่างของวัตถุไปตกที่ผิวกระจกเงาระนาบแล้วสะท้อนออกไปจากกระจก โดยรังสีสะท้อนที่ออกมาจากจุดเดียวกันบนวัตถุจะเป็นรังสีที่ปล่อยออกจากกันไม่สามารถไปตัดกันได้จริง ดังนั้นการหาจุดตัดกันของรังสีสะท้อนต้องต่อแนวรังสีสะท้อนย้อนกลับที่เสมือนว่าไปตัดกันหลังกระจก และเกิดภาพเสมือนที่จุดตัดหลังกระจกนี้ โดยรังสีสะท้อนที่มาจากจุดด้านบนของวัตถุจะเสมือนว่าไปตัดกันเกิดภาพด้านบนของวัตถุขึ้นหลังกระจก รังสีสะท้อนนี้เมื่อเข้าสู่ตาผู้สังเกตก็จะทำให้ตามองเห็นภาพของจุดด้านบนของวัตถุในกระจก ในทำนองเดียวกันรังสีที่สะท้อนมาจากจุดด้านล่างของวัตถุจะเสมือนว่าไปตัดกันเกิดภาพที่จุดด้านล่างของวัตถุขึ้นที่หลังกระจก เมื่อรังสีสะท้อนนี้เข้าสู่ตาผู้สังเกตก็จะทำให้ตามองเห็นภาพจุดด้านล่างของวัตถุ

ในกระจก และเห็นว่าภาพจุดด้านล่างของวัตถุจะอยู่ด้านซ้ายขณะที่จุดด้านล่างของวัตถุที่เป็นจุดทำให้เกิดภาพนี้เป็นจุดล่างด้านขวาของวัตถุ ส่วนจุดอื่นบนวัตถุก็จะเกิดภาพในทำนองเดียวกันกับภาพที่ 2.3 ภาพมือหน้ากระจกเงาระนาบจะเกิดภาพเสมือนในกระจกมีลักษณะกลับทิศซ้ายขวายู่ในกระจก

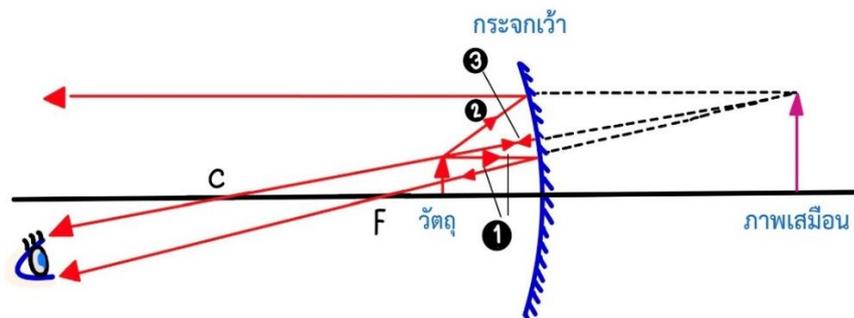


ภาพที่ 2.3 ลักษณะภาพหลังกระจกเงาระนาบที่กลับทิศซ้ายขวากับวัตถุ

### 2.3.2 กระจกเว้า (Concave mirror)

ภาพที่เกิดจากกระจกเว้าจะเกิดได้ 3 ลักษณะตามตำแหน่งของวัตถุที่อยู่หน้ากระจก

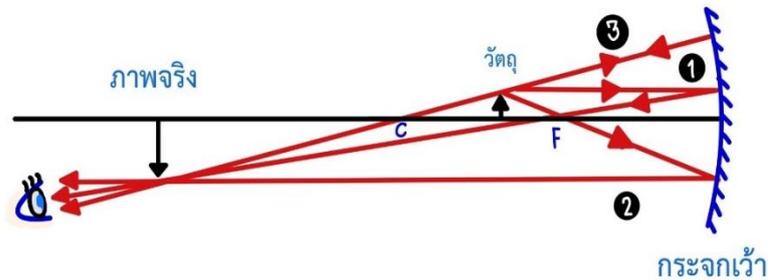
1. เมื่อวัตถุอยู่ระหว่างกระจกกับจุดโฟกัสดังภาพที่ 2.4 จะได้ภาพเสมือนหัวตั้งขนาดขยาย จึงนิยมใช้ทำกระจกส่องหน้า ถ้าวัตถุอยู่ชิดกระจกให้ขนาดภาพเท่ากับขนาดวัตถุ เมื่อวางวัตถุไว้ที่ตำแหน่ง  $c$  จะเกิดภาพที่ระยะอนันต์ เส้นหมายเลข ❶ เป็นรังสีตกที่ขนานกับแกนमुखสำคัญแล้วสะท้อนผ่านจุดโฟกัส เส้นหมายเลข ❷ เป็นรังสีตกที่มีแนวผ่านจุดโฟกัสแล้วสะท้อนขนานกับแกนमुखสำคัญ เส้นหมายเลข ❸ เป็นรังสีตกที่มีแนวผ่านจุดศูนย์กลางความโค้งแล้วสะท้อนกลับสวนทิศกับรังสีตก แนวรังสีสะท้อนทั้งสามเสมือนว่าไปตัดกันจนเกิดภาพเสมือนหลังกระจก



ภาพที่ 2.4 วัตถุอยู่ระหว่างกระจกเว้ากับจุดโฟกัสของกระจก

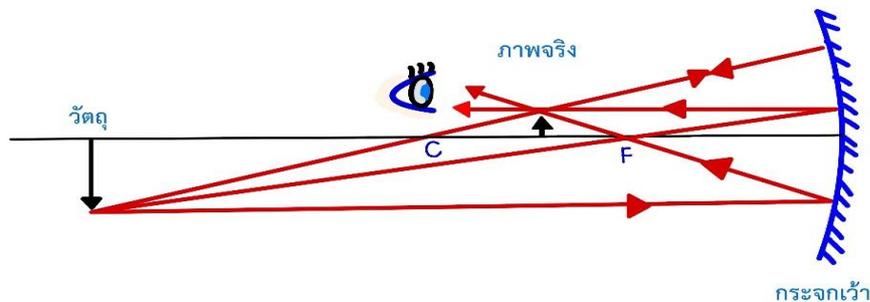
2. เมื่อวัตถุอยู่ระหว่างจุดโฟกัสกับจุดศูนย์กลางความโค้งดังภาพที่ 2.5 จะได้ภาพจริงหัวกลับขนาดขยายอยู่หน้ากระจก ถ้าวัตถุอยู่ที่จุดศูนย์กลางความโค้งขนาดภาพจะเท่ากับขนาดวัตถุ

การเขียนเส้นแสดงทางเดินของรังสีตกและรังสีสะท้อนเพื่อหาคำแหน่งเกิดภาพจะเหมือนกันกับข้อ 1 แต่รังสีสะท้อนจะไปตัดกันจริงหน้ากระจก



ภาพที่ 2.5 วัตถุอยู่ระหว่างจุดโฟกัสกับจุดศูนย์กลางความโค้งของกระจกเว้า

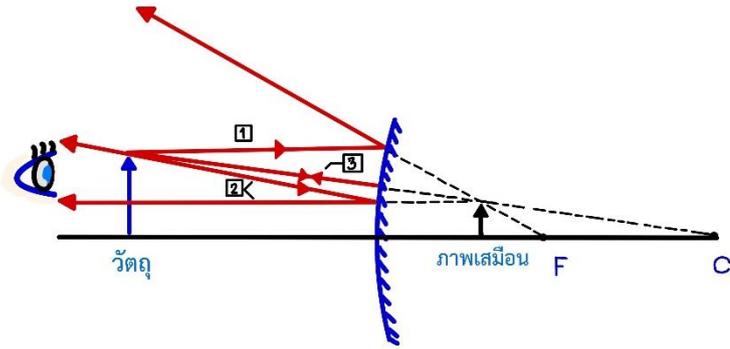
3. เมื่อวัตถุอยู่ไกลออกไปจากจุดศูนย์กลางความโค้งของกระจกจะเกิดภาพจริงหัวกลับ ขนาดย่ออยู่หน้ากระจกดังภาพที่ 2.6 และถ้าวัตถุอยู่ที่ระยะอนันต์จะเกิดภาพจริงขนาดเล็กมากที่จุดโฟกัสของกระจก จึงใช้กระจกเว้าเป็นกระจกใกล้วัตถุ (Objective mirror) หรือกระจกปฐมภูมิ (Primary mirror) ของกล้องโทรทรรศน์ชนิดหักเหแสง (Refracting telescope) หรือกล้องโทรทรรศน์ชนิดผสม (Catadioptric telescope) เพื่อสร้างภาพของดวงดาวหรือวัตถุอื่นในท้องฟ้า ขึ้นที่จุดโฟกัสของกระจก แล้วใช้เลนส์ใกล้ตา (Eyepiece lens) ขยายภาพที่จุดโฟกัสให้มีขนาดใหญ่มากขึ้น



ภาพที่ 2.6 ภาพที่เกิดจากวัตถุที่อยู่ระหว่างจุดศูนย์กลางของความโค้ง

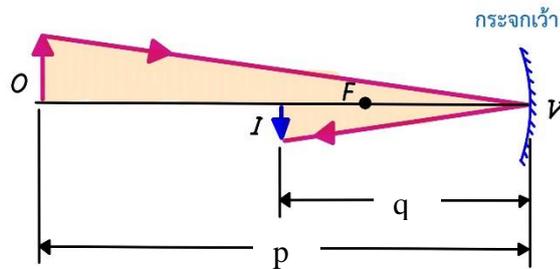
### 2.3.3 กระจกนูน (Convex mirror)

เมื่อวัตถุอยู่หน้ากระจกนูน การเขียนแนวรังสีตกทั้งสามกรณีเช่นเดียวกับกระจกเว้า จะได้แนวรังสีสะท้อนเสมือนว่าไปตัดกัน เกิดภาพเสมือนหัวตั้งขนาดย่อข้างหลังกระจก ถ้าวัตถุอยู่ชิดกระจกจะได้ภาพเสมือนขนาดเท่าวัตถุอยู่ชิดกระจกเช่นกัน และถ้าวัตถุอยู่ระยะอนันต์จากกระจกจะได้ภาพเสมือนเป็นจุดอยู่ที่จุดโฟกัสของกระจก จะเห็นได้ว่าภาพที่เกิดจากกระจกนูนจะเป็นภาพเสมือนหลังกระจกได้กรณีเดียวเท่านั้น และสามารถเลือกเขียนแนวรังสีตกเพียงสองแนวก็เพียงพอที่จะหาคำแหน่งเกิดภาพได้เช่นเดียวกับกระจกเว้า การเกิดภาพของกระจกนูนเป็นไปตามภาพที่

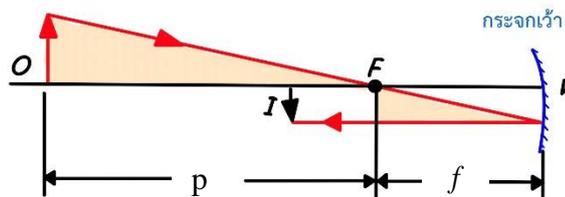


ภาพที่ 2.7 ภาพที่เกิดจากวัตถุอยู่หน้ากระจกนูน

ความสัมพันธ์ของความยาวโฟกัส ระยะวัตถุ และระยะภาพของกระจกโค้ง ถ้าวัตถุ  $O$  อยู่ห่างจากกระจกเว้ามากกว่ารัศมีความโค้งของกระจกจะทำให้เกิดภาพจริงหัวกลับ  $I$  ดังภาพที่ 2.7 เมื่อสร้างสามเหลี่ยมคล้ายสองคู่โดยมีชน แตมตมุ  $O$  และภาพ  $I$  เป็นฐานของสามเหลี่ยม



(ก)



(ข)

ภาพที่ 2.8 สามเหลี่ยมคล้ายที่เรงาเกิดจากวัตถุและภาพของกระจกเว้า

จากสามเหลี่ยมคล้ายในภาพที่ 2.8 (ข) จะได้

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q} \quad (2-1)$$

สำหรับกำลังขยายภาพ  $m$  หมายถึง อัตราส่วนระหว่างขนาดภาพต่อขนาดวัตถุหรือระยะภาพต่อระยะวัตถุ ดังนี้

$$m = \frac{I}{O} = \frac{q}{p} \quad (2-2)$$

เมื่อ	f	แทน ความยาวโฟกัสของกระจก
	p	แทน ระยะวัตถุ
	q	แทน ระยะภาพ
	O	แทน ขนาดวัตถุ
	I	แทน ขนาดภาพ
	m	แทน กำลังขยายภาพ

โดยกำหนดให้ขนาดของภาพเสมือนหรือระยะภาพเสมือนมีเครื่องหมายเป็นลบ ขนาดภาพจริงหรือระยะภาพจริงมีเครื่องหมายเป็นบวก ดังนั้นถ้ากำลังขยายภาพ m มีเครื่องหมายลบ แสดงว่าเกิดภาพเสมือนหัวตั้ง ถ้า m มีเครื่องหมายบวกแสดงว่าเกิดภาพจริงหัวกลับ ถ้า m มากกว่า 1 จะเป็นภาพขนาดขยาย ถ้า m เท่ากับ 1 ขนาดภาพเท่ากับขนาดวัตถุ และถ้า m น้อยกว่า 1 จะเป็นภาพขนาดย่อ

**ตัวอย่างที่ 2.1** วัตถุสูง 10 เซนติเมตร อยู่หน้ากระจกนูน รัศมีความโค้ง 20 เซนติเมตร เกิดภาพห่างจากกระจก 2 เซนติเมตร จงหาตำแหน่งวัตถุ กำลังขยายภาพและขนาดภาพ

**วิธีทำ**

ให้	ตำแหน่ง	O	=	10 เซนติเมตร
	ตำแหน่ง	R	=	-20 เซนติเมตร
หรือ ความยาวโฟกัส	f	=	$\frac{-R}{2} = \frac{-20 \text{ cm}}{2} = -10$	เซนติเมตร
และ	q	=	-2	เซนติเมตร
	$\frac{1}{f}$	=	$\frac{1}{p} + \frac{1}{q}$	
	$\frac{1}{-10 \text{ cm}}$	=	$\frac{1}{p} - \frac{1}{2 \text{ cm}}$	
จะได้	p	=	2.5	เซนติเมตร
ตำแหน่งวัตถุ				2.5 เซนติเมตร
จาก	m	=	$\frac{q}{p} = -\frac{2 \text{ cm}}{2.5 \text{ cm}} = -0.8$	
กำลังขยายภาพลดลง				0.8 เท่า
และ	m	=	$\frac{I}{O}$	
	-0.8	=	$\frac{I}{10}$	
	I	=	-8	เซนติเมตร

**คำตอบ** ดังนั้นจะได้ว่า ขนาดภาพลดลง 8 เซนติเมตร

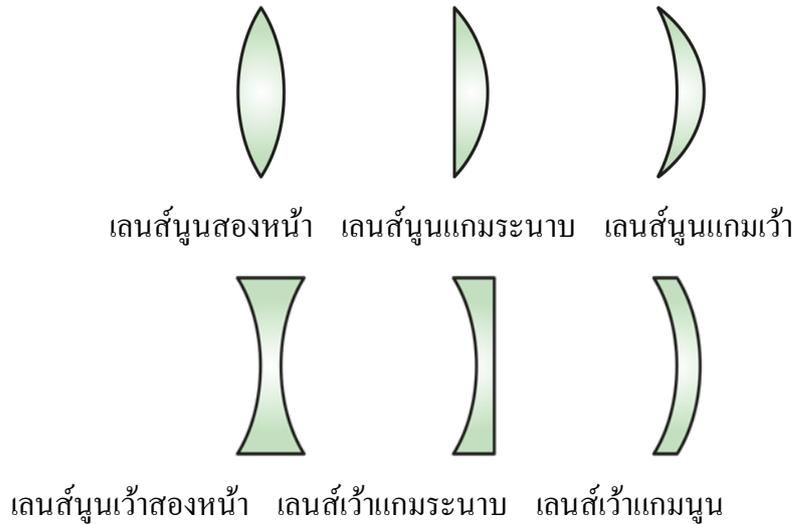
ตัวอย่างที่ 2.2 ใช้กระจกเว้าความยาวโฟกัส 0.75 เซนติเมตร ต่อดูพื้นผิหนึ่ง เห็นภาพพื้นใน กระจกห่างจากกระจก 1.5 เซนติเมตร จงหาระยะห่างจากพื้นผิหนึ่งถึงกระจกและกำลังขยายภาพ

วิธีทำ	ให้	$f$	=	0.75	เซนติเมตร
		$q$	=	-1.5	เซนติเมตร
	จาก	$\frac{1}{f}$	=	$\frac{1}{p} + \frac{1}{q}$	
		$\frac{1}{0.75 \text{ cm}}$	=	$\frac{1}{p} - \frac{1}{1.5 \text{ cm}}$	
		$\frac{1}{p}$	=	$\frac{1}{0.75 \text{ cm}} + \frac{1}{1.5 \text{ cm}} = \frac{3}{1.5}$	
	จะได้	$p$	=	0.5	เซนติเมตร
		ระยะห่างจากพื้นถึงกระจก 0.5 เซนติเมตร			
	จาก	$m$	=	$\frac{q}{p} = -\frac{1.5 \text{ cm}}{0.5 \text{ cm}} = -3$	

**คำตอบ** ดังนั้นจะได้กำลังขยายภาพลดลง 3 เท่า

## 2.4 ภาพที่เกิดจากการหักเหของแสง

เลนส์ (Lens) เป็นอุปกรณ์ทัศนศาสตร์ที่อาศัยการหักเหของแสงในการเปลี่ยนเส้นทางของแสงทำให้เกิดภาพชนิดต่าง ๆ เลนส์แบ่งออกเป็นสองประเภทใหญ่ คือ เลนส์นูน (Convex lens) และเลนส์เว้า (Concave lens) ดังแสดงในภาพที่ 2.9 นิยามของคำต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณภาพจากกระจก เช่น ระยะวัตถุ ระยะภาพ ความยาวโฟกัส รัศมีความโค้ง เป็นต้น ยังคงใช้ได้กับการคำนวณเรื่องเลนส์เช่นเดียวกัน ทั้งนี้เพราะเลนส์มีหน้าที่ในการรวมแสง (กระจายแสง) เช่นเดียวกับกระจกเว้า (กระจกนูน) จุดที่แตกต่างกันระหว่างเลนส์กับกระจกในกรณีของเลนส์ แสงจะหักเหผ่านเลนส์ไปยังด้านตรงข้ามกับด้านที่วัตถุอยู่ ส่วนกรณีของกระจก แสงที่ตกกระทบกับกระจกจะสะท้อนกลับไปยังด้านที่วัตถุอยู่เท่านั้น

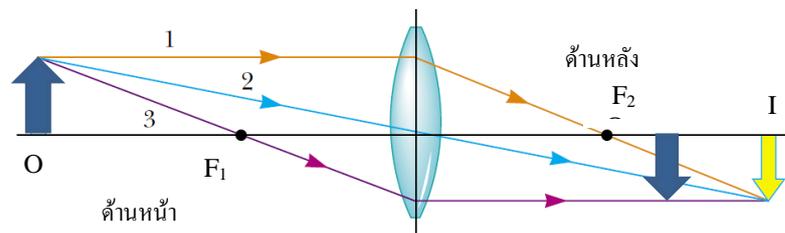


ภาพที่ 2.9 เลนส์นูนและเลนส์เว้า

โดยจะถือว่าเลนส์ที่กำลังจะพิจารณาทั้งหมดเป็นเลนส์บาง (Thin lens) ทำให้การวิเคราะห์ภาพที่เกิดจากเลนส์มีความง่ายขึ้น ดังต่อไปนี้

#### 2.4.1 เลนส์นูน (Convex lens)

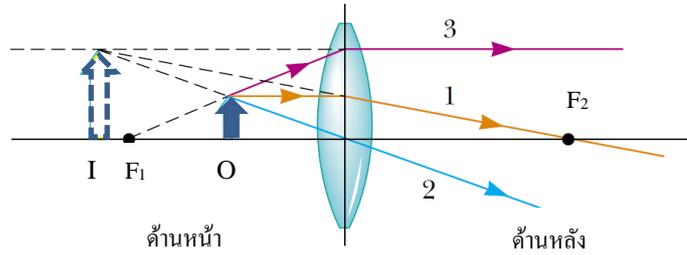
การหาตำแหน่งของภาพที่เกิดจากเลนส์นูนจะเป็นไปในลักษณะเดียวกับการพิจารณากระจกโค้งโดยพิจารณารังสีแสงที่สะดวกต่อการวิเคราะห์ ภาพที่ 2.10 แสดงรังสีแสงที่สามารถเข้าใจได้ง่ายสามเส้น โดยรังสีแสงหมายเลข 1 เป็นรังสีที่เดินทางตกกระทบกับเลนส์ในทิศทางขนานกับแกนหลัก กรณีนี้แสงที่หักเหผ่านเลนส์จะเดินทางผ่านจุดโฟกัสที่อยู่อีกด้านหนึ่งของเลนส์ ( $F_2$ ) ในทำนองเดียวกัน รังสีแสงหมายเลข 3 ที่เดินทางผ่านจุดโฟกัสด้านหน้าเลนส์ ( $F_1$ ) แสงที่หักเหออกจากเลนส์เดินทางขนานกันแกนหลัก



ภาพที่ 2.10 การวาดเส้นรังสีเพื่อหาตำแหน่งและชนิดของภาพจากเลนส์นูน

สำหรับรังสีแสงหมายเลข 2 ที่เดินทางผ่านใจกลางเลนส์ ซึ่งที่จุดนี้ระนาบของเลนส์มีทิศตั้งฉากกับแกนหลัก นั่นคือแสงที่เดินทางออกมาจากเลนส์จะอยู่ในแนวเดิม เพราะฉะนั้นรังสีแสงที่ผ่านใจกลางเลนส์จึงมีลักษณะเป็นเส้นตรงดังภาพ จุดที่รังสีแสงทั้ง 3 ตัดกันจะเป็นตำแหน่งของภาพ

ที่เกิดขึ้น ในกรณีของภาพที่ 2.11 ภาพที่ได้จึงเป็นภาพจริง (รังสีแสงตัดกันจริง) อยู่ที่ด้านหลังของเลนส์ และสามารถรับภาพด้วยฉากได้

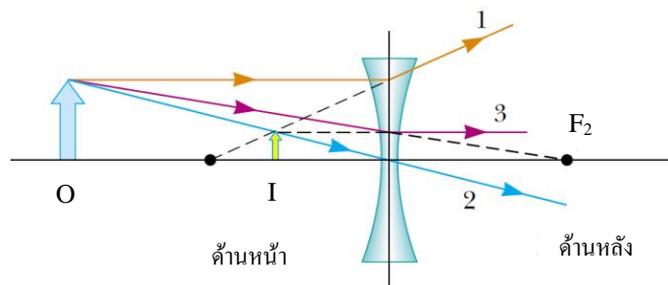


ภาพที่ 2.11 เส้นรังสีเพื่อหาดำแหน่งและชนิดของภาพจากเลนส์นูนเมื่อวัตถุอยู่ภายในระยะความยาวโฟกัสของเลนส์

หากพิจารณากรณีเมื่อวัตถุอยู่ห่างจากเลนส์โดยมีระยะวัตถุน้อยกว่าความยาวโฟกัสของเลนส์ จะเห็นได้ว่ารังสีของแสงไม่ตัดกันจริง แต่สามารถลากให้มาตัดกันได้ทางด้านหน้าเลนส์ เพราะฉะนั้นภาพที่ได้ในกรณีนี้เป็นภาพเสมือนอยู่ด้านหน้าเลนส์

#### 2.4.2 เลนส์เว้า (Concave lens)

การวิเคราะห์ภาพที่เกิดจากเลนส์เว้าสามารถทำได้ในทำนองเดียวกัน ภาพที่ 2.12 เป็นแผนภาพการใช้รังสีแสงเพื่อหาดำแหน่งภาพที่เกิดจากเลนส์เว้า เนื่องจากรังสีแสงไม่ตัดกันจริง ภาพที่ได้ในกรณีนี้จะเป็นภาพเสมือน (หัวตั้ง) อยู่ด้านหน้าเลนส์ ถ้าทดลองหาดำแหน่งของภาพของวัตถุที่ตำแหน่งต่าง ๆ ที่เกิดจากเลนส์เว้าจะพบว่าภาพที่ได้จะเป็นภาพเสมือนเสมอเพราะเลนส์เว้าทำหน้าที่กระจายแสงเพราะฉะนั้นแสงที่ผ่านเลนส์เว้าไปยังอีกด้านหนึ่งย่อมไม่สามารถที่จะมาตัดกันได้จริง



ภาพที่ 2.12 การวาดเส้นรังสีเพื่อหาดำแหน่งและชนิดของภาพจากเลนส์เว้า

ในการวาดเส้นรังสีเพื่อหาดำแหน่งและชนิดของภาพจากเลนส์เว้าและเลนส์นูนนั้นจะไม่สะดวก โดยเฉพาะถ้าต้องการค่าที่แน่นอน สามารถทำได้โดยใช้สมการของเลนส์บาง ซึ่งเป็นสมการเดียวกันกับสมการกระจก (2-1) และ (2-2)

โดยในการใช้สมการนี้ ความยาวโฟกัส( $f$ ) จะเป็นบวกสำหรับเลนส์นูนและเป็นลบสำหรับเลนส์เว้า ระยะวัตถุ( $p$ )เป็นบวกเมื่อวัตถุอยู่หน้าเลนส์และเป็นลบเมื่อวัตถุอยู่หลังเลนส์ ระยะภาพ( $q$ )เป็นบวกเมื่อภาพที่ได้อยู่หลังเลนส์ (หรือเป็นภาพจริง) และเป็นลบเมื่อภาพที่ได้อยู่หน้าเลนส์ (หรือเป็นภาพเสมือน) ส่วนกำลังขยายก็สามารถได้จากสมการ (2-2) เช่นเดียวกับในกรณีของกระจก

**ตัวอย่างที่ 2.3** วัตถุมีความสูง 2 เซนติเมตร วางที่ตำแหน่ง 24 เซนติเมตร ห่างจากเลนส์นูนที่มีความยาวโฟกัส 8 เซนติเมตร จงหา

(ก) ตำแหน่งและชนิดของภาพ

(ข) ความสูงของภาพ

**วิธีทำ**

$$\begin{aligned} \text{(ก)} \quad \frac{1}{q} &= \frac{1}{f} - \frac{1}{p} = \frac{1}{8 \text{ cm}} - \frac{1}{24 \text{ cm}} \\ &= \frac{1}{12} \text{ cm} \\ q &= 12 \text{ cm} \end{aligned}$$

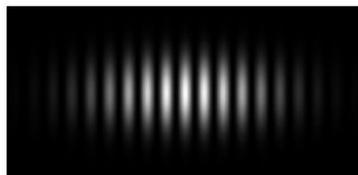
**คำตอบ** ดังนั้นภาพเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 12 เซนติเมตรจากเลนส์เป็นภาพจริง

$$\begin{aligned} \text{(ข)} \quad \frac{I}{O} &= \frac{q}{p} = \frac{12 \text{ cm}}{24 \text{ cm}} \\ 0 &= 1 \text{ cm} \end{aligned}$$

**คำตอบ** ดังนั้นความสูงของภาพ 1 เซนติเมตร

## 2.5 การแทรกสอดของแสง (Interference)

เมื่อแสงสีเดียว (Monochromatic light) ตกกระทบสลิตคู่ (หรือช่องแคบคู่) ที่ความกว้างของช่องแต่ละช่องและระยะห่างระหว่างช่องมีค่าใกล้เคียงกับความยาวคลื่นของแสง ช่องแคบแต่ละช่องจะทำหน้าที่เหมือนเป็นจุดกำเนิดคลื่นให้คลื่น 2 ขบวน ที่มีความยาวคลื่นและแอมพลิจูดเท่ากันเคลื่อนไปรวมกันหรือเกิดการแทรกสอดกันบนฉาก เกิดเป็นริ้วมืด-สว่างสลับกันบนฉาก ดังภาพที่ 2.13



**ภาพที่ 2.13** ริ้วการแทรกสอดจากสลิตคู่ของแสงที่มีความยาวคลื่นค่าเดียว

ถ้ารู้ระยะห่างระหว่างช่องแคบบนสลิตคู่ ( $d$ ) ระยะจากสลิตคู่ถึงฉาก ( $D$ ) และระยะห่างจากรี้วสว่างกลาง ( $x$ ) ของรี้วสว่างที่  $n$  จะคำนวณหาความยาวคลื่นของแสง ( $\lambda$ ) ได้จาก

$$d \sin \theta = n \lambda$$

เนื่องจากระยะ  $d$  และระยะ  $x$  มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับระยะระหว่างฉากกับช่องเล็กน้อย  $D$  ดังนั้น

$\theta$  จะเป็นมุมที่เล็กมาก

$$\sin \theta \approx \tan \theta = \frac{x}{D}$$

$$d \left( \frac{x}{D} \right) = n \lambda$$

ดังนั้นจะหาความยาวคลื่นของแสงได้จากสมการ

$$\lambda = \frac{dx}{nD} \quad (2-3)$$

**ตัวอย่างที่ 2.4** เมื่อแสงความยาวคลื่นค่าหนึ่งตกกระทบบนสลิตคู่ที่มีระยะห่างระหว่างช่องแคบเท่ากับ  $0.2 \text{ mm}$  และอยู่ห่างจากฉาก  $1 \text{ m}$  ถ้ารี้วสว่างที่ 4 ของรี้วการแทรกสอดของแสงบนฉากอยู่ห่างจากรี้วสว่างกลาง  $9.76 \text{ mm}$  จงหาความยาวคลื่นของแสง

วิธีทำ จาก

$$\lambda = \frac{dx}{nD}$$

จะได้

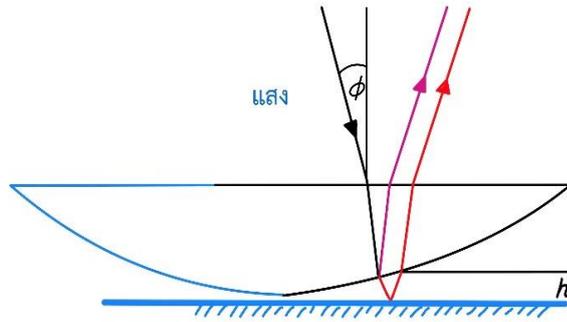
$$\lambda = \frac{(0.200)(9.76)}{(4)(1,000)} \text{ mm}$$

$$= 4.88 \times 10^{-4} \text{ mm}$$

$$= 488 \times 10^{-9} \text{ m}$$

**คำตอบ** ดังนั้นความยาวคลื่นของแสงจึงมีค่าเป็น  $488 \text{ นาโนเมตร}$

เมื่อแสงส่องกระทบบนฟิล์มบาง เช่น ฟองสบู่ หรือน้ำมันบนผิวน้ำ แสงส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับจากผิวนบนของฟิล์มบาง แสงอีกส่วนหนึ่งจะหักเหผ่านผิวนบนของฟิล์มบางไปตกกระทบบนและสะท้อนกลับที่ผิวด้านล่างของฟิล์มบางแล้วหักเหผ่านผิวนบนของฟิล์มบางออกไป แสงทั้งสองส่วนนี้จะแทรกสอดกันเกิดเป็นรี้วการแทรกสอดขึ้นบนฟิล์มบาง ถ้าแสงที่กระทบบนฟิล์มบางเป็นแสงขาวซึ่งมีองค์ประกอบหลายสี ความยาวคลื่นหลายค่า จะทำให้รี้วการแทรกสอดมีสีสันทองแดงเหมือนเกิดรุ้งขึ้นบนฟิล์มบาง เมื่อนำเลนส์นูนมาวางบนแผ่นแก้วผิวราบจะเกิดฟิล์มบางของอากาศที่มีความหนาไม่เท่ากันระหว่างผิวเลนส์และแผ่นแก้ว แต่ฟิล์มบางของอากาศนี้จะมีสมมาตรรอบจุดสัมผัสของผิวเลนส์กับแผ่นแก้ว เมื่อส่องแสงความยาวคลื่นค่าเดียวลงไป แสงที่สะท้อนกลับที่ผิวด้านล่างของเลนส์นูนกับแสงที่สะท้อนกลับจากผิวแผ่นแก้ว ดังภาพที่ 2.14 ซึ่งแสดงภาพทางเดินของแสงสำหรับเกิดการแทรกสอดกันเป็นรี้วของการแทรกสอดรูปวงกลมซ้อนร่วมจุดศูนย์กลางกัน ซึ่งเรียกว่า วงแหวนของนิวตัน (Newton's ring)

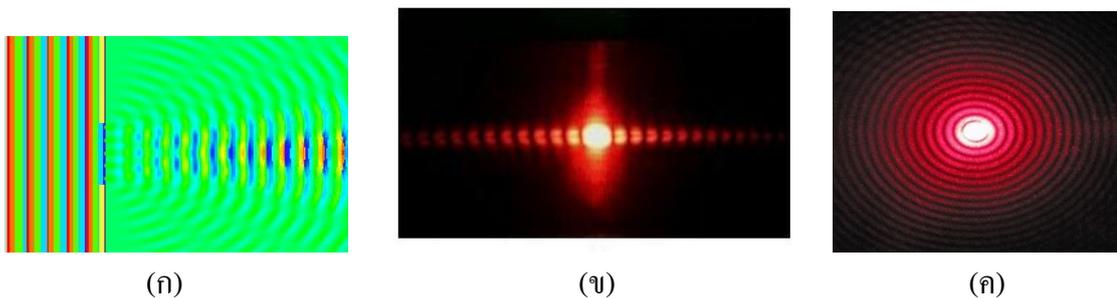


ภาพที่ 2.14 ภาพทางเดินของแสงการเกิดวงแหวนของนิวตัน

การเกิดวงแหวนของนิวตันนำไปใช้ประโยชน์ในการทดสอบความถูกต้องของผิวโค้งของแก้วที่ฝนทำเลนส์ ถ้าเป็นเลนส์นูนให้นำไปประกบกับผิวแก้วมาตรฐานที่เป็นผิวโค้งเว้า ถ้าผิวโค้งของแก้วที่ฝนทำเลนส์ยังไม่ได้มาตรฐานจะประกบกันไม่สนิท มีฟิล์มบางของอากาศอยู่ระหว่างผิวแก้ว เมื่อส่องแสงลงไปจะเกิดวงแหวนของนิวตันขึ้นถ้าผิวโค้งของแก้วที่ฝนทำเลนส์ได้มาตรฐานแล้วจะประกบกันสนิทเมื่อส่องแสงลงไปจะเห็นผิวแก้วมืดไปหมด (ไม่เกิดวงแหวนของนิวตัน)

## 2.6 การเลี้ยวเบนของแสง (Diffraction)

เมื่อแสงความยาวคลื่นค่าเดียวตกกระทบสลิตเดี่ยว หรือช่องแคบเดี่ยวที่มีความกว้างใกล้เคียงกับความยาวคลื่นของแสง ดังภาพที่ 2.15 (ก) แสงจะเลี้ยวเบนผ่านขอบของสลิตไปได้ โดยขอบของสลิตแต่ละข้างจะทำหน้าที่เหมือนเป็นจุดกำเนิดคลื่นให้คลื่น 2 ขบวน ที่มีความยาวคลื่นและแอมพลิจูดเท่ากัน เคลื่อนไปรวมกันหรือเกิดการแทรกสอดกันบนฉาก เกิดเป็นริ้วมืด-สว่างสลับกันบนฉาก ดังภาพที่ 2.15 (ข) ผลทำนองเดียวกันเกิดขึ้นเมื่อแสงความยาวคลื่นค่าเดียวเคลื่อนผ่านช่องเปิดกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางใกล้เคียงกับความยาวคลื่นของแสง ดังภาพที่ 2.15 (ค)



ภาพที่ 2.15 การเลี้ยวเบนของแสง ก) แสงเลี้ยวเบนผ่านสลิต ข) ภาพบนฉากการเกิดริ้วมืด-สว่าง ค) แสงที่ผ่านช่องเปิดวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลางใกล้เคียงกับความยาวคลื่นแสง  
ที่มา: Jon, R., ออน ไลน์. เข้าถึงเมื่อ 25 กุมภาพันธ์ 2563. จาก

<https://jonrista.com/2013/03/24/the-diffraction-myth>

จากภาพที่ 2.15 สังเกตว่าริ้วสว่างกลางของริ้วการเลี้ยวเบนจากสลิตเดี่ยวมีความกว้างประมาณ 2 เท่า ของริ้วสว่างอื่นและสว่างกว่ามาก โดยความสว่างจะค่อยๆ ลดลงเมื่ออยู่ห่างจากริ้วสว่างกลางออกไป นอกจากการหาความยาวคลื่นของแสงนอกจากใช้สลิตคู่แล้ว ยังมีอุปกรณ์ทางแสงอีกอย่างหนึ่งที่ใช้หาความยาวคลื่นของแสงได้คือ **เกรตติง (Grating)** เกรตติงเป็นแผ่นแก้วหรือพลาสติกที่ประกอบด้วยช่องเล็กๆ จำนวนมากนับร้อยช่องในระยะ 1 มิลลิเมตร ถ้าฉายต้นกำเนิดแสงผ่านเกรตติง แสงจะเลี้ยวเบนผ่านเกรตติงแล้วเกิดการแทรกสอดกันขึ้นเกิดเป็นจุดสว่างและจุดมืดบนฉาก ภาพที่ 2.16 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทำการทดลองการเลี้ยวเบนผ่านเกรตติง



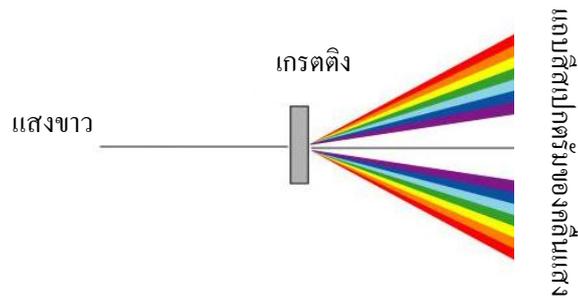
**ภาพที่ 2.16** การใช้เกรตติงในการศึกษาการของแสงเลเซอร์

**ที่มา:** สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, ออนไลน์. เข้าถึงเมื่อ 20 มกราคม 2563 จาก <http://physics.ipst.ac.th/?p=1359>

ถ้ารู้จำนวนช่องต่อหน่วยความยาวของเกรตติง ( $N$ ) ระยะห่างจากเกรตติงถึงฉาก ( $D$ ) และระยะห่างจากจุดสว่างกลาง ( $x$ ) ของจุดสว่างที่  $n$  จะคำนวณหาความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์ได้จากสมการ

$$\lambda = \frac{x}{nDN} \quad (2-4)$$

ในกรณีที่ฉายแสงขาวผ่านเกรตติง แสงขาวเมื่อเลี้ยวเบนผ่านเกรตติงจะกระจายออกเกิดเป็นแถบสีต่างๆ บนฉากยกเว้นแถบกลางจะเป็นแถบสีขาว ดังภาพที่ 2.17



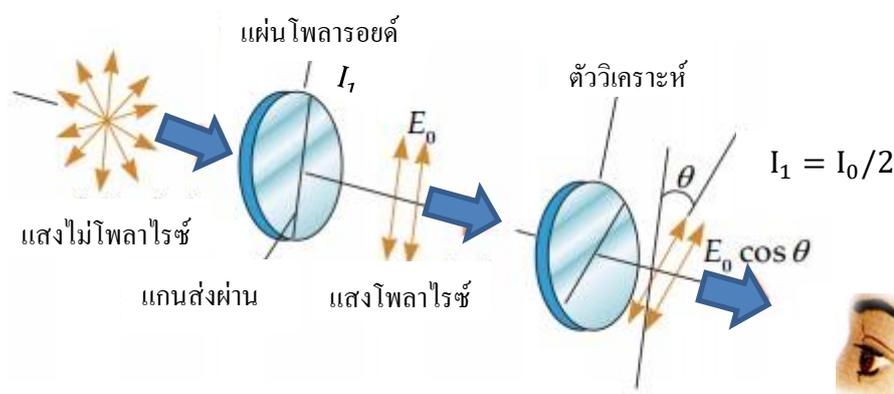
ภาพที่ 2.17 แสงขาวผ่านเกรตติงเกิดการกระจายแสงเป็นแถบสีต่างๆ

ที่มา: R. Nave., ออนไลน์. เข้าถึงเมื่อ 28 กุมภาพันธ์ 2563. จาก <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/grating.html>

## 2.7 การโพลาไรเซชันของแสง (Polarization of light)

โพลาไรเซชัน เป็นปรากฏการณ์ที่แสดงว่าแสงเป็นคลื่นตามขวาง เนื่องจากคลื่นตามยาวจะไม่แสดงปรากฏการณ์นี้ การที่แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและเป็นคลื่นตามขวาง แสงจึงประกอบด้วยสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่สั่นตั้งฉากกันในระนาบที่ตั้งฉากกับทิศการแผ่ของคลื่น ทิศการสั่นของสนามไฟฟ้า กำหนดให้เป็นทิศของโพลาไรเซชัน แสงธรรมดาที่ไม่โพลาไรส์ (unpolarized light) ประกอบด้วยเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าที่สั่นในทุกทิศทาง และอยู่บนระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางการแผ่ของคลื่น แสงโพลาไรส์ (polarized light) จะประกอบด้วยสนามไฟฟ้า ซึ่งสั่นในแนวใดแนวหนึ่งเท่านั้น เช่น ในแนวตั้ง แนวราบ เป็นต้น

การทำให้แสงไม่โพลาไรส์กลายเป็นแสงโพลาไรส์ทำได้หลายวิธี เช่น การให้แสงไม่โพลาไรส์ผ่านแผ่นโพลาไรซ์ แผ่นโพลาไรซ์ 2 แผ่น ซ้อนกัน แสงไม่โพลาไรส์ซึ่งเดิมมีความเข้มเป็น  $I_0$  เมื่อผ่านโพลาไรซ์แผ่นแรกจะมีความเข้มลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของความเข้มของแสงเดิม ถ้าความเข้มของแสงโพลาไรส์ก่อนผ่านแผ่นโพลาไรซ์แผ่นที่ 2 เป็น  $I_1$  (โดย  $I_1 = I_0/2$ ) และแกนส่งผ่านของโพลาไรซ์แผ่นแรกกับแผ่นที่ 2 ทำมุมกันเป็นมุม  $\theta$  ดังภาพที่ 2.18



ภาพที่ 2.18 ความเข้มของแสงโพลาไรซ์เมื่อผ่านแผ่นโพลาไรซ์

ที่มา: โพลาไรเซชัน, ออนไลน์. เข้าถึงเมื่อ 5 มกราคม 2563 จาก

<http://www.rmutphysics.com/charud/pdf-learning/6/physics2/17Polarisation.pdf>

ความเข้มของแสงโพลาไรซ์เมื่อผ่านโพลาไรซ์แผ่นที่ 2 จะมีค่าลดลงเป็น  $I_2$  โดย  $I_2$  สัมพันธ์กับ  $I_1$  และ  $\theta$  ตามสมการ

$$I_2 = I_1 \cos^2\theta \quad (2-5)$$

สมการ (2.5) นี้ เรียกว่า กฎของมาลุส (Malus's law)

ตัวอย่างที่ 2.5 เมื่อมองผ่านแผ่นโพลาไรซ์ 2 แผ่น ที่วางซ้อนกัน ไปยังเทียนไข ถ้าความเข้มแสงของเทียนไขที่มองเห็นมีค่าเป็น 1 ใน 8 ของความเข้มแสงจากเทียนไข มุมระหว่างแกนส่งผ่านของแผ่นโพลาไรซ์ทั้งสองมีค่าเท่าใด

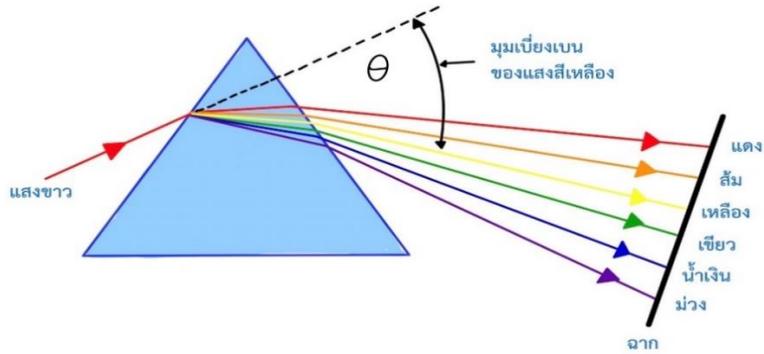
วิธีทำ	จาก	$I_2 = I_1 \cos^2\theta$
	โดยที่ $I_1 = I_0/2$ และ	$I_2 = I_0/8$
	จึงได้	$\frac{I_0}{8} = \frac{I_0}{2} \cos^2\theta$
	และ	$\frac{1}{4} = \cos^2\theta$
	ดังนั้น	$\cos \theta = \frac{1}{2}$
	และ	$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{1}{2}\right) = 60^\circ$

**คำตอบ** ดังนั้นมุมระหว่างแกนส่งผ่านของแผ่นโพลาไรซ์ทั้งสองจึงมีค่าเป็น 60 องศา

## 2.8 ปรากฏการณ์ของแสง (Phenomena of light)

**2.8.1 การกระจายของแสง (Dispersion)** เป็นปรากฏการณ์การแยกตัวออกจากกันของคลื่นแสงที่มีความถี่หรือความยาวคลื่นแตกต่างกัน เมื่อแสงเคลื่อนที่ผ่านผิวรอยต่อของตัวกลางสองชนิดสาเหตุเกิดจากค่าดัชนีหักเหของคลื่นแสงที่มีความถี่หรือความยาวคลื่นต่างกันจะมีค่าไม่เท่ากัน ทำให้มุมหักเหของคลื่นแสงแต่ละความถี่หรือแต่ละความยาวคลื่นมีค่าไม่เท่ากัน เช่น แสงขาวซึ่งประกอบด้วยคลื่นแสงความถี่หรือความยาวคลื่นต่าง ๆ กัน เมื่อหักเหผ่านผิวด้านข้างของปริซึมด้านหนึ่งไปทะลุออกยังผิวด้านตรงกันข้ามจะเกิดการแยกตัวออกเป็นแสงสีต่าง ๆ กันที่เรียกกันว่าแสงสี

รุ้ง โดยสีม่วงจะหักเหมากที่สุดเพราะมีค่าดัชนีหักเหเมื่อผ่านแก้วสูงสุด ส่วนแสงสีแดงจะหักเหออกจากปริซึมน้อยที่สุด เพราะมีค่าดัชนีหักเหเมื่อผ่านแก้วน้อยที่สุด ดังภาพที่ 2.19



ภาพที่ 2.19 การกระจายแสงของแสงขาวเมื่อหักเหผ่านปริซึมได้เป็นแสงสีรุ้ง

รุ้ง เป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่เกิดจากแสงอาทิตย์ส่องผ่านเข้าไปในละอองน้ำในอากาศแล้วเกิดการหักเหและสะท้อนกลับหมดในละอองน้ำ ทำให้เห็นแถบสีสเปกตรัมของแสงสีขาวของแสงอาทิตย์ เป็นปรากฏการณ์หนึ่ง que แสดงให้เห็นถึงการกระจายของแสงที่ชัดเจน รุ้งปฐมภูมิเกิดจากแสงแดดตกกระทบเข้าทางด้านบนของหยดน้ำซึ่งเมื่อแสงแดดตกกระทบหยดน้ำจะเกิดการหักเหหรือกระจายแสงในหยดน้ำแสง แต่ละสีจะเกิดการสะท้อนกลับหมดที่ผิวด้านในของหยดน้ำแล้วแสงแต่ละสีจะเกิดการหักเหออกจากหยดน้ำรุ้งปฐมภูมิจะเกิดการหักเห 2 ครั้งการสะท้อน 1

รุ้งทุติยภูมิเกิดจากแสงแดดตกกระทบเข้าทางด้านล่างของหยดน้ำซึ่งเมื่อแสงแดดตกกระทบหยดน้ำจะเกิดการหักเหหรือการกระจายแสงเป็นสีในหยดน้ำแสงแต่ละสีจะเกิดการสะท้อนกลับหมดครั้งที่ 1 ที่ผิวด้านในและแสงแต่ละสีจะเกิดการสะท้อนกลับหมดครั้งที่ 2 ที่ผิวด้านในแล้วแสงแต่ละสีจะเกิดการหักเหออกจากหยดน้ำรุ้งทุติยภูมิเกิดการหักเห 2 ครั้ง และการสะท้อน 2 ครั้ง การมองเห็นรุ้งปฐมภูมิและรุ้งทุติยภูมิสามารถมองเห็นรุ้งได้ทั้งในเวลาก่อนและหลังฝนตก ดังภาพที่ 2.20



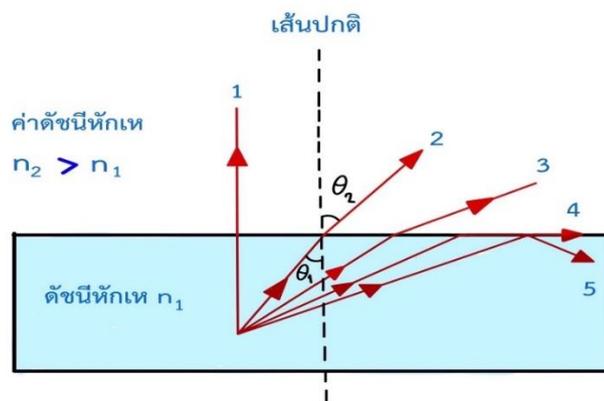
(ก) รุ้งปฐมภูมิ

(ข) รุ้งทุติยภูมิ

ภาพที่ 2.20 ภาพถ่ายจริงของรุ้งปฐมภูมิ และรุ้งทุติยภูมิโดยผู้เขียนเอง

### 2.8.2 การสะท้อนกลับหมด (Total internal reflection)

ในกรณีที่รังสีตกกระทบเดินทางจากตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหสูงสู่ตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหต่ำกว่า มุมหักเหจะโตกว่ามุมตกกระทบ รังสีหักเหจะเบนออกจากเส้นแนวฉาก และจะมีมุมตกกระทบหนึ่งที่ทำให้มุมหักเหเท่ากับ  $90^\circ$  องศา รังสีหักเหจะขนานกับแนวรอยต่อของตัวกลาง มุมตกกระทบที่ทำให้มุมหักเหเท่ากับ  $90^\circ$  องศาเรียกว่า มุมวิกฤต  $\theta_c$  (Critical angle) ถ้ามุมตกกระทบโตกว่ามุมวิกฤต แสงจะไม่สามารถหักเหเข้าสู่ตัวกลางใหม่ได้เลย แต่จะสะท้อนกลับสู่ตัวกลางเดิม ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การสะท้อนกลับหมด เช่น กรณีที่แสงเดินทางจากน้ำหรือแก้วเข้าสู่อากาศ ปรากฏการณ์สะท้อนกลับหมดเป็นดังภาพที่ 2.21



ภาพที่ 2.21 การสะท้อนกลับหมดเมื่อมุมตกในตัวของดัชนีหักเหของตัวกลางที่ไม่เท่ากัน

เมื่อดัชนีหักเหแสง  $n_1$  มากกว่า  $n_2$  วัตถุอยู่ในตัวกลางที่มีดัชนีหักเห  $n_1$  ทำมุมตกที่ผิวรอยต่อของตัวกลางน้อยกว่ามุมวิกฤต  $\theta_c$  รังสีจะหักเหเข้าสู่ตัวกลางดัชนีหักเห  $n_2$  ได้ แต่ถ้ารังสีตกจากวัตถุทำมุมตกโตเท่ากับมุม  $\theta_c$  รังสีหักเหจะขนานกับผิวรอยต่อของตัวกลาง ไม่สามารถหักเหเข้าสู่ตัวกลางใหม่ได้ และถ้ารังสีตกทำมุมตกโตกว่ามุมวิกฤต  $\theta_c$  รังสีจะสะท้อนกลับเข้าสู่ตัวกลางทั้งหมดเป็นการสะท้อนกลับหมด

จากกฎของสเนลล์  $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$

เมื่อ  $\theta_1 = \theta_c$

จะได้  $n_1 \sin \theta_c = n_2 \sin \theta_2$

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \sin \theta_2$$

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \sin 90^\circ$$

ดังนั้น  $\theta_c = \sin^{-1} \left( \frac{n_2}{n_1} \right)$

ถ้าให้  $n_1$  แทนดัชนีหักเหของตัวกลางเดิม

$n_2$  แทนดัชนีหักเหของตัวกลางใหม่ โดย  $n_2$  มีค่ามากกว่า  $n_1$

$\theta_c$  แทนมุมวิกฤตของแสงจากตัวกลางเดิมสู่ตัวกลางใหม่

$\theta_2$  แทนมุมหักเห  $= 90^\circ$

ตัวอย่างที่ 2.7 จงหามุมวิกฤตของน้ำมัน ดัชนีหักเหเป็น  $\frac{5}{4}$  เทียบกับอากาศ

วิธีทำ กำหนดให้ น้ำมันเป็นตัวกลางที่ 1  $n_1 = \frac{5}{4}$

อากาศเป็นตัวกลางที่ 2  $n_2 = 1$

$$\theta_c = \sin^{-1} \left( \frac{n_2}{n_1} \right) = \sin^{-1} \left( \frac{1}{\frac{5}{4}} \right) = \sin^{-1} \left( \frac{4}{5} \right)$$

$$\theta_c = 53^\circ$$

**คำตอบ** มุมวิกฤตของน้ำมันเท่ากับ  $53$  องศา

### 2.8.3 มिरาจ (Mirage)

ปรากฏการณ์มิราจเป็นการหักเหของแสงในบรรยากาศชั้นต่างๆ เนื่องจากความหนาแน่นของอากาศในชั้นต่าง ๆ ไม่เท่ากันมักเกิดขึ้นในบริเวณที่อากาศมีความหนาแน่นแตกต่างกันมาก ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจะเกิดในวันที่อากาศร้อนจัดจะเห็นเหมือนมีสระน้ำอยู่บนพื้นถนน นั่นเป็นภาพลวงตาที่เกิดจากแสงจากท้องฟ้าหักเหและสะท้อนกลับหมดจากชั้นของอากาศร้อนบนพื้นดินที่เป็นเช่นนี้เพราะในขณะที่แสงแดดร้อนจัดอากาศที่ใกล้ผิวถนนจะมีอุณหภูมิสูงกว่าอากาศที่อยู่สูงจากผิวถนนขึ้นไป อากาศที่อยู่ใกล้ผิวถนนจึงมีความหนาแน่นน้อยกว่าอากาศที่อยู่สูงจากผิวถนนขึ้นไป ความหนาแน่นของอากาศที่แตกต่างกันจึงเปรียบเสมือนตัวกลางที่แตกต่างกัน ดังนั้นเมื่อแสงจากท้องฟ้าเดินทางผ่านความหนาแน่นของอากาศที่แตกต่างกันแสงจึงเกิดการหักเหได้ และเมื่อมุมตกกระทบมีขนาดใหญ่กว่ามุมวิกฤต จึงเกิดการสะท้อนกลับหมด



ภาพที่ 2.22 การเกิดมิราจหรือภาพลวงตา

ที่มา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล, ออนไลน์. เข้าถึงเมื่อ 10 มกราคม 2563. จาก

<http://www.neutron.rmutphysics.com>

## 2.9 ทศนอุปกรณ์ (Optics)

จุดประสงค์หลักเกี่ยวกับทัศนอุปกรณ์นี้สามารถนำหลักการของทัศนศาสตร์เชิงเรขาคณิตไปใช้อธิบายเกี่ยวกับทัศนอุปกรณ์บางอย่าง เช่น แว่นขยาย กล้องจุลทรรศน์ กล้องโทรทรรศน์ เครื่องตรวจภายในลูกตา เครื่องวัดความโค้งของกระจกตา เป็นต้น

### 2.9.1 แว่นขยาย (Magnifying glass)

แว่นขยายเป็นทัศนอุปกรณ์แบบง่ายที่สุด โดยใช้เลนส์นูนเพียงอย่างเดียวส่องดูวัตถุโดยให้ระยะวัตถุสั้นกว่าความยาวโฟกัสของเลนส์ ทำให้เกิดภาพเสมือน หัวตั้ง ขนาดโตกว่าวัตถุให้ตาอยู่ชิดกับเลนส์นูนมองดูภาพเสมือนซึ่งอยู่ด้านเดียวกับวัตถุการขยายของภาพควรประมาณ 3 หรือ 4 เท่า เพราะถ้าขยายมากเกินไปจะเกิดภาพที่ไม่คมชัดและตาของคนปกติจะมองเห็นภาพได้ชัดเจนที่สุดเมื่อภาพอยู่ห่างจากตาประมาณ 25 เซนติเมตร ดังนั้นจึงควรวางวัตถุห่างจากเลนส์ให้พอเหมาะที่จะภาพได้ชัดเจน ประโยชน์ของแว่นขยาย เช่น ใช้ส่องดูลายมือ แผลงต่าง ๆ เพชรพลอย เป็นต้น และยังสามารถใช้เป็นเลนส์ใกล้ตา (Eyepieces) ในกล้องจุลทรรศน์และกล้องโทรทรรศน์เพื่อทำหน้าที่ขยายภาพจริงที่ได้จากเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens)

### 2.9.2 กล้องจุลทรรศน์ (Microscope)

กล้องจุลทรรศน์ประกอบด้วยเลนส์นูน 2 เลนส์ คือ เลนส์ใกล้วัตถุและเลนส์ใกล้ตา เลนส์ใกล้วัตถุมีความยาวโฟกัสสั้น ต้องวางวัตถุไว้ให้ห่างจากเลนส์นี้เพียงเล็กน้อยเพื่อทำให้เกิดภาพจริงหัวกลับขึ้น เลนส์ใกล้ตาจะทำหน้าที่เป็นแว่นขยาย เกิดภาพเสมือนหัวตั้งขึ้น ภาพสุดท้ายนี้จะอยู่ห่างจากเลนส์ใกล้ตาประมาณ 25 เซนติเมตร กล้องจุลทรรศน์สมัยใหม่ที่ใช้ในงานวิจัยอาจมีเลนส์ประกอบไว้มากกว่า 2 เลนส์ ซึ่งออกแบบไว้เพื่อทำให้เกิดภาพคมชัดยิ่งขึ้น



ภาพที่ 2.23 กล้องจุลทรรศน์

ที่มา: มูลนิธิเทคโนโลยีสารสนเทศตามพระราชดำริ, ออนไลน์. เข้าถึงเมื่อ 6

มีนาคม 2563 จาก <http://www.princess-it.org>

### 2.9.3 กล้องโทรทรรศน์ (Telescope)

กล้องโทรทรรศน์เป็นทัศนอุปกรณ์ที่ใช้ส่องดูวัตถุที่อยู่ไกลเพื่อให้เห็นภาพได้โตมากขึ้นกว่าการมองดูด้วยตาเปล่าแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ กล้องโทรทรรศน์ชนิดหักเห (Refracting telescope) ซึ่งใช้เลนส์นูนเป็นเลนส์ใกล้วัตถุและมีเลนส์นูนหรือเลนส์เว้า อีกอันหนึ่งเป็นเลนส์ใกล้ตา เช่น กล้องดาราศาสตร์ (Astronomical telescope) กล้องสปาย (Terrestrial telescope) และกล้องดูละคร (Opera glass) อีกประเภทหนึ่งของกล้องโทรทรรศน์คือ กล้องโทรทรรศน์ชนิดสะท้อนแสง (Reflecting telescope) ใช้กระจกเว้าทำหน้าที่คล้ายเลนส์ใกล้วัตถุและมีเลนส์นูนเป็นเลนส์ใกล้ตา ในที่นี้จะกล่าวถึงกล้องโทรทรรศน์บางชนิดเท่านั้น เช่น กล้องดาราศาสตร์ ประกอบด้วยเลนส์นูน 2 เลนส์ คือ เลนส์นูนแรกหรือเลนส์ใกล้วัตถุทำให้เกิดภาพจริงหัวกลับอยู่ตรงจุดโฟกัสของเลนส์ใกล้วัตถุเลนส์นูนอันที่สองเป็นเลนส์ใกล้ตา วางอยู่ใกล้กับภาพทำหน้าที่เป็นแว่นขยายเกิดภาพเสมือนทำหน้าที่เป็นแว่นขยาย เกิดภาพเสมือนลำแสงจากวัตถุที่อยู่ไกลทำมุมกับแกนमुखสำคัญ



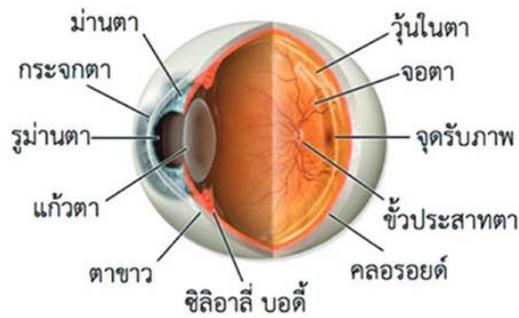
ภาพที่ 2.24 กล้องดาราศาสตร์

ที่มา: กล้องโทรทรรศน์ชนิดหักเหแสง, ออนไลน์. เข้าถึงเมื่อ 4 มีนาคม 2563 จาก

<http://www.narit.or.th/index.php/songkhla-observatory>

### 2.9.4 ตาและการมองเห็น (Ophthalmoscope)

ตาจัดเป็นอวัยวะที่มนุษย์ใช้ในการมองวัตถุ จึงจัดเป็นสิ่งที่ช่วยให้นักวิทยาศาสตร์มองเห็นวัตถุหรือสิ่งต่าง ๆ ได้ ส่วนต่าง ๆ ของนัยน์ตาคู่คล้ายกับส่วนต่าง ๆ ของกล้องถ่ายรูป โดยแสงจากวัตถุผ่านเลนส์แก้วตา (Crystalline lens) ที่มีลักษณะเป็นเลนส์นูน แล้วหักเหไปเกิดภาพจริงหัวกลับของวัตถุขึ้นที่เรตินา (Retina) ลักษณะของนัยน์ตาเป็นดังภาพที่ 2.25



ภาพที่ 2.25 ลักษณะของนัยน์ตา

ที่มา: กายวิภาคของดวงตา, ออนไลน์ เข้าถึงเมื่อ 2 เมษายน 2563.

จาก <https://www.isoptik.com>

ส่วนประกอบของนัยน์ตาประกอบด้วยเนื้อเยื่อเหนียวใสด้านหน้า เรียกว่า คอรัเนีย (Cornea) ถัดจากคอรัเนียเป็นของเหลวใสมีค่าดัชนีหักเหใกล้เคียงกับน้ำคือ 1.336 ถัดไปเป็นเลนส์ แก้วตา (Crystalline lens) ด้านหน้าของเลนส์แก้วตาเป็นม่านตา (Iris) ตรงกลางมีช่องเปิดกลม เรียกว่า รูม่านตา (Pupil) เลนส์แก้วตาประกอบด้วยเนื้อเยื่อโปร่งแสงหลายชั้นที่มีค่าดัชนีหักเห ตั้งแต่ 1.37 ที่ชั้นนอกจนถึง 1.42 ที่กลางเลนส์ ขอบเลนส์แก้วตาจะมีกล้ามเนื้อซิลิอารี (Ciliary muscle) ยึดเลนส์แก้วตา โดยกล้ามเนื้อนี้จะสามารถควบคุมความหนาบางของเลนส์ แก้วตาได้เพื่อให้เกิดภาพของวัตถุที่คมชัดบนเรตินา เพราะการปรับความหนาบางของเลนส์แก้วตา ทำให้ความยาวโฟกัสเปลี่ยนทำให้เกิดภาพที่คมชัดที่เรตินา สำหรับเรตินาประกอบด้วยใยประสาทที่ แยกมาจากประสาทตา เมื่อใยประสาทที่เรตินาได้รับภาพก็จะส่งความรู้สึกไปยังประสาทตาต่อไป ยังสมองบนเรตินาตรงกับแนวสายตาดจะมีรอยนูนเล็กๆ เรียก จุดเหลือง (Yellow spot) ใจกลางจุด เหลืองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.25 มิลลิเมตร เรียกว่า โฟเวียเซนทราลิส (Fovea centralist) เป็นส่วนที่มีความไวในการมองเห็นสูงมากกว่าส่วนอื่นของเรตินา เวลาเพ่งมอง วัตถุ ภาพของวัตถุจะไปตกลงตรงจุดนี้ทำให้เห็นรายละเอียดของวัตถุที่เพ่งมองได้ชัดเจนขึ้น บริเวณ ที่ประสาทตาต่อกับเรตินา เรียกว่าจุดบอด (Blind spot) เป็นจุดที่ไม่มีเซลล์รับแสงอยู่เลย เมื่อมีแสง มาตกที่จุดนี้จะมองไม่เห็นสิ่งใด ระหว่างเลนส์กับเรตินาจะเป็นของเหลวใสที่มีค่าดัชนีหักเห ใกล้เคียงกับของน้ำใยประสาทที่เรตินา จะมีส่วนที่ไวต่อแสงเรียกว่า เซลล์รูปแท่ง (Rods cell) และ เซลล์รูปกรวย (Cones cell) เซลล์รูปแท่งจะทำให้มองเห็นสิ่งต่าง ๆ ในที่มีมืดสลัวหรือกลางคืน แต่ไม่ สามารถแยกสีได้ ส่วนเซลล์รูปกรวยจะทำให้มองเห็นในตอนกลางวันและเห็นรายละเอียดได้ดี ส่วนรูม่านตาจะทำหน้าที่ควบคุมปริมาณแสงเข้าสู่นัยน์ตา ถ้าแสงน้อยรูม่านตาจะขยายใหญ่ ถ้าแสง มากรูม่านตาจะเล็กลง

ความผิดปกติของนัยน์ตาที่พบบ่อยคือ อาการสายตาสั้นและสายตายาว การใส่แว่นตาที่ทำด้วยเลนส์นูนเพื่อให้ภาพเข้ามาเกิดบนเรตินา ส่วนผู้ที่มิกกล้ามเนื้อแข็งแรงมากจนบังคับให้เลนส์มีความหนามากไปจะทำให้ภาพเกิดก่อนถึงเรตินา เรียกว่า เกิดอาการสายตาสั้น สามารถแก้ไขโดยการใส่แว่นตาที่ทำด้วยเลนส์เว้าเพื่อยืดระยะภาพให้ไปตกพอดีเรตินาก็จะทำให้เห็นภาพได้ชัดเป็นปกติ อาการผิดปกติอีกอย่างหนึ่งของนัยน์ตาคือสายตาดูเอียง ซึ่งเกิดจากผิวของคอร์เนียไม่เป็นทรงกลม ทำให้ไม่สามารถมองเห็นเส้นในแนวดิ่งและแนวราบได้ชัดเจนพร้อมกัน ซึ่งแก้ไขได้โดยใช้เลนส์ทรงกระบอกหรือเลนส์กึ่งวงกลม

## 2.10 บทสรุป

แสงเป็นได้ทั้งคลื่นและอนุภาคในเวลาเดียวกัน ในบทนี้เราศึกษาแสงเชิงเรขาคณิต สมบัติการสะท้อนของแสงช่วยในการศึกษาการมองเห็นวัตถุในลักษณะต่างๆ ผ่านกระจกและเลนส์ กล่าวคือ เมื่อมีวัตถุอยู่หน้ากระจกเงาระนาบจะมีรังสีของแสงกระจายออกจากวัตถุไปตกที่ผิวกระจกด้วยมุมตกกระทบที่มีค่าต่าง ๆ กันเป็นจำนวนมาก จึงมีรังสีสะท้อนออกจากผิวกระจกในทิศทางทำมุมสะท้อนต่าง ๆ กันเป็นจำนวนมากเช่นเดียวกัน และเป็นไปตามกฎการสะท้อนของแสง ภาพที่เกิดจากกระจกเว้าจะเกิดได้ 3 ลักษณะตามตำแหน่งของวัตถุที่อยู่หน้ากระจก เมื่อวัตถุอยู่หน้ากระจกนูน การเขียนแนวรังสีตกทั้งสามกรณีเป็นเช่นเดียวกับกระจกเว้า จะได้แนวรังสีสะท้อนเสมือนว่าไปตัดกัน เกิดภาพเสมือนหัวตั้งขนาดย่อข้างหลังกระจก ถ้าวัตถุอยู่ชิดกระจกจะได้ภาพเสมือนขนาดเท่าวัตถุอยู่ชิดกระจกเช่นกัน และถ้าวัตถุอยู่ระยะอนันต์จากกระจกจะได้ภาพเสมือนเป็นจุดอยู่ที่จุดโฟกัสของกระจก จะเห็นได้ว่าภาพที่เกิดจากกระจกนูนจะเป็นภาพเสมือนหลังกระจกได้กรณีเดียวเท่านั้น เลนส์ เป็นอุปกรณ์ทัศนศาสตร์ที่อาศัยการหักเหของแสงในการเปลี่ยนเส้นทางของแสง เลนส์แบ่งออกเป็นสองประเภทใหญ่ๆ คือ เลนส์นูน และเลนส์เว้า ทัศนอุปกรณ์เป็นการนำหลักการของทัศนศาสตร์เชิงเรขาคณิตไปใช้อธิบายเกี่ยวกับทัศนอุปกรณ์ เช่น แว่นขยาย กล้องจุลทรรศน์ กล้องโทรทรรศน์ เครื่องตรวจภายในลูกตา เครื่องวัดความโค้งของกระจกตา เป็นต้น ดวงตาจัดเป็นอวัยวะที่ช่วยให้มนุษย์มองเห็นวัตถุหรือสิ่งต่างๆ ได้ ส่วนต่างๆ ของนัยน์ตาคัล้ายกับส่วนต่างๆ ของกล้องถ่ายรูป โดยแสงจากวัตถุผ่านเลนส์แก้วตาที่มีลักษณะเป็นเลนส์นูน แล้วหักเหไปเกิดภาพจริงหัวกลับของวัตถุขึ้นที่เรตินา

## แบบฝึกหัด

1. นำวัตถุมาวางด้านหน้าของกระจกที่มีรัศมีความโค้ง 35 เซนติเมตร โดยวางห่างจากกระจกเป็นระยะที่ทำให้เกิดภาพจริงขนาดใหญ่เป็น 2.5 เท่าของวัตถุอยากทราบว่าวัตถุห่างจากกระจกเป็นระยะเท่าไร [คำตอบ 24.5 เซนติเมตร]
2. ชายคนหนึ่งสูง 1.8 เมตร ยืนอยู่ริมสระว่ายน้ำ ห่างจากขอบสระ 2.4 เมตร ถ้าเข้ากันสระลึก 3 เมตร จงหาระยะลึกจริงของก้นสระ ถ้าดัชนีหักเหของน้ำเท่ากับ  $4/3$  [คำตอบ 16/3 เมตร]
3. เสาต้นหนึ่งปักเอียง  $53.1^\circ$  กับผิวน้ำ โดยมีบางส่วนของเสาปักในน้ำ เมื่อมองลงไปใต้น้ำจะเห็นส่วนของเสาที่จมอยู่ในน้ำเอียงทำมุมเท่าใดกับผิวน้ำ [คำตอบ  $45^\circ$ ]
4. แท่งแก้วแผ่นหนึ่งหนา 18 เซนติเมตร อยู่ใต้น้ำลึก 20 เซนติเมตร แท่งแก้วนี้วางทับวัตถุบางอย่างอยู่ ถ้าดัชนีหักเหของแก้วและน้ำ มีค่าเป็น  $3/2$  และ  $4/3$  ตามลำดับ
  - (ก) เมื่อมองลงไปตรงๆ จากอากาศจะเห็นวัตถุลอยสูงขึ้นมากเท่าใด [คำตอบ 11 เซนติเมตร]
  - (ข) เมื่อมองลงไปตรงๆ โดยลึ้มตามองดูในน้ำ จะเห็นวัตถุลอยสูงขึ้นเท่าใด [คำตอบ 2 เซนติเมตร]
5. ชายคนหนึ่งซึ่งนั่งอยู่ในเรือลำเล็กๆ ในมหาสมุทร เป็นปลาฉลามตัวหนึ่งว่ายผ่านใต้ท้องเรือไปที่ความลึก 4.5 เมตร ชายคนนี้จะมองไม่เห็นปลาฉลามตัวนี้ เมื่อปลาฉลามว่ายห่างออกไปจากเขาเท่าใด (ระยะแนวราบ) สมมติว่าตาของชายคนนี้อยู่ใกล้ผิวน้ำมากและดัชนีหักเหของน้ำทะเลเท่ากับ  $4/3$  [คำตอบ 5.1 เมตร]
6. กระจกเว้าบานหนึ่ง เมื่อรับแสงจากดวงอาทิตย์จะเกิดภาพของดวงอาทิตย์ที่ระยะห่าง 20 เซนติเมตร จากกระจก เมื่อนำวัตถุมาวางหน้ากระจกเว้านี้ที่ระยะ 16 เซนติเมตร จากกระจก จะเกิดภาพชนิดใดที่ตำแหน่งใด [คำตอบ ภาพเสมือน ที่ระยะ 60 เซนติเมตร จากกระจก ด้านหลังกระจก]
7. ถ้าต้องการแยกภาพของไดโอดเปล่งแสง ซึ่งสูง 4 มิลลิเมตรลงบนแกน โดยใช้กระจกโค้งนูนอยู่ห่างออกไป 90 เซนติเมตร ทางด้านซ้ายของกระจกโค้งและไดโอดเปล่งแสงอยู่ตรงกึ่งกลางระหว่างกระจกโค้งกับฉาก จะต้องใช้กระจกโค้งชนิดใด ความยาวโฟกัสเท่าใดและภาพของไดโอดเปล่งแสง สูงเท่าใด [คำตอบ ความยาวโฟกัส 30 เซนติเมตรและภาพสูง 8 เซนติเมตร]

## เอกสารอ้างอิง

- ก่องกัญจน์ ภัทรากาญจน์ และ ธนกาญจน์ ภัทรากาญจน์. (2554). **ฟิสิกส์ 2: ตัวอย่างและโจทย์พร้อม คำเฉลย**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- มูลนิธิเทคโนโลยีสารสนเทศตามพระราชดำริ. *กล้องจุลทรรศน์*. สืบค้น 6 มีนาคม 2563. จาก <http://www.princess-it.org>
- ทวี นิมน้อย และมนู เพ็ญพุ่ม. (2541). **ฟิสิกส์พื้นฐานระดับมหาวิทยาลัย 1**. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- ปิยพงษ์ สิทธิคง. (2548). **ฟิสิกส์ระดับอุดมศึกษา เล่ม 2**. กรุงเทพมหานคร: วิรัตน์ เอ็ดดูเคชั่น จำกัด
- แพทย์หญิงณัฐธิดา นิมวรพันธุ์. *กายวิภาคของดวงตา*. สืบค้น 2 มีนาคม 2563. จาก <https://www.isoptik.com>
- มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล. *การแทรกสอดที่เกิดจากแสงสองแหล่ง*. สืบค้น 25 มีนาคม.2556. จาก <http://www.rmutphysics.com>
- มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล. *การหักเหของแสง*. สืบค้น 1 มีนาคม 2563. จาก <http://www.neutron.rmutphysics.com>
- มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล. *แสงสีขาวผ่านปริซึม*. สืบค้น 1 มีนาคม 2563. จาก [http://www.rmutphysics.com/physics/oldfront/62/light1/ligh\\_25.html](http://www.rmutphysics.com/physics/oldfront/62/light1/ligh_25.html)
- วิฑูร ชื่นวชิรศิริ และวีระชัย สิริพันธ์วรารณณ์. (2550). **ฟิสิกส์เบื้องต้น**. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยมหิดล.
- มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล. *โพลาไรเซชัน*. สืบค้น 28 กุมภาพันธ์ 2563. จาก <http://www.rmutphysics.com/charud/pdf-learning/6/physics2/17Polarisation.pdf>
- มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล. *Learning atomic*. สืบค้น 20 กุมภาพันธ์ 2563. จาก <http://www.atom.rmutphysics.com/charud/oldnews/0/286/2/4/atom/bo2.htm>
- สถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ. *กล้องดาราศาสตร์*. สืบค้น 4 มีนาคม 2563. จาก <http://www.narit.or.th/index.php/songkhla-observatory>
- สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. *การทดลองเกรตติง*. สืบค้น 20 มกราคม 2563 จาก <http://physics.ipst.ac.th/?p=1359>
- อนุกรรมการปรับปรุงหลักสูตรวิทยาศาสตร์ ทบวงมหาวิทยาลัย. (2543). **ฟิสิกส์ เล่ม2**. กรุงเทพมหานคร: สมาคมวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์.
- Brown, Paige. (2011). *Light Logic for 'Light'-ning Fast Computers*. สืบค้น 25 มีนาคม 2556 จาก, [http://www.scilogis.com/from\\_the\\_lab\\_bench/light-logic-for-light-ning-fast-](http://www.scilogis.com/from_the_lab_bench/light-logic-for-light-ning-fast-)

computers/

Cutnell, J. D., and Johnson, K. W. (2005). *Physics*. Hoboken, NJ: John Wiley & Son.

Davidson, Michael W. (2003). *Polarized Light Microscopy*. สืบค้น 25 กุมภาพันธ์ 2556. จาก

<http://www.micro.magnet.fsu.edu>

Giancoli, D.C. (1998). **Physics**. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.

Halliday, David., Resnick, Robert., and Walker, Jearl. (2005). **Fundamentals of Physics**

(7<sup>th</sup>ed). New York: John Willey& Son.

Hecht, E. (2002). **Optics**(4<sup>th</sup> ed). San Francisco: Addison Wesley.

Jon, R. *Diffraction of Light*. สืบค้น 25 กุมภาพันธ์ 2563. จาก[https://jonrista.com/2013/03/24/the-](https://jonrista.com/2013/03/24/the-diffraction-myth)

[diffraction-myth](https://jonrista.com/2013/03/24/the-diffraction-myth)

R. Nave. *Diffraction Grating*. สืบค้น 28 กุมภาพันธ์ 2563. จาก [http://hyperphysics.phy-](http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/grating.html)

[astr.gsu.edu/hbase/phyopt/grating.html](http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/grating.html)

Serway, Raymond A. (2006). **Serway's Principles of Physics a Calculus-based Text**

(4<sup>th</sup>ed). California: Thomson Learning.

Serway, R.A. and Beichner, J.B. (2004). **Physics for Science and Engineers with Modern**

**Physics** (6<sup>th</sup>ed). Philadelphia:Saunders.

Young, Hugh D. (1992). **University Physics** (8<sup>th</sup>ed). New York: Addison Wesley.

## บทที่ 3

# ไฟฟ้าสถิตและไฟฟ้ากระแส

## (Electrostatics and electricity)

### 3.1 บทนำ

เมื่อกล่าวถึงไฟฟ้าในฟิสิกส์จะหมายถึง การพิจารณาวัสดุหรือสสารที่อยู่รอบ ๆ ตัว ซึ่งจะประกอบไปด้วยประจุไฟฟ้ามากมาย แต่เนื่องจากความเป็นกลางทางไฟฟ้าจึงไม่สามารถเห็นถึงอิทธิพลของประจุไฟฟ้าเหล่านั้นได้ แต่ถ้ามีการทำให้เกิดการสูญเสียประจุใดประจุหนึ่งไป จะทำให้เกิดความสูญเสียความเป็นกลางทางไฟฟ้า วัสดุนั้นก็จะมีสามารถแสดงปรากฏการณ์ที่เกิดจากประจุไฟฟ้าสถิตขึ้นได้ ประจุไฟฟ้ามีสองชนิดคือ ประจุไฟฟ้าบวก และประจุไฟฟ้าลบ ในบทนี้จะศึกษาไฟฟ้ากระแสตรง ทั้งความหมายและการประยุกต์ โดยเริ่มตั้งแต่ชนิดของประจุไฟฟ้า ปรากฏการณ์ทางไฟฟ้าสถิต สนามไฟฟ้า เส้นแรงไฟฟ้า งานในการเคลื่อนประจุไฟฟ้า สนามไฟฟ้า พลังงานทางไฟฟ้า ศักย์ไฟฟ้า และกฎการอนุรักษ์พลังงาน การศึกษาการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า ซึ่งกลายเป็นกระแสไฟฟ้า ศึกษาวงจรไฟฟ้าอย่างง่าย ตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุ การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า การใช้กฎของเคอร์ชอฟฟ์ ซึ่งเป็นผลมาจากกฎการอนุรักษ์พลังงานและการอนุรักษ์ประจุไฟฟ้าสำหรับระบบโดดเดี่ยว วงจรส่วนใหญ่กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรจะมีค่าคงตัวทั้งขนาดและทิศทาง กระแสที่มีทิศทางไหลคงตัวนี้ เรียกว่า กระแสตรง สำหรับไฟฟ้ากระแสตรง จะศึกษากฎของโอห์ม แรงเคลื่อนไฟฟ้า สภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุ ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะของวัสดุต่างๆ และศึกษาไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งเป็นการเปลี่ยนทิศของการไหลเป็นช่วง ๆ ขึ้นกับเวลา จะกล่าวถึงการประยุกต์ใช้ เช่น หลักการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับที่มีอยู่ทุกครัวเรือน ประโยชน์ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่อยู่ในอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าต่าง ๆ ในชีวิตประจำวัน

### 3.2 ประจุไฟฟ้า (Charge)

วัสดุหรือสสารแต่ละชนิดจะมีประจุไฟฟ้าสะสมอยู่ซึ่งประจุไฟฟ้ามีอยู่สองชนิดคือประจุบวกและประจุลบ โดยทั่วไปถ้าไม่มีการทำให้เกิดการสูญเสียประจุวัสดุหรือสสารจะมีความเป็นกลางทางประจุไฟฟ้า นั่นคือมีประจุบวกเท่ากับประจุลบ สำหรับขนาดของประจุมิหน่วยเป็นคูลอมบ์ (C)

โดยภายในวัสดุหรือสสารจะประกอบไปด้วยอนุภาคส่วนที่เล็กที่สุดที่เป็นตัวกำหนดประจุจำนวน 3 ชนิดได้แก่

### 1. อิเล็กตรอน

อิเล็กตรอนมีประจุไฟฟ้าเป็นลบมีขนาดของประจุเท่ากับ  $1.6 \times 10^{-19}$  คูโลมบ์ และมีขนาดของมวลเท่ากับ  $9.11 \times 10^{-27}$  กิโลกรัม

### 2. โปรตอน

โปรตอนที่มีประจุไฟฟ้าเป็นบวก ขนาดของประจุเท่ากับอิเล็กตรอนคือ  $1.6 \times 10^{-19}$  คูโลมบ์ และมีขนาดของมวลเท่ากับ  $1.67 \times 10^{-27}$  กิโลกรัม

### 3. นิวตรอน

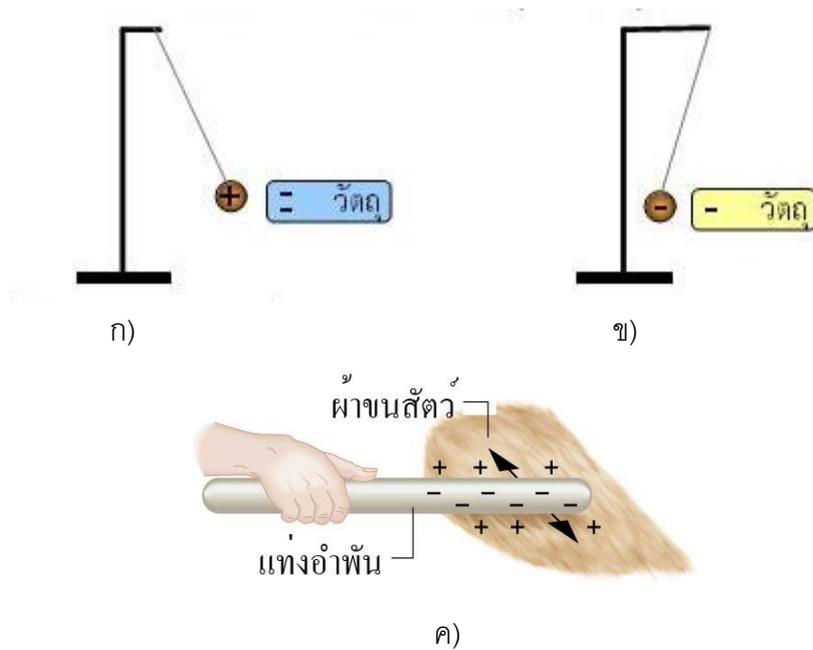
นิวตรอนจะมีความเป็นกลางทางไฟฟ้า นั่นคือไม่มีประจุ โดยมีขนาดของมวลเท่ากับ  $1.67 \times 10^{-27}$  กิโลกรัม

เมื่อเปรียบเทียบขนาดและมวลของแต่ละอนุภาคแสดงผลสรุปดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สรุปผลการเปรียบเทียบขนาดประจุและมวลของอนุภาคต่าง ๆ

อนุภาค	ขนาดประจุ (C)	มวล (kg)
โปรตรอน	$+1.6 \times 10^{-19}$	$1.67 \times 10^{-27}$
นิวตรอน	0	$1.67 \times 10^{-27}$
อิเล็กตรอน	$-1.6 \times 10^{-19}$	$9.11 \times 10^{-27}$

สสารจะแสดงความเป็นประจุได้ถ้าอะตอมในสสารมีการสูญเสียหรือได้รับอิเล็กตรอน หลังจากนั้นสสารจะไม่เป็นกลางอีกต่อไปเพราะประจุลัพธ์มีค่าไม่เป็นศูนย์ ถ้าสสารได้รับอิเล็กตรอนเข้ามา สสารจะมีความเป็นประจุลบ ถ้าสสารเสียดิอิเล็กตรอนไปก็จะเป็นประจุบวกในกรณีของการถูแท่งอำพันกับผ้าขนสัตว์ ผลของการทำให้เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างสสารทั้งสองทำให้มีความเป็นประจุนั้นเอง คุณสมบัติของประจุไฟฟ้า คือ ประจุชนิดเดียวกันจะผลักกัน ประจุที่ต่างชนิดกันจะดึงดูดกัน ดังแสดงในภาพที่ 3.1 ความเป็นจริงแล้วการที่อิเล็กตรอนในอะตอมโคจรรอบนิวเคลียสที่มีประจุบวกก็เนื่องมาจากแรงดึงดูดระหว่างประจุตรงข้ามด้วยเช่นเดียวกัน นอกจากนี้จะเห็นว่ากรณีประจุของสสารเกิดจากความไม่สมดุลของอนุภาคอิเล็กตรอน ดังนั้นในระบบโดดเดี่ยวใดๆ ประจรวมของระบบจะมีค่าคงที่เสมอ นั่นคือ “ประจุไม่สามารถสูญหายหรือถูกสร้างขึ้นมาใหม่” เพียงถ่ายเทไปมาระหว่างสสารหรืออะตอมเท่านั้น แรงที่ประจุไฟฟ้ากระทำต่อกันไม่ว่าจะเป็นการดูดหรือผลัก เป็นแรงพื้นฐานของธรรมชาติที่สำคัญอีกอันหนึ่ง เรียกแรงเนื่องจากประจุนี้ว่า “แรงไฟฟ้า” ตัวอย่างดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 การทดลองตรวจสอบชนิดของประจุไฟฟ้า ก) ลูกพิชที่มีประจุบวกกับวัตถุ ข) ลูกพิชที่มีประจุลบกับแท่งวัตถุ ค) ผลของแท่งอำพันที่ถูกับฟ้านสัตว์

ที่มา: <https://sites.google.com/site/krudang2010/fisiks-5-fifasthit/kar-henyw-na-fifa>

จากภาพที่ 3.1 ก) ให้ลูกพิชมีประจุบวก ถ้าเกิดแรงดูดกับวัตถุชนิดหนึ่ง แสดงว่าวัตถุนี้มีประจุลบ ข) ให้ลูกพิชมีประจุลบ เกิดแรงผลัดกับวัตถุชนิดหนึ่ง แสดงว่าวัตถุนี้มีประจุลบ ค) การถูฟ้านสัตว์กับแท่งอำพัน จะเกิดการถ่ายเทประจุในบริเวณที่ถู โดยฟ้านสัตว์จะให้ประจุบวกกับแท่งอำพันมีผลให้แท่งอำพันในบริเวณที่ถูนั้นมีประจุเป็นลบ ส่วนฟ้านสัตว์เมื่อเสียดี้เล็กตรอนไปจึงทำให้มีประจุไฟฟ้าเป็นบวกในบริเวณนั้น

### 3.3 ปรากฏการณ์ไฟฟ้าสถิต (Phenomena of electrostatics)

วัตถุหรือสสารแต่ละชนิดจะมีความเป็นกลางทางไฟฟ้า คือมีประจุบวกเท่ากับประจุลบ แต่ถ้ามมีการทำให้เกิดการเสียประจุ เช่นการขจัดถูระหว่างวัตถุสองอย่าง ประจุลบจะถ่ายโอนจากสสารหนึ่งไปยังอีกสสารหนึ่ง โดยสสารที่รับประจุลบไว้จะมีประจุไฟฟ้าลบส่วนสสารที่สูญเสียประจุลบไปก็จะมีประจุบวก ส่งผลให้รอบ ๆ สสารทั้งสองเกิดสนามไฟฟ้าขึ้นมาตัวอย่างง่ายที่สังเกตได้จากชีวิตประจำวันเรา เช่นเมื่อเรานำหวีหรือไม้บรรทัด ไปถูกับเส้นผมของเราจะทำให้เกิดการถ่ายเทประจุระหว่างสสารทั้งสอง และเมื่อเรานำหวีหรือไม้บรรทัดมาวางไว้ใกล้ๆ กับกระดาษชิ้นเล็กๆ ก็เกิดแรงที่เกิดจากสนามไฟฟ้านั้นดึงดูดกระดาษเข้าหาหวี

สำหรับตัวอย่างของปรากฏการณ์ไฟฟ้าสถิตที่พบได้บ่อยที่สุดในธรรมชาติคือปรากฏการณ์ที่เกิดฟ้าผ่า ฟ้าผ่าเกิดขึ้นเมื่อเมฆที่มีประจุไฟฟ้าสะสมกันมากจนสามารถส่งกระแส

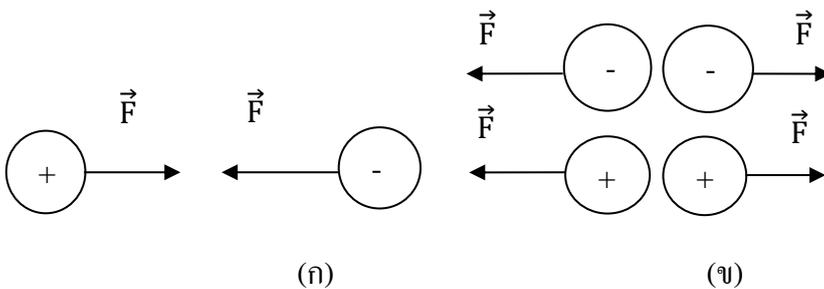
กระโดดข้ามตัวกลางที่ไม่ใช่ตัวนำที่คั่นคืออากาศ และเมื่อประจุไฟฟ้าที่มีจำนวนมากไปกระทบกับสิ่งของต่าง ๆ เช่น พืช หรือสัตว์ ก็จะทำให้เกิดผลเนื่องจากประจุไฟฟ้า ตัวอย่างดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 ปรากฏการณ์ฟ้าผ่าที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า  
ที่มา : Serway, R. A., and Jewett, J. W., 2014.

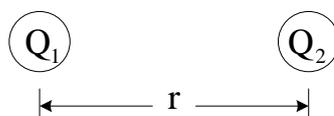
### 3.4 กฎของคูลอมบ์ (Coulomb's law)

เนื่องจากเมื่อมีประจุไฟฟ้าจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าแผ่ออกมารอบๆ และเมื่อไรก็ตามที่นำประจุตั้งแต่สองประจุนั้นไปมาวางไว้ใกล้ๆ กันก็จะเกิดผลเนื่องจากประจุทั้งสองเกิดแรงกระทำ โดยเมื่อมีประจุไฟฟ้าตั้งแต่สองประจุนั้นไปวางอยู่ใกล้กันจะเกิดแรงกระทำซึ่งเป็นแรงที่เกิดขึ้นจากประจุทั้งสอง โดยถ้าเป็นประจุนิคมเดียวกันจะผลักกันหรือถ้าเป็นประจุต่างชนิดกันจะดูดกัน



ภาพที่ 3.3 แรงที่เกิดจาก (ก) ประจุที่ต่างชนิดกัน และ (ข) ประจุนิคมเดียวกัน

พิจารณาในกรณีที่มีประจุสองประจุวางห่างกันเป็นระยะทาง  $r$  ดังภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 ระยะห่างของประจุที่วางห่างกันเป็นระยะทาง  $r$

จากภาพเราสามารถคำนวณหาแรงที่เกิดขึ้นจากประจุทั้งสองได้จากสมการ

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Q_1||Q_2|}{r^2} \quad (3-1)$$

สมการที่ (3.1) นี้เรียกว่า **กฎของคูลอมบ์** ซึ่งค้นพบโดยวิศวกรชาวฝรั่งเศสชื่อ ชาร์ล โอคูสแตง เดอ กูลง (Charles – Augustin de Coulomb) ที่กล่าวไว้ว่า เมื่อมีประจุวางห่างกันแรงที่เกิดจากประจุทั้งสองจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาดของประจุทั้งสองและแปรผกผันกับระยะห่างระหว่างประจุทั้งสองยกกำลังสอง

จากการทดลองค่าคงที่คือ  $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$  มีค่าเท่ากับ  $9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$

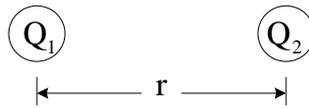
โดย  $\epsilon_0$  แทน ค่าสภาพยอมของสุญญากาศ (Vacuum permittivity constant)  
มีค่าเท่ากับ  $8.854 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$

เมื่อ  $F$  แทน ขนาดของแรงระหว่างประจุ 2 ประจุ หน่วย นิวตัน (N)

$Q_1, Q_2$  แทน ขนาดประจุ หน่วย คูลอมบ์ (C)

$r$  แทน ระยะห่างระหว่างประจุ หน่วย เมตร (m)

**ตัวอย่างที่ 3.1** จากภาพที่ 3.5 ถ้าระยะห่างระหว่างประจุทั้งสองเท่ากับ 0.5 m และประจุทั้งสองมีขนาดเท่ากับ  $2e$  จงหาขนาดของแรงที่เกิดจากประจุทั้งสอง



ภาพที่ 3.5 ระยะห่างระหว่างประจุ

จากสมการที่ (3-1)

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Q_1||Q_2|}{r^2}$$

จะได้

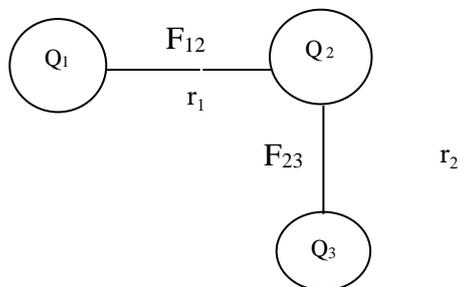
$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{4e^2}{0.5^2}$$

$$F = \frac{9 \times 10^9 \times 4 \times (1.6 \times 10^{-19})^2}{2.5}$$

$$F = 23 \times 10^{-10} \text{ N}$$

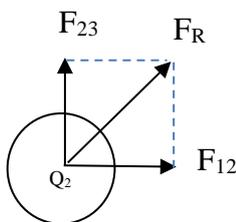
**คำตอบ** ดังนั้น แรงที่กระทำต่อประจุทั้งสองเท่ากับ  $23 \times 10^{-10}$  นิวตัน

ตัวอย่างที่ 3.2 จากภาพถ้ำ  $Q_1$  เท่ากับ  $+1e$  ส่วน  $Q_2$  เท่ากับ  $-2e$  และ  $Q_3$  เท่ากับ  $+1e$  ระยะ  $r_1$  เท่ากับ  $4\text{ cm}$ ,  $r_2$  เท่ากับ  $3\text{ cm}$  จงคำนวณหาขนาดของแรงที่กระทำต่อประจุ  $Q_2$  เนื่องจากประจุ  $Q_1$ ,  $Q_3$  และขนาดของแรงลัพธ์ ตามลำดับ



ภาพที่ 3.6 การวางตัวของประจุ

พิจารณาจากภาพที่ 3.6 สามารถแตกแรงที่กระทำได้ดังภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 แรงที่เกิดจากการวางตัวของประจุ

คำนวณหา  $F_{12}$

$$F_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Q_1||Q_2|}{r_{12}^2}$$

$$F_{12} = \frac{9 \times 10^9 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 2 \times 1.6 \times 10^{-19}}{0.04^2}$$

$$F_{12} = \frac{46.08}{0.0016} \times 10^{-29}$$

$$F_{12} = 2.88 \times 10^{-25} \text{ N}$$

คำนวณหา  $F_{23}$

$$F_{23} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Q_2||Q_3|}{r_{23}^2}$$

$$F_{23} = \frac{9 \times 10^9 \times 2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 1.6 \times 10^{-19}}{0.03^2}$$

$$F_{23} = \frac{46.08}{0.0009} \times 10^{-29}$$

$$F_{23} = 5.12 \times 10^{-25} \text{ N}$$

หา  $F_R$  โดยใช้วิธีการทางพีชคณิตจะได้

$$F_R = \sqrt{F_{12}^2 + F_{23}^2}$$

$$F_R = \sqrt{(2.88 \times 10^{-25})^2 + (5.12 \times 10^{-25})^2}$$

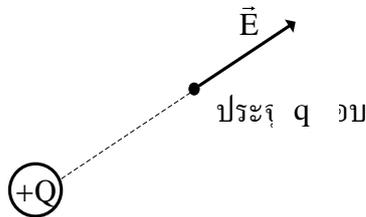
$$F_R = \sqrt{8.29 \times 10^{-50} + 26.21 \times 10^{-50}}$$

$$F_R = \sqrt{34.5 \times 10^{-50}} \text{ N}$$

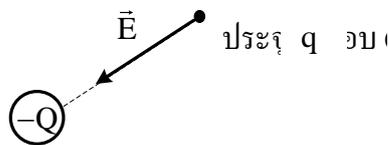
**คำตอบ** ดังนั้น ขนาดของแรงที่กระทำต่อประจุ  $Q_2$  เนื่องจากประจุ  $Q_1$ ,  $Q_3$  และขนาดของแรงลัพธ์ มีค่าเท่ากับ  $2.87 \times 10^{-25}$  นิวตัน  $5.56 \times 10^{-25}$  นิวตัน และ  $\sqrt{34.5 \times 10^{-50}}$  นิวตัน ตามลำดับ

### 3.5 สนามไฟฟ้า (Electric field)

เมื่อมีประจุไฟฟ้าอยู่ ณ ตำแหน่งใด ๆ อิทธิพลที่ประจุไฟฟ้าแผ่ออกมารอบประจุเรียกว่า สนามไฟฟ้า ดังนั้นสนามไฟฟ้าคือ สนามที่มีอำนาจแผ่ออกไปรอบๆ และการกระทำต่อประจุไฟฟ้า ในบริเวณรอบนั้น หากทดลองนำประจุทดสอบไปวางไว้ จะได้ทิศของสนามไฟฟ้ามีทิศพุ่งออกจากประจุบวก และพุ่งเข้าหาประจุลบ ดังภาพที่ 3.8 และ 3.9



ภาพที่ 3.8 แสดงทิศของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแหล่งกำเนิดประจุที่เป็นบวก



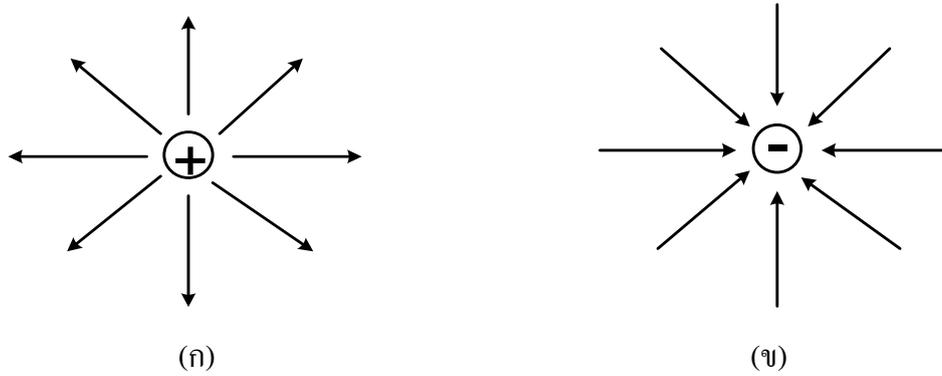
ภาพที่ 3.9 แสดงทิศของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแหล่งกำเนิดประจุที่เป็นลบ

จากนิยามของสนามไฟฟ้าคือ แรงที่กระทำต่อประจุทดสอบ สามารถคำนวณหาได้จากสมการ

$$E = \frac{F}{Q} \quad (3-2)$$

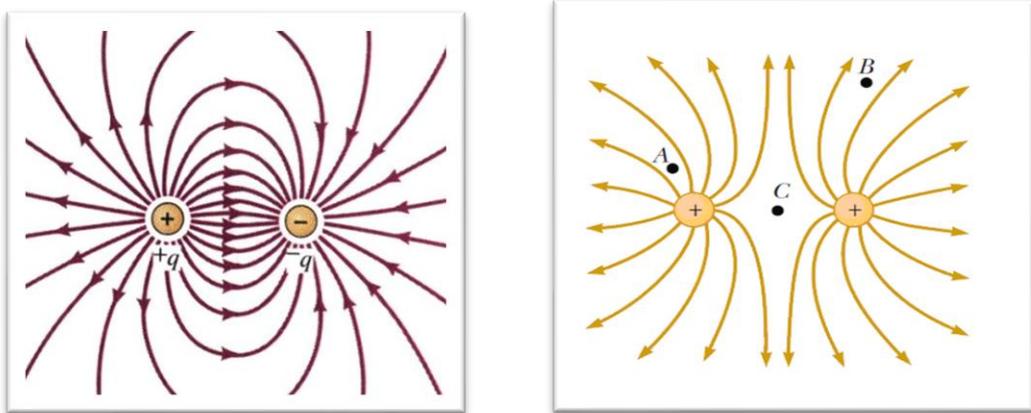
หรือ 
$$E = \frac{kQ}{r^2}$$

สำหรับหน่วยของสนามไฟฟ้าคือ นิวตันต่อคูลอมบ์ (N/C) โดยถ้าเรานำประจุสองประจุที่มีประจุชนิดเดียวกันและประจุต่างชนิดกันเส้นสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นแสดงดังภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 แสดงทิศทางของสนามไฟฟ้า (ก) ประจุบวก และ (ข) ประจุลบ

ถ้ามีประจุไฟฟ้าสองประจุวางอยู่ใกล้กันลักษณะของสนามไฟฟ้าจะพุ่งออกจากประจุบวกเข้าหาประจุลบ ดังภาพที่ 3.11



ภาพที่ 3.11 แสดงลักษณะของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากประจุไฟฟ้าต่างชนิดกัน

ที่มา: Serway, R. A., and Jewett, J. W., 2014.

ตัวอย่างที่ 3.3 จงหาขนาดความเข้มสนามไฟฟ้าในอากาศ ณ ตำแหน่งที่ห่างจากประจุ  $5 \times 10^{-9}$  คูลอมบ์ เท่ากับ 30 เซนติเมตร และเมื่อนำประจุ  $4 \times 10^{-10}$  คูลอมบ์ มาวางไว้ ณ ตำแหน่งนั้น จงหาขนาดแรงไฟฟ้าที่กระทำต่อประจุ  $4 \times 10^{-10}$  คูลอมบ์

วิธีทำ จาก 
$$E = \frac{kq}{r^2}$$

$$= \frac{(9 \times 10^9) \times (5 \times 10^{-9})}{(30 \times 10^{-2})^2} = 5 \times 10^2 \text{ N/C}$$

ขนาดความเข้มสนามไฟฟ้ามีค่า  $5 \times 10^2$  นิวตันต่อคูลอมบ์

$$\begin{aligned} F &= qE \\ &= (4 \times 10^{-10}) \times (5 \times 10^2) \\ &= 2 \times 10^{-7} \text{ N} \end{aligned}$$

**คำตอบ** แรงไฟฟ้าที่กระทำต่อประจุ  $4 \times 10^{-10}$  คูลอมบ์ มีค่าเท่ากับ  $2 \times 10^{-7}$  นิวตัน

### 3.6 พลังงานศักย์ไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า (Electrical potential energy and electric potential)

**3.6.1 พลังงานศักย์ไฟฟ้า** คือ พลังงานเนื่องมาจากตำแหน่งของประจุสนามไฟฟ้า โดยมีค่าเท่ากับพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนประจุนั้น (Infinity) ไปยังจุดที่พิจารณานั้น ในกรณีที่เป็นประจุบวกหรือเคลื่อนที่จากจุดพิจารณานั้นไปยังระยะอนันต์ในกรณีที่เป็นประจุลบ

**3.6.2 ศักย์ไฟฟ้า** คือพลังงานศักย์ต่อหนึ่งหน่วยประจุไฟฟ้า ณ จุดใด ๆ หรือเขียนเป็นสมการได้

$$V = \frac{E_p}{q} \quad (3-3)$$

หรือ

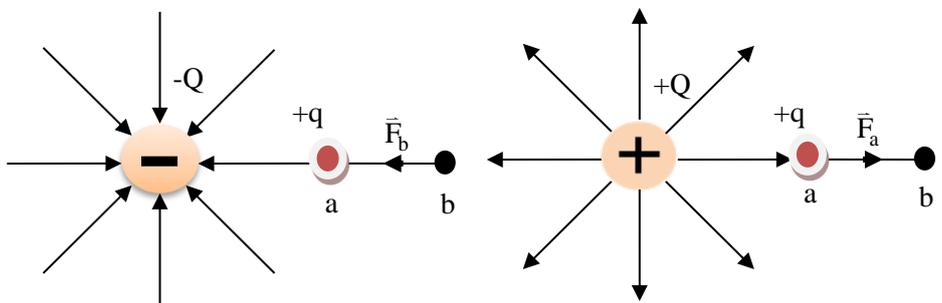
$$E_p = qV \quad (3-4)$$

เมื่อ

$V$  คือ ศักย์ไฟฟ้า มีหน่วยเป็นจูลต่อคูลอมบ์

$E_p$  คือ พลังงานศักย์ มีหน่วยเป็นจูล

$q$  คือ ประจุไฟฟ้า มีหน่วยเป็นคูลอมบ์



(ก) เมื่อเคลื่อนที่ +q จู

เข้าหา -Q

(ข) เมื่อเคลื่อนที่ +q จู

+Q ก

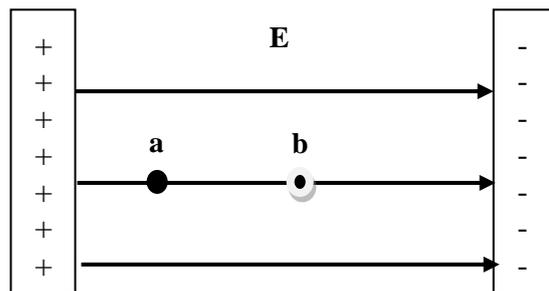
ภาพที่ 3.12 แสดงเส้นสมศักย์

จากภาพที่ 3.12 (ก) กำหนดได้ว่าศักย์ไฟฟ้าที่  $a(V_a)$  สูงกว่าศักย์ไฟฟ้าที่  $b(V_b)$  เมื่อประจุบวกอยู่ที่  $a$  ประจุจะเคลื่อนที่ไป  $b$  โดยแรงทางไฟฟ้า ดังนั้นจะทราบว่าประจุบวกจะเคลื่อนที่จากศักย์ไฟฟ้าสูงไปสู่ศักย์ไฟฟ้าต่ำหรือเคลื่อนที่ตามทิศของสนาม จากภาพที่ 3.12 (ข) กำหนดได้ว่าศักย์ไฟฟ้าที่  $b(V_b)$  สูงกว่าศักย์ไฟฟ้าที่  $a$  ถ้าเอาประจุไฟฟ้าไปวางไว้ในสนามไฟฟ้าประจุไฟฟ้าจะเกิดการเคลื่อนที่ทำให้เกิดพลังงานศักย์ขึ้น

### 3.7 ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากสนามไฟฟ้าคงตัว (Electric potential due to constant electric field)

#### 3.7.1 ความต่างศักย์ไฟฟ้า

ณ จุดใดๆ ในสนามไฟฟ้า คือ พลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนประจุ  $+1$  คูลอมบ์ จากจุดหนึ่งไปอีกจุดหนึ่ง และมีค่าเท่ากับผลต่างของศักย์ไฟฟ้าระหว่าง 2 จุดนั้น



ภาพที่ 3.13 ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากสนามไฟฟ้าที่คงตัว

จากภาพที่ 3.13 แผ่นตัวนำขนานสองแผ่น โดยแผ่นหนึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็นบวก อีกแผ่นหนึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็นลบ จำได้สนามไฟฟ้ามีทิศพุ่งออกจากแผ่นตัวนำที่เป็นบวกไปยังแผ่นตัวนำที่เป็นลบ ซึ่งถ้าพิจารณาศักย์ไฟฟ้าที่จุด  $a$  ไปยังจุด  $b$  จะได้ความต่างศักย์ไฟฟ้า

$$V_{ab} = V_a - V_b$$

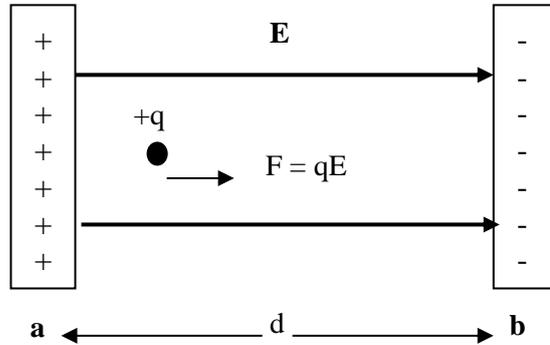
ให้  $V_{ab}$  แทน ความต่างศักย์ระหว่าง  $a$  และ  $b$  ซึ่งจะต้องใช้พลังงานในการเคลื่อนประจุ  $+q$  จาก  $b$  ไปยัง  $a$  เมื่อเคลื่อนประจุ  $+1$  คูลอมบ์ ด้วยแรงทางไฟฟ้าซึ่งเป็นแรงอนุรักษ์จะได้งานทางไฟฟ้าเกิดขึ้นซึ่งมีค่าเท่ากับความต่างศักย์ให้  $W$  คือ งานในการเคลื่อนประจุ จะได้

$$W = V_{ab} = V_a - V_b$$

ดังนั้นเมื่อเคลื่อนประจุ  $+q$  จะได้

$$\begin{aligned}
 W_{b \rightarrow a} &= qV_{ab} = q(V_a - V_b) \\
 V_{ab} &= V_a - V_b = \frac{W_{b \rightarrow a}}{q}
 \end{aligned}
 \tag{3.10}$$

เมื่อ  $W_{b \rightarrow a}$  แทน งานในการเคลื่อนประจุจาก a ไปยัง b



ภาพที่ 3.14 แรงที่กระทำต่อจุดประจุอันเนื่องมาจากสนามไฟฟ้าที่คงตัว

### 3.7.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้า

จากงานในการเคลื่อนประจุจาก b ไป a หรือ  $W_{b \rightarrow a}$  คือแรงทางไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลื่อนประจุให้เคลื่อนที่ไปได้การกระจัดที่ตำแหน่งใด ๆ จะเขียนได้ว่า

$$W_{b \rightarrow a} = F \cdot d$$

$$q(V_a - V_b) = qE \cdot d$$

$$V_a - V_b = E \cdot d$$

$$V_{ab} = E \cdot d$$

หรือ 
$$E = \frac{V}{d} \tag{3.11}$$

เมื่อ E แทน สนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นโลหะคู่ขนาน  
 V แทน ความต่างศักย์ระหว่างแผ่นโลหะ a และ b  
 d แทน ระยะห่างระหว่างแผ่นโลหะ a และ b

ตัวอย่างที่ 3.4 แบตเตอรี่รีขนาด 12 โวลต์ ต่อเข้ากับแผ่นตัวนำวางขนานกันระยะห่าง 0.3 เซนติเมตร สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ระหว่างแผ่นขนานมีความสม่ำเสมอ จงหาค่าสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นขนานนี้

วิธีทำ จาก 
$$E = \frac{|V_B - V_A|}{d} = \frac{12}{0.3 \times 10^{-2}}$$

$$= 4.0 \times 10^3 \text{ V/m}$$

**คำตอบ** ดังนั้นสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นเท่ากับ  $4.0 \times 10^3$  โวลต์/เมตร

**ตัวอย่างที่ 3.5** ประจุขนาด  $2 \mu\text{C}$  ถูกวางไว้ที่จุดกำเนิด และประจุ  $-6 \mu\text{C}$  ถูกวางที่พิกัด  $(0, 3) \text{ m}$  จงหาศักย์ไฟฟ้ารวมทั้งหมดที่เกิดจากประจุทั้งสองที่จุดจุดหนึ่งซึ่งมีพิกัด  $(4, 0) \text{ m}$

**วิธีทำ** จาก

$$V = Ed = k\left(\frac{q_1}{d_1} + \frac{q_2}{d_2}\right)$$

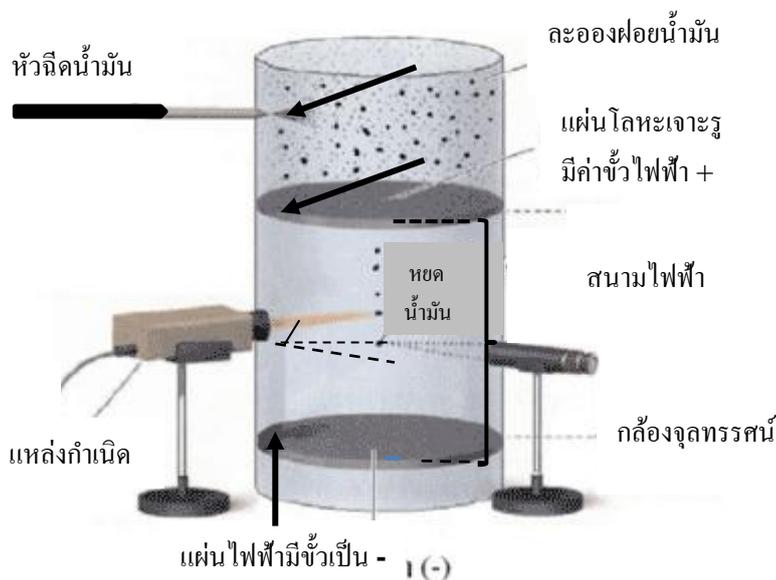
$$V = (9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{C}^2) \left( \frac{2 \times 10^{-6} \text{ C}}{4 \text{ m}} + \frac{-6 \times 10^{-6} \text{ C}}{5 \text{ m}} \right)$$

$$= -6.29 \times 10^3 \text{ V}$$

**คำตอบ** ศักย์ไฟฟ้ารวมที่เกิดจากประจุทั้งสองที่จุดซึ่งมีพิกัด  $(4, 0) \text{ m}$  เท่ากับ  $-6.29 \times 10^3$  โวลต์

### 3.7.3 การทดลองหยดน้ำมันของมิลลิแกน

โรเบิร์ต มิลลิแกน ได้ทำการทดลองในปี ค.ศ. 1909 ถึง 1913 ซึ่งเขาสามารถวัดค่าขนาดของอนุภาคมูลฐานบนอิเล็กตรอน และสาธิตความเป็นธรรมชาติของควอนตัมของประจุนี้ แผนภาพของอุปกรณ์การทดลองของเขาแสดงดังภาพที่ 3.15

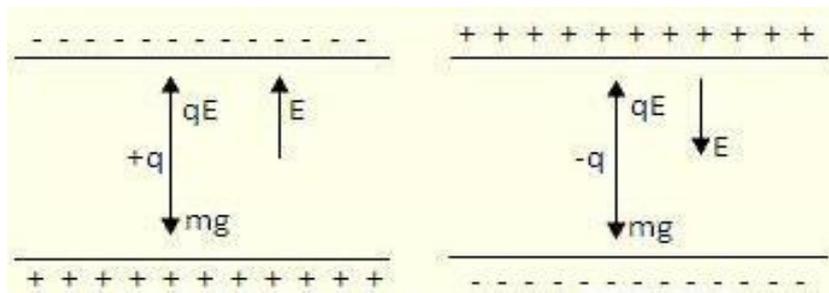


ภาพที่ 3.15 การทดลองหยดน้ำมันของมิลลิแกน

**ที่มา** : สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, ออนไลน์. เข้าถึงเมื่อ 30 มกราคม 2563

จาก <https://www.scimath.org/lesson-physics/item/7270-electron>

ซึ่งประกอบด้วยแผ่นโลหะขนานกันสองแผ่น หยคน้ำมันจากเครื่องฟั่นละอองถูกปล่อยให้เคลื่อนที่ผ่านรูเล็ก ๆ ของแผ่นโลหะแผ่นบน โดยเขาใช้รังสีเอกซ์ เพื่อทำให้อากาศในแชมเบอร์เกิดการไอออนไนซ์ ทำให้อิเล็กตรอนอิสระมาเกาะติดกับหยคน้ำมัน เป็นผลให้หยคน้ำมันเหล่านั้นมีประจุลบ เมื่อฉายลำแสงในแนวขนานไปที่หยคน้ำมันจะสามารถมองเห็นหยคน้ำมันได้จากกล้องโทรทัศน์ ซึ่งแกนของกล้องตั้งฉากกับลำแสง เมื่อมองจากกล้องในลักษณะนี้ จะทำให้เห็นหยคน้ำมัน และสามารถวัดอัตราการตกของหยคน้ำมันแต่ละหยดได้ จากการคำนวณ ให้หยคน้ำมันมีมวล  $m$  และมีประจุอยู่  $q$  และเป็นประจุลบ ถ้าไม่มีสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง แรงสองแรงที่กระทำต่อประจุ คือ แรงโน้มถ่วง  $mg$  ในทิศลง และแรงยกจากความหนาแน่นกระทำในทิศขึ้นดังภาพที่ 3.16



ภาพที่ 3.16 แสดงการหามวลของประจุอิเล็กตรอน

ที่มา : สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, ออนไลน์. เข้าถึงเมื่อ 31 มกราคม 2563 จาก <http://www.physic2u.com/Topic56/ChargeInElectricFields.html>

โดยแรงยกนั้นแปรผันตรงกับอัตราเร็วของหยคน้ำมัน เมื่อหยคน้ำมันเคลื่อนที่จนมีอัตราเร็วเข้าใกล้อัตราเร็วสุดท้าย แรงทั้งสองจะมีความสมดุลซึ่งกันและกัน เมื่อเปิดเครื่องให้มีสนามไฟฟ้าจะทำให้หยคน้ำมันเคลื่อนที่ขึ้นอย่างช้า ๆ โดยทั่วไปจะมีอัตราเร็วอยู่ที่ประมาณหนึ่งร้อยเซนติเมตรต่อวินาที ซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้กับอัตราการเคลื่อนที่ของหยคน้ำมันขณะที่ไม่มีความเร็วไฟฟ้าได้ และทำการสลับทิศการเคลื่อนที่ของหยคน้ำมันให้เคลื่อนที่ขึ้นและลง ด้วยการเปิดและปิดสนามไฟฟ้าสลับกันไป ผลการทดลองนี้ มิลลิแกนและเพื่อนร่วมงานของเขาพบว่า หยคน้ำมันทุกหยดมีประจุเกาะเป็นจำนวนมากเท่ากับเลขจำนวนเต็มคูณด้วยขนาดของประจุพื้นฐาน  $e$  โดยมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 1%

$$q = ne$$

เมื่อ  $n = 0, 1, 2, \dots$  เป็นจำนวนของอิเล็กตรอน และขนาดของอิเล็กตรอน  $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$  การทดลองของมิลลิแกนให้ผลสรุปที่เป็นหลักบานว่า ประจุมีการควอนไทซ์ ซึ่งผลงานนี้ได้รับรางวัลโนเบลสาขาวิชาฟิสิกส์ในปี ค.ศ. 1923

### 3.8 การประยุกต์ใช้หลักการของไฟฟ้าสถิต (Application of electrostatics principles)

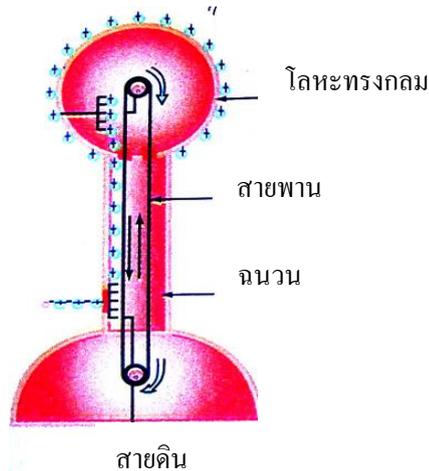
การประยุกต์ใช้หลักการเกี่ยวกับไฟฟ้าสถิตในทางปฏิบัตินั้นแสดงได้โดยอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น สายล่อฟ้า แท่นดักจับฝุ่นละออง เครื่องกำเนิดไฟฟ้า กล้องจุลทรรศน์สนาม-ไอออน และเครื่องยนต์ขับเคลื่อนจรวดโดยใช้ไอออน เป็นต้น

#### 3.8.1 แท่นดักจับฝุ่นละอองแบบไฟฟ้าสถิต (The electrostatic precipitator)

หลักสำคัญคือการคายประจุไฟฟ้าในก๊าซ อุปกรณ์นี้ทำหน้าที่ดักจับฝุ่นละอองจากการสันดาปของก๊าซเป็นผลให้มลพิษทางอากาศลดลง เครื่องดักจับฝุ่นละอองนั้นมีประโยชน์อย่างมากในโรงไฟฟ้าถ่านหินและอุตสาหกรรมที่ปล่อยควันเสียจำนวนมาก โดยตัวอุปกรณ์จะมีแท่นที่มีความต่างศักย์สูงประมาณ 40 ถึง 100 กิโลโวลต์ กระจายไว้อยู่ระหว่างเส้นลวดที่ลากลงไปจนถึงจุดศูนย์กลางของท่อและผนังของท่อ ซึ่งต่อท่อลงสายดิน ทำให้เส้นลวดมีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบเมื่อเทียบกับผนัง สนามไฟฟ้าจึงมีทิศไปยังเส้นลวด ค่าของสนามไฟฟ้าบริเวณใกล้ ๆ เส้นลวดจะมีค่าสูงพอที่จะทำให้เกิดการคายประจุรอบ ๆ เส้นลวด อากาศบริเวณใกล้ ๆ กับเส้นลวดจึงประกอบด้วยไอออนบวก กลุ่มของอิเล็กตรอนและไอออนลบอย่างเช่น อากาศจะถูกทำให้สะอาดขึ้นโดยการเข้าไปในเครื่องดักจับฝุ่นและเคลื่อนที่เข้าใกล้เส้นลวด เมื่ออิเล็กตรอนและไอออนลบที่เกิดจากการคายประจุถูกเร่งให้เคลื่อนที่ไปที่ผนังด้านนอกโดยสนามไฟฟ้า อนุภาคสิ่งสกปรกในอากาศจะเกิดการชาร์จประจุ เนื่องจากการชนและการจับกันกับไอออนเพราะว่าอนุภาคสิ่งสกปรกที่ถูกชาร์จประจุส่วนใหญ่เป็นประจุลบ จึงถูกดึงให้เข้าหาผนังเครื่องดักจับฝุ่นโดยสนามไฟฟ้า เมื่อเขย่าท่ออย่างเป็นจังหวะมีคาบที่แน่นอนจะทำให้อนุภาคหลุดร่อนออกจากผนังและร่วงหล่นลงไปที่ภาชนะรองรับด้านล่าง

#### 3.8.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ แวน เดอ แกรฟฟ์ (The Van de Graaff Generator)

ในปี ค.ศ. 1929 โรเบิร์ต แวน เดอ แกรฟฟ์ ใช้หลักการที่ตัวนำที่ถูกชาร์จประจุถูกนำมาสัมผัสกับผิวด้านในของตัวนำกลวง ประจุทุกตัวที่อยู่บนตัวนำที่ถูกชาร์จจะถูกถ่ายโอนไปยังตัวนำกลวง ทำให้ประจุบนตัวนำกลวงและศักย์ไฟฟ้าของมันสามารถทำให้เพิ่มขึ้นได้ไม่จำกัด โดยเขาได้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้ได้ถูกใช้ในงานวิจัยทางนิวเคลียร์ฟิสิกส์อย่างกว้างขวาง โดยประจุถูกส่งอย่างต่อเนื่องไปยังขั้วอิเล็กโทรดที่มีศักย์ไฟฟ้าสูง โดยการเคลื่อนที่ของสายพานที่ทำจากวัสดุที่เป็นฉนวน ขั้วไฟฟ้าสูงนี้ทำมาจากโลหะกลวงรูปโดมที่ยึดติดอยู่กับเสาที่เป็นฉนวน ดังภาพที่ 3.17



ภาพที่ 3.17 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแวนเดอแกรฟฟ์

ที่มา: ญัฐกานต์ วงศ์ใหญ่, ออนไลน์. เข้าถึงเมื่อ 5 เมษายน 2563 จาก

<https://sites.google.com/site/fisiksthudey/fifasthit/snam-fifa>

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบนี้สามารถสร้างความต่างศักย์ได้มากถึง 20 ล้าน โวลต์ การเร่งโปรตอนให้เคลื่อนที่ผ่านความต่างศักย์ที่มากเช่นนี้ทำให้เกิดพลังงานมากพอที่จะไปจุดให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ระหว่างโปรตอนเหล่านั้นกับเป้าที่เป็นนิวไคลด์ชนิดต่าง ๆ ได้ ส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดย่อมลงมาส่วนใหญ่เราจะเห็นในห้องเรียนวิทยาศาสตร์

### 3.9 กระแสไฟฟ้า (Electric current)

เมื่ออิเล็กตรอนซึ่งเป็นอนุภาคมีประจุลบ เคลื่อนที่ผ่านจุดใด ๆ ในหนึ่งหน่วยเวลาจะทำให้เกิดปริมาณกระแสไฟฟ้าขึ้นซึ่งเขียนเป็นความสัมพันธ์ตามสมการอนุพันธ์ได้คือ

$$I = \frac{dq}{dt} \quad (3-12)$$

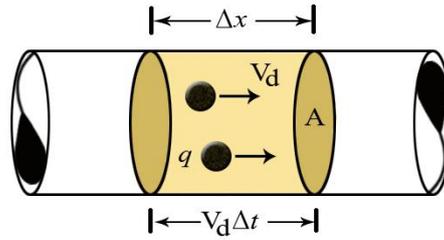
เมื่อ  $I$  คือ กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์, A)

$q$  คือ ประจุไฟฟ้า (คูลอมบ์, C)

$t$  คือ เวลา (วินาที, s)

จากสมการ (3-12) จะได้นิยามของกระแสไฟฟ้าคือ คูลอมบ์ต่อวินาทีหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า แอมแปร์ สำหรับทิศทางการของกระแสไฟฟ้านั้นจะมีทิศตามประจุบวกหรือมีทิศตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของประจุลบ

พิจารณาจากภาพที่ 3.18 เมื่ออิเล็กตรอนอิสระเคลื่อนที่ในวัสดุตัวนำไฟฟ้าที่มีพื้นที่หน้าตัด  $A$  ในเวลา  $\Delta t$



ภาพที่ 3.18 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในตัวนำไฟฟ้า

จากภาพเรียกความเร็วเฉลี่ยที่อิเล็กตรอนอิสระทั้งหมดใช้ในการเคลื่อนที่ไปว่า ความเร็วลอยเลื่อนของอิเล็กตรอน,  $v_d$  ดังนั้น จะได้ว่าระยะที่ประจุเคลื่อนที่ได้  $\Delta x$  ในหนึ่งหน่วยเวลา  $\Delta t$  คือ

$$\Delta x = v_d \Delta t \quad (3-13)$$

ถ้าพิจารณาประจุ  $dq$  ที่ไหลภายในตัวนำนี้ในช่วงเวลาสั้นๆ  $dt$  เมื่อเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หน้าตัด  $A$  สามารถเขียนให้อยู่ในรูปอนุพันธ์ได้เป็น

$$dq = neV_d A dt \quad (3-14)$$

- เมื่อ
- $n$  คือ จำนวนอิเล็กตรอน
  - $e$  คือ ขนาดของประจุอิเล็กตรอน (คูลอมบ์, C)
  - $A$  คือ พื้นที่หน้าตัด (ตารางเมตร,  $m^2$ )
  - $V_d$  คือ ความเร็วลอยเลื่อน (เมตรต่อวินาที, m/s)

ดังนั้น จะได้จำนวนกระแสไฟฟ้าที่เคลื่อนที่สัมพันธ์กับความเร็วลอยเลื่อนคือ

$$I = \frac{dq}{dt} = nev_d A \quad (3-15)$$

ตัวอย่างที่ 3.5 จงหากระแสที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของประจุเป็นฟังก์ชันกับเวลา  $q = 5t^2 + 2t + 1$  ที่เวลา 2 วินาที

วิธีทำ จากสมการ

$$I = \frac{dq}{dt}$$

จะได้

$$I = \frac{d(5t^2 + 2t + 1)}{dt}$$

ที่ 2 วินาที

$$I = 10t + 2$$

$$I = 10(2) + 2$$

$$I = 22 \text{ A}$$

**คำตอบ** ดังนั้นกระแสไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับ 22 แอมแปร์

### 3.10 กฎของโอห์ม (Ohm's law)

วัสดุต่างๆ จะมีคุณสมบัติของการนำไฟฟ้าได้แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับจำนวนอิเล็กตรอนอิสระที่สามารถเคลื่อนที่ได้ภายในเนื้อวัสดุนั้นๆ โอห์มได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของวัสดุ โดยการหาความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในวัสดุที่มีความเป็นฉนวนไฟฟ้า ซึ่งฉนวนนั้นเป็นวัสดุที่ไม่ยอมให้กระแสไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่าน หรืออิเล็กตรอนอิสระเคลื่อนที่ผ่านได้ยาก โดยพบว่าเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าจะได้ว่ากระแสไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง และจะได้ค่าคงตัวของสมการเป็นความต้านทานของวัสดุนั้นๆ ดังสมการ

$$R = \frac{V}{I} \quad (3-16)$$

เมื่อ

$I$  คือ กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์, A)

$V$  คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์, V)

$R$  คือ ความต้านทานไฟฟ้า (โอห์ม,  $\Omega$ )

ค่าผกผันของความต้านทานไฟฟ้าเรียกว่า *ความนำไฟฟ้า* (Conductivity, G มีหน่วยเป็นซีเมนส์, S) หรือเขียนเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ได้คือ

$$G = \frac{1}{R} = \frac{I}{V} \quad (3-17)$$

พิจารณาถ้าให้ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านวัสดุตัวนำที่มีความยาว  $l$  และพื้นที่หน้าตัด  $A$  ภายใต้ความต่างศักย์ไฟฟ้า  $V$  เราสามารถหาค่าสนามไฟฟ้าในลวดตัวนำ คือ

$$E = \frac{V}{l} \quad (3-18)$$

เมื่อ  $J$  คือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเมตร) จะได้ว่า

$$J = \frac{I}{A} \quad (3-19)$$

จากสมการ (3-18) และกฎของโอห์ม แทนลงในสมการ (3-19) จะได้

$$J = \frac{\ell}{RA} E \quad (3-20)$$

และได้ความสัมพันธ์ระหว่าง J และ E ดังนี้

$$J = \sigma E \quad (3-21)$$

เมื่อ  $\sigma$  คือ ค่าคงตัวเรียกสภาพนำไฟฟ้า (Conductivity, หน่วยเป็นโอห์ม<sup>-1</sup>เมตร<sup>-1</sup>)

$$\sigma = \frac{\ell}{RA} \quad (3-22)$$

จะได้

$$R = \frac{\ell}{\sigma A} \quad (3-23)$$

และส่วนกลับของสภาพนำไฟฟ้าเรียกว่า *สภาพต้านทานไฟฟ้า* (Resistivity, หน่วยเป็นโอห์ม) เขียนได้ดังสมการ

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (3-24)$$

ดังนั้น

$$R = \rho \frac{\ell}{A} \quad (3-25)$$

เมื่อ  $\rho$  คือ สภาพความต้านทานไฟฟ้า (โอห์ม.เมตร,  $\Omega \cdot m$ )

สภาพต้านทานของตัวนำไฟฟ้าของวัสดุบางชนิด แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สภาพต้านทานไฟฟ้าของวัสดุตัวนำบางชนิด

วัสดุ	สภาพความต้านทานไฟฟ้า ( $\Omega \cdot m$ )
เงิน	$1.47 \times 10^{-8}$
ทองแดง	$1.72 \times 10^{-8}$
ทอง	$2.44 \times 10^{-8}$
อะลูมิเนียม	$2.75 \times 10^{-8}$
เหล็กกล้า	$10 \times 10^{-8}$
ตะกั่ว	$22 \times 10^{-8}$
ปรอท	$95 \times 10^{-8}$

ที่มา : ปิยพงษ์ สุทธิคง, 2548.

ตัวอย่างที่ 3.6 จงหาความต้านทานไฟฟ้าในขดลวดทองแดงความยาว 50 เซนติเมตร มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 2 ตารางเมตร

วิธีทำ จากสมการ

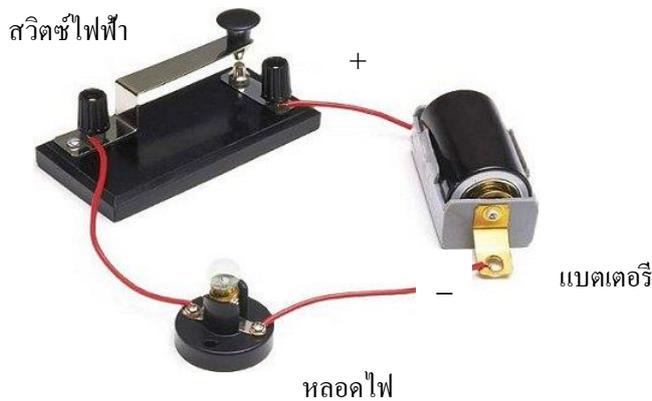
$$R = \rho \frac{\ell}{A}$$

$$R = 1.7 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m} \times \frac{0.5 \text{ m}}{2 \text{ m}^2}$$

คำตอบ ความต้านทานไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ  $0.425 \times 10^{-8}$  โอห์ม

### 3.11 แรงเคลื่อนไฟฟ้า (Electromotive force)

แรงเคลื่อนไฟฟ้าเป็นค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เราใช้เรียกกรณีพิจารณาความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นที่แหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า โดยเราสามารถพิจารณาการต่อวงจรไฟฟ้าอย่างง่ายกับตัวต้านทาน (R) หรือในวงจรจะใช้หลอดไฟแทนตัวต้านทาน และแบตเตอรี่ที่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้า ( $\mathcal{E}$ ) และมีความต้านทานภายในของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า  $r$  ดังภาพที่ 3.19



ภาพที่ 3.19 วงจรไฟฟ้าอย่างง่าย

โดยเราสามารถหาสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า ความต้านทาน และแรงเคลื่อนไฟฟ้าได้จากดังนี้

$$V = \mathcal{E} - Ir \quad (3-26)$$

เนื่องจาก

$$V = IR \quad (3-27)$$

ดังนั้นจะได้

$$IR = \mathcal{E} - Ir \quad (3-28)$$

หรือ

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R+r} \quad (3-29)$$

สมการ (3-29) หมายความว่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรหาได้จากการหาอัตราส่วนของแรงเคลื่อนไฟฟ้ากับผลรวมของความต้านทานภายในของแบตเตอรี่และความต้านทานในวงจร

### 3.12 กำลังไฟฟ้า (Electric power)

เมื่อไฟฟ้าไหลผ่านตัวต้านทานจะเกิดการสูญเสียพลังงานให้กับตัวต้านทานนั้น เราเรียกการสูญเสียพลังงานนี้ว่า กำลังไฟฟ้า โดยกำลังไฟฟ้าหาได้จากสมการ

$$P = IV \quad (3-30)$$

$$P = I^2R \quad (3-31)$$

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (3-32)$$

**ตัวอย่างที่ 3.7** จงหากำลังไฟฟ้าที่เกิดจากการปล่อยกระแสไฟฟ้าขนาด 5 แอมแปร์ ไหลในขดลวดที่มีความต้านทาน 2 โอห์ม ที่มีความต้านทาน

**วิธีทำ** จากสมการ

$$P = I^2R$$

จะได้

$$P = (5)^2(2)$$

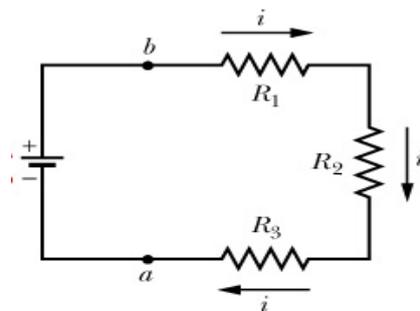
**คำตอบ** ได้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 50 วัตต์

### 3.13 การต่อตัวต้านทานไฟฟ้า (Resistors in circuit)

ความต้านทานไฟฟ้าคือ ความสามารถในการต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าในตัวนำไฟฟ้า โดยการต่อตัวต้านทานไฟฟ้ามีวิธีการต่อตัวต้านทานสองแบบคือ แบบขนานและแบบอนุกรม

#### 3.13.1 การต่อแบบอนุกรม (Series circuit)

ลักษณะการต่อแบบอนุกรมเป็นดังภาพที่ 3.20



ภาพที่ 3.20 การต่อตัวต้านทานแบบอนุกรม

ลักษณะของการต่อตัวต้านทานแบบอนุกรม

1. กระแสที่วิ่งผ่านตัวต้านทานจะมีค่าเท่ากันทุกจุดและมีค่าเท่ากับกระแสรวม
2. ความต่างศักย์รวมมีค่าเท่ากับผลรวมของความต่างศักย์ที่ตัวต้านทานทุกตัวรวมกันหรือ

$$V_{tot} = V_1 + V_2 + V_3 \quad (3-33)$$

3. จากสมการ (3-33) และกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการต่ออนุกรม จะได้

$$V_{tot} = I(R_1 + R_2 + R_3 + \dots)$$

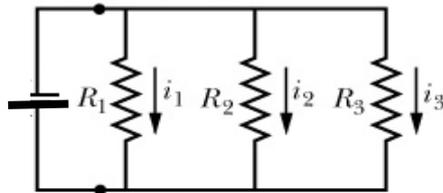
$$IR_{tot} = I(R_1 + R_2 + R_3)$$

ดังนั้นความต้านทานรวมในวงจรจึงมีค่าเท่ากับผลรวมของความต้านทานทั้งหมด

$$R_{tot} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots \quad (3-34)$$

### 3.13.2 การต่อแบบขนาน (Parallel circuit)

ลักษณะของการต่อแบบขนานเป็นไปตามภาพที่ 3.21



ภาพที่ 3.21 การต่อตัวต้านทานแบบขนาน

ลักษณะการต่อตัวต้านทานแบบขนาน

1. ความต้านทานรวมในวงจรหาได้จากสมการ

$$I = I_1 + I_2 + I_3 \quad (3-35)$$

$$I = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} + \frac{V}{R_3} \quad (3-36)$$

$$I = V\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}\right) = \frac{V}{R_{tot}} \quad (3-37)$$

นั่นก็จะได้

$$\frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots \quad (3-38)$$

2. ความต่างศักย์ไฟฟ้ามี่ค่าเท่ากันทุกจุดและมีค่าเท่ากับความต่างศักย์รวม
3. กระแสไฟฟ้ารวมในวงจรหาได้ตามสมการ

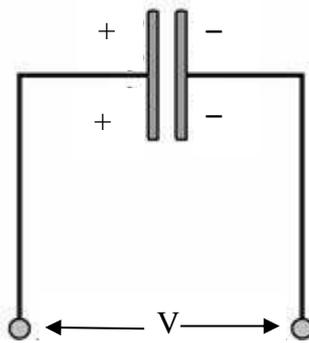
$$I = \frac{V}{R_{tot}} \quad (3-38)$$

### 3.14 ตัวเก็บประจุ (Capacitor)

ตัวเก็บประจุ เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เก็บสะสมประจุไฟฟ้า โดยพิจารณาดำนำสองตัวที่เป็นแผ่นขนานกัน ภายใต้ปรากฏการณ์สมดุลสถิตถ้าตัวนำไฟฟ้าทั้งสองมีประจุไฟฟ้าขนาดเท่ากันแต่เป็นประจุตรงข้ามกัน จะเกิดความต่างศักย์ระหว่างตัวนำทั้งสอง โดยหากกำหนดปริมาณของประจุที่อยู่บนแผ่นตัวนำของตัวเก็บประจุที่มีความต่างศักย์ค่าหนึ่ง ปริมาณประจุ  $Q$  ที่อยู่บนตัวนำแปรผันตรงกับความต่างศักย์ระหว่างตัวนำทั้งสอง โดยค่าคงที่ของการแปรผันขึ้นกับรูปร่างและระยะห่างของตัวนำ จึงนิยามความหมายของความจุไฟฟ้า ได้ว่าตัวเก็บประจุจะมีความจุไฟฟ้าเป็นอัตราส่วนระหว่างขนาดของประจุที่อยู่บนตัวนำตัวใดตัวหนึ่งต่อขนาดความต่างศักย์ระหว่างตัวนำ

$$C = \frac{Q}{V} \quad (3.39)$$

ความจุมีหน่วยเป็นคูลอมบ์ต่อโวลต์ แต่เพื่อเป็นเกียรติให้แก่ไมเคิล ฟาราเดย์ ความจุไฟฟ้าจึงใช้เป็นฟารัด (Farad, F) ซึ่งในทางปฏิบัติความจุไฟฟ้าจะอยู่ในช่วงไมโครฟารัดถึงพิโกฟารัด สำหรับตัวเก็บประจุที่สร้างจากแผ่นตัวนำขนานดังภาพที่ 3.22



ภาพที่ 3.22 ตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน

#### 3.14.1 การคำนวณหาค่าความจุไฟฟ้า

ในสถานการณ์ปกติทั่วไปตัวเก็บประจุจะประกอบด้วยตัวนำสองตัว อย่างไรก็ตามตัวนำชนิดเดียวก็มีความจุไฟฟ้าได้เช่นกัน เช่น ความจุไฟฟ้าของทรงกลมที่ถูกชาร์จประจุจะแปรผันตรงกับรัศมีของทรงกลม  $a$  และไม่ขึ้นกับทั้งประจุที่อยู่บนทรงกลมและความต่างศักย์ ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ

$$C = \frac{Q}{kQ/a} = \frac{a}{k}$$

สำหรับตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน หากให้แผ่นโลหะมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากันเท่ากับ  $A$  อยู่ห่างกันเป็นระยะ  $d$  แต่ละแผ่นมีความหนาแน่นประจุเชิงผิว  $\sigma = \frac{Q}{A}$  ถ้าแผ่นโลหะทั้งสองอยู่ใกล้กันมากๆ

เราสามารถประมาณได้ว่าสนามไฟฟ้าที่อยู่ระหว่างแผ่นโลหะมีความสม่ำเสมอและมีค่าเป็นศูนย์ที่บริเวณอื่นนอกเหนือจากนี้ ค่าสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นโลหะมีค่าเป็น

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{Q}{\epsilon_0 A} \tag{3-40}$$

เพราะว่าสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นโลหะมีความสม่ำเสมอ ขนาดของความต่างศักย์ระหว่างแผ่นโลหะจึงมีค่าเป็น  $Ed$  จะได้ว่า

$$V = Ed = \frac{Qd}{\epsilon_0 A}$$

ดังนั้น

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d} \tag{3-41}$$

### 3.14.2 การต่อตัวเก็บประจุแบบต่างๆ

ตัวอย่างภาพของตัวเก็บประจุ แบตเตอรี่ และสวิตช์ เป็นดังภาพที่ 3.23 สำหรับต่อในวงจรอิเล็กทรอนิกส์



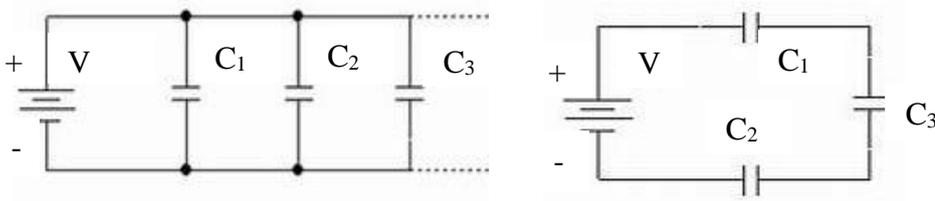
(ก) ตัวเก็บประจุ

(ข) แบตเตอรี่

(ค) สวิตช์

ภาพที่ 3.23 สัญลักษณ์ที่ใช้ในวงจร (ก) ตัวเก็บประจุ (ข) แบตเตอรี่ และ (ค) สวิตช์

โดยสัญลักษณ์ของตัวเก็บประจุสะท้อนให้เห็นถึงการวางตัวทางเรขาคณิตของตัวเก็บประจุแบบขนานซึ่งเป็นแบบทั่วไป ภาพที่ 3.24 เป็นภาพการต่อตัวเก็บประจุ (ก) แบบขนาน (ข) แบบอนุกรม



(ก) แบบขนาน

(ข) แบบอนุกรม

ภาพที่ 3.24 การต่อตัวเก็บประจุ (ก) แบบขนาน และ (ข) แบบอนุกรม

การต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน พิจารณาความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุแต่ละตัวจะมีค่าเท่ากัน และมีค่าเท่ากับความต่างศักย์ที่ตกคร่อมจุดที่ตัวเก็บประจุทั้งสองต่อกันอยู่สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$C_{รวม} = C_1 + C_2 + \dots \quad (3-42)$$

สำหรับการต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรมผลรวมของความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุแต่ละตัวสามารถคำนวณหาค่าความจุไฟฟ้ารวมได้ดังนี้

$$\frac{1}{C_{รวม}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots \quad (3-43)$$

### 3.14.3 พลังงานที่สะสมอยู่ในตัวเก็บประจุ

ในวงจรไฟฟ้าแบบเตอริจะสร้างสนามไฟฟ้าในเส้นลวดตัวนำและขาร์จประจุ โดยประจุจะเคลื่อนที่ระหว่างเส้นลวดกับตัวเก็บประจุ จะทำให้เกิดการถ่ายโอนพลังงานในระบบ นั่นคือ ก่อนที่สวิตช์จะถูกสับปิดลง พลังงานศักย์ในรูปของพลังงานศักย์เคมีจะถูกเก็บสะสมอยู่ในแบตเตอรี่ ซึ่งพลังงานนี้ถูกถ่ายโอนระหว่างการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น พลังงานศักย์เคมีบางส่วนในแบตเตอรี่จะถูกถ่ายโอนไปเป็นพลังงานศักย์ไฟฟ้าที่สอดคล้องกับระยะห่างของประจุบวกและประจุลบบนแผ่นตัวนำ งานที่กระทำในการขาร์จประจุให้กับตัวเก็บประจุจะอยู่ในรูปของพลังงานศักย์ไฟฟ้า  $U_E$  ที่เก็บสะสมอยู่ในตัวเก็บประจุ เราสามารถแสดงพลังงานศักย์ไฟฟ้าที่เก็บสะสมอยู่ในตัวเก็บประจุหลังจากถูกขาร์จประจุแล้วคือ

$$U_E = \frac{Q^2}{2C} = \frac{1}{2} QV = \frac{1}{2} CV^2 \quad (3-44)$$

ซึ่งสามารถใช้สมการดังกล่าวนี้ประยุกต์ใช้ได้กับตัวเก็บประจุใดๆ ก็ได้ ไม่ว่าตัวเก็บประจุนั้นจะมีการจัดเรียงตัวแบบใดก็ตาม สำหรับตัวเก็บประจุที่สนใจ พลังงานที่สะสมอยู่ภายในตัวเก็บประจุจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อประจุและความต่างศักย์มีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับข้อจำกัดในทางปฏิบัติของพลังงานที่สะสมอยู่ในตัวเก็บประจุเมื่อค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ามักพอที่จะคายประจุขึ้นระหว่างแผ่นตัวนำสองแผ่น ดังนั้นจึงมักจะเห็นว่าตัวเก็บประจุส่วนใหญ่จะระบุค่าความต่างศักย์สูงสุดที่เหมาะสมกับการใช้งานเอาไว้เสมอ โดยสามารถพิจารณาได้ว่าพลังงานที่สะสมอยู่ในตัวเก็บประจุนั้นถูกเก็บสะสมอยู่ในสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นอยู่ระหว่างแผ่นตัวนำเมื่อตัวเก็บประจุถูกขาร์จประจุเข้าไป หากพิจารณาสนามไฟฟ้าที่อยู่ในปริมาตรของแผ่นตัวนำสองแผ่น ซึ่งปริมาตรนี้มีค่าเท่ากับ  $Ad$  ซึ่งคือพื้นที่หน้าตัดคูณกับความยาวของแผ่นตัวนำ โดยถ้าเราให้  $u_E$  เป็น พลังงานต่อหน่วยปริมาตรหรือความหนาแน่นพลังงาน นั่นคือ

$$u_E = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 \quad (3-45)$$

โดยทั่วไปสมการนี้สามารถใช้ได้โดยไม่ขึ้นกับแหล่งกำเนิดสนามไฟฟ้า นั่นคือที่จุดใดๆ ความหนาแน่นพลังงานในสนามไฟฟ้าใดๆ นั้นแปรผันตรงกับขนาดของสนามไฟฟ้ายกกำลังสอง

#### 3.14.4 ชนิดของตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุหากเราต้องการเพิ่มค่าความจุไฟฟ้าสามารถทำได้โดยการสอดแผ่นตัวกลางไดอิเล็กตริกคั่นกลางเข้าไประหว่างแผ่นตัวนำ โดยสารไดอิเล็กตริก คือ วัสดุที่ไม่นำไฟฟ้า เช่น ยาง แก้ว หรือกระดาษอบมัน เป็นต้น สำหรับตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน เราสามารถเขียนสมการได้เป็น

$$C = \kappa \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad (3-46)$$

โดยค่า  $\kappa$  นี้เรียกว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุ (dielectric constant) ซึ่งวัสดุแต่ละชนิดจะมีค่าแตกต่างกันไปตามชนิดของวัสดุ

ตัวเก็บประจุจำนวนมากถูกสร้างมาให้อยู่ในรูปของแผ่นวงจรรวม แต่อุปกรณ์ไฟฟ้าบางอย่างก็ยังคงใช้ตัวเก็บประจุแบบเดี่ยวอยู่ ส่วนใหญ่ที่เราพบตัวเก็บประจุมักทำมาจากแผ่นโลหะบางๆ ที่คั่นด้วยแผ่นไดอิเล็กตริกที่ทำจากกระดาษเคลือบฟาราฟิน หากเป็นตัวเก็บประจุขนาดเล็กก็มักจะทำมาจากวัสดุที่เป็นเซรามิก ตัวเก็บประจุนอกชนิดหนึ่งคือตัวเก็บประจุแบบอิเล็กทรอนิกส์ มักใช้กับงานเก็บประจุที่มีปริมาณมากที่ศักย์ไฟฟ้าสัมพัทธ์ต่ำ นอกจากนี้ยังมีตัวเก็บประจุแบบปรับค่าความจุได้ ตัวอย่างภาพตัวเก็บประจุแบบเซรามิก และแบบอิเล็กทรอนิกส์ดังภาพที่ 3.25



ก) ตัวเก็บประจุแบบเซรามิก



ข) ตัวเก็บประจุแบบอิเล็กทรอนิกส์

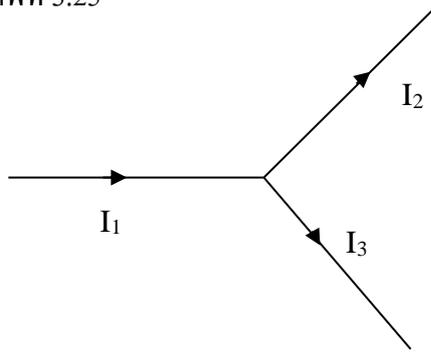
ภาพที่ 3.25 ภาพตัวเก็บประจุแบบเซรามิกและแบบอิเล็กทรอนิกส์

### 3.15 กฎของเคอร์ชอฟ (Kirchhoff's law)

ในเรื่องของการต่อตัวต้านทานนั้นถ้าตัวต้านทานที่นำมาต่อกันมีหลายตัวทำให้เกิดความสลับซับซ้อนซึ่งเราสามารถคำนวณหาค่ากระแสหรือความต่างศักย์ในวงจรได้ง่ายโดยใช้กฎของเคอร์ชอฟ ซึ่งมี 2 ข้อ คือ

1. ที่จุดรวมใดๆ ในวงจรไฟฟ้า ผลรวมของกระแสไฟฟ้าที่จุดนี้มีค่าเท่ากับศูนย์ หรือกระแสไฟฟ้าไหลเข้ามีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าไหลออก

พิจารณาจากภาพที่ 3.25



ภาพที่ 3.25 ลักษณะของกระแสไฟฟ้าไหลเข้าเท่ากับกระแสไฟฟ้าไหลออก  
จะได้สมการตามกฎข้อที่ 1 ของเคอร์ชอฟคือ

$$\sum I_{\text{tot}} = 0 \quad (3-47)$$

หรือ

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0$$

2. ผลรวมของแรงเคลื่อนไฟฟ้าในวงจรปิดใดๆ มีค่าเท่ากับผลรวมของความต่างศักย์ใน  
วงจรมานั้น หรือเขียนเป็นสมการได้คือ

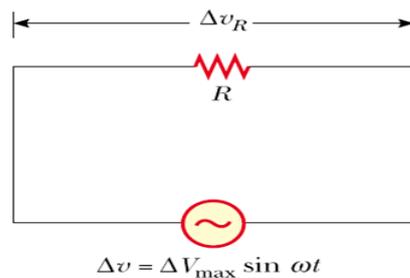
$$\sum E = \sum V \quad (3-48)$$

### 3.16 ไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternative current)

อุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าที่ใช้กันอยู่ในบ้านทุกวันนี้ล้วนใช้ไฟฟ้ากระแสสลับทั้งสิ้น  
ไฟฟ้ากระแสสลับมีลักษณะการไหลของกระแสไฟฟ้าที่สลับทิศทางตลอดเวลา โดยจะมีค่า  
ขณะหนึ่งที่เป็นศูนย์จากนั้นจะเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดในทิศทางบวกแล้วลดลงกลับมาเป็นศูนย์อีก  
ต่อจากนั้นก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นอีกจนถึงค่าสูงสุดแต่มีทิศทางลบวนสลับกันไปมาตลอดเวลา ถ้าไฟฟ้า  
กระแสสลับมีความถี่คงที่ กระแสไฟฟ้าที่ไหลก็จะเปลี่ยนทิศทางคงที่ตามไปด้วย

#### 3.16.1 ความต้านทานในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ

สำหรับความต้านทานไฟฟ้าในวงจรกระแสสลับนั้นสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 3.25



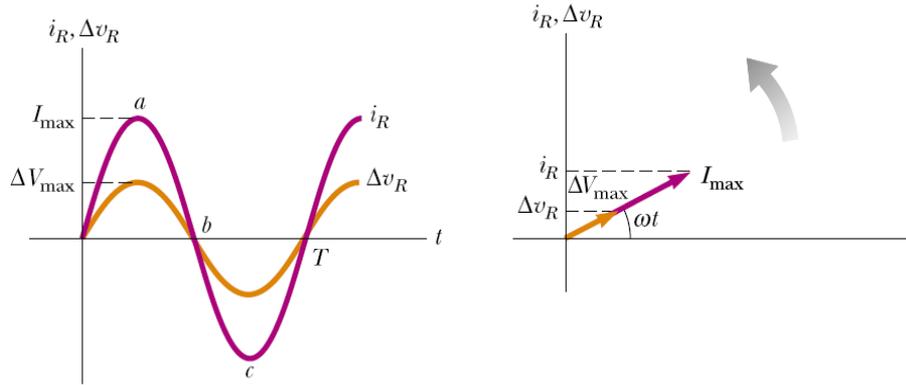
ภาพที่ 3.25 ความต้านทานไฟฟ้าในวงจรกระแสสลับ

ซึ่งให้  $v_m$  เป็นค่าแอมพลิจูดของความต่างศักย์ หรือค่าความต่างศักย์ที่มากที่สุด จะเขียนความต่างศักย์ตกคร่อมตัวต้านทาน ได้เป็น

$$v_R = v_m \sin(\omega t) \tag{3-49}$$

$$i_R = \frac{v_m}{R} = I_m \sin(\omega t) \tag{3-50}$$

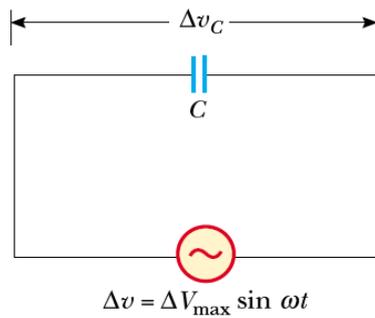
สำหรับลักษณะเฟสของความต่างศักย์ไฟฟ้ากับกระแสจะมีเฟสตรงกับกระแสดังภาพที่ 3.26



ภาพที่ 3.26 (ก) กระแสและความต่างศักย์ (ข) มุมเฟสระหว่างกระแสกับความต้านทานไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ

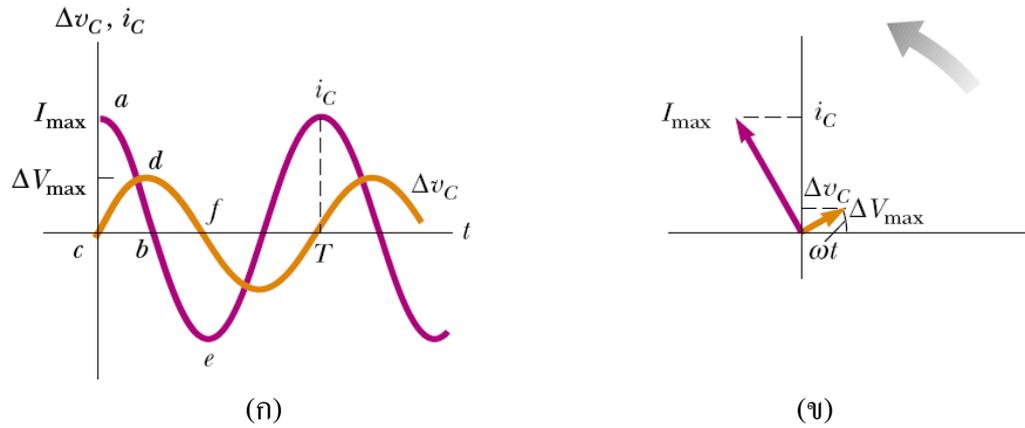
### 3.16.2 ตัวเก็บประจุในไฟฟ้ากระแสสลับ

สำหรับตัวเก็บประจุไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับนั้นจะเป็น ไปดังภาพที่ 3.27



ภาพที่ 3.27 ตัวเก็บประจุไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ

โดยจะสามารถพบว่ากระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์จะมีเฟสไม่ตรงกัน นั่นคือ เฟสของกระแสไฟฟ้าจะนำความต่างศักย์อยู่ 90 องศา ดังภาพที่ 3.28



ภาพที่ 3.28 (ก) เฟสของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ที่ตัวเก็บประจุ  
(ข) มุมเฟสระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ที่ตัวเก็บประจุ

พิจารณาจากสมการ

$$v = v_m \sin(\omega t)$$

เนื่องจาก

$$C = \frac{q}{v}$$

ดังนั้น

$$q = CV$$

$$q = CV_m \sin(\omega t)$$

$$I_C = \frac{dq}{dt} = \frac{d(CV_m \sin(\omega t))}{dt}$$

$$= CV_m \omega (\cos \omega t)$$

$$I_C = \frac{V_m}{\frac{1}{\omega C}} (\cos \omega t)$$

เปรียบเทียบกับสมการกระแสที่ผ่านตัวต้านทาน R เขียนได้เป็น

$$I_R = V_m = I_m \sin(\omega t)$$

จะได้ความต้านทานที่เกิดจากตัวเก็บประจุ ( $X_C$ ) ซึ่งเป็นค่าความต้านทานความจุ (capacitive reactance) มีหน่วยเป็น โอห์ม คือ

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \quad (3-51)$$

จากสมการ

$$I_C = \frac{V_m}{\frac{1}{\omega C}} (\cos \omega t) = I_m \cos(\omega t)$$

หรือ

$$I_C = I_m (\sin \omega t + \frac{\pi}{2}) \quad (3-52)$$

**ตัวอย่างที่ 3.8** จงหาความต้านทานของประจุไฟฟ้าขนาด  $10 \mu\text{C}$  เมื่อนำไปต่อในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ ที่มีความถี่  $50 \text{ Hz}$

**วิธีทำ** จากสมการ  
เนื่องจาก

$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$

$$\omega = 2\pi f$$

$$\omega = (2)(3.14)(50)$$

$$\omega = 31.4 \text{ rad/s}$$

จะได้

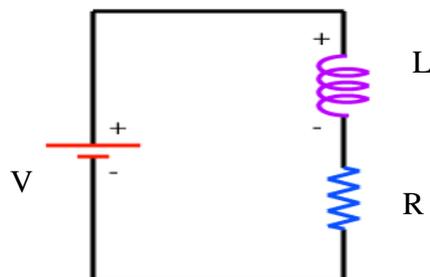
$$X_C = \frac{1}{(31.4)(10 \times 10^{-6})}$$

$$X_C = 311.4 \times 10^6 \Omega$$

**คำตอบ** ความต้านทานของประจุไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ  $311.4 \times 10^6$  โอห์ม

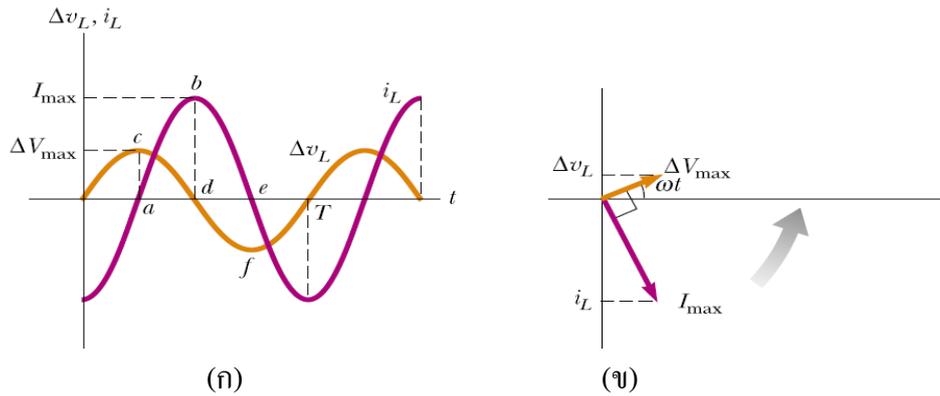
### 3.16.3 ขดลวดเหนี่ยวนำในวงจรไฟฟ้า

ขดลวดเหนี่ยวนำคือ ขดลวดที่นำมาต่อเข้าในวงจร RL กับวงจรไฟฟ้ากระแสตรง โดยไม่คิดความต้านทานภายในของขดลวด ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดมีหน่วยเป็น เฮนรี (H) สำหรับสัญลักษณ์ขดลวดตัวนำในวงจรจะเป็นดังภาพที่ 3.29



ภาพที่ 3.29 ขดลวดเหนี่ยวนำในวงจรไฟฟ้ากระแสตรง RL

เมื่อมีความต่างศักย์ไฟฟ้าที่คร่อมขดลวดตัวนำจะมีการนำกระแสไฟฟ้าอยู่  $90$  องศา ดังภาพที่ 3.30



ภาพที่ 3.30 (ก) เฟสของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ที่ขดลวดตัวนำ  
(ข) มุมเฟสระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ที่ขดลวดตัวนำ

พิจารณาจากกฎของเคอร์ชอฟฟ์ ใช้ค่าความต่างศักย์ภายในวงจร  $V = V_L$  เมื่อ  $L$  คือค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำจะได้

$$V = \frac{dI}{dt} L$$

และ

$$v = V_m \sin(\omega t)$$

จะได้

$$\frac{dI}{dt} L = V_m \sin(\omega t)$$

$$dI = \frac{V_m}{L} \sin(\omega t) dt$$

$$\int dI = \int \frac{V_m}{L} \sin(\omega t) dt$$

$$I = -\frac{V_m}{\omega L} \cos(\omega t)$$

$$I = -I_m \cos(\omega t) = I_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$$

เมื่อเปรียบเทียบกับสมการ

$$I_R = \frac{V_m}{R} = I_m \sin(\omega t)$$

จะได้ความต้านทานที่เกิดจากขดลวดเหนี่ยวนำ ( $X_L$ ) คือ

$$X_L = \omega L \tag{3-53}$$

**ตัวอย่างที่ 3.9** จงหาความต้านทานที่เกิดจากการนำขดลวดเหนี่ยวนำขนาด 2 mH ไปต่อกับ วงจรไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่กระแสไฟฟ้า 50 Hz

**วิธีทำ** จากสมการ

$$X_L = \omega L$$

และ

$$\omega = 2\pi f$$

จะได้

$$\omega = (2)(3.14)(50)$$

$$= 31.4 \text{ rad/s}$$

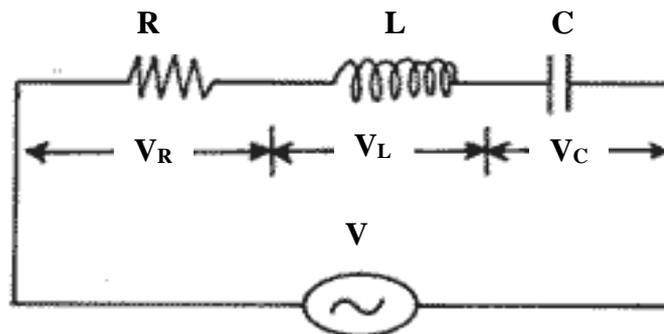
$$X_L = (31.4)(2 \times 10^{-3})$$

$$= 62.8 \text{ m}\Omega$$

**คำตอบ** ดังนั้น ความต้านทานที่เกิดจากการนำขดลวดเหนี่ยวนำเท่ากับ 62.8 มิลลิโอห์ม

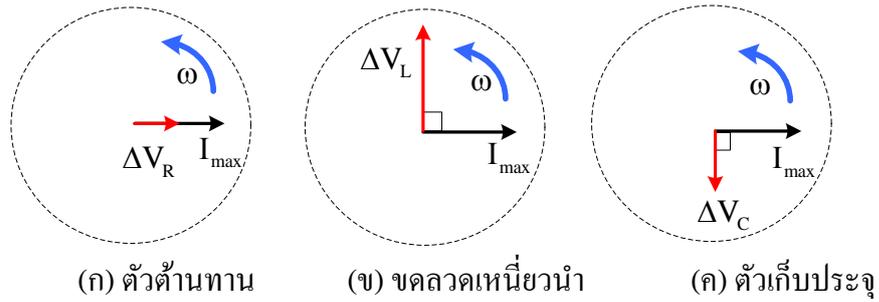
### 3.17 วงจรไฟฟ้ากระแสสลับ RLC (RLC circuit)

จากเรื่องที่ผ่านมาเราได้ศึกษาถึงความต้านทาน ขดลวดตัวนำ และตัวเก็บประจุที่ต่อใน วงจรไฟฟ้ากระแสไฟฟ้าสลับ สำหรับในหัวข้อนี้จะศึกษาวงจร RLC ที่ต่ออนุกรมจากแหล่งกำเนิดที่ ให้แรงเคลื่อนไฟฟ้ากับวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ ดังภาพที่ 3.31 เป็นการต่อวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ RLC



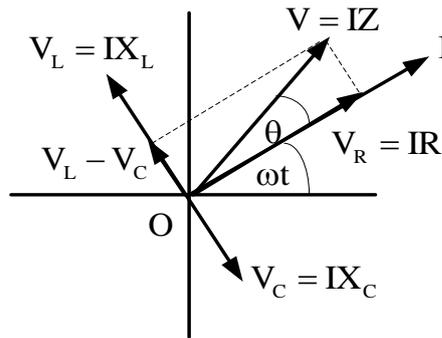
**ภาพที่ 3.31** การต่อวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ RLC

จากภาพเนื่องจากเฟสของกระแสกับความต่างศักย์ของตัวเก็บประจุและขดลวดเหนี่ยวนำมี ความต่างเฟสกันดังภาพที่ 3.32 ทำให้สามารถวาดเฟสไดอะแกรมของตัวต้านทาน ขดลวดเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุได้ ดังนี้



ภาพที่ 3.32 เฟสของความต่างศักย์กับกระแสไฟฟ้า (ก) ตัวต้านทาน (ข) ขดลวดเหนี่ยวนำ (ค) ตัวเก็บประจุ

จากภาพที่ 3.32 จะเห็นว่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวต้านทานจะมีเฟสเดียวกันกับกระแสไฟฟ้า แต่ขดลวดเหนี่ยวนำจะมีความต่างศักย์ต่างเฟสกับกระแสไฟฟ้าอยู่  $90^\circ$  เช่นเดียวกับกรณีของตัวเก็บประจุที่ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุจะมีเฟสตามหลังอยู่  $90^\circ$



ภาพที่ 3.33 มุมเฟสระหว่างความต่างศักย์กับกระแสไฟฟ้า  
จากภาพที่ 3.33 จะได้

$$V^2 = V_R^2 + (V_L - V_C)^2$$

$$V^2 = I^2[R^2 + (X_L - X_C)^2]$$

$$V = I\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

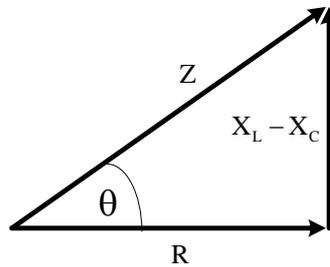
และให้

$$V = IZ$$

เมื่อ  $Z$  คือความต้านทานเชิงซ้อนโดยที่

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

เมื่อเขียนเป็นเวกเตอร์จะได้ดังภาพที่ 3.34



ภาพที่ 3.34 การรวมเวกเตอร์เพื่อหาค่าความต้านทานเชิงซ้อน

### 3.18 หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer)

หม้อแปลงไฟฟ้า คือเครื่องมือสำหรับเพิ่ม หรือลดความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับให้สูงขึ้นหรือต่ำลง โดยอาศัยการเหนี่ยวนำไฟฟ้าระหว่างขดลวด มีส่วนประกอบง่ายๆ คือแกนเหล็กอ่อนตัดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสกลางกลวง โดยมากมักจะใช้แผ่นเหล็กอ่อนบางๆ หลายๆ แผ่นอันซ้อนกัน แกนเหล็กอ่อน มีหน้าที่รวมเส้นแรงแม่เหล็กจากขดลวดขดที่หนึ่งไปเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสในขดลวดขดที่สอง ทั้งสองข้างของแกนเหล็กมีขดลวดหุ้มจนวนบางพันไว้ข้างหนึ่งมีจำนวนรอบมาก อีกข้างหนึ่งมีจำนวนรอบน้อย ขดลวดด้านที่ต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับเรียกว่าขดลวดปฐมภูมิ (primary coil) ขดลวดอีกขดหนึ่งเรียกว่าขดลวดทุติยภูมิ (secondary coil) นอกจากนั้นยังมีหม้อแปลงไฟฟ้าจากวัสดุที่เรียกว่าวัสดุเฟอร์ไรต์หรือเหล็กเซรามิกส์ ซึ่งสามารถที่จะเปลี่ยนพลังงานกลให้เป็นพลังงานไฟฟ้า หรือเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลได้ สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคติพลังงานที่สูญเสียในขดลวดและในแกนเหล็กมีค่าเป็นศูนย์ จากกฎของฟาราเดย์ศักย์ไฟฟ้าที่คร่อมส่วนปฐมภูมิคือ

$$V = -N \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (3-54)$$

เมื่อ  $\Phi_B$  คือฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านขดลวดแต่ละรอบ ถ้าเราสมมติว่าเส้นสนามแม่เหล็กทั้งหมดยังคงอยู่ในแกนเหล็ก ฟลักซ์ที่ผ่านขดลวดปฐมภูมิแต่ละรอบจะเท่ากับฟลักซ์ที่ผ่านขดลวดทุติยภูมิแต่ละรอบ ดังนั้นเราสามารถคำนวณหาค่าศักย์ไฟฟ้าคร่อมขดลวดแต่ละขดได้คือ

$$V_2 = \frac{N_2}{N_1} V_1 \quad (3-55)$$

เมื่อ  $N_2 > N_1$  ศักย์ไฟฟ้าขาออก  $V_2$  จะมากกว่าศักย์ไฟฟ้าขาเข้า  $V_1$  การจัดวางองค์ประกอบแบบนี้จะเรียกว่า หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเพิ่มศักย์ไฟฟ้าขาออก  $N_2 < N_1$  ศักย์ไฟฟ้าขาออกจะน้อยกว่าขาเข้า เราจะเรียกว่า หม้อแปลงไฟฟ้าแบบลดศักย์ไฟฟ้าขาออก สำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มักได้รับกำลังไฟฟ้าจากตัวแปลงไฟฟ้าสลับที่ประกอบด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าที่จะเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าสลับให้มีค่าลดลง ในอุปกรณ์ไฟฟ้าหลายชนิด ตัวแปลงไฟฟ้านี้ยังทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับไปเป็นไฟฟ้ากระแสตรงอีกด้วย อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในครัวเรือนจำนวนมากต้องการศักย์ไฟฟ้าต่ำ หม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กซึ่งต่อโดยตรงกับปลั๊กที่อยู่ข้างผนังในบ้านเราสามารถทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมได้

### 3.19 บทสรุป

ไฟฟ้าสถิตเกิดจากประจุไฟฟ้าที่สะสมอยู่ในวัสดุหรือสสาร ซึ่งประกอบไปด้วยประจุสามชนิด ได้แก่ โปรตรอน นิวตรอน และอิเล็กตรอน โดยเราสามารถทำให้เกิดประจุไฟฟ้าได้โดยการเหนี่ยวนำไฟฟ้า การสัมผัส และการขั้วดี ซึ่งเมื่อประจุไฟฟ้าถูกนำมาวางอยู่ใกล้กันถ้าเป็นประจุชนิดเดียวกันจะเกิดแรงผลักรัน ประจุต่างชนิดเดียวกันจะเกิดแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน แรงทางไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นจากประจุนี้สามารถคำนวณได้โดยใช้กฎของคูลอมบ์ ซึ่งจะเกิดรอบบริเวณที่มีประจุอยู่และสามารถแผ่อำนาจของแรงออกไปได้ เรียกว่า สนามไฟฟ้า สามารถใช้เส้นสมมติที่เรียกว่า เส้นแรงไฟฟ้าในการแสดงขนาดของสนามไฟฟ้า ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ได้ และเมื่อมีสนามไฟฟ้าก็จะทำให้ทราบถึงศักย์ไฟฟ้า ซึ่งคือผลของงานในการเคลื่อนประจุไฟฟ้าจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งนั่นเอง

กระแสไฟฟ้าเกิดจากการเคลื่อนที่ของประจุบวกและประจุลบ โดยกระแสไฟฟ้าเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวนำที่มีความต้านทานไฟฟ้าขนาดของกระแสไฟฟ้าจะแปรผกผันกับความต้านทานไฟฟ้า ซึ่งคำนวณได้โดยใช้กฎของโอห์ม สำหรับการต่อตัวต้านทานมีสองแบบคือการต่อแบบขนานและการต่อแบบอนุกรม โดยการต่อแต่ละแบบก็จะให้ผลรวมของความต้านทานที่แตกต่างกัน ไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งเป็นไฟฟ้าที่ใช้อยู่ในปัจจุบันมีลักษณะของเฟสที่แตกต่างกันระหว่างกระแสและความต่างศักย์โดยเมื่อเทียบกับความต้านทานเฟสของความต่างศักย์จะตรงกับกระแส เมื่อเทียบกับขดลวดเหนี่ยวนำเฟสของความต่างศักย์จะตามกระแสอยู่ 90 องศา และเมื่อเทียบกับตัวเก็บประจุเฟสของความต่างศักย์จะนำกระแสอยู่ 90 องศา โดยแต่ละกรณีจะมีความต้านทานที่แตกต่างกันซึ่งสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานเหล่านั้นได้ และเมื่อนำวงจรมาต่อกับตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และขดลวดเหนี่ยวนำก็จะได้ความต้านทานรวมเรียกว่าความต้านทานเชิงซ้อน

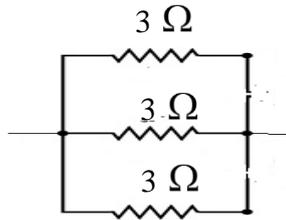
### แบบฝึกหัด

1. วางประจุบนผิวของทรงกลมตัวนำที่อยู่โดดเดี่ยวรัศมี 2.7 เซนติเมตร ความหนาแน่นประจุเชิงผิวมีค่าสม่ำเสมอและมีค่าเป็น  $6.9 \times 10^{-6}$  คูลอมบ์ต่อตารางเมตร แล้วทรงกลมนี้มีประจุทั้งหมดเท่าไร [คำตอบ  $6.3 \times 10^{-8}$  คูลอมบ์]
2. ถ้าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวโลหะทรงกลมรัศมี R มีค่าเท่ากับ  $V_0$  จงหาสนามไฟฟ้าที่ระยะ  $2R$  จากจุดศูนย์กลางของทรงกลม [คำตอบ  $\frac{V_0}{4R}$ ]
3. จากรูป A, B และ C มีจุดประจุขนาด  $3 \times 10^{-6}$ ,  $1 \times 10^{-6}$  และ  $-1 \times 10^{-6}$  คูลอมบ์ตามลำดับ เมื่อ  $AP = 0.6$  เมตร  $CP = 0.3$  เมตร และ  $BP = 0.1$  เมตร ศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่ง P มีค่าเท่าใด [คำตอบ  $1.05 \times 10^5$  โวลต์]



ภาพที่ 3.35 สำหรับคำถามข้อ 3

4. จากรูปความต้านทานรวมมีค่าเท่ากับเท่าไร [คำตอบ 1 โอห์ม]



ภาพที่ 3.36 สำหรับคำถามข้อ 4

5. จากข้อ 4 ถ้าทำให้เกิดความต่างศักย์รวมในวงจรเท่ากับ 6 โวลต์ ความต่างศักย์ที่คร่อมตัวต้านทานแต่ละตัวมีค่าเท่าไร [คำตอบ 6 โอห์ม]
6. จากข้อ 4 ถ้าปล่อยให้กระแสไฟฟ้าขนาด 2 แอมแปร์ไหลในวงจร จงหาความต่างศักย์ที่ตัวต้านทานแต่ละตัว [คำตอบ 6 โวลต์]
7. วงจรกระแสสลับความถี่ 50 เฮิรตซ์ มีตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ วัตต์กระแสไฟฟ้าในวงจรได้ 0.1 แอมแปร์ ความต่างศักย์คร่อมตัวเหนี่ยวนำ 22 โวลต์ ค่าความเหนี่ยวนำจะเป็นเท่าใด [คำตอบ 0.7 เฮนรี]

## เอกสารอ้างอิง

ปิยพงษ์ สิทธิคง. (2548). **ฟิสิกส์ระดับอุดมศึกษา เล่ม 2**. กรุงเทพมหานคร: วิรัตน์ เอ็ดดุกะชั้น จำกัด  
ณัฐกานต์ วงศ์ใหญ่. *เครื่องกำเนิดแวนเดอแกรฟฟ์*. สืบค้น 5 เมษายน 2563 จาก

<https://sites.google.com/site/fisiksthudey/fifasthit/snam-fifa>

พงษ์ศักดิ์ ชินนาบุญ. (2552). **ฟิสิกส์มหาวิทยาลัย 2 เล่ม 1**. กรุงเทพมหานคร: วิทยพัฒน์.

ยัง และ เฟรดแมน. (2548). **ฟิสิกส์ระดับอุดมศึกษา เล่ม 2**. (แปลจาก **University Physics with Modern Physics** โดย ปิยพงษ์ สิทธิคง). กรุงเทพมหานคร: เพียร์สัน เอ็ดดุกะชั้นอินโดไชน่า.

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. *การทดลองของมิลลิแกน*. สืบค้น 30

มกราคม 2563 จาก <https://www.scimath.org/lesson-physics/item/7270-electron>

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. *มวลของประจุอิเล็กตรอน*. สืบค้น 31

มกราคม 2563 จาก <http://www.physic2u.com/Topic56/ChargeInElectricFilelds.html>

สุชาติ สุภาพ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. (2558). **ฟิสิกส์ทั่วไป**. กรุงเทพฯ:

สำนักพิมพ์ทริปเพิ้ล เอ็ดดุกะชั้น.

Bellance, J, and Brandt, R. (2010). **21<sup>st</sup> Century Skills Rethinking How Students Learn**.

Solution Tree Press.

Halpern, A. (2011). **Schaum's outlines 3,000 Solved Problems in Physics**. New York: The

McGraw-Hill Companies, Inc.

Serway, R. A., and Jewett, J. W. (2014). **Physics for Scientists and Engineers with Modern**

**Physics 9<sup>th</sup> ed.** Belmont: Brooks/Cole-Thomson Learning.

Serway, R.A., Vuille, C., and Hughes, J. (2015). **College Physics 10<sup>th</sup> ed.** Stamford: Cengage

Learning.

Thornton, T.S., and Rex, A. (2013). **Modern Physics for Scientists and Engineers 4<sup>th</sup> ed.**

Boston: Brooks/Cole- Cengage Learning.

Young, H.D., and Freedman, R.A. (2016). **Sear's & Zemansky's University Physics with**

**Modern Physics 14<sup>th</sup> ed.** Essex: Pearson Education Limited.

<https://www.youtube.com/watch?v=gI246k9vMCM>

## บทที่ 4

### แม่เหล็กไฟฟ้าเบื้องต้น

#### (Introduction to electromagnetics)

##### 4.1 บทนำ

แม่เหล็กและไฟฟ้ามีความสัมพันธ์ต่อกันใกล้ชิดมากและเกี่ยวข้องกับการดำเนินชีวิตของมนุษย์รวมทั้งการพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีโดยเฉพาะการสื่อสาร มีความเชื่อว่าเข็มทิศถูกประดิษฐ์ขึ้นและใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศจีนครั้งแรกตั้งแต่ช่วงต้นศตวรรษที่ 13 ก่อนคริสต์ศักราช และมีการพัฒนาโดยมีจุดเริ่มต้นมาจากชาวอินเดีย ในปี ค.ศ. 1269 ปีแยร์ เดอ มารีกูร์ ชาวฝรั่งเศสได้ทำการทดลองและพบว่าเมื่อนำเข็มทิศมาวางใกล้กับแม่เหล็กทรงกลม เข็มจะเกิดการเบี่ยงตัวเป็นแนวรอบๆ แม่เหล็กทรงกลมนั้น และผ่านจุดสองจุดที่อยู่ตรงข้ามกัน เรียกว่า ขั้วแม่เหล็ก การทดลองที่ได้ทำต่อเนื่องมาพบว่า ไม่ว่าแม่เหล็กจะมีรูปร่างอย่างไรจะประกอบด้วยขั้วสองขั้วเสมอ ต่อมาในปี ค.ศ. 1600 วิลเลียม กิลเบิร์ต ได้ทำการทดลองต่อมาและเขาได้เสนอว่าโลกเป็นแม่เหล็กถาวรขนาดใหญ่ ต่อมาในปี ค.ศ. 1750 มีการทดลองโดยใช้เครื่องชั่งการบิด (Torsion balance) แสดงแรงดึงดูดหรือแรงผลักระหว่างขั้วแม่เหล็ก ซึ่งแปรผกผันกับกำลังสองของระยะห่างระหว่างขั้ว โดยขั้วแม่เหล็กจะเป็นขั้วคู่เสมอ ไม่เหมือนกับแรงระหว่างประจุไฟฟ้า ความสัมพันธ์ระหว่างไฟฟ้าและแม่เหล็กถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1819 ขณะการบรรยายของฮันส์ คริสเตียน เออร์สเตด ได้สาธิตให้เห็นว่า การที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านในเส้นลวดทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของเข็มทิศ ต่อมา ในปี ค.ศ. 1820 ฟาราเดย์ และ โจเซฟ เฮนรี ได้แสดงให้เห็นว่า มีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นเมื่อใช้แท่งแม่เหล็กเคลื่อนที่เข้าใกล้หรือตัดผ่านขดลวดตัวนำ หรือทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าในวงจร นั่นคือ การเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้าและในปีต่อมา ทฤษฎีของแมกซ์เวลล์ ได้ถูกเสนอในทางกลับกัน กล่าวคือ การเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กได้ ในบทนี้จะศึกษาเกี่ยวกับการทำนายทางคณิตศาสตร์โดยสมการของแมกซ์เวลล์ และการทดลองของเฮิร์ตซ์ ที่สามารถแสดงให้เห็นได้ว่า ทั้งสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าเป็นองค์ประกอบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Waves) ซึ่งอย่างที่เราทราบกันดีว่าแสงมีสมบัติเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในบทนี้จะทำความเข้าใจแรงทางแม่เหล็ก แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ กฎของแอมแปร์ กฎของฟาราเดย์ที่เกี่ยวข้องกับการเหนี่ยวนำ กฎของเลนซ์ ปრაกฏการ

ฮอลล์ และที่สำคัญการอธิบายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้สมการของแมกซ์เวลล์ รวมทั้งประโยชน์ที่เราใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในชีวิตประจำวัน ทั้งคลื่นไมโครเวฟ คลื่นอินฟราเรด คลื่นวิทยุ เป็นต้น และในปัจจุบันองค์การเพื่อการวิจัยนิวเคลียร์แห่งยุโรปหรือเซิร์น (CERN) ก็มีการทดสอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เชื่อมต่อกับแม่เหล็กตัวนำยิ่งยวดในเครื่องเร่งอนุภาคขนาดใหญ่ ซึ่งแม่เหล็กดังกล่าวใช้สำหรับการควบคุมการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุในเครื่องเร่งนี้

## 4.2 สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic field)

แนวคิดของขั้วแม่เหล็กและปฏิกริยาระหว่างแม่เหล็กมีความคล้ายคลึงกับแนวคิดของประจุไฟฟ้า เริ่มตั้งแต่ขั้วแม่เหล็กและประจุไฟฟ้าแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทเหมือนกัน คือ ขั้วเหนือและขั้วใต้ และประจুবวกกับประจุลบ ในส่วนของแรงที่เกิดขึ้นก็มีลักษณะเหมือนกัน โดยขั้วหรือประจุชนิดเดียวกันจะออกแรงผลักกัน แต่หากเป็นขั้วหรือประจุต่างชนิดกันจะออกแรงดึงดูดกัน สนามแม่เหล็กไฟฟ้า คือ บริเวณที่แสดงอำนาจของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก (Electric and Magnetic Field: EMFs) โดยมีทิศทางที่ตั้งฉากซึ่งกันและกันและตั้งฉากกับทิศทางที่คลื่นเคลื่อนที่ไป นอกจากนั้นแล้วแม่เหล็กยังออกแรงดึงดูดกับก้อนเหล็กที่ไม่เป็นแม่เหล็กได้ อย่างไรก็ตามขั้วแม่เหล็กกับประจุไม่ใช่สิ่งเดียวกัน ดังนั้นขั้วแม่เหล็กจึงไม่จำเป็นต้องสอดคล้องกับประจุทั้งหมด การศึกษาสภาวะแม่เหล็กในช่วงเริ่มต้นเป็นการพิจารณาจากแม่เหล็กในธรรมชาติซึ่งเรียกว่าแม่เหล็กถาวร (permanent magnetic)

### 4.2.1 การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

ปรากฏการณ์การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กนั้น พอจะเห็นได้จากที่แท่งแม่เหล็กดูดเหล็กได้ สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อนำแท่งแม่เหล็กมาจ่อใกล้ ๆ กับเหล็กชนิดอื่น ๆ เช่น ตะปูเหล็ก ซึ่งปกติอิเล็กตรอนในตะปูจะหมุนรอบตัวเองในทิศทางต่าง ๆ กัน แต่เมื่อถูกเหนี่ยวนำโดยแท่งแม่เหล็ก อิเล็กตรอนในตะปูจะจัดเรียงตัวเองใหม่และหมุนไปในทิศทางเดียวกัน โดยด้านที่อยู่ใกล้ขั้วแม่เหล็กจะมีอิเล็กตรอนหมุนรอบตัวเองในทิศตรงข้ามกับอิเล็กตรอนในขั้วแม่เหล็ก ฉะนั้นตะปูจึงกลายเป็นแท่งแม่เหล็กอีกแท่งหนึ่งซึ่งทำให้เกิดการดึงดูดกัน

### 4.2.2 แรงเนื่องจากแม่เหล็กบนประจุเคลื่อนที่

รอบแท่งแม่เหล็กหรือวัตถุที่มีอำนาจแม่เหล็กจะเป็นบริเวณของสนามแม่เหล็ก นักวิทยาศาสตร์พบว่าจะมีสนามแม่เหล็กรอบตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้า กล่าวคือเมื่อประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่เข้าไปในบริเวณของสนามแม่เหล็กจะมีแรงกระทำต่อประจุไฟฟ้าที่กำลังเคลื่อนที่นั้น แรงที่กระทำต่อประจุไฟฟ้าเนื่องจากสนามแม่เหล็ก (magnetic field) เขียนแทนด้วยปริมาณเวกเตอร์  $B$  จะขึ้นอยู่กับความเร็วของประจุไฟฟ้า เขียนสมการได้เป็น

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (4-1)$$

เมื่อ  $\vec{F}$  เรียกว่า แรงแม่เหล็ก (magnetic force) ที่กระทำต่อประจุ  $q$  มีหน่วยเป็นนิวตัน  
 $\vec{v}$  คือ เวกเตอร์ความเร็วของประจุไฟฟ้า มีหน่วยเป็น เมตรต่อวินาที  
 $\vec{B}$  คือ เวกเตอร์สนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น เทสลา

#### 4.2.3 แรงบนตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้า

เมื่อตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าอยู่ในสนามแม่เหล็ก จะเกิดแรงแม่เหล็กกระทำกับอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่อยู่ในตัวนั้น และเนื่องจากอิเล็กตรอนอยู่ในสนามแม่เหล็ก แรงทั้งหมดที่เกิดขึ้นกับอิเล็กตรอน ก็คือแรงที่เกิดกับตัวนำนั่นเอง พิจารณาตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้า  $I$  วางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก  $\vec{B}$  จะเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$F = IB\ell \quad (4-2)$$

เมื่อ  $I$  คือ กระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็น แอมแปร์

$\ell$  คือ ขนาดความยาวของตัวนำ มีหน่วยเป็น เมตร

แต่ถ้าตัวนำวางไม่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก แรงบนตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าซึ่งวางอยู่ในสนามแม่เหล็กเขียนได้ว่า

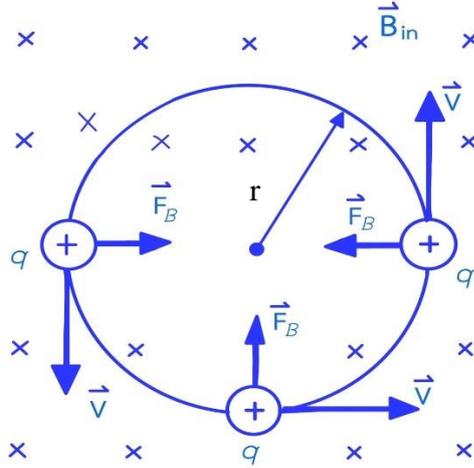
$$\vec{F} = I\vec{\ell} \times \vec{B} \quad (4-3)$$

$\vec{\ell}$  คือ เวกเตอร์ความยาวของตัวนำ มีหน่วยเป็น เมตร

#### 4.2.4 การเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุในสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอ

ในการบ่งบอกทิศทางของสนามแม่เหล็ก คือ ถ้า  $\vec{B}$  อยู่ในระนาบของหน้ากระดาษจะแสดงดังเวกเตอร์ลูกศรด้านขวามือตามทิศทางของสนามแม่เหล็ก สำหรับกรณีสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกับหน้ากระดาษมีทิศทางพุ่งเข้ากระดาษแทนด้วยสัญลักษณ์  $\vec{B}_m$  ดังภาพที่ 4.1 เครื่องหมายเหล่านี้ อาจใช้บ่งบอกถึงปริมาณอื่นที่มีทิศทางตั้งฉากกับกระดาษเช่นเดียวกัน เช่น ทิศทางของแรงแม่เหล็กและทิศทางของกระแส ซึ่งแรงแม่เหล็กที่กระทำบนอนุภาคมีประจุที่เคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็กจะตั้งฉากกับความเร็วของอนุภาค เป็นผลให้งานอันเนื่องมาจากแรงแม่เหล็กมีค่าเป็นศูนย์ พิจารณากรณีของอนุภาคประจุบวกเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอ ด้วยความเร็วเริ่มต้นตั้งฉากกับสนามสมมติว่าทิศทางของสนามแม่เหล็กมีทิศพุ่งเข้ากระดาษ ซึ่งแรงแม่เหล็กที่กระทำต่ออนุภาคจะมีทิศตั้งฉากกับทิศของสนามแม่เหล็กและทิศของความเร็วสม่ำเสมอ เมื่ออนุภาคมีประจุเคลื่อนที่ภายใต้

สนามแม่เหล็กนี้ ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคจะเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากแรงแม่เหล็ก แต่ความเร็วและแรงแม่เหล็กนั้นยังคงมีทิศตั้งฉากอยู่เสมอ การเคลื่อนที่ของอนุภาคจึงมีลักษณะเป็นวงกลมบนระนาบที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก



ภาพที่ 4.1 ความเร็วของอนุภาคมีประจุตั้งฉากกับทิศของสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอ

อนุภาคเคลื่อนที่เป็นวงกลมเนื่องจากแรงแม่เหล็ก  $\vec{F}_B$  ซึ่งมีทิศตั้งฉากกันกับทั้ง  $\vec{v}$  และ  $\vec{B}$  โดยมีขนาดคงที่เป็น  $qvB$  ภาพที่ 4.1 อนุภาคประจุบวกมีการหมุนทวนเข็มนาฬิกาซึ่งอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กที่มีทิศพุ่งเข้ากระดาษ ถ้า  $q$  เป็นประจุลบจะเคลื่อนที่ในทิศตรงข้ามคือ หมุนตามเข็มนาฬิกา หากแทนแรงลัพธ์ตามกฎข้อที่สองของนิวตันจะได้

$$\sum \vec{F} = \vec{F}_B = m\vec{a} \quad (4-4)$$

เนื่องจากอนุภาคเคลื่อนที่แบบวงกลม เราสามารถใช้สมการการเคลื่อนที่แบบวงกลมของอนุภาค และแทนความเร่งด้วยความเร่งสู่ศูนย์กลาง

$$F_B = qvB = \frac{mv^2}{r} \quad (4-5)$$

จากสมการข้างต้น จะได้ว่ารัศมีของการเคลื่อนที่แบบวงกลม คือ

$$r = \frac{mv}{qB} \quad (4-6)$$

จะเห็นว่า รัศมีของการเคลื่อนที่แบบวงกลมแปรผันตรงกับโมเมนตัมเชิงเส้น  $mv$  ของอนุภาค และแปรผกผันกับขนาดของประจุของอนุภาคและขนาดของสนามแม่เหล็ก โดยอัตราเร็วเชิงมุม คือ

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{qB}{m} \quad (4-7)$$

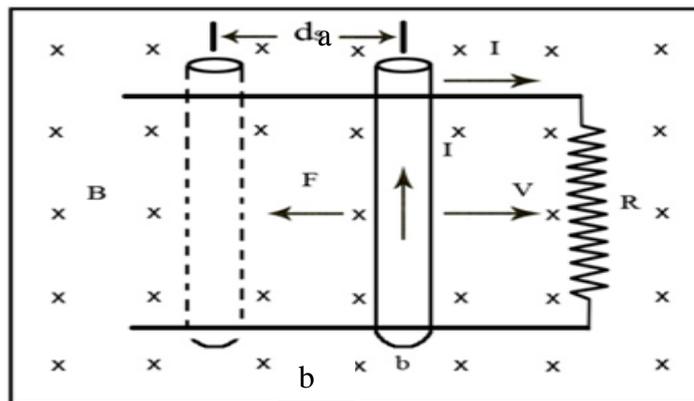
คาบการเคลื่อนที่เท่ากับเส้นรอบวงหารด้วยอัตราเร็วของอนุภาค

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi m}{qB} \quad (4-8)$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่าอัตราเร็วเชิงมุมและคาบของการเคลื่อนที่แบบวงกลมไม่ขึ้นอยู่กับอัตราเร็วของอนุภาคหรือรัศมีของการเคลื่อนที่ อัตราเร็วเชิงมุมจึงมักใช้อ้างถึงความถี่ไซโคลตรอน (Cyclotron frequency) ซึ่งถูกนำไปใช้ในเครื่องเร่งอนุภาคไซโคลตรอนได้

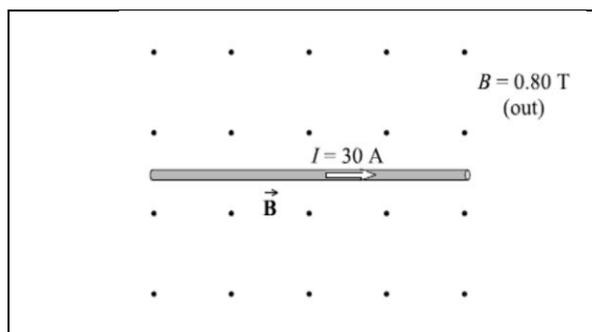
### 4.3 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induced electromotive force)

เมื่อเคลื่อนตัวนำในผ่านเข้าไปในสนามแม่เหล็ก อิเล็กตรอนอิสระบนตัวนำจะถูกกระทำด้วยแรงแม่เหล็ก ทำให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ ถ้าสมมติให้ตัวนำไฟฟ้าตัวหนึ่ง ยาว  $l$  เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $v$  ในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก  $B$  อิเล็กตรอนอิสระทุกตัวของในตัวนำนั้น จะมีความเร็ว  $v$  ในทิศตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก  $B$  ด้วย ดังนั้น อิเล็กตรอนแต่ละตัวจะถูกกระทำด้วยแรง  $qvB$  ให้เคลื่อนที่ไปในตัวนำตามทิศของแรงที่เกิดกับอิเล็กตรอน จะนำอิเล็กตรอนไปทางปลาย  $b$  ของตัวนำ ทางปลาย  $a$  จะเหลือประจุบวกดังนั้นตัวนำ  $ab$  จะมีกระแสไฟฟ้าไหลในวงจร ดังภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ตัวอย่างที่ 4.1 จากภาพที่ 4.3 สนามแม่เหล็กพุ่งออกนอกกระดาษและมีขนาด  $0.80 \text{ T}$  มีเส้นลวดยาว  $0.10 \text{ m}$  วางตัวตั้งฉากกับทิศแม่เหล็กและมีกระแสในเส้นลวด  $30 \text{ A}$  จงหาขนาดและทิศทางของแรงที่เส้นลวดยาว  $5 \text{ เซนติเมตร}$



ภาพที่ 4.3 สนามแม่เหล็ก

**วิธีทำ** จากสมการ (4.2)  $F = IB\ell = (30\text{A})(0.80\text{T})(0.050\text{m}) = 1.2\text{ N}$

จากกฎมือขวา จะได้แรงจะมีทิศลงมาด้านล่างของกระดาษ

**คำตอบ** ขนาดของแรงมีค่า 1.2 นิวตัน ทิศลงมาด้านล่างกระดาษ

#### 4.4 กฎของแอมแปร์ (Ampere's law)

เป็นกฎที่อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กที่เกิดกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวนำภายในวงปิด ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า ค่าการเหนี่ยวนำแม่เหล็กคูณระยะทางในทิศเดียวกับสนามตามทางปิดใดๆจะมีค่าเท่ากับ  $\mu_0$  คูณกับกระแสทั้งหมดภายในวงปิดนั้น หรือเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I$$

หรือ  $\oint B \cos\theta dl = \mu_0 I$  (4-9)

เมื่อ  $\theta$  คือ มุมระหว่าง  $B$  กับระยะทางสั้นๆ ( $dl$ )

$\mu_0$  คือ ค่าสภาพให้ซึมได้ของสุญญากาศ (Permittivity)

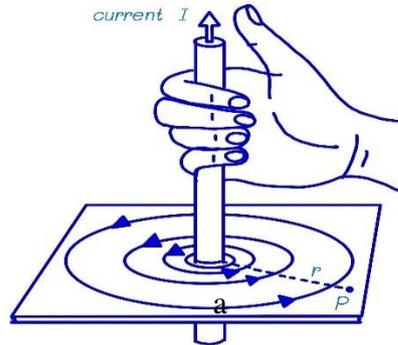
สามารถเรียกปริมาณ  $\oint \vec{B} \cdot d\vec{l}$  ได้ว่า การหมุนเวียนของสนามแม่เหล็ก (magnetic circulation) ตามทางปิดใดๆ กฎของแอมแปร์จึงกล่าวเป็นใจความได้ว่า การหมุนเวียนของสนามแม่เหล็กตามทางปิดใด ๆ รัศมี  $a$  ที่ล้อมกระแสไฟฟ้า จะมีค่าเท่ากับ  $\mu_0 I$

ถ้าลองพิจารณาในกรณีของตัวนำยาวมากที่มีกระแสไฟฟ้า  $I$  จากลักษณะความสมมาตร การหมุนเวียนของสนามแม่เหล็กจะมีเส้นทางเป็นวงกลม ซึ่งมีตัวนำเป็นจุดศูนย์กลาง จะได้ว่า

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = B(2\pi a) = \mu_0 I$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a} \quad (4-10)$$

ตัวอย่างที่ 4.3 จากภาพที่ 4.4 จงคำนวณหาขนาดของสนามแม่เหล็กในอากาศ ณ จุดห่าง 5 เซนติเมตร ตามแนวรัศมีของเส้นลวดที่มีกระแสไฟฟ้า 15 แอมแปร์



ภาพที่ 4.4 แรงแม่เหล็ก

วิธีทำ จากสมการ (4-5)

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a}$$

$$= \frac{(4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A})(15\text{A})}{2\pi(0.05\text{m})}$$

$$= 6 \times 10^{-5} \text{ T}$$

คำตอบ สนามแม่เหล็กมีขนาดเท่ากับ  $6 \times 10^{-5}$  เทสลา

#### 4.5 กฎของบีโอ-ซาวาร์ต (Biot-Savart Law)

จากปรากฏการณ์ที่ว่า เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลในตัวนำหรือประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ จะเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นในบริเวณนั้น ซึ่งต่อมาได้มีการทดลองของบีโอกับซาวาร์ตได้ข้อมูลที่สนับสนุนว่า กระแสไฟฟ้าคงตัว  $I$  ที่ไหลผ่านเส้นลวดความยาว  $d\vec{l}$  ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่จุดใดจุดหนึ่ง จะสามารถคำนวณหาค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นได้จากสมการ

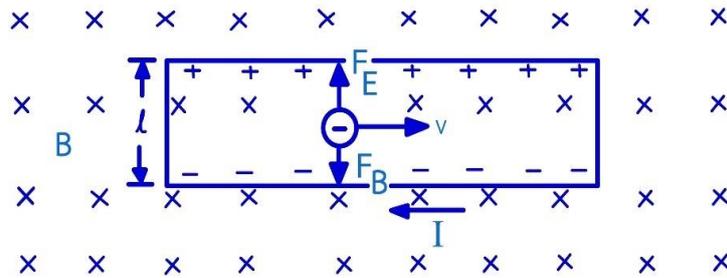
$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} I \oint \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^2} \quad (4-11)$$

เมื่อ  $r$  คือ ระยะทางจาก  $d\vec{l}$  ถึงจุดที่จะหาความเข้มของสนามแม่เหล็ก ซึ่งเป็นสมการ (4-11) สามารถอธิบายถึงสนามแม่เหล็ก ณ จุดใดๆ ที่อยู่ห่างออกไปจากบริเวณที่มีการไหลของกระแสไฟฟ้าหรือประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่อย่างไม่จำกัด ทั้งนี้การไหลของกระแสไฟฟ้านั้นจะต้องคงตัว

#### 4.6 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect)

E.H. Hall ได้ค้นพบว่า แถบโลหะแบนๆ เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าไปตามความยาวที่วางอยู่ในสนามแม่เหล็กจะเกิดความต่างศักย์ขึ้นระหว่างด้านข้างของแถบโลหะนั้น และได้เรียก

ปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์ฮอลล์ เพื่อเป็นเกียรติแก่เขา จากปรากฏการณ์นี้สามารถนำไปใช้หาว่าภายในตัวนำนั้นมีพาหะที่เป็นประจุลบที่เป็นตัวเคลื่อนที่ นอกจากนี้ยังสามารถวัดจำนวนประจุไฟฟ้าอิสระต่อหน่วยปริมาตรได้อีกด้วย ปรากฏการณ์ฮอลล์อาจแสดงได้โดยเมื่อนำแถบโลหะแบนๆ กว้าง  $l$  วางในสนามแม่เหล็ก ซึ่งมีความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก  $B$  และมีทิศตั้งฉากกับพื้นที่ด้านกว้างของแผ่นโลหะ



ภาพที่ 4.5 ปรากฏการณ์ฮอลล์

จากภาพที่ 4.5 แรงอันเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กสามารถหาได้จากสมการ (4-1) เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าไปตามความยาวของแถบโลหะจากขวาไปซ้าย ในกรณีที่อิเล็กตรอนเป็นพาหะนำไฟฟ้า อิเล็กตรอนจะวิ่งจากซ้ายไปขวา ในสนามแม่เหล็กอิเล็กตรอนจะถูกแรงกระทำในทิศลง เนื่องจากมีแรงของสนามแม่เหล็กมากกว่า แรงแม่เหล็กนี้จึงมีขนาด

$$F_B = evB$$

โดย  $-e$  และ  $v$  เป็นประจุและอัตราเร็วของอิเล็กตรอนตามลำดับ ในตอนแรกอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ลง ทำให้ด้านล่างและด้านบนของแถบโลหะมีประจุลบและบวกสะสมอยู่ ซึ่งจะทำให้เกิดความต่างศักย์ตามขวางในแถบโลหะขึ้น ซึ่งเรียกว่า ความต่างศักย์ตามขวางของฮอลล์ (transverse Hall potential difference,  $V_H$ ) และจะมีสนามไฟฟ้า  $E$  ในทิศลงเกิดขึ้น สนามนี้จะทำให้เกิดแรงกระทำ  $eE$  ในทิศขึ้นต่ออิเล็กตรอนหักล้างแรงจากสนามแม่เหล็กนั่นคือ

$$eE = evB$$

หรือ

$$E = vB$$

สุดท้ายทำให้อิเล็กตรอนวิ่งไปทางขวา สวนกับทิศของกระแสและทำให้ได้ความต่างศักย์ฮอลล์ คือ

$$\begin{aligned} V_H &= EI \\ \text{หรือ} \quad V_H &= vBl \end{aligned}$$

ถ้า  $n$  เป็นความหนาแน่นของพาหะอิเล็กตรอนจากความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ว่า

$$\begin{aligned} V &= \frac{1}{neA} \\ &= \frac{1}{ned} \end{aligned}$$

เมื่อนำกลับเข้าไปแทนจะได้ว่า

$$V_H = \frac{IB}{ned}$$

โดยปกติ นิยมเขียนสัมประสิทธิ์ฮอลล์ (Hall Coefficient,  $R_H$ )

$$\text{ดังนั้น} \quad V_H = R_H \frac{IB}{d} \quad (4-12)$$

จากประจุของอิเล็กตรอน  $e = 1.6 \times 10^{-19}$  คูลอมป์ และค่า  $V_H, B, I, d$  อาจวัดได้จากการทดลอง จึงอาจคำนวณค่าความหนาแน่นของพาหะ  $n$  ได้ โดย  $R_H$  คือ สัมประสิทธิ์ฮอลล์ (Hall coefficient) เท่ากับ  $1/nq$  ความสัมพันธ์นี้แสดงให้เห็นว่าตัวนำที่ผ่านการสอบเทียบอย่างถูกต้องแล้วสามารถใช้วัดขนาดของสนามแม่เหล็กที่ไม่ทราบค่าได้

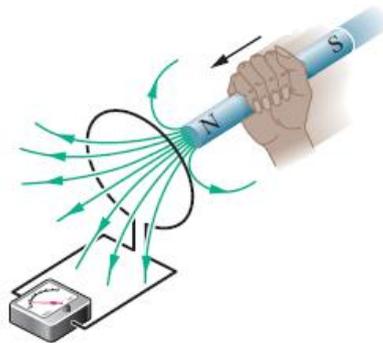
#### 4.7 กฎของฟาราเดย์เกี่ยวกับการเหนี่ยวนำ (Faraday's law induction)

ถ้านำขดลวดตัวนำไฟฟ้ามาวางในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก ให้ฟลักซ์แม่เหล็ก (magnetic flux,  $\phi$ ) ซึ่งหมายถึงจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่พุ่งผ่านพื้นที่หน้าตัดหนึ่งหน่วย ที่ผ่านขดลวดนั้นเปลี่ยนแปลงตามเวลา จะพบว่า เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นในขดลวด กระแสที่เกิดขึ้นเรียกว่า กระแสเหนี่ยวนำ (induced current) ซึ่งเกิดจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (induced electromotive force) จากการวัดค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ พบว่า ขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็ก ( $d\phi/dt$ ) ตัวอย่างเช่น ถ้าวางแท่งแม่เหล็กใกล้ขดลวดตัวนำ แล้วเคลื่อนแท่งแม่เหล็กหรือขดลวดในลักษณะที่ทำให้ ฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านขดลวดเปลี่ยนแปลงแล้ว จะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นในขดลวด ซึ่งจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับว่าแท่งแม่เหล็กหรือขดลวดเคลื่อนที่เร็วหรือช้า ถ้าอัตรา

การเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าสูง แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นก็จะมีค่ามากด้วย ทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นอยู่กับว่าฟลักซ์แม่เหล็กกำลังเพิ่มหรือลดดังภาพที่ 4.5 ซึ่งจะหาได้โดยอาศัยกฎมือซ้าย แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะเกิดในลักษณะที่ต้านกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} \quad (4-13)$$

เมื่อ  $\varepsilon$  คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้า มีหน่วยเป็น โวลต์  
 $\frac{d\phi}{dt}$  คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็ก มีหน่วยเป็น เวเบอร์ต่อวินาที



ภาพที่ 4.5 การทดลองกฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์

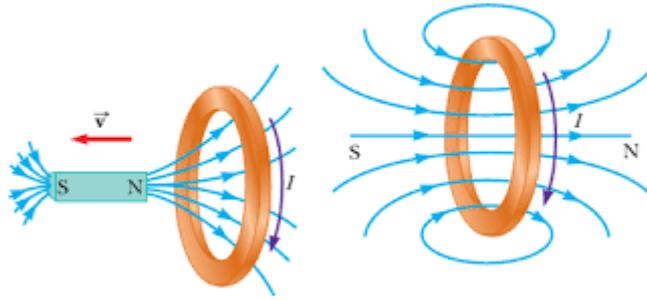
ที่มา : Resnick, R., Walker, J. and Halliday, D., 2014.

#### 4.8 กฎของเลนซ์ (Lenz's law)

เป็นกฎที่ใช้หาทิศทางของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำของขดลวดวงปิดที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเคลื่อนที่สัมพันธ์กันระหว่างขดลวดกับแม่เหล็ก ซึ่งกล่าวว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าขึ้นในขดลวดตัวนำที่จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่มีทิศต่อต้านการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กจากภายนอกขดลวด ซึ่งสามารถพิจารณาได้ 2 กรณีดังนี้

1. ถ้าตัวนำเคลื่อนที่ตัดสนามแม่เหล็ก แล้วสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสเหนี่ยวนำในตัวนำนั้นจะเสริมกับสนามแม่เหล็กเดิมที่ถูกตัดแล้ว

2. ถ้าสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ใกล้ขดลวด สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสเหนี่ยวนำในขดลวดจะต้านการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กที่เคลื่อนที่นั้น ทิศทางของกระแสเหนี่ยวนำที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของแท่งแม่เหล็กใกล้ขดลวดแสดงได้ดังภาพที่ 4.6



ภาพที่ 4.6 กระแสเหนี่ยวนำและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสเหนี่ยวนำ

ที่มา : Serway, R. A., and Jewett, J. W., 2014

#### 4.9 แสงกับการเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Light as electromagnetic wave)

สมัยโบราณเชื่อกันว่าการที่มนุษย์มองเห็นสิ่งต่างๆ ได้ เนื่องจากนัยน์ตาปล่อยอะไรบางอย่างออกไปสู่สิ่งนั้นๆ แต่ต่อมากความเชื่อเปลี่ยนเป็นว่า การมองเห็นสิ่งต่าง ๆ เป็นเพราะสิ่งนั้นเปล่งแสงหรือสะท้อนแสงเข้าสู่นัยน์ตา เซอร์ไอแซค นิวตัน (Sir Isac Newton) ได้ตั้งทฤษฎีขึ้นมาอธิบายเกี่ยวกับแสงและการมองเห็นว่า แสงเป็นอนุภาค ที่ส่งออกมาจากแหล่งกำเนิดแสง โดยแสงเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงออกไปจากแหล่งกำเนิดแสงนั้น แสงจะทะลุผ่านวัตถุโปร่งใสและสะท้อนกลับจากผิววัตถุทึบแสง เมื่ออนุภาคเหล่านี้กระทบหรือสะท้อนเข้าสู่ตาจะทำให้เกิดการมองเห็นขึ้น ต่อมาฮอยเกนส์ (Christiaan Huygens) ได้เสนอแนวคิดว่าแสงเป็นคลื่นและตั้งทฤษฎีคลื่นแสงขึ้น ทฤษฎีนี้อธิบายกฎการสะท้อนและกฎการหักเหของแสงได้ แต่ยังไม่เป็นที่ยอมรับในขณะนั้น เนื่องจากยังไม่พบสมบัติการเลี้ยวเบนของแสงเพราะถ้าแสงเป็นคลื่นจริงแสงต้องเลี้ยวเบนผ่านสิ่งกีดขวางได้

ภายหลัง ยัง (Thomas Young) และเฟรสเนล (Augustin Jean Fresnel) ได้ทดลองพบการแทรกสอดและการเลี้ยวเบนของแสง ซึ่งอธิบายได้ด้วยทฤษฎีคลื่นแสง ทฤษฎีคลื่นแสงจึงเป็นที่ยอมรับกันจนถึงปัจจุบันการแทรกสอดและการเลี้ยวเบนของแสงช่วยให้วัดอัตราเร็วของแสงได้ โดยไมเคิลสัน (Albert Michaelson) และมอร์เลย์ (Edward Morley) ใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า ไมเคิลสัน อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ (Michaelson interferometer) ทดลองวัดอัตราเร็วของแสง ซึ่งได้ผลใกล้เคียงกับค่าที่ยอมรับในปัจจุบัน คือ  $3 \times 10^8$  m/s ในสุญญากาศหรือในอากาศ (โดยประมาณ) และจากการทดลองของยังเกี่ยวกับการแทรกสอดของแสง สามารถวัดความยาวคลื่นของแสงได้ ทำให้แนวคิดที่ว่าแสงเป็นอนุภาคตามข้อเสนอของนิวตันหมดความหมายไป ต่อมาแมกซ์เวลล์ได้เสนอทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นมา ผลจากการคำนวณพบว่าอัตราเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่า

เท่ากับอัตราเร็วของแสง จึงเป็นการสนับสนุนว่าแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง แต่ทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกซ์เวลล์ใช้อธิบายปรากฏการณ์บางอย่างของแสง เช่น ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกไม่ได้ โดยปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเป็นปรากฏการณ์ที่โลหะบางชนิดปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมาทันทีที่แสงซึ่งมีความถี่สูงพอฉายลงบนแผ่นโลหะ จนถึงปี พ.ศ.2448 ไอน์สไตน์ (Albert Einstein) ได้ตั้งทฤษฎีขึ้นมาอธิบายว่าแสงเป็นก้อนพลังงานที่เรียกว่า โฟตอน (Photon) และพลังงานของโฟตอนจะขึ้นกับความถี่ถ้าความถี่ของโฟตอนสูงพอทันทีที่แสงตกกระทบผิวโลหะ โฟตอนของแสงจะถ่ายทอดพลังงานให้อิเล็กตรอนทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากอะตอมของโลหะนั้นได้

การพิจารณาว่าแสงเป็นคลื่นหรือเป็นโฟตอนขึ้นอยู่กับปรากฏการณ์ของแสงที่ต้องการอธิบาย เช่น การอธิบายการสะท้อนและการหักเหของแสงต้องพิจารณาว่าแสงเป็นคลื่นและใช้ทฤษฎีคลื่นของแสงอธิบาย แต่การอธิบายปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกต้องพิจารณาให้แสงเป็นโฟตอนจึงจะอธิบายได้ถูกต้องสมบูรณ์ แนวคิดที่ว่าแสงเป็นทั้งคลื่นและโฟตอนจึงอธิบายปรากฏการณ์ต่าง ๆ ของแสงได้อย่างกว้างขวางและครอบคลุม ในปัจจุบันเป็นที่ยอมรับกันว่า แสงมีสมบัติคู่ (Dual properties) คือ แสงเป็นได้ทั้งคลื่นและโฟตอนในเวลาเดียวกัน แต่ในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะปรากฏการณ์ที่อธิบายได้โดยแนวคิดที่ว่าแสงเป็นคลื่นเท่านั้น

#### 4.10 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave)

ในปี ค.ศ.1867 แมกซ์เวลล์ได้นำเสนอทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เป็นการรวมสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าไว้ในสมการเดียวกัน ในสมการนี้ได้ทำนายถึงการมีอยู่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยทฤษฎีซึ่งในขณะนั้นยังไม่มีผู้ใดค้นพบหรือรู้จักคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามาก่อนเลย ต่อมาจึงมีการพบว่าแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง เช่นเดียวกับกับคลื่นวิทยุ รังสีใต้แดง รังสีเหนือม่วง หรือไมโครเวฟ เป็นต้น การค้นพบทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกซ์เวลล์เป็นการค้นพบที่สำคัญครั้งหนึ่งของนักฟิสิกส์ที่ทำให้มีการพัฒนาความรู้ความเข้าใจคุณสมบัติต่างๆ ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดต่างๆ จนนำไปสู่การศึกษา ค้นคว้าและพัฒนา ประยุกต์ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดต่างๆ ให้เป็นประโยชน์ในชีวิตประจำวันของมนุษย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านกิจการ โทรคมนาคมและการสื่อสารในรูปแบบต่างๆ ที่ใช้กันอยู่อย่างแพร่หลายทั่วโลก เช่นทุกวันนี้

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นคลื่นตามขวางประกอบด้วยสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่มีการแกว่งในทิศทางตั้งฉากกันและทิศตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น มีความเร็วในการเคลื่อนที่

ในสุญญากาศเป็น  $c = 2.9979 \times 10^8$  เมตร/วินาที ถ้าพิจารณาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เป็นคลื่นระนาบที่มีสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตั้งฉากกันทิศใดทิศหนึ่ง ดังภาพที่ 4.6 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ตามแนวแกน x สนามไฟฟ้าตั้งในแนวแกน y สนามแม่เหล็กไฟฟ้าตั้งในแนวแกน z เมื่อพิจารณาในระบบพิกัดฉาก พบว่าค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในแนวแกน x, y และ z ที่เคลื่อนที่ในสุญญากาศเป็นดังนี้

$$E_x = 0$$

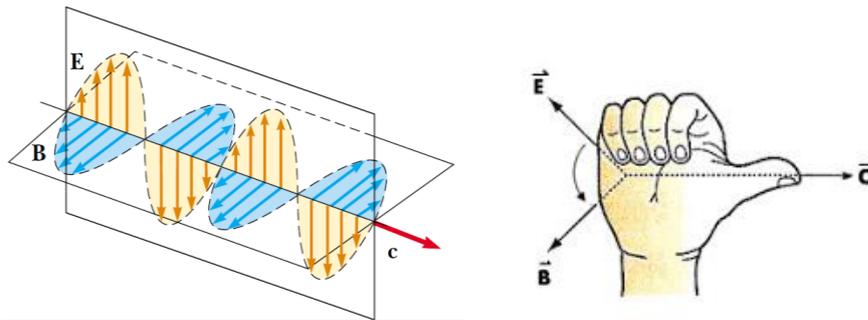
$$E_y = E$$

$$E_z = 0$$

$$B_x = 0$$

$$B_y = 0$$

$$B_z = B$$



ภาพที่ 4.7 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ในแนวแกน x และการใช้กฎมือขวา

ที่มา : Serway, R. A., and Jewett, J. W., 2014

พิจารณาทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้จากเวกเตอร์สนามไฟฟ้า  $E$  และเวกเตอร์สนามแม่เหล็ก  $B$  โดยอาศัยกฎมือขวา คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกันกับทิศของเวกเตอร์  $\vec{E} \times \vec{B}$  ดังเกิดในภาพที่ 4.7 จะพบว่าทิศการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นเช่นที่ว่านี้ (นิ้วชี้ตามทิศทางของ  $E$  หลังจากนั้นนิ้วโป้งไปหา  $B$  นิ้วโป้งแทนทิศการเคลื่อนที่ของคลื่น) ซึ่งจากสมการคลื่นระนาบแม่เหล็กไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ในสุญญากาศของแมกซ์เวลล์ สมการที่หนึ่งจากกฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

หรือ

$$\frac{\partial \vec{E}_z}{\partial y} - \frac{\partial \vec{E}_y}{\partial z} = -\frac{\partial \vec{B}_x}{\partial t}$$

$$\frac{\partial \vec{E}_x}{\partial z} - \frac{\partial \vec{E}_z}{\partial x} = -\frac{\partial \vec{B}_y}{\partial t}$$

$$\frac{\partial \vec{E}_y}{\partial x} - \frac{\partial \vec{E}_x}{\partial y} = -\frac{\partial \vec{B}_z}{\partial t}$$

แต่

$$\vec{E}_y = \vec{E}$$

$$\vec{E}_x = \vec{E}_z = 0$$

และ

$$\vec{B}_z = \vec{B}$$

$$\vec{B}_x = \vec{B}_y = 0$$

จะได้

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial x} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (4-14)$$

หาอนุพันธ์ของสมการ(4-9) เทียบกับ x จะได้

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x^2} = -\frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial x \partial t} \quad (4-15)$$

จากสมการคลื่นระนาบแม่เหล็กไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ในสุญญากาศของแมกซ์เวลล์ สมการที่สองจะได้

$$\nabla \times \vec{B} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (4-16)$$

ดังนั้น

$$\frac{\partial \vec{B}_z}{\partial y} - \frac{\partial \vec{B}_y}{\partial z} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}_x}{\partial t}$$

$$\frac{\partial \vec{B}_x}{\partial z} - \frac{\partial \vec{B}_z}{\partial x} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}_y}{\partial t}$$

$$\frac{\partial \vec{B}_y}{\partial x} - \frac{\partial \vec{B}_x}{\partial y} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}_z}{\partial t}$$

แต่

$$\vec{B}_z = \vec{B}$$

$$\vec{B}_x = \vec{B}_y = 0$$

และ

$$\vec{E}_y = \vec{E}$$

$$\vec{E}_x = \vec{E}_z = 0$$

ดังนั้น 
$$-\frac{\partial \vec{B}}{\partial x} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (4-17)$$

หาอนุพันธ์ของสมการ (4-17) เทียบกับ  $t$  จะได้

$$-\frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t \partial x} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (4-18)$$

จากสมการ (4-15) และ (4-18) จะได้

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x^2} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (4-19)$$

เทียบสมการจะได้ความเร็วในสุญญากาศ ดังนี้

$$\frac{1}{c^2} = \epsilon_0 \mu_0$$

หรือ 
$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

นั่นคือ 
$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (4-20)$$

และหาอนุพันธ์ของสมการ(4-14) เทียบกับ  $t$  จะได้

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x \partial t} = -\frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \quad (4-21)$$

ทำนองเดียวกันกับสมการ (4-17) เทียบกับ  $x$  จะได้สมการคลื่นในเทอมของสนามแม่เหล็ก

$$\frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial x^2} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x \partial t} \quad (4-22)$$

จากสมการ (4-21) และ (4-22) เขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$\frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial x^2} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \quad (4-23)$$

หรือ 
$$\frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \quad (4-24)$$

จะเห็นว่า สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะเคลื่อนที่ไปตามแกน  $+x$  เหมือนกันด้วยความเร็ว

$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$  เท่ากันในสุญญากาศ โดยทิศทางการแกว่งของสนามไฟฟ้าจะตั้งฉากกับทิศของ

สนามแม่เหล็กและปริมาณการกระจัดของสนามทั้งสองเป็นไปตามสมการฟังก์ชันคลื่นของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

$$\vec{E} = E_0 \sin(k\vec{x} - ct) \quad (4-20)$$

หรือ 
$$\vec{E} = E_0 \sin(k\vec{x} - \omega t) \quad (4-21)$$

และ 
$$\vec{B} = B_0 \sin(k\vec{x} - ct) \quad (4-22)$$

หรือ 
$$\vec{B} = B_0 \sin(k\vec{x} - \omega t) \quad (4-23)$$

โดย  $E_0$  แทน แอมพลิจูดของสนามไฟฟ้า  
 $B_0$  แทน แอมพลิจูดของสนามแม่เหล็ก  
 $k$  แทน เวกเตอร์คลื่นเท่ากับ  $\frac{2\pi}{\lambda}$   
 $\omega$  แทน ความถี่เชิงมุมเท่ากับ  $2\pi f$  หรือ  $\frac{2\pi}{T}$   
 $c$  แทน ความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสุญญากาศ  
 เท่ากับ  $\frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$  หรือ  $2.9979 \times 10^8$  เมตร/วินาที

$\epsilon_0$  แทน สภาพยอมของสุญญากาศ (Permittivity) เท่ากับ  $8.85 \times 10^{-12}$  ฟารัด/เมตร

$\mu_0$  แทน สภาพให้ซึมได้ของสุญญากาศ (Permeability) เท่ากับ  $1.26 \times 10^{-6}$  เฮนรี/เมตร

ทิศทางการแกว่งของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก รวมทั้งทิศการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไม่จำเป็นต้องอยู่ในแนวแกน x แกน y และแกน z เท่านั้น จะแกว่งหรือเคลื่อนไหวในแนวแกนใดก็ได้แต่ทิศของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กแกว่งในทิศที่ตั้งฉากกับทิศการเคลื่อนที่ของคลื่นทำให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นคลื่นตามขวาง ความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไม่ได้เกิดจากการเคลื่อนที่ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก เพราะสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กไม่ได้เคลื่อนที่แต่เป็นความเร็วของการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ตามจุดต่างๆ ที่อยู่บนแกนของทิศการเคลื่อนที่ของคลื่น

จาก 
$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial x} = \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

หรือ 
$$\frac{\partial}{\partial x} [E_0 \sin k(x - ct)] = \frac{\partial}{\partial t} [B_0 \sin k(x - ct)]$$

$$E_0 k \cos k(x - ct) = c B_0 k \cos k(x - ct)$$

จะได้  $E_0 = c B_0$  (4-24)

และ  $\frac{E}{B} = \frac{E_0 \sin k(x-ct)}{B_0 \sin k(x-ct)} = \frac{E_0}{B_0}$   
 $= \frac{B_0 c}{B_0} = c$

ดังนั้น  $\vec{E} = c \vec{B}$  (4-25)

สมการ (4-25) แสดงความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เวลาใดๆ

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็ว ( $c$ ) ความยาวคลื่น ( $\lambda$ ) และความถี่ ( $f$ ) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ยังคงเป็นสมการเดียวกับที่เคยใช้ในการอธิบายคลื่นที่ผ่านมาทั้งหมดนั่นคือ

$$c = f\lambda \quad (4-26)$$

**ตัวอย่างที่ 4.4** ถ้าสนามไฟฟ้าในคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าตามสมการ

$$E_y = 100 \sin(10^7 x - \omega t) \text{ V/m}$$

(ก) จงหาความยาวคลื่นและความถี่เชิงมุมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้

(ข) จงเขียนสมการของสนามแม่เหล็กของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้

**วิธีทำ** (ก) ความยาวคลื่นและความถี่เชิงมุมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าเป็น

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} = \frac{2\pi}{10^7} = 6.28 \times 10^{-7} \text{ m} \\ = 628 \text{ nm}$$

โดยที่  $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi c}{\lambda} = kc$

$$\omega = (10^7)(3 \times 10^8) \text{ Hz} = 3 \times 10^{15} \text{ Hz}$$

**คำตอบ** ความยาวคลื่นเท่ากับ 628 นาโนเมตร และความถี่เชิงมุมเท่ากับ  $3 \times 10^{15}$  เฮิรตซ์

(ข) ขนาดของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้ สัมพันธ์กับแอมพลิจูดของสนามแม่เหล็กในคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้ จึงมีค่าเป็น

$$B_0 = \frac{E_0}{c} = \frac{100}{3 \times 10^8} \text{ T} = 3.33 \times 10^{-7} \text{ T}$$

จึงเขียนสมการของสนามแม่เหล็กของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้ได้เป็น

$$\vec{B} = 3.33 \times 10^{-7} \sin(10^7 x - \omega t) \text{ T}$$

$$\text{หรือ} \quad \vec{B} = 3.33 \times 10^{-7} \sin[10^7(x - ct)] \text{ T}$$

**คำตอบ** เขียนสมการสนามแม่เหล็กได้เป็น  $B = 3.33 \times 10^{-7} \sin[10^7(x - ct)]$  เทสลา

**ตัวอย่างที่ 4.5** คลื่นวิทยุหนึ่งมีความยาวคลื่น 300 เมตร เคลื่อนที่ในสุญญากาศ จงหา

(ก) ความถี่ในหน่วย kHz

(ข) คาบของคลื่น

(ค) สนามแม่เหล็กมีค่าเท่าไร เมื่อขนาดของสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 150 N/C

**วิธีทำ**

(ก) 
$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{300 \text{ m}}$$

$$= 10^6 \text{ Hz} = 10^3 \text{ kHz}$$

(ข) 
$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{10^6} = 10^{-6} \text{ s}$$

(ค) 
$$B = \frac{E}{c} = \frac{150}{3 \times 10^8} = 5.0 \times 10^{-7} \text{ T}$$

**คำตอบ** ถ้าสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 150 N/C สนามแม่เหล็กที่เวลานี้ มีค่าเป็น  $5.0 \times 10^{-7}$  เทสลา

#### 4.11 สมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell equations)

จากการศึกษาปรากฏการณ์ทางไฟฟ้าและแม่เหล็กเริ่มตั้งแต่คูลอมบ์ได้ทดลองศึกษาแรงระหว่างประจุและได้ตั้งเป็นกฎที่เรียกว่า กฎของคูลอมบ์ ต่อมาก็ได้ขยายไปอยู่ในรูปของสนามไฟฟ้าและกฎที่สำคัญสำหรับใช้อธิบายลักษณะของฟลักซ์สนามไฟฟ้าคือกฎของเกาส์ กฎดังกล่าวนี้ได้ขยายมาใช้สำหรับแม่เหล็กด้วย เรียกว่า กฎของเกาส์สำหรับแม่เหล็กเมื่อมีการค้นพบความสัมพันธ์ระหว่างไฟฟ้ากับแม่เหล็กแอมแปร์ได้ตั้งกฎสำหรับอธิบายการเกิดสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสเรียกว่ากฎวงจรรของแอมแปร์ซึ่งพบว่าการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าหรือกระแสหรือสนามไฟฟ้าได้แมกซ์เวลล์ (James Clerk Maxwell) นักคณิตศาสตร์และนักฟิสิกส์ชาวสก็อตแลนด์ได้รวบรวมกฎต่างๆทางไฟฟ้าแม่เหล็กเหล่านี้เข้าด้วยกันโดยขยายความในกฎของแอมแปร์ออกไปให้ครอบคลุมถึงลักษณะการเกิดสนามแม่เหล็กเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าแม้ว่าในบริเวณนั้นจะไม่มีสารแม่เหล็กหรือกระแสจริงอยู่ที่ตามกฎต่างๆที่แมกซ์เวลล์รวบรวมขึ้นเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ 4 สมการ

## 1. กฎของเกาส์สำหรับสนามไฟฟ้า

$$\oint_A \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (4-27)$$

จากกฎของเกาส์สำหรับสนามไฟฟ้า อธิบายได้ว่าฟลักซ์ไฟฟ้าสุทธิที่ตัดผ่านผิวปิดรูปทรงใด ๆ มีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณประจุสุทธิภายในผิวปิดนั้น ซึ่งถ้าปริมาณประจุสุทธิภายในผิวปิดใดไม่เป็นศูนย์ ย่อมมีฟลักซ์ไฟฟ้าสุทธิตัดผ่านผิวปิดนั้น โดยประจุภายในผิวปิดอาจมีเพียงประจุบวกหรือประจุลบหรือมีทั้งประจุบวกและประจุลบกระจายอยู่ ประจุบวกและประจุลบ ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดของสนามไฟฟ้าจึงปรากฏแยกกันได้ เช่น ประจุบวกของโปรตอนและประจุลบของอิเล็กตรอน

## 2. กฎของเกาส์สำหรับสนามแม่เหล็ก

$$\oint_A \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (4-28)$$

จากกฎของเกาส์สำหรับสนามแม่เหล็ก จะได้ว่าฟลักซ์แม่เหล็กสุทธิที่ตัดผ่านผิวปิดรูปทรงใด ๆ จะมีค่าเป็นศูนย์เสมอ ซึ่งฟลักซ์แม่เหล็กจะต้องมีทั้งขั้วเหนือกับขั้วใต้คู่กันเสมอ ไม่ว่าจะแบ่งแท่งแม่เหล็กหนึ่งออกเป็นแท่งเล็กๆ ก็แท่งก็ตาม หรือแบ่งจนเหลือเพียงอะตอมเดียว ผลการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียสและการสปีนของอิเล็กตรอน ทำให้เกิดเป็นวงกระแส (Current loop) คล้ายกระแสไฟฟ้าที่ไหลวนในวงลวดกลมที่ทำให้ด้านหนึ่งของวงลวด มีสภาพขั้วเป็นขั้วเหนืออีกด้านหนึ่งของวงลวดมีสภาพเป็นขั้วใต้ (พิจารณาได้จากกฎมือขวา) อะตอมจึงมีสภาพเหมือนแท่งแม่เหล็กและขั้วแม่เหล็กไม่อาจปรากฏแยกกันได้ (ต่างจากประจุไฟฟ้า) กล่าวคือ ถ้าขั้วเหนือปรากฏขึ้นในบริเวณหนึ่ง บริเวณใกล้ๆ กันนั้นต้องมีขั้วใต้ปรากฏอยู่ด้วย

## 3. กฎของฟาราเดย์-เฮนรี

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_M}{dt} \quad (4-29)$$

สำหรับความหมายของกฎของฟาราเดย์-เฮนรี สนามไฟฟ้ารอบวงปิดใดๆ มีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราการเปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลาของฟลักซ์แม่เหล็กที่ตัดผ่านวงปิดนั้น ซึ่งสนามแม่เหล็กที่กำลังเปลี่ยนแปลงตามเวลาจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้าในบริเวณนั้น ไม่ว่าบริเวณนั้นจะเป็นสุญญากาศ บริเวณในตัวนำหรือบริเวณฉนวน

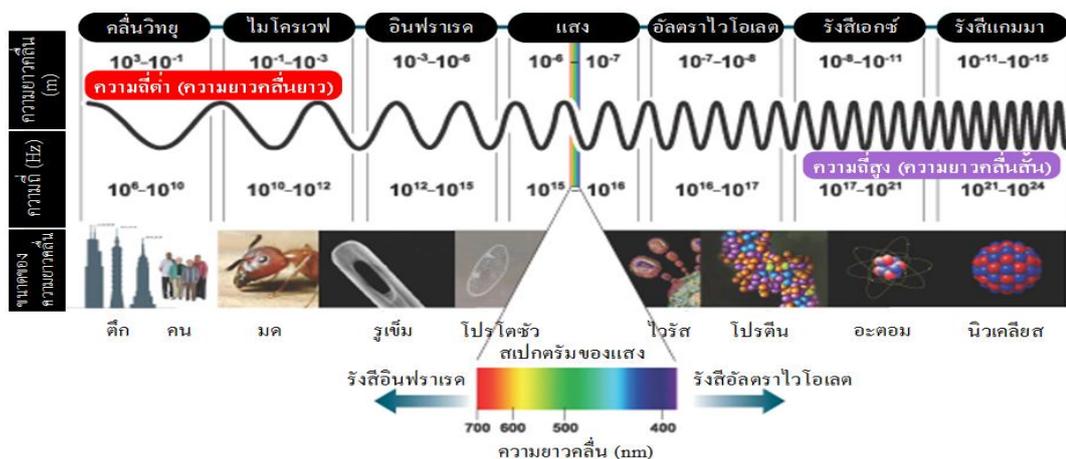
## 4. กฎของแอมแปร์ที่ปรับปรุงโดยแมกซ์เวลล์

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 \left( I + \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \right) \quad (4-30)$$

สำหรับกฎของแอมแปร์ที่ปรับโดยแมกซ์เวลล์ สามารถกล่าวได้ว่า สนามแม่เหล็กรอบวงปิดใดๆ มีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสไฟฟ้าสุทธิที่ไหลผ่านวงปิดนั้น โดยกระแสไฟฟ้าสุทธิหมายถึงทั้งกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวนำและกระแสกระจัดขยายความได้ว่า นอกจากประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่หรือกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวนำที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กในบริเวณรอบๆ ประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่หรือบริเวณรอบๆตัวนำแล้ว สนามไฟฟ้าที่กำลังเปลี่ยนแปลงตามเวลาในบริเวณใด จะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กในบริเวณนั้น ไม่ว่าจะบริเวณนั้นจะเป็นสุญญากาศ บริเวณในตัวนำหรือบริเวณฉนวน

## 4.12 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave spectrum)

ประจุไฟฟ้าจะสั่นด้วยความถี่มากหรือน้อยเพียงใด จะมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดขึ้นเสมอ เนื่องจากประจุมีความเร่ง เพราะฉะนั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่อมมีค่าความถี่หรือความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน เนื่องจากอัตราเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสุญญากาศมีค่าเท่ากันหมด เท่ากับ  $3 \times 10^8$  m/s ช่วงของความถี่หรือความยาวคลื่นทั้งหลายนี้ เรียกว่า สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังภาพที่ 4.8 แสดงช่วงของความถี่และความยาวคลื่นต่างๆ ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า



ภาพที่ 4.8 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ที่มา: สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, ออนไลน์. เข้าถึงเมื่อ 2 มีนาคม 2563

จาก <http://www.astro.virginia.edu>

สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความยาวคลื่นแสงที่ตามองเห็นจะเริ่มจากสีม่วงไปสีแดง ส่วนสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่นอื่นๆ มีชื่อเรียกต่างกันไป ซึ่งประกอบไปด้วยคลื่นวิทยุ ไมโครเวฟ อินฟราเรด อุลตราไวโอเลต (รังสีUV) รังสีเอ็กซ์ และรังสีแกมมา

#### 4.12.1 คลื่นวิทยุ

มีความถี่อยู่ในช่วง  $10^6 - 10^9$  เฮิรตซ์ คลื่นวิทยุมี 2 ระบบ ได้แก่

1. คลื่นวิทยุระบบเอเอ็ม (Amplitude modulation : AM) ความถี่ตั้งแต่ 530–1600 กิโลเฮิรตซ์ที่สถานีวิทยุส่งออกอากาศในระบบเอเอ็มเป็นการสื่อสารโดยการผสม (Modulate) คลื่นเสียงเข้ากับคลื่นวิทยุซึ่งเรียกว่าคลื่นพาหะและสัญญาณเสียงจะบังคับให้แอมพลิจูดของคลื่นพาหะเปลี่ยนแปลงไป เมื่อคลื่นวิทยุที่ผสมสัญญาณเสียงกระจายออกจากสายอากาศไปยังเครื่องรับวิทยุ เครื่องรับวิทยุจะทำหน้าที่แยกสัญญาณเสียง ซึ่งอยู่ในรูปของสัญญาณไฟฟ้าออกจากสัญญาณคลื่นวิทยุแล้วขยายให้มีแอมพลิจูดสูงขึ้นเพื่อส่งให้ลำโพงแปลงสัญญาณออกมาเป็นเสียงที่หูรับฟัง

2. คลื่นวิทยุระบบเอฟเอ็ม (Frequency modulation : FM) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผสมสัญญาณเสียงเข้ากับคลื่นพาหะโดยให้ความถี่ของคลื่นพาหะเปลี่ยนแปลงสัญญาณเสียงการส่งคลื่นในระบบเอเอ็มใช้ช่วงความถี่จาก 88–108 เมกะเฮิรตซ์ ระบบการส่งคลื่นแบบเอเอ็มและเอฟเอ็มต่างกันที่วิธีการผสมคลื่น ดังนั้นเครื่องรับวิทยุระบบเอเอ็มกับเอฟเอ็มจึงไม่สามารถรับคลื่นวิทยุของอีกระบบหนึ่งได้ในการส่งกระจายเสียงด้วยคลื่นวิทยุระบบเอเอ็มคลื่นสามารถเดินทางถึงเครื่องรับวิทยุได้สองทางคือ เคลื่อนที่ไปตรง ๆ ในแนวระดับสายตา ซึ่งเรียกว่า คลื่นดินส่วนคลื่นที่สะท้อนกลับลงมาจากชั้นไอโอโนสเฟียร์ เรียกว่า คลื่นฟ้า ส่วนคลื่นวิทยุระบบเอเอ็มซึ่งมีความถี่สูงจะมีการสะท้อนที่ชั้นไอโอโนสเฟียร์น้อย ดังนั้นถ้าต้องการส่งกระจายเสียงด้วยระบบเอเอ็มให้ครอบคลุมพื้นที่ไกล ๆ จึงต้องมีสถานีถ่ายทอดเป็นระยะ ๆ และผู้รับต้องตั้งสายอากาศให้สูง ในขณะที่คลื่นวิทยุเคลื่อนที่ผ่านสิ่งกีดขวางที่มีขนาดใกล้เคียงความยาวคลื่นจะมีการเลี้ยวเบนเกิดขึ้นทำให้คลื่นวิทยุอ้อมผ่านไปได้ แต่ถ้าสิ่งกีดขวางมีขนาดใหญ่มาก เช่น ภูเขาคลื่นวิทยุที่มีความยาวคลื่นสั้นจะไม่สะท้อนอ้อมผ่านภูเขาไปได้ทำให้ด้านตรงข้ามของภูเขาเป็นจุดปลอดคลื่น โลหะมีสมบัติสามารถสะท้อนและดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดี ดังนั้นคลื่นวิทยุจะทะลุผ่านเข้าไปถึงภายในโลหะได้ยาก อาจจะสังเกตได้ง่ายเมื่อฟังวิทยุในรถยนต์เมื่อรถยนต์ผ่านใต้สะพานที่มีโครงสร้างเป็นเหล็กเสียงวิทยุจะเบาลงหรือเงียบหายไป ในการส่งกระจายเสียงสถานีส่งคลื่นวิทยุหนึ่งๆจะใช้คลื่นวิทยุที่มีความถี่คลื่น โดยเฉพาะ เพราะถ้าใช้คลื่นที่มีความถี่เดียวกันจะเข้าไปใน

เครื่องรับพร้อมกันเสียงจะรบกวนกัน แต่ถ้าสถานีส่งวิทยุอยู่ห่างกันมาก ๆ จนคลื่นวิทยุของสถานีทั้งสองไม่สามารถรบกวนกันได้สถานีทั้งสองอาจใช้ความถี่เดียวกันได้

คลื่นโทรทัศน์มีความถี่ประมาณ  $10^8$  เฮิรตซ์ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูงขนาดนี้จะไม่สะท้อนที่ชั้นไอโอโนสเฟียร์ แต่จะทะลุผ่านชั้นบรรยากาศไปนอกโลก ดังนั้นการส่งคลื่นโทรทัศน์ไปไกล ๆ จะต้องใช้สถานีถ่ายทอดคลื่นเป็นระยะๆ เพื่อรับคลื่นโทรทัศน์จากสถานีส่งซึ่งมาในแนวเส้นตรง แล้วขยายให้สัญญาณแรงขึ้นก่อนที่จะส่งไปยังสถานีที่อยู่ถัดไป เพราะสัญญาณเดินทางเป็นเส้นตรงดังนั้นสัญญาณจะไปได้ไกลสุดเพียงประมาณ 80 กิโลเมตร บนผิวโลกเท่านั้น ทั้งนี้เพราะผิวโลกโค้งหรืออาจใช้คลื่นไมโครเวฟนำสัญญาณจากสถานีส่งไปยังดาวเทียม ซึ่งโคจรอยู่ในวงโคจรที่ตำแหน่งหยุดนิ่งเมื่อเทียบกับตำแหน่งหนึ่งๆบนผิวโลก นั่นคือ ดาวเทียมมีความเร็วเชิงมุมเดียวกับความเร็วในการหมุนรอบตัวเองของโลกจากนั้นดาวเทียมก็จะส่งคลื่นต่อไปยังสถานีรับที่อยู่ไกลๆได้

#### 4.12.2 คลื่นไมโครเวฟ

คลื่นไมโครเวฟมีความถี่ตั้งแต่  $1 \times 10^9$  เฮิรตซ์ ถึง  $3 \times 10^{11}$  เฮิรตซ์ ปัจจุบันใช้คลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่ 2400 เมกะเฮิรตซ์ ในการทำอาหาร เปิดปิดประตูโรงรถ ถ่ายภาพพื้นผิวดาวเคราะห์ ศึกษากำเนิดของจักรวาล เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟสะท้อนจากผิวโลหะได้ดี ดังนั้นจึงมีการนำคุณสมบัตินี้ไปใช้ประโยชน์ในการตรวจหาคำแหน่งของอากาศยานตรวจจับอัตราเร็วของรถยนต์ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวเรียกว่าเรดาร์

#### 4.12.3 รังสีอินฟราเรด

เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่ในช่วง  $10^{11} - 10^{14}$  เฮิรตซ์ สามารถแบ่งเป็น 3 ช่วง

1. อินฟราเรดใกล้ (0.7–1.5 ไมโครเมตร)
2. อินฟราเรดปานกลาง (1.5–4.0 ไมโครเมตร)
3. อินฟราเรดไกล (4.0–1000 ไมโครเมตร)

วัตถุที่มีความร้อนจะแผ่รังสีอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่า 100 ไมโครเมตร กระจกสามเหลี่ยมของนิวตันรับรังสีอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่นบางช่วงได้ และฟิล์มถ่ายภาพบางชนิดสามารถตรวจจับรังสีอินฟราเรดได้ ตามปกติแล้วสิ่งมีชีวิตทุกชนิดจะแผ่รังสีอินฟราเรดตลอดเวลาและรังสีอินฟราเรดสามารถทะลุผ่านเมฆหมอกที่หนาที่บึกเกินกว่าที่แสงธรรมดาจะผ่านได้ นักเทคโนโลยีจึงอาศัยสมบัตินี้ในการถ่ายภาพพื้นโลกจากดาวเทียมเพื่อศึกษาการแปรสภาพของป่าไม้หรือการอพยพเคลื่อนย้ายของฝูงสัตว์ เป็นต้น รังสีอินฟราเรดมีการใช้ในระบบควบคุมที่เรียกว่า รีโมทคอนโทรล หรือการควบคุมระยะไกล ซึ่งเป็นระบบควบคุมการทำงาน

ของเครื่องรับโทรทัศน์จากระยะไกล เช่น ทำการปิดเปิดเครื่องการเปลี่ยนช่อง เป็นต้น ในกรณีนี้รังสีอินฟราเรดจะเป็นตัวนำคำสั่งจากอุปกรณ์ควบคุมไปยังเครื่องรับนอกจากนี้ในทางการทหารก็มีการนำรังสีอินฟราเรดมาใช้ควบคุมอาวุธนำวิถีให้เคลื่อนไปยังเป้าหมายได้อย่างแม่นยำ เทคโนโลยีปัจจุบันใช้การส่งสัญญาณด้วยเส้นใยนำแสงและคลื่นที่เป็นพาหะนำสัญญาณคือ รังสีอินฟราเรด เพราะการใช้แสงธรรมดา นำสัญญาณอาจถูกรบกวนโดยแสงจากภายนอกได้ง่าย

#### 4.12.4 แสงที่ตามองเห็น

แสงมีความถี่โดยประมาณตั้งแต่  $4 \times 10^{14}$  เฮิร์ตซ์ ถึง  $8 \times 10^{14}$  เฮิร์ตซ์ ประสาทตาของมนุษย์ไวต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าช่วงนี้มาก วัตถุที่มีอุณหภูมิสูงมาก ๆ เช่น ไส้หลอดไฟฟ้าที่มีอุณหภูมิสูงประมาณ 2500 องศาเซลเซียส หรือฝิวดวงอาทิตย์ที่มีอุณหภูมิประมาณ 6000 องศาเซลเซียส จะเปล่งแสงได้ สำหรับแสงที่มีความยาวคลื่นประมาณ 700 นาโนเมตร ประสาทตาจะรับรู้เป็นแสงสีแดง ส่วนแสงที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่าประสาทตาจะรับรู้เป็นแสงสีส้ม เหลือง เขียว น้ำเงิน ตามลำดับ จนถึงแสงสีม่วง ซึ่งมีความยาวคลื่นประมาณ 400 นาโนเมตร แสงสีต่าง ๆ ที่กล่าวมานี้เมื่อรวมกันด้วยปริมาณที่เหมาะสมจะเป็นแสงสีขาว

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเช่นเดียวกับคลื่นวิทยุ ดังนั้นอาจใช้แสงเป็นคลื่นพาหะนำข่าวสารในการสื่อสารได้ เช่นเดียวกับการใช้คลื่นวิทยุและคลื่นโทรทัศน์เป็นพาหะนำเสียงและภาพดังกล่าวแล้วเหตุที่ไม่สามารถใช้แสงที่เกิดจากวัตถุที่มีความร้อนเป็นคลื่นพาหะเพราะว่าแสงเหล่านี้มีหลายความถี่และเฟสที่ไม่แน่นอน ปัจจุบันเรามีเครื่องกำเนิดเลเซอร์ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดแสงอาพันธ์ที่ให้แสงได้ และมีผู้ทดลองผสมสัญญาณเสียงและภาพกับเลเซอร์ได้สำเร็จ นอกจากใช้ในการสื่อสารแล้ว เลเซอร์ยังใช้ในวงการต่างๆ ได้อย่างกว้างขวาง เช่น วงการแพทย์ใช้ในการผ่าตัดนิยน์ตา เป็นต้น เลเซอร์เป็นเขียนภาษาอังกฤษว่า LASER ซึ่งย่อมาจาก Light amplification by stimulated emission of radiation ที่แปลเป็นภาษาไทยได้ว่า “การขยายสัญญาณแสงโดยการปล่อยรังสีแบบเร่งเร้า” เพราะแสงเลเซอร์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้จากกระบวนการปล่อยรังสีแบบเร่งเร้าและสัญญาณแสงถูกขยาย

#### 4.12.5 รังสีอัลตราไวโอเล็ต

เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่อยู่ในช่วง  $10^{15}$  ถึง  $10^{18}$  เฮิร์ตซ์ รังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีในธรรมชาติส่วนใหญ่มาจากดวงอาทิตย์และรังสีนี้ทำให้บรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์มีประจุอิสระและไอออน เพราะรังสีอัลตราไวโอเล็ตมีพลังงานสูงพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากโมเลกุลของอากาศ ซึ่งพบว่าในไอโอโนสเฟียร์มีโมเลกุลหลายชนิด เช่น

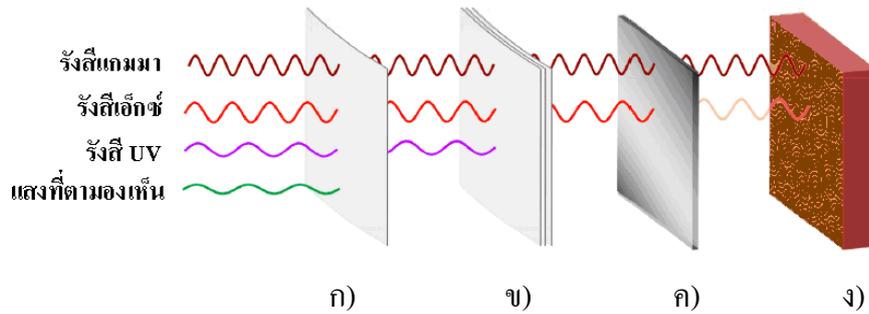
ไอโซน ซึ่งสามารถกั้นรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ดี ตามปกติรังสีอัลตราไวโอเล็ตไม่สามารถทะลุผ่านสิ่งกีดขวางที่หนาได้ รังสีนี้สามารถฆ่าเชื้อโรคบางชนิดได้ ดังนั้นในวงการแพทย์จึงใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตในปริมาณพอเหมาะเพื่อรักษาโรคผิวหนังบางชนิด

#### 4.12.6 รังสีเอกซ์

เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่อยู่ในช่วง  $10^{17} - 10^{21}$  เฮิรตซ์ รังสีเอกซ์สามารถทะลุผ่านสิ่งกีดขวางหนาๆ ได้ ดังนั้นวงการอุตสาหกรรมจึงใช้รังสีเอกซ์ตรวจหารอยร้าวภายในชิ้นส่วนโลหะขนาดใหญ่ เจ้าหน้าที่ด้านตรวจก็ใช้รังสีเอกซ์ตรวจหาอาวุธปืนหรือวัตถุระเบิดในกระเป๋าเดินทางโดยไม่ต้องเปิดกระเป๋า โดยอาศัยหลักการว่ารังสีเอกซ์จะถูกขวางกั้นโดยอะตอมของธาตุนั้นๆ ได้ดีกว่าธาตุเบา ทางการแพทย์ใช้วิธีฉายรังสีเอกซ์ผ่านร่างกายคนไปตกบนฟิล์มเพื่อตรวจดูลักษณะผิดปกติของอวัยวะภายในและกระดูก เมื่อฉายรังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นประมาณ 10 นาโนเมตร ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่ใกล้เคียงกับกับขนาดของอะตอมและระยะห่างระหว่างอะตอมของผลึกผ่านผลึกของโลหะที่จัดเรียงตัวกันอย่างมีระเบียบจะเกิดปรากฏการณ์เลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เช่นเดียวกับเมื่อแสงผ่านเกรตติงทำให้สามารถคำนวณหาระยะห่างระหว่างอะตอมและลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมจึงทำให้ทราบโครงสร้างของผลึกแต่ละชนิดได้

#### 4.12.7 รังสีแกมมา

รังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูงกว่ารังสีเอกซ์ แต่เดิมรังสีแกมมาเป็นชื่อเรียกคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงที่เกิดจากการสลายของนิวเคลียสของธาตุกัมมันตรังสี แต่ในปัจจุบันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าใดๆ ที่มีความถี่สูงกว่ารังสีเอกซ์โดยทั่วไปจะเรียกรังสีแกมมาทั้งนั้น ปฏิกิริยานิวเคลียร์บางปฏิกิริยาจะปลดปล่อยรังสีแกมมาการระเบิดของลูกระเบิดนิวเคลียร์จะให้รังสีแกมมาปริมาณมาก การมีความถี่สูงทำให้รังสีนี้เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตทุกชนิด นอกจากนี้ยังมีรังสีแกมมาที่ไม่ได้เกิดจากการสลายของธาตุกัมมันตรังสี เช่น รังสีแกมมาที่มาจากอวกาศและรังสีคอสมิกนอกโลก อนุภาคประจุไฟฟ้าที่ถูกเร่งในเครื่องเร่งอนุภาคก็สามารถให้กำเนิดรังสีแกมมาได้เช่นกัน



ภาพที่ 4.9 เปรียบเทียบความสามารถในการทะลุทะลวงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ก) กระดาษหนึ่งแผ่น ข) กระดาษหลายแผ่น ค) แผ่นอะลูมิเนียม ง) กำแพงคอนกรีตหนา

ที่มา: สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. ออนไลน์. เข้าถึงเมื่อ 5 มีนาคม

2563 จาก <https://nnnattanicha.wordpress.com>

#### 4.13 พลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Energy of electromagnetic wave)

คลื่นมีพลังงานอยู่ด้วยเสมอสามารถคำนวณหาความเข้มของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ความเข้มของคลื่นเป็นกำลังของคลื่นต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ได้จากขนาดของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของคลื่นแม่เหล็กนั้น ๆ โดยอาศัยความสัมพันธ์

$$I = \frac{E_0 B_0}{2\mu_0} \quad (4-31)$$

โดย  $\mu_0$  แทน ค่าความซาบซึ่มได้ของสนามแม่เหล็กในสุญญากาศ เป็นค่าคงตัวที่มีค่าเท่ากับ  $4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$

$E_0$  แทน แอมพลิจูดของสนามไฟฟ้า

$B_0$  แทนแอมพลิจูดของสนามแม่เหล็ก

ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของสนามไฟฟ้าและขนาดของสนามแม่เหล็ก สามารถเขียนสมการที่ (4-31) ได้เป็น

$$I = \frac{E_0 B_0}{2\mu_0} = \frac{c}{2\mu_0} B_0^2 = \frac{1}{2\mu_0 c} E_0^2 \quad (4-32)$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่าความเข้มของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแปรผันตามแอมพลิจูดกำลังสองของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเช่นเดียวกับความเข้มของคลื่นกลที่ได้ศึกษาผ่านมา

ในที่นี้จะพิจารณาพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปของความเข้ม โดยอาศัยค่าของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่รวมกันเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีวิธีการคำนวณพลังงาน

ของแสงในลักษณะที่แตกต่างกันออกไปเนื่องจากคลื่นมีคุณสมบัติความเป็นอนุภาคอยู่ในตัวด้วย เช่นเดียวกัน

**ตัวอย่างที่ 4.6** ถ้ากำลังของแสงจากโคมไฟอ่านหนังสือที่ตกกระทบหนังสือที่มีพื้นที่หน้าตัด  $0.05 \text{ m}^2$  มีค่าเท่ากับ  $2 \text{ W}$  จงคำนวณหาแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของแสงนี้  
**วิธีทำ** ความเข้ม คือ กำลังต่อพื้นที่หน้าตัด ดังนั้นความเข้มของคลื่นแสงที่ตกกระทบหนังสือมีค่า

$$\begin{aligned} I &= \frac{P}{A} \\ &= \frac{2}{0.05} \\ &= 40 \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

เพื่อคำนวณหาแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้า

$$\begin{aligned} I &= \frac{1}{2\mu_0 c} E_0^2 \\ E_{\text{max}} &= \sqrt{2\mu_0 c I} \\ &= \sqrt{2(4\pi \times 10^{-7})(3 \times 10^8)(40)} \\ &= 173.7 \text{ V/m} \end{aligned}$$

เพื่อคำนวณหาแอมพลิจูดของสนามแม่เหล็ก

$$\begin{aligned} I &= \frac{c}{2\mu_0} B_0^2 \\ B_0 &= \sqrt{\frac{2\mu_0 I}{c}} \\ &= \sqrt{\frac{2(4\pi \times 10^{-7})(40)}{(3 \times 10^8)}} \\ &= 5.79 \times 10^{-7} \text{ V/m} \end{aligned}$$

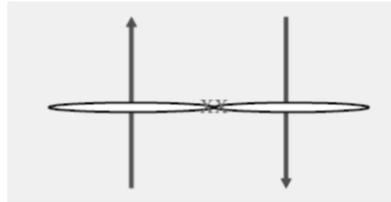
**คำตอบ** ขนาดของสนามแม่เหล็กมากที่สุดมีค่าเท่ากับ  $5.79 \times 10^{-7}$  เทสลา

#### 4.14 บทสรุป

ฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านพื้นผิวคำนวณจากการอินทิเกรตตลอดพื้นผิวนั้น โดยกฎของบิโอต์-ซาวาร์ตบอกไว้ว่า สนามแม่เหล็กที่จุดใด ๆ คำนวณจากการแทนค่าความยาวของส่วนเล็ก ๆ ควบคู่กับกระแสไฟฟ้าที่คงที่ผ่านความยาวส่วนนั้น โดยแรงแม่เหล็กต่อหนึ่งหน่วยความยาวระหว่างเส้นลวดขนานกันสองเส้นที่วางแยกห่างกัน จะมีแรงดึงดูดกันถ้ากระแสไหลอยู่ในทิศทางเดียวกัน และผลัดกันถ้ากระแสมีทิศทางตรงข้ามกัน กฎของแอมแปร์ กล่าวถึงการอินทิเกรตตามเส้นของสนามแม่เหล็กที่คูณแบบสเกลาร์กับส่วนความยาวสั้น ๆ รอบเส้นทางปิดใด ๆ ซึ่งจะเท่ากับกระแสคงที่ทั้งหมดที่ผ่านพื้นผิวใด ๆ ที่ถูกล้อมรอบด้วยเส้นทางปิดนั้น สำหรับกฎของเกาส์ของแม่เหล็กกล่าวว่า ฟลักซ์แม่เหล็กสุทธิที่ผ่านพื้นผิวปิดใด ๆ จะมีค่าเป็นศูนย์ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า ซึ่งอยู่ในระนาบที่ตั้งฉากกันและเหนี่ยวนำกันเองต่อไปเรื่อยๆ ตามสมการแมกซ์เวลล์ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะขนส่งพลังงานไปในทิศตั้งฉากกับระนาบสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลาง คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีหลายชนิดขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดและความยาวคลื่น แต่ละชนิดมีสมบัติเฉพาะแตกต่างกันและนำมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะในทางสื่อสาร โทรคมนาคม การแพทย์และอุตสาหกรรม แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ทำให้ประสาทตาของคนปกติเกิดความรู้สึกมองเห็น สมบัติที่สำคัญของแสง คือ การสะท้อน การหักเห การแทรกสอด การเลี้ยวเบน และการโพลาไรส์ สมบัติของแสงเหล่านี้นำมาใช้ประโยชน์ใช้ในทัศนอุปกรณ์ต่าง ๆ

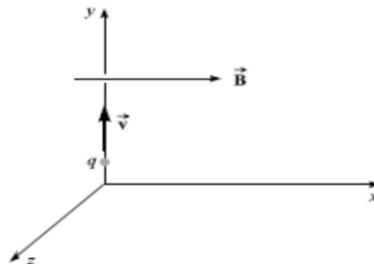
## แบบฝึกหัด

1. จากภาพที่ 4.10 ลวดยาวสองเส้นวางขนานกันห่างกัน 10 เซนติเมตรและมีกระแสไหลภายใน 6.0 A และ 4.0 A จงหาแรงบนเส้นลวด D ซึ่งมีความยาว 1 เมตร ถ้ากระแส (ก) มีทิศไปทางเดียวกัน (ข) มีทิศตรงข้ามกัน [คำตอบ (ก) 48  $\mu$ N (ข) 48  $\mu$ N แต่ทิศทางตรงข้าม]



ภาพที่ 4.10 สำหรับคำถามข้อ 1

2. เส้นลวดสองเส้นห่างกัน 20 เซนติเมตรมีกระแสไหลเท่ากันทิศตรงกันข้ามขนาด 10 A จงหาขนาดของสนามแม่เหล็กกึ่งกลางระหว่างเส้นลวดทั้งสอง [คำตอบ  $4 \times 10^{-5}$  T]
3. สนามไฟฟ้าขนาด 3.0 G ในทิศทาง x ดังภาพที่ 4.11 ถ้าโปรตอน(+e) ถูกยิงเข้าไปในสนามไฟฟ้าในทิศ +y ด้วยความเร็ว  $5 \times 10^6$  m/s (ก) จงหาขนาดและทิศของแรงที่กระทำกับโปรตอน (ข) ถ้าสลับโปรตอนเป็น อิเล็กตรอนขนาดและทิศจะเป็นอย่างไร [คำตอบ (ก) แรงมีขนาด  $2.4 \times 10^{-16}$  N ทิศ -Z , (ข) แรงมีขนาด  $2.4 \times 10^{-16}$  N ทิศ +Z]



ภาพที่ 4.11 สำหรับคำถามข้อ 3

4. จงคำนวณหาความเข้มของสนามแม่เหล็กในอากาศ ระยะห่างจากลวดเส้นตรงยาวซึ่งมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน 15 A [คำตอบ  $6 \times 10^{-5}$  T]
5. เส้นลวดยาวสองเส้นขนานกันมีระยะห่าง 4 เซนติเมตรและมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน 2A และ 6 A ในทิศทางเดียวกัน จงคำนวณแรงระหว่างลวดต่อเมตรของระยะความยาวลวด [คำตอบ  $6 \times 10^{-5}$  N/m แรงดูด]
6. จงหาแรงที่เกิดจากการยิงอิเล็กตรอนเข้าไปในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กความเข้ม 10 เวเบอร์ต่อตารางเมตร ด้วยความเร็ว  $3 \times 10^7$  เมตรต่อวินาที [คำตอบ  $4.8 \times 10^{-11}$  นิวตัน]

## เอกสารอ้างอิง

- ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์. (2535). **ฟิสิกส์ 2**. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เชิญโชค สรขวัญ และคณะ. (2546). **ฟิสิกส์ทั่วไป 2 General Physics II 2<sup>nd</sup> ed.** กรุงเทพมหานคร : คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล.
- พงษ์ศักดิ์ ชินนาบุญ. (2552). **ฟิสิกส์มหาวิทยาลัย 2 เล่ม 1**. กรุงเทพมหานคร: วิทย์พัฒนา.
- ประธาน บุรณศิริ และคณะ. (2559). **ฟิสิกส์ 2**. กรุงเทพมหานคร: เอสแควร์ อี จำกัด.
- ยัง และ เฟรดแมน. (2548). **ฟิสิกส์ระดับอุดมศึกษา เล่ม 2**. (แปลจาก **University Physics with Modern Physics** โดย ปิยพงษ์ สิทธิคง). กรุงเทพมหานคร: เพียร์สัน เอ็ดดูเคชัน อิน โด ไชนา. สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. *สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า*. สืบค้น 2 มีนาคม 2563 จาก <http://www.astro.virginia.edu>
- สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. *อำนาจทะลุทะลวงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า*. สืบค้น 5 มีนาคม 2563 จาก <https://nntanicha.wordpress.com>
- Bellance, J, and Brandt, R. (2010). **21<sup>st</sup> Century Skills Rethinking How Students Learn**. Solution Tree Press.
- Halpern, A. (2011). **Schaum's outlines 3,000 Solved Problems in Physics**. New York: The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Serway, R. A., and Jewett, J. W. (2014). **Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics 9<sup>th</sup> ed.** Belmont: Brooks/Cole-Thomson Learning.
- Serway, R.A., Vuille, C., and Hughes, J. (2015). **College Physics 10<sup>th</sup> ed.** Stamford: Cengage Learning.
- Tientongdee, S. (2018). *Development of problem-solving skill by using active learning for student teachers in Introductory Physics*. J. Phys.: Conf. Ser. 1144 012002
- Thornton, T.S., and Rex, A. (2013). **Modern Physics for Scientists and Engineers 4<sup>th</sup> ed.** Boston: Brooks/Cole- Cengage Learning.
- Young, H.D., and Freedman, R.A. (2016). **Sear's & Zemansky's University Physics with Modern Physics 14<sup>th</sup> ed.** Essex: Pearson Education Limited.

## บทที่ 5

### ทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษ

(Special theory of relativity)

#### 5.1 บทนำ

ความสำเร็จของกฎของนิวตันและทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าในฟิสิกส์แบบดั้งเดิม ทำให้นักฟิสิกส์เข้าใจธรรมชาติมากขึ้นมาก แต่ก็ยังมีบางปรากฏการณ์ที่ไม่สามารถอธิบายได้ด้วยกฎของนิวตันหรือทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า ผลการทดลองมากมายไม่สามารถอธิบายได้มีจำนวนมากขึ้นเรื่อยๆ จนในที่สุดในปลายศตวรรษที่ 19 มีการเปลี่ยนแปลงที่สะท้อนวงการในโลกของฟิสิกส์ ในปี ค.ศ. 1900 มัคซ์ พลังค์ (Max Planck) ได้เสนอความคิดพื้นฐานซึ่งนำไปสู่การกำเนิดทฤษฎีควอนตัม ในปี ค.ศ. 1905 อัลเบิร์ต ไอน์สไตน์ (Albert Einstein) ได้ให้กำเนิดทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษ ที่ส่งผลต่อความเข้าใจธรรมชาติของวิทยาศาสตร์อย่างลึกซึ้ง และเป็นพื้นฐานในการปฏิวัติองค์ความรู้ในกลศาสตร์แขนงต่าง ๆ ในฟิสิกส์ เช่น ฟิสิกส์อะตอม ฟิสิกส์นิวเคลียร์ และฟิสิกส์ของสสารควบแน่น การเกิดของทฤษฎีใหม่ ๆ หลายทฤษฎีสามารถนำไปใช้สำหรับอธิบายปรากฏการณ์ที่อธิบายไม่ได้ด้วยทฤษฎียุคดั้งเดิม ทฤษฎีที่สร้างขึ้นใหม่เหล่านี้รวมเรียกว่า ฟิสิกส์ยุคใหม่ โดยนักวิทยาศาสตร์ได้ศึกษาลึกลงไปถึงระดับอะตอมและนิวเคลียส และได้ทำการทดลองและศึกษาปรากฏการณ์หลายอย่าง เช่น การแผ่รังสีของวัตถุดำ ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก การเกิดเส้นสเปกตรัม การเกิดรังสีเอกซ์ เป็นต้น พบว่าปรากฏการณ์เหล่านี้ไม่สามารถใช้ความรู้เดิมที่มีอยู่มาอธิบายได้ จึงได้มีการตั้งกฎเกณฑ์ใหม่ขึ้นมาเพื่อใช้อธิบายความสัมพันธ์ของปรากฏการณ์ในระดับอะตอม ซึ่งทฤษฎีนี้เรียกว่า ทฤษฎีควอนตัม อย่างไรก็ตามแม้ว่าฟิสิกส์ที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นในช่วงศตวรรษที่ 20 ได้นำไปสู่ความสำเร็จทางเทคโนโลยีที่สำคัญจำนวนมาก แต่เรื่องราวทั้งหมดก็ยังไม่สมบูรณ์ การค้นพบใหม่ๆ ยังคงดำเนินต่อไปอย่างต่อเนื่องตลอดช่วงชีวิตของมนุษย์

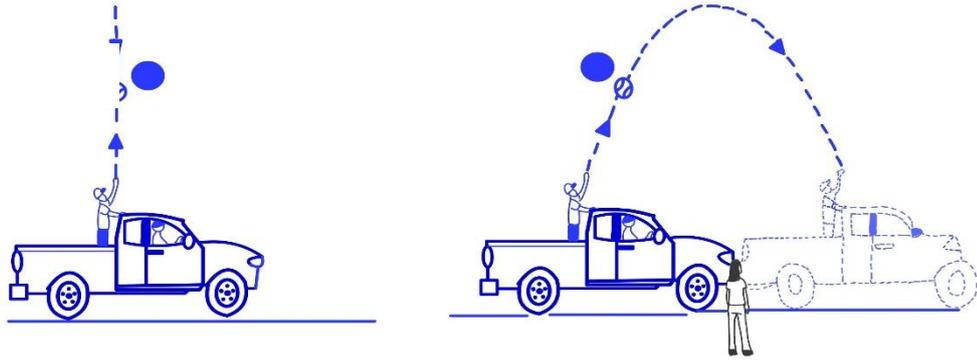
#### 5.2 ทฤษฎีสัมพัทธภาพ (Special relativity)

สิ่งที่พบเห็นและกระบวนการสังเกตในชีวิตประจำวันของเราล้วนเกี่ยวข้องกับวัตถุซึ่งเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วที่น้อยกว่าอัตราเร็วแสงมาก กฎของนิวตันนั้นใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของวัตถุซึ่งใช้ได้ สถานการณ์ต่างๆ ที่พบเห็นกันในชีวิตประจำวันเป็นอย่างดี เพราะมักจะพิจารณาวัตถุที่เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วไม่มากนัก แต่ถ้าพิจารณาวัตถุที่เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วที่สูงขึ้น ปรากฏว่าผลที่

ได้จากกลศาสตร์นิวตันนั้นเริ่มมีความผิดพลาดเพื่อให้เห็นภาพว่าอัตราเร็ว “สูง” นั้นหมายถึงอัตราเร็วเท่าไร โดยปกติแล้วการเดินของมนุษย์มีอัตราเร็วอยู่ที่ประมาณ 1-2 m/s ในขณะที่รถยนต์ที่วิ่งด้วยอัตราเร็ว 70 km/h คิดให้อยู่ในหน่วย SI ได้ประมาณ 20 m/s ส่วนเครื่องบินสามารถบินได้ด้วยอัตราเร็วประมาณ 150 m/s ส่วนอัตราเร็วของวัตถุที่เราต้องเริ่มคิดถึงทฤษฎีสัมพัทธภาพคือ เมื่อวัตถุเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วแสงในสุญญากาศ นั่นคือมีค่าเท่ากับ  $3 \times 10^8$  m/s ซึ่งจะเห็นได้ว่าเป็นอัตราเร็วที่ไม่สามารถพบในชีวิตประจำวันอย่างแน่นอน แล้วอะไรที่เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วสูงเข้าใกล้อัตราเร็วของแสง การที่จะทำให้วัตถุที่มีขนาดใหญ่เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วเข้าใกล้แสงวัตถุที่มีอัตราเร็วสูงมาก ๆ มักจะเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็ก อนุภาคขนาดเล็กที่คุ้นเคยกันดี เช่น อิเล็กตรอน โปรตอน และนิวตรอน ซึ่งคำว่าเล็กในที่นี้ หมายถึง การที่มีมวลน้อย (มวลของอิเล็กตรอนเท่ากับ  $9.1 \times 10^{-31}$  kg เป็นต้น) อันที่จริงแล้วยังมีอนุภาคขนาดเล็กอื่น ๆ อีกมากมาย และอนุภาคทั้งหลายมีสถานการณ์เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วเข้าใกล้แสง ดังนั้นการวิเคราะห์ระบบที่เกี่ยวข้องกับอนุภาคเหล่านี้จึงต้องใช้ทฤษฎีสัมพัทธภาพเสมอ ซึ่งแขนงหนึ่งของวิชาฟิสิกส์ยุคใหม่ที่เกี่ยวข้องกับ การศึกษาอนุภาคเล็ก ๆ ทั้งหมดคือ สาขาฟิสิกส์อนุภาค ทฤษฎีสัมพัทธภาพ นอกจากจะอธิบายพฤติกรรมของอนุภาคที่มีอัตราเร็วสูงแล้วยังอธิบายการเชื่อมโยงกันระหว่างปริภูมิ และเวลาด้วย ในกลศาสตร์แบบดั้งเดิมการเดินของเวลาไม่มีความเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของวัตถุแต่อย่างใด แต่ในทฤษฎีสัมพัทธภาพ เวลามีความเชื่อมโยงกับการเคลื่อนที่ของวัตถุเสมอ

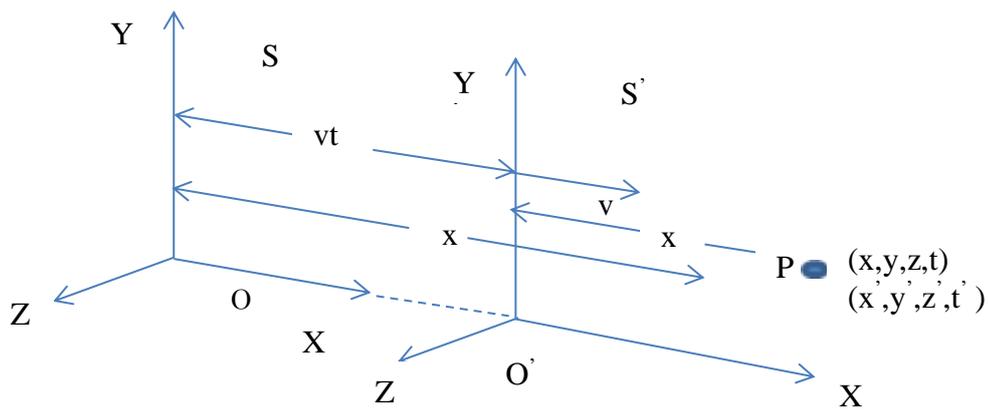
### 5.2.1 หลักการสัมพัทธภาพแบบกาลิเลียน

ตามกฎข้อหนึ่งของนิวตัน ที่กล่าวว่า ระบบใด ๆ หากอยู่นิ่ง ระบบจะยังคงพยายามรักษา สภาพอยู่นิ่งเช่นนั้นต่อไป หรือหากระบบที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ก็จะยังคงเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ตราบเท่าที่ไม่มีแรงภายนอกใด ๆ มากระทำต่อระบบ ระบบที่เป็นไปตามกฎของความเฉื่อยนี้ เรียกว่า กรอบอ้างอิงเฉื่อย เป็นกรอบอ้างอิงหนึ่งซึ่งวัตถุที่ถูกสังเกตจะไม่มี ความเร่งเมื่อไม่มีแรงมากระทำต่อวัตถุนั้น และกรอบอ้างอิงใด ๆ ที่มีความเร็วคงที่เทียบกับกรอบอ้างอิงเฉื่อยจะเป็น กรอบอ้างอิงเฉื่อยไปด้วย โดยกฎในทางกลศาสตร์ต้องเหมือนกันในทุกๆ กรอบอ้างอิงเฉื่อย ซึ่ง เรียกว่า หลักการสัมพัทธภาพแบบกาลิเลียน โดยกฎทางกลศาสตร์ต้องเหมือนกันในทุกๆ กรอบอ้างอิงเฉื่อย ดังตัวอย่างภาพที่ 5.1



ภาพที่ 5.1 ผู้สังเกตสองคนมองเส้นทางของการโยนลูกบอลและได้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกัน

สำหรับระบบบนพื้นโลก อาจพิจารณาได้ว่าเป็นกรอบอ้างอิงเฉื่อย โดยที่ไม่คำนึงถึงความเร่งที่อาจมีค่าเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับโลกซึ่งเป็นผลจากการเคลื่อนที่เนื่องจากการหมุน และการเคลื่อนที่ในวงโคจรของโลก ในฐานะที่เป็นระบบอ้างอิงเฉื่อย สมมติว่ามีปรากฏการณ์ทางกายภาพบางอย่าง ซึ่งจะเรียกว่า เหตุการณ์ เกิดขึ้น และถูกสังเกตโดยผู้สังเกตที่หยุดนิ่งในกรอบอ้างอิงเฉื่อย คำว่า ในกรอบ หมายความว่า ผู้สังเกตอยู่นิ่งเทียบกับจุดกำเนิดของกรอบนั้น ตำแหน่งของเหตุการณ์และเวลาของการเกิดขึ้นสามารถระบุได้ด้วยระบบสี่พิกัด  $(x,y,z,t)$  สามารถแปลงพิกัดเหล่านี้จากพิกัดของผู้สังเกตในกรอบเฉื่อยหนึ่งไปเป็นพิกัดของผู้สังเกตอีกคนที่อยู่ในกรอบที่กำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสัมพัทธ์สม่ำเสมอเมื่อเทียบกับกรอบแรก ให้ระบบพิกัดอันหนึ่งเป็น  $XYZ$  อยู่ในระบบอ้างอิงเฉื่อย  $S$  และอีกระบบพิกัดอีกอันหนึ่งเป็น  $x'y'z'$  อยู่ในระบบอ้างอิง  $S'$  ซึ่งเคลื่อนที่สัมพัทธ์กับระบบ  $S$  ด้วยความเร็ว  $v$  ตามแกน  $xx'$  ดังภาพที่ 5.2



ภาพที่ 5.2 เหตุการณ์เกิดที่จุด  $P$  ถูกเห็นโดยผู้สังเกตสองคน ในกรอบ  $S$  และ  $S'$

จุดกำเนิดของกรอบอ้างอิงเฉื่อยทั้งสองทับกันที่เวลา  $t = t' = 0$  โดยเหตุการณ์อยู่ที่จุด P ในกรอบอ้างอิงเฉื่อย S มีพิกัด  $(x, y, z, t)$  และ S' คือ  $(x', y', z', t')$  ตามลำดับ โดย S' เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $v$  สัมพันธ์กับ S

$$x' = x - vt \quad y' = y \quad z' = z \quad t' = t \quad (5-1)$$

สมการข้างต้น เรียกว่า สมการการแปลงปริภูมิ-เวลาแบบกาลิเลียน

ถ้าทำการหาอนุพันธ์ของสมการข้างต้นเทียบกับเวลา และสมมติว่า  $d/dt$  เหมือนกับ  $d/dt'$  จะได้สมการการแปลงความเร็วดังนี้

$$\frac{dx'}{dt'} = \frac{dx}{dt} - v \quad \text{หรือ} \quad u'_x = u_x - v \quad (5-2)$$

เมื่อ  $u_x$  และ  $u'_x$  เป็นองค์ประกอบของความเร็วในแนวแกน x ของอนุภาคที่วัดโดยผู้สังเกตใน S และ S' ตามลำดับ สมการที่ (5-2) คือ สมการการแปลงความเร็วแบบกาลิเลียน

### 5.2.2 อัตราเร็วของแสง

จากสมการของแมกซ์เวลล์ในบทที่ 4 แสดงให้เห็นว่า อัตราเร็วของแสงในสุญญากาศมีค่าเป็น  $3 \times 10^8$  m/s ในช่วงปลายทศวรรษที่ 1800 มีความคิดว่าคลื่นแสงเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่เรียกว่า อีเทอร์ (ether) และอัตราเร็วของแสงจะเท่ากับ  $c$  เฉพาะในกรอบอีเทอร์สัมบูรณ์ นั่นคือ ถ้าแสงเคลื่อนที่ในแนวแกน x และผู้สังเกตเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $v$  ในแนวแกน x ผู้สังเกตนั้นจะวัดอัตราเร็วของแสง ได้เป็น  $c \pm v$  ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับทิศการเคลื่อนที่ของผู้สังเกตและของแสง เนื่องจากการกรอบอีเทอร์สัมบูรณ์ตามแนวคิดเดิมจะแสดงว่าแสงมีสมบัติเหมือนกับคลื่นแบบดั้งเดิมอื่นๆ และแสดงว่าแนวความคิดแบบกลศาสตร์แบบดั้งเดิมในเรื่องกรอบสัมบูรณ์นั้นเป็นจริง จึงได้มีการเพิ่มแนวความคิดที่สำคัญแนวความคิดหนึ่งเข้าไปเพื่อประกอบการพิจารณาถึงการมีอยู่ของกรอบอีเทอร์ให้เป็นที่ยอมรับในช่วงก่อนปลายศตวรรษ 1800 การทดลองเกี่ยวกับการเดินทางของแสงในตัวกลางที่เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วสูงสุดที่ทำได้ในห้องปฏิบัติการภายในช่วงเวลานั้นไม่สามารถตรวจจับความแตกต่างที่มีขนาดน้อยๆ ในช่วง  $c$  ถึง  $c \pm v$  ได้ จนกระทั่งมีการเริ่มต้นในปี ค.ศ. 1880 นักวิทยาศาสตร์ตัดสินใจที่จะใช้โลกเป็นกรอบอ้างอิงเคลื่อนที่ โดยพยายามที่จะเพิ่มโอกาสการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในอัตราเร็วของแสง

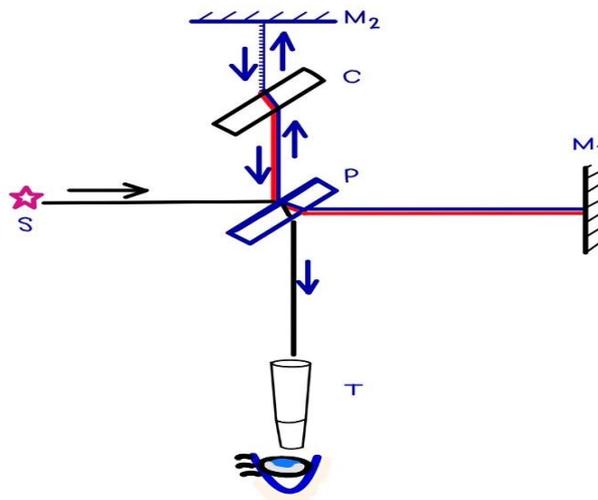
หลักการสัมพัทธภาพแบบกาลิเลียนใช้ได้กับเฉพาะกฎทางกลศาสตร์ แต่มีความขัดแย้งกับกฎทางไฟฟ้าและแม่เหล็กนั้นที่กำหนดว่าในทุกๆ กรอบอ้างอิงเฉื่อย อัตราเร็วของแสงจะมีค่าคงที่เท่ากับ  $3 \times 10^8$  m/s ผลลัพธ์นี้ขัดแย้งกับสิ่งที่คาดการณ์จากสมการการแปลงความเร็วแบบกาลิเลียน จากสัมพัทธภาพแบบกาลิเลียนที่ว่าอัตราเร็วของแสงไม่ควรที่จะคงที่ในทุกๆ กรอบอ้างอิงเฉื่อย เพื่อการแก้ปัญหาเหล่านี้จึงได้สรุปออกมาเป็น 2 กรณี คือ กฎของไฟฟ้าและแม่เหล็กนั้นไม่เหมือนเดิมในทุกๆ กรอบอ้างอิงเฉื่อย หรือ สมการการแปลงความเร็วแบบกาลิเลียนนั้นไม่ถูกต้อง ถ้าเราสมมติตามกรณีแรก กรอบอ้างอิงที่ถูกเสนอให้อัตราเร็วของแสงมีค่าเท่ากับ  $c$  ต้องมีอยู่จริง และอัตราเร็วจากการวัดจะต้องมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าค่านี้ในกรอบอ้างอิงอื่น ๆ ซึ่งเป็นผลมาจากสมการการแปลงความเร็วแบบกาลิเลียน ถ้าพิจารณาตามกรณีที่สอง จะทำให้ไม่ต้องพิจารณาเรื่องเวลาสมบูรณ์และความยาวสมบูรณ์ ซึ่งเป็นหลักการพื้นฐานของสมการการแปลงปริภูมิ-เวลาแบบกาลิเลียน

### 5.2.3 การหากรอบอ้างอิงสมบูรณ์

ในปี ค.ศ.1860 แมกซ์เวลล์ ได้เสนอทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งสรุปเกี่ยวกับกฎต่าง ๆ ทั้งหมดของไฟฟ้าและแม่เหล็กซึ่งเรียกว่า สมการของแมกซ์เวลล์ ทฤษฎีของเขาได้ทำนายถึงการที่มีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปในอวกาศด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วแสง ต่อมาในปี ค.ศ. 1888 เฮิร์ตซ์ ได้ทำการทดลองสร้างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นได้ในห้องปฏิบัติการ จากความสำเร็จนี้ทั้งการทดลองและการคำนวณทางทฤษฎี แสดงให้เห็นว่าแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวาง จากทฤษฎีของแมกซ์เวลล์ซึ่งการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไม่จำเป็นต้องมีตัวกลางในการเคลื่อนที่ อย่างไรก็ตามปรากฏการณ์อื่น ๆ ของคลื่นในเชิงกลศาสตร์ คลื่นยังต้องอาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่ นักฟิสิกส์จึงคิดว่าควรมีการกำหนดตัวกลางเพื่อช่วยในการเคลื่อนที่ของแสงและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอื่น ๆ โดยตั้งชื่อตัวกลางนี้ว่า อีเทอร์ (ether) โดยสมมติว่าอีเทอร์มีอยู่ทั่วไปในอวกาศและมีคุณสมบัติต่างๆ เช่น ต้องโปร่งใส ไม่มีมวล ดังนั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจึงสามารถเดินทางผ่านสุญญากาศได้ นอกจากนี้ต้องมีความยืดหยุ่นเพื่อรับการสั่นของการเคลื่อนที่ของคลื่น สมมติว่าอีเทอร์หยุดนิ่งเมื่อเทียบกับวัตถุอื่นที่เคลื่อนที่ผ่านมัน ซึ่งเรียกว่า กรอบอีเทอร์ หรือกรอบอ้างอิงสมบูรณ์ ความเร็วของแสงในกรอบอีเทอร์จะมีค่าเท่ากับความเร็วของแสงเสมอ

### 5.3 การทดลองของไมเคิลสันกับมอร์เลย์ (Michelson-Morley Experiment)

จากการศึกษาจะสามารถยืนยันได้ว่ากรอบอ้างอิงสัมบูรณ์ หรือกรอบอีเทอร์มีจริง ก็ต่อเมื่อสามารถวัดความเร็วสัมบูรณ์ของโลกสัมพัทธ์กับกรอบอ้างอิงอีเทอร์ได้ ในปี ค.ศ. 1887 ไมเคิลสันกับมอร์เลย์ได้ทำการทดลองเพื่อหากรอบอ้างอิงอีเทอร์นี้ เขาสมมติว่าอีเทอร์อยู่นิ่ง แสงเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับ  $3 \times 10^8$  เมตร/วินาที สัมพัทธ์กับอีเทอร์ และได้สมมติอีกว่าความเร็วสัมบูรณ์ของโลกสัมพัทธ์กับอีเทอร์ได้เมื่อใช้สัญญาณแสง สำหรับเครื่องมือที่เขาใช้ทดลองต้องมีความไวมากเพราะความเร็วในวงโคจรของโลก  $v = 3 \times 10^4$  เมตร/วินาที มีค่าเพียง  $10^{-4}$  เท่าของอัตราเร็วแสง ดังภาพที่ 5.3 แสดงการจัดเครื่องมือการทดลองลำแสงสีเดียวความยาวคลื่น  $\lambda$  จากแหล่งกำเนิดแสง S หลังจากผ่านเลนส์ L ตกกระทบบนกระจก P (ซึ่งฉาบด้วยเงินไว้ครึ่งหนึ่ง) จะแยกลำแสงออกเป็นสองส่วน ส่วนหนึ่งทะลุผ่านเข้าไป คือลำแสงที่ 1 อีกส่วนเกิดการสะท้อน คือลำแสงที่ 2 ลำแสงเหล่านี้หลังจากสะท้อนกระจกเงา  $M_1$  และ  $M_2$  ตามลำดับ จะกลับมายังกระจก P อีกครั้ง แล้วลำแสงที่ 2 ทะลุผ่านกระจก P ไปยังกล้อง T ส่วนลำแสงที่ 1 จะสะท้อนกระจก P ไปยังกล้อง T ลำแสงที่ 2 ผ่านกระจก P สามครั้ง ขณะที่ลำแสงที่ 1 ผ่านเพียงครั้งเดียว ดังนั้นเพื่อให้ทางเดินของลำแสงทั้งสองเท่ากัน จึงวางกระจก C ในทางเดินของลำแสงที่ 1

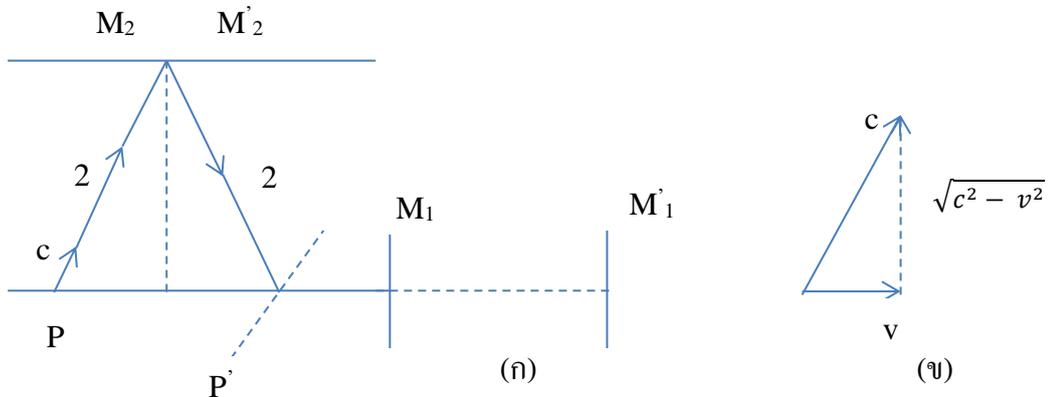


ภาพที่ 5.3 แสดงการทดลองของไมเคิลสันและมอร์เลย์

ถ้าทางเดินของลำแสงทั้งสองมาถึงที่ตาพร้อมๆ กัน จะเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันทำให้เกิดแถบสว่างขึ้น แต่เนื่องจากมีกระแสอีเทอร์จึงเป็นผลให้ลำแสงทั้งสองใช้เวลามาถึงตาต่างกัน ดังนั้นจึงเกิดการแทรกสอดแบบหักล้างกัน ซึ่งในการทดลองจริงๆ นั้นไม่สามารถจัดให้กระจกเงา  $M_1$  และ  $M_2$  ตั้งฉากกันอย่างสมบูรณ์เป็นเหตุให้ริ้วการแทรกสอดมีลักษณะเป็นแถบมืดสว่างสลับกัน

ถ้าทางเดินของแสงเปลี่ยนไปจะทำให้แถบแสงเลื่อนไปจากตำแหน่งเดิม ด้วยเหตุนี้เครื่องมือทดลองที่อยู่หนึ่งกับที่จึงไม่สามารถบอกอะไรได้ ดังนั้นในการทดลองจึงต้องหมุนเครื่องมือทดลองไป  $90^\circ$  เป็นผลให้ลำแสงทั้งสองสลับตำแหน่งกันสัมพันธ์กับกระแสวิกเตอร์ จึงคาดคะเนได้ว่าแถบการแทรกสอดต้องเลื่อนตำแหน่งไป สมมติว่าโลกเคลื่อนที่ไปทางขวา ด้วยความเร็ว  $v$  สัมพัทธ์กับอีเทอร์ จัดเครื่องมือให้  $PM_1 = PM_2 = L$  และให้  $PM_1$  ขนานกับ  $v$  ใช้การแปลงแบบกาลิเลียน ความเร็วของสัญญาณแสงจาก  $P$  ไปยัง  $M_1$  คือ  $c - v$  ขณะที่จาก  $M_1$  ไปยัง  $P$  หลังจากสะท้อนกระจกเงา  $M_1$  มีความเร็วเป็น  $c + v$  ให้  $t_1$  เป็นเวลาที่แสงใช้เดินทางจาก  $P$  ไป  $M_1$  และจาก  $M_1$  มายัง  $P$  จะได้

$$\begin{aligned} t_1 &= \frac{L}{c - v} + \frac{L}{c + v} \\ &= \frac{2Lc}{c^2 - v^2} \\ &= \frac{2L}{c} / \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) \end{aligned}$$



ภาพที่ 5.4 (ก) ทางเดินของลำแสงที่ 2 ขณะที่เครื่องวัดการแทรกสอดเคลื่อนที่ขนานกับ  $PM_1$  (ข) แสดงเวกเตอร์ความเร็วสัมพัทธ์ของ  $c$  และ  $v$

ลำแสงที่ 2 มีแนวทางการเดินทางดังภาพที่ 5.4 (ก) องค์ประกอบของความเร็วแสงที่ตั้งฉากกับทิศการเคลื่อนที่ของเครื่องวัดการแทรกสอด หาได้จากกรรวมเวกเตอร์ในภาพ (ข) ซึ่งได้ค่าเป็น  $\sqrt{c^2 - v^2}$  ดังนั้นเวลา  $t_2$  สำหรับลำแสงที่ 2 ใช้เดินทางจาก  $PM_2P$  คือ

$$\begin{aligned} t_2 &= \frac{2L}{\sqrt{c^2 - v^2}} \\ &= \frac{2L}{c} / \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \end{aligned}$$

ช่วงเวลาซึ่งลำแสงที่ 1 แตกต่างจากลำแสงที่ 2 คือ

$$\begin{aligned}\Delta t &= t_1 - t_2 \\ &= \frac{2L}{c} \left[ \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1} - \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2} \right]\end{aligned}$$

เนื่องจาก  $\frac{v^2}{c^2}$  มีค่าน้อยมาก เราสามารถกระจายเทอมในวงเล็บของสมการข้างต้น และใช้เฉพาะ 2 เทอมแรก จะได้

$$\begin{aligned}\Delta t &= \frac{2L}{c} \left[ \left(1 + \frac{v^2}{c^2} \dots\right) - \left(1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} \dots\dots\right) \right] \\ &\approx \frac{2L}{c} \left( \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} \right) \\ \Delta t &\approx \frac{Lv^2}{c^3} \quad (5-3)\end{aligned}$$

ถ้าหมุนเครื่องวัดการแทรกสอดไปเป็นมุม 90 องศา จะได้ว่าความแตกต่างของช่วงเวลาของลำแสงทั้งสองเท่ากับ  $2\Delta t$  ดังนั้นจำนวน  $\Delta N$  ของริ้วการแทรกสอดที่เลื่อนไปจากตำแหน่งเดิมเมื่อหมุนเครื่องวัดการแทรกสอด คือ

$$\begin{aligned}\Delta N &= \frac{\text{ความแตกต่างของทางเดินแสง}}{\text{ความยาวคลื่น}} \\ &= \frac{2\Delta t c}{\lambda}\end{aligned}$$

แทนค่า  $\Delta t$  จากสมการ (5-3) จะได้

$$\Delta N = \frac{2Lv^2}{\lambda c^2} \quad (5-4)$$

ในการทดลอง ไมเคิลสันและมอร์เลย์สะท้อนลำแสงที่ 1 และ 2 กลับไปกลับมาหลายครั้ง จนกระทั่งได้ทางเดินของแสงประมาณ 10 เมตร ใช้แหล่งกำเนิดแสงที่มีความยาวคลื่น 500 อังสตรอม เมื่อแทนค่าดังกล่าวในสมการ(5-4) ดังนั้นคาดว่าแถบแสงจะเลื่อนไป  $\Delta N$  เท่ากับ 0.4

เครื่องมือของไมเคิลสันและมอร์ลีย์ใช้ตรวจจับการเลื่อนของริ้วที่เล็กขนาด 0.01 ได้ แต่ไม่สามารถตรวจจับการเลื่อนใดๆในรูปแบบของริ้วได้เลย จึงสรุปว่าเคลื่อนที่ของโลกเมื่อเทียบกับอีเทอร์สมมติไม่สามารถตรวจพบได้ จากการทดลองทำให้ทราบถึงความเป็นไปไม่ได้ที่จะวัดอัตราเร็วของอีเทอร์เมื่อเทียบกับโลก และความล้มเหลวของสมการการแปลงความเร็วแบบกาลิ

เขียนเมื่อนำไปใช้กับกรณีของแสง เพื่อแก้ปัญหาสำหรับข้อขัดแย้งในทฤษฎีเหล่านี้ 'ไอน์สไตน์' ได้เสนอทฤษฎีขึ้น เขาได้วางรากฐาน ทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษขึ้นบนสมมติฐานสองข้อ

- 1) หลักของสัมพัทธภาพ : กฎทางฟิสิกส์จะต้องเหมือนเดิมในทุกกรอบอ้างอิงเฉื่อย
- 2) ความคงที่ของอัตราเร็วของแสง : อัตราเร็วของแสงในสุญญากาศมีค่าคงที่เท่ากับ  $3 \times 10^8$  m/s ในทุกๆกรอบอ้างอิงเฉื่อย ไม่ว่าอัตราเร็วของผู้สังเกตหรืออัตราเร็วของแหล่งกำเนิดที่ปลดปล่อยแสงจะเป็นเท่าใด

ผลสืบเนื่องจากทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษ จะพิจารณาเฉพาะแนวคิดเรื่องความพร้อมกัน เรื่องช่วงเวลา และเรื่องความยาว

#### 5.4 การยืดของเวลา (Time Dilation)

ช่วงเวลามีลักษณะเช่นเดียวกับช่วงความยาว คือไม่ใช่ปริมาณที่สัมบูรณ์ ตัวอย่างเช่น พิจารณาเหตุการณ์ต่างกันสองเหตุการณ์ ช่วงเวลาระหว่างเหตุการณ์ทั้งสองถูกบันทึกด้วยนาฬิกาสองเรือนในระบบบิเนอเรียล S และ S' แต่นาฬิกาทั้งสองถูกสังเกตจากระบบ S จากสมการ (5-3)

$$t_1 = \frac{t'_1 + (v/c^2)x'_1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$t_2 = \frac{t'_1 + (v/c^2)x'_2}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$t_2 - t_1 = \frac{(t'_2 - t'_1) + (v/c^2)(x'_2 - x'_1)}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

ตามสมการข้างต้น ผู้สังเกตในระบบ S มองดูนาฬิกาของ S' ซึ่งต้องอยู่หนึ่งระหว่างการสังเกต อ่านช่วงเวลาของ  $t'_2 - t'_1 = T_0$  เป็นช่วงเวลาระหว่างเหตุการณ์ทั้งสองที่ถูกบันทึกโดยผู้สังเกตใน S' ซึ่งอยู่หนึ่งเมื่อเทียบกับนาฬิกาของตัวเอง และ  $t_2 - t_1 = T$  เป็นช่วงเวลาที่ถูกบันทึกโดยผู้สังเกตใน S ซึ่งเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $-v$  สัมพัทธ์กับ S' และนาฬิกาใน S' ซึ่งเราจะได้ความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$T = \frac{T_0}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \gamma T_0 \quad (5-5)$$

เนื่องจาก  $\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$  มีค่ามากกว่าหนึ่งเสมอ จะได้ช่วงเวลา T ยาวกว่า  $T_0$  ดังนั้นจะปรากฏแก่ผู้สังเกตใน S ว่า นาฬิกาของ S' คล้ายกับเดินช้ากว่าเมื่อเทียบกับนาฬิกาของตัวเอง ลักษณะเช่นนี้เกิดกลับกันได้ กล่าวคือ เมื่อผู้สังเกตใน S' มองนาฬิกาใน S จะปรากฏว่าเดินช้ากว่าเมื่อเทียบกับนาฬิกา

ของตัวเอง ดังนั้นนาฬิกาจะปรากฏว่าเดินเร็วที่สุดเมื่อมันหยุดนิ่งสัมพัทธ์กับผู้สังเกต และปรากฏว่าเดินช้าลงด้วยแฟกเตอร์  $\sqrt{1-\beta^2}$  เมื่อนาฬิกาเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $v$  สัมพัทธ์กับผู้สังเกตช่วงเวลาทีวัดในกรอบอ้างอิงที่นาฬิกาหยุดนิ่ง คือ  $T_0$  เรียกว่า การยืดของเวลา (time dilation) ตัวอย่างที่น่าสนใจเกี่ยวกับการยืดของเวลาเป็นการสังเกตการณ์จาก มิวออน ซึ่งเป็นอนุภาคมูลฐานที่ไม่เสถียร มีประจุเท่ากับประจุของอิเล็กตรอนและมีมวลเป็น 207 เท่าของมวลอิเล็กตรอน มิวออนเกิดขึ้นจากการชนกันของรังสีคอสมิกกับอะตอมที่อยู่สูงขึ้นไปในชั้นบรรยากาศ มิวออนที่มีความเร็วต่ำในห้องปฏิบัติการมีช่วงชีวิตที่ถูกวัดในลักษณะของช่วงเวลาที่จะเป็น ประมาณ  $T_0 = 2.2 \mu\text{s}$  ถ้าใช้ค่านี้เป็นค่าเฉลี่ยของช่วงชีวิตของมิวออนอนุภาคหนึ่ง และสมมติว่ามิวออนที่เกิดจากรังสีคอสมิกมีอัตราเร็วเข้าใกล้กับอัตราเร็วของแสง จะพบว่าอนุภาคเหล่านี้สามารถเคลื่อนที่เป็นระยะทางโดยประมาณเท่ากับ  $(3 \times 10^8 \text{ m/s})(2.2 \times 10^{-6} \text{ s}) \approx 6.6 \times 10^2 \text{ m}$  ก่อนที่เหล่าอนุภาคจะสลายตัว ดังนั้นอนุภาคเหล่านี้จะดูเหมือนว่าไม่สามารถมาถึงพื้นผิวโลกจากระดับสูงในชั้นบรรยากาศที่อนุภาคเหล่านี้เกิดขึ้นได้ อย่างไรก็ตามจากการทดลองหลายๆ ครั้งแสดงว่ามิวออนจำนวนมากสามารถมาถึงพื้นผิวโลกได้ ปรากฏการณ์ของการยืดของเวลาสามารถอธิบายเหตุการณ์นี้ได้ หากวัดโดยผู้สังเกตบนโลก มิวออนจะมีเวลาที่ถูกยืดออกไปเท่ากับ  $\gamma T_0$  ตัวอย่างเช่น ที่อัตราเร็ว 0.99c,  $\gamma \approx 7.1$  และ  $\gamma T_0 \approx 16 \mu\text{s}$  ดังนั้นระยะทางเฉลี่ยที่มิวออนสามารถเคลื่อนที่ได้ในช่วงเวลาที่วัดได้จากผู้สังเกตที่อยู่บนโลกจะมีค่าประมาณ  $(0.99)(3 \times 10^8 \text{ m/s})(16 \times 10^{-6} \text{ s}) \approx 4.8 \times 10^3 \text{ m}$  ในปี ค.ศ. 1976 ในห้องปฏิบัติการขององค์การวิจัยนิวเคลียร์ยุโรป ในกรุงเจนีวา มิวออนถูกยิงเข้าไปในวงแหวนกักเก็บขนาดใหญ่วงหนึ่งด้วยอัตราเร็วประมาณ 0.9994c อิเล็กตรอนที่เกิดจากการสลายตัวของมิวออนถูกตรวจจับโดยส่วนตรวจจับที่อยู่รอบ ๆ วงแหวนนี้ทำให้นักวิทยาศาสตร์สามารถวัดค่าอัตราการสลายตัวและค่าช่วงชีวิตของมิวออนได้ ค่าช่วงชีวิตของมิวออนที่เคลื่อนที่ถูกวัดว่ามีค่าโดยประมาณเท่ากับ 30 เท่าของค่าช่วงชีวิตของมิวออนที่อยู่กับที่ซึ่งสอดคล้องกับค่าทำนายด้วยสัมพัทธภาพ โดยมีค่าสองส่วนในหนึ่งพันส่วน

**ตัวอย่างที่ 5.1** สมชายขับรถด้วยอัตราเร็ว 30 m/s จากนั้นภรรยาของเขาซึ่งกำลังรออยู่ที่ปลายทางคาดว่าสมชายจะใช้เวลา 5 h ก็จะมาถึง แต่สมชายไปถึงช้ากว่ากำหนด สมชายแก้ตัวว่านาฬิกาของเขาบันทึกเวลาเดินทางที่ 5 h แต่เขาขับรถเร็วดังนั้นนาฬิกาของเขาถึงเดินช้ากว่านาฬิกาของภรรยา ถ้านาฬิกาของสมชายระบุว่าการเดินทางใช้เวลา 5 h จริงๆ เวลาของนาฬิกาภรรยาซึ่งอยู่นิ่งบนโลกจะผ่านไปนานแค่ไหน

วิธีทำ ในที่นี้ผู้สังเกตคือ ภรรยาของสมชายที่กำลังอยู่นิ่งบน โลก นาฬิกาในรถของสมชายเคลื่อนที่ ด้วยอัตราเร็ว 30 m/s เทียบกับภรรยาของเขา ซึ่งจากสถานการณ์จะเห็นว่านาฬิกาที่เคลื่อนที่จะเดิน ช้ากว่านาฬิกาที่หยุดนิ่ง จึงจัดว่ามีความเกี่ยวข้องกับการยืดของเวลา ช่วงเวลาที่ควรจะเป็นที่วัดใน กรอบหยุดนิ่งของรถ คือ 5 h

$$\text{จาก } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \text{ จะได้ว่า } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(3 \times 10^1 \text{ m/s})^2}{(3 \times 10^8 \text{ m/s})^2}}}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{1 - 10^{-14}}}$$

$$\gamma = (1 - 10^{-14})^{-\frac{1}{2}}$$

$$\approx 1 + \frac{1}{2}(10^{-14})$$

$$= 1 + 5 \times 10^{-15}$$

$$\Delta t = \gamma T_0$$

$$= (1 + 5 \times 10^{-15})(5\text{h})$$

$$= 5 \text{ h} + 2.5 \times 10^{-14} \text{ h}$$

$$= 5 \text{ h} + 0.09 \text{ ns}$$

**คำตอบ** ดังนั้น นาฬิกาของภรรยาจะเดินนำหน้านาฬิกาของสมชายในรถเพียง 0.09 ns

**ตัวอย่างที่ 5.2** คาบเพนดูลัมถูกวัดได้เป็น 3 วินาที ในกรอบอ้างอิงของเพนดูลัมนั้น เมื่อวัดคาบโดยผู้สังเกตที่กำลังเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว 0.96 เท่าของอัตราเร็วแสง สัมพันธ์กับเพนดูลัม จะมีคาบเป็นเท่าใด

วิธีทำ จาก

$$\Delta t = \gamma T_0$$

$$= \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(0.96c)^2}{c^2}}} T_0$$

$$= \frac{1}{\sqrt{1 - 0.9216}} (3 \text{ s})$$

$$= (3.57)(3) = 10.7 \text{ s}$$

**คำตอบ** เพนดูลัมที่เคลื่อนที่จะเคลื่อนที่นานกว่าเพื่อให้ได้หนึ่งคาบ เมื่อเทียบกับเพนดูลัมที่หยุดนิ่ง คาบเวลาจะเพิ่มขึ้นจำนวนเท่าของ 3.57

### 5.5 การหดสั้นของความยาว (Length contraction)

พิจารณาผู้สังเกตสองคนที่อยู่นิ่งในกรอบอ้างอิงเฉื่อย S และ S' ผู้สังเกตใน S' มีไม้เมตร ความยาว  $L_0$  วางขนานกับแกน  $x'$  กล่าวคือ  $L_0 = x'_2 - x'_1$  ซึ่งยาวเท่ากันทั้งในกรอบ S และ S' เมื่อผู้สังเกตทั้งสองหยุดนิ่งสัมพัทธ์กัน สมมติว่ากรอบอ้างอิง S' เริ่มเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $v$  ตามแกน  $XX'$  สำหรับผู้สังเกตใน S' นั้นยังคงเห็นความยาวของไม้เมตรเป็น  $L_0$  แต่สำหรับผู้สังเกตใน S ความยาวของไม้เมตรเป็น  $L = x_2 - x_1$  เราแปลง  $x_1$  และ  $x_2$  โดยใช้การแปลงโคออร์ดิเนตแบบลอเรนตซ์ ได้เป็น

$$x'_2 = \gamma(x_2 - vt_2)$$

$$x'_1 = \gamma(x_1 - vt_1)$$

นำสมการข้างต้นลบกัน จะได้

$$x'_2 - x'_1 = \gamma[(x_2 - x_1) - v(t_2 - t_1)]$$

เนื่องจากผู้สังเกตใน S ต้องวัดปลายไม้เมตรทั้งสองพร้อมๆ กัน หมายความว่า  $t_1 = t_2$  สมการข้างต้นจะกลายเป็น

$$x_2 - x_1 = \frac{1}{\gamma}(x'_2 - x'_1)$$

$$\text{เมื่อ } x'_2 - x'_1 = L_0 \quad 1/\gamma = \sqrt{1 - \beta^2} \quad \text{และ } x_2 - x_1 = L$$

เป็นความยาวของไม้เมตรที่วัดโดยผู้สังเกตใน S แทนค่าเหล่านี้ลงในสมการข้างต้น จะได้

$$L = \frac{L_0}{\gamma} = L_0 \sqrt{1 - \beta^2} \quad (5-6)$$

ปริมาณ  $\sqrt{1 - \beta^2}$  น้อยกว่า 1 เสมอ (และ  $\gamma > 1$ ) ด้วยเหตุนี้ ความยาว  $L$  ต้องน้อยกว่า  $L_0$  กล่าวคือ สำหรับผู้สังเกตใน S จะมองดูเหมือนกับว่าไม้เมตรหดสั้นลง ปรากฏการณ์ในลักษณะเช่นนี้กลับกัน

ได้เช่น ถ้า S มีไม้เมตรยาว  $L_0$  ขณะที่ S' เคลื่อนที่ และสังเกตไม้เมตร จะปรากฏว่ายาว  $L_0\sqrt{1-\beta^2}$  (คือหดสั้นลง)

ดังนั้นสรุปได้ว่า การวัดความยาวของวัตถุมีค่ามากที่สุด เมื่อวัตถุนั้นหยุดนิ่งสัมพัทธ์กับผู้สังเกตและจะปรากฏว่าหดสั้นลงด้วยแฟกเตอร์  $\sqrt{1-\beta^2}$  กับผู้สังเกตที่เคลื่อนที่สัมพัทธ์กับวัตถุ ตัวอย่างเดิมคือเรื่องของมิวออน ที่เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วเข้าใกล้กับอัตราเร็วแสงผู้สังเกตที่อยู่ในกรอบอ้างอิงของมิวออนเป็นผู้วัดช่วงชีวิตที่ควรจะเป็น ขณะที่ผู้สังเกตที่อยู่บนโลกเป็นผู้วัดความยาวที่ควรจะเป็น ในกรอบอ้างอิงของมิวออน ไม่มีการยืดของเวลา แต่ระยะทางของการเดินทางเข้าสู่ผิวโลกนั้นสั้นกว่าเมื่อทำการวัดในกรอบอ้างอิงนี้ เช่นเดียวกับกรอบอ้างอิงของผู้สังเกตที่อยู่บนโลกมีการยืดของเวลา แต่ระยะทางของการเดินทางที่วัดได้คือ ความยาวที่ควรจะเป็น ด้วยเหตุนี้ เมื่อทำการคำนวณเกี่ยวกับมิวออน โดยใช้กรอบอ้างอิงทั้งสอง ผลลัพธ์ของการทดลองในกรอบอ้างอิงหนึ่งจะเหมือนกับผลลัพธ์ของการทดลองในอีกกรอบหนึ่ง ซึ่งก็คือ มิวออนตกถึงผิวโลกมากกว่าที่ทำนายไว้โดยไม่มีปรากฏการณ์สัมพัทธ์

**ตัวอย่างที่ 5.3** สมมตินักวิ่งวิบากเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว  $0.75c$  แบบวัตถุในแนวราบยาว  $15\text{ m}$  ไปยังสถานที่เป้าหมายซึ่งยาว  $10\text{ m}$  เป้าหมายมีประตูหน้าและประตูหลังที่เปิดในตอนเริ่มต้น ผู้สังเกตคนหนึ่งบนพื้นดินสามารถปิดและเปิดประตูทั้งสองบานได้ทันที และพร้อมกันด้วยรีโมทคอนโทรล เมื่อนักวิ่งและวัตถุอยู่ในสถานที่เป้าหมาย ผู้สังเกตบนพื้นดินปิดประตูและหลังจากนั้นจึงเปิดประตูทั้งสองบาน เพื่อว่านักวิ่งที่แบกวัตถุจะถูกกักไว้ในสถานที่เป้าหมายชั่วขณะหนึ่งและจากนั้นจึงค่อยปล่อยให้ออกจากประตูหลัง ทั้งนักวิ่งและผู้สังเกตบนพื้นดินจะเห็นพ้องกันหรือไม่ว่านักวิ่งจะผ่านสถานที่เป้าหมายไปได้อย่างปลอดภัย

**วิธีทำ** วัตถุที่นักวิ่งแบกนั้นอยู่ในสภาวะเคลื่อนที่เมื่อเทียบกับผู้สังเกตบนพื้นดิน เพื่อให้ผู้สังเกตวัดความยาวของวัตถุได้สั้นลง ขณะที่สถานที่เป้าหมายที่หยุดอยู่กับที่มีความยาวที่ควรจะเป็น  $10\text{ m}$  ซึ่งจัดตัวอย่างนี้เป็นเรื่อง การหดสั้นของความยาว หากความยาวที่หดลงของวัตถุตามที่ผู้สังเกตบนพื้นดินเห็น

$$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = (15\text{m})\sqrt{1 - (0.75)^2} = 9.9\text{ m}$$

ดังนั้นผู้สังเกตบนพื้นดินจะวัดเสาได้สั้นกว่าความจริงเล็กน้อย และไม่เป็นปัญหาในการกักกันไว้  
ในสถานที่เป้าหมายในช่วงขณะหนึ่ง โดยเราเรียกเหตุการณ์แบบนี้ว่า พาราดอกซ์ หาความยาวที่ห  
ลงของสถานที่เป้าหมายจากมุมมองผู้ที่กำลังวิ่ง

$$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = (10\text{m})\sqrt{1 - (0.75)^2} = 6.6 \text{ m}$$

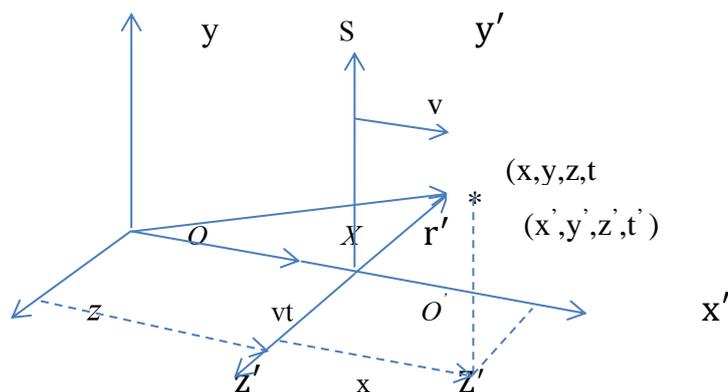
**คำตอบ** หาความยาวที่หดลงของสถานที่เป้าหมายจากมุมมองผู้ที่กำลังวิ่งได้ 6.6 เมตร

## 5.6 ความเป็นเวลาเดียวกัน (Simultaneity)

ในกลศาสตร์นิวตัน เวลาสมมติว่าเป็นปริมาณสัมบูรณ์ กล่าวคือ  $t = t'$  ดังนั้นสเกลของ  
เวลาเดียวกันใช้ได้กับกรอบอ้างอิงเฉื่อยทั้งหมด เมื่อเรากล่าวว่า เหตุการณ์ A และ B เกิดขึ้นพร้อม  
กัน หมายความว่าเหตุการณ์ทั้งสองนี้เกิดขึ้นในเวลาเดียวกัน โดยไม่คำนึงถึงกรอบอ้างอิงใดๆ เพราะ  
เหตุการณ์เหล่านี้พิจารณาว่าเป็นเวลาเดียวกัน ซึ่งเป็นจริงเฉพาะในกลศาสตร์แบบดั้งเดิมสำหรับการ  
เคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำ ๆ อย่างไรก็ตามในสัมพัทธภาพ ความยาวและเวลาไม่เป็นปริมาณสัมบูรณ์  
เหตุการณ์หนึ่งที่เป็นเวลาเดียวกันกับผู้สังเกตในระบบอ้างอิงเฉื่อยหนึ่ง ไม่จำเป็นต้องเป็นเวลา  
เดียวกันกับผู้สังเกตในระบบอ้างอิงเฉื่อยอื่น ซึ่งเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่สัมพัทธ์กับระบบแรก  
ความหมายของความเป็นเวลาเดียวกันตามแนวคิดของไอน์สไตน์ กล่าวคือเหตุการณ์สองเหตุการณ์  
ซึ่งอยู่ในกรอบอ้างอิงใดๆ ที่จุด  $A(x_1, t_1)$  และ  $B(x_2, t_2)$  เป็นเวลาเดียวกัน ถ้าสัญญาณแสงที่ปล่อย  
ออกมาพร้อมๆกันจากจุดกึ่งกลางทางเรขาคณิต ระหว่าง  $x_1$  และ  $x_2$  มาถึง  $x_1$  ที่เวลา  $t_1$  และถึง  $x_2$  ที่  
เวลา  $t_2$  ดังนั้นในทางทฤษฎีสัมพัทธภาพของไอน์สไตน์ ความเป็นเวลาเดียวกันไม่มีความหมาย  
สัมบูรณ์เพราะโคออร์ดิเนต  $t$  และ  $t'$  นอกจากจะไม่เท่ากันแล้วยังขึ้นกับระบบพิกัด  $x$  และ  $x'$   
กำหนดโดยการแปลงแบบลอเรนตซ์ ซึ่งกำลังจะกล่าวดังต่อไปนี้

## 5.7 สมการการแปลงแบบลอเรนซ์ (Lorentz transformation equations)

พิจารณากรอบอ้างอิงเฉื่อย  $S$  ที่อยู่นิ่ง และกรอบอ้างอิงเฉื่อย  $S'$  ที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  
คงที่  $v$  ตามแกน  $xx'$  ดังแสดงในภาพที่ 5.4



ภาพที่ 5.5 โคออร์ดิเนตของจุด P วัดจากระบบอินเนอร์เชียล S และ S'

มีผู้สังเกต 2 คน ผู้สังเกตคนแรกอยู่นิ่งเทียบกับกรอบ S และผู้สังเกตอีกคนอยู่นิ่งเทียบกับกรอบ S' ที่กำลังเคลื่อนที่ไปทางขวาด้วยอัตราเร็ว  $v$  ดังภาพที่ 5.4 ผู้สังเกตใน S รายงานชุดเหตุการณ์ในพิกัด  $(x, y, z, t)$  และผู้สังเกตในกรอบ S' รายงานเหตุการณ์ชุดเดียวกันในระบบพิกัด  $(x', y', z', t')$  สมการ (5-1) ทำนายว่า ระยะห่างสองเหตุการณ์ในกรอบที่เหตุการณ์เหล่านี้เกิดขึ้นไม่ขึ้นอยู่กับ การเคลื่อนที่ของผู้สังเกตนั้น แต่เนื่องจากค่ากล่าวนี้ขัดกับหลักของการหดสั้นของความยาว จึงได้มีการ เสนอสมการการแปลงที่ถูกต้องที่ใช้ในทุกย่านอัตราเร็วในช่วง  $0 < v < c$  สมการที่ใช้ได้กับทุก อัตราเร็ว และทำให้เราสามารถแปลงโคออดิเนตจาก S เป็น S' คือ สมการการแปลงแบบลอเรนตซ์ ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นโดย เฮนดริก เอ ลอเรนตซ์ (Hendrik A. Lorentz) ในปี ค.ศ. 1890 ในเรื่องเกี่ยวกับ แม่เหล็กไฟฟ้า จากนั้นไอน์สไตน์เป็นผู้เห็นถึงความสำคัญทางกายภาพ ทำให้เขากล้าที่จะแปล ความหมายของสมการเหล่านี้ภายใต้กรอบงานของทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษ

$$x' = \gamma(x - vt) \quad (5-7)$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = \gamma\left(t - \frac{v}{c}x\right)$$

สำหรับการแปลงโคออร์ดิเนตที่กลับกัน จากกรอบอ้างอิง S' ไปยังกรอบอ้างอิง S สามารถหาได้โดย การแทน  $v$  ด้วย  $-v$  และเปลี่ยนโคออร์ดิเนตไพรม์ และอันไพรม์ กล่าวคือ

$$x = \gamma(x' + vt') \quad (5-8)$$

$$y = y'$$

$$z = z'$$

$$t = \gamma\left(t' + \frac{v}{c}x'\right)$$

เมื่อ  $v/c \ll 1$  และ  $v/c^2 \ll 1$  สมการการแปลงแบบลอเรนตซ์จะลดรูปเป็นสมการแบบ กาลิเลียน ดังนั้นเราสามารถสรุปได้ว่า เมื่อความเร็วเข้าใกล้ศูนย์ การแปลงแบบลอเรนตซ์ จะเท่ากับการ

แปลงแบบกาลิเลียม การแปลงแบบลอเรนตซ์ยังให้ขีดจำกัดแก่ค่าสูงสุดของความเร็วด้วย กล่าวคือ ความเร็ว  $v$  ต้องน้อยกว่า  $c$  ถ้า  $v$  มากกว่า  $c$  เมื่อใดปริมาณ  $\sqrt{1 - (v^2/c^2)}$  จะเป็นปริมาณจินตภาพ ทำให้โคออร์ดิเนตอวกาศและเวลาเป็นจินตภาพด้วย ในทางฟิสิกส์จึงเป็นไปได้ ดังนั้นใน สุญญากาศจะไม่มีสิ่งใดเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่มากกว่าความเร็วแสงนั่นเอง

**ตัวอย่างที่ 5.4** นักบินอวกาศคนหนึ่งเดินทางไปยังดาวเคราะห์ที่อยู่ไกลโพ้นจากโลก 8 ปีแสง นักบินอวกาศคนนี้วัดเวลาของการเดินทางที่ขั้วเดียวได้เป็น 6 ปี ถ้ายานอวกาศเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วคงที่ 0.8 เท่าของอัตราเร็วของแสง จงหาความยาวที่หดที่วัดได้โดยนักบิน

**วิธีทำ** ระยะทาง 8 ปีแสงจะแสดงถึงความยาวที่ควรจะเป็นจากโลกถึงดาวเคราะห์ที่วัดโดยผู้สังเกตบนโลกที่เห็นว่าดาวทั้งสองเกือบจะหยุดนิ่ง

หาความยาวที่หดที่วัดได้โดยนักบินได้คือ

$$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 8 \sqrt{1 - \frac{(0.8c)^2}{c^2}} = 5 \text{ ปี}$$

**คำตอบ** ความยาวที่หดที่วัดได้โดยนักบินเท่ากับ 5 ปี

### 5.7.1 การแปลงความเร็วแบบลอเรนตซ์

ถ้ากรอบอ้างอิงอินเนอร์เชียล  $S$  และ  $S'$  เคลื่อนที่สัมพัทธ์กันด้วยความเร็ว  $v$  ไปตามแกน  $XX'$  พิจารณานอนุภาคที่จุด  $P$  กำลังเคลื่อนที่ในอวกาศด้วยความเร็ว  $\vec{u} (u_x, u_y, u_z)$  ซึ่งวัดโดยผู้สังเกตในกรอบ  $S$  และด้วยความเร็ว  $\vec{u}' (u'_x, u'_y, u'_z)$  ที่วัดโดยผู้สังเกตในกรอบ  $S'$  จุดประสงค์คือ เพื่อจะหาความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบ

$$u'_x = \frac{dx'}{dt'}, \quad u'_y = \frac{dy'}{dt'}, \quad u'_z = \frac{dz'}{dt'} \quad (5-10)$$

ดิฟเฟอเรนเชียล สมการ (5-10) ได้

$$dx' = \gamma(dx - vdt), \quad dy' = dy, \quad dz' = dz$$

$$dt' = \gamma \left( dt - \frac{v}{c^2} dx \right)$$

ดังนั้น

$$u'_x = \frac{dx'}{dt'} = \frac{\gamma(dx - vdt)}{\gamma[dt - (vdx/c^2)]}$$

$$= \frac{(dx/dt) - v}{1 - (v/c^2)(dx/dt)}$$

หรือ 
$$u'_x = \frac{u_x - v}{1 - (vu_x/c^2)} \quad (5-11)$$

ในทำนองเดียวกัน 
$$u'_y = \frac{u_y}{\gamma[1 - (vu_x/c^2)]}$$

และ 
$$u'_z = \frac{u_z}{\gamma[1 - (vu_x/c^2)]}$$

สมการข้างต้นเหล่านี้เรียกว่า **สมการการแปลงความเร็วแบบลอเรนตซ์** และสามารถหาการแปลงความเร็วที่กลับกันได้ กล่าวคือ  $u_x, u_y, u_z$  ในเทอมของ  $u'_x, u'_y, u'_z$  โดยการแทน  $v$  ด้วย  $-v$  และสลับข้างของสมการ (5.11) เพื่อหา  $u_x, u_y, u_z$  จะได้

$$u_x = \frac{u'_x + v}{1 + (vu'_x/c^2)}$$

$$u_y = \frac{u'_y}{\gamma[1 + (vu'_x/c^2)]} \quad (5-12)$$

$$u_z = \frac{u'_z}{\gamma[1 + (vu'_x/c^2)]}$$

**ตัวอย่างที่ 5.5** ความเร็วสัมพัทธ์ของยานอวกาศสองลำที่ 1 และ 2 กำลังเคลื่อนที่ทิศตรงกันข้าม ผู้สังเกตคนหนึ่งบนโลกวัดอัตราเร็วของยานอวกาศลำที่ 1 ได้เป็น  $0.75c$  และวัดอัตราเร็วของยานอวกาศลำที่ 2 ได้เป็น  $0.85c$  จงหาความเร็วของยานอวกาศลำที่ 2 ที่สังเกตโดยลูกเรือบนยานอวกาศลำที่ 1

**วิธีทำ** ผู้สังเกตบนโลกอยู่นิ่งในกรอบ  $S$  ทำการวัดสองค่าในยานอวกาศแต่ละลำ ถ้าต้องการหาความเร็วของยานอวกาศลำที่ 2 ที่วัดโดยลูกเรือบนยานลำที่ 1 ดังนั้น  $u_x = -0.85c$  ความเร็วของยานอวกาศ  $A$  ยังเป็นความเร็วของผู้สังเกตที่อยู่นิ่งในยานอวกาศลำที่ 1 ที่สัมพัทธ์กับผู้สังเกตที่หยุดนิ่งบนโลก ดังนั้น  $v = 0.75c$

ทำให้เราได้ว่า

$$\begin{aligned} u'_x &= \frac{u_x - v}{1 - \frac{u_x v}{c^2}} \\ &= \frac{-0.85c - 0.75c}{1 - \frac{(-0.85c)(0.75c)}{c^2}} \\ &= -0.977c \end{aligned}$$

**คำตอบ** คำนวณยานอวกาศลำที่ 2 กำลังเคลื่อนที่ในทิศทาง  $-x$  ที่ถูกสังเกตโดยลูกเรือบนยานอวกาศลำที่ 1 จะสังเกตว่าอัตราเร็วที่น้อยกว่าอัตราเร็วของแสง กล่าวคือ วัตถุซึ่งอัตราเร็วที่น้อยกว่าแสงในกรอบอ้างอิงหนึ่งจะต้องมีอัตราเร็วที่น้อยกว่าอัตราเร็วของแสงในกรอบอื่นๆ สมการการแปลงแบบกาลิเลียนใช้ไม่ได้ในสถานการณ์เชิงสัมพัทธ์

## 5.8 โมเมนตัมในทฤษฎีสัมพัทธภาพ

กฎทางฟิสิกส์ต่างๆ จะยังคงเหมือนเดิมภายใต้การแปลงแบบลอเรนตซ์ เมื่อพิจารณาโมเมนตัมเชิงเส้นและพลังงาน เพื่อให้สอดคล้องตามสมการการแปลงของลอเรนตซ์และหลักการสัมพัทธภาพ โดยที่นิยามในรูปทั่วไปเหล่านี้จะต้องลดรูปมาสู่นิยามในรูปดั้งเดิม เมื่ออัตราเร็วของวัตถุที่น้อยกว่าอัตราเร็วของแสงมากๆ สมมติเราสังเกตการชนของอนุภาคสองอนุภาคในกรอบอ้างอิง  $S$  และยืนยันว่าโมเมนตัมของระบบเป็นแบบอนุรักษ์ ต่อมาจินตนาการว่าโมเมนตัมของอนุภาคที่วัดโดยผู้สังเกตคนหนึ่งในกรอบอ้างอิงที่สอง  $S'$  กำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $v$  สัมพัทธ์กับกรอบแรก ใช้สมการการแปลงความเร็วแบบลอเรนตซ์ และนิยามดั้งเดิมของโมเมนตัมเชิงเส้น  $\vec{p} = m\vec{u}$  เมื่อ  $\vec{u}$  คือความเร็วของอนุภาค  $m$  คือมวลของอนุภาค พบว่าโมเมนตัมเชิงเส้นของระบบนั้นไม่อาจวัดได้ว่ามีสมบัติอนุรักษ์ แต่เนื่องจากกฎทางฟิสิกส์นั้นเหมือนเดิมในทุกกรอบอ้างอิงเฉื่อย ดังนั้นโมเมนตัมเชิงเส้นของระบบจะมีคุณสมบัติอนุรักษ์ในทุกๆ กรอบจึงต้องปรับนิยามของโมเมนตัมเชิงเส้นเพื่อให้โมเมนตัมของระบบโคเดเดียมมีคุณสมบัติอนุรักษ์สำหรับผู้สังเกตทุกคน ดังนั้นสมการเชิงสัมพัทธ์ของโมเมนตัมเชิงเส้น คือ

$$\vec{p} \equiv \frac{m\vec{u}}{\sqrt{1-u^2/c^2}} = \gamma m\vec{u} \quad (5-13)$$

เมื่อ  $u$  มีค่าน้อยกว่า  $c$  มากๆ  $\gamma$  จะมีค่าเข้าใกล้หนึ่ง และโมเมนตัมจะมีค่าเข้าใกล้  $m\vec{u}$  ดังนั้นสมการเชิงสัมพัทธ์สำหรับโมเมนตัมจะลดรูปเป็นสมการในรูปดั้งเดิมเมื่อความเร็วของอนุภาคมีค่าน้อยกว่า  $c$  มาก ๆ

ตัวอย่างที่ 5.6 อิเล็กตรอนตัวหนึ่งเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว  $0.75c$  จงหาขนาดของโมเมนตัมเชิงสัมพัทธ์ของอิเล็กตรอนตัวนี้ (มวลของอิเล็กตรอนเท่ากับ  $9.11 \times 10^{-31} \text{kg}$ )

วิธีทำ จากสมการ

$$\begin{aligned}\vec{p} &= \frac{m\vec{u}}{\sqrt{1-u^2/c^2}} \\ &= \frac{(9.11 \times 10^{-31} \text{kg})(0.75)(3 \times 10^8 \text{m/s})}{\sqrt{1-\frac{(0.75c)^2}{c^2}}} \\ &= 3.1 \times 10^{-22} \text{kg} \cdot \text{m/s}\end{aligned}$$

คำตอบ ขนาดของโมเมนตัมเชิงสัมพัทธ์เท่ากับ  $3.1 \times 10^{-22}$  กิโลกรัมเมตรต่อวินาที

### 5.9 แรงแและพลังงานในทฤษฎีสัมพัทธภาพ

แรงแและพลังงานที่จะกล่าวต่อไปนี้เป็นแรงแที่กระทำต่ออนุภาคเดี่ยว และพลังงานของอนุภาคเดี่ยว จากกลศาสตร์แบบดั้งเดิม กฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 2 ของนิวตัน คือ

$$\vec{F} = \frac{d(\vec{p})}{dt}$$

แทนขนาดของโมเมนตัม  $p = mu = \frac{m_0 u}{\sqrt{1-u^2/c^2}}$  และจากนิยามของพลังงานจลน์ในกลศาสตร์แบบดั้งเดิม และให้การเคลื่อนที่อยู่ในแนวแกน  $x$  เขียนได้ว่า

$$E_k = \int \vec{F} \cdot d\vec{l} = \int \vec{F} \cdot d\vec{x} = \int \frac{d(mu)}{dt} dx = \int (mdu + udm)u = \int (mudu + u^2 dm)$$

จากสมการของมวลสัมพัทธ์  $m = \frac{m_0}{\sqrt{1-u^2/c^2}}$  เราสามารถเขียนได้ว่า

$$m^2 c^2 - m^2 u^2 = m_0^2 c^2$$

โดยการหาอนุพันธ์สมการข้างต้นนี้ และหารตลอดด้วย  $2m$  จะได้

$$mudu + u^2 dm = c^2 dm$$

ดังนั้น เขียนใหม่ได้เป็น

$$E_k = \int c^2 dm = c^2 \int dm = mc^2 - m_0 c^2$$

โดยสมการมวลสัมพัทธ์ จะได้ว่า

$$E_k = mc^2 \left[ \frac{1}{\sqrt{1-u^2/c^2}} - 1 \right] = \gamma mc^2 - mc^2 = (\gamma - 1)mc^2 \quad (5-14)$$

ให้  $mc^2 = E_R$  ซึ่งไม่ขึ้นกับอัตราเร็วของอนุภาค เรียกว่า **พลังงานหยุดนิ่ง** ซึ่งแสดงว่ามวลอยู่ในรูปของพลังงาน เทอม  $\gamma mc^2$  ในสมการ (5.14) ที่ขึ้นอยู่กับอัตราเร็วของอนุภาคนั้น เป็นผลรวมของพลังงานจลน์และพลังงานหยุดนิ่ง ซึ่งเรียกว่า **พลังงานสุทธิ**

$$E = mc^2 + E_k$$

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1-u^2/c^2}} = \gamma mc^2 \quad (5-15)$$

ค่าพลังงานสุทธิ  $E$  มีความสัมพันธ์กับค่าโมเมนตัมเชิงเส้นสัมพันธ์  $p$  ซึ่งสามารถหาได้จาก  $E = \gamma mc^2$  และ  $p = \gamma mu$  ถ้ายกกำลังสองสมการนี้ และนำมาลบกัน สามารถกำจัดตัวแปร  $u$  ได้

$$E^2 = p^2 c^2 + (mc^2)^2 \quad (5-16)$$

เมื่ออนุภาคนั้นอยู่นิ่ง  $p = 0$  ดังนั้น

$$E = E_R = mc^2$$

สุดท้ายเนื่องจากมวล  $m$  ของอนุภาคไม่ขึ้นกับการเคลื่อนที่ของอนุภาคนั้น ค่า  $m$  จะต้องมีค่าคงที่เท่าเดิมในทุกกรอบอ้างอิง ด้วยเหตุผลนี้  $m$  จึงมักถูกเรียกว่า มวลที่ไม่เปลี่ยนแปลง หรืออีกนัยหนึ่ง เนื่องจากทั้งพลังงานสุทธิและโมเมนตัมเชิงเส้นของอนุภาคหนึ่งขึ้นอยู่กับค่าความเร็ว ปริมาณเหล่านี้จึงขึ้นอยู่กับกรอบอ้างอิงที่ปริมาณเหล่านี้ถูกวัด เมื่อต้องจัดการกับอนุภาคในระดับย่อยของอะตอม เป็นการสะดวกกว่าที่จะแสดงพลังงานของมันในหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์ เนื่องจากอนุภาคต่างๆ มีพลังงานอันเกิดจากการถูกเร่งผ่านความต่างศักย์ค่าหนึ่ง แฟกเตอร์ของการแปลงหน่วยพลังงาน คือ  $1 \text{ eV}$  เท่ากับ  $1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$

**ตัวอย่างที่ 5.7** จงหาพลังงานหยุดนิ่งของโพตอนในหน่วยของอิเล็กตรอนโวลต์ และโมเมนตัมของโพตอน

**วิธีทำ**

$$E_R = m_p c^2 = (1.6726 \times 10^{-27} \text{ kg})(2.998 \times 10^8 \text{ m/s})^2$$

$$= (1.504 \times 10^{-10} \text{ J}) \left( \frac{1 \text{ eV}}{1.602 \times 10^{-19} \text{ J}} \right)$$

$$= 938 \text{ MeV}$$

ถ้าพลังงานสุทธิของโฟตอนตัวหนึ่งเป็นสามเท่าของพลังงานหยุดนิ่ง อัตราเร็วของโฟตอนตัวนั้นจะมีค่าเท่าใด

$$E = 3mc^2 = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}} \rightarrow 3 = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}}$$

แก้สมการหา  $u$

$$1 - \frac{u^2}{c^2} = \frac{1}{9} \rightarrow \frac{u^2}{c^2} = \frac{8}{9}$$

$$u = \frac{\sqrt{8}}{3}c = 0.943c$$

$$= 2.83 \times 10^8 \text{ m/s}$$

โมเมนตัมของโฟตอนเป็นเท่าใด

$$E^2 = p^2c^2 + (mc^2)^2 = (3mc^2)^2$$

$$p^2c^2 = 9(mc^2)^2 - (mc^2)^2 = 8(mc^2)^2$$

$$p = \sqrt{8} \frac{mc^2}{c} = \sqrt{8} \frac{938 \text{ MeV}}{c}$$

$$= 8.8 \text{ eV}$$

**คำตอบ** โฟตอนมีพลังงานหยุดนิ่ง 938 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ และโมเมนตัม 8.8 อิเล็กตรอนโวลต์

## 5.10 ทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป

จากที่แรงดึงดูดโน้มถ่วงซึ่งกันและกันระหว่างมวลสองมวล และความต้านทานของมวลที่กำลังถูกเร่งด้วย คำถามนี้ที่ทำให้นิวตันและนักฟิสิกส์คนอื่นๆ งงงวยมาเป็นเวลานานหลายปีได้ถูกเฉลยโดยไอน์สไตน์ในปี ค.ศ. 1916 เมื่อเขาได้ตีพิมพ์ทฤษฎีความโน้มถ่วงของเขา ที่มีความซับซ้อนทางคณิตศาสตร์ เรียกว่า ทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป ไอน์สไตน์ได้เสนอว่าไม่มีการทดลองเชิงกลหรือการทดลองวิธีอื่นๆ ที่จะใช้จำนวนความแตกต่างระหว่างสถานการณ์ทั้งสองนี้ได้ การขยายความนี้รวมถึงปรากฏการณ์ทั้งหมด เช่น สมมติว่ามีพัลส์แสงถูกส่งออกไปในแนวราบข้ามไปอีกฝั่งหนึ่งของลิฟต์ ซึ่งลิฟต์ตัวนั้นถูกเร่งในทิศขึ้นในอวกาศอันว่างเปล่า จากมุมมองของผู้สังเกตคนหนึ่งในกรอบอ้างอิงเฉื่อยที่อยู่นอกลิฟต์ตัวนั้น แสงจะเดินทางเป็นเส้นตรงในขณะที่พื้นของลิฟต์ตัวนั้นเร่งในทิศขึ้น สำหรับผู้สังเกตที่อยู่ในลิฟต์ เส้นวิถีของพัลส์แสงจะโค้งลง เนื่องจากพื้นลิฟต์ และผู้สังเกตถูกเร่งในทิศขึ้น ดังนั้น จากความเท่าเทียมกันของไอน์สไตน์ เสนอว่าลำแสงก็ควรถูกทำให้โค้งลงด้วยอิทธิพลของสนามโน้มถ่วง ซึ่งต่อมาได้มีการทำการทดลองหลายครั้งเพื่อพิสูจน์ปรากฏการณ์นี้ แม้ว่าการโค้งจะมีค่าน้อย ลำเลเซอร์ที่มุ่งชี้ไปในแนวราบจะตกลงน้อยกว่า 1

เซนติเมตร หลังจากเดินทางไปเป็นระยะ 6000 กิโลเมตร ทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปของไอน์สไตน์สองสมมติฐาน คือ

1. กฎในธรรมชาติทุกกฎมีรูปแบบเดียวกันสำหรับผู้สังเกตทุกคนในกรอบอ้างอิงใดๆ ไม่ว่ากรอบนั้นจะถูกร่งหรือไม่
2. ในบริเวณใกล้เคียงของจุดใดๆ สนามโน้มถ่วงจะเท่าเทียมกับกรอบอ้างอิงที่ถูกเร่งในอวกาศที่ปราศจากแรงโน้มถ่วง

ปรากฏการณ์หนึ่งที่น่าสนใจที่ทำนายได้โดยทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปก็คือ เวลาถูกเปลี่ยนแปลงด้วยความโน้มถ่วง นาฬิกาเรือนที่อยู่ในสภาวะที่มีความโน้มถ่วงจะเดินช้ากว่านาฬิกาเรือนที่อยู่ในบริเวณที่ความโน้มถ่วงน้อยมาก เป็นผลให้ความถี่ของการแผ่รังสีที่ถูกปลดปล่อยโดยอะตอมในบริเวณที่มีสนามโน้มถ่วงสูงเกิดปรากฏการณ์ เลื่อนเข้าใกล้สีแดง เข้าสู่ความถี่ต่ำกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับการปลดปล่อยแบบเดียวกันในบริเวณที่สนามโน้มถ่วงมีแรงอ่อนๆ การเลื่อนเข้าหาสีแดงโดยความโน้มถ่วงนี้ถูกตรวจพบในเส้นสเปกตรัมที่ถูกปลดปล่อยโดยอะตอมในดาวฤกษ์ที่มีมวลมาก การทดสอบปรากฏการณ์นี้ได้รับการพิสูจน์บนโลกโดยการเปรียบเทียบความถี่ของรังสีแกมมาที่ถูกปลดปล่อยจากนิวเคลียสที่อยู่ห่างกัน ในแนวตั้งเป็นระยะ 20 เมตร

ข้อสมมติฐานที่สอง ไอน์สไตน์ได้พัฒนาวิธีการเพื่อใช้อธิบายความเร่งที่จะทำให้สนามโน้มถ่วงหายไป โดยกำหนดแนวคิดเกี่ยวกับ ความโค้งของปริภูมิ-เวลา เพื่อใช้อธิบายปรากฏการณ์ความโน้มถ่วงที่ทุก ๆ จุด ในความเป็นจริงความโค้งของปริภูมิ-เวลา สามารถแทนที่ทฤษฎีความโน้มถ่วงของนิวตันได้อย่างสมบูรณ์ ตามความคิดของไอน์สไตน์ สาเหตุของมวลจะเป็นตัวทำให้เกิดความโค้งของปริภูมิ-เวลา ในบริเวณใกล้เคียงกับมวลนั้น และความโค้งจะเป็นตัวควบคุมเส้นทางของปริภูมิ-เวลาที่ซึ่งวัตถุเคลื่อนที่อย่างอิสระทั้งหมดจะต้องเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางนี้

ตัวอย่างปรากฏการณ์ความโค้งของปริภูมิ-เวลา ลองพิจารณานักเดินทางสองคนเคลื่อนที่บนเส้นทางที่ขนานกัน โดยอยู่ห่างจากกัน 2-3 เมตร บนพื้นโลก และเคลื่อนที่มุ่งไปทางทิศเหนือในแนวเส้นลองจิจูดทั้งสอง ขณะที่พวกเขาสังเกตซึ่งกันและกัน เมื่ออยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตร พวกเขาอ้างว่าเส้นทางของพวกเขานั้นขนานกันจริง ๆ แต่เมื่อพวกเขาเข้าใกล้ขั้วโลกเหนือ พวกเขาสังเกตว่าพวกเขา กำลังเคลื่อนที่เข้าใกล้กันมากขึ้นและบรรจบกันที่ตำแหน่งขั้วโลกเหนือ พวกเขาสังเกตว่าพวกเขา กำลังเคลื่อนที่เข้าใกล้กันมากขึ้น และบรรจบกันที่ตำแหน่งขั้วโลกเหนือ ด้วยเหตุนี้พวกเขาจึงยืนยันว่าได้เคลื่อนที่ในเส้นทางที่ขนานกันจริง แต่กลับเคลื่อนที่เข้าหากัน คล้ายว่ามีแรงดึงดูดระหว่างพวกเขา จึงสามารถสร้างข้อสรุปจากเหตุการณ์นี้ได้ว่า พวกเขา กำลังเดินอยู่บนพื้นผิวที่มี

ความโค้ง และเป็นแบบเรขาคณิตมากกว่าที่จะเป็นแรงดึงดูดที่เป็นสาเหตุให้พวกเขาเคลื่อนตัวเข้าหากัน ในทำนองเดียวกันสัมพัทธภาพทั่วไปที่ได้ทำนายว่า เมื่อลำแสงหนึ่งทีเคลื่อนที่ผ่านใกล้ดวงอาทิตย์ควรจะถูกเบี่ยงเบนในปริภูมิ-เวลาที่โค้งงอ ซึ่งเกิดจากมวลของดวงอาทิตย์ และได้รับการยืนยันเมื่อนักดาราศาสตร์ตรวจพบการ โค้งของแสงจากดาวฤกษ์ใกล้กับดวงอาทิตย์ในช่วงสุริยุปราคาเต็มดวงในช่วงหลังสงครามโลกครั้งที่ 1 ทำให้ไอน์สไตน์เป็นที่รู้จักอย่างกว้างขวาง

## 5.11 บทสรุป

สมมติฐานพื้นฐานสองข้อของทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษมีดังต่อไปนี้ ข้อแรกกฎของฟิสิกส์ทั้งหลายจะต้องเหมือนกันในทุกๆ กรอบอ้างอิงเฉื่อย ข้อสองอัตราเร็วของแสงในสุญญากาศมีค่าเหมือนกันคือ อัตราเร็วแสงเท่ากับ  $3 \times 10^8$  m/s ในทุกกรอบอ้างอิงเฉื่อย ไม่ว่าค่าความเร็วของผู้สังเกตหรือค่าความเร็วของแหล่งกำเนิดที่ปลดปล่อยแสงจะเป็นเท่าใด ผลของทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษมีดังต่อไปนี้ เหตุการณ์ที่ถูกวัดว่าเกิดขึ้นพร้อมกันสำหรับผู้สังเกตคนหนึ่ง ไม่จำเป็นที่จะถูกวัดว่าเกิดขึ้นพร้อมกันสำหรับผู้สังเกตอีกคนหนึ่งซึ่งกำลังเคลื่อนที่สัมพัทธ์กับผู้สังเกตคนแรก นาฬิกาที่อยู่ในสถานะเคลื่อนที่สัมพัทธ์กับผู้สังเกตคนหนึ่งจะถูกวัดว่าเดินช้ากว่าปกติ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การยืดของเวลา ความยาวของวัตถุที่กำลังเคลื่อนที่จะถูกวัดว่าสั้นลง เมื่ออยู่ในทิศทางของการเคลื่อนที่นั้น ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การหดของความยาว เพื่อให้สอดคล้องกับสมมติฐานของสัมพัทธภาพพิเศษ สมการการแปลงแบบกาลิเลียมต้องถูกแทนที่ด้วย สมการแปลงแบบลอเรนตซ์ นิยามของโมเมนตัมเชิงเส้นได้ถูกขยายให้อยู่ในรูปทั่วไป เพื่อให้สอดคล้องกับสมมติฐานของไอน์สไตน์ ทำให้นิยามของพลังงานจลน์มีการเปลี่ยนแปลงไป ทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป ของไอน์สไตน์ ประกอบไปด้วยสมมติฐาน ได้แก่ กฎในธรรมชาติทุกกฎมีรูปแบบเดียวกัน สำหรับผู้สังเกตทุกคนในกรอบอ้างอิงใดๆ ไม่ว่ากรอบนั้นจะถูกเร่งหรือไม่ และอีกกฎหนึ่งคือ ในบริเวณใกล้เคียงของจุดใดๆ สนามโน้มถ่วงจะเท่าเทียมกับกรอบอ้างอิงที่ถูกเร่งในอวกาศที่ปราศจากแรงโน้มถ่วง หลักการของความเท่าเทียม

## แบบฝึกหัด

1. แผลคู้หนึ่งมีอายุ 25 ปี โดยแผลคนแรกออกเดินทางไปในอวกาศด้วยอัตราเร็วคงที่ ในขณะที่อยู่ในยานอวกาศจับเวลาด้วยนาฬิกาที่เที่ยงตรงมาก เมื่อเขากลับมายังโลก เขาบอกว่าเขาอายุ 31 ปี ในขณะที่ฝาแผลคนที่อยู่บนโลกบอกว่าตัวเขามีอายุ 43 ปี จงหาอัตราเร็วของยานอวกาศ [คำตอบ 0.943c]
2. ไรร์สชนิดหนึ่งแบ่งตัวในสภาพเพาะเชื้อที่อยู่บนพื้นโลกได้ทุก ๆ 10 วินาที หากนำเชื้อไรร์สนี้เดินทางจากโลกไปดวงอาทิตย์ ซึ่งห่างออกไป  $1.5 \times 10^{11}$  เมตร ด้วยยานอวกาศซึ่งเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว 0.85c ขณะที่ยานอวกาศชนดวงอาทิตย์มีเชื้อไรร์สแบ่งตัวได้กี่เท่าไ้ในยานอวกาศ [คำตอบ  $2.1 \times 10^9$  ตัว]
3. นักบินอวกาศในยานอวกาศถือไม้เมตรอันหนึ่งไว้ขณะที่ยานอวกาศแล่นผ่านโลกด้วยอัตราเร็ว  $v$  ขนานกับผิวโลก บุคคลในยานจะสังเกตเห็นอะไรในขณะที่ไม้เมตรถูกหมุนจากแนวขนานไปให้ตั้งฉากกับทิศการเคลื่อนที่ของยาน [คำตอบ  $\sqrt{1 - (v/c)^2}$  เมตร]
4. ยานอวกาศกำลังเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว 0.95c จากโลกไปยังดาวเคราะห์ดวงหนึ่งซึ่งอยู่ห่างออกไป 4.5 ปีแสง การเดินทางนี้จะใช้เวลาเท่าไร ตาม (ก) นาฬิกาบนโลก (ข) นาฬิกาบนยานอวกาศ (ค) สำหรับคนบนยานอวกาศ [คำตอบ (ก)  $1.5 \times 10^8$  วินาที (ข)  $4.7 \times 10^7$  วินาที (ค)  $1.3 \times 10^{16}$  วินาที]
5. อนุภาคหนึ่งมีมวล  $m$  ขณะที่กำลังวิ่งด้วยความเร็ว  $v$  ดังนั้นอนุภาคนี้อาจมีพลังงานทั้งหมดเท่ากับ  $mc^2$  สมมติว่าพลังงานนี้มีค่าเป็น 5 เท่าของพลังงานของโฟตอนตัวหนึ่งที่มีโมเมนตัมเท่ากับโมเมนตัมของอนุภาคนี้ออกดี อยากทราบว่าอัตราส่วนมีค่าเท่าไร [คำตอบ 1/5]
6. จงคำนวณหามวลของอิเล็กตรอนที่เดินทางเร็วเท่ากับครึ่งหนึ่งของอัตราเร็วของแสง มวลนิ่งของอิเล็กตรอนเท่ากับ  $9.11 \times 10^{-31}$  กิโลกรัม [คำตอบ 2.96 เท่าของมวลที่หยุดนิ่ง]
7. จงหาพลังงานจลน์ที่ต้องใช้ทำให้อิเล็กตรอนมีอัตราเร็ว 0.9 เท่าของอัตราเร็วของแสง โดยเริ่มต้นจากเดิมอยู่นิ่ง [คำตอบ  $5.2 \times 10^3$  เมกะอิเล็กตรอนโวลต์]
8. กรอบอ้างอิงเฉื่อยสองกรอบเคลื่อนที่ออกจากกันด้วยอัตราเร็วคงที่ 0.6 เท่าของอัตราเร็วแสง ถ้าในกรอบหนึ่งมีนักวิ่งวิ่งในทิศตั้งฉากกับแกนที่ทั้งสองระบบเคลื่อนที่สัมพัทธ์กัน ซึ่งได้ระยะทาง 200 เมตร ในเวลา 20 วินาที [คำตอบ 25 วินาที]

## เอกสารอ้างอิง

- ก่องกัญจน์ ภัทรากาญจน์ และชนกาญจน์ ภัทรากาญจน์. (2554). **ฟิสิกส์ 2 ตัวอย่างและโจทย์ พร้อมคำเฉลย**. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เจริญโชค ศรีขวัญ และคณะ. (2546). **ฟิสิกส์ทั่วไป 2 General Physics II 2<sup>nd</sup> ed.** กรุงเทพมหานคร : คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล.
- ปิยพงษ์ สิทธิคง. (2553). **ฟิสิกส์ระดับอุดมศึกษา เล่ม 3**. กรุงเทพมหานคร: วิรัตน์ เอ็ดดูเคชั่น จำกัด
- ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์. (2535). **ฟิสิกส์ 2**. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Halpern, A. (2011). **Schaum's outlines 3,000 Solved Problems in Physics**. New York: The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Halliday, R. and Jearl, W. (2011). **Principles of Physics 9<sup>th</sup> ed.** California: John Wiley & Sons, Inc.
- Serway, R.A., Moses, C.J., & Moyer, C.A. (2005). **Modern Physics 3<sup>rd</sup> ed.** California: Brooks/Cole-Thomson Learning.
- Serway, R. A., and Jewett, J. W. (2014). **Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics 9<sup>th</sup> ed.** Belmont: Brooks/Cole-Thomson Learning.
- Serway, R.A., Vuille, C., and Hughes, J. (2015). **College Physics 10<sup>th</sup> ed.** Stamford: Cengage Learning.
- Thornton, T.S., and Rex, A. (2013). **Modern Physics for Scientists and Engineers 4<sup>th</sup> ed.** Boston: Brooks/Cole- Cengage Learning.
- Young, H.D., and Freedman, R.A. (2016). **Sear's & Zemansky's University Physics with Modern Physics 14<sup>th</sup> ed.** Essex: Pearson Education Limited.

## บทที่ 6

### กลศาสตร์ควอนตัมเบื้องต้น

#### (Introduction to quantum mechanics)

##### 6.1 บทนำ

กลศาสตร์ควอนตัม (Quantum Mechanics) เป็นหัวข้อที่สำคัญในฟิสิกส์ยุคใหม่ (Modern Physics) ที่ทำให้มนุษย์สามารถเข้าใจพฤติกรรมของอนุภาคขนาดเล็กในระดับอะตอมได้ เพราะในโลกจุลภาค (microscopic world) อะตอมหรืออนุภาคทั้งหลายจะไม่ประพฤติตัวตามกฎการเคลื่อนที่ของนิวตันเฉกเช่นวัตถุทั่วไปในโลกมหภาค (macroscopic world) ที่มนุษย์คุ้นเคยอยู่ในชีวิตประจำวัน แต่มีหลายพฤติกรรมที่ฟังดูว่าแปลกประหลาดมาก ไม่น่าจะเป็นจริงได้ตามประสบการณ์ทั่วไปของคนเรา เช่นอนุภาคตัวหนึ่งสามารถอยู่ “สองตำแหน่ง” ในเวลาเดียวกันได้ หรืออนุภาคสามารถวิ่ง “ทะลุ” กำแพงกั้นได้ เป็นต้น ในบทเรียนนี้นักศึกษาจะได้ศึกษาถึงหลักการของกลศาสตร์ควอนตัม แนวคิดเบื้องต้นเกี่ยวกับฟิสิกส์อะตอมเพื่อเป็นพื้นฐานในการศึกษาในระดับที่สูงขึ้นต่อไป มีการกล่าวถึงรายละเอียดของความเป็นคลื่นของอนุภาค ความพยายามที่จะอธิบายพฤติกรรมของอนุภาคเล็ก ๆ เช่นอิเล็กตรอนที่ประพฤติตัวเป็นคลื่น โดยอาศัย “ฟังก์ชันคลื่น” (wave function) และสมการที่อธิบายถึงสมบัติของฟังก์ชันคลื่นนี้ รวมถึงหลักความไม่แน่นอนที่เป็นหลักสำคัญในเรื่องควอนตัมอีกด้วย

##### 6.2 ก่อนยุคกลศาสตร์ควอนตัม (Before quantum mechanics)

ในปี ค.ศ. 1900 เป็นจุดเริ่มต้นของกลศาสตร์ควอนตัม (Quantum mechanics) ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากข้อเสนอของ พลังค์ นักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน ซึ่งได้เสนอแนวคิดที่ว่า พลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เปล่งออกจากผิวของวัตถุดำ จะอยู่ในลักษณะของกลุ่มหรือก้อนพลังงาน ซึ่งจะเรียกว่า อยู่ในลักษณะของควอนตัม ผู้ที่มีส่วนสำคัญในการแสดงแนวคิดของควอนตัมของพลังงานที่มีความถูกต้องและมีความทั่วไปตามธรรมชาติ ได้แก่ ไอน์สไตน์ (Albert Einstein) เพราะจากบทความของเขาในเวลาใกล้เคียงกับของพลังค์ ได้แสดงให้เห็นอย่างเด็ดขาดถึงความถูกต้องของแนวคิดของควอนตัมของค่าพลังงาน เพราะพลังค์ไม่ได้เสนอว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีลักษณะเป็นอนุภาค

หากจะทำความเข้าใจความแตกต่างของข้อเสนอของพลังค์และไอน์สไตน์ ก็ต่อเมื่อพิจารณาการแผ่รังสีของวัตถุดำ และปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effect) ปัจจุบันใครก็ตามที่ไม่มีความรู้ทางหลักการของกลศาสตร์ควอนตัมบ้างพอสมควร จะเท่ากับว่าผู้นั้นอยู่ในยุคมืดของความรู้ และปรัชญาความคิดอยู่ การจะเข้าใจกลศาสตร์ควอนตัมมีความจำเป็นต้องศึกษาเนื้อหาทางฟิสิกส์สาขาต่างๆ โดยเฉพาะกลศาสตร์ยุคดั้งเดิม ที่มีการพัฒนามาอย่างยาวนาน พร้อมทั้งมีการพัฒนาทางด้านคณิตศาสตร์เพื่อนำมาใช้เป็นเครื่องมือในการศึกษาฟิสิกส์ ซึ่งทฤษฎีของลากรานจ์ (Lagrange's theorem) และหลักการของแฮมิลตัน (Hamilton's principle) นั้น สามารถนำมาแก้ปัญหาต่างๆ ทางด้านกลศาสตร์ได้สง่างาม และสะดวกกว่าทฤษฎีของนิวตันมาก ซึ่งถือได้ว่าเป็นจุดสุดยอดของการพัฒนาการของทฤษฎีของกลศาสตร์ยุคดั้งเดิมเลยทีเดียว

ในสาขาวิชาทางแสงและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ก็ได้มีการเสนอชุดสมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equations) ซึ่งก็ได้พัฒนามาอย่างมากที่สุดที่เป็นพื้นฐานของการพัฒนาการของกลศาสตร์ควอนตัมเช่นเดียวกัน

ส่วนสาขาวิชาทางด้านความร้อนและพลศาสตร์ความร้อน (Thermodynamics) ซึ่งมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง และได้รับการพัฒนาต่อเป็นทฤษฎีของกลศาสตร์เชิงสถิติ (Statistical mechanics) โดยแมกซ์เวลล์ และ โบลต์ซมันน์ (Ludwig Eduard Boltzmann) รวมทั้งนักวิทยาศาสตร์อีกหลายคน จนสามารถอธิบายปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ ซึ่งประกอบด้วยอนุภาคจำนวนมากได้ลึกซึ้งขึ้น และยังสามารถเข้าใจในแนวคิดของเอนโทรปี (Entropy) ได้มากขึ้น

ทางสาขาวิชาดาราศาสตร์ (Astronomy) ก็ได้มีการพัฒนาโดยอาศัยทฤษฎีกลศาสตร์ของนิวตันและลากรานจ์ จนกระทั่งสามารถจะเข้าใจหลักการสำคัญของระบบสุริยจักรวาล และระบบของดาราศาสตร์ได้มากขึ้น

### 6.3 การแผ่รังสีของวัตถุดำ (Black body radiation)

วัตถุทุกชนิดไม่ว่าจะเป็นของแข็งหรือของเหลว ถ้ามีอุณหภูมิสูงกว่าศูนย์องศาสัมบูรณ์จะแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาทุกความถี่ เช่น จากการสังเกตแท่งเหล็กที่ถูกเผาจนร้อนจัด พบว่าที่อุณหภูมิไม่สูงรังสีที่แผ่ออกมาส่วนใหญ่มีพลังงานอยู่ในช่วงความถี่ต่ำ เช่น รังสีใต้แดง ซึ่งตาไม่สามารถมองเห็น แต่ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น ความถี่ที่พลังงานส่วนใหญ่แผ่ออกมาเพิ่มสูงขึ้น จนกระทั่งสามารถมองเห็นได้ด้วยตา ซึ่งทำให้เห็นแท่งเหล็กเป็นสีแดง และเปลี่ยนเป็นสีส้มเหลือง และในที่สุดเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอีกจะเห็นแท่งเหล็กเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน สีม่วง ตามลำดับ รังสีของแสงที่แผ่ออกมาในช่วงที่ตามองเห็น เรียกรังสีช่วงนี้ว่าสเปกตรัม ต่อมาเมื่อแท่งเหล็กร้อนจัด ความถี่ที่พลังงานส่วนใหญ่แผ่ออกมาสูงขึ้นอีก เป็นรังสีเหนือม่วงซึ่งตาไม่สามารถมองเห็นได้สเปกตรัมที่เกิดจากการเผาแท่งเหล็กให้ร้อนจัดนี้เป็นสเปกตรัมแบบต่อเนื่องจากวัตถุที่มีอุณหภูมิสูง (วัตถุที่ร้อน) นอกจากจะมีการแผ่รังสีแล้วยังมีการดูดกลืนรังสีจากสิ่งแวดล้อมด้วย โดยอัตราการรังสีที่แผ่

ออกมาจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและชนิดของพื้นผิว วัตถุต่างชนิดกันจะมีความสามารถในการแผ่และดูดกลืนรังสีต่างกัน วัตถุที่เป็นตัวแผ่และดูดกลืนรังสีได้อย่างสมบูรณ์และดีที่สุด เรียกว่า วัตถุดำ (Black Body) จะดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทุกความถี่ที่ตกกระทบโดยไม่สะท้อนออกมา

ในปี ค.ศ. 1859 เคอร์ชอฟฟ์ อาศัยความรู้เรื่อง อุณหพลศาสตร์ เขียนสมการแสดงกำลังของรังสีที่แผ่ออกมาจากวัตถุเมื่อเกิดสมดุลความร้อนด้วยการแผ่รังสี (Thermal equilibrium with radiation) ได้เป็น

$$e_f = J(f, T)A_f \quad (6-1)$$

เมื่อ  $e_f$  คือ กำลังของรังสีต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ต่อหนึ่งหน่วยความถี่ที่แผ่ออกมาจากวัตถุ

$A_f$  คือ สัดส่วนของกำลังแสงต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ต่อหนึ่งหน่วยความถี่ที่ตกกระทบวัตถุ แล้วถูกดูดกลืน

$J(f, T)$  คือ universal function ซึ่งไม่แตกต่างกันไม่ว่าจะเป็นวัตถุชนิดใด โดยฟังก์ชันนี้จะขึ้นอยู่กับความถี่ของแสงที่แผ่ออกมาจากวัตถุและอุณหภูมิสัมบูรณ์ของวัตถุ

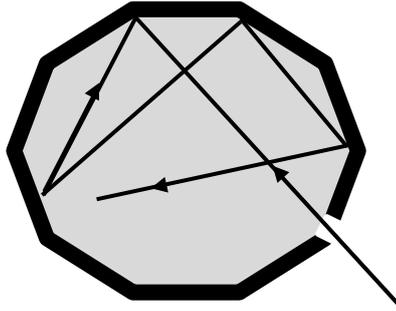
สำหรับวัตถุดำสามารถดูดกลืนรังสีทุกความยาวคลื่นที่ตกกระทบ โดยถ้าหากวัตถุดูดกลืนรังสีที่ตกกระทบไม่หมด จะพบว่ารังสีสะท้อนออกมาให้เราเห็นได้ แต่เนื่องจากวัตถุไม่มีการสะท้อนของรังสีเลย จึงเห็นวัตถุเป็นสีดำ สมการกำลังของรังสีที่แผ่ออกมาที่เสนอโดยเคอร์ชอฟฟ์สำหรับวัตถุดำ เขียนได้เป็น

$$e_f = J(f, T) \quad (6-2)$$

โดยที่  $A_f = 1$  แสดงให้เห็นว่าวัตถุดูดกลืนพลังงานทั้งหมดที่ตกกระทบตัวมันได้ สำหรับทุก ๆ ค่าความถี่

สมการ (6-2) แสดงให้เห็นว่าการแผ่รังสีของวัตถุดำขึ้นอยู่กับความถี่ของแสงและอุณหภูมิของวัตถุ โดยไม่ขึ้นกับวัสดุ ขนาด และรูปร่างของวัตถุ และจะเห็นว่าการแผ่และการดูดกลืนรังสีของวัตถุใด ๆ สัมพันธ์กัน ซึ่งก็เป็นจริงสำหรับวัตถุดำด้วย ดังนั้นในบางครั้งวัตถุดำอาจถูกเรียกว่า ตัวแผ่รังสีในอุดมคติ (ideal black body radiation)

วัตถุดำสามารถสร้างขึ้นได้โดยการทำโพรงในเนื้อวัตถุหรือภาชนะ และมีช่องเปิดเล็ก ๆ ให้รังสีส่องเข้าไปได้ เมื่อรังสีเข้าไปจะเกิดการสะท้อนกลับไปมาภายในโพรงจนในที่สุดรังสีก็จะถูกดูดกลืนหมด ดังนั้นโพรงจึงทำหน้าที่เหมือนเป็นวัตถุดำ ในขณะที่ช่องเปิดทำหน้าที่เป็นผิวของวัตถุดำที่อุณหภูมิ  $T$  ใด ๆ



ภาพที่ 6.1 แสดงโพรงซึ่งเป็นเสมือนวัตถุดำ

ภายในโพรงจะมีคลื่นนิ่ง (standing waves) ของรังสีที่ถูกส่งออกมาโดยโมเลกุลของผนังโพรง ซึ่งความจริงแล้วมีทั้งส่งและดูดกลืนคลื่น และที่สมดุลความร้อนที่อุณหภูมิ  $T(K)$  นี้ คลื่นที่ถูกผนังส่งออกมาจะเท่ากับที่ผนังดูดกลืนกลับ โดยจะมีคลื่นจำนวนเล็กน้อยที่รั่วออกจากช่องเปิด ในเวลาต่อมาเราได้พยายามทำความเข้าใจถึงการแผ่รังสีของวัตถุดำให้มากยิ่งขึ้น โดยการศึกษาและการทดลองของนักฟิสิกส์ชาวออสเตรียชื่อ โจเซฟ สเตฟาน ในปี ค.ศ. 1879 พบว่ากำลังทั้งหมดของรังสีที่แผ่ออกมาจากวัตถุดำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่สำหรับทุกๆ ความถี่ ของรังสีที่แผ่ออกมา แปรผันกับกำลังสี่ของอุณหภูมิสัมบูรณ์ของวัตถุ

กฎของสเตฟาน เขียนได้ดังนี้

$$e_{\text{total}} = \sigma T^4 \quad (6-3)$$

เมื่อ  $e_{\text{total}}$  คือ กำลังทั้งหมดของรังสีที่แผ่ออกมาจากวัตถุ ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่

$T$  คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ มีหน่วยเป็นเคลวิน (K)

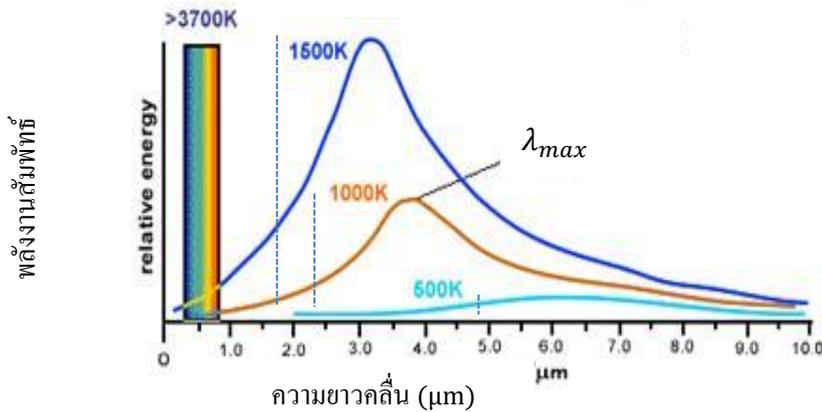
$\sigma$  คือ ค่าคงตัวของสเตฟาน-โบลต์ซมันน์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$

สำหรับวัตถุใด ๆ ก็ตามที่ไม่ใช่วัตถุดำ กฎของสเตฟาน เขียนได้เป็น

$$e_{\text{total}} = a\sigma T^4 \quad (6-4)$$

เมื่อ  $a$  คือ สัมประสิทธิ์ที่มีค่าน้อยกว่า 1

เมื่อศึกษาการแผ่รังสีของวัตถุดำ จะพบว่าความเข้มของรังสีที่แผ่ออกมาจากวัตถุดำเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ดังภาพที่ 6.2



ภาพที่ 6.2 แสดงสเปกตรัมการแผ่รังสีของวัตถุดำที่อุณหภูมิต่าง ๆ

ที่มา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล, ออนไลน์. เข้าถึงเมื่อ 5 มีนาคม 2563 จาก

<http://www.rmutphysics.com/charud/virtualexperiment/virtual3/blackbody>

ซึ่งจากภาพจะพบว่าเมื่ออุณหภูมิของวัตถุดำสูงขึ้นตำแหน่งที่มีความเข้มรังสีสูงสุดจะเปลี่ยนไปในทิศทางที่ความยาวคลื่นสั้นลง เมื่อ  $\lambda_{max}$  คือ ความยาวคลื่นของรังสีที่มีความเข้มมากที่สุด มีหน่วยเป็นเมตร เป็นที่ทราบกันดีว่า สามารถมองเห็นวัตถุได้เนื่องจากมีแสงมาตกกระทบวัตถุแล้วสะท้อนเข้าตาเรา วัตถุโดยทั่วไป ณ อุณหภูมิห้องจะแผ่รังสีออกมาในย่านอินฟราเรด หรือความยาวคลื่นสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร ซึ่งเป็นสเปกตรัมในย่านที่ตาเรามองไม่เห็น เมื่อวัตถุถูกทำให้ร้อนขึ้น วัตถุจะเริ่มทำการแผ่รังสีในย่านที่ตาเรามองเห็นออกมา เช่น เหล็กที่ถูกเผาไฟ จะเริ่มมีสีแดง ต่อมาเมื่ออุณหภูมิของเปลวไฟสูงขึ้นจะสังเกตเห็นว่าเหล็กเปลี่ยนเป็นสีเหลือง ความยาวคลื่นซึ่งได้จากอัตราการแผ่พลังงานสูงสุดของวัตถุจะแปรผันกับอุณหภูมิของวัตถุ เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\lambda_{max} = \frac{2.9 \times 10^{-3}}{T} \quad (6-5)$$

ซึ่งสามารถเรียกสมการ (6.5) นี้ว่า กฎการกระจัดของวิน (Wien's displacement Law) หลังจากที่เคอร์ชอฟฟ์ ได้เสนอสมการที่แสดงการแผ่รังสีของวัตถุดำในรูปของกำลังต่อพื้นที่ต่อความถี่ของวัตถุดำ ได้มีความพยายามในการแสดงสมการดังกล่าวในรูปของความสัมพัทธ์ที่ชัดเจนยิ่งขึ้น เนื่องจากว่าฟังก์ชัน  $J(f, T)$  นี้ยังไม่สามารถเขียนให้อยู่ในรูปที่ชัดเจนได้ แต่เพื่อความสะดวกจะพิจารณาการแผ่รังสีในเทอมของความหนาแน่นพลังงาน หรือพลังงานต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรต่อหนึ่งหน่วยความถี่ แทน โดยปริมาณทั้งสองมีความสัมพันธ์กันแสดงได้ดังนี้

$$J(f, T) = u(f, T) \frac{c}{4} \quad (6-6)$$

เมื่อ  $c$  คือ อัตราเร็วแสง ต่อมาในปี ค.ศ. 1893 วินส์ ได้เสนอความสัมพันธ์ของตัวแปรในสมการ (6-6) ออกมาอย่างชัดเจนจากผลการศึกษาดังนี้

$$u(f, T) = Af^3 e^{-\beta f/T} \quad (6-7)$$

เมื่อ  $A$  และ  $\beta$  เป็นค่าคงตัว

สมการที่ (6-7) นี้เรียกว่า กฎเลขชี้กำลังของวินส์ (Wein's exponential law) โดยถือว่าเป็นสมการที่กล่าวถึงการแผ่รังสีของวัตถุดำที่ชัดเจนขึ้นมากเนื่องจากเป็นสมการที่ได้จากทฤษฎีจึงได้นักฟิสิกส์หลายท่านทำการตรวจสอบกับผลการทดลอง พบว่าผลการทดลองและทฤษฎีเข้ากันได้ดีมากที่ความยาวคลื่นสั้นๆ กล่าวคือ ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1 ถึง 4 ไมโครเมตร และอุณหภูมิในช่วง 400 ถึง 1600 เคลวิน

อย่างไรก็ตามเมื่อได้มีการทดลองการแผ่รังสีของวัตถุดำที่ความยาวคลื่นสูงขึ้นไปจนถึง 60 ไมโครเมตร พบว่ากฎของวิน ให้ผลที่ต่างจากการทดลองอย่างมากโดยเฉพาะในส่วนที่มีความยาวคลื่นมาก ๆ เป็นที่น่าสังเกตว่าความแตกต่างที่สังเกตได้เกิดขึ้น ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดให้ความยาวคลื่นที่สนใจคงที่ ณ ความยาวคลื่น 54.2 ไมโครเมตร และทำการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิจาก  $-200^{\circ}\text{C}$  ถึง  $1500^{\circ}\text{C}$  ซึ่งนักฟิสิกส์ที่ได้ทำการทดลองศึกษาความแตกต่างนี้คือ รูเบน โดยได้ข้อสรุปว่าในช่วงความยาวคลื่นมาก ๆ ความหนาแน่นพลังงานจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิ ซึ่งเป็นผลสรุปที่แตกต่างจากกฎของวิน ข้อสรุปของรูเบนที่ได้จากการทดลอง มีผลของทฤษฎีจากการศึกษาของ เรย์ลีและจิ้น มาสนับสนุน โดยอาศัยทฤษฎีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและอุณหพลศาสตร์ ซึ่งทฤษฎีที่น่าเสนอโดยนักฟิสิกส์ทั้งสองนี้เรียกว่า ทฤษฎียุคดั้งเดิมของการแผ่รังสีของวัตถุดำ สามารถสรุปเป็นสมการความหนาแน่นพลังงานได้ดังนี้

$$u(f, T) = \frac{8\pi f^2}{c^3} k_B T \quad (6-8)$$

หรือในรูปของความยาวคลื่น

$$u(\lambda, T) = \frac{8\pi}{\lambda^4} k_B T \quad (6-9)$$

เมื่อ  $k_B$  คือ ค่าคงตัวของโบลซ์มานส์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$  แต่อย่างไรก็ตามทฤษฎีนี้สามารถอธิบายการแผ่รังสีของวัตถุดำได้เฉพาะในช่วงที่ความยาวคลื่นมาก ๆ เท่านั้น

ในปี ค.ศ. 1900 มัคซ์ พลังค์ (Max Planck) ได้อธิบายปรากฏการณ์เกี่ยวกับการแผ่รังสีของวัตถุต่าง ๆ ได้เสนอสมการที่มีพื้นฐานมาจากสิ่งที่ วินและเรย์ลี กับจิ้น ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับแนวคิดใหม่ทางฟิสิกส์ ซึ่งเป็นรากฐานของฟิสิกส์ควอนตัมในปัจจุบัน ข้อสรุปของพลังค์สามารถแสดงออกมาได้ในรูปของสมการเช่นกัน ดังนี้

$$u(f, T) = \frac{8\pi hf^3}{c^3} \left( \frac{1}{e^{\frac{hf}{k_B T}} - 1} \right) \quad (6-10)$$

เมื่อ  $h$  คือ ค่าคงตัวของพลังค์ มีค่าเท่ากับ  $6.626 \times 10^{-34}$  J.s

สังเกตว่าที่ความถี่สูง ๆ จะได้  $\frac{hf}{k_B T} \gg 1$  แล้ว

$$\left( \frac{1}{e^{\frac{hf}{k_B T}} - 1} \right) \approx e^{-\frac{hf}{k_B T}}$$

ดังนั้น เขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} u(f, T) &= \frac{8\pi hf^3}{c^3} \left( \frac{1}{e^{\frac{hf}{k_B T}} - 1} \right) \\ &\approx \frac{8\pi hf^3}{c^3} e^{-\frac{hf}{k_B T}} \end{aligned} \quad (6-11)$$

ซึ่งเป็นสมการแสดงกฎของวิน

ตามแนวคิดของพลังค์การแผ่รังสีของวัตถุดำเกิดจากการสั้นของโมเลกุลขนาดเล็กมาก ๆ ที่เรียกว่า ตัวสะท้อน ซึ่งอยู่ที่ผนังภายในโพรงของวัตถุดำโดยมีจำนวนมากมาย ด้วยความถี่ค่าหนึ่ง ( $f$ ) ทำให้พลังงานมีค่าใด ๆ ก็ได้เช่นกัน และจะมีแอมพลิจูดของการสั้นลดลงเมื่อมันปลดปล่อยพลังงานบางส่วนออกมา ซึ่งค่าพลังงานเป็นไปตามเงื่อนไข คือ

$$E = nhf \quad (6-12)$$

เมื่อ  $E$  คือ พลังงานของอะตอมตัวที่รับหรือคายพลังงาน มีหน่วยเป็น จูล (J)

$h$  คือ ค่าคงตัวของพลังค์ มีค่าเท่ากับ  $6.63 \times 10^{-34}$  J.s

$n$  คือ เลขจำนวนเต็ม 1, 2, 3... เรียกว่าเลขควอนตัม (quantum number)

$\nu$  คือ ความถี่ของแสง มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hz)

โดยพลังงานของอะตอมที่สั้นจะดูดกลืนหรือแผ่รังสี (คายพลังงาน) ออกมามีเฉพาะบางค่าเท่านั้น มีลักษณะไม่ต่อเนื่องเป็นก้อนของพลังงาน เรียกว่า ควอนตัมของพลังงาน (quantum of energy)

**ตัวอย่างที่ 6.1** จงหาความยาวคลื่นสูงสุดของการแผ่รังสีของวัตถุดำที่แผ่ออกมาจากร่างกายมนุษย์ที่อุณหภูมิผิวหนัง  $35^{\circ}\text{C}$

**วิธีทำ** การแผ่รังสีความร้อนจากผิวของวัตถุใดๆ ค่าความยาวคลื่นสูงสุดจะสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่ผิววัตถุจากการใช้กฎการกระจายของวิน

$$\begin{aligned}\text{จาก } \lambda_{\max} &= \frac{2.9 \times 10^{-3}}{T} \text{ m.K} \\ \lambda_{\max} &= \frac{2.9 \times 10^{-3}}{308} \text{ m.K} \\ &= 9.41 \mu\text{m}\end{aligned}$$

**คำตอบ** ความยาวคลื่นสูงสุดเท่ากับ 9.41 ไมโครเมตร

**ตัวอย่างที่ 6.2** วัตถุชิ้นหนึ่งมีมวล 2 kg ต่ออยู่กับสปริงเบาที่มีค่าคงที่ 25 N/m สปริงถูกยืดให้ห่างออกจากจุดสมดุลของมันเป็นระยะ 0.4 m และถูกปล่อยจากจุดหยุดนิ่ง

ก) จงหาพลังงานสุทธิของระบบนี้และความถี่ของการสั่นตามการคำนวณแบบแผนเดิม

$$\begin{aligned}\text{วิธีทำ จากพลังงานของระบบ } E &= \frac{1}{2}kA^2 \\ &= \frac{1}{2}(25\text{N/M})(0.4\text{m})^2\end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้นได้ค่าพลังงาน } E = 2 \text{ J}$$

$$\begin{aligned}\text{หาค่าความถี่ของการสั่น } f &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \\ &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{25\text{N/m}}{2\text{kg}}} \\ &= 0.563 \text{ Hz}\end{aligned}$$

**คำตอบ** พลังงานสุทธิของระบบเท่ากับ 2 จูล และความถี่เท่ากับ 0.563 เฮิรตซ์

ข) หากพลังงานของวัตถุที่สั่นนี้เป็นแบบควอนไทซ์ จงหาเลขควอนตัม  $n$  ของระบบ

$$\text{จาก } E = nhv$$

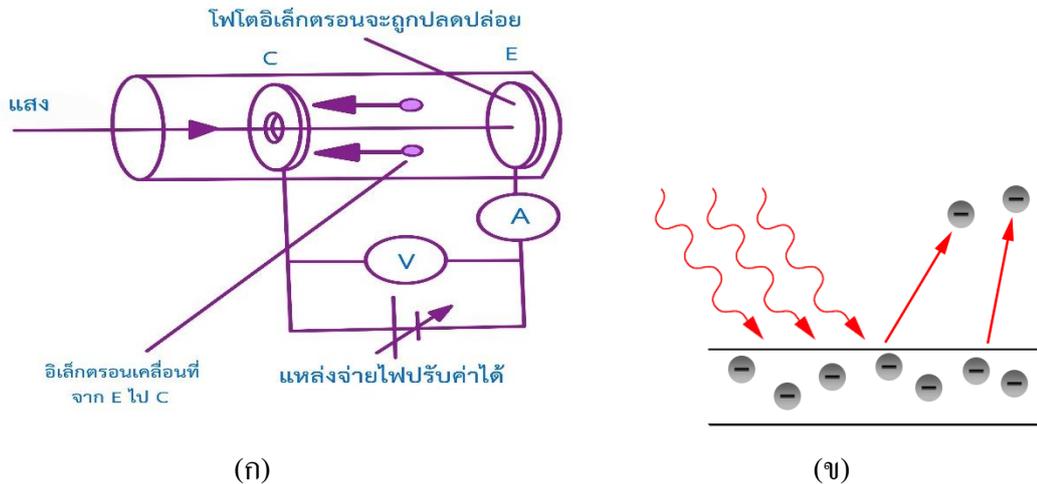
$$n = \frac{E}{hf}$$

$$\begin{aligned}n &= \frac{2 \text{ J}}{(6.626 \times 10^{-34} \text{ J.s})(0.563 \text{ Hz})} \\ &= 5.36 \times 10^{33}\end{aligned}$$

**คำตอบ** เลขควอนตัมเท่ากับ  $5.36 \times 10^{33}$

## 6.4 ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effect)

ในปี ค.ศ.1887 เฮิร์ตซ์ (Hertz) ได้ทำการทดลองฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตไปตกกระทบบนผิวโลหะ พบว่ามีอิเล็กตรอนอิสระหลุดออกจากที่โลหะนั้น อิเล็กตรอนที่หลุดจากแผ่นโลหะเรียกว่าโฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectrons) และปรากฏการณ์ที่แสงทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากผิวโลหะนี้ เรียกว่า ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก



ภาพที่ 6.3 (ก) แผนภาพชุดทดลองการศึกษาปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตรอน  
(ข) แสดงภาพการเกิดโฟโตอิเล็กตรอน

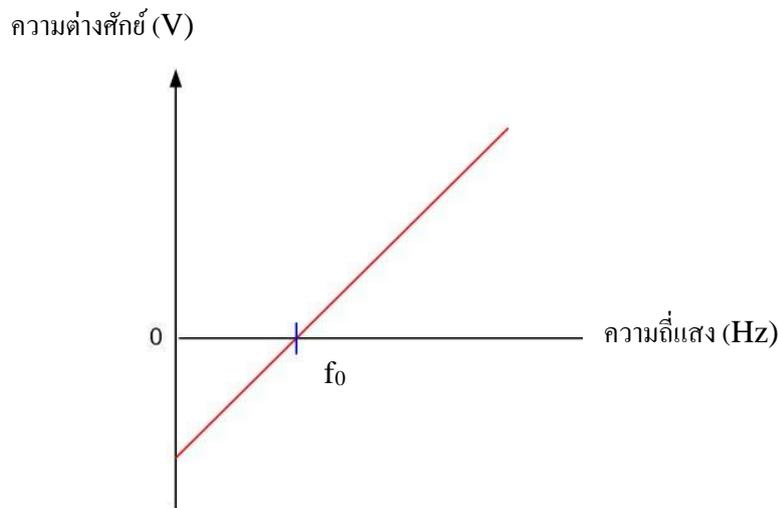
ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกแสดงได้โดยใช้อุปกรณ์ดังภาพที่ 6.3 แผ่นโลหะ C และ E อยู่ในหลอดสุญญากาศ โดย C ต่อเข้ากับขั้วไฟฟ้าลบ และ E ต่อเข้ากับขั้วไฟฟ้าบวก โดยเมื่อฉายแสง ด้วยความถี่ ซึ่งเป็นความถี่ที่สูงพอเหมาะ ลงบนแผ่นโลหะ C ทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากแผ่นโลหะ C ซึ่งจะพบว่าเข็มของแอมมิเตอร์เบนไป แสดงว่ามีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น โดยขณะที่ความต่างศักย์ต่ำ ๆ กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีค่าน้อย ทำให้อิเล็กตรอนบางตัวมีพลังงานไม่มากพอที่จะเคลื่อนที่ถึงแผ่น E เมื่อเพิ่มความต่างศักย์กระแสไฟฟ้ามีค่ามากขึ้นจนกระทั่งกระแสที่ทำให้อิเล็กตรอนทุกตัวมีพลังงานมากพอจึงสามารถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วถึงแผ่น E และถ้าใช้ความเข้มแสงต่างกัน จะพบว่าแสงที่มีความเข้มมากจะให้กระแสไฟฟ้าสูงสุดมีค่ามากกว่า ต่อจากนั้นกลับขั้วไฟฟ้าและเพิ่มความต่างศักย์จนกระทั่งกระแสไฟฟ้าเป็นศูนย์ ทำให้อิเล็กตรอนที่มีความเร็วมากที่สุดหรือพลังงานจลน์สูงสุดหยุดนิ่ง เรียกความต่างศักย์นี้ว่า ความต่างศักย์หยุดยั้ง (Stopping Potential) แทนด้วย  $V_s$  ดังนั้นจะได้พลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอน คือ

$$E_{kmax} = eV_s = \frac{1}{2}mv_{max}^2 \quad (6-13)$$

โดยที่  $E_{kmax}$  คือ พลังงานจลน์สูงสุดของอิเล็กตรอน มีหน่วยเป็นจูล (J)

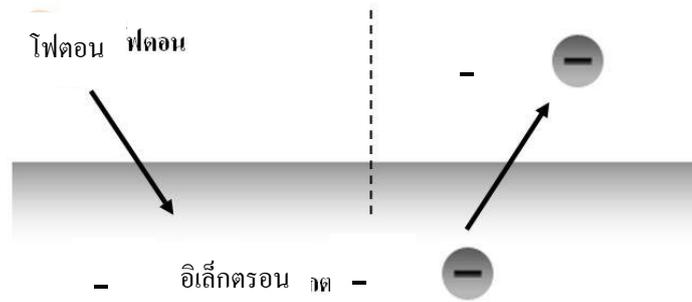
- $e$  คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ  $1.6 \times 10^{-19}$  คูลอมบ์ (C)  
 $V_s$  คือ ความต่างศักย์หยุดยั้ง มีหน่วยเป็นโวลต์ (V)  
 $m$  คือ มวลของอิเล็กตรอนมีค่า  $9.1 \times 10^{-31}$  kg  
 $V_{\max}$  คือ ความเร็วสูงสุดของอิเล็กตรอน (m/s)

จากการทดลองเมื่อฉายแสงความถี่ต่าง ๆ กันลงบนแผ่นโลหะ C พบว่า ถ้าให้ความถี่แสงมากกว่าความถี่ค่าหนึ่ง อิเล็กตรอนก็จะหลุดจากผิวโลหะได้ ความถี่นี้เรียกว่าความถี่ขีดเริ่ม (V) และเมื่อให้ความถี่มากกว่าความถี่ขีดเริ่มแล้ว พบว่าวัดค่าศักย์หยุดยั้งในแต่ละกรณีของแสงที่ใช้ฉาย เมื่อนำมาหาความสัมพันธ์แสดงได้ด้วยกราฟ ดังภาพที่ 6.4



ภาพที่ 6.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่แสงและความต่างศักย์หยุดยั้ง

ไอน์สไตน์ (Einstein) ได้อธิบายเกี่ยวกับปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก โดยเสนอทฤษฎีเกี่ยวกับโฟโตอิเล็กตรอนว่า เมื่อแสงซึ่งมีลักษณะเป็นอนุภาคที่ประกอบด้วยก้อนพลังงานเล็ก ๆ เรียกว่า โฟตอน (Photon) โดยโฟตอนแต่ละก้อนจะมีพลังงานเท่ากับ เมื่อโฟตอนตกกระทบโลหะ พลังงานของโฟตอนจะถ่ายให้กับอิเล็กตรอนในโลหะตัวต่อตัว และในการที่อิเล็กตรอนจะหลุดจากอะตอมของผิวโลหะ อิเล็กตรอนจะต้องได้รับพลังงานจากโฟตอนอย่างน้อยเท่ากับค่าฟังก์ชันงาน (Work Function) ซึ่งเป็นพลังงานยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนไว้กับอะตอมนั้น ถ้าพลังงานที่ได้รับมากกว่าค่าฟังก์ชันงาน พลังงานส่วนที่เหลือจะปรากฏเป็นพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน ถ้าแสงมีความถี่ ( $f$ ) ตกกระทบแผ่นโลหะที่มีค่าฟังก์ชันของงาน  $W$  พลังงานที่เหลือคือพลังงานจลน์สูงสุด  $E_{K_{\max}}$  ของอิเล็กตรอนหลุดออกมา ดังภาพที่ 6.5



ภาพที่ 6.5 แสดงโฟตอน ค่าฟังก์ชันงานและพลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอน

ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ตามทฤษฎีเกี่ยวกับโฟโตอิเล็กตรอนเป็นสมการได้ว่า

$$E_{Kmax} = hf - \phi \quad (6-14)$$

เมื่อ  $E_{Kmax}$  คือ พลังงานจลน์สูงสุดของอิเล็กตรอนหน่วยเป็นอิเล็กตรอนโวลต์ (eV)

ซึ่งพลังงาน 1 eV มีค่าเท่ากับ  $1.6 \times 10^{-19}$  จูล (J)

$hf$  คือ พลังงานทั้งหมดของโฟตอน

โดยโฟตอน 1 ตัว มีหน่วยเป็นอิเล็กตรอนโวลต์ (eV)

โดยที่  $f$  คือ ความถี่ของแสงซึ่ง  $f = \frac{c}{\lambda}$  เมื่อ  $c$  คือความเร็วแสงมีค่า  $3 \times 10^8$  m/s

และ  $\lambda$  คือความยาวคลื่นของแสง ในหน่วยเมตร

$\phi$  คือ ฟังก์ชันงานของโลหะ มีหน่วยเป็น อิเล็กตรอนโวลต์ (eV)

เรียกสมการที่ (6.14) ว่า สมการโฟโตอิเล็กตรอนของไอน์สไตน์ โดยสมการนี้จะพบว่าพลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอนขึ้นอยู่กับความถี่ของแสง ทั้งนี้เพราะค่าฟังก์ชันงานของโลหะเป็นค่าคงที่สำหรับโลหะแต่ละชนิด การทดลองอีกประเภทหนึ่งที่ฟิสิกส์ยุคดั้งเดิมไม่สามารถอธิบายได้คือระบบที่มีขนาดเล็กมากๆ ซึ่งคำว่าเล็กในที่นี้คือเมื่อพิจารณาวัตถุที่มีขนาดในระดับอะตอม เพื่อเป็นการเปรียบเทียบถึงความเล็กของวัตถุที่ว่า มนุษย์มีความสูงอยู่ที่ระดับ 1-2 m เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นผมมีขนาดประมาณ 50 – 100  $\mu\text{m}$  เซลล์สิ่งมีชีวิตมีขนาดประมาณ 10  $\mu\text{m}$  ในขณะที่อะตอมมีขนาดอยู่ที่ระดับ  $10^{-10}$  m หรือเรียกว่า อังสตรอม ยิ่งไปกว่านั้นนิวเคลียสที่อยู่ภายในอะตอมมีขนาดเพียง  $10^{-15}$  m โดยมีชื่อเรียกว่า เฟอร์มิ ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีขนาดเล็กมากจึงเป็นที่แน่นอนว่าเรามักไม่พบหรือต้องมีความเกี่ยวข้องกับสิ่งที่มีขนาดเล็กเท่านี้ในชีวิตประจำวัน นักฟิสิกส์ต้องพบกับข้อจำกัดของฟิสิกส์ยุคดั้งเดิมก็เมื่อเขาเหล่านั้นต้องการจะอธิบายโครงสร้างภายในของอะตอม ซึ่งถือได้ว่าเป็นหน่วยที่เล็กที่สุดที่ประกอบกันขึ้นมาเป็นทุกสรรพสิ่ง ในจักรวาลนี้ การอธิบายโครงสร้างของอะตอมรวมไปถึงปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับอะตอมโดยอาศัยฟิสิกส์ยุคดั้งเดิม

นั้น หลายครั้งพบว่าผลที่ได้มีความผิดพลาดและในหลายๆ ครั้งที่ นักฟิสิกส์ไม่สามารถอธิบายอะไรได้เลยแม้แต่เล็กน้อย ด้วยเหตุนี้เองนักฟิสิกส์จึงรู้ถึงความจำเป็นที่จะต้องมียุคใหม่ที่ลึกซึ้งยิ่งขึ้นไปกว่าทฤษฎีที่มีมาทั้งหมดในฟิสิกส์ยุคดั้งเดิม ทฤษฎีใหม่นี้คือ ทฤษฎีควอนตัม

**ตัวอย่างที่ 6.3** ในการทดลองปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก ใช้แสงความยาวคลื่น  $4 \times 10^{-7}$  เมตร ส่งกระทบโลหะ ซึ่งต้องใช้ความต่างศักย์หยุดยั้ง 2 โวลต์ แต่เมื่อเปลี่ยนความยาวคลื่นแสงเป็น  $6 \times 10^{-7}$  เมตร ต้องใช้ความต่างศักย์หยุดยั้ง 1 โวลต์ จงหา

(ก) ค่าคงที่ของพลังค์

(ข) ค่าฟังก์ชันงาน

**วิธีทำ** (ก) จากสมการที่ (6-14)  $E_{kmax} = hf - \phi$  และ  $E_{kmax} = eV_s$ ,  $\lambda = c/f$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น} \quad eV_s &= \frac{hc}{\lambda} - W \\ \text{แทนค่าได้} \quad e(2V) &= \frac{hc}{4.0 \times 10^{-7} \text{m}} - W \end{aligned} \quad (1)$$

$$e(1V) = \frac{hc}{6.0 \times 10^{-7} \text{m}} - W \quad (2)$$

แก้สมการ (1) และ (2)

**คำตอบ** ได้ค่าคงตัวของพลังค์  $h = 6.4 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$

(ข) แทนค่า  $h$  ที่ได้จากข้อ (ก) ลงในสมการที่ (1) หรือ (2) จะได้  $W = 3 \text{ eV}$

**คำตอบ** ค่าคงตัวของพลังค์เท่ากับ  $6.4 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$  และฟังก์ชันงาน 3 อิเล็กตรอน โวลต์

**ตัวอย่างที่ 6.4** จงหาความต่างศักย์ที่สามารถหยุดอิเล็กตรอนตัวที่เร็วที่สุด ซึ่งถูกปลดปล่อยออกมาจากผิวของนิกเกิลภายใต้กิริยาของแสงเหนือม่วง ซึ่งมีความยาวคลื่น 200 nm ฟังก์ชันงานของนิกเกิลคือ 5.01 eV

**วิธีทำ** พลังงานของโฟตอนที่มีความยาวคลื่น 200 nm

$$\begin{aligned} E &= hf = h \frac{c}{\lambda} \\ &= \frac{(6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})(3.0 \times 10^8 \text{ m/s})}{(200 \times 10^{-9} \text{ m})(1.6 \times 10^{-19} \text{ J/eV})} \\ &= 6.22 \text{ eV} \end{aligned}$$

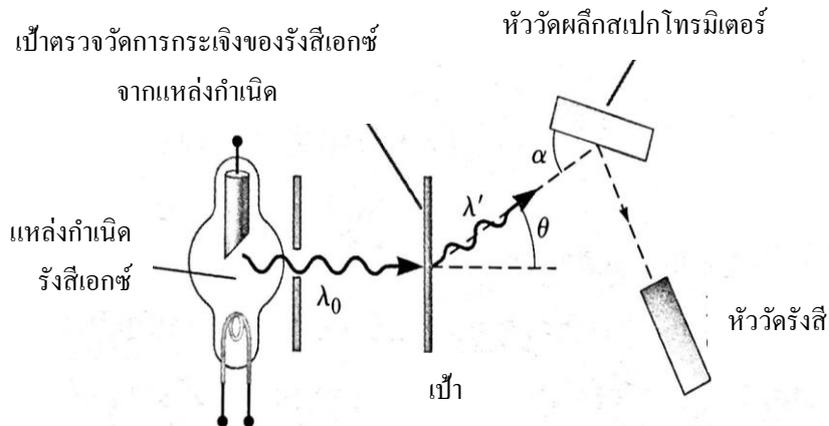
พลังงานของอิเล็กตรอนที่หลุดออกมา คือ

$$\begin{aligned} E_{kmax} &= hf - \phi \\ &= 6.22 \text{ eV} - 5.01 \text{ eV} \\ &= 1.21 \text{ eV} \end{aligned}$$

**คำตอบ** ดังนั้นต้องใช้ความต่างศักย์ 1.21 eV

## 6.5 ปรากฏการณ์คอมป์ตัน (The Compton Effect)

ในปี ค.ศ. 1923 อาร์เทอร์ ฮอลล์ คอมป์ตัน และปีเตอร์ เดอบาย ต่างนำเสนอต่อยอดแนวคิดโมเมนตัมของโฟตอนของไอน์สไตน์ คอมป์ตัน และเพื่อนร่วมงานได้รวบรวมหลักฐานที่แสดงให้เห็นว่าทฤษฎีคลื่นของแสงในยุคดั้งเดิมล้มเหลวในการอธิบายการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์จากอิเล็กตรอน ตามทฤษฎีดั้งเดิม เนื่องจากอิเล็กตรอนที่ต่างกันแต่ละตัวเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วที่แตกต่างกันหลังจากเกิดอันตรกิริยาซึ่งขึ้นอยู่กับผลรวมของพลังงานที่ถูกดูดกลืนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ความถี่ของคลื่นที่กระเจิงออกมาที่มุมหนึ่งเมื่อวัดเทียบกับการแผ่รังสีของคลื่นตกกระทบควรแสดงให้เห็นการกระจายของค่าการเลื่อนดอปเปลอร์ แต่ผลการทดลองของคอมป์ตันกลับตรงข้ามกับการทำนายโดยทฤษฎีนี้ การทดลองของคอมป์ตันแสดงให้เห็นว่า ที่มุมหนึ่งมีความถี่เดียวเท่านั้นของรังสีจากการกระเจิงที่สามารถสังเกตได้ คอมป์ตันและเพื่อนร่วมงานอธิบายการทดลองนี้โดยคิดว่าโฟตอนไม่ได้เป็นคลื่น แต่มันประพฤติตัวเป็นจอนุภาคที่มีพลังงานคือ  $hf$  และมีโมเมนตัม  $hf/c$  และสมมติฐานว่าพลังงานและโมเมนตัมของระบบโดดเดี่ยวของการชนกันของคู่โฟตอน-อิเล็กตรอนนั้นมีสมบัติของการอนุรักษ์คอมป์ตัน ในปัจจุบันปรากฏการณ์การกระเจิงนี้รู้จักกันในนาม ปรากฏการณ์คอมป์ตัน (Compton effect)



ภาพที่ 6.6 แผนภาพเครื่องมือที่คอมป์ตันใช้ รังสีเอ็กซ์กระเจิงออกมาจากเป้าคาร์บอน  
ที่มา: Serway, R.A, Mose, C.J., & Moyer, C.A., 2005

จากภาพรังสีเอ็กซ์กระเจิงออกจากเป้าคาร์บอน ถูกทำให้เลี้ยวเบนโดยการหมุนผลึกสเปกโตรมิเตอร์ และจากนั้นจึงวัดความเข้มของรังสีเอ็กซ์ด้วยหัววัดรังสี (ionization chamber) ซึ่งสร้างกระแสไฟฟ้าที่แปรผันกับความเข้มแสง รังสีตกกระทบประกอบด้วยรังสีเอ็กซ์ที่มีความยาวคลื่นเดียว ความเข้มแสงของรังสีเอ็กซ์ที่กระเจิงออกมากับความยาวคลื่นสำหรับการกระเจิงคอมป์ตันที่มุม  $\theta$  ซึ่งเราสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้คือ

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda_0 = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos\theta) \quad (6-15)$$

เมื่อ  $m_e$  คือ มวลของอิเล็กตรอน

$\lambda'$  คือ ความยาวคลื่นรังสีเอ็กซ์หลังการกระเจิงจากแท่งแกรไฟต์แล้ว

$\lambda_0$  คือ ความยาวคลื่นรังสีเอ็กซ์ก่อนการกระเจิงจากแท่งแกรไฟต์

$\Delta\lambda$  คือ การเลื่อนของความยาวช่วงคลื่น

$\theta$  คือ มุมที่ความยาวคลื่นรังสีเอ็กซ์กระเจิงจากแท่งแกรไฟต์

สมการนี้เรียกว่า สมการเลื่อนของคอมป์ตัน และเราสามารถหา ความยาวคลื่นคอมป์ตัน (Compton wavelength) ของอิเล็กตรอน ได้คือ

$$\lambda_c = \frac{h}{m_e c} = 0.00243 \text{ nm}$$

เมื่ออนุภาคโฟตอนของรังสีเอ็กซ์มีพลังงาน  $E = hf_0$  ซึ่งสัมพันธ์กับความยาวคลื่น  $\lambda_0$  เมื่ออนุภาคโฟตอนชนกับอิเล็กตรอนภายในเป้าหมายรังสีซึ่งอยู่นิ่ง โดยทั่วไปจะเกิดการเปลี่ยนแปลงแนวทางของโฟตอน หรือกล่าวได้ว่า รังสีเกิดการกระเจิงและทำให้อิเล็กตรอนเกิดการเคลื่อนที่

สมการที่แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์เมื่อมีการกระเจิงที่มุม  $\theta$  ต่าง ๆ ค่า  $m_e$  ที่ปรากฏในสมการนี้คือ มวลนิ่งของอิเล็กตรอนในกรณีที่อยู่อิเล็กตรอนที่โคนโฟตอนพุ่งชนเป็นอิเล็กตรอนอิสระ หรือเป็นอิเล็กตรอนที่ถูกยึดด้วยแรงยึดเหนี่ยวภายในอะตอมขนาดต่ำ ๆ แต่ถ้าเป็นอิเล็กตรอนที่ถูกยึดเหนี่ยวด้วยแรงยึดเหนี่ยวค่าสูง ๆ ขนาด  $m$  นี้จะต้องแทนด้วยมวลทั้งหมดของอะตอม ดังนั้นจึงมีผลทำให้เกิดการเลื่อนคอมป์ตัน เช่น ในกรณีของอะตอมคาร์บอนมีมวลมากกว่าอิเล็กตรอนที่ถูกยึดเหนี่ยวอย่างแน่นหนา จึงมีน้อยกว่าการเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นโฟตอนที่พุ่งชนอิเล็กตรอนอิสระประมาณ 22,000 เท่า ซึ่งในทางปฏิบัติไม่สามารถตรวจสอบได้ จึงทำให้เมื่อสังเกตผลจากการทดลองปรากฏการณ์คอมป์ตัน จะพบว่ารังสีเอ็กซ์ที่มีความยาวคลื่นเดิมออกมาด้วย ( $\lambda_0$ )

**ตัวอย่างที่ 6.5** รังสีเอ็กซ์ความยาวคลื่น  $\lambda_0 = 0.2 \text{ nm}$  กระเจิงออกจากก้อนวัสดุ รังสีเอ็กซ์ที่กระเจิงออกมาสามารถสังเกตได้ที่มุม  $45^\circ$  เทียบกับลำแสงตกกระทบ จงคำนวณหาความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ที่กระเจิง

**วิธีทำ** จากสมการ  $\lambda' - \lambda_0 = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos\theta)$

$$\lambda' = \lambda_0 + \frac{h}{m_e c} (1 - \cos\theta)$$

$$\begin{aligned}
&= 0.2 \times 10^{-9} \text{ m} + \frac{(6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})(1 - \cos 45^\circ)}{(9.11 \times 10^{-31} \text{ kg})(3 \times 10^8 \text{ m/s})} \\
&= 0.2 \times 10^{-9} \text{ m} + 7.1 \times 10^{-13} \text{ m} = 0.20071 \text{ nm}
\end{aligned}$$

**คำตอบ** ความยาวคลื่นเท่ากับ 0.20071 นาโนเมตร

**ตัวอย่างที่ 6.6** กำหนดให้โฟตอนของรังสีเอ็กซ์มีความยาวคลื่น 0.03 nm เกิดการกระเจิงจากอิเล็กตรอนอิสระ ถ้าการเลื่อนคอมป์ตันของรังสีเอ็กซ์มีค่าเท่ากับความยาวคลื่นคอมป์ตันพอดี อิเล็กตรอนนี้จะมีพลังงานจลน์หลังการชนเท่าใด

**วิธีทำ** จากสมการ (6-15) จะได้

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda_0 = \frac{h}{mc}$$

ดังนั้น  
แทนค่าได้

$$\lambda' = \frac{h}{mc} + \lambda_0$$

$$\begin{aligned}
\lambda' &= \frac{6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}}{(9.1 \times 10^{-31} \text{ kg})(3 \times 10^8 \text{ m/s})} + 0.03 \text{ nm} \\
&= 0.032 \text{ nm}
\end{aligned}$$

จากพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนหลังการชน  $E_k = \frac{hc}{\lambda_0} - \frac{hc}{\lambda'}$

ดังนั้น

$$\begin{aligned}
E_k &= 1240 \text{ eV}\cdot\text{nm} \left( \frac{1}{0.03 \text{ nm}} - \frac{1}{0.032 \text{ nm}} \right) \\
&= 2583 \text{ eV}
\end{aligned}$$

**คำตอบ** พลังงานจลน์หลังชนมีค่าเท่ากับ 2583 อิเล็กตรอนโวลต์

## 6.6 สมบัติความเป็นคลื่นของอนุภาค (The wave properties of particles)

ที่ผ่านมาการศึกษาปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก ปรากฏการณ์คอมป์ตัน ที่แสดงให้เห็นว่าคลื่นแสงมีพฤติกรรมเช่นเดียวกับอนุภาค โดยอนุภาคของคลื่นแสงดังกล่าวเรียกว่า โฟตอน จากทั้งสองปรากฏการณ์ อาจทำให้เกิดข้อสงสัยว่าความจริงแล้ว แสงเป็นคลื่นหรืออนุภาค คำตอบคือ แสงสามารถพิจารณาว่าเป็นได้ทั้งคลื่นและอนุภาค ขึ้นอยู่กับปรากฏการณ์ที่กำลังพิจารณานั้นเหมาะสมที่จะใช้สมบัติแบบใดของแสงในการอธิบาย

ในปี ค.ศ. 1924 เดอบรอยล์ (*Louis Victor De Broglie*) เป็นนักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศสได้เสนอสมมติฐานที่แสดงถึงสมการความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและโมเมนตัมของโฟตอนของแสง โดยอาศัยทฤษฎีสัมพัทธภาพของไอน์สไตน์ร่วมกับทฤษฎีของพลังค์ว่าด้วยความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นและอนุภาค แล้วนำมาใช้กับโฟตอน กรณีที่อนุภาคมวล  $m$  เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $v$  ย่อมมีโมเมนตัม คือ

$$p = mv$$

จาก  $E = mc^2$  จะได้

$$m = \frac{E}{c^2}$$

จะได้

$$p = \frac{Ev}{c^2}$$

ถ้าอนุภาคนี้คือ โฟตอน จะมีความเร็วเท่ากับความเร็วแสง แต่พลังงานของโฟตอนที่มีความถี่มีค่า  $hf$  และความเร็วแสง  $c = f\lambda$  เมื่อแทนค่า  $E$  และ  $c$  ในสมการ จะได้ โมเมนตัมของโฟตอน

$$p = \frac{hf}{f\lambda}$$

$$p = \frac{h}{\lambda} \quad (6-16)$$

หรือ ความยาวคลื่นของโฟตอน

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \quad (6-17)$$

ความยาวคลื่นของอนุภาคตามสมการที่ (6.17) เรียกว่า ความยาวคลื่นเดอบรอยล์ของอนุภาค (*De Broglie's wavelength of particle*) หลังจากที่ได้เดอบรอยล์เสนอความคิดของเขาแล้ว ได้มีนักวิทยาศาสตร์หลายท่านได้พยายามทดสอบความเป็นไปได้ของสมมติฐานดังกล่าว โดยคิดว่าถ้าอนุภาคมีสมบัติของคลื่นอนุภาคก็น่าจะแสดงสมบัติการแทรกสอดและเลี้ยวเบนได้เช่นเดียวกับคลื่นทั่วไป อนุภาคที่ใช้ในการศึกษาครั้งแรกก็คือ อิเล็กตรอน

นอกจากจะทราบว่าอนุภาคที่แสดงสมบัติเป็นคลื่นมีความยาวคลื่นเท่ากับความยาวคลื่นเดอบรอยล์แล้ว ยังสามารถหาค่าความถี่ของอนุภาคได้ถ้าเราทราบพลังงานของมัน ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และพลังงานของอนุภาค แสดงได้ดังสมการ

$$f = \frac{E}{h} \quad (6-18)$$

**ตัวอย่างที่ 6.7** วัตถุมวล 50 กรัม ถูกขว้างด้วยอัตราเร็ว 40 เมตรต่อวินาที ความยาวคลื่นเดอบรอยมีขนาดเท่าใด

วิธีทำ จาก 
$$\lambda = \frac{h}{mu} = \frac{6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}}{(50 \times 10^{-3} \text{ kg})(40 \text{ m/s})}$$

$$= 3.3 \times 10^{-34} \text{ m}$$

**คำตอบ** ความยาวคลื่นเดอบรอย  $3.3 \times 10^{-34}$  เมตร

**ตัวอย่างที่ 6.8** อิเล็กตรอนในหลอดที่มีอัตราเร็ว  $5 \times 10^7 \text{ m/s}$  จงหาความยาวคลื่นเดอบรอยที่สัมพันธ์กับอิเล็กตรอน

วิธีทำ จาก 
$$\lambda = \frac{h}{p}$$

$$\lambda = \frac{6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}}{(9.11 \times 10^{-31} \text{ kg})(5 \times 10^7 \text{ m/s})}$$

$$= 1.46 \times 10^{-11} \text{ m}$$

$$= 0.0146 \text{ nm}$$

**คำตอบ** ความยาวคลื่นเท่ากับ 0.0146 นาโนเมตร

## 6.7 ฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอน (Electron wave function)

หัวข้อนี้นำเสนอเพื่อหารูปแบบการบรยายคลื่นหรือฟังก์ชันคลื่นสำหรับอนุภาคที่กำลังเคลื่อนที่สาเหตุที่สนใจฟังก์ชันคลื่นสำหรับอนุภาคที่กำลังเคลื่อนที่ก็เพราะว่าความยาวคลื่นเดอบรอยสำหรับอนุภาคจะเกิดขึ้นเมื่ออนุภาคมีโมเมนตัมเท่านั้น จากที่ฟังก์ชันทั่วไปของคลื่นส่วนใหญ่ไม่ว่าจะเป็นฟังก์ชันคลื่นของเส้นเชือก คลื่นเสียง คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับตำแหน่ง  $x$  และเวลา  $t$  จะเป็นดังสมการนี้

$$\psi(x, t) = A \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \quad (6-19)$$

สมการที่ (6-19) แสดงฟังก์ชันของคลื่น โดยในที่นี้พิจารณาที่เวลา  $t = 0$  เมื่อ  $A$  คือ แอมพลิจูด และ  $\lambda$  คือความยาวคลื่น ถ้าคลื่นที่กำลังพิจารณาเป็นคลื่นในเส้นเชือก  $\psi$  จะแทนการกระจัดของเส้นเชือก ณ ตำแหน่งวัดจากจุดสมดุล ถ้าเป็นคลื่นเสียง  $\psi$  จะแทนการกระจัดของโมเลกุลของอากาศและถ้าเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะแทนขนาดของสนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งหนึ่งฟังก์ชัน

คลื่นที่เวลา  $t = 0$  คือ  $\psi(x, t) = A \sin \left[ \frac{2\pi x}{\lambda} \right]$  เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น กล่าวคือที่  $t = t$  ใด ๆ ฟังก์ชันคลื่นเขียนได้

$$\psi(x, t) = A \sin \left[ \frac{2\pi}{\lambda} (x - vt) \right] \quad (6-20)$$

เนื่องจาก  $v$  คือความเร็วของคลื่น สามารถเขียนได้เป็นอัตราส่วนระหว่างความยาวคลื่นต่อช่วงเวลา 1 คาบ หรือ  $v = \lambda/T$  ทำให้เราสามารถเขียนสมการที่ (6-20) ได้ใหม่เป็น

$$\psi(x, t) = A \sin \left[ 2\pi \left( \frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right) \right] \quad (6-21)$$

โดยกำหนดให้  $k$  คือ เลขคลื่น มีค่าเท่ากับ  $\frac{2\pi}{\lambda}$  และ  $\omega$  คือ ความถี่เชิงมุม ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $\frac{2\pi}{T}$  หรือ  $2\pi f$  ดังนั้นสมการ (6-21) เขียนได้ใหม่เป็น

$$\psi(x, t) = A \sin[kx - \omega t] \quad (6-22)$$

ซึ่งฟังก์ชันที่ใช้บรรยายคลื่นที่กำลังเคลื่อนที่ไปทางด้าน  $+x$  สังเกตว่าจะใช้เครื่องหมาย  $-$  และในทางกลับกันสำหรับคลื่นที่กำลังเคลื่อนที่ไปทางด้าน  $-x$  จะมีเครื่องหมายเป็น  $+$  แต่โดยทั่วไปเมื่อ  $x = 0$  และ  $t = 0$  จะได้ว่าฟังก์ชันไม่เท่ากับ 0 ซึ่งทำให้อาจเขียนได้ว่า  $\psi(x, t) = A \sin \phi$  เมื่อ  $\phi$  คือ ค่าคงตัวเฟส ดังนั้นฟังก์ชันที่ใช้บรรยายคลื่นเขียนในรูปทั่วไปได้เป็น

$$\psi(x, t) = A \sin[kx - \omega t + \phi] \quad (6-23)$$

นอกจากนี้เราสามารถหาความเร็วของจุด ๆ หนึ่งบนคลื่นที่สัมพันธ์กับเฟสค่าหนึ่งได้ว่ามีค่าเป็น

$$v_p = \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega}{k} \quad (6-24)$$

โดยเรียกความเร็วนี้ว่า อัตราเร็วเฟส

## 6.8 หลักความไม่แน่นอน (The uncertainty principle)

เมื่อใดก็ตามที่มีการวัดตำแหน่งหรือความเร็วของอนุภาคที่เวลาใดเวลาหนึ่ง ความไม่แน่นอนในการทดลองจะถูกสร้างขึ้นเพื่อให้วัดค่าได้ จากกลศาสตร์แบบดั้งเดิมจะไม่มีสิ่งกีดขวางพื้นฐานใดมาที่กั้นความละเอียดสูงสุดของเครื่องมือหรือขั้นตอนการทดลองได้ ความเป็นไปได้ที่จะวัดค่าใดๆ ด้วยความไม่แน่นอนขนาดน้อยๆ ได้ ทฤษฎีควอนตัมทำนายว่า โดยพื้นฐานแล้ว

เป็นไปได้ที่จะวัดตำแหน่งและโมเมนตัมของอนุภาคพร้อมกันด้วยความเที่ยงตรงที่ไม่จำกัด ในปี ค.ศ. 1927 เวอร์เนอร์ ไฮเซนเบิร์ก (Werner Heisenbert) ได้เสนอแนวคิดนี้ ซึ่งในปัจจุบันรู้จักกันในนาม หลักความไม่แน่นอนของไฮเซนเบิร์ก (Heisenberg uncertainty principle)

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

เมื่อ  $\Delta x$  คือ ความไม่แน่นอนของการวัดตำแหน่ง

$\Delta p$  คือ ความไม่แน่นอนของการวัดโมเมนตัม

$\hbar$  เท่ากับ  $1.055 \times 10^{-34}$  J.s

นั่นคือ ในทางกายภาพจะไม่สามารถวัดค่าที่แน่นอนของตำแหน่งและโมเมนตัมของอนุภาคได้พร้อมกัน ไฮเซนเบิร์กได้ชี้ให้เห็นว่า ความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นจากค่าการวัดตำแหน่งและโมเมนตัม ไม่ได้เกิดจากเครื่องมือวัด แต่เกิดจากโครงสร้างทางควอนตัมของสสารนั้น ถ้า

$p_x, p_y, p_z$  เป็นส่วนประกอบของโมเมนตัมในทิศทาง  $x, y, z$  ตามลำดับจะได้ว่า

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2} \quad (6-25)$$

$$\Delta y \Delta p_y \geq \frac{\hbar}{2} \quad (6-26)$$

$$\Delta z \Delta p_z \geq \frac{\hbar}{2} \quad (6-27)$$

หากต้องการให้กลุ่มคลื่นกลุ่มหนึ่งมีช่วงเวลาแคบ ๆ ทำให้การระบุตำแหน่งของอนุภาคในปริภูมิเป็นไปได้อย่างแม่นยำ ต้องอาศัยฟังก์ชันคลื่นฮาร์มอนิกที่มีความแตกต่างของความถี่จำนวนมาก เพื่อที่จะทำให้เกิดการหักล้างกันของคลื่นในทุกช่วงเวลา ยกเว้นในช่วง  $\Delta t$

$$\text{เนื่องจาก} \quad E = hf$$

$$\text{ดังนั้น} \quad \Delta E = h\Delta f$$

$$\text{หรือ} \quad \Delta E = \hbar\Delta\omega$$

โดยพิจารณาการรวมกันของคลื่นเพียงสองขบวนจะมีผลทำให้ผลคูณระหว่าง  $\Delta\omega$  และ  $\Delta t$  เขียนได้เป็น  $\Delta\omega\Delta t \approx 1$  ทำให้สามารถเขียนหลักความไม่แน่นอนในการบอกพลังงานและช่วงเวลาในรูปทั่วไปได้เป็น

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2} \quad (6-28)$$

เมื่อ  $\Delta E$  คือ ความไม่แน่นอนของการวัดพลังงาน

$\Delta t$  คือ ความไม่แน่นอนของการวัดเวลา

โดยหลักความไม่แน่นอนนี้บอกว่าการอนุรักษ์พลังงานอาจถูกหักล้างด้วยค่า  $\Delta E$  ตราบเท่าที่ใช้เวลานาน ๆ  $\Delta t$  สามารถใช้แนวคิดนี้ในการประมาณค่าพลังงานหยุดนิ่งของอนุภาค

**ตัวอย่างที่ 6.9** ถ้าค่าคงตัวของเพลงก์เป็น  $660 \text{ J}\cdot\text{s}$  แทนที่จะเป็น  $6.6 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$  ความยาวคลื่นเดอบรอยของนักฟุตบอลมวล  $100 \text{ kg}$  วิ่งเร็ว  $5 \text{ m/s}$  ควรมีขนาดเท่าไร ตำแหน่งของเขามีความไม่แน่นอนอย่างน้อยที่สุดเท่าไรตามสายตาของผู้เล่นฝ่ายตรงกันข้าม

$$\begin{aligned} \text{วิธีทำ} \text{ ความยาวของคลื่นเดอบรอย } \lambda &= \frac{h}{p} = \frac{660 \text{ J}\cdot\text{s}}{(100\text{kg})(5 \text{ m/s})} \\ &= 1.32 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ความไม่แน่นอนของตำแหน่ง } (\Delta p)(\Delta x) &= \frac{h}{4\pi} \\ \Delta x &= \frac{h}{(4\pi)(\Delta p_x)} \\ &= \frac{660 \text{ J}\cdot\text{s}}{(4\pi)(100\text{kg})(5 \text{ m/s})} \\ &= 0.105 \text{ m} \end{aligned}$$

**คำตอบ** ความยาวคลื่นเดอบรอย  $1.32$  เมตร และความไม่แน่นอนของตำแหน่ง  $0.105$  เมตร

**ตัวอย่างที่ 6.10** อะตอมซึ่งอยู่ในสถานะกระตุ้น ปล่อยพลังงานออกมาในรูปของโฟตอน และกลับคืนสู่สถานะปกติในเวลาประมาณ  $10^{-8} \text{ s}$  จงหาความไม่แน่นอนในการวัดพลังงานของสถานะกระตุ้น

$$\begin{aligned} \text{วิธีทำ} \text{ จาก } \Delta E \Delta t &\geq \frac{\hbar}{2} \\ \Delta E &\geq \frac{\hbar}{2\Delta t} \\ &= \frac{h}{4\pi\Delta t} \\ &= \frac{6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}}{4\pi(10^{-8} \text{ s})} \\ &= 0.5025 \times 10^{-26} \text{ J} \end{aligned}$$

**คำตอบ** ความไม่แน่นอนในการวัดพลังงานเท่ากับ  $0.5025 \times 10^{-26}$  จูล

## 6.9 สมการคลื่นของชโรดิงเจอร์ (Schrodinger wave equation)

เนื่องจากคลื่นที่พิจารณาในบทนี้เป็นคลื่นของอนุภาคที่เรียกว่า คลื่นสสาร เกิดจากแนวคิดของเดอบรอย เกี่ยวกับสสารที่ประพฤติตัวเป็นคลื่นได้ ซึ่งคลื่นดังกล่าวต้องอาศัยแนวคิดเฉพาะทางที่เรียกว่า กลศาสตร์ควอนตัม มาใช้ในการศึกษาและวิเคราะห์ โดยหนึ่งในผู้วางรากฐานแนวคิดนี้คือ เออวิน ชโรดิงเจอร์ (Erwin Schrödinger) ค.ศ. 1926 และเราเรียกสมการคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของคลื่น (หรือ อนุภาค) นี้ว่า สมการชโรดิงเจอร์

เริ่มต้นพิจารณาคำที่เขียนแทนด้วยสมการคณิตศาสตร์ง่าย ๆ

$$\psi(x, t) = A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \omega t\right) \quad (6-29)$$

โดยที่  $A$  คือ แอมพลิจูดของคลื่น

โดยอาศัยแนวคิดของเดอบรอย เราจะได้

$$E = hf = \frac{h}{2\pi} 2\pi f = \hbar\omega \quad (6-30)$$

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{2\pi\hbar}{2\pi p} = \frac{2\pi\hbar}{p} \quad (6-31)$$

แทนสมการ (6.30) และ (6.29) ในสมการ (6.28) จะได้

$$\psi(x, t) = A \sin\left(\frac{1}{\hbar}(px - Et)\right) \quad (6-32)$$

หาอนุพันธ์ของสมการ (6.31) เทียบกับ  $x$

$$\frac{\partial\psi}{\partial x} = \frac{p}{\hbar} A \cos\left(\frac{1}{\hbar}(px - Et)\right) \quad (6-33)$$

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} = -\frac{p^2}{\hbar^2} \psi \quad (6-34)$$

ในกรณีที่อนุภาคมีความเร็วต่ำ ๆ เทียบกับ  $c$  กฎทรงพลังงานเขียนได้เป็น

พลังงานจลน์ + พลังงานศักย์ = พลังงานทั้งหมด

$$\frac{1}{2}mv^2 + V(x, t) = E \quad (6-34)$$

เมื่อ  $E$  คือพลังงานทั้งหมดของอนุภาคที่มีมวล  $m$  เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว  $v$  โดยมีพลังงานศักย์  $V(x,t)$  ซึ่งเป็นฟังก์ชันของตำแหน่ง  $x$  และเวลา  $t$  สมการ (6-35) สามารถเขียนในรูปของโมเมนตัม  $p$  ได้ดังนี้

$$\frac{p^2}{2m} + V(x,t) = E \quad (6-35)$$

คูณทั้งสองข้างของสมการ  $\psi(x,t)$  จะได้

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} \psi(x) + V\psi(x) = E\psi(x) \quad (6-36)$$

ในกรณีที่อนุภาคที่ไม่ถูกจำกัดการเคลื่อนที่หรืออนุภาคอิสระ พลังงานศักย์จะมีค่าเป็นศูนย์ สมการชโรดิงเงอร์จะเขียนได้เป็น

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} \psi(x) = E\psi(x) \quad (6-37)$$

หรือเขียนได้เป็น

$$\frac{d^2}{dx^2} \psi(x) + \frac{2m}{\hbar^2} E\psi(x) = 0 \quad (6-38)$$

เนื่องจากในกรณีที่กำลังพิจารณาขณะนี้ เป็นกรณีของอนุภาคอิสระ พลังงานทั้งหมดก็คือพลังงานจลน์ ดังนั้น

$$E = \frac{p^2}{2m} \quad (6-39)$$

เมื่อ  $p = \hbar k$  แทนลงในสมการ (6.39)

$$E = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} \quad (6-40)$$

สมการ (6-40) แสดงให้เห็นว่า พลังงานของอนุภาคอิสระมีโอกาasเป็นไปได้ทุกค่า ทำให้ได้ใหม่

$$\frac{d^2}{dx^2} \psi(x) + k^2 \psi(x) = 0 \quad (6-41)$$

เมื่อ  $k = \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar}$  คำตอบของสมการ (6.41) จะเขียนได้เป็น

$$\psi(x) = A \sin(kx) + B \cos(kx) \quad (6-42)$$

## 6.10 บทสรุป

ลักษณะเฉพาะของการแผ่รังสีของวัตถุดำ ไม่สามารถอธิบายด้วยแนวคิดแบบดั้งเดิม พลังค์ได้แนะนำแนวคิดทางควอนตัมและค่าคงตัวของพลังค์  $h$  เมื่อสมมติว่าอะตอมที่เกิดการสั่น เมื่ออยู่ในระดับพลังงานที่ไม่ต่อเนื่องมีส่วนต่อการแผ่รังสีนี้ในแบบจำลองของพลังค์ การแผ่รังสีที่เปล่งออกมา จะมีลักษณะเป็นควอนไทซ์ เมื่อใดก็ตามที่มีการสั่นจะทำให้เกิดการเปลี่ยนระดับพลังงาน โอน์สไตน์ประสบความสำเร็จในการต่อยอดสมมติฐานเชิงควอนตัมของพลังค์ เพื่ออธิบายคลื่นนิ่งของการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในโพรงที่ใช้แบบจำลองการแผ่รังสีของวัตถุดำ ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก คือกระบวนการที่อิเล็กตรอนหลุดออกจากผิวโลหะเมื่อมีแสงตกกระทบบนผิวโลหะนั้น ในแบบจำลองของโอน์สไตน์ แสงถูกมองว่าเป็นกระแสของอนุภาค หรือเรียกว่า โฟตอน ซึ่งแต่ละตัวมีพลังงานเท่ากับ  $hf$  โดยค่าพลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาคือค่าพลังงาน  $hf$  ลบด้วยค่าฟังก์ชันงานของโลหะ แสงมีธรรมชาติความเป็นคู่ คือ มีลักษณะพิเศษเป็นได้ทั้งคลื่นและอนุภาค โดยการรวมคลื่นจำนวนมากเข้าด้วยกันจะเกิดบริเวณหนึ่งมีการแทรกสอดแบบเสริมกัน และมีอัตราเร็วเฟสเป็นอัตราเร็วแบบกลุ่ม รังสีเอ็กซ์กระเจิงออกมาเป็นมุมต่างๆ โดยอิเล็กตรอนที่อยู่ในเป้าในเหตุการณ์การกระเจิงนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ที่กระเจิง ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า ปรากฏการณ์คอมป์ตัน ถ้าให้รังสีเอ็กซ์ประพุดติตัวเป็นโฟตอน และใช้การอนุรักษ์พลังงานและโมเมนตัมเชิงเส้นเข้าไปอธิบายการชนกันระหว่างโฟตอนกับอิเล็กตรอน จะได้ การเปลี่ยนความยาวคลื่นคอมป์ตัน ซึ่งวัตถุทั้งหลายที่มีมวลและ โมเมนตัม จะมีสมบัติความเป็นคลื่นด้วยและมีความยาวคลื่นที่เรียกว่า คลื่นของเดอ บรอย สำหรับหลักความไม่แน่นอนของไฮเซนแบร์ก กล่าวว่า ถ้าวัดตำแหน่งของอนุภาคที่มีความไม่แน่นอนและขณะเดียวกันก็วัดโมเมนตัมเชิงเส้นที่มีความไม่แน่นอนด้วย

## แบบฝึกหัด

1. ดวงอาทิตย์มีอุณหภูมิผิว 5800 เคลวิน ถ้ากำหนดให้ดวงอาทิตย์นั้นเป็นวัตถุดำจงคำนวณหา กำลังการแผ่รังสีความร้อนของดวงอาทิตย์ [คำตอบ  $6.146 \times 10^7$  เวบเบอร์ต่อตารางเมตร]
2. สมมติว่าวัตถุดำที่ 1500 เคลวิน มีความเข้มของการแผ่รังสีที่ความยาวคลื่นประมาณ 2 ไมโครเมตร ถามว่าวัตถุจะต้องมีอุณหภูมิเท่าไรจึงจะมีความเข้มของการแผ่รังสีมากที่สุดที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร [คำตอบ 5454.55 เคลวิน]
3. จงหาความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนที่มีพลังงานจลน์ 100 อิเล็กตรอนโวลต์ [คำตอบ 1.23 อังสตรอม]
4. จงหาอัตราเร็วของอิเล็กตรอนซึ่งมีความยาวคลื่นอนุภาคเท่ากับ 0.1 นาโนเมตร และจงหา ความต่างศักย์ที่ใช้เร่งอิเล็กตรอนนี้ด้วย [คำตอบ  $7.33 \times 10^6$  เมตรต่อวินาที และ 151.1 โวลต์]
5. แสงที่มีความยาวคลื่น 124 นาโนเมตร จะสามารถทำให้เกิดโฟตอนมีความยาวเดอบรอยล์เท่าไร ฉายแสงตกกระทบโลหะชนิดหนึ่งซึ่งมีฟังก์ชันงาน 8 อิเล็กตรอนโวลต์ [คำตอบ 0.9 นาโนเมตร]
6. ถ้าอนุภาคหนึ่งมีมวล 0.05 กรัม กำลังวิ่งไปตามแกน x ด้วยความเร็วประมาณ 20.5 เมตร/วินาที ถึง 20.7 เมตร/วินาที จงหาความไม่แน่นอนของตำแหน่งแกน x [คำตอบ  $1.05 \times 10^{-29}$  เมตร]
7. อนุภาคมวล m โคจรเป็นวงรัศมี r ความไม่แน่นอนของความเร็วของอนุภาคนี้อย่างน้อยต้องเท่ากับเท่าไร [คำตอบ  $\frac{h}{2\pi mr}$  ]
8. แสงมีความยาวคลื่น 2000 Å ฉายตกกระทบบนผิวของโลหะอะลูมิเนียม สำหรับอะลูมิเนียม จะต้องใช้พลังงานถึง 4.2 อิเล็กตรอนโวลต์ จึงจะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกไปได้
  - (ก) จงคำนวณพลังงานจลน์ของโฟโตอิเล็กตรอนตัวที่เร็วที่สุดที่หลุดออกไปได้ [คำตอบ 2 อิเล็กตรอนโวลต์]
  - (ข) จงหาค่าความต่างศักย์หยุดยั้ง [คำตอบ 2 โวลต์]

## เอกสารอ้างอิง

- ก่องกัญจน์ ภัทราภาณจน์ และชนภาณจน์ ภัทราภาณจน์. (2554). **ฟิสิกส์ 2 ตัวอย่างและโจทย์ พร้อม คำเฉลย**. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เชิญโชค ศรีขวัญ และคณะ. (2546). **ฟิสิกส์ทั่วไป 2 General Physics II 2<sup>nd</sup> ed.** กรุงเทพมหานคร : คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล.
- มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล. *การแผ่รังสีที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ*. สืบค้น 5 มีนาคม 2563 จาก <http://www.rmutphysics.com/charud/virtualexperiment/virtual3/blackbody>
- ปิยพงษ์ สิทธิคง. (2553). **ฟิสิกส์ระดับอุดมศึกษา เล่ม 3**. กรุงเทพมหานคร: วิรัตน์ เอ็ดดูลักษณ์ จำกัด
- ประธาน บุรณศิริ และคณะ. (2559). **ฟิสิกส์ 2**. กรุงเทพมหานคร: เอ สแควร์ อี จำกัด.
- ธิตี บวรรัตนารักษ์ และนคร ไพศาลกิตติสกุล. (2559). **กลศาสตร์ควอนตัมเบื้องต้น พิมพ์ครั้งที่ 2**. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิฑูร ชื่นวชิรศิริ และวีระชัย สิริพันธ์วรารณณ์. (2550). **ฟิสิกส์เบื้องต้น**. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยมหิดล.
- อนุกรรมการปรับปรุงหลักสูตรวิทยาศาสตร์ ทบวงมหาวิทยาลัย. (2543). **ฟิสิกส์ เล่ม 2**. กรุงเทพมหานคร: สมาคมวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์.
- David J. Griffiths. (2005). *Introduction to quantum mechanics*. NJ: Pearson prentice hall.
- Crummett P. & Bwestern. (1994). **University Physics**. USA : Wm. C. Brown.
- Halliday, D., Resnick, R. & Walker, J. (2005). **Fundamentals Physics**. (7th ed.). USA: John Wiley and Sons.
- Serway, R.A., Moses, C.J., & Moyer, C.A. (2005). **Modern Physics 3<sup>rd</sup> ed.** California: Brooks/Cole-Thomson Learning.
- Serway, R. A., and Jewett, J. W. (2014). **Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics 9<sup>th</sup> ed.** Belmont: Brooks/Cole-Thomson Learning.
- Serway, R.A., Vuille, C., and Hughes, J. (2015). **College Physics 10<sup>th</sup> ed.** Stamford: Cengage Learning.
- Thornton, T.S., and Rex, A. (2013). **Modern Physics for Scientists and Engineers 4<sup>th</sup> ed.** Boston: Brooks/Cole- Cengage Learning.
- Young, H.D., and Freedman, R.A. (2016). **Sear's & Zemansky's University Physics with Modern Physics 14<sup>th</sup> ed.** Essex: Pearson Education Limited.

## บทที่ 7

### ฟิสิกส์นิวเคลียร์และกัมมันตภาพรังสี

#### (Physics nuclear and radioactivity)

##### 7.1 บทนำ

ปี ค.ศ. 1896 จุดกำเนิดของวิชาฟิสิกส์นิวเคลียร์เมื่อนักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศส อ็องตวน อ็องรี เบคเคอเรล (Antoine Henri Becquerel) ได้ค้นพบกัมมันตภาพรังสีในสารประกอบยูเรเนียม ทำให้นักวิทยาศาสตร์ทำการศึกษารายละเอียดของธาตุกัมมันตรังสีโดยเฉพาะ โครงสร้างนิวเคลียร์ในทันที โดยเอิร์นสท์ รัทเทอร์ฟอร์ด ได้แสดงให้เห็นว่ารังสีที่แผ่ออกมาจากสารกัมมันตรังสีมีอยู่สามชนิดคือ รังสีแอลฟา เบตา และแกมมา โดยจำแนกตามธรรมชาติของประจุไฟฟ้าและความสามารถในการทะลุทะลวงสสารและการทำให้อากาศแตกตัวเป็นไอออน ในปี ค.ศ. 1911 รัทเทอร์ฟอร์ด ฮันส์ ไกเกอร์ และเอิร์นสต์ มาร์สเดน ได้ทำการทดลองการกระเจิงของอนุภาคแอลฟา ซึ่งเป็นที่ยอมรับกันว่านิวเคลียสของอะตอมสามารถที่จะจำลองให้เป็นจุดมวลและจุดประจุ และมวลของอะตอมส่วนใหญ่รวมกันอยู่ในนิวเคลียส การศึกษาต่อมาได้ค้นพบการมีอยู่ของแรงนิวเคลียร์ช่วงสั้น ซึ่งออกแรงกระทำกันระหว่างอนุภาคที่มีระยะทางห่างกันน้อยกว่า  $10^{-14}$  เมตร โดยประมาณ และมีค่าเป็นศูนย์เมื่อระยะทางมากขึ้น ในระหว่างศตวรรษใหม่นี้ การประยุกต์ฟิสิกส์นิวเคลียร์ได้มีผลกระทบมหาศาลต่อพลเมืองโลก บางอย่างเป็นผลดี บางอย่างก่อให้เกิดความหายนะ ทุกอะตอมมีนิวเคลียสประจุบวก ความหนาแน่นสูงมากอยู่ที่ตรงกลาง นิวเคลียสมีขนาดเล็กกว่าขนาดโดยรวมของอะตอมมาก แต่มีมวลเกือบทั้งหมดของอะตอม เราจะดูสมบัติทั่วไปที่สำคัญของนิวเคลียส ปฏิกิริยาและคุณสมบัติต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในนิวเคลียส แบบจำลองแรงนิวเคลียร์มวลเชิงอะตอมและพลังงาน ทั้งนี้ยังรวมถึงการศึกษาโครงสร้างภายในและการเปลี่ยนแปลงของนิวเคลียสด้วย ความเสถียรหรือไม่เสถียรของนิวเคลียสจะพิจารณาจากแรงนิวเคลียร์ดึงดูดกันระหว่างโปรตอนและนิวตรอน และอันตรกิริยาไฟฟ้าผลักระหว่างโปรตอน นิวเคลียสที่ไม่เสถียรสลายตัว เปลี่ยนเป็นโครงสร้างอื่น โดยกระบวนการสลายแบบต่างๆ ปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เปลี่ยนโครงสร้างนี้อาจเกิดขึ้นได้เองโดยการชนนิวเคลียสด้วยอนุภาคหรือนิวเคลียสอื่นได้ ปฏิกิริยาสองแบบที่น่าสนใจเป็นพิเศษคือ การแบ่งแยกตัวและการหลอม สำหรับในบทนี้เราจะมาศึกษาพฤติกรรมเหล่านี้กัน

## 7.2 ส่วนประกอบของนิวเคลียส (Components of a nucleus)

โครงสร้างของอะตอมของธาตุหนึ่งนั้นจะประกอบไปด้วยนิวเคลียส และอิเล็กตรอนที่โคจรรูปร่าง นิวเคลียส ซึ่งภายในนิวเคลียสนั้นจะประกอบไปด้วยโปรตอนที่มีประจุเป็นบวกและนิวตรอนที่เป็นกลาง เราเรียกทั้งสองอย่างรวมกันว่าเรียกว่านิวไคลด์ หรือนิวคลีออน นิวเคลียสทั้งหมดประกอบด้วยอนุภาคทั้งสองชนิด ยกเว้นเฉพาะนิวเคลียสของไฮโดรเจนธรรมดาซึ่งมีโปรตอนเพียงตัวเดียว มวลทางนิวเคลียร์สามารถวัดได้ด้วยแมสสเปกโตรมิเตอร์ และโดยการวิเคราะห์ปฏิกิริยานิวเคลียร์ โปรตอนมีขนาดใหญ่กว่าอิเล็กตรอน 1836 เท่าโดยประมาณ และมวลของโปรตอนเกือบจะเท่ากับมวลของนิวตรอน หน่วยของมวลอะตอม (atomic mass unit)  $u$  ถูกนิยามขึ้นโดยกำหนดให้มวลอะตอมเดี่ยวของไอโซโทป  $^{12}\text{C}$  นั้นมีค่าเท่ากับ  $12 u$  เมื่อ  $1 u$  เท่ากับ  $1.660539 \times 10^{-27} \text{ kg}$  สำหรับองค์ประกอบของนิวไคลด์เราสามารถเขียนได้ดังต่อไปนี้ ถ้าให้

Z	แทนเลขเชิงอะตอม ซึ่งจะหมายถึงจำนวนโปรตอน
N	แทนจำนวนนิวตรอน
X	คือสัญลักษณ์ของธาตุ
A	คือเลขมวล หรือเลขนิวคลีออน เป็นผลรวมของจำนวนโปรตรอนและนิวตรอนในนิวเคลียสอะตอม

จะเขียนสัญลักษณ์นิวเคลียสของอะตอมของธาตุได้คือ  ${}^A_Z X$

เลขนิวคลีออนหรือเลขมวล A คือผลบวกของจำนวนโปรตอน Z กับจำนวนนิวตรอน N

$$A = Z + N \quad (7-1)$$

เรียกนิวเคลียสชนิดหนึ่ง ๆ ที่มีค่าของทั้ง Z และ N จำเพาะค่าหนึ่งว่านิวไคลด์ นิวไคลด์ เป็นการรวมกันอย่างเฉพาะเจาะจงของเลขอะตอมและเลขมวลซึ่งเป็นตัวแทนของนิวเคลียส ตัวอย่างเช่น เหล็ก  ${}^{56}_{26}\text{Fe}$  มีเลขมวล 56 และเลขอะตอม 26 ดังนั้น นิวเคลียสของเหล็กจะประกอบไปด้วยโปรตอน 26 ตัว และนิวตรอน 30 ตัว เพื่อไม่ให้มีความสับสน จึงตัดตัวห้อย Z เนื่องจากสัญลักษณ์ทางเคมีสามารถใช้เพื่อกำหนด Z ได้อยู่เสมอ เหล็กจึงเขียนได้เป็น  ${}^{56}\text{Fe}$  หรือ iron-56 หรือ Fe-56 ก็ได้ อีกด้วย

**ตัวอย่างที่ 7.1** จงหาจำนวนอิเล็กตรอนและ นิวตรอนที่อยู่ใน  ${}^4_2\text{He}$

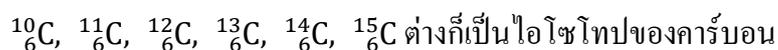
**วิธีทำ** เมื่อพิจารณาจากสัญลักษณ์ของธาตุจะได้ เลขมวลคือ 4 และเลขอะตอมคือ 2 ดังนั้นจะมีจำนวนนิวตรอนเท่ากับ  $4 - 2 = 2$  นิวตรอน และเนื่องจากธาตุมีความเป็นกลางทางไฟฟ้า นั่นคือมีประจุบวกเท่ากับประจุลบ

**คำตอบ** จำนวนอิเล็กตรอนเท่ากับนิวตรอนคือเท่ากับ 2

### 7.3 ประเภทของนิวไคลด์ (Types of nuclide)

เพื่อพิจารณาลักษณะของนิวไคลด์ชนิดต่างๆ โดยพิจารณาจากความเหมือนกันและความแตกต่างกันแล้วจัดกลุ่ม สามารถพิจารณาประเภทต่างๆของนิวไคลด์ได้เป็น 3 ประเภท คือ

1. ธาตุที่เป็นไอโซโทปกัมมันต์ หมายถึงนิวไคลด์ของธาตุชนิดเดียวกันที่มีเลขเชิงอะตอมเหมือนกัน แต่มีค่านิวตรอนและเลขมวลต่างกัน เช่น



2. ธาตุที่เป็นไอโซโทนกัน หมายถึงนิวไคลด์ของธาตุต่างชนิดกันแต่มีจำนวนนิวตอนเท่ากัน เช่น



3. ธาตุที่เป็นไอโซบาร์ หมายถึงนิวไคลด์ของธาตุต่างชนิดกันที่มีเลขมวลเท่ากัน นั่นคือผลรวมของเลขอะตอมและนิวตรอนมีค่าเท่ากันนั่นเอง เช่น



**ตัวอย่างที่ 7.3** จงหามวลนิวเคลียร์ของไอโซโทปนี้ในหน่วยมวลอะตอมและหน่วยกิโลกรัมของ  ${}^{12}\text{C}$  เมื่อกำหนดให้มวลอะตอมในตารางธาตุรวมมวลของอิเล็กตรอนไว้ด้วย โดยระบุไว้ว่าเท่ากับ 12 uพอดี

**วิธีทำ**

$${}^{12}\text{C} \text{ หมายความว่า } A = 12, Z = 6$$

$$\text{มวลของอิเล็กตรอน 6 ตัว} = 6 (0.000\,548\,6 \text{ u})$$

$$= 0.003\,291\,6 \text{ u}$$

$$\text{มวลนิวเคลียร์ของ } {}^{12}\text{C} = 12.000 \text{ u} - 0.003\,291\,6 \text{ u}$$

$$= 11.9967 \text{ u}$$

$$= (11.9967 \text{ u})(1.6606 \times 10^{-27} \text{ kg/u})$$

$$= 1.9922 \times 10^{-26} \text{ kg}$$

**คำตอบ** มวลนิวเคลียร์ของไอโซโทป  $0.003\,291\,6 \text{ u}$  หรือ  $1.9922 \times 10^{-26}$  กิโลกรัม

#### 7.4 แรงภายในนิวเคลียส (Nuclear force)

โดยทั่วไปแล้วภายในนิวเคลียสนั้นประกอบไปด้วยโปรตอน และนิวตรอนที่อยู่ใกล้ชิดกัน เนื่องจากนิวตรอนมีความเป็นกลางทางไฟฟ้าคือมีประจุเป็นลบแต่โปรตอนที่มีประจุบวกซึ่งเมื่ออยู่ด้วยกันแล้วจะต้องเกิดแรงผลักรังสีที่น่าสนใจคือทำไมโปรตอนที่มีประจุบวกเหมือนกันจึงยึดติดอยู่ด้วยกันได้ภายในนิวเคลียสโดยที่ไม่เกิดแรงผลักรังสี นั่นแสดงว่าต้องมีแรงอีกแรงหนึ่งซึ่งเป็นแรงที่พยายามยึดเหนี่ยวนิวเคลียสไว้ด้วยกันโดยแรงดังกล่าวนี้สามารถเอาชนะแรงผลักระหว่างประจุบวกได้

เมื่อพิจารณามวลทั้งหมดของนิวเคลียสแล้วนำมาเปรียบเทียบกับ ผลรวมของนิวตรอนกับโปรตอนแล้ว ตามหลักความเป็นจริงจะต้องมีค่าเท่ากับมวลของนิวเคลียส แต่ในความเป็นจริงแล้วปรากฏว่ามวลของนิวเคลียสมีค่าน้อยกว่าผลรวมของนิวตรอนและโปรตอนที่อยู่ในนิวเคลียสนั้นซึ่งมวลที่หายไปนี่เองที่เปลี่ยนไปเป็นพลังงาน และพลังงานนี่เองที่เป็นพลังงานที่ยึดเหนี่ยวอนุภาคต่างที่อยู่ภายในนิวเคลียสให้อยู่ด้วยกัน ซึ่งสามารถเอาชนะแรงที่เกิดจากประจุได้ โดยมวลที่หายไปสามารถหาได้จากสมการ

$$m = (Zm_p + Nm_n) - m_A \quad (7-2)$$

เมื่อ	Z	คือ จำนวน โปรตรอน
	N	คือ จำนวน นิวตรอน
	m	คือ มวลพร่อง (Mass Defect)
	$m_p$	คือ มวลของ โปรตรอน
	$m_n$	คือ มวลของ นิวตรอน
	$m_A$	คือ มวลของ นิวเคลียส

นั่นก็คือสรุปได้ว่าพลังงานที่ยึดเหนี่ยวอนุภาคต่างๆที่อยู่ภายในนิวเคลียสให้อยู่ด้วยกัน ก็คือพลังงานที่เกิดจากผลต่างของมวลที่หายไประหว่างผลรวมของมวลโปรตอนและนิวตรอนกับมวลของนิวเคลียสนั่นเอง โดยเรียกค่าผลต่างของมวลนี้ว่า มวลพร่อง โดยในสวนของมวลพร่องนี้ได้เปลี่ยนไปเป็นพลังงานตามสมการ

$$E = mc^2 \quad (7-3)$$

เมื่อ	E	คือ พลังงาน
	m	คือ มวลพร่องหรือส่วนพร่องมวล
	c	คือ ความเร็วแสงในสุญญากาศ มีค่าเท่ากับ $2.9979 \times 10^8$ m/s

แรงนิวเคลียร์มีลักษณะเฉพาะ ข้อแรกไม่ขึ้นกับประจุ นิวตรอนถูกยึดเหนี่ยวเช่นเดียวกับโปรตอน และการยึดเหนี่ยวเหมือนกันทั้งคู่ ข้อที่สองมีพิสัยสั้นอยู่ในระดับขนาดนิวเคลียร์ นั่นคือ  $10^{-15}$  m แต่ภายในพิสัยของมัน แรงนิวเคลียร์แรงกว่าแรงไฟฟ้ามาก มิฉะนั้นนิวเคลียสจะไม่มีวันเสถียรได้ มันคงจะฉีกกระจายสมการง่าย ๆ อย่างกฎของนิวตันของความโน้มถ่วงหรือกฎของคูลอมบ์สำหรับแรงนี้ได้

สำหรับหน่วยของมวลนิวเคลียสเนื่องจากเป็นหน่วยที่มีขนาดเล็กมากจึงได้กำหนดหน่วยขึ้นมาหน่วยหนึ่ง คือ หน่วยมวลเอกภาพ (u) หรือ unit mass

$$\text{โดย} \quad 1 \text{ u} = 931.5 \text{ MeV}$$

ดังนั้นจึงอาจเขียนพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างนิวเคลียสได้ดังสมการ

$$E = (Zm_p + Nm_n - m_A) \times 931.494 \text{ MeV} / \text{u} \quad (7-4)$$

นั่นก็คือเมื่อพิจารณาจากสมการข้างบนแล้ว ถ้าให้มวลมีหน่วยเป็นกิโลกรัม และให้ความเร็วแสงที่สุญญากาศมีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที จะได้พลังงานมีหน่วยเป็นจูล แต่ถ้าให้หน่วยของมวลคือหน่วยเอกภาพ จะได้พลังงานเป็นหน่วยของอิเล็กตรอนโวลต์ โดยที่มวลพร่องหนึ่งหน่วยมวลมีค่าเท่ากับ 931.5 MeV ในการคำนวณหาค่าส่วนมวลพร่องหรือพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียสอาจจะใช้มวลของโปรตอนแทนมวลของนิวเคลียสและใช้มวลอะตอมไฮโดรเจนแทนมวลของโปรตอนได้ เนื่องจากไฮโดรเจนเป็นธาตุที่มีเลขอะตอม 1 มีน้ำหนักอะตอมเฉลี่ย 1.00794 u

**ตัวอย่างที่ 7.4** กำหนดให้มวลอะตอมของคาร์บอนที่เป็นกลางมีค่าเท่ากับ 12 u มวลอะตอมของไฮโดรเจนที่เป็นกลางคือ 1.0078 u และมวลของนิวตรอนมีค่าเท่ากับ 1.0058 u จงหาขนาดของมวลพร่องและหาค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียสในหน่วย MeV ของไอโซโทปคาร์บอน  $^{12}\text{C}$

**วิธีทำ** มวล 6 โปรตอนเท่ากับ มวลอะตอมไฮโดรเจน 6 มวล

$$= 6 \times 1.0078$$

$$= 6.0468 \text{ u}$$

มวลของนิวตรอน 6 มวล

$$= 6 \times 1.0058$$

$$= 6.0522 \text{ u}$$

จะได้ผลรวมของมวลนิวตรอนและโปรตอนมีค่าเท่ากับ

$$6.0468\text{u} + 6.0522\text{u} = 12.0990 \text{ u}$$

ดังนั้น ได้ส่วนพร่องของมวลมีค่าเท่ากับ

$$12.0990\text{u} - 12.000\text{u} = 0.0990\text{u}$$

คำนวณหาพลังงานยึดเหนี่ยวนิวเคลียสจาก

$$\begin{aligned} \text{ส่วนพระองค์มวลภายใน } u \times 931 \\ &= (0.0990)(931) \\ &= 92.17\text{ MeV} \end{aligned}$$

**คำตอบ** มวลพระองค์ 0.0990 u และพลังงานยึดเหนี่ยวเท่ากับ 92.17 เมกะอิเล็กตรอน โวลต์

**ตัวอย่างที่ 7.5** โคบอลต์-60 ปล่องรังสีแกมมาตัวหนึ่งมีพลังงาน 1.33 MeV ถามว่ามวลนิวเคลียสลดลงเป็นเศษส่วนเท่าไรในกระบวนการนี้

**วิธีทำ** จาก  $E = mc^2$   
 $(1.33 \times 10^6 \text{eV})(1.6 \times 10^{-19} \text{J/eV}) = (m)(3 \times 10^8 \text{m/s})^2$

จะได้มวลพระองค์  $m = \frac{(1.33 \times 10^6 \text{eV})(1.6 \times 10^{-19} \text{J/eV})}{(3 \times 10^8 \text{m/s})^2}$

ให้  $\Delta m = 2.364 \times 10^{-30} \text{kg}$

และจากมวลนิวเคลียสได้  $m = (60)(1.66 \times 10^{-27} \text{kg})$

ดังนั้น สัดส่วนมวล  $\frac{\Delta m}{m} = \frac{2.364 \times 10^{-30} \text{kg}}{(60)(1.66 \times 10^{-27} \text{kg})}$   
 $= 2.4 \times 10^{-5}$

**คำตอบ** มวลนิวเคลียสลดลงเป็นสัดส่วนเท่ากับ  $2.4 \times 10^{-5}$

## 7.5 สมบัติของนิวเคลียส (Characteristics of nucleus)

จากที่รัทเทอร์ฟอร์ด (Ernest Rutherford) ได้ค้นพบว่านิวเคลียสมีรัศมีเล็กกว่าอะตอมหลายหมื่นเท่า หลังการทดลองเดิมของรัทเทอร์ฟอร์ดเอิร์นสต์ที่ได้ทำการทดลองยิงอนุภาคแอลฟา (นิวเคลียสของอะตอมฮีเลียม) ไปที่แผ่นโลหะบาง และพบว่าอนุภาคนี้สามารถวิ่งผ่านได้เป็นจำนวนมาก แต่จะมีเพียงส่วนน้อยที่เป็นอนุภาคที่กระเจิงไปจากแนวเดิมหรือสะท้อนกลับทางเดิมได้ ก็มีการทดลองการกระเจิงเพิ่มเติมอีกหลายการทดลองโดยใช้โปรตอน อิเล็กตรอน และนิวตรอน พลังงานสูง การทดลองเหล่านี้ ประจวบกันในอะตอมถูกตั้งให้มารวมกันอยู่ในรูปของทรงกลมขนาดเล็กซึ่งเรียกว่า นิวเคลียส และสามารถแสดงการรัศมีทรงกลมของนิวเคลียสได้เป็น R ซึ่งไม่มากไปกว่า  $10^{-14} \text{m}$  โดยประมาณ เนื่องจากปกติแล้วระยะทางในฟิสิกส์นิวเคลียสนั้นเป็นระยะทางที่สั้นมาก ดังนั้นหน่วยของความยาวที่สะดวกต่อการใช้งานบ่อยๆ จึงอยู่ในหน่วยของเฟมโตเมตร (fm) หรือบางครั้งเรียกว่าเฟอร์มิ (fermi) ให้ค่าเป็น 1 fm ซึ่งเท่ากับ  $10^{-15} \text{m}$  ในช่วง

เวลาหลังการทดลองการกระเจิงของอนุภาคของรัทเทอร์ฟอร์ดเป็นต้นมา มีการทดลองจำนวนมากที่แสดงให้เห็นว่านิวเคลียสที่ขึ้นกับจำนวนนิวคลีออน (นิวตรอนและโปรตอน) ที่เราเรียกจำนวนนี้ว่า เลขมวล  $A$  หรือเลขนิวคลีออน โดยสามารถหารัศมีเฉลี่ยของนิวเคลียสส่วนมากได้ด้วยสมการ

$$R = R_0 A^{1/3} \quad (7-5)$$

โดยที่  $R_0$  คือค่าคงตัวที่ได้จากการทดลอง มีค่าเท่ากับ  $1.2 \times 10^{-15} \text{ m}$

ให้เลขมวล  $A$  เป็นเลขจำนวนเต็มที่ใหญ่ที่สุดที่สอดคล้องกับมวลนิวเคลียสในหน่วยมวลเชิงอะตอม ( $u$ ) (มวลโปรตอนและมวลนิวตรอนมีค่าประมาณ  $1 u$  ทั้งคู่) สำหรับความหนาแน่นของนิวเคลียส ถ้าให้  $V$  คือปริมาตรของทรงกลมมีค่าเท่ากับ  $4\pi R^3/3$  ดังนั้นสมการ (7-4) แสดงว่าปริมาตรของนิวเคลียสเป็นสัดส่วนกับ  $A$  การหาร  $A$  (มวลโดยประมาณในหน่วย  $u$ ) ด้วยปริมาตรให้ความหนาแน่นโดยประมาณและทำให้  $A$  หักล้างกันไป ดังนั้นทุกนิวเคลียสมีความหนาแน่นเท่ากันโดยประมาณ ความจริงนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งในการเข้าใจโครงสร้างนิวเคลียส

**ตัวอย่างที่ 7.6** นิวเคลียสของธาตุชนิดหนึ่งมีเลขมวล 56 จงหารัศมี มวลโดยประมาณ และความหนาแน่นโดยประมาณของนิวเคลียส

วิธีทำ จากสมการ (7-5)  $R = R_0 A^{1/3}$

$$= (1.2 \times 10^{-15} \text{ m})(56)^{1/3}$$

$$= 4.6 \times 10^{-15} \text{ m}$$

ธาตุใด ๆ จะมีมวลเท่ากับเลขมวล  $A$  คูณด้วย  $u$  ดังนั้นมวลมีค่าประมาณ

$$m = (56)(1.66 \times 10^{-27} \text{ kg})$$

$$= 9.3 \times 10^{-26} \text{ kg}$$

ปริมาตรทรงกลม คือ

$$V = \frac{4}{3}\pi R^3 = \frac{4}{3}\pi(4.6 \times 10^{-15} \text{ m})^3$$

$$= 4.1 \times 10^{-43} \text{ m}^3$$

ค่าความหนาแน่น  $\rho$  คำนวณได้จาก

$$\rho = \frac{m}{V} \approx \frac{9.3 \times 10^{-26} \text{ kg}}{4.1 \times 10^{-43} \text{ m}^3}$$

$$= 2.3 \times 10^{17} \text{ kg/m}^3$$

**คำตอบ** นิวเคลียสของธาตุนี้มีมวล  $9.3 \times 10^{-26}$  กิโลกรัม ความหนาแน่น  $2.3 \times 10^{17}$  กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ตัวอย่างที่ 7.7 กำหนดให้รัศมีของคาร์บอนอะตอมเท่ากับ 0.075 nm จงหาอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของนิวเคลียสของ  $^{12}\text{C}$  ต่อปริมาตรของอะตอมของ  $^{12}\text{C}$

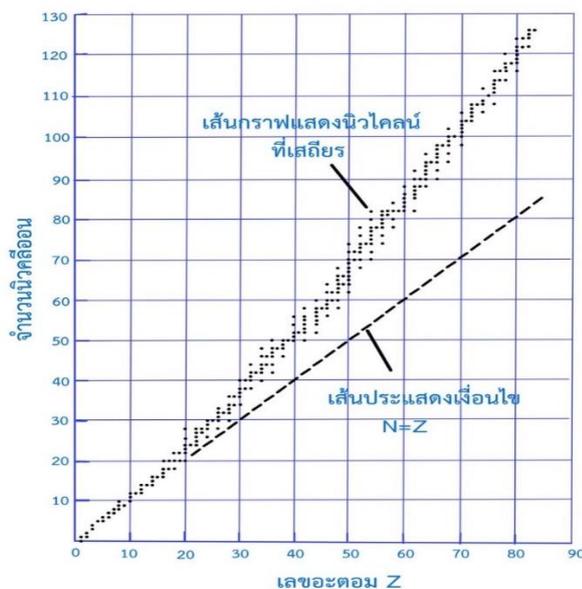
วิธีทำ จากสมการ (7-4)

$$\begin{aligned}
 R &= R_0 A^{1/3} \\
 \text{รัศมีของนิวเคลียสของ } ^{12}\text{C} &= (1.2 \times 10^{-15} \text{ m})(12)^{1/3} \\
 &= 2.747 \times 10^{-15} \text{ m} \\
 \frac{\text{ปริมาตรของนิวเคลียส}}{\text{ปริมาตรของอะตอม}} &= \frac{\frac{4}{3}\pi(2.747 \times 10^{-15} \text{ m})^3}{\frac{4}{3}\pi(0.075 \times 10^{-9} \text{ m})^3} \\
 &= 4.9 \times 10^{-14}
 \end{aligned}$$

คำตอบ อัตราส่วนปริมาตรของนิวเคลียสเท่ากับ  $4.9 \times 10^{-14}$

## 7.6 เสถียรภาพนิวเคลียร์ (Stability of nucleus)

แรงผลักรวมระหว่างกลุ่มของโปรตอนที่อยู่รวมกันอยู่ในนิวเคลียสซึ่งแรงผลักรวมนี้มีค่ามากนั้นอาจคาดได้ว่าจะทำให้นิวเคลียสแตกออกจากกัน แต่เนื่องจากมันไม่ได้เกิดขึ้นจริง ดังนั้นจึงต้องมีแรงต้านดึงคู่ให้โปรตอนรวมกันอยู่ได้ภายในนิวเคลียส นั่นคือแรงนิวเคลียร์ ซึ่งเป็นแรงดึงดูดระยะสั้นมาก แรงนิวเคลียร์นี้ยังกระทำอันตรกิริยาระหว่างคู่ของนิวตรอนและระหว่างนิวตรอนกับโปรตอนด้วย โดยแรงนิวเคลียร์จะแรงกว่าแรงผลักรวมภายในนิวเคลียส ดังนั้นนิวเคลียสจึงยังคงตัวอยู่ได้ แรงนิวเคลียร์เป็นอิสระจากประจุไฟฟ้า เป็นแรงที่เกี่ยวข้องกับอันตรกิริยาระหว่างโปรตอน-โปรตอน โปรตอน-นิวตรอน และนิวตรอน-นิวตรอน จะเหมือนกันทุกกรณี ซึ่งแตกต่างอย่างสิ้นเชิงกับแรงผลักรวมที่เพิ่มขึ้นมาจากอันตรกิริยาระหว่างโปรตอนกับโปรตอน จากการทดลองเรื่องการกระเจิงและการศึกษาพลังงานยึดเหนี่ยวนิวเคลียร์ ช่วงสั้นๆ ของแรงนิวเคลียร์นี้แสดงได้ดังภาพที่ 7.1



ภาพที่ 7.1 แสดงกราฟระหว่างจำนวนนิวตรอน N กับเลขอะตอม Z ของนิวเคลียสที่เสถียร

จากภาพที่ 7.1 แรงนิวเคลียร์ส่งผลให้มีนิวเคลียสที่เสถียรประมาณ 270 ชนิด ส่วนนิวเคลียสอื่น ๆ จำนวนเป็นร้อยก็สามารถถูกสังเกตรพบได้แต่นิวเคลียสเหล่านั้นไม่เสถียร จากกราฟระหว่างเลขนิวตรอนกับเลขอะตอม ของกลุ่มนิวเคลียสที่เสถียร นิวเคลียสที่เสถียรจะแทนด้วยจุดสีดำ ซึ่งมีแนวช่วงแคบ ๆ ที่เรียกว่า เส้นของเสถียรภาพ จะสังเกตเห็นว่า นิวเคลียสเบาที่เสถียรจะมีจำนวนโปรตอนเท่ากับจำนวนนิวตรอน ซึ่งก็คือ  $N = Z$  และยังสังเกตเห็นว่านิวเคลียสหนักที่เสถียร จำนวนนิวตรอนจะมากกว่าจำนวนโปรตอน ซึ่งมีค่า  $Z = 20$  ขึ้นไป ทำให้เส้นของเสถียรภาพเบนออกจากเส้นที่แสดง  $N = Z$  ขึ้นไปทางด้านบน การเบี่ยงเบนนี้อธิบายได้ว่า เมื่อเราสังเกตรพบจำนวนโปรตอนเพิ่มขึ้น จะทำให้ความแรงของแรงคูลอมบ์มีปริมาณเพิ่มขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มที่ทำให้นิวเคลียสแยกออกจากกัน ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีนิวตรอนมากขึ้น เพื่อให้นิวเคลียสยังคงอยู่ในสถานะที่เสถียร เพราะว่ามีนิวตรอนทำให้เกิดได้เฉพาะแรงนิวเคลียร์ดึงดูด แต่ท้ายที่สุดแล้วแรงคูลอมบ์ซึ่งเป็นแรงผลักระหว่างโปรตอนจะไม่สามารถถูกชดเชยด้วยการเพิ่มจำนวนนิวตรอนให้มากขึ้นได้ ซึ่งจุดนี้เป็นจุดที่มี  $Z = 83$  หมายความว่า ธาตุที่มีโปรตอนมากกว่า 83 จะมีนิวเคลียสที่ไม่เสถียร

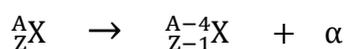
## 7.7 สารกัมมันตภาพรังสี (Radioactivity)

ในปี ค.ศ. 1896 เฮนรี เบคเคอเรล ได้ค้นพบว่า รังสีที่ผลึกของเกลือยูเรเนียมปล่อยออกมา โดยไม่มีการกระตุ้นจากภายนอกเป็นรังสีชนิดใหม่ซึ่งเกิดขึ้นเอง ต่อมาได้เรียกรังสีนี้ว่า กัมมันตภาพรังสี ต่อมา มารีคูรี ได้รายงานการค้นพบธาตุกัมมันตรังสี สองชนิดคือ พอลอเนียม และเรเดียม นอกจากนี้จากผลการทดลองจำนวนมากชี้ให้เห็นว่ากัมมันตภาพรังสีตามที่เรากล่าวถึง อยู่ในขณะนี้ เป็นผลจากการสลาย หรือการแตกสลายของนิวไคลด์ที่ไม่เสถียรนั่นเอง

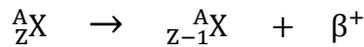
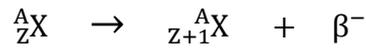
การเกิดกัมมันตภาพรังสี เป็นปรากฏการณ์อย่างหนึ่งของธาตุบางชนิดที่มีอยู่ตามธรรมชาติ สามารถที่จะแผ่รังสีออกมาได้เองโดยไม่ต้องมีการกระตุ้นหรือให้พลังงานซึ่งจะแตกต่างจากธาตุทั่วไปที่ต้องมีการกระตุ้นจึงจะมีการแผ่รังสี

การแผ่รังสีเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภายในของนิวเคลียสของธาตุกัมมันตรังสี การที่นิวเคลียสของธาตุกัมมันตรังสีเปลี่ยนแปลงสภาพเป็นนิวเคลียสของธาตุใหม่ เรียกว่าการสลายตัวของธาตุกัมมันตภาพรังสี สำหรับสารกัมมันตภาพรังสีสามารถแผ่รังสีได้ 3 ชนิดคือ

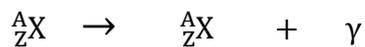
1. รังสีแอลฟา (Alpha decay) เมื่อมีการแผ่รังสีชนิดนี้ออกมา จะทำให้ได้อนุภาคที่เป็นนิวเคลียสของฮีเลียม  ${}^4_2\text{He}$  ออกมา ดังสมการข้างล่าง



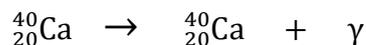
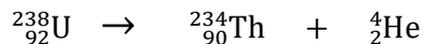
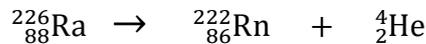
2. รังสีบีตา (Beta decay) เป็นการปล่อยอนุภาคที่เป็นอิเล็กตรอนหรือโพซิตรอนออกมา โดยที่โพซิตรอนเป็นอนุภาคที่มีลักษณะคล้ายกับอิเล็กตรอนที่มีประจุไฟฟ้าเป็น  $+e$  และเพื่อชี้ให้เห็นถึงความคล้าย และความแตกต่างกันจึงใช้สัญลักษณ์  $\beta^-$  แทนอิเล็กตรอน และ  $\beta^+$  แทนโพซิตรอน ดังสมการข้างล่าง



2. รังสีแกมมา (Gamma decay) ซึ่งเป็นรังสีที่มีโฟตอนพลังงานสูงเกิดจากนิวไคลด์สลายตัวทำให้มวลหรือประจุเปลี่ยนแปลง ดังสมการข้างล่าง

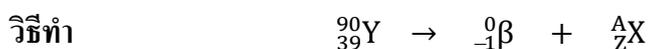


ตัวอย่างการแผ่รังสีของสารกัมมันตภาพรังสี



รังสีทั้ง 3 ชนิดนี้ สามารถตรวจสอบได้โดยการปล่อยให้เคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็ก รังสีแกมมาจะไม่เบี่ยงเบนในสนามแม่เหล็ก เนื่องจากไม่มีประจุ นอกจากนี้อำนาจการทะลุทะลวงยังต่างกันด้วย รังสีแอลฟามีมวลมากความเร็วน้อยจึงทะลุทะลวงได้น้อย รังสีแกมมามีความเร็วเท่าแสงสามารถทะลุทะลวงได้มาก ในการกั้นรังสีแกมมาจึงต้องใช้ตะกั่วแผ่นหนา ๆ

ตัวอย่างที่ 7.10 ธาตุกัมมันตรังสี  ${}^{90}_{39}\text{Y}$  ปล่อยอนุภาคบีตาออกมาตัวหนึ่ง ถามว่าไอโซโทปผลิตภัณฑ์เป็นอะไร



$$90 = 0 + A, A = 90; 39 = -1 + Z, Z = 39 + 1 = 40$$

จากตารางธาตุ  $Z = 40$  คือ ธาตุเซอร์โคเนียม ดังนั้น ไอโซโทปผลิตภัณฑ์ คือ เซอร์โคเนียม - 90  
**คำตอบ** ดังนั้น จะได้ธาตุ  ${}_{40}^{90}\text{Zr}$

**ตัวอย่างที่ 7.11** พลูโทเนียม-246,  ${}_{94}^{246}\text{Pu}$  ปล่อยอนุภาคเบตาออกมา 2 ตัวอนุภาคแอลฟา 2 ตัว และรังสีแกมมาหลายตัวตามกันมา จงหาไอโซโทปผลิตภัณฑ์คืออะไร

**วิธีทำ**

$${}_{94}^{246}\text{Pu} \rightarrow 2 {}_{-1}^0\beta + 2 {}_2^4\alpha + n {}_0^0\gamma + {}_Z^AX$$

$$246 = 0 + 8 + 0 + A, A = 246 - 8 = 238$$

$$94 = -2 + 4 + 0 + Z, Z = 94 - 2 = 92$$

จากตารางธาตุ  $Z = 92$  คือ ธาตุยูเรเนียม

**คำตอบ** ดังนั้น ไอโซโทปผลิตภัณฑ์ คือ ยูเรเนียม-238

## 7.8 ครึ่งชีวิต (Half life)

ครึ่งชีวิตของกัมมันตภาพรังสีหมายถึง เมื่อช่วงเวลาผ่านไปเท่ากับครึ่งชีวิตของธาตุหรือสารนั้นๆ แล้วจะทำให้ธาตุหรือสารนั้นเหลืออยู่ครึ่งหนึ่ง เช่น สารตัวอย่างกัมมันตรังสีคาร์บอน อยู่  $x$  อะตอมแล้ว โดยสารกัมมันตรังสีคาร์บอนนี้มีครึ่งชีวิตเท่ากับ 5,730 ปี เพราะฉะนั้นแล้วเมื่อเวลาผ่านไป 5,730 ปีก็จะเหลือคาร์บอนนี้อยู่ครึ่งหนึ่งของอะตอมเดิมที่มีอยู่นั้นคือเท่ากับ  $\frac{x}{2}$  อะตอม และเมื่อเวลาผ่านไปอีก 5,730 ปี ก็จะเหลืออะตอมของคาร์บอนนี้อยู่  $\frac{x}{4}$  อะตอม เป็นอย่างนี้ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งไม่เหลืออะตอมของคาร์บอนนี้อีกเลย กระบวนการสลายตัวในธรรมชาติเกิดขึ้นแบบสุ่มและสามารถที่จะอธิบายได้ด้วยการคำนวณเชิงสถิติสำหรับสารกัมมันตรังสีที่มีขนาดอยู่ในระดับมหภาคที่ประกอบไปด้วยนิวเคลียสของธาตุกัมมันตรังสีจำนวนมาก สำหรับสารที่มีนิวเคลียสจำนวนมาก อัตราของกระบวนการสลายตัวที่เกิดเฉพาะในแต่ละสารตัวอย่างจะแปรผันตรงกับจำนวนของนิวเคลียสกัมมันตรังสีที่มีอยู่ในขณะนั้น ถ้า  $N$  คือจำนวนของนิวเคลียสของธาตุกัมมันตรังสีที่ยังไม่สลายตัวที่ขณะหนึ่ง อัตราการเปลี่ยนแปลง  $N$  ตามเวลา คือ

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (7-6)$$

เมื่อ

$\frac{dN}{dt}$  คือ อัตราการสลายตัว

$N$  คือ จำนวนนิวเคลียสเริ่มต้น

$\lambda$  คือ ค่าคงตัวของการสลายตัว

จากสมการ

จะได้

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

เมื่ออินทิเกรตสมการ จะได้

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt \quad (7-7)$$

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = \lambda \int_0^t dt$$

$$\ln N - \ln N_0 = -\lambda t - 0 \quad (7-8)$$

จะได้

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (7-9)$$

เมื่อค่าคงตัว  $N_0$  แสดงถึงจำนวนของนิวเคลียสของธาตุกัมมันตรังสี ที่ยังไม่สลายตัวที่เวลา  $t = 0$  สมการ (7-9) แสดงให้เห็นว่าจำนวนของนิวเคลียสของธาตุกัมมันตรังสีที่ยังไม่สลายตัวในสารตัวอย่างที่พิจารณาจะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลตามเวลา กราฟระหว่าง  $N$  และ  $t$  แสดงดังภาพที่ 7.2 แสดงถึงการสลายตัวในธรรมชาติ

ต่อมากำหนดให้  $R$  คือ อัตราการสลายตัวของกัมมันตภาพรังสี หรือกัมมันตภาพ มีหน่วยเป็น Decays / s หรือ Decay / hr หรือ Decays / yr

ดังนั้น

$$R = \left| \frac{dN}{dt} \right| = N_0 \lambda e^{-\lambda t}$$

ให้

$$R_0 = N_0 \lambda \quad (7-10)$$

เมื่อ  $R_0$  คือ ค่าอัตราการสลายตัวเริ่มต้นของกัมมันตภาพรังสี

$N_0$  คือ ค่าจำนวนนิวไคลด์เริ่มต้น

ดังนั้น

$$R = R_0 e^{-\lambda t} \quad (7-11)$$

กำหนดให้

$$N = \frac{N_0}{2}$$

เมื่อ

$$t = T_{1/2}$$

ดังนั้น

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \quad (7-12)$$

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (7-13)$$

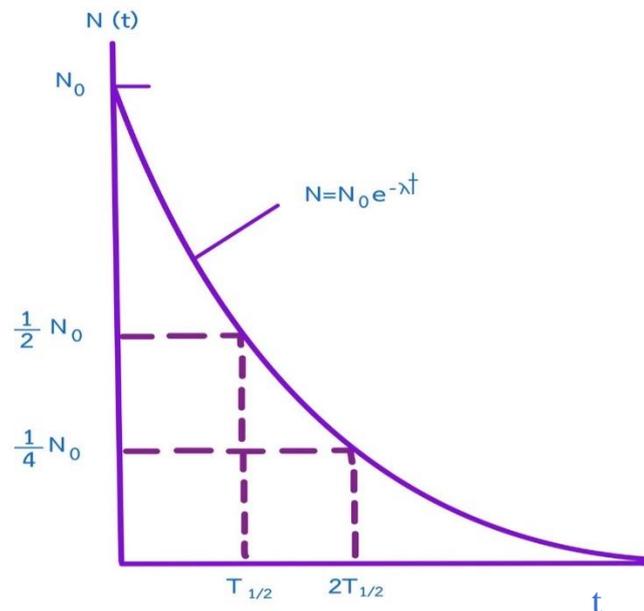
หรือ

$$T_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (7-14)$$

หน่วยของกัมมันตภาพรังสีที่ใช้อยู่บ่อยครั้งคือ คูรี (Ci) กำหนดให้เป็น

$$1 \text{ Ci} \equiv 3.7 \times 10^{10} \text{ decays/s}$$

ค่านี้เป็นหน่วยดั้งเดิมที่ถูกกำหนดขึ้น เพราะมันเป็นการประมาณค่าการเปล่งกัมมันตภาพรังสีของธาตุเรเดียม 1 g ส่วนหน่วยในระบบ SI ของกัมมันตภาพรังสีคือ เบคเคอเรล (Bq)  $1 \text{ Bq} = 1 \text{ decay/s}$



ภาพที่ 7.2 แสดงกราฟอัตราการสลายตัวของกัมมันตภาพรังสี

ตัวอย่างที่ 7.8 ธาตุกัมมันตภาพรังสีชนิดหนึ่งมีครึ่งชีวิตเท่ากับ 3.8 วัน จงหาค่าคงตัวของการสลายตัวของสารกัมมันตภาพรังสีนี้

วิธีทำ จากสมการ  $T_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda}$

จะได้ค่าคงตัวการสลายตัวเท่ากับ

$$\lambda = \frac{0.693}{T_{1/2}}$$

เมื่อแทนค่าครึ่งชีวิตลงไปจะได้  $\lambda = \frac{0.693}{3.8 \times 86400}$

$$= 2.1 \times 10^{-6} \text{ ต่อวินาที}$$

**คำตอบ** ค่าคงตัวของการสลายตัวเท่ากับ  $2.1 \times 10^{-6}$  ต่อวินาที

ตัวอย่างที่ 7.9 ที่เวลา  $t=0$  ตัวอย่างของธาตุกัมมันตรังสีจำนวนของ  $^{11}\text{C}$  อยู่ 3.5 ไมโครกรัม ซึ่งมีครึ่งชีวิต 20.4 นาที (ก) จงหาจำนวนนิวเคลียส  $N_0$  ในสารตัวอย่างที่เวลา  $t=0$  (ข) อัตราการเกิดปฏิกิริยาของตัวอย่างนี้ในตอนเริ่มต้นและหลังจากเวลาผ่านไป 8 ชั่วโมงมีค่าเท่าใด

วิธีทำ (ก) มวลโมเลกุลของ  $^{11}\text{C}$  อยู่ที่ประมาณ 11 กรัมต่อโมล

หาจำนวนโมลของ  $^{11}\text{C}$  บริสุทธิ์ในสารตัวอย่าง 3.5  $\mu\text{g}$

$$n = \frac{3.5 \times 10^{-6} \text{ g}}{11 \text{ g/mol}} = 3.18 \times 10^{-7} \text{ โมล}$$

หาจำนวนของนิวเคลียสที่ยังไม่สลายตัวของ  $^{11}\text{C}$  บริสุทธิ์ในปริมาณเท่านี้

$$\begin{aligned} N_0 &= (3.18 \times 10^{-7} \text{ โมล})(6.02 \times 10^{23} \text{ นิวไคลด์ต่อโมล}) \\ &= 1.92 \times 10^{17} \text{ นิวไคลด์} \end{aligned}$$

**คำตอบ** จำนวนนิวเคลียสในสารตัวอย่างเท่ากับ  $1.92 \times 10^{17}$  นิวไคลด์

(ข) หาอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นของสาร

$$\begin{aligned} R_0 &= N_0 \lambda = \frac{0.693}{T_{1/2}} N_0 \\ &= \frac{0.693}{20.4 \text{ min}} \left( \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \right) (1.92 \times 10^{17}) \\ &= (5.66 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1})(1.92 \times 10^{17}) \\ &= 1.09 \times 10^{14} \text{ แบคเคอเรล} \end{aligned}$$

จากสมการหาอัตราการเกิดปฏิกิริยา  $R = R_0 e^{-\lambda t}$

$$\begin{aligned} &= (1.09 \times 10^{14} \text{ Bq}) e^{-(5.66 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1})(2.88 \times 10^4 \text{ s})} \\ &= 8.96 \times 10^6 \text{ แบคเคอเรล} \end{aligned}$$

ที่เวลา  $t = 8$  ชั่วโมง

$$= 2.88 \times 10^4 \text{ วินาที}$$

**คำตอบ** อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารที่เวลา 8 ชั่วโมง เท่ากับ  $2.88 \times 10^4$  วินาที

สำหรับครึ่งชีวิตและชนิดของการแผ่รังสีของธาตุบางชนิดแสดงดังตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 ค่าครึ่งชีวิตและชนิดของการแผ่รังสีของธาตุบางชนิด

นิวเคลียส	ครึ่งชีวิต	นิวเคลียสเสถียร
ยูเรเนียม ( $^{238}_{92}\text{U}$ )	$4.47 \times 10^9$ ปี	$^{206}_{82}\text{Pb}$
แอกทีเนียม ( $^{235}_{92}\text{U}$ )	$7.04 \times 10^8$ ปี	$^{207}_{82}\text{Pb}$
ทอเรียม ( $^{232}_{90}\text{Th}$ )	$1.41 \times 10^{10}$ ปี	$^{208}_{82}\text{Pb}$

ที่มา: Serway, R.A, Mose, C.J, Moyer C.A., 2005

## 7.9 ปฏิกิริยานิวเคลียร์ (Nuclear reaction)

ปฏิกิริยานิวเคลียร์คือ ปฏิกิริยาที่มีการเปลี่ยนแปลงต่อนิวเคลียสของอะตอมโดยจะเกิดปฏิกิริยานี้ในโครงสร้างระดับนิวเคลียส ปฏิกิริยานิวเคลียร์อาจเป็นการสลายของนิวเคลียสกัมมันตรังสี หรือการยิงอนุภาคที่มีพลังงานสูงเข้าชนนิวเคลียสดังเช่นในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในนิวเคลียส รัทเทอร์ฟอร์ด เป็นบุคคลแรกที่สังเกตพฤติกรรมของปฏิกิริยาดังกล่าว ในปี ค.ศ. 1991 ต่อมาได้มีการพัฒนาเครื่องเร่งอนุภาคในช่วงปี ค.ศ. 1930 เป็นต้นมา ด้วยเทคโนโลยีขั้นสูงของเครื่องเร่งอนุภาคและตัวตรวจจับอนุภาคในแต่ละวัน เครื่องยิงอนุภาคแฮดรอนขนาดใหญ่ (Large Hadron Collider) ในยุโรปสามารถที่จะเร่งอนุภาคให้มีพลังงานถึง 14000 GeV อนุภาคพลังงานสูงเหล่านี้ถูกใช้เพื่อสร้างอนุภาคชนิดใหม่ที่มีคุณสมบัติที่ช่วยให้เข้าใจและไขปริศนาของนิวเคลียสได้

พิจารณานิวเคลียสของธาตุ X ถูกยิงด้วยอนุภาค a ทำให้เกิดนิวเคลียสของธาตุใหม่ คือธาตุ Y และมีการปล่อยอนุภาค b ออกมา โดยเขียนเป็นสมการได้คือ

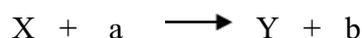


ปฏิกิริยาดังกล่าวเขียนได้เป็นสัญลักษณ์คือ



โดยทั่วไปของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นผลรวมของโปรตอน และนิวตรอน ทั้งก่อนและหลังจากเกิดปฏิกิริยาจะต้องมีค่าเท่ากันเสมอ

สำหรับการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์นั้นจะพบว่า ผลรวมของมวลก่อนและหลังเกิดปฏิกิริยานั้นจะมีค่าไม่เท่ากัน โดยจะมีมวลบางส่วนหายไปหรือเพิ่มขึ้น ซึ่งมวลที่หายไปหรือเพิ่มขึ้นนี้จะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของพลังงานที่เกิดขึ้นนั่นเอง ถ้าให้ Q แทนค่าพลังงานที่เกิดจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ สำหรับปฏิกิริยา



เราสามารถหาพลังงานที่เกิดขึ้นได้จากสมการ

$$Q = (M_a + M_x - M_b - M_y)c^2 \quad (7-16)$$

เมื่อ  $Q$  คือ พลังงานที่เกิดจากปฏิกิริยา

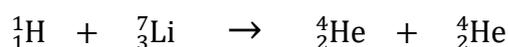
$M_a$  คือ มวลของธาตุ  $a$

$M_x$  คือ มวลของธาตุ  $x$

$M_b$  คือ มวลของธาตุ  $b$

$M_y$  คือ มวลของธาตุ  $y$

ตัวอย่างเช่น พิจารณาปฏิกิริยาของ  ${}^7\text{Li}(p, \alpha){}^4\text{He}$  ตัวแปร  $p$  แทน โปรตอน ซึ่งก็คือ นิวเคลียสของอะตอมไฮโดรเจน ดังนั้นเราสามารถเขียนปฏิกิริยานี้ในรูปของเทอมที่ขยายแล้วได้เป็น

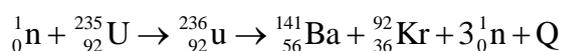


ค่า  $Q$  สำหรับปฏิกิริยานี้คือ 17.3 MeV สำหรับค่าพลังงานที่เกิดจากปฏิกิริยานิวเคลียร์นี้เราสามารถหาได้จากค่าคิวโดยถ้าพลังงานที่ได้มีค่าเป็นบวก แสดงว่ามีพลังงานเกิดขึ้นในรูปของพลังงานจลน์เรียกปฏิกิริยานี้ว่า **ปฏิกิริยาคายความร้อน** (Exothermic reaction) ในกรณีที่ค่าคิวหรือพลังงานที่ได้มีค่าเป็นลบเรียกปฏิกิริยานี้ว่า **ปฏิกิริยาดูดความร้อน** (Endothermic reaction) เพื่อที่จะให้ระบบโคดเดี่ยวเป็นไปตามกฎการอนุรักษ์โมเมนตัมปฏิกิริยาดูดกลืนพลังงานจะไม่เกิดขึ้นจนกว่าอนุภาคที่ยิงใส่นิวเคลียสจะมีพลังงานจลน์มากกว่าค่าคิว พลังงานน้อยที่สุดที่จำเป็นต้องใช้เพื่อให้เกิดปฏิกิริยา เรียกว่า **พลังงานขีดเริ่ม**

### 7.9.1 ปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชัน

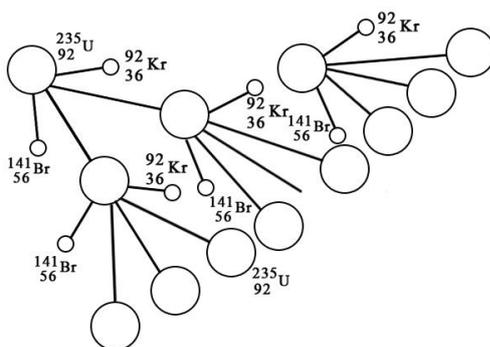
ปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชัน (Fission reaction) หรือปฏิกิริยาการแบ่งแยกตัวของนิวเคลียส คือ กระบวนการที่เกิดจากการยิงนิวตรอนไปยังนิวเคลียสของอะตอมหนัก ซึ่งผลจากการยิงนั้นจะทำให้ นิวเคลียสแยกออกจากกันเป็นสองส่วนที่เกือบเท่ากัน สำหรับในปฏิกิริยานี้จะมีมวลบางส่วนหายไป กลายเป็นพลังงานออกมา ซึ่งนอกจากจะได้พลังงานออกมาแล้ว ผลจากการเกิดปฏิกิริยานี้ยังทำให้เกิดนิวตรอนขึ้นมาใหม่อีก 2 – 3 ตัว ซึ่งนิวตรอนที่เกิดขึ้นมาใหม่นี้จะวิ่งด้วยความเร็วสูง และจะวิ่งไปชนนิวเคลียสของอะตอมอื่นอีกต่อไป ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาลักษณะเป็นลูกโซ่ ผลของการเกิดปฏิกิริยานี้จะทำให้ได้พลังงานเป็นจำนวนมาก

สำหรับตัวอย่างของปฏิกิริยาแบ่งแยกนี้พิจารณาการยิงนิวตรอนไปยังนิวเคลียสของ  ${}^{235}_{92}\text{U}$  ซึ่งจะให้นิวเคลียสเกิดการแยกตัวออกเป็นสองส่วน คือเกิดนิวเคลียสของแบเรียม (Ba) และคริปทอน (Kr) ดังสมการ



โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะมีค่า  $Q = 200 \text{ MeV}$  ซึ่งจากปฏิกิริยาถือว่าเป็นพลังงานที่มีค่าสูงมาก สามารถที่จะลำดับการแยกตัวได้ดังนี้

- 1 นิวเคลียสแบ่งแยกตัวก้อนหนึ่ง ( $^{235}\text{U}$ ) จับกับนิวตรอน
- 2 ผลของการจับนิวตรอนทำให้นิวเคลียสก้อนนั้น ไปอยู่ ณ สถานะกระตุ้นสถานะหนึ่ง เป็น  $^{236}\text{U}$  โดยมีการสั่นอย่างรุนแรง อันเนื่องจากพลังงานส่วนเกินที่มีในขั้นนี้
- 3 นิวเคลียสก้อนดังกล่าวจะบิดเบี้ยว ในขณะเดียวกัน แรงผลักระหว่างโปรตอนต่างๆ ซึ่งในแต่ละส่วนมีการแบ่งแยก ทำให้เกิดการบิดเบี้ยวยิ่งขึ้น
- 4 ในที่สุดนิวเคลียสก้อนนี้ก็แบ่งแยกออกเป็นสองชิ้น โดยมีนิวตรอนจำนวนหนึ่งเกิดขึ้น ในกระบวนการนี้ด้วย ดังภาพที่ 7.3



ภาพที่ 7.3 แสดงการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เป็นแบบลูกโซ่

เนื่องจากระบวนการแบ่งแยกนิวเคลียสนั้น ในการเกิดปฏิกิริยาแต่ละครั้ง จะทำให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ (Chain reaction) ต่อไปอีกอย่างต่อเนื่อง ถ้าไม่มีวิธีควบคุมให้นิวตรอนนี้ช้าลง ก็ย่อมที่จะมีพลังงานเกิดขึ้นอย่างมหาศาล จนทำให้เกิดการระเบิดอย่างรุนแรงได้ ซึ่งหลักการของปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบฟิชชันนี้เอง ที่เป็นหลักการเบื้องต้นในการผลิตระเบิดนิวเคลียร์ และเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์การแบ่งแยกตัว ที่ใช้ธาตุยูเรเนียมเป็นสารตั้งต้นปฏิกิริยา โดยปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบฟิชชันจะให้น้ำเกิดความร้อนกลายเป็นไอน้ำและผ่านเข้าไปในตัวปั่นไฟทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าได้ ซึ่งจะเชื่อมต่อเข้ากับระบบที่หล่อเย็นเพื่อให้น้ำนั้นไหลเวียนกลับไปยังเตาปฏิกรณ์ได้

ตัวอย่างที่ 7.8 ครึ่งชีวิตของ  $^{90}\text{Sr}$  ประมาณ 28 ปี หรือ  $8.8 \times 10^8 \text{ s}$  ถามว่า  $^{90}\text{Sr}$  จำนวน 1 g มีกี่อะตอม ค่าคงตัวของการสลายตัวเป็นเท่าไร และ  $^{90}\text{Sr}$  จำนวนนี้สลายตัวเท่าไรต่อวินาที (เมื่อสตรอนเชียม-90 นี้เป็นผลผลิตฟิชชันกัมมันตรังสีจากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ฟิชชัน)

วิธีทำ 1 โมล มี  $6.02 \times 10^{23}$  อะตอม ดังนั้น  $^{90}\text{Sr}$  90 กรัม มีจำนวนเท่ากับ  $6.02 \times 10^{23}$  อะตอม

การสลายตัว จำนวน  $1 \text{ g} = 10^{-3} \text{ kg}$  มีเท่ากับ  $\frac{6.02 \times 10^{23}}{90} = 6.69 \times 10^{21}$  อะตอม

จาก 
$$T_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda}$$

ดังนั้นค่าคงตัวของการสลายตัว 
$$\lambda = \frac{0.693}{8.8 \times 10^8} = 7.88 \times 10^{-10} \text{ s}^{-1}$$

จาก อัตราการสลายตัว 
$$\frac{dN}{dt} = \lambda N = (6.69 \times 10^{21})(7.88 \times 10^{-10} \text{ s}^{-1}) = 5.27 \times 10^{12} \text{ ต่อวินาที}$$

**คำตอบ** ค่าคงตัวของการสลายตัวเท่ากับ  $7.88 \times 10^{-10}$  ต่อวินาที และมีอัตราการสลายตัว  $5.27 \times 10^{12}$  ต่อวินาที

**ตัวอย่างที่ 7.9** วัดกัมมันตภาพของ  $^{14}\text{C}$  ในวัตถุโบราณชิ้นหนึ่งได้เท่ากับ  $2.8 \times 10^7$  เบคเคอเรล ครึ่งชีวิตของ  $^{14}\text{C}$  มีค่าเท่ากับ 5,730 ปี

(ก) จงหาค่าคงตัวของการสลายตัวในหน่วยต่อวินาที

(ข) จงหาค่ากัมมันตภาพเมื่อเวลาผ่านไป 1000 ปี

วิธีทำ (ก) จาก 
$$\lambda = \frac{0.693}{T_{1/2}} = \frac{0.693}{(5730 \text{ y})(315 \times 10^7 \text{ s/y})} = 3.84 \times 10^{-12} \text{ ต่อวินาที}$$

**คำตอบ** ค่าคงตัวของการสลายตัวเท่ากับ  $3.84 \times 10^{-12}$  ต่อวินาที

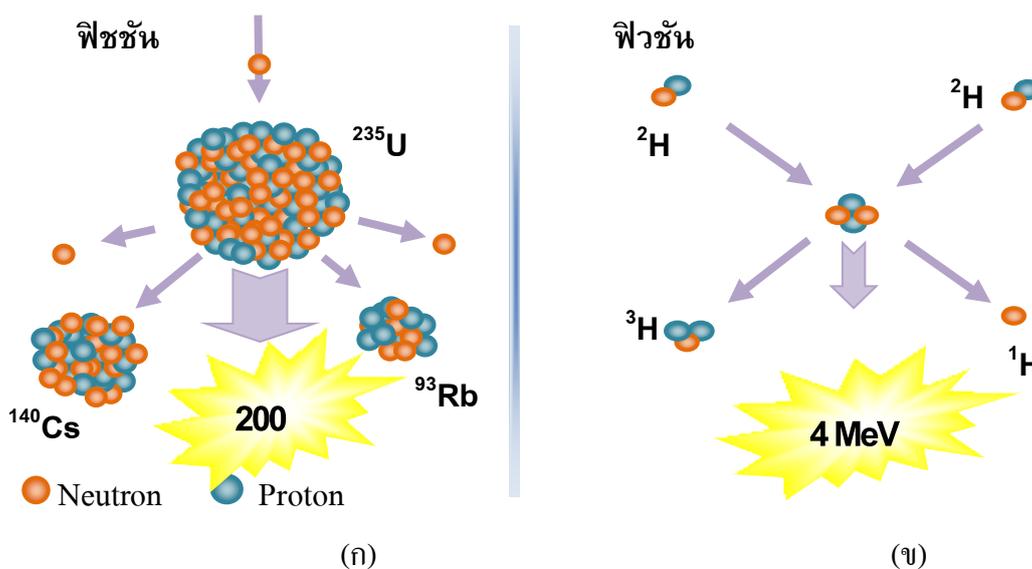
(ข) จาก 
$$N = N_0 e^{-\lambda t} = (2.8 \times 10^7 \text{ Bq}) \exp(-(3.84 \times 10^{-12} \text{ s}^{-1})(3.15 \times 10^{10} \text{ s})) = 2.5 \times 10^7 \text{ เบคเคอเรล}$$

**คำตอบ** ค่ากัมมันตภาพเท่ากับ  $2.5 \times 10^7$  เบคเคอเรล

## 7.9.2 ปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชัน

ปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชัน (Fusion reaction) หรือปฏิกิริยาการหลอมรวมกันของนิวเคลียส นั้น เป็นกระบวนการที่เป็นส่วนกลับของปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบฟิชชัน นั่นคือเป็นกระบวนการที่นิวเคลียสเบาตั้งแต่สองก้อนมาหลอมรวมกันกลายเป็นนิวเคลียสที่มีมวลที่หนักขึ้น ซึ่งก็จะทำให้

มวลที่เกิดก่อนและหลังปฏิกิริยามีค่าไม่เท่ากัน ทำให้เกิดมวลพร่องซึ่งจะเป็นตัวที่ทำให้เกิดพลังงานขึ้นมานั่นเอง โดยการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชันแสดงดังภาพที่ 7.4 (ก) สำหรับปฏิกิริยาหลอมนิวเคลียสนี้ เป็นปฏิกิริยาเกิดขึ้นที่บริเวณดวงอาทิตย์ซึ่งจะเกิดขึ้นในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงมากๆ โดยลักษณะปฏิกิริยาจะเป็นปฏิกิริยาคายพลังงานเมื่อเปรียบเทียบระหว่างปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชันกับปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชันแสดงดังภาพที่ 7.4 (ข)



ภาพที่ 7.4 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ (ก) ฟิวชัน (ข) ฟิวชัน

## 7.10 การประยุกต์ใช้งานพลังงานนิวเคลียร์ (Application of nuclear energy)

ปัจจุบันประเทศไทยมีการใช้พลังงานนิวเคลียร์ ในด้านต่างๆ มากมายตัวอย่าง ได้แก่

### 1. ด้านการแพทย์

ในทางการแพทย์นั้นมีการนำ ไอสารกัมมันตรังสี และรังสีมาใช้ในการตรวจวินิจฉัยและรักษาโรค ทำให้การวินิจฉัย และรักษาโรคของแพทย์ เป็นไปอย่างถูกต้อง และรวดเร็ว ตัวอย่างเช่น

- การรักษาโรคมะเร็งด้วยโคบอลต์-60
- อนุภาคทองคำ-198 ใช้ในการรักษามะเร็งผิวหนัง
- ลวดแทนทาลัม-182 ใช้ในการรักษามะเร็งปากมดลูก
- ไอโอดีน-131 ใช้ตรวจวินิจฉัยและรักษาโรคคอพอก และในรูป Labeled compound

ใช้ตรวจวิเคราะห์การทำงานของไต ระบบโลหิต

- เทคนิเชียม-99 m ใช้ตรวจทางเดินน้ำดี ไต ต่อมไทรอยด์
- เทลเลียม-201 ใช้ตรวจสภาพหัวใจเมื่อทำงานเต็มที่ ตรวจสภาพการไหลของโลหิต

เลี้ยงหัวใจ และตรวจสภาพกล้ามเนื้อหัวใจ

- แกลเลียม-67 ใช้ตรวจการอักเสบต่างๆ ที่เป็นหนอง เช่น ในช่องท้อง ตรวจมะเร็งในต่อมน้ำเหลือง

- อินเดียม-111 ใช้ติดสลาเคมีดเลือดขาว ตรวจหาแหล่งอักเสบของร่างกาย ตรวจการอุดตันของไขสันหลัง ตรวจมะเร็งเต้านม รังไข่ ลำไส้

อีกตัวอย่างหนึ่งคือ เทคนิคการวินิจฉัยทางการแพทย์ที่ใช้กันอย่างกว้างขวางเรียกว่า MRI หรือ การสร้างภาพด้วยเรโซแนนซ์แม่เหล็ก ที่อาศัยพื้นฐานของนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ เนื่องจากอะตอมสองในสามของร่างกายมนุษย์เป็นไฮโดรเจน MRI ใช้งานได้อย่างดีสำหรับการส่องมองเนื้อเยื่อภายในร่างกาย โดยเนื้อเยื่อจะถูกจัดให้อยู่ภายในขดลวดโซลินอยด์ขนาดใหญ่ซึ่งจ่ายสนามแม่เหล็กแต่ขนาดของสนามแม่เหล็กจะเปลี่ยนแปลงตามที่วางตลอดในร่างกายของเรา เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของสนาม อะตอมไฮโดรเจนในส่วนต่าง ๆ ของร่างกายจะมีพลังงานการแยกระหว่างสถานะสปินทั้งสองสถานะแตกต่างกัน ดังนั้นสัญญาณเรโซแนนซ์สามารถที่จะนำมาใช้เพื่อให้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับตำแหน่งของโปรตอน จากนั้นคอมพิวเตอร์จะช่วยวิเคราะห์ข้อมูลของตำแหน่งสำหรับการสร้างออกมาเป็นภาพได้

## 2. ด้านอุตสาหกรรม

มีการใช้เทคโนโลยีนิวเคลียร์ ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่นการใช้วัสดุกัมมันตรังสี และเทคนิคทางรังสี ซึ่งเรียกว่า เทคนิคเชิงนิวเคลียร์ เป็นการนำพลังงานปรมาณูมาใช้ สำหรับประเทศไทย ได้มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในกิจการต่างๆ ตัวอย่างดังต่อไปนี้

- ใช้วัดระดับของไหล สารเคมีต่าง ๆ ในขบวนการผลิตในโรงงานเส้นใยสังเคราะห์ ค่ายรังสีแกมมา
- ใช้ตรวจสอบระดับเศษไม้ในหม้อไอน้ำภายใต้ความดันสูง ในการผลิตไม้อัดแผ่นเรียบ ค่ายรังสีแกมมา
- ควบคุมการไหลผ่านของส่วนผสมในการผลิตปูนซีเมนต์
- วัดความหนาแน่นของน้ำปูนกับเส้นใยหิน ในขบวนการผลิตกระเบื้องกระดาด
- วัดความหนาแน่นในการดูดหินแร่ในทะเล เพื่อคำนวณหาปริมาณแร่ที่ดูดผ่าน
- วัดและควบคุมความหนาแน่นของน้ำโคลนที่จะใช้ในการขุดเจาะอุโมงค์ส่งน้ำใต้ดิน

## 3. ด้านการเกษตร

มีการใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ เช่น การกำจัดศัตรูพืช การปรับปรุงพันธุ์ การเก็บถนอมรักษาผลผลิตให้สามารถเก็บไว้ได้เป็นเวลานาน ไม่ให้เสียหาย เป็นต้น ตัวอย่างเช่นการใช้สารกัมมันตภาพรังสีฉายลงไปที่เนื้อหมูหมัก เพื่อฆ่าเชื้อแบคทีเรีย และจุลินทรีย์บางชนิด ทำให้เนื้อหมูไม่เน่าเสีย และยังคงคุณค่าทางอาหารไว้ได้ ทั้งนี้การควบคุมคุณภาพอาหารและความปลอดภัยอยู่ภายใต้การดูแลของกระทรวงสาธารณสุข ผู้บริโภคจึงสามารถไว้วางใจในการรับประทานอาหาร

เหล่านี้ได้นั่นเอง ตัวอย่างอื่นๆ ที่มีใช้ในประเทศไทยที่มีการเกษตรเป็นอาชีพหลักของประชากร โครงการใช้นิวเคลียร์เทคโนโลยี เพื่อส่งเสริมกิจการเกษตร เช่น

- การใช้เทคนิคนิวเคลียร์วิเคราะห์ดิน เพื่อการจำแนกพื้นที่ปลูก ทำให้ทราบว่า พื้นที่ที่ศึกษาเหมาะสมต่อการเพาะปลูกพืชชนิดใด ควรเพิ่มปุ๋ยชนิดใดลงไป
- เทคนิคการสะกรอยด้วยรังสีใช้ศึกษาเกี่ยวกับการดูดซึมแร่ธาตุ และปุ๋ยคอกต้นไม้ และพืชเศรษฐกิจต่างๆ เพื่อการปรับปรุงการใช้ปุ๋ยให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น
- การฉายรังสีแกมมาเพื่อฆ่าแมลงและไข่ในเมล็ดพืช ซึ่งเก็บไว้ในยุ้งฉาง และภายหลังจากบรรจุในภาชนะเพื่อการส่งออกจำหน่าย
- การใช้เทคนิครังสีเพื่อการขยายพันธุ์สัตว์เลี้ยง และการเพิ่มอาหารนม อาหารเนื้อ ในโค และ กระบือ
- การนำเทคนิคทางรังสีด้านอุทกวิทยา ในการเสาะหาแหล่งน้ำสำหรับการเกษตร
- การใช้เทคนิคการวิเคราะห์ด้วยวิธีอานรังสี วิเคราะห์สารตกค้างในสิ่งแวดล้อมจากการใช้ยาปราบศัตรูพืช ยาฆ่าแมลง ซึ่งมีความสำคัญต่อผู้บริโภค เป็นต้น

#### 4. ด้านสิ่งแวดล้อม

พลังงานนิวเคลียร์ มีส่วนเกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อมใน 2 ด้านคือในด้านการรักษาและพัฒนาสภาพของสิ่งแวดล้อมให้ดีขึ้น อีกด้านหนึ่งคือ การตรวจตรา และควบคุมปริมาณรังสีที่มีอยู่ในธรรมชาติหรือสิ่งแวดล้อมให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่อมวลมนุษย์ และสิ่งมีชีวิตโดยทั่วไป ประโยชน์ของพลังงานนิวเคลียร์ในด้านสิ่งแวดล้อม ได้แก่

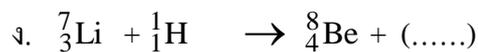
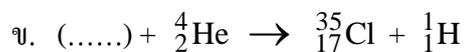
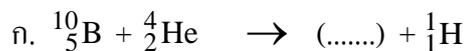
- การใช้รังสีแกมมาฆ่าเชื้อโรคต่าง ๆ ในน้ำทิ้งจากชุมชน และจากโรงพยาบาล เพื่อป้องกันโรคระบาด
- การใช้รังสีแกมมาฆ่าเชื้อโรคในขยะและตะกอน แล้วนำกลับมาทำเป็นปุ๋ยต่อไป
- การใช้รังสีอิเล็กตรอน ในการกำจัดก๊าซอันตราย (SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>) จากปล่องควัน โรงงานอุตสาหกรรม และการเผาถ่านหิน
- การใช้เทคนิคทางนิวเคลียร์วิเคราะห์สารพิษต่างๆ ในดิน พืช อากาศ น้ำ และอาหาร
- การวัดปริมาณรังสีในสิ่งแวดล้อม เช่น ที่อยู่อาศัย และสถานที่ทำงาน เป็นต้น

## 7.11 บทสรุป

นิวเคลียร์ฟิสิกส์คือการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในนิวเคลียสหรือในอะตอมของธาตุที่ประกอบไปด้วยโปรตอน นิวตรอนและอิเล็กตรอน โดยภายในนิวเคลียสประกอบไปด้วยนิวตรอนและโปรตอนที่ยึดกันอยู่ด้วยแรงที่เกิดจากมวลพ้อง นิวเคลียสมีความเสถียรเพราะแรงนิวเคลียร์ระหว่างนิวคลีออนที่ยึดเหนี่ยวให้นิวเคลียสยังคงตัวอยู่ได้ แรงระยะสั้นนี้ครอบคลุมแรงผลักรวมที่ระยะทางน้อยมาก และแรงไม่ขึ้นอยู่กับการประจุไฟฟ้า นิวเคลียสของธาตุเบาที่เสถียรจะมีจำนวนของโปรตอนและนิวตรอนในปริมาณที่เท่ากัน นิวเคลียสของธาตุหนักที่เสถียรจะมีจำนวนนิวตรอนมากกว่าโปรตอน นิวเคลียสที่มีความเสถียรมากที่สุดจะมีทั้งค่า  $Z$  และ  $N$  ที่เป็นเลขคู่ ความแตกต่างระหว่างผลรวมของมวลของทุกนิวคลีออนและมวลที่แท้จริงของนิวคลีออน เมื่อนำไปคูณกับ  $c^2$  จะได้พลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียส สารกัมมันตภาพรังสีคือสารที่มีการสลายตัวให้อนุภาค แอลฟา เบตาและแกมมาอยู่ตลอดเวลา โดยไม่ต้องมีการกระตุ้นเหมือนสารอื่น ปฏิกิริยานิวเคลียร์คือปฏิกิริยาที่เกิดจากการรวมตัว หรือการแบ่งแยกกันของธาตุ ซึ่งมวลของอนุภาคที่ทำปฏิกิริยาก่อนและหลังทำปฏิกิริยาไม่เท่ากันทำให้เกิดมวลพ้องที่ส่งผลให้เกิดพลังงานออกมาในลักษณะเป็นลูกโซ่ ถ้าสารกัมมันตภาพรังสีประกอบด้วยนิวเคลียสของธาตูกัมมันตรังสีจำนวน  $N_0$  ที่เวลา  $t = 0$  จำนวนนิวเคลียสที่เหลืออยู่  $N$  หลังจากเวลาผ่านไป  $t$  คือ  $N = N_0 e^{-\lambda t}$  ในการสลายตัวให้อนุภาคแอลฟา ปฏิกิริยานิวเคลียร์สามารถเกิดขึ้นได้เมื่อนิวเคลียสของอะตอมเป้าหมาย ถูกยิงด้วยอนุภาคนิวเคลียสหนึ่งผลจากการชนกันของอนุภาคจะทำให้เกิดนิวเคลียสที่เกิดใหม่ และอนุภาคอีกชนิดหนึ่งปลดปล่อยออกมา

### แบบฝึกหัด

1. จงหาจำนวน A, Z, e, p, n ของธาตุ  $X_9^{20}$  [คำตอบ 20, 9, 9, 9, 11]
2. นิวเคลียสของ  $^{226}_{88}\text{Ra}$  เมื่อสลายตัวได้ธาตุใหม่คือ  $^{222}_{86}\text{Rn}$  จะให้รังสีอะไรออกมา [คำตอบ แอลฟา]
3. เริ่มต้นมีธาตุ X อยู่ 20 g เมื่อผ่านไป 10 วัน เหลืออยู่ 5 g ธาตุ X มีครึ่งชีวิตเท่าไร [คำตอบ 5 วัน]
4. อะลูมิเนียม -28 แดกตัวให้อ่อนภาคเบตา ตอนแรกวัดกัมมันตภาพของสารนี้ได้ 0.01664 คูรี แต่เมื่อเวลาผ่านไป 9.24 ชั่วโมง อัตราการสลายตัวเหลือเพียง 0.00104 คูรี ดังนั้นเวลาครึ่งชีวิตของอะลูมิเนียมคือเท่าไร [คำตอบ 2.32 ชั่วโมง]
5. จงหาพลังงานยึดเหนี่ยวของ  $^{107}_{47}\text{Ag}$  ซึ่งมีมวลเท่ากับ 106.905 u [คำตอบ 915 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์]
6. เรเดียม -226 มีเวลาครึ่งชีวิต 1620 ปี ถ้าจะให้อัตราการสลายตัวเป็น 20,000 ต่อวินาที จะต้องใช้มวลของเรเดียมเท่าไร [คำตอบ  $5.54 \times 10^{-7}$  กรัม]
7. ในการทดลองระเบิดปรมาณูลูกหนึ่งซึ่งใช้  $^{235}_{92}\text{U}$  ทำให้เกิดปฏิกิริยาฟิชชันได้พลังงานทั้งสิ้น  $9.632 \times 10^{13}$  จูล หลังการเกิดระเบิด อยากทราบว่ามวลจะหายไปทั้งสิ้นกี่กิโลกรัม [คำตอบ  $1.07 \times 10^{-3}$  กิโลกรัม]
8. จงหานิวเคลียสที่ถูกต้องที่ควรเติมลงในวงเล็บ (.....) ในปฏิกิริยานิวเคลียร์ต่อไปนี้ [คำตอบ อยู่ในภาคผนวก]



## เอกสารอ้างอิง

- ก่องกัญจน์ ภัทราภาณจน์ และชนภาณจน์ ภัทราภาณจน์. (2554). **ฟิสิกส์ 2 ตัวอย่างและโจทย์ พร้อม คำเฉลย**. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เชิญโชค ศรขวัญ และคณะ. (2546). **ฟิสิกส์ทั่วไป 2 General Physics II 2<sup>nd</sup> ed.** กรุงเทพมหานคร : คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล.
- ปิยพงษ์ สิทธิคง. (2551). **ฟิสิกส์ระดับอุดมศึกษา เล่ม 3**. กรุงเทพมหานคร: วิรัตน์ เอ็ดดุกะชั้น จำกัด
- ทวี นิมน้อย และมนู เฟื่องฟู้ง. (2541). **ฟิสิกส์พื้นฐานระดับมหาวิทยาลัย 1**. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- วิฑูร ชื่นวชิรศิริ และวีระชัย สิริพันธ์วรารักษ์. (2550). **ฟิสิกส์เบื้องต้น**. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยมหิดล.
- อนุกรรมการปรับปรุงหลักสูตรวิทยาศาสตร์ ทบวงมหาวิทยาลัย. (2543). **ฟิสิกส์ เล่ม 2**. กรุงเทพมหานคร: สมาคมวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์.
- Crummett P. & Bwestern. (1994). **University Physics**. USA : Wm. C. Brown.
- Halliday, D., Resnick, R. & Walker, J. (2005). **Fundamentals Physics**. (7th ed.). USA: John Wiley and Sons.
- Serway, R.A., Moses, C.J., & Moyer, C.A. (2005). **Modern Physics 3<sup>rd</sup> ed.** California: Brooks/Cole-Thomson Learning.
- Serway, R. A., and Jewett, J. W. (2014). **Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics 9<sup>th</sup> ed.** Belmont: Brooks/Cole-Thomson Learning.
- Serway, R.A., Vuille, C., and Hughes, J. (2015). **College Physics 10<sup>th</sup> ed.** Stamford: Cengage Learning.
- Thornton, T.S., and Rex, A. (2013). **Modern Physics for Scientists and Engineers 4<sup>th</sup> ed.** Boston: Brooks/Cole- Cengage Learning.
- Young, H.D., and Freedman, R.A. (2016). **Sear's & Zemansky's University Physics with Modern Physics 14<sup>th</sup> ed.** Essex: Pearson Education Limited.

## บทที่ 8

### ฟิสิกส์สถานะของแข็งเบื้องต้น

#### (Introduction to solid state physics)

##### 8.1 บทนำ

สสารที่มีสถานะเป็นของแข็งสามารถจำแนกออกตามชนิดของพันธะ และการจัดเรียงตัวของอะตอมได้หลายประเภท ซึ่งในบทเรียนนี้จะกล่าวไว้ในส่วนแรก รวมทั้งสมบัติการเป็นฉนวน ตัวนำและสารกึ่งตัวนำของของแข็ง มีการเปรียบเทียบการอธิบายโดยทฤษฎีอิเล็กตรอนอิสระยุคเก่า และตามแบบกลศาสตร์ควอนตัม และการจำแนกของของแข็งออกเป็น ฉนวน ตัวนำและสารกึ่งตัวนำ โดยใช้ทฤษฎีควอนตัมเบื้องต้น ได้แก่ ทฤษฎีแถบพลังงาน มีการกล่าวถึงสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ซึ่งต่างจากสารกึ่งตัวนำที่เจือปน โดยจะทำให้ผู้เรียนสามารถเข้าใจคุณลักษณะที่สำคัญของฉนวน ตัวนำ และสารกึ่งตัวนำ ได้ดี ซึ่งของแข็งมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคมากกว่าของเหลวและแก๊ส จึงทำให้ของแข็งมีความแข็งแรงมาก เมื่อเทียบกับของเหลวและแก๊ส และมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบจึงทำให้เกิดรูปทรงทางเรขาคณิตเกิดขึ้น อาจจำแนกตามการจัดเรียงของอนุภาคตามชนิดของของแข็งได้เป็นของแข็งผลึกและของแข็งอสัณฐาน เนื่องจากของแข็งบางชนิดจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบทำให้ไม่มีรูปทรงทางเรขาคณิตเกิดขึ้น หรือจำแนกตามแรงดึงดูดระหว่างของแข็งที่เกิดขึ้น ได้แก่ ผลึกไอออนิก ผลึกโมเลกุล ผลึกโลหะ และผลึกโคเวเลนต์ ผลึกที่เกิดขึ้นจึงมีรูปทรงทางเรขาคณิตในรูปสามมิติที่แตกต่างกัน ในบทนี้จะเป็นการอธิบายสมบัติของของแข็ง ซึ่งจำแนกประเภทของแข็ง โครงผลึก ระบบผลึกและแลตทิซบราวเว เป็นต้น ซึ่งทำให้เข้าใจโครงสร้างและสมบัติของของแข็ง นำไปสู่การใช้ประโยชน์ทางด้านเทคโนโลยี และนวัตกรรมต่อไป

##### 8.2 สถานะทางฟิสิกส์ของสสาร (Physics state of matter)

เมื่ออะตอมและโมเลกุลจำนวนมากมาอยู่ใกล้กัน ลักษณะของอันตรกิริยาระหว่างอะตอมและโมเลกุลเหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดสถานะก๊าซ ของเหลว หรือของแข็งที่ก่อรูปขึ้นมา โดยในบทเรียนนี้จะกล่าวถึงสสารที่มีสถานะของแข็ง โดยแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ ของแข็งผลึก (Crystalline solids) และของแข็งอสัณฐาน (Amorphous solids) สำหรับของแข็งผลึกจะประกอบด้วยอะตอมที่จัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบหรือเป็นคาบในสามมิติ ส่วนของแข็งอสัณฐานอะตอมหรือโมเลกุล

จะไม่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ เช่น แก้ว ไม้ และพลาสติก เป็นต้น อย่างไรก็ตามเราสามารถพบของแข็งบางชนิดที่อยู่ในรูปทั้งผลึกและอสัณฐาน เช่น โบรอน ไตรออกไซด์  $B_2O_3$  เป็นต้น ซึ่งพลังงานยึดเหนี่ยวของผลึกจะเป็นตัววัดเสถียรภาพของผลึก ยิ่งมีพลังงานยึดเหนี่ยวมาก พลังงานที่ต้องใช้ในการแยกอะตอมออกมาเป็นอะตอมย่อย ๆ ยิ่งมีค่ามาก พลังงานยึดเหนี่ยวมีค่าเท่ากับพลังงานของผลึกในสถานะพลังงานต่ำสุด หรือที่ศูนย์องศาสัมบูรณ์ ลบด้วยผลรวมของพลังงานสถานะพื้นของอะตอมเดี่ยว ๆ โดยหน่วยของพลังงานจะเป็นอิเล็กตรอนโวลต์ต่ออะตอมหรือต่อโมเลกุล ซึ่ง 1 eV ต่ออะตอม จะมีค่าเท่ากับ 23.052 กิโลแคลอรีต่อโมล

### 8.2.1 การจำแนกประเภทของแข็ง

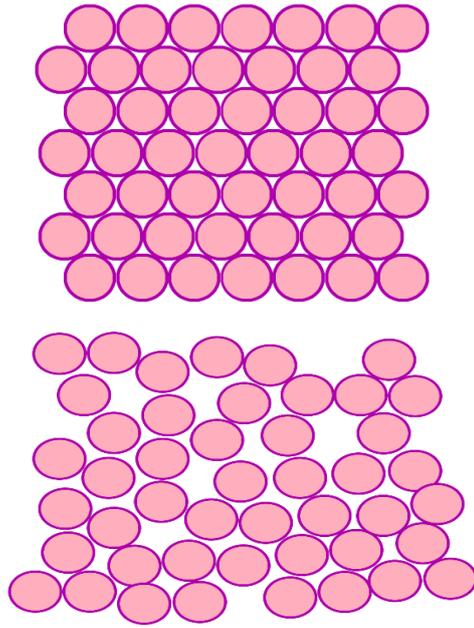
สำหรับการจำแนกประเภทของของแข็งจะแบ่งตามการจัดเรียงของอนุภาค ได้แก่ ผลึกและอสัณฐาน และการจำแนกตามชนิดของแรงดึงดูดที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาค ได้แก่ ผลึกโลหะ ผลึกไอออนิก ผลึกโมเลกุล และผลึกโคเวเลนต์ การจำแนกประเภทของแข็งตามการจัดเรียงอนุภาคของแข็ง ตามการจัดเรียงของอนุภาค สามารถจำแนกได้เป็นของแข็งผลึกที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบและของแข็งอสัณฐานที่มีการจัดเรียงไม่เป็นระเบียบ

#### 1. ของแข็งผลึก

อนุภาคของของแข็งมีการจัดเรียงอนุภาคชิดกันอย่างเป็นระเบียบ ทำให้เกิดเป็นรูปทรงทางเรขาคณิต ผิวหน้าเรียบและมีขอบตัดมุมระหว่างผิวหน้าที่แน่นอน ของแข็งประเภทนี้ เรียกว่าของแข็งผลึก เมื่อผลึกเกิดการแตกออกจะทำให้บางส่วนของผลึกหลุดออกไป แต่ยังคงมีบางส่วนหลงเหลืออยู่ในรูปผลึกแต่อาจเป็นผลึกที่ไม่สมบูรณ์ ทำให้รูปทรงภายนอกไม่เป็นไปตามรูปทรงทางเรขาคณิต แต่ยังคงสมบัติความเป็นผลึกอยู่ หากของแข็งอยู่ในรูปผลึก จะทำให้สมบัติบางอย่าง เช่น การนำไฟฟ้า หรือดรชนีการหักเหของแสง แตกต่างกันในแต่ละทิศทาง เรียกสมบัตินี้ว่า ไอโซทรอปี (Isotropy) ซึ่งเกิดขึ้นกับทิศทางการตกผลึกทั้งหมด โดยแม้จะเป็นธาตุเดียวกัน แต่อาจเกิดรูปผลึกได้แตกต่างกันตามการจัดเรียงตัวของของแข็ง

#### 2. ของแข็งอสัณฐาน

ในขณะที่ของแข็งบางประเภท อนุภาคมีการเรียงตัวชิดกันแต่ไม่เป็นระเบียบ จึงไม่มีรูปทรงทางเรขาคณิต เรียกของแข็งประเภทนี้ว่า ออสัณฐาน (Amorphous) ของแข็งอสัณฐานไม่มีจุดหลอมเหลวที่เด่นชัด เมื่อเทียบกับของแข็งผลึกที่มีจุดหลอมเหลวที่ชัดเจน

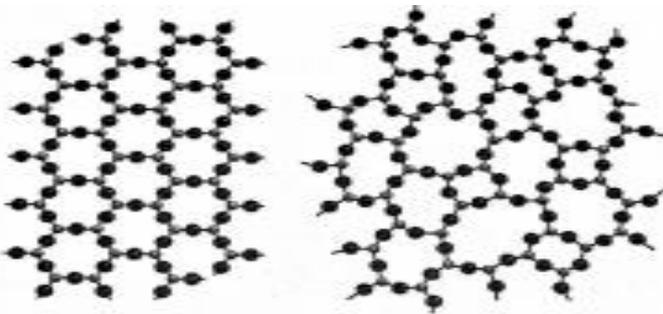


ก) ของแข็งผลึก

ข) ของแข็งอสัณฐาน

ภาพที่ 8.1 แสดงวิวัฒนาการของแข็งที่มีการจัดเรียงตัวแบบ ก) ของแข็งผลึก ข) ของแข็งอสัณฐาน

ตัวอย่างของแข็งอสัณฐาน เช่น พลาสติก แก้ว โดยแก้วเป็นชนิดของแข็งอสัณฐานที่มีซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งไม่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ แต่หากมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบจะได้เป็นของแข็งผลึกคือ ควอตซ์ (Quartz) จะเห็นได้ว่าแม้จะมีสารที่เป็นองค์ประกอบเหมือนกันนั่นคือ ซิลิกา แต่หากการจัดเรียงตัวไม่เหมือนกันจะทำให้ได้ทั้งรูปผลึก (ก) และอสัณฐาน (ข) จากสารที่เป็นองค์ประกอบเดียวกัน โดยอนุภาคขนาดเล็กแทนอะตอมของซิลิกอน และอนุภาคขนาดใหญ่สีดำเข้มแทนอะตอมของออกซิเจน



ก) ของแข็งผลึก

ข) ของแข็งอสัณฐาน

ภาพที่ 8.2 การจัดเรียงตัวของซิลิกาแบบผลึกและอสัณฐาน

ที่มา : ดัดแปลงจาก Chang, R., 2010

### 8.3 พันธะของแข็ง (Bonding of solid)

พลังงานยึดเหนี่ยวของผลึกเป็นตัววัดความมีเสถียรภาพของผลึก ยิ่งผลึกมีพลังงานยึดเหนี่ยวมากจำนวนพลังงานที่ใช้ในการแยกออกเป็นอะตอมย่อย ๆ ยิ่งมากด้วย พลังงานยึดเหนี่ยวมีค่าเท่ากับพลังงานของผลึกในสถานะพลังงานต่ำสุด ลบด้วยผลรวมของพลังงานสถานะพื้นของอะตอมเดี่ยว ๆ ดังนั้นพลังงานยึดเหนี่ยวมีค่าเป็นลบและเป็นสัดส่วน โดยตรงกับปริมาตรของผลึก โดยปกติพลังงานยึดเหนี่ยวมีหน่วยเป็นอิเล็กตรอนโวลต์ต่ออะตอมหรือต่อโมเลกุล สำหรับพันธะของแข็งผลึกแบ่งออกเป็น 5 ประเภท ตามลักษณะและความแข็งแรงของพันธะ ได้แก่

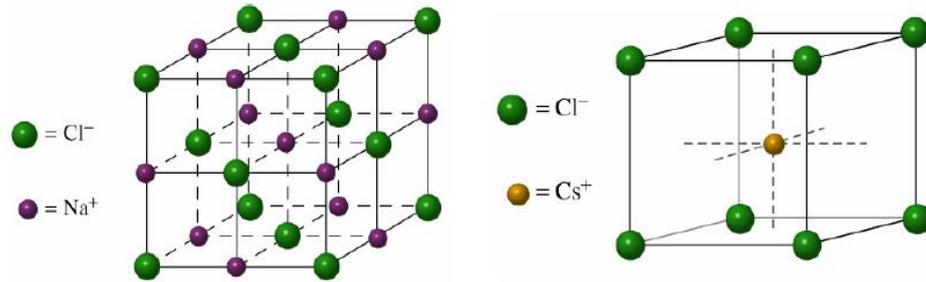
1. พันธะไอออนิก (ionic bond) พลังงานยึดเหนี่ยวประมาณ 5 – 10 eV ต่อโมเลกุล เช่น โซเดียมคลอไรด์
2. พันธะโคเวเลนต์ (covalent bond) พลังงานยึดเหนี่ยวประมาณ 10 eV ต่อโมเลกุล เช่น เพชร
3. พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) พลังงานยึดเหนี่ยวประมาณ 0.5 eV ต่อโมเลกุล เช่น น้ำแข็ง
4. พันธะโมเลกุล (molecule) พลังงานยึดเหนี่ยวมีค่าสูงถึง 0.1 eV เช่น มีเทน
5. พันธะโลหะ (metallic bonded) พลังงานยึดเหนี่ยวประมาณ 1-5 eV ต่อโมเลกุล เช่น โซเดียม

แรงที่ทำให้อะตอมเรียงตัวเป็นระเบียบในผลึกเป็นแรงเดียวกับในพันธะโมเลกุล บวกแรงเพิ่มเติมอีกชนิดหนึ่ง เช่น แกลือธรรมดา (NaCl) แรงดึงดูดคือแรงตามกฎคูลอมบ์ระหว่างอนุภาคประจุ ไม่มีทิศทางที่แน่นอน ส่วนอะตอมคาร์บอน ซิลิคอน เจอร์เมเนียม และดีบุกในโครงสร้างเพชรเป็นตัวอย่างของผลึกโคเวเลนต์ธาตุที่อยู่ในหมู่ IV ของตารางธาตุแต่ละอะตอมมีอิเล็กตรอนสี่ตัวในระดับชั้นนอกสุด แต่ละอะตอมสร้างพันธะโคเวเลนต์กับแต่ละสี่อะตอมข้างเคียงที่มุมของทรงสี่ด้าน พันธะเหล่านี้ขึ้นกับทิศทาง ชนิดของพันธะมีดังต่อไปนี้

#### 8.3.1 พันธะไอออนิก

พันธะไอออนิกเป็นพันธะที่แรงระหว่างอะตอมเกิดจากการย้ายอิเล็กตรอนทำให้อะตอมกลายเป็นไอออนที่มีประจุ + และ - ตรงข้ามกัน ประกอบด้วยไอออนบวกและลบจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ เป็นพันธะที่มีความแข็งแรงและไม่มีทิศทาง โดยทั่วไปแล้วมีโครงสร้าง 2

ประเภทที่พบใน ผลึก คือ โครงสร้างที่มีอะตอมอยู่ที่ผิวทุกด้าน (face-centered cubic, fcc) และ โครงสร้างแบบที่มีจุดศูนย์กลางในตัวและมีมุมทุกมุม (body-centered cubic, bcc)



ภาพที่ 8.3 ผลึกของโซเดียมคลอไรด์ และซีเซียมคลอไรด์

ที่มา : Flowers, P. et al., 2017

พลังงานเกาะกัน (cohesive energy) หรือพลังงานศักย์ภายในของผลึกเป็นผลรวมของแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตระหว่างไอออน กับแรงผลักพิสัยสั้น เนื่องจากการผลักกันของนิวเคลียส และการผลักกันของอิเล็กตรอนในชั้นปิดของไอออนต่างชนิดกัน

โดยทั่ว ๆ ไปแล้วมีโครงสร้างผลึกดังกล่าวที่พบอยู่มี 2 ประเภท คือ

1. โครงสร้างแบบลูกบาศก์ที่มีอะตอมจุดศูนย์กลางที่หน้าทุกด้าน เช่น โซเดียมคลอไรด์ ดังภาพที่ 8.3
2. โครงสร้างแบบลูกบาศก์ที่มีจุดศูนย์กลางในตัว เช่น ซีเซียมคลอไรด์ ระยะห่างระหว่างไอออนที่เหมือนกันใน NaCl คือ  $5.62 \text{ \AA}$  และใน CsCl คือ  $4.11 \text{ \AA}$  จำนวนเลขคอร์ดินเนชัน เป็นจำนวนของไอออนต่างชนิดกันที่ใกล้ที่สุดรอบ ๆ ไอออนแต่ละตัวในผลึกมีค่าเท่ากับ 6 สำหรับ NaCl และ 8 สำหรับ CsCl

พลังงานยึดเหนี่ยว หรือพลังงานเกาะกันหรือพลังงานศักย์ภายในของพันธะไอออนิก เป็นผลรวมของ ก) แรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตรวมระหว่างไอออน ข) แรงผลักพิสัยสั้น เนื่องจากการผลักกันของนิวเคลียส และการผลักกันของอิเล็กตรอนในเซลล์ปิดของไอออนต่างชนิดกัน พลังงานศักย์ทางไฟฟ้าสถิตรวมของผลึกไอออนิก กำหนดโดย

$$U_{\text{ดึงดูด}} = -\alpha k \frac{e^2}{r} \quad (8-1)$$

เมื่อ  $r$  คือ ระยะระหว่างไอออนสองตัวที่ใกล้ที่สุด

$\alpha$  คือ ค่าที่เมดเดอลุง (Madelung's constant) ซึ่งขึ้นกับรูปทรงเรขาคณิตของผลึก ส่วนมากมีค่าอยู่ระหว่าง 1.6 และ 1.8 สำหรับผลึก fcc เช่น NaCl ค่า  $\alpha$  เท่ากับ 1.7627

ต่อมาแมกซ์บอร์นได้ประมาณแรงผลักระหว่างไอออนโดยศักย์

$$U_{\text{ผลึก}} = Bk \frac{e^2}{r^m} \quad (8-2)$$

เมื่อ B และ m เป็นค่าคงตัว n มากกว่า 1 ทำให้เกิดแรงพิสัยสั้น ดังนั้นพลังงานศักย์รวม  $U_p$  คือ

$$U_p = -\alpha k \frac{e^2}{r} + \frac{B}{r^m} \quad (8-3)$$

ที่ระยะสมดุล  $r = r_0$  พลังงานศักย์จะมีค่าน้อยที่สุด กล่าวคือ

$$\begin{aligned} \left( \frac{dU_p}{dr} \right) &= 0 \\ -ke^2 \left( -\frac{\alpha}{r_0^2} - \frac{mB}{r_0^{m+1}} \right) &= 0 \\ \text{ได้} \quad B &= \frac{\alpha(r_0^{m-1})}{m} \end{aligned}$$

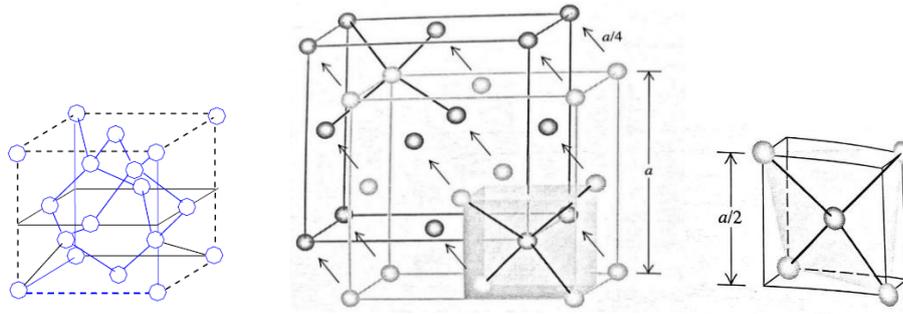
ดังนั้นพลังงานศักย์ที่ระยะสมดุล  $U_0$  คือ

$$U_0 = -\alpha k \frac{e^2}{r_0} \left( 1 - \frac{1}{m} \right) \quad (8-4)$$

### 8.3.2 พันธะโคเวเลนต์

พันธะโคเวเลนต์ในอะตอมคล้ายกับพันธะโคเวเลนต์ในโมเลกุล แต่ละอะตอมในพันธะใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน อิเล็กตรอนที่เข้าร่วมกันนี้จะอยู่ระหว่างอะตอมทั้งสองมากกว่าบริเวณอื่นๆ ตัวอย่างของผลึกโคเวเลนต์คือ เพชร ซิลิกอน ซิลิกอนคาร์ไบด์ และเจอร์มาเนียม ผลึกโคเวเลนต์มี

พลังงานเกาะกัน ประมาณ 6 ถึง 12 eV ต่ออะตอม ดังนั้นจึงแข็งแรงมาก ซึ่งทำให้ยากต่อการทำลาย อย่างที่ทราบกันดีว่า เพชรเป็นสารที่แข็งที่สุดและซิลิกอนคาร์ไบด์ใช้เป็นวัสดุสำหรับขัดในทางอุตสาหกรรม พันธะโคเวเลนต์มีจุดหลอมเหลวสูงมาก และไม่ละลายในของเหลวหลายชนิด ผลึกโคเวเลนต์มีอิเล็กตรอนอิสระน้อยมาก เช่นเดียวกับผลึกไอออนิก ดังนั้นพันธะโคเวเลนต์จึงเป็นตัวนำความร้อนและไฟฟ้าที่เลว มีความโปร่งแสงเนื่องจากไม่มีการดูดกลืนแสงเกิดขึ้น



ภาพที่ 8.4 โครงสร้างผลึกของเพชร

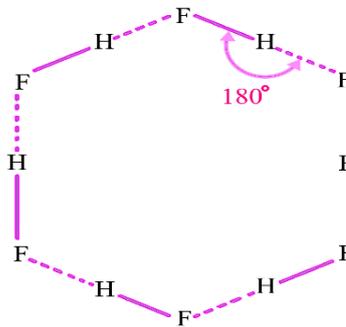
### 8.3.3 พันธะไฮโดรเจน

พันธะไฮโดรเจนมีความคล้ายกับพันธะไอออนิก เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนมีแรงพันธะอ่อน และยังเป็นไดโพลโมเมนต์ไฟฟ้าอย่างถาวร แสดงว่าโมเลกุลมีความเป็นขั้ว จุดหลอมเหลวและจุดเดือดของผลึกจะมีค่าค่อนข้างสูง พันธะไฮโดรเจนอาจจะเกิดขึ้นได้ เช่น ในสารประกอบไฮโดรด์ของอโลหะ ซึ่งมีอะตอมหนึ่งในโมเลกุลมีความสามารถในการดึงอิเล็กตรอนจากไฮโดรเจนได้ดี ทำให้ไฮโดรเจนอะตอมกลายเป็นไอออนบวก โมเลกุลของน้ำสถานะของแข็งจะมีโครงสร้างเตตระฮีดรอล การที่มีโครงสร้างเปิดเป็นเหตุให้โครงสร้างของน้ำแข็งมีปริมาตรมากกว่าน้ำ หรืออาจกล่าวง่ายๆว่า น้ำแข็งมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ เมื่อน้ำแข็งหลอมเหลวพันธะของไฮโดรเจนจะแตกตัวออกทำให้เป็นกลุ่มเล็ก ๆ หมายความว่าความหนาแน่นของน้ำที่  $0^{\circ}\text{C}$  จะน้อยกว่าที่  $4^{\circ}\text{C}$  ซึ่งเป็นจุดที่น้ำมีความหนาแน่นมากที่สุด

### 8.3.4 พันธะโมเลกุล

พันธะโมเลกุลเกิดการรวมตัวของโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว ทำให้โมเลกุลแบบนี้ไม่มีไดโพลโมเมนต์ไฟฟ้าอย่างถาวร อิเล็กตรอนในโมเลกุลจะวางตัวเป็นคู่สมบูรณ์ ดังนั้นจึงไม่มีการเกิดพันธะโคเวเลนต์ระหว่างอะตอมในโมเลกุล เช่นก๊าซเฉื่อยสถานะของแข็งที่จัดเป็นผลึกโมเลกุลเช่นคาร์บอนไดออกไซด์ และมีเทนในสถานะของแข็งโมเลกุลในผลึกโมเลกุลจะจับกันด้วยแรงระหว่างโมเลกุลที่เรียกว่า แรงแวนเดอร์วาลส์ แรงนี้เป็นแรงอ่อนมาก อย่างไรก็ตามเมื่อมีพันธะไอออนิก พันธะโคเวเลนต์ หรือพันธะโลหะพันธะวันเดอร์วาลส์ก็สามารถจะตอบสนองต่อการเกิดการควบแน่นจากสถานะก๊าซเป็นของเหลว และเกิดการเปลี่ยนจากของเหลวเป็นของแข็ง แม้ว่าโมเลกุลซึ่งเป็นผลึกโมเลกุลนี้จะไม่มีไดโพลโมเมนต์ไฟฟ้าอย่างถาวรแต่ก็ปรากฏไดโพลโมเมนต์ไฟฟ้าอย่างชั่วคราวได้ จึงทำให้เกิดแรงแวนเดอร์วาลส์การที่มีพลังงานต่ำมากนี้เองทำให้ผลึกโมเลกุลมีจุด

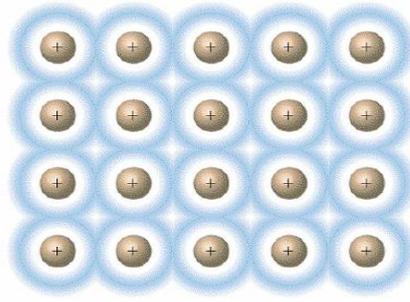
หลอมเหลวและจุดเดือดต่ำมาก โดยคุณสมบัติที่สำคัญของสารทั้งก้อน เช่น ความตึงผิว แรงเสียดทาน และความหนืด เกิดขึ้นเนื่องจากแรงแวนเดอร์วาลส์



ภาพที่ 8.5 โครงสร้างโมเลกุลของไฮโดรเจนฟลูออไรด์

### 8.3.5 พันธะโลหะ

ถ้าอะตอมที่มีอิเล็กตรอนวาเลนซ์ยึดกันอย่างอ่อนๆ ถูกนำเข้ามาใกล้ๆ กันเพื่อก่อรูปเป็นของแข็งอิเล็กตรอนวาเลนซ์แต่ละตัวเฉลี่ยแล้วจะอยู่ใกล้กับนิวเคลียสตัวหนึ่งตัวใดมากกว่าที่มันจะอยู่ในกรณีอะตอมเดี่ยวๆ ดังนั้นพลังงานศักย์ของอิเล็กตรอนในผลึกจะน้อยกว่าของอิเล็กตรอนในอะตอมเดี่ยวพลังงานศักย์ที่ลดลงนี้นำไปสู่การก่อรูปของพันธะโลหะแต่ในขณะเดียวกันนั้นพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนวาเลนซ์จะเพิ่มขึ้น ดังนั้นอิเล็กตรอนตัวนอกจึงเป็นอิเล็กตรอนอิสระ อิเล็กตรอนเหล่านี้ในผลึกไม่ได้เป็นของไอออนตัวใดตัวหนึ่ง แต่จะเคลื่อนที่อย่างอิสระตลอดทั้งแลตทิซผลึก และเราเรียกว่า มันเป็นก๊าซอิเล็กตรอน พันธะโลหะเป็นผลจากการดึงดูดระหว่างแกนไอออนบวกและก๊าซอิเล็กตรอนอิสระเหล่านี้ในโลหะอาจมีพลังงานระหว่างศูนย์และค่าที่มากที่สุด ซึ่งเรียกว่า พลังงานเฟอร์มิการที่โลหะมีอิเล็กตรอนอิสระ เป็นผลให้โลหะเป็นตัวนำความร้อนและตัวนำไฟฟ้าที่ดีเนื่องจากอิเล็กตรอนเหล่านี้สามารถเคลื่อนพลังงานจำนวนต่างๆ ได้ และสามารถเคลื่อนโฟตอนในช่วงแสงที่ตามองเห็นได้ ซึ่งเป็นการอธิบายว่าทำไมโลหะจึงทึบแสง พันธะโลหะนั้นแข็งแรงน้อยกว่าพันธะไอออนิกหรือพันธะโคเวเลนต์ แต่มากกว่าพันธะแวนเดอร์วาลส์



ภาพที่ 8.6 แบบจำลองของพันธะโลหะ

ที่มา : Petrucci, Harwood & Herring, 2011

#### 8.4 ทฤษฎีอิเล็กตรอนอิสระของโลหะ (Theory of free electron in metal)

คุณสมบัติเกี่ยวกับความร้อน สมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติแม่เหล็กของของแข็งถูกกำหนดด้วยประจุอินทรินซิก (intrinsic charge) โมเมนต์แม่เหล็ก และการกระจายของอิเล็กตรอนรอบ ๆ อะตอม เมื่อจำแนกของของแข็งตามการจัดตัวของอิเล็กตรอน อาจแบ่งได้เป็น ก) ฉนวน ข) โลหะ ในกรณีของฉนวน อิเล็กตรอนส่วนใหญ่จะยึดแน่นอยู่กับอะตอมมีอิเล็กตรอนจำนวนน้อยมากที่เคลื่อนที่อย่างอิสระไปในผลึก สำหรับโลหะมีอิเล็กตรอนที่สามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระไปในผลึกได้ ในขณะที่ฉนวนอิเล็กตรอนส่วนใหญ่จะยึดแน่นอยู่กับอะตอมมีอิเล็กตรอนจำนวนน้อยมากที่เคลื่อนที่อย่างอิสระได้ต่อไปพิจารณาคุณสมบัติของโลหะ โดยใช้ทฤษฎีอิเล็กตรอนอิสระอย่างคร่าวๆ

##### 8.4.1 ทฤษฎีอิเล็กตรอนอิสระตามแบบยุคเก่า

พอล คาร์ล ลัดวิกดรูค (Paul Karl Ludwig Drude) ในปี ค.ศ.1900 ได้เสนอว่าโลหะไอออนบวกอยู่นิ่งกับที่แต่อิเล็กตรอนวาเลนซ์ มีอิสระสามารถเคลื่อนที่ไปไหนมาไหนได้ภายในผลึก อิเล็กตรอนอิสระเหล่านี้เรียกว่า อิเล็กตรอนตัวนำ (conduction electrons) และอิเล็กตรอนในชั้นปิดเรียกว่า อิเล็กตรอนแกนไอออน ต่อมาในปี ค.ศ. 1909 เอช เอ ลอเรนตซ์ (H.A.Lorentz) ได้เสนอแนวความคิดร่วมด้วย ทำให้เกิดการตั้งทฤษฎีอิเล็กตรอนอิสระยุคเก่าและของดรูค-ลอเรนตซ์ได้ดังนี้

- 1) ใช้สถิติแบบดั้งเดิมของแมกซ์เวลล์-โบลทซ์มานน์กับก๊าซอิเล็กตรอนอิสระ
- 2) การผลัดกันระหว่างอิเล็กตรอนอิสระละทิ้งได้
- 3) ไอออนบวกทำให้เกิดสนามของศักย์คงตัว

ทฤษฎีนี้ประสบความสำเร็จในการอธิบายการนำความร้อนและการนำไฟฟ้า ได้ดีเช่น การอธิบายกฎของโอห์ม และความสัมพันธ์ระหว่างการนำความร้อน และการนำไฟฟ้า ใดๆก็ตามพบว่าไม่สามารถอธิบายการนำไฟฟ้าที่ขึ้นกับอุณหภูมิได้ และความร้อนจำเพาะของอิเล็กตรอนในโลหะ ตลอดจนคุณสมบัติทางแม่เหล็ก เช่น ไดอะแมกเนติกซ์สเซพติบิลิตี (diamagnetic susceptibility) โดยความขัดแย้งที่เกิดขึ้นจากทฤษฎีอิเล็กตรอนอิสระยุคเก่า สามารถสรุปได้เป็น 2 ประเด็น

ก. ตามทฤษฎียุคเก่าเราจะได้ว่า 
$$\sigma = \frac{10^6}{\sqrt{T}}$$

เมื่อ  $T$  เป็นอุณหภูมิสัมบูรณ์ และ  $\sigma$  คือสภาพการนำไฟฟ้าของโลหะ แต่จากการทดลองเราพบว่า  $\sigma$  เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ  $\frac{1}{T}$  ในทางตรงข้ามทฤษฎียุคเก่าทำนายอัตราส่วนระหว่างการนำไฟฟ้า  $\sigma$  กับการนำความร้อน  $K$  ได้อย่างถูกต้องว่า เป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิสัมบูรณ์  $T$  คือ  $\frac{1}{T} \frac{\sigma}{K}$  มีค่าเท่ากับค่าคงตัว  $\approx 2.5$  โดยอัตราส่วน  $\frac{\sigma}{K}$  นี้เรียกว่า อัตราส่วนไวด์มันน์ - ฟรานซ์ (Wiedemann-Franze)

#### ข. ความร้อนจำเพาะ

ตามทฤษฎีจลน์ของก๊าซ ถ้าก๊าซอิเล็กตรอนประพฤติตัวเหมือนก๊าซอุดมคติความร้อนจำเพาะควรมีค่าเท่ากับ  $\frac{3}{2}R$  เมื่อ  $R$  เป็นค่าคงที่ของก๊าซ แต่จากการทดลองพบว่า ความร้อนจำเพาะของก๊าซอิเล็กตรอนอิสระขึ้นกับอุณหภูมิตามความสัมพันธ์  $C_V$  อิเล็กตรอนเท่ากับ  $10^{-4}RT$  ดังนั้นจะเห็นข้อบกพร่องของทฤษฎีอิเล็กตรอนอิสระยุคเก่า ทำให้มีการเสนอแนวความคิดใหม่ขึ้นมา

### 8.4.2 ทฤษฎีอิเล็กตรอนอิสระตามแบบกลศาสตร์ควอนตัม

ซอมเมอร์เฟลด์ (Sommerfeld) ในปี ค.ศ. 1928 ได้เสนอเปลี่ยนแปลงแก้ไขทฤษฎียุคเก่า 2 ประการ ประการแรกต้องพิจารณาอิเล็กตรอนอิสระในโลหะ โดยใช้กลศาสตร์ควอนตัม ซึ่งนำไปสู่แนวความคิดที่ว่าอิเล็กตรอนเหล่านี้มีพลังงานเป็นค่าไม่ต่อเนื่อง ประการที่สอง ต้องใช้สถิติเฟอร์มิดิแรคกับก๊าซอิเล็กตรอน ซึ่งแบ่งการพิจารณาดังนี้

1. การประยุกต์กลศาสตร์ควอนตัม และสถิติเฟอร์มิ-ดิแรค กับอิเล็กตรอนอิสระ ในโลหะตามที่ซอมเมอร์เฟลด์ได้กล่าวคือ ศักย์ภายในผลึกโลหะอาจสมมุติได้ว่ามีค่าคงที่ ดังนั้นจึงไม่มีแรงลัทธิกระทำต่ออิเล็กตรอนในผลึก การเคลื่อนที่ของ

อิเล็กตรอนถูกจำกัดด้วยกำแพงศักย์สูงมากที่บริเวณขอบของผลึก เพื่อความง่ายจะพิจารณาผลึกเป็นกล่องรูปลูกบาศก์ ความยาว  $L$  บรรจุอิเล็กตรอนอิสระซึ่งมีพลังงานของอิเล็กตรอนในกล่องที่กว้าง  $L$  กรณีหนึ่งมิติ คือ

$$E_x = n_x^2 \frac{h^2}{8mL^2}, \quad n_x = 1, 2, 3, \dots$$

เมื่อ  $m$  เป็นมวลของอิเล็กตรอน

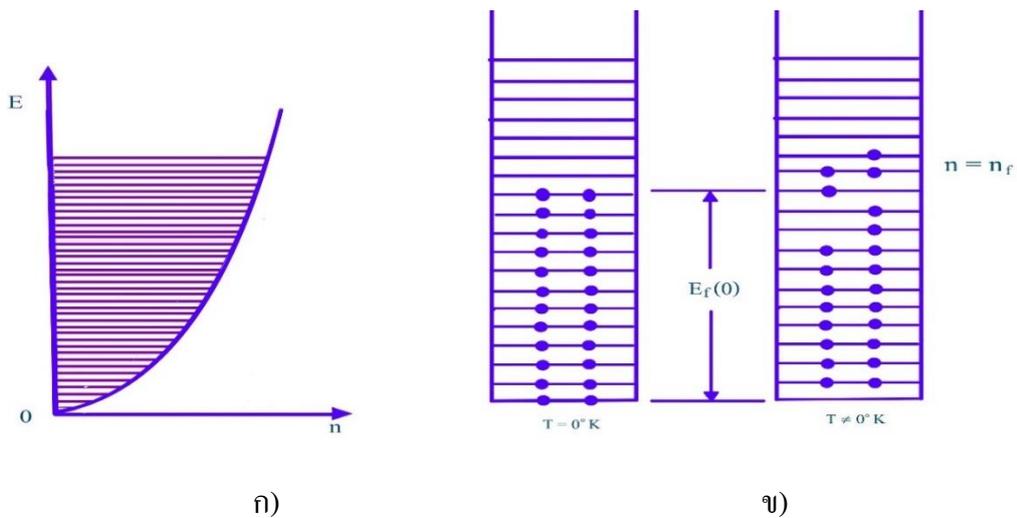
สำหรับกรณีสามมิติ อาจเขียนได้เป็น

$$E_n = (n_x^2 + n_y^2 + n_z^2) \frac{h^2}{8mL^2}$$

$$E_n = n^2 \frac{h^2}{8mL^2}$$

$$\text{เมื่อ } n^2 = n_x^2 + n_y^2 + n_z^2$$

พิจารณาภาพที่ 8.7 ด้านล่าง แสดงกราฟของ  $E$  กับ  $n$  แม้ค่า  $L$  จะน้อย เช่น  $L = 0.1$  เซนติเมตร ความห่างระหว่างระดับพลังงานคือ  $10^{-4}$  eV ซึ่งมีค่าน้อยมากจนสามารถพิจารณาได้ว่าระดับพลังงานเหล่านี้มีค่าใกล้เคียงกัน ลักษณะเป็นกึ่งต่อเนื่อง แต่ละระดับพลังงานกำหนดด้วยเลขควอนตัม 4 ตัว กล่าวคือ  $n_x$  คือ เลขควอนตัมหลัก  $n_y$  คือเลขควอนตัมออร์บิทัล  $n_z$  คือเลขควอนตัมแม่เหล็ก และ  $m$  คือเลขควอนตัมสปิน เมื่อ  $m_s = \pm \frac{1}{2}$  เนื่องจาก  $m_s$  มีค่าได้เพียง 2 ค่าเท่านั้น แต่ละระดับพลังงานจึงมีอิเล็กตรอนอยู่ได้เพียง 2 ตัว ดังภาพ 8.4 ข) เป็นฟังก์ชันของ  $n_f$  และ  $L$  พลังงานของอิเล็กตรอนสูงสุดค่านี้ที่คล่องจองกับ  $n = n_f$  ที่ศูนย์องศาสัมบูรณ์ เรียกว่า พลังงานเฟอร์มิที่จุดศูนย์ (zero point Fermi energy),  $E_F(0)$



ภาพที่ 8.7 ก) กราฟของ  $E$  กับ  $n$  แสดงระดับกึ่งต่อเนื่องสำหรับอนุภาคในกล่อง 1 มิติที่มี  $L$  มาก ข) ระดับพลังงานโดยอิเล็กตรอน

โดยปกติแล้วหากอยากทราบสถานะพื้นหรือพลังงานเฟอร์มิในเทอมของจำนวนอิเล็กตรอนทั้งหมดและขนาดของกล่อง สมมุติว่า  $N$  อิเล็กตรอนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ดังนั้นจำนวนอิเล็กตรอนทั้งหมดในระบบคือ  $NL^3$  ให้แต่ละจุดแลตทิซมีอิเล็กตรอนที่มีเลขควอนตัม  $n_x, n_y, n_z$  และ  $m$  มีพลังงานเฟอร์มิที่จุดศูนย์

$$E_F(0) = \frac{\hbar^2}{2m} (3\pi^2 N)^{2/3}$$

สมการข้างต้นจะเห็นว่า พลังงานเฟอร์มิ เป็นฟังก์ชันของจำนวนอิเล็กตรอนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ( $N$ )

**ตัวอย่างที่ 8.1** จงหาระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่บรรจุในกล่องยาว  $0.1 \text{ nm}$  ซึ่งเป็นกล่องที่มีขนาดเท่ากับอะตอม

วิธีทำ จาก

$$E_n = n^2 \frac{\hbar^2}{8mL^2}$$

$$= n^2 \frac{(6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})^2}{8(9.11 \times 10^{-31} \text{ kg})(0.1 \times 10^{-9} \text{ m})^2}$$

$$= 6 \times 10^{-18} n^2 \text{ J}$$

$$= 38 n^2 \text{ eV}$$

ในกรณีนี้ระดับพลังงานจะแยกกันด้วยขนาดพลังงานมากพอเมื่อเทียบกับพลังงานของอะตอม **คำตอบ** ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า ควอนไทเซชันของพลังงานเป็นส่วนสำคัญสำหรับอิเล็กตรอน และอนุภาคเล็กอื่นๆ เมื่อบรรจุอยู่ในบริเวณที่มีขนาดเท่าอะตอม

**ตัวอย่างที่ 8.2** ที่อุณหภูมิตำทองแดงมีความเข้มข้นอิเล็กตรอนอิสระ  $8.45 \times 10^{28} \text{ m}^{-3}$  โดยการใช้

แบบจำลองอิเล็กตรอนอิสระ จงหาพลังงานเฟอร์มิของทองแดงของแข็ง

วิธีทำ เนื่องจากทองแดงเป็นโลหะ และจาก

$$E_F(0) = \frac{\hbar^2}{2m} (3\pi^2 N)^{2/3}$$

$$E_F = \frac{3^{2/3} \pi^{4/3} (1.055 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})^2 (8.45 \times 10^{28} \text{ m}^{-3})^{2/3}}{2(9.11 \times 10^{-31} \text{ kg})}$$

$$= 1.126 \times 10^{-18} \text{ J} = 7.03 \text{ eV}$$

**คำตอบ** พลังงานเฟอร์มิของทองแดงเท่ากับ  $7.03$  อิเล็กตรอนโวลต์

## 2. การประยุกต์ทฤษฎีกับคุณสมบัติของโลหะ โดยจะใช้ทฤษฎีควอนตัมของ

อิเล็กตรอนอิสระในการอธิบายคุณสมบัติบางประการได้

**2.1 การนำไฟฟ้าของโลหะ** ตามทฤษฎีควอนตัมอิเล็กตรอนอิสระในโลหะจะอยู่ในสถานพลังงานที่กำหนดแน่นอนซึ่งเป็นไปตามสถิติเฟอร์มี-ดิแรค หากไม่มีสนามภายนอก อิเล็กตรอนจะมีการเคลื่อนที่อย่างสุ่ม หากพิจารณาการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในหนึ่งมิติตามแกน  $x$  มองว่าอิเล็กตรอนจำนวนมากจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนดในทิศ  $+x$  พอๆกับในทิศ  $-x$  ดังนั้นจึงไม่มีกระแสลัพธ์ หากให้สนามไฟฟ้าเข้าไป อิเล็กตรอนจะถูกเร่งไปยังขั้วบวกของสนาม การเร่งนี้ทำให้เป็นการเพิ่มความเร็วและพลังงานให้กับอิเล็กตรอน แต่เฉพาะอิเล็กตรอนที่มีพลังงานใกล้เคียงพลังงานเฟอร์มีเท่านั้นที่จะได้รับพลังงานพอที่จะกระจายใหม่ อิเล็กตรอนลัพธ์จะเป็นผลให้เกิดกระแสไฟฟ้า และมีส่วนช่วยในการนำไฟฟ้า การคำนวณโดยใช้หลักของทฤษฎีนี้แสดงว่า สภาพนำไฟฟ้า  $\sigma$  เป็นสัดส่วนผกผันกับอุณหภูมิสัมบูรณ์  $T$  ซึ่งให้ค่าตรงกับผลการทดลอง

**2.2 การนำความร้อนของโลหะ** ในโลหะการนำความร้อนเกิดขึ้นทั้งจากการสั่นของอะตอมและอิเล็กตรอนอิสระ สำหรับสารที่ไม่ใช่โลหะการนำความร้อนเกิดขึ้นจากการสั่นของอะตอมเป็นหลัก แทนที่จะกล่าวเกี่ยวกับการสั่นของอะตอม เราจะกล่าวถึงในเทอมของโฟนอน จำนวนของโฟนอนเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่วิถีอิสระเฉลี่ยของโฟนอน ยังคงมีค่าน้อย ดังนั้นสำหรับสารที่ไม่ใช่โลหะ การนำความร้อนจึงมีค่าน้อยมาก ถึงแม้วิถีอิสระเฉลี่ยของโฟนอนในโลหะจะมีค่าน้อย แต่ของอิเล็กตรอนอิสระมีค่ามาก ดังนั้นอิเล็กตรอนอิสระจึงเป็นเหตุให้โลหะเป็นตัวนำความร้อนที่ดี ทฤษฎีควอนตัมของอิเล็กตรอนอิสระได้ทำนายกฎของไวน์มานน์-ฟรานซ์ที่ว่า  $(1/T)(\sigma/k)$  เท่ากับค่าคงที่ ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้าและสภาพนำความร้อน

**2.3 ความร้อนจำเพาะอิเล็กตรอนของโลหะ** อาจเขียนได้เป็น อิเล็กตรอนที่มี 3 ระดับขึ้น ความเสรี (degrees of freedom)

$$C_v = C_v(\text{อะตอม}) + C_v(\text{อิเล็กตรอน})$$

$$= 3R + \frac{3}{2}R = \frac{9}{2}R$$

แต่เป็นที่ทราบกันดีว่าความร้อนจำเพาะของของแข็งทั้งหมดที่อุณหภูมิสูงกว่าค่า ๆ หนึ่งมีค่าเท่ากับ  $3R$  ดังนั้นเราต้องกำจัดเทอม  $\frac{3}{2}R$  ตามสถิติของเฟอร์มี - ดิแรค ที่อุณหภูมิ  $T$  ใดๆ อิเล็กตรอนที่มี

พลังงานในช่วง  $E_F \pm kT$  เท่านั้น จึงดูคลื่นความร้อน อัตราส่วนของอิเล็กตรอนเหล่านี้คือ  $2kT/E_F$  ดังนั้นความร้อนจำเพาะอิเล็กตรอนกำหนดโดย

$$\begin{aligned} C_V(\text{อิเล็กตรอน}) &= \frac{3}{2} R \times \frac{2kT}{E_F} \\ &= \frac{3RkT}{E_F} \approx \gamma T \end{aligned}$$

เมื่อ  $\gamma$  มีค่าน้อยมาก จึงละทิ้งเทอม  $C_V(\text{อิเล็กตรอน})$  และจะได้

$$C_V = C_V(\text{อะตอม})$$

## 8.5 การนำไฟฟ้าในโลหะ ฉนวน และสารกึ่งตัวนำ (Conductivity of metal, insulator, and semiconductor)

ตัวนำไฟฟ้าที่ดีต้องมีความหนาแน่นของประจุพาหะอิสระสูง ขณะที่ความหนาแน่นของประจุพาหะอิสระของฉนวนมีค่าเกือบเป็นศูนย์ สารกึ่งตัวนำเป็นกลุ่มวัสดุที่มีสมบัติทางไฟฟ้าและความร้อนอยู่ระหว่างกลางระหว่างค่าของฉนวนและค่าของตัวนำ ที่มีความสำคัญทางเทคโนโลยี ในหัวข้อนี้จะอภิปรายถึงกลไกการนำไฟฟ้าในกลุ่มวัสดุสามชนิดนี้ โดยใช้แบบจำลองที่มีพื้นฐานจากแถบพลังงาน

### 8.5.1 การนำไฟฟ้าของโลหะ

ถ้าวัสดุชนิดหนึ่งเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี ประจุพาหะภายในวัสดุชนิดนั้นจะต้องมีความเป็นอิสระในการที่จะตอบสนองต่อสนามไฟฟ้า เมื่อเราทำการพิจารณาอิเล็กตรอนที่อยู่ในโลหะเป็นประจุพาหะการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่ตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าเป็นตัวแทนของการเพิ่มขึ้นของพลังงานในระบบ โดยจะส่งผลในรูปของพลังงานจลน์ที่เพิ่มขึ้นในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน การพิจารณาระบบจะใช้แบบจำลองของระบบที่ไม่โคจรเดี่ยวในรูปของพลังงาน จากงานเท่ากับการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ เมื่องานคือ งานที่กระทำไปยังอิเล็กตรอนโดยสนามไฟฟ้า ดังนั้นเมื่อป้อนสนามไฟฟ้าให้กับตัวนำ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังสถานะพลังงานที่เป็นไปได้ที่อยู่สูงขึ้นไปในแผนภาพระดับพลังงานเพื่อแสดงถึงการเพิ่มขึ้นของพลังงานจลน์ เนื่องจากอิเล็กตรอนประพฤติตัวตามสถิติของเฟอร์มี-ดิแรก ระดับพลังงานทั้งหมดที่อยู่ต่ำกว่าพลังงานเฟอร์มีจะเต็มไปด้วยอิเล็กตรอน และระดับพลังงานที่อยู่เหนือพลังงานเฟอร์มีจะว่างเปล่า พลังงานเฟอร์มี  $E_F$  มีตำแหน่งอยู่ในแถบ โดยเป็นตำแหน่งที่บ่งบอกถึงสถานะพลังงานเต็มที่มีค่าสูงสุด เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

มากกว่า 0 เคลวิน เล็กน้อย อิเล็กตรอนบางตัวจะถูกกระตุ้นด้วยอุณหภูมิจนไปสู่ระดับที่เหนือกว่า  $E_F$  แต่โดยรวมแล้วเป็นการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยจากกรณี 0 เคลวิน ถ้าทำการเป็นความต่างศักย์ให้กับโลหะ อิเล็กตรอนที่มีพลังงานอยู่ใกล้กับพลังงานเฟอร์มิจะต้องการปริมาณพลังงานเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจากสนามไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป เพื่อให้เข้าถึงสถานะพลังงานว่างใกล้ๆ ที่อยู่เหนือพลังงานเฟอร์มิ ด้วยเหตุนี้อิเล็กตรอนในโลหะที่ได้รับการป้อนสนามไฟฟ้าอย่างอ่อนๆ ก็มีอิสระที่จะเคลื่อนที่ ทั้งนี้เพราะมีระดับว่างมากมายที่เป็นไปได้ที่อยู่ใกล้กับระดับพลังงานที่ถูกครอบครองแบบจำลองของโลหะที่ใช้พื้นฐานของทฤษฎีแถบพลังงานแสดงให้เห็นว่าโลหะเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีเยี่ยม

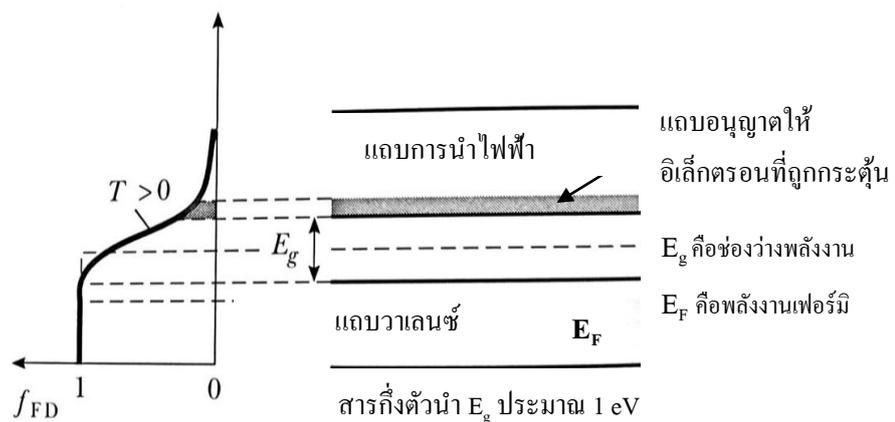
### 8.5.2 การนำไฟฟ้าของฉนวน

พิจารณาแถบพลังงานที่อยู่นอกสุดสองแถบของวัสดุโดยแถบที่อยู่ต่ำกว่ามีอิเล็กตรอนอยู่เต็ม และแถบที่อยู่สูงกว่านั้นว่างที่ 0 เคลวิน แถบที่อยู่ต่ำกว่าหรือแถบเต็ม เรียกว่า แถบวาเลนซ์ และแถบที่อยู่สูงกว่าหรือแถบว่างเรียกว่าแถบนำโดยพลังงานที่แยกห่างระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบนำเป็นช่องว่างพลังงานของวัสดุ พลังงานเฟอร์มิมีค่าอยู่ที่ตำแหน่งหนึ่งในช่องว่างพลังงานโดยนิยามให้พลังงานเฟอร์มิเป็นเหมือนกับพลังงานของสถานะที่ถูกเติมเต็มสูงสุดที่อุณหภูมิศูนย์เคลวิน ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าพลังงานเฟอร์มิควรเป็นจุดบนสุดของแถบวาเลนซ์ สมมติว่าวัสดุชนิดหนึ่งมีช่องว่างพลังงานที่ค่อนข้างกว้าง ตัวอย่างเช่น มีค่าโดยประมาณเท่ากับ 5 อิเล็กตรอน โวลต์ ที่ 300 เคลวิน ซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับช่องว่างพลังงานที่อุณหภูมิค่านั้นการกระจายแบบเฟอร์มิ-ดิแรกทำนายว่ามีอิเล็กตรอนเพียงส่วนน้อยที่ถูกกระตุ้นด้วยอุณหภูมิจนไปยังแถบนำ แต่เนื่องจากไม่มีสถานะที่เป็นไปได้ที่อยู่ใกล้ๆ กับพลังงานเหนือแถบวาเลนซ์ จึงทำให้อิเล็กตรอนไม่เคลื่อนที่ วัสดุนี้จึงเป็นฉนวน แม้ว่าฉนวนหนึ่งๆ จะมีสถานะว่างมากมายในแถบนำที่สามารถรองรับอิเล็กตรอนได้แต่สถานะเหล่านี้ถูกแยกห่างจากสถานะเต็มด้วยช่องว่างพลังงานขนาดใหญ่จึงมีอิเล็กตรอนเพียงส่วนน้อยที่เข้าครอบครองสถานะเหล่านี้ทำให้สภาพนำไฟฟ้า โดยรวมของฉนวนมีค่าน้อย

### 8.5.3 การนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

สารกึ่งตัวนำมีโครงสร้างของแถบพลังงานแบบเดียวกับฉนวน แต่มีช่องว่างพลังงานเล็กกว่ามาก โดยมีค่าประมาณ 1 อิเล็กตรอน โวลต์ แสดงค่าช่องว่างพลังงานของวัสดุบางชนิด โครงสร้างของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำเนื่องจากระดับเฟอร์มิอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้กับกึ่งกลางของช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ และมีค่าพลังงานที่เล็กพอที่จะทำให้จำนวนอิเล็กตรอนเกิด

การกระตุ้นด้วยอุณหภูมิจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำ และเนื่องจากการมีระดับพลังงานที่ว่างอยู่มากมายเหนือระดับพลังงานที่ถูกเติมเต็มด้วยปัจจัยจากอุณหภูมิในแถบนำ การป้อนความต่างศักย์ค่าเล็กน้อยก็ทำให้อิเล็กตรอนขึ้นไปอยู่ในแถบนำในสถานะพลังงานที่เป็นไปได้ ทำให้เกิดเป็นกระแสในระดับปานกลางที่อุณหภูมิศูนย์เคลวิน อิเล็กตรอนทั้งหมดในวัสดุเหล่านี้จะอยู่ในแถบวาเลนซ์ และไม่มีพลังงานที่จะกระตุ้นอิเล็กตรอนข้ามช่องว่างพลังงาน ดังนั้นสารกึ่งตัวนำจึงเป็นตัวนำที่ไม่ดีในสถานะที่มีอุณหภูมิต่ำมาก ๆ และเนื่องจากการกระตุ้นด้วยอุณหภูมิให้กับอิเล็กตรอนเพื่อที่จะข้ามช่องว่างแคบ ๆ มีความเป็นไปได้มากขึ้นที่สถานะอุณหภูมิสูง ค่าการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจึงเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งตรงข้ามกับค่าการนำไฟฟ้าในโลหะที่จะลดลงอย่างช้าๆเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำที่เป็นไปได้นั้นอาจจะเป็นประจุลบ ประจุบวก หรือประจุทั้งสอง เมื่ออิเล็กตรอนตัวหนึ่งเคลื่อนที่จากแถบวาเลนซ์ไปสู่แถบนำอิเล็กตรอนนั้นจะทิ้งที่ว่างเอาไว้ เรียกว่า โฮล (Hole) ในแถบวาเลนซ์ที่มีอิเล็กตรอนตัวอื่นอยู่โฮลนี้ประพฤติตัวราวกับเป็นประจุพาหะในลักษณะที่อิเล็กตรอนอิสระที่อยู่บริเวณใกล้เคียง ๆ สามารถเคลื่อนที่มายังโฮลเมื่อใดก็ตามที่อิเล็กตรอน  $E$  เช่นนั้นจะเป็นการสร้างโฮลใหม่ในตำแหน่งที่อิเล็กตรอนหลุดออกมา ดังนั้นผลสืบเนื่องสุทธิสามารถแสดงได้ในรูปของการเคลื่อนที่ของโฮลในเนื้อวัสดุในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน โฮลประพฤติตัวราวกับว่าเป็นอนุภาคที่มีประจุ  $+e$  ภาพที่ 8.8 เป็นภาพแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ แสดงค่าช่องพลังงานมีค่าน้อยกว่าช่องว่างพลังงานในจำนวนมาก และแสดงช่องว่างพลังงานและแถบพลังงานเฟอร์มิ



ภาพที่ 8.8 แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน แสดงแถบพลังงานเฟอร์มิ

ที่มา : ดัดแปลงมาจาก Raymond A. Serway, Clement J. Moses, & Curt A. Moyer, 2005.

### 8.5.3.1 สารกึ่งตัวนำอินทรินสิก

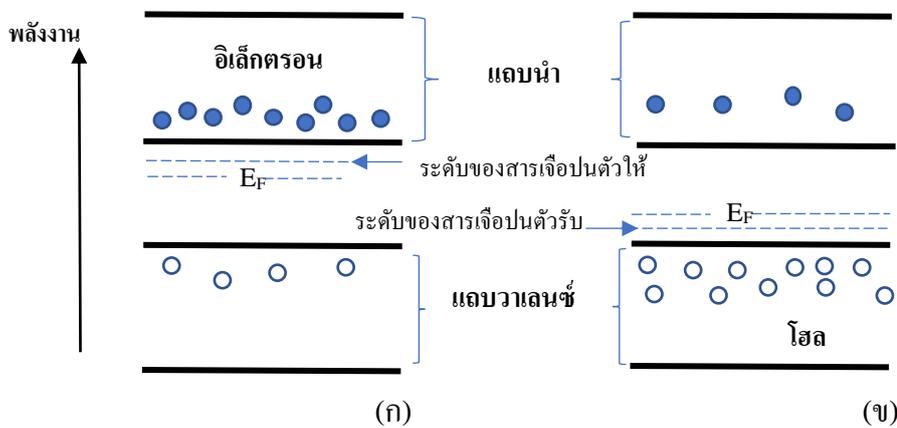
ผลึกสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ที่ประกอบด้วยธาตุเพียงชนิดเดียวหรือสารประกอบเพียงชนิดเดียว เรียกว่า สารกึ่งตัวนำอินทรินสิก (intrinsic semiconductor) ในสารกึ่งตัวนำเหล่านี้จำนวนอิเล็กตรอนนำไฟฟ้าและจำนวนโฮลจะเท่ากัน การจับคู่กันของประจุเหล่านี้เรียกว่า คู่อิเล็กตรอน-โฮล (electron-hole pairs) เมื่อปรากฏว่ามีสนามไฟฟ้าจากภายนอก โฮลจะเคลื่อนที่ในทิศทางของสนามและอิเล็กตรอนตัวนำจะเคลื่อนที่ในทิศทางตรงข้ามกับสนาม เนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮลเคลื่อนที่ตรงข้ามกัน การเคลื่อนที่ของประจุทั้งสอง จึงทำให้เกิดเป็นกระแสในทิศทางเดียวกัน

### 8.5.3.2 สารกึ่งตัวนำที่ถูกรเจือ

เมื่อมีการเติมสารเจือลงในสารกึ่งตัวนำจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้ง โครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำและค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า การเติมสารอื่นผสมลงไป เรียกว่า การเจือ (doping) มีความสำคัญอย่างยิ่งในการควบคุมค่าการนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำ ตัวอย่างเช่น ในกรณีที่จะเติมในกลุ่มธาตุหมู่ 5 เช่น P, As หรือ Sb เป็นต้น ตัวหนึ่งมีอิเล็กตรอนวงนอกสุดห้าตัว ถูกนำไปเติมให้กับสารกึ่งตัวนำที่เป็นธาตุหมู่สี่ อิเล็กตรอนสี่ตัวจะจับเป็นพันธะโควาเลนต์กับอะตอมสารกึ่งตัวนำ และเหลือเป็นอิเล็กตรอนว่างอยู่หนึ่งตัว อิเล็กตรอนที่เกินมานี้เกือบจะเป็นอิสระกับอะตอมหลัก และเราสามารถสร้างเป็นแบบจำลองโดยให้มีระดับพลังงานเกิดขึ้นในช่องว่างพลังงานที่ตำแหน่งด้านล่างใกล้กับแถบนำ การมีอะตอมเพนตะวาเลนซ์ (pentavalent atom) ส่งผลให้เกิดการมีอิเล็กตรอนในโครงสร้าง ดังนั้นจึงถูกเรียกว่าเป็นอะตอมผู้ให้ (donor atom) เนื่องจากระยะห่างระหว่างระดับพลังงานของอิเล็กตรอนของอะตอมผู้ให้กับขอบล่างของแถบนำมีค่าน้อย ประมาณ 0.05 อิเล็กตรอนโวลต์ ปริมาณการกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยก็เพียงพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนเหล่านี้เคลื่อนที่ไปสู่แถบนำได้ สารกึ่งตัวนำที่เจือด้วยอะตอมผู้ให้ถูกเรียกว่า สารกึ่งตัวนำชนิด n (n-type semiconductors) เนื่องจากเป็นสารที่มีประจุพาหะข้างมากเป็นอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบ ถ้าสารกึ่งตัวนำหมู่ 4 ถูกเจือด้วยอะตอมหมู่ 3 เช่น B, Al, Ga หรือ In เป็นต้น ที่มีอิเล็กตรอนวงนอกสุดสามตัว ดังเช่นในอินเดียม และอะลูมิเนียม อิเล็กตรอนสามตัวจะรวมเป็นพันธะโควาเลนต์กับอะตอมสารกึ่งตัวนำที่อยู่ใกล้เคียง เหลือที่ว่างสำหรับอิเล็กตรอนไว้หนึ่งที - โฮลตัวหนึ่ง - ซึ่งจะเป็พันธะที่สี่ถ้ามีอิเล็กตรอนในอะตอมสารเจือมากพอที่จะรวมตัวเป็นพันธะในสถานการณ์นี้สามารถสร้างแบบจำลองได้โดยการวาดระดับพลังงานในช่องว่างพลังงานในบริเวณที่อยู่เหนือแถบวาเลนซ์ อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ที่มีพลังงานเพียงพอจากอุณหภูมิห้องเข้าไปเติมระดับพลังงานที่ว่างนี้

จะเหลือโฮลทิ้งไว้ตัวหนึ่งในแถบวาเลนซ์ โฮล ตัวนี้สามารถนำกระแสไฟฟ้าได้เมื่อมีสนามไฟฟ้าปรากฏอยู่ เนื่องจากอะตอมไตรวาเลนซ์ (trivalent atom) ได้รับความเสียหายจากแถบวาเลนซ์ สารเจือประเภทนี้จึงถูกเรียกว่า อะตอมผู้รับ (acceptor atoms) สารกึ่งตัวนำที่ถูกเจือด้วยสารเจือแบบไตรวาเลนซ์ (ผู้รับ) มีชื่อว่า **สารกึ่งตัวนำชนิด p** เนื่องจากประจุพาหะข้างมากคือ โฮล ที่มีประจุบวก เมื่อการนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำเป็นผลเนื่องมาจากสารเจือผู้รับหรือสารเจือผู้ให้วัสดุ นั้นจึงถูกเรียกว่า สารกึ่งตัวนำเอ็กซ์ทรินสิค

ช่วงความหนาแน่นของสารเจือทั่วไปสำหรับสารกึ่งตัวนำเอ็กซ์ทรินสิคคือ  $10^{13} - 10^{19}$  ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ขณะที่ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำทั่วไปมีค่า  $10^{21}$  ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยประมาณ



ภาพที่ 8.9 (ก) สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (ข) สารกึ่งตัวนำชนิดพี

การเติมอะตอมของธาตุในหมู่ III (B, Al, Ga, In, Tl) ที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเพียงสามตัวให้ผลทำนองเดียวกัน ตัวอย่างหนึ่งคือ แกลเลียม ( $Z = 31$ ) ในฐานะสารเจือปนแทนในเจอร์เมเนียม อะตอมแกลเลียมอาจจะสร้างพันธะโคเวเลนต์สี่พันธะแต่มันมีอิเล็กตรอนตัวนอกแค่สามตัว อย่างไรก็ตามมันสามารถขโมยอิเล็กตรอนหนึ่งตัวจากอะตอมเจอร์เมเนียมข้างเคียงเพื่อให้ครบพันธะโคเวเลนต์สี่พันธะที่ต้องการได้ อะตอมที่ได้มีโครงสร้างแบบอิเล็กตรอนเดียวกับ Ge แต่มีขนาดใหญ่กว่าเล็กน้อย เพราะประจุนิวเคลียสของแกลเลียมน้อยกว่า คือมี  $+31e$  แทนที่จะเป็น  $+32e$  การขโมยนี้ทิ้งอะตอมข้างเคียงให้มีโฮลหรืออิเล็กตรอนที่หายไปหนึ่งตัว โฮลทำตัวเป็นประจุบวกที่เคลื่อนที่ทั่วผลึกได้ด้วยสภาพนำในตัว อิเล็กตรอนที่ถูกขโมยถูกยึดกับอะตอมแกลเลียมในระดับที่เรียกว่า ระดับตัวรับประมาณ 0.01 อิเล็กตรอน โวลต์ เหนือด้านบนของแถบวาเลนซ์ อะตอมแกลเลียมซึ่งเรียกว่า เป็นตัวรับ จึงรับอิเล็กตรอนหนึ่งตัวไปเพื่อให้ครบพันธะโคเวเลนต์สี่พันธะที่

ต้องการ อิเล็กตรอนพิเศษนี้ทำให้อะตอมแกเลียมที่เดิมเป็นกลางมีประจุสุทธิ  $-e$  ไอออนแกเลียมที่เกิดขึ้นไม่มีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่ ในสารกึ่งตัวนำที่ถูกเจือสารด้วยตัวรับโดยมองสภาพนำไฟฟ้าเกือบทั้งหมดว่าเป็นผลจากการเคลื่อนที่ของประจุบวก (โฮล)

## 8.6 อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor equipments)

อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำมีบทบาทซึ่งขาดไม่ได้ในอิเล็กทรอนิกส์ร่วมสมัย ในวิทยุและโทรทัศน์สมัยแรก อุปกรณ์รับส่งอาศัยหลอดสุญญากาศ แต่สิ่งเหล่านี้ได้ถูกแทนที่เกือบหมดในสามทศวรรษสุดท้ายด้วยอุปกรณ์สถานะของแข็ง ซึ่งรวมทั้งทรานซิสเตอร์ ไดโอด วงจรรวม และอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำอื่น หลอดสุญญากาศที่เหลือรอดอย่างเดียวในอุปกรณ์วิทยุและโทรทัศน์คือหลอดภาพในเครื่องรับโทรทัศน์ส่วนใหญ่ อุปกรณ์ภาพในกล้องโทรทัศน์ในห้องถ่าย และเครื่องส่งกำลังสูง แผ่นสารกึ่งตัวนำบางใช้เป็นโฟโตเซลล์ได้ เมื่อวัสดุถูกฉายด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่โฟตอน มีพลังงานอย่างน้อยเท่ากับช่องว่างแถบระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบการนำ อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์จะถูกคลื่นโฟตอนและกระโดดไปแถบการนำที่มีส่วนต่อสภาพนำได้ สภาพนำจึงเพิ่มขึ้นตามความเข้มคลื่น เครื่องตรวจจับอนุภาคประจำทำงานด้วยหลักการเดียวกัน วงจรภายนอกให้โวลเตจคร่อมสารกึ่งตัวนำ อนุภาคประจุมีพลังที่เคลื่อนที่ผ่านสารกึ่งตัวนำชนอย่างไม่ยืดหยุ่นกับวาเลนซ์อิเล็กตรอนกระตุ้นมันจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบการนำและสร้างคู่ของโฮลและอิเล็กตรอน การนำ สภาพนำเพิ่มขึ้นชั่วขณะทำให้เกิดพัลส์ กระแสในวงจรรวม เครื่องตรวจจับสถานะของแข็งใช้กันอย่างแพร่หลายในงานวิจัยฟิสิกส์ทางด้านฟิสิกส์นิวเคลียร์และฟิสิกส์พลังงานสูง

ในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำหลายชนิดหลักการสำคัญคือ สภาพการนำของวัสดุถูกควบคุมด้วยความเข้มข้นสารเจือปน ซึ่งเปลี่ยนค่าได้ในขอบเขตที่กว้างจากบริเวณหนึ่งของอุปกรณ์ไปยังอีกบริเวณ หนึ่ง ตัวอย่างหนึ่งคือ รอยต่อพี-เอ็น (**p-n junction**) ที่ขอบเขตระหว่างบริเวณหนึ่งของสารกึ่งตัวนำที่มีสารเจือปนชนิด p กับอีกบริเวณหนึ่งที่มีสารเจือปนชนิด n วิธีหนึ่งในการสร้างรอยต่อ p-n ทำโดยพอก พูนวัสดุชนิด n บางชนิดบนผิวสะอาดมาก ๆ ของวัสดุชนิด p บางชนิด การประดิษฐ์รอยต่อพี เริ่มจากการเปลี่ยนแปลงผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ให้เป็นชนิดเอ็นโดยเติมสารเจือปนชนิดให้อิเล็กตรอน แล้วจึงเปลี่ยนแปลงผลึกเดี่ยวของสารที่เหลือให้เป็นชนิดพี โดยการเติมสารเจือปนชนิดรับอิเล็กตรอน บริเวณที่แยกชนิดเอ็นจากชนิดพี เมื่อเกิดรอยต่อพี-เอ็น โฮลจะแพร่จากซ้ายไปขวาและอิเล็กตรอนจะแพร่จากขวาไปซ้าย ทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้น โฮลบางตัว

ที่มีพลังงานมากพอ จะแพร่ข้ามรอยต่อไปยังบริเวณเอ็น และเกิดการรวมตัวกับอิเล็กตรอนตัวนำ ทำให้เกิดกระแสโฮล  $I_1$  จากด้านพีไปยังด้านเอ็น ในขณะที่เดียวกันการกระตุ้นของพลังงานความร้อนจะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้นในด้านเอ็น และโฮลที่เกิดขึ้นจะแพร่ข้ามรอยต่อไปยังบริเวณพี ทำให้เกิดกระแส  $I_2$  ที่สภาวะสมดุลกระแสทั้งสองจะเท่ากัน เมื่อเราให้ความต่างศักย์  $V$  โดยที่ขั้วบวกของเซลล์ไฟฟ้าต่อกับด้านพี และขั้วลบของเซลล์ไฟฟ้าต่อกับด้านเอ็น เรียกว่าไบอัสเดินหน้า (forward bias) กำแพงศักย์ที่บริเวณรอยต่อจะลดต่ำลง กระแส  $I_1$  มีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับกระแสอิเล็กตรอนตรงข้ามกับกระแสโฮล ในขณะที่ไบอัสเดินหน้า อิเล็กตรอนจำนวนมากสามารถข้ามกำแพงศักย์ได้ และไปรวมกับกระแสโฮลในทิศทางตรงกันข้ามทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าจำนวนมาก ในกรณีตรงกันข้าม ถ้าต่อขั้วลบเข้ากับด้านพี และขั้วบวกกับด้านเอ็น เรียกการไบอัสกลับทาง (reverse bias) กำแพงศักย์บริเวณรอยต่อจะมีค่าเพิ่มขึ้น กระแส  $I_1$  ลดลงแต่กระแส  $I_2$  ไม่เปลี่ยนแปลง

### 8.6.1 ทรานซิสเตอร์

การประดิษฐ์ทรานซิสเตอร์โดยจอห์น บาร์ดีน (John Bardeen) ค.ศ. 1908 – 1991 วอลเตอร์ แบริตเทน (Walter Brattain) ค.ศ. 1902 – 1987 และวิลเลียม ชอกกิลีย์ (William Shockley) ค.ศ. 1910 – 1989 ในปี ค.ศ. 1948 เป็นการปฏิวัติโลกอิเล็กทรอนิกส์อย่างสิ้นเชิง ผลงานชิ้นนี้ทำให้พวกเขาทั้งสามคนได้ร่วมกันรับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ ในปี ค.ศ. 1956 โดยในปี ค.ศ. 1960 ทรานซิสเตอร์ได้เข้ามาแทนที่หลอดสุญญากาศในอุปกรณ์ต่างๆ ที่เป็นอิเล็กทรอนิกส์ การเริ่มต้นใช้ทรานซิสเตอร์ก่อให้เกิดอุตสาหกรรมที่มีมูลค่าเป็นล้านล้านดอลลาร์ที่ผลิตอุปกรณ์ที่ได้รับความนิยมอย่างเช่น คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล คีย์บอร์ดไร้สาย และคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กพกพา

ทรานซิสเตอร์แบบรอยต่อ (junction transistor) ตัวหนึ่งประกอบไปด้วยวัสดุสารกึ่งตัวนำที่มีบริเวณ n แคบมาก ๆ โดยถูกประกอบด้วยบริเวณ p สองบริเวณ หรืออาจจะเป็นบริเวณ p ที่ถูกประกบด้วยบริเวณ n สองบริเวณ ซึ่งในแต่ละกรณีนั้นทรานซิสเตอร์จะเกิดจากรอยต่อ p-n สองรอยต่อทรานซิสเตอร์ชนิดนี้เป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในช่วงแรกของอิเล็กทรอนิกส์สารกึ่งตัวนำ

## 8.7 บทสรุป

ของแข็งสามารถจำแนกออกเป็นอัญฐาน ซึ่งมีการจัดเรียงตัวของอะตอมไม่เป็นระเบียบ และผลึกที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมอย่างเป็นระเบียบ ถ้าจำแนกตามชนิดของพันธะจะแบ่งออกเป็น 5 ประเภท คือ (1) พันธะไอออนิก (2) พันธะโคเวเลนต์ (3) พันธะไฮโดรเจน (4) พันธะโมเลกุล และ (5) พันธะโลหะ เซลหนึ่งหน่วยเป็นกลุ่มที่เล็กที่สุดในผลึกซึ่งแทนโครงสร้างของผลึกนั้น หรืออาจกล่าวได้ว่า เมื่อใช้การดำเนินการเคลื่อนย้ายซ้ำๆ กันจะทำให้เกิดผลึกขึ้นมา แถวของจุดที่ได้จากการดำเนินการเคลื่อนย้ายเรียกว่าแลตทิซ สำหรับสสารที่เป็นฉนวน อิเล็กตรอนจะยึดแน่นอยู่กับอะตอม และไม่สามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระในผลึก โลหะถือเป็นตัวนำที่ดีจะมีอิเล็กตรอนซึ่งไม่ยึดแน่นกับอะตอมและสามารถเคลื่อนที่ในผลึกอย่างอิสระ ทรูคและลอเรนทซ์เป็นผู้เสนอทฤษฎีอิเล็กตรอนอิสระยุคเก่าของโลหะ ซึ่งสามารถทำนายกฎของโอห์ม และความสัมพันธ์ระหว่างสภาพการนำความร้อนและไฟฟ้าได้ แต่ทฤษฎีนี้ไม่สามารถทำนายสภาพนำไฟฟ้าที่ขึ้นกับอุณหภูมิ และความร้อนจำเพาะของโลหะตลอดจนคุณสมบัติของแม่เหล็กได้ ปัญหาดังกล่าวหมดไปเมื่อชอมเมอร์เฟลด์ได้เสนอทฤษฎีอิเล็กตรอนอิสระตามแบบกลศาสตร์ควอนตัมขึ้นมา การจัดจำแนกของแข็งออกเป็น ฉนวน ตัวนำและสารกึ่งตัวนำ อธิบายได้ด้วยทฤษฎีควอนตัม มีวิธีการเบื้องต้น คือ ทฤษฎีแถบพลังงาน สำหรับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ หลักสำคัญเบื้องต้นคือ หลักของรอยต่อพี-เอ็น การประดิษฐ์รอยต่อพี-เอ็น เริ่มจากการเปลี่ยนแปลงผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ให้เป็นชนิดเอ็น โดยเติมสารเจือปนชนิดให้อิเล็กตรอน แล้วจึงเปลี่ยนแปลงผลึกเดี่ยวของสารที่เหลือให้เป็นชนิดพี โดยการเติมสารเจือปนชนิดรับอิเล็กตรอน บริเวณที่แยกชนิดเอ็นจากชนิดพี เรียกว่า รอยต่อพี-เอ็น คุณสมบัติที่สำคัญของสารกึ่งตัวนำไดโอด และทรานซิสเตอร์

## แบบฝึกหัด

1. พันธะที่ยึดเหนี่ยวโมเลกุลของของแข็งมีอะไรบ้าง แตกต่างกันอย่างใด จงอธิบาย
2. อิเล็กตรอนตัวหนึ่งอยู่ในกล่องศักย์รูปสี่เหลี่ยม ที่สถานะพื้นอิเล็กตรอนนี้มีพลังงาน 1 อิเล็กตรอนโวลต์ จงหาความกว้างของกล่อง [คำตอบ 0.614 นาโนเมตร]
3. จงแสดงว่าสำหรับผลึกรูปลูกบาศก์ที่มีจุดศูนย์กลางในตัวมีค่าคงที่เมคเคลอสูงเท่ากับ 1.7627
4. จงหาค่าพลังงานที่จำเป็นต้องใช้กระตุ้นให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากสถานะพื้น ไปยังสถานะกระตุ้น  $n = 3$  ในโลหะตัวนำ [คำตอบ 9 อิเล็กตรอนโวลต์]
5. สำหรับผลึก NaCl ที่มีรัศมีอะตอมเท่ากับ 2.81 ค่าเมคเคลอสูงเท่ากับ 1.7476 และ  $n = 9$  จงหาพลังงานยึดเกาะรวมกันต่ออะตอม [คำตอบ -7.94 อิเล็กตรอนโวลต์]
6. จงคำนวณหาพลังงานเฟอร์มิของโซเดียมที่ศูนย์องศาสัมบูรณ์ [คำตอบ 3.15 อิเล็กตรอนโวลต์]
7. ทฤษฎีกลศาสตร์ควอนตัมช่วยแก้ปัญหาข้อจำกัดของทฤษฎีอิเล็กตรอนอิสระยุคเก่าได้อย่างไร
8. ธาตุใดบ้างที่เหมาะสมสำหรับการเป็นสารเจือปนในซิลิกอนเพื่อทำให้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีและชนิดเอ็น

## เอกสารอ้างอิง

- กฤษณา ชุตินา. (2556). **หลักเคมีทั่วไป 1**. (พิมพ์ครั้งที่ 19). กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย และคณะ. (2560). **เคมี 1 12/e**. กรุงเทพมหานคร : แมคกรอ-ฮิล.
- ปิยพงษ์ สิทธิคง. (2553). **ฟิสิกส์ระดับอุดมศึกษา เล่ม 3**. กรุงเทพมหานคร: วิรัตน์ เอ็ดดูเคชั่น จำกัด
- ประภาณี เกษมศรี ณ อยุธยา และคณะ. (2555). **เคมีทั่วไปเล่ม 1**. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- รัชนิกร วันจันทิก. (2557). **พื้นฐานและการประยุกต์ของจลนพลศาสตร์เคมี**. มหาสารคาม : อภิชาติการพิมพ์.
- วิทยา เรืองพรวิสุทธิ. (2558). **เคมีวัสดุ เคมีพื้นผิวและปฏิกิริยาเร่ง**. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Ashcroft, N. W., and Mermin, D.N. (1975). *Solid State Physics*. Tokyo: CBS Publishing Japan, LTD.
- Chang, R. (2010). **Chemistry (10<sup>th</sup> Edition)**. United State of America : McGraw-Hill Higher Education.
- Flowers, P., et al. (2014). **Chemistry**. United State of America : OpenStax.
- Moore, J.W., Stanitski, C.L & Jurs, P.C. (2002). *CHEMISTRY-The Molecular Science*. Fort Worth: Harcourt college.
- Petrucci, R. H., et al. (2011). **General Chemistry : Principles and Modern Applications (10<sup>th</sup> Edition)**. United State of America : MacMillian Publishing Company.
- Serway, R.A., Moses, C.J., & Moyer, C.A. (2005). **Modern Physics 3<sup>rd</sup> ed**. California: Brooks/Cole-Thomson Learning.
- Serway, R. A., and Jewett, J. W. (2014). **Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics 9<sup>th</sup> ed**. Belmont: Brooks/Cole-Thomson Learning.
- Thornton, T.S., and Rex, A. (2013). **Modern Physics for Scientists and Engineers 4<sup>th</sup> ed**. Boston: Brooks/Cole- Cengage Learning.
- Young, H.D., and Freedman, R.A. (2016). **Sear's & Zemansky's University Physics with Modern Physics 14<sup>th</sup> ed**. Essex: Pearson Education Limited.

## กิจกรรมส่งเสริมสมรรถนะทางการเรียนรู้วิทยาศาสตร์

**คำชี้แจง** กิจกรรมนี้ได้พัฒนาตามแนวคิดการเรียนรู้แบบเชิงรุก (Active Learning) ที่ส่งเสริมทักษะการคิดขั้นสูง โดยมุ่งเน้นที่การคิดแก้ปัญหา (Tientongdee, 2018) และการสอนฟิสิกส์แบบเพียร์ (สุมาลี เทียนทองดี, 2560)

- กิจกรรมที่ 1**      การหาความร้อนจำเพาะของลาวคหนึบกระดาษ
- กิจกรรมที่ 2**      การหาความยาวโฟกัสของเลนส์
- กิจกรรมที่ 3**      การทดลองของเฮิร์ตซ์
- กิจกรรมที่ 4**      การต่อวงจรความต้านทานอย่างง่าย
- กิจกรรมที่ 5**      การแผ่รังสีของวัตถุดำ
- กิจกรรมที่ 6**      อุปกรณ์การสลายตัวของกัมมันภาพตรังสี

## กิจกรรมที่ 1

### การหาความร้อนจำเพาะของลวดหนึบกระดาษ

**คำชี้แจง** กิจกรรมนี้ได้พัฒนาตามแนวทางการเรียนรู้แบบเชิงรุก (Active Learning) ที่ส่งเสริมทักษะการคิดขั้นสูง โดยมุ่งเน้นที่การคิดแก้ปัญหา (Tientongdee, 2018)

**คำถามท้าทาย** เราจะฝึกทักษะการคิดแก้ปัญหาทางวิทยาศาสตร์ได้อย่างไร : กรณีศึกษาการหาความร้อนจำเพาะของลวดหนึบกระดาษ

#### วัสดุและอุปกรณ์

1. แก้วน้ำทำจากกระดาษชานอ้อยจำนวน 3 อัน
2. เทอร์โมมิเตอร์
3. น้ำบริสุทธิ์
4. ลวดหนึบกระดาษจำนวน 15 ตัว
5. น้ำร้อน

#### กระบวนการดำเนินกิจกรรมแบบเพียร์ (สุมาลี เทียนทองดี, 2560)

1. เตรียมอุปกรณ์ต่างๆ ให้พร้อม จากนั้นนำน้ำบริสุทธิ์อุณหภูมิปกติที่ทราบมวลมาวัดอุณหภูมิตั้งต้นของน้ำด้วยเทอร์โมมิเตอร์ บันทึกค่าเอาไว้
2. ตั้งคำถามว่า “ทำไมจึงต้องบันทึกข้อมูลเหล่านี้ ?” และอภิปรายในกลุ่ม “เราจะหาความร้อนจำเพาะของลวดหนึบกระดาษได้อย่างไร ?” โดยให้คิดหากระบวนการในการหาคำตอบคนเดียวก่อน แล้วนำไปเสนอในกลุ่ม และสรุปออกมาในภาพรวมของกลุ่ม
3. เข้ากลุ่มเพื่อลงมือทำการทดลอง ซึ่งมวลของลวดหนึบกระดาษจำนวน 15 ตัวเอาไว้ นำลวดหนึบกระดาษเทใส่ในน้ำร้อนที่เตรียมไว้ ทำการวัดอุณหภูมิจนอุณหภูมิคงตัว บันทึกค่า
4. เทน้ำออกจากลวดหนึบกระดาษแล้วนำลวดหนึบกระดาษเทใส่ลงในน้ำบริสุทธิ์ที่เตรียมไว้ก่อนหน้านี้ วัดอุณหภูมิของน้ำที่มีลวดหนึบกระดาษ สังเกตการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ บันทึก
5. เมื่อได้อุณหภูมิสุดท้ายที่คงที่แล้ว ให้ตั้งคำถามว่า “จากข้อมูลเหล่านี้เราจะสามารถนำไปคำนวณหาค่าความร้อนจำเพาะของลวดหนึบกระดาษได้อย่างไร?”

**ขั้นวิเคราะห์ข้อมูล** ผู้เรียนควรสามารถแสดงวิธีการคำนวณหาค่าความร้อนจำเพาะจากข้อมูลที่ได้จากการทดลองอย่างเป็นขั้นตอน โดยนำความรู้ในเนื้อหาที่เรียนมาใช้ในการแสดงวิธีทำ

**ขั้นอภิปรายและสรุปผล** ให้ผู้เรียนร่วมกันอภิปรายผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการเปรียบเทียบผลว่าแต่ละคนหรือแต่ละกลุ่มได้ผลการทดลองเหมือนหรือเหมือนกันอย่างไร และช่วยกันสรุปภายในชั้นเรียน จากนั้นนำไปเขียนรายงานผลการทดลอง

**กิจกรรมที่ 2**  
**การหาความยาวโฟกัสของเลนส์**

**คำชี้แจง** กิจกรรมนี้ได้พัฒนาตามแนวคิดการเรียนรู้แบบเชิงรุก (Active Learning) ที่ส่งเสริมทักษะการคิดขั้นสูง โดยมุ่งเน้นที่การคิดแก้ปัญหา (Tientongdee, 2018)

**คำถามท้าทาย** เราจะฝึกการหาสมการทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆได้อย่างไร

**วัสดุและอุปกรณ์**

1. แท่นวางชุดอุปกรณ์การศึกษาเรื่องเลนส์
2. เลนส์นูน
3. หลอดไฟหรือต้นกำเนิดแสง
4. แหล่งจ่ายไฟ
5. วัตถุรูปร่างเป็นเส้นตรง เช่น เทียนเป่าเค้กวันเกิด
6. ฉากรับภาพสีขาว

**กระบวนการดำเนินกิจกรรมแบบเพียร์**

1. คำถามสำหรับในชั้นเรียนให้แต่ละคนคิดหาคำตอบของตนเองว่า “เราจะหาความยาวโฟกัสของเลนส์ได้อย่างไรบ้าง ?”
2. เข้ากลุ่มเพื่ออภิปรายการหาคำตอบของตนเอง และสรุปออกมาในภาพรวมของกลุ่มตนเอง
3. เข้ากลุ่มเพื่อลงมือทำการทดลอง

**ตอนที่ 1 หาความยาวโฟกัสของเลนส์นูน**

- 1.1 จัดอุปกรณ์ให้วางบนแท่นวางอุปกรณ์โดยให้ต้นกำเนิดแสงส่องวัตถุรูปร่างเส้นตรง ถัดไปคือ เลนส์นูน และจากนั้นเป็นฉากรับภาพสีขาว
- 1.2 ใช้ฉากรับภาพสีขาวหาดำแหน่งภาพจริง (เป็นภาพหัวกลับ) ที่เกิดขึ้น สังเกตความคมชัดของภาพ โดยหาดำแหน่งที่ภาพคมชัดที่สุด บันทึกผลตำแหน่งของวัตถุ เลนส์นูน และฉากรับภาพ

- 1.3 เปลี่ยนตำแหน่งของวัตถุอีก 2 ครั้ง โดยเลื่อนตำแหน่งของเลนส์ และทำการทดลองซ้ำ  
ข้อ 1-2

ตัวอย่างตารางบันทึกผลการทดลอง

ครั้งที่	ตำแหน่ง(cm)			ระยะ (cm)		ความยาวโฟกัส (cm)
	วัตถุ	เลนส์	ภาพ	วัตถุ	ภาพ	
1						
2						
3						
ความยาวโฟกัสเฉลี่ย						

- 1.4 คำนวณหาระยะวัตถุ ระยะภาพ และความยาวโฟกัสของเลนส์นูน

ตอนที่ 2 การหาความยาวโฟกัสของเลนส์นูนจากกำลังขยาย

- 2.1 วัดความสูงของวัตถุ (รูปตัว I) โดยใช้ไม้บรรทัด บันทึกผล  
2.2 ทดลองเหมือนขั้นตอนที่ 1.1 และ 1.2 โดยให้วัดขนาดของภาพที่เกิดขึ้นบนฉากรับภาพ  
ไปด้วย บันทึกขนาดของภาพ  
2.3 คำนวณกำลังขยายของเลนส์  
2.4 ทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง โดยเปลี่ยนระยะวัตถุ

ตัวอย่างตารางบันทึกผลการทดลอง

ครั้งที่	ตำแหน่ง (cm)			ระยะภาพ (cm)	ขนาดภาพ (cm)	กำลังขยาย (เท่า)
	วัตถุ	เลนส์	ภาพ			
1						
2						
3						

- 2.5 เขียนกราฟระหว่าง กำลังขยายของภาพ กับ ระยะภาพ โดยให้กำลังขยายเป็นแกนตั้ง  
และระยะภาพเป็นแกนนอน

- 2.6 หาความยาวโฟกัสจากกราฟ

### ตอนที่ 3 การหาความยาวโฟกัสของเลนส์เว้าโดยใช้เลนส์นูนช่วย

3.1 จัดอุปกรณ์บนแท่นวางอุปกรณ์เหมือนกับตอนที่หนึ่งแต่เพิ่มเลนส์เว้า โดยตั้งชั้นกลางระหว่างเลนส์ นูนกับฉากรับภาพสีขาว

3.2 ใช้ผลการทดลองตอนที่ 1 เพื่อหาดำแหน่งภาพจากเลนส์นูน จากนั้นปรับตำแหน่งฉากที่จะทำให้ เห็นภาพจากเลนส์เว้า

3.3 ทำการทดลองซ้ำข้อ 3.2 อีก 2 ครั้ง โดยเปลี่ยนตำแหน่งของเลนส์เว้า

#### ตัวอย่างตารางบันทึกผลการทดลอง

ครั้งที่	ตำแหน่ง (cm)					ระยะ (cm)		ความยาวโฟกัส (cm)
	วัตถุ	เลนส์นูน	ภาพ	เลนส์เว้า	ภาพ	วัตถุ	ภาพ	
1								
2								
3								
ความยาวโฟกัสเฉลี่ย								

#### ขั้นวิเคราะห์ข้อมูล

ผู้เรียนควรฝึกทักษะการคำนวณ โดยการหาค่าตัวแปรต่างๆ จากการทดลอง และการหาค่าเฉลี่ย รวมทั้งทักษะการเขียนกราฟ การวิเคราะห์กราฟ และหาความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ได้จากกราฟระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตาม และนำไปสู่คำนวณหาระยะวัตถุ ระยะภาพ และความยาวโฟกัสของเลนส์นูน จากข้อมูลในตาราง

#### ขั้นอภิปรายและสรุปผล

อภิปรายผลการทดลอง โดยการเปรียบเทียบการทดลองแต่ละตอน กับเพื่อนกลุ่มอื่นๆ อภิปรายร่วมกัน ในชั้นเรียน และสรุปผลการทดลองแต่ละตอนตามจุดประสงค์การเรียนรู้

### กิจกรรมที่ 3 การทดลองของเฮิร์ตซ์

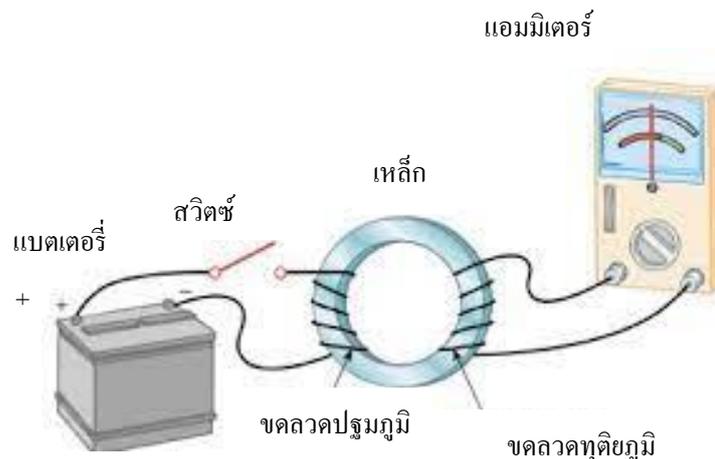
**คำชี้แจง** กิจกรรมนี้ได้พัฒนาตามแนวทางการเรียนรู้แบบเชิงรุก (Active Learning) ที่ส่งเสริมทักษะการคิดขั้นสูง โดยมุ่งเน้นที่การคิดแก้ปัญหา (Tientongdee, 2018)

**คำถามท้าทาย** พิจารณากระตุ้นด้วยคำถาม และการค้นหาคำตอบตามหลักวิทยาศาสตร์ :  
กรณีศึกษาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดขึ้นได้อย่างไร ?

#### วัสดุและอุปกรณ์

1. แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า หรือหม้อแปลงไฟฟ้า โวลต์ต่ำ
2. สายไฟ
3. อุปกรณ์ภาครับ
4. อุปกรณ์ภาคส่ง
5. แอมมิเตอร์
6. วัสดุต่างๆ ได้แก่ แผ่นกระดาษ แผ่นพลาสติก และ/หรือแผ่นอะลูมิเนียม

#### การจัดอุปกรณ์ การทดลองของเฮิร์ตซ์



**กระบวนการดำเนินกิจกรรมแบบเพียร์** (สุมาลี เทียนทองดี, 2560)

1. ตั้งคำถามเพื่ออภิปรายร่วมกันว่า “ใช้ชีวิตประจำวันของเราเกี่ยวข้องกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างไรบ้าง”

2. เข้ากลุ่มเพื่ออภิปรายคำตอบของตนเอง จากนั้นให้ฝึกการตั้งคำถามเกี่ยวกับเรื่องนี้ กลุ่มละอย่างน้อย 1 คำถาม เพื่อนำไปสู่การจัดกิจกรรม
3. ลงมือทำกิจกรรมการทดลอง โดยจัดเตรียมอุปกรณ์ชุดทดลอง ประกอบด้วย อุปกรณ์ภาคส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า อุปกรณ์ภาครับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้าโวลต์ต่ำ หรือแบตเตอรี่ (ถ่านไฟฉาย)
4. จัดวางอุปกรณ์ชุดทดลองคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และต่อไฟฟ้ากระแสตรง 6-12 โวลต์ จากหม้อแปลงไฟฟ้าโวลต์ต่ำหรือแบตเตอรี่ เข้ากับอุปกรณ์ภาคส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลงของหลอด LED และเข็มของมิเตอร์ โดยเลือกที่สวิตช์ LED/VU
5. ปรับระยะห่างของขดลวดของอุปกรณ์ภาคส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และอุปกรณ์ภาครับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลงของหลอด LED และเข็มของมิเตอร์
6. นำวัสดุต่าง ๆ เช่น แผ่นไม้ แผ่นอะลูมิเนียมบาง แผ่นพลาสติก กระดาษ และแผ่นโลหะหนา มาวางกั้น ระหว่างขดลวดของวงจรภาครับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และวงจรภาคส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลงของหลอด LED และเข็มของมิเตอร์
7. ออกแบบตารางบันทึกผลการทดลอง และบันทึกผลลงในตาราง
8. อภิปรายผลการทดลองโดยการเปรียบเทียบผลการทดลองกับกลุ่มอื่น
9. สรุปผลการทดลอง

#### ตัวอย่างตารางบันทึกผลการทดลอง

ระยะห่างที่ปรับ	การสังเกตหลอด LED	การสังเกตเข็มของแอมมิเตอร์
.....		
.....		
.....		
<b>การเปลี่ยนแปลงวัสดุ</b>		
.....		
.....		
.....		

### ขั้นวิเคราะห์ข้อมูล

ฝึกทักษะการสังเกตผลการทดลอง และการนำหลักการและทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามาใช้ประยุกต์ช่วยในการวิเคราะห์ว่าผลการทดลองนั้นเป็นไปตามหลักการและทฤษฎีที่ได้เรียนรู้มาหรือไม่

### ขั้นอภิปรายและสรุปผล

เปรียบเทียบผลการทดลองกับการทดลองของผู้อื่นหรือกลุ่มอื่น หากไม่มีให้หาผลการทดลองจากแหล่งข้อมูลในปรากฏในรายงานของการวิจัย หรือแหล่งข้อมูลในสื่ออื่นๆที่มีความน่าเชื่อถือ เพื่อเป็นการฝึกทักษะการใช้สื่อและเทคโนโลยีในการสื่อสาร เปรียบเทียบความเหมือนและความแตกต่างจากนั้นทำการสรุปผลการทดลอง

### กิจกรรมที่ 4

#### การต่อวงจรความต้านทานอย่างง่าย

**คำชี้แจง** กิจกรรมนี้ได้พัฒนาตามแนวคิดการเรียนรู้แบบเชิงรุก (Active Learning) ที่ส่งเสริมทักษะการคิดขั้นสูง โดยมุ่งเน้นที่การคิดแก้ปัญหา (Tientongdee, 2018)

**คำถามท้าทาย** เราจะต่อวงจรความต้านทานอย่างง่ายและคำนวณหาความต้านทานรวมได้อย่างไร?

#### วัสดุและอุปกรณ์

1. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง
2. ตัวต้านทานไฟฟ้า หลากหลายขนาดจำนวน 4 ตัว
3. มัลติมิเตอร์แบบดิจิทัลหรือแบบเข็ม
4. แผงวงจรไฟฟ้า

#### กระบวนการดำเนินกิจกรรมแบบเพียร์ (สุมาลี เทียนทองดี, 2560)

1. คำถามเพื่ออภิปรายในชั้นเรียน “ใช้ชีวิตประจำวันของเราเกี่ยวข้องกับตัวต้านทานไฟฟ้าและวงจรไฟฟ้าอย่างไรบ้าง”
2. นักศึกษาเข้ากลุ่มเพื่ออภิปรายคำตอบของตนเองอีกครั้ง จากนั้นให้แต่ละกลุ่มฯ ตั้งคำถามเอง กลุ่มละอย่างน้อย 1 คำถาม เพื่อนำไปสู่การจัดกิจกรรม

#### ตอนที่ 1 การต่อแบบอนุกรม

- 1.1 วัดความต้านทานของตัวต้านทานแต่ละตัว บันทึกค่าตัวต้านทาน
- 1.2 นำตัวต้านทานทั้ง 4 ตัว มาต่อกันแบบอนุกรม วัดความต้านทานทั้งวงจร แล้วต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง
- 1.3 ต่อมัลติมิเตอร์อนุกรมหลังตัวต้านทานตัวที่ 1, 2, 3, 4 และก่อนกลับเข้าแหล่งจ่ายไฟฟ้า เพื่อหาค่ากระแส
- 1.4 ต่อมัลติมิเตอร์ขนานกับตัวต้านทานตัวที่ 1, 2, 3, 4 และทั้งวงจรเพื่อหาค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า

#### ตอนที่ 2 การต่อแบบขนาน

- 2.1 วัดความต้านทานของตัวต้านทาน บันทึกค่าตัวต้านทานตัวที่ 1, 2, 3, และ 4
- 2.2 นำตัวต้านทานทั้ง 4 ตัวมาต่อกันแบบขนาน วัดความต้านทานทั้งวงจร แล้วต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้า กระแสตรง

2.3 ต่อมัลติมิเตอร์อนุกรมหลังตัวต้านทานตัวที่ 1, 2, 3, 4 และก่อนกลับเข้าแหล่งจ่ายไฟฟ้า เพื่อหา ค่ากระแส

2.4 ต่อมัลติมิเตอร์ขนานกับตัวต้านทานตัวที่ 1, 2, 3, 4 และทั้งวงจร เพื่อหาค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า

### ตอนที่ 3 การต่อแบบผสม

3.1 วัดความต้านทานของตัวต้านทานบันทึกค่าตัวต้านทานตัวที่ 1, 2, 3, และ 4

3.2 นำตัวต้านทานทั้ง 4 ตัวมาต่อวงจรผสม ดังรูป วัดความต้านทานทั้งวงจร แล้วต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

3.3 ต่อมัลติมิเตอร์อนุกรมหลังตัวต้านทานตัวที่ 1, 2, 3, 4 และก่อนกลับเข้าแหล่งจ่ายไฟฟ้า เพื่อหา ค่ากระแส

3.4 ต่อมัลติมิเตอร์ขนานกับตัวต้านทานตัวที่ 1, 2, 3, 4, คร่อมตัวที่ 1-2, คร่อมตัวที่ 3-4 และทั้งวงจรเพื่อหาค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า

หมายเหตุ ความถี่ให้ผู้เรียนออกแบบตารางการทดลองด้วยตนเอง

### ตัวอย่างตารางบันทึกผลการทดลอง

ตัวต้านทาน	ค่าความต้านทาน (โอห์ม)
ตัวที่ 1	
ตัวที่ 2	
ตัวที่ 3	
ตัวที่ 4	
ความต้านทานรวมทั้งวงจร	.....
ผ่านตัวต้านทาน	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)
ตัวที่ 1	
ตัวที่ 2	
ตัวที่ 3	
ตัวที่ 4	
กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านวงจร	.....
ความต่างศักย์ตกคร่อมตัวต้านทาน	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)
ตัวที่ 1	

ตัวที่ 2	
ตัวที่ 3	
ตัวที่ 4	
ความต่างศักย์ตก คร่อมทั้งวงจร	.....

### ขั้นวิเคราะห์ข้อมูล

ฝึกการวิเคราะห์โดยการแสดงวิธีการคำนวณตามหลักการที่เรียนรู้อมา เพื่อจะนำไปใช้ในการเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

1. จงแสดงการคำนวณหาค่าความต้านทานรวมของวงจร  
.....
2. จงแสดงการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านวงจร  
.....
3. จงแสดงการคำนวณค่าความต่างศักย์ตกคร่อมทั้งวงจร  
.....

### ขั้นอภิปรายและสรุปผลการทดลอง

จงเปรียบเทียบผลการทดลองที่วัดค่าได้และค่าที่ได้จากการคำนวณว่ามีความเหมือนหรือแตกต่างกันอย่างไร พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลการทดลองกับกลุ่มอื่น/ผู้อื่น

**กิจกรรมที่ 5**  
**การแผ่รังสีของวัตถุดำ**

**คำชี้แจง** กิจกรรมนี้ได้พัฒนาตามแนวคิดการเรียนรู้แบบเชิงรุก (Active Learning) ที่ส่งเสริมทักษะการคิดขั้นสูง โดยมุ่งเน้นที่การคิดแก้ปัญหา (Tientongdee, 2018)

**คำถามท้าทาย** ทำไมเราจึงมองเห็นข้างใน โพรงของวัตถุเป็นสีดำ และการแผ่รังสีของวัตถุดำเกิดขึ้นได้อย่างไร?

**วัสดุและอุปกรณ์**

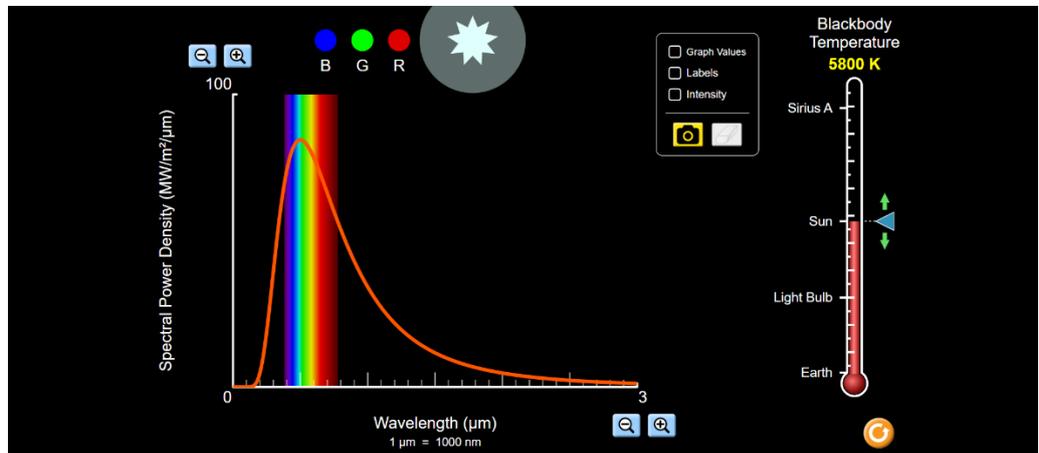
1. กล่องใส่รองเท้าแบบกระดาษ
2. กรรไกร
3. ไฟฉาย

**กระบวนการดำเนินกิจกรรมแบบเพียร์** (สุมาลี เทียนทองดี, 2560)

1. ตั้งคำถามสำหรับในชั้นเรียนว่า “วัตถุดำคืออะไร และทำไมเราจึงเห็นเป็นสีดำ”
2. เข้ากลุ่มเพื่ออภิปรายคำตอบของตนเอง จากนั้นให้ตัวแทนกลุ่มสรุปคำตอบของกลุ่มตนเอง เพื่อนำไปสู่การจัดกิจกรรม
3. ลงมือทำกิจกรรมการทดลอง โดยนำกล่องใส่รองเท้าแบบกระดาษที่มีฝาปิด มาเจาะรูตรงกลางที่ฝากล่องเป็นรูปร่างกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร
4. เจาะรูขนาดพอดีกับไฟฉายด้านข้างกล่อง นำไฟฉายสอดเข้าไปในช่องนั้น และปิดฝากล่อง ให้ผู้ทดลองมองเข้าไปในกล่องผ่านรูด้านฝากล่อง สังเกตและบันทึกผล
5. ปิดช่องที่สอดไฟฉาย และเปลี่ยนที่ใส่ไฟฉาย จากนั้นทำการทดลองซ้ำตามข้อ 2
6. ปรับความสว่างของไฟฉาย และทำการทดลองซ้ำ

7. ทำการศึกษาผ่านบทเรียนสำเร็จรูปตามที่อยู่ลิงค์นี้ เรื่อง กฎของแพลงก์

<http://phet.colorado.edu/en/simulation/blackbody-spectrum>



ที่มา : บทเรียนสำเร็จรูป, สืบค้นเมื่อ เมื่อ 12 มิถุนายน 2563 จาก

<http://phet.colorado.edu/en/simulation/blackbody-spectrum>

### ขั้นวิเคราะห์ข้อมูล

สังเกตผลการทดลองในขณะที่มีการปรับเปลี่ยนมุมของไฟฉาย และเมื่อเพิ่มแสงสว่างของไฟฉาย พิจารณากฎของแพลงก์เพื่อนำมาช่วยประกอบการอธิบายสิ่งที่สังเกตได้

### ขั้นอภิปรายและสรุปผลข้อมูล

เปรียบเทียบผลการทดลองกับเพื่อนกลุ่มอื่นๆ และอภิปรายผลที่ได้จากการเรียนรู้ผ่านสื่อเสมือน และนำกฎของแพลงก์มาช่วยในการอธิบาย

**กิจกรรมที่ 6**  
**อุปนิสัยการสลายตัวของกัมมันตภาพรังสี**

**คำชี้แจง** กิจกรรมนี้ได้พัฒนาตามแนวคิดการเรียนรู้แบบเชิงรุก (Active Learning) ที่ส่งเสริมทักษะการคิดขั้นสูง โดยมุ่งเน้นที่การคิดแก้ปัญหา (Tientongdee, 2018)

**คำถามท้าทาย** เปรียบเทียบผลของกิจกรรมนี้กับการสลายตัวของกัมมันตภาพรังสีได้ เขียนกราฟ วิเคราะห์ คำนวณ และสรุปผลการทดลองได้อย่างไร

**วัสดุและอุปกรณ์**

1. ลูกเต๋าคำนวณ 100 ลูก
2. โปรแกรมเขียนกราฟ เช่น Microsoft excel

**กระบวนการดำเนินกิจกรรมแบบเพียร์** (สุมาลี เทียนทองดี, 2560)

1. ตั้งคำถามสำหรับในชั้นเรียนว่า “ธาตุกัมมันตภาพเช่น โคนบอลล์-60 มีการสลายตัวอย่างไร”
2. เข้ากลุ่มเพื่ออภิปรายคำตอบของตนเอง จากนั้นให้ตัวแทนกลุ่มสรุปคำตอบของกลุ่มตนเอง เพื่อนำไปสู่การจัดกิจกรรม

**ตอนที่ 1** ความน่าจะเป็น 1 ใน 6

- 1.1 ทอยลูกเต๋าทิ้งหมด ลงในตะกร้าพลาสติก แล้วหยิบลูกเต๋าค้างออก 1 เต็ม ออกจากตะกร้าให้หมด แล้วนับว่าเอาออกไปก็ลูก
- 1.2 ให้นำ 100 ลบออกจากจำนวนที่หยิบออกไป และบันทึกค่าที่ได้ลงในตารางบันทึกผลให้เป็นครั้งที่ 1 โดยครั้งที่ 0 ให้บันทึกเป็น 100
- 1.3 จากนั้นนำจำนวนลูกเต๋าค้างที่เหลือ ทอยลงในตะกร้าเป็นครั้งที่ 2 และเลือกหยิบลูกเต๋าค้างออก 1 เต็ม อีกครั้ง (ไม่นำเอาลูกเต๋าค้างที่หยิบออกไปแล้วมารวมซ้ำในการทอยแต่ละครั้ง)
- 1.4 ทำซ้ำ ไปเรื่อยๆ เป็นจำนวน 15 ครั้ง
- 1.5 ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1 – 4 ใหม่อีกจำนวน 2 ครั้ง รวมทั้งสิ้น 3 ครั้ง

1.6 นำค่าที่ได้ทั้ง 3 ครั้ง มาคำนวณหาค่าเฉลี่ย โดยปัดให้เป็นจำนวนเต็ม ตามหลักการปัดเลข ก่อนบันทึกค่าเฉลี่ย

หมายเหตุ หากการทอยลูกเต๋าแต่ละครั้งไม่มีแต้ม 1 ออกมาเลย ให้ทำใหม่ ให้ถือว่าครั้งนั้นไม่ได้เกิดขึ้น

### ตอนที่ 2 ความน่าจะเป็น 2 ใน 6

2.1 ทำการทดลองเหมือนตอนที่ 1 แต่ให้เลือกลูกเต๋าทิ้งที่ออกแต้ม 1 และ 2 ออกจากตะกร้าให้หมด ทำซ้ำ

จนกว่าลูกเต๋าทิ้งจะเหลือ 1 ลูก โดยเมื่อเหลือ 1 ลูก ให้หยุด และใส่ศูนย์ในตารางบันทึกผลได้เลย

2.2 ทำซ้ำอีก 2 ครั้ง และคำนวณหาค่าเฉลี่ย เหมือนตอนที่ 1

### ตอนที่ 3 ความน่าจะเป็น 3 ใน 6

3.1 ทำการทดลองเหมือนกับตอนที่ 1 แต่ให้เลือกลูกเต๋าทิ้งที่ออกแต้ม 1, 2, และ 3 ออกจากตะกร้าให้หมดทำซ้ำ จนกว่าลูกเต๋าทิ้งจะหมด หรือเหลือ 2 ลูก โดยเมื่อหมดหรือเหลือ 2 ลูก ให้หยุด และใส่ศูนย์ในตารางบันทึกผลได้เลย

3.2 ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง และคำนวณหาค่าเฉลี่ย เหมือนกับตอนที่ 1

### ขั้นวิเคราะห์ข้อมูล

นำค่าเฉลี่ยของทั้งสามตอนมาเขียนกราฟ และฝึกใช้โปรแกรมในการเขียนกราฟ เพื่อฝึกทักษะการสื่อสารและเทคโนโลยี แสดงสมการที่ได้จากกราฟ นำมาหาค่าครึ่งชีวิต จากนั้นทำการคำนวณค่าครึ่งชีวิตจากทฤษฎีโดยใช้สมการ  $T_{1/2} = \frac{0.693}{\ln\left(\frac{1}{1-p}\right)}$  นำข้อมูลที่ได้จากกราฟ และที่ได้จากการคำนวณมาเปรียบเทียบกันว่ามีความเหมือนหรือต่างกันอย่างไร โดยทำการคำนวณค่าร้อยละของความคลาดเคลื่อน

### ขั้นอภิปรายและสรุปผลการทดลอง

สรุปค่าครึ่งชีวิตที่ได้จากการทดลอง และที่ได้จากการเปรียบเทียบกับทางทฤษฎี สรุปสาเหตุของความคลาดเคลื่อนที่เป็นไปได้ พร้อมทั้งให้เหตุผลประกอบ

## บรรณานุกรม

ก่องกัญจน์ ภัทรากาญจน์ และ ธนกาญจน์ ภัทรากาญจน์. (2554). **ฟิสิกส์ 2: ตัวอย่างและโจทย์พร้อม**

**คำเฉลย.** กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2549). **ฟิสิกส์ 2.** กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

เชิญโชค ศรีขวัญ และคณะ. (2546). **ฟิสิกส์ทั่วไป 2 General Physics II 2<sup>nd</sup> ed.** กรุงเทพมหานคร :

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล.

ประธาน บุรณศิริ และคณะ. (2559). **ฟิสิกส์ 2 : Physics for Scientists and Engineers II.**

กรุงเทพฯ : เซนเจก เลนนิ่ง อินโด-ไชน่า จำกัด.

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์. (2535). **ฟิสิกส์ 2.** กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์

มหาวิทยาลัย.

มูลนิธิเทคโนโลยีสารสนเทศตามพระราชดำริ. *กล้องจุลทรรศน์*. สืบค้น 6 มีนาคม 2563. จาก

<http://www.princess.it.org>

ทบวงมหาวิทยาลัย (2526). เคมี เล่ม 1 (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ : อักษรเจริญทัศน์.

ทวี ฉิมน้อย และมนู เพ็ญพูน. (2541). **ฟิสิกส์พื้นฐานระดับมหาวิทยาลัย 1.** กรุงเทพมหานคร:

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

ทิสนา เขมมณี. **ศาสตร์การสอน.** (2547). กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์

มหาวิทยาลัย

ธิดิ บวรรัตนารักษ์ และนคร ไพศาลกิตติสกุล. (2559). **กลศาสตร์ควอนตัมเบื้องต้น พิมพ์ครั้งที่ 2.**

กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ปิยพงษ์ สิทธิคง. (2548). **ฟิสิกส์ระดับอุดมศึกษา เล่ม 2.** กรุงเทพมหานคร: วิรัตน์ เอ็ดดูลักษณ์ จำกัด

ปิยพงษ์ สิทธิคง. (2551). **ฟิสิกส์ระดับอุดมศึกษา เล่ม 3.** กรุงเทพมหานคร: วิรัตน์ เอ็ดดูลักษณ์ จำกัด

แพทย์หญิงฉวีรัฐธิดา นุ่มวรพันธุ์. *กายวิภาคของดวงตา*. สืบค้น 2 มีนาคม 2563. จาก

<https://www.isoptik.com>

พงษ์ศักดิ์ ชินนาบุญ. (2552). **ฟิสิกส์มหาวิทยาลัย 2 เล่ม 1.** กรุงเทพมหานคร : วิทย์พัฒนา.

ฟิสิกส์ราชมงคล. *การแทรกสอดที่เกิดจากแสงสองแหล่ง*. สืบค้น 25 มีนาคม 2556. จาก,

<http://www.rmutphysics.com>

ฟิสิกส์ราชมงคล. *การหักเหของแสง*. สืบค้น 1 มีนาคม 2563. จาก

<http://www.neutron.rmutphysics.com>

ฟิสิกส์ราชมงคล. *โพลาริเซชัน*. สืบค้น 28 กุมภาพันธ์ 2563. จาก

- <http://www.rmutphysics.com/charud/pdf-learning/6/physics2/17Polarisation.pdf>  
ฟิสิกส์ราชมงคล. Learning atomic. สืบค้น 20 กุมภาพันธ์ 2563. จาก
- <http://www.atom.rmutphysics.com/charud/oldnews/0/286/2/4/atom/bo2.html>  
ฟิสิกส์ราชมงคล. *แสงสีขาวผ่านปริซึม*. สืบค้น 1 มีนาคม 2563. จาก
- [http://www.rmutphysics.com/physics/oldfront/62/light1/ligh\\_25.html](http://www.rmutphysics.com/physics/oldfront/62/light1/ligh_25.html)  
วิฑูร ชื่นวชิรศิริ และวีระชัย สิริพันธ์วรารณณ์. (2550). *ฟิสิกส์เบื้องต้น*. กรุงเทพมหานคร:  
มหาวิทยาลัยมหิดล.
- สมพงษ์ ใจดี. (2541). *ฟิสิกส์มหาวิทยาลัย 2*. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์  
มหาวิทยาลัย.
- สุมาลี เทียนทองดี. (2560). *การสอนแบบเพียร์ในรายวิชาฟิสิกส์*. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์  
มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา.
- สิทธิชัย โภไคยอุดม. (2552). *กลศาสตร์ควอนตัมพื้นฐาน*. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัย  
เทคโนโลยีมหานคร
- สถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ. *กล้องดาราศาสตร์*. สืบค้น 4 มีนาคม 2563. จาก  
<http://www.narit.or.th/index.php/songkhla-observatory>
- อนุกรรมการปรับปรุงหลักสูตรวิทยาศาสตร์ ทบวงมหาวิทยาลัย. (2543). *ฟิสิกส์ เล่ม 2*.  
กรุงเทพมหานคร: สมาคมวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์.
- Ashcroft, N. W., and Mermin, D.N. (1975). **Solid State Physics**. Tokyo: CBS Publishing Japan,  
LTD.
- Bellance, J., and Brandt, R. (2010). **21<sup>st</sup> Century Skills Rethinking How Students Learn**.  
Solution Tree Press.
- Brown, Paige. (2011). Light Logic for ‘Light’-ning Fast Computers. สืบค้น 25 มีนาคม 2556 จาก  
[http://www.scilogsg.com/from\\_the\\_lab\\_bench/light-logic-for-light-ning-fast-computers/](http://www.scilogsg.com/from_the_lab_bench/light-logic-for-light-ning-fast-computers/)
- Chang, R. (1998). **Chemistry (6<sup>th</sup> ed.)**. Boston: McGraw-Hill.
- Cutnell, J. D., and Johnson, K. W. (2005). **Physics**. NJ: John Wiley & Son.
- Crummett P. & Bwestern. (1994). **University Physics**. USA: Wm. C. Brown.
- David J. Griffiths. (2005). **Introduction to quantum mechanics**. NJ: Pearson prentice hall.
- Davidson, Michael W. (2003). Polarized Light Microscopy. สืบค้น 25 กุมภาพันธ์ 2556 จาก  
<http://www.micro.magnet.fsu.edu>
- Giancoli, D.C. (1998). **Physics**. NJ: Prentice Hall.

- Giambattista, A., Richardson, B.M., and Richardson, R.C. (2007). **College Physics (2<sup>nd</sup> ed)**. Boston: Mc Graw Hill.
- Halliday, D., Resnick, R. & Walker, J. (2011). **Principles of Physics (9<sup>th</sup> ed)**. California: John Wiley & Sons.
- Halliday, David., Resnick, Robert., and Walker, Jearl. (2005). **Fundamentals of Physics (7<sup>th</sup> ed)**. New York: John Willey& Son.
- Hecht, E. (2002). Optics(4thed). San Francisco: Addison Wesley. Moore, J.W., Stanitski, C.L & Jurs, P.C. (2002). **CHEMISTRY-The Molecular Science**. Fort Worth: Harcourt college.
- Halpern, A. (2011). **Schaum's outlines 3,000 Solved Problems in Physics**. New York: The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Jon, R. *Diffraction of Light*. Retrieved 25 February 2020 from <https://jonrista.com/2013/03/24/the-diffraction-myth>
- Manton, N. and Mee, N. (2017). **The Physical World**. Cambridge: Oxford university press.
- Petrucci, R. H., Harwood, W. S. & Herring, F. G. (2002). **General chemistry-principles and modern applications (8th ed.)**. New Jerzy: Prentice Hall.
- R. Nave. Diffraction Grating. Retrieved 28 Febuary 2020 from <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/grating.html>
- Serway, R. A., and Jewett, J. W. (2014). **Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics 9<sup>th</sup> ed**. Belmont: Brooks/Cole-Thomson Learning.
- Serway, R.A., Moses, C.J., & Moyer, C.A. (2005). **Modern Physics 3<sup>rd</sup> ed**. California: Brooks/Cole-Thomson Learning.
- Serway, R.A., Vuille, C., and Hughes, J. (2015). **College Physics 10<sup>th</sup> ed**. Stamford: Cengage Learning.
- Thornton, T.S., and Rex, A. (2013). **Modern Physics for Scientists and Engineers 4<sup>th</sup> ed**. Boston: Brooks/Cole- Cengage Learning.
- Tientongdee, S. (2018). Development of problem-solving skill by using active learning for student teachers in Introductory Physics. *J. Phys.: Conf. Ser.* DOI: 1144012002
- Young, H.D., and Freedman, R.A. **Sear's & Zemansky's University Physics with Modern Physics 14<sup>th</sup> ed**. Essex: Pearson Education Limited, 2016.
- Serway, Raymond A. (2006). **Serway's Principles of Physics a Calculus-based Text (4<sup>th</sup> ed)**.

California: Thomson Learning.

Serway, R.A. and Beichner, J.B. (2004). **Physics for Science and Engineers with Modern**

**Physics** (6<sup>th</sup> ed). Philadelphia:Saunders.

Ulfbastel. *Newton's Rings*. สืบค้น 20 กุมภาพันธ์ 2563. จาก

[https://en.wikipedia.org/wiki/File:Newton\\_rings.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Newton_rings.jpg)

Young, Hugh D. (1992). **University Physics** (8<sup>th</sup> ed). New York: Addison Wesley.

ภาคผนวก (ก)

คณิตศาสตร์สำหรับฟิสิกส์

สมการเอกลักษณ์ทางตรีโกณมิติ

$$\begin{aligned} \sin^2\theta + \cos^2\theta &= 1 & ; & & \csc^2\theta &= 1 + \cot^2\theta \\ \sec^2\theta &= 1 + \tan^2\theta & ; & & \sin^2\frac{\theta}{2} &= \frac{1}{2}(1 - \cos\theta) \\ \sin 2\theta &= 2\sin\theta\cos\theta & ; & & \cos^2\frac{\theta}{2} &= \frac{1}{2}(1 + \cos\theta) \\ \cos 2\theta &= \cos^2\theta - \sin^2\theta & ; & & 1 - \cos\theta &= 2\sin^2\frac{\theta}{2} \\ \tan 2\theta &= \frac{2\tan\theta}{1 - \tan^2\theta} & ; & & \tan\frac{\theta}{2} &= \sqrt{\frac{1 - \cos\theta}{1 + \cos\theta}} \\ \sin(A \pm B) &= \sin A \cos B \pm \cos A \sin B \\ \cos(A \pm B) &= \cos A \cos B \mp \sin A \sin B \\ \sin A \pm \sin B &= 2\sin\left[\frac{1}{2}(A \pm B)\right] \cos\left[\frac{1}{2}(A \mp B)\right] \\ \cos A + \cos B &= 2\cos\left[\frac{1}{2}(A + B)\right] \cos\left[\frac{1}{2}(A - B)\right] \\ \cos A - \cos B &= 2\sin\left[\frac{1}{2}(A + B)\right] \cos\left[\frac{1}{2}(B - A)\right] \end{aligned}$$

สมบัติของฟังก์ชันเอกซโพเนนเชียล

ถ้า  $a, b$  เป็นจำนวนจริงใดๆ ที่  $a > 0, b > 0$  และ  $m, n$  เป็นจำนวนจริงใดๆ

$$\begin{aligned} a^m \cdot a^n &= a^{m+n} \\ \frac{a^m}{a^n} &= a^{m-n} ; a \neq 0 \\ (a^m)^n &= a^{mn} \\ (ab)^n &= a^n \cdot b^n \\ \left(\frac{a}{b}\right)^n &= \frac{a^n}{b^n} ; b \neq 0 \\ a^{-n} &= \frac{1}{a^n} ; a \neq 0 \\ a^0 &= 1 \\ \sqrt[n]{a^m} &= a^{\frac{m}{n}} ; a \in R \text{ ซึ่ง } a \text{ มีรากที่ } n \end{aligned}$$

อนุพันธ์ของฟังก์ชัน

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} c &= 0 \quad , c \in R \\ \frac{d}{dx} x &= 1 \end{aligned}$$

$$\frac{d}{dx} c \cdot f(x) = c \frac{d}{dx} f(x)$$

$$\frac{d}{dx} x^n = nx^{n-1}, n \in R$$

$$\frac{d}{dx} [f(x) \pm g(x)] = \frac{d}{dx} f(x) \pm \frac{d}{dx} g(x)$$

$$\frac{d}{dx} (u \cdot v) = u \frac{dv}{dx} + v \frac{du}{dx}$$

$$\frac{d}{dx} \left( \frac{u}{v} \right) = \frac{v \frac{du}{dx} - u \frac{dv}{dx}}{v^2}, v \neq 0$$

$$\frac{d}{dx} \sin u = \cos u \frac{du}{dx}$$

$$\frac{d}{dx} \cos u = -\sin u \frac{du}{dx}$$

$$\frac{d}{dx} \tan u = \sec^2 u \frac{du}{dx}$$

$$\frac{d}{dx} \operatorname{cosec} u = -\operatorname{cosec} u \cdot \cot u \frac{du}{dx}$$

$$\frac{d}{dx} \sec u = \sec u \cdot \tan u \frac{du}{dx}$$

$$\frac{d}{dx} \cot u = -\operatorname{cosec}^2 u \frac{du}{dx}$$

$$\frac{d}{dx} \arcsin u = \frac{1}{\sqrt{1-u^2}} \frac{du}{dx}$$

$$\frac{d}{dx} \arccos u = -\frac{1}{\sqrt{1-u^2}} \frac{du}{dx}$$

$$\frac{d}{dx} \arctan u = \frac{1}{1+u^2} \frac{du}{dx}$$

$$\frac{d}{dx} \operatorname{arccot} u = -\frac{1}{1+u^2} \frac{du}{dx}$$

$$\frac{d}{dx} \operatorname{arcsec} u = \frac{1}{u\sqrt{u^2-1}} \frac{du}{dx}$$

$$\frac{d}{dx} \operatorname{arccosec} u = -\frac{1}{u\sqrt{u^2-1}} \frac{du}{dx}$$

ปริพันธ์ของฟังก์ชัน

$$\int dx = x + c$$

$$\int x^n dx = \frac{x^{n+1}}{n+1} + c, n \neq -1$$

$$\int \frac{1}{x} dx = \ln x + c$$

$$\int kf(x) dx = k \int f(x) dx$$

$$\int [f(x) \pm g(x)] dx = \int f(x) dx \pm \int g(x) dx$$

$$\int \sin x dx = -\cos x + c$$

$$\int \cos x dx = \sin x + c$$

$$\int \sec^2 x dx = \tan x + c$$

$$\int \operatorname{cosec}^2 x dx = -\cot x + c$$

$$\int \sec x \tan x dx = \sec x + c$$

$$\int \operatorname{cosec} x \cot x dx = -\operatorname{cosec} x + c$$

$$\int \tan x dx = \ln|\sec x| + c$$

$$\int \cot x dx = \ln|\sin x| + c$$

$$\int \sec x dx = \ln|\sec x + \tan x| + c$$

$$\int \operatorname{cosec} x dx = \ln|\operatorname{cosec} x - \cot x| + c$$

$$\int \frac{1}{\sqrt{1-x^2}} dx = \arcsin x + c = -\arccos x + c$$

$$\int \frac{1}{1+x^2} dx = \arctan x + c = -\operatorname{arccot} x + c$$

$$\int \frac{1}{x\sqrt{x^2-1}} dx = \operatorname{arcsec} |x| + c = -\operatorname{arccosec} |x| + c$$

**ภาคผนวก (ข)**

**เฉลยคำตอบอย่างละเอียดบางข้อ**

## เฉลยคำตอบอย่างละเอียดบางข้อ

### บทที่ 1

10. ก) เส้นทาง ab ไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตร เพราะฉะนั้น  $W = 0$  และ  $\Delta U = Q = 600$  จูล

ข) เส้นทาง bd ความดันคงที่ ระบบทำงานระหว่างการขยายตัว

$$\begin{aligned} W &= p(V_2 - V_1) \\ &= (8 \times 10^4 \text{ Pa})(5 \times 10^{-3} \text{ m}^3 - 2 \times 10^{-3} \text{ m}^3) \\ &= 240 \text{ จูล} \end{aligned}$$

เส้นทาง abd ให้งานทั้งหมด  $W = 240$  จูล และความร้อนที่ไหลเข้าไปในระบบ  $Q = 800$  จูล  
แทนลงในสมการ 14-6 จะได้

$$\Delta U = Q - W = 800 \text{ จูล} - 240 \text{ จูล} = 560 \text{ จูล}$$

เพราะฉะนั้นการเปลี่ยนแปลงของพลังงานภายใน ตามทาง abd = 560 จูล

ค)  $\Delta U$  ตามเส้นทาง acd ไม่เปลี่ยน เพราะขึ้นอยู่กับสถานะเริ่มต้นและสุดท้าย

ฉะนั้น ตามเส้นทาง acd ;  $\Delta U = 560$  จูล

$$\begin{aligned} \text{งานทั้งหมด } W &= p(V_2 - V_1) \\ &= (3 \times 10^4 \text{ พาสคาล})(5 \times 10^{-3} \text{ ลูกบาศก์เมตร} - 2 \times 10^{-3} \text{ ลูกบาศก์เมตร}) \\ &= 90 \text{ จูล} \end{aligned}$$

แทนลงในสมการ 14-7 จะได้

$$\begin{aligned} Q &= \Delta U + W \\ &= 560 \text{ จูล} + 90 \text{ จูล} \\ &= 650 \text{ จูล} \end{aligned}$$

### บทที่ 2

$$\begin{aligned} 1. \quad \text{กำลังขยาย } m &= \frac{f}{s - f} \\ 2.5 &= \frac{35/2}{s - 35/2} \\ s &= 24.5 \text{ cm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 8. \quad \frac{d}{L} &= (1)\lambda \\ 50 \times 10^{-6} \left( \frac{6 \times 10^{-3}}{L} \right) &= (1)(400 \times 10^{-9}) \\ L &= 0.75 \text{ m} = 75 \text{ cm} \end{aligned}$$

### บทที่ 3

3. ให้  $V_A$ ,  $V_B$  และ  $V_C$  เป็นศักย์ไฟฟ้าที่จุด P และ  $V$  เป็นศักย์ไฟฟ้ารวมที่จุด P

$$\begin{aligned} V &= V_A + V_B + V_C \\ V &= \frac{kq_1}{r_1} + \frac{kq_2}{r_2} + \frac{kq_3}{r_3} \\ &= (9 \times 10^9) \left[ \frac{3 \times 10^{-6}}{0.6} + \frac{1 \times 10^{-6}}{0.1} - \frac{1 \times 10^{-6}}{0.3} \right] \\ &= 1.05 \times 10^5 \text{ V} \end{aligned}$$

6. จากสมการ  $V = IR$  ที่แต่ละจุด  $V = (3)(2) = 6 \text{ V}$

7. จาก  $V_L = IX_L = I(2\pi fL)$

$$22 = 0.1 \times 2 \times 3.14 \times 50 \times L$$

$$L = 0.7 \text{ H}$$

### บทที่ 4

1. (ก) แรงแม่เหล็กบนเส้นลวด D ซึ่งเกิดจาก เส้นลวด C มีค่า

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} = \frac{(4\pi \times 10^{-7} \text{ T}\cdot\text{m/A})(6 \text{ A})}{2\pi(0.10 \text{ m})} = 1.2 \times 10^{-5} \text{ T}$$

แรงแบนเส้นลวด D ยาว 1 เมตรซึ่งตั้งฉากกับสนาม C จะมีค่า

$$F = IBL = (4.0 \text{ A})(1.2 \times 10^{-5} \text{ T})(1.0 \text{ m}) = 48 \mu\text{N}$$

(ข) ถ้ากระแสในเส้นลวด D ไหลในทิศตรงข้าม ทิศของแรงจะตรงข้าม เส้นลวดจะเกิดการผลักกัน และแรงจะมีขนาด  $48 \mu\text{N}$  ต่อระยะ 1 เมตร

6. จาก  $F$  แม่เหล็ก  $= qvB$

$$= 1.6 \times 10^{-19} \text{ C} \times 3 \times 10^7 \text{ m/s} \times 10 \text{ Wb/m}^2$$

$$= 4.8 \times 10^{-11} \text{ นิวตัน}$$

### บทที่ 5

1. นาฬิกาบนยานอวกาศใช้เวลา  $\Delta t$  นาน 6 ปี ส่วนบนโลกเห็นคู่แข่งมีอายุมากขึ้น 6 ปี แต่นาฬิกาของเขานบนโลกบอกว่าที่จริงแล้วเวลา  $\Delta t_0$  เท่ากับ 18 ปี ได้ผ่านไป ดังนั้น

$$\Delta t_0 = \gamma \Delta t$$

$$6 = \sqrt{1 - (v/c)^2}(18)$$

$$\begin{aligned} (v/c)^2 &= 1 - 0.111 \\ v &= 0.943c \end{aligned}$$

5. จาก  $E = mc^2$

แทนค่า  $mc^2 = \frac{5hc}{\lambda}$  ..... (1)

$mv = \frac{5h}{\lambda}$

โมเมนตัมของมวล  $m =$  โมเมนตัมของโปรตอน

$mv = \frac{h}{\lambda}$  .....(2)

(2)/(1)  $\frac{v}{c} = \frac{1}{5}$

### บทที่ 6

5. จาก  $E_{k_{\max}} = \frac{hc}{\lambda} - W$

$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{6.6 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{124 \times 10^{-9}} - 8 \times 1.6 \times 10^{-19}$

$\frac{1}{2}mv^2 = 1.6 \times 10^{-18} - 1.3 \times 10^{-18}$

$mv^2 = 6 \times 10^{-19}$

$m$  คูณตลอด  $(mv)^2 = 6 \times 10^{-19} m = 6 \times 10^{-19} \times 9 \times 10^{-31} = 54 \times 10^{-50}$

$mv = 7.3 \times 10^{-25}$

ความยาวคลื่นเดอบรอยล์  $= \frac{h}{mv} = \frac{6.6 \times 10^{-34}}{7.3 \times 10^{-25}} = 0.9$  นาโนเมตร

6. จากสมการความไม่แน่นอน  $\Delta x \cdot \Delta P_x \geq \hbar$

$P = m \Delta v = 0.05 \times 10^{-3} (20.7 - 20.5) = 10^{-5} \text{ kg-m/s}$

แทนค่า  $\Delta x \cdot 10^{-5} \geq \frac{\hbar}{2\pi}$

$\Delta x \geq \frac{10^5 \times 6.6 \times 10^{-34}}{2\pi}$

$\Delta x \geq 1.05 \times 10^{-29} \text{ m}$

### บทที่ 7

6. หาจำนวนนิวเคลียสจาก  $R = \lambda N$

จากโจทย์  $R = 20,000$  ต่อวินาที

$$\lambda = \frac{0.693}{T} = \frac{0.693}{1620 \times 365 \times 24 \times 3600} = 1.36 \times 10^{-11} \text{ ต่อวินาที}$$

$$20,000 = 1.36 \times 10^{-11} N$$

$$N = 1.47 \times 10^{15} \text{ นิวเคลียส}$$

$$\therefore \text{มวลของเรเดียม} = \frac{1.47 \times 10^{15}}{6.02 \times 10^{23}} \times 226 = 5.54 \times 10^{-7} \text{ กรัม}$$

7. หามวลของ  ${}_{92}^{235}\text{U}$  ที่กลายเป็นพลังงาน  $9.632 \times 10^{13}$  จูล

$$\text{จาก } E = mc^2$$

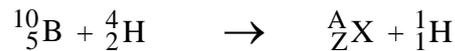
$$9.632 \times 10^{13} = m \times (3 \times 10^8)^2$$

$$m = \frac{9.632 \times 10^{13}}{9 \times 10^{16}} = 1.07 \times 10^{-3} \text{ Kg}$$

$$\therefore \text{หลังจากระเบิดมวลจะหายไป} = 1.07 \times 10^{-3} \text{ กิโลกรัม}$$

8. ให้นิวเคลียสที่อยู่ในวงเล็บคือ  ${}^A_Z\text{X}$

ก. สมการเขียนใหม่ได้



จากผลรวมเลขมวลอะตอมซ้ายมือ = ขวามือ

$$\therefore 10 + 4 = A + 1$$

$$A = 13$$

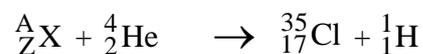
จากผลรวมเลขอะตอมซ้ายมือ = ขวามือ

$$5 + 2 = Z + 1$$

$$Z = 6$$

นิวเคลียสของ  ${}^A_Z\text{X} = {}_6^{13}\text{X}$  คือ  ${}_{6}^{13}\text{C}$

ข. เขียนสมการใหม่ได้



$$\therefore A + 4 = 35 + 1$$

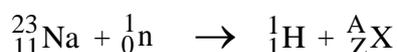
$$A = 32$$

$$\text{และ } Z + 2 = 17 + 1$$

$$Z = 16$$

นิวเคลียสของ  ${}^A_Z\text{X} = {}_{16}^{32}\text{X}$  คือ  ${}_{16}^{32}\text{S}$

ค. เขียนสมการใหม่



$$\therefore 23 + 1 = 1 + A$$

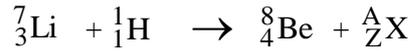
$$A = 23$$

$$\text{และ } 11 + 0 = 1 + Z$$

$$Z = 10$$

$$\therefore \text{นิวเคลียสของ } {}_Z^AX = {}_{10}^{23}X \text{ คือ } {}_{10}^{23}\text{Ne}$$

ง. เขียนสมการใหม่



$$\therefore 7 + 1 = 8 + A$$

$$A = 0$$

$$\text{และ } 3 + 1 = 4 + Z$$

$$Z = 0$$

$$\therefore \text{นิวเคลียสของ } {}^A_Z\text{X} = {}^0_0\text{X} \text{ คือรังสีแกมมา } \gamma$$



## บทที่ 8

4. จาก  $E_n = n^2 E_1$

$$E_3 = 3^2 (1.602 \times 10^{-19} \text{J})$$

$$E_3 = 1.442 \times 10^{-18} \text{J}$$

$$1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{J}$$

$$E_3 = 9 \text{ eV}$$

5. จาก  $E = -\alpha \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r_0} \left(1 - \frac{1}{n}\right)$

$$E = (-1.7476) \left( \frac{1}{4 \times 3.14 \times 8.85 \times 10^{-12}} \right) \left( \frac{(1.6 \times 10^{-19})^2}{2.81 \times 10^{-10}} \right) \left( 1 - \frac{1}{9} \right)$$

$$E = -1.27 \times 10^{-18} \text{J}$$

$$E = -7.94 \text{ eV}$$

\*\*\*\*\*

## ดัชนี

### ก

กฎการกระจัดของวิน	164,167
กฎของคูลอมบ์	67,68,98
กฎของเคอร์ชอฟ	89
กฎข้อที่ศูนย์ของอุณหพลศาสตร์	21
กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์	30
กฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์	21
กฎของฟาราเดย์	111
กฎของบีโอ-ซาวาร์ต	108
กฎของเลนซ์	111
กฎของโอห์ม	64,80,81,98
กฎของแอมแปร์	107
กระบวนการความดันคงตัว	26
กระบวนการปริมาตรคงตัว	26
กระบวนการความร้อนคงตัว	27
กระบวนการอุณหภูมิกงตัว	24
กรอบอ้างอิงสัมบูรณ์	137,138
การกระจายแสง	52
การขยายตัวของของเหลว	8
การขยายตัวของวัตถุ	4
การขยายตัวตามปริมาตร	7
การขยายตัวตามพื้นที่	6
การขยายตัวตามเส้น	5

การต่อแบบขนาน	85,98
การต่อแบบอนุกรม	84,98
การยืดของเวลา	142,143,157
การนำความร้อน	16-19
การนำความร้อนของโลหะ	224
การนำไฟฟ้าของฉนวน	227
การนำไฟฟ้าของโลหะ	224
การนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ	227
การแปลงความเร็วแบบลอเรนซ์	149
การแผ่รังสีความร้อน	16,20,21
การแผ่รังสีของวัตถุดำ	161,163,164
การแทรกสอดของแสง	37,47,48
การพาความร้อน	16,19
การโพลาไรเซชันของแสง	51
การเรียนรู้แบบเชิงรุก	237
การเลี้ยวเบนของแสง	36,37,49
การสะท้อนกลับหมด	53,54,55
การสะท้อนของแสง	37,59,60
การหักเหของแสง	37,44,55
การหดสั้นของความยาว	145
การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก	103
กำลังไฟฟ้า	64,83,84
กลศาสตร์ควอนตัม	160,161,181
<b>ข</b>	
ของแข็งผลึก	213-215
ของแข็งอสัณฐาน	212-214

**ค**

ความเข้มแสง	52
ความเค้นที่เกิดจากการขยายตัว	9
ความเป็นเวลาเดียวกัน	147
ความจุความร้อน	11-13,16,31
ความจุความร้อนจำเพาะ	12,13,16,31
ความต่างศักย์ไฟฟ้า	73,75,81,85
ความร้อนแฝงจำเพาะ	14,15,29
ความยาวคลื่นคอมป์ตัน	173,174,183
ควอนตัมของพลังงาน	160,167
ครึ่งชีวิต	196,199,200
คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	102,103,112,113
คลื่นไมโครเวฟ	103,124
คลื่นวิทยุ	103,113,119,122

**ด**

ตัวเก็บประจุ	65,85-88
--------------	----------

**ท**

ทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป	155,157
ทรานซิสเตอร์	230-232
ทัศนอุปกรณ์	56,57,60

**ธ**

ธาตุกัมมันตภาพรังสี	195,199
---------------------	---------

**น**

นิวไคลด์	187,188,195
นิวคลีออน	187,192,208

**ป**

ปฏิกิริยานิวเคลียร์	202-205,208
ปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชัน	202,204
ปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชัน	204
ปรากฏการณ์คอมป์ตัน	172
ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก	168
ปรากฏการณ์ฮอลล์	109

**ผ**

ผลของความร้อนที่มีต่อวัตถุ	4
----------------------------	---

**พ**

พันธะในของแข็ง	215
พันธะไอออนิก	215,216,218,231
พันธะโคเวเลนต์	215,231
พันธะโมเลกุล	215,218,231
พันธะโลหะ	215,219,231
พันธะไฮโดรเจน	215,218,231
พลังงานศักย์ไฟฟ้า	72,88

**ฟ**

พลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	127,128
พลังงานศักย์ไฟฟ้า	72
พลังงานหยุดนิ่ง	153,154,180
ฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอน	177
ไฟฟ้ากระแสสลับ	64,90-94

**ม**

มวลพร้อม	189-191, 204
----------	--------------

มีراج	55
โมเมนต์ในทฤษฎีสัมพัทธภาพ	151

ร

แรงเคลื่อนไฟฟ้า	64,82,83,90
แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	106
แรงภายในนิวเคลียส	189
รังสีแกมมา	126,191,196,207-209
รังสีบีตา	195
รังสีแอลฟา	186,195,195
รังสีอินฟราเรด	124
รังสีเอ็กซ์	126
รังสีอัลตราไวโอเล็ต	126
รัศมีของนิวเคลียส	192
รอยต่อพีเอ็น	232

ว

วงจรไฟฟ้ากระแสสลับ	95
--------------------	----

ส

สมการโฟโตอิเล็กตรอน	171
สมการแมกซ์เวลล์	120,129
สมการการแปลงแบบลอเรนตซ์	148
สมการเลื่อนของคอมป์ตัน	173
สมการคลื่นของชโรดิงเจอร์	180
สมรรถนะทางการเรียนรู้	236
สมบัติของนิวเคลียส	192
สมบัติความเป็นคลื่นของอนุภาค	175
สถานะทางฟิสิกส์ของสสาร	213

เสถียรภาพนิวเคลียร์	194
สนามแม่เหล็กไฟฟ้า	103,129
สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	122
สารกัมมันตภาพรังสี	195
สารกึ่งตัวนำ	225
สารกึ่งตัวนำที่ถูกรัด	228
ส่วนประกอบของนิวเคลียส	411
<b>ห</b>	
หลักการสัมพัทธภาพแบบกาลิเลียน	134
หลักความไม่แน่นอน	161,178-180
หม้อแปลงไฟฟ้า	64,97
<b>อ</b>	
ไอโซโทน	188
ไอโซโทป	188
ไอโซบาร์	188
อัตราการสลายตัว	197
อุณหภูมิ	2
อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ	230
<b>ฮ</b>	
โพล	228