หนังสือเรียนสาระการเรียนรู้พื้นฐานและเพิ่มเติม

ฟิสิกส์ เล่ม ๒

กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์

ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ ๕

ตามหลักสูตรการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช ๒๕๔๔

หนังสือเรียนสาระการเรียนรู้พื้นฐานและเพิ่มเติม

ฟิสิกส์ เล่ม ๒

กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์

ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ ๕

ตามหลักสูตรการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช ๒๕๔๔

จัดทำโดย

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

กระทรวงศึกษาธิการ

ISBN 974 - 01 - 3876 - 4

พิมพ์ครั้งที่หนึ่ง ๒๐๐,๐๐๐ เล่ม

พ.ศ. ๒๕๔๗

องค์การค้าของคุรุสภาจัดพิมพ์จำหน่าย

พิมพ์ที่โรงพิมพ์คุรุสภาลาดพร้าว

๒๒๔๙ ถนนลาดพร้าว วังทองหลาง กรุงเทพมหานคร

มีลิขสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติ

ประกาศกระทรวงศึกษาธิการ

เรื่อง อนุญาตให้ใช้หนังสือในโรงเรียน

ด้วยสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ได้จัดทำหนังสือเรียนสาระการเรียนรู้พื้นฐานและเพิ่มเติม ฟิสิกส์ เล่ม 2 ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 5 ตามสาระและมาตรฐานการเรียนรู้กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ หลักสูตรการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช 2544 กระทรวงศึกษาธิการพิจารณาแล้ว อนุญาตให้ใช้หนังสือนี้ในโรงเรียนได้

ประกาศ ณ วันที่ 6 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2547

(นางพรนิภา ลิมปพยอม)
ปลัดกระทรวงศึกษาธิการ

คำนำ

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ได้รับมอบหมายจากกระทรวงศึกษาธิการให้พัฒนาหลักสูตร หนังสือเรียน คู่มือครู และสื่ออื่นๆ ที่ใช้ประกอบการเรียนรู้ในกลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ เพื่อส่งเสริมการเรียนการสอนและวิธีเรียนรู้ให้เป็นไปตามหลักการและจุดหมายของหลักสูตร

หนังสือเรียนสาระการเรียนรู้พื้นฐานและเพิ่มเติม ฟิสิกส์ เล่ม 2 ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 5 นี้ จัดทำตามสาระและมาตรฐานการเรียนรู้ กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ หลักสูตรการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช 2544 มีเนื้อหาเกี่ยวกับ ของไหล ความร้อน คลื่นกล เสียง แสง แสงและทัศนอุปกรณ์ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในชีวิตประจำวันได้เป็นอย่างดี

สำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐานหวังเป็นอย่างยิ่งว่า หนังสือเรียนเล่มนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการจัดการเรียนรู้ และเป็นส่วนสำคัญในการพัฒนาทักษะกระบวนการเรียนรู้ด้านต่าง ๆ ทางวิทยาศาสตร์ และขอขอบคุณสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ตลอดจนบุคคลและหน่วยงานอื่นๆ ที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการจัดทำไว้ ณ โอกาสนี้

(คุณหญิงกษมา วรวรรณ ณ อยุธยา)
เลขาธิการคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน
5 กุมภาพันธ์ 2547

คำชี้แจง

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) ได้รับมอบหมายจากกระทรวงศึกษาธิการ ให้ดำเนินการจัดทำหลักสูตรการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช 2544 ของกลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ ซึ่งประกอบด้วยสาระหลัก 8 สาระคือ สิ่งมีชีวิตกับกระบวนการดำรงชีวิต ชีวิตกับสิ่งแวดล้อม สารและสมบัติของสาร แรงและการเคลื่อนที่ พลังงาน กระบวนการเปลี่ยนแปลงของโลก ดาราศาสตร์และอวกาศ ธรรมชาติของวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และมาตรฐานการเรียนรู้วิทยาศาสตร์สำหรับการศึกษาขั้นพื้นฐาน รวมทั้งมาตรฐานการเรียนรู้ช่วงชั้นซึ่งเป็นเป้าหมายสำหรับผู้เรียนทุกคนที่จะได้รับการพัฒนาทั้งด้านความรู้ กระบวนการคิด กระบวนการสืบเสาะหาความรู้ การแก้ปัญหาความสามารถในการสื่อสาร การตัดสินใจ การนำความรู้ไปใช้ในชีวิตประจำวันตลอดจนมีจิตวิทยาศาสตร์ คุณธรรมและค่านิยมที่ถูกต้องเหมาะสม โดยมุ่งเน้นความเป็นไทยควบคู่กับความเป็นสากล ตั้งแต่ปีการศึกษา 2546 เป็นต้นไป โรงเรียนจะต้องใช้หลักสูตรการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช 2544 จึงจำเป็นต้องมีสื่อการเรียนการสอนที่ได้รับการพัฒนาอย่างเหมาะสมและเป็นไปตามเป้าหมายของหลักสูตรดังกล่าว

หนังสือเรียนสาระการเรียนรู้พื้นฐานและเพิ่มเติม ฟิสิกส์ เล่ม 2 สำหรับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 5 เล่มนี้ สสวท. ได้พัฒนาขึ้นตามมาตรฐานการเรียนรู้เรียนกลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ เพื่อนำไปใช้เป็นหนังสือเรียนหลักประกอบด้วยเนื้อหาความรู้ที่เป็นหลักการพื้นฐานที่จำเป็นสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในชีวิตประจำวัน รวมทั้งส่วนที่เพิ่มเติมเพื่อการศึกษาต่อในระดับสูงขึ้นไป มีกิจกรรมการเรียนรู้ที่หลากหลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการสำรวจตรวจสอบ การปฏิบัติทดลอง การสืบค้นข้อมูล การอภิปราย อันจะก่อให้เกิดทักษะที่สำคัญในการเรียนรู้และการดำรงชีวิต ในการจัดทำหนังสือเรียนเล่มนี้ได้รับความร่วมมืออย่างดียิ่งจากคณาจารย์ ผู้ทรงคุณวุฒิ นักวิชาการอิสระ นักวิชาการและ ครูผู้สอนจากสถาบันต่างๆ ทั้งภาครัฐและเอกชน จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

สสวท. หวังเป็นอย่างยิ่งว่าหนังสือเรียนวิทยาศาสตร์เล่มนี้จะเป็นประโยชน์แก่นักเรียนและผู้เกี่ยวข้องทุกฝ่าย ที่จะช่วยให้การจัดการศึกษาวิทยาศาสตร์มีประสิทธิภาพและประสิทธิผล หากมีข้อเสนอแนะใดที่จะให้หนังสือเรียนเล่มนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น โปรดแจ้ง สสวท. ทราบด้วยจักขอบคุณยิ่ง

(นายพิศาล สร้อยธุหร่ำ)

ผู้อำนวยการ

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

สารบัญ

หน้า

ภาคเรียนที่ 1 ของไหล ความร้อน คลื่นกล (บทที่ 9, 10 และ 11)

บทที่ 9 ของไหล 1

9.1 ความหนาแน่น 2

9.2 ความดันในของเหลว 3

9.2.1 ความดันในของเหลวขึ้นอยู่กับความลึก 4

9.2.2 เครื่องมือวัดความดัน 7

9.2.3 ความดันกับชีวิตประจำวัน 9

9.3 กฎของพาสคัลและเครื่องอัดไฮดรอลิก 11

9.4 แรงลอยตัวและหลักของอาร์คิมีดิส 13

9.5 ความตึงผิว 18

9.6 ความหนืด 22

9.7 พลศาสตร์ของของไหล 26

9.7.1 ของไหลอุดมคติ 26

9.7.2 การไหลของของไหลอุดมคติ 26

9.7.3 สมการความต่อเนื่อง 27

9.7.4 สมการของแบร์นูลลี 29

9.7.5 การประยุกต์สมการของแบร์นูลลี 32

การทดลองและกิจกรรม **35**

การทดลอง 9.1 ความดันในของเหลว 35

การทดลอง 9.2 แรงลอยตัว 36

กิจกรรม 9.1 แรงตึงผิวของของเหลว 36

การทดลอง 9.3 ความตึงผิวของของเหลว 37

กิจกรรม 9.2 หลักของแบร์นูลลี 38

โจทย์แบบฝึกหัดบทที่ 9 39

หน้า

บทที่ 10 ความร้อน **47**

10.1 ความร้อน 48

10.1.1 อุณหภูมิ 48

10.1.2 การขยายตัวของวัตถุเนื่องจากความร้อน 52

10.1.3 สถานะและการเปลี่ยนสถานะของสาร 54

10.1.4 การถ่ายโอนความร้อน 58

10.1.5 การแผ่รังสีความร้อน 59

10.2 แก๊สอุดมคติ 60

10.2.1 กฎของบอยล์ 61

10.2.2 กฎของชาร์ลส์ 62

10.2.3 กฎของแก๊ส 63

10.3 ทฤษฎีจลน์ของแก๊ส 67

10.3.1 แบบจำลองของแก๊สอุดมคติ 67

10.3.2 ความดันและพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊ส 68

10.3.3 อัตราเร็วของโมเลกุลของแก๊ส 72

10.4 พลังงานภายในของระบบ 74

10.5 การประยุกต์ 77

10.5.1 เครื่องยนต์แบบต่างๆ 77

10.5.2 ไอน้ำในอากาศและความดันไอ 79

การทดลองและกิจกรรม **83**

การทดลอง 10.1 กฎของบอยล์ 83

การทดลอง 10.2 กฎของชาร์ลส์ 84

กิจกรรม 10.1 การปรับเทียบเทอร์มอมิเตอร์ 85

กิจกรรม 10.2 หาความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยของอุณหภูมิ 86

โจทย์แบบฝึกหัดบทที่ 10 87

หน้า

บทที่ 11 คลื่นกล **93**

11.1 การถ่ายโอนพลังงานของคลื่นกล 95

11.1.1 การสั่น การเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายและคลื่น 96

11.1.2 ชนิดของคลื่น 100

11.2 คลื่นผิวน้ำ 102

11.3 การซ้อนทับของคลื่น 108

11.4 สมบัติของคลื่น 112

11.4.1 การสะท้อน 112

11.4.2 การหักเห 117

11.4.3 การแทรกสอด 121

11.4.4 การเลี้ยวเบนของคลื่น 125

11.5 คลื่นนิ่งและการสั่นพ้อง 129

การทดลองและกิจกรรม **134**

กิจกรรม 11.1 คลื่นและตัวกลาง 134

การทดลอง 11.1 สมบัติของคลื่น 135

ตอนที่ 1 การสะท้อนของคลื่น 135

ตอนที่ 2 การหักเหของคลื่น 135

ตอนที่ 3 การแทรกสอดของคลื่น 135

ตอนที่ 4 การเลี้ยวเบนของคลื่น 136

กิจกรรม 11.2 คลื่นนิ่งในเส้นเชือก 136

โจทย์แบบฝึกหัดบทที่ 11 137

ภาคเรียนที่ 2 เสียง แสง (บทที่ 12, 13 และ 14)

บทที่ 12 เสียง **147**

12.1 ธรรมชาติของเสียง 149

12.2 อัตราเร็วของเสียง 153

12.3 การเคลื่อนที่ของคลื่นเสียง 154

12.4 ความเข้มเสียงและการได้ยิน 156

12.4.1 ความเข้มเสียง 157

12.4.2 ระดับความเข้มเสียง 158

12.4.3 มลภาวะของเสียง 160

หน้า

12.4.4 หูกับการได้ยิน 162
12.4.5 เวลาก้องเสียง 165
12.5 เสียงดนตรี 166
12.5.1 ระดับเสียง 166
12.5.2 คุณภาพเสียง 168
12.5.3 ความถี่ธรรมชาติ 172
12.5.4 การสั่นพ้องของเสียง 173
12.6 บีตส์และคลื่นนิ่งของเสียง 174
12.7 ปรากฏการณ์ดอปเพลอร์และคลื่นกระแทก 177
12.8 การประยุกต์ความรู้เรื่องเสียง 182
12.8.1 ด้านสถาปัตยกรรม 182
12.8.2 ด้านการประมง 183
12.8.3 ด้านการแพทย์ 183
12.8.4 ด้านธรณีวิทยา 184
12.8.5 ด้านวิศวกรรมและอุตสาหกรรม 185
การทดลองและกิจกรรม **187**
การทดลอง 12.1 เสียงกับการแทรกสอด 187
การทดลอง 12.2 เสียงกับการเลี้ยวเบน 187
กิจกรรม 12.1 ความถี่ธรรมชาติ 188
การทดลอง 12.3 การสั่นพ้องของเสียง 189
การทดลอง 12.4 การวัดความยาวคลื่นเสียง 189
การทดลอง 12.5 การเกิดบีตส์ของเสียง 191
กิจกรรม 12.2 คลื่นนิ่งของเสียง 192
ความรู้เพิ่มเติม 193
โจทย์แบบฝึกหัดบทที่ 12 195

บทที่ 13 แสง **199**
13.1 การแทรกสอด 200
13.2 การเลี้ยวเบนของแสง 205
13.3 เกรตติง 210

หน้า

13.4 การกระเจิงของแสง 215
13.4.1 ปรากฏการณ์เรือนกระจก 216
การทดลองและกิจกรรม **218**
การทดลอง 13.1 การแทรกสอดของแสง 218
การทดลอง 13.2 การเลี้ยวเบนของแสง 219
การทดลอง 13.3 เกรตติง 219
โจทย์แบบฝึกหัดบทที่ 13 222

บทที่ 14 แสงและทัศนอุปกรณ์ **225**
14.1 การเคลื่อนที่และอัตราเร็วของแสง 226
14.2 การสะท้อนของแสง 227
14.2.1 ภาพในกระจกเงาราบ 229
14.2.2 ภาพที่เกิดจากการสะท้อนของแสงบนกระจกผิวโค้งทรงกลม 232
14.3 การหักเหของแสง 240
14.3.1 กฎการหักเหของแสง 240
14.3.2 ความลึกจริง ความลึกปรากฏ 245
14.4 เลนส์บาง 246
14.5 ปรากฏการณ์ที่เกี่ยวกับแสง 254
14.5.1 การกระจายแสง 254
14.5.2 การสะท้อนกลับหมดของแสง 255
14.5.3 รุ้ง 259
14.5.4 มิราจ 262
14.6 ทัศนอุปกรณ์ 262
14.6.1 เครื่องฉายภาพนิ่ง 263
14.6.2 กล้องถ่ายรูป 263
14.6.3 กล้องจุลทรรศน์ 264
14.6.4 กล้องโทรทรรศน์ 265
14.7 ความสว่าง 267
14.8 การถนอมสายตา 272
14.8.1 การดูวัตถุที่มีความสว่างมาก 272
14.8.2 การดูวัตถุที่มีความสว่างน้อย 273

หน้า

14.8.3 การดูผ่านทัศนอุปกรณ์ 273

14.9 ตาและการมองเห็นสี 274

14.10 สี 276

14.10.1 การผสมสารสี 278

14.10.2 การผสมแสงสี 279

การทดลองและกิจกรรม **280**

การทดลอง 14.1 การหักเหของแสง 280

การทดลอง 14.2 การหักเหของแสงผ่านเลนส์นูน 281

การทดลอง 14.3 เครื่องฉายภาพนิ่ง 282

การทดลอง 14.4 กล้องจุลทรรศน์ 282

การทดลอง 14.5 กล้องโทรทรรศน์ 283

การทดลอง 14.6 สีของวัตถุ 283

การทดลอง 14.7 การผสมแสงสีบนฉากขาว 283

โจทย์แบบฝึกหัดบทที่ 14 285

บทที่ 9
ของไหล

สสารในสภาพปกติมีสามสถานะ คือ ของแข็ง ของเหลวและแก๊ส ที่อุณหภูมิหนึ่ง ของแข็งมีรูปร่างและปริมาตรคงตัว ถ้าถูกแรงไม่มากอัด ส่วนของเหลวจะมีปริมาตรคงตัวและมีรูปทรงตามภาชนะที่บรรจุและปริมาตรจะลดลงเล็กน้อยเมื่อถูกแรงอัด ส่วนแก๊สมีรูปร่างและปริมาตรไม่คงตัว ปริมาตรของแก๊สขึ้นกับปริมาตรภาชนะที่บรรจุ แก๊สมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรยิ่งกว่าของเหลวมาก แม้อุณหภูมิจะเปลี่ยนเพียงเล็กน้อยก็ตาม แต่เนื่องจากของเหลวและแก๊สมีรูปร่างไม่แน่นอน อีกทั้งสามารถไหลจากที่หนึ่งไปอีกที่หนึ่งได้ จึงอาจเรียกของเหลวและแก๊สว่า **ของไหล** (fluid) ก็ได้ ในบทนี้จะได้ศึกษาสมบัติต่างๆ ของของไหล ได้แก่ ความหนาแน่น ความดัน ความตึงผิว ความหนืด โดยใช้กฎฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้อง

9.1 ความหนาแน่น

ความหนาแน่นเป็นสมบัติเฉพาะตัวของสาร โดยทั่วไปจะหมายถึงความหนาแน่นมวล (mass density) ซึ่งหาได้จากปริมาณมวลสารในหนึ่งหน่วยปริมาตร ถ้าให้ m เป็นมวลของสารซึ่งมีปริมาตร V และ ρ (อ่านว่า โร "rho") เป็นความหนาแน่นของสาร จะได้ว่า

$$\rho = \frac{m}{V} \qquad (9.1)$$

ความหนาแน่นเป็นปริมาณสเกลาร์ มีหน่วยกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ตาราง 9.1 ความหนาแน่นของสารบางชนิดที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ

สาร	ความหนาแน่น (kg/m^3)	สาร	ความหนาแน่น (kg/m^3)
ของแข็ง		**ของเหลว**	
ทอง	19.3×10^3	ปรอท	13.6×10^3
ตะกั่ว	11.3×10^3	น้ำทะเล	1.024×10^3
เหล็ก	7.8×10^3	น้ำ (4 °C)	1.000×10^3
อะลูมิเนียม	2.7×10^3	เอทิลอัลกอฮอล์	0.79×10^3
แก้ว	$2.4 - 2.8 \times 10^3$	น้ำมันเบนซิน	0.68×10^3
คอนกรีต	2.3×10^3	แก๊ส	
น้ำแข็ง	0.917×10^3	อากาศ	1.21
ไม้	$0.3 - 0.9 \times 10^3$	ฮีเลียม	0.179
โฟม	0.10×10^3	คาร์บอนไดออกไซด์	1.98

อาจบอกความหนาแน่นของสารใดๆ เป็น **ความหนาแน่นสัมพัทธ์** (relative density) โดยกำหนดว่า ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของสารใด หมายถึง อัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของสารนั้นกับความหนาแน่นของสารอ้างอิง ซึ่งนิยมใช้น้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ซึ่งมีความหนาแน่นมากที่สุดเท่ากับ 1.000×10^3 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตัวอย่างเช่น จะหาความหนาแน่นสัมพัทธ์ของปรอท จากตาราง 9.1 ปรอทมีความหนาแน่น 13.6×10^3 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของปรอทจึงเท่ากับ $\frac{13.6 \times 10^3 \ kg/m^3}{1.0 \times 10^3 \ kg/m^3}$ หรือ 13.6 ดังนั้นความหนาแน่นสัมพัทธ์ 13.6 จึงหมายความว่าปรอท

มีความหนาแน่นเป็น 13.6 เท่าของความหนาแน่นของน้ำ หรือปรอทมีมวลเป็น 13.6 เท่าของน้ำ เมื่อสารทั้งสองมีปริมาตรเท่ากัน

ในอดีตเคยเรียกความหนาแน่นของสารเทียบกับความหนาแน่นของน้ำว่า **ความถ่วงจำเพาะ** (specific gravity) ซึ่งเป็นตัวเลขไม่มีหน่วย ปัจจุบันใช้ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของสาร

ตัวอย่าง 9.1 ความหนาแน่น

นักสำรวจเดินทางด้วยบอลลูนบรรจุแก๊ส ก่อนออกเดินทาง เขาบรรจุแก๊สฮีเลียมที่มีปริมาตร 400 ลูกบาศก์เมตร และมวล 65 กิโลกรัม ขณะนั้นแก๊สฮีเลียมในบอลลูนมีความหนาแน่นเท่าใด

วิธีทำ หาความหนาแน่นจากสมการ $\rho = \frac{m}{V}$

ในที่นี้ ปริมาตรของแก๊สฮีเลียม $V = 400\ m^3$

มวลของแก๊สฮีเลียม $m = 65\ kg$

แทนค่าจะได้ $\rho = \frac{65\ kg}{400\ m^3} = 0.16\ kg/m^3$

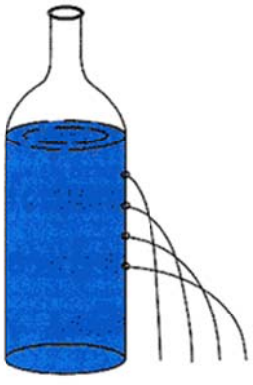
คำตอบ ความหนาแน่นของแก๊สฮีเลียมเท่ากับ 0.16 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

9.2 ความดันในของเหลว

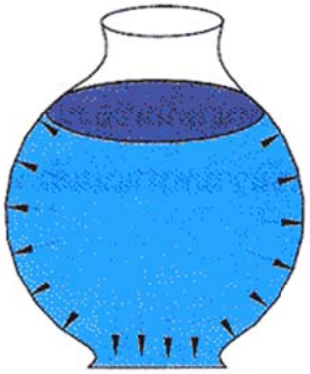
ถ้านำขวดน้ำพลาสติกมาเจาะรูให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 มิลลิเมตร หลายๆ รู ณ ตำแหน่งต่างๆ กัน รอบขวด แล้วใส่น้ำจนเต็มขวด สังเกตการพุ่งของน้ำจากรู ดังรูป 9.1

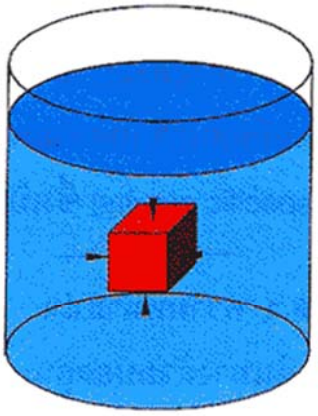
☐ เหตุใดน้ำจึงพุ่งออกจากรูที่เจาะไว้

การที่น้ำพุ่งออกจากรู แสดงว่า มีแรงกระทำต่อน้ำ แรงนี้ดันให้น้ำออกมาในทิศตั้งฉากกับผนังภาชนะที่ตำแหน่งรูเจาะ ไม่ว่าผนังจะอยู่ในแนวใด ถ้าปิดรู แรงกระทำนี้ก็ยังมีอยู่ และจะกระทำต่อผนังภาชนะทุกส่วนที่สัมผัสของเหลว และแรงมีทิศทางตั้งฉากกับผนังส่วนนั้นๆ ดังรูป 9.2 **ขนาดของแรงที่กระทำตั้งฉากต่อพื้นที่หนึ่งหน่วย** เรียกว่า **ความดัน** (pressure)



รูป 9.1 ลักษณะของสายน้ำที่พุ่งออกจากรู ณ ตำแหน่งต่างๆ บนขวด





ก. แรงที่ของเหลวกระทำต่อผนังภาชนะ **ข. แรงที่ของเหลวกระทำต่อวัตถุที่จม**

รูป 9.2 ทิศของแรงที่ของเหลวกระทำต่อผนังภาชนะและต่อวัตถุที่จมในของเหลว

ถ้าให้ F เป็นแรงที่ของเหลวกระทำตั้งฉากกับพื้นที่ A

และ P เป็นความดันที่เกิดจากของเหลวกระทำบนพื้นที่ A จะเขียนได้ว่า

$$P = \frac{F}{A} \text{ หรือ } F = PA \qquad \textbf{(9.2)}$$

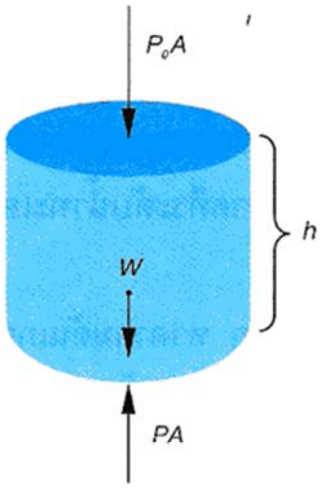
ความดันเป็นปริมาณสเกลาร์ มีหน่วยนิวตันต่อตารางเมตร (N/m^2) หรือพาสคัล (pascal) ซึ่งย่อว่า (Pa)

9.2.1 ความดันในของเหลวขึ้นอยู่กับความลึก

คนที่เคยดำน้ำจะพบว่ารู้สึกปวดแก้วหู ถ้าดำน้ำยิ่งลึกมากขึ้น ก็จะยิ่งปวดแก้วหู แสดงว่าแรงกดของน้ำที่กระทำต่อแก้วหูมีค่าเพิ่มตามความลึก แต่เนื่องจากพื้นที่ของแก้วหูไม่เปลี่ยนแปลง จึงแสดงว่า ความดันในของเหลวมีค่าเพิ่มตามความลึก ความดันในของเหลวสัมพันธ์กับความลึกอย่างไรและขึ้นกับปริมาณใดบ้าง ศึกษาได้จากการทดลอง 9.1 เรื่อง ความดันในของเหลวในตอนท้ายบท

จากการทดลอง พบว่าความดันในของเหลวแปรผันตรงกับความลึกและความหนาแน่นของของเหลว เราอาจหาความสัมพันธ์ได้จากการพิจารณาเชิงทฤษฎีดังนี้

พิจารณาของเหลวที่มีความหนาแน่น ρ และอยู่นิ่งในภาชนะเปิดสู่บรรยากาศ จากนั้นจินตนาการว่ามีของเหลวรูปทรงกระบอก (ส่วนที่แรเงา) ที่มีความสูง h และพื้นที่หน้าตัด A ดังรูป 9.3



รูป 9.3 แรงต่างๆ ที่กระทำต่อของเหลวรูปทรงกระบอก

ให้ W เป็นน้ำหนักของเหลวบนพื้นที่ A

ดังนั้น $W = mg = \rho Vg = \rho Ahg$

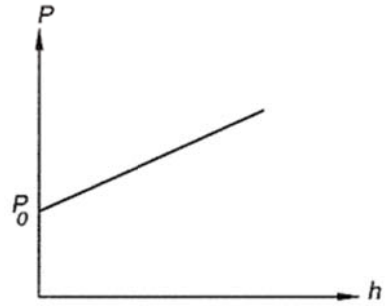
ให้ P_0 เป็นความดันบรรยากาศ ดังนั้นแรงที่อากาศกระทำต่อพื้นที่ A ด้านบนคือ P_0A มีทิศลง

P เป็นความดันเนื่องจากน้ำหนักของเหลวที่ความลึก h บนพื้นที่ A ดังนั้นแรงที่ของเหลวกระทำต่อพื้นที่ A คือ PA มีทิศขึ้น

เนื่องจากของเหลวอยู่ในสมดุล แรงลัพธ์ที่กระทำในแนวดิ่งมีค่าเป็นศูนย์ หรือ $\Sigma F_y = 0$

ดังนั้น $PA = P_0A + \rho Ahg$

จะได้ $$P = P_0 + \rho gh \qquad (9.3)$$



รูป 9.4 กราฟความดันของของเหลวกับระยะความลึกจากผิวของเหลว

จึงกล่าวได้ว่า ความดันในของเหลวที่มีความหนาแน่น ρ ที่ระดับลึก h จากผิวของเหลวที่บรรจุในภาชนะเปิดสู่บรรยากาศเท่ากับผลรวมของความดันบรรยากาศ P_0 กับปริมาณ ρgh

ปริมาณ ρgh เป็นความดันในของเหลวที่ระดับลึก h ซึ่งเกิดจากน้ำหนักของเหลวเพียงอย่างเดียว ความดันนี้เรียกว่า **ความดันเกจ** (gauge pressure) แทนด้วยสัญลักษณ์ P_g

ผลรวมของความดันบรรยากาศกับความดันเกจ เรียกว่า **ความดันสัมบูรณ์** (absolute pressure)

เนื่องจาก P_0 และ g ในสมการ (9.3) เป็นค่าคงตัว ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า **ความดันในของเหลวชนิดเดียวกันที่ระดับลึกเดียวกันมีค่าเท่ากันเสมอ โดยรูปทรงของภาชนะที่บรรจุไม่มีผลใด ๆ ต่อความดันเลย**

ตัวอย่าง 9.2 ความดันเกจและความดันสัมบูรณ์

เรือดำน้ำลำหนึ่งอยู่ที่ระดับลึก 100 เมตร จงหาความดันเกจและความดันสัมบูรณ์ที่ตัวเรือดำน้ำ ถ้าน้ำทะเลมีความหนาแน่น 1.024×10^3 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และความดันบรรยากาศที่ระดับน้ำทะเลเท่ากับ 1.013×10^5 พาสคัล (กำหนดให้ $g = 9.8\ \text{m/s}^2$)

วิธีทำ

ก. หาความดันเกจจาก $P_g = \rho gh$

ดังนั้น $P_g = (1.024 \times 10^3\ \text{kg/m}^3) \times (9.8\ \text{m/s}^2) \times (100\ \text{m})$

$= 1.004 \times 10^6\ \text{Pa}$

ข. หาความดันสัมบูรณ์จาก $P = P_0 + P_g$

เมื่อ $P_0 = 1.013 \times 10^5\ \text{Pa}$

ดังนั้น $P = (1.013 \times 10^5\ \text{Pa}) + (1.004 \times 10^6\ \text{Pa})$

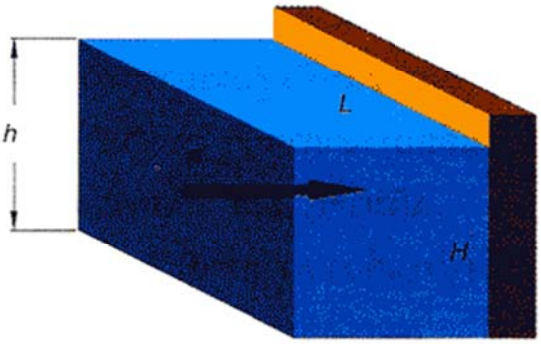
$= 1.11 \times 10^6\ \text{Pa}$

คำตอบ ความดันเกจและความดันสัมบูรณ์ที่ตัวเรือดำน้ำเท่ากับ 1.004×10^6 พาสคัล และ 1.11×10^6 พาสคัล ตามลำดับ

ตัวอย่าง 9.3 แรงที่น้ำกระทำต่อประตูกั้นน้ำ

ประตูกั้นน้ำแห่งหนึ่งกว้าง L สูง H เมื่อระดับน้ำสูงสุดแรงที่น้ำกระทำต่อประตูกั้นน้ำเป็นเท่าใด

วิธีทำ พิจารณาประตูกั้นน้ำที่ผนังด้านสัมผัสน้ำตั้งอยู่ในแนวดิ่ง ดังรูป 9.5 จะมีแรงที่น้ำกระทำต่อประตูกั้นน้ำในทิศตั้งฉาก ซึ่งในภาวะปกติน้ำจะรับความดันบรรยากาศ ขนาดของแรงหาได้จากผลคูณระหว่างความดันของน้ำกับพื้นที่ผนังประตูกั้นน้ำส่วนที่อยู่ใต้ระดับน้ำ แต่เนื่องจากความดันในของเหลวขึ้นกับความลึก ดังกราฟรูป 9.4 ดังนั้นจึงต้องใช้ความดันเฉลี่ย ซึ่งหาได้ดังนี้



รูป 9.5 แรงที่น้ำกระทำต่อประตูกั้นน้ำกว้าง L สูง H และระดับน้ำมีความลึก h

ความดันเฉลี่ย $= \frac{1}{2}$ (ความดันที่จุดสูงสุด + ความดันที่จุดต่ำสุด)

ความดันเฉลี่ย $= \frac{1}{2}\ [P_0 + (P_0 + \rho gh)] = P_0 + \frac{1}{2}\rho gh$

$\therefore$ พื้นที่ผนังประตูกั้นน้ำส่วนที่อยู่ใต้ระดับน้ำ คือ Lh

ให้ F เป็นแรงที่น้ำกระทำต่อผนังประตูกั้นน้ำ

จะได้ $$F = (P_0 + \frac{1}{2}\rho gh) \times Lh$$

$$F = P_0Lh + \frac{1}{2}\rho gLh^2$$

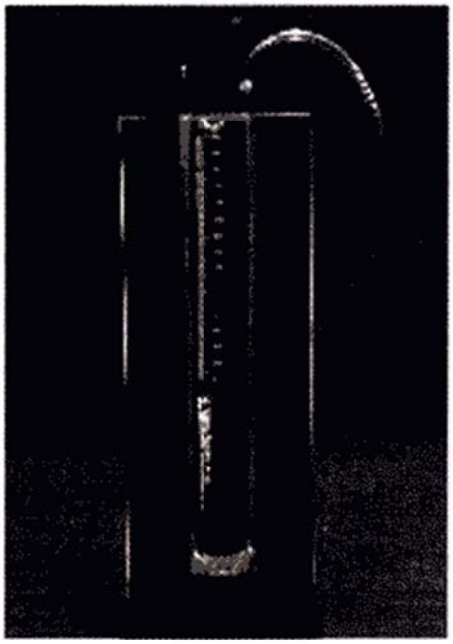
แต่ P_0Lh เป็นแรงส่วนที่มาจากความดันบรรยากาศ ถ้าคิดเฉพาะแรงส่วนที่มาจากน้ำหนักของน้ำ จะเห็นว่า $F \propto h^2$ หรือ แรงที่น้ำกระทำต่อประตูกั้นน้ำแปรผันตรงกับความลึกของน้ำยกกำลังสอง

คำตอบ แรงที่น้ำกระทำต่อประตูกั้นน้ำมีค่าเท่ากับ $P_0Lh + \frac{1}{2}\rho gLh^2$

9.2.2 เครื่องมือวัดความดัน

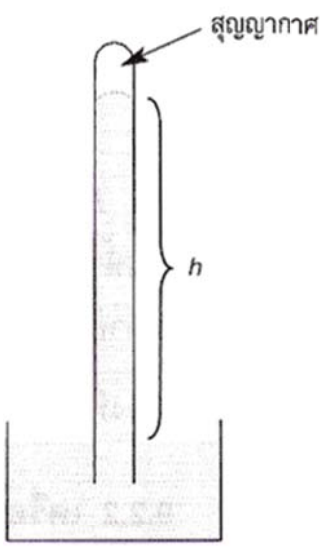
ความดันของแก๊สหุงต้มในถังแก๊ส ความดันของบรรยากาศขณะเวลาต่างๆ ความดันของแก๊สในยางรถยนต์ หรือความดันของน้ำประปา ล้วนเป็นความดันที่เกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวันของทุกคน ความดันของของไหลเหล่านี้ วัดค่าได้อย่างไร เครื่องวัดความดันของของไหลเหล่านี้มีหลายรูปแบบ เช่น แมนอมิเตอร์ แบรอมิเตอร์และเครื่องวัดบูร์ดอน เครื่องมือวัดความดันเหล่านี้มีหลักการทำงานต่างกันอย่างไร ในที่นี้จะกล่าวถึงเพียงสังเขป

แมนอมิเตอร์ (manometer) เป็นเครื่องมือวัดความดันของของไหลชนิดหนึ่ง ประกอบด้วยหลอดแก้วรูปตัวยูมีของเหลวบรรจุไว้ภายใน ดังรูป 9.6 ปลายข้างหนึ่งอาจเปิดสู่บรรยากาศ ถ้าต้องการวัดความดันเทียบกับความดันบรรยากาศ แต่อาจใช้วัดเทียบกับความดันอื่นก็ได้ และการรู้ความต่างระดับของเหลวในหลอดทั้งสองข้างจะทำให้สามารถหาความดันที่แตกต่างได้ เมื่อทราบความหนาแน่นของของเหลว



รูป 9.6 แมนอมิเตอร์

แบรอมิเตอร์ปรอท (mercury barometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้ปรอทสำหรับวัดความดันบรรยากาศโดยตรง ซึ่งประดิษฐ์โดยทอร์ริเซลลี (Torricelli) ชาวอิตาเลียน ในปี พ.ศ. 2186 แบรอมิเตอร์ปรอทประกอบด้วยหลอดแก้วทรงกระบอกยาวประมาณ 80 เซนติเมตร ปลายข้างหนึ่งปิด เมื่อบรรจุปรอทจนเต็มแล้วคว่ำในอ่างปรอทโดยไม่ให้อากาศเข้าในหลอด เมื่อยกหลอดตั้งขึ้น จะเกิดสุญญากาศด้านปลายปิด ดังนั้นบริเวณตอนบนของหลอด จึงไม่มีความดันอากาศ และลำปรอทยังคงระดับความสูงอยู่ได้เพราะความดันบรรยากาศภายนอกกระทำที่ผิวปรอทในอ่าง ซึ่งความดันอากาศ P_0 นี้สมดุลกับความดันเนื่องจากน้ำหนักของลำปรอทที่ h ดังนั้นความดันบรรยากาศ P_0 จึงมีค่าเท่ากับ ρgh เมื่อ ρ เป็นความหนาแน่นของปรอท



รูป 9.7 แบรอมิเตอร์

ความดันอากาศที่อ่านจากแบรอมิเตอร์ปรอทมักอ่านจากความสูงของปรอทเป็นมิลลิเมตร และเรียกเป็นหน่วยความดันว่า **มิลลิเมตรของปรอท** (mmHg) (หน่วยความดันนี้ไม่ใช่หน่วยเอสไอ)

ความดัน 1 บรรยากาศ (atmosphere หรือ atm) เป็นความดันเนื่องจากน้ำหนักของลำปรอทที่สูง 0.760 เมตร หรือ 760 มิลลิเมตร

เมื่อแทน ρ g และ h ลงในสมการ $P_0 = \rho gh$ จะได้

$P_0 = 1.013\,25 \times 10^5 \text{ N m}^{-2} = 1.013\,25 \times 10^5 \text{ Pa} = 1 \text{ atm}$

ในแต่ละวันและเวลาเมื่อความดันของบรรยากาศเปลี่ยนแปลง ความสูงของระดับปรอทจะเปลี่ยนแปลงด้วย ดังนั้นในแต่ละท้องที่ในแต่ละเวลาความดันบรรยากาศจะไม่เท่ากัน

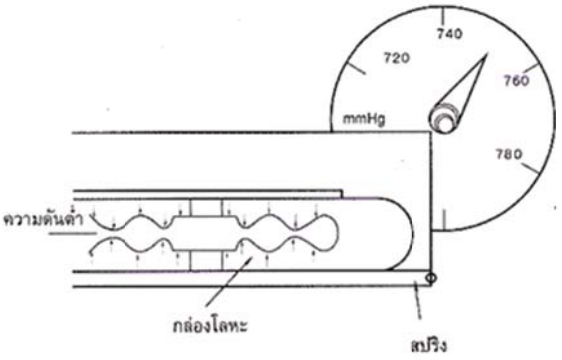
อาจจะวัดความดันในหน่วยอื่นก็ได้ เช่น บาร์ (bar) หรือทอร์ (torr) โดยหน่วยทั้งสามมีความสัมพันธ์กับหน่วยเอสไอ ดังนี้ คือ

760 mmHg = $1.013\,25 \times 10^5$ Pa

1 bar = 10^5 Pa

และ1 torr = 1 mmHg = 133.3224 Pa

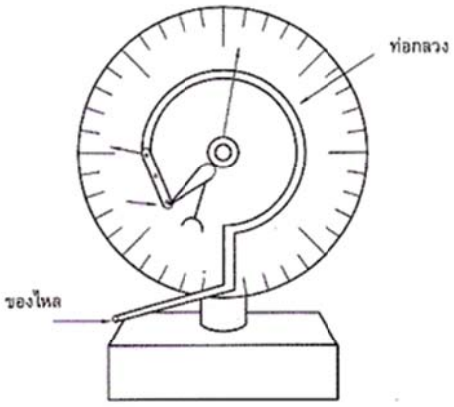
แบรอมิเตอร์แอนีรอยด์ (aneroid barometer) เป็นเครื่องมือวัดความดันอากาศหรือแก๊สอีกแบบหนึ่ง มีลักษณะเป็นกล่องโลหะที่ภายในบรรจุอากาศที่มีความดันต่ำ ตัวกล่องวางอยู่ระหว่างแผ่นสปริงซึ่งมีอุปกรณ์กลไกต่อกับเข็มชี้ เมื่อความดันอากาศภายนอกเพิ่มขึ้นหรือลดลง มีผลทำให้กล่องโลหะยุบลง หรือพองออก การเปลี่ยนแปลงขนาดของกล่อง ทำให้เข็มชี้เคลื่อนไหว แสดงความดันอากาศ ณ เวลานั้น แบรอมิเตอร์แอนีรอยด์จำเป็นต้องมีการปรับเทียบกับแบรอมิเตอร์ปรอทที่เชื่อถือได้ก่อน แต่ก็ใช้งานได้สะดวกกว่า



รูป 9.8 แบรอมิตอร์แอนีรอยด์

เนื่องจากความดันอากาศ ณ สถานที่ใดขึ้นกับความสูงของสถานที่นั้นเหนือระดับน้ำทะเล จึงมีการดัดแปลงแบรอมิเตอร์แอนีรอยด์ให้เป็นเครื่องวัดความสูง หรือที่เรียกว่า **อัลติมิเตอร์** (altimeter) ซึ่งสามารถใช้วัดระดับเพดานบินของเครื่องบินได้

เครื่องวัดบูร์ดอน (bourdon gauge) เป็นอุปกรณ์วัดความดันของของไหลที่มีความดันสูง เช่น ใช้ในถังเก็บลมสำหรับเติมยางรถยนต์ ถังแก๊สหุงต้มหรือแก๊สในยางรถยนต์ เป็นต้น อุปกรณ์มีลักษณะเป็นท่อกลวงรูปก้นหอย ปลายด้านหนึ่งต่อกับของไหลที่ต้องการวัดความดัน ส่วนปลายอีกข้างหนึ่งปิด เมื่อของไหลเข้าไปในท่อความดันของของไหลจะทำให้ท่อยืดออก จึงมีผลทำให้เข็มที่ติดอยู่ตรงปลายท่อเบนไปจากตำแหน่งเดิม ซึ่งปริมาณการเบนจะบอกความดันในของไหลนั้น

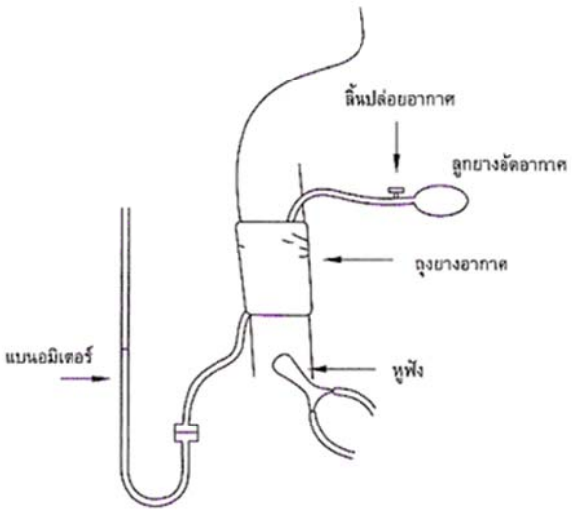


รูป 9.9 เครื่องวัดบูร์ดอน

9.2.3 ความดันกับชีวิตประจำวัน

ในชีวิตประจำวัน เราต้องเกี่ยวข้องกับความดันตลอดเวลา ดังจะเห็นได้จากอุปกรณ์หลายอย่างที่เราใช้ในการทำงานต้องอาศัยความดันบรรยากาศทั้งสิ้น ดังตัวอย่างต่อไปนี้

เครื่องวัดความดันโลหิต ทำด้วยแมนอมิเตอร์หลอดแก้วรูปตัวยูซึ่งมีปรอทบรรจุภายในปลายข้างหนึ่งของหลอดมีท่อยางสวมต่อกับถุงอากาศ และมีลูกยางสำหรับอัดอากาศเข้าถุงอากาศ ในการวัดความดันโลหิต ผู้วัดจะต้องพันถุงอากาศเข้ากับท่อนแขนของผู้ป่วย แล้วบีบลูกยางเพื่ออัดอากาศเข้าไปให้มากพอที่จะบีบเส้นเลือด ห้ามไม่ให้โลหิตไหลไปปลายแขนได้ จากนั้นผู้วัดจะเปิดลิ้นปล่อยอากาศในถุงออกช้าๆ พร้อมกับใช้หูฟังฟังชีพจรที่เส้นเลือดใหญ่บริเวณแขนด้านหน้า ดังรูป 9.10



รูป 9.10 การวัดความดันโลหิต

ขณะที่ความดันอากาศในถุงสูงกว่าความดันโลหิตจะไม่ได้ยินเสียงชีพจร เมื่อความดันอากาศในถุงเท่ากับความดันโลหิตในเส้นเลือด โลหิตจะเริ่มไหลไปสู่ปลายแขน ซึ่งจะได้ยินเสียงจากหูฟัง ความดันที่อ่านได้ในครั้งแรกนี้จะเป็นความดันโลหิตสูงสุด (systolic pressure) ในเส้นเลือดที่เกิดจากหัวใจบีบตัวส่งโลหิตไปเลี้ยงส่วนต่างๆของร่างกาย จากนั้นผู้วัดก็ค่อยๆ ปล่อยอากาศออกจากถุง จนกระทั่งความดันอากาศในถุงเท่ากับความดันโลหิตในเส้นเลือดดำที่ไหลกลับเข้าสู่หัวใจ คราวนี้เสียงที่ได้ยินในตอนแรกจะเงียบลง และผู้วัดจะอ่านความดันโลหิตต่ำสุดจากความสูงของลำปรอทในแมนอมิเตอร์อีกครั้งหนึ่ง

ร่างกายคนปกติจะมีความดันโลหิตสูงสุดเท่ากับ 120 มิลลิเมตรของปรอทและความดันโลหิตต่ำสุดเท่ากับ 80 มิลลิเมตรของปรอท (ความดันนี้เป็นความดันเกจ) การวัดความดันโลหิตอาจใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มาประกอบกับตัวรับรู้ความดัน (pressure sensor) และมีมอเตอร์อัตโนมัติสำหรับสูบอากาศในตัว ซึ่งจะอ่านความดันเป็นตัวเลขได้ทันทีโดยไม่ต้องใช้แมนอมิเตอร์

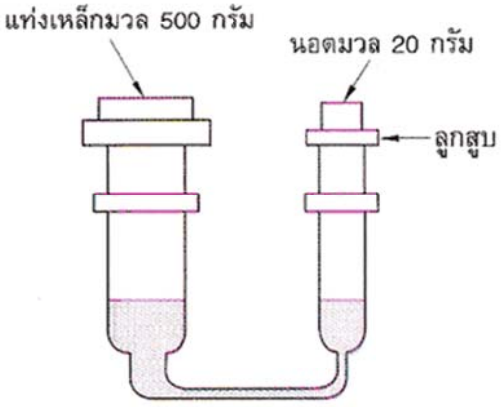
หลอดดูดเครื่องดื่ม เมื่อใช้หลอดดูดเครื่องดื่ม อากาศในหลอดมีปริมาตรลดลง ทำให้ความดันอากาศในหลอดดูดลดลงด้วย ความดันอากาศภายนอกซึ่งมากกว่าก็จะสามารถดันของเหลวขึ้นไปแทนที่อากาศในหลอดดูดจนกระทั่งของเหลวไหลเข้าปาก

ยางติดผนัง เมื่อออกแรงกดแผ่นยางติดผนังบนผิวเรียบ เช่น แผ่นกระจก อากาศที่อยู่ระหว่างแผ่นยางและกระจกจะถูกขับออก ทำให้บริเวณดังกล่าวเกือบเป็นสุญญากาศ อากาศภายนอกซึ่งมีความดันสูงกว่า ก็จะกดผิวแผ่นยางให้แนบติดแผ่นกระจก

9.3 กฎของพาสคัลและเครื่องอัดไฮดรอลิก

เราได้ศึกษาแล้วว่า ความดันในของเหลวที่อยู่นิ่งในภาชนะเปิดเกิดจากน้ำหนักของของเหลวและความดันบรรยากาศเหนือผิวของเหลว แต่ถ้ามีแรงภายนอกมากระทำต่อของเหลวที่อยู่นิ่งในภาชนะปิด ความดันในของเหลวจะเป็นอย่างไร ศึกษาได้จากชุดศึกษากฎของพาสคัล ดังรูป 9.11

เมื่อวางแท่งเหล็กมวล 500 กรัม บนลูกสูบใหญ่ ขณะเดียวกันก็วางนอตมวล 20 กรัม หลายตัว ลงบนลูกสูบเล็ก จนลูกสูบทั้งสองอยู่ในสมดุล จะเห็นว่าระดับของของเหลวในกระบอกสูบทั้งสองสูงเท่ากัน (โดยประมาณ) และน้ำหนักรวมของนอตบนลูกสูบเล็กมีค่าน้อยกว่าน้ำหนักของแท่งเหล็กมาก แสดงว่าแรงที่กดบนลูกสูบใหญ่มีค่ามากกว่าแรงที่กดลงบนลูกสูบเล็ก



รูป 9.11 ชุดศึกษากฎของพาสคัล

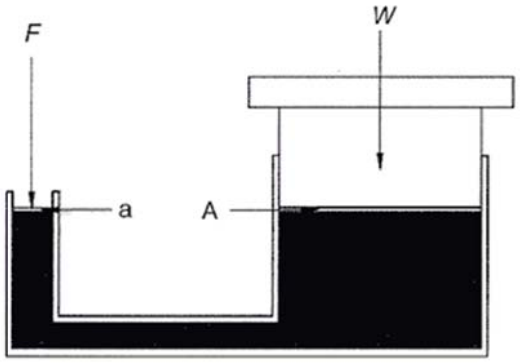
เมื่อหาอัตราส่วนระหว่างแรงกดกับพื้นที่หน้าตัดของลูกสูบแต่ละอัน จะพบว่าอัตราส่วนดังกล่าวมีค่าเท่ากัน แสดงว่า ความดันที่ลูกสูบทั้งสองมีค่าเท่ากัน จึงกล่าวได้ว่า เมื่อเพิ่มความดันที่ลูกสูบหนึ่ง จะทำให้ความดันที่อีกลูกสูบหนึ่งเพิ่มขึ้นเท่ากัน

พาสคัลเป็นผู้พบหลักการนี้ จึงเรียกว่า **กฎของพาสคัล** (Pascal's law) ซึ่งแถลงว่า **เมื่อเพิ่มความดันในของเหลวที่อยู่นิ่งในภาชนะปิด ความดันที่เพิ่มจะถูกถ่ายทอดไปยังทุก ๆ ตำแหน่งในของเหลวรวมทั้งผนังของภาชนะนั้นด้วย**

Blaise Pascal (พ.ศ. 2166 - 2205) นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศส เมื่ออายุได้ 11 ปี เขาได้เขียนบทความเรื่องการเกิดเสียงจากวัตถุที่สั่นสะเทือนและเมื่ออายุได้ 16 ปี เขาได้ตั้งทฤษฎีทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับรูปหกเหลี่ยมในวงกลม ในปี ค.ศ.1642 เขาได้ค้นพบหลักการสร้างเครื่องคำนวณและได้สร้างเครื่องคำนวณกลเครื่องแรกของโลก ผลงานการค้นพบทางฟิสิกส์ที่สำคัญ ได้แก่ การตั้งกฎของพาสคัล การประดิษฐ์แบรอมิเตอร์และเครื่องอัดไฮดรอลิก

รูป 9.12 พาสคัล

กฎของพาสคัลสามารถอธิบายการทำงานของเครื่องกลผ่อนแรงที่รู้จักกันทั่วไป คือ **เครื่องอัดไฮดรอลิก** (hydraulic press) ดังรูป 9.13 ซึ่งประกอบด้วยกระบอกสูบและลูกสูบสองชุดที่มีขนาดต่างกัน กระบอกสูบทั้งสองมีท่อต่อเชื่อมถึงกันและมีของเหลวบรรจุภายในเครื่องอัดไฮดรอลิกผ่อนแรงได้อย่างไร



รูป 9.13 การทำงานของเครื่องอัดไฮดรอลิก

ให้ A และ a เป็นพื้นที่หน้าตัดของลูกสูบใหญ่และลูกสูบเล็กของเครื่องอัดไฮดรอลิกตามลำดับ

เมื่อออกแรง F กดลงบนลูกสูบเล็กซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด a จะทำให้ความดันในของเหลวเพิ่มเท่ากับ $\frac{F}{a}$ ดังนั้นจากกฎของพาสคัล ที่ลูกสูบใหญ่จะมีความดันเพิ่มเท่ากับ $\frac{F}{a}$ ด้วย

ถ้า W เป็นน้ำหนักที่ต้องการจะยก ซึ่งอยู่บนลูกสูบใหญ่ที่มีพื้นที่หน้าตัด A ดังนั้นความดันในของเหลวที่ลูกสูบใหญ่ เท่ากับ $\frac{W}{A}$

ถ้าระดับของเหลวในกระบอกสูบทั้งสองเท่ากัน จากกฎของพาสคัลจะได้

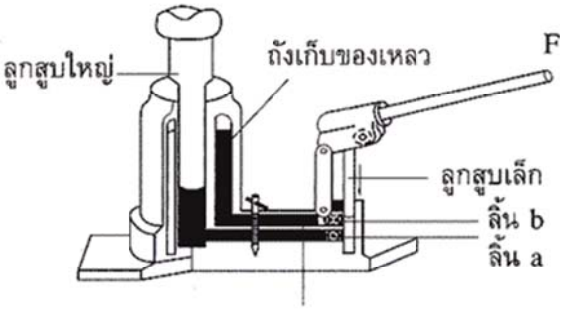
$$\frac{F}{a} = \frac{W}{A} \quad \text{หรือ} \quad \frac{W}{F} = \frac{A}{a}$$

ปริมาณ $\frac{W}{F}$ เรียกว่า **การได้เปรียบเชิงกล** (mechanical advantage)

นั่นคือ การได้เปรียบเชิงกล $= \frac{W}{F} = \frac{A}{a}$ **(9.4)**

เครื่องอัดไฮดรอลิกบางชนิดได้รับการออกแบบให้ผ่อนแรงได้มากขึ้น โดยการเพิ่มคานที่ลูกสูบเล็กและท่อต่อลิ้นปิด-เปิดให้ของเหลวไหลจากถังเก็บไปยังกระบอกสูบทั้งสอง ดังรูป 9.14

จากรูป 9.14 เมื่อออกแรง F กดที่ปลายคานลูกสูบเล็ก ของเหลวจะไหลผ่านลิ้น a ไปยังกระบอกสูบใหญ่ เมื่อดึงคานขึ้น ลูกสูบเล็กจะเคลื่อนที่ขึ้น ลิ้น a จะปิดกั้นของเหลวไม่ให้ไหลกลับ ส่วนลิ้น b จะเปิดให้ของเหลวจากถังเก็บไหลเข้าไปในกระบอกสูบเล็ก เมื่อกดคานลงอีกครั้ง ของเหลวจะไหลเข้าไปในกระบอกสูบใหญ่อีก การโยกคานหลายๆ ครั้ง จะทำให้ระดับของเหลวในกระบอกสูบใหญ่สูงขึ้น จึงสามารถยกน้ำหนัก W ให้สูงมากขึ้นและเมื่อต้องการให้น้ำหนัก W ลดต่ำลงมา ก็เปิดลิ้น c ปล่อยของเหลวให้ไหลไปสู่ถังเก็บ



รูป 9.14 เครื่องอัดไฮดรอลิก

เครื่องมือที่ทำงานโดยอาศัยหลักการเดียวกับเครื่องอัดไฮดรอลิกนี้ ได้แก่ แม่แรงยกรถยนต์ รถแทรกเตอร์ เก้าอี้ทำฟัน และระบบห้ามล้อรถยนต์ เป็นต้น

ตัวอย่าง 9.4 เครื่องอัดไฮดรอลิก

ลูกสูบใหญ่ของแม่แรงยกรถยนต์เครื่องหนึ่งมีพื้นที่เป็น 100 เท่าของลูกสูบเล็ก ถ้าต้องการยกรถมวล 1,200 กิโลกรัม จะต้องออกแรงกดที่ลูกสูบเล็กเท่าไร

วิธีทำ จากสถานการณ์ที่กำหนด เขียนแผนภาพได้ดังรูป 9.15

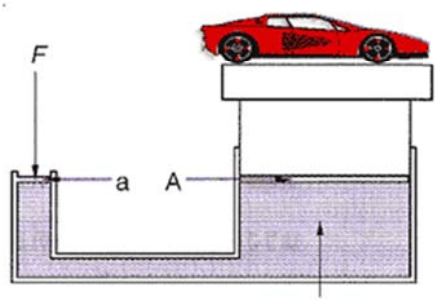
จากสมการ $\dfrac{F}{a} = \dfrac{W}{A}$ หรือ $F = \dfrac{a}{A}W$

เมื่อ $W = 1\,200\ \text{kg} \times 9.8\ \text{m/s}^2 = 11\,760\ \text{N}$

และ $\dfrac{a}{A} = \dfrac{1}{100}$

ดังนั้น $F = \dfrac{11\,760\ \text{N}}{100} = 117.6\ \text{N}$

คำตอบ ต้องออกแรงกดที่ลูกสูบเล็กเท่ากับ 117.6 นิวตัน

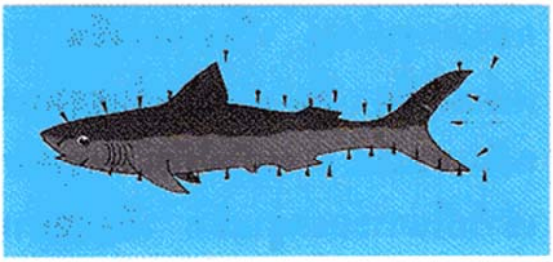


รูป 9.15 แม่แรงยกรถยนต์

9.4 แรงลอยตัวและหลักของอาร์คิมีดิส

ทุกคนคงเคยเห็นปลาเลี้ยงในตู้ปลาว่ายน้ำไปมา และหลายคนคงเคยเล่นน้ำในทะเลหรือสระน้ำ เราจะรู้สึกว่าร่างกายเราถูกน้ำพยุงไว้ไม่ให้จม ที่เป็นเช่นนี้เพราะเหตุใด

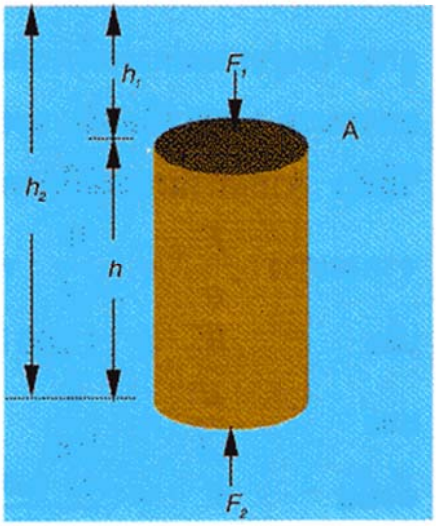
ขณะที่ปลาอยู่ในน้ำ ความดันน้ำจะทำให้มีแรงของน้ำกระทำต่อตัวปลา โดยเมื่อรวมแรงทุกแรงแล้ว แรงลัพธ์ที่กระทำต่อด้านล่างของตัวปลาในทิศขึ้น จะมีขนาดมากกว่าแรงลัพธ์ที่กระทำต่อด้านบนของตัวปลาในทิศลง เพราะความดันของน้ำที่ส่วนล่างมีค่ามากกว่าความดันของน้ำที่ส่วนบน ดังนั้น การรวมแรงทั้งหมดที่น้ำกระทำต่อตัวปลาจึงเป็นแรงลัพธ์ของแรงดังกล่าวที่มีทิศขึ้น เรียกแรงลัพธ์นี้ว่า **แรงลอยตัว** (buoyant force) F_B



รูป 9.16 แรงที่น้ำกระทำต่อตัวปลาบริเวณต่างๆ ของตัวปลาขณะอยู่ในน้ำ

- ☐ ถ้าแรงลอยตัวมีค่ามากกว่าน้ำหนักปลา จะเกิดอะไรขึ้น
- ☐ ถ้าแรงลอยตัวมีค่าน้อยกว่าน้ำหนักปลา ปลาจะเคลื่อนที่อย่างไร

แรงลอยตัวสามารถหาได้จากการทดลอง 9.2 ในท้ายบท หรือจากการพิจารณาวัตถุทรงกระบอกความสูง h พื้นที่หน้าตัด A จมในของเหลวที่มีความหนาแน่น ρ และอยู่ในสมดุล ดังรูป 9.17



รูป 9.17 การหาแรงลอยตัว

แรงที่ของเหลวกระทำที่ผิวด้านบน = F_1

$F_1 = P_1 A = \rho g h_1 A$

เมื่อ P_1 คือ ความดันของของเหลวที่ผิวด้านบน

แรงที่ของเหลวกระทำที่ผิวด้านล่าง = F_2

$F_2 = P_2 A = \rho g h_2 A$

เมื่อ P_2 คือ ความดันของของเหลวที่ผิวด้านล่าง

แรงลัพธ์ที่กระทำต่อวัตถุทรงกระบอก คือแรงลอยตัว F_B มีทิศขึ้นและขนาดดังนี้

$F_B = F_2 - F_1 = \rho g A(h_2 - h_1) = \rho g A h$

นั่นคือ $F_B = \rho g V$

เมื่อ $V = Ah$ คือปริมาตรของวัตถุทรงกระบอก ปริมาณ $\rho g V$ ก็คือ mg หรือน้ำหนักของของเหลวที่มีปริมาตรเท่ากับปริมาตรวัตถุทรงกระบอก

ดังนั้น แรงลอยตัวที่กระทำต่อวัตถุทรงกระบอกจึงเท่ากับน้ำหนักของของเหลวที่มีปริมาตรเท่าวัตถุทรงกระบอก ผลที่ได้นี้ใช้ได้กับวัตถุที่มีรูปทรงอื่นๆ ด้วย

อาร์คิมีดีส (Archimedes) นักปราชญ์ชาวกรีกเป็นผู้ค้นพบธรรมชาติของแรงลอยตัว และได้เสนอหลักการเกี่ยวกับการลอยและการจมของวัตถุซึ่งเรียกว่า **หลักของอาร์คิมีดีส** (Archimedes' principle) ดังนี้ **วัตถุที่จมในของเหลวหมดทั้งก้อนหรือจมแต่เพียงบางส่วน จะถูกแรงลอยตัวกระทำ และแรงลอยตัวจะเท่ากับน้ำหนักของของเหลวที่ถูกวัตถุนั้นแทนที่**

รูป 9.18 อาร์คิมีดิส

Archimedes (ค.ศ. 286 – 331 ก่อน ค.ศ.) นักปราชญ์ชาวกรีก ผลงานที่สำคัญทางด้านคณิตศาสตร์คือการค้นพบว่า π มีค่าระหว่าง $3\frac{10}{70}$ และ $3\frac{10}{71}$ ผลงานที่สำคัญทางด้านวิทยาศาสตร์ คือ การค้นพบหลักการเกี่ยวกับการลอยและจมของวัตถุ

หลักของอาร์คิมีดีส จึงอาจเขียนได้ดังนี้

ในกรณีวัตถุจม ขนาดแรงลอยตัว = ขนาดน้ำหนักของของเหลวที่มีปริมาตรเท่าวัตถุ

ในกรณีวัตถุลอย ขนาดแรงลอยตัว = ขนาดน้ำหนักของของเหลวที่มีปริมาตรเท่ากับวัตถุส่วนที่จมในของเหลว

เราสามารถนำความรู้เรื่องการลอยตัวไปอธิบายสมบัติต่างๆ ของของไหลได้ และสามารถสรุปเป็นหลักทั่วไปได้ว่า **เมื่อวัตถุอยู่ในของไหลจะมีแรงลอยตัวกระทำเนื่องจากของไหลนั้นส่งความดันกระทำต่อวัตถุเสมอ**

ในชีวิตประจำวัน เราจะพบว่ามีวัตถุหลายชนิดลอยในของเหลวได้ โดยมีปริมาตรส่วนหนึ่งจมอยู่ในของเหลวและอีกส่วนหนึ่งอยู่พ้นผิวของเหลว อาทิ เช่น โฟม น้ำแข็งและไม้ก๊อกสามารถลอยในน้ำได้ และมีวัตถุอีกหลายชนิดที่จมในของเหลว เช่น ก้อนหินและเหล็กจมน้ำแต่ลอยในปรอท

ถ้าวัตถุใดจมในของเหลว แสดงว่าน้ำหนักของวัตถุมากกว่าแรงลอยตัวในของเหลว และถ้าวัตถุใดลอยในของเหลว แสดงว่าแรงลอยตัวในของเหลวมีค่าเท่ากับน้ำหนักของวัตถุ

☐ ให้ออกแบบเครื่องมือวัดความหนาแน่นของของเหลวและอธิบายหลักการทำงาน

ตัวอย่าง 9.5 วัตถุลอยในอากาศ

บอลลูนที่ยังไม่บรรจุแก๊สลูกหนึ่งพร้อมกระเช้ามีมวลรวมกัน 500 กิโลกรัม จะต้องบรรจุแก๊สฮีเลียมปริมาตรเท่าใด บอลลูนจึงสามารถลอยนิ่งในอากาศบริเวณผิวโลกได้พอดี

วิธีทำ เนื่องจากอากาศเป็นของไหล บอลลูนที่ลอยในอากาศจึงมีแรงลอยตัวกระทำเช่นเดียวกับวัตถุที่อยู่ในน้ำ ขณะที่บอลลูนอยู่ในสมดุล (แรงลัพธ์ที่กระทำต่อบอลลูนเป็นศูนย์) แรงลอยตัว F_B ที่กระทำต่อบอลลูนเท่ากับน้ำหนักของฮีเลียม W_{He} และน้ำหนักของบอลลูนกับกระเช้า W

ดังนั้น $F_B = W_{He} + W$

$m_{air}g = m_{He}g + (500\,\text{kg})\,g$

$\rho_{air}V = \rho_{He}V + 500\,\text{kg}$

เมื่อ m_{air} และ m_{He} เป็นมวลของอากาศและมวลของฮีเลียมตามลำดับ

ρ_{air} และ ρ_{He} เป็นความหนาแน่นของอากาศและฮีเลียมตามลำดับ

$$V = \frac{500\,\text{kg}}{1.21\,\text{kg/m}^3 - 0.179\,\text{kg/m}^3} = 485\,\text{m}^3$$

คำตอบ ต้องบรรจุแก๊สฮีเลียมปริมาตร 485 ลูกบาศก์เมตร

รูป 9.19 แรงที่กระทำต่อบอลลูน

ตัวอย่าง 9.6 วัตถุลอยน้ำ

เมื่อนำวัตถุก้อนหนึ่งใส่ลงในน้ำ ปรากฏว่าวัตถุลอยน้ำ โดยมีปริมาตรส่วนที่จมลงในน้ำเป็น 0.6 เท่าของปริมาตรทั้งหมด ความหนาแน่นของวัตถุนี้เป็นกี่เท่าของความหนาแน่นของน้ำ

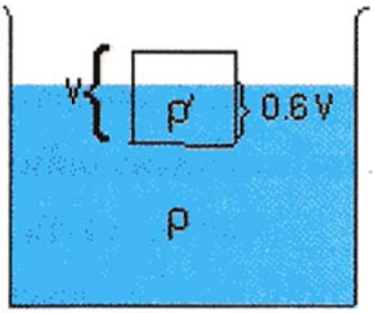
วิธีทำ จากสถานการณ์ในโจทย์ เขียนแผนภาพได้ดังรูป 9.20 เนื่องจากวัตถุลอยในน้ำ ดังนั้น

น้ำหนักของวัตถุทั้งก้อน = น้ำหนักของน้ำที่ถูกแทนที่มีปริมาตรเท่าส่วนที่จม

$\rho' Vg = 0.6\,V\rho g$

$\rho' = 0.6\,\rho$

คำตอบ ความหนาแน่นของวัตถุเท่ากับ 0.6 เท่าของความหนาแน่นของน้ำ



ปริมาตรทั้งหมดของวัตถุ = V

ปริมาตรของวัตถุส่วนจม = $0.6\,V$

ความหนาแน่นของน้ำ = ρ

ความหนาแน่นของวัตถุ = ρ'

รูป 9.20 วัตถุลอยในของเหลว

ตัวอย่าง 9.7 วัตถุจมน้ำ

เมื่อชั่งมงกุฎในอากาศอ่านน้ำหนักได้ 8.5 นิวตัน เมื่อนำไปชั่งในน้ำอ่านน้ำหนักได้ 7.7 นิวตัน มงกุฎนี้ทำด้วยทองคำบริสุทธิ์หรือไม่

วิธีทำ จากสถานการณ์ในโจทย์ เขียนแผนภาพได้ดังรูป 9.21

เมื่อชั่งมงกุฎในอากาศ แรงที่เครื่องชั่งยกมงกุฎในอากาศเท่ากับน้ำหนักของมงกุฎ W ดังนั้น

$$W = 8.5 \text{ N}$$

เมื่อชั่งมงกุฎในน้ำ มงกุฎอยู่ในสมดุลด้วยแรงสามแรง คือ แรงลอยตัว F_B แรงที่เครื่องชั่งยกมงกุฎในน้ำ F' และน้ำหนักของมงกุฎ W ดังนั้น

$$F_B + F' = W$$

หรือ $$F_B + 7.7 \text{ N} = 8.5 \text{ N}$$

$$F_B = 0.8 \text{ N}$$

แต่แรงลอยตัว = น้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ามงกุฎ

หรือ $$F_B = m_w g$$

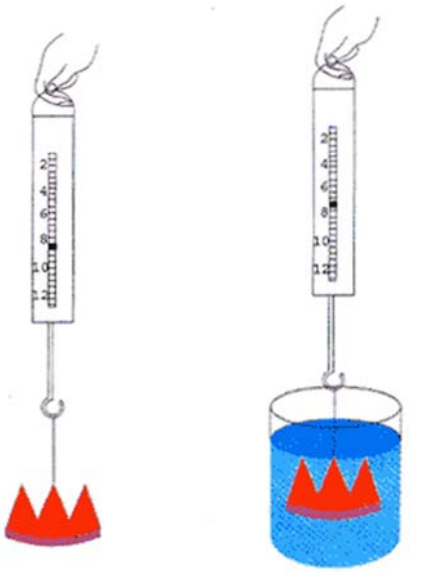
$$0.8 \text{ N} = \rho_w V_w g$$

เมื่อ ρ_w คือความหนาแน่นของน้ำ

และ V_w คือปริมาตรของมงกุฎ

$$\therefore \text{ปริมาตรมงกุฎ } V_w = 0.8 \text{ N}\left(\frac{1}{\rho_w g}\right)$$

$$\text{แต่มวลของมงกุฎ } m = 8.5 \text{ N}\left(\frac{1}{g}\right)$$



ก. ชั่งในอากาศ ข. ชั่งในน้ำ

รูป 9.21 การชั่งมงกุฎ

$$\therefore \text{ความหนาแน่นของมงกุฎ } \rho = \frac{m}{V_w}$$

$$= \left(\frac{8.5}{g}\frac{\rho_w g}{0.8}\right) \text{ เมื่อ } \rho_w = 10^3 \text{ kg/m}^3$$

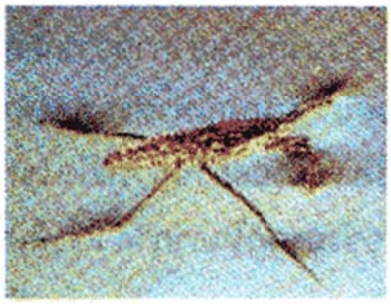
จะได้ $$\rho = 10.6 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$$

จากตาราง 9.1 ทองคำบริสุทธิ์มีความหนาแน่น $19.3 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$ ตัวเลข 10.6×10^3 จึงแสดงว่ามงกุฎไม่ได้ทำด้วยทองคำบริสุทธิ์

คำตอบ มงกุฎไม่ได้ทำด้วยทองคำบริสุทธิ์

9.5 ความตึงผิว

หลายคนคงเคยเห็นแมลงตัวเล็กๆ ยืนหรือวิ่งไปมาบนผิวน้ำได้โดยไม่จมน้ำ หรือถ้าวางใบมีดโกนซึ่งทำด้วยวัสดุที่มีความหนาแน่นมากกว่าน้ำบนผิวน้ำนิ่ง ใบมีดโกนจะลอยบนผิวน้ำได้ เหตุใดแมลงและใบมีดโกนจึงประคองตัวอยู่บนผิวน้ำได้

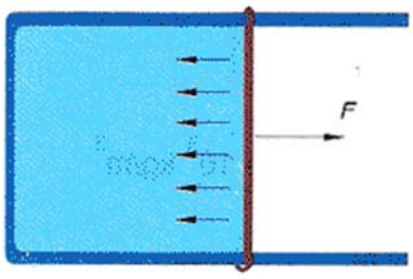


รูป 9.22 แมลงบนผิวน้ำ

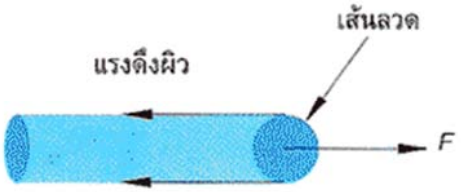
การที่แมลงไม่จมน้ำและใบมีดโกนลอยบนผิวน้ำได้ แสดงว่า มีแรงอีกชนิดหนึ่งที่ไม่ใช่แรงลอยตัวมากระทำและช่วยพยุงขาแมลงและใบมีดโกนไว้ และแรงนั้นต้องเป็นแรงที่กระทำที่ผิวน้ำ แรงนี้เป็นแรงระหว่างโมเลกุลของน้ำที่ผิวน้ำซึ่งดึงกันและกันไว้ ทำให้ผิวน้ำราบเรียบและตึง จึงเรียกว่า **แรงดึงผิว** (surface tension force) แรงดึงผิวของของเหลวจึงเป็นแรงที่พยายามยึดผิวของเหลวไว้ไม่ให้แยกจากกัน

รูป 9.23 ใบมีดโกนลอยบนผิว

นำเส้นลวดเล็กๆ มาดัดให้เป็นโครงลวดรูปตัวยู จากนั้นนำเส้นลวดตรงเล็กๆ อีกเส้นหนึ่งมาวางพาด จุ่มโครงลวดลงในน้ำสบู่ในแนวดิ่ง เมื่อยกโครงลวดขึ้นจะเห็นฟิล์มน้ำสบู่ติดขึ้นมา จากนั้นดึงเส้นลวดตรงให้เคลื่อนที่ออกไปตามโครงลวดอย่างช้าๆ จะเห็นว่าฟิล์มน้ำสบู่แผ่ขยายจนมีพื้นที่มากขึ้นๆ ดังรูป 9.24 ในที่สุดเส้นลวดตรงจะหลุดออกจากฟิล์มน้ำสบู่



รูป 9.24 ฟิล์มน้ำสบู่บนโครงลวดรูปตัวยู



รูป 9.25 แรงดึงผิวของฟิล์มน้ำสบู่

ขณะที่ออกแรงดึงเส้นลวดตรง ฟิล์มน้ำสบู่จะออกแรงต้านไม่ให้เส้นลวดตรงหลุดจากน้ำสบู่ ซึ่งก็คือแรงดึงผิวนั่นเอง เมื่อพิจารณาบริเวณที่เส้นลวดตรงสัมผัสกับฟิล์มน้ำสบู่ จะพบว่าฟิล์มน้ำสบู่มีสองผิวและแรงดึงผิวของฟิล์มน้ำสบู่มีทิศขนานกับระนาบของฟิล์มและตั้งฉากกับ

แนวที่เส้นลวดตรงสัมผัสฟิล์มน้ำสบู่ ดังรูป 9.25 จึงสรุปได้ว่า **แรงดึงผิวของของเหลวมีทิศขนานกับผิวของของเหลวและตั้งฉากกับขอบที่ของเหลวสัมผัส** ซึ่งสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากกิจกรรม 9.1 เรื่องแรงดึงผิว ท้ายบท

ถ้าปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างขาโครงลวด ขนาดของแรงดึงสูงสุดก่อนที่เส้นลวดตรงหลุดจากฟิล์มน้ำสบู่ก็จะเปลี่ยนไปด้วย เมื่อคำนวณอัตราส่วนระหว่างแรงดึงสูงสุดที่ใช้ต่อความยาวของผิวของเหลวที่สัมผัสเส้นลวดตรง (ซึ่งก็คือสองเท่าของความยาวของเส้นลวดตรงเพราะผิวสัมผัสมีสองผิว คือผิวบนและผิวล่าง) จะพบว่ามีค่าคงตัว ค่านี้เรียกว่า **ความตึงผิว** (surface tension) แทนด้วยสัญลักษณ์ γ นั่นคือ

$$\gamma = \frac{F}{L} \qquad \textbf{(9.5)}$$

เมื่อ F เป็นขนาดของแรงดึงผิว

และ L เป็นความยาวของผิวสัมผัส

ความตึงผิวของของเหลว มีหน่วย นิวตันต่อเมตร (N/m)

ถ้าเปลี่ยนน้ำสบู่เป็นของเหลวชนิดอื่น อัตราส่วนนี้จะมีค่าต่างกัน ความตึงผิวจึงเป็นสมบัติเฉพาะตัวของของเหลวชนิดหนึ่งๆ ซึ่งสามารถวัดโดยการทดลอง 9.3 เรื่องความตึงผิวของของเหลว ท้ายบท

จากรูป 9.23 เมื่อพิจารณางานของแรง F ที่ดึงเส้นลวดตรงให้เคลื่อนที่เป็นระยะ Δx ทำให้ผิวของเหลวมีพื้นที่มากขึ้น $L\,\Delta x$ งานที่ใช้ในการเพิ่มพื้นที่ผิว หาได้ดังนี้

$$W = F\,\Delta x$$

$$= \gamma L\,\Delta x \quad \text{เมื่อ} \quad F = \gamma L$$

$$W = \gamma\,\Delta A \quad \text{เมื่อ} \quad \Delta A = L\,\Delta x \text{ เป็นพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้น}$$

นั่นคือ

$$\gamma = \frac{W}{\Delta A} \qquad \textbf{(9.6)}$$

จากสมการ (9.6) แสดงได้ว่า ความตึงผิวของของเหลวเท่ากับอัตราส่วนระหว่างงานต่อพื้นที่ผิวของเหลวที่เพิ่มขึ้น ความตึงผิวตามความหมายนี้มีหน่วยจูลต่อตารางเมตร (J/m^2)

ความตึงผิวของของเหลวแต่ละชนิดที่อุณหภูมิเดียวกัน มีค่าไม่เท่ากัน สำหรับของเหลวชนิดหนึ่ง ความตึงผิวจะเปลี่ยนไปเมื่อของเหลวมีสารเจือ เช่น น้ำเกลือหรือน้ำสบู่จะมีความตึงผิวน้อยกว่าน้ำ และความตึงผิวจะลดลงเมื่ออุณหภูมิของของเหลวเพิ่มขึ้น ตาราง 9.2 แสดงความตึงผิวของของเหลวบางชนิด ที่อุณหภูมิ 20°C

ตาราง 9.2 ความตึงผิวของของเหลวบางชนิด ที่อุณหภูมิ 20°C

ของเหลว	ความตึงผิว (N/m)
ปรอท	0.4350
น้ำ	0.0728
กลีเซอรอล	0.0631
เบนซิน	0.0289
เอทิลแอลกอฮอล์	0.0223

ตัวอย่าง 9.8 ความตึงผิว

ถ้าใช้แรง 2.1×10^{-3} นิวตัน ดึงเส้นลวดตรง ดังรูป 9.24 และถ้าระยะห่างระหว่างขาของโครงลวดรูปตัวยูเท่ากับ 0.05 เมตร ความตึงผิวของฟิล์มน้ำสบู่เป็นเท่าใด

วิธีทำ ความตึงผิว $\gamma = \dfrac{F}{L}$

ในที่นี้ F = แรงดึงผิวของฟิล์มน้ำสบู่

= แรงที่ใช้ดึงเส้นลวดตรง

= 2.1×10^{-3} N

L = ความยาวทั้งหมดของแนวผิวน้ำสบู่ที่หลุดจากลวดตรง

= สองเท่าของความยาวของเส้นลวดตรง

= $2\times5\times10^{-2}$ m

แทนค่าจะได้ $\gamma = \dfrac{2.1\times10^{-3}\ \text{N}}{2\times5\times10^{-2}\ \text{m}}$

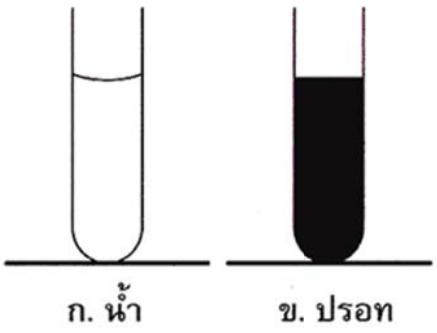
= 0.021 N/m

คำตอบ ความตึงผิวของฟิล์มน้ำสบู่ เท่ากับ 0.021 นิวตันต่อเมตร

ความตึงผิวเกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์บางอย่างในธรรมชาติ เช่น การโค้งของผิวของเหลวในภาชนะ และการซึมตามรูเล็ก เป็นต้น

การโค้งของผิวของเหลว

เมื่อเทของเหลวลงในภาชนะและของเหลวนั้นอยู่นิ่ง สังเกตผิวของเหลวจะพบว่า ผิวของเหลวตรงบริเวณที่สัมผัสผิวภาชนะมีลักษณะโค้ง ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า **การโค้งของผิวของเหลว** (meniscus effect) เช่น เวลาเทน้ำและปรอทลงในแก้วคนละใบ หลังจากที่ของเหลวทั้งสองอยู่นิ่ง จะพบว่าผิวน้ำและผิวปรอทตรงบริเวณที่สัมผัสผิวแก้วมีลักษณะโค้งเว้าและโค้งนูน ตามลำดับ ดังรูป 9.26

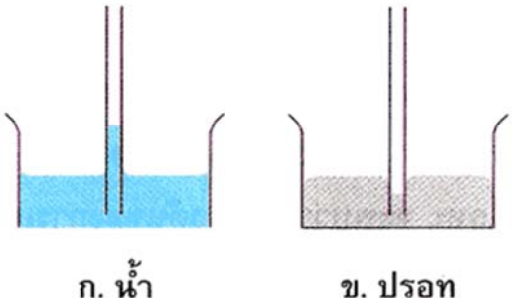


รูป 9.26 ลักษณะผิวของเหลวที่สัมผัสผิวแก้ว

ปรากฏการณ์นี้เกิดจาก**แรงระหว่างโมเลกุล** (intermolecular force) สองชนิด คือ **แรงเชื่อมแน่น** (cohesive force) ซึ่งเป็นแรงระหว่างโมเลกุลชนิดเดียวกัน และ**แรงยึดติด** (adhesive force) ซึ่งเป็นแรงระหว่างโมเลกุลต่างชนิดกัน จากรูป 9.26 ก. เมื่อแรงยึดติดระหว่างโมเลกุลของน้ำกับโมเลกุลของแก้วมากกว่าแรงเชื่อมแน่นระหว่างโมเลกุลของน้ำ โมเลกุลของน้ำที่อยู่บริเวณผิวที่สัมผัสกับแก้วจึงถูกดูดขึ้นไปตามผิว ดังนั้นผิวน้ำจึงโค้งเว้าและน้ำจะเปียกแก้ว แต่ในรูป 9.26 ข. เมื่อแรงเชื่อมแน่นระหว่างโมเลกุลของปรอทมากกว่าแรงยึดติดระหว่างโมเลกุลของปรอทกับโมเลกุลของแก้ว โมเลกุลของปรอทบริเวณผิวที่สัมผัสกับผิวแก้วจึงถูกดึงดูดลงไปตามผิว ดังนั้นผิวปรอทจึงโค้งนูนและปรอทไม่เปียกแก้ว

การซึมตามรูเล็ก

เมื่อจุ่มปลายข้างหนึ่งของ**หลอดรูเล็ก** (capillary tube) ซึ่งเป็นหลอดแก้วที่มีปลายเปิดทั้งสองข้างและมีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยมากลงในของเหลว จะพบว่าระดับของเหลวในหลอดสูงหรือต่ำกว่าระดับของเหลวภายนอกหลอด ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า **การซึมตามรูเล็ก** (capillary action) เช่น จุ่มปลายข้างหนึ่งของหลอดรูเล็กลงในน้ำและปรอท จะพบว่าระดับน้ำในหลอดสูงกว่าระดับน้ำนอกหลอดและส่วนระดับปรอทในหลอดต่ำกว่าระดับปรอทภายนอกหลอด ดังรูป 9.27



ระดับน้ำและระดับปรอทในหลอดแก้วรูเล็กปลายเปิดทั้งสองข้าง

รูป 9.27 การซึมตามรูเล็ก

□ อธิบายปรากฏการณ์การซึมตามรูเล็กในรูป 9.27 ได้อย่างไร

นอกจากนี้ ยังมีปรากฏการณ์การซึมตามรูเล็กที่พบเห็นในชีวิตประจำวันอีก เช่น การซึมของน้ำเข้าไปในเนื้อผ้าผ่านช่องว่างระหว่างเส้นใยผ้า การซึมของน้ำเข้าไปในเยื่อกระดาษผ่านรูเล็กๆ หรือช่องว่างระหว่างอนุภาคของเยื่อกระดาษ การซึมของน้ำจากรากพืชขึ้นไปตามลำต้นโดยอาศัยท่อไซเล็ม (xylem) หรือท่อส่งอาหารของพืช การซึมของน้ำเกลือที่อยู่ใต้ดินขึ้นสู่ผิวดินในภาคอีสาน เป็นต้น

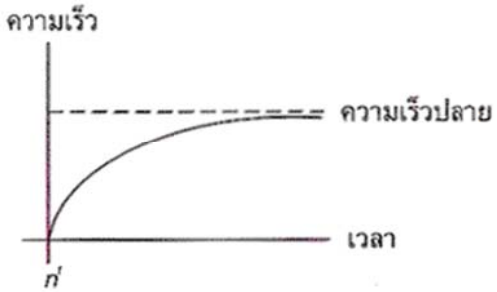
9.6 ความหนืด

เมื่อใช้ช้อนคนของเหลว เช่น น้ำ น้ำเชื่อมและนมข้นหวาน จะพบว่า การคนนมข้นหวานจะใช้แรงมากกว่าการคนน้ำเชื่อม และการคนน้ำเชื่อมจะใช้แรงมากกว่าการคนน้ำ ทั้งนี้เป็นเพราะของเหลวทั้งสามชนิดมี **ความหนืด** (viscosity) ต่างกัน แก๊สก็มีความหนืดเช่นกัน แต่ความหนืดของแก๊สน้อยกว่าความหนืดของของเหลวมาก

ของไหลที่มีความหนืดมากจะมีแรงต้านการเคลื่อนที่ของวัตถุในของไหลนั้นมาก แรงต้านการเคลื่อนที่อันเนื่องมาจากความหนืดของของไหล เรียกว่า **แรงหนืด** (viscous force) ความหนืดของของเหลวมีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่ของวัตถุในของเหลวอย่างไร

เทกลีเซอรอลใส่กระบอกใส ปล่อยลูกกลมโลหะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 มิลลิเมตร ลงในกลีเซอรอล ดังรูป 9.28 สังเกตการเคลื่อนที่ของลูกกลมโลหะ จะพบว่า ในช่วงต้นของการเคลื่อนที่ ลูกกลมโลหะเคลื่อนที่โดยมีความเร่ง หลังจากนั้นก็เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงตัว เรียกความเร็วนี้ว่า **ความเร็วปลาย** (terminal velocity) กราฟระหว่างความเร็วและเวลาของลูกกลมโลหะ เป็นดังรูป 9.29

รูป 9.28 การเคลื่อนที่ของลูกกลมโลหะในกลีเซอรอล

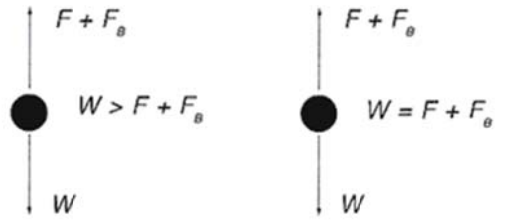


รูป 9.29 กราฟระหว่างความเร็วและเวลาของลูกกลมโลหะที่ถูกปล่อยให้ตกในกลีเซอรอล

ที่เป็นเช่นนี้เพราะ ในช่วงต้นของการเคลื่อนที่ ลูกกลมโลหะเคลื่อนที่โดยมีความเร่งภายใต้แรงลัพธ์ขนาดหนึ่ง ต่อมาเมื่อลูกกลมโลหะมีความเร็วสูงขึ้น แรงลัพธ์นั้นลดลงๆ จนมีค่าเป็นศูนย์ ลูกกลมโลหะจึงเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงตัว แรงลัพธ์ที่กระทำต่อลูกกลมโลหะเกิดจากแรงอะไร และเหตุใดแรงลัพธ์นั้นจึงมีค่าเป็นศูนย์

จากหลักของอาร์คิมีดีสและกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน ขณะที่ลูกกลมโลหะตกในกลีเซอรอล (หรือของไหลอื่น) ลูกกลมจะถูกแรงกระทำสามแรง คือ น้ำหนัก(W) ของลูกกลมโลหะ แรงลอยตัว (F_B) และแรงหนืด (F) ของกลีเซอรอล ซึ่งขึ้นกับความเร็วของลูกกลมโลหะ

เมื่อพิจารณาแรงทั้งสามนี้ จะพบว่าน้ำหนักของลูกกลมโลหะและแรงลอยตัวมีค่าคงตัว ดังนั้นการที่แรงลัพธ์เปลี่ยนไปจึงเกิดจากแรงหนืดเพียงแรงเดียว กล่าวคือเมื่อเริ่มเคลื่อนที่ แรงหนืดจะมีขนาดน้อยกว่าผลต่างของน้ำหนักและแรงลอยตัว ดังรูป 9.30 ก. เมื่อลูกกลมโลหะเคลื่อนที่เร็วขึ้น แรงหนืดจะมีขนาดมากขึ้นจนทำให้แรงลัพธ์ที่กระทำต่อลูกกลมโลหะเป็นศูนย์ ลูกกลมโลหะจึงเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงตัว ดังรูป 9.30 ข. จึงสรุปได้ว่า **แรงหนืดที่กระทำต่อวัตถุขึ้นอยู่กับขนาดความเร็วของวัตถุและแรงนี้มีในทิศตรงกันข้ามกับทิศการเคลื่อนที่ของวัตถุ**



ก. ขณะที่เคลื่อนที่ด้วยความเร่ง ข. การเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงตัว

รูป 9.30 แรงที่กระทำต่อลูกกลมโลหะที่ตกในของเหลว ขณะเคลื่อนที่ด้วยความเร่งและความเร็วคงตัว

สโตกส์ (Sir George Stokes) ได้ทดลองหาแรงหนืดที่กระทำต่อวัตถุทรงกลมขณะเคลื่อนที่ในของไหล พบว่า แรงหนืดแปรผันตรงกับความเร็วของวัตถุทรงกลม ดังสมการ

$$F = 6\pi\eta r v \qquad (9.7)$$

สมการนี้เรียกว่า **กฎของสโตกส์** (Stokes' law)

เมื่อ F คือ แรงหนืดของของไหล

r คือ รัศมีของวัตถุทรงกลม

υ คือ ความเร็วของวัตถุทรงกลม

η คือ ความหนืดของของไหล

ความหนืดมีหน่วยนิวตัน วินาทีต่อตารางเมตร (Ns/m^2) หรือ พาสคัล วินาที (Pa s) ในอดีตหน่วยของความหนืด (ในระบบ cgs) คือ ปัวส์ (poise) แทนด้วยสัญลักษณ์ P โดยที่

1 Pa s = 10 P

จะเห็นได้ว่า แรงหนืดที่ของไหลกระทำต่อวัตถุซึ่งเคลื่อนที่ในของไหล นอกจากจะขึ้นกับความหนืดของของไหลแล้ว ยังขึ้นกับความเร็วของวัตถุขณะนั้นด้วย

ตาราง 9.3 ความหนืดของของไหลบางชนิด ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

สาร	ความหนืด (10^{-3} Pa s)	สาร	ความหนืด (10^{-6} Pa s)
ของเหลว		**แก๊ส**	
กลีเซอรอล	1412	ออกซิเจน	20.9
น้ำมันลินซีด	986	ฮีเลียม	18.9
น้ำมันมะกอก	84	อากาศ	18.08
กรดซัลฟิวริก	22	คาร์บอนมอนอกไซด์	18.4
เอทิลแอลกอฮอล์	1.192	คาร์บอนไดออกไซด์	16.0
น้ำ	1.005	คลอรีน	14.7
เบนซิน	0.649	มีเทน	12.0
น้ำมันละหุ่ง	0.234	ไฮโดรเจน	9.5

เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยน ความหนืดของของไหลจะเปลี่ยนด้วย โดยทั่วไป ความหนืดของของไหลจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดังตาราง 9.4 ต่อไปนี้

ตาราง 9.4 ความหนืดของกลีเซอรอลที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ(^{0}C)	ความหนืด (10^{-3} Pa s)	อุณหภูมิ (^{0}C)	ความหนืด (10^{-3} Pa s)
0	12 070	60	81.3
10	3 900	70	50.6
20	1 412	80	31.9
30	612	90	21.3
40	284	100	14.8
50	142		

ตัวอย่าง 9.9 กฎของสโตกส์

ปล่อยทรงกลมเหล็กที่มีรัศมี 1 มิลลิเมตร ลงในน้ำ ความเร็วปลายของทรงกลมเหล็กจะมีค่าเท่าใด

วิธีทำ ขณะทรงกลมเหล็กเคลื่อนที่ด้วยความเร็วปลาย แรงลัพธ์ที่กระทำต่อทรงกลมเหล็กเป็นศูนย์ ดังนั้นน้ำหนักของทรงกลมเหล็กทิศลงเท่ากับผลรวมของแรงหนืดและแรงลอยตัวทิศลง ซึ่งเขียนเป็นสมการการเคลื่อนที่ของทรงกลมเหล็ก ได้ดังนี้

$$W = F + F_B$$

$$mg = 6\pi\eta r v + m_w g$$

$$\rho Vg = 6\pi\eta r v + \rho_w Vg$$

$$v = \frac{(\rho - \rho_w)Vg}{6\pi\eta r}$$

m คือ มวลของทรงกลมเหล็ก

m_w คือ มวลของน้ำ

ρ คือ ความหนาแน่นของทรงกลมเหล็ก

ρ_w คือ ความหนาแน่นของน้ำ

V คือ ปริมาตรทรงกลมเหล็ก

และ r คือ รัศมีของทรงกลมเหล็ก

รูป 9.31 แรงต่าง ๆที่กระทำต่อทรงกลมเหล็กขณะเคลื่อนที่ในน้ำด้วยความเร็วปลาย

แทนค่า $V = \frac{4}{3}\pi r^3$ จะได้

$$v = \frac{2}{9}\frac{gr^2(\rho - \rho_w)}{\eta}$$

$$= \frac{2 \times 9.8\ \text{m/s}^2 \times 1.0 \times 10^{-3}\ \text{m} \times 1.0 \times 10^{-3}\ \text{m} \times (7.8 - 1.0) \times 10^3\ \text{kg/m}^3}{9 \times 1.0 \times 10^{-3}\ \text{Ns/m}^2}$$

$$= 14.8\ \text{m/s}$$

คำตอบ ความเร็วปลายของทรงกลมเหล็กเท่ากับ 14.8 เมตรต่อวินาที

9.7 พลศาสตร์ของของไหล

เราได้ศึกษาสมบัติบางประการของของไหล เช่น ความดัน แรงลอยตัว เป็นต้น ซึ่งเป็นการศึกษาของไหลที่อยู่นิ่ง สำหรับของไหลที่มีการเคลื่อนที่ เช่น ลมพัด การไหลของน้ำในท่อ ความดันของของไหลเหล่านั้น จะเปลี่ยนอย่างไรหรือไม่ จะได้ศึกษาดังต่อไปนี้

รูป 9.32 การไหลอย่างสม่ำเสมอของอากาศผ่านรถยนต์ทดลองในอุโมงค์ลม

9.7.1 ของไหลอุดมคติ

การเคลื่อนที่ของของไหลเป็นการเคลื่อนที่ที่ซับซ้อน เพื่อให้การศึกษาการเคลื่อนที่ของของไหลไม่ยุ่งยาก เราจะพิจารณา**ของไหลอุดมคติ** (ideal fluid) ซึ่งมีสมบัติดังนี้

1. **มีการไหลอย่างสม่ำเสมอ** (steady flow) หมายถึง ความเร็วของทุกอนุภาค ณ ตำแหน่งต่างๆ ในของไหลมีค่าคงตัว โดยความเร็วของอนุภาคของของไหลเมื่อไหลผ่านจุดต่างๆ กันจะเท่ากันหรือต่างกันก็ได้

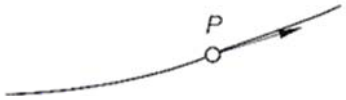
2. **มีการไหลโดยไม่หมุน** (irrotational flow) กล่าวคือในบริเวณโดยรอบจุดหนึ่งๆ ในของไหลจะไม่มีอนุภาคของของไหลเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเชิงมุมรอบจุดนั้นๆ เลย

3. **มีการไหลโดยไม่มีแรงต้านเนื่องจากความหนืด** (nonviscous flow) หมายความว่าไม่มีแรงต้านใดๆ ภายในเนื้อของของไหลมากระทำต่ออนุภาคของของไหล

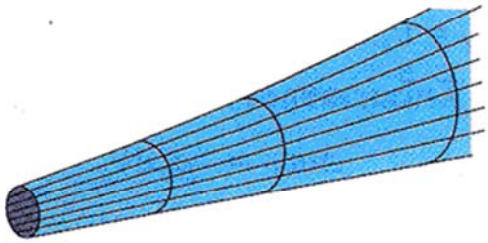
4. **ไม่สามารถอัดได้** (incompressible flow) หมายความว่า ของไหลมีปริมาตรคงตัว โดยปริมาตรของของไหลแต่ละส่วนไม่ว่าจะไหลผ่านบริเวณใดก็ยังคงมีความหนาแน่นเท่าเดิม

9.7.2 การไหลของของไหลอุดมคติ

ในของไหลที่ไหลอย่างสม่ำเสมอ อนุภาคหนึ่งๆของของไหลจะเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางเดินเส้นหนึ่ง เรียกว่า **เส้นกระแส** (streamline) โดยความเร็วของอนุภาคนั้นที่ตำแหน่งต่างๆ มีทิศในแนวเส้นสัมผัส ณ ตำแหน่ง ดังรูป 9.33 และเส้นกระแสของอนุภาคแต่ละตัวจะไม่ตัดกัน ถ้าให้เส้นกระแสจำนวนหนึ่งอยู่เรียงกันเป็นมัด ดังรูป 9.34 จะเรียกมัดของเส้นกระแสนี้ว่า **หลอดการไหล** (tube of flow) หลอดการไหลนี้จึงเปรียบเสมือนท่อที่มีของไหลไหลเข้าทางปลายข้างหนึ่งและไหลออกทางปลายอีกข้างหนึ่ง

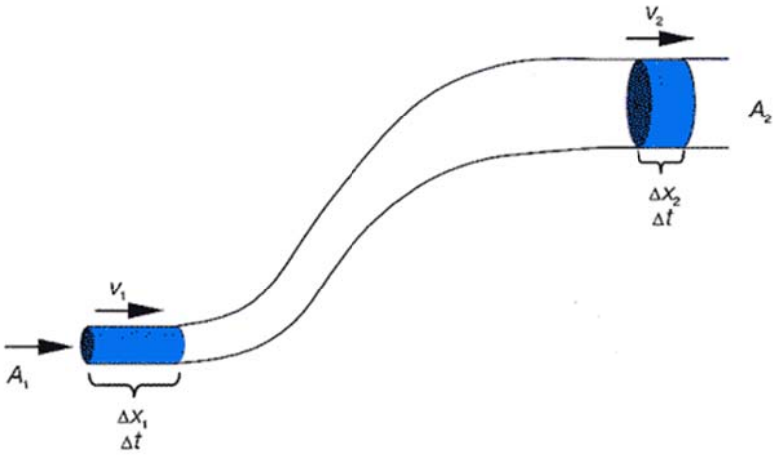


รูป 9.33 เส้นกระแสของอนุภาคในของไหลและความเร็วของอนุภาคขณะผ่านจุด P จะมีทิศในแนวเส้นสัมผัสกับเส้นกระแส ณ จุดนั้น



รูป 9.34 ในหลอดการไหล อนุภาคไม่สามารถไหลออกนอกหลอดการไหลได้ เพราะถ้าเส้นกระแสจะตัดกัน อนุภาคจะพุ่งไปได้สองทิศทาง จึงเป็นไปไม่ได้

9.7.3 สมการความต่อเนื่อง



รูป 9.35 ของไหลอุดมคติไหลอย่างสม่ำเสมอผ่านหลอดการไหล ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เท่ากัน ปริมาตรของของไหลที่ผ่านพื้นที่หน้าตัด A_1 ในเวลา Δt จะเท่ากับปริมาตรของของไหลที่ผ่านพื้นที่หน้าตัด A_2 ในเวลา Δt ที่เท่ากัน

พิจารณาหลอดการไหลที่มีขนาดไม่สม่ำเสมอและของไหลไหลจากปลายล่างที่มีพื้นที่หน้าตัด A_1 ไปปลายบนที่มีพื้นที่หน้าตัด A_2 ดังรูป 9.35

พิจารณาที่ปลายล่าง

ของไหลเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่ A_1 ด้วยอัตราเร็ว v_1 ในเวลา Δt จะได้ระยะทาง $\Delta l_1 = v_1 \Delta t$ และปริมาตร $\Delta V_1 = A_1 v_1 \Delta t$

ดังนั้นมวลของของไหลที่ผ่านพื้นที่ A_1 คือ

$$\Delta m_1 = \rho_1 \Delta V_1 = \rho_1 A_1 v_1 \Delta t$$

พิจารณาที่ปลายบน

ของไหลเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่ A_2 ด้วยอัตราเร็ว v_2 ในเวลา Δt เดียวกัน จะได้ระยะทาง $\Delta l_2 = v_2 \Delta t$ และปริมาตร $\Delta V_2 = A_2 v_2 \Delta t$

ดังนั้นมวลของของไหลที่ผ่านพื้นที่ A_2 คือ

$$\Delta m_2 = \rho_2 \Delta V_2 = \rho_2 A_2 v_2 \Delta t$$

เนื่องจากของไหลไม่สามารถไหลผ่านผนังของหลอดการไหล และไม่มีการสร้างหรือทำลายของไหลในหลอดการไหล ดังนั้นมวลของของไหลที่ผ่านแต่ละส่วนของหลอดการไหลในเวลา Δt เดียวกันจึงมีค่าเท่ากัน นั่นคือ

$$\Delta m_1 = \Delta m_2$$

จะได้ $$\rho_1 A_1 v_1 \Delta t = \rho_2 A_2 v_2 \Delta t$$

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2$$

เนื่องจากของไหลอุดมคติไม่สามารถอัดตัวได้ ดังนั้น ความหนาแน่นจึงไม่เปลี่ยนแปลง แสดงว่า $\rho_1 = \rho_2$

จะได้ $$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

นั่นคือ $$Av = \text{ค่าคงตัว} \qquad (9.9)$$

สมการ (9.9) เรียกว่า **สมการความต่อเนื่อง** (the equation of continuity) ซึ่งสรุปเป็นใจความได้ว่า **ผลคูณระหว่างพื้นที่หน้าตัดกับอัตราเร็วของของไหลอุดมคติ ไม่ว่าจะอยู่ที่ตำแหน่งใดในหลอดการไหลจะมีค่าคงตัวเสมอ**

ผลคูณ Av เรียกว่า **อัตราการไหล** (volume flow rate หรือ volume flux) มีหน่วยลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

จากสมการ (9.9) จะเห็นว่าอัตราเร็วของของไหลแปรผกผันกับพื้นที่หน้าตัดของหลอดการไหล นั่นคือ ถ้าพื้นที่หน้าตัดเล็ก อัตราเร็วจะมาก และถ้าพื้นที่หน้าตัดใหญ่ อัตราเร็วจะน้อย การที่ Av มีค่าคงตัว ทำให้สามารถอธิบายได้ว่า บริเวณหลอดการไหลที่มีพื้นที่หน้าตัดเล็ก เส้นกระแสจะใกล้ชิดกัน และเส้นกระแสจะอยู่ห่างกันในบริเวณของหลอดการไหลที่มีที่พื้นที่หน้าตัดใหญ่ ด้วยเหตุนี้ เมื่อระยะห่างระหว่างเส้นกระแสลด อัตราเร็วของของไหลจะเพิ่ม และเมื่อระยะระหว่างเส้นกระแสเพิ่ม อัตราเร็วของของไหลจะลด

ตัวอย่าง 9.10 สมการความต่อเนื่อง

น้ำไหลด้วยอัตราเร็ว 10 เซนติเมตรต่อวินาที ในท่อที่มีรัศมี 3 เซนติเมตร ไปสู่ท่อที่มีรัศมี 2 เซนติเมตร อัตราเร็วของน้ำในท่อเล็กเป็นเท่าใด

วิธีทำ จากสถานการณ์ในโจทย์ เขียนแผนภาพได้ดังรูป 9.36

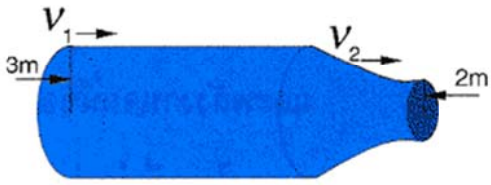
จาก $A_1 v_1 = A_2 v_2$

เมื่อ v = อัตราเร็วของน้ำ

และ A = พื้นที่หน้าตัดของท่อ

แทนค่า $\pi(3 \times 10^{-2})^2\ m^2 \times 10^{-1}\ m/s = \pi(2 \times 10^{-2})^2\ m^2\ v_2$

จะได้ $v_2 = 22.5 \times 10^{-2}\ m/s$



รูป 9.36 การไหลของน้ำในท่อ

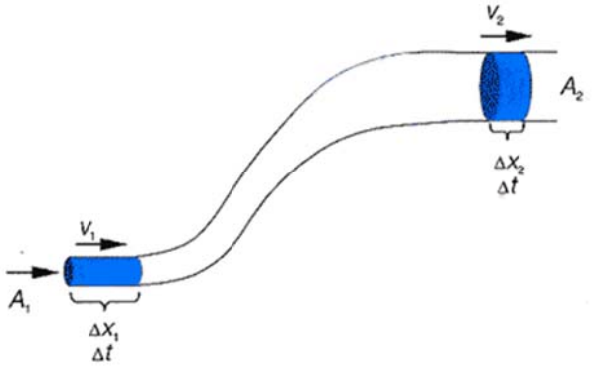
คำตอบ อัตราเร็วของน้ำในท่อเล็กเท่ากับ 0.225 เมตรต่อวินาที

9.7.4 สมการของแบร์นูลลี

หลายคนคงเคยรดน้ำต้นไม้ด้วยสายยาง เมื่อบีบปลายสายยางให้พื้นที่หน้าตัดสายยางแคบลง จะพบว่ากระแสน้ำจะพุ่งไปได้ไกลและเร็วกว่าเดิม ความดันและอัตราเร็วของน้ำในสายยางและที่ปลายสายยาง มีความสัมพันธ์กันหรือไม่ อย่างไร

พิจารณาการเคลื่อนที่ของของไหลอุดมคติในท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เท่ากัน โดยท่อส่วนล่างมีพื้นที่หน้าตัด A_1 และอยู่สูงจากระดับอ้างอิง h_1 ส่วนท่อส่วนบนมีพื้นที่หน้าตัด A_2 และอยู่จากระดับอ้างอิง h_2 ดังรูป 9.37

ในช่วงเวลา Δt ของไหลในท่อส่วนล่างเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว v_1 ได้ระยะทาง Δl_1 และมีความดัน P_1 ส่วนของไหลในท่อส่วนบนเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว v_2 ได้ระยะทาง Δl_2 และมีความดัน P_2 เนื่องจากของไหลเคลื่อนที่ในช่วงเวลา Δt เดียวกัน ดังนั้นมวล m และปริมาตร V ของของไหลที่ผ่านพื้นที่ A_1 และ A_2 จึงมีค่าเท่ากัน



รูป 9.37 ของไหลที่เคลื่อนที่ผ่านท่อจากตำแหน่งหนึ่งไปอีกตำแหน่งซึ่งอยู่ต่างระดับ

พิจารณาของไหลที่ท่อส่วนล่าง

แรงที่ของไหลกระทำบนพื้นที่ A_1 คือ $F_1 = P_1A_1$

ดังนั้นงานที่ทำโดยแรง F_1 คือ

$$W_1 = F_1\Delta l_1 = P_1(A_1\Delta l_1) = P_1V$$

พลังงานศักย์โน้มถ่วงของของไหล $E_{p1} = mgh_1$

และพลังงานจลน์ของของไหล $E_{k1} = \frac{1}{2}mv_1^2$

พิจารณาของไหลที่ท่อส่วนบน

แรงที่ของไหลกระทำบนพื้นที่ A_2 คือ $F_2 = -P_2A_2$ (เครื่องหมายลบที่ปรากฏเนื่องจาก F_2 มีทิศตรงข้ามกับ F_1)

ดังนั้นงานที่ทำโดยแรง F_2 คือ

$$W_2 = -F_2\Delta l_2 = -P_2(A_2\Delta l_2) = -P_2V$$

พลังงานศักย์โน้มถ่วงของของไหล $E_{p2} = mgh_2$

และพลังงานจลน์ของของไหล $E_{k2} = \frac{1}{2}mv_2^2$

งานสุทธิที่ทำโดยแรงทั้งสองคืองานที่ทำให้พลังงานศักย์โน้มถ่วงและพลังงานจลน์ของของไหลเปลี่ยนไป

พลังงานศักย์โน้มถ่วงที่เปลี่ยนไปคือ $\Delta E_p = E_{p2} - E_{p1} = mgh_2 - mgh_1$

พลังงานจลน์ที่เปลี่ยนไปคือ $\Delta E_k = E_{k2} - E_{k1} = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2$

จากความสัมพันธ์ระหว่างงานและพลังงาน เราทราบว่า งานของแรงที่กระทำต่อระบบเท่ากับพลังงานของระบบที่เปลี่ยนไป ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\Delta W = \Delta E_k + \Delta E_p$$

ตอนแรกทำงาน $W_1 = P_1V$

ตอนหลังทำงาน $W_2 = P_2V$

ดังนั้น จะได้

$$\Delta W = (P_1 - P_2)V = (\frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2) + (mgh_2 - mgh_1)$$

เนื่องจาก $V = \frac{m}{\rho}$ แทนค่าในสมการข้างต้นจะได้

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2$$

นั่นคือ $$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g h = \text{ค่าคงตัว} \qquad (9.10)$$

สมการนี้เรียกว่า **สมการของแบร์นูลลี** (Bernoulli's equation) ซึ่งกล่าวว่า **ผลรวมของความดัน พลังงานจลน์ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร และพลังงานศักย์โน้มถ่วงต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ณ ตำแหน่งใด ๆ ภายในท่อที่ของไหลผ่าน มีค่าคงตัวเสมอ**

จากสมการของแบร์นูลลี จะเห็นว่า **ถ้าระดับคงตัวเมื่อของไหลมีอัตราเร็วเพิ่ม ความดันของของไหลจะลด และเมื่อของไหลมีอัตราเร็วลดลง ความดันของของไหลจะเพิ่มขึ้น** ข้อสรุปนี้เรียกว่า **หลักของแบร์นูลลี** (Bernoulli's principle)

Daniel Bernoulli (พ.ศ. 2243 - 2325) นักฟิสิกส์ชาวสวิส เกิดในตระกูลนักคณิตศาสตร์ แต่เขาเป็นสมาชิกคนเดียวของครอบครัวที่สนใจฟิสิกส์ ผลงานสำคัญที่สุดของเขาคือหนังสือชื่อ Hydrodynamica ที่ตีพิมพ์ใน ค.ศ. 1738 ซึ่งกล่าวถึง สมดุล ความดันและอัตราเร็วของของไหล เขาได้แสดงให้เห็นว่า ถ้าระดับการไหลไม่เปลี่ยน เมื่ออัตราเร็วของของไหลเพิ่มขึ้น ความดันของของไหลจะลดลง หนังสือของเขายังได้อธิบายพฤติกรรมของแก๊สเมื่ออุณหภูมิและความดันของแก๊สเปลี่ยนเป็นครั้งแรก อันถือว่าได้เป็นจุดเริ่มต้นของทฤษฎีจลน์ของแก๊ส

รูป 9.38 แบร์นูลลี

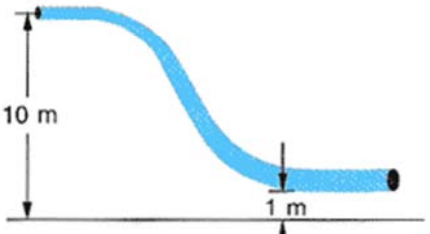
ตัวอย่าง 9.11 สมการของแบร์นูลลี

ท่อน้ำที่ไม่สม่ำเสมอท่อหนึ่ง ท่อตอนบนมีพื้นที่หน้าตัด 4.0 ตารางเซนติเมตร และอยู่สูงจากพื้น 10 เมตร ถ้าน้ำในท่อมีความดัน 1.5×10^5 พาสคัล และไหลด้วยอัตราเร็ว 2 เมตรต่อวินาที ไปยังท่อตอนล่างซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด 8 ตารางเซนติเมตร และอยู่สูงจากพื้น 1 เมตร จงหา

ก. อัตราเร็วของน้ำในท่อตอนล่าง

ข. ความดันของน้ำในท่อตอนล่าง

วิธีทำ จากสถานการณ์ในโจทย์ เขียนแผนภาพได้ ดังรูป 9.39 หาอัตราเร็วของน้ำในท่อตอนล่าง v_2 ได้จากสมการความต่อเนื่อง



รูป 9.39 การไหลของน้ำในท่อ

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

แทนค่าจะได้ $$v_2 = \frac{4.0\times10^{-4}\,\mathrm{m}^2 \times 2.0\ \mathrm{m/s}}{8.0\times10^{-4}\ \mathrm{m}^2}$$

$$= 1.0\ \mathrm{m/s}$$

ก. หาความดันของน้ำในท่อตอนล่าง P_2 จากสมการของแบร์นูลลี

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^{\,2} + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^{\,2} + \rho g h_2$$

ดังนั้น $$P_2 = P_1 + \frac{1}{2}\rho\left(v_1^2 - v_2^2\right) + \rho g\left(h_1 - h_2\right)$$

$$P_2 = (1.5\times10^5\ Pa) + \left[\frac{1}{2}\times10^3\ \mathrm{kg/m^3} \times (4.0\,m/s - 1.0\,m/s)\right]$$

$$+\ (9.8\ \mathrm{m/s^2}\times10^3\ \mathrm{kg/m^3})(10m - 1m)$$

$$P_2 = 2.412\times10^5\ \mathrm{Pa}$$

คำตอบ ก. อัตราเร็วของน้ำในท่อตอนล่างเท่ากับ 1 เมตรต่อวินาที

ข. ความดันของน้ำในท่อตอนล่าง เท่ากับ 2.412×10^5 พาสคัล

9.7.5 การประยุกต์สมการของแบร์นูลลี

สมการของแบร์นูลลีสามารถอธิบายปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของของไหลได้หลายเรื่อง เช่น การหาอัตราเร็วของของเหลวที่พุ่งออกจากรูเล็กๆ การทำงานของเครื่องพ่นสี และการออกแบบปีกเครื่องบิน เป็นต้น

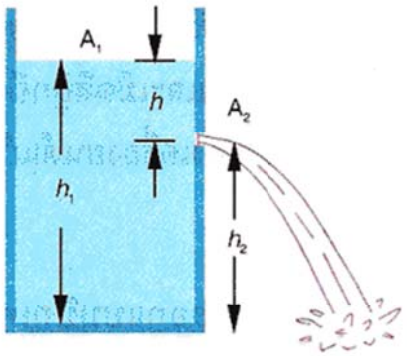
การหาอัตราเร็วของของเหลวที่พุ่งออกจากรูเล็ก ๆ

ตัวอย่าง 9.12 กฎของทอริเชลลี

ถังบรรจุของเหลวมีความหนาแน่น ρ ถ้ามีรูเล็กที่ด้านข้างของถังโดยรูอยู่ต่ำจากระดับผิวของเหลวในถังเป็นระยะ h อัตราเร็วของของเหลวที่พุ่งออกจากรูเป็นเท่าใด กำหนดให้รูที่เจาะมีพื้นที่หน้าตัดน้อยมากเมื่อเทียบกับพื้นที่ผิวของเหลวในถัง

วิธีทำ จากสถานการณ์ที่กำหนด เราจะพิจารณาของเหลวสองบริเวณ คือ ผิวด้านบนซึ่งมีพื้นที่ A_1 และรูด้านข้างซึ่งมีพื้นที่ A_2

กำหนดให้ของเหลวที่ผิวด้านบนมีความดัน P_1 มีอัตราเร็ว v_1 และอยู่สูง h_1 ส่วนของเหลวที่รูด้านข้างมีความดัน P_2 มีอัตราเร็ว v_2 และอยู่สูง h_2 เขียนแผนภาพได้ดังรูป 9.40



รูป 9.40 ของเหลวบรรจุในถังที่มีรูด้านข้าง ของเหลวจะพุ่งออกจากรู

จากสมการของแบร์นูลลี

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^{\,2} + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^{\,2} + \rho g h_2$$

เนื่องจาก $A_2 << A_1$ ระดับของเหลวจะเปลี่ยนน้อยมาก อาจถือได้ว่า ผิวของเหลวอยู่นิ่ง นั่นคือ $v_1 = 0$ และ v_2 เป็นอัตราเร็วของของเหลวขณะพุ่งออกจากรูให้มีค่าเท่ากับ v และเนื่องจากรูอยู่ไม่ต่ำกว่าระดับผิวนัก P_1 และ P_2 จึงต่างประมาณเท่ากับความดันบรรยากาศ P_0 ดังนั้น

$$P_0 + 0 + \rho g h_1 = P_0 + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g h_2$$

$$v^2 = 2g(h_1 - h_2)$$

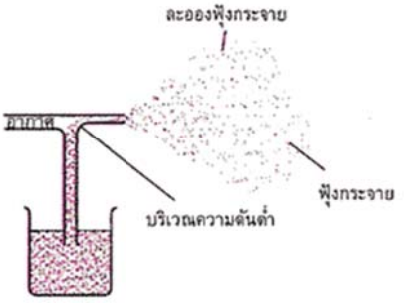
$$v = \sqrt{2gh}$$

คำตอบ อัตราเร็วของของเหลวที่พุ่งออกจากรูด้านข้างถังเท่ากับ $\sqrt{2gh}$

จะเห็นได้ว่า อัตราเร็วของของเหลวที่พุ่งออกจากรูด้านข้างถังเท่ากับอัตราเร็วของวัตถุที่ตกแบบเสรีจากระดับสูง h เท่ากัน และไม่ขึ้นกับชนิดของของเหลว ความสัมพันธ์นี้ทอร์ริเซลลีเป็นผู้ค้นพบ จึงเรียกว่า **กฎของทอร์ริเซลลี** (Torricelli's law)

อุปกรณ์พ่นสี

อุปกรณ์พ่นสีมีส่วนประกอบ ดังรูป 9.41 เมื่ออากาศผ่านท่อไปยังหัวฉีด อัตราเร็วของอากาศที่ผ่านหัวฉีดจะสูงกว่าอัตราเร็วของอากาศที่ผ่านตามท่อ เพราะหัวฉีดมีขนาดเล็กกว่าท่อมาก ดังนั้นความดันของอากาศบริเวณหัวฉีดจึงน้อยมาก สารละลายของสี

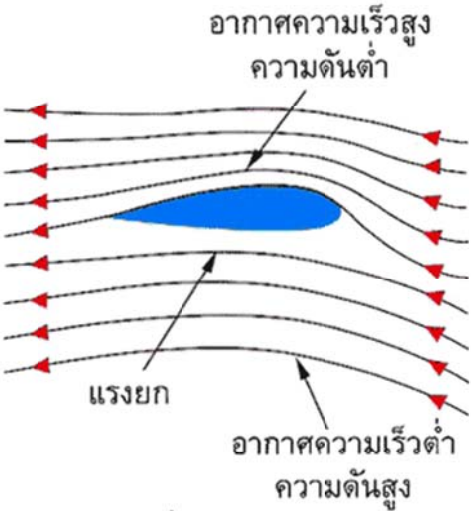


รูป 9.41 อุปกรณ์พ่นสี

ที่อยู่ในกระป๋องซึ่งมีความดันสูงกว่า จึงเคลื่อนที่ผ่านตามท่อไปผสมกับอากาศที่บริเวณหัวฉีด ทำให้ทั้งอากาศและเม็ดสีถูกฉีดและกระจายออกทางหัวฉีดด้วยอัตราเร็วสูง การทำงานของคาร์บูเรเตอร์ของเครื่องยนต์แก๊สโซลีนหรือขวดสเปรย์น้ำหอมก็อาศัยหลักการเดียวกันนี้

ปีกเครื่องบิน

วิศวกรออกแบบปีกเครื่องบินทำงานออกแบบโดยอาศัยสมการของแบร์นูลลี โดยออกแบบให้ด้านบนของปีกมีความโค้งมากกว่าด้านล่าง ดังรูป 9.42 เมื่อเครื่องบินบิน อากาศที่บริเวณผิวปีกด้านบนต้องเคลื่อนที่ได้ระยะทางไกลกว่าอากาศที่บริเวณผิวปีกด้านล่าง ดังนั้นอัตราเร็วของอากาศที่บริเวณผิวปีกด้านบนจะสูงกว่าอัตราเร็วของอากาศที่ผิวปีกด้านล่าง ทำให้ความดันของอากาศที่ผิวปีกด้านล่างมากกว่าที่ผิวปีกด้านบน จึงเป็นผลให้เกิดแรงยกขึ้นกระทำที่ปีกเครื่องบิน เครื่องบินจึงสามารถบินขึ้นได้



รูป 9.42 ปีกเครื่องบินแสดงการไหลของอากาศผ่านปีกเครื่องบินที่ได้รับการออกแบบให้เกิดแรงยกตัว

การทดลองและกิจกรรม

การทดลอง 9.1 ความดันในของเหลว

จุดประสงค์

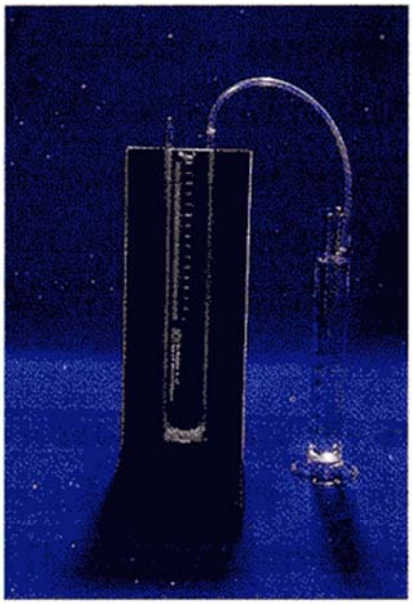
ตอนที่ 1 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความดันและความลึกในของเหลว เมื่อความหนาแน่นของของเหลวมีค่าคงตัว

ตอนที่ 2 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความดันและความหนาแน่นของของเหลว เมื่อความลึกมีค่าคงตัว

อุปกรณ์ แมนอมิเตอร์ ของเหลวหลายชนิด ได้แก่ น้ำ น้ำเกลือและกลีเซอรอล

วิธีทดลอง ตอนที่ 1

จุ่มหลอดแก้ววัดความดันของแมนอมิเตอร์ลงในกระบอกตวงที่มีน้ำ เลื่อนหลอดแก้วให้ระดับน้ำในหลอดแก้วมีความลึก h ต่างๆ แต่ละครั้งบันทึกความดัน นำข้อมูลมาเขียนกราฟระหว่างความดัน P และความลึก h ในของเหลว



รูป 9.43 การวัดความดันในของเหลวโดยใช้แมนอมิเตอร์

วิธีทดลอง ตอนที่ 2

วัดความดันของน้ำ น้ำเกลือและกลีเซอรอล ที่ระดับความลึก h เดียวกัน แต่ละครั้งบันทึกความดัน นำข้อมูลมาเขียนกราฟระหว่างความดัน P และความหนาแน่น ρ

- ☐ กราฟที่ได้จากตอนที่ 1 ความดัน P และความลึก h มีความสัมพันธ์หรือไม่อย่างไร
- ☐ กราฟที่ได้จากตอนที่ 2 ความดัน P และความหนาแน่น ρ มีความสัมพันธ์หรือไม่อย่างไร

การทดลอง 9.2 แรงลอยตัว

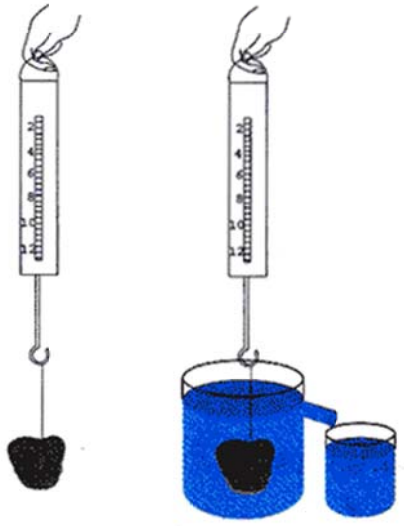
จุดประสงค์ เพื่อศึกษาแรงลอยตัวที่กระทำต่อวัตถุที่อยู่ในของเหลว

อุปกรณ์ เครื่องชั่งสปริง ถ้วยยูเรกา บีกเกอร์ กระบอกตวง วัตถุต่างๆ

วิธีทดลอง

ชั่งน้ำหนักวัตถุในอากาศ แล้วนำวัตถุไปชั่งน้ำหนักในน้ำที่บรรจุในถ้วยยูเรกาที่มีน้ำถึงขอบพวย รองรับน้ำที่ล้นออกมาด้วยบีกเกอร์หรือกระบอกตวง

- ☐ น้ำหนักวัตถุในอากาศและน้ำหนักวัตถุในน้ำเท่ากันหรือไม่ อย่างไร
- ☐ น้ำที่ล้นออกมาหรือน้ำที่ถูกวัตถุแทนที่มีปริมาตรเท่าใด น้ำจำนวนนี้มีน้ำหนักเท่าใด
- ☐ น้ำหนักของน้ำที่ล้นออกมาเท่ากับน้ำหนักวัตถุที่หายไปหรือไม่
- ☐ ทดลองกับวัตถุอื่น เช่น ไม้ ผลที่ได้เป็นอย่างไร



รูป 9.44 การวัดน้ำหนักวัตถุในอากาศและในน้ำโดยใช้เครื่องชั่งสปริง

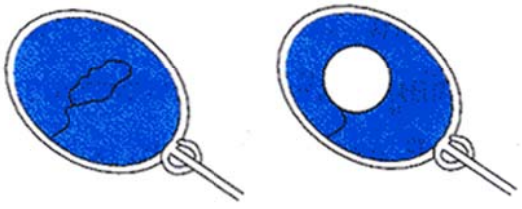
กิจกรรม 9.1 แรงดึงผิวของของเหลว

จุดประสงค์ เพื่อศึกษาแรงดึงผิวของของเหลวบางชนิด

อุปกรณ์ อุปกรณ์ประกอบด้วยเส้นลวดดัดเป็นห่วงรูปวงกลม น้ำสบู่และเส้นด้าย

วิธีทดลอง

จุ่มโครงลวดโลหะในน้ำสบู่ ดึงโครงลวดขึ้นจากน้ำสบู่ให้ฟิล์มน้ำสบู่ติดขึ้นมากับโครงลวด นำด้ายซึ่งผูกเป็นห่วงวางบนฟิล์มน้ำสบู่ โดยให้ปลายด้ายพาดกับโครงลวด ดังรูป 9.45 ใช้เข็มหรือวัตถุปลายแหลมเจาะฟิล์มน้ำสบู่ในห่วงด้าย



รูป 9.45 แรงดึงผิวของฟิล์มน้ำสบู่

- ☐ รูปร่างของห่วงด้าย ก่อนและหลังที่ฟิล์มน้ำสบู่ภายในห่วงถูกเจาะ เหมือนหรือต่างกันอย่างไร
- ☐ จากผลที่เกิดขึ้น จะบอกทิศของแรงที่ฟิล์มน้ำสบู่กระทำต่อห่วงด้ายได้หรือไม่ อย่างไร

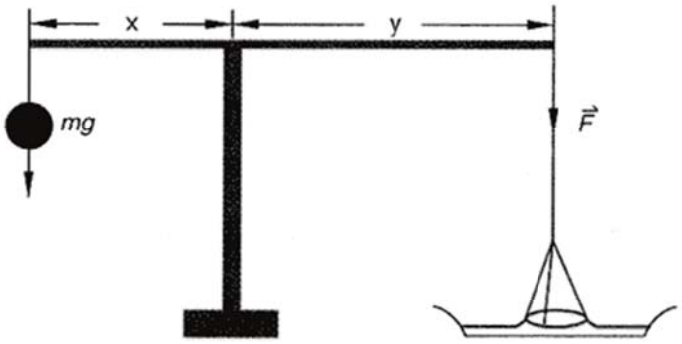
การทดลอง 9.3 ความตึงผิวของของเหลว

จุดประสงค์ เพื่อศึกษาความตึงผิวของของเหลวบางชนิด

อุปกรณ์ อุปกรณ์ประกอบด้วยเครื่องชั่งอย่างง่าย ซึ่งอาจทำจากไม้เมตรหรือท่อโลหะที่สม่ำเสมอ ทำเป็นคานคล้ายเครื่องชั่งโบราณ ใช้ลวดอะลูมิเนียมขดเป็นวงแล้วผูกด้ายสำหรับแขวน หรือใช้อุปกรณ์สำเร็จ (ชุดทดลองวัดความตึงผิวของของเหลว)

วิธีทดลอง

1. จัดอุปกรณ์ทดลองให้คานสมดุลและห่วงวงกลมแตะผิวน้ำพอดี ดังรูป



รูป 9.46 ชุดทดลองวัดความตึงผิวของของเหลว

2. ใส่ชิ้นโลหะขนาดต่างๆ ลงที่ห่วงสำหรับแขวนทีละอัน จนกระทั่งห่วงวงกลมหลุดจากผิวน้ำ
3. ใช้หลักของโมเมนต์ หาน้ำหนักรวมของชิ้นโลหะซึ่งเป็นแรงที่ทำให้ห่วงวงกลมหลุดจากผิวน้ำ แรงนี้คือ แรงดึงผิว F ของน้ำ
4. คำนวณหาความตึงผิว γ ของน้ำจากอัตราส่วนระหว่างแรงดึงผิวกับความยาวทั้งหมดของเส้นผิวของน้ำที่ขาด หรือ $\frac{F}{L}$ (L เป็นสองเท่าของความยาวเส้นรอบวง)
5. ทดลองข้อ 1-4 ซ้ำ แล้วหาความตึงผิวเฉลี่ย
6. เปลี่ยนของเหลวเป็นของเหลวอื่น เช่น น้ำเกลือ แล้วทดลองข้อ 1-5 ซ้ำ

- ☐ ก่อนที่ห่วงวงกลมจะหลุดออกจากผิวของเหลว จะมีผิวของเหลวติดห่วงวงกลมขึ้นมาที่ผิว
- ☐ อัตราส่วน $\frac{F}{L}$ สำหรับของเหลวชนิดเดียวกัน มีค่าแตกต่างกันหรือไม่
- ☐ อัตราส่วน $\frac{F}{L}$ สำหรับของเหลวต่างชนิดกัน มีค่าแตกต่างกันหรือไม่

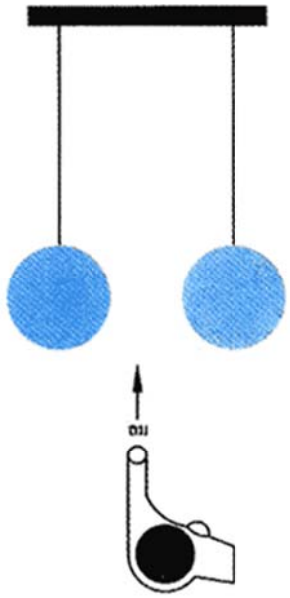
กิจกรรม 9.2 หลักของแบร์นูลลี

จุดประสงค์ เพื่อตรวจสอบหลักของแบร์นูลลี

อุปกรณ์ ลูกปิงปอง
ที่เป่าผม
เชือกเส้นเล็ก หรือด้าย เทปเหนียว

วิธีทดลอง ใช้เทปเหนียวติดด้ายกับลูกปิงปอง แล้วนำไปแขวน ดังรูป 9.47 จากนั้นเตรียมใช้ที่เป่าผมเป่าไปบริเวณระหว่างลูกปิงปองทั้งสอง

- ☐ ก่อนทำการเป่าให้ถามผู้เรียนก่อนว่า ลูกปิงปองทั้งสองจะเคลื่อนที่อย่างไร และให้เหตุผลว่าเป็นเพราะเหตุใด
- ☐ เมื่อเป่าแล้วถามผู้เรียนว่า เพราะเหตุใดลูกปิงปองทั้งสองจึงเคลื่อนที่เช่นนั้น



รูปที่ 9.47 การสาธิตหลักของแบร์นูลลี

โจทย์แบบฝึกหัดบทที่ 9

คำถาม

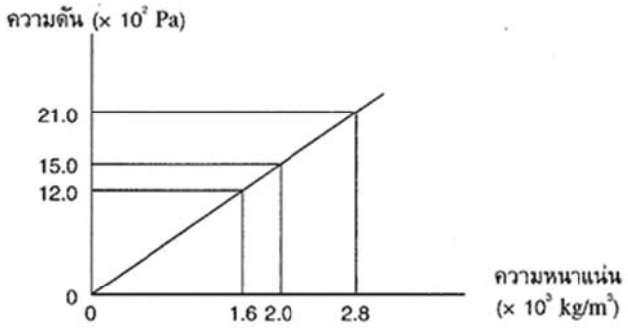
1. น้ำมีความหนาแน่น 1000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร หมายความว่าอย่างไร
2. ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของตะกั่วเท่ากับ 11.3 หมายความว่าอย่างไร
3. การเปลี่ยนอุณหภูมิของของเหลว จะมีผลต่อความดันในของเหลวหรือไม่ อย่างไร
4. นำปลายข้างหนึ่งของหลอดดูดชนิดใสไปจุ่มในน้ำ ใช้นิ้วปิดปลายบน แล้วยกหลอดให้พ้นผิวน้ำและวางตัวในแนวดิ่ง จะเห็นว่าในหลอดมีลำน้ำอยู่ด้านล่างและลำอากาศอยู่ตอนบน อากาศที่อยู่ระหว่างนิ้วและผิวน้ำในหลอดจะมีความดันมากกว่า เท่ากับหรือน้อยกว่าความดันบรรยากาศ (ลองทำดู)
5. จงอธิบายการทำงานของหลอดฉีดยาขณะดูดของเหลวเข้าไปในหลอด
6. เพราะเหตุใด จึงนิยมใช้ปรอทบรรจุในหลอดแก้วของแบรอมิเตอร์แทนที่จะใช้น้ำ
7. การวัดความดันโลหิต ผู้ถูกวัดต้องนอนในแนวราบและแขนต้องอยู่ในแนวขนานกับลำตัว หรือถ้าอยู่ในท่านั่ง แพทย์ต้องพันถุงอากาศรอบแขนในระดับเดียวกับหัวใจ เพราะเหตุใด
8. ในการใช้เครื่องชั่งสปริงชั่งวัตถุ เหตุใดในขณะที่ชั่งวัตถุขณะอยู่ในของเหลว เครื่องชั่งจึงอ่านค่าได้น้อยกว่าเมื่อชั่งวัตถุนั้นในอากาศ
9. ตามปกติเหล็กจมน้ำ แต่เหตุใด เรือที่ทำด้วยเหล็กจึงสามารถลอยน้ำได้
10. จะมีวิธีการหาความหนาแน่นวัตถุที่เบา เช่น โฟม ได้อย่างไร (ลองทำดู)
11. เพราะเหตุใด บอลลูนตรวจอากาศที่บรรจุแก๊สฮีเลียม จึงบรรจุแก๊สเพียงร้อยละ 10 ถึง 20 ของปริมาตรทั้งหมดของบอลลูน
12. ตะกั่วมีความหนาแน่นมากกว่าเหล็ก แต่ทั้งตะกั่วและเหล็กต่างก็มีความหนาแน่นมากกว่าน้ำ ถ้านำตะกั่วและเหล็กที่มีปริมาตรเท่ากันไปวางในน้ำ แรงลอยตัวของน้ำที่กระทำต่อตะกั่วจะมากกว่า เท่ากับหรือน้อยกว่าแรงลอยตัวของน้ำที่กระทำต่อเหล็ก
13. ยกตัวอย่างปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับความตึงผิว
14. ลูกกลมโลหะที่มีลักษณะเหมือนกันตกในของเหลวที่มีความหนืดต่างกัน ความเร็วปลายของลูกกลมโลหะทั้งสองจะต่างกันหรือไม่
15. ลูกกลมเหล็กที่มีขนาดเท่ากันสองลูก ถูกปล่อยพร้อมกันลงในหลอดบรรจุน้ำที่มีอุณหภูมิ 10 และ 20 องศาเซลเซียส ลูกกลมเหล็กในหลอดใดถึงก้นหลอดก่อน

16. เด็กๆ มักถูกผู้ใหญ่เตือนว่า ห้ามยืนใกล้รถไฟหรือรถบรรทุกที่กำลังเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วสูงเพราะจะถูกผลักเข้าหารถ หรือห้ามยืนใกล้หน้าผาที่มีลมพัดแรงเพราะจะตกหน้าผา ข้อห้ามเหล่านี้เป็นไปได้หรือไม่ เพราะเหตุใด
17. ขณะเกิดพายุ บางครั้งหลังคาบ้านถูกพายุพัดปลิวหลุด เพราะเหตุใด
18. วางเหรียญ 50 สตางค์ ห่างจากขอบแก้วที่วางตะแคงประมาณ 3 - 5 เซนติเมตร ออกแรงเป่าผ่านด้านบนของเหรียญ เหรียญจะเคลื่อนไปตกในแก้วได้ เพราะเหตุใด (ลองทำดู)

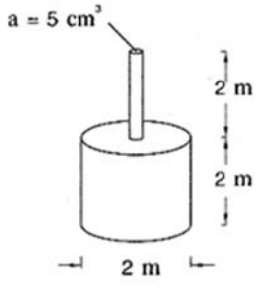
ปัญหา

กำหนดให้ ความหนาแน่นของน้ำ = 10^3 kg/m^3
ความหนาแน่นของน้ำทะเล = 1.025×10^3 kg/m^3
ความหนาแน่นของปรอท = 13.6×10^3 kg/m^3
ความดันบรรยากาศ P_0 = 1.013×10^5 Pa
ความเร่งโน้มถ่วง g = 9.8 m/s^2

1. ดาวนิวตรอนเป็นดาวที่มีขนาดเล็ก แต่มีความหนาแน่นมาก ถ้าดาวนิวตรอนมีรัศมี 10 กิโลเมตร แต่มีมวลเท่ากับดวงอาทิตย์ คือ 1.99×10^{30} กิโลกรัม ความหนาแน่นของดาวนิวตรอนเป็นเท่าใด
2. ไม้บัลซาที่มีปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร และมีความหนาแน่นสัมพัทธ์ 0.15 จะมีน้ำหนักเท่าใด
3. เรือดำน้ำลำหนึ่งได้รับการออกแบบให้ทนความดันจากภายนอกได้ไม่เกิน 10^6 พาสคัล เรือดำน้ำลำนี้จะสามารถดำน้ำทะเลได้ลึกมากที่สุดเท่าใด
4. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับความหนาแน่นของของเหลวสามชนิด (ถ้าความลึกคงตัว) เป็นดังรูป ความลึกที่คงตัวนั้นมีค่าเท่าใด ตอบในหน่วยเซนติเมตร

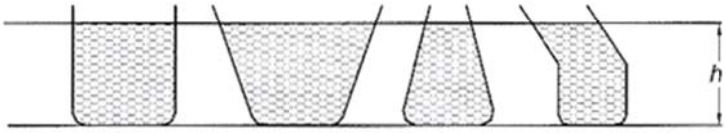


รูปสำหรับข้อ 4



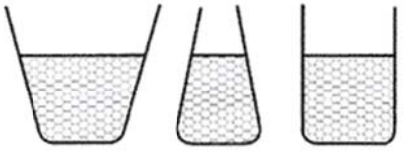
รูปสำหรับข้อ 5

5. ภาชนะรูปทรงกระบอกรัศมี 1 เมตร สูง 2 เมตร มีท่อทรงกระบอกเล็กๆ สูง 2 เมตร พื้นที่หน้าตัด 5 ตารางเซนติเมตร ติดแน่นตอนบน ดังรูป ภาชนะนี้บรรจุน้ำเต็ม จงคำนวณหาแรงดันของน้ำที่กระทำต่อก้นภาชนะและน้ำหนักของน้ำที่บรรจุในภาชนะนี้ คำตอบทั้งสองนี้เท่ากันหรือไม่ เพราะเหตุใด
6. จากรูป ภาชนะทั้งสี่บรรจุของเหลวชนิดเดียวกัน ที่ระดับสูง h เท่ากัน ข้อความต่อไปนี้ข้อใดถูก
   1. ความดันเกจที่ก้นภาชนะทุกใบเท่ากัน
   2. ความดันสัมบูรณ์ที่ด้านข้างภาชนะทุกใบเท่ากัน
   3. ความดันสัมบูรณ์ที่ด้านข้างภาชนะเป็นครึ่งหนึ่งของความดันสัมบูรณ์ที่ก้นภาชนะ



รูปสำหรับข้อ 6

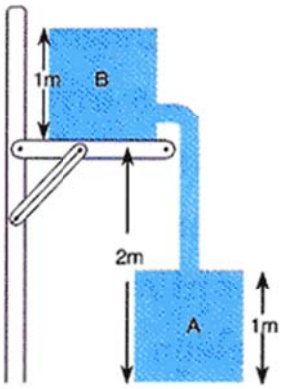
7. ภาชนะทั้งสามมีระดับน้ำสูงเท่ากันและพื้นที่ก้นเท่ากัน ดังรูป จงตอบคำถามต่อไปนี้
   ก. แรงที่น้ำกระทำต่อก้นภาชนะทั้งสาม เนื่องจากความดันของน้ำเท่ากันหรือไม่
   ข. น้ำในภาชนะทั้งสาม เมื่อนำไปชั่ง จะมีน้ำหนักเท่ากันหรือไม่
   ค. เหตุใดคำตอบที่ได้ในข้อ ก. และ ข.จึงไม่เท่ากัน



รูปสำหรับข้อ 7

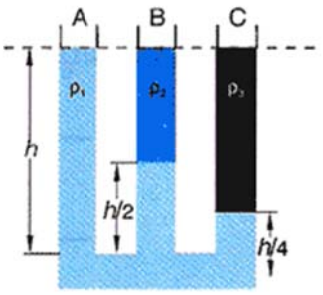
8. ที่ระดับความลึกจากผิวน้ำทะเลเท่าใด ความดันสัมบูรณ์จึงมีค่าเท่ากับสองเท่าความดันบรรยากาศ
9. ถังรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ที่มีความยาวด้านละ 2 เมตร เมื่อบรรจุน้ำเต็มจะมีความดันที่ก้นถังเป็นเท่าใด และความดันเฉลี่ยที่ด้านข้างของถังจะเป็นเท่าใด
10. ถังรูปลูกบาศก์มีความยาวด้านละ 1 เมตร บรรจุน้ำเกลือที่มีความหนาแน่น 1.03×10^3 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จงหา
    ก. แรงเนื่องจากความดันสัมบูรณ์ที่น้ำเกลือกระทำที่ก้นถัง
    ข. แรงเฉลี่ยเนื่องจากความดันสัมบูรณ์ที่น้ำเกลือกระทำที่ด้านข้างของถังหนึ่งด้าน

11. ถัง A และ B มีท่อต่อถึงกันและบรรจุน้ำเต็ม ดังรูป ถ้าถังทั้งสองเป็นรูปลูกบาศก์ที่ด้านมีความยาว 1 เมตร จงหา
    ก. ความดันสัมบูรณ์ที่กันถัง B
    ข. แรงเนื่องจากความดันสัมบูรณ์ที่กระทำต่อก้นถัง A
    ค. แรงเฉลี่ยเนื่องจากความดันสัมบูรณ์ที่ด้านข้างหนึ่งด้านของถัง A



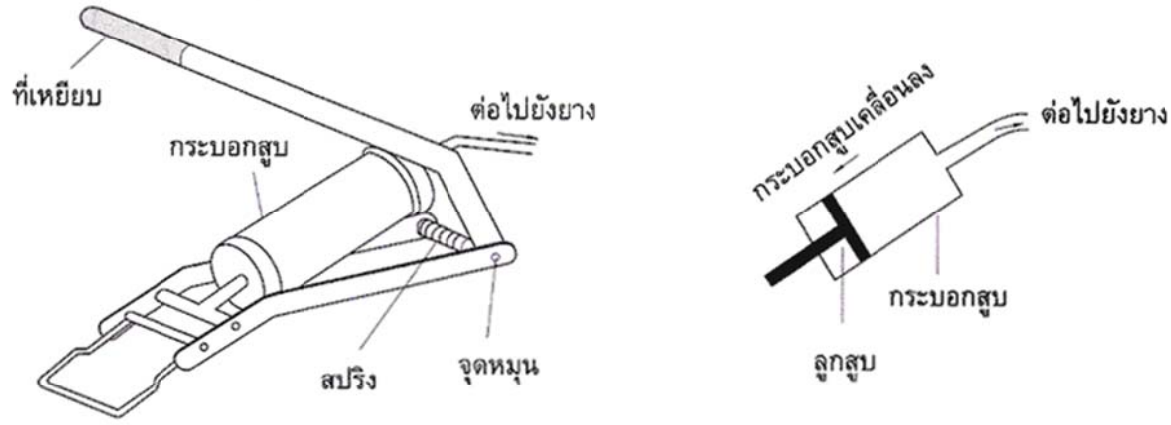
รูปสำหรับข้อ 11

12. ของเหลว A ,B และ C มีความหนาแน่น ρ_1 , ρ_2 และ ρ_3 ตามลำดับ บรรจุในภาชนะที่มีท่อต่อถึงกัน ดังรูป ถ้า h, $\frac{h}{2}$ และ $\frac{h}{4}$ เป็นความสูงของของเหลว A ในท่อทั้งสาม จงพิสูจน์ว่า $\rho_1 = \rho_2 = \rho_3$



รูปสำหรับข้อ 12

13. เครื่องสูบรถจักรยานแบบเท้ากด ประกอบด้วย กระบอกสูบ ลูกสูบและที่เหยียบ เมื่อออกแรงกดที่เหยียบ กระบอกสูบจะเคลื่อนที่เข้าหาลูกสูบ ดันอากาศในกระบอกสูบให้ผ่านตามสายยางที่ต่อกับยางรถ



รูปสำหรับข้อ 13

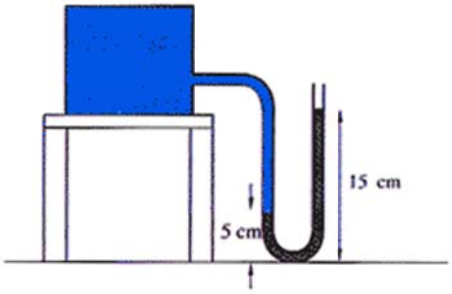
ก. ถ้าลูกสูบมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 25 ตารางเซนติเมตร และแรงที่กระทำต่อกระบอกสูบเท่ากับ 800 นิวตัน จงแสดงว่า ความดันที่ลูกสูบเท่ากับ 320 กิโลพาสคัล

ข. ถ้านำเครื่องสูบนี้ไปสูบยางรถยนต์สี่ล้อที่มีมวล 600 กิโลกรัม จนยางแต่ละเส้นมีความดันเกจ 200 กิโลพาสคัล พื้นที่ของยางแต่ละเส้นที่สัมผัสถนน เป็นเท่าใด

14. แมนอมิเตอร์เครื่องหนึ่งมีระดับปรอทในขาทั้งสองข้างอยู่ที่ขีด 0 ของสเกล ถ้าระยะระหว่างขีดของสเกลเท่ากับ 1 มิลลิเมตร แต่ละขีดที่อยู่เหนือขีด 0 ขึ้นไป อ่านความดันเท่าใดบ้าง

15. ถ้าแบรอมอเตอร์บนเครื่องบินอ่านความดันได้ 8.8×10^4 พาสคัล เครื่องบินอยู่สูงจากระดับน้ำทะเลเท่าใด กำหนดให้ ความหนาแน่นเฉลี่ยของอากาศเท่ากับ 1.2 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

16. ขาข้างหนึ่งของแมนอมิเตอร์ที่มีปรอทบรรจุอยู่ ถูกต่อเข้ากับถังสี่เหลี่ยมที่บรรจุแก๊สชนิดหนึ่งปรากฏว่าระดับปรอทในขาทั้งสองข้างสูง 5 เซนติเมตร และ 15 เซนติเมตร ดังรูป ถ้าความดันของอากาศขณะนั้นเท่ากับ 10^5 พาสคัล แก๊สในถังมีความดันเท่าใด



รูปสำหรับข้อ 16

17. ลูกสูบเล็กของเครื่องวัดไฮดรอลิกมีพื้นที่หน้าตัด 25 ตารางเซนติเมตรและลูกสูบใหญ่มีพื้นที่หน้าตัด 800 ตารางเซนติเมตร ถ้ามีมวล 6000 กิโลกรัม วางกดอยู่ในเครื่องอัดไฮดรอลิกซึ่งมีน้ำมันที่มีความหนาแน่น 780 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ถ้าเครื่องอัดไฮดรอลิก อยู่ในสมดุล โดยระดับน้ำมันในลูกสูบเล็กอยู่สูงกว่าระดับน้ำมันในลูกสูบใหญ่ 80 เซนติเมตร แรงที่กดบนลูกสูบเล็กมีค่าเท่าใด

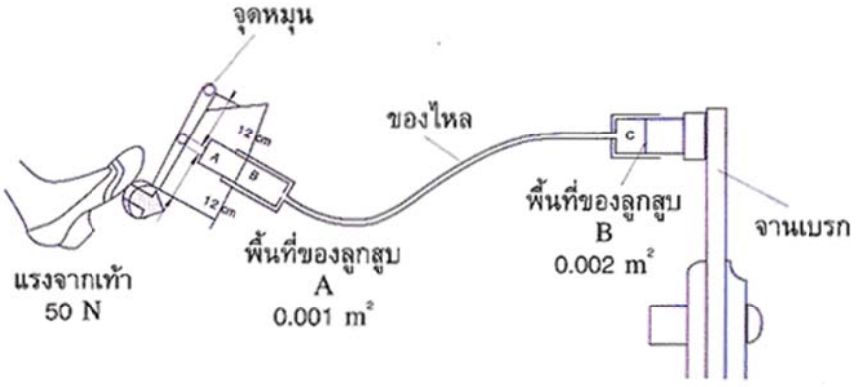
18. รูปแสดงระบบเบรกไฮดรอลิกของรถยนต์โดยอาศัยข้อมูลในรูป ตอบคำถามต่อไปนี้

ก. แรงที่กระทำต่อลูกสูบ A ข. ความดันในของเหลวที่ B

ค. ความดันในของเหลวที่ C ง. แรงที่กระทำต่อจานเบรก

แรงที่กระทำต่อจานเบรกในข้อ ง. จะมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าเดิม ถ้า

จ. จุด O อยู่ใกล้จุดหมุนมากกว่าเดิม ฉ. พื้นที่ของลูกสูบ A ลดลง



รูปสำหรับข้อ 18

19. เรือลำหนึ่งมีมวล 4000 กิโลกรัม ลอยในน้ำที่มีความหนาแน่น 1.0×10^3 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จงหา
    ก. ปริมาตรของเรือส่วนที่จมอยู่ใต้ผิวน้ำ
    ข. แรงลอยตัวของน้ำที่กระทำต่อเรือ
20. นำเหล็กรูปลูกบาศก์ปริมาตร 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร ไปหย่อนในน้ำและน้ำมันที่มีความหนาแน่น 1000 และ 800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ แรงลอยตัวที่กระทำต่อเหล็กในกรณีทั้งสองเป็นเท่าใด
21. แขวนก้อนอะลูมิเนียมที่มีมวล 1 กิโลกรัม และความหนาแน่น 2.7×10^3 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยเชือก จากนั้นนำไปแช่น้ำ แรงดึงในเชือกก่อนและหลังแช่น้ำเป็นเท่าใด
22. นำไม้รูปลูกบาศก์มีความยาวด้านละ 0.5 เมตร มีความหนาแน่น 800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ไปลอยน้ำที่มีความหนาแน่น 1000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
    ก. ไม้จมน้ำลึกเท่าใด
    ข. จะต้องใช้แรงเท่าใดกดที่แท่งไม้ เพื่อให้ไม่จมมิดน้ำพอดี
23. นำวัตถุรูปลูกบาศก์ไปวางในของเหลว พบว่าปริมาตรบางส่วนของวัตถุอยู่เหนือผิวของเหลว ถ้าให้ ρ_o เป็นความหนาแน่นของวัตถุ
    ρ_f เป็นความหนาแน่นของของเหลว
    V_o เป็นปริมาตรของวัตถุ
    V_f เป็นปริมาตรของของเหลวที่ถูกแทนที่
    ก. จงพิสูจน์ว่า $\frac{\rho_o}{\rho_f} = \frac{V_f}{V_0}$ และปริมาตรวัตถุส่วนที่อยู่เหนือผิวของเหลว = $\left(1 - \frac{\rho_o}{\rho_f}\right)V_0$
    ข. ถ้าวัตถุเป็นน้ำแข็งและของเหลวเป็นน้ำที่มีความหนาแน่น 917 และ 1000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ปริมาตรส่วนที่จมและลอยคิดเป็นร้อยละเท่าใด
    ค. ภูเขาน้ำแข็งลูกหนึ่งลอยในน้ำทะเลที่มีความหนาแน่น 1024 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ปริมาตรของภูเขาน้ำแข็งส่วนที่จมใต้ผิวน้ำคิดเป็นร้อยละเท่าใด
24. ในการทดลองวัดความตึงผิวของของเหลวชนิดหนึ่ง โดยใช้เครื่องมือเดียวกับที่ใช้ในการทดลอง 9.3 ถ้าห่วงวงกลมมีรัศมี 10 เซนติเมตร พบว่าจะต้องเพิ่มมวล 139.5 กรัม ที่ห่วงสำหรับแขวนน้ำหนัก จึงทำให้ห่วงวงกลมหลุดจากผิวของเหลวพอดี จงหาความตึงผิวของของเหลวนี้

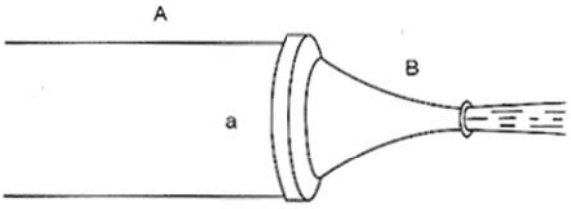
25. ลวดวงกลมมวล m มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน d_1 และมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก d_2 ห้อยอยู่ในแนวราบโดยวงกลมแตะผิวของเหลว แรงที่ใช้ดึงลวดวงกลมให้หลุดจากผิวของเหลวพอดีมีค่าเท่าใด กำหนดให้ความตึงผิวของของเหลวเท่ากับ γ
26. แผ่นโลหะรูปวงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลางยาว 10 เซนติเมตร กำลังแตะผิวน้ำพอดี จงหาแรงที่ดึงแผ่นโลหะนี้ให้หลุดจากผิวน้ำพอดี เมื่อแผ่นโลหะมีมวล 25 กรัม กำหนดให้ความตึงผิวของน้ำเท่ากับ 7.0×10^{-2} นิวตันต่อเมตร
27. ในการปล่อยลูกกลมโลหะลงในของเหลวสองชนิด แล้วหาอัตราเร็วของลูกกลมโลหะที่ทุกระยะ 5 เซนติเมตร จะได้ข้อมูลดังตาราง จากข้อมูล ของเหลวชนิดใดมีความหนืดมากกว่า

ตารางข้อมูลของโจทย์แบบฝึกหัดข้อ 27

ระดับความลึก (cm)	อัตราเร็ว (cm/s)	
	ของเหลวชนิดที่ 1	ของเหลวชนิดที่ 2
0	0	0
5	5	4
10	7	6
15	8	7
20	8.5	7
25	8.5	7
30	8.5	7

28. ลูกกลมเหล็กรัศมี 1 มิลลิเมตร ตกในน้ำเชื่อม ความเร็วสุดท้ายของลูกกลมเหล็กมีค่าเท่าใด กำหนดให้ลูกกลมเหล็กและน้ำเชื่อมมีความหนาแน่น 7800 และ1600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ และน้ำเชื่อมมีความหนืด 100 มิลลิพาสคัล วินาที
29. หยดน้ำมันมีรัศมี 0.1 มิลลิเมตร ตกในอากาศจนมีความเร็วสุดท้าย จงหาแรงหนืดที่อากาศกระทำต่อหยดน้ำมัน และความเร็วสุดท้ายของหยดน้ำมัน กำหนดให้ น้ำมันมีความหนาแน่น 850 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และอากาศมีความหนืด 18 ไมโครพาสคัล วินาที
30. หยดน้ำฝนรูปทรงกลมขนาดเท่ากันสองหยดตกในอากาศ ด้วยความเร็วสุดท้าย v เท่ากัน ถ้าหยดน้ำทั้งสองรวมกันเป็นหยดเดียว ความเร็วสุดท้ายจะเป็นเท่าใดตอบในเทอมของ v
31. ถ้าน้ำในท่อประปาที่ไหลผ่านมาตรวัดเข้าบ้านมีอัตราการไหล 40 ลิตรต่อนาที จงหาอัตราเร็วของน้ำในท่อประปาเมื่อไหลผ่านท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร

32. ท่อ M มีพื้นที่ตัดขวาง 3.0×10^{-3} ตารางเมตร ต่อกับท่อ N ที่มีพื้นที่ตัดขวาง 1.0×10^{-3} ตารางเมตร ให้ท่อทั้งสองวางตัวในแนวราบ ถ้าน้ำไหลเข้าท่อ M ด้วยอัตราเร็ว 0.3 เมตรต่อวินาที จงหา
ก. อัตราการไหลของน้ำในท่อทั้งสอง ข. อัตราเร็วของน้ำในท่อ N
33. เครื่องบินลำหนึ่งต้องมีแรงยก 900 นิวตันต่อตารางเมตร จึงจะสามารถบินขึ้นได้ ถ้าอัตราเร็วของอากาศที่ผ่านส่วนล่างของปีกเท่ากับ 100 เมตรต่อวินาที จงหาอัตราเร็วของอากาศที่ผ่านส่วนบนของปีก เพื่อให้เกิดแรงยก 900 นิวตันต่อตารางเมตร กำหนดให้ความหนาแน่นของอากาศขณะนั้นเท่ากับ 1.2 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
34. อัตราเร็วของพายุที่พัดเหนือหลังคาบ้านหลังหนึ่งเท่ากับ 30 เมตรต่อวินาที ผลต่างระหว่างความดันอากาศเหนือหลังคาบ้านและใต้หลังคาบ้านเป็นเท่าใด และถ้าหลังคาบ้านนี้มีพื้นที่ 175 ตารางเมตร แรงยกที่กระทำต่อหลังคาบ้านเป็นเท่าใด กำหนดให้ความหนาแน่นของอากาศขณะนั้นเท่ากับ 1.3 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
35. ท่อยาววางตัวในแนวราบ มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 เซนติเมตร บริเวณกลางของความยาวท่อมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ถ้าอัตราการไหลของน้ำในท่อเท่ากับ 0.1 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ความแตกต่างของความดันในของน้ำในท่อใหญ่และท่อเล็กเป็นเท่าใด
36. ถ้าน้ำพุ่งออกจากปลายท่อน้ำดับเพลิงด้วยอัตราเร็ว 20 เมตรต่อวินาที ดังรูป ความดันที่จุด a ซึ่งอยู่ห่างจากปลายท่อเล็กน้อยมีค่าเท่าใด กำหนดให้เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ A และ B เท่ากับ 8 เซนติเมตร และ 4 เซนติเมตร ตามลำดับ



รูปสำหรับข้อ 36

37. ถังน้ำมันขนาดใหญ่มีรูรั่วที่ระยะลึก 10 เมตร จากผิวน้ำมัน ถ้าถังน้ำมันปิดสนิทและความดันที่ผิวน้ำมันเท่ากับ 3.0×10^{5} พาสคัล จงหาอัตราเร็วของน้ำมันที่พุ่งออกจากถัง กำหนดให้ความหนาแน่นของน้ำมันเท่ากับ 600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

บทที่ 10
ความร้อน

ความร้อนเป็นพลังงานรูปหนึ่งซึ่งสามารถถ่ายโอนจากแหล่งที่มีอุณหภูมิสูงไปยังแหล่งที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าได้ พลังงานความร้อนอาจเปลี่ยนมาจากพลังงานรูปอื่น และในทางกลับกันพลังงานความร้อนสามารถเปลี่ยนไปเป็นพลังงานรูปอื่นได้ ในบทนี้จะกล่าวถึงหน่วยของพลังงานความร้อน ระดับความร้อน การเปลี่ยนสถานะและความร้อนแฝง รวมทั้งจะกล่าวถึงการทดลองและเครื่องมือที่เกี่ยวข้อง เช่น การวัดความร้อนจำเพาะของสารโดยแคลอริมิเตอร์ เป็นต้น นอกจากนี้จะกล่าวถึงแก๊สและกฎของแก๊สอย่างละเอียด

จากการศึกษากฎของแก๊สอุดมคติ พบว่าสำหรับแก๊สปริมาณหนึ่ง ความดันจะขึ้นกับปริมาตรและอุณหภูมิ และนับตั้งแต่นักวิทยาศาสตร์มีทฤษฎีอะตอม หลายคนได้เสนอความคิดเรื่องทฤษฎีจลน์ของแก๊สว่า แก๊สประกอบด้วยอนุภาคเล็กๆ ที่เคลื่อนที่ในทิศทางต่างๆกันด้วยความเร็วสูง เมื่ออนุภาคชนผนังจะทำให้เกิดความดัน การใช้ทฤษฎีจลน์ของแก๊สร่วมกับกลศาสตร์ของนิวตัน เพื่อวิเคราะห์สาเหตุที่แก๊สมีความดัน จนในที่สุด นอกจากจะสามารถพิสูจน์กฎของแก๊สอุดมคติได้แล้วยังสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์ของโมเลกุลของแก๊สและอุณหภูมิได้ด้วย

การศึกษากระบวนการเปลี่ยนแปลงระหว่างพลังงานความร้อนและพลังงานกลคือวิชาอุณหพลศาสตร์ ซึ่งมีขอบเขตกว้างขวางเพราะครอบคลุมระบบที่เป็นแก๊ส ของแข็ง ของเหลว และระบบไฟฟ้าเคมี ฯ แต่ในบทนี้เราจะเน้นหนักในส่วนที่เกี่ยวกับแก๊สเท่านั้น

10.1 ความร้อน

ดังที่กล่าวมาแล้ว ความร้อนเป็นพลังงานรูปหนึ่งซึ่งอาจเปลี่ยนมาจากพลังงานไฟฟ้า หรือจากพลังงานกลหรือพลังงานแสง ฯลฯ และพลังงานความร้อนก็สามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานรูปอื่นได้ ในระบบเอสไอ (SI) พลังงานความร้อน (Thermal Energy) มีหน่วยเป็นจูล (Joule, J) เช่นเดียวกับหน่วยของพลังงานกล แต่บางคนยังนิยมบอกพลังงานความร้อนเป็นหน่วยอื่นๆ อีก เช่น แคลอรี (Calory, cal) และบีทียู (BTU หรือ British Thermal Unit) เป็นต้น ความหมายและความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยต่างๆของพลังงานความร้อนเป็นดังนี้

พลังงาน 1 แคลอรี คือพลังงานความร้อนที่ทำให้น้ำที่มีมวล 1 กรัม มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศาเซลเซียส ($^{\circ}$C) (ในช่วง 14.5 $^{\circ}$C ถึง 15.5 $^{\circ}$C)

พลังงาน 1 บีทียู คือ พลังงานความร้อนที่ทำให้น้ำมวล 1 ปอนด์ มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศาฟาเรนไฮต์ ($^{\circ}$F) (ในช่วง 58.1 $^{\circ}$F ถึง 59.1 $^{\circ}$F)

จากการทดลองพบว่า

1 cal = 4.186 J

1 BTU = 252 cal = 1055 J

10.1.1 อุณหภูมิ

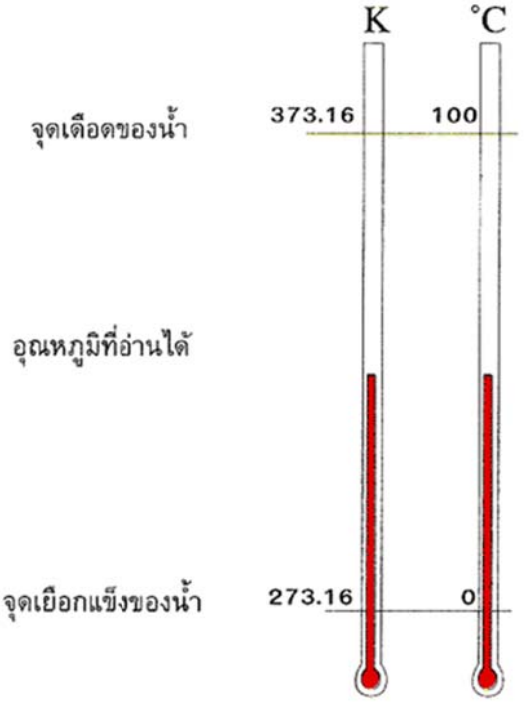
ถ้าเราทราบมวลและความเร็วของแต่ละโมเลกุลแก๊สเราก็สามารถหาพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สได้ นักวิทยาศาสตร์ได้กำหนดว่าอุณหภูมิคือปริมาณที่แปรผันโดยตรงกับพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊ส การที่จะบอกว่าวัตถุร้อนมากหรือร้อนน้อยเพียงไร เราสามารถบอกได้ด้วยอุณหภูมิของวัตถุนั้น และเมื่อวัตถุที่มีระดับความร้อนมากจะมีอุณหภูมิสูง ดังนั้นวัตถุที่มีระดับความร้อนน้อยก็จะมีอุณหภูมิต่ำ ถ้าเราเอาวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงมาสัมผัสวัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำ พลังงานความร้อนจะถูกถ่ายโอนจากวัตถุแรกไปยังวัตถุหลัง จนกระทั่งวัตถุทั้งสองมีอุณหภูมิเท่ากัน ดังนั้นเราจึงสามารถอาศัยสมบัติทางความร้อนของวัตถุต่างๆเพื่อวัดอุณหภูมิได้ เช่น ใช้จุดเยือกแข็งของน้ำและจุดเดือดของน้ำบอกอุณหภูมิหรือความต้านทานไฟฟ้าของวัตถุที่เปลี่ยนไปกับอุณหภูมิก็สามารถใช้วัดอุณหภูมิได้ เป็นต้น

☐ คำกล่าวที่ว่าอุณหภูมิคือระดับความร้อนถูกต้องหรือไม่ อย่างไร จงอธิบาย

□ ในห้องปรับอากาศมีแผ่นกระเบื้องและแผ่นเหล็กวางอยู่ เมื่อเวลาผ่านไปพอสมควร วัตถุทุกชิ้นในห้องจะมีอุณหภูมิเท่ากันคือ 25 °C เมื่อเราเอามือขวาไปแตะที่แผ่นกระเบื้อง และมือซ้ายไปแตะที่แผ่นเหล็กจะรู้สึกอย่างไร จงอธิบายว่าเป็นเพราะเหตุใด

อุปกรณ์ที่ใช้วัดอุณหภูมิมีชื่อเรียกว่าเทอร์มอมิเตอร์ เทอร์มอมิเตอร์มีหลายชนิด เทอร์มอมิเตอร์ทำงานโดยอาศัยสมบัติของสารที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ เช่น สารขยายตัวคือมีปริมาตรเพิ่มขึ้นเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น สารมีความต้านทานทางไฟฟ้าสูงขึ้นเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น สารเปลี่ยนสีเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยน เราได้นำสมบัติเหล่านี้ของสารมาทำเป็นเทอร์มอมิเตอร์ ในอดีตได้มีการกำหนดสเกลของอุณหภูมิไว้หลายอย่าง แต่ปัจจุบันนิยมใช้เพียงสองสเกลดังนี้คือ

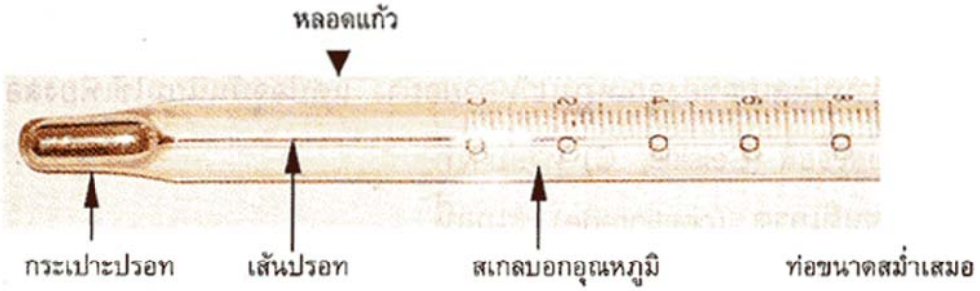
1. สเกลองศาเซลเซียส (Celsius, °C) หรือบางทีเรียกองศาเซนติเกรด (centigrade) สเกลนี้กำหนดว่าที่ความดัน 1 บรรยากาศ จุดเยือกแข็งของน้ำเป็น 0 องศาเซลเซียส และจุดเดือดของน้ำเป็น 100 องศาเซลเซียส และระยะระหว่างจุดเดือดและจุดเยือกแข็งของน้ำแบ่งเป็น 100 ส่วนเท่าๆ กัน
2. สเกลเคลวิน (Kelvin, K) เป็นหน่วยของอุณหภูมิสัมบูรณ์ จึงไม่ต้องใช้คำองศานำหน้าเคลวิน อุณหภูมิต่ำสุดคือ 0 เคลวิน โดยได้กำหนดว่า ที่ความดัน 1 บรรยากาศ จุดเยือกแข็งของน้ำเป็น 273.16 เคลวิน และจุดเดือดของน้ำเป็น 373.16 เคลวิน ระหว่างจุดเดือดและจุดเยือกแข็งของน้ำแบ่งเป็น 100 ส่วนเท่าๆ กัน ดังนั้นช่วงอุณหภูมิ 1 เคลวิน จึงเท่ากับช่วงอุณหภูมิ 1 °C **หน่วยเคลวินเป็นหน่วยมาตรฐานหนึ่งของระบบเอสไอ**



รูป 10. 1 สเกลองศาเซลเซียสและสเกลเคลวิน

การเทียบอุณหภูมิระหว่างหน่วยต่างๆ เช่น 27 °C จะมีค่าเท่าใดในหน่วยเคลวิน จะสามารถกระทำได้โดยใช้จุดเปรียบเทียบคือจุดเยือกแข็งและจุดเดือดของน้ำ

เทอร์มอมิเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดอุณหภูมิมีหลายรูปแบบและถูกทำขึ้นเพื่อความเหมาะสมตามลักษณะของการใช้งาน เช่น เทอร์มอมิเตอร์สำหรับใช้วัดอุณหภูมิห้อง เทอร์มอมิเตอร์วัดอุณหภูมิของคนไข้ หรือเทอร์มอมิเตอร์วัดอุณหภูมิของเตาอบเป็นต้น สสารใดที่มีสมบัติซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิสามารถนำมาทำเป็นเครื่องวัดอุณหภูมิได้ โดยการปรับเทียบกับอุณหภูมิมาตรฐานในช่วงอุณหภูมิที่ต้องการ ตามปกติไม่มีเทอร์มอมิเตอร์ชนิดใดที่ใช้ได้ดีในทุกช่วงอุณหภูมิ รูป10.2 แสดงตัวอย่างเทอร์มอมิเตอร์บางชนิด

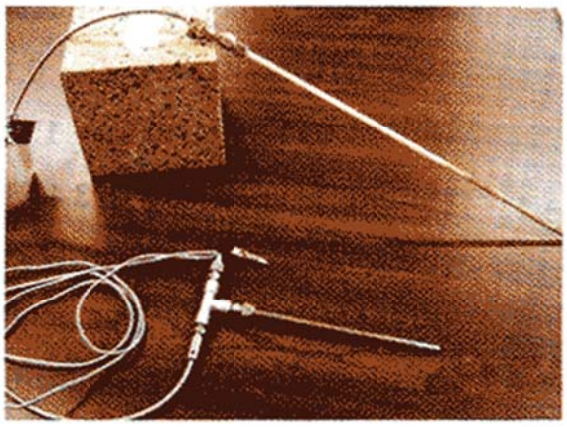


เทอร์มอมิเตอร์ธรรมดา

เทอร์มอมิเตอร์วัดไข้

เทอร์มอมิเตอร์วัดไข้แบบดิจิตอล

เทอร์มอมิเตอร์สำหรับวัดอุณหภูมิของเตาอบ



เทอร์มอคัปเปิล

รูป 10.2 เทอร์มอมิเตอร์ชนิดต่างๆ

เทอร์มอมิเตอร์สำหรับวัดอุณหภูมิของเตาอบอาจทำจากแผ่นโลหะต่างชนิดประกบกันและทำงานโดยอาศัยการขยายตัวที่ต่างกัน หรือใช้เทอร์มอคัปเปิลซึ่งประกอบด้วยลวดโลหะต่างชนิดกัน 2 เส้นเชื่อมต่อกันที่ปลายข้างหนึ่ง เมื่อนำปลายนี้ไปสัมผัสกับเปลวไฟ จะทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้นระหว่างปลายที่ไม่ได้เชื่อม ถ้าใช้โวลต์มิเตอร์วัดค่าความต่างศักย์นี้พร้อมกับเปิดตาราง จะทราบค่าอุณหภูมิของเปลวไฟได้ ส่วนเทอร์มอมิเตอร์วัดไข้แบบดิจิทัลอาจใช้ตัวรับรู้ (sensor) ที่เป็นสารกึ่งตัวนำซึ่งความต้านทาน ไฟฟ้าของมันขึ้นกับอุณหภูมิ และมีวงจรวัดและปรับเทียบอุณหภูมิโดยแสดงค่าที่อ่านได้เป็นตัวเลข

ถ้าให้พลังงานความร้อนน้อยๆ ΔQ จูล แก่สารมวล m กิโลกรัม ทำให้สารมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ΔT เคลวิน นิยามความจุความร้อน (heat capacity) โดยสมการ

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \qquad \textbf{(10.1)}$$

ดังนั้นความจุความร้อนคือความร้อนที่ทำให้สารนั้นมีอุณหภูมิสูงขึ้นหนึ่งหน่วย และนิยามความจุความร้อนจำเพาะ (specific heat capacity) ของสารโดยสมการ

$$c = \frac{1}{m}\frac{\Delta Q}{\Delta T} \qquad \textbf{(10.2)}$$

ดังนั้น ความจุความร้อนจำเพาะคือความจุความร้อนสำหรับมวลหนึ่งหน่วย นั่นคือ

$$c = C/m$$

สมการ (10.2) อาจเขียนใหม่เป็น

$$\Delta Q = mc\Delta T \qquad \textbf{(10.3)}$$

ΔQ อาจหมายถึงพลังงานความร้อนที่ถ่ายโอนออกจากสาร เมื่อสารมีอุณหภูมิลดลง ΔT ได้ ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าความร้อนจำเพาะ คือ พลังงานความร้อนที่ทำให้สารมวลหนึ่งหน่วยมีอุณหภูมิเปลี่ยนไปหนึ่งองศา ในระบบเอสไอ ความร้อนจำเพาะมีหน่วยวัดเป็นจูลต่อกิโลกรัมเคลวิน (J/kg K) ตามปกติความจุความร้อนจำเพาะของสาร c ขึ้นกับอุณหภูมิ

เมื่อสารมวล m มีอุณหภูมิเพิ่มจาก T_1 เป็น T_2 ถ้าในช่วงอุณหภูมินี้ความจุความร้อนจำเพาะของสารเปลี่ยนแปลงน้อยมากจึงให้เป็นค่าคงตัว ความร้อนที่สารได้รับอาจเขียนได้เป็น

$$Q = mc\Delta T = mc(T_2 - T_1) \qquad \textbf{(10.4)}$$

ตาราง 10.1 ความจุความร้อนจำเพาะของสารที่อุณหภูมิห้องและที่ความดันบรรยากาศ

วัสดุ	ความจุความร้อนจำเพาะของสาร (J/kg K)
อะลูมิเนียม	900
ทองแดง	390
เหล็ก	450
ตะกั่ว	130
ปรอท	140
หินอ่อน	860
เอทานอล	2,500
น้ำ	4,186
ร่างกายมนุษย์	3,500

ความจุความร้อนจำเพาะอาจแสดงในหน่วย J/kg K หรือ J/kg $^{\circ}$C ซึ่งมีค่าเท่ากัน

ตัวอย่าง 10.1 จงหาพลังงานความร้อนที่ทำให้เหล็กมวล 200 กรัม ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส มีอุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 60 องศาเซลเซียส

วิธีทำ m = 200 g = 0.2 kg

จากตาราง 10.1 สำหรับเหล็ก c = 450 J/kg K

$\Delta T = T_2 - T_1 = (60 - 20)\ ^{\circ}\text{C} = 40$ K

ความร้อนที่ต้องการ คือ $Q = mc\Delta T$

$= 0.2 \text{ kg} \times 450 \text{ J/kg K} \times 40 \text{ K}$

$= 3{,}600$ J

คำตอบ พลังงานความร้อนที่ต้องการคือ 3,600 จูล

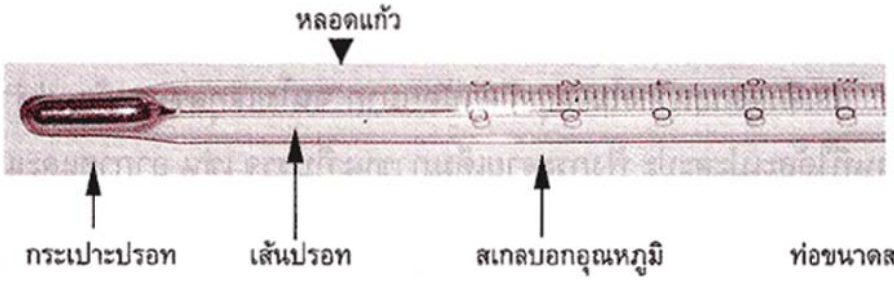
10.1.2 การขยายตัวของวัตถุเนื่องจากความร้อน

วัตถุโดยทั่วไปเมื่อได้รับความร้อนจะขยายตัว ซึ่งทำให้ความยาวหรือพื้นที่หน้าตัดหรือปริมาตรของวัตถุเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันถ้าวัตถุสูญเสียความร้อนหรือคายความร้อนวัตถุก็จะหดตัวทำให้มีความยาวหรือพื้นที่หน้าตัดหรือปริมาตรลดลง

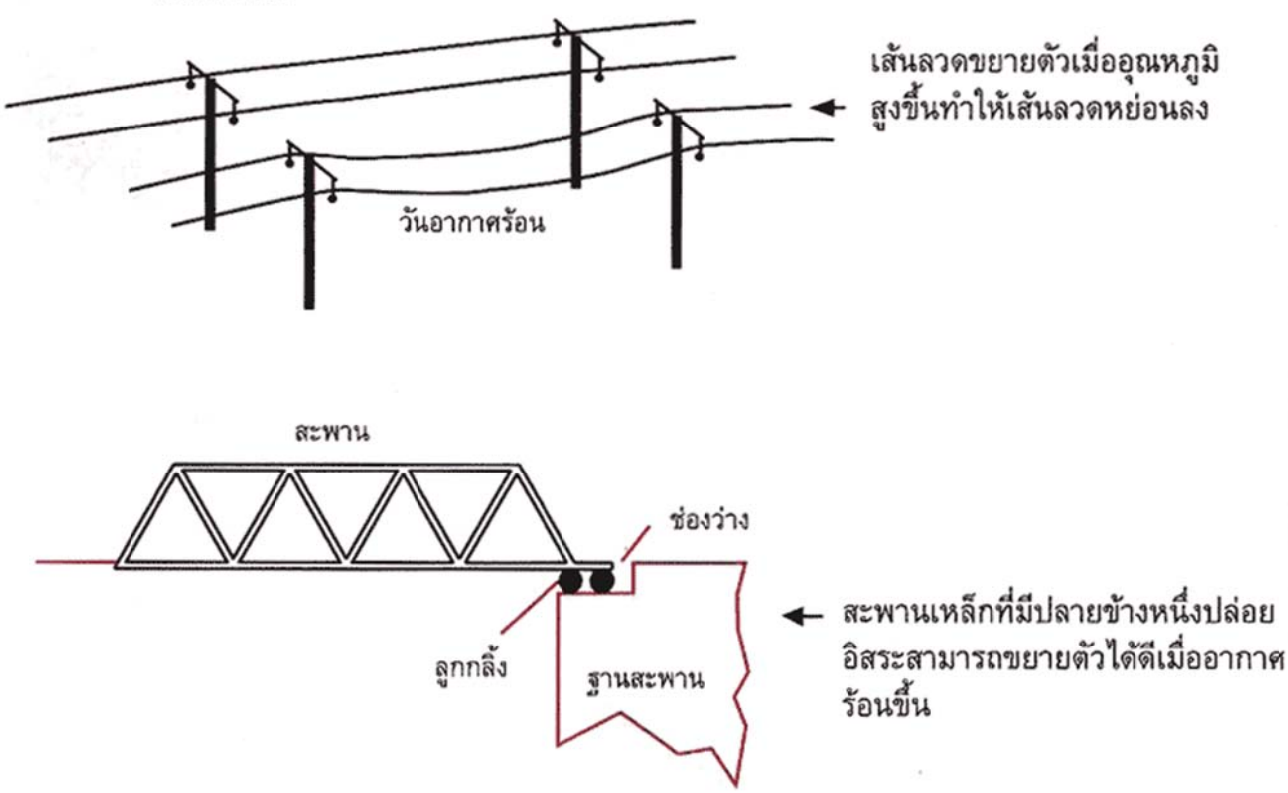
สมบัติสำคัญ ๆ ที่เกี่ยวกับการขยายตัวของของแข็งที่ควรทราบ ได้แก่

1. ของแข็งต่างชนิดกันถ้าเดิมมีความยาวเท่ากัน เมื่อร้อนขึ้นเท่ากันจะมีส่วนขยายตัวเพิ่มขึ้นไม่เท่ากัน
2. ของแข็งชนิดเดียวกัน ถ้าเดิมมีความยาวเท่ากัน เมื่อร้อนขึ้นเท่ากัน จะขยายตัวเพิ่มขึ้นเท่ากัน
3. สมบัติการขยายตัวและหดตัวของวัตถุเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนเป็นเรื่องที่วิศวกร ต้องคำนึงถึงเวลานำวัตถุมาใช้งาน

การขยายตัวของสารเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้เกิดผลต่าง ๆ ซึ่งแสดงในรูป 10.3



เทอร์มอมิเตอร์ทำงานโดยใช้หลักการขยายตัวหรือหดตัวของของเหลวในหลอดแก้ว เมื่อมีอุณหภูมิเปลี่ยน



รูป 10.3 ผลของการขยายตัวที่วิศวกรต้องคำนึงถึงในกรณีการก่อสร้างสิ่งต่าง ๆ

10.1.3 สถานะและการเปลี่ยนสถานะของสาร

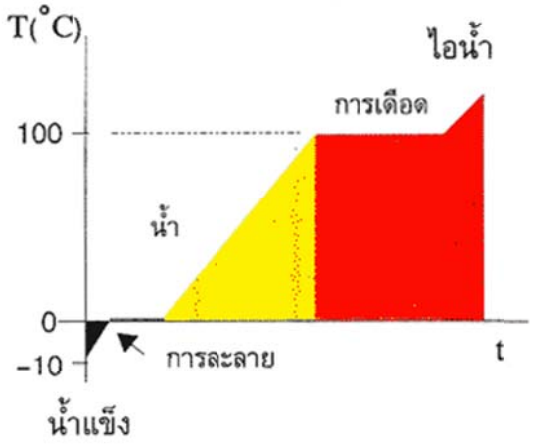
สังเกตสารและสิ่งของต่างๆ ที่อยู่รอบตัวเราจะพบว่า สารมี 3 สถานะคือ ของแข็ง ของเหลว แก๊ส ในชีวิตประจำวันที่เราสามารถเห็นได้ทั้ง 3 สถานะ คือ น้ำ เพราะอาจเป็นของแข็ง (น้ำแข็ง) ของเหลว (น้ำ) และแก๊ส (ไอน้ำ)ได้

ก. ของแข็ง แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีค่ามาก ทำให้โมเลกุลอยู่ใกล้กัน และรูปทรงของของแข็งไม่เปลี่ยนแปลงมากเมื่อมีแรงขนาดพอสมควรมากระทำ ตามคำจำกัดความนี้ ท่อนเหล็ก ก้อนหิน จึงเป็นของแข็ง

ข. ของเหลว แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีค่าน้อย โมเลกุลจึงเคลื่อนที่ไปมาได้บ้าง ทำให้รูปทรงของของเหลวเปลี่ยนแปลงไปตามภาชนะที่บรรจุ น้ำ ปรอท น้ำมัน เป็นของเหลว

ค. แก๊ส แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีค่าน้อยมาก จนโมเลกุลของแก๊สอยู่ห่างกันมาก และเคลื่อนที่ได้สะเปะสะปะ ฟุ้งกระจายเต็มภาชนะที่บรรจุ เช่น อากาศและแก๊สชนิดต่างๆ

ถ้าเรานำน้ำแข็งที่มีอุณหภูมิต่ำมาก เช่น –10 องศาเซลเซียส มาให้ความร้อนภายใต้ความดันปกติ คือ 1 บรรยากาศ น้ำแข็งจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ จนเกิดการหลอมละลายที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส นี่คืออุณหภูมิของการหลอมละลาย (T_m) ของน้ำแข็ง และถ้าให้ความร้อนแก่น้ำแข็งเพิ่มต่อไปอีก น้ำแข็งก็จะละลายเป็นน้ำมากขึ้นแต่อุณหภูมิจะยังคงที่เท่าเดิม คือ 0 องศาเซลเซียส ดังนั้นในช่วงนี้พลังงานความร้อนที่ให้แก่น้ำแข็งจะถูกนำไปทำให้โมเลกุลซึ่งเดิมเกาะติดกันแน่นเคลื่อนออกจากกัน น้ำแข็งจึงละลายเป็นน้ำจนกระทั่งน้ำแข็งที่ 0 องศาเซลเซียสละลายเป็นน้ำที่ 0 องศาเซลเซียสหมด และเราให้ความร้อนต่อ น้ำก็จะเริ่มมีอุณหภูมิสูงขึ้น จนเริ่มเดือดเป็นไอน้ำที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส การเดือด ก็คือการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นแก๊สและจุดเดือดของน้ำ (T_v) ที่ความดัน 1 บรรยากาศก็คือ 100 องศาเซลเซียส ในทำนองเดียวกับขณะละลาย ความร้อนที่ให้แก่น้ำขณะเดือดก็จะไม่ทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น แต่จะถูกนำไปทำให้โมเลกุลของน้ำ ซึ่งเดิมอยู่ใกล้กันพอประมาณมีพลังงานจลน์มากพอที่จะแยกจากกันเป็นแก๊ส น้ำจึงเริ่มกลายเป็นไอน้ำ จนกระทั่งน้ำเดือดหมด ถ้าเก็บกักไอน้ำไว้และให้ความร้อน



รูป 10.4 แสดงการเปลี่ยนสถานะของน้ำ

ต่อไปอีก ไอน้ำก็จะมีอุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียสได้ ในรูป 10.4 แสดงการเปลี่ยนสถานะของน้ำเมื่อได้รับความร้อน

ถ้าทำการทดลองเช่นเดียวกันนี้กับสารอื่น เช่น ขี้ผึ้ง พาราฟิน ก็จะได้ผลคล้ายคลึงกัน คือมีการเปลี่ยนสถานะของสารจากของแข็งเป็นของเหลว และของเหลวเป็นแก๊ส และขณะที่สารเปลี่ยนสถานะ อุณหภูมิของสารจะไม่เปลี่ยน สำหรับขี้ผึ้งอาจมีจุดหลอมเหลวสูงกว่า 0 องศาเซลเซียส เช่น 35 องศาเซลเซียส และจุดเดือดอาจสูงประมาณ 380 องศาเซลเซียส ซึ่งทั้งนี้ก็ขึ้นกับชนิดของขี้ผึ้งที่ใช้ทดลอง

อย่างไรก็ตาม สำหรับของแข็งบางชนิด เช่น น้ำแข็งแห้งหรือคาร์บอนไดออกไซด์แข็ง ตามปกติที่ความดัน 1 บรรยากาศ จะมีอุณหภูมิ –78.5 องศาเซลเซียส ถ้าให้ความร้อน น้ำแข็งแห้งจะเปลี่ยนสภาวะจากของแข็งกลายเป็นแก๊ส เราเรียกการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นแก๊สทันทีว่า การระเหิด (sublimation) และถ้าต้องการให้น้ำแข็งแห้งละลายเป็นของเหลวเราต้องให้ความร้อนแก่น้ำแข็งแห้งที่ความดันสูงมากๆ สารหลายชนิดเช่นการะบูนมีสมบัติเช่นนี้ สรุปว่าการเปลี่ยนสถานะเป็นสมบัติของสารที่อาจมีหลายรูปแบบได้

สำหรับน้ำ พบว่าที่ความดัน 1 บรรยากาศ น้ำแข็งมีจุดหลอมเหลวที่ 0 องศาเซลเซียส และความร้อนที่ทำให้น้ำแข็ง 1 กิโลกรัมหลอมเหลวหมด เป็น **ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว** (L_m) โดย

$$L_m = 333 \text{ kJ/kg} = 333 \text{ J/g} \qquad \textbf{(10.5)}$$

และที่ความดัน 1 บรรยากาศน้ำจะเดือดที่ 100 องศาเซลเซียส โดยความร้อนที่ทำให้น้ำ 1 กิโลกรัมกลายเป็นไอหมดเป็นความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (L_v) โดย

$$L_v = 2256 \text{ kJ/kg} = 2256 \text{ J/g} \qquad \textbf{(10.6)}$$

จากคำจำกัดความของความร้อนแฝง ดังนั้นถ้า L เป็นความร้อนแฝงของการเปลี่ยนสถานะของสาร เราจะได้ว่าความร้อนที่ทำให้สารมวล m เปลี่ยนสถานะหมดคือ

$$Q = mL \qquad \textbf{(10.7)}$$

เราอาจวัดค่าความร้อนแฝง L ได้โดยใช้แคลอริมิเตอร์ ซึ่งจะกล่าวในตอนต่อไป

ตัวอย่าง 10.2 จงหาปริมาณความร้อนที่ทำให้น้ำแข็งมวล 250 กรัม อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส กลายเป็นน้ำหมดและสุดท้ายน้ำ 10 กรัมเดือดกลายเป็นไอ

วิธีทำ มวลของน้ำแข็ง m = 250 g = 0.250 kg

น้ำแข็งละลายหมดกลายเป็นน้ำ 0 °C ต้องการความร้อน

$$Q_1 = mL_m$$
$$= 0.25 \text{ kg} \times 333 \text{ kJ/kg}$$
$$= 83.25 \text{ kJ}$$

น้ำ 0 °C กลายเป็นน้ำ 100 °C ต้องการความร้อน

$$Q_2 = mc\Delta T$$
$$= 0.25 \text{ kg} \times 4.2 \text{ kJ/kg K} \times 100 \text{ K}$$
$$= 105 \text{ kJ}$$

น้ำ 10 กรัม หรือ 0.01 กิโลกรัมที่ 100 °C เดือดเป็นไอน้ำต้องการความร้อน

$$Q_3 = mL_v$$
$$= 0.01 \text{ kg} \times 2256 \text{ kJ/kg}$$
$$= 22.56 \text{ kJ}$$

ความร้อนทั้งหมดที่ต้องใช้ Q = 83.25 + 105 + 22.56 kJ

= 210.8 kJ

คำตอบ ความร้อนทั้งหมดที่ต้องการคือ 210.8 กิโลจูล

หมายเหตุ ในการหา Q_1 อาจใช้หน่วย m เป็นกรัมก็ได้

$$Q_1 = 250 \text{ g} \times 333 \text{ J/g}$$
$$= 83250 \text{ J} = 83.25 \text{ kJ}$$

ตัวอย่าง 10.3 ก) ในตาราง 10.1 โลหะชนิดใดมีความร้อนจำเพาะสูงสุด

ข) ก้อนอะลูมิเนียมมวล 200 กรัม อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส อยู่ในภาชนะที่เป็นฉนวน เมื่อเทน้ำแข็งอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส มวล 70 กรัม ลงในภาชนะ จากนั้นปิดภาชนะด้วยฝาฉนวน อุณหภูมิสุดท้ายภายในภาชนะเป็นเท่าใด (ให้คิดว่าภาชนะฉนวนให้หรือรับความร้อนน้อยมาก)

วิธีทำ

ก) จากบรรดาโลหะที่ปรากฏในตาราง 10.1 อะลูมิเนียม (Al) มีค่า

c_{Al} = 900 J/kg K = 0.90 kJ/kg K ดังนั้นจึงเป็นค่าสูงสุด

ข) เหตุการณ์อาจเกิดได้ 4 รูปแบบคือ

(1) น้ำแข็งละลายไม่หมด ดังนั้นอุณหภูมิสุดท้าย t = 0 °C

(2) น้ำแข็งละลายหมด แต่อุณหภูมิของอะลูมิเนียมยังสูงกว่า 0°C ทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น แต่ไม่เดือด ดังนั้นอุณหภูมิสุดท้ายจะอยู่ระหว่าง 0 กับ 100 คือ 0< t < 100

(3) น้ำบางส่วนเดือด อุณหภูมิสุดท้าย t = 100 °C

(4) น้ำเดือดหมด และก้อนอะลูมิเนียม มีอุณหภูมิ $t \geq 100$ °C

เวลาน้ำแข็งมวล 0.070 kg ละลายหมดต้องการความร้อน

$Q_1 = mL_m$ = 70 g × 333 J/g = 23310 J

ก้อนอะลูมิเนียมมวล 200 กรัม เมื่ออุณหภูมิลดเหลือ 0 °C แสดงว่าอุณหภูมิลดลง 300 °C หรือ 300 K การลดนี้ให้ความร้อน

$Q_2 = m_A c_A \Delta T$ = 200 g × 0.9 J/g K × 300 K = 54000 J

เพราะ $Q_2 > Q_1$ แสดงว่าน้ำแข็งละลายหมด

ถ้าอะลูมิเนียมมีอุณหภูมิลดลง 300°C เหลืออุณหภูมิ 100°C มันจะคายความร้อน

Q_3 = Q_2 x 200/300 = 36000 J

ความร้อนปริมาณนี้ทำให้น้ำที่100 °C เดือด

$$m = \frac{Q}{L_v} = 36000 \text{ J} / (2256 \text{ J/g}) = 16.0 \text{ g}$$

ดังนั้นถ้าน้ำเดือดก็จะเดือดไม่หมด สภาวะสุดท้ายที่จะเป็นคือ (2) หรือ (3) สมมุติว่าเป็น (2) นั่นคืออุณหภูมิสุดท้าย 0 °C $< t <$ 100 °C ได้สมการ จากกฎการอนุรักษ์พลังงาน

$Q_1 + mc(t-0)$ = $m_A c_A$ (300 - t)

23310 + (70)(4.2) t = (200)(0.9)(300 - t)

ได้อุณหภูมิผสมสุดท้ายของน้ำและอะลูมิเนียม t = 64.7 °C

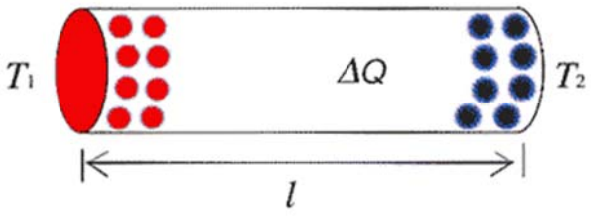
คำตอบ อุณหภูมิผสมสุดท้ายในภาชนะเท่ากับ 64.7 องศาเซลเซียส

หมายเหตุ ตัวอย่างนี้ใช้หน่วยของมวลเป็นกรัม (g) ใช้หน่วยของ c เป็น J/g K และใช้หน่วยของ L เป็น J/g จะได้หน่วยของพลังงานจะออกมาเป็น จูล (J)

10.1.4 การถ่ายโอนความร้อน

ความร้อนอาจถ่ายโอนหรือส่งผ่านจากวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปสู่อีกวัตถุหนึ่งที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าได้ การถ่ายโอนความร้อนมี 3 รูปแบบ คือ การนำ การพา และการแผ่รังสี เหตุที่เรียกว่าการถ่ายโอนเนื่องจากปรากฏการณ์นี้มีผู้ให้และผู้รับความร้อน โดยความร้อนไม่มีการสูญเสียเลย

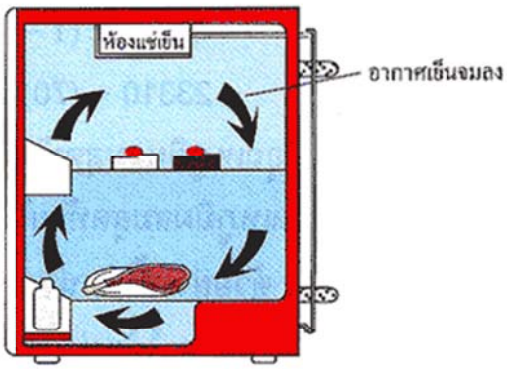
การนำความร้อนเป็นการถ่ายโอนพลังงานความร้อนผ่านตัวนำความร้อนซึ่งโดยมากเป็นโลหะต่างๆ เช่น ถ้าเราเอามือจับช้อนโลหะ โดยให้ปลายข้างหนึ่งของช้อนอยู่ในเปลวไฟสักครู่ มือเราจะรู้สึกร้อน เพราะความร้อนถูกส่งผ่านจากเปลวไฟมายังมือของเราโดยอาศัยช้อนโลหะเป็นตัวนำความร้อน



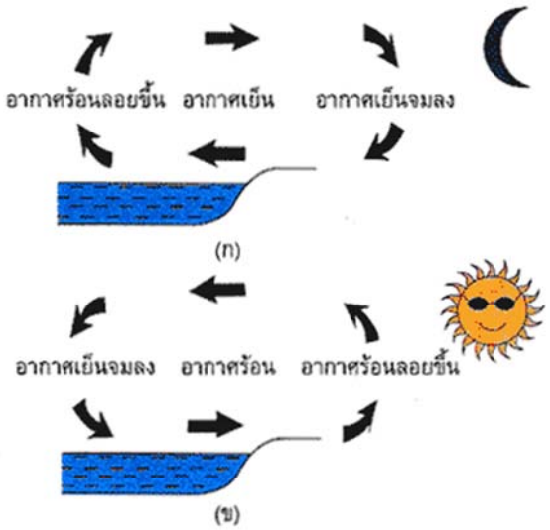
รูป 10.5 พลังงานความร้อน ΔQ ถูกส่งผ่านวัตถุที่มีพื้นที่หน้าตัด A จากด้านที่มีอุณหภูมิสูง T_1 ไปยังด้านที่มีอุณหภูมิต่ำ T_2 ซึ่งด้านทั้งสองอยู่ห่างกัน l

การพาเป็นกระบวนการที่ถ่ายโอนพลังงานความร้อนโดยอาศัยการเคลื่อนที่ของสารเป็นพาหะนำความร้อน ในการนำความร้อนนั้นพลังงานความร้อนถูกส่งผ่านตัวนำไปโดยโมเลกุล แต่โมเลกุลของตัวนำไม่ได้เคลื่อนที่ตามไป ส่วนในการพาความร้อนโมเลกุลของสารเคลื่อนที่พาพลังงานความร้อนจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งซึ่งอยู่ไกลออกไป เมื่อน้ำได้รับความร้อนจากเปลวไฟที่ก้นภาชนะความร้อนถูกถ่ายโอนจากก้นภาชนะขึ้นด้านบน ที่บริเวณก้นภาชนะและน้ำได้รับความร้อนจะขยายตัวทำให้มีความหนาแน่นน้อยลงดังนั้นมันจะลอยตัวสูงขึ้น ส่วนน้ำที่อยู่ข้างบนซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าและมีความหนาแน่นมากกว่าก็จะจมลงมาแทนที่ การหมุนวนของน้ำจึงทำให้เกิดการพาความร้อนขึ้นดังรูป 10.6 อาจศึกษาลักษณะการพาความร้อนเพิ่มเติมได้ จากรูป 10.7 และ รูป 10.8

รูป 10.6 การพาความร้อนของโมเลกุลของน้ำจากก้นภาชนะที่ร้อนไปยังผิวน้ำที่เย็นกว่าเมื่อก้นภาชนะที่บรรจุน้ำได้รับความร้อนจากเปลวไฟ



รูป 10.7 การพาความร้อนของอากาศในตู้เย็น



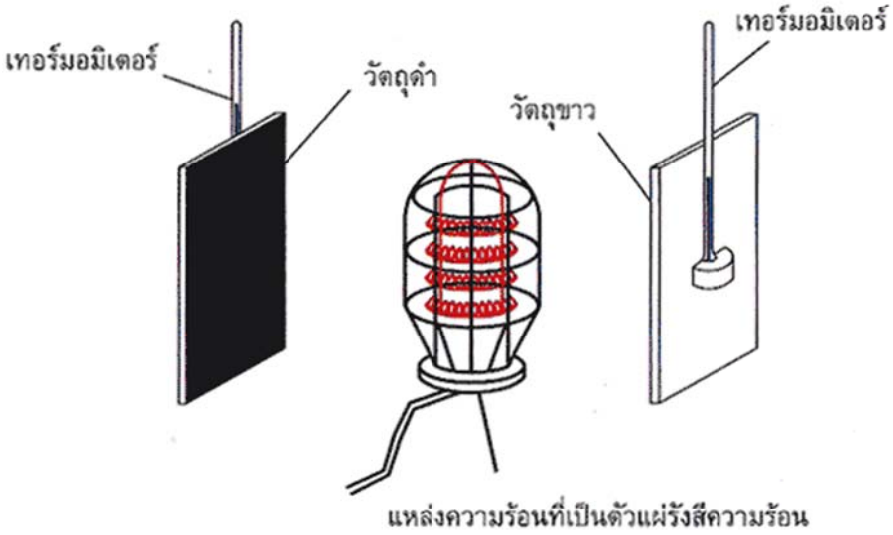
รูป 10.8 การพาความร้อนของอากาศทำให้เกิดปรากฏการณ์ ก. ลมบก และ ข. ลมทะเล

☐ ลมบกและลมทะเลเกิดได้อย่างไร และในช่วงเวลาใด

10.1.5 การแผ่รังสีความร้อน

การส่งพลังงานความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อนเป็นการส่งพลังงานความร้อนโดยไม่ต้องอาศัยตัวกลาง เช่น โลกได้รับพลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นต้น

โดยทั่วไปวัตถุที่สามารถแผ่รังสีได้ดีก็สามารถดูดกลืนรังสีได้ดีด้วย วัตถุที่สามารถแผ่รังสีและดูดกลืนทุกรังสีที่มาตกกระทบได้หมดเรียกว่า วัตถุดำ วัตถุดำไม่มีในธรรมชาติคือ มีแต่ในอุดมคติ ตัวอย่างของวัตถุที่มีลักษณะใกล้เคียงวัตถุดำคือ วัตถุที่มีผิวสีดำสำหรับวัตถุขาวจะมีสมบัติตรงข้ามกับวัตถุดำ คือไม่แผ่รังสีและไม่ดูดกลืนรังสีที่มาตกกระทบ ซึ่งเป็นวัตถุขาวในอุดมคติเท่านั้น ตัวอย่างวัตถุที่มีลักษณะใกล้เคียงกับวัตถุขาวคือ แผ่นอะลูมิเนียมเรียบที่มีผิวขัดมันซึ่งจะเปล่งรังสีน้อยมากและจะสะท้อนรังสีที่มาตกกระทบได้เกือบ 100 %



รูป 10.9 ความแตกต่างในการรับพลังงานของการแผ่รังสีความร้อนระหว่างวัตถุสีดำกับวัตถุสีขาว วัตถุสีดำจะรับพลังงานของการแผ่รังสีความร้อนได้ดีกว่าวัตถุขาวและอุณหภูมิจะเพิ่มสูงเร็วกว่าวัตถุขาว

ถ้าวัตถุมีอุณหภูมิ T_1 และสิ่งแวดล้อมมีอุณหภูมิ T_2 จะพบว่า วัตถุจะส่งพลังงานของการแผ่รังสีออกมาให้สิ่งแวดล้อม ในขณะเดียวกัน สิ่งแวดล้อมก็จะส่งพลังงานของการแผ่รังสีสู่วัตถุ ถ้า $T_1 > T_2$ จะพบว่าวัตถุสูญเสียพลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีเท่ากับผลต่างระหว่างพลังงานความร้อนที่วัตถุแผ่ออกไปกับพลังงานความร้อนที่วัตถุได้รับจากสิ่งแวดล้อม และอัตราการแผ่รังสีจะเป็นศูนย์ เมื่อ $T_1 = T_2$ นั่นคือวัตถุและสิ่งแวดล้อมอยู่ในสภาพสมดุลทางความร้อน

10.2 แก๊สอุดมคติ

ดังที่กล่าวข้างต้น สำหรับสารในสถานะแก๊ส โมเลกุลทั้งหลายสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระและจะฟุ้งกระจายเต็มภาชนะที่บรรจุ พบว่าปริมาตรของแก๊สขึ้นกับความดัน อุณหภูมิและมวลของแก๊ส สมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทั้งหลายนี้เรียกว่า กฎของแก๊ส การทดลองของบอยล์และชาร์ล เมื่อประมาณ 300 ปีก่อนและข้อมูลที่ได้จากการทดลองทางเคมีในเวลาต่อมา ทำให้ได้กฎของแก๊สตามโครงสร้างของโมเลกุล แก๊สอาจแบ่งได้เป็น 3 ชนิด ดังนี้

ก) แก๊สอะตอมเดี่ยว (monatomic gas) หนึ่งโมเลกุลของแก๊สชนิดนี้จะประกอบด้วยอะตอมเพียงอะตอมเดียว เช่น แก๊สฮีเลียม(He) นีออน (Ne) อาร์กอน (Ar) เป็นต้น

ข) แก๊สอะตอมคู่ (diatomic gas) หนึ่งโมเลกุลของแก๊สชนิดนี้ประกอบด้วยอะตอม 2 อะตอม เช่น แก๊สไฮโดรเจน (H_2) ไนโตรเจน (N_2) ออกซิเจน (O_2) เป็นต้น

ค) แก๊สหลายอะตอม (polyatomic gas) หนึ่งโมเลกุลของแก๊สชนิดนี้ ประกอบด้วยอะตอมตั้งแต่ 3 อะตอมขึ้นไป เช่น แก๊สโอโซน (O_3) มีเทน (CH_4) แอมมอเนีย (NH_3) เป็นต้น

เลขอโวกาโดร (Avogadro's number, N_A) คือ จำนวนอะตอมของคาร์บอน12 (C–12) ซึ่งมีมวลรวมกันได้ 12 กรัมพอดี สารที่มีจำนวนโมเลกุลชนิดเดียวกันรวมกันได้ N_A โมเลกุล จะบัญญัติว่าเป็น 1 โมล (mole) ปัจจุบันพบว่า N_A มีค่าเท่ากับ 6.02×10^{23} โมเลกุลต่อโมล

$$N_A = 6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

ดังนั้น แก๊สไฮโดรเจน 6.02×10^{23} โมเลกุล คือ 1 โมลของแก๊สไฮโดรเจน

แก๊สออกซิเจน 12.04×10^{23} โมเลกุล คือ 2 โมลของแก๊สออกซิเจน

แก๊สไนโตรเจน 3.01×10^{23} โมเลกุล คือ 0.5 โมลของแก๊สไนโตรเจน

ถ้า N เป็นจำนวนโมเลกุลของแก๊ส จะได้ว่า n ซึ่งเป็นจำนวนโมลของแก๊สนั้น มีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$n = \frac{N}{N_A}$$

มวลของแก๊สชนิดต่างๆ จำนวน 1 โมล เรียกว่า มวลโมลาร์ (M) ของแก๊ส ถ้า m เป็นมวลของ 1 โมเลกุล จะได้ว่า

$$M = m N_A$$

มวลโมลาร์ของแก๊สบางชนิดแสดงในตารางข้างล่าง

ตาราง 10.2 มวลโมเลกุลของแก๊สชนิดต่าง ๆ

แก๊ส	มวลโมลาร์ (g/mole)
He	4.00
Ne	20.0
Ar	40.0
H_2	2.00
N_2	28.0
O_2	32.0
Cl_2	71.0
CH_4	16.0

มวลโมลาร์ของแก๊สชนิดอื่นๆ คำนวณได้จากตารางธาตุ สำหรับอากาศมีมวลโมลาร์เฉลี่ยเท่ากับ 28.9 กรัมต่อโมล

10.2.1 กฎของบอยล์ (Boyle's Law)

โรเบิร์ต บอยล์ พบว่า สำหรับแก๊สในภาชนะปิด ถ้าอุณหภูมิ (T) ของแก๊สคงตัว ปริมาตร (V) ของแก๊สจะแปรผกผันกับความดัน (P) ของแก๊ส หรืออาจเขียนความสัมพันธ์ได้เป็น

$$V \propto \frac{1}{P} \quad \text{เมื่อ } T \text{ คงตัว}$$

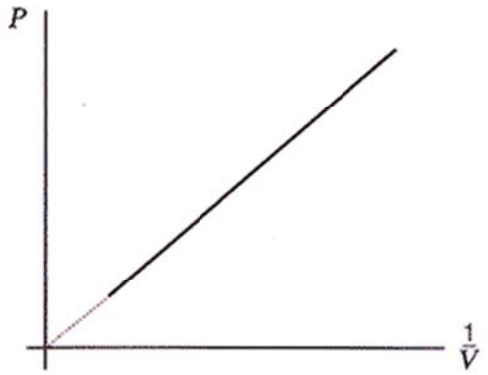
หรือ PV = ค่าคงตัว (10.3)

ผู้เรียนสามารถทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันและปริมาตรของอากาศได้ด้วย

รูป 10.10 บอยล์

Robert Boyle (ค.ศ. 1627-1691) นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษค้นพบว่า ถ้ารักษาอุณหภูมิให้คงตัว ความดันกับปริมาตรของอากาศแปรผกผันกัน ปัจจุบันเรียกความสัมพันธ์นี้ว่า กฎของบอยล์ เขายังศึกษาวิทยาศาสตร์ด้านอื่นๆ เช่น แสง เสียง แม่เหล็ก ไฟฟ้า เป็นต้น

ตนเอง โดยใช้อุปกรณ์ง่ายๆ ดังข้อแนะนำที่ค่อนข้างละเอียดในตอนท้ายบท ตัวอย่างกราฟแสดงผลการทดลองเป็นตามรูปข้างล่างนี้ (เมื่อ P เป็นความดันของแก๊สที่รวมความดันบรรยากาศด้วย)



รูป 10.11 กราฟระหว่างความดัน (P) และส่วนกลับของปริมาตรของแก๊ส ($1/V$) เมื่ออุณหภูมิคงตัว

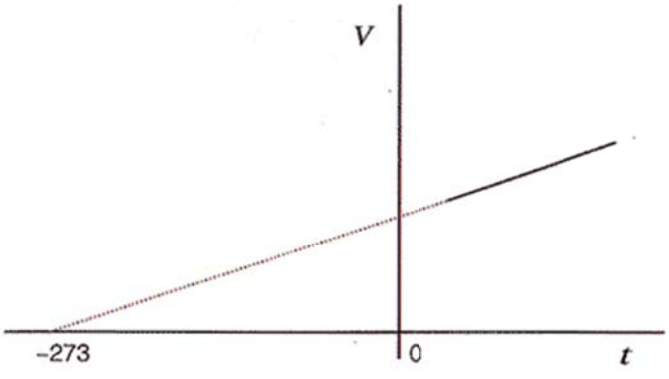
10.2.2 กฎของชาร์ลส์ (Charles' Law)

ชาร์ลส์พบว่า สำหรับแก๊สในภาชนะปิด ถ้าความดัน (P) คงตัว ปริมาตร (V) ของแก๊สจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิเคลวิน (T) ของแก๊ส หรืออาจเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้ คือ

$$V \propto T \quad \text{(ถ้า } P \text{ คงตัว)}$$

หรือ $$\frac{V}{T} = \text{ค่าคงตัว} \qquad \textbf{(10.4)}$$

ผลการทดลองแสดงโดยกราฟระหว่าง V กับ t ($^{\circ}$C) เป็นดังรูป 10.13



รูป 10.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตร (V) กับอุณหภูมิเป็นองศาเซลเซียส (t) เมื่อความดันคงตัว

รูป 10.12 ชาร์ลส์

Jacques Alexandre - Cesar Charles (ค.ศ. 1746-1823) นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศส เป็นคนแรกที่ใช้แก๊สไฮโดรเจนบรรจุในบอลลูนแทนอากาศร้อน ทำให้บอลลูนสามารถลอยขึ้นสูงๆได้ เขาได้ศึกษาเกี่ยวกับการขยายตัวของแก๊ส โดยทดลองกับแก๊สออกซิเจน ไนโตรเจน ไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์และอากาศ และพบว่า ถ้ารักษาให้ความดันของแก๊สคงตัว ปริมาตรของแก๊สแปรผันตรงกับอุณหภูมิ ปัจจุบันเรียกความสัมพันธ์นี้ว่า กฎของชาร์ลส์

10.2.3 กฎของแก๊ส

เมื่อรวมกฎของบอยล์และกฎของชาร์ลส์ จะได้

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

หรือ

$$\frac{PV}{T} = \text{ค่าคงตัว} \qquad \textbf{(10.5)}$$

และสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะสมดุลของแก๊สในสถานะ 1 และ 2 คือ

$$\frac{P_1V_1}{T_1} = \frac{P_2V_2}{T_2} \qquad \textbf{(10.6)}$$

พบว่าสมการข้างบนใช้ได้ ถ้าความดัน P ไม่สูงจนเกินไป และอุณหภูมิ T ไม่ต่ำจนเกินไป จากการทดลอง โดยใช้แก๊สหลายชนิดและหลายปริมาตร พบว่าค่าคงตัวในสมการ (10.5) แปรผันโดยตรงกับจำนวนโมล (n) ของแก๊ส นั่นคือสำหรับแก๊สชนิดหนึ่ง ๆ

$$\frac{PV}{T} \propto n$$

ดังนั้นไม่ว่าจะเป็นแก๊สชนิดใด จากนี้อาจเขียน ได้ว่า

$$\frac{PV}{T} = nR$$

โดย R เป็นค่าคงตัวเรียก ค่าคงตัวของแก๊ส จากการทดลองพบว่า

$$R = 8.31 \quad \text{J/mol K}$$

ดังนั้นจะได้

$$PV = nRT \qquad \textbf{(10.7)}$$

สมการนี้เรียก **กฎของแก๊สอุดมคติ** แก๊สที่มีการเปลี่ยนแปลงสอดคล้องกับสมการนี้เรียกว่า **แก๊สอุดมคติ**

ถ้าแทน $n = N / N_A$ ลงใน (10.7) จะได้

$$PV = \frac{N}{N_A}RT$$

ถ้าให้ค่าคงตัว

$$k_B = \frac{R}{N_A}$$

k_B เรียกว่า ค่าคงตัวของโบลต์ซมันน์ (Boltzmann's constant) จะได้

$$k_B = \frac{8.31}{6.02\times10^{23}} = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

กฎของแก๊สอุดมคติ จึงสามารถเขียนได้อีกรูปหนึ่งคือ

$$PV = Nk_BT \qquad (10.8)$$

โดย N เป็นจำนวนโมเลกุลทั้งหมดของแก๊ส

พบว่าสมการ $PV = nRT$ และ (10.8) ยังใช้ได้สำหรับแก๊สผสมที่ไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกันด้วย ตัวอย่างเช่น ถ้าแก๊สในภาชนะที่มีปริมาตร V ประกอบด้วยแก๊สชนิดที่ 1, 2 และ 3 จำนวน n_1, n_2 และ n_3 โมลตามลำดับ กฎของแก๊สนี้คือ

$$PV = (n_1+n_2+n_3)RT$$

โดย P และ T เป็นความดันรวมและอุณหภูมิเคลวินร่วมของแก๊สนี้ สมการข้างบนอาจเขียนได้ว่า

$$P = \frac{n_1RT}{V} + \frac{n_2RT}{V} + \frac{n_3RT}{V} = P_1+P_2+P_3$$

ในที่นี้ P_1, P_2 และ P_3 คือความดันย่อยของแก๊สทั้งสามชนิด และในกรณีนี้สมการ (10.8) จึงอาจเขียนได้เป็น

$$PV = (N_1+N_2+N_3)k_BT$$

โดย N_1, N_2 และ N_3 คือจำนวนโมเลกุลของแก๊สแต่ละชนิด

สมการ $PV = nRT$ แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง P, V, n และ T ของแก๊สอุดมคติ สมการนี้ไม่สามารถนำไปใช้กับแก๊สธรรมชาติได้ทุกกรณี เพราะถ้าอุณหภูมิของแก๊สลดลงใกล้จุดอิ่มตัวหรือเมื่อความดันของแก๊สสูงมากเกินไป สมบัติของแก๊สธรรมชาติจะแตกต่างจากแก๊สอุดมคติมาก ปัจจุบัน พบว่า ยังไม่มีสมการใดสามารถแสดงสมบัติของแก๊สธรรมชาติได้ทุกความดัน อุณหภูมิ และปริมาตร

โดยทั่วไปสำหรับแก๊สผสม กฎของแก๊ส คือ

$$PV = (\sum_i n_i)RT$$

โดย n_i คือจำนวนโมลของแก๊สชนิดที่ i และ

$$P_i = \frac{n_i RT}{V}$$

เมื่อ P_i คือความดันย่อยของแก๊สที่ i ในแก๊สผสมนั้น

ความดันมีหน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร (N/m^2) หรือพาสคัล (pascal, Pa) แต่ในการคำนวณเกี่ยวกับแก๊ส โดยมากมักจะใช้ความดันของแก๊สเป็นหน่วยบรรยากาศ โดย

1 บรรยากาศ (atm) = 1.013×10^5 Pa = 760 มิลลิเมตรของปรอท

และมักใช้ปริมาตรในหน่วยลูกบาศก์เดซิเมตร (dm^3)หรือลิตร โดย

1,000 ลูกบาศก์เดซิเมตร = 1 ลูกบาศก์เมตร = 1 m^3

ตัวอย่าง 10.5 แก๊สออกซิเจนในถังที่มีปริมาตร 40 ลูกบาศก์เดซิเมตร เดิมมีความดัน 20 บรรยากาศ และมีอุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ต่อมาแก๊สรั่วไปบางส่วนจนมีความดัน 4.0 บรรยากาศและมีอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส จงหาว่าแก๊สรั่วไปกี่กิโลกรัม

วิธีทำ กำหนดความดัน อุณหภูมิ และปริมาตรของแก๊สตอนแรกและตอนหลัง

$P_1 = 20 \times 1.013 \times 10^5$ Pa $\quad P_2 = 4.0 \times 1.013 \times 10^5$ Pa

$T_1 = 273+27 = 300$ K $\quad T_2 = 273 + 20 = 293$ K

$V_1 = V_2 = 40 \times 10^{-3}$ m^3

จาก $PV = nRT$

$$n_1 = \frac{P_1V_1}{RT_1} = \frac{(20 \times 1.013 \times 10^5 \text{ N/m}^2)(40 \times 10^{-3} \text{ m}^3)}{(8.31 \text{ J/mol K})(300 \text{ K})} = 32.51 \text{ mol}$$

$$n_2 = \frac{P_2V_2}{RT_2} = \frac{(4.0 \times 1.013 \times 10^5 \text{ N/m}^2)(40 \times 10^{-3} \text{ m}^3)}{(8.31 \text{ J/mol K})(293 \text{ K})} = 6.66 \text{ mol}$$

ดังนั้นแก๊สรั่วไป $n_1 - n_2 = \Delta n = 32.51 - 6.66 = 25.85$ mol

จากตาราง 10.4 สำหรับ ออกซิเจน $M = 32$ g/mol

ดังนั้น $\Delta m = 25.85 \times 32 = 827$ g $= 0.827$ kg

คำตอบ แก๊สออกซิเจนรั่วออกจากถัง 0.827 กิโลกรัม

ตัวอย่าง 10.6 ยางรถยนต์บรรจุลมด้วยความดันเกจ 200 กิโลพาสคัลและลมยางรถยนต์มีอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส หลังจากรถแล่นไปได้ 100 กิโลเมตร อุณหภูมิของลมยางรถยนต์เพิ่มขึ้นเป็น 40 องศาเซลเซียส จงหาความดันลมยางรถตอนหลังนี้ ให้ถือว่าปริมาตรภายในของยางคงตัว (ใช้ 1 atm = 101 kPa)

วิธีทำ ถ้า P_o เป็นความดัน 1 บรรยากาศ และ P เป็นความดันของลมยาง ความดันเกจของลมยางคือ

$$P_g = P - P_o$$

จะได้ $P_1 = P_{g1} + P_o$ = 200 kPa+ 101 kPa

= 301 kPa

T_1 = 10+273 = 283 K

T_2 = 40+273 = 313 K

เนื่องจากมวลของแก๊สในยางไม่เปลี่ยน จะได้ $P_1V_1/T_1 = P_2V_2/T_2$

หรือ $P_2 = P_1\left(\frac{V_1}{V_2}\right)\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = P_1\left(\frac{T_2}{T_1}\right)$ (เพราะ $V_1 = V_2$)

$$= (301 \text{ kPa})\left(\frac{313 \text{ K}}{283 \text{ K}}\right) = 333 \text{ kPa}$$

P_2 = (333 – 101) kPa = 232 kPa

คำตอบ ความดันเกจภายในยางรถตอนหลังเท่ากับ 232 กิโลพาสคัล

ตัวอย่าง 10.7 บอลลูนที่บรรจุแก๊สไฮโดรเจนปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตรพอดี จะยกมวลได้เท่าใด ให้ความดันภายในบอลลูนเท่ากับความดันภายนอกคือเท่ากับ 1 บรรยากาศ และอุณหภูมิของแก๊สไฮโดรเจนในบอลลูนเท่ากับอุณหภูมิภายนอกคือ 30 องศาเซลเซียส

วิธีทำ จำนวนโมลของแก๊สไฮโดรเจน

$$n = \frac{PV}{RT} = \frac{1.013\times10^5\times1}{8.31\times(273+30)} = 40.23 \text{ mol}$$

n = จำนวนโมลของอากาศที่มีปริมาตรเท่ากับบอลลูน

มวลของแก๊สไฮโดรเจนในบอลลูน

m_H = 40.23 × 2 = 80.46 g = 0.0805 kg

มวลของอากาศปริมาตรเท่ากับบอลลูน

m_a = 40.23 × 28.9 = 1162.69 g = 1.1627 kg

แรงพยุงคือ $m_a g$

ในสภาวะสมดุล $m_H g + mg = m_a g$

โดย m เป็นมวลมากที่สุดที่บอลลูนสามารถยกได้ ดังนั้น

$m = m_a - m_H$

= 1.1627 - 0.0805 = 1.0822 kg

คำตอบ บอลลูนยกมวลได้ มากที่สุดประมาณ 1.08 กิโลกรัม

10.3 ทฤษฎีจลน์ของแก๊ส

ในคริสต์ศตวรรษที่ 17 โรเบิร์ต บอยล์ ได้อธิบายว่าเหตุใดแก๊สจึงมีความดัน และคำอธิบายนี้ได้มีการให้รายละเอียดเพิ่มเติมโดยดาเนียล แบร์นูลลี ในคริสต์ศตวรรษที่ 18 ความคิดเบื้องต้นคือ แก๊สประกอบด้วยโมเลกุลที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงตลอดเวลา ความดันที่ผนังเกิดจากการที่โมเลกุลของแก๊สชนผนังและกระดอนกลับอย่างต่อเนื่อง ความคิดนี้ได้รับการสนับสนุนจากปรากฏการณ์ **การเคลื่อนที่แบบบราวน์** (Brownian motion) ซึ่งเราสามารถเห็นปรากฏการณ์ได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ส่องดูอนุภาคเล็กๆ เช่น อนุภาคของควันบุหรี่ ว่าอนุภาคต่างๆเคลื่อนที่ส่ายไปมาอย่างรวดเร็ว การเปลี่ยนตำแหน่งที่มีทิศทางแบบสุ่มนี้ คือ การเคลื่อนที่แบบบราวน์ ซึ่งเกิดจากการที่อนุภาคถูกโมเลกุลของอากาศชนในทุกทิศทาง

เมื่อข้อคิดนี้เป็นจริง เราก็สามารถใช้กลศาสตร์ของนิวตันคำนวณการเคลื่อนที่ของโมเลกุล และการชนผนังของโมเลกุลเพื่ออธิบายความดันของแก๊สให้สอดคล้องกับกฎของแก๊สอุดมคติดังที่กล่าวมาแล้ว

10.3.1 แบบจำลองของแก๊สอุดมคติ

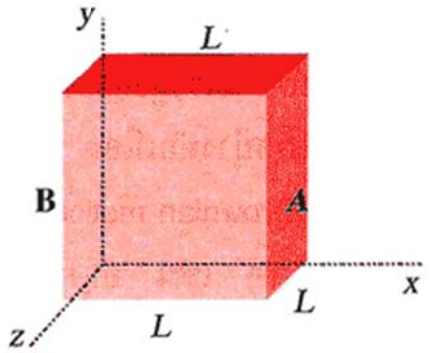
เพื่อความสะดวกและง่ายต่อการวิเคราะห์แนวคิดข้างต้น จำเป็นต้องกำหนดสมมติฐานหรือแบบจำลองของแก๊สอุดมคติขึ้นดังนี้

1. แก๊สประกอบด้วยโมเลกุลจำนวนมาก ทุกโมเลกุลมีลักษณะเป็นก้อนกลมที่มีขนาดเท่ากัน มีความยืดหยุ่นสูง ดังนั้นโมเลกุลเหล่านี้จะชนผนังและกระดอนแบบยืดหยุ่นสมบูรณ์

2. ถือว่าปริมาตรรวมของโมเลกุลทุกตัวน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาตรของแก๊สทั้งภาชนะ จึงสามารถตัดปริมาตรของโมเลกุลทิ้งไปได้
3. ไม่มีแรงใดๆ กระทำต่อโมเลกุลไม่ว่าจะเป็นแรงผลักหรือแรงดึงดูด หรือแม้กระทั่งแรงโน้มถ่วงของโลกที่กระทำต่อโมเลกุลด้วย
4. การเคลื่อนที่ของโมเลกุลเป็นแบบสุ่ม ซึ่งหมายถึงว่าโมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ได้สะดวกทุกทิศทาง

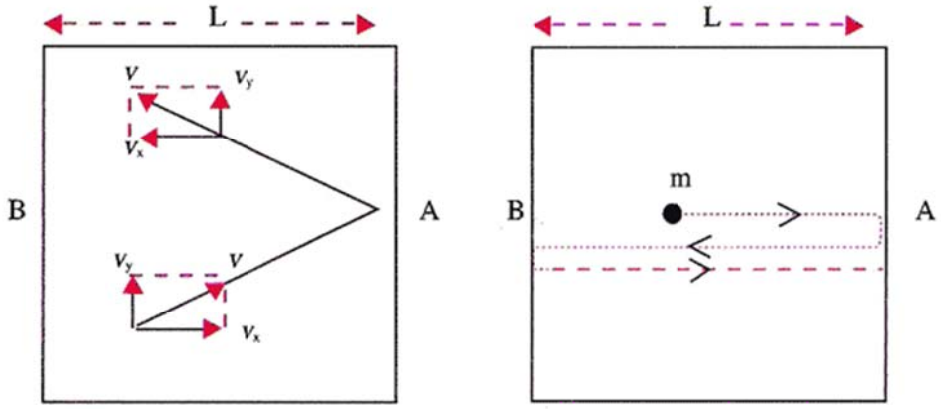
10.3.2 ความดันและพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊ส

เนื่องจากแก๊สมีโมเลกุลจำนวนมาก เราจึงต้องพิจารณาค่าเฉลี่ยของพฤติกรรมของโมเลกุล ซึ่งอาจทำดังนี้ รูป 10.14 แสดงกล่องลูกบาศก์ขนาด $L \times L \times L$ ที่โมเลกุล N ตัว บรรจุอยู่ภายใน เลือกให้แกน x แกน y และแกน z ขนานกับขอบภาชนะดังรูป



รูป 10.14 ภาชนะลูกบาศก์ขนาด $L \times L \times L$ บรรจุแก๊ส N โมเลกุล

พิจารณาโมเลกุลที่มีความเร็วในแนว x เท่ากับ v_x เมื่อโมเลกุลนี้ชนผนัง A ของภาชนะแบบยืดหยุ่นสมบูรณ์ โมเลกุลจะกระดอนกลับออกมาในทิศทางตรงข้ามด้วยอัตราเร็ว v_x เท่าเดิม ดังในรูป 10.15 ก. เพื่อความสะดวกในการศึกษาขั้นต่อไป จะพิจารณาการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเฉพาะในแนว x เท่านั้น หลังจากชนผนัง A แล้วโมเลกุลจะเคลื่อนที่กลับมาชนผนัง B ซึ่งอยู่ตรงข้ามกับ A โดยจะเคลื่อนที่ได้ระยะทาง L ต่อมาโมเลกุลจะกระดอนกลับจาก B ในทิศตรงกันข้ามด้วยความเร็ว v_x เข้าชนผนัง A อีกดังแสดงในรูป 10.15 ข. ดังนั้นโมเลกุลจะชนผนัง A ทุกช่วงเวลา $2L/v_x$



รูป 10.15 ก. แสดงการชนผนังภาชนะของโมเลกุลแบบยืดหยุ่นสมบูรณ์
ข. แสดงโมเลกุลชนผนังภาชนะทั้งสองด้าน รูปแสดงเฉพาะการเคลื่อนที่ในแนว x เท่านั้น

ในตอนนี้จะพิจารณาผลการชนของโมเลกุลต่อผนัง A ในแนว x เมื่อโมเลกุลมวล m เคลื่อนที่เข้าชนผนังด้วยความเร็ว v_x และสะท้อนกลับด้วยความเร็ว $-v_x$ ในการชนผนังแต่ละครั้งโมเมนตัมของมวลลดลง

$$mv_x - (-mv_x) = 2mv_x$$

ในการชนแต่ละครั้งผนังด้านขวารับโมเมนตัมจากโมเลกุลที่เข้ามาชนเท่ากับ $2mv_x$ แต่โมเลกุลนี้ชนผนังด้านขวามือทุกช่วงเวลา $2L/v_x$ ดังนั้นโมเมนตัมที่ผนังได้รับจากโมเลกุลนี้ในหนึ่งหน่วยเวลาเท่ากับ

$$\frac{2mv_x}{2L/v_x} = \frac{mv_x^2}{L}$$

ถ้า $v_{x1}, v_{x2}, \ldots\ldots, v_{xi}$ ..... เป็นความเร็วในแนว x ของโมเลกุลตัวที่ 1,2,...,i... ตามลำดับ โมเมนตัมที่ผนังด้านขวาได้รับในหนึ่งหน่วยเวลาจากโมเลกุลทั้งหมดที่มีในกล่องคือ N ตัว เท่ากับ

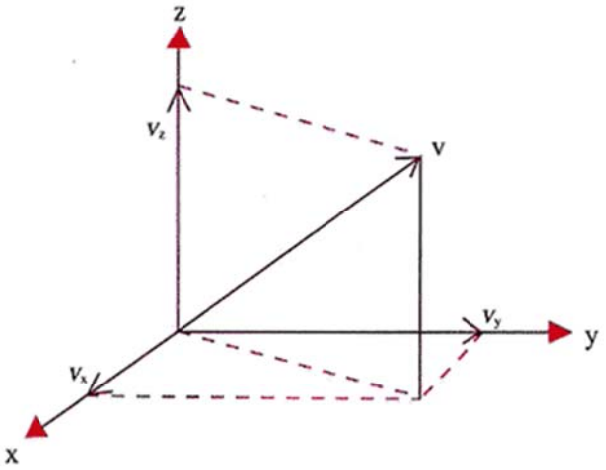
$$\frac{mv_{x1}^2}{L} + \frac{mv_{x2}^2}{L} + \ldots \frac{mv_{xi}^2}{L} + \ldots \frac{mv_{xN}^2}{L} = \sum_{i=1}^{N} \frac{mv_{xi}^2}{L}$$

เนื่องจากโมเลกุลมีจำนวนมากและการชนถี่มาก โมเมนตัมที่ผนังได้รับจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา แต่จากกฎข้อสองของนิวตัน โมเมนตัมที่ผนังได้รับต่อเวลาคือแรง (F) ที่กระทำต่อผนัง แรงนี้เกิดจากการชนของโมเลกุลทั้งหลาย ดังนั้น

$$F = \sum_{i=1}^{N} \frac{m v_{xi}^2}{L}$$

ถ้า v_i เป็นอัตราเร็วของโมเลกุลตัวที่ i ตามรูป 10.16 จะได้

$$v_i^2 = v_{xi}^2 + v_{yi}^2 + v_{zi}^2$$



รูป 10.16 องค์ประกอบ v_x, v_y, v_z ของความเร็ว v

อาจเขียนได้ว่า

$$v_1^2 + v_2^2 + \cdots v_i^2 + \cdots v_N^2 = (v_{x1}^2 + v_{x2}^2 + \cdots v_{xi}^2 + \cdots v_{xN}^2) + (v_{y1}^2 + v_{y2}^2 + \cdots v_{yi}^2 + \cdots v_{yN}^2) + (v_{z1}^2 + v_{z2}^2 + \cdots v_{zi}^2 + \cdots v_{zN}^2)$$

หรือ $$\sum_{i=1}^{N} v_i^2 = \sum_{i=1}^{N} v_{xi}^2 + \sum_{i=1}^{N} v_{yi}^2 + \sum_{i=1}^{N} v_{zi}^2$$

เมื่อหารสมการข้างต้นนี้ด้วย N และแทนค่าเฉลี่ยของอัตราเร็วกำลังสองซึ่งเขียนได้เป็น

$$< v^2 > = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} v_i^2$$

และ $$< v_x^2 > = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} v_{xi}^2 \quad , < v_y^2 > = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} v_{yi}^2 \quad , < v_z^2 > = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} v_{zi}^2$$

ดังนั้น จะได้

$$< v^2 > = < v_x^2 > + < v_y^2 > + < v_z^2 >$$

เนื่องจากโมเลกุลทั้งหลายเคลื่อนที่โดยมีทิศทางแบบสุ่ม ดังนั้นจะได้ว่า

$$< v_x^2 > = < v_y^2 > = < v_z^2 >$$

จากสมการข้างบนจะได้

$$3\langle v_x^2\rangle = \langle v^2\rangle$$

หรือ $$\langle v_x^2\rangle = \frac{1}{3}\langle v^2\rangle$$

จากสมการแรงที่กระทำต่อผนังอาจเขียนได้ในรูป

$$F = \frac{m}{L}\sum_{i=1}^{N} v_{xi}^2 = \frac{m}{L}N.\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} v_{xi}^2$$

ดังนั้น

$$F = \frac{m}{L}N.\langle v_x^2\rangle$$

นั่นคือ

$$F = \frac{1}{3}\frac{m}{L}N.\langle v^2\rangle$$

เนื่องจากความดันแก๊สที่ผนังของกล่องคือ F/L^2 ดังนั้นจากสมการข้างบน ความดันแก๊สที่ผนัง A ของกล่องคือ

$$P = \frac{F}{L^2} = \frac{1}{3}\frac{m}{L^3}N.\langle v^2\rangle$$

$$= \frac{1}{3}\frac{m}{V}N.\langle v^2\rangle$$

โดย $L^3 = V$ = ปริมาตรของกล่อง จากหลักความสมมาตรพบว่าความดันแก๊สที่ผนังอื่น ก็มีค่าเท่ากับความดันแก๊สที่ผนัง A ซึ่งเราได้จากสมการข้างบน จากสมการนี้จะได้

$$PV = \frac{1}{3}mN\langle v^2\rangle \qquad \textbf{(10.9)}$$

$$= \frac{2}{3}N.\frac{1}{2}m\langle v^2\rangle$$

พลังงานจลน์เฉลี่ยของแต่ละโมเลกุลในกล่องคือ

$$\langle E_k\rangle = \frac{1}{N}\left(\frac{1}{2}mv_1^2 + \frac{1}{2}mv_2^2 + \ldots \frac{1}{2}mv_N^2\right)$$

$$= \frac{1}{2}m.\frac{1}{N}\left(\sum_{i=1}^{N} v_i^2\right)$$

$$= \frac{1}{2}m\langle v^2\rangle$$

แทนใน (10.9) ได้

$$PV = \frac{2}{3}N\langle E_k \rangle$$

เพื่อให้สมการนี้ สอดคล้องกับกฎของแก๊สอุดมคติในสมการ (10.7) แบร์นูลลีเสนอว่าพลังงานจลน์โดยเฉลี่ยของการเคลื่อนที่ของโมเลกุลในกล่องแปรผันโดยตรงกับอุณหภูมิเคลวินของแก๊ส

$$< E_k > \propto T \qquad \text{หรือ} \qquad < E_k > = \frac{3}{2}kT$$

โดย $3k/2$ เป็นค่าคงตัวของการแปรผัน เมื่อแทนใน (10.37) จะได้

$$PV = \frac{2}{3}N.\frac{3}{2}kT = NkT$$

ซึ่งสอดคล้องกับกฎของแก๊สอุดมคติ(10.8) ถ้า k คือค่าคงตัวของโบลต์ซมันน์ (k_B) นั่นคือ

$$PV = Nk_BT \qquad \textbf{(10.10)}$$

โดยสรุป สมมติฐานที่กล่าวในตอนต้นของหัวข้อนี้สามารถอธิบายที่มาของความดันของแก๊สได้อย่างสอดคล้องกับกฎของแก๊สอุดมคติดังสมการ (10.8) โดยต้องเพิ่มสมมุติฐานอีกข้อหนึ่งคือ

5. พลังงานจลน์เฉลี่ยของการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของแก๊สแปรผันโดยตรงกับอุณหภูมิเคลวิน ดังสมการ

$$< E_k > = \frac{3}{2}k_BT \qquad \textbf{(10.11)}$$

โดย k_B คือ ค่าคงตัวของโบลต์ซมันน์

และสรุปได้ว่าสมมุติฐานของแก๊สถูกต้อง กล่าวคือแก๊สประกอบด้วยโมเลกุลขนาดเล็กๆ จำนวนมากที่เคลื่อนที่ตลอดเวลา

10.3.3 อัตราเร็วของโมเลกุลของแก๊ส

จากสมการ $\langle E_K \rangle = \frac{1}{2}m\langle v^2 \rangle$ และ (10.11) จะได้

$$\frac{1}{2}m < v^2 > = \frac{3}{2}k_BT$$

สมการนี้ทำให้ทราบอัตราเร็วกำลังสองเฉลี่ยของโมเลกุล ถ้าให้

$$< v^2 > = v_{rms}^2 \quad \text{หรือ} \quad v_{rms} = \sqrt{< v^2 >}$$

โดย v_{rms} เป็นความเร็วอาร์เอ็มเอส (rms ย่อมาจาก root mean square) ซึ่งเป็นความเร็วกำลังสองเฉลี่ย แทนใน $\frac{1}{2}m < v^2 > = \frac{3}{2}k_B T$ จะได้

$$\frac{1}{2}mv_{rms}^2 = \frac{3}{2}k_B T$$

ซึ่งจะสามารถคำนวณ v_{rms} ที่อุณหภูมิ T เคลวินของโมเลกุลได้ ถ้าทราบมวลของโมเลกุล 1 ตัว

สมการข้างบนอาจเขียนได้อีกแบบหนึ่งดังนี้คือ

$$v_{rms}^2 = \frac{3k_B T}{m} \qquad \textbf{(10.12)}$$

$$v_{rms}^2 = \frac{3(k_B N_A)T}{mN_A}$$

จะได้ว่า

$$v_{rms}^2 = \frac{3RT}{M}$$

หรือ

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} \qquad \textbf{(10.13)}$$

เนื่องจาก m ในสมการข้างต้น มีหน่วยเป็นกิโลกรัมในระบบเอสไอ หน่วยของ M ในสมการ (10.13) จะต้องเป็นหน่วยกิโลกรัมต่อโมล ในตัวอย่างจากตาราง 10.2 มวลโมเลกุลของแก๊สออกซิเจนที่ใช้ในสมการ (10.13) จึงต้องเป็น 32×10^{-3} กิโลกรัมต่อโมล

ตัวอย่าง 10.8 จงหา v_{rms} ของโมเลกุลของแก๊สออกซิเจนที่มีอุณหภูมิ 300 เคลวิน

วิธีทำ ในสมการ (10.13)

$M = 32 \times 10^{-3}$ กิโลกรัมต่อโมล

$R = 8.31$ J/K mol , $T = 300$ K

แทนค่าได้

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{3\ (8.31\ \text{J/K.mol})\ (300\ \text{K})}{32 \times 10^{-3}\ \text{kg/mol}}}$$

$$= 483.4 \text{ m/s}$$

คำตอบ อัตรา v_{rms} ของโมเลกุลออกซิเจนที่อุณหภูมิ 300 เคลวินเท่ากับ 483 เมตรต่อวินาที

การหา v_{rms} ในตัวอย่างข้างบนอาจทำได้อีกวิธีหนึ่งโดยใช้สมการ(10.12)จากสมการนี้

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{3k_BT}{m}}$$

จากสมการ (10.12) มวลของโมเลกุลออกซิเจน 1 ตัว

$$m = \frac{M}{N_A} = \frac{32 \times 10^{-3}\ kg.mol^{-1}}{6.02 \times 10^{23}\ mol^{-1}} = 5.316 \times 10^{-26}\ \text{kg}$$

ดังนั้น $$v_{rms} = \sqrt{\frac{3(1.38 \times 10^{-23}\ J/K)(300\ K)}{5.316 \times 10^{-26}\ kg}} = 483.4\ \text{m/s}$$

แต่วิธีนี้มีตัวเลขซึ่งทำให้คำนวณยุ่งยากกว่าวิธีก่อน

ตัวอย่างได้ให้ข้อสังเกตที่สำคัญดังนี้คือ

ก. โมเลกุลที่มีมวลมาก v_{rms} จะมีค่าน้อยกว่าโมเลกุลที่มีมวลน้อยที่อุณหภูมิเดียวกัน

ข. ถึงแม้การตั้งสมมุติฐานของแก๊สในหัวข้อ 10.3.1 ให้โมเลกุลในกล่องเหมือนกันหมด แต่การศึกษาในระดับสูง จะพบว่าสมการ (10.12) และ (10.13) ซึ่งสามารถใช้คำนวณ v_{rms} ของโมเลกุลของแก๊สชนิดต่างๆที่อยู่รวมกันได้ เช่นโมเลกุลของอากาศเป็นต้น

ค. อัตราเร็ว v_{rms} ไม่เท่ากับอัตราเร็วเฉลี่ย$< v >$ ดังเห็นได้จากกรณี มีโมเลกุล 5 ตัว ซึ่งมีอัตราเร็ว 1,2,3,4 และ 5 เมตรต่อวินาที จะได้

$$< v > = \frac{1}{5}(1+2+3+4+5) = 3.00\ \text{m/s}$$

และ $$< v^2 > = \frac{1}{5}(1^2+2^2+3^2+4^2+5^2) = 11\ \text{m}^2/\text{s}^2$$

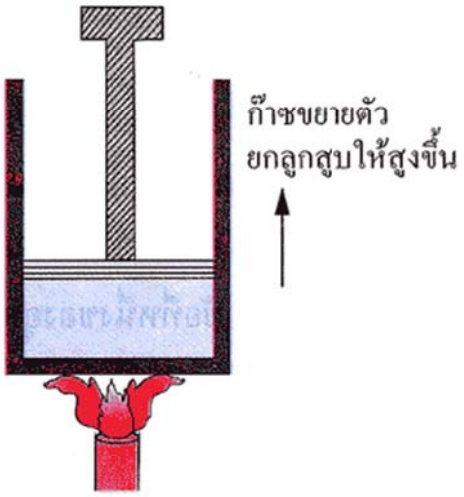
จาก (10.40) $$v_{rms} = \sqrt{< v^2 >} = 3.32\ \text{m/s}$$

จะเห็นได้ว่า v_{rms} ไม่เท่ากับ $< v >$ แต่มีค่าใกล้เคียงกัน และ $v_{rms} \geq < v >$ เสมอ ดังนั้น เราอาจทราบค่าโดยประมาณของ $< v >$ ได้จาก v_{rms} ซึ่งคำนวณได้ง่าย

10.4 พลังงานภายในของระบบ

ระบบประกอบด้วยสิ่งต่างๆที่อยู่ในขอบเขตที่ต้องการศึกษา เช่น ระบบโมเลกุลของแก๊สจะประกอบด้วยโมเลกุลของแก๊สทุกตัวในภาชนะที่ต้องการศึกษา พลังงานภายในของระบบ คือ พลังงานทั้งหมดของโมเลกุลของแก๊สในระบบนั้น

สำหรับแก๊สธรรมชาติ สถานการณ์จะมีความซับซ้อนขึ้น เพราะโมเลกุลของแก๊สมีแรงกระทำต่อกัน ดังนั้นในแต่ละขณะพลังงานศักย์ทั้งหมดจึงขึ้นกับตำแหน่งของโมเลกุลทุกตัว



รูป 10.17 การให้พลังงานความร้อนแก่ระบบเพื่อให้ระบบทำงาน

เพราะในแก๊สอุดมคติไม่มีแรงใดๆ กระทำต่อโมเลกุลไม่ว่าจะเป็นแรงหรือแรงโน้มถ่วงของโลก ดังนั้นพลังงานทั้งหมดของโมเลกุลจึงเป็นพลังงานจลน์แต่เพียงอย่างเดียว ด้วยเหตุนี้ผลรวมของพลังงานจลน์ทั้งหมดของโมเลกุลก็คือพลังงานภายใน U ของแก๊สนั่นเอง ดังนั้น

$$U = N < E_k >$$

จากสมการ (10.11)

$$U = \frac{3}{2} N k_B T \qquad \textbf{(10.14)}$$

สำหรับแก๊สอุดมคติในภาชนะปิดที่ N จะคงตัว พลังงานภายในจึงขึ้นกับอุณหภูมิเท่านั้น

กฎของความร้อน

ความร้อน คือ พลังงานที่สามารถถ่ายโอนจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้เพราะที่ทั้งสองมีความแตกต่างของอุณหภูมิ ถ้านำวัตถุ 2 ก้อนที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันมาสัมผัสกัน จะมีการถ่ายโอนของความร้อนจากวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงไปยังวัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำ การไหลนี้เกิดเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิ หาได้เกิดจากความแตกต่างของพลังงานภายในไม่ วัตถุจะถ่ายโอนพลังงานความร้อนกันจนกระทั่งมีอุณหภูมิเท่ากัน สถานการณ์ที่วัตถุไม่มีการถ่ายโอนความร้อนเมื่อมีอุณหภูมิเท่ากันนี้ เรียกว่า วัตถุทั้งสองอยู่ในสภาพสมดุลทางความร้อน

กฎข้อที่ศูนย์ของอุณหพลศาสตร์แถลงว่า ถ้าวัตถุ A และวัตถุ B อยู่ในสภาวะสมดุลทางความร้อน และวัตถุ A กับวัตถุ C อยู่ในสภาวะสมดุลทางความร้อนแล้ว วัตถุ B และวัตถุ C ก็จะอยู่ในสภาวะสมดุลทางความร้อนด้วย กล่าวคือมีอุณหภูมิเท่ากันด้วย

ดังที่กล่าวข้างต้น อุณหพลศาสตร์ คือ การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายโอนพลังงานความร้อน และงานที่ระบบกระทำหรือถูกกระทำโดยสิ่งแวดล้อม ถ้าระบบรับพลังงานความร้อน Q จากสิ่งแวดล้อมและทำงานได้ W ให้กับสิ่งแวดล้อม พร้อมกันนั้นระบบก็มีพลังงานภายในเปลี่ยนไป ΔU หรือ $U_2 - U_1$ จากกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ จะได้ว่า

$$Q = U_2 - U_1 + W \qquad \textbf{(10.15)}$$

หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่าความร้อนที่ระบบได้รับเท่ากับพลังงานภายในของระบบที่เพิ่มขึ้นบวกกับงานที่ระบบได้รับจากสิ่งแวดล้อม จึงเห็นได้ว่ากฎข้อที่หนึ่งนี้คือกฎการอนุรักษ์พลังงานนั่นเอง

งาน W ที่ระบบทำหรือรับจากสิ่งแวดล้อมจะเกิดขึ้นเมื่อมีการถ่ายโอนพลังงานโดยวิธีกล ซึ่งมีแรงมาเกี่ยวข้อง ส่วนพลังงานความร้อน Q สามารถถ่ายโอนได้โดยอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิ อย่างไรก็ตามงานอาจเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้ และในทางกลับกัน พลังงานความร้อนก็อาจเปลี่ยนเป็นงานได้เช่นกัน

ถ้าพิจารณาการอัดแก๊สในกระบอกสูบ เมื่อออกแรงดันลูกสูบให้แก๊สภายในกระบอกสูบมีปริมาณน้อยลง ในการทำงานให้กับระบบ W จะมีค่าเป็นลบ ถ้าไม่มีความร้อนออกจากแก๊ส อุณหภูมิของแก๊สภายในกระบอกสูบจะสูงขึ้น พลังงานภายในระบบ U มากขึ้น นั้นคือ ΔU เป็นบวก

แต่ถ้าแก๊สภายในระบบขยายตัวดันลูกสูบให้เคลื่อนที่ งานที่ระบบทำจะเป็นบวก ถ้าไม่มีความร้อนเข้าสู่แก๊ส อุณหภูมิของแก๊สจะลดลงแสดงว่าพลังงานภายในของระบบลดลง ΔU จะมีค่าเป็นลบ

ข้อสรุปเกี่ยวกับเครื่องหมายของ U W Q แสดงในตาราง 10.3

ตาราง 10.3

ปริมาณ		เครื่องหมาย
U	พลังงานภายในระบบที่เพิ่มขึ้น	+
	พลังงานภายในระบบที่ลดลง	-
W	งานที่ทำโดยระบบ	+
	งานที่ให้กับระบบ	-
Q	ความร้อนเข้าสู่ระบบ	+
	ความร้อนออกจากระบบ	-

ถ้าระบบมีการเปลี่ยนแปลงน้อย ๆ อาจใช้สัญลักษณ์ ΔQ แทน Q ΔU แทน U และ ΔW แทน W ได้ ดังนั้นกฎที่ 1 จะเขียนได้เป็น

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta W \qquad \textbf{(10.16)}$$

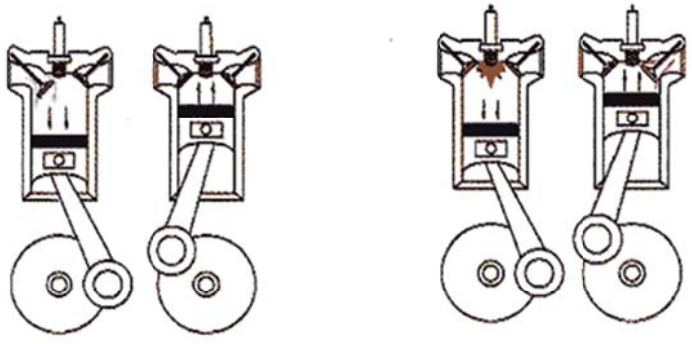
ซึ่งมีความหมายเหมือนกับสมการ (10.15)

บทนี้จะกล่าวถึงระบบแก๊สอุดมคติในภาชนะปิด เช่น แก๊สในกระบอกสูบที่มีลูกสูบปิด หรือแก๊สปริมาณหนึ่งที่มีมวลคงตัว อย่างไรก็ตามกฎที่ 1 ก็สามารถใช้กับระบบอื่นๆ ได้

10.5 การประยุกต์

หลักการขยายตัวและหดตัวของแก๊สเมื่อได้รับหรือคายความร้อนสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องยนต์ซึ่งทำงานโดยการเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานกลได้เครื่องยนต์ที่น่าสนใจมีหลายแบบ ดังตัวอย่างต่อไปนี้

10.5.1 เครื่องยนต์แบบต่าง ๆ



ก. ข. ค. ง.

รูป 10.18 การทำงานของเครื่องยนต์เบนซินที่มีการสันดาป ภายใน 4 จังหวะ

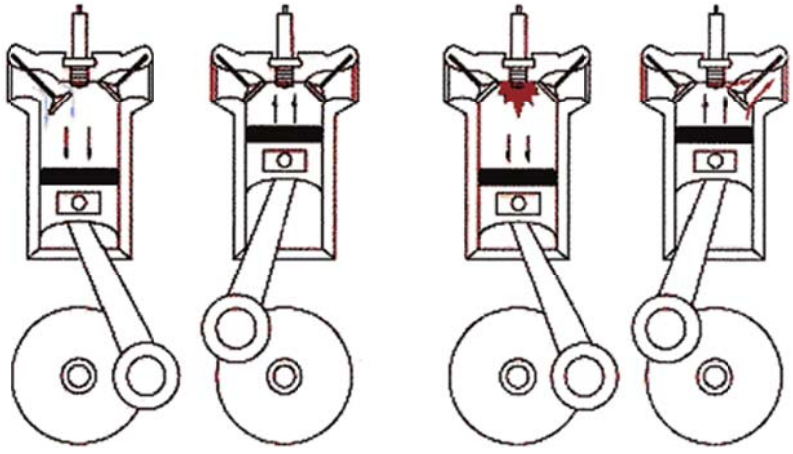
วัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเบนซินหรือน้ำมันแก๊สโซลีนเป็นเชื้อเพลิง โดยมีการทำงาน ดังรูป 10.18

ในรูป ก. ท่อไอดีเปิด ส่วนท่อไอเสียปิดให้อากาศผสมกับไอน้ำมัน (7% ของไอน้ำมัน 93% ของอากาศโดยน้ำหนัก) ที่อุณหภูมิประมาณ 40°C ถูกดูดเข้าไปในกระบอกสูบผ่านวาล์วของไอดีโดยลูกสูบเลื่อนลง

ในรูป ข. ลูกสูบเลื่อนขึ้นวาล์วไอดีเปิด และวาล์วไอเสียปิดเป็นช่วงอัด อากาศที่ผสมไอน้ำมันถูกอัดจนอุณหภูมิเพิ่มขึ้นประมาณ 300 องศาเซลเซียส

ในรูป ค. เมื่อหัวเทียนเกิดประกายไฟฟ้าทำให้อากาศผสมและไอน้ำมันติดไฟจึงให้พลังงานความร้อน Q_H และความดันเพิ่มขึ้นมีพลังให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นด้วยเป็นประมาณ 2000 องศาเซลเซียส ช่วงนี้เป็นช่วงที่เครื่องยนต์ให้กำลัง ความดันที่เพิ่มขึ้นจะผลักลูกสูบให้เคลื่อนลง ทำให้แก๊สขยายตัวมีผลทำให้ความดันและอุณหภูมิของแก๊สลดลง

ในรูป ง. แสดงช่วงคายไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ของอากาศเชื้อเพลิง ไอเสียจะถูกขับออกจากกระบอกสูบโดยการเลื่อนขึ้นของกระบอกสูบ เมื่อลูกสูบขึ้นไปจนสุด วาล์วไอเสียปิด วาล์วไอดีจะเปิดเช่นเดียวกับในตอนแรกแล้ววัฏจักรก็เริ่มต้นอีกครั้งหนึ่ง



รูปที่ 10.19 แผนภาพแสดงวัฏจักรของเครื่องยนต์ดีเซล

- วัฏจักรของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซล หรือน้ำมันโซลาเป็นเชื้อเพลิง มีการทำงานอย่างไร ให้นักเรียนไปสืบค้นมาตอบ

10.5.2 ไอน้ำในอากาศและความดันไอ

ถ้าเทน้ำใส่ภาชนะโดยไม่ให้เต็ม จากนั้นปิดฝาภาชนะให้แน่น เมื่อปล่อยทิ้งไว้ ถึงแม้อุณหภูมิในขณะนั้นจะสูงไม่ถึงจุดเดือดของน้ำแต่ที่บริเวณผิวน้ำก็ยังมีโมเลกุลของน้ำบางตัวที่มีพลังงานจลน์สูงพอที่จะทำให้มันหลุดหนีจากผิวออกไปในอากาศกลายเป็นโมเลกุลของไอน้ำในอากาศได้ นี่คือการระเหยเมื่อทิ้งน้ำไว้นานๆ ไอน้ำภายในภาชนะจะเพิ่มมากขึ้น ไอน้ำนี้ประพฤติตัวเหมือนแก๊ส คือ มีความดัน ซึ่งเรียกว่า **ความดันไอ** ซึ่งตามปกติเป็นส่วนหนึ่งของความดันบรรยากาศ อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิหนึ่งๆ ความดันไอน้ำจะมีค่าสูงสุดค่าหนึ่ง ซึ่งเรียกว่า **ความดันไออิ่มตัว** และถ้าความดันสูงขึ้นอีกโมเลกุลของไอน้ำก็จะอยู่ใกล้กันมากขึ้น แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลจะทำให้โมเลกุลไอน้ำจับกันและกลั่นตัวเป็นน้ำตกลงแหล่งน้ำเดิม ถ้าอุณหภูมิถึงจุดเดือด ความดันไออิ่มตัวจะเท่ากับความดันบรรยากาศพอดี ความดันไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิต่างๆ ในหน่วยของบรรยากาศมีแสดงในตาราง 10.4

ตาราง 10.4 ความดันไออิ่มตัวของน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	ความดันไออิ่มตัวของน้ำ (atm)
0	0.0060
10	0.0121
20	0.0230
30	0.0417
40	0.0725
50	0.1214
60	0.1963
70	0.3073
80	0.4672
85	0.5704
90	0.6919
92	0.7462
94	0.8039
96	0.8654
98	0.9306
100	1.0000

จากตาราง 10.4 พบว่าความดันไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเท่ากับ 1 บรรยากาศพอดี ดังนั้นน้ำจึงเดือดที่ 100 องศาเซลเซียส ขณะที่อากาศมีความดัน 1 บรรยากาศ แต่ถ้าเราขึ้นไปยอดเขาสูง เช่น ยอดดอยอินทนนท์ ที่นั้นความดันของอากาศอาจลดลงเหลือ 0.8 บรรยากาศ ตารางแสดงว่าที่ยอดเขา น้ำจะเดือดที่อุณหภูมิประมาณ 94 องศาเซลเซียส ในทางกลับกัน ถ้าต้องการให้น้ำเดือดที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส จะต้องเพิ่มความดัน ซึ่งทำได้โดยการต้มน้ำภายใต้ภาชนะปิด เช่น หม้อต้มความดัน โดยในหม้อนี้ขณะต้มน้ำ ความดันภายในจะเพิ่มขึ้นจนถึงค่าหนึ่งที่สูงกว่า 1 บรรยากาศ เช่น 1.4 บรรยากาศ จากนั้นหม้อน้ำก็จะมีวาล์วปล่อยให้อากาศภายในรั่วออกเพื่อให้ความดันสูงสุดเท่ากับ 1.4 บรรยากาศ ซึ่งจะทำให้น้ำเดือดที่ประมาณ 110 องศาเซลเซียส เพื่อสามารถต้มเนื้อให้เปื่อยได้ง่ายกว่าต้มที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

ความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศมีนิยามดังนี้

ความชื้นสัมพัทธ์ = 100 × (ความดันไอน้ำในอากาศ / ความดันไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิของอากาศ) %

โดยทั่วไปถ้าอุณหภูมิลดขณะที่อากาศอยู่นิ่ง ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศจะเพิ่มขึ้น เพราะน้ำจะระเหยยากขึ้น ในทางกลับกันถ้าอุณหภูมิเพิ่ม ความชื้นสัมพัทธ์จะลดเพราะน้ำระเหยง่ายขึ้น นี่จึงเป็นเหตุที่ทำให้เราตากผ้าในแสงแดด เพราะแดดจะทำให้ผ้าและอากาศบริเวณนั้นร้อนขึ้น น้ำจึงระเหยง่ายขึ้นและผ้าก็จะแห้งเร็วขึ้น

พื้นที่ต่างๆ ในประเทศไทยส่วนใหญ่มีความชื้นสัมพัทธ์สูงเช่นอาจสูงถึง 80% โดยเฉพาะในหน้าฝน เวลาฝนตกใหม่ๆ หรือหยุดตกใหม่ๆ ความชื้นสัมพัทธ์อาจสูงถึง 100% ดังนั้นในขณะนั้นผ้าที่ตากจะไม่แห้งเลย แต่ในหน้าหนาวเมื่อลมเย็นพัดมาจากประเทศจีน ลมจะนำอากาศแห้งมาด้วย ทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ลดต่ำ ทำให้ผิวหนังแตกได้ง่าย โดยเฉพาะที่ใบหน้า

ขอให้สังเกตว่าเครื่องปรับอากาศสามารถทำให้อุณหภูมิในห้องลดลงได้ โดยการดูดพลังงานความร้อนจากอากาศในห้องที่อุณหภูมิต่ำไปถ่ายให้อากาศนอกห้องที่มีอุณหภูมิสูงได้ นอกจากนั้นเครื่องปรับอากาศก็ยังทำหน้าที่ลดความชื้นด้วย โดยการดูดอากาศในห้องไปผ่านคอยล์ที่เย็น เพื่อทำให้ไอน้ำในห้องกลั่นตัวเป็นหยดน้ำ ความชื้นจะได้ลดลง ตามปกติในห้องปรับอากาศมีความชื้นประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์เท่านั้นเองซึ่งน้อยกว่าความชื้นสัมพัทธ์นอกห้อง ในการทำเช่นนี้เครื่องปรับอากาศต้องทำงานหนักขึ้นมากเพราะทุกๆ 1 กรัมที่ไอน้ำกลั่นตัวมันจะต้องคายพลังงานความร้อนออก 2,256 จูล ดังนั้นจึงมีการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าเพื่องานนี้มาก

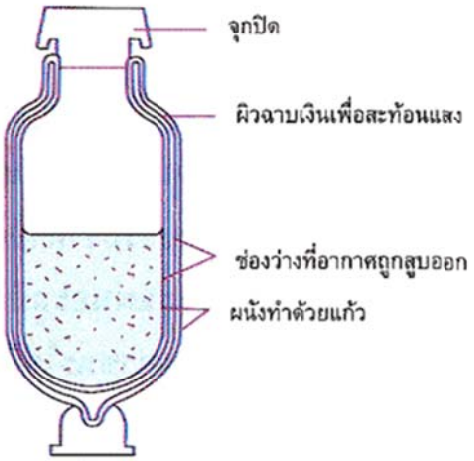
แต่หลังจากเครื่องปรับอากาศทำงานไปนานๆ และเมื่อความชื้นลดลงมาก เครื่องปรับอากาศสามารถทำงานเบา

แต่ถ้าในห้องมีอากาศเสียมาก เช่น มีการสูบบุหรี่ ห้องต้องมีการถ่ายเทอากาศ โดยดูดอากาศจากภายนอกเข้ามาเปลี่ยนกับอากาศภายในห้องโดยใช้พัดลมดูดอากาศ ในการนี้จะมีการดึงความชื้นเข้ามา ทำให้เครื่องปรับอากาศต้องทำงานหนักอย่างไม่รู้จบ และสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้ามาก ดังนั้นจึงควรรักษาอากาศภายในห้องปรับอากาศให้สะอาดที่สุดเท่าที่จะทำได้

ตัวอย่างที่ยกมาข้างบนนี้เป็นเพียงตัวอย่างเล็กน้อยที่ทำงานโดยการประยุกต์ความรู้เรื่องความชื้นในอากาศ ดังนั้นการศึกษาเรื่องนี้อย่างละเอียด จะทำให้นักเรียนได้ความรู้ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในชีวิตประจำวันได้ นอกจากนี้แล้วเรายังมีการประยุกต์ที่น่าสนใจเกี่ยวกับการถ่ายโอนความร้อนอีกดังต่อไปนี้

ก. ขวดเทอร์มอส

ขวดเทอร์มอสเป็นขวดที่สามารถปิดกั้นการส่งผ่านพลังงานความร้อนระหว่างภายนอกขวดและกับในขวดได้ จึงทำให้อุณหภูมิภายในขวดคงที่ได้ ทำให้สามารถใช้เป็นกระติกน้ำร้อน หรือกระติกน้ำแข็งได้ ขวดทำด้วยแก้วสองชั้น อากาศที่อยู่ระหว่างชั้นแก้วถูกสูบออกเพื่อป้องกันการนำและการพาความร้อน นอกจากนั้นที่ผิวแก้วยังมีการฉาบเงิน เพื่อป้องกันการแผ่รังสีความร้อนจากภายนอก ดังแสดงในรูป 10.20 สำหรับกระติกน้ำร้อน มักมีคอขวดที่เล็กเพื่อป้องกันการนำความร้อนออกทางด้านนี้ และทั้งกระติกน้ำร้อนส่วนใหญ่มักหุ้มด้วยพลาสติกหรือวัสดุที่ยืดหยุ่นเพื่อป้องกันแรงกระทบต่างๆจากภายนอกขณะใช้งาน กระติกลักษณะนี้สามารถควบคุมอุณหภูมิภายในไม่ให้เปลี่ยนแปลงมากได้เป็นเวลานาน



รูป 10.20 แสดงโครงสร้างภายในของกระติกน้ำร้อน

ข. ใยแก้ว

ใยแก้วทำด้วยแก้วเส้นมีขนาดเล็กมากซึ่งถูกนำมาขดรวมกันแน่น ใยแก้วส่วนมากมักมีสีเหลืองอ่อน และมีลักษณะคล้ายสำลีแต่มีความหนาแน่นกว่ามาก เวลากดใยดูจะยืดหยุ่นตัวได้เล็กน้อย บริเวณระหว่างใยแก้วมีโพรงอากาศขนาดเล็กมากมาย เนื่องจากอากาศเป็นฉนวนความร้อนที่ดีมาก ดังนั้นอากาศจะป้องกันมิให้มีการนำความร้อนผ่านใยแก้วได้ง่าย และเนื่องจาก

โพรงอากาศมีขนาดเล็กมากนี่เอง การพาความร้อนโดยอากาศไม่มีเช่นกัน ผลก็คือขดใยแก้วจะมีสภาพนำความร้อนประมาณ 0.03 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน ซึ่งใกล้เคียงกับสภาพนำความร้อนของอากาศ และเนื่องจากแก้วสะท้อนและหักเหแสงหรือรังสีได้ดี ดังนั้นใยแก้วจะเบนรังสีที่มากระทบออกทุกทิศ ทำให้ใยแก้วสามารถสกัดกั้นการแผ่รังสีความร้อนได้ด้วย

แผ่นใยแก้วซึ่งด้านบนและล่างถูกหุ้มด้วยแผ่นพลาสติกนั้นเป็นที่นิยมปูบนฝ้าหลังคาเพื่อกั้นความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่มาตกกระทบหลังคาบ้าน แต่ผู้ใช้ก็มีข้อควรระวังคือ ไม่ควรฉีกใยแก้วเล่น เพราะเศษแก้วเล็กๆ จะฟุ้งกระจายเข้าไประคายบริเวณภายในจมูก ปอดและตาได้ และถ้าต้องการตัดแผ่นใยแก้ว ควรใส่เครื่องปกป้องตาและจมูกเพื่อกันอันตรายจากเศษใยแก้ว

เพราะใยแก้วสามารถดูดกลืนเสียงได้ดีมาก จึงนิยมใช้บุในห้องที่ต้องการให้ไร้เสียงสะท้อน หรือตามบริเวณรอบลำตัวเครื่องบินเพื่อกั้นเสียงเครื่องยนต์ไม่ให้รบกวนผู้โดยสาร เป็นต้น

ค. โฟมขาว

โฟมขาว (Polystyrene extrusion) เป็นสารพอลิสไตรีนได้รับการเตรียมให้ภายในมีฟองอากาศมากมาย เช่นเดียวกับกรณีใยแก้ว เพราะฟองอากาศช่วยสกัดกั้นการนำความร้อน ดังนั้นแผ่นโฟมขาวจึงมีสภาพนำความร้อนที่ใกล้เคียงกับอากาศซึ่งต่ำมาก วัสดุประเภทนี้จึงเป็นที่นิยมใช้เป็นวัสดุกันความร้อน เช่น ใช้เคลือบถ้วยกาแฟ หรือทำกล่องที่มีฝาปิดเพื่อเก็บน้ำแข็ง เป็นต้น เพราะโฟมขาวมีราคาค่อนข้างถูก แต่โฟมขาวกั้นการแผ่รังสีได้ไม่ดี ดังนั้นถ้าปิดทับด้านนอกภาชนะด้วยแผ่นอะลูมิเนียมบาง หรือพ่นด้วยสารเป็นเงาสะท้อนแสงก็จะสามารถรักษาอุณหภูมิภายในภาชนะได้ดีขึ้น

ข้อเสียของโฟมขาวคือ ติดไฟง่ายและให้แก๊สพิษ ดังนั้นถ้าใช้โฟมขาวเป็นวัสดุกันความร้อนในบ้าน ครอบครัวจะต้องระวังเป็นพิเศษ กรณีใช้โฟมขาวในการตบแต่งภายในอาคารเวลามีงานก็มีอันตรายเช่นกัน อย่างไรก็ตามปัจจุบันได้มีการพัฒนาโฟมขาวให้ติดไฟยากจึงลดอันตรายด้านนี้ได้พอสมควร

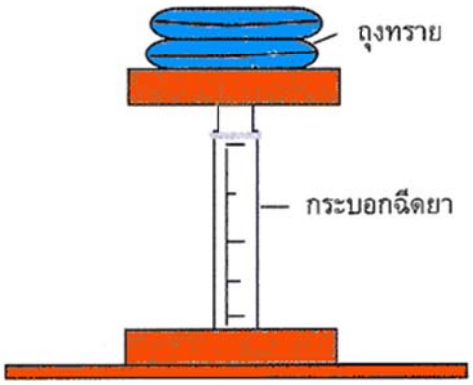
การทดลองและกิจกรรม

การทดลอง 10.1 กฎของบอยล์

วัตถุประสงค์ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันและปริมาตรของแก๊สเมื่ออุณหภูมิคงตัว

อุปกรณ์ อุปกรณ์สำหรับทดลองกฎของบอยล์ ประกอบด้วยแป้นยึดกระบอกฉีดยาสัตว์ขนาดใหญ่ที่อุดปลายไว้แล้ว ถุงทราย 500 กรัม 7-8 ถุง และเทอร์มอมิเตอร์สำหรับวัดอุณหภูมิของห้อง

วิธีทดลอง อากาศที่ถูกขังในหลอดฉีดยาจะเปลี่ยนปริมาตรตามความดัน สังเกตได้จากการใช้ถุงทรายกดทับแป้นโดยมีจำนวนต่างๆ ดังรูป บันทึกจำนวนถุงทรายที่ใช้กดและปริมาตรอากาศที่อ่านได้ ควรระวังที่จะเคาะกระบอกฉีดยาเบาๆ ก่อนอ่านปริมาตร เพื่อลดความไม่แน่นอนเนื่องจากความเสียดทานระหว่างกระบอกสูบกับลูกสูบ จัดทำตารางข้อมูลเบื้องต้นให้เหมาะสมและเข้าใจง่าย



รูป 10.21 ชุดทดลองกฎของบอยล์

เติมช่องข้อมูลที่เป็นส่วนกลับของปริมาตร $(1/V)$ แล้วอาจเขียนกราฟระหว่างจำนวนถุงทรายส่วนกลับของปริมาตรโดยตรง ถ้ากฎของบอยล์เป็นจริง กราฟที่ได้จะเป็นรูปอะไร

จำนวนถุงทรายไม่ใช่ความดัน แต่ความดันเป็นปฏิภาคตรงกับน้ำหนักของทรายทั้งหมดที่กด อนึ่งแรงที่กดแก๊สยังมีน้ำหนักของแป้นบนและตัวแกนซึ่งเบารวมอยู่ด้วย และไม่ควรลืมว่ามีแรงดันจากความดันของบรรยากาศคูณพื้นที่หน้าตัดของกระบอกสูบ (เมื่อไม่มีน้ำหนักถุงทรายกดเลย มีความดันเท่ากับความดันบรรยากาศอยู่แล้ว)

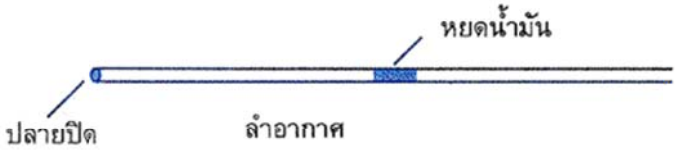
- ☐ ถ้าจะหาความดันของบรรยากาศจากกราฟระหว่างจำนวนถุงทรายกับส่วนกลับของปริมาตร จะต้องทำอย่างไร
- ☐ กราฟที่ได้จากการทดลองเป็นกราฟเส้นตรงหรือไม่และสอดคล้องกับกฎของบอยล์อย่างไร
- ☐ ถ้าอุณหภูมิระหว่างการทดลองเปลี่ยนแปลงมากจะมีผลต่อกราฟอย่างไร

การทดลอง 10.2 กฎของชาร์ลส์

วัตถุประสงค์ ศึกษาการเปลี่ยนปริมาตรของแก๊สเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนโดยให้ความดันคงตัว

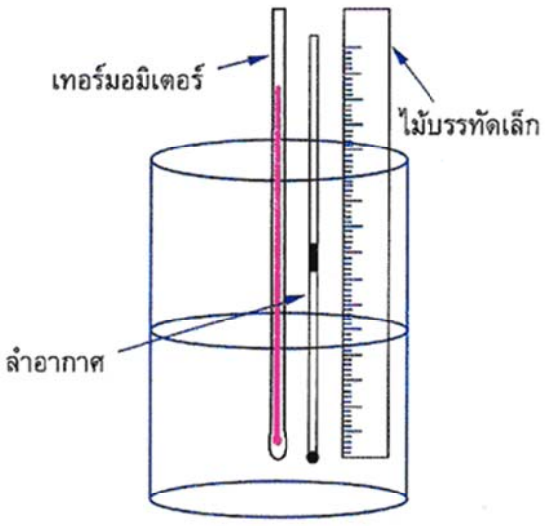
อุปกรณ์ หลอดแก้วเล็กหรือแคปปิลลารี ตะเกียงแอลกอฮอล์ น้ำมันเครื่องหรือน้ำมันหล่อลื่น (ความดันไอต่ำที่อุณหภูมิปกติ) ถ้วยใส่น้ำร้อน เทอร์มอมิเตอร์ และไม้บรรทัดสำหรับวัดความยาวของลำอากาศ

วิธีทดลอง ก่อนทดลองต้องปิดปลายหนึ่งของหลอดแคปปิลลารี โดยการลนไฟที่ปลายหลอดหลอมจนแก้วปิด และขณะที่หลอดยังร้อน (อาจใช้ผ้าหรือกระดาษรองที่จับ) จิ้มปลายอีกนิ้วอีกข้างหนึ่งที่เปิดเข้ากับหยดน้ำมัน เมื่ออากาศในหลอดค่อยๆ เย็นลงมันจะดูดน้ำมันเข้าไปส่วนหนึ่ง ทำให้มีลำอากาศขังอยู่ในท่อของหลอดแคปปิลลารี ซึ่งพร้อมที่จะนำไปทดลอง ดังรูป 10.22 (หลังจากอากาศเย็นสู่อุณหภูมิห้องแล้ว)



รูป 10.22 หลอดแคปปิลลารีที่จะทดลองและการจัดอุปกรณ์

ทดลองจุ่มหลอดที่เตรียมไว้ในน้ำร้อน พร้อมด้วยเทอร์มอมิเตอร์ โดยให้อุณหภูมิเริ่มต้นสูงประมาณ 70-80 องศาเซลเซียส เมื่ออ่านอุณหภูมิแล้วรีบวัดความยาวของลำอากาศ ซึ่งอาจจะทำได้โดยการจุ่มไม้บรรทัดขนาดเล็กลงในน้ำเพื่อเปรียบเทียบ หรือดึงหลอดขึ้นมาวัดอย่างรวดเร็ว และบันทึกข้อมูลไว้แล้ววัดซ้ำอีก เมื่ออุณหภูมิลดลง 5-10 องศาเซลเซียส ควรได้จุดข้อมูลไม่น้อยกว่า 5 จุด



เขียนกราฟระหว่างความยาวของลำอากาศ (แกนตั้ง) กับอุณหภูมิในองศาเซลเซียส (แกนนอน) ได้กราฟเป็นรูปอะไร สรุปได้ว่าการทดลองนี้เป็นไปตามกฎของชาร์ลส์หรือไม่

- การที่ตัวสเกลหรือหลอดแก้วยืดหรือหดตามอุณหภูมิที่เป็นปฏิภาคกับอุณหภูมิสัมบูรณ์นั้น มีผลต่อการทดลองนี้อย่างไร
- ท่ออากาศลักษณะนี้จะใช้ปรับเทียบเป็นเทอร์มอมิเตอร์สำหรับวัดอุณหภูมิได้หรือไม่
- การทำกระเปาะที่ปลายให้ใหญ่ขึ้นกว่าขนาดของหลอด จะมีผลไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเพียงไร
- เหตุใด เทอร์มอมิเตอร์แอลกอฮอล์จึงมักใส่สีและมีกระเปาะใหญ่ สมบัติของแอลกอฮอล์ประการใดที่ทำให้มันใช้เป็นเทอร์มอมิเตอร์ได้

กิจกรรม 10.1 การปรับเทียบเทอร์มอมิเตอร์

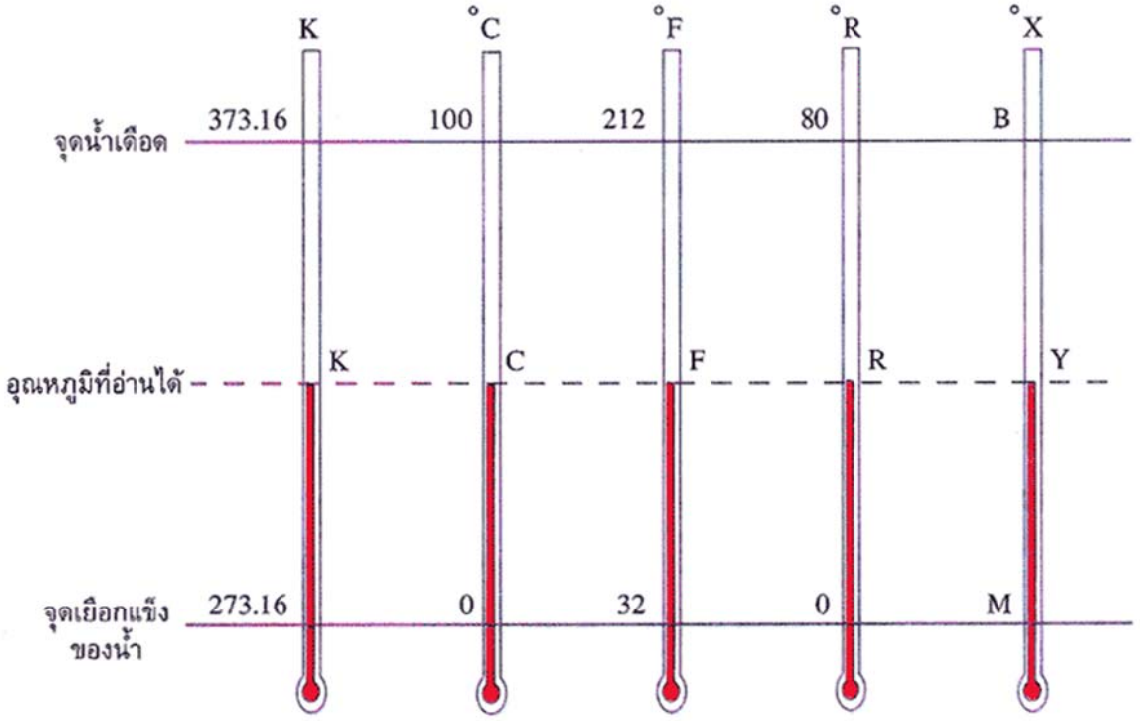
การปรับเทียบเทอร์มอมิเตอร์ที่ 0 °C และที่ 100 °C (หรือตรวจสอบว่าเทอร์มอมิเตอร์จะวัดได้ถูกต้องเพียงใด โดยเฉพาะที่สองอุณหภูมินี้) อาจทำได้ไม่ยาก เช่น การปรับเทียบจุด 0 °C ก็อาจทำได้โดยใช้น้ำแข็งสะอาด ทำเป็นก้อนเล็กๆ เพื่อใช้ใส่ภาชนะให้ละลาย ขณะที่น้ำแข็งยังละลายไม่หมด อุณหภูมิควรเป็น 0 °C (เพราะเหตุใด) ตรวจดูว่าเทอร์มอมิเตอร์ที่จุ่มไว้อ่านที่ 0 °C ถูกต้องหรือไม่

ณ ที่ 100 °C ก็อาจปรับเทียบเทอร์มอมิเตอร์ได้ในทำนองเดียวกัน โดยอาศัยการเดือดของน้ำบริสุทธิ์ แต่ต้องมีบารอมิเตอร์สำหรับตรวจวัดความดันบรรยากาศด้วยเพราะความดันบรรยากาศในบางวันและบางเวลา อาจแตกต่างจากความดันบรรยากาศมาตรฐาน เหตุใดจึงต้องวัดความดันด้วย

- เพราะเหตุใด จุดหลอมเหลวของน้ำแข็งและจุดเดือดของน้ำบริสุทธิ์ เป็นจุดสะดวกในการปรับเทียบอุณหภูมิ จุดหลอมเหลวและจุดเดือดของสารอื่นสามารถใช้ปรับเทียบอุณหภูมิได้หรือไม่

กิจกรรม 10.2 หาความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยของอุณหภูมิ

เนื่องจากประเทศต่างๆ เกือบทั่วโลกใช้การวัดอุณหภูมิในหน่วยองศาเซลเซียส แต่มีประเทศสหรัฐอเมริกาที่ใช้การวัดอุณหภูมิในหน่วยองศาฟาเรนไฮน์ เป็นผลให้บางหน่วยงานของไทยที่มีเครื่องจักร เครื่องมือที่สั่งมาจากประเทศสหรัฐอเมริกา ต้องวัดค่าอุณหภูมิในหน่วยองศาฟาเรนไฮน์



☐ ให้นักเรียนสืบค้นข้อมูล และวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยงานของอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส องศาฟาเรนไฮต์ และเคลวิน)

โจทย์แบบฝึกหัดบทที่ 10

คำถาม

1. ลูกแซคเป็นเครื่องดนตรีชนิดหนึ่งที่ใช้เขย่าเป็นจังหวะ การเขย่าลูกแซคจนจบเพลง อุณหภูมิภายในลูกแซคจะเปลี่ยนแปลงหรือไม่ อย่างไร
2. แท่งเหล็กมวล 5 กิโลกรัม และ 10 กิโลกรัม จะมีค่าความร้อนและค่าความจุความร้อนจำเพาะเท่ากันหรือต่างกัน อย่างไร
3. เมื่อใช้ค้อนตอกตะปูจะพบว่าตะปูร้อนขึ้น เมื่อสูบลมเข้ายางรถจักรยานจะพบว่ากระบอกสูบร้อนขึ้นกว่าเดิม เมื่อใช้สว่านเจาะเนื้อไม้จะพบว่าบริเวณเนื้อไม้ที่ถูกเจาะและดอกสว่านร้อนขึ้น พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นในแต่ละกรณีแปลงรูปมาจากพลังงานใด
4. นอกจากพลังงานเคมี พลังงานไฟฟ้าและพลังงานกลแล้ว มีพลังงานใดบ้างที่แปลงรูปเป็นพลังงานความร้อน จงตอบพร้อมทั้งยกตัวอย่างประกอบ
5. ถ้าใส่ตะปูที่เผาจนร้อนแดงลงในแก้วซึ่งใส่น้ำพอสมควร อุณหภูมิของน้ำและตะปูจะเปลี่ยนแปลงอย่างไร เมื่อปล่อยทิ้งไว้เป็นเวลานานพอ อุณหภูมิควรมีค่าอย่างไร พลังงานความร้อนของตะปูและน้ำมีการถ่ายโอนให้แก่กันหรือไม่ และพลังงานความร้อนของตะปูและน้ำมีการถ่ายโอนให้แก่สิ่งแวดล้อมหรือไม่
6. น้ำมีจุดควบแน่นอยู่ที่อุณหภูมิเท่าไร และมีค่าความร้อนแฝงจำเพาะของการควบแน่นเป็นเท่าไร
7. น้ำที่แข็งตัวเป็นน้ำแข็งกับไอน้ำที่ควบแน่นเป็นหยดน้ำในปริมาณที่เท่ากัน กระบวนการใดมีการคายความร้อนมากกว่ากัน
8. ก่อนฝนตก เหตุใด เราจึงรู้สึกว่าอากาศรอบตัวเราร้อนกว่าปกติ
9. เหตุใดแก๊สจึงฟุ้งกระจายเต็มภาชนะที่บรรจุและสามารถบีบอัดให้มีปริมาตรน้อยลงกว่าเดิมได้มาก
10. เมื่ออัดแก๊สให้มีปริมาตรลดลง ความดันของแก๊สจะเพิ่มขึ้นเพราะเหตุใด
11. เราจะทำให้แก๊สจำนวนหนึ่งมีความดันและปริมาตรเปลี่ยนไป โดยที่อุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงได้อย่างไร
12. แก๊สจำนวนหนึ่งอยู่ในกระบอกสูบ เมื่อความดันของแก๊สเพิ่มขึ้นเป็น 3 เท่า ปริมาตรของแก๊สจะลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของเดิม อัตราส่วนระหว่างอุณหภูมิของแก๊สครั้งหลังกับครั้งแรกมีค่าเท่าใด

13. แก๊สจำนวนหนึ่งเมื่อมีความดัน P_1 จะมีปริมาตร V_1 อุณหภูมิสัมบูรณ์ของแก๊สขณะนั้นเท่ากับ T_1 และความหนาแน่นของแก๊สเท่ากับ P_1 ถ้าแก๊สจำนวนดังกล่าวมีความดัน P_2 จะมีปริมาตร V_2 และอุณหภูมิสัมบูรณ์ของแก๊สเท่ากับ T_2 แก๊สจะมีความหน่าแน่นเท่าใด
14. ตารางข้างล่างแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดัน P และปริมาตร V ของแก๊สจำนวนหนึ่งที่มีมวลและอุณหภูมิคงตัว

    ก. จงเขียนกราฟระหว่างความดัน P และส่วนกลับของปริมาตร $\frac{1}{V}$ โดยให้ P อยู่บนแกนยืนและ $\frac{1}{V}$ อยู่บนแกนนอน

    ข. ถ้ามวลของแก๊สลดลงครึ่งหนึ่ง จงเขียนกราฟระหว่างความดัน P และส่วนกลับของปริมาตร $\frac{1}{V}$

$P\ (\times 10^5\ \text{Pa})$	$V\ (\times 10^{-3}\ \text{m}^3)$
10	0.4
8	0.5
6	0.7
4	1.0
2	2.0
1	4.0

15. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดัน P กับปริมาตร V และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดัน P กับส่วนกลับของปริมาตร $\frac{1}{V}$ มีลักษณะอย่างไรและจากกราฟที่ได้ สรุปความสัมพันธ์ระหว่างความดัน P กับปริมาตร V และความดัน P กับส่วนกลับของปริมาตร $\frac{1}{V}$ ได้อย่างไร
16. เมื่อแก๊สอุณหภูมิสูงขึ้น นักเรียนคิดว่าอัตราเร็วของโมเลกุลของแก๊สจะเปลี่ยนแปลงอย่างไร
17. แก๊สต่างชนิดกัน ถ้ามีอุณหภูมิเท่ากัน พลังงานจลน์เฉลี่ยของโมเลกุลเท่ากันหรือไม่
18. ถ้าความดันและปริมาตรของแก๊สเปลี่ยนไปโดยจำนวนโมเลกุลและอุณหภูมิคงตัว พลังงานภายในของระบบจะเปลี่ยนแปลงหรือไม่ อย่างไร

19. ถ้าอุณหภูมิและปริมาตรของแก๊สเปลี่ยนไปโดยจำนวนโมเลกุลและความดันคงตัว พลังงานภายในของระบบจะเปลี่ยนแปลงหรือไม่ อย่างไร
20. เมื่ออัดแก๊สในภาชนะให้มีปริมาตรน้อยลง ถ้าไม่มีการถ่ายโอนพลังงานเข้าหรือออกจากระบบ พลังงานภายในระบบจะเปลี่ยนแปลงหรือไม่ อย่างไร

ปัญหา

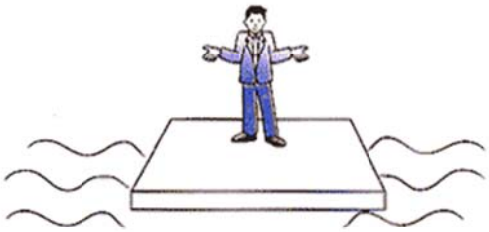
1. เพื่อประหยัดพลังงานไฟฟ้า นิยมปรับอุณหภูมิในห้องปรับอากาศให้เท่ากับ 26 องศาเซลเซียส ถามว่าอุณหภูมินี้เท่ากับกี่องศาฟาเรนไฮต์
2. ที่ความดัน 1 บรรยากาศ ไนโตรเจนเหลวจะเดือดที่อุณหภูมิ –321 องศาฟาเรนไฮต์ จงหาจุดเดือดนี้ในหน่วยองศาเซลเซียส และเคลวิน
3. อุณหภูมิใดในหน่วยองศาเซลเซียส และองศาฟาเรนไฮต์ ที่มีตัวเลขเท่ากัน
4. ใส่ก้อนอะลูมิเนียมมวล 80 กรัม อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสลงในน้ำมวล 200 กรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ซึ่งอยู่ในภาชนะฉนวนมีฝาฉนวนปิดมิดชิด เมื่อถึงสมดุลความร้อน อุณหภูมิของสารทั้งสองจะเป็นเท่าใด และพลังงานความร้อนออกที่ถูกถ่ายเทจากก้อนอะลูมิเนียมเป็นเท่าใด
5. จงหาพลังงานความร้อนที่ทำให้น้ำแข็งมวล 50 กรัม อุณหภูมิ –20 องศาเซลเซียส หลอมละลายกลายเป็นน้ำหมด และน้ำมีอุณหภูมิสูงจนเดือดเป็นไอที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสที่ความดัน 1 บรรยากาศ (ความร้อนจำเพาะของน้ำแข็งเท่ากับ 2.1 J/g K)
6. ใส่อัลลอย (โลหะผสม) ซึ่งมีมวล 120 กรัม อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ลงในน้ำมวล 250 กรัม อุณหภูมิ 98 องศาเซลเซียส ซึ่งอยู่ในภาชนะฉนวนการผสมนี้จะทำให้น้ำเดือดกี่กรัม กำหนดให้ความร้อนจำเพาะของอัลลอยเท่ากับ 500 J/kg
7. บอลลูนที่ภายในบรรจุแก๊สไฮโดรเจน ขณะอยู่ที่พื้นมีอุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส มีปริมาตร 1.8×10^{-2} ลูกบาศก์เมตร และมีความดัน 1.0×10^{5} พาสคัล ถ้าบอลลูนนี้ลอยสูงขึ้น จนอุณหภูมิแก๊สภายในลดลงเหลือ 18 องศาเซลเซียส ความดันลดลงเหลือ 0.8×10^{5} พาสคัล ถามว่าขณะนั้นบอลลูนมีปริมาตรเท่าใด
8. แก๊สไนโตเจนบรรจุอยู่ในภาชนะปิดที่มีปริมาตร 207 ลูกบาศก์เดซิเมตร มีอุณหภูมิ 303 เคลวิน และความดัน 1.01×10^{5} พาสคัล
   ก. จงหาจำนวนโมเลกุลของแก๊สไนโตรเจนในภาชนะ
   ข. ความดันของแก๊สไนโตรเจนในภาชนะ ถ้า
      i) เติมแก๊สไนโตรเจนที่มีจำนวนโมเลกุลเท่ากับคำตอบในข้อ ก. เข้าในภาชนะโดยให้อุณหภูมิ และปริมาตรของแก๊สในภาชนะยังคงเดิม
      ii) เติมแก๊สฮีเลียมที่มีจำนวนโมเลกุลเท่ากับจำนวนโมเลกุลในข้อ ก. เข้าไปในภาชนะโดยอุณหภูมิของแก๊สผสม และปริมาตรของภาชนะยังเท่าเดิม

9. ถ้าอากาศภายในห้องที่มีขนาด 50 ลูกบาศก์เมตร ถูกทำให้ร้อนขึ้นจากอุณหภูมิ 7 องศาเซลเซียสเป็น 35 องศาเซลเซียส โดยความดันยังคงเป็น 1 บรรยากาศเท่าเดิม ถามว่าจะมีอากาศรั่วออกไปจากห้องกี่กิโลกรัม กำหนดให้ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสที่ความดันปกติอากาศมีความหนาแน่น 1.14 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
10. ใส่ก้อนโลหะมวล 300 กรัม ที่มีอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสลงในน้ำแข็งป่นที่มีมวล 300 กรัม อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ซึ่งอยู่ในภาชนะที่ถูกหุ้มรอบด้วยฉนวนความร้อน ในที่สุดพบว่า น้ำแข็งละลายหมดกลายเป็นน้ำที่มีอุณหภูมิ 5.0 องศาเซลเซียส
    ก. ความร้อนเคลื่อนที่ออกจากก้อนโลหะเท่าใด
    ข. ค่าความร้อนจำเพาะของโลหะที่ได้จากการทดลองนี้เป็นเท่าใด
11. จงหา V_{rms} ของโมเลกุลไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 7 องศาเซลเซียส พลังงานจลน์เฉลี่ยของโมเลกุลไนโตรเจนที่อุณหภูมินี้เป็นเท่าใด
12. จงหา V_{rms} ของอะตอมนีออนที่อุณหภูมิ 450 เคลวิน พลังงานจลน์เฉลี่ยของโมเลกุลนีออนที่อุณหภูมินี้เป็นเท่าใด
13. ถ้าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สในภาชนะปิดเท่ากับ 6.3×10^{-21} จูล และจำนวนโมเลกุลต่อปริมาตรของแก๊สเท่ากับ 2.4×10^{25} โมเลกุลต่อลูกบาศก์เมตร จงหาความดันของแก๊สนี้
14. แก๊ส A และแก๊ส B เป็นแก๊สอะตอมเดี่ยวที่มีมวลและอุณหภูมิเท่ากัน แต่มวลโมเลกุลของแก๊ส A มากกว่าของแก๊ส B จงเปรียบเทียบ
    ก. พลังงานจลน์เฉลี่ยของโมเลกุลของแก๊ส A และ B
    ข. พลังงานจลน์ทั้งหมดของแก๊ส A และ B
15. แก๊สปริมาณหนึ่งอยู่ในกระบอกสูบถูกอัดจนมีความดันเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าของความดันเดิมโดยมีอุณหภูมิคงตัว จงหาอัตราส่วนระหว่างปริมาณต่อไปนี้ในสภาวะใหม่กับสภาวะเดิม
    ก. ปริมาตร
    ข. ความหนาแน่น
    ค. จำนวนโมเลกุลต่อปริมาตร
    ง. พลังงานจลน์เฉลี่ยของโมเลกุลของแก๊ส
16. ออกซิเจนมวล 16 กรัม ถูกบรรจุในขวดที่ปิดมิดชิดมีอุณหภูมิ 293 เคลวิน ถ้าอุณหภูมิของออกซิเจนในขวดเพิ่มขึ้น 20 เคลวิน พลังงานภายในจะเพิ่มขึ้นเท่าใด

17. แก๊สในกระบอกสูบรับความร้อนจากภายนอก 142 จูล ขณะที่แก๊สขยายตัวมันทำงานบนระบบภายนอก 160 จูล ถามว่าพลังงานภายในของแก๊สเพิ่มขึ้นหรือลดลงเท่าใด และอุณหภูมิของแก๊สเพิ่มขึ้นหรือลดลง
18. แก๊สในกระบอกสูบคายความร้อน 240 จูล ขณะที่พลังงานภายในเพิ่มขึ้น 50 จูล ถามว่าแก๊สหดตัวหรือขยายตัว

บทที่ 11
คลื่นกล

ถ้าลงไปเล่นน้ำในทะเลที่มีคลื่นแรง บางครั้งตัวเราถูกพัดพาไปไกล และหากอยู่ใกล้ฝั่งอาจจะถูกกระแทกให้ขึ้นฝั่ง จากเหตุการณ์นี้ย่อมรู้สึกได้ถึงพลังงานที่คลื่นน้ำทะเลถ่ายโอนให้กับตัวเรา ในกรณีที่ยืนบนแพเหล็กริมน้ำที่รอลงเรือ เมื่อคลื่นแม่น้ำเคลื่อนที่มากระทบพลังงานจากคลื่นที่ถ่ายโอนให้กับแพเหล็กจะทำให้แพเคลื่อนที่ขยับขึ้นลงได้



รูป 11.1 แพริมน้ำลงเรือ

การเคลื่อนที่แบบคลื่นเป็นการถ่ายโอนพลังงานจากการรบกวนซึ่งแตกต่างจากการเคลื่อนที่แบบอนุภาคซึ่งอนุภาคเคลื่อนที่ไปด้วย มีปรากฏการณ์รอบตัวเรามากมายที่มีการเคลื่อนที่แบบนี้ เช่น คลื่นเสียง คลื่นแผ่นดินไหว คลื่นมหาสมุทร คลื่นซึนามิ รังสีต่างๆ จากแสงอาทิตย์ เป็นต้น

รูป 11.2 คลื่นในชีวิตประจำวัน

เราได้ใช้ประโยชน์จากการถ่ายโอนพลังงานของคลื่น ทั้งโดยตรงจากคลื่นในธรรมชาติและโดยการประยุกต์ เช่นการได้ยินเสียงไพเราะต่างๆ การเห็นวัตถุต่างๆ รอบตัวเรา การผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานคลื่นน้ำ ในทางกลับกันเราก็ได้รับผลกระทบจากการกัดเซาะชายฝั่งซึ่งมีสาเหตุจากพลังงานของคลื่นน้ำเช่นกัน

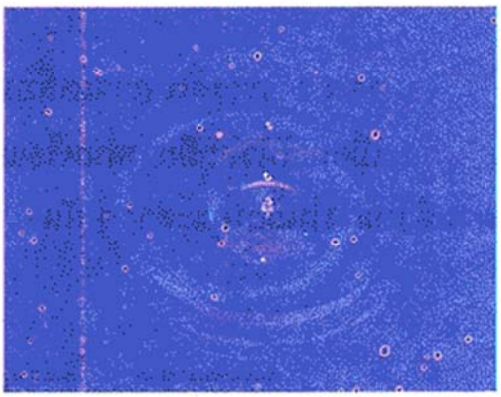
ในการถ่ายโอนพลังงานแบบคลื่น โมเลกุลของตัวกลางไม่เคลื่อนที่ตามไป และสมบัติของการเคลื่อนที่แบบคลื่นที่เหมือนกับการเคลื่อนที่ของอนุภาค คือ มีการสะท้อนและการหักเห แต่ที่ต่างกัน คือ คลื่นมีการซ้อนทับ การแทรกสอดการเลี้ยวเบน แต่อนุภาคไม่มี

☐ การถ่ายโอนพลังงานแบบคลื่นโมเลกุลของตัวกลางจะเคลื่อนที่อย่างไร

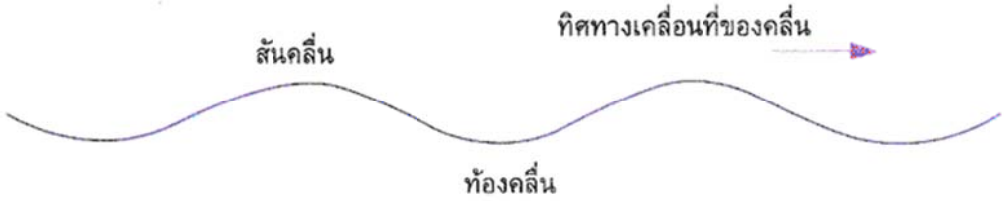
11.1 การถ่ายโอนพลังงานของคลื่นกล

เมื่อโยนก้อนหินลงไปในสระน้ำที่ผิวน้ำเรียบดังรูป จะเกิดคลื่นวงกลมแผ่ขยายออกไปดังรูป 11.3

เมื่อพิจารณาผิวน้ำหลังจากโยนก้อนหินลงสระน้ำ ก้อนหินจะถ่ายโอนพลังงานให้กับโมเลกุลน้ำทำให้โมเลกุลน้ำที่ผิวน้ำมีการเคลื่อนที่เป็นคลื่นวงกลมดังรูป 11.4 เมื่อพิจารณาในแนวภาคตัดขวางจะเห็นว่าน้ำกระเพื่อมสูงขึ้นและเว้าลงเป็นวงแล้วขยายวงออกไป เรียกคลื่นน้ำ ซึ่งศึกษาลักษณะการเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้ำได้โดยสังเกตขณะที่คลื่นไปกระทบกับวัตถุที่ลอยน้ำ เช่น จอก ขวดน้ำ ก้อนโฟมจะเห็นการเคลื่อนที่ของสิ่งเหล่านี้ในลักษณะเคลื่อนขึ้นลงสม่ำเสมอ ซึ่งเป็นการสั่นขึ้นลงอย่างต่อเนื่องและซ้ำรอยเดิมดังรูป 11.5

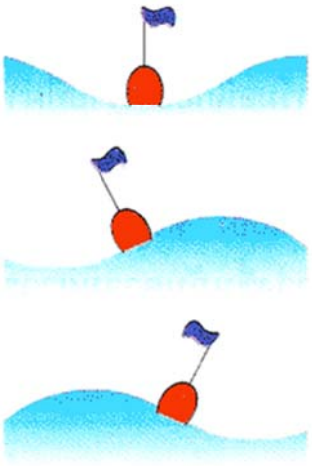


รูป 11.3 การเกิดคลื่นวงกลม



รูป 11.4 การเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้ำที่ผิวน้ำ

สังเกตได้ว่าสิ่งที่เกิดขึ้นเป็นคลื่นเคลื่อนที่ ซึ่งเป็นผลของการรบกวนที่ได้จากการถ่ายโอนพลังงานจากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่ง โดยการรบกวนนี้อาจมีตัวกลางหรือไม่ก็ได้ ในกรณีที่มีตัวกลาง เมื่อแหล่งกำเนิดมีการสั่นก็จะถ่ายโอนพลังงานให้กับตัวกลางที่อยู่นิ่ง ถ้าตัวกลางนี้มีสมบัติยืดหยุ่นและไม่ดูดกลืนพลังงานหรือไม่แปลงพลังงานไปเป็นพลังงานความร้อน โมเลกุลของตัวกลางนั้นก็จะมีการสั่นแล้วถ่ายโอนพลังงานให้กับโมเลกุลข้างเคียง



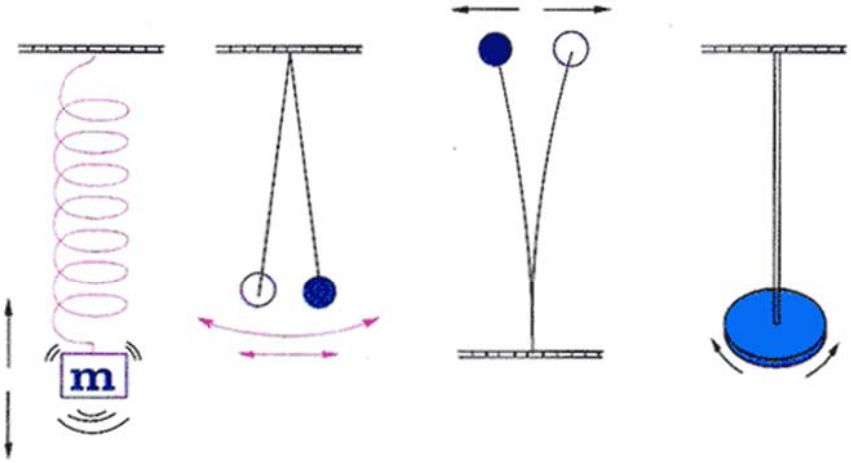
รูป 11.5 การเคลื่อนวนไปมาของวัตถุลอยน้ำ

จำนวนมากต่อเนื่องกันไปทำให้คลื่นเคลื่อนที่ออกไป
โดยโมเลกุลของตัวกลางหรืออนุภาคจะสั่นหรือ
เคลื่อนวนไปมา ณ ตำแหน่งหนึ่งๆ เท่านั้น

□ เมื่อคลื่นน้ำเคลื่อนที่ผ่านไปแล้ว วัตถุที่ลอยน้ำจะเปลี่ยนตำแหน่งหรือไม่

11.1.1 การสั่น การเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายและคลื่น

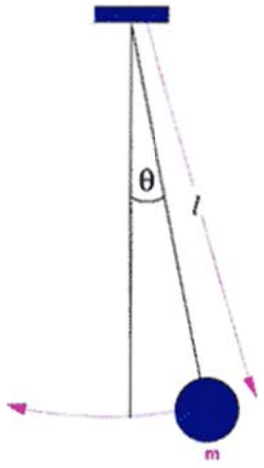
เมื่อทำให้วัตถุมีการสั่นหรือแกว่งในลักษณะต่างๆ ดังรูป 11.6 จะมีการถ่ายโอนพลังงานผ่านตัวกลางในลักษณะต่างๆ กัน



รูป 11.6 การสั่นของวัตถุแบบต่างๆ

จากการศึกษาการสั่นที่เป็นการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายที่ผ่านมา พบว่า ความถี่ของการแกว่งของลูกตุ้มนาฬิกา ในกรณีมุมเล็กๆ (θ มีค่าน้อย) ดังรูป 11.7 คาบและความถี่ของการแกว่งขึ้นกับความยาวของเชือกหรือความยาวของแขนดังสมการที่ 11.1

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \quad , \quad f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{l}} \qquad \textbf{(11.1)}$$



รูปที่ 11.7 การแกว่งลูกตุ้มนาฬิกา

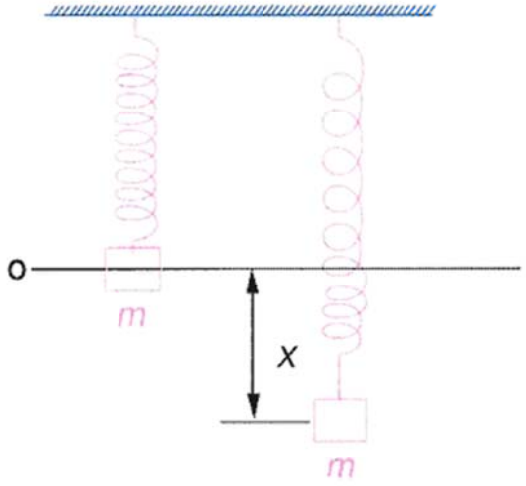
T เป็นคาบของการแกว่งของลูกตุ้มนาฬิกามีหน่วยเป็นวินาทีต่อรอบ

l เป็นความยาวของลูกตุ้มนาฬิกามีหน่วยเป็น เมตร

g เป็นความเร่งโน้มถ่วงมีหน่วยเป็น เมตรต่อวินาทีกำลังสอง

f เป็นความถี่ของการแกว่งของลูกตุ้มนาฬิกามีหน่วยเป็น รอบต่อวินาที หรือ Hz

จากสมการที่ 11.1 แถลงว่าสำหรับความยาวของลูกตุ้มนาฬิกาค่าหนึ่งจะมีค่าความถี่เฉพาะค่าหนึ่งเรียก**ความถี่ธรรมชาติ** ซึ่งขึ้นกับความยาวของลูกตุ้ม ส่วนในกรณีของมวล m ผูกปลายสปริงแขวนในแนวดิ่งดังรูป 11.8 เมื่อมวลอยู่ในสภาวะสมดุลจะอยู่ที่ระดับ O ถ้าออกแรงดึงมวล ให้สปริงยืดออกเป็นระยะ x_o เมตร ไปยังระดับ A แล้วปล่อยมวลจะสั่นขึ้นลงโดยมีระดับ O เป็นระดับสมดุลด้วยความถี่ธรรมชาติดังสมการที่ 11.2



รูป 11.8 การสั่นของมวลติดปลายสปริง

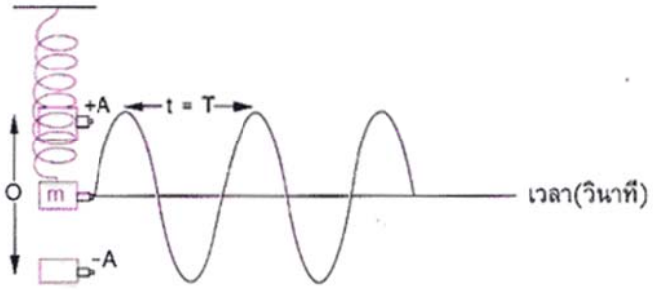
$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \qquad \textbf{(11.2)}$$

f เป็นความถี่ของการสั่นของวัตถุปล่อยสปริงมีหน่วยเป็น รอบต่อวินาที หรือ Hz

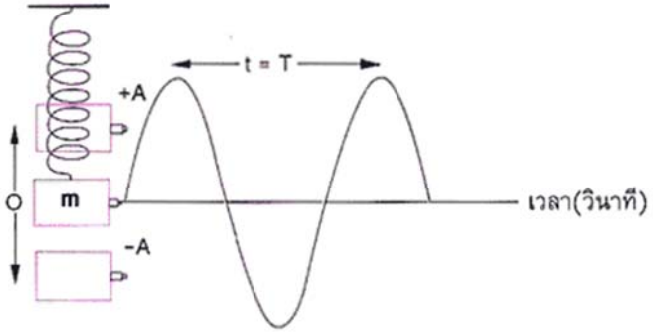
m เป็นมวลของวัตถุมีหน่วยเป็น กิโลกรัม

k เป็นค่าคงที่ของสปริงมีหน่วยเป็น นิวตันต่อเมตร

ในกรณีของการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายของวัตถุมวล m ติดปลายสปริงนี้ เมื่อนำปากกามาติดมวล m แล้วให้ลากบนกระดาษเคลื่อนที่ต่อเนื่องจะได้รูปแบบของการเคลื่อนที่แบบไซนูซอยดัล ดังรูป 11.9



ก. รอยปากกาที่ติดกับมวลติดสปริง



ข. รอยปากกาที่ติดกับมวลติดสปริงค่ามวลเพิ่มขึ้น

รูป 11.9 แสดงรอยปากกาบนกระดาษที่เคลื่อนที่ต่อเนื่อง

จากรอยปากกาที่เกิดขึ้นในรูป 11.9 จะเห็นว่าสอดคล้องกับลักษณะการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย โดยการกระจัดในแนวตั้งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 11.3 คือ

$$S_y = A\sin\theta$$

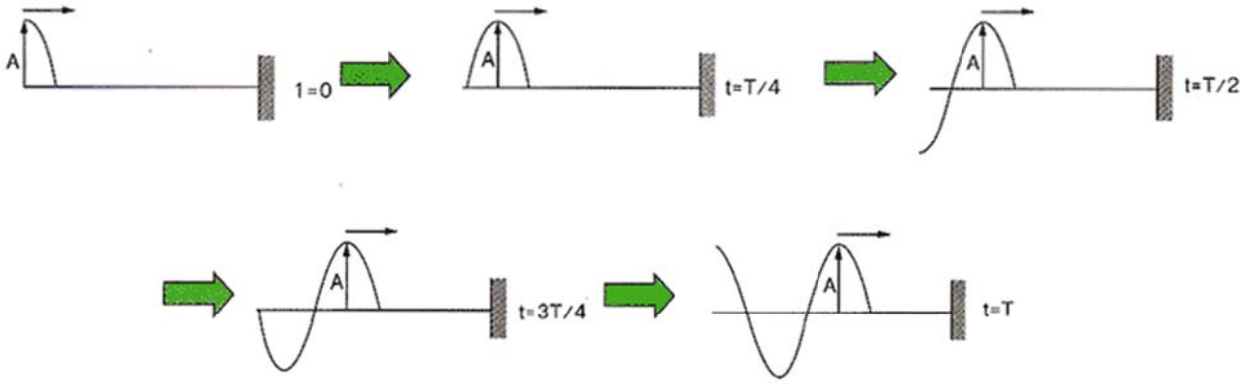
หรือ $$S_y = A\sin\omega t \qquad (11.3)$$

โดย $\theta = \omega t$ เป็นการกระจัดเชิงมุมของวัตถุมวล m ที่สั่นขึ้นลง และเป็นสมการที่สอดคล้องกับรอยปากกาที่ปรากฏบนกระดาษ เรียกมุม $\theta = \omega t$ เป็นเฟสของวัตถุซึ่งตรงกับเฟสของรอยปากกา

เมื่อนำปลายข้างหนึ่งของเชือกที่มีมวลน้อยมากไปผูกกับสิ่งที่ตรึงแน่นแล้วสะบัดที่ปลายอีกข้างหนึ่งขึ้นลงจะทำให้เกิดคลื่นในเส้นเชือกดังรูป 11.10

รูป 11.10 คลื่นในเส้นเชือก

พิจารณาการเกิดคลื่นในรูป 11.10 อย่างช้าๆ ดังนั้นขณะที่มือเริ่มสะบัดเชือกขึ้น คลื่นในเส้นเชือกจะเคลื่อนที่ดังรูป 10.11 ก. เวลาที่พิจารณาคือ t = 0 ต่อไปคลื่นเคลื่อนที่ไปได้ t = T/4, t = T/2, t = 3T/4 และ t = T ตามลำดับ



รูป 11.11 ลักษณะของคลื่นที่เวลาต่างๆ

เมื่อเทียบลักษณะของคลื่นเชือกกับกราฟไซน์จะกำหนดเฟสของจุดต่างๆ บนคลื่นได้ดังรูป 11.12

จุด ก มีเฟสเท่ากับ 0 เรเดียน

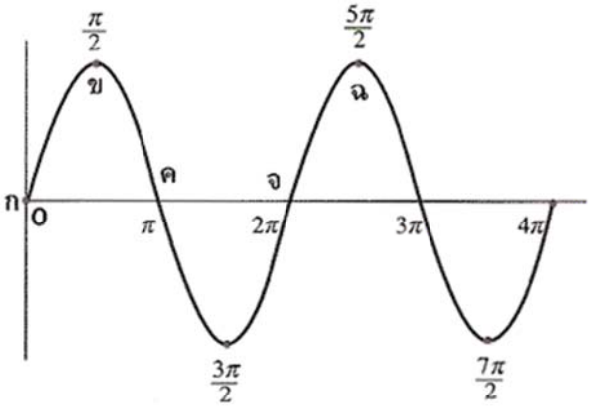
จุด ข มีเฟสเท่ากับ $\frac{\pi}{2}$ เรเดียน

จุด ค มีเฟสเท่ากับ π เรเดียน

จุด ง มีเฟสเท่ากับ $\frac{3\pi}{2}$ เรเดียน

จุด จ มีเฟสเท่ากับ 2π เรเดียน

จุด ฉ มีเฟสเท่ากับ $\frac{5\pi}{2}$ เรเดียน

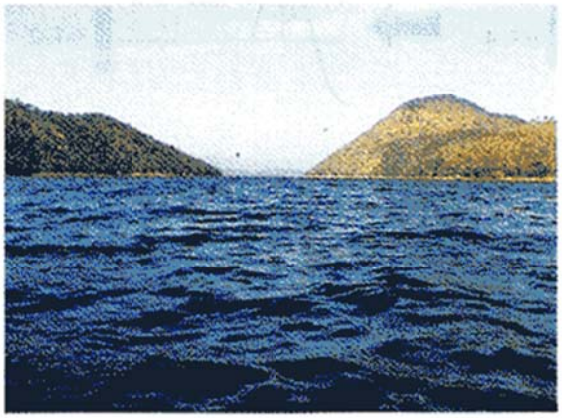


รูป 11.12 เฟสของตำแหน่งบนคลื่น

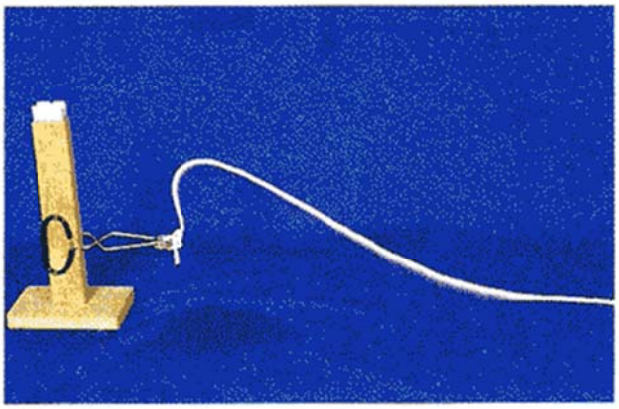
☐ จงเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของคลื่นน้ำกับโมเลกุลน้ำ และการเคลื่อนที่ของคลื่นเชือกกับการเคลื่อนที่ของอนุภาคของเส้นเชือก

11.1.2 ชนิดของคลื่น

เมื่อแหล่งกำเนิดคลื่นผลิตแล้ว ในการแผ่คลื่นหรือการถ่ายโอนพลังงานของคลื่นต้องมีโมเลกุลหรืออนุภาคของตัวกลางเป็นตัวถ่ายโอนพลังงานจึงจะทำให้คลื่นแผ่ออกไปได้ เรียกคลื่นนี้ว่า **คลื่นกล** เช่น คลื่นน้ำ คลื่นในเส้นเชือก คลื่นเสียง คลื่นแผ่นดินไหว



คลื่นน้ำ



คลื่นในเส้นเชือก

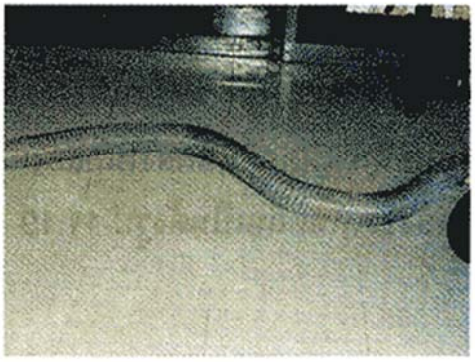
รูปที่ 11.13 คลื่นน้ำและคลื่นในเส้นเชือก

คลื่นแผ่นดินไหว

รูป 11.14 คลื่นแผ่นดินไหว

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นคลื่นที่ไม่ต้องมีตัวกลางในการถ่ายโอนพลังงาน เช่นแสง คลื่นวิทยุ เป็นต้น

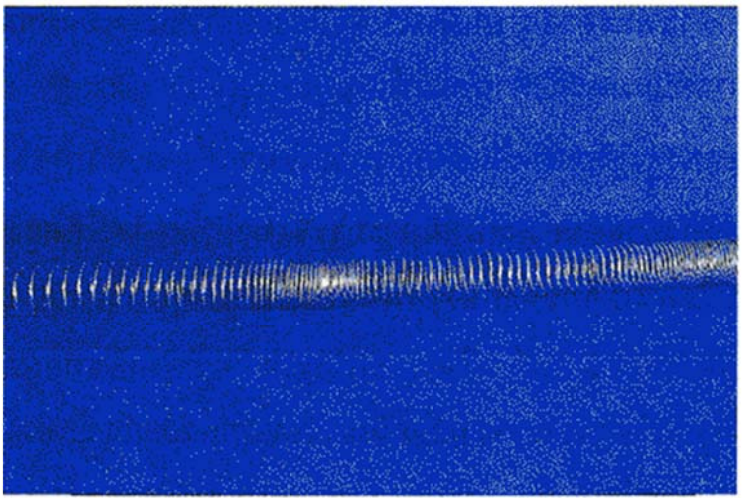
รูป 11.15 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า



รูป 11.16 คลื่นตามขวาง

เมื่อคลื่นถ่ายโอนพลังงานผ่านโมเลกุลของตัวกลาง เช่น คลื่นในเส้นเชือกที่ถูกสะบัดขึ้นลงหรือคลื่นในลวดสปริงที่วางบนพื้นแล้วสะบัดดังรูป 11.16

จะเห็นได้ว่า ทิศการแผ่คลื่นกับทิศเคลื่อนที่ของโมเลกุลตัวกลางตั้งฉากกัน เรียกคลื่นนี้ว่า **คลื่นตามขวาง** ในกรณีของลวดสปริงที่วางบนพื้นแล้วเขย่าในแนวของสปริง ดังรูป 11.17



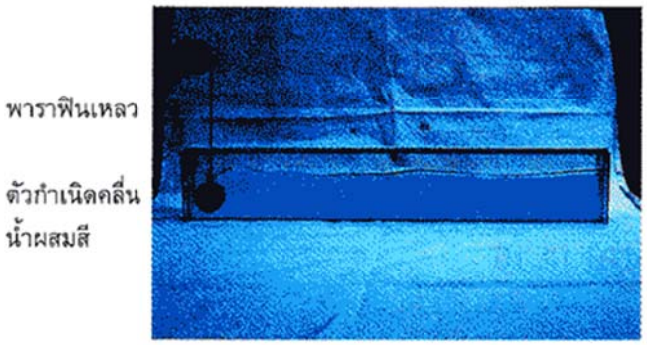
รูป 11.17 คลื่นตามยาว

จะเห็นได้ว่าในกรณีที่ทิศการแผ่คลื่นกับทิศการเคลื่อนที่ของโมเลกุลตัวกลางไปในแนวเดียวกัน เรียก **คลื่นตามยาว** ในกรณีของอนุภาคพื้นฐาน เช่น อิเล็กตรอน โปรตอน จะแสดงสมบัติของคลื่นได้ด้วย เรียกคลื่นนี้ว่า **คลื่นสสาร**

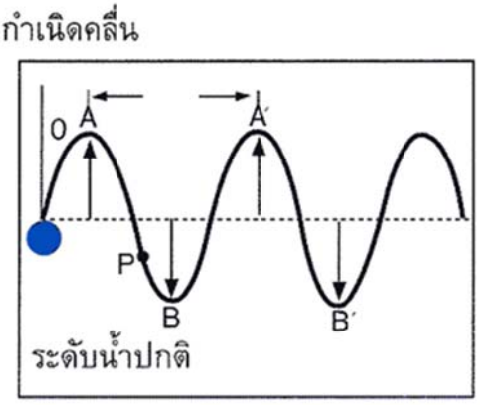
11.2 คลื่นผิวน้ำ

คลื่นผิวน้ำเป็นคลื่นกลเกิดขึ้นเมื่อผิวน้ำถูกรบกวนและมีการถ่ายโอนพลังงานผ่านโมเลกุลของน้ำ เมื่อคลื่นผิวน้ำเคลื่อนที่ โมเลกุลของน้ำมีการเคลื่อนที่อย่างไร

เราอาจศึกษาการเคลื่อนที่ของคลื่นผิวน้ำและโมเลกุลของน้ำโดยใช้**กล่องคลื่น** ดังรูป 11.18 เมื่อขยับต้นกำเนิดคลื่นขึ้นลงในกล่องคลื่น จะเกิดคลื่นผิวน้ำซึ่งเคลื่อนที่ออกไป ถ้าสังเกตด้านข้างกล่องจะเห็นคลื่นเป็นดังรูป 11.19 ซึ่งเป็นภาคตัดด้านของคลื่นผิวน้ำขณะหนึ่ง



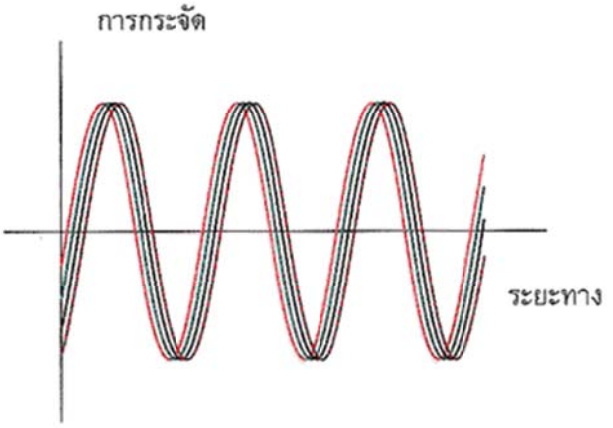
รูป 11.18 กล่องคลื่น



รูป 11.19 ภาพด้านข้างของคลื่นผิวน้ำ ณ ขณะหนึ่ง

ถ้าพิจารณาที่ตำแหน่งต่างๆ บนผิวน้ำ ซึ่งมีการขยับขึ้นลงเมื่อมีคลื่นบนผิวน้ำ ดังในรูป 11.19 ระยะทางจากระดับสมดุลถึงตำแหน่งนั้นๆ (เช่นจุด O และ P) เรียกว่า **การกระจัด** A และ A′ เป็นตำแหน่งสูงสุดของคลื่นที่มีการกระจัดมากที่สุดและมีทิศขึ้น เรียกว่า **สันคลื่น** B และ B′ เป็นตำแหน่งต่ำสุดของคลื่นที่มีการกระจัดมากที่สุดแต่มีทิศลง เรียกว่า **ท้องคลื่น** ความสูงของสันคลื่นหรือความลึกของท้องคลื่นจากระดับ สมดุล เรียกว่า **แอมพลิจูด** ระยะทางระหว่างสันคลื่นที่อยู่ถัดกัน เช่น AA′ หรือระยะทางระหว่างท้องคลื่นที่อยู่ถัดกัน เช่น BB′ เป็นความยาวของคลื่นหนึ่งลูก เรียกว่า **ความยาวคลื่น** เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ λ มีหน่วยเป็นเมตร อาจกล่าวได้ว่าความยาวคลื่น คือ ระยะห่างตามแนวสมดุลระหว่างจุดสองจุดบนคลื่นที่มีเฟสต่างกัน 360 องศา หรือ 2π เรเดียน

ในการเคลื่อนที่ของคลื่นผิวน้ำ จะเห็นสันคลื่นและท้องคลื่นเคลื่อนที่ตามกันไปอย่างต่อเนื่องแต่อนุภาคของน้ำที่ตำแหน่งต่างๆ บนคลื่นเมื่อขยับขึ้นจนถึงตำแหน่งสูงสุดแล้วจะขยับลงมายังตำแหน่งต่ำสุดจากนั้นก็ขยับขึ้นไปใหม่อีก วนเวียนในลักษณะเช่นนี้ตราบเท่าที่ยังมีคลื่นบนผิวน้ำโดยโมเลกุลของน้ำไม่ได้เคลื่อนที่ตามไปกับคลื่นเลย

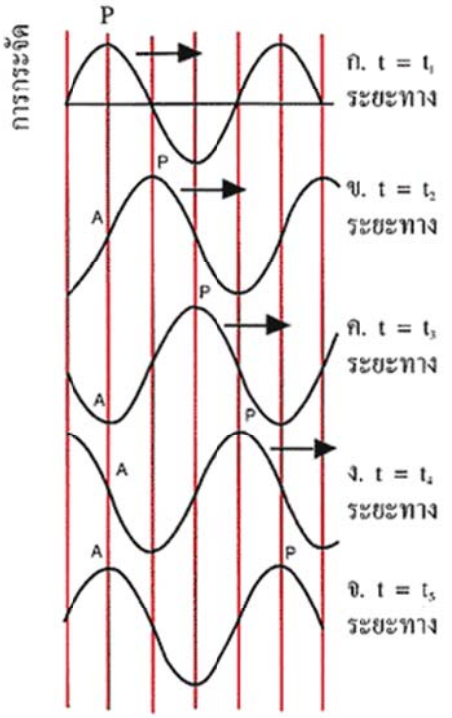


รูป 11.20 การเคลื่อนที่ของคลื่น

พิจารณาคลื่นผิวน้ำที่กำลังแผ่ออกไป การกระจัดของอนุภาคน้ำที่ผิวและระยะทางที่คลื่นผิวน้ำเคลื่อนที่ได้ที่เวลาต่างๆ เป็นดังกราฟในรูป 11.21 ที่เวลา t_1 P เป็นสันคลื่น ในเวลาถัดมาสันคลื่น P จะเคลื่อนที่ไปทางขวาเรื่อยๆ ดังรูป 11.21 ข. ค. ง. และ จ. ตามลำดับ ระยะทางที่สันคลื่น P (หรือตำแหน่งใดๆ บนคลื่น) เคลื่อนที่ได้ในหนึ่งหน่วยเวลา เรียกว่า อัตราเร็วคลื่น แทนด้วยสัญลักษณ์ v มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที

จำนวนลูกคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งใดๆ บนผิวน้ำในหนึ่งหน่วยเวลา เรียกว่า **ความถี่** แทนด้วยสัญลักษณ์ f มีหน่วยเป็นรอบต่อวินาที หรือ **เฮิรตซ์** (Hz) ช่วงเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งใดๆ ครบหนึ่งลูกคลื่นหรือหนึ่งรอบเรียกว่า **คาบ** แทนด้วยสัญลักษณ์ T มีหน่วย เป็นวินาที เช่น พิจารณา ผิวน้ำที่ A ใน รูป 11.21 ก. ขณะเวลา t_1 เป็นสันคลื่นและที่เวลา t_3 เป็นท้องคลื่น และจะเคลื่อนที่กลับขึ้นเป็นสันคลื่นอีกครั้งเมื่อเวลา t_5 ช่วงเวลา t_1 ถึง t_5 หรือ $t_5 - t_1$ คือ คาบ คาบและความถี่มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$T = \frac{1}{f} \quad \text{หรือ} \quad f = \frac{1}{T}$$

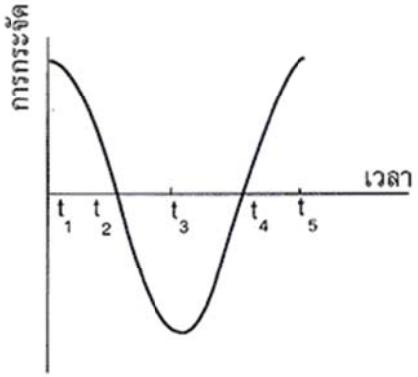


รูป 11.21 กราฟระหว่างการกระจัดของอนุภาคน้ำและระยะทางที่คลื่นผิวน้ำเคลื่อนที่ได้

จะเห็นว่า เมื่อผิวน้ำที่ A เคลื่อนที่ขึ้นลงครบหนึ่งรอบ คลื่นผิวน้ำจะเคลื่อนที่ได้หนึ่งลูกหรือได้ระยะทางเท่ากับหนึ่งความยาวคลื่น λ ถ้าคลื่นผิวน้ำมีความถี่ f ดังนั้นใน 1 วินาที คลื่นผิวน้ำจะเคลื่อนที่ได้ระยะทาง $f\lambda$ ซึ่งก็คือ อัตราเร็วคลื่น v ดังนั้น

$$v = f\lambda \qquad \textbf{(11.1)}$$

สำหรับโมเลกุลน้ำที่ A ในรูป 11.21 ถ้าเขียนกราฟระหว่างการกระจัดและเวลาในช่วงเวลา t_1 ถึง t_5 จะได้ดังรูป 11.22

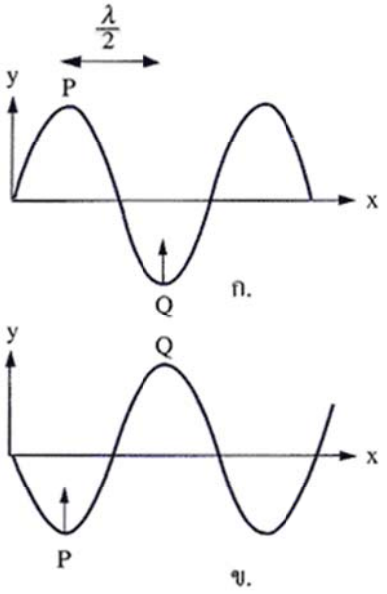


รูป 11.22 กราฟระหว่างการกระจัดและเวลาของอนุภาคน้ำที่ A ในช่วงเวลา t_1 ถึง t_5

พิจารณาผิวน้ำที่ A ในรูป 11.21 อีกครั้ง เมื่อเวลาผ่านไปครบหนึ่งคาบ ผิวน้ำจะเคลื่อนที่ขึ้นลงแนวดิ่งได้หนึ่งรอบ และถ้าคลื่นไม่มีการสูญเสียพลังงาน แอมพลิจูดของคลื่นจะมีค่าคงตัว จึงกล่าวได้ว่า ผิวน้ำที่ A มีการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายครบหนึ่งรอบพอดี โดย ณ เวลาหนึ่ง ผิวน้ำที่ A จะอยู่ที่ตำแหน่งหนึ่งของรอบจึงเรียกว่ามี**เฟส**หนึ่ง

การศึกษาเฟสของคลื่นจะเป็นการเปรียบเทียบเฟสของจุดเดียวกันแต่คนละเวลา เช่น ผิวน้ำที่ A ในรูป 11.21 ก. และ จ. มีความต่างเฟสเท่ากับ 360 องศา หรือการเปรียบเทียบเฟสของจุดสองจุดบนคลื่น ณ เวลาหนึ่ง ดังในรูป 11.23 และ 11.24

พิจารณารูป 11.24 ก. จุด P และ Q อยู่ห่างกันครึ่งความยาวคลื่นและเคลื่อนที่ในทิศตรงข้ามกัน เรียกว่า จุดทั้งสองนี้มี**เฟสตรงข้ามกัน** เมื่อเวลาผ่านไปครึ่งคาบ ตำแหน่งของจุดทั้งสองเปลี่ยนไป ดังรูป 11.24 ข. ดังนั้น ทั้งจุด P และ Q จะมีเฟสเปลี่ยนไป แต่จุดทั้งสองที่ยังคงมีเฟสตรงข้ามกัน เพราะยังอยู่ห่างจากระดับสมดุลเท่ากันและเคลื่อนที่ในทิศตรงข้ามกัน



รูป 11.24 ภาพด้านข้างของคลื่นผิวน้ำที่เวลาหนึ่ง แสดงจุดที่มีเฟสตรงข้ามกัน

ตัวอย่าง 11.1 เด็กคนหนึ่งใช้เท้ากระทุ่มน้ำในสระเป็นจังหวะสม่ำเสมอ 2 ครั้งต่อวินาที พบว่าคลื่นผิวน้ำลูกแรกเคลื่อนที่ไปกระทบขอบสระฝั่งตรงข้าม ซึ่งอยู่ห่างออกไป 10 เมตร ในเวลา 10 วินาที จงหาความยาวคลื่นของคลื่นผิวน้ำ

วิธีทำ หาความยาวคลื่นของคลื่นผิวน้ำจากสมการ $v = f\lambda$

ในที่นี้ v = อัตราเร็วคลื่น $= \frac{s}{t} = \frac{10\ \text{m}}{10\ \text{s}} = 1\ \text{m/s}$

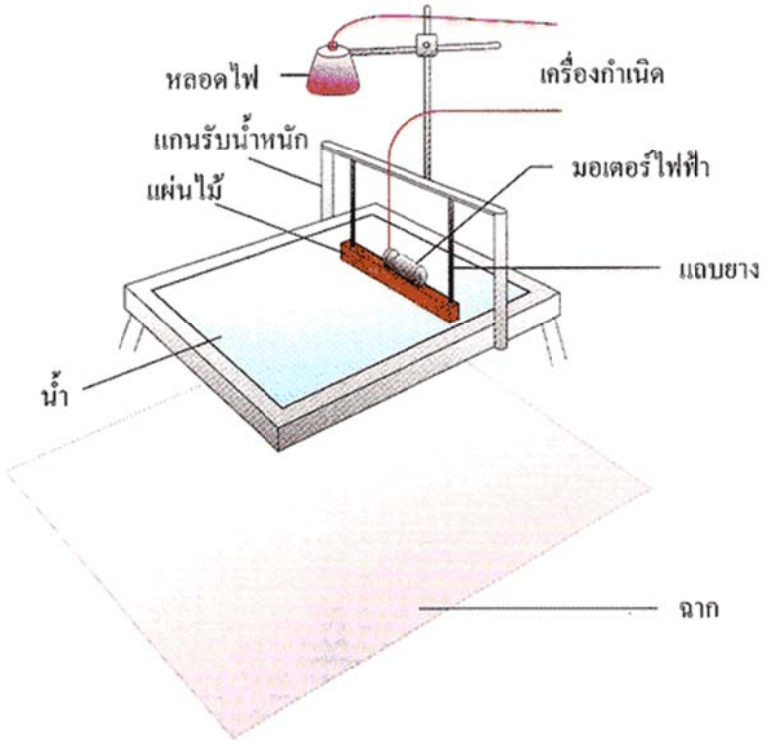
f = ความถี่ของการกระทุ่มน้ำ $= 2\ \text{Hz}$

แทนค่าในสมการ $1\ \text{m/s} = 2\ \text{Hz} \times \lambda$

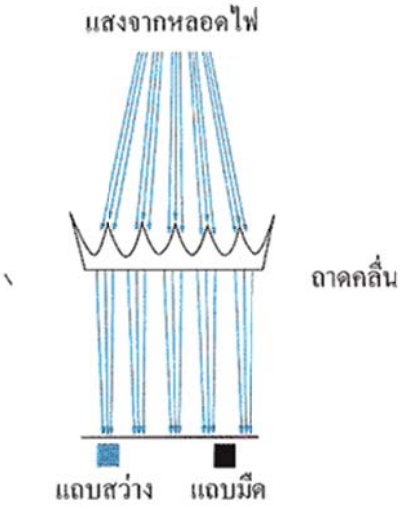
$\lambda = 0.5\ \text{m}$

คำตอบ ความยาวคลื่นของคลื่นผิวน้ำเท่ากับ 0.5 เมตร

เราสามารถศึกษาคลื่นผิวน้ำและพฤติกรรมของคลื่นผิวน้ำ ทำได้โดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า **ถาดคลื่น** ซึ่งมีส่วนประกอบต่าง ๆ แสดงในรูป 11.25



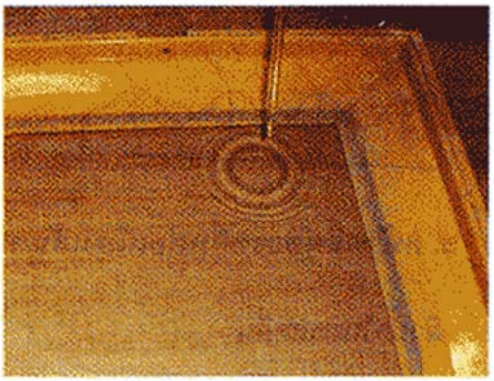
รูป 11.25 ถาดคลื่น



คลื่นผิวน้ำมีลักษณะโค้งขึ้นและโค้งลง ผิวน้ำส่วนที่โค้งขึ้นทำหน้าที่เป็นเลนส์นูนรวมแสงทำให้เกิดแถบสว่าง ผิวน้ำส่วนที่โค้งลงจะทำหน้าที่เป็นเลนส์เว้ากระจายแสง ทำให้เกิดแถบมืด

รูป 11.26 การเกิดแถบสว่างและแถบมืดบนกระดาษขาว

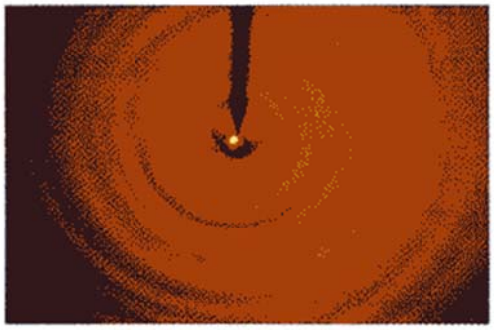
เมื่อรบกวนผิวน้ำบนถาดคลื่น จะเกิดคลื่นผิวน้ำเคลื่อนที่ออกจากบริเวณที่ถูกรบกวน และเกิดภาพของคลื่นผิวน้ำบนกระดาษขาวที่วางใต้ถาดคลื่น มีลักษณะเป็นแถบมืดและแถบสว่างสลับกัน ถ้ารบกวนผิวน้ำหนึ่งครั้ง คลื่นที่ได้เรียกว่า **คลื่นดล** แต่ถ้ารบกวนผิวน้ำเป็นจังหวะอย่างต่อเนื่อง จะเกิดคลื่นผิวน้ำเคลื่อนที่ออกไปตลอดเวลา เรียกว่า **คลื่นต่อเนื่อง** โดยความถี่ของคลื่นที่เกิดขึ้นเท่ากับความถี่ของการรบกวนของแหล่งกำเนิดคลื่น



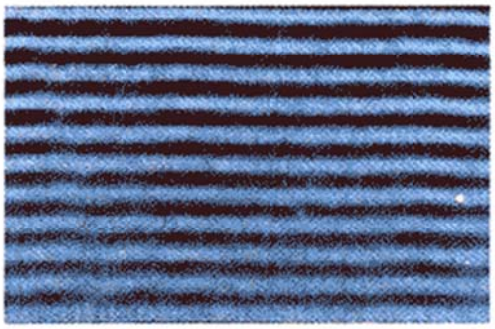
ก. คลื่นดลวงกลม

ข. คลื่นดลเส้นตรง

รูป 11.25 คลื่นดล



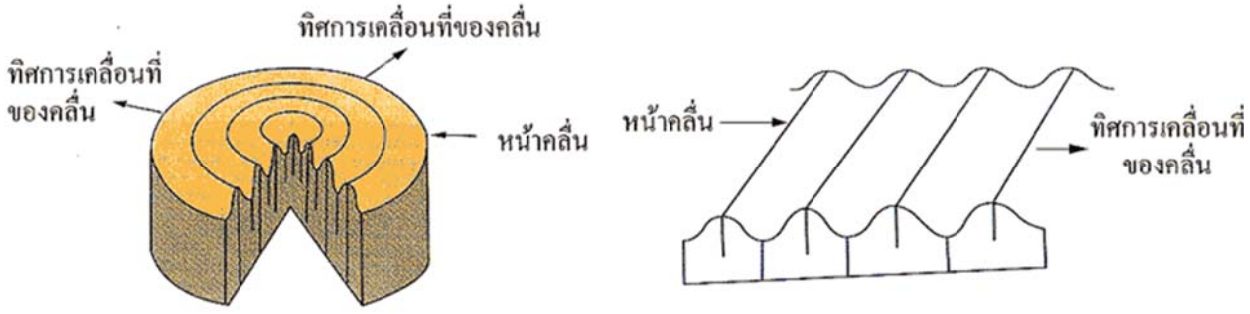
ก. คลื่นต่อเนื่องวงกลม



ข. คลื่นต่อเนื่องเส้นตรง

รูป 11.26 คลื่นต่อเนื่อง

เมื่อคลื่นต่อเนื่องแผ่ออกจากแหล่งกำเนิด แนวสันคลื่นหรือแนวท้องคลื่นที่มีเฟสตรงกันเรียกว่า **หน้าคลื่น** ดังนั้น เส้นกลางของแถบสว่างซึ่งเกิดจากแนวสันคลื่นและเส้นกลางของแถบมืดซึ่งเกิดจากแนวท้องคลื่นจึงใช้แทนหน้าคลื่นได้ ในรูป 11.29 ก. และ ข. ใช้แนวแถบสว่างเป็นหน้าคลื่น หน้าคลื่นมีทิศตั้งฉากกับทิศการเคลื่อนที่ของคลื่นและระยะระหว่างหน้าคลื่นที่อยู่ถัดกันจะเท่ากับความยาวคลื่น



ก. หน้าคลื่นของคลื่นต่อเนื่องวงกลม **ข. หน้าคลื่นของคลื่นต่อเนื่องเส้นตรง**

รูป 11.29 หน้าคลื่นของคลื่นผิวน้ำในถาดคลื่น

11.3 การซ้อนทับของคลื่น

เมื่อคลื่นดลสองคลื่นเคลื่อนที่มาพบกัน ผลที่เกิดขึ้นเป็นอย่างไร ศึกษาได้จากสถานการณ์ต่อไปนี้

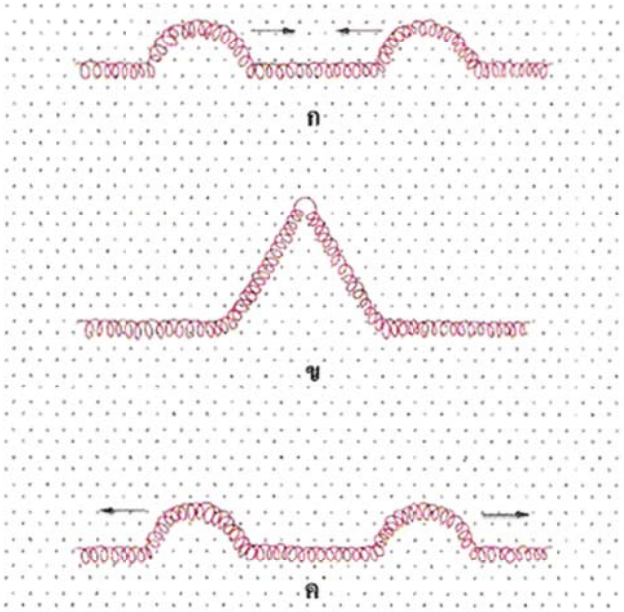
วางลวดสปริงบนพื้นห้อง จับปลายลวดสปริงทั้งสองด้าน ดึงให้ยืดออกประมาณ 3 เมตร แล้วสะบัดปลายลวดสปริงไปทางเดียวกัน พร้อมกัน 1 ครั้ง เพื่อให้เกิดคลื่นดลตามขวาง ดังรูป 11.30 ก. จากนั้นให้สะบัดในทิศตรงข้ามกัน พร้อมกัน 1 ครั้ง ดังรูป 11.30 ข. สังเกตลักษณะของคลื่นที่เกิดขึ้น

ก. สะบัดไปทางเดียวกัน ข. สะบัดตรงกันข้ามกัน

รูป 11.30 การสะบัดลวดสปริง

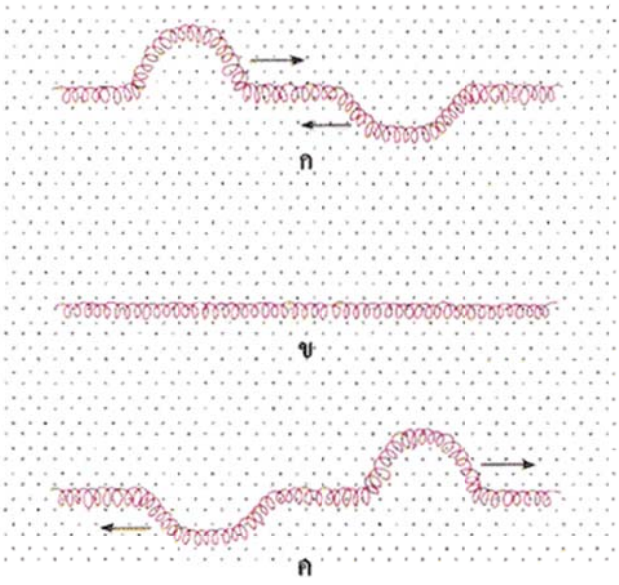
- ☐ ในแต่ละกรณีคลื่นดลทั้งสองเคลื่อนที่อย่างไร
- ☐ ขณะที่คลื่นทั้งสองพบกันผลเป็นอย่างไร และเมื่อคลื่นทั้งสองเคลื่อนที่ผ่านพ้นกันไปแล้วผลเป็นอย่างไร

เมื่อคลื่นดลสองคลื่นที่อนุภาคของลวดสปริงมีการกระจัดในทิศเดียวกัน เคลื่อนที่มาพบกัน คลื่นดลทั้งสองจะรวมกัน ทำให้การกระจัดลัพธ์มีขนาดมากกว่าการกระจัดเดิมของแต่ละคลื่น เมื่อคลื่นทั้งสองเคลื่อนที่ผ่านพ้นกันแล้ว คลื่นดลแต่ละคลื่นจะมีลักษณะเหมือนเดิมและเคลื่อนที่ในทิศเดิม ดังรูป 11.31



ก. คลื่นทั้งสองก่อนพบกัน
ข. คลื่นทั้งสองขณะพบกัน
ค. คลื่นทั้งสองภายหลังพบกัน

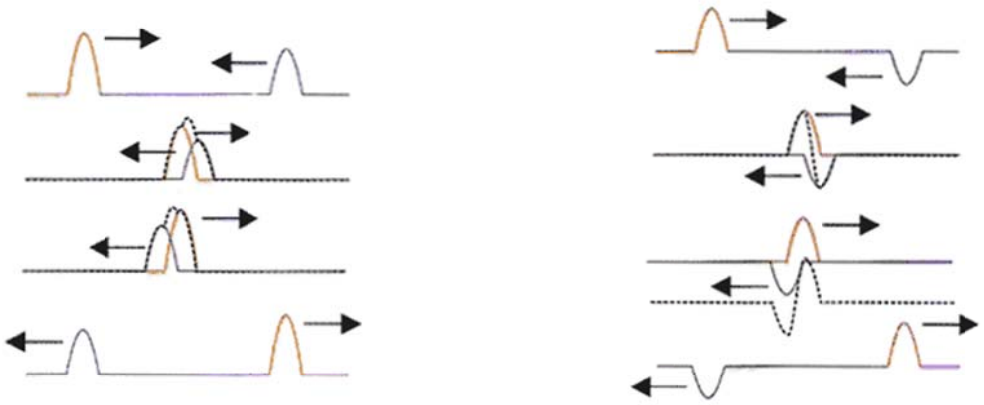
รูป 11.31 การซ้อนทับของคลื่นดล เมื่อคลื่นดลทั้งสองมีการกระจัดในทิศเดียวกัน



ก. คลื่นทั้งสองก่อนพบกัน
ข. คลื่นทั้งสองขณะพบกัน
ค. คลื่นทั้งสองภายหลังพบกัน

รูป 11.32 การซ้อนทับของคลื่นดล เมื่อคลื่นดลทั้งสองมีการกระจัดในทิศตรงข้ามกัน

เมื่อคลื่นสองคลื่นที่เกิดในลวดสปริงมีการกระจัดในทิศตรงข้ามกัน เคลื่อนที่มาพบกัน คลื่นทั้งสองจะรวมกัน ทำให้การกระจัดผลลัพธ์มีขนาดน้อยกว่าการกระจัดเดิมของแต่ละคลื่น เมื่อคลื่นทั้งสองเคลื่อนที่ผ่านกันแล้ว คลื่นแต่ละคลื่นจะมีลักษณะเหมือนเดิมและเคลื่อนที่ในทิศเดิม ดังรูป 11.32



ก. เมื่อคลื่นดลทั้งสองมีการกระจัดในทิศเดียวกัน ข. เมื่อคลื่นดลทั้งสองมีการกระจัดในทิศตรงข้ามกัน

รูป 11.33 การซ้อนทับของคลื่นดลสองคลื่น

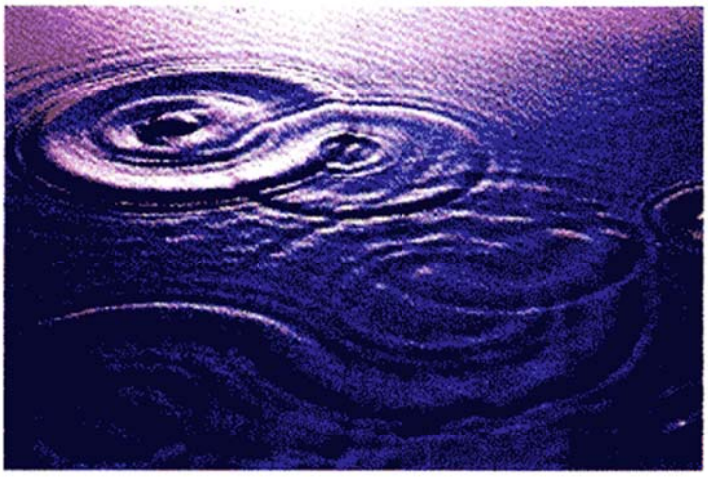
☐ การที่คลื่นทั้งสองเคลื่อนที่มาพบกันจะแตกต่างจากการที่วัตถุทั้งสองเคลื่อนที่มาพบกันอย่างไร

คลื่นที่มีรูปร่างอื่นๆ เช่นคลื่นในรูป 11.33 เมื่อคลื่นทั้งสองมาพบกันจะเกิดการซ้อนทับ การที่คลื่นตั้งแต่สองคลื่นขึ้นไปเคลื่อนที่มาพบกันและเกิดคลื่นรวม ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า **การซ้อนทับ** การซ้อนทับของคลื่นสามารถอธิบายโดยใช้ **หลักการซ้อนทับ** ซึ่งกล่าวว่า **เมื่อคลื่นตั้งแต่สองคลื่นมาพบกันแล้วรวมกัน การกระจัดของคลื่นรวมมีค่าเท่ากับผลบวกของการกระจัดของแต่ละคลื่นที่มาพบกัน หลังจากที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านพ้นกันแล้ว แต่ละคลื่นยังคงมีรูปร่างและทิศเดิม**

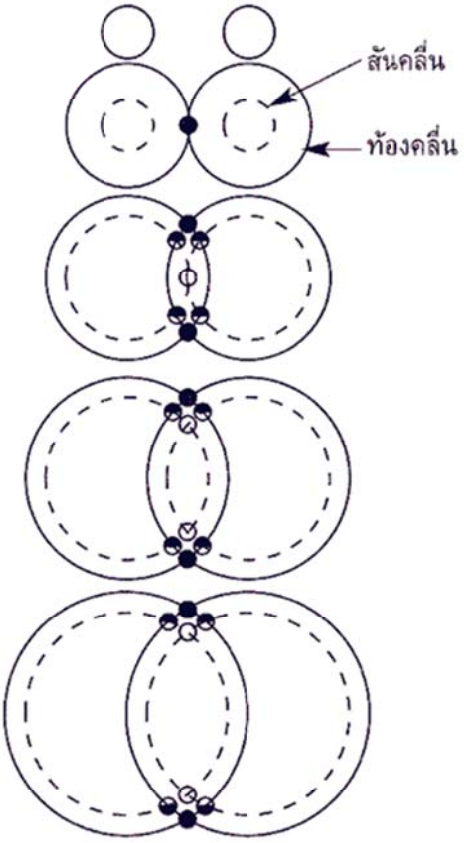
นอกจากคลื่นดลในลวดสปริงสองคลื่นมาพบกันจะเกิดการซ้อนทับเป็นคลื่นรวมขึ้น ถ้าเป็นคลื่นอื่น เช่น คลื่นผิวน้ำสองคลื่นเคลื่อนที่มาพบกันก็จะมีการรวมกันได้เช่นกัน ศึกษาได้จากสถานการณ์ต่อไปนี้

ใช้ปลายดินสอสองแท่งแตะผิวน้ำในถาดคลื่นโดยแตะ ณ ตำแหน่งห่างกันประมาณ 6 เซนติเมตร จะเห็นภาพของคลื่นดลวงกลมสองคลื่นเคลื่อนที่แผ่ขยายออกจากแหล่งกำเนิด เมื่อคลื่นทั้งสองพบกัน จะได้ภาพลักษณะคล้ายรูป 11.34 ซึ่งเป็นการซ้อนทับของคลื่นผิวน้ำในธรรมชาติ

ถ้าสมมติว่าแหล่งกำเนิดคลื่นทั้งสองทำให้เกิดคลื่นวงกลมที่เหมือนกันทุกประการ คือ มีความถี่และเฟสตรงกัน เราอาจเขียนภาพแสดงการซ้อนทับของคลื่นทั้งสองได้ดังรูป 11.35



รูป 11.34 คลื่นดลวงกลมสองคลื่นเคลื่อนที่มาพบ



รูป 11.35 การซ้อนทับของคลื่นดลสอง
คลื่นซึ่งเหมือนกันทุกประการ

เมื่อคลื่นดลวงกลมทั้งสองพบกันในลักษณะที่ท้องคลื่นของคลื่นทั้งสองหรือสันคลื่นของคลื่นทั้งสองเหมือนเดิม แอมพลิจูดของคลื่นรวมจะเพิ่มขึ้น นั่นคือ สันคลื่นของคลื่นรวมจะสูงกว่าเดิมและท้องคลื่นของคลื่นรวมจะต่ำกว่าเดิม ในรูป 11.35 การซ้อนทับของท้องคลื่นกับท้องคลื่นแทนด้วย ● ส่วนการซ้อนทับของสันคลื่นกับสันคลื่นแทนด้วย o แต่ถ้าสันคลื่นพบกับท้องคลื่นที่ได้แอมพลิจูดของคลื่นรวม ณ ที่นั้นจะเท่ากับผลต่างของแอมพลิจูดของคลื่นทั้งสอง ซึ่งแทนด้วย ◒, ◓

11.4 สมบัติของคลื่น

ในการศึกษาที่ผ่านมา เราได้พิจารณาคลื่นในลวดสปริง คลื่นในเส้นเชือกและคลื่นผิวน้ำ ซึ่งเคลื่อนที่ในตัวกลางเนื้อเดียวโดยไม่มีสิ่งกีดขวาง แต่ถ้าคลื่นเคลื่อนที่จากตัวกลางหนึ่งไปอีกตัวกลางหนึ่งหรือเคลื่อนที่ไปในตัวกลางเดียวกัน แต่พบสิ่งกีดขวาง คลื่นจะเปลี่ยนพฤติกรรมอย่างไร

11.4.1 การสะท้อน

เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ไปกระทบสิ่งกีดขวาง จะมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น ศึกษาได้จากสถานการณ์ต่อไปนี้

วางลวดสปริงไว้บนพื้น ตรึงปลายข้างหนึ่งไว้ แล้วดึงปลายลวดสปริงอีกข้างหนึ่งให้ยืดออกยาวประมาณ 3 เมตร สะบัดปลายลวดสปริงในแนวขนานกับพื้นเพื่อทำให้เกิดคลื่นตามขวาง สังเกตลักษณะของคลื่นดลก่อนและหลังกระทบจุดที่ตรึงไว้

- ☐ ทิศการเคลื่อนที่ของคลื่นดล ก่อนและหลังกระทบจุดที่ยึดไว้ ต่างกันหรือไม่ อย่างไร
- ☐ ลักษณะของคลื่นดลก่อนกระทบและหลังกระทบจุดที่ยึดไว้ ต่างกันหรือไม่ อย่างไร

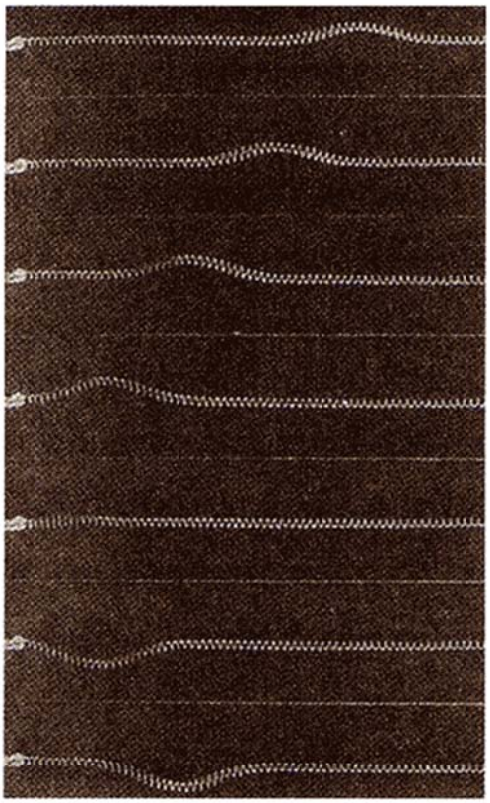
เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ถึงปลายสุดของลวดสปริงที่ถูกตรึงไว้ คลื่นจะสะท้อนกลับมา แอมพลิจูดของคลื่นที่สะท้อนกลับมีทิศตรงข้ามกับแอมพลิจูดของคลื่นเดิม คือว่ามีเฟสตรงข้ามกับคลื่นเดิม การที่คลื่นเคลื่อนที่กระทบสิ่งกีดขวางแล้วเปลี่ยนทิศสะท้อนกลับมาในตัวกลางเดิม ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า **การสะท้อน** และคลื่นที่เคลื่อนที่ไปกระทบปลายสุดของตัวกลางก่อนเกิดการสะท้อน เรียกว่า **คลื่นตกกระทบ** ส่วนคลื่นที่เคลื่อนที่กลับมา เรียกว่า **คลื่นสะท้อน**

ต่อไปใช้เชือกยาวประมาณ 2 เมตร ผูกที่ปลายด้านหนึ่งของลวดสปริง แล้วตรึงปลายอีกข้างหนึ่งของเชือกไว้ ดึงอีกปลายหนึ่งของลวดสปริงให้ยืดออกประมาณ 3 เมตร แล้วสะบัดปลายลวดสปริงในแนวขนานกับพื้นเพื่อให้เกิดคลื่นตามขวาง สังเกตพฤติกรรมของคลื่นที่เกิดขึ้นตรงรอยผูกระหว่างลวดสปริงกับเส้นเชือก

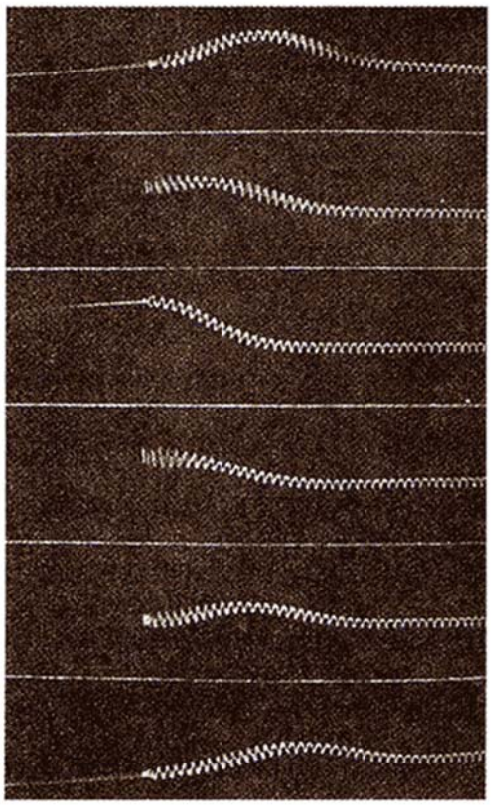
- ☐ ทิศการเคลื่อนที่ของคลื่นดลก่อนและหลังกระทบรอยต่อระหว่างลวดสปริงกับเส้นเชือกแตกต่างกันหรือไม่อย่างไร
- ☐ ลักษณะของคลื่นดลก่อนและหลังกระทบรอยต่อ ต่างกันหรือไม่ อย่างไร

การผูกเชือกที่ปลายลวดสปริงทำให้ปลายลวดสปริงนี้มีอิสระในการเคลื่อนที่ซึ่งต่างกับกรณีแรกที่มีการยึดปลายของลวดสปริงไว้ ซึ่งทำให้ปลายของลวดสปริงเคลื่อนที่ไม่ได้ เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ถึงปลายสุดของตัวกลางที่มีอิสระในการเคลื่อนที่คลื่นจะสะท้อนกลับมาในตัวกลางเดิมโดยคลื่นสะท้อนจะมีเฟสเดียวกับคลื่นตกกระทบ

จากสถานการณ์นี้ทำให้สามารถกล่าวได้ว่าเมื่อมีคลื่นตกกระทบรอยต่อระหว่างตัวกลางจะเกิดการสะท้อนโดยคลื่นสะท้อนอาจจะมีเฟสตรงกันหรือมีเฟสตรงข้ามกันกับคลื่นตกกระทบขึ้นอยู่กับลักษณะของรอยต่อระหว่างตัวกลางและความหนาแน่นของตัวกลางดังรูป 11.36 และ 11.37



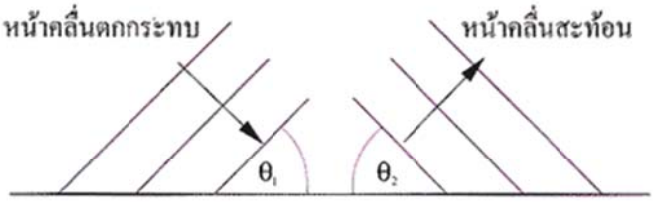
รูป11.36 การสะท้อนของคลื่นจากปลายที่ตรึงไว้



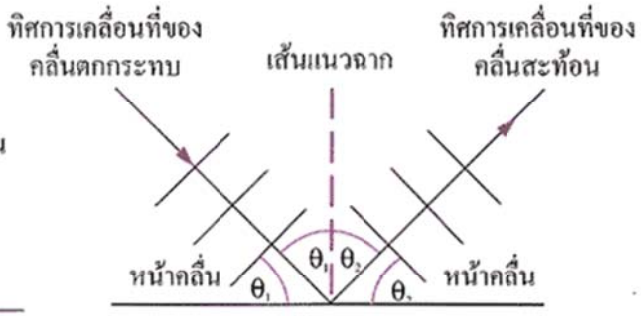
รูป 11.37 การสะท้อนของคลื่นจากปลายอิสระ

เมื่อคลื่นตกกระทบที่ปลายสุดของตัวกลางหรือเมื่อมีวัตถุมากั้นทางเดินของคลื่นจะเกิดการสะท้อน การสะท้อนของคลื่นมีกฎเกณฑ์อย่างไร ศึกษาได้จากคลื่นผิวน้ำในถาดคลื่นจากการทดลอง 11.1 ตอนที่ 1 เรื่องการสะท้อนของคลื่น

จากการทดลองให้คลื่นเส้นตรงไปตกกระทบแผ่นกั้น โดยหน้าคลื่นตกกระทบทำมุมต่างๆ กับแผ่นกั้น พบว่า ในการสะท้อนแต่ละครั้ง มุม θ_1 ที่หน้าคลื่นตกกระทบทำกับแผ่นกั้นเท่ากับมุม θ_2 ที่หน้าคลื่นสะท้อนทำกับแผ่นกั้นเสมอ ดังรูป 11.38



รูป 11.38 มุมที่หน้าคลื่นตกกระทบและหน้าคลื่นสะท้อนกระทำกับแผ่นกั้น



รูป 11.39 ทิศการเคลื่อนที่ของคลื่นตกกระทบและคลื่นสะท้อน

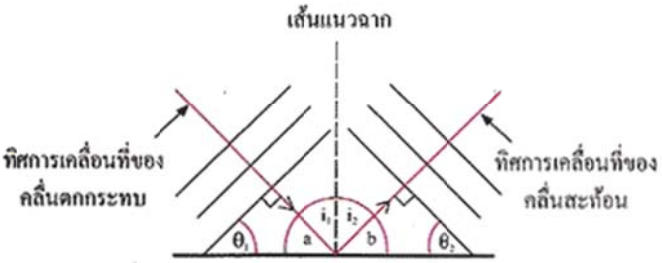
☐ ในแต่ละกรณี มุมที่หน้าคลื่นตกกระทบกระทำต่อแผ่นสะท้อน และมุมที่หน้าคลื่นสะท้อนทำกับแผ่นสะท้อนมีความสัมพันธ์กันหรือไม่อย่างไร

ในการเขียนทิศการเคลื่อนที่ของคลื่นตกกระทบและคลื่นสะท้อน เกิดการสะท้อนครั้งหนึ่งจะได้ดังรูป 11.39 เมื่อหน้าคลื่นตกกระทบแผ่นกั้นตรงจุดที่คลื่นตกกระทบ ลากเส้นตั้งฉากกับแผ่นกั้น เส้นนี้เรียกว่า **เส้นแนวฉาก** มุมที่ทิศการเคลื่อนที่ของคลื่นตกกระทบ ทำกับเส้นแนวฉากจะเท่ากับมุมที่หน้าคลื่นตกกระทบทำกับแผ่นกั้นคือ θ_1 มุมนี้เรียกว่า**มุมตกกระทบ** มุมที่ทิศการเคลื่อนที่ของคลื่นสะท้อนทำกับเส้นแนวฉากจะเท่ากับมุมที่หน้าคลื่นสะท้อนทำกับแผ่นกั้นคือ θ_2 มุมนี้เรียกว่า**มุมสะท้อน**

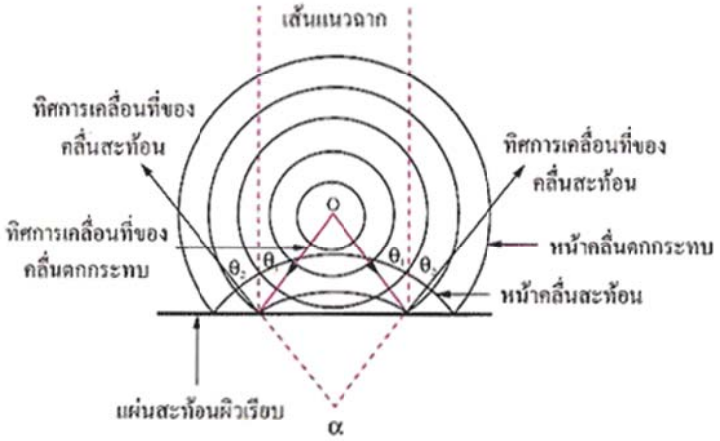
จากการทดลอง สรุปเป็น **กฎการสะท้อน** ได้ว่า **เมื่อเกิดการสะท้อนของคลื่นจะได้มุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อนเสมอ**

เมื่อคลื่นต่อเนื่องที่มีหน้าคลื่นตรงและหน้าคลื่นวงกลมตกกระทบแผ่นกั้นผิวเรียบตรง การสะท้อนของคลื่น จะเป็นไปตามกฎการสะท้อน ดังรูป 11.40 และ 11.41 ถ้าเปลี่ยนแผ่นกั้นผิวเรียบตรงเป็นแผ่นกั้นผิวเรียบโค้ง การสะท้อนที่เกิดขึ้นยังคงเป็นไปตามกฎการสะท้อน เช่น คลื่นหน้าตรงตกกระทบแผ่นกั้นผิวโค้งเว้า โดยทิศการเคลื่อนที่ของคลื่นตกกระทบขนานกับแกนของแผ่นกั้นผิวโค้งเว้า คลื่นสะท้อนจะมีทิศพุ่งตรงไปยังโฟกัส F ของแผ่นกั้นผิวโค้งเว้า

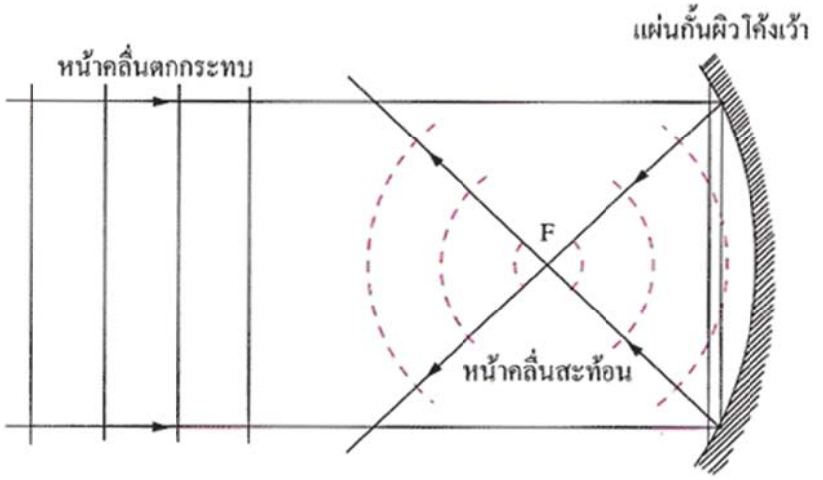
ดังรูป 11.42 ถ้าแหล่งกำเนิดคลื่นวงกลมอยู่ที่โฟกัส F คลื่นสะท้อนที่ผิวโค้งเว้าจะเป็นคลื่นหน้าตรง ดังรูป 11.43



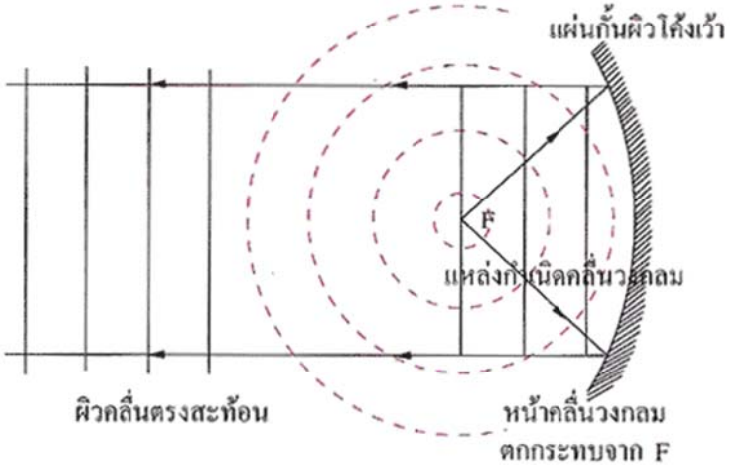
รูป 11.40 การสะท้อนของคลื่นต่อเนื่องเส้นตรงจากแผ่นกั้นหน้าตรง



รูป 11.41 การสะท้อนของคลื่นต่อเนื่องวงกลมจากแผ่นกั้นหน้าตรง

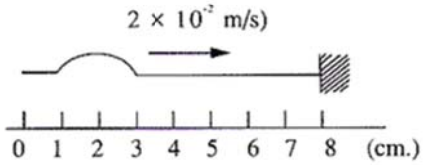


รูป 11.42 การสะท้อนของคลื่นต่อเนื่องเส้นตรงจากแผ่นกั้นผิวโค้งเว้า



รูป 11.43 การสะท้อนของคลื่นต่อเนื่องวงกลมจากแผ่นกั้นผิวโค้งเว้า

ตัวอย่าง 11.2 คลื่นดลในเส้นเชือกเคลื่อนที่ไปทางขวาด้วยอัตราเร็ว 2×10^{-2} เมตรต่อวินาที โดยปลายเส้นเชือกตรึงอยู่ที่ตำแหน่ง 8 เซนติเมตร ดังรูปที่เวลาเริ่มต้น คลื่นดลอยู่ที่ตำแหน่ง 3 เซนติเมตร เมื่อเวลาผ่านไป 1 วินาที และ 4 วินาที คลื่นอยู่ ณ ตำแหน่งใด วาดภาพประกอบ



รูป 11.44 รูปสำหรับตัวอย่าง 11.2

วิธีทำ หาระยะทางที่คลื่นเคลื่อนที่ได้ใน 1 วินาที จากสมการ $s = vt$

แทนค่า $s = 2\times10^{-2}\frac{\text{m}}{\text{s}}\times1\text{s}$

$s = 2$ cm.

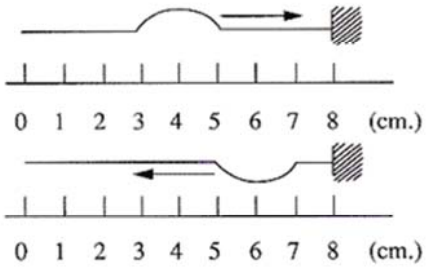
นั่นคือ เมื่อเวลาผ่านไป 1 วินาที คลื่นดลเคลื่อนที่ได้ระยะทาง 2 cm. เมื่อเขียนคลื่นดลจะอยู่ที่ตำแหน่ง 5 cm. ดังรูป

หาระยะทางที่คลื่นเคลื่อนที่ได้ใน 4 วินาที จากสมการ $s = vt$

แทนค่า $s = 2\times10^{-2}\frac{\text{m}}{\text{s}}\times4\text{s}$

$s = 8$ cm.

นั่นคือเมื่อเวลาผ่านไป 4 s คลื่นเคลื่อนที่ได้ระยะทาง 8 cm. แต่เนื่องจากปลายเชือกตรึงอยู่ที่ตำแหน่ง 8 cm. ดังนั้นเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ได้ 5 cm. คลื่นจะสะท้อนกลับ โดยคลื่นสะท้อนมีเฟสตรงข้ามกับคลื่นตกกระทบ และเคลื่อนที่ต่อมาอีก 3 cm. ดังนั้นคลื่นจะอยู่ที่ตำแหน่ง 5 cm. ดังรูป



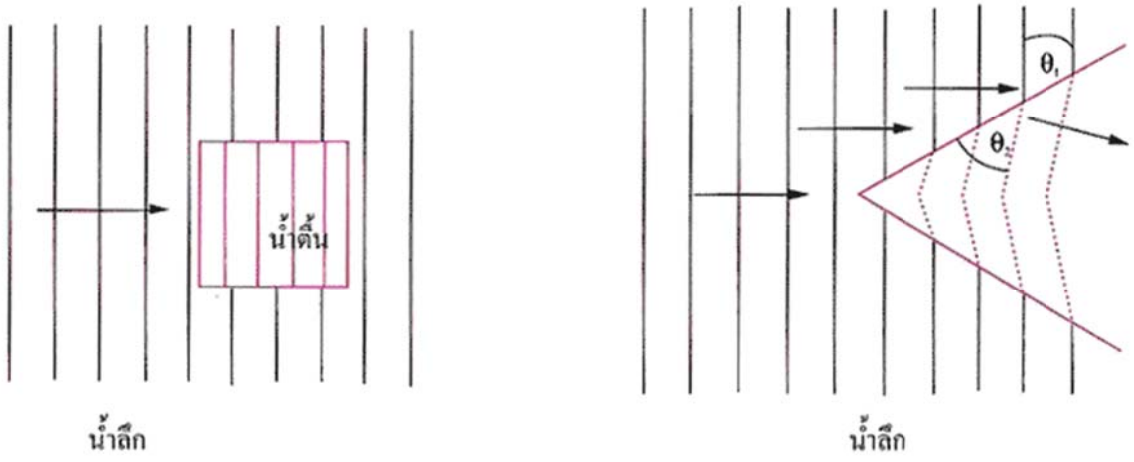
รูป 11.45 ภาพประกอบตัวอย่าง

คำตอบ เมื่อเวลาผ่านไป 1 วินาที และ 4 วินาที คลื่นจะอยู่ ณ ตำแหน่ง 5 เซนติเมตร แต่มีเฟสตรงข้ามกัน

11.4.2 การหักเห

เมื่อคลื่นตกกระทบสิ่งกีดขวางจะเกิดการสะท้อนขึ้น ถ้าคลื่นผิวน้ำเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางหนึ่งเข้าไปในอีกตัวกลางหนึ่ง ผลที่เกิดขึ้นจะเป็นอย่างไร ศึกษาได้จากการทดลอง 11.1 ตอนที่ 2 เรื่องการหักเหของคลื่น

เมื่อทดลองให้คลื่นผิวน้ำเคลื่อนที่จากบริเวณน้ำลึกเข้าไปยังบริเวณน้ำตื้น เพราะความลึกของน้ำเปลี่ยนความเร็วของคลื่น ดังนั้นอาจถือได้ว่าน้ำลึกและน้ำตื้นเป็นตัวกลางคนละชนิด โดยทิศการเคลื่อนที่ของคลื่นตกกระทบตั้งฉากกับรอยต่อ พบว่า คลื่นที่ผ่านเข้าไปในอีกตัวกลางหนึ่งมีความยาวคลื่นเปลี่ยนไป แต่ทิศการเคลื่อนที่ของคลื่นไม่เปลี่ยน ดังรูป 11.46 ก. เมื่อทดลองใหม่ให้คลื่นผิวน้ำเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อระหว่างบริเวณน้ำลึกบริเวณน้ำตื้นโดยทิศการเคลื่อนที่ของคลื่นตกกระทบไม่ตั้งฉากกับรอยต่อ พบว่า คลื่นที่ผ่านเข้าไปในอีกตัวกลางหนึ่งมีทิศการเคลื่อนที่เปลี่ยนไปและความยาวคลื่นเปลี่ยนไปด้วย ดังรูป 11.46 ข.



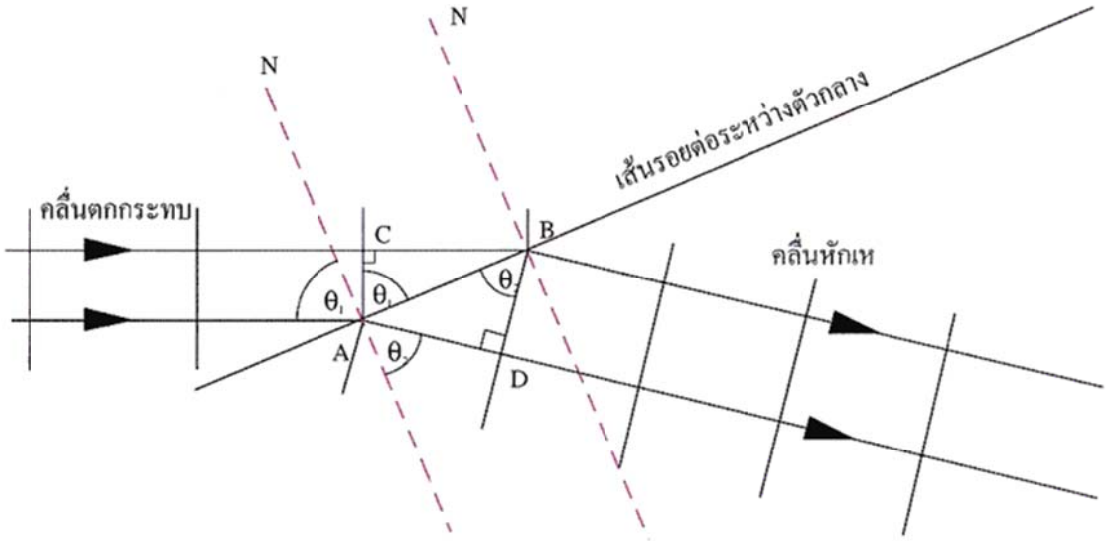
ก. หน้าคลื่นตกกระทบขนานกับรอยต่อ **ข. หน้าคลื่นตกกระทบไม่ตั้งฉากกับรอยต่อ**

รูป 11.46 คลื่นผิวน้ำเคลื่อนที่จากบริเวณน้ำลึกเข้าไปในบริเวณน้ำตื้น

- เมื่อคลื่นผิวน้ำเคลื่อนที่ผ่านบริเวณรอยต่อระหว่างเขตน้ำลึกและเขตน้ำตื้น ถ้าหน้าคลื่นตกกระทบขนานกับรอยต่อ ทิศการเคลื่อนที่ของคลื่นและความยาวคลื่นเปลี่ยนแปลงอย่างไร
- เมื่อคลื่นผิวน้ำเคลื่อนที่ผ่านบริเวณรอยต่อระหว่างเขตน้ำลึกและเขตน้ำตื้นถ้าหน้าคลื่นตกกระทบทำมุมกับรอยต่อ ทิศการเคลื่อนที่ของคลื่นและความยาวคลื่นเปลี่ยนแปลงอย่างไร

เมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าไปในอีกตัวกลางหนึ่ง พบว่าอัตราเร็วคลื่นจะเปลี่ยนไป ซึ่งวิเคราะห์ได้จากสมการ $v = f\lambda$ โดยความถี่ของคลื่นตกกระทบมีค่าคงตัว แต่ความยาวคลื่นในบริเวณน้ำลึกและบริเวณน้ำตื้นมีค่าต่างกัน ดังนั้น อัตราเร็วของคลื่นจึงแตกต่างกัน

ปรากฏการณ์ที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อระหว่างตัวกลางที่มีสมบัติต่างกัน แล้วทำให้อัตราเร็วและทิศการเคลื่อนที่ของคลื่นเปลี่ยนไป เรียกว่า **การหักเห** และคลื่นที่ผ่านรอยต่อระหว่างตัวกลางไปเรียกว่า **คลื่นหักเห**



รูป 11.47 การหักเหของคลื่น

เมื่อคลื่นเกิดการหักเห ความยาวคลื่นและอัตราเร็วของคลื่นตกกระทบ และคลื่นหักเหเปลี่ยนไป ปริมาณเหล่านี้มีความสัมพันธ์กัน ซึ่งหาได้ดังนี้

จากรูป 11.47 หน้าคลื่นของคลื่นตกกระทบทำมุม θ_1 กับเส้นรอยต่อ และหน้าคลื่นของคลื่นหักเหทำมุม θ_2 กับเส้นรอยต่อ ให้ N เป็นเส้นแนวฉาก ทิศการเคลื่อนที่ของคลื่นตกกระทบจะทำมุม θ_1 กับเส้นแนวฉาก มุม θ_1 คือ มุมตกกระทบ และทิศการเคลื่อนที่ของคลื่นหักเหจะทำมุม θ_2 กับเส้นแนวฉาก มุม θ_2 เรียกว่า **มุมหักเห** ซึ่งเป็นมุมที่ทิศการเคลื่อนที่ของคลื่นหักเหทำกับเส้นแนวฉาก

จากรูป 11.47 BC เป็นความยาวคลื่นในบริเวณน้ำลึก λ_1

AD เป็นความยาวคลื่นในบริเวณน้ำตื้น λ_2

จะได้ $\sin\theta_1 = \dfrac{BC}{AB} = \dfrac{\lambda_1}{AB}$

$\sin\theta_2 = \dfrac{AD}{AB} = \dfrac{\lambda_2}{AB}$

ดังนั้น $$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{\lambda_1 / AB}{\lambda_2 / AB}$$

$$= \frac{\lambda_1}{AB} \quad \frac{AB}{\lambda_2}$$

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \qquad (11.2)$$

ถ้าให้ v_1 เป็นอัตราเร็วคลื่นในน้ำลึก

v_2 เป็นอัตราเร็วคลื่นในน้ำตื้น

เนื่องจากคลื่นในน้ำลึกและน้ำตื้นมีความถี่เท่ากันเพราะเกิดจากแหล่งกำเนิดคลื่นเดียวกัน ดังนั้น

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{f\lambda_1}{f\lambda_2}$$

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \qquad (11.3)$$

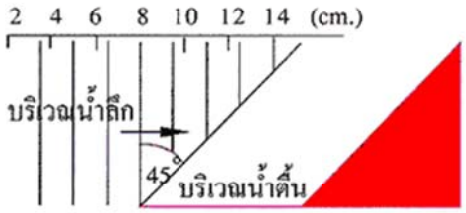
จากสมการ (11.2) และ (11.3) จะได้

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{v_1}{v_2} \qquad (11.4)$$

จากสมการ (11.3) อธิบายได้ว่า เมื่อคลื่นมีการหักเห อัตราส่วนระหว่างไซน์ของมุมตกกระทบกับไซน์ของมุมหักเหมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างอัตราเร็วคลื่นในตัวกลางที่คลื่นตกกระทบกับ อัตราเร็วคลื่นในตัวกลางที่คลื่นหักเห

☐ จากการสังเกตคลื่นผิวน้ำในถาดคลื่น เมื่อผิวน้ำเคลื่อนที่มาถึงรอยต่อระหว่างเขตน้ำลึกกับเขตน้ำตื้น คลื่นมีการสะท้อนหรือไม่ อย่างไร

ตัวอย่าง 11.3 คลื่นผิวน้ำมีความถี่ 12 เฮิรตซ์ เคลื่อนที่จากบริเวณน้ำลึกเข้าสู่บริเวณน้ำตื้น โดยหน้าคลื่นตกกระทบทำมุม 45 องศา กับเส้นรอยต่อน้ำลึกกับน้ำตื้น



รูป 11.48 สำหรับตัวอย่าง 11.3

ก. อัตราเร็วของคลื่นผิวน้ำในน้ำลึกเป็นเท่าใด

ข. เมื่อคลื่นผ่านเส้นรอยต่อน้ำลึกกับน้ำตื้น มุมหักเหเป็นเท่าใด กำหนดความยาวคลื่นในน้ำตื้น เท่ากับ 1.0 เซนติเมตร

ค. ความถี่ของคลื่นในน้ำตื้นเท่ากับกี่เฮิรตซ์

วิธีทำ ก. หาความยาวคลื่นจากรูป โดยนับหน้าคลื่นจาก 8 cm. ถึง 14 cm. มีคลื่น 4 ลูก

ดังนั้น 4λ = 14 cm. – 8 cm.

จะได้ความยาวคลื่น λ = 1.5 cm.

หาอัตราเร็วของคลื่นผิวน้ำในน้ำลึกได้จากสมการ $v = \lambda f$

แทนค่า $v = 1.5 \times 10^{-2}\ \text{m} \times 12\ \text{Hz}$

$= 0.18\ \text{m/s}$

คำตอบ อัตราเร็วของคลื่นผิวน้ำในน้ำลึกเท่ากับ 0.18 เมตรต่อวินาที

ข. หามุมหักเห θ_2 ได้จาก $\dfrac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \dfrac{\lambda_1}{\lambda_2}$

มุมตกกระทบ $\theta_1 = 45^\circ$

ความยาวคลื่นในน้ำลึก $\lambda_1 = 1.5 \times 10^{-2}$ m

ความยาวคลื่นในน้ำตื้น $\lambda_2 = 1.0 \times 10^{-2}$ m

แทนค่า $\dfrac{\sin 45^\circ}{\sin\theta_2} = \dfrac{1.5\times10^{-2}\ \text{m}}{1.0\times10^{-2}\ \text{m}}$

$\sin\theta_2 = \dfrac{1}{\sqrt{2}} \times \dfrac{1}{1.5} = 0.471$

$\theta_2 = 28^\circ$ (ประมาณ)

คำตอบ มุมหักเหมีค่าเท่ากับ 28 องศา

ค. ความถี่ของคลื่นในบริเวณน้ำตื้น

ความถี่ของคลื่นผิวน้ำในน้ำตื้นเท่ากับความถี่ของคลื่นในน้ำลึกเท่ากับ 12 เฮิรตซ์ เพราะเกิดจากแหล่งกำเนิดเดียวกัน

คำตอบ ความถี่ของคลื่นในน้ำตื้นเท่ากับ 12 เฮิรตซ์

11.4.3 การแทรกสอด

จากหลักการซ้อนทับของคลื่น เราทราบแล้วว่า ถ้าคลื่นดลสองคลื่นมาพบกัน จะเกิดการรวมกัน ถ้าคลื่นที่มาพบกันเป็นคลื่นต่อเนื่องที่มีความถี่เท่ากันและมีเฟสตรงกัน ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจะเป็นอย่างไร ศึกษาได้จากการทดลอง 11.1 ตอนที่ 3 เรื่องการแทรกสอดของคลื่น

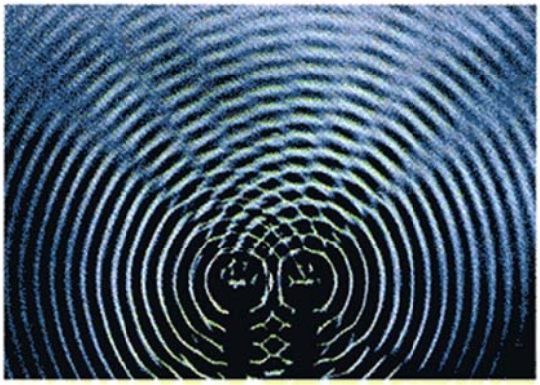
จากการทดลอง แหล่งกำเนิดคลื่นซึ่งเป็นปุ่มกลมสองปุ่ม ถือได้ว่าเป็น**แหล่งกำเนิดอาพันธ์** เพราะให้คลื่นที่มีความถี่เท่ากันและมีเฟสตรงกันหรือต่างกันคงตัว เมื่อปุ่มกำเนิดคลื่นสั่นจะทำให้เกิดคลื่นต่อเนื่องวงกลมสองขบวนที่เหมือนกัน (คือมีความถี่เท่ากันและมีเฟสตรงกัน) เมื่อคลื่นทั้งสองขบวนซ้อนทับกัน จะเห็นเป็นแนวมืดและแนวสว่างสลับกัน เรียกว่า **ลวดลายการแทรกสอด** ดังรูป 11.49 การซ้อนทับของคลื่นต่อเนื่องทั้งสองขบวนที่มาพบกันนี้ เรียกว่า **การแทรกสอด**

รูป 11.49 ลวดลายการแทรกสอดของคลื่นต่อเนื่องวงกลมสองคลื่นที่เกิดจากแหล่งกำเนิดอาพันธ์

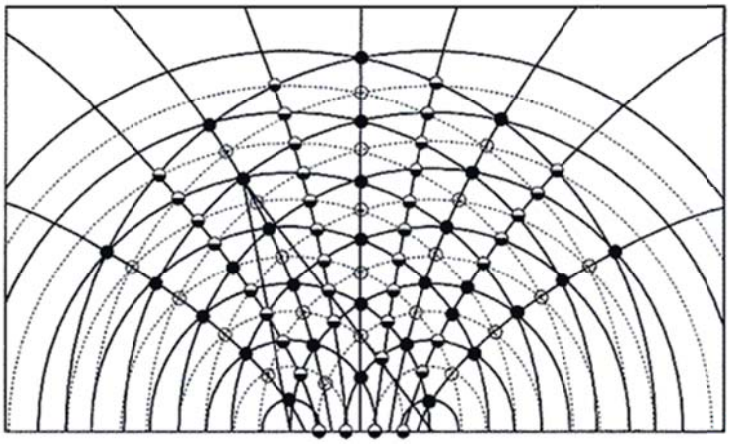
การแทรกสอดของคลื่นในรูป 11.49 เกิดจากคลื่นต่อเนื่องวงกลมสองขบวนที่เหมือนกันทุกประการ มาพบกันและเกิดการซ้อนทับกัน โดยเมื่อใดที่สันคลื่นพบท้องคลื่น ตำแหน่งนั้นแอมพลิจูดของคลื่นทั้งสองจะหักล้างกัน ทำให้ผิวน้ำไม่กระเพื่อม เรียกว่าเกิด**การแทรกสอด**

แบบหักล้าง ตำแหน่งที่ผิวน้ำไม่กระเพื่อมหรือมีการกระจัดเป็นศูนย์ เรียกว่า **บัพ** แต่ถ้าสันคลื่นพบสันคลื่น หรือท้องคลื่นพบท้องคลื่น แอมพลิจูดของคลื่นทั้งสอง ณ ที่นั่นจะเสริมกัน ทำให้ผิวน้ำ ณ ตำแหน่งนั้นมีระดับสูงขึ้นมากที่สุดหรือลดต่ำมากที่สุด ตามลำดับ เรียกว่าเกิด**การแทรกสอดแบบเสริม** และเรียกตำแหน่งที่ผิวน้ำกระเพื่อมมากที่สุดหรือมีการกระจัดมากที่สุด ว่า **ปฏิบัพ**

เมื่อเขียนเส้นเชื่อมต่อบัพที่อยู่ถัดกัน จะได้**เส้นบัพ** และถ้าเขียนเส้นเชื่อมต่อปฏิบัพที่อยู่ถัดกันไป จะได้ **เส้นปฏิบัพ** ดังรูป 11.50 ก. ถ้ากำหนดให้ ● แทนตำแหน่งที่ท้องคลื่นพบท้องคลื่น ○ แทนตำแหน่งที่สันคลื่นพบสันคลื่น ◒ แทนตำแหน่งที่ท้องคลื่นพบสันคลื่น และส่วนโค้งของวงกลมแทนหน้าคลื่น เราสามารถเขียนแผนภาพการแทรกสอดของคลื่นต่อเนื่องวงกลมสองคลื่นได้ดังรูป 11.50 ข.



ก.



ข.

รูป 11.50 การแทรกสอดของคลื่นต่อเนื่องวงกลมสองคลื่น

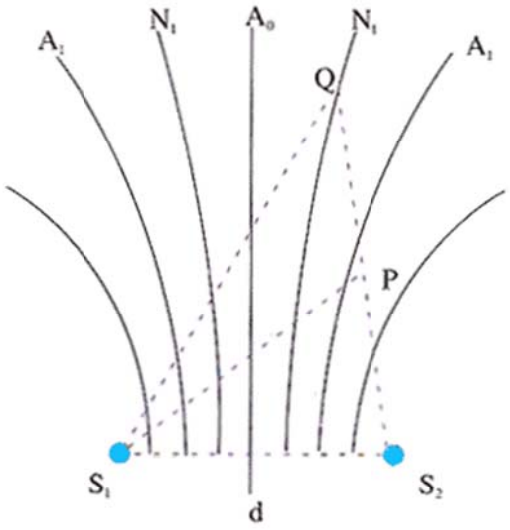
จากรูป 11.50 ข. ถ้าพิจารณาเฉพาะเส้นบัพและปฏิบัพจะได้ดังรูป 11.51 โดย S_1 และ S_2 เป็นแหล่งกำเนิดอาพันธ์ A_0 A_1 A_2 ... เป็นเส้นปฏิบัพ N_1 N_2 N_3 ... เป็นเส้นบัพ

เมื่อพิจารณาเส้นปฏิบัพ ทุกๆ จุดบนเส้น ปฏิบัพทุกจุดคลื่นจะมีการแทรกสอดแบบเสริม นั่นคือ สันคลื่นซ้อนทับสันคลื่น และท้องคลื่นซ้อนทับกับท้องคลื่นพอดี ดังนั้น ผลต่างระหว่าง

ระยะทางจากแหล่งกำเนิดคลื่นทั้งสองไปยังจุดใดๆ บนเส้นปฏิบัพจะเท่ากับจำนวนเต็มของความยาวคลื่นเสมอ เช่นที่ P ในรูป 11.51 จะได้

$$S_1P - S_2P = n\lambda \text{ เมื่อ } n = 0,1,2,\ldots \quad \textbf{(11.5)}$$

ในทำนองเดียวกัน ทุก ๆ จุดบนเส้นบัพคลื่นมีการแทรกสอดแบบหักล้าง นั่นคือ สันคลื่นซ้อนทับกับท้องคลื่นพอดี ดังนั้น ผลต่างระหว่างระยะทางจากแหล่งกำเนิดคลื่นทั้งสองไปยังจุดใดๆ บนเส้นบัพ เท่ากับจำนวนเต็มบวกครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นเสมอ เช่นที่ Q ในรูป 11.51 จะได้



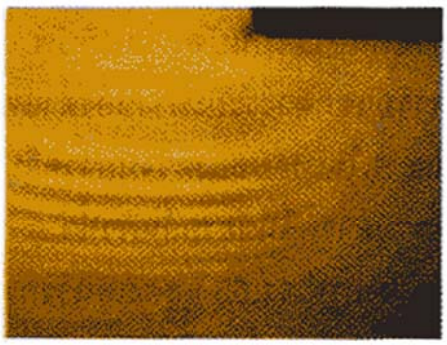
รูป 11.51 เส้นบัพและเส้นปฏิบัพที่เกิดจากการแทรกสอดของคลื่น

$$S_1Q - S_2Q = (n+\frac{1}{2})\lambda \text{ เมื่อ } n = 0,1,2,\ldots \quad \textbf{(11.6)}$$

ปริมาณ $S_1P - S_2P$ และ $S_1Q - S_2Q$ เรียกว่า **ความต่างระยะทาง**

ขณะเกิดการแทรกสอด ในแนว S_1 และ S_2 ในรูป 11.51 รูปคลื่นที่เกิดขึ้นจะปรากฏเสมือนนิ่งอยู่กับที่ เรียกว่า **คลื่นนิ่ง**

คลื่นนิ่งของคลื่นหน้าตรงสามารถทำให้เกิดขึ้นได้ โดยให้คลื่นผิวน้ำที่มีหน้าคลื่นเส้นตรงเคลื่อนที่จากแหล่งกำเนิดไปกระทบแผ่นกั้นขอบตรงที่ขนานกับหน้าคลื่น คลื่นที่สะท้อนกลับจะแทรกสอดกับคลื่นเดิมเกิดเส้นบัพและเส้นปฏิบัพขึ้น ดังรูป 11.52

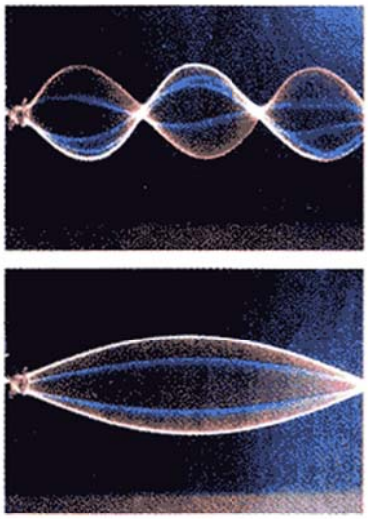


รูป 11.52 เส้นบัพและเส้นปฏิบัพในคลื่นนิ่ง

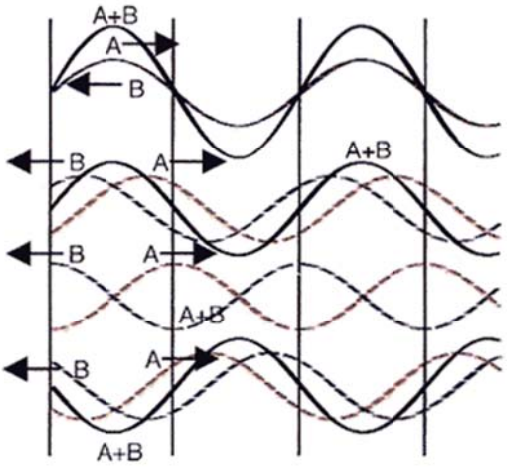
คลื่นนิ่งเกิดในเส้นเชือกได้เช่นกัน ซึ่งศึกษาได้จากกิจกรรม 9.1 เรื่องคลื่นนิ่งในเส้นเชือก

เมื่อทำให้เกิดคลื่นในเส้นเชือกที่ปลายข้างหนึ่งตรึงและมีความตึงพอเหมาะ คลื่นที่สะท้อนกลับจะแทรกสอดกับคลื่นตกกระทบ โดยการแทรกสอดแบบเสริมจะอยู่ที่ตำแหน่งหนึ่ง การแทรกสอดแบบหักล้างก็จะอยู่ที่อีกตำแหน่งหนึ่งตลอดเวลา ดังรูป 11.53 ทำให้เห็นตำแหน่งที่อนุภาคของ

เส้นเชือกสั่นมากที่สุด หรือมีการกระจัดมากที่สุดซึ่งเป็น**ปฏิบัพ** และตำแหน่งที่อนุภาคของเส้นเชือกไม่สั่นเลยหรือมีการกระจัดเป็นศูนย์ซึ่งเป็น**บัพ** แสดงได้ดังกราฟรูป 11.54



รูป 11.53 คลื่นนิ่งในเส้นเชือก



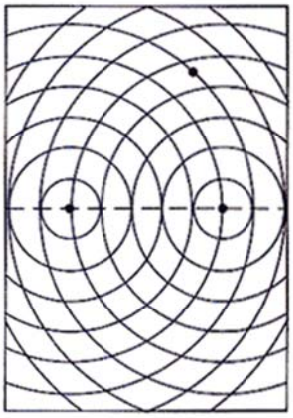
รูป 11.54 การใช้หลักการซ้อนทับหาคลื่นลัพธ์ที่เกิดจากคลื่น A และ B ที่เคลื่อนที่สวนทางกัน

ตัวอย่าง 11.4 S_1 และ S_2 เป็นปุ่มกำเนิดคลื่นของถาดคลื่นและเป็นแหล่งกำเนิดอาพันธ์ ทำให้เกิดการแทรกสอดของคลื่น ดังรูป 11.55 ถ้า Q อยู่ห่างจาก S_1 และ S_2 เท่ากับ 9.6 และ 7.2 เซนติเมตร ตามลำดับ จงหาค่า

ก. ตำแหน่ง Q เป็นบัพหรือปฏิบัพ

ข. ความแตกต่างระยะทางของตำแหน่ง Q จาก S_1 และ S_2 ในเทอมของความยาวคลื่น λ เป็นเท่าไร

ค. ความยาวคลื่นของคลื่นผิวน้ำ



รูป 11.55 สำหรับตัวอย่าง 11.4

วิธีทำ จากรูป 11.55 แสดงเส้นวงกลมแทนแนวสันคลื่น แนวกึ่งกลางระหว่างสันคลื่นที่ติดกันจะเป็นแนวท้องคลื่น (ซึ่งไม่เขียนแสดงไว้)

ก. พิจารณาตำแหน่ง Q จะเห็นว่า Q อยู่บนสันคลื่นลำดับที่ 6 ของ S_1 และอยู่บนท้องคลื่นลำดับที่ 5 ของ S_2 ดังนั้นที่ Q เกิดการแทรกสอดแบบเสริม นั่นคือ ตำแหน่ง Q เป็นบัพ

ข. จากรูป ตำแหน่งของ Q เทียบกับ S_1 หรือ $S_1Q = 6\lambda$

ตำแหน่งของ Q เทียบกับ S_2 หรือ $S_2Q = 4.5\lambda$

ดังนั้น ความต่างระยะทางของตำแหน่ง $Q = S_1Q - S_2Q = 6\lambda - 4.5\lambda = 1.5\lambda$

ค. จากข้อ ข. $S_1Q - S_2Q = 1.5\lambda$ และจากโจทย์ $S_1Q = 9.6$ cm. และ $S_2Q = 7.2$ cm.
แทนค่า จะได้ $\lambda = 1.6$ cm.

คำตอบ ก. ตำแหน่ง Q เป็นบัพ

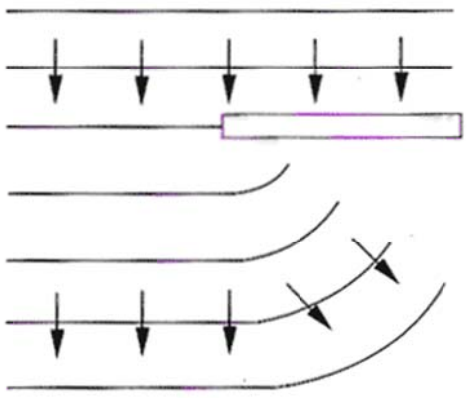
ข. ความต่างระยะทางของตำแหน่ง Q เท่ากับ 1.5λ

ค. ความยาวคลื่นของคลื่นผิวน้ำเท่ากับ 1.6 เซนติเมตร

11.4.4 การเลี้ยวเบนของคลื่น

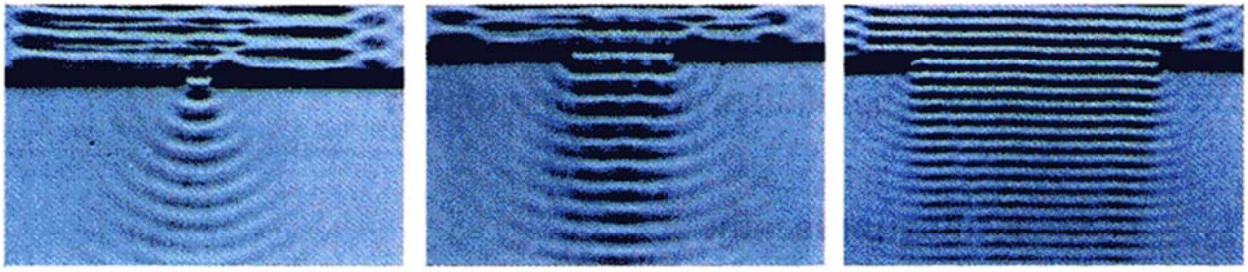
เมื่อคลื่นเคลื่อนที่พบสิ่งกีดขวางจะสะท้อน แต่ถ้าสิ่งกีดขวางนั้นกั้นการเคลื่อนที่ของคลื่นแต่เพียงบางส่วน คลื่นจะเคลื่อนที่อย่างไร จะทราบได้จากการทดลอง 11.1 ตอนที่ 4 เรื่อง การเลี้ยวเบนของคลื่น

เมื่อทดลองนำแผ่นกั้นขวางการเคลื่อนที่ของคลื่นบางส่วน พบว่า มีคลื่นส่วนหนึ่งแผ่กระจายจากขอบของแผ่นกั้นไปทางด้านหลังของแผ่นกั้นนั้น ดังรูป 11.56 ก. การที่มีคลื่นปรากฏในบริเวณด้านหลังของแผ่นกั้นเช่นนี้ เรียกว่า **การเลี้ยวเบน** ถ้าเพิ่มความยาวคลื่นของคลื่นตกกระทบก็จะเห็นการเลี้ยวเบนเกิดมากขึ้น ดังรูป 11.56 ข.



รูป 11.56 การเลี้ยวเบนของคลื่นผิวน้ำเมื่อผ่านขอบสิ่งกีดขวาง

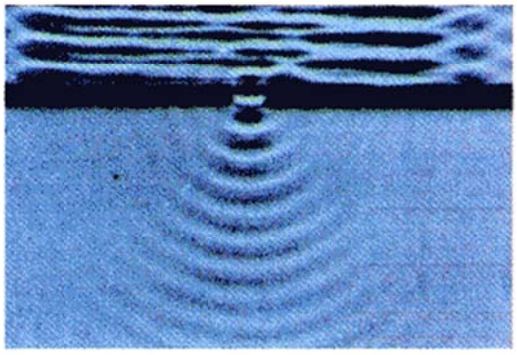
เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ปะทะสิ่งกีดขวางที่มี**ช่องเปิด** คลื่นจะเลี้ยวเบนเช่นกัน การเลี้ยวเบนจะเกิดมากหรือน้อยขึ้นกับความกว้าง (d) ของช่องเปิด ถ้าช่องเปิดมีความกว้างน้อยกว่าความยาวคลื่น (λ) ดังรูป 11.57



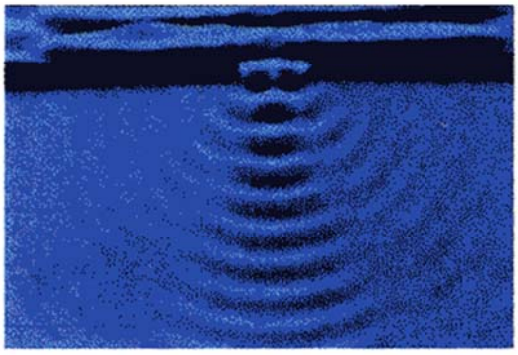
$d << \lambda$ $d \approx \lambda$ $d >> \lambda$

รูป 11.57 การเลี้ยวเบนของคลื่นผิวน้ำที่มีความยาวคลื่นคงตัวเมื่อผ่านช่องเปิดเดี่ยวที่มีความกว้างต่าง ๆ กัน

สำหรับช่องเปิดที่แคบมาก คลื่นจะแผ่ออกทำให้ช่องเปิดเสมือนเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นวงกลม ดังรูป 11.58 และถ้าสิ่งกีดขวางสองแหล่งมีช่องเปิดสองช่องที่แคบมาก ช่องเปิดทั้งสองจึงเป็นเสมือนแหล่งกำเนิดคลื่นวงกลม ทำให้เกิดการแทรกสอดของคลื่น จึงนับได้ว่าเป็นการแทรกสอดที่เกิดจากการเลี้ยวเบน ดังรูป 11.59



รูป 11.58 การเลี้ยวเบนจากช่องเปิดที่แคบมากๆ ($d << \lambda$)



รูป 11.59 การแทรกสอดของคลื่นจากการเลี้ยวเบนผ่านช่องเปิดสองช่อง

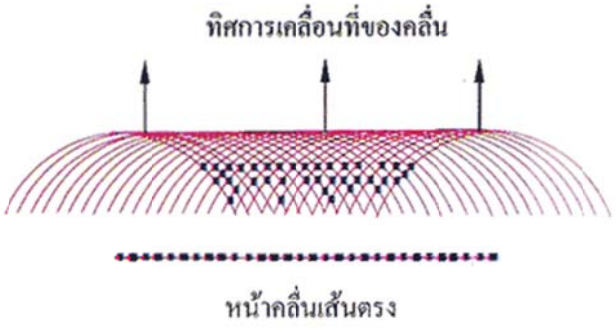
จากการที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านช่องเปิดแคบๆ แล้วแผ่ออกเป็นคลื่นวงกลม จึงดูเสมือนเป็นคลื่นที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดคลื่นวงกลม ปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้โดยใช้**หลักการของฮอยเกนส์** ซึ่งกล่าวว่า **แต่ละจุดบนหน้าคลื่นถือได้ว่าเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นใหม่ซึ่งส่งคลื่นออกไปทุกทิศทางด้วยอัตราเร็วเท่ากับอัตราเร็วของคลื่นเดิม**

Christian Huygens (พ.ศ. 2172 – 2238) เป็นนักวิทยาศาสตร์ชาวเนเธอร์แลนด์ ผู้เสนอทฤษฎีที่ว่าแสงเป็นคลื่น ได้ประดิษฐ์และปรับปรุงกล้องโทรทรรศน์จนสามารถค้นพบดวงจันทร์เป็นบริวารของดาวเสาร์ซื่อไททันและเห็นวงแหวนของดาวเสาร์อย่างชัดเจน เขาเป็นคนแรกที่ประดิษฐ์นาฬิกาแบบลูกตุ้มที่สามารถควบคุมเวลาได้

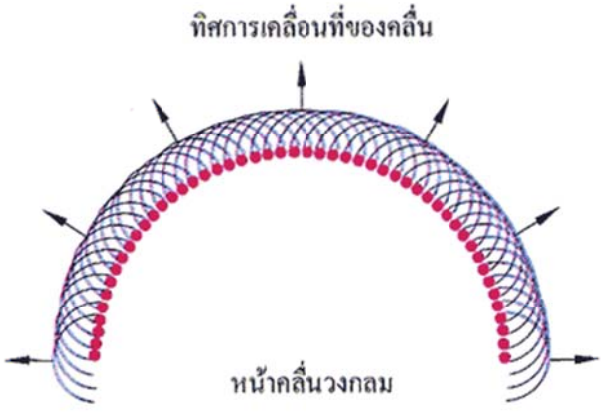
รูป 11.60 คริสเตียน ฮอยเกนส์

หลักการของฮอยเกนส์จึงสรุปได้ว่า ทุกๆ จุดบนหน้าคลื่นเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นใหม่ที่ทำให้เกิดคลื่นวงกลมที่มีเฟสเดียวกัน และเคลื่อนที่ในทิศการเคลื่อนที่ของคลื่นเดิม

พิจารณาหน้าคลื่นเส้นตรง ดังรูป 11.61 ก. และหน้าคลื่นวงกลม ดังรูป 11.61 ข. ซึ่งเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว v ในเวลา t ต่อมาหน้าคลื่นใหม่จะอยู่ห่างจากตำแหน่งเดิมเป็นระยะ vt อธิบายได้ว่า เนื่องจากทุกๆ จุดบนหน้าคลื่นเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นใหม่ คลื่นที่ออกจากทุกๆ จุดจึงเป็นคลื่นวงกลม ฉะนั้นในเวลา t คลื่นที่ออกจากทุกๆ จุดบนหน้าคลื่นเส้นตรงจะมีหน้าคลื่นเป็นวงกลมเล็กๆ รัศมี vt แผ่ออกไปด้านหน้า ถ้าลากเส้นสัมผัสกับวงกลมเล็กๆ เหล่านี้ จะได้หน้าคลื่นใหม่ที่ขนานกับหน้าคลื่นเดิม



ก. หน้าคลื่นเส้นตรง

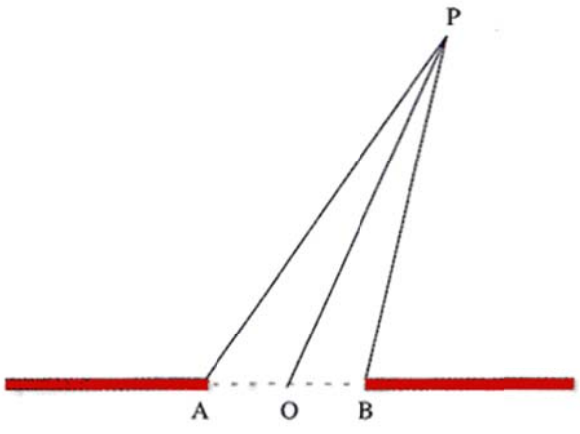


ข. หน้าคลื่นวงกลม

รูป 11.61 หน้าคลื่นซึ่งเกิดจากคลื่นวงกลมเล็กๆ ทำให้เกิดหน้าคลื่นใหม่ขนานกับหน้าคลื่นเดิม

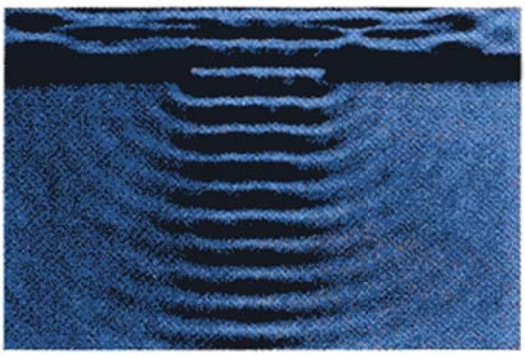
ในกรณีคลื่นเคลื่อนที่ผ่านช่องเปิดที่มีความกว้างมากกว่าความยาวคลื่น พบว่าคลื่นที่เกิดจากการเลี้ยวเบนมีแนวบัพเกิดขึ้น ซึ่งอธิบายได้โดยใช้หลักการของฮอยเกนส์และหลักการซ้อนทับของคลื่น ดังนี้

เมื่อมีคลื่นผ่านช่องเปิด AB ซึ่งกว้างกว่าความยาวคลื่น ดังรูป 11.62 ทุกๆ จุดบนเส้น AB จะทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นที่ให้คลื่นวงกลมใหม่มากมายที่เหมือนกัน ดังนั้นที่จุด P จะมีการแทรกสอดของคลื่นจากแหล่งกำเนิดทุกจุดบน AB ถ้าให้ O เป็นจุดกึ่งกลาง AB แสดงว่า AO หรือ OB ยาวกว่า $\frac{\lambda}{2}$ ทำให้ผลต่างระหว่าง AP และ OP มีโอกาสต่างกัน $\frac{\lambda}{2}$ พอดีได้ ดังนั้นคลื่นจาก A และ O เมื่อเคลื่อนที่ถึงจุด P จะแทรกสอดแบบหักล้างในทำนองเดียวกัน คลื่นวงกลมจากแหล่งกำเนิด ที่ตำแหน่งต่างๆ จาก A ถึง O และจาก O ถึง B แต่ละคู่จะแทรกสอดแบบหักล้างที่จุด P ได้เช่นกัน เป็นผลให้จุด P เป็นตำแหน่งที่ผิวน้ำไม่กระเพื่อมหรือเป็นบัพ เนื่องจากจุด P เคลื่อนที่ไปพร้อมกับการเคลื่อนที่ของคลื่นจึงทำให้เกิดแนวบัพขึ้น ดังรูป 11.63



รูป 11.62 การเลี้ยวเบนจากช่องเปิดที่กว้างกว่าความยาวคลื่น

การศึกษาที่ผ่านมา จะเห็นว่า เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ไปในตัวกลางหนึ่งแล้วพบสิ่งกีดขวางหรือคลื่นเคลื่อนที่จากตัวกลางหนึ่งไปอีกตัวกลางหนึ่ง คลื่นจะมีพฤติกรรมเปลี่ยนไป คือจะ สะท้อน หักเห แทรกสอด และเลี้ยวเบน ซึ่งเรียกรวมว่า**สมบัติของคลื่น** คลื่นชนิดอื่นๆ ที่นอกเหนือจากคลื่นผิวน้ำที่กล่าวในบทนี้ มีสมบัติเหล่านี้เช่นกัน

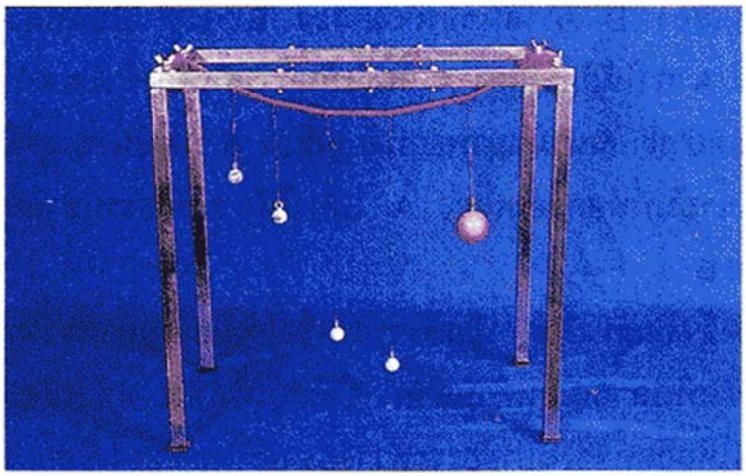


รูป 11.63 เส้นบัพจากการเลี้ยวเบนจากช่องเปิดที่กว้างกว่า ความยาวคลื่น

- การแทรกสอดของคลื่นและการเลี้ยวเบนของคลื่นจำเป็นต้องเกิดขึ้นพร้อมกันทุกครั้งหรือไม่ เพราะเหตุใด
- การเลี้ยวเบนของคลื่นเมื่อผ่านสลิตที่แคบกว่าความยาวคลื่น จะมีแนวบัพเกิดขึ้นหรือไม่ เพราะเหตุใด

11.5 คลื่นนิ่งและการสั่นพ้อง

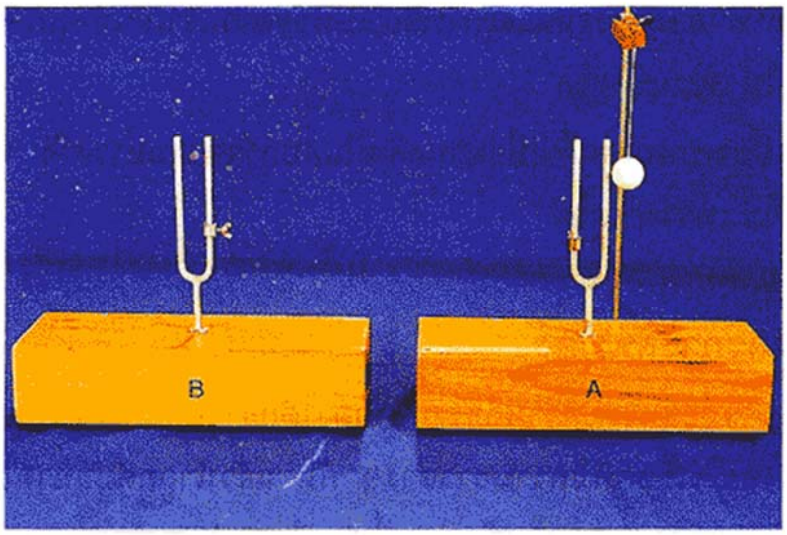
วัตถุต่างๆ เมื่อสั่นจะมีความถี่ธรรมชาติดังได้กล่าวแล้ว เมื่อนำลูกตุ้มขนาดเล็กหลายลูกมาผูกกับเชือกโดยใช้เชือกที่มีความยาวต่างๆ กัน แล้วนำลูกตุ้มขนาดใหญ่ผูกด้วยเชือกที่มีความยาวเท่ากับความยาวของลูกตุ้มเล็กลูกหนึ่ง เมื่อแกว่งลูกตุ้มใหญ่จะสังเกตการสั่นของลูกตุ้มเล็กต่างๆ ดังรูป 11.64



รูป 11. 64 การสั่นของลูกตุ้มที่มีความยาวเชือกต่างๆ กัน

จากการสังเกตจะเห็นว่าลูกตุ้มเล็กที่มีเชือกผูกความยาวเท่ากับเชือกที่ผูกลูกตุ้มใหญ่จะเริ่มสั่นและช่วงการสั่นจะกว้างขึ้นเรื่อยๆ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า **การสั่นพ้อง** ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อวัตถุถูกบังคับให้สั่นด้วยแรงภายนอกที่มีความถี่เท่ากันหรือเป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่ธรรมชาติของวัตถุนั้น มีผลทำให้วัตถุสั่นด้วยแอมพลิจูดที่กว้างกว่าปกติ

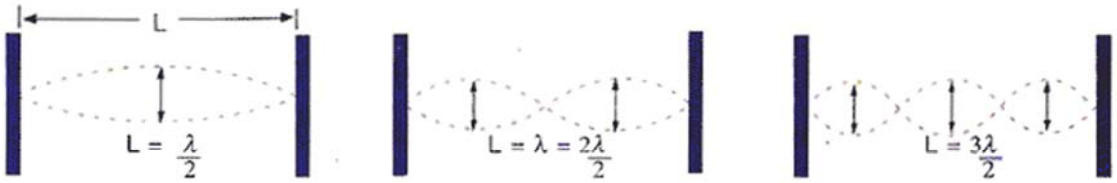
ในกรณีของส้อมเสียงสองอันที่มีความถี่เท่ากันเมื่อนำมาติดบนกล่องไม้โดยวางหันด้านที่เป็นปลายเปิดเข้าหากัน ดังรูป 11.65



รูป 11. 65 การสั่นพ้องจากส้อมเสียง

เมื่อเคาะส้อมเสียง B การสั่นของส้อมเสียง B จะถ่ายโอนพลังงานผ่านโมเลกุลของอากาศไปยังกล่องไม้ A ทำให้ส้อมเสียง A สั่นนี้เป็นการสั่นพ้องซึ่งมีผลทำให้ลูกปิงปอง P สั่นโดยมีแอมพลิจูดสูง แต่ถ้านำดินน้ำมันมาพอกที่ส้อมเสียง A การสั่นของลูกปิงปองจะมีแอมพลิจูดน้อยมาก เพราะดินน้ำมันที่พอกส้อมเสียง A ได้ทำให้ความถี่ธรรมชาติของ A เปลี่ยนไปจึงไม่เท่ากับความถี่ของ B

สำหรับกรณีคลื่นในเส้นเชือก เมื่อพิจารณาเชือกที่มีปลายด้านขวาผูกติดแน่นกับหมุด A แล้วนำเครื่องสั่นมาติดที่ปลายเชือกด้านซ้าย ขึงเชือกให้ตึง แล้วเปิดเครื่องสั่นโดยปรับให้ความถี่ของเครื่องสั่นให้สอดคล้องกับระยะระหว่างปลายทั้งสองของเชือก แล้วทำให้เกิดการสั่นที่มีแอมพลิจูดสูงสุดหรือเกิดปฏิบัพและตำแหน่งที่อนุภาคของเชือกไม่สั่นเลยคือมีการกระจัดเป็นศูนย์หรือเกิดบัพดังรูป 11.66



ก. ข. ค.

รูป 11. 66 คลื่นนิ่งในเส้นเชือก

จากรูป 11.66 เมื่อปรับความถี่ของเครื่องสั่นจากศูนย์เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนเกิดปฏิบัพตรงกลางดังรูป 11.66 ก. จะได้ความสัมพันธ์ คือ $L = \frac{\lambda}{2}$ และกรณีนี้เกิดคลื่นนิ่งหนึ่งวง เมื่อปรับ

ความถี่ให้สูงขึ้นจะเกิดคลื่นนิ่งดังรูป 11.66 ข. จะได้ความสัมพันธ์ $L = \frac{2\lambda}{2}$ และเมื่อปรับความถี่ของเครื่องสั่นจนกระทั่งเกิดคลื่นนิ่งครั้งถัดไปดังรูป 11.66 ค. จะได้ความสัมพันธ์ $L = \frac{3\lambda}{2}$ ดังนั้นถ้าเกิดคลื่นนิ่ง n วง หรือครั้งที่ n จะได้ความสัมพันธ์ $L = \frac{n\lambda}{2}$ สรุปความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นของคลื่นนิ่งในเส้นเชือกที่ยาว L ในกรณีทั่วไป ได้ดังสมการ

$$\lambda = \frac{2L}{n} \quad \text{เมื่อ} \quad n = 1, 2, 3, \ldots \tag{11.7}$$

ในกรณีต่างๆ ที่ทำให้เกิดคลื่นนิ่งนี้ ความถี่ของเครื่องสั่นจะต้องสอดคล้องกับความถี่ธรรมชาติของคลื่นในเส้นเชือกจึงจะทำให้เกิดการสั่นพ้อง ซึ่งมีความถี่ดังสมการ

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{nv}{2L} \quad \text{เมื่อ} \quad n = 1, 2, 3, \ldots \tag{11.8}$$

v เป็นความเร็วของคลื่นในเส้นเชือก และ n คือจำนวนวงของคลื่นนิ่ง

จากสมการ (11.8) ได้ความถี่ที่ทำให้เกิดการสั่นพ้องหรือคลื่นนิ่งในเส้นเชือก เมื่อ $n = 1$ การสั่นที่เกิดขึ้นจะเป็นการสั่นที่มีความถี่น้อยที่สุด เรียก **ความถี่มูลฐาน** หรือ ฮาร์มอนิกที่หนึ่ง ส่วนฮาร์มอนิกที่สอง คือเมื่อ $n = 2$ และต่อไปเรื่อยๆ ความถี่ที่สอดคล้องกับฮาร์มอนิกต่างๆ เรียก f_1, f_2 และอื่นๆ เราเรียกชุดการสั่นพ้องนี้ว่า อนุกรมฮาร์มอนิกและ n คือ เลขฮาร์มอนิกที่ n ปรากฏการณ์การสั่นพ้องเป็นปรากฏการณ์สามัญของระบบการสั่น ซึ่งสามารถเกิดได้ทั้งในสองและสามมิติ เช่นกรณีคลื่นนิ่งในเส้นเชือกเป็นการสั่นพ้องในหนึ่งมิติ ส่วนกรณีของหนังกลองที่เกิดคลื่นนิ่งนั้นเป็นการสั่นพ้องในสองมิติ

ในการโล้ชิงช้าซึ่งทุกชิงช้ามีความถี่ธรรมชาติของมัน ถ้าจะทำให้เกิดการสั่นพ้องก็สามารถทำได้โดยการผลักชิงช้าด้วยความถี่ที่สอดคล้องกับความถี่ธรรมชาติหรือให้คนนั่งบนชิงช้าโยกตนเองโดยการย่อเข่าโยกเป็นจังหวะที่มีความถี่สอดคล้องกับความถี่ธรรมชาติของชิงช้าที่เขานั่ง

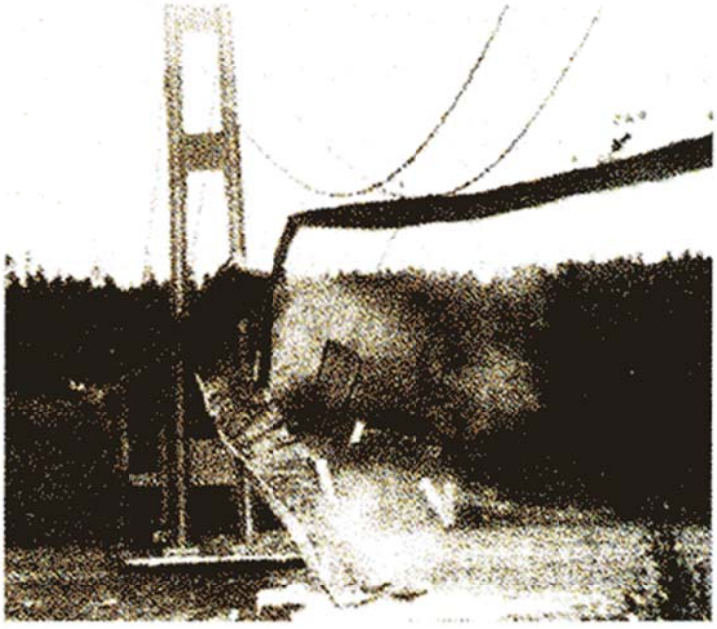
ปรากฏการณ์การสั่นพ้องในชีวิตประจำวันไม่เป็นประโยชน์นัก เช่นเครื่องยนต์และสิ่งก่อสร้างต่างๆ มักได้รับการออกแบบเพื่อลดหรือต้านการสั่นพ้อง เพื่อป้องกันการเกิดความเสียหายเพราะถ้าเกิดการสั่นพ้อง อุปกรณ์จะทำงานบกพร่อง

วัตถุทั่วไปมีความถี่ธรรมชาติหลายค่า ในรถคันหนึ่งจะมีแหล่งกำเนิดความถี่หลายชนิด เช่น ที่ล้อรถหรือเครื่องยนต์ สำหรับกรณีเครื่องยนต์มักจะมียางรองรับการสั่นติดไว้ระหว่างเครื่องยนต์กับตัวถังรถ แม้จะเป็นรถที่ได้รับการออกแบบดีก็ยังสั่น เช่น ถ้าใส่ยางรถที่ล้อไม่ดีอาจทำให้ล้อไม่สมดุล นี่อาจเป็นสาเหตุของการสั่นซึ่งจะนำไปสู่การสั่นอย่างรุนแรงที่พวงมาลัย การแก้ไขปัญหานี้อาจทำได้โดยการเพิ่มตะกั่วถ่วงล้อรถ

หรือกรณีรถวิ่งไปบนถนนก็อาจสั่นได้ ซึ่งจะเป็นการสั่นขึ้นลงเนื่องจากสภาพถนน หรือมีลมมาปะทะด้วยความถี่ที่อาจตรงกับความถี่ธรรมชาติของรถคันนั้นได้ ดังนั้นควรติดตั้งอุปกรณ์ลดแรงกระแทกในรถเพื่อป้องกันอันตรายจากการสั่นพ้องนี้

หลักการทำงานของตัวลดแรงกระแทกคือต้องลดขนาดของแรงที่ปะทะลงด้วยของเหลวภายในตัวซึ่งจะทำให้การสั่นสิ้นสุดอย่างรวดเร็ว ของเหลวที่ใช้นี้อาจเป็นน้ำมันที่ไหลผ่านรูเปิดเล็กๆ ของตัวลูกสูบเพื่อให้ลูกสูบเคลื่อนที่ช้าลงเวลาได้รับแรงกระทำกดจากการสั่นภายนอก จนกระทั่งการสั่นจากภายนอกหมดพลังงานไปในที่สุด

สิ่งก่อสร้างทั้งหลายจะมีความถี่ในการสั่นพ้องค่าหนึ่งหรือหลายค่าก็ได้ จึงอาจก่อให้เกิดปัญหาได้ ดังนั้นเราจะต้องทราบว่า ส่วนต่างๆ ของวัตถุมีความถี่ธรรมชาติเท่าไรภายใต้สถานการณ์ต่างๆ ในเครื่องบินและเฮลิคอปเตอร์ซึ่งทุกชิ้นส่วนจะต้องได้รับการตรวจสอบค่าความถี่การสั่นพ้อง เพราะถ้าการสั่นพ้องเกิดขึ้นที่ส่วนปีกและตัวหมุนของเฮลิคอปเตอร์ก็เป็นอันตรายมาก



รูป 11.67 สภาพการบิดของสะพานแขวนเมื่อเกิดการสั่นพ้อง

เมื่อพิจารณาระดับในระดับที่เล็กลงไป โมเลกุลหนึ่ง ๆ อาจมีความถี่สั่นพ้องที่มากกว่าหนึ่งค่าได้ และการมีสมบัตินี้ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในเตาไมโครเวฟ โดยเตามีหลอดแมกนีตรอนที่ทำหน้าที่ผลิตคลื่นที่มีความถี่หนึ่ง แล้วส่งไปกระทบอาหารทำให้โมเลกุลของน้ำ น้ำตาล หรือไขมันในอาหารสั่น ซึ่งกระบวนการสั่นนี้ทำให้เกิดพลังงานความร้อนในอาหาร เตาอบไมโครเวฟนี้ได้รับการออกแบบไม่ให้พลังงานถูกดูดซึมไปในตัวเตาเอง

การทดลองและกิจกรรม

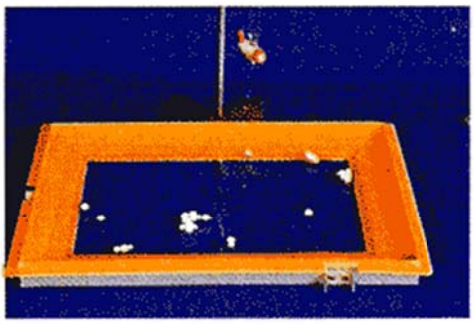
กิจกรรม 11.1 คลื่นและตัวกลาง

จุดประสงค์ สังเกตและอธิบายการเคลื่อนที่ของคลื่นผิวน้ำผ่านตัวกลาง

วัสดุและอุปกรณ์ ถาดน้ำ กรรไกร ไม้บรรทัด หลอดหยด กระดาษ น้ำ (อาจใช้ชุดถาดคลื่น)

วิธีทดลอง

1. ก่อนทำการทดลอง อ่านคำสั่งและวิธีการทดลองทุกข้ออย่างละเอียด
2. สร้างตารางข้อมูลเพื่อบันทึกข้อมูลการทดลอง
3. ใส่น้ำในถาดน้ำ ให้สูงประมาณ 1.5 - 2 cm.
4. ตัดชิ้นกระดาษเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 0.5 cm. ประมาณ 10 ชิ้น (การใช้กรรไกรต้องระมัดระวัง)
5. โรยกระดาษลงบนผิวน้ำและเขี่ยให้กระดาษกระจายอย่างสม่ำเสมอบนผิวน้ำ (ใช้ชิ้นกระดาษในการสังเกตทิศการเคลื่อนที่ของคลื่น)
6. ดูดน้ำจากถาดน้ำเข้าสู่หลอดหยด
7. รอจนกระทั่งน้ำและชิ้นกระดาษหยุดเคลื่อนที่ (การคนน้ำโดยบังเอิญจะทำให้น้ำเคลื่อนที่ ซึ่งเป็นกระแสน้ำ ไม่ใช่คลื่นน้ำ)
8. ถือหลอดหยดเหนือผิวน้ำ 2 - 3 cm. ตำแหน่งกึ่งกลางถาดน้ำ หยดน้ำลงหนึ่งหยด
9. สังเกตการเคลื่อนที่ของคลื่นน้ำผ่านผิวน้ำและการเคลื่อนที่ของชิ้นกระดาษ (อาจสังเกตเงาของคลื่นที่กันถาดน้ำจะชัดกว่า) วาดและจดบันทึกผลการทดลองที่สังเกตได้
10. ทำการทดลองซ้ำข้อ 7 - 9 ซ้ำ หลายครั้ง



รูป 11.18 การเกิดคลื่นน้ำ

11. ทำความสะอาดและเช็ดอุปกรณ์เพื่อเก็บเข้าที่ให้เรียบร้อย ก่อนออกจากห้องทดลอง

การทดลอง 11.1 สมบัติของคลื่น

จุดประสงค์ เพื่อศึกษาสมบัติของคลื่น

วัสดุและอุปกรณ์ ถาดคลื่น หม้อแปลงโวลต์ต่ำ

วิธีทดลอง

ตอนที่ 1 การสะท้อนของคลื่น

วางแผ่นกั้นตรงกลางถาดคลื่นให้แผ่นเอียงทำมุม 30 องศา กับแนวอ้างอิง ทำให้เกิดคลื่นเส้นตรงที่มีหน้าคลื่นขนานกับแนวอ้างอิง เคลื่อนที่ไปตกกระทบแผ่นกั้นแล้วทำให้เกิดคลื่นสะท้อน วัดและบันทึกมุมที่หน้าคลื่นตกกระทบทำกับแผ่นกั้นและมุมที่หน้าคลื่นสะท้อนทำกับแผ่นกั้น

ทดลองซ้ำ โดยเปลี่ยนมุมเป็น 45 และ 60 องศา

- ☐ ในแต่ละกรณีที่มุมที่หน้าคลื่นตกกระทบทำกับแผ่นกั้น และมุมที่หน้าคลื่นสะท้อนทำกับแผ่นกั้นมีความสัมพันธ์กันหรือไม่อย่างไร

ตอนที่ 2 การหักเหของคลื่น

วางแผ่นกระจกใสรูปสี่เหลี่ยมลงในถาดคลื่น ให้ผิวบนของกระจกใสอยู่ใต้ผิวน้ำประมาณ 1 - 2 มิลลิเมตร จัดแผ่นกระจกใสให้ขอบกระจกขนานกับแนวคลื่นกำเนิด บริเวณเหนือแผ่นกระจกใสจะเป็นบริเวณน้ำตื้น ทำให้เกิดคลื่นและให้คลื่นเส้นตรงเคลื่อนที่จากบริเวณน้ำลึกสู่บริเวณน้ำตื้น สังเกตทิศการเคลื่อนที่และความยาวคลื่นทั้งในบริเวณน้ำลึกและน้ำตื้น

ทดลองซ้ำ โดยหมุนแผ่นกระจกใสให้ขอบของกระจกทำมุมต่างๆ กับหน้าคลื่น สังเกตทิศการเคลื่อนที่และความยาวคลื่นทั้งในบริเวณน้ำลึกและน้ำตื้น

- ☐ เมื่อคลื่นผิวน้ำเคลื่อนที่ผ่านบริเวณรอยต่อระหว่างบริเวณน้ำลึกและบริเวณน้ำตื้น โดยให้หน้าคลื่นตกกระทบขนานกับรอยต่อ และทำมุมกับรอยต่อในทั้งสองกรณี ทิศการเคลื่อนที่ของคลื่นหักเหและความยาวคลื่นหักเหเปลี่ยนแปลงอย่างไร

ตอนที่ 3 การแทรกสอดของคลื่น

จัดปุ่มกำเนิดคลื่นอันกลางและปุ่มด้านข้างอันใดอันหนึ่งให้แตะผิวน้ำ ทำให้เกิดคลื่นต่อเนื่องวงกลมสองขบวนที่เหมือนกันทุกประการแผ่ออกไป สังเกตภาพที่เกิดขึ้นบนแผ่นกระดาษ

- ☐ จากภาพคลื่นต่อเนื่องวงกลมที่สร้างโดยปุ่มกำเนิดคลื่นทั้งสองมีตำแหน่งที่เป็นแถบมืด แถบมืดนี้เกิดขึ้นได้อย่างไร

ตอนที่ 4 การเลี้ยวเบนของคลื่น

วางแผ่นกั้นหน้าตรง ณ บริเวณกลางถาดคลื่นในแนวขนานกับคานกำเนิดคลื่น ทำให้เกิดคลื่นเส้นตรงต่อเนื่องเคลื่อนที่เข้าหาแผ่นกั้น โดยให้หน้าคลื่นขนานกับแผ่นกั้นนั้น สังเกตการเคลื่อนที่ของคลื่นเมื่อเลี้ยวเบนผ่านขอบแผ่นกั้น

ใช้แผ่นกั้นสองแผ่นทำช่องเปิดที่มีความกว้างมากกว่าความยาวคลื่น สังเกตลักษณะของคลื่นเมื่อผ่านช่องเปิด ปรับความกว้างของช่องเปิดให้มีความกว้างใกล้เคียงและน้อยกว่าความยาวคลื่น ในแต่ละกรณี สังเกตลักษณะของคลื่นเมื่อผ่านช่องเปิดไปแล้ว

- ☐ เมื่อใช้แผ่นกั้นสกัดเคลื่อนที่ของคลื่นผิวน้ำบางส่วน ด้านหลังของแผ่นกั้นจะมี การเคลื่อนที่ของคลื่นอย่างไร
- ☐ เมื่อใช้แผ่นกั้นสองแผ่น ทำช่องเปิดที่มีความกว้างมากกว่า ใกล้เคียงและน้อยกว่าความยาวคลื่นของคลื่นผิวน้ำ ในแต่ละครั้ง คลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านช่องเปิดมีลักษณะอย่างไร

กิจกรรม 11.2 คลื่นนิ่งในเส้นเชือก

จุดประสงค์ เพื่อศึกษาคลื่นนิ่งในเส้นเชือก

วัสดุและอุปกรณ์ เครื่องเคาะสัญญาณเวลา หม้อแปลงโวลต์ต่ำ สายไฟ

วิธีทดลอง

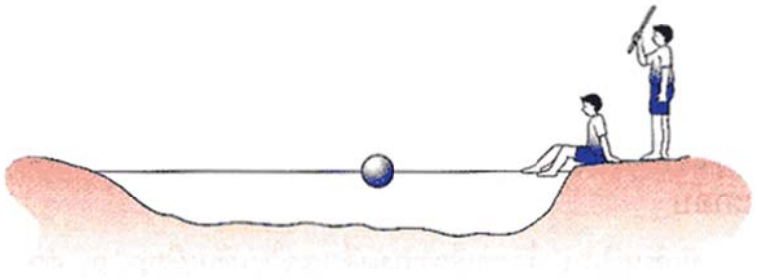
ผูกปลายข้างหนึ่งของเส้นเชือกที่ยาวประมาณ 2 เมตร กับแผ่นเหล็กสปริงของเครื่องเคาะสัญญาณเวลา (ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดคลื่น) ดึงปลายอีกข้างหนึ่งของเชือกให้เส้นเชือกมีความตึงพอเหมาะ (ไม่หย่อน) เปิดสวิตช์ให้เครื่องเคาะสัญญาณเวลาทำงาน สังเกตลักษณะของคลื่นที่เกิดขึ้น ออกแรงดึงเพิ่มเพื่อให้เส้นเชือกตึงมากขึ้น สังเกตลักษณะของคลื่นที่เกิดขึ้น

- ☐ ลักษณะของคลื่นที่เกิดขึ้นทั้งสองกรณี เหมือนหรือต่างกันอย่างไร

โจทย์แบบฝึกหัดบทที่ 11

คำถาม

1. คลื่นกลเกิดขึ้นได้อย่างไร
2. คลื่นตามขวางและคลื่นตามยาวแตกต่างกันอย่างไร
3. ขวัญและเรียมกำลังเล่นบอลอยู่ในสวนสาธารณะ เมื่อลูกบอลตกลงไปกลางสระ ทำให้ไม่สามารถเอื้อมมือถึงได้



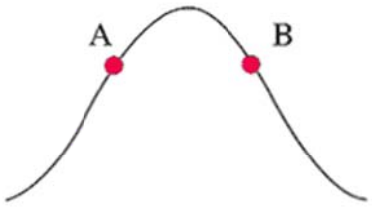
รูปสำหรับคำถามข้อ 3

ขวัญคิดว่า ถ้าใช้เท้าตีผิวน้ำอย่างสม่ำเสมอเพื่อทำให้เกิดคลื่น คลื่นจะพาลูกบอลให้เข้าฝั่งตรงข้ามได้ ส่วนเรียมบอกว่า ถ้าขว้างไม้ไปถูกลูกบอลที่จุด A ลูกบอลจะเคลื่อนที่เข้าหาฝั่งตรงข้ามได้ ความคิดของใครน่าจะถูกต้อง เพราะเหตุใด

4. ถ้าส่งคลื่นไปตามลวดสปริง หลังจากคลื่นได้ผ่านตำแหน่งหนึ่งบนลวดสปริงไปแล้ว ตำแหน่งนั้นจะเป็นอย่างไร เพราะเหตุใด
5. เมื่อสะกิดเส้นเชือกของลูกตุ้มนาฬิกาเป็นจังหวะอย่างสม่ำเสมอ ปรากฏว่ามีความถี่ของการสะกิดค่าหนึ่งที่ทำให้ลูกตุ้มแกว่งเป็นช่วงกว้างเพราะเหตุใด และความถี่นี้มีความสัมพันธ์กับมวล (m) ของลูกตุ้ม ความยาว (l) ของเชือกอย่างไร เพราะเหตุใด

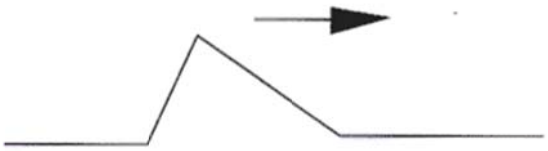
รูปสำหรับข้อ 5

6. มนุษย์อวกาศในยานอวกาศที่กำลังพุ่งจากโลกด้วยความเร่ง g มีวิธีที่จะหามวลของอุปกรณ์ใดๆ อย่างไร
7. เมื่อนำส้อมเสียงที่กำลังสั่นจุ่มลงในน้ำจะเกิดอะไร เพราะเหตุใด
8. อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่น ความถี่และอัตราเร็วของคลื่น
9. อธิบายความหมายของหน้าคลื่น
10. คลื่นในเส้นเชือกกำลังเคลื่อนที่จากซ้ายไปขวา A และ B เป็นจุดสองจุดบนเส้นเชือก เมื่อขณะเวลาหนึ่ง รูปร่างส่วนหนึ่งของเส้นเชือกเป็นดังรูป เมื่อเวลาผ่านไปอีกเล็กน้อย A และ B จะเคลื่อนที่อย่างไร วาดภาพประกอบ



รูปสำหรับข้อ 10

11. คลื่นถูกส่งไปตามเส้นเชือก อัตราเร็วของคลื่นดลในเส้นเชือก ณ ตำแหน่งต่างๆ เปลี่ยนแปลงหรือไม่ เพราะเหตุใด
12. อธิบายความหมายของเฟส
13. จงเขียนรูปคลื่นต่อเนื่องสองขบวนที่มีเฟสตรงข้ามกัน
14. อธิบายความแตกต่างระหว่างอัตราเร็วของคลื่นผิวน้ำซึ่งเป็นคลื่นตามขวาง กับอัตราเร็วของโมเลกุลน้ำ
15. กราฟระหว่างการกระจัดกับระยะทางและกราฟระหว่างการกระจัดกับเวลาของการเคลื่อนที่ของคลื่นกล เช่น คลื่นผิวน้ำ กราฟทั้งสองมีความแตกต่างกันอย่างไร
16. จากการทดลองเรื่องคลื่นผิวน้ำในถาดคลื่น ถ้าปรับกระแสที่ผ่านมอเตอร์ให้ปุ่มกำเนิดคลื่นสั่นถี่ขึ้นเป็นสองเท่าของเดิม อัตราเร็วของคลื่น ความถี่และความยาวคลื่นของคลื่นผิวน้ำจะเปลี่ยนแปลงอย่างไร
17. รูปต่อไปนี้แสดงลักษณะของคลื่นที่เคลื่อนที่ไปทางขวามือ จงเขียนรูปคลื่นอีกคลื่นหนึ่งที่สามารถหักล้างคลื่นนี้ ในเวลานั้นได้หมดพอดี



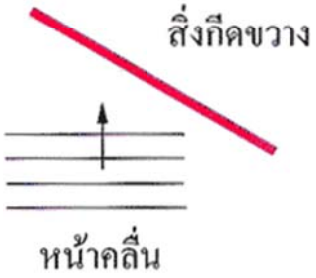
รูปสำหรับข้อ 17

18. จงเขียนรูปร่างของคลื่นซึ่งเกิดการซ้อนทับของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าหากันดังต่อไปนี้ ทุกวินาที เป็นเวลานาน 5 วินาที กำหนดให้อัตราเร็วของคลื่นเท่ากับ 1 เซนติเมตรต่อวินาที

มาตราส่วน 1:2

รูปสำหรับข้อ 18

19. หลักการซ้อนทับใช้อธิบายปรากฏการณ์ใดของคลื่นได้บ้าง
20. คลื่นต่อเนื่องเส้นตรงเคลื่อนที่เข้าสู่สิ่งกีดขวางดังรูป จงเขียนรูปแสดงหน้าคลื่นของคลื่นที่กำลังสะท้อนและหลังสะท้อนแล้ว

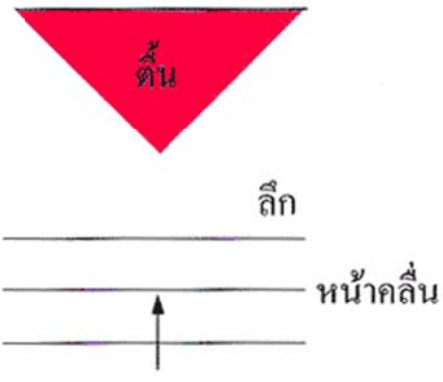


รูปสำหรับข้อ 20

21. เมื่อคลื่นต่อเนื่องเคลื่อนที่จากตัวกลางหนึ่งเข้าไปในอีกตัวกลางหนึ่ง ปริมาณใดต่อไปนี้คงเดิมหรือเปลี่ยนแปลง แอมพลิจูด ความยาวคลื่น ความถี่คลื่นและอัตราเร็วคลื่น
22. คลื่นในเส้นเชือกเคลื่อนที่จากเส้นเชือกเบาไปสู่เส้นเชือกหนัก ดังรูป เมื่อคลื่นในเส้นเชือกเคลื่อนที่ถึงรอยต่อระหว่างเส้นเชือกทั้งสอง จะเกิดการเปลี่ยนแปลงใดบ้าง เพราะเหตุใด

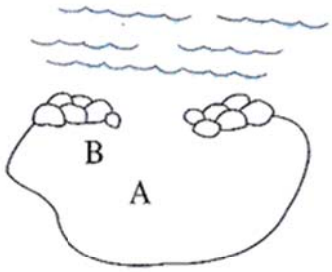
รูปสำหรับข้อ 22

23. หน้าคลื่นของคลื่นต่อเนื่องเส้นตรงกำลังเคลื่อนที่จากบริเวณน้ำลึกเข้าสู่บริเวณน้ำตื้น ดังรูป จงเขียนรูปแสดงหน้าคลื่นตกกระทบและหน้าคลื่นหักเห



รูปสำหรับข้อ 23

24. จากการสังเกตคลื่นผิวน้ำในถาดคลื่น เมื่อเคลื่อนที่ถึงรอยต่อระหว่างน้ำลึกและน้ำตื้น คลื่นมีการสะท้อนหรือไม่ อย่างไร
25. แหล่งกำเนิดอาพันธ์สองแหล่ง สร้างคลื่นผิวน้ำที่ความยาวคลื่น 3 เซนติเมตร ณ ที่ตำแหน่งหนึ่งห่างจากแหล่งกำเนิดทั้งสอง 18 เซนติเมตร และ 21 เซนติเมตร จะเกิดการแทรกสอดเป็นบัพหรือปฏิบัพ
26. แหล่งกำเนิดอาพันธ์สองแหล่งอยู่ห่างกัน 4 เซนติเมตร สร้างคลื่นผิวน้ำที่มีความยาวคลื่น 2 เซนติเมตร จงเขียนภาพการแทรกสอดของคลื่นผิวน้ำที่เกิดขึ้น และเขียนเส้นบัพทั้งหมด
27. คลื่นในเส้นเชือกมีความยาวคลื่น 10 เซนติเมตร เคลื่อนที่ไปสู่อีกปลายหนึ่งที่ยึดแน่น ถ้าเส้นเชือกยาว 20 เซนติเมตร จะเกิดคลื่นนิ่งมีบัพและปฏิบัพจำนวนเท่าใด
28. ปุ่มกำเนิดคลื่นสองปุ่มของถาดคลื่นทำให้เกิดคลื่นที่มีความยาวคลื่น 4 เซนติเมตร ถ้าปุ่มทั้งสองอยู่ห่างกัน 3 เซนติเมตร จะมีเส้นบัพเกิดขึ้นระหว่างปุ่มทั้งสองกี่เส้น
29. คลื่นต่อเนื่องเส้นตรงในถาดคลื่นเคลื่อนที่เข้าหาช่องเปิด จงเขียนภาพการเลี้ยวเบนที่เกิดขึ้นเมื่อปรับ
    ก. ความกว้างของช่องเปิดให้มีค่าเพิ่มขึ้น (ความยาวคลื่นคงตัว)
    ข. ความยาวคลื่นของคลื่นต่อเนื่องเส้นตรงให้มีค่าลดลง (ความกว้างของช่องเปิดคงตัว)
30. ถ้าคลื่นผิวน้ำมีความยาวคลื่นมากกว่าความกว้างของช่องเปิด 1 ช่อง การเลี้ยวเบนของคลื่นนี้จะแตกต่างกับคลื่นผิวน้ำที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่าความกว้างของช่องเปิด 1 ช่องอย่างไร
31. ท่าเรือแห่งหนึ่งมีแนวกำแพงหินซึ่งมีช่องเปิดตรงกลาง ดังรูป ในวันที่ทะเลมีคลื่นลมแรง เจ้าของเรือจะนำเรือไปจอดหลังแนวกำแพงหิน
    ก. เหตุใด เจ้าของเรือจึงไม่จอดเรือในทะเล
    ข. เจ้าของเรือที่นำเรือไปจอดหลังแนวกำแพงหินสังเกตว่า ถ้านำเรือไปจอดที่ตำแหน่ง A เรือจะไม่โคลงมากเท่าที่ตำแหน่ง B จงอธิบายเหตุการณ์นี้

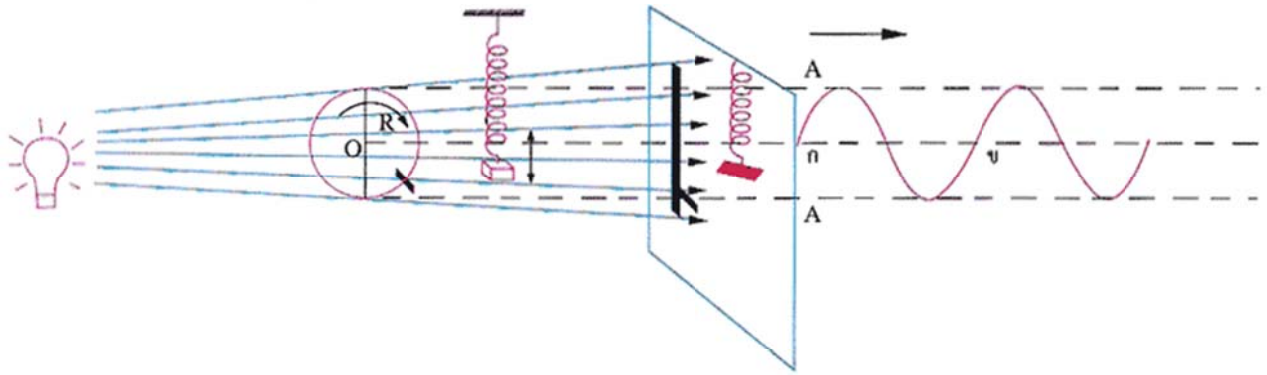


รูปสำหรับข้อ 31

32. หลักการของฮอยเกนส์ใช้อธิบายปรากฏการณ์ใดที่เกี่ยวกับคลื่นได้บ้าง
33. การเลี้ยวเบนของคลื่นเมื่อผ่านช่องเปิดที่แคบกว่าความยาวคลื่น จะมีแนวบัพเกิดขึ้นหรือไม่ เพราะเหตุใด
34. การแทรกสอดและการเลี้ยวเบนจำเป็นต้องเกิดขึ้นพร้อมกันหรือไม่ เพราะเหตุใด
35. ในวันที่ 7 พฤศจิกายน พ.ศ. 2483 ได้เกิดลมพายุพัดด้านข้างของสะพานแขวนที่ช่องแคบแทคโคมา เป็นสาเหตุให้สะพานแกว่งด้วยแอมพลิจูดที่สูงมากสะพานพัง เหตุใดจึงเป็นเช่นนั้น
36. หน้าต่างกระจกบ้านที่ติดถนน มีความถี่ธรรมชาติ 40 เฮิรตซ์ เวลารถยนต์ผ่านกระจกจะสั่นเล็กน้อย แต่เมื่อรถบรรทุกผ่านกระจกจะสั่นรุนแรงมากจนบางครั้งแตก แสดงว่าความถี่ที่เกิดจากเครื่องยนต์ของรถสองชนิดนี้แตกต่างกันอย่างไร

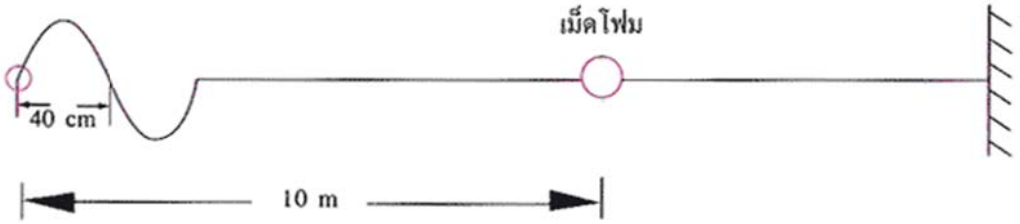
ปัญหา

1. เมื่อหมุนแผ่นจานรัศมี R ที่ติดหมุดกลม ในขณะเดียวกันดึงวัตถุมวล m ที่ติดปลายสปริง แล้วปล่อย ปรับความถี่ของแผ่นจาน จนกระทั่งเงาของหมุดกลมกับมวล m เคลื่อนที่ไปด้วยกันบนฉาก ให้ความถี่ของการหมุนของแผ่นจานเป็น f ค่าคงตัวของสปริงมีค่าเท่าใด และเมื่อเอาฉากออก นำเชือกไปผูกวัตถุมวล m ปล่อยให้มีการเคลื่อนที่แบบเดิม คลื่นในเส้นเชือกที่เกิดขึ้นตำแหน่ง ก. กับ ข. ใช้เวลาห่างกันเท่าใด



รูปสำหรับปัญหาข้อ 1

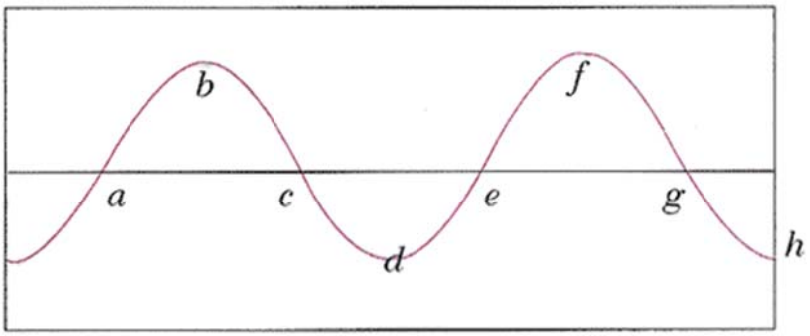
2. เมื่อสะบัดปลายเชือกขึ้นลงสองรอบต่อวินาที ดังรูป เม็ดโฟมที่อยู่ห่างจากมือ 10 เมตร จะเคลื่อนที่อย่างไรหลังจากที่เริ่มสะบัดปลายเชือก 20 วินาทีและเคลื่อนที่ไปได้กี่รอบและมีเฟสเท่าใด



รูปสำหรับปัญหาข้อ 2

3. คลื่นในทะเลซัดเข้าหาฝั่งด้วยอัตราเร็ว 3 เมตรต่อวินาที ถ้าระยะระหว่างสันคลื่นที่ถัดกันเท่ากับ 6 เมตร ในเวลา 1 ชั่วโมง จะมีคลื่นกระทบฝั่งกี่ลูก

4. คลื่นผิวน้ำกำลังเคลื่อนที่ไปทางขวาด้วยอัตราเร็ว 10 เซนติเมตรต่อวินาที ตัวอักษร a ถึง h แทนจุดบนคลื่น ดังรูป



รูปสำหรับข้อ 4

ก. จุดคู่ใดที่มีเฟสตรงกัน

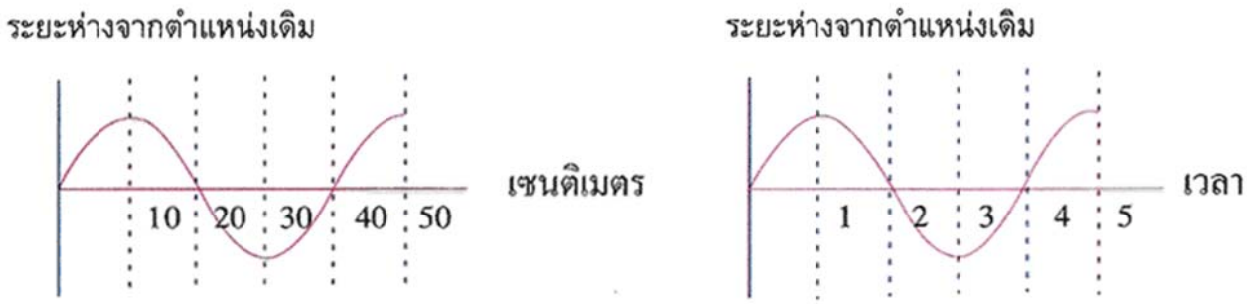
ข. จุดคู่ใดที่มีเฟสตรงข้ามกัน

ค. จุดคู่ใดที่มีความต่างเฟส 90 180 270 และ 360 องศา

ง. เมื่อเวลาผ่านไปเล็กน้อย จุดต่าง ๆ มีการเคลื่อนที่ทิศใด

จ. ความยาวคลื่นและความถี่ของคลื่นเป็นเท่าใด

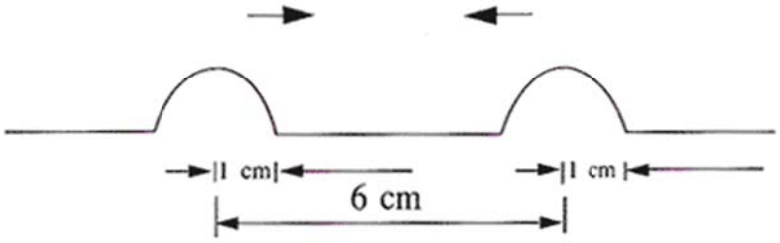
5. คลื่นต่อเนื่องในเส้นเชือกกำลังเคลื่อนที่ไปทางขวา เมื่อเวลา $t = 0$ กราฟระหว่างการกระจัดของอนุภาคบนเส้นเชือกกับระยะทางที่คลื่นเคลื่อนที่ได้ เป็นดังรูป ก. ถ้าเขียนกราฟระหว่างการกระจัดของอนุภาคบนเส้นเชือกกับเวลา จะได้กราฟดังรูป ข. อัตราเร็วของคลื่นในเส้นเชือกเป็นเท่าใด



รูปสำหรับปัญหาข้อ 5

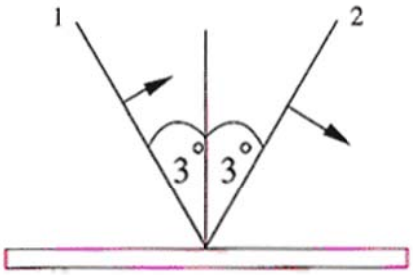
6. การทดลองโดยใช้ถาดคลื่นที่มีน้ำลึกสม่ำเสมอ วัดความกว้างของแถบสว่าง 5 แถบที่อยู่ถัดกัน ของคลื่นต่อเนื่องได้ระยะทาง 10 เซนติเมตร ถ้าคลื่นผิวน้ำมีอัตราเร็ว 20 เซนติเมตรต่อวินาที จงหาความยาวคลื่นและความถี่ของคลื่น

7. คลื่นสองคลื่นในเส้นเชือก กำลังเคลื่อนที่เข้าหากันด้วยอัตราเร็ว 2 เซนติเมตรต่อวินาที ณ เวลาขณะหนึ่ง คลื่นดลทั้งสองอยู่ห่างกัน 6 เซนติเมตร ดังรูป เมื่อเวลาผ่านไป 2.5 วินาที คลื่นทั้งสองอยู่ห่างกันเท่าใด



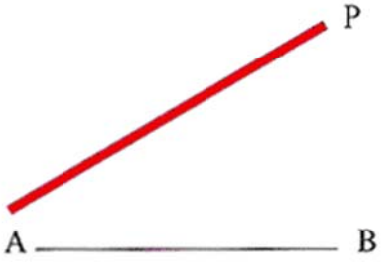
รูปสำหรับปัญหาข้อ 7

8. รูป 1 และ 2 แสดงหน้าคลื่นของคลื่นสองคลื่น และลูกศรแทนทิศการเคลื่อนที่ของคลื่นทั้งสองนั้น
   ก. หมายเลขใด เป็นหน้าคลื่นของคลื่นตกกระทบและคลื่นสะท้อน
   ข. มุมตกกระทบมีค่าเท่าใด



รูปสำหรับปัญหาข้อ 8

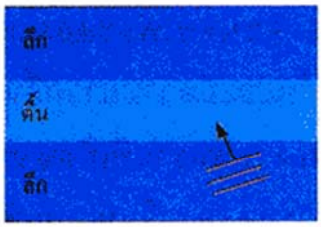
9. เส้นตรง AB แทนคานกำเนิดคลื่นเส้นตรงของถาดคลื่น P เป็นแผ่นกั้นหน้าตรง ดังรูป



รูปสำหรับปัญหาข้อ 9

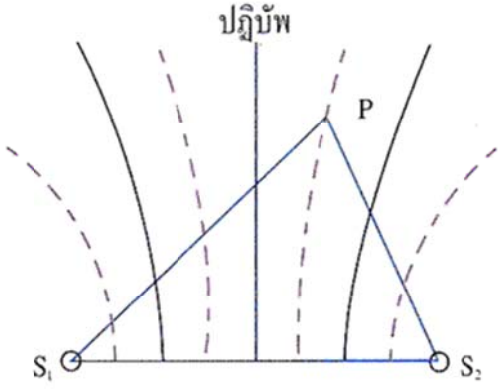
ถ้าคาน AB ทำให้เกิดคลื่นเส้นตรงเคลื่อนที่เข้าหาแผ่นกั้นหน้าตรง P
ก. มุมระหว่างแผ่นกั้นหน้าตรงและหน้าคลื่นตกกระทบมีค่าเท่าใด
ข. เขียนภาพการสะท้อน โดยใช้ลูกศรแสดงทิศการเคลื่อนที่ก่อนและหลังการสะท้อนของคลื่น
ค. มุมตกกระทบและมุมสะท้อนมีค่าเท่าใด

10. คลื่นต่อเนื่องเส้นตรงแผ่จากบริเวณน้ำลึก A เข้าสู่บริเวณน้ำตื้น B และบริเวณน้ำลึก C ที่ลึกเท่ากับ A ดังรูป ถ้ารอยต่อระหว่าง A และ B และรอยต่อระหว่าง B และ C ตรง แสดงว่าคลื่นใน A และ C มีหน้าคลื่นขนานกัน



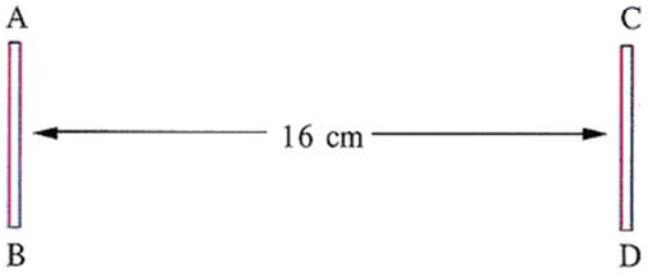
รูปสำหรับปัญหาข้อ 10

11. คลื่นผิวน้ำในถาดคลื่นเคลื่อนที่จากบริเวณน้ำตื้นเข้าสู่บริเวณน้ำลึก โดยมีมุมตกกระทบเท่ากับ 56 องศา และมุมหักเหเท่ากับ 70 องศา
    ก. ถ้าความยาวคลื่นในน้ำตื้นเท่ากับ 0.6 เซนติเมตร จงหาความยาวคลื่นในน้ำลึกในหน่วยเซนติเมตร
    ข. ถ้าคานกำเนิดคลื่นสั่น 10 รอบต่อวินาที ความถี่ของคลื่นในบริเวณน้ำลึกมีค่าเท่าใด
    ค. อัตราเร็วคลื่นในบริเวณน้ำลึกมีค่าเท่าใด
12. ในการศึกษาคลื่นผิวน้ำในถาดคลื่น โดยให้คลื่นเคลื่อนที่จากบริเวณน้ำลึกไปบริเวณน้ำตื้น พบว่าระยะระหว่างหน้าคลื่นที่ติดกันในน้ำลึกและในน้ำตื้นเท่ากับ 2.5 และ 1.5 เซนติเมตร ตามลำดับ ถ้ามุมระหว่างหน้าคลื่นในบริเวณน้ำตื้นทำมุม 35 องศา กับรอยต่อของน้ำลึกและน้ำตื้น มุมระหว่างหน้าคลื่นในน้ำลึกกับรอยต่อของน้ำลึกและน้ำตื้นเป็นเท่าใด
13. ถ้ามุมตกกระทบ θ_1 ในรูป 11.47 เปลี่ยนไป มุมหักเห θ_2 จะเปลี่ยนตาม จงพิสูจน์ว่า $\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2}$ มีค่าคงตัว
14. จากรูป แสดงภาพการแทรกสอดของคลื่นผิวน้ำที่เกิดจากแหล่งกำเนิดอาพันธ์ S_1 และ S_2 มี P เป็นจุดบนเส้นบัพ ถ้า S_1P เท่ากับ 10 เซนติเมตรและ S_2P เท่ากับ 7 เซนติเมตร ถ้าอัตราเร็วของคลื่นทั้งสองเท่ากับ 30 เซนติเมตรต่อวินาที แหล่งกำเนิดคลื่นทั้งสองมีความถี่เท่าใด



รูปสำหรับปัญหาข้อ 14

15. แหล่งกำเนิดอาพันธ์สองแหล่งที่อยู่ห่างกัน 6 เซนติเมตร ทำให้เกิดคลื่นผิวน้ำที่มีความถี่เท่ากันและมีความยาวคลื่น 2 เซนติเมตร จงหาว่าบนเส้นตรงที่เชื่อมระหว่างแหล่งกำเนิดทั้งสอง คลื่นรวมที่เกิดจากการแทรกสอดมีบัพกี่ตำแหน่ง
16. ในการทดลองคลื่นนิ่งบนเส้นเชือก ถ้าความถี่ของคลื่นนิ่งเป็น 475 เฮิรตซ์ และอัตราเร็วของคลื่นในเส้นเชือกเท่ากับ 380 เมตรต่อวินาที ตำแหน่งบัพสองตำแหน่งที่อยู่ถัดกันจะห่างกันเท่าใด
17. AB และ CD เป็นคานกำเนิดคลื่นเส้นตรงของถาดคลื่น ที่ขนานกันและอยู่ห่างกัน 16 เซนติเมตร คานทั้งสองให้คลื่นผิวน้ำที่มีเฟสตรงกันและมีความยาวคลื่น 4 เซนติเมตร ถ้าเกิดคลื่นนิ่งระหว่าง AB และ CD
    ก. จงหาจำนวนบัพที่เกิดระหว่าง AB และ CD และบัพที่อยู่ถัดกัน ห่างกันเท่าใด
    ข. ถ้าฉายแสงสว่างเหนือถาดคลื่นจะมีแถบสว่างทั้งหมดที่แถบที่เกิดขึ้นระหว่าง AB และ CD บนฉากใต้ถาดคลื่น



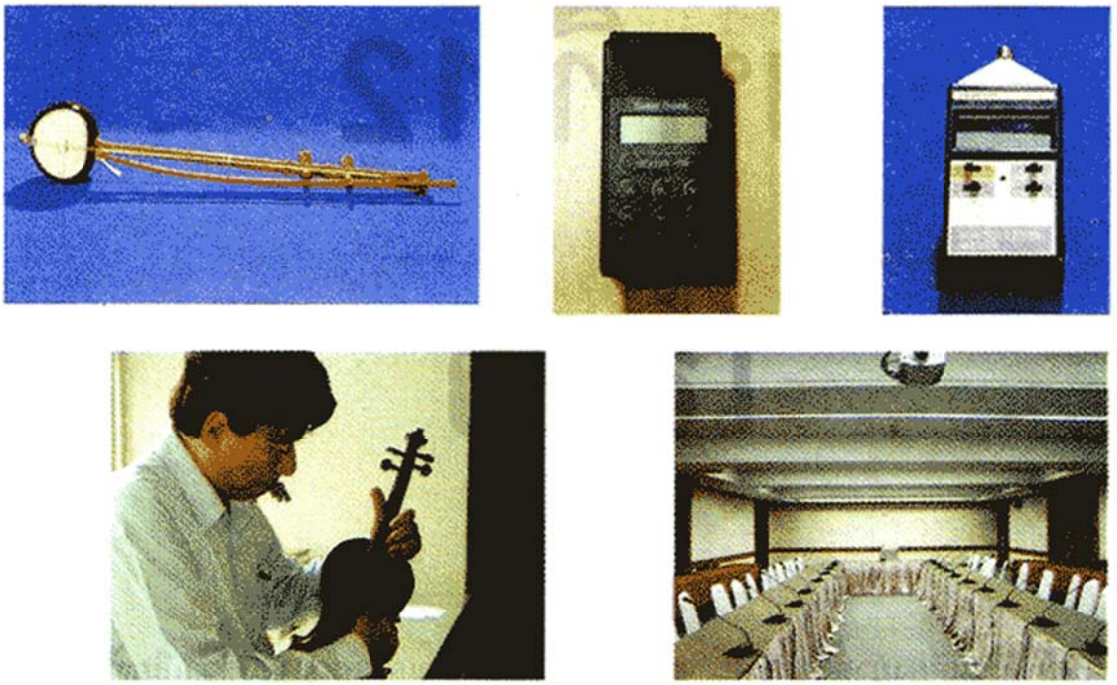
รูปสำหรับปัญหาข้อ 17

บทที่ 12

เสียง

มนุษย์ได้ยินเสียงมาตั้งแต่เกิด ทารกสามารถจดจำและแยกแยะได้ว่าเสียงใดเป็นเสียงบิดา หรือเสียงมารดา เสียงช่วยในการพัฒนาการสื่อสารเป็นภาษาพูดของมนุษย์ เสียงจากสิ่งต่างๆ รอบตัวทำให้มนุษย์เข้าใจสภาพแวดล้อมของตนดีขึ้น จะเห็นว่าเสียงเป็นปัจจัยหนึ่งของการดำรงชีวิต ต่อไปเราจะศึกษาเกี่ยวกับธรรมชาติของเสียงให้ลึกซึ้ง เพื่อให้เข้าใจว่าทำไมหูของมนุษย์จึงแยกเสียงผู้ชายจากเสียงผู้หญิงได้ รวมทั้งจะศึกษาการป้องกันอันตรายที่เกิดกับระบบรับฟังเสียงอันเนื่องมาจากเสียงที่มีความดังมาก

ความรู้เรื่องเสียงยังทำให้มนุษย์สามารถสร้างเครื่องวัดระยะทางแบบต่างๆได้ เช่นให้เสียงเคลื่อนที่จากเครื่องกำเนิดไปกระทบวัตถุที่ต้องการ เมื่อเสียงสะท้อนกลับมาถึงเครื่องรับ (ซึ่งอยู่ติดกับเครื่องกำเนิด) อุปกรณ์จะคำนวณหาเวลาที่เสียงเคลื่อนที่ในอากาศ แล้วสรุปตัวเลขออกมาเป็นระยะทาง นอกจากจะใช้หาระยะทางที่วัตถุอยู่ไกลในอากาศแล้ว ในกรณีวัตถุที่อยู่ในน้ำ เช่น ฝูงปลา เรือดำน้ำ และหินโสโครกใต้น้ำ ก็สามารถใช้หลักการเดียวกันหาระยะทางได้ เช่นกัน โดยใช้อุปกรณ์พิเศษที่ทำงานในน้ำได้ หรือในการหาระยะลึกของชั้นหินต่างๆ ใต้พิภพ ก็สามารถหาได้โดยใช้การระเบิดที่ผิวโลก แล้วจับเวลาที่เสียงสะท้อนจากชั้นหินเบื้องล่างกลับมาที่เครื่องรับให้ทราบโครงสร้างทางธรณีวิทยาของบริเวณที่สำรวจได้



รูป 12.1 สิ่งที่เกี่ยวข้องกับเสียง

ในการศึกษาลักษณะการออกแบบอาคาร เช่น ห้องประชุม ทั้งสถาปนิกและวิศวกรต้องคำนวณล่วงหน้าว่าต้องการให้มีเสียงก้องในอาคารมากน้อยเพียงใด และใช้วัสดุเก็บเสียง เช่น พรม ม่าน แผ่นกระดาษเก็บเสียง ฯลฯ เพื่อช่วยให้เวลาที่เกิดเสียงก้องพอเหมาะพอดีก่อนที่เสียงก้องจะจางหายไป

ด้านการแพทย์ก็ได้มีการนำเสียงมาใช้ในการตรวจอวัยวะภายในของคนเพื่อวินิจฉัยสาเหตุของความผิดปกติ เช่น ตรวจการทำงานของลิ้นหัวใจ มดลูก ครรภ์ เนื้องอก ตับ ม้าม และสมอง เพราะเสียงสามารถสะท้อนที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นของเนื้อเยื่อต่างๆ ได้ดี

ในการออกแบบเพื่อลดระดับความเข้มเสียงของเครื่องยนต์ เครื่องจักรในโรงงาน เสียงจากยานพาหนะบนทางด่วน ก็อาศัยความรู้เรื่องการดูดกลืนเสียง

นอกจากนั้นมนุษย์ยังนำความรู้ด้านเสียงมาสร้างและพัฒนาเครื่องดนตรีด้วย จึงทำให้มีเครื่องดนตรีประเภทต่างๆ มากมาย อาทิเช่นเครื่องสาย ได้แก่ ไวโอลิน เชลโล ซอสามสาย ซออู้ ซอด้วง กีตาร์ พิณ กระจับปี่ แมนโดลิน แบนโจ ขิม เครื่องลม เช่น ขลุ่ย ปี่ แคน ฟลุต คาลิเนต แซกโซโฟน และเครื่องเคาะ เช่น ระนาดเอก ระนาดทุ้ม ระนาดฝรั่ง นอกจากนี้ก็ยังมีเครื่องดนตรีประเภทต่างๆ อีกมากมาย รวมทั้งเครื่องดนตรีที่สร้างจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์

จะเห็นว่าเรื่องราวที่เกี่ยวข้องกับเสียงนั้นมีมากมาย ถ้าเราสามารถทำความเข้าใจหลักการทางวิทยาศาสตร์ของเสียง จะช่วยให้เรามีความรู้พอที่จะนำไปใช้พัฒนาหรือสร้างเครื่องมือ เครื่องใช้ที่เป็นประโยชน์ได้

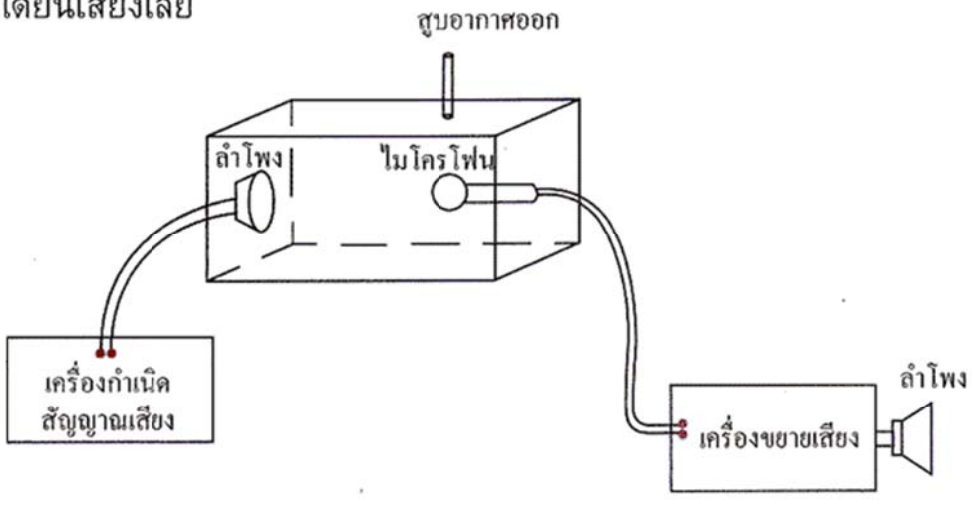
12.1 ธรรมชาติของเสียง

เสียงเกิดได้อย่างไร ถ้าเราใช้มือสัมผัสที่ลำคอของเราขณะเปล่งเสียง จะรู้สึกว่ามีการสั่นของกล้ามเนื้อที่ลำคอ ในทำนองเดียวกัน ถ้าเราใช้นิ้วสัมผัสที่สายของเครื่องดนตรี เช่น สายกีตาร์ ก็จะพบว่ามีการสั่นของสายในขณะที่เราดีดให้เกิดเสียง ยิ่งไปกว่านั้นจะพบอีกด้วยว่าขนาดของการสั่นเกี่ยวข้องโดยตรงกับความดังของเสียง นั่นคือ เสียงจะดังมากเมื่อวัตถุเกิดการสั่นมาก และเสียงจะเบาลงเมื่อวัตถุสั่นน้อยลง

รูป 12.2 ก. การเกิดเสียงจากแหล่งกำเนิด

ขณะที่เราดีดสายกีตาร์ พลังงานในการดีดซึ่งเป็นพลังงานกลจะถูกถ่ายโอนให้กับสายกีตาร์ ทำให้สายกีตาร์สั่น พลังงานการสั่นของสายกีตาร์จะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานเสียงแผ่กระจายออกไปโดยรอบ จึงกล่าวได้ว่า **เสียงเกิดจากการสั่นของวัตถุ**

พลังงานเสียงจากต้นกำเนิดเสียงเมื่อแผ่มาถึงผู้ฟัง โดยอาศัยการถ่ายโอนพลังงานการสั่นจากตัวกำเนิดเสียงผ่านอากาศมายังหูผู้ฟัง แต่ถ้าไม่มีอากาศเป็นตัวกลางรับถ่ายโอนพลังงาน เราก็จะไม่ได้ยินเสียงเลย



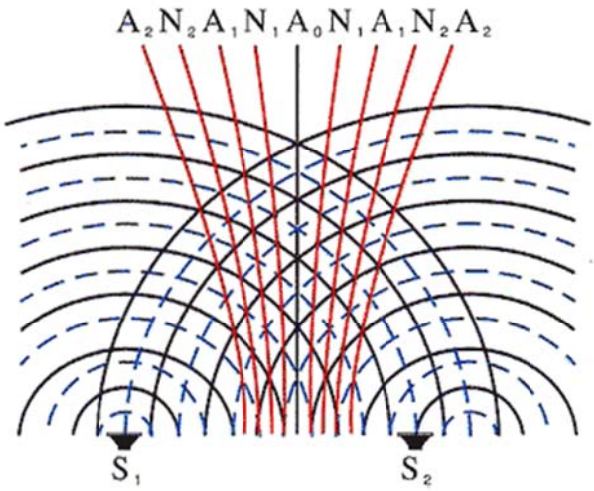
รูป 12.2 ข. แสดงเสียงไม่อาจผ่านสุญญากาศได้

☐ นักเรียนคิดว่าจะทำโครงงานเพื่อแสดงให้เห็นว่าเสียงไม่สามารถผ่านสุญญากาศได้อย่างไร

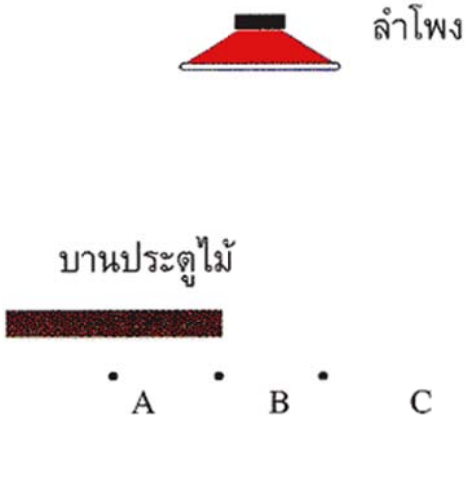
สรุปได้ว่า **เสียงจากแหล่งกำเนิดเสียง ต้องอาศัยตัวกลางในการถ่ายโอนพลังงานการสั่นของแหล่งกำเนิดเสียงนั้นไปยังที่ต่าง ๆ**

เราเคยทราบมาแล้วว่า อากาศประกอบด้วยโมเลกุล ดังนั้นการถ่ายโอนพลังงานเสียงจากแหล่งกำเนิดเสียงมายังผู้ฟังจะต้องถ่ายโอนพลังงานผ่านโมเลกุลของอากาศ การถ่ายโอนพลังงานนี้จะเป็นแบบที่โมเลกุลของอากาศรอบ ๆ แหล่งกำเนิดเสียงรับพลังงานแล้วเคลื่อนที่มาถ่ายโอนพลังงานให้กับผู้ฟัง หรือโดยใช้แบบที่โมเลกุลของอากาศรอบ ๆ แหล่งกำเนิดเสียงรับพลังงานแล้วถ่ายโอนพลังงานให้กับโมเลกุลของอากาศที่อยู่ถัดกันและโมเลกุลของอากาศนั้นก็ถ่ายโอนพลังงานต่อกันมาเป็นช่วง ๆ จนกระทั่งถึงผู้ฟัง การถ่ายโอนพลังงานของเสียงจะเป็นแบบใด

ถ้าใช้ลำโพง 2 ตัวต่อพ่วงกัน (ลำโพงมีความถี่เท่ากันเพราะให้เสียงจากเครื่องกำเนิดสัญญาณเสียงเดียวกัน) ในการยืนฟัง ณ บางตำแหน่งจะได้ยินเสียงดัง แต่บางตำแหน่งจะได้ยินเสียงเบา ถ้านำผลการสังเกตจากกิจกรรมนี้ไปเปรียบเทียบกับการกระจัดของผิวน้ำในถาดคลื่นเมื่อมีคลื่นจาก ***แหล่งกำเนิดอาพันธ์*** 2 แหล่ง ก็จะมีบางตำแหน่งที่การกระจัดเสริมกันและบางตำแหน่งที่การกระจัดหักล้างกัน เราก็สามารถสรุปได้ว่าตำแหน่งที่ได้ยินเสียงดังเพราะเกิดจากการเสริมกันของคลื่นเสียง และตำแหน่งที่ได้ยินเสียงเบา ก็จะเกิดจากการหักล้างกันของคลื่นเสียง ดังนั้น เราสามารถสรุปได้ว่า **เสียงแสดงสมบัติการแทรกสอดได้** ซึ่งการแทรกสอดนี้เป็นสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งของคลื่นที่สามารถแสดงได้ดังรูป 12.3 และจากการทดลอง 12.1 ท้ายบท



รูป 12.3 ภาพวาดแสดงการแทรกสอดของคลื่นเสียงจากแหล่งกำเนิดเสียงอาพันธ์ 2 แหล่ง S_1 กับ S_2



รูป 12.4 แสดงการเลี้ยวเบนของเสียง

เมื่อเสียงสามารถแสดงสมบัติการแทรกสอดได้ เสียงจึงสามารถแสดงสมบัติการเลี้ยวเบน ซึ่งเป็นสมบัติที่สำคัญอีกประการหนึ่งของคลื่นได้ด้วย ดังการทดลอง 12.2 ท้ายบท

จากรูปที่ 12.4 เสียงที่ได้ยิน ณ ตำแหน่ง A ซึ่งอยู่ด้านหลังสิ่งกีดขวางจะดังน้อยกว่าเสียงที่ได้ยิน ณ ตำแหน่ง B และ C ซึ่งอธิบายได้ว่า เสียงสามารถเคลื่อนที่อ้อมสิ่งกีดขวางไปยังด้านหลังของสิ่งกีดขวางได้เช่นเดียวกับคลื่นน้ำที่สามารถเคลื่อนที่อ้อมสิ่งกีดขวางได้ หรือกล่าวได้ว่า **เสียงสามารถแสดงสมบัติการเลี้ยวเบนได้** สรุปเสียงสามารถแสดงสมบัติการแทรกสอดและการเลี้ยวเบน ซึ่งเป็นสมบัติที่สำคัญของคลื่นได้จึงสรุปว่า **เสียงมีสมบัติเป็นคลื่น**

ดังที่กล่าวมาแล้วเสียงเกิดจากการสั่นของวัตถุที่เป็นต้นกำเนิดเสียงและพลังงานการสั่นจะเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางไปยังผู้ฟัง ทำให้ผู้ฟังได้ยินเสียงจากแหล่งกำเนิดเสียงนั้น

ในชีวิตประจำวัน เราจะคุ้นเคยกับปรากฏการณ์เลี้ยวเบนของเสียงมากกว่าการแทรกสอด เช่น ได้ยินเสียงคนพูดจากมุมห้อง ช่องหน้าต่าง หรือช่องประตูโดยทั้งๆ ที่มีขอบกำแพง หน้าต่าง ประตูบังไม่ให้เห็นตัวผู้พูด หรือแม้แต่เสียงเพลงจากวิทยุ โทรทัศน์ก็สามารถเลี้ยวเบนอ้อมวัตถุต่างๆ มายังผู้ฟังได้

เราสามารถจัดกิจกรรมง่ายๆ เพื่อแสดงสมบัติการสะท้อนของเสียง โดยการใช้ท่อกระดาษแข็ง แผ่นไม้อัด ลำโพงที่ต่อจากเครื่องกำเนิดเสียง วางอุปกรณ์ต่างๆ ดังรูป 12.5

รูป 12.5 แสดงการสะท้อนของเสียง

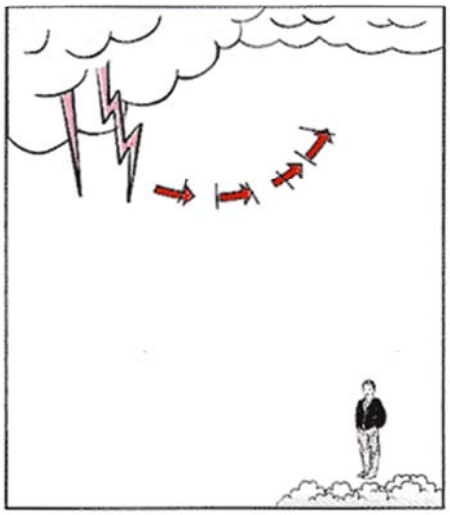
ปรับแผ่นไม้ไปมาจนกระทั่งได้ยินเสียงจากลำโพงชัดเจน แสดงว่าคลื่นเสียงมีการสะท้อน และเมื่อเราตะโกนใส่ผนังตึก จะพบว่ามีเสียงสะท้อนกลับมาทำให้เราได้ยิน แต่การได้ยินเสียงสะท้อนกลับจะขึ้นกับระยะห่างระหว่างผู้พูดกับตัวสะท้อน

ปกติความรู้สึกในการได้ยินเสียงของหูคน ขณะเสียงถูกส่งผ่านไปยังสมองจะติดประสาทหูอยู่นานประมาณ 1/10 วินาที

ถ้าเสียงที่สะท้อนกลับอยู่ในช่วงเวลาสั้นกว่า 1/10 วินาที เราจะได้ยินเสียงก้อง เหมือนกับเรากัมหน้าไปตะโกนในตุ่มน้ำ หรือร้องเพลงดังๆ ในห้องน้ำ

- ☐ ถ้าเราตะโกนหรือส่งเสียงในห้องเรียน จะมีเสียงสะท้อนกลับมาหรือไม่ อย่างไร
- ☐ เหตุใดเราจึงไม่สามารถแยกเสียงสะท้อนกลับ กับเสียงพูดหรือเสียงที่ตะโกนทุกครั้งที่พูดหรือตะโกน

เมื่อคลื่นเสียงเคลื่อนที่จากตัวกลางหนึ่งผ่านเข้าไปในอีกตัวกลางหนึ่ง คลื่นเสียงส่วนหนึ่งจะหักเห เช่นเดียวกับการหักเหของคลื่นน้ำ ตัวอย่างการหักเหของเสียงที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติที่เราอาจสังเกตได้ ได้แก่ การเห็นฟ้าแลบแต่ไม่ได้ยินเสียงฟ้าร้อง ทั้งนี้เนื่องจากคลื่นเสียงเคลื่อนที่ผ่านอากาศร้อนได้เร็วกว่าอากาศเย็น ซึ่งเราทราบแล้วว่าชั้นต่างๆ ของอากาศเหนือพื้นดินมีอุณหภูมิไม่เท่ากัน ยิ่งชั้นสูงอุณหภูมิของอากาศก็ยิ่งลดลง ดังนั้นในที่สูงๆ จากพื้นผิวโลก อัตราเร็วของเสียงจะน้อยกว่าบริเวณใกล้ผิวโลก ขณะเกิดฟ้าแลบและฟ้าร้องในตอนกลางวัน คลื่นเสียงจะเคลื่อนที่จากอากาศตอนบนซึ่งเย็นกว่าสู่อากาศบริเวณใกล้พื้นดินซึ่งร้อนกว่า ทำให้เกิดการหักเหของเสียงฟ้าร้องกลับขึ้นไปในอากาศตอนบน ถ้าเสียงเกิดการหักเหกลับไปทั้งหมด เราจะเห็นเฉพาะฟ้าแลบแต่ไม่ได้ยินเสียงฟ้าร้อง สถานการณ์ข้างต้นนี้แสดงว่า **เสียงมีสมบัติการหักเห**



รูป 12.6 การเกิดฟ้าแลบแต่ไม่ได้ยินเสียงฟ้าร้อง

- ☐ ต่อลำโพงตัวหนึ่งกับเครื่องกำเนิดสัญญาณเสียงไว้ในห้อง ขณะลำโพงส่งเสียง ผู้ฟังจะได้ยินเสียง ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในห้องว่ามีความดังไม่เท่ากัน เหตุการณ์นี้เกิดจากสมบัติใดของเสียง

12.2 อัตราเร็วของเสียง

ช่วงเวลาที่เสียงเคลื่อนที่จากแหล่งกำเนิดเสียงผ่านอากาศมาถึงหูผู้ฟัง ขึ้นกับระยะทางระหว่างต้นกำเนิดเสียงกับผู้รับฟัง ถ้าระยะห่างมาก เสียงต้องใช้ช่วงเวลานานกว่าจะได้ยินเสียง แต่ถ้าระยะใกล้ เสียงก็จะใช้ช่วงเวลาสั้นกว่า อัตราเร็วของคลื่นเสียงในตัวกลางหนึ่งๆ จะคงตัวเมื่ออุณหภูมิของตัวกลางคงตัว ดังแสดงในตาราง 12.1

ตาราง 12.1 อัตราเร็วของเสียงในตัวกลางต่างๆ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

ตัวกลาง	อัตราเร็ว (เมตรต่อวินาที)
แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (0 °C)	258
อากาศ (15 °C)	346
แก๊สไฮโดรเจน	1,339
น้ำ	1,498
น้ำทะเล	1,531
แก้ว	4,540
อะลูมิเนียม	5,000
เหล็ก	5,200

☐ ถ้าใช้ก้อนหินเคาะรางรถไฟ จะทำให้เกิดเสียงขึ้นในตัวกลาง 2 ชนิด คือ ในเหล็กที่ใช้ทำรางกับในอากาศ เรามีวิธีทดสอบอย่างไร จึงจะทราบว่าอัตราเร็วของเสียงในตัวกลางทั้งสองไม่เท่ากัน

เมื่อนักฟิสิกส์ศึกษาอัตราเร็วของเสียงในอากาศ เขาได้พบว่าอัตราเร็วของเสียงในอากาศมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิของอากาศโดยประมาณ ตามสมการ

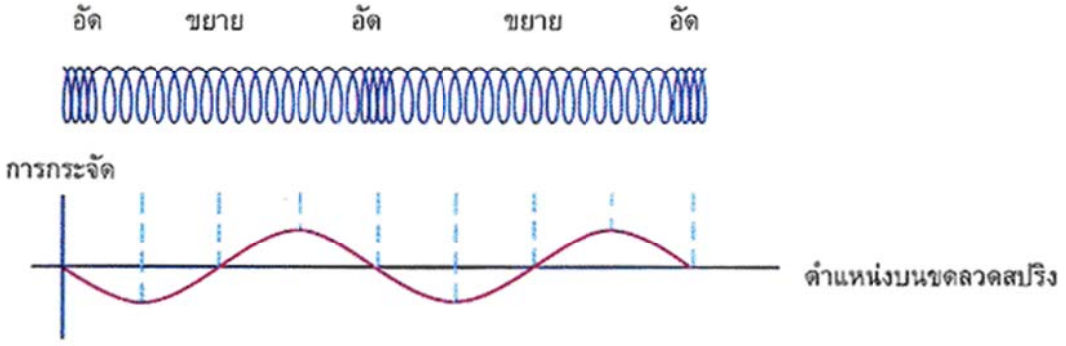
$$v_t = 331 + 0.6t \qquad \textbf{(12.1)}$$

เมื่อ v_t เป็นอัตราเร็วของเสียงในอากาศที่อุณหภูมิ t ใดๆ และมีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที

t เป็นอุณหภูมิของอากาศ มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส

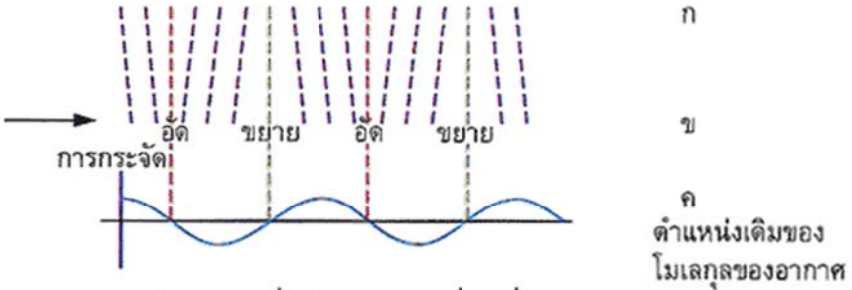
โดยสรุปคลื่นเสียงเกิดจากการสั่นของวัตถุที่เป็นแหล่งกำเนิดเสียง พลังงานการสั่นของแหล่งกำเนิดจะถูกถ่ายโอนให้แก่โมเลกุลของตัวกลางที่อยู่ติดกับต้นกำเนิดนั้น และพลังงานถูกส่งต่อกันไปเรื่อยๆ จนถึงหูผู้ฟัง ผลที่เกิดขึ้นคือ คลื่นเสียงเคลื่อนที่จากแหล่งกำเนิดโดยมีโมเลกุลของอากาศทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการถ่ายโอนพลังงานของคลื่นเสียงนั้น (สำหรับคลื่นเสียงในอากาศ)

เมื่อแหล่งกำเนิดเสียงสั่น พลังงานของการสั่นจะถูกถ่ายโอนให้แก่โมเลกุลของอากาศที่อยู่รอบๆ โดยการชนระหว่างโมเลกุล เมื่อพิจารณา**แนวการถ่ายโอนพลังงานของคลื่นเสียงกับแนวการสั่นของโมเลกุลของอากาศซึ่งเป็นโมเลกุลของตัวกลางแล้ว จะพบว่าอยู่ในแนวเดียวกัน ดังนั้น คลื่นเสียงจึงเป็นคลื่นตามยาว**



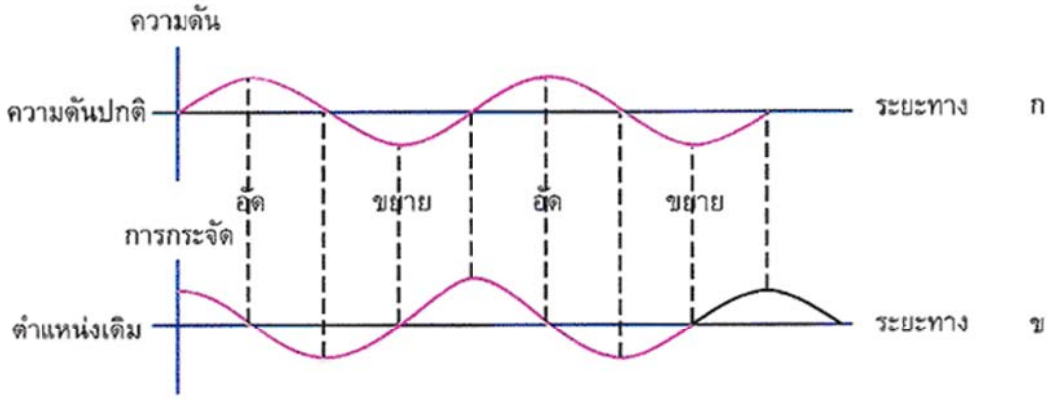
รูป 12.7 กราฟระหว่างการกระจัดออกจากตำแหน่งเดิมของขดลวดสปริงกับตำแหน่งต่างๆ บนสปริงขณะที่คลื่นตามยาวผ่าน

เมื่อพิจารณาภาพการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของอากาศขณะมีคลื่นเสียงผ่านให้พิจารณาโมเลกุลของอากาศอยู่ในแนวเส้นตรงซึ่งมีทิศออกจากแหล่งกำเนิดเสียง ขณะไม่มีคลื่นเสียงผ่านแต่ละโมเลกุลของอากาศอยู่ห่างกันเป็นระยะทางเท่ากันโดยตลอด ดังรูป 12.8 ก. เมื่อมีคลื่นเสียงผ่านระยะระหว่างโมเลกุลของอากาศจะเปลี่ยนไป ตามลักษณะที่เป็นส่วนอัดและส่วนขยาย ดังรูป 12.8 ข. และกราฟระหว่างระยะห่างจากตำแหน่งเดิมของโมเลกุลอากาศตามแนวการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงจะเป็นลักษณะเดียวกับการเกิดคลื่นตามยาวในขดลวดสปริง ดังแสดงในรูป 12.8 ค.



รูป 12.8 คลื่นเสียงขณะเคลื่อนที่ผ่านอากาศ

ขณะที่คลื่นเสียงเคลื่อนที่ผ่านอากาศ โมเลกุลของอากาศในบริเวณที่เป็นส่วนอัดจะมีจำนวนมากกว่าปกติ ทำให้ความดันอากาศที่บริเวณส่วนอัดสูงกว่าความดันปกติ ส่วนโมเลกุลของอากาศในบริเวณที่เป็นส่วนขยายจะมีจำนวนน้อยกว่าปกติ ทำให้ความดันของอากาศในบริเวณส่วนขยายต่ำกว่าปกติ ดังนั้น บริเวณตรงกลางระหว่างส่วนอัดจึงมีความดันเพิ่มจากปกติมากที่สุด และตรงกลางของส่วนขยายก็มีความดันลดลงจากปกติมากที่สุด ดังนั้นเมื่อพิจารณาคลื่นเสียงที่เคลื่อนที่ผ่านอากาศในขณะใดขณะหนึ่ง กราฟระหว่างความดันของอากาศ ณ ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวการเคลื่อนที่ของเสียงจะเป็นดังรูป 12.9 ก. และกราฟระหว่างการกระจัดของโมเลกุลของอากาศ ตามแนวการเคลื่อนที่ของเสียงเป็นดังรูป 12.9 ข.



รูป 12.9 ก. กราฟระหว่างความดันกับตำแหน่งต่างๆ ตามแนวการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียง
ข. กราฟระหว่างการกระจัดของโมเลกุลกับตำแหน่งต่างๆ ตามแนวการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียง

คลื่นเสียงเกิดจากการสั่นของแหล่งกำเนิดเสียง พลังงานการสั่นของต้นกำเนิดนี้จะถูกถ่ายโอนให้กับโมเลกุลของอากาศ ทำให้ความดันอากาศเปลี่ยนแปลง แต่ความถี่ของการเปลี่ยนแปลงก็ยังคงเท่ากับความถี่ของต้นกำเนิดเสียง การเปลี่ยนแปลงความดันของอากาศดังกล่าวนี้ จะถูกถ่ายโอนต่อๆ กันมาจากต้นกำเนิดจนกระทั่งถึงหูผู้ฟัง ทำให้ผู้ฟังได้ยินเสียงมีความถี่เดียวกับความถี่ของต้นกำเนิดเสียง

12.4 ความเข้มเสียงและการได้ยิน

เสียงเกิดจากการสั่นของวัตถุที่เป็นแหล่งกำเนิดเสียงและในการทำให้วัตถุสั่นจำต้องใช้พลังงาน **ถ้าพลังงานที่ใช้มีค่ามากแอมพลิจูดของการสั่นก็มีค่ามาก และถ้าใช้พลังงานน้อย แอมพลิจูดของการสั่นก็จะน้อยตามไปด้วย** พลังงานการสั่นของต้นกำเนิดเสียงจะถูกถ่ายโอนให้แก่โมเลกุลของอากาศที่อยู่รอบๆ แหล่งกำเนิดเสียงซึ่งพลังงานจะถูกถ่ายโอนผ่าน

โมเลกุลของอากาศต่อกันไปถึงหูผู้ฟัง ทำให้แก้วหูสั่นสะเทือน เป็นผลให้ผู้ฟังได้ยินเสียง การได้ยินเสียงของผู้ฟัง ขึ้นกับปัจจัยหลายประการ ซึ่งจะศึกษาต่อไป

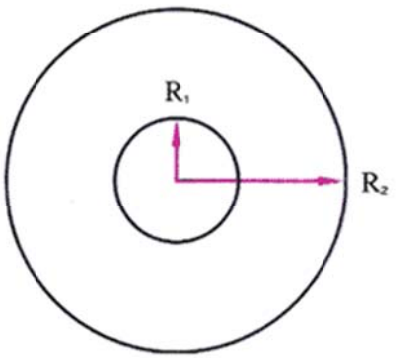
12.4.1 ความเข้มเสียง

เมื่อแหล่งกำเนิดเสียงสั่น พลังงานจากการสั่นจะถูกถ่ายโอนต่อๆ กันมาผ่านโมเลกุลของอากาศจนกระทั่งถึงหูผู้ฟัง ทำให้ผู้ฟังได้ยินเสียง เสียงที่หูได้ยินอาจจะดังหรือเบาก็ได้ ขึ้นอยู่กับพลังงานของเสียงที่หูผู้ฟังได้รับ

- ☐ ถ้าเราเปิดวิทยุไว้กลางสนาม แล้วเดินห่างจากวิทยุออกไปเรื่อยๆ เสียงที่ได้ยินจากวิทยุเครื่องนั้นจะเป็นอย่างไร
- ☐ แหล่งกำเนิดเสียงสองแหล่งมีอัตราการให้พลังงานต่างกัน ถ้าหูอยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดเสียงทั้งสองเป็นระยะทางเท่ากัน หูจะได้ยินเสียงจากแหล่งกำเนิดทั้งสองดังเท่ากันหรือไม่ อย่างไร

อัตราการถ่ายโอนพลังงานเสียงของแหล่งกำเนิด คือ **ปริมาณพลังงานเสียงที่ส่งออกจากแหล่งกำเนิดในหนึ่งหน่วยเวลา** ซึ่งเรียกว่า ***กำลังเสียง*** ในระบบเอสไอ ใช้หน่วยกำลังเสียงเป็นจูลต่อวินาที หรือวัตต์ ผู้ฟังจะได้ยินเสียงจากแหล่งกำเนิดเสียงที่มีกำลังมาก ดังกว่าเสียงจากแหล่งกำเนิดเสียงที่มีกำลังน้อย ในกรณีผู้ฟังอยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดเสียงทั้งสองเท่ากัน

ตามปกติคลื่นน้ำจากแหล่งกำเนิดที่เป็นจุด จะแผ่หน้าคลื่นออกจากแหล่งกำเนิดเป็นรูปวงกลม สำหรับคลื่นเสียงจากแหล่งกำเนิดที่เป็นจุด ก็อาจพิจารณาได้เช่นกันว่า หน้าคลื่นจะแผ่ออกเป็นรูปทรงกลม โดยมีจุดกำเนิดคลื่นเสียงอยู่ที่ศูนย์กลางของทรงกลมนั้น ดังนั้นหน้าคลื่นทรงกลมที่อยู่ไกลจากจุดกำเนิด ย่อมมีพื้นที่มากกว่าหน้าคลื่นทรงกลมที่อยู่ใกล้ ดังรูป 12.10



รูป 12.10 รูปหน้าคลื่นทรงกลมจากแหล่งกำเนิดเสียง

กำลังเสียงที่แหล่งกำเนิดเสียงส่งออกไปต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของหน้าคลื่นทรงกลม เรียกว่า **ความเข้มเสียง** ถ้ากำหนดกำลังเสียงจากแหล่งกำเนิดเสียงมีค่าคงตัว สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ว่า

$$\text{ความเข้มเสียง} = \frac{\text{กำลังเสียงของแหล่งกำเนิดเสียง}}{\text{พื้นที่ผิวทรงกลมรัศมี R ที่มีแหล่งกำเนิดเสียงอยู่ที่ศูนย์กลาง}}$$

หรือ

$$I = \frac{P}{4\pi R^2} \qquad \textbf{(12.3)}$$

เมื่อ I เป็นความเข้มเสียง ณ ตำแหน่งต่างๆ มีหน่วยเป็น วัตต์ / ตารางเมตร

P เป็นกำลังเสียงของแหล่งกำเนิดเสียง มีหน่วยเป็น วัตต์

R เป็นระยะระหว่างแหล่งกำเนิดเสียงกับตำแหน่งที่จะหาความเข้มเสียง มีหน่วยเป็นเมตร

จากสมการ (12.3) ถ้าแหล่งกำเนิดเสียงมีกำลังเสียง P คงตัว สามารถสรุปได้ว่า

$$I \ \alpha \ \frac{1}{R^2} \qquad \textbf{(12.4)}$$

ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่าความเข้มเสียง ณ ตำแหน่งต่างๆ จะลดลง เมื่อตำแหน่งนั้นๆ อยู่ไกลจากแหล่งกำเนิดเสียงมากขึ้น

จากการทดลองเรื่องการได้ยินของหูคนปกติ พบว่า เสียงที่เบาที่สุดที่หูมนุษย์สามารถได้ยิน มีความเข้มเสียง 10^{-12} วัตต์ต่อตารางเมตร และเสียงดังที่สุดที่หูมนุษย์สามารถทนฟังได้โดยไม่เป็นอันตรายต่อแก้วหู มีความเข้มเสียง 1 วัตต์ต่อตารางเมตรเท่านั้นเอง

12.4.2 ระดับความเข้มเสียง

เนื่องจากอัตราส่วนระหว่างความเข้มเสียงที่ดังที่สุดที่มนุษย์ทนฟังได้กับความเข้มเสียงเบาที่สุดที่มนุษย์ได้ยินมีค่ามากถึง 10^{12} ดังนั้น เพื่อความสะดวกในทางปฏิบัติ จึงนิยมใช้ **ระดับความเข้มเสียง** เป็นปริมาณที่บอกความดังของเสียงแทนความเข้มเสียง จากการทดลองเกี่ยวกับความรู้สึกต่อการได้ยินเสียงของคนปกติ พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มเสียงที่จุด

รับฟังเป็น 2 เท่า ความดังของเสียงที่ได้ยินไม่ได้เพิ่ม 2 เท่า แต่ความดังของเสียงที่ได้ยินจะเพิ่มเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเอง

กำหนดให้เสียงที่เบาที่สุดที่หูคนปกติรับรู้ได้มีระดับความเข้มเสียงเป็น 0 เบล ตามข้อกำหนดนี้จะปรากฏว่า เมื่อเพิ่มความเข้มเสียง ณ ตำแหน่งรับฟังเสียงเป็น 10 เท่าของความเข้มเสียงต่ำสุด ระดับความเข้มเสียงจะเพิ่มขึ้น 1 เบล ถ้าเพิ่มความเข้มเสียงเป็น 100 เท่า หรือ 10^2 เท่า ระดับความเข้มเสียงจะเพิ่มขึ้น 2 เบล จึงสรุปได้ว่าความเข้มเสียงที่จุดรับฟังเป็น 10^1 10^2 10^3 ...เท่าของความเข้มเสียงที่เบาที่สุดที่หูคนปกติรับได้

รูป 12.11 ตัวอย่างอุปกรณ์วัดระดับความเข้มเสียง

สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มเสียงกับระดับความเข้มเสียง β ได้ดังนี้

ระดับความเข้มเสียง $$\beta = 10 \log\left(\frac{I}{I_o}\right)$$ **(12.5)**

เมื่อ I_o คือ ความเข้มเสียงอ้างอิงที่มนุษย์เริ่มได้ยิน = $1\times10^{-12}\,W/m^2$

I คือ ความเข้มเสียงใดๆ ที่ต้องการวัด

β คือ ระดับความเข้มเสียงมีหน่วยเป็นเดซิเบล (dB)

☐ เสียงดังที่สุดที่หูมนุษย์สามารถทนฟังได้ โดยไม่เป็นอันตรายต่อหู มีระดับความเข้มเสียงเท่าใด

ตาราง 12.2 ระดับความเข้มเสียงจากแหล่งกำเนิดต่างๆ

แหล่งกำเนิด	ระดับความเข้มเสียง (เดซิเบล, dB)	ผลการรับฟัง
การหายใจปกติ	10	แทบจะไม่ได้ยิน
การกระซิบแผ่วเบา	30	เงียบมาก
สำนักงานที่เงียบ	50	เงียบ
การพูดคุยธรรมดา	60	ปานกลาง
เครื่องดูดฝุ่น	75	ดัง
โรงงานทั่วไป, ถนนที่มีการจราจรหนาแน่น	80	ดัง
เครื่องเสียงสเตอริโอในห้อง, เครื่องเจาะถนนแบบอัดลม	90	รับฟังบ่อย ๆ การได้ยินจะเสื่อมอย่างถาวร
เครื่องตัดหญ้า	100	
ดิสโก้เธค การแสดงดนตรีประเภทร็อค	120	ไม่สบายหู
ฟ้าผ่าระยะใกล้	130	
เครื่องบินไอพ่นกำลังขึ้นที่ระยะใกล้	150	เจ็บปวดในหู
จรวดขนาดใหญ่กำลังขึ้นที่ระยะใกล้	180	แก้วหูชำรุดทันที

12.4.3 มลภาวะของเสียง

เมื่อเราอยู่ใกล้บริเวณที่กำลังมีการตอกเสาเข็มหรือมีการขุดเจาะถนนด้วยเครื่องเจาะหรือบริเวณโรงงานอุตสาหกรรมที่มีเครื่องจักรขนาดใหญ่ หรือแม้แต่ในบริเวณสนามบิน เสียงที่เกิดขึ้นในบริเวณเหล่านี้ จะเป็นเสียงที่มีระดับความเข้มเสียงสูง ถ้าหูรับฟังเสียงเหล่านี้ติดต่อกันนานๆ จะทำให้สภาพหูและสภาพจิตใจของผู้ฟังผิดปกติได้ ดังนั้นผู้ที่ทำงานในบริเวณที่มีระดับความเข้มเสียงสูง จึงต้องมีจุกอุดหูหรือที่ครอบหูหรือวัสดุเก็บเสียงอื่นๆ เพื่อช่วยลดระดับความเข้มเสียงให้หูปลอดภัย

เราสามารถทำกิจกรรมง่ายๆ โดยการฟังเสียงจากเครื่องขยายเสียงที่ดังมาก แล้วเปรียบเทียบการได้ยินเสียงกับตอนที่สวมเครื่องครอบหูว่าเป็นอย่างไร นอกจากเสียงดังจะน่ารำคาญ เช่น เสียงขุดเจาะถนน เสียงเครื่องบินแล้ว ยังมีเสียงดังที่เป็นเสียงที่ผู้ได้ยินมีความสุข เช่น เสียงดนตรีในงานแสดงหรืองานวัด หรือตามสถานบันเทิง ซึ่งล้วนแล้วแต่เป็นเสียงที่มี

ระดับความเข้มเสียงสูงมาก อันตรายสำหรับเรื่องนี้ก็คือทั้งผู้เล่นและผู้ฟังต่างก็ไม่พยายามลดความดังของเสียงลงเลย

เนื่องจากเสียงที่มีระดับความเข้มเสียงสูง เป็นอันตรายต่อผู้ฟังที่อยู่ใกล้ กระทรวงมหาดไทยจึงได้ออกประกาศเกี่ยวกับความปลอดภัยในการทำงานในบริเวณที่มีเสียงดัง โดยมีเกณฑ์ ดังแสดงในตาราง 12.3

ตาราง 12.3 ประกาศกระทรวงมหาดไทย เรื่องความปลอดภัยเกี่ยวกับเสียง

เวลาในการทำงานต่อวัน (ชั่วโมง)	ระดับความเข้มเสียงที่คนทำงานได้รับอย่างต่อเนื่องต้องไม่เกิน (เดซิเบล)
น้อยกว่า 7	91
7 - 8	90
มากกว่า 8	80

เสียงที่มีระดับความเข้มเสียงสูง และเสียงที่ทำความรำคาญแก่หูผู้ฟัง คือ ***มลภาวะของเสียง*** การปรับปรุงหรือแก้ไขแหล่งกำเนิดเสียงให้มีกำลังเสียงลดลงจะทำให้ระดับความเข้มของเสียงลดลงด้วย จึงจัดเป็นการลดมลภาวะของเสียงวิธีหนึ่ง เครื่องยนต์เก่าที่ไม่ได้มาตรฐานจะส่งเสียงดังมาก การแก้ไขให้เครื่องยนต์ทำงานดีขึ้นจะทำให้เสียงที่ส่งออกมาค่อยลงนี้ ก็เป็นวิธีช่วยลดมลภาวะของเสียงทางหนึ่ง

ปัญหามลภาวะของเสียงส่วนใหญ่ มาจากยวดยานพาหนะต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งรถจักรยานยนต์และรถยนต์ที่มีเครื่องยนต์เก่า หรือรถที่มีการดัดแปลงท่อไอเสีย จนสร้างความรำคาญให้แก่ผู้คนทั่วไป ปัญหาดังกล่าวนี้มีพบได้ทั่วไปในเมืองใหญ่ๆ นอกจากนี้เสียงดังจากเรือหางยาวก็สร้างความรำคาญให้แก่ชุมชนที่ตั้งบ้านเรือนอยู่ตามแนวสองฝั่งคลองและแม่น้ำ และเสียงจากโรงงานอุตสาหกรรมก็สร้างความรำคาญกับชุมชนที่อยู่ใกล้เคียงโรงงานเช่นกัน

ข้อมูลที่ได้จากหน่วยงานที่รับผิดชอบเรื่องมลภาวะของเสียง แสดงว่าเสียงจากยวดยานพาหนะส่วนใหญ่จะมีระดับความเข้มเสียงสูงเกิน 85 เดซิเบล ซึ่งมาตรฐานระดับความเข้มเสียงในปัจจุบันกำหนดว่าระดับความเข้มเสียงจากยานพาหนะ ณ ที่ระยะห่าง 7.5 เมตร จากบ้านจะต้องไม่เกิน 85 เดซิเบล

บางครั้งโรงงานมีเครื่องจักรขนาดใหญ่ที่ได้มีการติดตั้งอย่างไม่ถูกต้อง ทำให้เครื่องจักรสั่นหรือแกว่งรุนแรงเมื่อให้เครื่องทำงาน การแก้ไขโดยการใช้สปริงหรือยางเสริมที่จุดติดตั้งกับพื้นจะช่วยลดเสียงเนื่องจากการสั่นของเครื่องได้มาก นอกจากนั้นการใช้วัสดุเก็บเสียงที่ผนังด้านในของโรงงานก็จะช่วยลดความดังของระดับความเข้มเสียงภายในโรงงานได้ หรือแม้แต่ในโรงฝึกงานของโรงเรียนก็สมควรใช้วัสดุเก็บเสียงเช่นกัน

รูป 12.12 แสดงการป้องกันมลภาวะของเสียงโดยใช้ที่ครอบหู

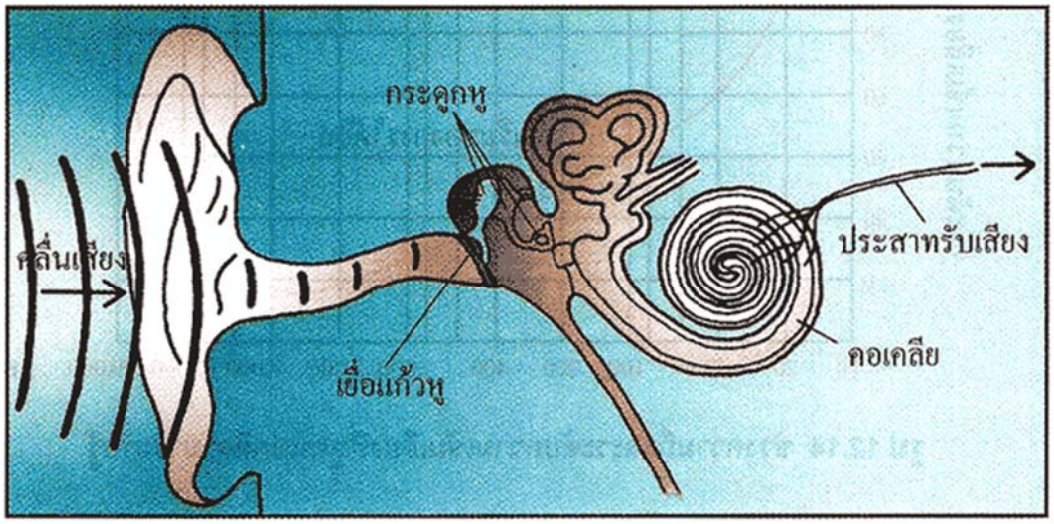
ในกรณีที่เราไม่สามารถแก้ไขความดังของเสียงที่แหล่งกำเนิดเสียงได้ การป้องกันโดยวิธีอื่นๆ เช่น การใช้จุกอุดหู หรือที่ครอบหู หรือการติดตั้งวัสดุเก็บเสียงจะสามารถช่วยลดมลภาวะของเสียงได้

- ☐ เสียงที่มีความถี่สูง เป็นมลภาวะของเสียงหรือไม่ เพราะเหตุใด
- ☐ รถจักรยานยนต์หรือรถยนต์ที่ถอดท่อเก็บเสียงออก หรือถูกดัดแปลงท่อไอเสียเพื่อทำให้เกิดเสียงดังมาก เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในเขตชุมชนหรือไม่ และรถดังกล่าวเพิ่มมลภาวะของเสียงอย่างไร

12.4.4 หูกับการได้ยิน

ถ้าเราอยู่ในที่ที่สงบเงียบ เราอาจจะได้ยินแม้กระทั่งเสียงน้ำฝนที่หยดจากหลังคา เสียงลมหายใจของคนที่อยู่ใกล้ๆ เสียงที่แผ่วเบาเหล่านี้ เกิดจากการถ่ายโอนพลังงานจากการสั่นของต้นกำเนิดเสียง ผ่านอากาศมากระทบเยื่อแก้วหู ซึ่งมีความไวมาก การศึกษาโครงสร้างและการทำงานของหู พบว่า การสั่นของเยื่อแก้วหูเพียงเล็กน้อยเท่านั้นก็มีผลต่อประสาทรับรู้ในการได้ยินของคนเราแล้ว

หูของคนเราแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนนอก ส่วนกลางและส่วนใน ดังรูป 12.13



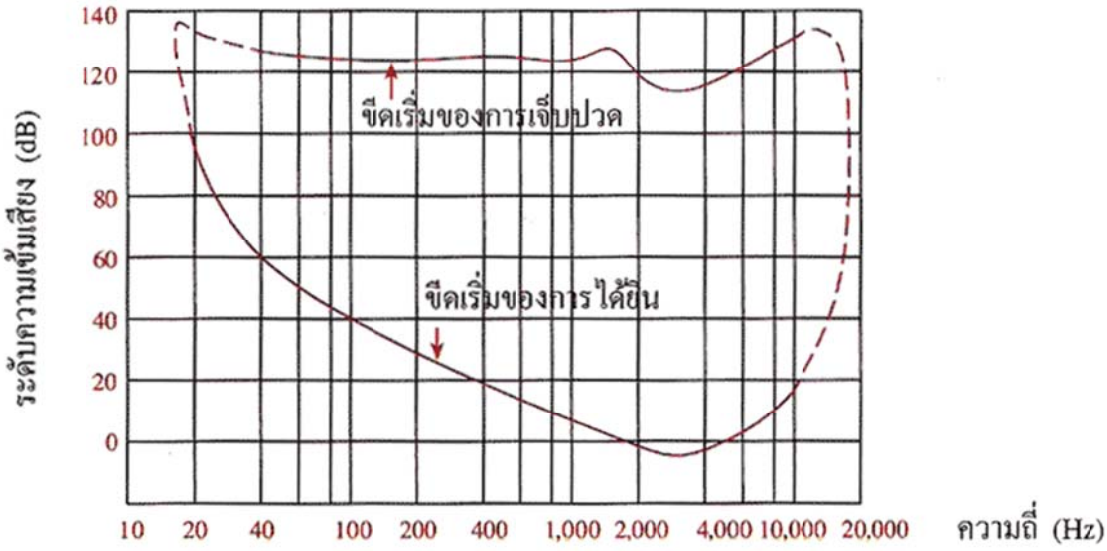
รูป 12.13 ส่วนประกอบของหู

หูส่วนนอกประกอบด้วยใบหูและรูหู ซึ่งอยู่ลึกเข้าไปในกะโหลกศีรษะไปสิ้นสุดที่เยื่อแก้วหู

หูส่วนกลางเริ่มจากเยื่อแก้วหูซึ่งเป็นเนื้อเยื่อแผ่นบางๆ ปิดช่องหูที่แบ่งระหว่างหูส่วนนอกกับหูส่วนกลางบริเวณถัดจากเยื่อ แก้วหูเข้าไปเป็นโพรง ภายในโพรงมีกระดูก 3 ชิ้นซึ่งมีชื่อเรียกตามรูปร่าง คือ กระดูกค้อน กระดูกทั่ง และกระดูกโกลน ภายในหูส่วนกลางยังมีช่องเล็กๆ ที่ติดต่อกับหลอดลมซึ่งทำหน้าที่ปรับความดันอากาศทั้งสองของแก้วหูให้เท่ากันตลอดเวลา ถ้าความดันทั้งสองข้างของแก้วหูไม่เท่ากัน จะหูอื้อ หรือปวดหู เช่น เมื่อเราดำน้ำลงไปลึกๆ หรือขึ้นไปบนที่สูงมากๆ เป็นต้น

หูส่วนในมีส่วนสำคัญต่อการได้ยินเสียง ได้แก่ส่วนที่เป็นท่อกลวงขดเป็นรูปคล้ายหอยโข่ง เรียกว่า คอเคลียที่ภายในมีเซลล์ขนอยู่เป็นจำนวนมาก เพื่อทำหน้าที่รับรู้การสั่นของคลื่นเสียงที่ผ่านมาจากหูส่วนกลาง พร้อมกับส่งสัญญาณการรับรู้ผ่านเส้นประสาทไปยังสมอง สมองจะทำหน้าที่แปลสัญญาณที่ได้รับ ทำให้เรารับรู้เกี่ยวกับเสียงที่ได้ยิน

เราทราบแล้วว่า ขอบเขตความสามารถของการได้ยินเสียงของหูคนขึ้นกับระดับความเข้มเสียง และความถี่ของเสียง จากการศึกษาความสามารถทางการได้ยินของคนปกติพบว่าช่วงความถี่และระดับความเข้มของเสียงที่คนเราสามารถรับรู้ได้มีความสัมพันธ์กัน ดังรูป 12.14



รูป 12.14 ช่วงความถี่และระดับความเข้มเสียงที่หูคนปกติสามารถรับรู้

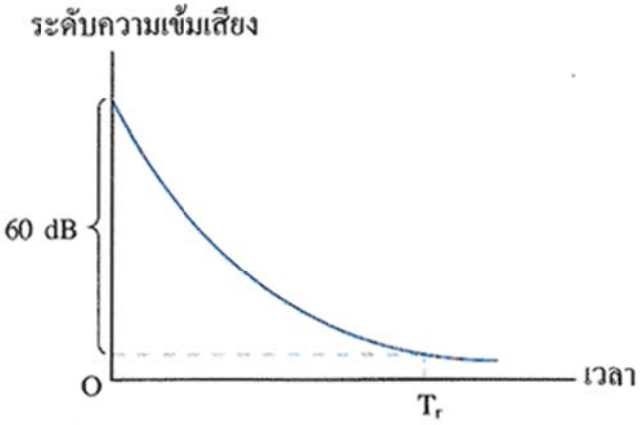
- ☐ ถ้าเสียงจากแหล่งกำเนิดเสียงมีความถี่ 30 เฮิรตซ์ คนปกติจะได้ยินเสียงนี้เสมอไปหรือไม่ เพราะเหตุใด
- ☐ ถ้าระดับความเข้มเสียง ณ ตำแหน่งหูของผู้ได้ยินมีค่า 10 เดซิเบล เขาจะได้ยินเสียงนี้เสมอไปหรือไม่ เพราะเหตุใด
- ☐ จากรูป 12.14 จงอธิบายการรับรู้เสียงของคนว่า ขึ้นกับความถี่และระดับความเข้มเสียงอย่างไร

จากรูป 12.14 จะเห็นได้ว่าสำหรับเสียงที่มีความถี่ต่ำๆ เช่น 20-30 เฮิรตซ์ หูจะได้ยินเสียงดังกล่าวก็ต่อเมื่อเสียงนั้นมีระดับความเข้มเสียง 60-70 เดซิเบล ซึ่งแตกต่างกับเสียงความถี่ที่มีสูงปานกลาง เช่น 1,000 เฮิรตซ์ ที่เราสามารถได้ยินแม้จะมีระดับความเข้มเสียงเพียง 10 เดซิเบลก็ตาม กราฟเส้นล่างแสดงตำแหน่ง***ขีดเริ่มของการได้ยิน*** และกราฟเส้นบนแสดง***ขีดเริ่มของความเจ็บปวด*** พื้นที่ซึ่งล้อมรอบด้วยกราฟเส้นบนและเส้นล่างนี้จะแทนขอบเขตของการได้ยินของคน เสียงที่เราสามารถรับรู้ได้จะมีความถี่และระดับความเข้มเสียงอยู่ภายในขอบเขตของการได้ยินนี้

กราฟการได้ยินของหูมนุษย์ ช่วยให้เราเข้าใจว่าทำไมวิทยุกระเป๋าหิ้วที่มีกำลังเสียงเพียง 0.25 วัตต์ สามารถส่งกระจายข่าวสารและดนตรีให้เราได้ยินอย่างชัดเจน เพราะว่าเสียงที่ใช้พูดคุย สนทนา ทั่วไปจะมีความถี่ในช่วง 1000-8000 เฮิรตซ์ ซึ่งการได้ยินต้องการระดับความเข้มเสียงใกล้ 0-10 เดซิเบล ก็สามารถทำให้ผู้ได้ยินชัดเจน แล้วเสียงร้องเพลงก็อยู่ในความถี่ช่วงนี้เช่นกัน สำหรับเสียงเบส และเสียงแหลมนั้นต้องใช้เครื่องขยายเสียงที่มีกำลังสูงกว่านี้

12.4.5 เวลาก้องเสียง

เวลาที่นับจากขณะเสียงมีพลังงานมากที่สุดจนกระทั่งเสียงมีพลังงานลดลงถึงค่าหนึ่งกำหนดลดลง 60 dB คือ เวลาก้องเสียง (Tr) ในห้องประชุมที่มีการสะท้อน เช่น ห้องกระจกหรือผนังตึก ที่ว่างเปล่า ค่า (Tr) จะสูงมาก จนเวลาเปิดเครื่องขยายเสียงจะมีเสียงก้องนานมากจนกระทั่งฟังเสียงคนพูดไม่รู้เรื่อง หรือน่ารำคาญ ดังนั้นในการออกแบบห้องประชุม โรงละคร หรือโรงภาพยนตร์ วิศวกรและสถาปนิกจะต้องคำนึงถึงเสียงก้องเสมอ ในห้องที่มีเสียงก้องมากไป ต้องใช้วัสดุเก็บเสียง เช่น ผ้าม่าน กระดาษชานอ้อย หรือพรมปูที่พื้นห้อง เพื่อช่วยลดค่า (Tr) ลงให้พอเหมาะเพราะถ้า (Tr) มีค่าน้อยไป จะฟังเพลงไม่เพราะ



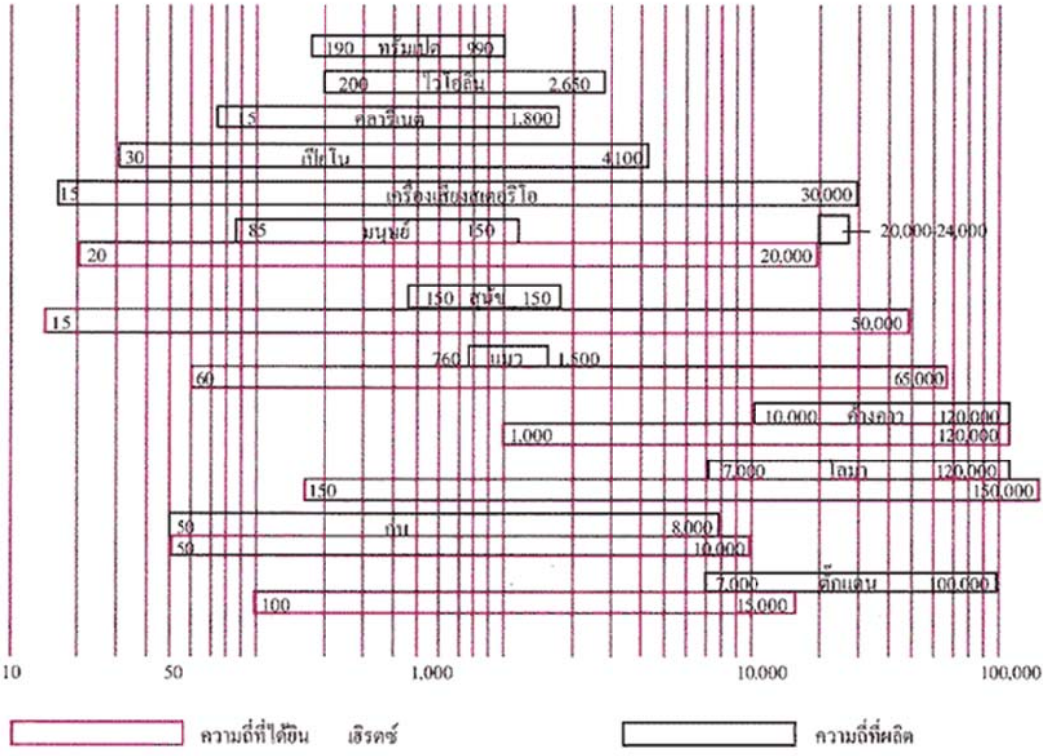
รูป 12.15 กราฟแสดงเวลาของเสียงก้อง

ปัจจุบันเครื่องขยายเสียงชั้นดี จะมีวงจรสร้างเสียงก้องด้วย ทำให้เราสามารถเลือกเวลาของเสียงก้องว่าให้มีมากหรือน้อยได้ เพื่อให้เหมาะกับห้อง และรสนิยมของผู้ฟัง

12.5 เสียงดนตรี

12.5.1 ระดับเสียง

การได้ยินเสียงของคนเรา นอกจากจะขึ้นกับความเข้มเสียงและระดับความเข้มเสียงแล้ว ยังขึ้นกับความถี่ของเสียงด้วย ความถี่ของเสียงที่หูคนปกติได้ยินมีค่าตั้งแต่ 20 ถึง 20,000 เฮิรตซ์ ดังนั้นเสียงที่มีความถี่ต่ำกว่า 20 เฮิรตซ์ลงไปเราเรียกว่า ***คลื่นใต้เสียง*** สำหรับเสียงที่มีความถี่สูงกว่า 20,000 เฮิรตซ์ขึ้นไปเรียกว่า ***คลื่นเหนือเสียง*** จะเห็นได้ว่าหูมนุษย์เราสามารถได้ยินเสียงในช่วงความถี่หนึ่งเท่านั้น สำหรับสัตว์อื่น ๆ ก็เช่นกัน คือจะได้ยินเสียงในช่วงความถี่หนึ่งเช่นกัน แต่ช่วงความถี่ของเสียงที่สัตว์แต่ละชนิดได้ยินจะแตกต่างกันไป และแตกต่างจากช่วงความถี่ของเสียงที่มนุษย์ได้ยิน นอกจากนี้แหล่งกำเนิดเสียงต่าง ๆ ก็ให้เสียงได้ในช่วงความถี่ที่แตกต่างกัน เช่น แมวสามารถเปล่งเสียงในช่วงความถี่ 760-1,500 เฮิรตซ์ แต่สามารถได้ยินเสียงในช่วงความถี่ที่กว้างกว่ามาก คือ ตั้งแต่ 60-65,000 เฮิรตซ์ คนสามารถเปล่งเสียงในช่วงความถี่ 85-1,100 เฮิรตซ์ แต่สามารถได้ยินเสียงที่มีความถี่ตั้งแต่ 20-20,000 เฮิรตซ์ ซึ่งพิจารณาได้จากรูป 12.16



รูป 12.16 แผนภาพแสดงช่วงความถี่ของแหล่งกำเนิดเสียง
และช่วงความถี่เสียงที่มนุษย์-สัตว์ได้ยิน

☐ หูคนจะรับรู้เสียงจากแหล่งกำเนิดเสียงที่สั่นด้วยความถี่ 500 เฮิรตซ์เสมอไปหรือไม่อย่างไร

เมื่อได้ยินเสียงตามปกติ เราจะบอกได้ว่าเสียงนั้นมี**ระดับเสียง**สูงหรือต่ำ ความแตกต่างของเสียงที่กล่าวนี้ ขึ้นกับความถี่ของเสียง เสียงที่มีระดับเสียงต่ำจะเป็นเสียงที่มีความถี่น้อย คนทั่วไปมักเรียกว่า **เสียงทุ้ม** ส่วนเสียงที่มีระดับเสียงสูงจะเป็นเสียงที่มีความถี่มาก เรียกว่า **เสียงแหลม** การจัดแบ่งระดับเสียง อาจทำได้หลายวิธี วิธีหนึ่งก็คือแบ่งเป็นระดับเสียงดนตรี ซึ่งแสดงระดับเสียงตามตาราง 12.4

ตาราง 12.4 การแบ่งระดับเสียงดนตรีในวิทยาศาสตร์

ระดับเสียงดนตรี	C (โด)	D (เร)	E (มี)	F (ฟา)	G (ซอล)	A (ลา)	B (ที)	C′ (โด)
ความถี่ (เฮิรตซ์)	256	288	320	341	384	427	480	512

เสียง C มีความถี่ 256 เฮิรตซ์ ถัดจากเสียง C จะเป็นเสียง D E F G A และ B ตามลำดับ เสียง C' มีความถี่เป็น 2 เท่าของเสียง C เสียง D' E' F' G' A' และ B' จะมีความถี่เป็น 2 เท่าของ D E F G A ตามลำดับ ถ้าพิจารณาต่อไปอีกจะมีเสียง C" มีความถี่เป็น 2 เท่าของเสียง C' หรือ 4 เท่าของเสียง C ไปเรื่อยๆ

สำหรับเสียง C กับ C' หรือ C' กับ C" เรียกว่า **คู่แปด** ทำนองเดียวกันเสียงอื่น ๆ เช่น เสียง D' จะเป็นเสียงคู่แปดของเสียง D เสียง E' เป็นเสียงคู่แปดของเสียง E เป็นต้น

☐ เสียงใดที่เป็นเสียงคู่แปดของเสียง F G A B D' และ A"

☐ เสียง A' G" B' และ F" มีความถี่เท่าใด

ในการเล่นดนตรี โดยเล่นเสียงตาม***โน้ต*** ทีละตัวตามทำนองเพลงหรือทำให้เกิดเสียงโน้ตหลายตัวพร้อมๆ กันก็ได้ เช่น การเล่นคอร์ด ซึ่งเป็นการทำให้เกิดเสียงโน้ตหลายตัวพร้อมกัน

ในการแบ่งระดับเสียงของเครื่องดนตรีสากล เสียงต่างๆ มีความถี่ตามตาราง 12.5

ตาราง 12.5 การแบ่งระดับเสียงดนตรีในทางดนตรีศาสตร์

ระดับเสียงดนตรี	C (โด)	D (เร)	E (มี)	F (ฟา)	G (ซอล)	A (ลา)	B (ที)	C′ (โด)
ความถี่ (เฮิรตซ์)	261.6	293.7	329.6	349.2	392.0	440.0	493.9	523.3

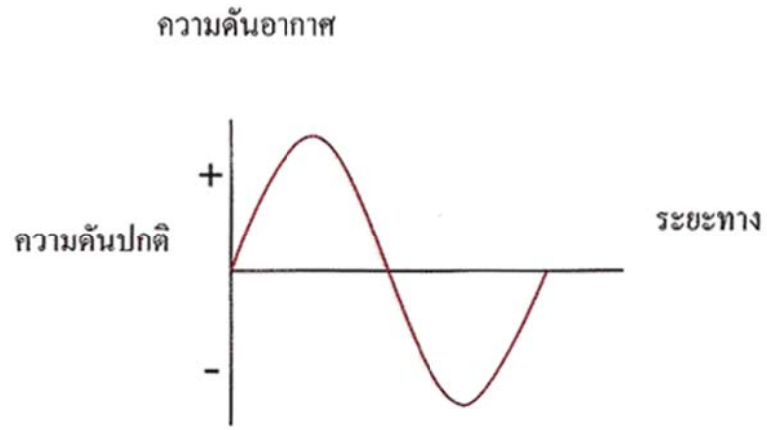
เมื่อพิจารณาเสียงดนตรีพื้นเมืองของแต่ละชาติ พบว่ามีการแบ่งระดับเสียงแตกต่างกัน จึงทำให้เสียงดนตรีของแต่ละชาติมีเอกลักษณ์เฉพาะตัว การแบ่งระดับเสียงดนตรีของไทยในยุคใหม่ใกล้เคียงกับการแบ่งระดับเสียงของดนตรีสากล ทำให้เครื่องดนตรีไทยสามารถเล่นเพลงสากลบางเพลงได้ และเครื่องดนตรีสากลก็สามารถเล่นเพลงไทยบางเพลงได้เช่นกัน จึงมีการนำเครื่องดนตรีสากลมาบรรเลงร่วมกับดนตรีไทย เช่น เครื่องสายผสมออร์แกน หรือเครื่องสายผสมเปียโน เป็นต้น

- ☐ ระดับเสียงของขลุ่ยกับของกลองต่างกันหรือไม่ อย่างไร
- ☐ ไวโอลินกับขลุ่ย เล่นโน้ต A เหมือนกัน ระดับเสียงจากเครื่องดนตรีทั้งสองแตกต่างกันหรือไม่ อย่างไร

12.5.2 คุณภาพเสียง

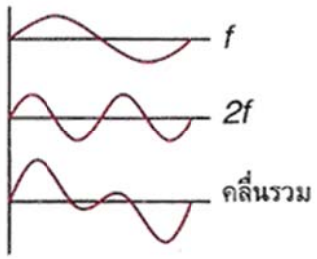
แหล่งกำเนิดเสียงต่างกัน อาจให้เสียงที่มีระดับเสียงเดียวกัน เช่น ไวโอลินและขลุ่ยเล่นโน้ตเดียวกันจะให้เสียงที่มีความถี่เดียวกัน แต่เราสามารถแยกออกได้ว่า เสียงใดเป็นเสียงไวโอลินและเสียงใดเป็นเสียงขลุ่ย แสดงว่า นอกจากระดับเสียงแล้ว จะต้องมีปัจจัยอื่นอีกที่ทำให้เสียงที่ได้ยินแตกต่างกัน จนเราสามารถแยกประเภทของแหล่งกำเนิดเสียงนั้นๆ ได้

เพื่อพิจารณาคลื่นเสียงจากแหล่งกำเนิดเสียงที่มีความถี่เดียว กราฟระหว่างความดันกับตำแหน่งต่าง ๆ ตามแนวการเคลื่อนที่ของเสียง เป็นดังรูป 12.17

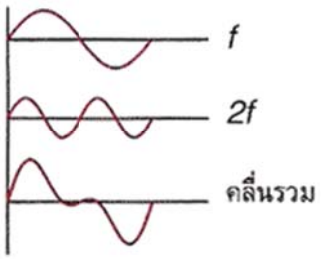


รูป 12.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันของอากาศ
กับระยะทางเมื่อคลื่นเสียงความถี่เดียวเคลื่อนที่ผ่าน

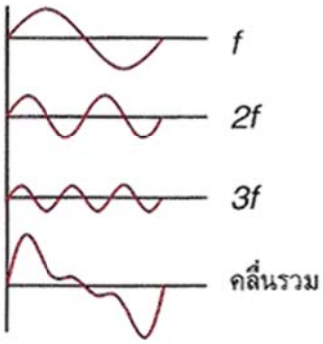
ถ้าคลื่นเสียงจากแหล่งกำเนิดเสียงสองแหล่งที่มีความถี่ f กับ $2f$ แต่มีแอมพลิจูดเท่ากัน ซ้อนทับกันผลที่เกิดขึ้น จะเป็นดังรูป 12.18 ก. ถ้าคลื่นเสียงจากแหล่งกำเนิดสองแหล่งมีความถี่ f และ $2f$ แต่มีแอมพลิจูดต่างกัน ผลรวมจะเป็นดังรูป 12.18 ข. ถ้าคลื่นจากแหล่งกำเนิดสามแหล่งที่มีความถี่ f, $2f$ และ $3f$ และมีแอมพลิจูดต่างกัน รวมกันผลจะเป็นดังรูป 12.18 ค



ก. การซ้อนทับระหว่างคลื่นเสียงจากแหล่งมีความถี่ f และ $2f$ และแอมพลิจูดเท่ากัน



ข. การซ้อนทับระหว่างคลื่นเสียงจากแหล่งกำเนิดที่แอมพลิจูดต่างกัน

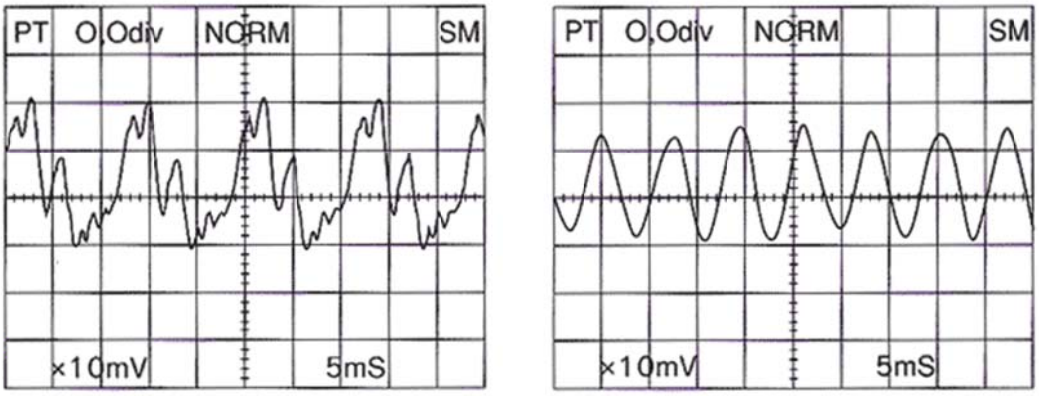


ค. การซ้อนทับระหว่างคลื่นกำเนิดที่มีความถี่ f, $2f$ และ $3f$ และแอมพลิจูดต่างกัน

รูป 12.18 แสดงการซ้อนทับระหว่างคลื่นเสียงจากแหล่งกำเนิดที่มีความถี่และแอมพลิจูดต่างๆ

ในทำนองเดียวกัน ถ้าคลื่นเสียงจากแหล่งกำเนิดเสียงหลาย ๆ แหล่งที่มีความถี่ f, $2f$, $3f$, ..., nf ซ้อนทับกัน โดยแอมพลิจูดหรือความเข้มของเสียงแต่ละความถี่แตกต่างกัน ผลการซ้อนทับของคลื่นเสียงจะมีลักษณะเฉพาะตัวที่แตกต่างกันไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความถี่และความเข้มของเสียงแต่ละความถี่

ตามปกติในขณะที่สายไวโอลินสั่น จะมีเสียงซึ่งมีความถี่ f, $2f$, $3f$, ..., nf เกิดพร้อมกัน โดยเสียงแต่ละความถี่จะมีความเข้มเสียงแตกต่างกัน คลื่นเสียงจากไวโอลินจะมีความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับตำแหน่งต่าง ๆ ตามแนวการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงดังกราฟในรูป 12.19 ก.



ก. ไวโอลิน **ข. ซอด้วง**

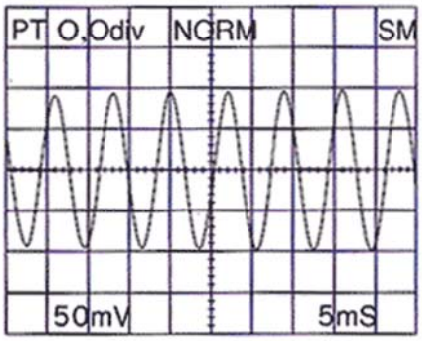
รูป 12.19 กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับตำแหน่งของคลื่นเสียงจากไวโอลิน และซอด้วง

เสียงจากซอด้วงก็เช่นกัน จะประกอบด้วยเสียงที่มีความถี่ f, $2f$, $3f$, ..., nf เกิดขึ้นพร้อมกัน โดยความเข้มเสียงแต่ละความถี่แตกต่างกัน คลื่นเสียงจากซอด้วงจะมีความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับตำแหน่งต่างๆ ตามแนวการเคลื่อนที่ของคลื่น จะเห็นได้ชัดว่าลักษณะคลื่นเสียงจากซอด้วงแตกต่างจากลักษณะคลื่นเสียงจากไวโอลิน

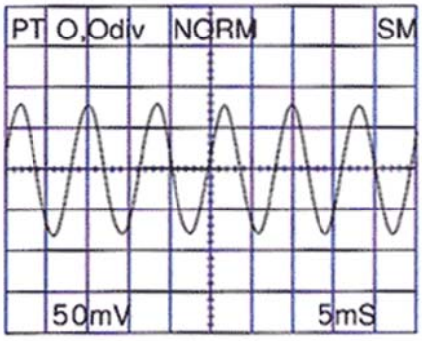
ความถี่ต่ำสุดของเสียงที่ออกจากแหล่งกำเนิดเสียงใดๆ เราเรียกว่า ***ความถี่มูลฐาน*** ของแหล่งกำเนิดนั้น สำหรับความถี่อื่นๆ ที่เกิดขึ้นพร้อมกับความถี่มูลฐานแต่มีความถี่เป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่มูลฐาน เราเรียกว่า ***ฮาร์มอนิก*** ของความถี่มูลฐาน เช่น ความถี่ของเสียงสูงเป็น 2 เท่าของความถี่มูลฐาน เรียกว่า ***ฮาร์มอนิกที่ 2*** ความถี่ของเสียงที่สูงเป็น 3 เท่าของความถี่มูลฐาน เรียกว่า ***ฮาร์มอนิกที่ 3*** เป็นต้น

ต้นกำเนิดเสียงต่างๆ ขณะสั่น จะให้เสียงซึ่งมีความถี่มูลฐานและฮาร์มอนิกต่างๆ ออกมาพร้อมกันเสมอ แต่จำนวนฮาร์มอนิกและความเข้มเสียงของแต่ละฮาร์มอนิกจะแตกต่างกัน

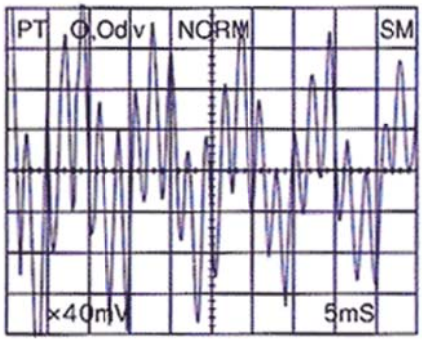
ทำให้ลักษณะของคลื่นเสียงที่ออกมาแตกต่างกัน สำหรับแหล่งกำเนิดเสียงที่ต่างกัน จะให้เสียงที่มีลักษณะเฉพาะตัว หรือที่เราเรียกว่ามี ***คุณภาพเสียง*** ต่างกันนั่นเอง คุณภาพเสียงช่วยให้เราสามารถแยกประเภทของแหล่งกำเนิดเสียงได้



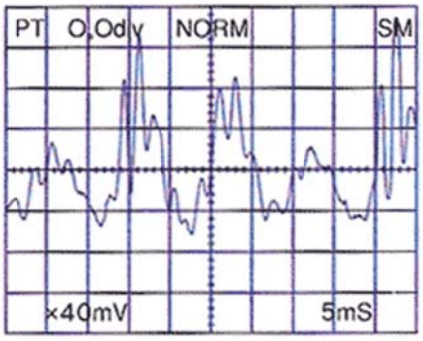
ก. รูปคลื่นเสียงของขลุ่ยไทย



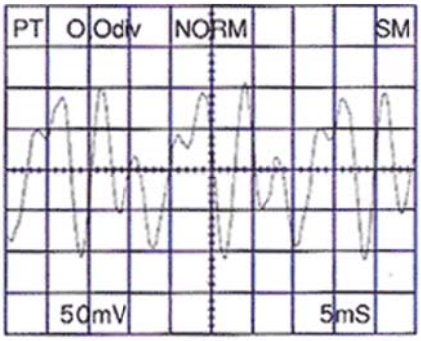
ข. รูปคลื่นเสียงของขลุ่ยสากล



ค. รูปคลื่นเสียงระนาดไม้ไผ่



ง. รูปคลื่นเสียงคนพูดคำว่า "เอ"



ฉ. รูปคลื่นเสียงของทรัมเปต

รูป 12.20 แสดงคุณภาพเสียงจากแหล่งกำเนิดต่างๆ

- ☐ เพราะเหตุใด ขลุ่ยและทรัมเปตที่เล่นโน้ตตัวเดียวกันจึงมีคุณภาพเสียงต่างกัน
- ☐ เครื่องดนตรีชนิดเดียวกัน เมื่อเล่นโน้ตตัวเดียวกันมีคุณภาพเสียงต่างกันหรือไม่ เพราะเหตุใด
- ☐ ปริมาตรของอากาศในช่องจมูก ปาก คอ และปอด มีผลต่อคุณภาพของเสียงพูดของคนหรือไม่ อย่างไร

12.5.3 ความถี่ธรรมชาติ

วัตถุต่างๆ ที่ถูกตรึง เช่น สะพานแขวน ชิงช้า ลูกตุ้มที่แขวนเชือก สายไฟที่ขึงบนเสากลางทุ่ง เมื่อถูกแรงแล้วปล่อยให้แกว่ง ชิงช้าและลูกตุ้มถูกผลัก สายไฟถูกลมแรงพัด หรือแม้แต่ตึกขนาดใหญ่ก็สามารถสั่นได้เมื่อเกิดแผ่นดินไหว

แผ่นไม้บรรทัดที่ยึดปลายข้างหนึ่งที่ขอบโต๊ะ เมื่อดีดที่ปลายอีกข้างหนึ่งไม้บรรทัดก็สั่นอย่างอิสระเราเรียกความถี่ในการสั่นนี้ว่า**ความถี่ธรรมชาติ** ซึ่งมีค่าคงตัว สรุป ความถี่ในการสั่นหรือแกว่งของวัตถุที่สั่นหรือแกว่งอย่างอิสระ เรียกว่า **ความถี่ธรรมชาติของวัตถุ** เช่นสายกีตาร์ที่ถูกขึงตึง เมื่อถูกดีดบริเวณตรงกลาง สายกีตาร์จะสั่นด้วยความถี่ธรรมชาติ ซึ่งมีค่าเท่ากับความถี่มูลฐาน

การสั่นพ้อง

กลับมาพิจารณาวัตถุต่างๆ ที่ถูกตรึง เช่น สะพานแขวน ชิงช้า ลูกตุ้มที่แขวนเชือก สายไฟที่ขึงบนเสากลางทุ่ง เมื่อมีแรงมากระทำเพียงครั้งเดียวแล้วหยุด มันจะสั่นอย่างอิสระด้วยความถี่ธรรมชาติ แต่ถ้าแรงนั้นเป็นแรงดลที่กระทำด้วยความถี่หนึ่งๆ จะเกิดอะไรขึ้นกับวัตถุ

เมื่อออกแรงกระตุ้นวัตถุด้วยความถี่ต่างๆ วัตถุจะถูกบังคับให้สั่นหรือแกว่งด้วยความถี่ที่เท่ากับแรงนั้น แต่แอมพลิจูดของการสั่นหรือแกว่งจะมากที่สุดเมื่อความถี่ของแรงที่มากระตุ้นเท่ากับความถี่ธรรมชาติของวัตถุ ดังจะเห็นได้จากกิจกรรม 12.1 ท้ายบท

ปรากฏการณ์ที่มีแรงกระทำให้วัตถุสั่นหรือแกว่ง โดยความถี่ของแรงที่ทำให้วัตถุสั่นหรือแกว่งเท่ากับความถี่ธรรมชาติของวัตถุนั้น เรียกว่า การสั่นพ้อง ในกรณีที่เกิดการสั่นพ้องนี้การสั่นของวัตถุจะมีแอมพลิจูดของการสั่นมากที่สุดเมื่อเทียบกับการสั่นด้วยความถี่อื่นๆ

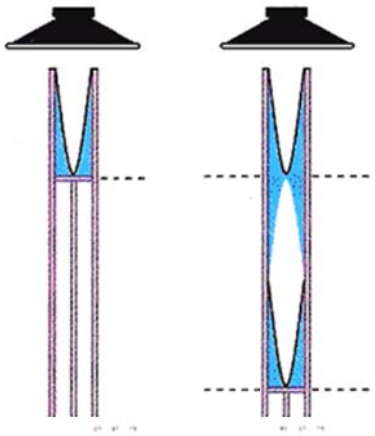
12.5.4 การสั่นพ้องของเสียง

จากที่ได้ศึกษามา เราทราบแล้วว่าเสียงเกิดจากการสั่นของแหล่งกำเนิด และการเคลื่อนที่ของเสียงเป็นการเคลื่อนที่แบบคลื่น ขณะเสียงเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง อนุภาคของตัวกลางจะสั่นด้วยความถี่เดียวกับความถี่ของแหล่งกำเนิด เมื่อให้เสียงเคลื่อนที่ผ่านอากาศที่อยู่ในท่อซึ่งมีปริมาตรต่างๆ กัน เสียงที่ได้ยินจะเปลี่ยนแปลงอย่างไร จะพิจารณาจากกิจกรรม 12.4

อนุภาคของอากาศในหลอดเรโซแนนซ์ถูกบังคับให้สั่นด้วยความถี่ของเสียงจากลำโพง การเลื่อนลูกสูบไปจนกระทั่งลูกสูบอยู่ ณ ตำแหน่งหนึ่ง จะทำให้ได้ยินเสียงดังที่สุด ณ ตำแหน่งนี้ อนุภาคอากาศภายในหลอดจะสั่นมากที่สุด จึงได้ยินเสียงดังที่สุด การที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากความถี่ของเสียงจากลำโพงมีค่าเท่ากันกับความถี่ธรรมชาติของลำอากาศในหลอดพอดี ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ เรียกว่า ***การสั่นพ้องของเสียง*** ศึกษาได้จากการทดลอง 12.3 ท้ายบท

ขณะที่เกิดการสั่นพ้องของเสียงในหลอดเรโซแนนซ์ ระยะทางระหว่างตำแหน่งของลูกสูบขณะได้ยินเสียงดังที่สุดซึ่งอยู่ถัดกันมีความสัมพันธ์กับความยาวคลื่นเสียงที่ใช้ทดลองอย่างไร สิ่งที่เกิดขึ้นจะเกี่ยวกับปรากฏการณ์คลื่นนิ่งของเสียงหรือไม่

จากที่เคยศึกษามา เราทราบว่า คลื่นสามารถแสดงสมบัติการแทรกสอด เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงในหลอดเรโซแนนซ์ในขณะที่เกิดการสั่นพ้อง จะมีการแทรกสอดระหว่างคลื่นเสียงจากลำโพงและเสียงที่สะท้อนจากลูกสูบ จากการทดลอง จะเห็นว่า เมื่อเลื่อนลูกสูบออกไป**ระยะทางระหว่างตำแหน่งถัดกันของลูกสูบเมื่อได้ยินเสียงดังที่สุดสองครั้งจะเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นเสียง** และจากความรู้เกี่ยวกับคลื่นนิ่งของเสียง สามารถสรุปได้ว่า ขณะเกิดการสั่นพ้องของเสียงในหลอดเรโซแนนซ์ จะเกิดการซ้อนทับระหว่างคลื่นเสียงในหลอดทำให้เกิดคลื่นนิ่ง จากการศึกษาคลื่นนิ่งของเสียงในหลอดเรโซแนนซ์ ขณะที่เกิดการสั่นพ้องของเสียงในหลอด โมเลกุลของอากาศที่อยู่ติดกับลูกสูบจะไม่เคลื่อนที่ ส่วนโมเลกุลอากาศที่บริเวณปากหลอดจะสั่นออกจากตำแหน่งเดิมมากที่สุด นั่นคือมีการกระจัดสูงสุดเท่ากับแอมพลิจูดของคลื่นเสียงที่ได้ยิน ฉะนั้นเมื่อเขียนกราฟระหว่างระยะทางที่โมเลกุลอากาศขยับออกจากตำแหน่งเดิมกับตำแหน่งของโมเลกุลอากาศภายในหลอดจะเป็นดังรูป 12.21 และจากการทดลอง 12.4



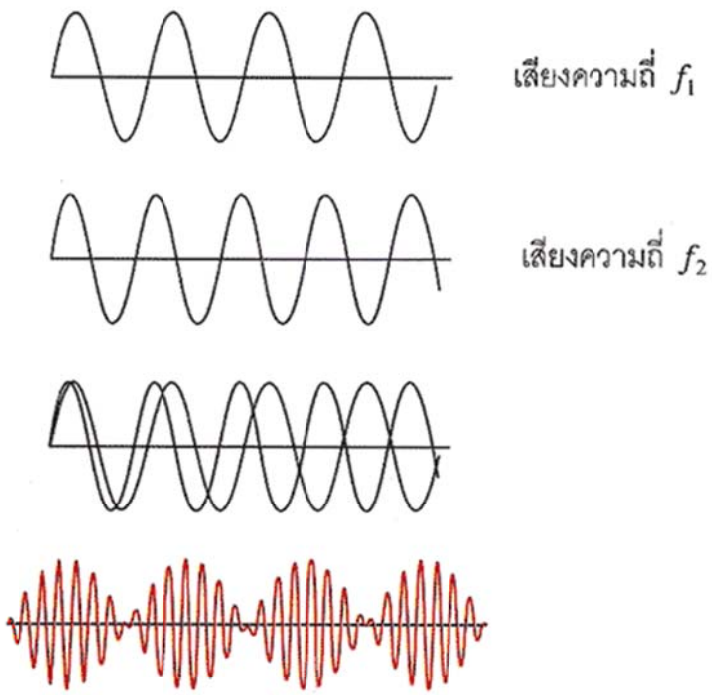
รูปที่ 12.21 กราฟการกระจัดกับตำแหน่งของหลอดเรโซแนนซ์ขณะเกิดการสั่นพ้องของเสียง

- เครื่องดนตรีประเภทเครื่องสาย เช่น กีตาร์ ไวโอลิน ขิม หรือซออู้ นอกจากจะมีสายสำหรับทำให้เกิดเสียงแล้ว ยังมีกล่องเสียงด้วย กล่องเสียงมีประโยชน์อย่างไร
- นักเรียนคิดว่า ลำอากาศที่อยู่ในเครื่องดนตรีประเภทเป่า เช่น ขลุ่ย ทรัมเปต แซกโซโฟน มีผลต่อความดังของเสียงที่เกิดจากเครื่องดนตรีหรือไม่ อย่างไร
- ถ้าต้องการหาความถี่ของเสียงจากแหล่งกำเนิดเสียง โดยใช้ปรากฏการณ์การสั่นพ้องของเสียง จะมีวิธีการทดลองอย่างไร
- ขณะเกิดการสั่นพ้อง ความดันของอากาศ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของหลอดเรโซแนนซ์เป็นอย่างไร เมื่อเทียบกับความดันปกติ
- ลำโพงตัวหนึ่งให้เสียงในช่วงความถี่ 40-10,000 เฮิรตซ์ และความถี่ที่ทำให้ลำโพงนี้เกิดการสั่นพ้อง คือ 40 เฮิรตซ์ ควรต่อลำโพงนี้กับเครื่องกำเนิดสัญญาณเสียงความถี่ 40 เฮิรตซ์หรือไม่ เพราะเหตุใด

12.6 บีตส์และคลื่นนิ่งของเสียง

เราทราบแล้วว่า คลื่นเสียงจากแหล่งกำเนิดเสียงสองแหล่งที่มีความถี่เท่ากัน เมื่อเคลื่อนที่มาพบกันจะซ้อนทับและแสดงปรากฏการณ์แทรกสอด ถ้าคลื่นเสียงจากแหล่งกำเนิดสองแหล่งที่มีความถี่ต่างกันเคลื่อนที่มาพบกันเสียงที่ได้ยินจะเป็นอย่างไร

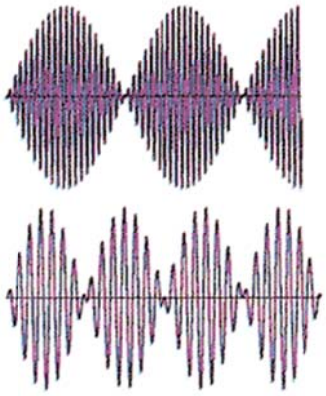
เสียงที่ได้ยินจากแหล่งกำเนิดเสียงแหล่งเดียว จะเป็นเสียงดังสม่ำเสมอต่อเนื่องกัน ส่วนเสียงที่ได้ยินจากแหล่งกำเนิดเสียงสองแหล่งที่มีความถี่ต่างกันเล็กน้อยจะเป็นเสียงที่ดังและค่อยสลับกันเป็นจังหวะคงตัว ซึ่งเรียกว่า **บีตส์ของเสียง** บีตส์เกิดจากการซ้อนทับระหว่างคลื่นเสียงจากแหล่งกำเนิด 2 แหล่งที่มีความถี่ไม่เท่ากัน ดังการทดลอง 12.5 ถ้าความถี่ของเสียงจากแหล่งกำเนิดทั้งสองต่างกันเล็กน้อย เสียงบีตส์ที่ได้ยินจะเป็นจังหวะช้าๆ แต่ถ้าความถี่ของเสียงจากแหล่งกำเนิด ทั้งสองต่างกันมาก เสียงบีตส์ที่ได้ยินจะเป็นจังหวะเร็วขึ้น โดยปกติหูเราจะสามารถจำแนก เสียงบีตส์ที่ได้ยินเป็นจังหวะที่มีความถี่ไม่เกิน 7 เฮิรตซ์



รูป 12.22 การซ้อนทับระหว่างคลื่นจากแหล่งกำเนิด 2 แหล่ง เป็นผลให้เกิดบีตส์ของเสียง

คลื่นเสียงจากแหล่งกำเนิด 2 แหล่งที่มีความถี่ f_1 และ f_2 ซึ่งต่างกันไม่เกิน 7 เฮิรตซ์ เมื่อมาซ้อนทับกันจะทำให้เกิดบีตส์ที่มีเสียงดังและค่อยสลับกันเป็นจังหวะคงตัว **ความถี่บีตส์** จะเท่ากับ **จำนวนครั้งของเสียงดังที่ได้ยินในหนึ่งวินาที** ซึ่งจะหาได้จากผลต่างของความถี่ของคลื่นเสียงทั้งสอง

$$\text{ความถี่บีตส์} = \Delta f = |f_2 - f_1| \qquad (12.6)$$



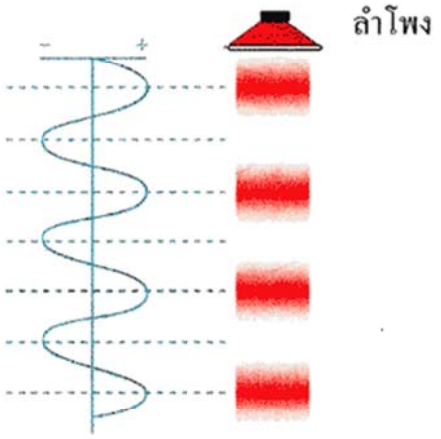
รูป 12.23 ผลการซ้อนทับระหว่างคลื่นจากแหล่งกำเนิด 2 แหล่งที่ทำให้เกิดบีตส์ความถี่ต่างๆ กัน

บีตส์ไม่จำเป็นต้องเกิดจากแหล่งกำเนิดเสียงประเภทเดียวกันเท่านั้น แต่อาจเกิดจากแหล่งกำเนิดเสียงคนละประเภทก็ได้ ในชีวิตประจำวันที่อาจพบเห็นได้แก่ การปรับเสียงของเครื่องดนตรีชนิดต่างๆ เช่น ไวโอลิน โดยเทียบกับเสียงจากหลอดเทียบเสียงที่มีความถี่มาตรฐาน และทำให้เสียงจากสายไวโอลินดังพร้อมๆ กับเสียงจากหลอดเทียบเสียงมาตรฐาน ขณะที่ความถี่ของเสียงไวโอลินยังไม่เท่ากับความถี่ของเสียงจากหลอดเทียบเสียงมาตรฐาน เราจะได้ยินเสียงบีตส์จนกระทั่งเมื่อปรับความตึงของสายไวโอลินได้พอเหมาะ คือให้การสั่นของสายไวโอลินมีความถี่เท่ากับความถี่ของหลอดเทียบเสียงมาตรฐาน เสียงบีตส์ที่ได้ยินก็จะหายไป

รูป 12.24 แสดงการปรับสายกับหลอดเทียบเสียง

- ☐ ถ้านักเรียนมีแห่งกำเนิดเสียง ที่สามารถปรับค่าความถี่ได้ตั้งแต่ 20-20,000 เฮิรตซ์ เมื่อต้องการทราบความถี่ของขลุ่ยเลาหนึ่ง นักเรียนจะมีวิธีการหาอย่างไร
- ☐ นักเรียนจะตั้งความตึงของสายกีตาร์ตัวหนึ่งอย่างไร จึงจะให้เสียงที่ได้มีความถี่เท่ากับความถี่เสียงจากกีตาร์อีกตัวหนึ่ง

จากการศึกษาคลื่นนิ่งของคลื่นน้ำและคลื่นนิ่งในเส้นเชือก เราทราบแล้วว่าคลื่นนิ่งเป็นปรากฏการณ์การแทรกสอดที่เกิดจากการซ้อนทับระหว่างคลื่นสองคลื่นที่เคลื่อนที่สวนทางกัน โดยที่คลื่นทั้งสองมีความถี่ ความยาวคลื่นและแอมพลิจูดเท่ากัน สำหรับกรณีคลื่นเสียงก็จะแสดงปรากฏการณ์คลื่นนิ่งได้หรือไม่



รูป 12.25 แสดงคลื่นนิ่งของเสียง

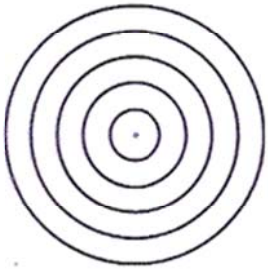
เมื่อเสียงจากลำโพงเคลื่อนที่ไปกระทบพื้นโต๊ะจะสะท้อน และเสียงที่สะท้อนจากพื้นโต๊ะนี้จะซ้อนทับกับเสียงที่ออกจากลำโพงโดยตรง ทำให้เกิดปรากฏการณ์การแทรกสอดที่มีลักษณะเป็นคลื่นนิ่งได้โดยเราจะได้ยินเสียงดังและค่อยสลับกัน เมื่อได้ยินเสียง ณ ตำแหน่งต่างๆ ระหว่างลำโพงกับพื้นโต๊ะ ตำแหน่งที่ได้ยินเสียงดัง แสดงว่า มีการแทรกสอดแบบเสริมและตำแหน่งนั้นจะเป็น **ปฏิบัพของความดัน** ส่วนตำแหน่งที่ได้ยินเสียงค่อย แสดงว่ามีการแทรกสอดแบบหักล้างและตำแหน่งนั้นจะเป็น **บัพของความดัน** สามารถรับฟังได้จากกิจกรรม 12.2 ท้ายบท

- ☐ ขณะที่เกิดคลื่นนิ่งของเสียง ระยะระหว่างบัพของความดันคู่หนึ่งที่อยู่ถัดกันมีค่าเท่าไร เมื่อเทียบกับความยาวคลื่นของคลื่นเสียง

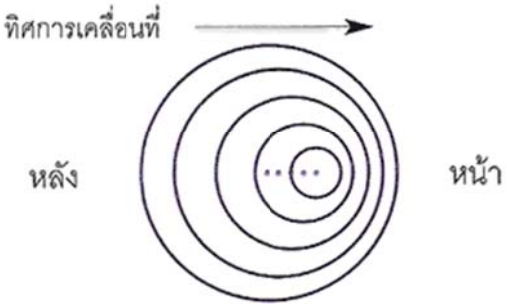
- ☐ วางลำโพงใกล้กำแพง ขณะที่ลำโพงให้เสียงออกมาอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอ ผู้ได้ยินเสียงที่เดินในแนวระหว่างลำโพงกับกำแพงจะได้ยินเสียงที่มีความดังไม่สม่ำเสมอปรากฏการณ์นี้เกิดจากสมบัติใดของเสียง

12.7 ปรากฏการณ์ดอปเพลอร์และคลื่นกระแทก

ถ้าเราใช้ปลายดินสอแตะผิวน้ำในถาดคลื่นด้วยจังหวะสม่ำเสมอ ณ ตำแหน่งเดิม จะสังเกตเห็นหน้าคลื่นมีลักษณะดังรูป 12.26 ก. ความยาวคลื่นทางด้านซ้ายมือและด้านขวามือของจุดกำเนิดมีค่าเท่ากัน แสดงว่าความถี่ของคลื่นที่เคลื่อนที่ออกไปทางด้านซ้ายมือและทางด้านขวามือมีค่าเท่ากัน



รูป 12.26 ก. จุดกำเนิดคลื่นอยู่นิ่ง



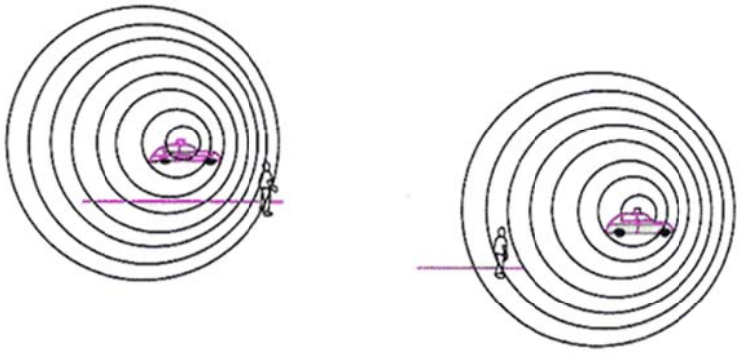
รูป 12.26 ข. ลักษณะของหน้าคลื่น
เมื่อจุดกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่

ถ้าเราใช้ปลายดินสอแตะผิวน้ำด้วยจังหวะคงตัวเท่าเดิมและเคลื่อนที่ปลายดินสอไปทางขวามือด้วยอัตราเร็วคงตัวจะสังเกตเห็นหน้าคลื่นมีลักษณะดังรูป 12.26 ข. ซึ่งจะเห็นว่าความยาวคลื่นทางด้านขวามือ หรือด้านที่แหล่งกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่ไปหาจะสั้นกว่าเดิม และความยาวคลื่นทางด้านซ้ายมือหรือด้านที่แหล่งกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่ออกห่างจะยาวกว่าเดิม แสดงว่าความถี่ของคลื่นน้ำที่อยู่ด้านหน้าและด้านหลังปลายดินสอแตกต่างกัน

☐ เมื่อแหล่งกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่ ความถี่ของคลื่นในแนวการเคลื่อนที่ซึ่งอยู่ด้านหน้าและด้านหลังแหล่งกำเนิดคลื่นแตกต่างกับความถี่ของแหล่งกำเนิดคลื่นตามปกติหรือไม่อย่างไร

สำหรับคลื่นเสียงก็เช่นเดียวกัน ขณะที่แหล่งกำเนิดเสียงเคลื่อนที่ ความยาวคลื่นของคลื่นเสียงที่อยู่ด้านหน้าแหล่งกำเนิดเสียงจะสั้นกว่าความยาวคลื่นของเสียงเมื่อแหล่งกำเนิดเสียงอยู่กับที่ จึงทำให้ผู้รับฟังเสียงที่อยู่ด้านหน้าแหล่งกำเนิดเสียงได้ยินเสียงที่มีความถี่สูงกว่าความถี่ของแหล่งกำเนิด ในขณะเดียวกันความยาวคลื่นของคลื่นเสียงที่อยู่ด้านหลังแหล่งกำเนิดเสียงจะมีค่ามากกว่าความยาวคลื่นของเสียงของแหล่งกำเนิดเสียงอยู่กับที่ จึงเป็นผลทำให้ได้ยินเสียงที่อยู่ด้านหลังแหล่งกำเนิดเสียงว่ามีความถี่ต่ำกว่าความถี่ของแหล่งกำเนิด **ปรากฏการณ์ที่ผู้ฟังได้ยินเสียงว่ามีความถี่เปลี่ยนไปจากความถี่จริงของแหล่งกำเนิดเพราะแหล่งกำเนิดเสียงเคลื่อนที่** เรียกว่า ***ปรากฏการณ์ดอปเพลอร์***

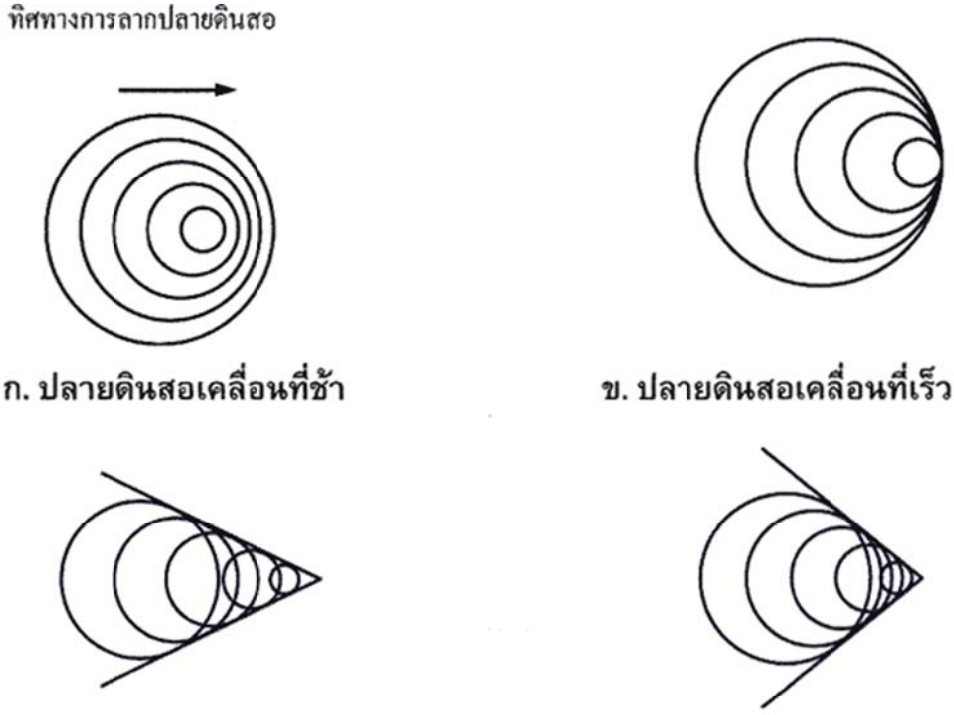
☐ เพราะเหตุใดผู้ฟังจึงได้ยินความถี่เสียงแตกต่างจากความถี่ของแหล่งกำเนิด เมื่อแหล่งกำเนิดเสียงเคลื่อนที่เข้าหาหรือออกห่างจากผู้ฟังที่อยู่กับที่



รูป 12.27 การเกิดปรากฏการณ์ดอปเพลอร์

ถ้าแหล่งกำเนิดเสียงอยู่นิ่ง แต่ผู้ฟังเคลื่อนที่เข้าหาหรือออกห่างจากแหล่งกำเนิดเสียง ผู้ฟังจะได้ยินเสียงที่มีความถี่แตกต่างจากความถี่ของแหล่งกำเนิดเช่นกัน โดยผู้ฟังจะได้ยินเสียงที่มีความถี่สูงขึ้นเมื่อผู้ฟังเคลื่อนที่เข้าหาแหล่งกำเนิด และผู้ฟังจะได้ยินเสียงความถี่ต่ำลงเมื่อผู้ฟังเคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิด นั่นคือ ถึงแม้แหล่งกำเนิดเสียงจะอยู่นิ่ง แต่ผู้ฟังมีการเคลื่อนที่ ก็จะเกิดปรากฏการณ์ดอปเพลอร์เช่นกัน

ถ้านักเรียนใช้ปลายดินสอจุ่มที่ผิวน้ำในถาดคลื่นด้วยจังหวะสม่ำเสมอ และเคลื่อนปลายดินสอด้วยอัตราเร็วคงตัวที่มีค่าต่างๆ กัน จะสังเกตเห็นหน้าคลื่นน้ำมีลักษณะดังรูป 12.28 ก.-ง.



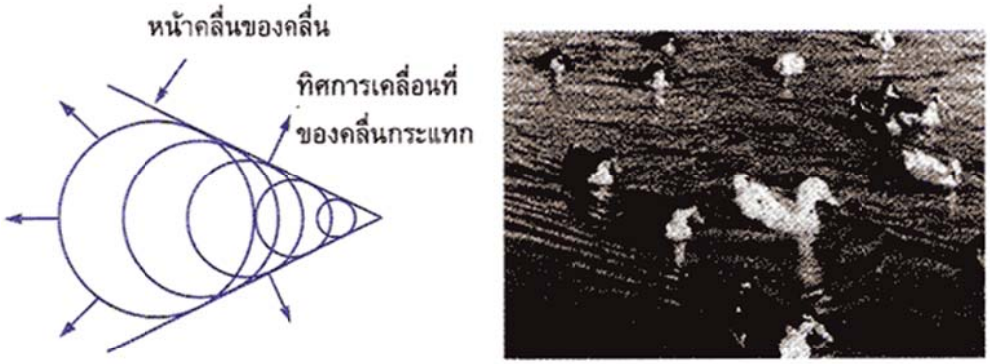
ก. ปลายดินสอเคลื่อนที่ช้า **ข. ปลายดินสอเคลื่อนที่เร็ว**

ค. ปลายดินสอเคลื่อนที่เร็วขึ้น **ง. ปลายดินสอเคลื่อนที่เร็วมาก**

รูป 12.28 ลักษณะหน้าคลื่นน้ำเมื่อปลายดินสอซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วต่างๆ

- ☐ อัตราเร็วของแหล่งกำเนิดคลื่นเป็นอย่างไร เมื่อเทียบกับอัตราเร็วของคลื่นในรูป ก. ข. ค. และ ง.
- ☐ ลักษณะของหน้าคลื่นจะเป็นอย่างไร เมื่ออัตราเร็วของแหล่งกำเนิดคลื่นสูงขึ้นๆ

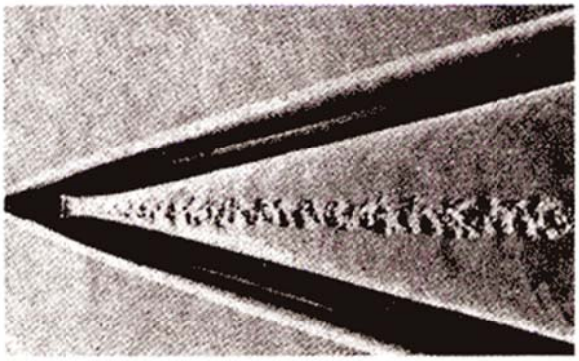
เมื่อแหล่งกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่ในตัวกลาง ถ้าอัตราเร็วของแหล่งกำเนิดคลื่นเพิ่มขึ้น หน้าคลื่นที่อยู่ทางด้านหน้าแหล่งกำเนิดคลื่นจะถูกอัดกันและอยู่ใกล้กันมากขึ้น จนกระทั่งเมื่ออัตราเร็วของแหล่งกำเนิดคลื่นเท่ากับอัตราเร็วของคลื่นในตัวกลาง หน้าคลื่นทุกๆ หน้าคลื่นที่ออกจากแหล่งกำเนิดจะเคลื่อนที่ไปพร้อม ๆ กันกับแหล่งกำเนิดคลื่น ดังรูป 12.28 ข. ถ้าอัตราเร็วของแหล่งกำเนิดสูงกว่าอัตราเร็วคลื่นในตัวกลางแหล่งกำเนิดคลื่นจะเคลื่อนที่ผ่านพ้นหน้าคลื่นทุกๆหน้าคลื่นอัดตัวกันออกไป และหลังจากนั้น หน้าคลื่นจะอัดตัวกันในลักษณะที่เป็นหน้าคลื่นวงกลมซ้อนเรียงกันไปตามแนวการเคลื่อนที่ของแหล่งกำเนิด โดยมีแนวหน้าคลื่นที่อัดตัวกันมีลักษณะเป็นรูปมุมแหลม เรียกว่าหน้าคลื่นของ***คลื่นกระแทก*** ดังรูป 12.29 โดยพลังงานที่แต่ละหน้าคลื่นพาไปจะเสริมกันบนหน้าคลื่นกระแทก



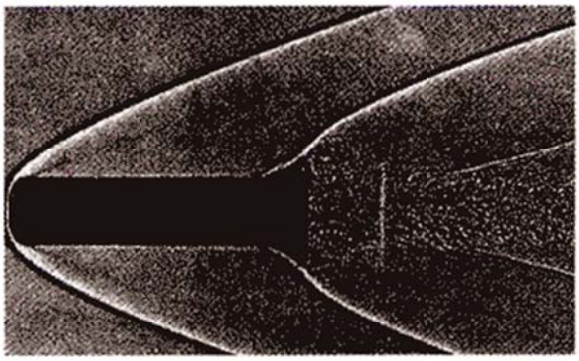
ก. หน้าคลื่นของคลื่นกระแทก **ข. คลื่นกระแทกที่เกิดจากเป็ดว่ายน้ำ**

รูป 12.29 คลื่นกระแทกใน 2 มิติ

ในกรณีที่แหล่งกำเนิดคลื่นทำให้เกิดคลื่นรูปทรงกลมและแหล่งกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วสูงกว่าอัตราเร็วของคลื่นในตัวกลาง จะทำให้เกิดคลื่นกระแทกเช่นเดียวกัน โดยแนวหน้าคลื่นของคลื่นกระแทกเป็นผิวของรูปกรวย ดังรูป 12.30 แหล่งกำเนิดคลื่นยิ่งเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วสูงขึ้น มุมของรูปกรวยจะยิ่งเล็กลงๆ และพลังงานของคลื่นกระแทกยิ่งสูงเพราะหน้าคลื่นที่อัดตัวกันมีจำนวนมากขึ้น



ก. รูปจำลองคลื่นกระแทกที่เกิดจากเครื่องบินที่บินด้วยอัตราเร็วเหนือเสียง



ข. รูปจำลองคลื่นกระแทกที่เกิดจากกระสุนปืน

รูป 12.30 คลื่นกระแทกจากแหล่งกำเนิดที่ให้คลื่นทรงกลม

ในกรณีเครื่องบินที่บินในอากาศ เมื่ออัตราเร็วของเครื่องบินสูงขึ้นๆ จนกระทั่งเท่ากับอัตราเร็วของเสียงในอากาศ หน้าคลื่นเสียงจากเครื่องบินทุกคลื่นจะอัดอยู่ที่บริเวณหัวเครื่องบิน ดังรูป 12.31

รูป12.31 หน้าคลื่นเสียงเมื่อเครื่องบินเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วเท่ากับอัตราเร็วเสียง

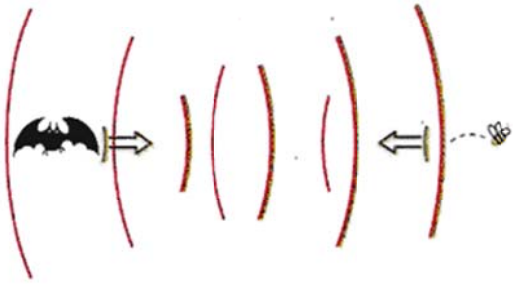
ถ้าอัตราเร็วของเครื่องบินสูงกว่าอัตราเร็วเสียงในอากาศ จะเกิดคลื่นกระแทกของเสียง โดยหน้าคลื่นกระแทกจะเป็นรูปกรวย ถ้าอัตราเร็วของเครื่องบินยิ่งสูงขึ้นๆ มุมกรวยจะยิ่งเล็กลงๆ และคลื่นกระแทกนี้ จะทำให้ความดันเปลี่ยนแปลงมากและรวดเร็ว เป็นผลให้เกิดเสียงดังคล้ายระเบิดในบริเวณที่คลื่นกระแทกนี้เคลื่อนที่ผ่านซึ่งอาจทำให้กระจกหน้าต่างแตกร้าวได้ เสียงที่เกิดขึ้นนี้ เรียกว่า ***ซอนิกบูม***

โดยทั่วไป คลื่นกระแทกจะเกิดจากความดันที่เปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรงและฉับพลัน เช่น จากลูกระเบิด หรือฟ้าผ่า ทำให้อากาศในบริเวณที่มีการระเบิดมีความร้อนสูงและอากาศขยายตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดคลื่นกระแทก ถ้าคลื่นกระแทกมีพลังงานสูงมากพอ ก็อาจทำให้อาคารบ้านเรือนพังทลาย และเยื่อแก้วหูของผู้ได้ยินเป็นอันตรายถึงฉีกขาดได้

☐ คลื่นกระแทกเป็นมลภาวะของเสียงหรือไม่ เพราะเหตุใด

12.8 การประยุกต์ความรู้เรื่องเสียง

นักวิทยาศาสตร์ได้ศึกษาการบินและการหาอาหารของค้างคาวบางชนิด พบว่าค้างคาวส่วนใหญ่สามารถบินหรือหาอาหารในเวลากลางคืนได้ โดยค้างคาวจะส่งคลื่นเหนือเสียงออกไปเป็นจังหวะๆ เมื่อคลื่นเหนือเสียงที่ส่งออกไปกระทบมันจึงสามารถสิ่งกีดขวางก็จะสะท้อนกลับมายังหูของค้างคาว ทำให้ค้างคาวสามารถรู้ตำแหน่งและลักษณะของสิ่งกีดขวางมันจึงสามารถบินไปไหนมาไหนได้โดยไม่ชนสิ่งกีดขวางเลย และค้างคาวยังใช้วิธีการเดียวกันนี้ในการตรวจสอบตำแหน่งของสิ่งที่เป็นอาหารได้ด้วย



รูป 12.32 การหาอาหารของค้างคาว

การศึกษาธรรมชาติและสมบัติของเสียงได้ช่วยให้ นักวิทยาศาสตร์นำเอาความรู้ต่างๆ มาประยุกต์ในด้านต่างๆ ดังตัวอย่างต่อไปนี้

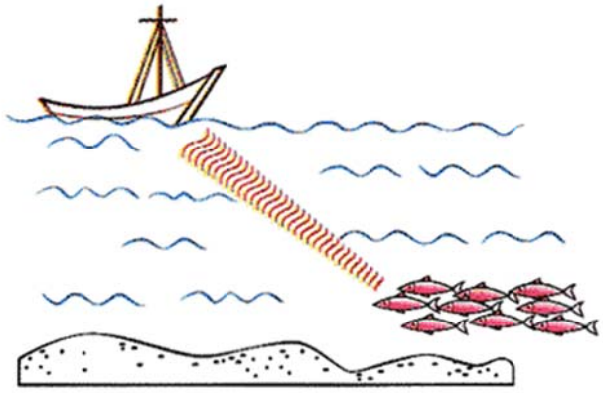
12.8.1 ด้านสถาปัตยกรรม

ดังที่กล่าวมาแล้วในเรื่องการสะท้อนของเสียงว่า เสียงสะท้อนจากผนัง พื้น เพดาน ทำให้เกิดเสียงก้อง ดังเช่นการร้องเพลงในห้องน้ำที่ผนังและพื้นมีกระเบื้องปู จะมีเสียงก้องจึงเหมาะกับการร้องเพลง เพราะทำให้ผู้ร้องเกิดความรู้สึกว่าการร้องเพลงในห้องน้ำเพราะกว่าการร้องในห้องธรรมดา ดังนั้นห้องสำหรับฟังเพลงหรือร้องเพลงต้องมีการให้เสียงก้องเกิดขึ้นมากกว่าห้องทั่วไป แต่ก็ต้องมีค่าพอเหมาะสมไม่มากเกินไปจนฟังเพลงไม่รู้เรื่อง หรือเกิดความรำคาญ การออกแบบอาคาร ห้องประชุม ทั้งสถาปนิกและวิศวกรก็ต้องคำนวณล่วงหน้าว่าให้มีเสียงก้องมากหรือน้อยเพียงใด โดยการใช้วัสดุเก็บเสียงเช่นพรม ม่าน แผ่นกระดาษเก็บเสียง ฯลฯ เพื่อช่วยทำให้เวลาที่เกิดเสียงก้องพอเหมาะก่อนที่เสียงก้องจะจางหายไป

ปัจจุบันสถาปนิกมีปัญหาน้อยลง เพราะสามารถออกแบบให้ห้องมีเสียงก้องน้อยที่สุดเพื่อใช้ในการประชุม และเมื่อใดที่ต้องใช้ห้องเดิมในการแสดงดนตรีก็สามารถใช้เครื่องขยายเสียงที่มีวงจรสำหรับสร้างเสียงก้องขึ้นมา ทำให้เสียงเพลง และเสียงดนตรีมีความไพเราะอย่างที่ควรจะเป็นคือมีเวลาก้องเสียงพอสมควร

12.8.2 ด้านการประมง

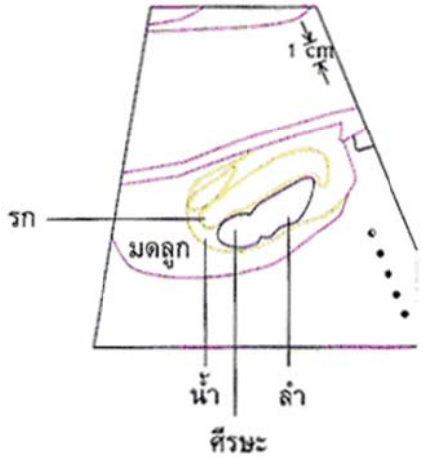
ชาวประมงใช้เครื่อง***โซนาร์*** ในการหาตำแหน่งของฝูงปลาเช่นเดียวกับค้างคาวใช้โซนาร์ในการหาอาหาร โดยเครื่องโซนาร์ของเรือประมงจะส่งคลื่นเหนือเสียงออกไปเป็นจังหวะๆ เมื่อคลื่นเสียงดังกล่าวกระทบฝูงปลา คลื่นเสียงจะสะท้อนกลับมายังเรือ และสัญญาณเสียงที่ได้รับนี้จะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้าผ่านเข้าเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ ซึ่งจะบอกช่วงเวลาระหว่างสัญญาณเสียงที่ส่งออกไปกับสัญญาณเสียงสะท้อนที่กลับมายังเรือและเมื่อแปลงช่วงเวลานี้เป็นระยะห่างของวัตถุที่สะท้อนผลออกมาทางจอภาพ จะทำให้สามารถทราบตำแหน่งของฝูงปลา นอกจากนี้ชาวประมงยังใช้คลื่นเหนือเสียงสื่อสารระหว่างเรือประมงด้วยกันอีกด้วย โดยทั่วๆ ไปเครื่องโซนาร์จะใช้คลื่นเหนือเสียงที่มีความถี่ในช่วง 20-100 กิโลเฮิรตซ์



12.8.3 ด้านการแพทย์

แพทย์ก็ได้มีการนำคลื่นเหนือเสียงมาใช้ในการตรวจอวัยวะภายในของคนไข้เพื่อวินิจฉัยสาเหตุของความผิดปกติ เช่น ตรวจการทำงานของลิ้นหัวใจ ตรวจมดลูก ตรวจครรภ์ ตรวจเนื้องอก ตับ ม้าม และสมอง เพราะคลื่นเหนือเสียงสามารถสะท้อนที่รอยต่อระหว่างชั้นของเนื้อเยื่อต่างๆ ได้ดีกว่ารังสีเอกซ์มาก คลื่นเหนือเสียงที่ใช้ในทางการแพทย์นี้ได้จากการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้ามาเป็นพลังงานของคลื่นเหนือเสียงด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งมีความถี่ในช่วง 1-10 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อคลื่นเสียงดังกล่าวผ่านผิวหนังเข้าในร่างกาย ไปกระทบเนื้อเยื่อที่มีความหนาแน่นต่างกันซึ่งสะท้อนคลื่นได้ดีต่างกัน เครื่องรับคลื่นสะท้อนจะเปลี่ยนคลื่นเสียงสะท้อนเป็นสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งเมื่อผ่านเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแล้วจะถูกส่งไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลคลื่นสะท้อนที่มาจากทิศต่างๆ เข้าด้วยกัน แล้วสรุปผลที่ได้ออกมาเป็นภาพ

ก. ภาพถ่ายจากจอภาพของเครื่องอัลทราซาวด์ แสดงทารกในครรภ์ที่มีอายุประมาณ 9 สัปดาห์

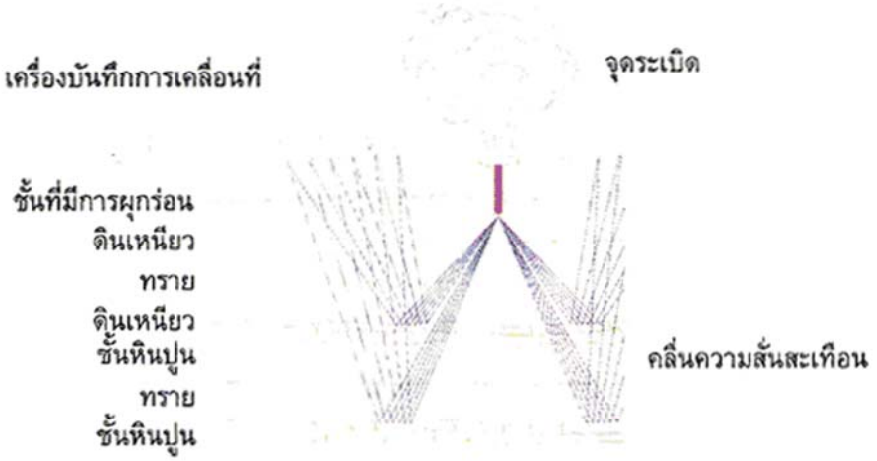


ข. แสดงอวัยวะต่าง ๆ ในครรภ์มารดา และทารกในครรภ์

รูป 12.34 การตรวจครรภ์โดยใช้คลื่นเหนือเสียง

12.8.4 ด้านธรณีวิทยา

ในการสำรวจแหล่งแร่ด้วยการวิเคราะห์ชั้นหินต่างๆ นักธรณีวิทยาใช้วิธีการส่งคลื่นเสียงที่มีพลังงานสูงซึ่งได้จากการระเบิดของลูกระเบิดขนาดเล็กที่บริเวณผิวโลก คลื่นเสียงที่เกิดจากการระเบิดนี้จะทะลุผ่านชั้นต่างๆ ของเปลือกโลกลงไป เพราะเปลือกโลกประกอบด้วยชั้นหินที่มีลักษณะและความหนาแน่นแตกต่างกัน ทำให้คลื่นสะท้อนที่แต่ละชั้นของเปลือกโลกมีลักษณะแตกต่างกัน คลื่นเสียงสะท้อนนี้เมื่อกลับถึงผิวโลกจะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้าเข้าสู่อุปกรณ์เพื่อวิเคราะห์ต่อไป และผลที่ได้จะถูกนำมาเป็นข้อมูลหนึ่งของลักษณะชั้นหินต่างๆ ใต้ผิวโลก



รูป 12.35 การสำรวจชั้นหินโดยใช้คลื่นเสียง

12.8.5 ด้านวิศวกรรมและอุตสาหกรรม

วิศวกรใช้คลื่นเหนือเสียงในการตรวจสอบรอยร้าวหรือรอยตำหนิในเนื้อโลหะ แก้ว หรือเซรามิก โดยการส่งคลื่นเสียงที่มีความถี่ในช่วง 500 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 15 เมกะเฮิรตซ์ ผ่านเข้าไปในชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบ แล้ววิเคราะห์ลักษณะของคลื่นสะท้อน หรือวิเคราะห์ลักษณะคลื่นที่ถูกรบกวนในคลื่นที่ผ่านออกไป วิธีนี้นอกจากจะใช้ตรวจสอบชิ้นงานประเภทโลหะหล่อหรือเซรามิกแล้วยังถูกนำไปใช้ตรวจสอบยางรถยนต์ที่ผลิตใหม่ด้วย เครื่องมือวัดความหนาของแผ่นโลหะหรือวัสดุที่มีความแข็งอื่นๆ สามารถทำได้โดยใช้คลื่นเหนือเสียง แม้คลื่นจะไม่สามารถทะลุถึงอีกด้านหนึ่งของผิวหน้าแผ่นโลหะนั้นได้ก็ตาม เช่น การตรวจสอบความหนาของหม้อต้มน้ำความดันสูงสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมเป็นต้น

คลื่นเหนือเสียงพลังงานสูงยังถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวางในการทำความสะอาดผิวของเครื่องใช้ขนาดเล็ก เช่น ชิ้นส่วนในนาฬิกาข้อมือและแว่นตา เป็นต้น เพื่อให้อนุภาคสกปรกที่จับเกาะผิวสั่นด้วยพลังงานของคลื่นเหนือเสียง เพราะความถี่ธรรมชาติของอนุภาคสกปรกตามปกติไม่เท่ากับความถี่ธรรมชาติของชิ้นส่วนโลหะ คลื่นจึงทำให้อนุภาคสกปรกเหล่านั้นหลุดจากผิวโลหะไปลอยปะปนไปในของเหลวที่โลหะแช่อยู่

ในการทหารก็มีการใช้คลื่นเหนือเสียงติดต่อสื่อสาร และตรวจจับการเคลื่อนไหวของเรือใต้น้ำ และตอร์ปิโด และใช้คลื่นเสียงจับตำแหน่งของเป้าเป็นต้น

การศึกษาการสะท้อนของคลื่น ทำให้พบว่า การสะท้อนของคลื่นจะเกิดขึ้นเมื่อวัตถุหรือสิ่งกีดขวางมีขนาดพอๆหรือใหญ่กว่าความยาวคลื่นที่ตกกระทบ และเรายังทราบอีกว่าเสียงที่มีความถี่สูงจะมีความยาวคลื่นสั้น นักวิทยาศาสตร์จึงได้นำความรู้นี้มาประยุกต์กับการเดินเรือโดยสร้างอุปกรณ์ที่เรียกว่า **โซนาร์** ซึ่งจะส่งคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงสม่ำเสมอจากใต้ท้องเรือหรือด้านหัวเรือผ่านน้ำทะเลออกไป คลื่นเสียงดังกล่าวนี้ จะเคลื่อนที่ไปในน้ำ เมื่อกระทบสิ่งกีดขวาง เช่น หินโสโครก ฝูงปลา หรือเรือใต้น้ำที่ขวางอยู่ ถ้าสิ่งกีดขวางนั้นมีขนาดใหญ่กว่าหรือเท่ากับความยาวคลื่นเสียง จะเกิดเสียงการสะท้อนกลับมายังเครื่องรับบนเรือที่ส่งคลื่นออกไป การจับช่วงเวลาที่ส่งคลื่นเสียงออกไปและรับคลื่นสะท้อนกลับมาช่วยให้เราคำนวณหาระยะทางระหว่างตำแหน่งของเรือกับสิ่งกีดขวางได้

- ☐ เหตุใดเครื่องโซนาร์จึงต้องส่งคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงออกไป
- ☐ ใช้เครื่องโซนาร์วัดความลึกของทะเลและมหาสมุทรได้อย่างไร

ตัวอย่าง 12.2 ในการสำรวจความลึกของทะเลแห่งหนึ่ง ผู้สำรวจจับเวลาที่เสียงเคลื่อนที่ออกเดินทางจนกระทั่งสะท้อนกลับมายังเครื่องรับได้ 1.2 วินาที เท่ากับทะเล ณ บริเวณนั้นลึกเท่าใด กำหนดให้อัตราเร็วของเสียงในน้ำทะเลเท่ากับ 1,531 เมตร / วินาที

วิธีทำ ช่วงเวลาที่เสียงเริ่มเคลื่อนที่จนกระทั่งสะท้อนกลับเท่ากับ 1.2 วินาที

ดังนั้นช่วงเวลาที่เสียงเดินทางจากเรือไปกระทบกับพื้นใต้ทะเลเท่ากับ 0.6 วินาที

จากความสัมพันธ์

$$s = vt$$
$$= (1{,}531\ \text{m/s}) \times (0.6\ \text{s})$$
$$= 918.6\ \text{m}$$

คำตอบ ทะเล ณ บริเวณนั้นลึก 918.6 เมตร

ตัวอย่าง 12.3 ถ้าเครื่องโซนาร์ส่งคลื่นเสียงที่มีความถี่ 5 กิโลเฮิรตซ์ จงหาขนาดของวัตถุใต้น้ำที่ไม่สามารถสะท้อนคลื่นเสียงนี้ได้ กำหนดให้อัตราเร็วของเสียงในน้ำทะเลเท่ากับ 1,531 เมตร / วินาที

วิธีทำ จากความสัมพันธ์

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

เพราะฉะนั้นคลื่นที่มีความถี่ 5 kHz จะมีความยาวคลื่น

$$= \frac{1531\ \text{m/s}}{5000\ \text{s}^{-1}}$$
$$= 0.306\ \text{m}$$

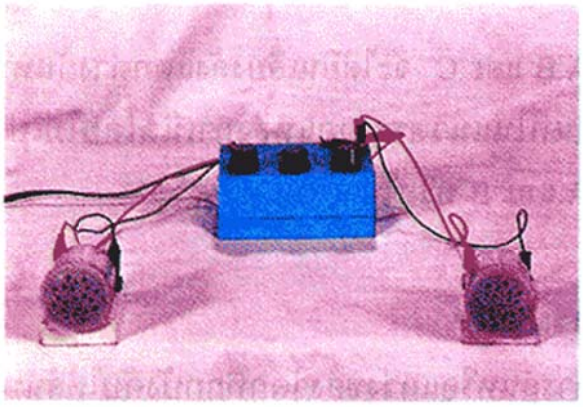
คำตอบ วัตถุใต้น้ำที่มีขนาดเล็กกว่า 0.306 เมตร จะไม่สะท้อนคลื่นเสียงจากเครื่องโซนาร์นี้

การทดลองและกิจกรรม

การทดลอง 12.1 เสียงกับการแทรกสอด

จุดประสงค์ เพื่อศึกษาสมบัติการแทรกสอดของเสียง

วิธีทำ ต่อเครื่องกำเนิดสัญญาณเสียงกับลำโพง 2 ตัว หมุนปุ่มเลือกความถี่ที่ 3 กิโลเฮิรตซ์ และหมุนปุ่มปรับความดังให้ได้ยินเสียงดังพอสมควร วางลำโพงที่ขอบโต๊ะ จัดหน้าลำโพงให้หันออกนอกโต๊ะ ดังรูป 12.36 แล้วฟังเสียงทางด้านหน้าลำโพง ณ ตำแหน่งต่างๆ ได้ยินในแนวขนานกับขอบโต๊ะ เปรียบเทียบความดังของเสียง ณ ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวที่ได้ยินเสียง



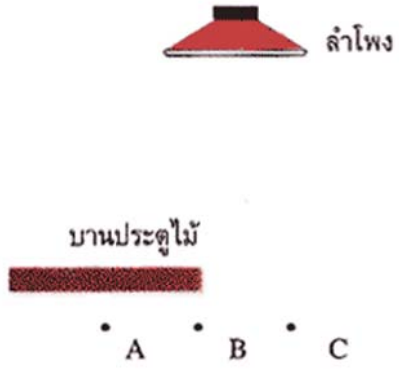
รูป 12.36 การติดตั้งอุปกรณ์พร้อมลำโพง 2 ตัว

- ☐ ความถี่ของเสียงจากลำโพงทั้งสองตัว แตกต่างกันหรือไม่ อย่างไร
- ☐ ความดังของเสียงที่ได้ยิน ณ ตำแหน่งต่างๆ เมื่อใช้ลำโพง 2 ตัว เป็นอย่างไร และจะอธิบายได้อย่างไร

การทดลอง 12.2 เสียงกับการเลี้ยวเบน

จุดประสงค์ เพื่อศึกษาสมบัติการเลี้ยวเบนของเสียง

วิธีทำ ต่อเครื่องกำเนิดสัญญาณเสียงกับลำโพง 1 ตัว หมุนปุ่มเลือกความถี่ไปที่ 1 กิโลเฮิรตซ์ และปรับความดังของเสียงให้ดังพอสมควร นำลำโพงไปวางที่ด้านหลังประตูห้องเรียนซึ่งเปิดอยู่ แล้วฟังเสียงที่อีกด้านหนึ่งของประตูนอกห้องเรียนที่บังลำโพงไว้ ณ ตำแหน่งต่างๆ ดังรูป 12.37

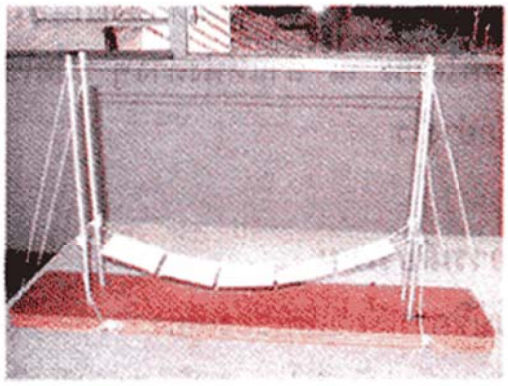


รูป 12.37 การติดตั้งอุปกรณ์และตำแหน่งการฟังเสียงด้านหลังสิ่งกีดขวาง

- ☐ ณ ตำแหน่ง A B และ C จะได้ยินเสียงดังแตกต่างกันหรือไม่ อย่างไร
- ☐ ถ้าเสียงเคลื่อนที่ในแนวตรงจากแหล่งกำเนิดโดยไม่เปลี่ยนทิศทางจะได้ยินเสียง ณ ตำแหน่ง A และ B หรือไม่

กิจกรรม 12.1 ความถี่ธรรมชาติ

จุดประสงค์ เพื่อศึกษาการสั่นหรือแกว่งของวัตถุที่ถูกบังคับให้สั่นหรือแกว่งด้วยแรงภายนอกที่มีความถี่ต่างๆ กัน



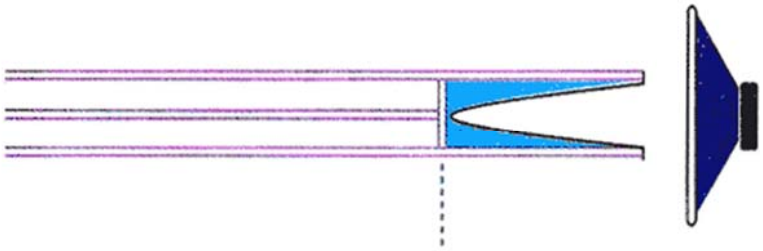
รูป 12.38 การจัดอุปกรณ์

วิธีทำ 1. ออกแรงกระตุ้นเพียงครั้งเดียวที่เชือกด้านหนึ่งของสะพานแขวนสาธิตสังเกตการสั่นหรือการแกว่ง จากนั้นออกแรงกระตุ้นด้วยความถี่ต่างๆ สังเกตการสั่นหรือการแกว่งของสะพานแขวน

การทดลอง 12.3 การสั่นพ้องของเสียง

จุดประสงค์ เพื่อศึกษาการสั่นพ้องของเสียงที่เกิดจากท่อปลายปิด

วิธีทำ ต่อลำโพงกับเครื่องกำเนิดสัญญาณเสียงแล้วปรับความถี่ของเสียงเป็น 1 กิโลเฮิรตซ์ พร้อมทั้งปรับความดังของเสียงให้พอเหมาะ นำลำโพงไปวางใกล้ปลายข้างหนึ่งของหลอดเรโซแนนซ์ ดังรูป 12.39 เลื่อนลูกสูบของหลอดเรโซแนนซ์มาใกล้ปากหลอดแล้วเลื่อนลูกสูบออกจากลำโพงช้าๆ เปรียบเทียบเสียงที่ได้ยินเมื่อลูกสูบอยู่ที่ตำแหน่งต่างๆ ทำการทดลองซ้ำ แต่เปลี่ยนความถี่ของเสียงเป็น 2 และ 3 กิโลเฮิรตซ์



รูป 12.39 การจัดอุปกรณ์เพื่อศึกษาการสั่นพ้องของเสียง

☐ ความดังของเสียงที่ได้ยินเมื่อเลื่อนลูกสูบไปอยู่ที่ตำแหน่งต่างๆ แตกต่างกันหรือไม่อย่างไร

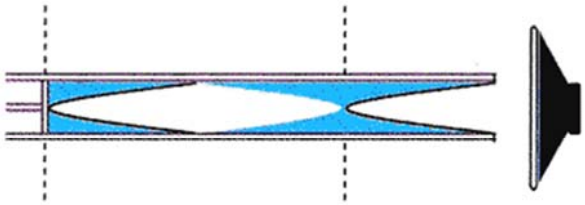
การทดลอง 12.4 การวัดความยาวคลื่นเสียง

จุดประสงค์ เพื่อศึกษาวิธีการวัดความยาวคลื่นเสียงในอากาศโดยอาศัยปรากฏการณ์การสั่นพ้องของเสียง

วิธีทำ

ตอนที่ 1 ใช้เทอร์มอมิเตอร์วัดอุณหภูมิของอากาศขณะนั้น คำนวณอัตราเร็วของเสียงในอากาศโดยใช้ความสัมพันธ์ $v_t = 331 + 0.6t$ นำอัตราเร็วของเสียงที่ได้มาคำนวณหาความยาวคลื่นเสียงในอากาศ เมื่อความถี่ของเสียงเท่ากับความถี่เสียงจากเครื่องกำเนิดสัญญาณเสียงคือ 1,000, 2,000 และ 3,000 เฮิรตซ์ บันทึกความยาวคลื่นเสียงเมื่อความถี่ของเสียงมีค่าต่างๆ กัน

ตอนที่ 2 ต่อสายไฟจากเครื่องกำเนิดสัญญาณเสียงเข้ากับลำโพง นำลำโพงไปวางใกล้ปลายข้างหนึ่งของหลอดเรโซแนนซ์ ดังรูป 12.40 หมุนปุ่มปรับความถี่ของเครื่องกำเนิดสัญญาณเสียงไปที่ 1 กิโลเฮิรตซ์ พร้อมทั้งปรับความดังให้เหมาะสม เลื่อนลูกสูบมาใกล้ปากหลอดเรโซแนนซ์ที่อยู่ใกล้กับลำโพง แล้วเลื่อนลูกสูบออกช้าๆ จนกระทั่งได้ยินเสียงดังเพิ่มมากที่สุด บันทึกตำแหน่ง x_1 ของลูกสูบ จากนั้นค่อยๆ เลื่อนลูกสูบออกไปอีก จนกระทั่งได้ยินเสียงดังเพิ่มมากที่สุดเป็นครั้งที่ 2 บันทึกตำแหน่ง x_2 ค่อยๆ เลื่อนลูกสูบออกไปอีกจนกระทั่งได้ยินเสียงดังเพิ่มมากที่สุดเป็นครั้งที่ 3, 4 ... บันทึกตำแหน่ง x_3, x_4 ... วัดระยะระหว่างตำแหน่งของลูกสูบที่ได้ยินเสียงดังที่สุดสองตำแหน่งที่อยู่ถัดกัน แล้วหาค่าเฉลี่ยของระยะดังกล่าวบันทึกผล และทำการทดลองซ้ำ โดยเปลี่ยนความถี่ของเครื่องกำเนิดสัญญาณเสียงเป็น 2 และ 3 กิโลเฮิรตซ์บันทึกผล



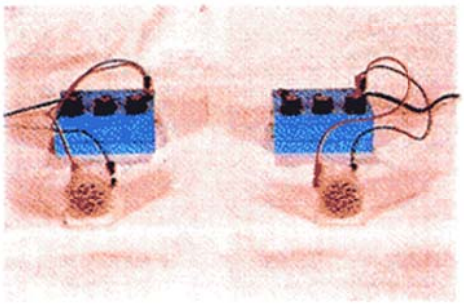
รูป 12.40 การจัดอุปกรณ์เพื่อการวัดความยาวคลื่นเสียงในอากาศโดยใช้หลอดเรโซแนนซ์

- ☐ ระยะระหว่างตำแหน่งของลูกสูบ ขณะได้ยินเสียงดังที่สุดสองครั้ง เมื่อตำแหน่งทั้งสองอยู่ถัดกันจะเปลี่ยนไปหรือไม่ เวลาความถี่ของเสียงเปลี่ยน
- ☐ ระยะระหว่างตำแหน่งของลูกสูบ ขณะได้ยินเสียงดังที่สุดสองครั้ง เมื่อตำแหน่งทั้งสองอยู่ถัดกันกับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นที่คำนวณได้จากตอนที่ 1 เท่ากันหรือไม่ เมื่อความถี่ของเสียงเท่ากัน

การทดลอง 12.5 การเกิดบีตส์ของเสียง

จุดประสงค์ เพื่อศึกษาผลของการซ้อนทับระหว่างคลื่นเสียงจากแหล่งกำเนิดเสียง 2 แหล่งที่มีความถี่ต่างกันเล็กน้อย

วิธีทำ ต่อสายไฟจากเครื่องกำเนิดสัญญาณเสียงเข้ากับลำโพง โดยต่อลักษณะเดียวกัน 2 ชุด ดังรูป 12.41 ก. หมุนปุ่มเลือกความถี่ของเครื่องกำเนิดสัญญาณเสียงทั้งสองไปที่ 1 กิโลเฮิรตซ์ทั้งสองเครื่องปรับความดังของเครื่องกำเนิดสัญญาณเสียงทั้งสองให้พอเหมาะ แล้วค่อย ๆ หมุนปุ่มปรับความถี่ละเอียดของเครื่องกำเนิดสัญญาณเสียงตัวใดตัวหนึ่งให้มีความถี่ที่ต่างไปเล็กน้อย ดังรูป 12.41 ข. แล้วรับฟังเสียงที่ด้านหน้าของลำโพงทั้ง 2 ตัว หลังจากนั้นปิดเครื่องกำเนิดสัญญาณเสียงตัวใดตัวหนึ่ง แล้วรับฟังเสียงจากลำโพงที่เหลือ เปรียบเทียบกับเสียงที่ได้ยินจากลำโพงทั้งสองตัว



ก. การติดตั้งอุปกรณ์

ข. ปุ่มปรับความถี่อย่างละเอียด

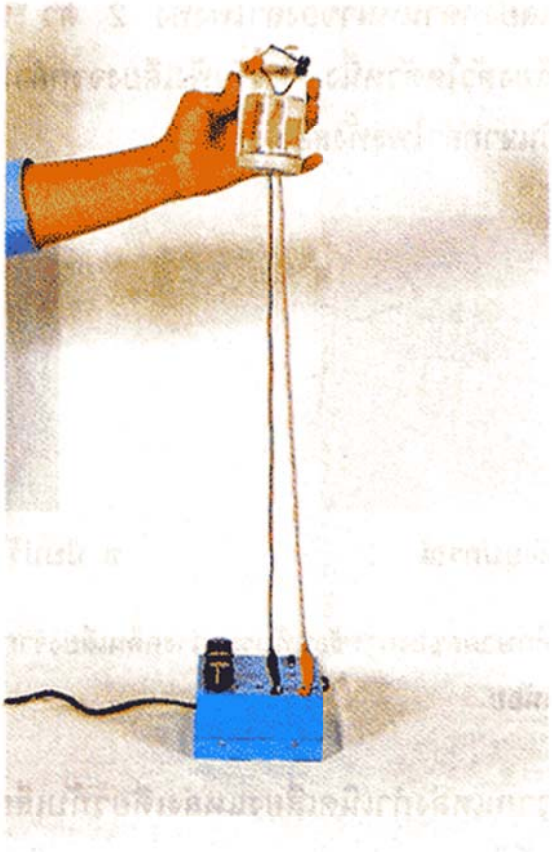
รูป 12.41 การจัดอุปกรณ์เพื่อศึกษาผลของการซ้อนทับระหว่างคลื่นเสียงจากแหล่งกำเนิดเสียง สองแหล่งที่มีความถี่ต่างกันเล็กน้อย

☐ เสียงที่ได้ยินจากแหล่งกำเนิดเสียงแหล่งเดียวกับเสียงที่ได้ยินจากแหล่งกำเนิดเสียงสองแหล่งที่มีความถี่ต่างกันเล็กน้อย แตกต่างกันอย่างไร

กิจกรรม 12.2 คลื่นนิ่งของเสียง

จุดประสงค์ เพื่อศึกษาคลื่นนิ่งของเสียง

วิธีทำ ต่อสายไฟจากเครื่องกำเนิดสัญญาณเสียงกับลำโพง ทำให้เกิดเสียงที่มีความถี่ 3 กิโลเฮิรตซ์ ปรับความดังของเสียงให้พอเหมาะ ถือลำโพงให้อยู่เหนือพื้นโต๊ะประมาณ 60 เซนติเมตร ดังรูป 12.42 ใช้ท่อรับฟังเสียง ณ ตำแหน่งต่างๆ บนแนวระหว่างลำโพงกับพื้นโต๊ะ



รูป 12.42 การจัดอุปกรณ์เพื่อศึกษาคลื่นนิ่งของเสียง

☐ เสียงที่นักเรียนได้ยิน ณ ตำแหน่งต่างๆ ระหว่างลำโพงกับพื้นโต๊ะดังเท่ากันหรือไม่อย่างไร

ความรู้เพิ่มเติม

ระดับเสียงโน้ตของดนตรีไทย

ดนตรีไทยนั้นแบ่งระดับเสียงโน้ตใน 1 คู่แปดเป็น 7 เสียง โดยมีความถี่ต่างกันขั้นละ $2^{(1/7)}$ ดังนี้

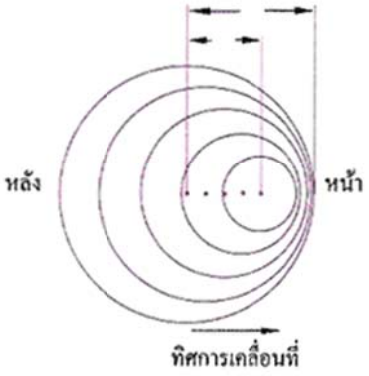
โน้ตตัวเลข	1	2	3	4	5	6	7	1'
ความถี่	T	$T.\ 2^{(1/7)}$	$T.\ 2^{(2/7)}$	$T.\ 2^{(3/7)}$	$T.\ 2^{(4/7)}$	$T.\ 2^{(5/7)}$	$T.\ 2^{(6/7)}$	$T.\ 2^{(7/7)}$

แต่ในปัจจุบัน ระดับเสียงโน้ตดนตรีไทย (เฉพาะบางวง) ได้ใช้ระบบเสียงใกล้เคียงกับระดับเสียงโน้ตดนตรีสากล โดยมีเสียงของโน้ตเช่นเดียวกับคีย์ขาวของเปียโน ดังนั้นระดับเสียงโน้ตดนตรีไทยจึงมี 2 แบบ

ปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ของเสียง

แหล่งกำเนิดเสียง เคลื่อนที่ไปทางขวามือ ด้วยอัตราเร็ว v_s ปล่อยคลื่นเสียงที่มีความถี่ f_o ออกไปในอากาศ ใน t วินาที จะมีคลื่น $f_o.t$ ลูก เคลื่อนที่ไปได้ระยะทาง $(v-v_s).t$
เมื่อ v เป็นอัตราเร็วของคลื่นเสียงในอากาศ

พิจารณาความยาวคลื่นในอากาศบริเวณด้านหน้าแหล่งกำเนิด



จาก ความยาวคลื่น $=$ $\dfrac{\text{ระยะทางที่คลื่นเคลื่อนที่ได้}}{\text{จำนวนคลื่น}}$

$$\lambda_1 = \frac{(v-v_s).t}{f_o.t}$$

$$\lambda_1 = \frac{v-v_s}{f_o}$$

ทำนองเดียวกัน พิจารณาความยาวคลื่นในอากาศบริเวณด้านหลัง ในเวลา t วินาที จะมีคลื่น $f_o.t$ ลูก เคลื่อนที่ไปได้ระยะทาง $(v+v_s)t$

$$\lambda_2 = \frac{(v+v_s).t}{f_o.t}$$

$$\lambda_2 = \frac{v+v_s}{f_o}$$

ดังนั้น ผู้ฟังที่อยู่ทางด้านหน้า (คือด้านที่แหล่งกำเนิดเสียงพุ่งเข้าหา) จะได้ยินเสียง ที่มีความถี่

$$f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \left(\frac{v}{v-v_s}\right) f_o$$

สำหรับผู้ฟังที่อยู่ด้านหลัง (คือด้านที่แหล่งกำเนิดเสียงวิ่งออกห่าง) จะได้ยินเสียง ที่มีความถี่

$$f_2 = \frac{v}{\lambda_2}$$

$$= \left(\frac{v}{v+v_2}\right) f_o$$

สรุป ผู้ฟังที่อยู่ด้านหน้า จะได้ยินเสียงที่มีความถี่สูงขึ้น ส่วนผู้ฟังที่อยู่ทางด้านหลังจะได้ยินเสียงที่มีความถี่ต่ำลง

หมายเหตุ

นอกจากปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ จะเกิดในกรณีเสียงแล้ว ในกรณีของแสงจากดาวฤกษ์ที่เคลื่อนที่เข้าหาโลก และออกจากโลก ก็จะมีปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ทางแสง เกิดขึ้นเช่นกัน

หรือในการตรวจวัดอัตราเร็วของยานพาหนะ ตำรวจจราจรจะส่งคลื่นเรดาร์ไปยังยานพาหนะ จากนั้นจึงใช้เครื่องตรวจสอบความถี่ของคลื่นเรดาร์ที่สะท้อนกลับ เพื่อคำนวณความถี่เปลี่ยนไปที่ออกมาเป็นอัตราเร็วของยานพาหนะนั้น

โจทย์แบบฝึกหัดบทที่ 12

คำถาม

1. คนที่มีบ้านพักริมทางรถไฟมักตรวจสอบว่าจะมีขบวนรถไฟผ่านหรือไม่ โดยใช้หูแนบกับรางรถไฟ เพราะเหตุใดจึงทำเช่นนั้น
2. ในเวลากลางคืน อากาศบริเวณพื้นดินเย็นกว่าอากาศบริเวณที่อยู่สูงขึ้นไป ถ้านักเรียนเป่าขลุ่ย เสียงขลุ่ยจะมีการหักเหอย่างไร จงอธิบายและวาดภาพประกอบ
3. ระดับความเข้มเสียงมากที่สุดกี่เดซิเบลที่มนุษย์ไม่ควรฟังติดต่อกันเกิน 8 ชั่วโมง ตามกฎหมายแรงงาน
4. เล่นไวโอลินและกีตาร์ด้วยเสียง D ความถี่ 440 เฮิรตซ์ แต่เสียงที่ออกมาจากเครื่องดนตรีทั้งสองมีคุณภาพเสียงต่างกัน เป็นเพราะเหตุใด
5. ความถี่ต่ำสุดที่เกิดจากเครื่องดนตรีชนิดหนึ่งเรียกว่าอย่างไร
6. ในบางครั้งเราอาจเรียกสุนัขด้วยการเป่านกหวีดชนิดที่คนไม่ได้ยินเสียง นกหวีดชนิดนี้ควรให้เสียงความถี่เป็นอย่างไร
7. เพราะเหตุใดเครื่องดนตรีที่มีขนาดใหญ่ จึงให้ระดับเสียงต่ำกว่าเครื่องดนตรีประเภทเดียวกันที่ขนาดเล็กกว่า เช่น กลองใบใหญ่กับกลองใบเล็ก เป็นต้น
8. ขวด ก. และ ข. เป็นขวดชนิดเดียวกัน และมีขนาดเท่ากัน แต่มีระดับน้ำในขวดต่างกัน เมื่อใช้ไม้เคาะด้านข้างของขวดทำให้เกิดเสียง ขวดใดมีระดับเสียงสูงกว่าเพราะเหตุใด อธิบาย ถ้าเป่าที่ปากขวดทำให้เกิดเสียง เสียงจากขวดใดจะมีระดับเสียงสูงกว่า เพราะเหตุใด อธิบาย

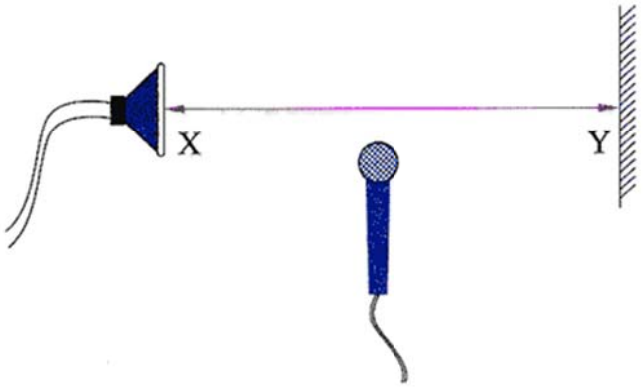
รูป 12.44 สำหรับแบบฝึกหัดข้อ 8

9. ไวโอลินสองตัวความถี่ 438 และ 440 เฮิรตซ์ ถ้าสีไวโอลินทั้งสองพร้อมกัน จะเกิดปรากฏการณ์ใดของเสียง
10. เรือลำหนึ่งกำลังแล่นเข้าหาหน้าผา กัปตันเรือเปิดหวูดส่งสัญญาณเสียงด้วยความถี่คงตัวโดยเปิดสัญญาณอย่างต่อเนื่อง เพราะเหตุใดผู้ฟังบนเรือจึงได้ยินเสียงบีตส์
11. การหาอัตราเร็วของเสียงในของเหลวโดยใช้หลักการของคลื่นนิ่ง ทำได้อย่างไร อธิบาย
12. นักเรียนคิดว่าเป็นไปได้หรือไม่ ที่จะใช้คลื่นเหนือเสียงทำความสะอาดภาชนะที่สกปรกด้วยฝุ่นละออง คราบไขมัน จงอธิบายเหตุผล

ปัญหา

1. จงหาความยาวคลื่นของเสียงซึ่งมีความถี่ 1,000 เฮิรตซ์ ขณะคลื่นเสียงผ่านอากาศ น้ำ และเหล็กที่มีอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสเท่ากัน กำหนดให้อัตราเร็วของเสียงในอากาศ น้ำและเหล็กที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มีค่าเป็น 346 1,498 และ 5,000 เมตร/วินาที ตามลำดับ
2. เครื่องโซนาร์บนเรือลำหนึ่งส่งคลื่นดลของเสียงลงไปใต้ท้องทะเล และรับฟังสะท้อนได้ในเวลา 5 วินาที ถ้าอัตราเร็วของเสียงในน้ำทะเลเท่ากับ 1,450 เมตร / วินาที ท้องทะเลนั้นลึกเท่าใด
3. ถ้ายิงปืนระหว่างหน้าผาสองแห่ง ปรากฏว่าได้ยินเสียงสะท้อน 2 ครั้ง หลังจากยิงปืนเป็นเวลา 2 วินาที และ 3 วินาที ตามลำดับ จงหาระยะระหว่างหน้าผาทั้งสอง กำหนดอุณหภูมิของอากาศขณะนั้นเป็น 40 องศาเซลเซียส อัตราเร็วของเสียงที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียสเท่ากับ 331 เมตร / วินาที และเพิ่มขึ้น 0.6 เมตร / วินาที ทุก 1 องศาเซลเซียส
4. หวูดรถไฟมีกำลังเสียง 20 วัตต์ ถ้าคลื่นเสียงจากหวูดรถไฟแผ่หน้าคลื่นออกไปเป็นรูปทรงกลม จงหาความเข้มเสียงที่ผิวทรงกลม ซึ่งอยู่ห่างออกไปจากหวูดรถไฟ 150 เมตร
5. นาย ก. เห็นพลุแตกกลางอากาศเหนือศีรษะเขาขึ้นไป 80 เมตร ขณะเดียวกันนาย ข. ซึ่งอยู่ห่างจากนาย ก. ตามแนวราบ เป็นระยะทาง 60 เมตร ก็เห็นพลุแตกเช่นกัน ความเข้มของเสียงพลุที่นาย ข. ได้รับเป็นกี่เท่าของความเข้มของเสียงพลุที่นาย ก. ได้รับ
6. รถยนต์ที่วิ่งบนทางด่วนพิเศษสายหนึ่ง ทำให้เกิดเสียงที่มีระดับความเข้ม 90 เดซิเบล ที่ระยะห่างจากถนน 20 เมตร นักเรียนจะมีวิธีการอย่างไรจึงจะทำให้ได้ยินเสียงนี้โดยมีระดับความเข้มเสียงลดลง

7. เมื่อเป่าแซกโซโฟนตัวหนึ่งให้เกิดเสียงมีความถี่มูลฐาน 440 เฮิรตซ์ พร้อมกับฮาร์มอนิกที่ 3, 5, 9, และ 11 จงหาความถี่ทั้งหมดของเสียงที่เป่าจากแซกโซโฟนขณะนั้น
8. ปรีดาสีไวโอลินให้เกิดเสียง "ซอล" ซึ่งมีความถี่ 384 เฮิรตซ์ ขณะที่ในห้องมีอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ถ้าเขาสีไวโอลินเดิมในห้องปรับอากาศที่มีอุณหภูมิ 26 องศาเซลเซียส โดยเล่นโน้ตเสียง "ซอล" ความถี่ของเสียงจากไวโอลินจะเปลี่ยนแปลงหรือไม่อย่างไร เพราะเหตุใด
9. นักดนตรีผู้หนึ่งดีดกีตาร์ทำให้เกิดเสียงความถี่ f ขณะเดียวกับที่มีเสียงออกมาจากแหล่งกำเนิดเสียงอื่น ทำให้เกิดเสียงบีตส์มีความถี่ 5 เฮิรตซ์ เมื่อเขาปรับความถี่ของเสียงจากสายกีตาร์ลดลงเป็น 329.6 เฮิรตซ์ ปรากฏว่าได้ยินเสียงที่มีระดับเสียงเดียวกัน จงหาค่าความถี่ f
10. แหล่งกำเนิดเสียงส่งคลื่นเสียงความถี่ 1,000 เฮิรตซ์ ด้วยกำลังเสียงคงตัวเข้าหากำแพงในแนวตั้งฉาก ดังรูป 12.45 เมื่อใช้เครื่องรับฟังเสียงเคลื่อนที่บนแนว xy พบว่าความเข้มเสียง ณ ตำแหน่งต่างๆ มีค่าไม่สม่ำเสมอทั้งนี้เกิดจากสมบัติใดบ้างของเสียง



รูป 12. 45 สำหรับโจทย์ข้อ 10

11. ท่อทรงกระบอกปลายปิดข้างหนึ่งยาว 2.40 เมตร ถ้าเสียงมีอัตราเร็ว 343 เมตร / วินาที เสียงจากท่อนี้จะมีความถี่ต่ำสุดเท่าใด
12. แหล่งกำเนิดเสียงส่งคลื่นเสียงความถี่ 2,000 เฮิรตซ์ ไปกระทบตัวสะท้อนอันหนึ่ง เมื่อใช้เครื่องรับฟังเสียงเคลื่อนไปตามแนวตรงระหว่างกำเนิดเสียงกับตัวสะท้อนได้ยินเสียงดังค่อยสลับกัน ถ้าต้องการให้ตำแหน่งเสียงดังสองตำแหน่งที่อยู่ถัดกันอยู่ห่างกันมากกว่าเดิม 2 เซนติเมตร แหล่งกำเนิดเสียงจะต้องส่งเสียงความถี่เท่าใดไปกระทบตัวสะท้อน อัตราเร็วของเสียงในอากาศเท่ากับ 340 เมตร / วินาที

13. เมื่อให้เสียงความถี่ 500 เฮิรตซ์ ผ่านเข้าไปในหลอดเรโซแนนซ์ ขณะอุณหภูมิอากาศเป็น 30 องศาเซลเซียส คลื่นเสียงจะต้องมีความถี่เท่าใดจึงจะเกิดการสั่นพ้องของเสียงได้อีกครั้งหนึ่ง ถ้าอุณหภูมิของอากาศ 0 องศาเซลเซียส อัตราเร็วเสียงในอากาศเท่ากับ 331 เมตร / วินาที และอัตราเร็วเพิ่มขึ้น 0.6 เมตร / วินาที ทุกๆ 1 องศาเซลเซียส
14. ในการทดลองการสั่นพ้องของเสียง ขณะเกิดการสั่นพ้องครั้งแรก ลูกสูบอยู่ห่างจากปากหลอดเรโซแนนซ์ 18 เซนติเมตร และเมื่อเกิดการสั่นพ้องครั้งถัดไปจะต้องดึงลูกสูบห่างจากปากหลอดเรโซแนนซ์กี่เซนติเมตร
15. หลอดแก้วรูปทรงกระบอกปลายปิดข้างหนึ่งถ้านำมาใส่น้ำให้มีระดับต่างๆ กันแล้วนำส้อมเสียงที่กำลังสั่นให้เกิดเสียงไปไว้ใกล้ปากหลอดจะพบว่ามีความสูงของน้ำในหลอดแก้ว 2 ค่าที่ทำให้เกิดเสียงดังกว่าเดิม ครั้งแรกมีน้ำในหลอดแก้วสูง 12 เซนติเมตร ครั้งที่ 2 มีน้ำในหลอดแกล้วสูง 37 เซนติเมตร ถ้าส้อมเสียงสั่นด้วยความถี่ 682 เฮิรตซ์ อัตราเร็วเสียงในอากาศขณะนั้นมีค่าเท่าใด

บทที่ 13

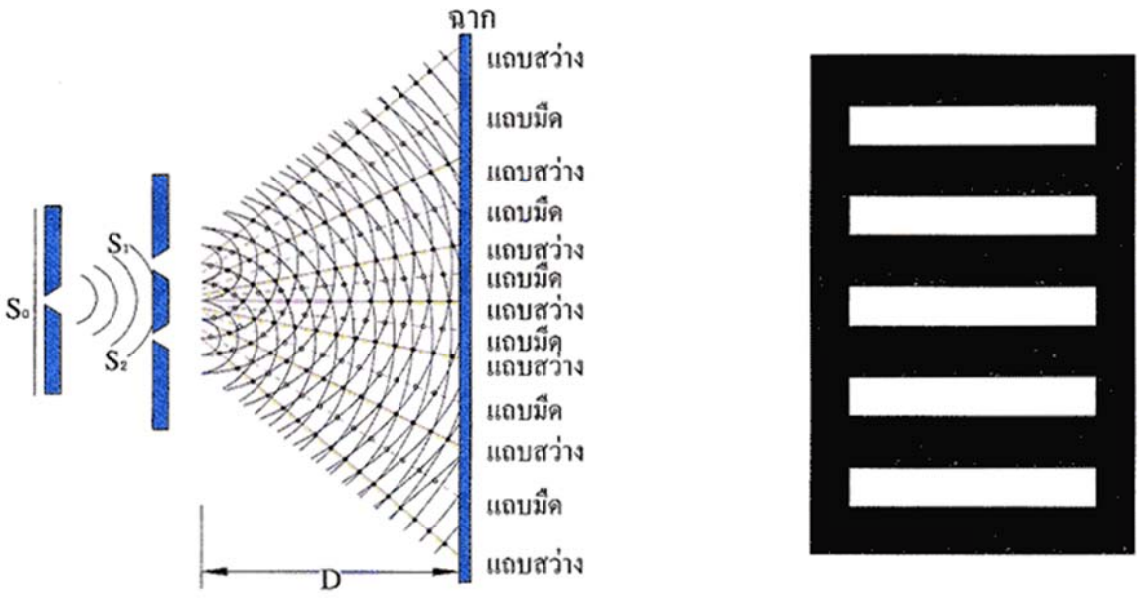
แสง

แสงเป็นสิ่งจำเป็นต่อชีวิตและมีประโยชน์ต่อมนุษย์มาก ถึงแม้เราจะคุ้นเคยกับแสงและสัมผัสแสงตลอดเวลา แต่รู้หรือไม่ว่าธรรมชาติของแสงเป็นอย่างไร ในอดีตนักวิทยาศาสตร์ได้มีการถกเถียงกันว่า แสงเป็นอนุภาคหรือคลื่น เซอร์ ไอแซค นิวตัน (Sir Isaac Newton พ.ศ. 2185 - 2270) ได้เสนอทฤษฎีคลื่นของแสงในการอธิบายการสะท้อนและการหักเห ในปี พ.ศ. 2221 คริสเตียน ฮอยเกนส์ (Christian Huygens พ.ศ. 2172 - 2238) ได้เสนอทฤษฎีคลื่นของแสง เพื่อใช้อธิบายการสะท้อนและการหักเห นอกจากนี้ยังมีนักวิทยาศาสตร์อีกหลายท่านที่เสนอความคิดเห็นเกี่ยวกับธรรมชาติของแสง แสงควรเป็นอนุภาคหรือคลื่นหรือเป็นทั้งคลื่นและอนุภาคจะได้ศึกษากันต่อไป

13.1 การแทรกสอด

ในเรื่องคลื่นกล เราทราบว่า เมื่อคลื่นน้ำสองคลื่นจากแหล่งกำเนิดอาพันธ์มาพบกัน คลื่นทั้งสองจะแทรกสอดกันทำให้เกิดแนวบัพและแนวปฏิบัพ หรือคลื่นเสียงสองคลื่นจากแหล่งกำเนิดอาพันธ์เมื่อมาพบกันก็จะแทรกสอดเช่นกัน ทำให้มีตำแหน่งที่มีเสียงดังและเสียงค่อยสลับกัน ถ้าแสงจากแหล่งกำเนิดอาพันธ์สองแหล่งมาพบกันบ้าง แสงจะแทรกสอดกันหรือไม่

ในปี พ.ศ. 2344 โทมัส ยัง (Thomas Young พ.ศ. 2316 - 2372) ได้พิสูจน์โดยการทดลองพบว่าแสงเป็นคลื่นเพราะ **แสงมีสมบัติการแทรกสอด** เช่นเดียวกับคลื่นน้ำ คลื่นเสียง และคลื่นชนิดอื่นๆ โทมัส ยัง ทดลองการแทรกสอดของแสง โดยให้แสงสีเดียวผ่านช่องแคบ 1 ช่อง แล้วไปผ่านช่องแคบอีก 2 ช่อง สมมติเป็นช่อง S_1 และ S_2 ซึ่งทำให้เกิดแถบมืด แถบสว่าง ปรากฏบนฉาก ดังรูป 13.1 ข. เมื่อแสงจาก S_1 และ S_2 เคลื่อนที่มาถึงตำแหน่งบนฉากบริเวณที่เกิดแถบมืด เพราะแสงแทรกสอดแบบหักล้าง และบริเวณที่เกิดแถบสว่างเพราะแสงจาก S_1 และ S_2 แทรกสอดแบบเสริม

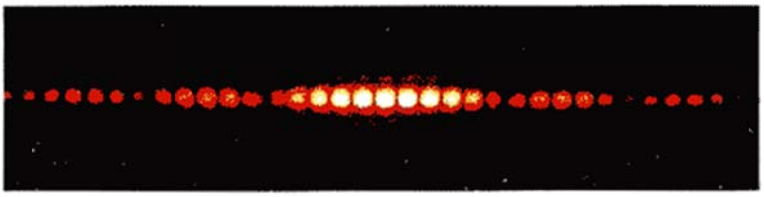


ก. ข.

รูป 13.1 ภาพการแทรกสอดของยัง

ถ้าให้แสงอาพันธ์จากหลอดไฟส่องไปยังแผ่นที่มีช่องแคบคู่ หรือแผ่นสลิตคู่ เมื่อแสงผ่านสลิตคู่ การแทรกสอดของแสงจะเป็นอย่างไร ให้ศึกษาจากการทดลอง 13.1

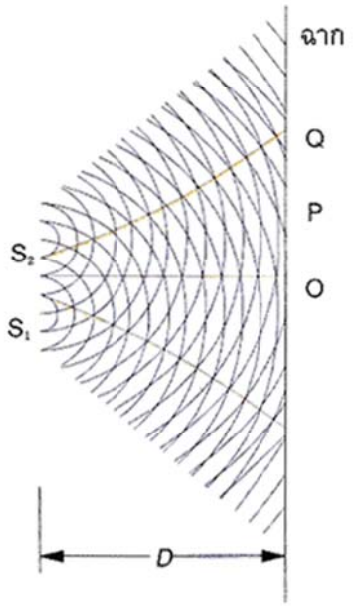
เมื่อให้แสงผ่านสลิตคู่ จะเห็นแถบมืดและแถบสว่างสลับกันบนฉาก และเมื่อระยะระหว่างสลิตเปลี่ยน ขนาดของแถบสว่างและแถบมืดจะเปลี่ยน และระยะระหว่างแถบมืดกับแถบสว่างก็เปลี่ยนด้วย



รูป 13.2 ภาพการแทรกสอดของแสงผ่านสลิตคู่

การเห็นแถบมืดและแถบสว่างสลับกันไปนี้ แสดงว่าความสว่าง ณ ตำแหน่งต่างๆ บนฉากมีค่าไม่เท่ากัน ทำนองเดียวกันกับการได้ยินเสียงดังและค่อยสลับกันไปเพราะคลื่นเสียงจากแหล่งกำเนิดเสียงอาพันธ์แทรกสอดกัน และการแทรกสอดแบบเสริมและหักล้างของคลื่นน้ำจากแหล่งกำเนิดอาพันธ์ก็เช่นกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าแสงที่ออกจากสลิตทั้งสองแทรกสอดกันขึ้นในลักษณะเดียวกับการแทรกสอดของคลื่นเสียงและคลื่นน้ำ

เมื่อแสงผ่านสลิตคู่จะมีการแทรกสอดของแสงบนฉากทำให้เกิดแถบมืดและแถบสว่าง การหาตำแหน่งของแถบมืดและแถบสว่างเหล่านี้ อาจทำได้โดยพิจารณาว่าสลิตทั้งสองเป็นแหล่งกำเนิดแสงอาพันธ์ 2 แหล่ง และใช้หลักการแทรกสอดของคลื่นน้ำมาอธิบายการแทรกสอดของคลื่นแสงดังนี้



รูป 13.3 การแทรกสอดของคลื่นแสงเมื่อผ่านสลิตคู่

จากรูป 13.3 สลิต S_1 และ S_2 ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงอาพันธ์ แสงจากสลิตทั้งสองจะแทรกสอดกัน และปรากฏภาพการแทรกสอดบนฉาก พิจารณาที่จุด O บนฉากระยะ S_1O , S_2O เท่ากัน แสงจะมีเฟสตรงกันทำให้เกิดการแทรกสอดแบบเสริมกัน ปรากฏเป็นแถบสว่างที่ O ณ ตำแหน่งอื่นๆ บนฉากถัดจากจุด O ออกไป คลื่นแสงจาก S_1 และ S_2 ที่มาถึงฉากจะมีเฟสต่างกันทีละน้อยจนกระทั่งเฟสต่างกันเท่ากับ 180 องศา ที่จุด P คลื่นแสงจะหักล้างกันหมดทำให้จุด P เป็นตำแหน่งของแถบมืดแถบแรก นับจากแถบสว่างกลางที่ O เพราะระยะทางที่คลื่นทั้งสองเคลื่อนที่มาถึงจุด P นี้จะต่างกันเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น

นั่นคือ $S_1P - S_2P = \frac{\lambda}{2}$

เมื่อ λ เป็นความยาวคลื่นแสงที่ผ่านสลิต

สำหรับจุด Q ซึ่งเป็นตำแหน่งของแถบสว่างแถบแรกที่อยู่ถัดแถบสว่างกลางที่ O ออกไป ระยะทางที่คลื่นจาก S_1 และ S_2 เคลื่อนที่มาถึงฉากจะต่างกันเท่ากับความยาวคลื่นพอดี

นั่นคือ $S_1Q - S_2Q = \lambda$

ในทำนองเดียวกันจะเห็นว่า ถ้าระยะทางที่คลื่นจาก S_1 และ S_2 เคลื่อนที่ถึงฉากต่างกันเท่ากับ $\frac{3\lambda}{2}$ ก็จะทำให้เกิดแถบมืดแถบที่สองถัดจากแถบสว่างกลาง และถ้าระยะทางต่างกัน 2λ ก็จะได้แถบสว่างแถบที่สองถัดจากแถบสว่างกลาง จึงสรุปได้ว่า ถ้าตำแหน่งของแถบสว่างและแถบมืดใดๆ ถัดจากแถบสว่างกลางออกไปเป็น X และ Y ตามลำดับ

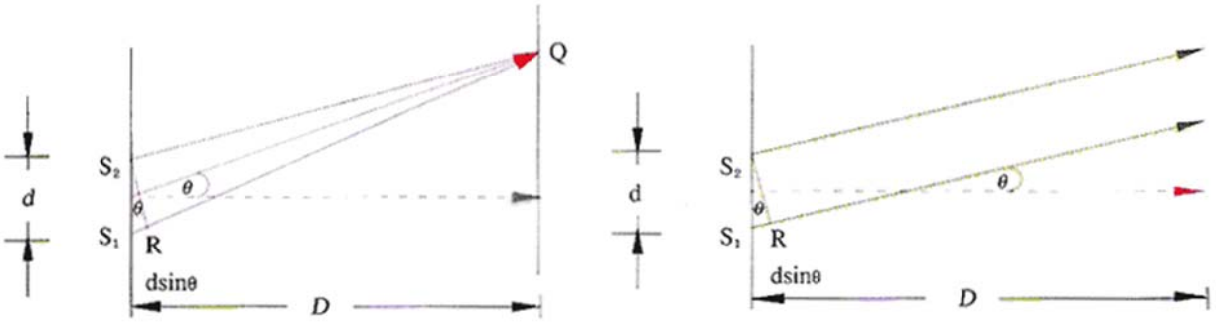
ถ้า $S_1X - S_2X = \lambda, 2\lambda, 3\lambda \ldots$ ที่ตำแหน่ง X จะสว่าง

ถ้า $S_1Y - S_2Y = \frac{\lambda}{2}, \frac{3\lambda}{2}, \frac{5\lambda}{2} \ldots$ ที่ตำแหน่ง Y จะมืด

เราสามารถหาตำแหน่งแถบมืด และแถบสว่างบนฉากได้ โดยการคำนวณจากรูป 13.4 ก. เมื่อพิจารณาผลต่างระหว่างระยะจาก S_1 และ S_2ไปยังตำแหน่ง Q พิจารณารูป 13.4 ก. กำหนดให้ R เป็นจุดบน S_1Q โดย $RQ = S_2Q$

ดังนั้น $S_1Q - S_2Q = S_1R$

ตามปกติฉากจะอยู่ห่างจากสลิตเป็นระยะ D ซึ่งไกลมากเมื่อเทียบกับระยะห่าง d ระหว่างสลิตทั้งสอง เมื่อพิจารณาจุด Q บนฉาก ซึ่งเป็นตำแหน่งของแถบสว่างแถบแรกเมื่อนับจากแถบสว่างกลางที่ O จึงอาจประมาณได้ว่า S_1Q และ S_2Q เป็นเส้นขนานที่ต่างก็ทำมุม θ กับแนวกลาง ดังรูป 13.4 ข. ลากเส้นตั้งฉาก S_2R จะได้มุม S_1S_2R เท่ากับ θ โดยประมาณ



ก. แสดงเส้นตรง S_1Q และ S_2Q

ข. แสดงเส้นตรง S_1Q และ S_2Q ซึ่งอาจถือว่าขนานกันได้ เพราะ Q อยู่ห่างจากสลิตมาก

รูป 13.4 แสดงเส้นตรง s_1Q ขนานกับ s_2Q เมื่อ $D >> d$

จากรูป ΔS_1S_2R $S_1R = d\sin\theta$

ดังนั้น $S_1Q - S_2Q = d\sin\theta$

นั่นคือ ตำแหน่งของแถบสว่างแถบแรกนับจากแนวกลางจะเกิดขึ้นเมื่อ

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

ในทำนองเดียวกัน สำหรับแถบสว่างอื่นๆ ที่ตำแหน่งถัดออกไปจะเกิดขึ้นเมื่อ

$$d\sin\theta = \lambda, 2\lambda, 3\lambda$$

จึงสรุปได้ว่า สำหรับแถบสว่าง

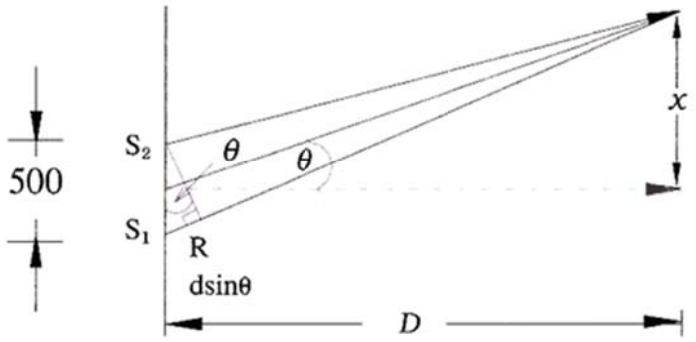
$$d\sin\theta = n\lambda \qquad n = 0,1,2,..... \tag{13.1}$$

และเมื่อพิจารณาในทำนองเดียวกันสำหรับกรณีแถบมืด จะได้เงื่อนไขในการเกิดแถบมืด คือ

$$d\sin\theta = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda \qquad n = 0,1,2,..... \tag{13.2}$$

ตัวอย่าง 13.1 สลิตคู่มีช่องห่างกัน 500 ไมโครเมตร เมื่อแสงความยาวคลื่น 470 นาโนเมตร ผ่านสลิต เกิดการแทรกสอดบนฉากซึ่งห่างสลิต 1.0 เมตร แถบสว่างที่ 3 อยู่ห่างจากจุดกึ่งกลางของแถบสว่างกลางเท่าใด

วิธีทำ ให้แถบสว่างที่ 3 ห่างจากแถบสว่างกลาง x



รูป 13.5 สำหรับตัวอย่าง 3.1

จาก $d\sin\theta = n\lambda$

เนื่องจาก ฉากอยู่ห่างจากสลิตมาก มุม θ จึงมีค่าน้อยมาก

จะได้ $\sin\theta \cong \tan\theta = \frac{x}{D}$

ดังนั้น $d\frac{x}{D} = n\lambda$

$$x = \frac{n\lambda D}{d}$$

$d = 500 \times 10^{-6}$ m , $\lambda = 470 \times 10^{-9}$ m , $D = 1.0$ m , $n = 3$

แทนค่า $$x = \frac{3 \times 470 \times 10^{-9}\ \text{m} \times 1\ \text{m}}{500 \times 10^{-6}\ \text{m}}$$

$$x = 2.82 \times 10^{-3}\ \text{m}$$

คำตอบ แถบสว่างที่ 3 ห่างจากจุดกึ่งกลางของแถบสว่างกลาง 2.82 เซนติเมตร

ตัวอย่าง 13.2 แสงสีเดียวส่องผ่านสลิตคู่ซึ่งสลิตอยู่ห่างกัน 450 ไมโครเมตร เกิดการแทรกสอดบนฉากที่อยู่ห่างจากสลิตคู่ 50 เซนติเมตร ถ้าระยะห่างระหว่างแถบมืดที่อยู่ถัดกันเท่ากับ 0.60 มิลลิเมตร ความยาวคลื่นแสงเป็นเท่าใด

วิธีทำ การหา λ ของแสงจะพิจารณาแถบมืด 2 แถบ ที่อยู่ถัดกัน เนื่องจากระยะห่างระหว่างแถบมืดที่อยู่ถัดกันมีค่าเท่ากันทุกคู่ ดังนั้นจะเลือกแถบมืดแถบใดก็ได้

สมมติเลือกแถบมืดที่ $n = 0$ และ $n = 1$

จาก $d\sin\theta = (n+\frac{1}{2})\lambda$

และ $\sin\theta = \tan\theta = \frac{x}{D}$ ดังตัวอย่างแรก

จะได้ $\frac{dx}{D} = (n+\frac{1}{2})\lambda$

เมื่อ $n = 0$ ให้แถบมืดห่างจากจุดกึ่งกลางของแถบสว่างกลาง = x_1

แทนค่าใน (1) $\frac{\lambda}{2} = \frac{450\times10^{-6}\,\text{m}}{50\times10^{-2}\,\text{m}}x_1$

$x_1 = \frac{10^4}{18}\lambda$

เมื่อ $n = 1$ ให้แถบมืดห่างจากจุดกึ่งกลางของแถบสว่างกลาง

แทนค่าใน (1) $x_2 = \frac{10^4}{6}\lambda$

ดังนั้น $x_2 - x_1 = \frac{10^4}{9}\lambda$

แต่ $x_2 - x_1$ คือระยะห่างระหว่างแถบมืดที่อยู่ถัดกันซึ่งโจทย์กำหนดเท่ากับ 0.6×10^{-3} m

จะได้ $0.60\times10^{-3}\ \text{m} = \frac{10^4}{9}\lambda$

$\lambda = 5.40\times10^{-7}\,\text{m}$

$\lambda = 540\,\text{nm}$

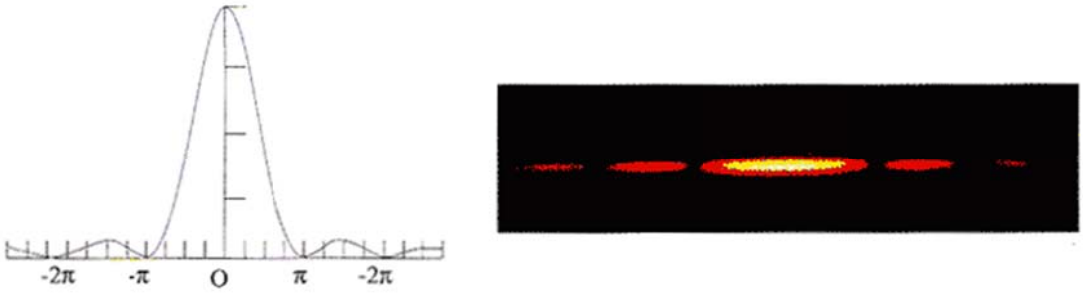
คำตอบ ความยาวคลื่นแสงเท่ากับ 540 นาโนเมตร

13.2 การเลี้ยวเบนของแสง

คลื่นผิวน้ำและคลื่นเสียงสามารถเคลื่อนที่อ้อมสิ่งกีดขวางไปด้านหลังของสิ่งกีดขวางได้ นี่เป็นสมบัติการเลี้ยวเบนของคลื่น แสงก็สามารถเลี้ยวเบนได้เช่นกัน กริมัลดิ (Francesco Maria Grimaldi พ.ศ. 2161 - 2206) เป็นผู้เห็นสมบัติการเลี้ยวเบนของแสงในปี พ.ศ. 2203 ได้เป็นคนแรก การเลี้ยวเบนของแสงเป็นอย่างไร ให้ศึกษาจากการทดลอง 13.2 ซึ่งว่าด้วย การเลี้ยวเบนของแสง

ก. สลิตเดี่ยวที่มีช่องใหญ่ ข. สลิตเดี่ยวที่มีช่องเล็ก

รูป 13.6 การเลี้ยวเบนของแสงที่เกิดจากสลิตเดี่ยวซึ่งมีขนาดต่างกัน



ก. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสง ณ ตำแหน่งต่าง ๆ บนฉาก ข. ภาพการเลี้ยวเบนของแสงที่ปรากฏบนฉาก

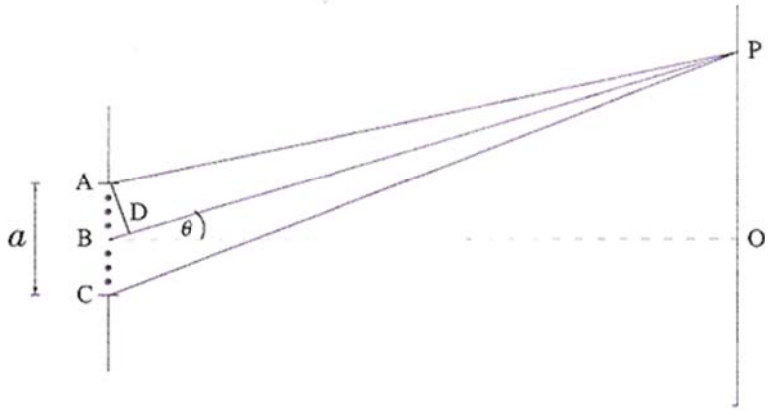
รูป 13.7 การเลี้ยวเบนของแสงผ่านสลิตเดี่ยว

จากการทดลองเรื่องการเลี้ยวเบนของแสง เมื่อให้แสงผ่านสลิตที่แคบ (คือความยาวมากกว่าความกว้างของสลิตมาก) จะเกิดปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนมีผลให้แถบสว่างกลางมีขนาดกว้างกว่าสลิต นอกจากนี้ถัดจากแถบสว่างกลางออกไปทั้งสองข้างยังมีแถบสว่างและแถบมืดสลับกันไป ซึ่งสามารถอธิบายการเลี้ยวเบนของแสงได้เมื่อใช้แสงความยาวคลื่นเดียวจากหลอดไฟส่องผ่านสลิตเดี่ยว โดยให้หลอดไฟอยู่ห่างจากสลิตเป็นระยะทางที่ไกลมากเมื่อเทียบกับความกว้างของสลิต เราจึงอาจประมาณได้ว่าคลื่นแสงที่มาตกกระทบสลิตนั้นเป็นคลื่นระนาบ[1] และโดยใช้หลักการของฮอยเกนส์ที่ถือว่าทุก ๆ จุดบนสลิตจะทำหน้าที่เสมือน

---

[1]แสงเป็นคลื่นที่แผ่กระจายออกทุกทิศทาง หน้าคลื่นจึงเป็นผิวโค้งของทรงกลม แต่เมื่อพิจารณา ณ ตำแหน่งหนึ่งบนหน้าคลื่นที่มีบริเวณแคบ จึงอาจถือว่าหน้าคลื่นดังกล่าวเป็นระนาบ

แหล่งกำเนิดคลื่นอาพันธ์ใหม่และคลื่นจากแหล่งกำเนิดเหล่านี้เมื่อพบกันจะแทรกสอดแบบทำลายหรือเสริม จึงทำให้เกิดแถบมืด แถบสว่าง โดยแถบสว่างกลางจะกว้างและสว่างมากที่สุด อนึ่งถ้าความกว้างของสลิตเพิ่ม ความกว้างของแถบสว่างกลางจะแคบลง แต่ถ้าความกว้างของสลิตแคบลง ความกว้างของแถบสว่างกลางก็จะเพิ่ม ดังรูป 13.6 ข. ส่วนแถบสว่างที่อยู่ถัดไปจะมีความสว่างลดลงๆ ตามลำดับดังปรากฏในกราฟรูป 13.6 ก. การเกิดแถบมืดแถบสว่าง ณ ตำแหน่งต่างๆ สามารถอธิบายได้ดังนี้



รูป 13.8 การวิเคราะห์การเกิดแถบมืดแถบสว่างต่างๆ บนฉากเมื่อแสงผ่านสลิตเดี่ยว

สำหรับสาเหตุการเกิดแถบสว่างที่ O ซึ่งเป็นจุดกึ่งกลางฉากที่อยู่ไกลจากสลิต อธิบายได้ดังนี้ ตามรูป 13.8 ตามหลักของฮอยเกนส์ทุกจุดบนสลิตเดี่ยว AC จะทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีเฟสตรงกันและกระจายแสงออกโดยรอบ O ห่างจากทุกคู่ จุดบน AB และ AC เท่ากัน ดังนั้นคลื่นแสงจากทั้งสองส่วนนี้ จึงแทรกสอดแบบเสริมกันตลอดเวลา จุด O จึงเป็นจุดกึ่งกลางของแถบสว่าง ดังแสดงในรูป 13.7 ก.

ในการหาตำแหน่งของแถบมืดนั้น จะเริ่มพิจารณาแถบมืดที่ 1 คือที่ P ในรูป 13.8 ให้แบ่งสลิตเดี่ยวออกเป็น 2 ส่วนเท่าๆ กัน แล้วพิจารณาคลื่นแต่ละคู่ที่มาหักล้างกันที่จุด P ให้จุด B เป็นจุดกึ่งกลางระหว่างจุด A กับจุด C ถ้าระยะทางที่คลื่นจาก B และ A เคลื่อนที่ถึงฉากที่จุด P ต่างกันเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น คลื่นทั้งสองที่ P จะมีเฟสต่างกัน 180 องศา จึงทำให้เกิดการแทรกสอดแบบหักล้างกัน และถ้าพิจารณาคลื่นคู่อื่นๆที่ออกจากแหล่งกำเนิดซึ่งอยู่ถัดจาก A และ B ลงมาเป็นระยะเท่าๆ กัน เมื่อคลื่นเหล่านั้นเคลื่อนที่มาถึงจุด P คลื่นแต่ละคู่จะมีเฟสต่างกัน 180 องศา ดังนั้นจุด P จะเป็นตำแหน่งที่คลื่นทั้งหมดแทรกสอดแบบ

หักล้างกัน จุด P จึงเป็นจุดมืด เมื่อลาก AD ตั้งฉากกับ BP ระยะ BD จะเท่ากับผลต่างของ BP กับ AP

$$BP - AP = BD$$

ถ้าให้มุม $PBO = \theta$ และ P อยู่ไกลมาก ดังนั้น มุม $BAD = \theta$ ด้วย

พิจารณารูปสามเหลี่ยม ABD

จะได้ $AB\sin\theta = BD$

และ $BP - AP = \frac{\lambda}{2}$ (λ เป็นความยาวคลื่นแสง)

นั่นคือ $AB\sin\theta = \frac{\lambda}{2}$

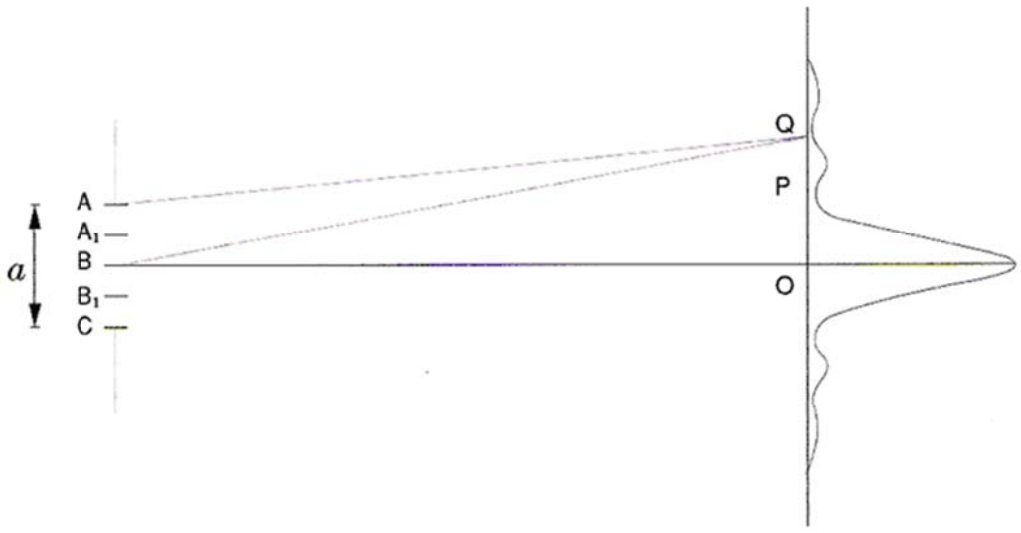
ถ้ากำหนดให้ความกว้างของสลิตเดี่ยว $= a$ จะได้

$$AB = \frac{a}{2}$$

ดังนั้น $$\frac{a}{2}\sin\theta = \frac{\lambda}{2}$$

จะได้ $$a\sin\theta = \lambda$$

ในการหาแถบมืดที่ 2 ที่ Q พิจารณาแบ่งความกว้างของสลิตเป็น 4 ส่วน เท่าๆ กัน คือให้ A_1 และ B_1 เป็นจุดแบ่งครึ่ง AB และ BC ตามลำดับ ดังรูป 13.9



รูป 13.9 การแบ่งสลิตเดี่ยวเป็น 4 ส่วนเท่าๆ กัน เพื่อหาแถบมืดที่ 2

ในช่วง AA_1 และ A_1B พิจารณาคลื่นจากแหล่งกำเนิดแสง A กับ A_1 และทุกคู่ที่อยู่ถัดจาก A และ A_1 ลงมาเท่ากัน เมื่อแทรกสอดแบบหักล้างกันที่ Q และในทำนองเดียวกันสำหรับคลื่นจากแหล่งกำเนิดแสงทุกคู่ ในช่วง BB_1 และ B_1C ดังนั้นเมื่อพิจารณาในทำนองเดียวกันกับการหาแถบมืดที่ P จะได้

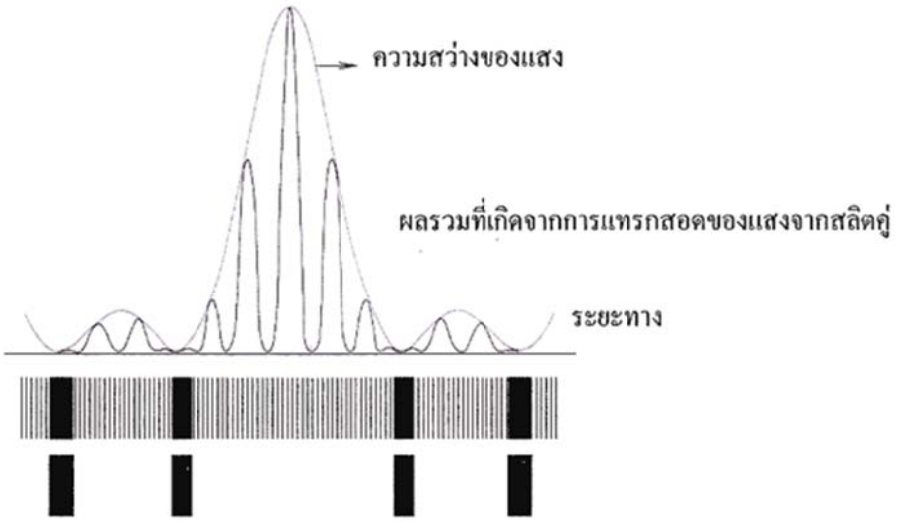
$$\frac{a}{4}\sin\theta = \frac{\lambda}{2}$$

นั้นคือ $$a\sin\theta = 2\lambda$$

หรือถ้าจะหาแถบมืดที่ 3 ให้แบ่งสลิตออกเป็น 6 ส่วนเท่ากัน แล้วใช้วิธีการเดียวกับข้างต้น สามารถสรุปเป็นเงื่อนไขทั่วไปสำหรับการเกิดแถบมืดหรือการแทรกสอดแบบหักล้างของปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนเมื่อแสงผ่านสลิตเดี่ยวได้ดังนี้

$$a\sin\theta = n\lambda \quad (\text{เมื่อ } n = 1, 2, 3,\ldots) \qquad \textbf{13.4}$$

ปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนของแสงโดยสลิตเดี่ยวและการแทรกสอดของแสงโดยสลิตคู่จะเกิดขึ้นพร้อมกันเสมอ เมื่อพิจารณาแถบมืดและแถบสว่างจากสลิตคู่จะพบว่าอยู่ใกล้กันยิ่งกว่าของสลิตเดี่ยว เนื่องจากแสงเลี้ยวเบนเมื่อผ่านสลิตแต่ละช่อง โดยมีแถบมืดและแถบสว่างเหมือนกับเหตุการณ์ที่เห็นจากการที่แสงผ่านสลิตเดี่ยวแล้วแสงที่เลี้ยวเบนโดยสลิตทั้งสองนี้ก็จะแทรกสอดกันทำให้ได้แถบมืดและแถบสว่างขนาดเล็กเกิดภายในแถบสว่างจากสลิตเดี่ยว ดังรูป 13.10



รูป 13.10 ความสว่างซึ่งเป็นผลจากการเลี้ยวเบนและการแทรกสอดของแสงที่ผ่านสลิตคู่

ตัวอย่าง 13.3 แสงมีความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร ตกตั้งฉากผ่านสลิตเดี่ยวที่กว้าง 500 ไมโครเมตร ขอบของแถบสว่างกลางอยู่เหนือแนวกลางเป็นมุมเท่าใด

วิธีทำ ความยาวคลื่น $\lambda = 600\times10^{-9}\ \mathrm{m}$

ความกว้างของช่อง $\mathrm{a} = 500\times10^{-6}\ \mathrm{m}$

ขอบของแถบสว่างกลางอยู่ตรงกับแถบมืดแถบแรกนับจากแนวกลาง ให้ θ เป็นมุมที่แถบมืดแถบแรกเบนจากแนวกลาง

จาก $\mathrm{a}\sin\theta = \lambda$

$500\times10^{-6}\ \mathrm{m}\ \sin\theta = 600\times10^{-9}\ \mathrm{m}$

$$\sin\theta = \frac{600\times10^{-9}\ \mathrm{m}}{500\times10^{-6}\ \mathrm{m}}$$

$$= 1.2\times10^{-3}$$

$$\sin\theta = 0.0012$$

θ = 0.0012 เรเดียน หรือ 0.0688 องศา

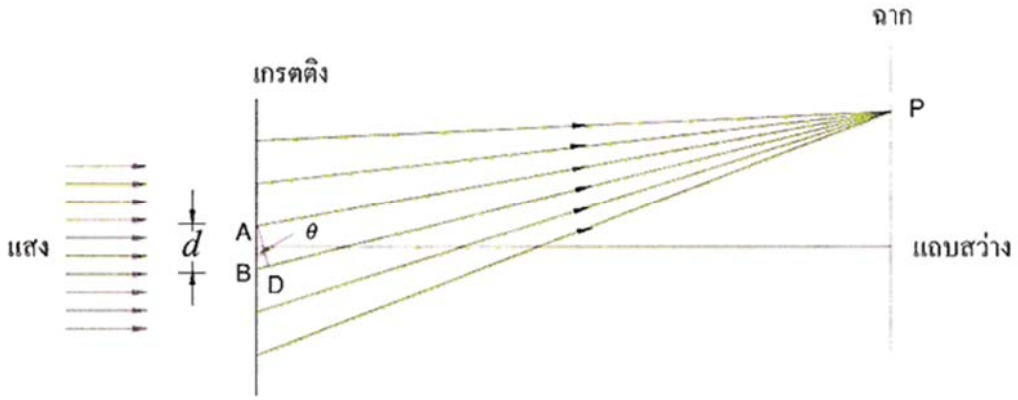
คำตอบ ขอบแถบสว่างกลางเบนไปจากแนวกลางทำมุม 0.0688 องศา

จากการศึกษาสมบัติการแทรกสอดของแสงจากสลิตคู่ ได้ความสัมพันธ์ $d\sin\theta = n\lambda = \frac{dx}{D}$ สำหรับกรณีแถบสว่าง และเมื่อพิจารณาแถบสว่างจะเห็นได้ว่า ถ้าระยะจากสลิตถึงฉาก D คงตัว เมื่อ d มีค่าน้อยลง ระยะจากแถบสว่างใดๆ ถึงแถบสว่างกลาง x จะมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อ d มีค่ามากขึ้นระยะจากแถบสว่างใดๆ ถึงแถบสว่างกลางจะมีค่าลดลงและถ้าระยะจากแถบสว่างใดๆ ถึงแถบสว่างกลางมีค่าน้อยลงมาก คือแถบสว่างอยู่ใกล้ชิดกันมาก จะทำให้วัดขนาดได้ยาก ดังนั้นเพื่อให้มีการวัดปริมาณต่างๆ ได้ง่าย จึงใช้วิธีลดระยะ d และเพิ่มจำนวนสลิตให้มากขึ้นและให้แต่ละสลิตมีขนาดเท่ากัน อุปกรณ์ที่ว่านี้คือเกรตติงนั่นเอง

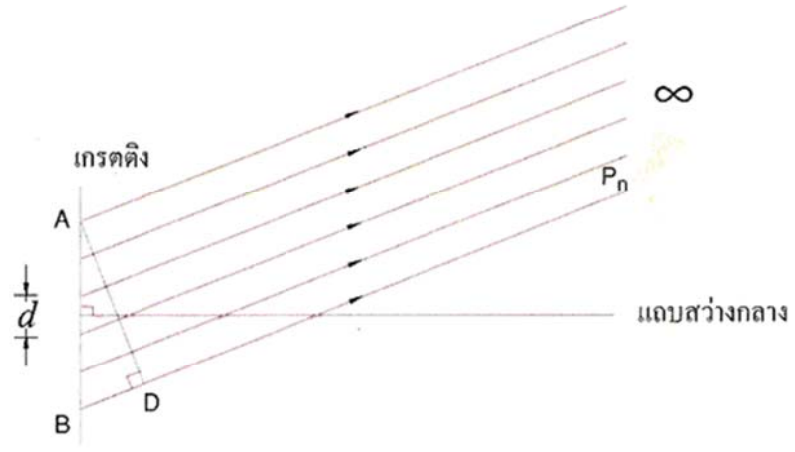
13.3 เกรตติง

เราทราบแล้วว่า สลิตคู่เป็นอุปกรณ์ที่ใช้หาความยาวคลื่นแสง นอกจากสลิตคู่แล้ว ยังมีอุปกรณ์อีกชนิดหนึ่งที่ใช้หาความยาวคลื่นแสงได้ อุปกรณ์นั้น คือ เกรตติง เกรตติงมีลักษณะเป็นแผ่น ซึ่งประกอบด้วยช่องขนาดเล็กจำนวนมากมาย จำนวนช่องของเกรตติงอาจมีตั้งแต่ 1,000 ถึง 10,000 ในช่วงความยาว 1 เซนติเมตร โดยช่องมีขนาดแคบมากและอยู่ห่างกันเท่ากัน

เมื่อให้แสงความยาวคลื่นเดียวตกกระทบเกรตติง แสงบางส่วนจะเบนออกจากแนวไปปรากฏบนฉากเป็นแถบสว่างเล็กๆ แถบสว่างนี้เกิดจากการแทรกสอดของแสงจากช่องอื่นๆ ทุกช่อง ถ้าลำแสงขนานตกตั้งฉากกับเกรตติง ช่องต่างๆเหล่านี้จะเป็นแหล่งกำเนิดแสงอาพันธ์ที่ให้คลื่นแสงทุกคลื่นที่มีเฟสตรงกัน การหาตำแหน่งของแถบสว่างใช้วิธีการเดียวกับที่กล่าวมาแล้ว โดยถือว่า ฉากอยู่ไกลจากเกรตติงมากจนแสงจากช่องแต่ละช่องของเกรตติง ซึ่งเคลื่อนที่ไปที่ฉากสามารถประมาณได้ว่าเป็นแสงขนาน ถ้าพิจารณาช่อง 2 ช่องที่อยู่ติดกัน เมื่อช่องแต่ละช่องเป็นแหล่งกำเนิดแสง โดยใช้เหตุผลเดียวกันกับที่เคยใช้สำหรับการแทรกสอดของสลิตคู่ จากรูป 13.11 พิจารณาตำแหน่ง P ซึ่งเป็นแถบสว่างที่ 1 ระยะทางที่แสงจากช่องแต่ละช่องของเกรตติงถึง P จะไม่เท่ากัน



ก. เสริมกันที่ P



ข. P อยู่ไกลมากจนแสงที่ออกจากช่องต่าง ๆ อาจถือได้ว่าขนานกัน

รูป 13.11 แสงที่ผ่านเกรตติงจะเลี้ยวเบนและแทรกสอดแบบเสริมกันที่ P

ผลต่างระหว่างระยะทางที่แสงเคลื่อนที่ไปถึง P จากช่อง 2 ช่องที่อยู่ถัดกัน เช่น A กับ B หรือ B กับ C หรือ C กับ D จะเท่ากับ $d\sin\theta$ เมื่อ d คือระยะห่างระหว่างช่อง ถ้า P เป็นแถบสว่างที่ n ผลต่างของระยะทางดังกล่าวจะเท่ากับ $n\lambda$ ดังนั้น สรุปเงื่อนไขสำหรับแถบสว่างที่ตำแหน่งใดๆ เป็น

$$d\sin\theta = n\lambda \quad \text{เมื่อ } n = 0, 1, 2, \qquad (13.5)$$

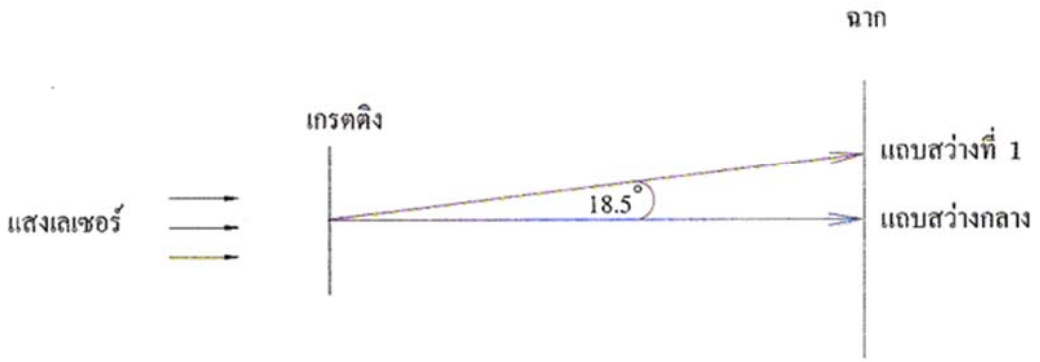
จากสมการ $d\sin\theta = n\lambda$ จะเห็นได้ว่าถ้าให้แสงที่มีความยาวคลื่นต่างๆกันผ่านเกรตติงแถบสว่างของแสงแต่ละความยาวคลื่นจะเกิด ณ ตำแหน่ง ๆ ต่างกัน ดังนั้นถ้าให้แสงขาวผ่านเกรตติงจะพบว่าแถบสว่างของแสงสีต่างๆกันจะเกิดขึ้น ณ ตำแหน่งต่างๆกัน เพราะแสงสีต่างๆ มีความยาวคลื่นต่างกัน และแสงแต่ละสีมีความยาวคลื่นเท่าไรหาได้จากการทดลอง 13.3

จากการทดลอง 13.3 เมื่อให้แสงขาวจากหลอดไฟฟ้าผ่านเกรตติงจะได้แถบสีเกิดขึ้น โดยที่แสงสีต่างๆ ในแถบสีนั้นมีความยาวคลื่นต่างกัน เช่น แสงสีม่วงมีความยาวคลื่นน้อยที่สุด และแสงสีแดงมีความยาวคลื่นมากที่สุด การเรียงแถบสีต่างๆ โดยแยกออกตามความยาวคลื่นของแสงเรียกว่า ***สเปกตรัม*** (spectrum) เช่น สเปกตรัมที่ได้จากการให้แสงอาทิตย์ผ่านปริซึม ซึ่งจะแสดงว่าแสงอาทิตย์ประกอบด้วยแสงสีต่างๆ มารวมกัน หรือกล่าวได้ว่า แสงอาทิตย์หรือบางครั้งเรียกแสงขาวเกิดจากการรวมกันของแสงที่มีความยาวคลื่นต่างๆกัน ความยาวคลื่นของแสงสีต่างๆ แสดงไว้ในตาราง 13.1

ตาราง 13.1 ความยาวคลื่นของแสงสีต่าง ๆ

แสงสี	ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)
ม่วง	380 – 450
น้ำเงิน	450 – 500
เขียว	500 – 570
เหลือง	570 – 590
แสด	590 – 610
แดง	610 – 760

ตัวอย่าง 13.4 ฉายแสงเลเซอร์ซึ่งเป็นแสงสีเดียวตกกระทบเกรตติงแบบเลี้ยวเบนในแนวตั้งฉาก เกรตติงมี 5,000 ช่องต่อเซนติเมตร ทำให้เกิดแถบสว่างที่ 1 ทำมุม 18.5 องศา กับแนวกลาง แสงเลเซอร์มีความยาวคลื่นเท่าใด



รูป 13.12 สำหรับตัวอย่าง 13.4

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

$$\mathrm{d} = \frac{10^{-2}}{5{,}000}\ \mathrm{m}, \quad \theta = 18.5°, \quad \mathrm{n} = 1, \quad \lambda = ?$$

แทนค่า $$\frac{10^{-2}}{5{,}000}\sin 18.5° = 1\times\lambda$$

$$\lambda = \frac{10^{-2}\times 0.317}{5{,}000}\ \mathrm{m}$$

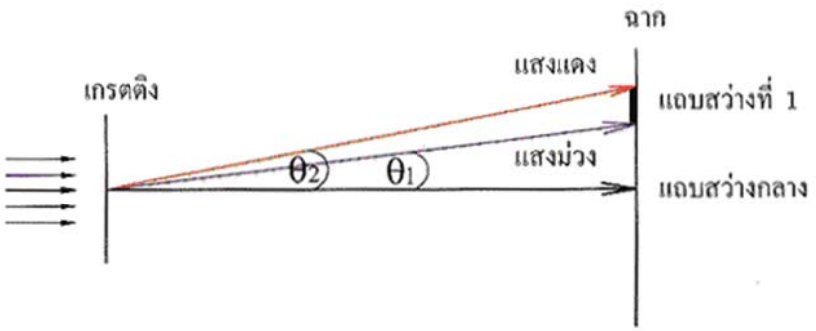
$$= 634\times 10^{-9}\ \mathrm{m}$$

คำตอบ แสงเลเซอร์มีความยาวคลื่น 634 นาโนเมตร

ตัวอย่าง 13.5 ฉายแสงขาวตกกระทบเกรตติงแบบเลี้ยวเบนในแนวตั้งฉาก ถ้าเกรตติงมี 10,000 ช่องต่อเซนติเมตร แถบสว่างที่ 1 มีความกว้างโดยคิดเป็นมุมโตกี่องศา

กำหนดความยาวคลื่นของแสงสีแดงเท่ากับ 700 นาโนเมตร และความยาวคลื่นของแสงสีน้ำเงินเท่ากับ 400 นาโนเมตร

วิธีทำ



รูป 13.13 สำหรับตัวอย่าง 13.5

เมื่อแสงขาวผ่านเกรตติงจะเกิดการเลี้ยวเบน แสงแต่ละสีของแสงขาวเลี้ยวเบนไม่เท่ากัน แสงสีแดงเลี้ยวเบนเป็นมุมใหญ่ที่สุดและแสงสีม่วงเลี้ยวเบนเป็นมุมเล็กที่สุด แถบสว่างที่ 1 จะปรากฏเป็นสเปกตรัมของแสงขาว

หาค่า θ_1 ของแสงสีม่วง

จาก $$d\sin\theta = n\lambda$$

$$d = \frac{10^{-2}}{10{,}000}\text{m},\quad n = 1,\quad \lambda = 400\times10^{-9}\text{m},\quad \theta_1 = ?$$

แทนค่า $$\frac{10^{-2}}{10{,}000}\text{m}\sin\theta_1 = 1\times400\times10^{-9}\text{m}$$

$$\sin\theta_1 = 0.400$$

$$\theta_1 = 23.58^\circ$$

หาค่า θ_2 ของแสงสีแดง

$$d = \frac{10^{-2}}{10{,}000}\text{m},\qquad \text{n} = 1,\quad \lambda = 700\times10^{-9}\text{m},\quad \theta_2 = ?$$

แทนค่า $$\frac{10^{-2}}{10{,}000}\text{m}\sin\theta_2 = 1\times700\times10^{-9}\text{m}$$

$$\sin\theta_2 = 0.700$$

$$\theta_2 = 44.43^\circ$$

ความกว้างของแถบสว่างที่ 1 คิดเป็นมุม $= 44.43^\circ - 23.58^\circ$

$$= 20.85^\circ$$

คำตอบ แถบสว่างที่ 1 ช่องรับมุม 20.9°

13.4 การกระเจิงของแสง

ตอนกลางวันในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส เราจะเห็นท้องฟ้าส่วนใหญ่เป็นสีฟ้า แต่ขณะดวงอาทิตย์ขึ้นหรือตก เราจะเห็นท้องฟ้าบริเวณใกล้ๆ ดวงอาทิตย์เป็นสีแดงเข้ม ปรากฏการณ์เช่นนี้อธิบายได้อย่างไร

โลกมีบรรยากาศห่อหุ้มอยู่และบรรยากาศประกอบด้วยฝุ่นและโมเลกุลต่างๆ หลายชนิด เมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบอนุภาคเหล่านี้ เช่น กระทบโมเลกุลของอากาศ แสงจะถูกโมเลกุลของอากาศกระจัดกระจายไปโดยรอบ เราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า **การกระเจิง**ของแสง พบว่าแสงที่มีความยาวคลื่นน้อยเมื่อกระทบโมเลกุลของอากาศจะกระเจิงได้ดีมาก คือถ้าความยาวคลื่นยิ่งสั้น แสงก็จะยิ่งกระเจิงได้ดีมาก ในบรรดาแสงทั้งหมดที่ตามองเห็น แสงสีม่วงซึ่งมีความยาวคลื่นสั้นที่สุดกระเจิงได้ดีที่สุด ส่วนแสงสีน้ำเงินกระเจิงได้ดีรองจากแสงสีม่วง

เหตุใดในเวลากลางวันเราจึงเห็นท้องฟ้าเป็นสีน้ำเงิน ทั้งๆ ที่แสงสีน้ำเงินกระเจิงได้ดีน้อยกว่าแสงสีม่วง ทั้งนี้เป็นเพราะประสาทตาของเรารับแสงสีน้ำเงินได้ดีกว่าแสงสีม่วงในตอนเช้าหรือตอนเย็น ขณะที่ดวงอาทิตย์กำลังจะขึ้นหรือจวนจะตก ถ้าเรามองดูท้องฟ้าส่วนที่อยู่ใกล้ดวงอาทิตย์จะเห็นเป็นสีแดง ทั้งนี้เนื่องจากขณะนั้นแสงอาทิตย์ต้องเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศเป็นระยะทางไกล จึงจะถึงตาเรา แสงสีน้ำเงินซึ่งกระเจิงได้ดีจึงกระจายหายไปทำให้มีเฉพาะแต่แสงย่านสีแดงเท่านั้นที่มาถึงตาเรา และเมื่อแสงสีแดงตกกระทบก้อนเมฆจะสะท้อนกลับมาสู่ตาเรา ทำให้ตาเห็นท้องฟ้าเป็นสีแดงไป

รูป 13.14 การเห็นดวงอาทิตย์ขณะขึ้นหรือตกเป็นสีแดงเนื่องจากการกระเจิง

ทฤษฎีฟิสิกส์ปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์แถลงว่า แสงมีสมบัติของทั้งคลื่นและอนุภาค การจะแสดงสมบัติด้านใดขึ้นกับอุปกรณ์ที่เราจัดให้แสดง ถึงกระนั้นแล้วก็ไม่สามารถแสดงสมบัติทั้งสองด้านพร้อมกัน ซึ่งนักเรียนจะได้ศึกษาในขั้นสูงต่อไป

13.4.1 ปรากฏการณ์เรือนกระจก

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง แสงจากดวงอาทิตย์ประกอบด้วย แสงหลายชนิด ทั้งที่ตามองเห็น และมองไม่เห็น แสงที่ตามองไม่เห็น ได้แก่ รังสีอัลตราไวโอเลต และรังสีอินฟราเรด คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเหล่านี้ เมื่อเคลื่อนที่ผ่านบรรยากาศของโลกคลื่นบางส่วนจะถูกบรรยากาศดูดกลืนและบางส่วนจะสะท้อนกลับสู่อวกาศ อีกหลายส่วนจะเคลื่อนที่ผ่านถึงผิวโลก และผิวโลกจะสะท้อนพลังงานแสงส่วนนี้บ้างและแสงที่เหลือก็จะถูกผิวโลกดูดกลืนหมด

แสงที่ผิวโลกดูดกลืนส่วนใหญ่เป็นแสงที่ตามองเห็นการดูดกลืนแสงทำให้ผิวโลกร้อนขึ้น เนื่องจากวัตถุร้อนทุกชนิดเปล่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกโดยรอบวัตถุ ยิ่งร้อนพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เปล่งออกมาก็ยิ่งมาก สำหรับอุณหภูมิโดยประมาณที่ผิวโลก (30°C) คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าส่วนใหญ่ที่เปล่งออกมาจากผิวโลกจะเป็นรังสีอินฟราเรด และเนื่องจากความถี่ของรังสีอินฟราเรดตรงกับความถี่ธรรมชาติของโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำในบรรยากาศ ดังนั้นเมื่อรังสีนี้ตกกระทบกับโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำก็จะถูกดูดกลืน ทำให้โมเลกุลเหล่านี้มีพลังงานเพิ่มขึ้นจึงปล่อยรังสีอินฟราเรดกลับออกมาทุกทิศทาง รังสีอินฟราเรดนี้ส่วนหนึ่งจะถูกโมเลกุลชนิดอื่นๆ ในบรรยากาศดูดกลืนแต่อีกส่วนหนึ่งจะหนีออกสู่อวกาศและส่วนที่เหลือจะกลับสู่พื้นโลกและถูกดูดกลืน ผิวโลกจึงร้อนขึ้นอีกทำให้เกิดกระบวนการซ้ำเดิมจนเป็นเหตุให้ผิวโลกและบรรยากาศใกล้ผิวโลกร้อนกว่าที่ควร

เหตุการณ์ที่บรรยากาศใกล้ผิวโลกร้อนกว่าปกติด้วยวิธีการดังกล่าวข้างต้น เรียกว่า **ปรากฏการณ์เรือนกระจก** (Greenhouse Effect) เหตุที่เรียกเช่นนี้ เพราะคล้ายสาเหตุที่ทำให้เกิดมีลักษณะเหตุการณ์ที่เกิดในเรือนกระจก ซึ่งใช้เพาะปลูกพืช กล่าวคือ กระจกที่ใช้ทำเรือนกระจก ยอมให้แสงอาทิตย์ที่ตามองเห็นผ่านเข้าไป แต่ไม่ยอมให้รังสีอินฟราเรดที่เกิดภายในเรือนกระจกผ่านออกมา ดังนั้นกระจกจะทำหน้าที่กักเก็บรังสีอินฟาเรดไว้ไม่ให้เล็ดลอดออกไปและกักกั้นไม่ให้อากาศร้อนถูกถ่ายเทออก อากาศภายในเรือนกระจกจึงร้อนกว่าปกติ รถยนต์ที่ปิดกระจกมิดชิดเวลาจอดไว้กลางแจ้ง ก็จะเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจกได้เช่นกัน

ปรากฏการณ์เรือนกระจกของบรรยากาศโลกสร้างประโยชน์ให้กับสิ่งแวดล้อมบนโลก ถ้าปราศจากปรากฏการณ์เรือนกระจก อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกอาจเท่ากับ 266 K หรือ -7 °C ได้ ซึ่งจะทำให้โลกมีบริเวณที่เป็นน้ำแข็งมีพื้นที่กว้างขวางกว่าที่เป็นอยู่ และบริเวณที่อยู่อาศัยของมนุษย์จะมีขนาดเล็กกว่าที่เป็นอยู่ขณะนี้

อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันมนุษย์ใช้พลังงานประเภทน้ำมันและถ่านหินมากขึ้นทุกวัน การเผาผลาญน้ำมันและถ่านหินจะทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ในบรรยากาศเพิ่มมากขึ้นๆ ปรากฏการณ์เรือนกระจกจึงรุนแรงขึ้นๆ ซึ่งมีผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกสูงขึ้นๆ นี่จึงเป็นการคุกคามที่น่ากลัวมากต่อภูมิอากาศของโลก จนนักสภาวะแวดล้อมทั่วโลกกำลังจับตามอง และจากการวิเคราะห์ได้พบว่า การวัดและการทำนายอุณหภูมิของบรรยากาศโลกที่จะเพิ่มขึ้นในอนาคตเป็นเรื่องยาก ทั้งนี้เพราะโลกมีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและถ้าอุณหภูมิเฉลี่ยของบรรยากาศเพิ่มขึ้นอีก 4°C น้ำแข็งที่ขั้วโลกเหนือและขั้วโลกใต้ก็จะละลายเป็นน้ำมากขึ้น ทำให้ระดับน้ำทะเลสูงขึ้นมาก ท่วมบริเวณที่ราบลุ่มใกล้ทะเลทั่วโลก เช่น บริเวณกรุงเทพฯ เป็นต้น ซึ่งจะทำให้เกิดความเสียหายต่อประชากรโลกเป็นอย่างยิ่ง

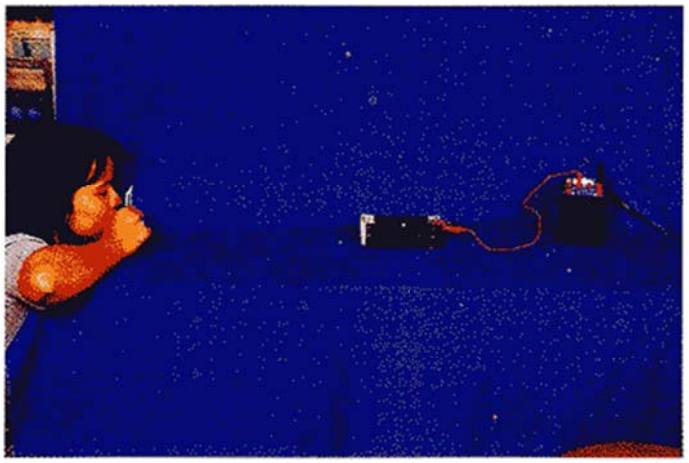
การทดลองและกิจกรรม

การทดลอง 13.1 การแทรกสอดของแสง

จุดประสงค์ เพื่อศึกษาภาพที่เกิดจากการแทรกสอด

วิธีทดลอง ต่อสายไฟตรงที่อยู่ในกล่องแสงเข้ากับหม้อแปลงไฟที่มีโวลต์ต่ำ โดยใช้ความต่างศักย์ประมาณ 8 - 10 โวลต์ ใช้แผ่นกรองแสงสีแดงเสียบที่ร่องของกล่องแสง เพื่อกรองแสงจากกล่องแสงให้เป็นแสงสีแดงบริสุทธิ์สำหรับผ่านสลิต มองไส้หลอดไฟผ่านสลิตคู่ ที่อยู่ห่างกันประมาณ 50 ไมโครเมตร โดยให้สลิตอยู่ใกล้ตา และให้ช่องสลิตขนานกับไส้หลอด สังเกตและบันทึกภาพที่เห็น ทำการทดลองซ้ำโดยใช้สลิตคู่ที่มีระยะห่างระหว่างช่องเท่ากับ 100 และ 250 ไมโครเมตร สังเกตและบันทึกภาพที่เกิดขึ้น

ทำการทดลองซ้ำโดยไม่ใช้แผ่นกรองแสงสีแดง (ไม่ต้องบันทึกภาพ)



รูป 13.15 การจัดตั้งอุปกรณ์แสดงการแทรกสอดของสลิตคู่

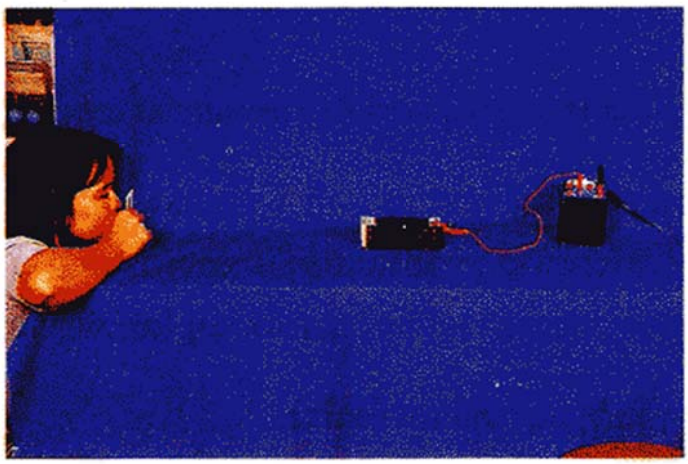
- ☐ ในกรณีที่ใช้แสงสีแดงผ่านสลิตคู่ที่มีระยะห่างระหว่างช่อง 50, 100 และ 250 ไมโครเมตร ภาพที่เห็นมีลักษณะอย่างไร มีความแตกต่างกันหรือไม่ อธิบาย
- ☐ เมื่อใช้แผ่นกรองแสงสีแดงเสียบที่กล่องแสง ภาพการแทรกสอดของแสงที่ได้ต่างจากกรณีที่ไม่ใช้แผ่นกรองแสงสีแดงอย่างไร

การทดลอง 13.2 การเลี้ยวเบนของแสง

จุดประสงค์ เพื่อศึกษาการเลี้ยวเบนของแสง

วิธีทดลอง ต่อหลอดไฟไส้ตรงที่อยู่ในกล่องแสงเข้ากับหม้อแปลงไฟโวลต์ต่ำ โดยใช้ความต่างศักย์ประมาณ 8 -10 โวลต์ ใช้แผ่นกรองแสงสีแดงเสียบที่ร่องของกล่องแสง เพื่อกรองแสงจากกล่องแสงให้เป็นแสงสีแดงบริสุทธิ์ มองไส้หลอดไฟฟ้าผ่านสลิตเดี่ยวที่มีความกว้างของสลิต 50 ไมโครเมตร สังเกตและบันทึกภาพที่เห็น ให้สังเกตบริเวณที่ตรงกับไส้หลอดไฟเป็นพิเศษ

ทำการทดลองซ้ำโดยไม่ใช้แผ่นกรองแสงสีแดง (ไม่ต้องบันทึกภาพ)



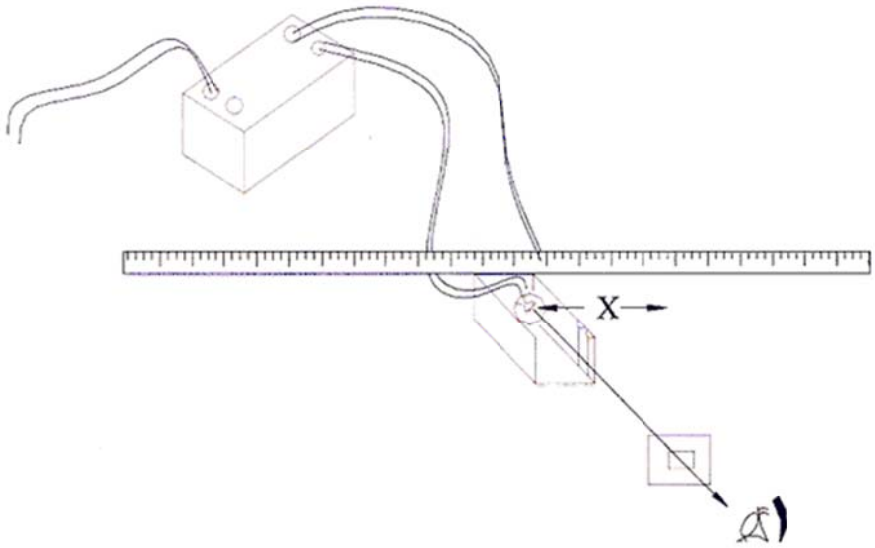
รูป 13.16 การจัดอุปกรณ์แสดงการเลี้ยวเบนของแสงผ่านสลิตเดี่ยว

- ☐ เพราะเหตุใด แถบสว่างกลางจึงมีขนาดใหญ่กว่าความกว้างของช่องสลิต
- ☐ เมื่อใช้แผ่นกรองแสงสีแดงเสียบที่กล่อง ภาพการเลี้ยวเบนของแสงที่ได้แตกต่างกับกรณีที่ไม่ใช้แผ่นกรองแสงสีแดงอย่างไร

การทดลอง 13.3 เกรตติง

จุดประสงค์ เพื่อหาความยาวคลื่นของแสงโดยใช้เกรตติง

วิธีทดลอง ต่อหลอดไฟจากกล่องแสงเข้ากับหม้อแปลงไฟโวลต์ต่ำ โดยใช้ความต่างศักย์ 10 - 12 โวลต์ วางไม้เมตรบนกล่องแสงในแนวตั้งฉากกับความยาวของกล่องแสง โดยให้ขีด 50.0 เซนติเมตรอยู่ตรงกับไส้หลอดพอดี มองไส้หลอดไฟฟ้าผ่านเกรตติง โดยให้เกรตติงอยู่ห่างจากไส้หลอดประมาณ 1.0 เมตร ดังรูป 13.17



รูป 13.17 การจัดอุปกรณ์เพื่อหาความยาวคลื่นของแสง

วัดระยะห่างของแสงสีต่างๆ ในแถบสว่างที่ 1 ของแสงสีต่างๆ โดยวัดจากแนวกลาง คือ ขีด 50.0 เซนติเมตร ให้วัดระยะห่าง x ของแถบสว่างกลางทั้งสองข้าง (เพื่อหาระยะห่างเฉลี่ย) บันทึกค่าในตารางคำนวณหาความยาวคลื่นของแสงสีต่างๆ โดยใช้ความสัมพันธ์ $d \sin\theta = \lambda$

☐ แสงสีต่างๆ มีความยาวคลื่นเท่าใดบ้าง

วิธีการทดลอง ตอนที่ 2

ใช้แผ่นกระดาษแข็งสีขาวที่กว้างประมาณ 1 เมตรวางตั้งในแนวดิ่งเป็นฉากรับแสง วางแผ่นเกรตติงในแนวดิ่งบนโต๊ะและให้อยู่ห่างจากฉากประมาณ 50 เซนติเมตร ฉายแสงเลเซอร์จากอุปกรณ์เลเซอร์ไดโอดผ่านเกรตติง จะปรากฏภาพแสงเลเซอร์ ณ ตำแหน่งต่างๆ บนฉาก

รูป 13.18 การจัดอุปกรณ์เพื่อวัดความยาวคลื่นแสงเลเซอร์

วัดระยะห่างระหว่างแถบสว่างที่ 1 กับแถบสว่างกลาง โดยวัดระยะห่างทั้งสองข้างของแถบสว่างที่ 1 (เพื่อหาระยะห่างเฉลี่ย) บันทึกค่าในตาราง คำนวณหาความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์โดยใช้ความสัมพันธ์ $d\sin\theta = \lambda \quad (n = 1)$

☐ แสงเลเซอร์ที่ใช้ในการทดลองมีความยาวคลื่นเท่าใด

โจทย์แบบฝึกหัดบทที่ 13

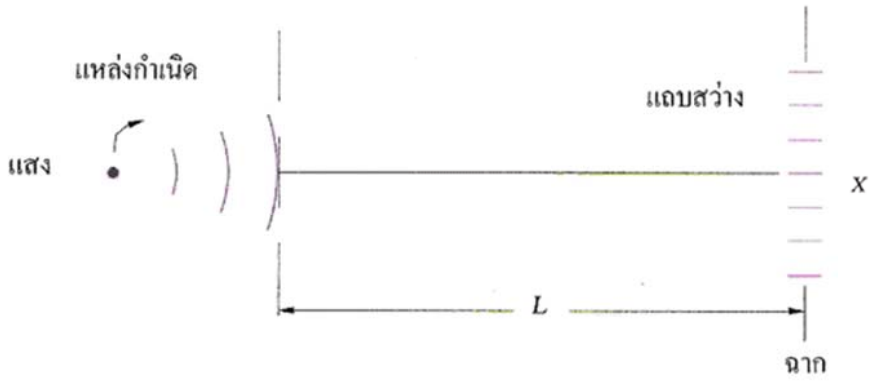
คำถาม

1. จงอธิบายเหตุใดเราจึงไม่เห็นการแทรกสอดของแสงจากเทียนไข 2 ดวง ที่วางไว้ใกล้กัน
2. แสงขาวตกกระทบเกรตติงในแนวตั้งฉากและเกิดภาพแทรกสอดบนฉาก มุมที่แสงแต่ละสีเบนไปจากแนวกลางขึ้นกับความยาวคลื่นของแสงหรือไม่ เพราะเหตุใด

ปัญหา

โจทย์สำหรับแบบฝึกหัดข้อ 1 - 5

แสงมีความยาวคลื่น 5.9×10^{-7} เมตร ตกกระทบตั้งฉากในแนวสลิตคู่ ถ้าสลิตทั้งสองอยู่ห่างกัน 1.0×10^{-3} เมตร ภาพการแทรกสอดบนฉากที่อยู่ห่างจากสลิตคู่ L เมตร ถ้า x คือระยะที่แถบสว่างแรกอยู่ห่างจากแถบสว่างกลาง



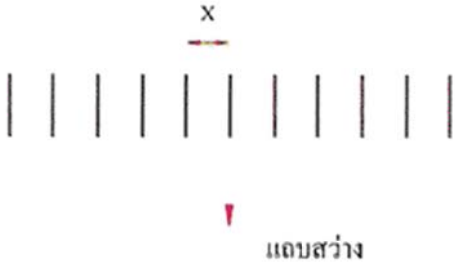
รูปสำหรับแบบฝึกหัดข้อ 1 - 2

1. ถ้า x เท่ากับ 5.9×10^{-3} เมตร L มีค่าเท่าใด
2. ถ้า L มีค่า 1 เมตร x จะมีค่าเท่าใด
3. แสงมีความยาวคลื่น 5.0×10^{-5} เซนติเมตร ตกกระทบสลิตเดี่ยวที่มีความกว้างของช่อง 0.015 เซนติเมตร ในแนวตั้งฉากภาพการเลี้ยวเบนจะปรากฏบนฉากที่อยู่ห่างออกไป 1.30 เมตร แถบสว่างกลางกว้างเท่าใด (เพราะมุมที่แถบมืดเบนไปจากแนวกลางมีขนาดเล็กมาก ดังนั้น $\sin\theta \cong \tan\theta$)

4. ถ้าให้แสงสีเหลืองซึ่งมีความยาวคลื่น 589 นาโนเมตร ผ่านเกรตติง พบว่าแถบสว่างแถบแรกเบนไป 44.1 องศา จากแนวของแถบสว่างกลาง จงหาระยะระหว่างสลิตและจำนวนช่องสลิตต่อเซนติเมตรของเกรตติงที่ใช้
5. ในการเกิดการแทรกสอดของแสงที่มีความยาวคลื่น 7.5×10^{-7} เมตร โดยใช้ช่องขนาดเล็ก 2 ช่อง บนฉากที่อยู่ห่างออกไป 1 เมตร ถ้าต้องการให้แถบสว่าง 2 แถบที่ติดกันอยู่ห่างกัน 1 มิลลิเมตร ช่องทั้งสองจะต้องอยู่ห่างกันเท่าไร (ให้ถือว่าตำแหน่งแถบสว่างเบนไปจากแนวกลางน้อยมาก)

โจทย์สำหรับแบบฝึกหัดข้อ 6 - 7

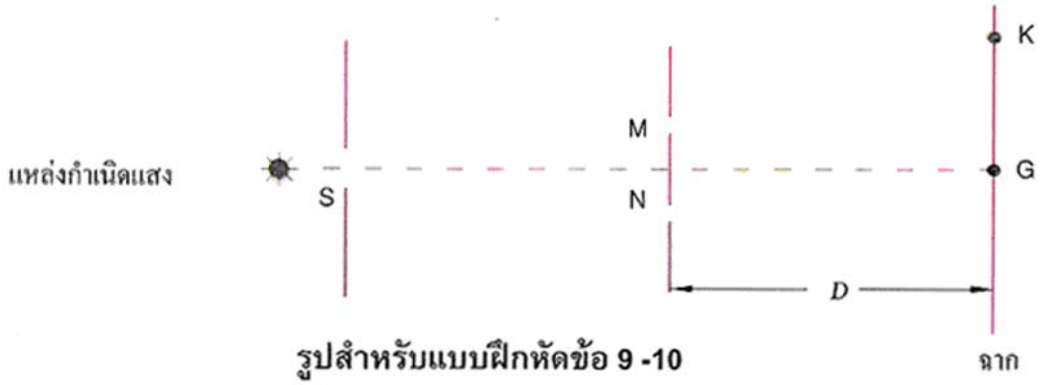
เส้นทึบข้างล่างแทนแถบสว่างของภาพแทรกสอดที่เกิดจากแสงที่มีความยาวคลื่น 6.0×10^{-7} เมตร เมื่อตกกระทบสลิตคู่ในแนวตั้งฉาก ถ้าสลิตทั้งสองอยู่ห่างกัน 2.0×10^{-5} เมตร และฉากรับภาพอยู่ห่างจากสลิต 2.0 เมตร



รูปสำหรับแบบฝึกหัดข้อ 6 - 7

6. ระยะ x มีค่าเท่าใด
7. ถ้าระยะระหว่างสลิตกับฉากเพิ่ม ระยะ x จะเปลี่ยนแปลงอย่างไร
8. ถ้าทำให้แหล่งกำเนิดแสงสว่างขึ้น ระยะ x จะเปลี่ยนแปลงอย่างไร

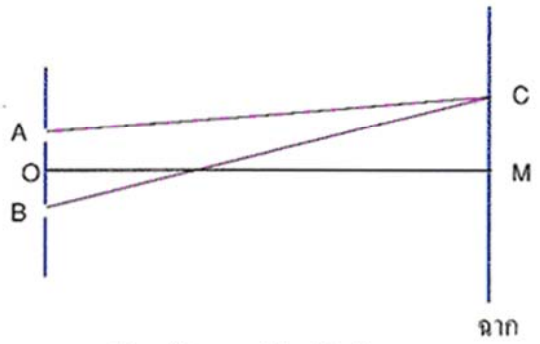
โจทย์สำหรับแบบฝึกหัดข้อ 9-10



รูปสำหรับแบบฝึกหัดข้อ 9 -10

รูปแสดงแผนภาพของการทดลองของยังเรื่องการแทรกสอด ซึ่งมีแหล่งกำเนิดแสงที่ให้แสงส่องผ่านสลิตเดี่ยว S และผ่านสลิตคู่ M กับ N แล้วตกกระทบฉากซึ่งอยู่ห่างจากสลิตคู่ M และ N เป็นระยะ D ถ้าแนวแบ่งครึ่ง MN กระทบฉากที่ตำแหน่ง G และแสงมีความยาวคลื่น λ ถ้า K เป็นจุดๆ หนึ่งบนฉากที่ทำให้ NK - MK = $\frac{\lambda}{2}$

9. ภาพที่ปรากฏบนฉากที่ตำแหน่ง G และ K เป็นอย่างไร
10. ภาพการแทรกสอดบนฉากก็ได้จากการทดลองชุดนี้ เป็นแถบมืดและแถบสว่าง ถ้าต้องการให้แถบสว่างอยู่ใกล้กันมากขึ้น จะต้องทำอย่างไร
11. AB เป็นสลิตคู่ เมื่อมีแสงที่มีความยาวคลื่น λ ตกกระทบสลิตคู่ ในแนวตั้งฉากภาพการแทรกสอดจะปรากฏที่ฉาก ถ้าระยะ AC = $n\lambda$ และ BC = $(n + 3)\lambda$ เมื่อ n เป็นจำนวนเต็มให้ OM เป็นแนวกลาง ภาพแทรกสอดที่ C เป็นแถบสว่างหรือแถบมืดที่เท่าใด



รูปสำหรับแบบฝึกหัดข้อ 11

12. เมื่อใช้แสงสีเขียวที่มีความยาวคลื่น 5.2×10^{-7} เมตร ตกตั้งกระทบสลิตคู่ ในแนวตั้งฉากเกิดภาพแทรกสอดบนฉาก ถ้าแถบสว่าง 2 แถบที่ติดกันอยู่ห่างกัน 0.2 มิลลิเมตร แต่ถ้าใช้แสงสีแดงที่มีความยาวคลื่น 6.5×10^{-7} เมตร แทน แถบสว่าง 2 แถบที่ติดกันจะอยู่ห่างกันกี่มิลลิเมตร
13. ใช้เกรตติงที่มี 5,000 ช่องต่อความยาว 1 เซนติเมตร รับแสงจากหลอดไฟที่อยู่ห่างออกไป 1 เมตร แถบสีม่วงในสเปกตรัมแถบแรกกว้างกี่เซนติเมตร ถ้าแสงสีม่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 380 - 450 นาโนเมตร (ให้ถือว่ามุมที่แสงสีม่วงเบนไปจากแนวกลางมีขนาดเล็กมาก)
14. เมื่อให้แสงที่เปล่งจากหลอดบรรจุไฮโดรเจนตกกระทบแผ่นเกรตติงเลี้ยวเบนอันหนึ่งในแนวตั้งฉากปรากฏว่า เส้นสเปกตรัมลำดับที่ 2 ที่เกิดเนื่องจากแสงสีแดง ซึ่งมีความยาวคลื่น 656 นาโนเมตร ซ้อนทับสเปกตรัมลำดับที่ 3 ของแสงสีอื่นอีกสีหนึ่ง แสงสีนั้นมีความยาวคลื่นเท่าใด ในหน่วยนาโนเมตร

บทที่ 14

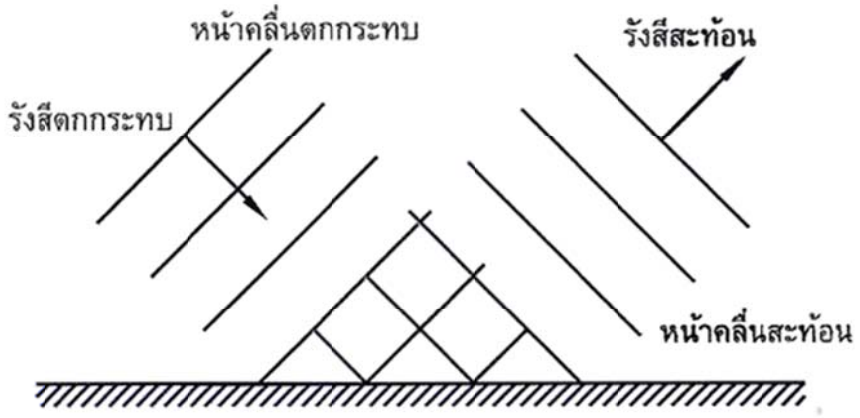
แสงกับทัศนอุปกรณ์

ในชีวิตประจำวันเราได้รับแสงจากจากแหล่งกำเนิดแสงหลายชนิด เช่น ดวงอาทิตย์ หลอดไฟฟ้า เทียนไข ตะเกียง แต่แสงส่วนใหญ่เป็นแสงสว่างจากดวงอาทิตย์ ดวงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มนุษย์รู้จักกันเป็นเวลาเนิ่นนานมากแล้ว และรู้ว่าแสงจากดวงอาทิตย์ทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่สวยงามบนท้องฟ้า เช่น รุ้ง พระอาทิตย์ทรงกลด สีของท้องฟ้าในยามเช้าและยามเย็น หรือปรากฏการณ์ภาพลวงตาที่เรียกว่า มิราจ เป็นต้น ถึงแม้ว่าเราจะมีความคุ้นเคยกับแสง แต่ทราบหรือไม่ว่า ธรรมชาติของแสงเป็นอย่างไร แสงเคลื่อนที่อย่างไร และเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วเท่าใด

14.1 การเคลื่อนที่และอัตราเร็วของแสง

การศึกษาแสงที่ตามองเห็นในบทเรียนนี้ เป็นการศึกษาแสงที่มีสมบัติความเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเช่นเดียวกับไมโครเวฟ อุลตราไวโอเลต ฯลฯ ในสุญญากาศคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งรวมทั้งแสงจะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงด้วยอัตราเร็วเท่ากัน คือ 299 792 458 เมตรต่อวินาที อย่างไรก็ตามในการคำนวณที่ไม่ต้องการความแม่นยำสูงมาก อาจใช้อัตราเร็วของแสงเป็น 3.00×10^8 เมตรต่อวินาที ก็ได้และนิยมเรียกระยะทางที่แสงเคลื่อนที่ได้ในสุญญากาศในเวลา 1 ปี ว่า 1 ปีแสง สำหรับอัตราเร็วของแสงในตัวกลางต่างๆ จะมีค่าไม่เท่ากัน และทุกอัตราเร็วจะมีค่าน้อยกว่าอัตราเร็วแสงในสุญญากาศ

จากการศึกษาคลื่นแสงที่ผ่านมาพบว่า เมื่อแสงผ่านสลิตเดี่ยวที่แคบ แสงจะเลี้ยวเบน และถ้าสลิตแคบนี้กว้างขึ้น การเลี้ยวเบนจะน้อยลง ในการอธิบายปรากฏการณ์นี้ ด้วยการเขียนหน้าคลื่นจะทำให้เข้าใจดี ในกรณีแสงเคลื่อนผ่านตัวกลางในแนวเส้นตรง พบว่าการเขียนเส้นตรงตั้งฉากกับหน้าคลื่นแสดงทิศของแสงที่เคลื่อนออกไปจะง่ายต่อการเข้าใจเรียกเส้นตรงนี้ว่า รังสี ตามปกติการเขียนรังสีจะใช้ลูกศรกำกับเพื่อแสดงทิศทาง สามารถใช้รังสีกับคลื่นทุกชนิด

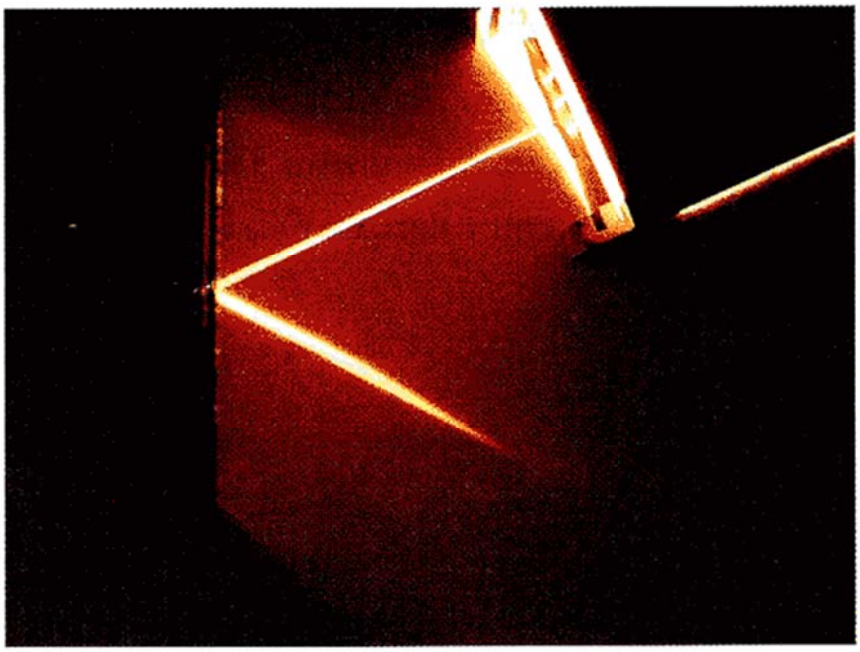


รูป 14.1 แสดงรังสีและหน้าคลื่นของคลื่นตกกระทบและคลื่นสะท้อน

ในการศึกษาสมบัติของแสงอันได้แก่ การสะท้อนและการหักเห จะใช้รังสีแสดงเส้นทางเดินของแสงดังรูป 14.1 การศึกษาสมบัติของแสงโดยอาศัยรังสีของแสงและวิชาเรขาคณิตในการวิเคราะห์เรียกว่า **ทัศนศาสตร์เชิงเรขาคณิต** ดังจะได้ศึกษาต่อไป

14.2 การสะท้อนของแสง

เวลาแสงเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีความหนาแน่นสม่ำเสมอ เช่น น้ำ อากาศ แท่งพลาสติกใส หรือสุญญากาศ แสงจะเคลื่อนที่เป็นแนวตรง อย่างไรก็ตาม ถ้าแสงเคลื่อนที่ไปกระทบวัตถุต่างชนิดกันและเป็นวัตถุทึบแสงที่มีผิวขัดมัน แสงจะเปลี่ยนทิศการเคลื่อนที่ ณ ตำแหน่งบนผิวที่แสงกระทบและเคลื่อนที่ย้อนกลับในตัวกลางเดิม เรียกการเปลี่ยนทิศการเคลื่อนที่ของแสงนี้ว่า **การสะท้อน**



รูป 14.2 แสงสะท้อนที่ผิวของวัตถุ

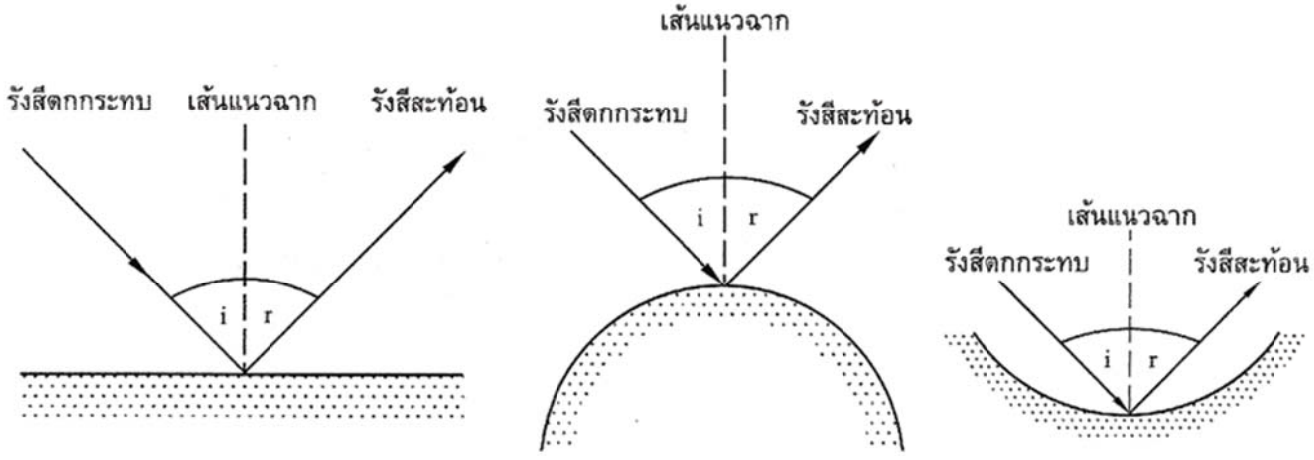
ตามปกติเมื่อแสงตกกระทบวัตถุใด วัตถุส่วนมากจะดูดกลืนแสงไว้ส่วนหนึ่ง และ แสงส่วนที่เหลือจะสะท้อนที่ผิววัตถุ สำหรับวัตถุที่เป็นกระจกเงา แสงจะสะท้อนเกือบทั้งหมด

ก. วัตถุผิวเรียบ ข. วัตถุผิวขรุขระ

รูป 14.3 ลักษณะการสะท้อนของแสงที่ผิววัตถุ

โดยทั่วไปลักษณะการสะท้อนของแสงขึ้นกับลักษณะผิวของวัตถุ สำหรับวัตถุระนาบที่มีผิวเรียบเป็นมัน เช่น กระจกเงา ผิวน้ำนิ่งในสระ รังสีสะท้อนทุกรังสีจะไปในทิศเดียวกัน ดังรูป 14.3 ก. แต่สำหรับวัตถุที่มีผิวขรุขระ เช่น ผ้า กระดาษ แผ่นไม้ที่ไม่ได้ขัด รังสีสะท้อนจะมีทิศต่าง ๆ กัน ดังรูป 14.3 ข.

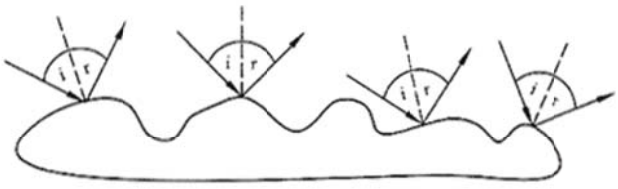
ถ้าให้รังสีของแสงตกกระทบที่ผิวราบ ผิวโค้งเว้า และผิวโค้งนูน ดังรูป 14.4 การสะท้อนของแสงที่แต่ละผิวให้ผลเช่นเดียวกัน คือ รังสีตกกระทบ รังสีสะท้อนและเส้นแนวฉากจะอยู่บนระนาบเดียวกัน นอกจากนี้ มุมตกกระทบ i และมุมสะท้อน r ในแต่ละกรณีก็มีค่าเท่ากัน



ก. ผิวราบ ข. ผิวโค้งนูน ค. ผิวโค้งเว้า

รูป 14.4 การสะท้อนของแสงที่ผิวเรียบแบบต่างๆ

ผิวราบและผิวโค้งที่กล่าวมาแล้วถือว่าเป็นผิวเรียบ ถ้าวัตถุมีผิวขรุขระการสะท้อนของแสงจะเป็นอย่างไร เมื่อพิจารณาบริเวณเล็กๆ ของผิวขรุขระ ซึ่งอาจถือได้ว่าเป็นผิวเรียบ เพราะผิวขรุขระประกอบด้วยผิวเรียบจำนวนมากโดยที่ผิวเรียบเหล่านั้นวางตัวทำมุมต่างๆ กัน ดังนั้นถ้าให้แสงตกกระทบวัตถุที่มีผิวขรุขระ มุมตกกระทบที่ผิวเรียบเล็กๆเหล่านั้นจะมีค่าต่างๆ กัน ถึงกระนั้นมุมตกกระทบก็จะเท่ากับมุมสะท้อน ณ ตำแหน่งที่แสงตกกระทบเสมอ ดังนั้นแสงที่สะท้อนออกมาจึงมีทิศทางต่างๆ กัน ดังรูป 14.5



รูป 14.5 การสะท้อนของแสงที่ผิวขรุขระ

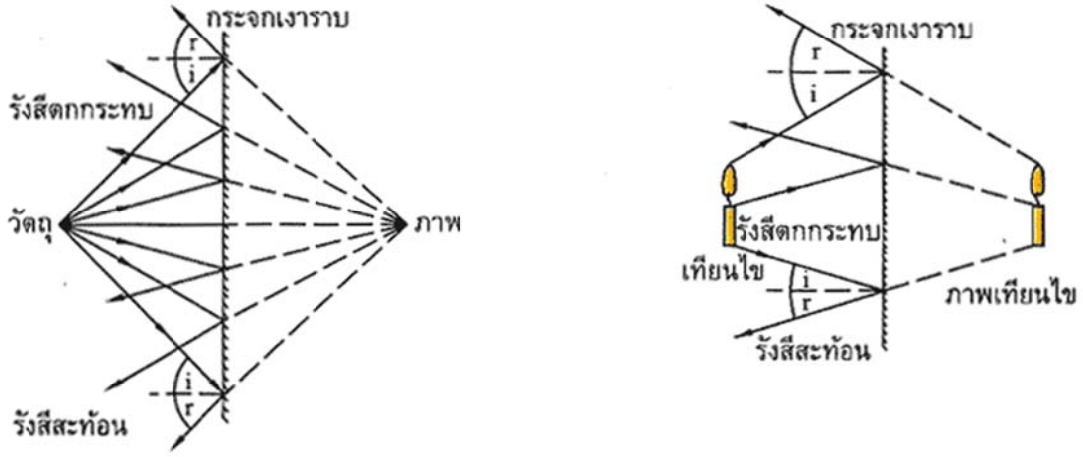
จึงสรุปเป็น **กฎการสะท้อนของแสง** ที่ผิววัตถุใดๆ ได้ดังนี้

1. **ณ ตำแหน่งที่แสงตกกระทบรังสีตกกระทบ รังสีสะท้อน และเส้นแนวฉาก อยู่ในระนาบเดียวกัน**
2. **มุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน**

14.2.1 ภาพในกระจกเงาราบ

เมื่อวางวัตถุไว้หน้ากระจกเงาราบ เราสามารถเห็นทั้งวัตถุและภาพของวัตถุในกระจกเงาราบได้ เพราะมีแสงจากวัตถุมาเข้าตา แต่การเห็นภาพของวัตถุนั้น เกิดจากการที่แสงจากวัตถุไปตกกระทบผิวกระจกเงาราบแล้วสะท้อนกลับมาเข้าตาเรา

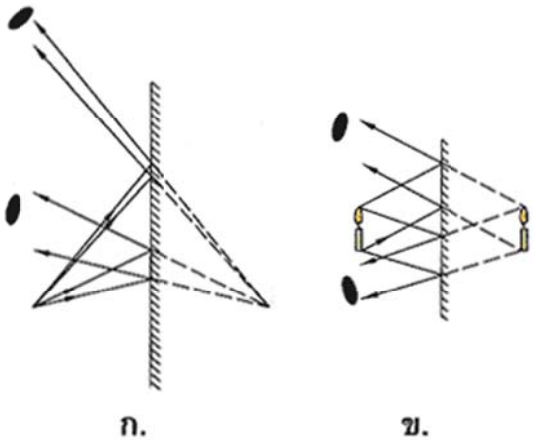
ตามปกติแสงจากวัตถุจะกระจายออกไปทุกทิศทางและจะตกกระทบเต็มพื้นที่ผิวของกระจกเงาราบ ถ้าพิจารณาแสงจากวัตถุเป็นรังสี จะมีรังสีของแสงจำนวนมากมายจากวัตถุตกกระทบผิวของกระจกเงาราบ ทำให้สามารถแสดงที่มาของภาพในกระจกเงาราบได้ ด้วยการใช้กฎการสะท้อนของแสงเขียนรังสีตกกระทบ รังสีสะท้อนและเส้นแนวฉากจากนั้นต่อแนวรังสีสะท้อนไปทางด้านหลังของกระจกเงาราบ จากสมบัติเชิงเรขาคณิตของแสง อาจแสดงได้ว่ารังสีสะท้อนเหล่านี้ เสมือนออกมาจากจุดจุดหนึ่ง ซึ่งก็คือตำแหน่งภาพของวัตถุนั่นเอง ดังรูป 14.6 ก. ระยะที่วัตถุอยู่ห่างจากผิวกระจกเรียกว่า **ระยะวัตถุ** ระยะที่ภาพอยู่ห่างจากผิวกระจก เรียกว่า **ระยะภาพ** ตามรูป 14.8 จุด P' เป็นภาพของ P โดยมี PA เป็นระยะวัตถุและ $P'A$ เป็นระยะภาพ



ก. วัตถุมีลักษณะเป็นจุด ภาพก็เป็นจุด **ข. วัตถุที่มีขนาด ภาพก็มีขนาด**

รูป 14.6 แสดงรังสีของแสงจากวัตถุและการเกิดภาพในกระจกเงาราบ

สำหรับวัตถุที่มีขนาดเพราะประกอบด้วยจุดหลายๆ จุด ดังนั้นภาพของจุดเหล่านี้ จึงรวมกันจะเป็นภาพของวัตถุซึ่งอาจหาได้โดยการเขียนรังสีต่างๆ โดยใช้วิธีของรูป 14.6 ก. และได้ภาพดังแสดงในรูป 14.6 ข.

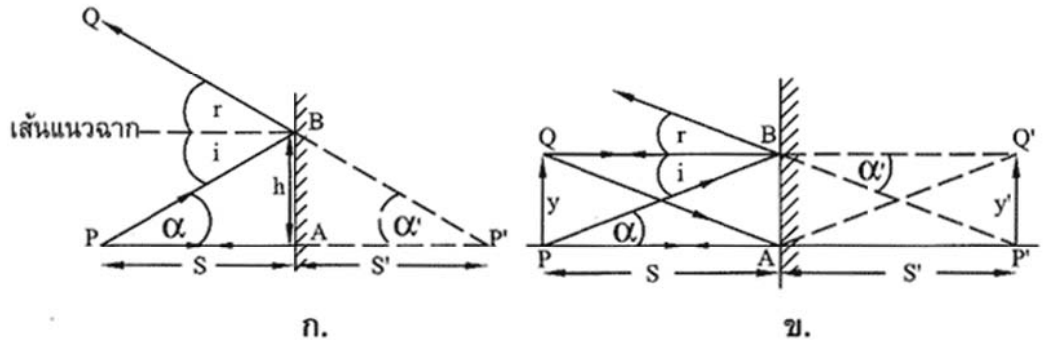


ก. **ข.**

รูป 14.7 การมองเห็นภาพในกระจกเงาราบ

เพื่อความสะดวกในการหาตำแหน่งภาพจะใช้รังสีตกกระทบจากจุดหนึ่งๆ ของวัตถุเพียง 2 รังสี ดังนั้นการแสดงการเห็นภาพของวัตถุในกระจกเงาราบอาจแสดงได้ดังรูป 14.7 โดยวางตาในตำแหน่งที่เหมาะสมเพื่อรับรังสีสะท้อน ตำแหน่งดังกล่าวอยู่ด้านหน้ากระจกเงาราบและอาจมีได้หลายตำแหน่ง รูป 14.7 ก. และ ข. แสดงตำแหน่งการเห็นภาพในกระจกเงาราบ 2 ตำแหน่ง

รูป 14.8 แสดงการหาระยะภาพ P เป็นวัตถุที่เป็นจุด ถ้า PB เป็นรังสีจากวัตถุที่ตกกระทบกระจกเงาราบและ BQ เป็นรังสีสะท้อนต่อ QB ไปตัดส่วนต่อของ PA ที่จุด P' ตามรูป 14.8 ก. P' เป็นภาพของ P



รูป 14.8 การเขียนรังสีของแสงเพื่อหาตำแหน่ง และขนาดภาพของวัตถุที่เกิดจากกระจกเงาราบ

พิจารณา Δ A B P $\quad \tan A\hat{P}B = \tan i = \dfrac{AB}{s}$

พิจารณา Δ A B P′ $\quad \tan A\hat{P}'B = \tan r = \dfrac{AB}{s'}$

เพราะว่า $\hat{i} = \hat{r}$ จะได้ $\dfrac{AB}{s} = \dfrac{AB}{s'}$

นั่นคือ $s = s'$

สรุปได้ว่า ระยะวัตถุเท่ากับระยะภาพเสมอ

ในรูป 14.8 ข. ถ้าวัตถุ PQ มีลักษณะเป็นเส้นตรงและยาว y จากข้างบนภาพของจุด P และ Q จะอยู่ที่จุด P′ และ Q′ ดังนั้น P′Q′ เป็นภาพของ PQ และมีความยาว y′ เพราะ PA = AP′ และ QB = BQ′ จากเรขาคณิตจะได้ว่า

$$PQ = P'Q'$$

หรือ $$y = y'$$

จะเห็นได้ว่าสำหรับกระจกเงาราบความยาวของภาพเท่ากับความยาวของวัตถุเสมอ

สรุปเกี่ยวกับวัตถุที่อยู่หน้าผิวสะท้อนราบได้ว่า

1. ระยะภาพเท่ากับระยะวัตถุ

2. ความยาวของภาพเท่ากับความยาวของวัตถุ

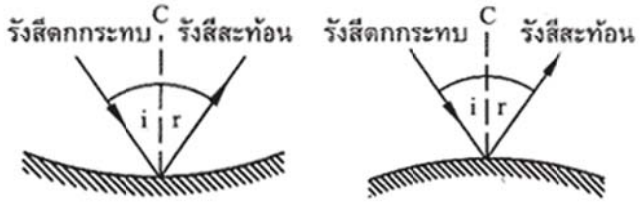
การศึกษาภาพของวัตถุที่เกิดในกระจกเงาราบที่ผ่านมาเป็นกรณีที่วัตถุมีขนาดเล็กกว่ากระจกเงาราบ ถ้าวัตถุมีขนาดใหญ่กว่ากระจกเงาราบ เราก็สามารถเขียนรังสีโดยใช้กฎการสะท้อนแสงเพื่อแสดงการเกิดภาพในกระจกเงาราบได้เช่นกัน

สำหรับวัตถุที่มีรูปทรงเช่นกล่องหรือเก้าอี้ ซึ่งประกอบด้วยจุดจำนวนมาก ดังนั้น เมื่อวัตถุวางอยู่หน้ากระจกเงาราบ เพราะภาพของจุดแต่ละจุดที่เกิดขึ้นจะมีระยะภาพเท่ากับระยะวัตถุ ทำให้องค์ประกอบอื่นๆ ของวัตถุที่ปรากฏเป็นภาพก็จะมีขนาดเท่ากันด้วย จึงทำให้สรุปได้ว่า **ขนาดของภาพที่ได้จากการวางวัตถุไว้หน้าผิวสะท้อนราบใด ๆ จะเท่ากับขนาดของวัตถุเสมอ**

ภาพของวัตถุในกระจกเงาราบนั้น เป็นภาพที่เกิดจากรังสีสะท้อนมาเข้าตาจึงทำให้ดูเสมือนว่า รังสีเหล่านั้นมาจากภาพอยู่หลังกระจก และถ้าเรานำฉากไปวาง ณ ตำแหน่งที่เห็นภาพนั้นก็จะไม่มีภาพใดๆ ปรากฏบนฉาก ภาพที่เกิดขึ้นในลักษณะเช่นนี้ เรียกว่า **ภาพเสมือน**

14.2.2 ภาพที่เกิดจากการสะท้อนของแสงบนกระจกผิวโค้งทรงกลม

กระจกเงาโค้งทรงกลมเป็นส่วนหนึ่งของผิวโค้งทรงกลม ถ้ากระจกใช้ผิวโค้งเว้าเป็นผิวสะท้อนแสง เรียกว่า กระจกเว้า ดังรูป 14.9 ก. และถ้ากระจกใช้ผิวโค้งนูนเป็นผิวสะท้อนแสง เรียกว่า กระจกนูน ดังรูป 14.9 ข. พิจารณารูปกระจกเว้าและกระจกนูน ในรูป 14.10 C **เป็นศูนย์กลางความโค้งของกระจก** และของทรงกลม R **เป็นรัศมีความโค้งของกระจก** และรัศมีของทรงกลม เส้นตรงที่ลากผ่านจุด C ไปหาตำแหน่ง V ที่เป็นจุดกึ่งกลางบนผิวโค้งของกระจก เรียกว่า **เส้นแกนมุขสำคัญ** และเรียกจุด V ว่า **จุดยอด** MM' เป็นความกว้างของกระจกโค้ง ซึ่งมีค่าน้อย เมื่อเทียบกับรัศมีความโค้ง



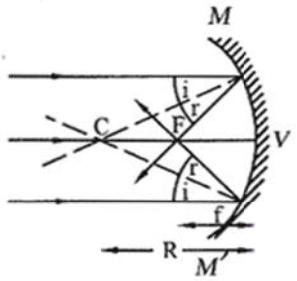
ก. กระจกเว้า ข. กระจกนูน

รูป 14.9 แสดงรังสีตกกระทบและรังสีสะท้อนที่กระจกโค้งทรงกลม

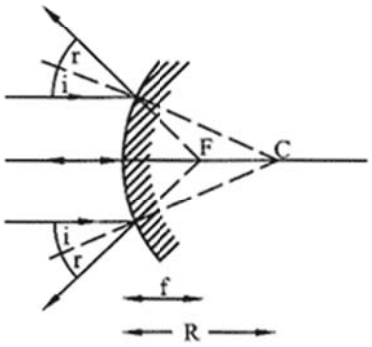
สำหรับรังสีตกกระทบทั้งหลายที่ขนานกับเส้นแกนมุขสำคัญของกระจกเว้า และมีแนวไม่ห่างจากแกนมุขสำคัญมาก รังสีสะท้อนจะตัดแกนมุขสำคัญที่จุดๆ หนึ่ง ซึ่งอยู่หน้ากระจกห่างจากจุดยอดของกระจกเท่ากับครึ่งหนึ่งของรัศมีความโค้งของกระจก จุดนี้เรียกว่า **โฟกัส** ดังรูป 14.10 จุด F เป็นโฟกัสและระยะทางจากโฟกัสถึงจุดยอดของกระจก เรียกว่า **ความยาวโฟกัส**

ถ้า f แทนความยาวโฟกัส และ R แทนรัศมีความโค้งของกระจกเว้า

$$f = \frac{R}{2} \qquad (14.1)$$



รูป 14.10 โฟกัสของกระจกเว้า

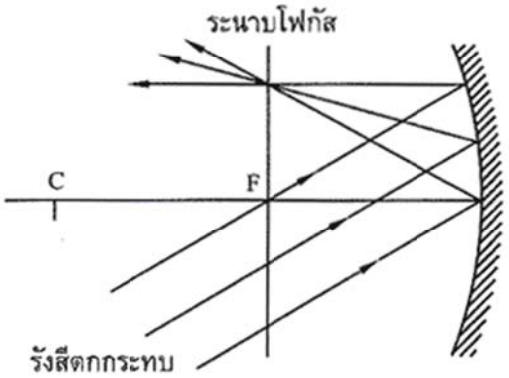


รูป 14.11 โฟกัสของกระจกนูน

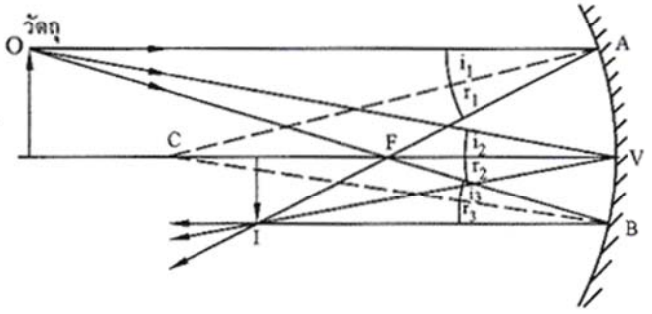
ในกรณีของกระจกนูน รังสีตกกระทบของแสงที่มีแนวขนานกับเส้นแกนมุขสำคัญจะสะท้อนที่กระจกนูนตามกฎการสะท้อนของแสง ดังรูป 14.11

ถ้าต่อแนวของรังสีสะท้อนให้ย้อนกลับไปพบกันจะได้จุดตัดของรังสีสะท้อนหรือโฟกัสของกระจกนูนอยู่ด้านหลังบนแกนมุขสำคัญของกระจก ความยาวโฟกัสของกระจกนูนเป็นครึ่งหนึ่งของรัศมีความโค้งเช่นเดียวกับกรณีกระจกเว้า ดังสมการ (14.1)

สำหรับรังสีทั้งหลายที่ขนานกันแต่ไม่ขนานกับแกนมุขสำคัญ เมื่อสะท้อนจากกระจกโค้งจะไปตัดกันที่จุดหนึ่งระนาบโฟกัส รูป 14.12 แสดงการสะท้อนแสงที่กระจกเว้ากรณีลากเส้นแล้วไม่ขนานกับแกนมุขสำคัญ อย่างไรก็ตาม หลักเกณฑ์นี้ใช้ได้เฉพาะรังสีตกกระทบที่ทำมุมเล็กกับแกนมุขสำคัญ และตกกระทบกระจกบริเวณใกล้ขั้วกระจกเท่านั้น

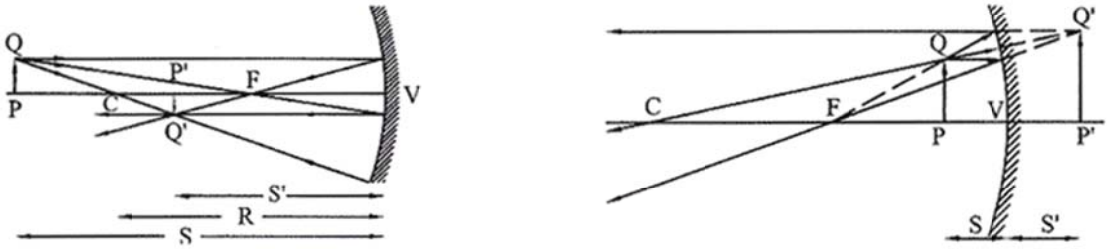


รูป 14.12 แสดงการสะท้อนของรังสีขนานแต่ไม่ขนานกับแกนมุขสำคัญ



รูป 14.13 การเกิดภาพของวัตถุที่มีขนาดโดยกระจกเว้า

การเขียนภาพของวัตถุ จะพิจารณาจุดๆ หนึ่งบนวัตถุ ในที่นี้จะเรียกว่า จุดวัตถุ ดังรูป 14.13 เนื่องจากแสงออกจากวัตถุทุกทิศทางแสงจึงตกกระทบเต็มพื้นที่ผิวของกระจก ดังนั้น การหาตำแหน่งภาพของจุดวัตถุ O ที่อยู่หน้ากระจกเว้าหรือกระจกนูน จะเขียนรังสีแนวใดจากวัตถุก็ได้ ให้ตกกระทบกระจกและใช้กฎการสะท้อนของแสงเขียนรังสีสะท้อนของแสง รังสีสะท้อนทุกรังสีตัดกันที่จุด I ดังนั้น จุด I เป็นตำแหน่งภาพของจุดวัตถุ O อย่างไรก็ตามเรามีวิธีเขียนภาพที่สะดวกกว่าที่บรรยายไว้ ดังแสดงในรูป 14.14 ก.



ก. ภาพจริง **ข. ภาพเสมือน**

รูป 14.14 ภาพเกิดจากกระจกเว้า

การหาตำแหน่งภาพของวัตถุมีขนาดที่อยู่หน้ากระจกเว้า สรุปเป็นหลักที่ใช้ในการเขียนรูปแสดงการเกิดภาพดังนี้

1. เขียนรังสีตกกระทบจากปลายวัตถุถึงผิวกระจกในแนวซึ่งขนานกับเส้นแกนมุขสำคัญ จะได้รังสีสะท้อนจากผิวกระจกผ่านโฟกัส
2. เขียนรังสีตกกระทบจากปลายวัตถุผ่านโฟกัสถึงผิวกระจก จะได้รังสีสะท้อนจากผิวกระจกขนานกับแกนมุขสำคัญ
3. เขียนรังสีตกกระทบจากปลายวัตถุผ่านศูนย์กลางความโค้งถึงผิวกระจก จะได้รังสีสะท้อนจากผิวกระจกย้อนกลับทางเดิม

รูป 14.14 แสดงการเขียนภาพของวัตถุ QP โดยเขียนรังสีตกกระทบจากจุดปลายวัตถุ Q ตามหลักการเขียนรูปแสดงการเกิดภาพดังกล่าวข้างต้น ได้รังสีสะท้อนทั้งสามรวมกันที่ Q' ส่วนรังสีอื่นๆ จาก Q เมื่อสะท้อนจากกระจกก็จะผ่านจุด Q' ด้วย ดังนั้น Q' เป็นภาพของจุดปลาย Q อาจแสดงลักษณะเดียวกันได้ว่าภาพของจุดวัตถุทั้งหลายที่อยู่ต่ำลงมาในช่วง QP ก็จะอยู่ในช่วง $Q'P'$ ดังนั้น $Q'P'$ คือภาพของ QP

ในรูป 14.14 ก. รังสีสะท้อนทั้งหลายตัดกันจริงหน้ากระจกเว้า ภาพที่เกิดเป็น **ภาพจริง** ที่สามารถใช้ฉากรับภาพได้ พบว่า ถ้าวัตถุอยู่ห่างจากกระจกเว้าไกลกว่าความยาวโฟกัส f จะเกิดภาพจริงทุกครั้งไป แต่ถ้าวัตถุอยู่ระหว่างจุดโฟกัสกับขั้วกระจก การเขียนรังสีของแสงสะท้อนพบว่า รังสีสะท้อนเสมือนตัดกันหลังกระจกเว้า ภาพที่เกิดหลังกระจกเว้าจึงเป็น **ภาพเสมือน** ดังรูป 14.14 ข.

สำหรับขนาดของภาพมีทั้งใหญ่กว่า เท่าและเล็กกว่าวัตถุ เรียกการเปรียบเทียบขนาดของภาพกับขนาดของวัตถุว่า **การขยาย** ให้ M แทนการขยาย จะได้

$$M = \frac{\text{ขนาดภาพ}}{\text{ขนาดวัตถุ}} \qquad \textbf{(14.2)}$$

สำหรับการเกิดภาพของกระจกนูน อาจแสดงได้ในทำนองเดียวกัน ดังในรูป 14.17 ของตัวอย่าง 14.3 พบว่าภาพจากกระจกนูนเป็นภาพเสมือนที่มีขนาดเล็กกว่าวัตถุทั้งสิ้น

การหาตำแหน่งภาพ นอกจากจะใช้วิธีเขียนรังสีของแสงตกกระทบและรังสีของแสงสะท้อนแล้ว ยังสามารถใช้วิชาคณิตศาสตร์คำนวณหาตำแหน่งภาพได้ พิจารณารูป 14.14 ก. เป็นตัวอย่างสำหรับกระจกเว้า ดังนี้

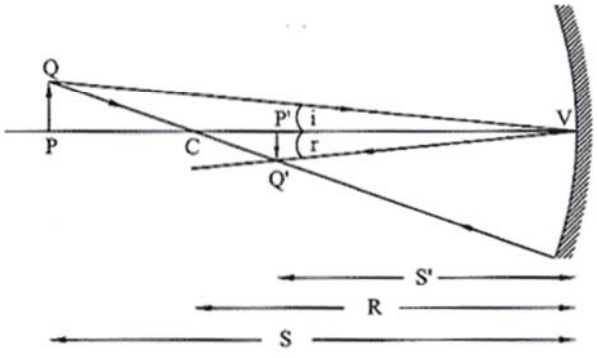
ใน Δ C P Q $\quad \tan P\hat{C}Q = \dfrac{PQ}{PC} = \dfrac{PQ}{S-R}$

ใน Δ C P′ Q′ $\quad \tan P'\hat{C}Q' = \dfrac{P'Q'}{P'C} = \dfrac{P'Q'}{R-S'}$

เนื่องจาก $\quad P\hat{C}Q = P'\hat{C}Q'$

ดังนั้น $\quad \dfrac{P'Q'}{PQ} = \dfrac{R-S'}{S-R} \qquad (1)$

ถ้าเขียนรังสีจาก Q อีกหนึ่งรังสีไปตกกระทบกระจกเว้าที่ขั้วกระจก V แสงจะสะท้อนผ่าน Q' เช่นกันซึ่งเป็นไปตามกฎการสะท้อน ดังรูป 14.15



รูป 14.15 แสดงรังสีตกกระทบและสะท้อนที่ V

Δ P Q V $\quad \tan P\hat{V}Q = \frac{PQ}{S}$

Δ P′ Q′ V $\quad \tan P'\hat{V}Q' = \frac{P'Q'}{S'}$

เนื่องจาก $P\hat{V}Q = P'\hat{V}Q'$ (มุมตกกระทบ = มุมสะท้อน)

ดังนั้น $\quad \frac{P'Q'}{PQ} = \frac{S'}{S}$ (2)

(1) = (2) จะได้ $\quad \frac{1}{S} + \frac{1}{S'} = \frac{2}{R}$

จากสมการ (14.1) จะได้

$$\frac{1}{S} + \frac{1}{S'} = \frac{1}{f} \qquad \textbf{(14.3)}$$

เมื่อใช้สมการ (14.2) วิเคราะห์จะได้ $\frac{P'Q'}{PQ} = \frac{S'}{S}$ นั่นคือ **การขยายเท่ากับอัตราส่วนระหว่างระยะภาพกับระยะวัตถุ**

หรือ $$M = \frac{S'}{S} \qquad \textbf{(14.4)}$$

หลักที่ใช้ในการเขียนรูปแสดงการเกิดภาพ หรือการคำนวณหาตำแหน่งภาพ หรือการหาการขยายสำหรับกระจกนูนก็เป็นเช่นเดียวกับกระจกเว้า

การใช้สมการ (14.3) หรือ สมการกระจกเงา หาตำแหน่งของภาพหรือการขยายจะต้องกำหนดเครื่องหมาย + หรือ – สำหรับ S, S' และ f ดังนี้

1. ให้ระยะวัตถุและระยะภาพมีเครื่องหมาย + เมื่อวัดระยะจากขั้วกระจกไปยังวัตถุและภาพที่อยู่หน้ากระจกเงา
2. สำหรับภาพที่เกิดหลังกระจกเงาระยะภาพมีเครื่องหมาย -
3. ความยาวโฟกัสของจุดโฟกัสที่อยู่ด้านหน้ากระจกเงามีเครื่องหมาย + แต่ถ้าจุดโฟกัสอยู่ด้านหลังกระจกเงา ความยาวโฟกัสมีเครื่องหมาย -

การเขียนรูปแสดงการเกิดภาพจากกระจกเว้าและกระจกนูน ถ้าวัตถุมีขนาดใหญ่กว่ากระจกโค้งก็สามารถเขียนรังสีต่างๆ โดยใช้กฎการสะท้อนของแสง เพื่อแสดงการเกิดภาพจากกระจกโค้งได้เช่นกัน

ตัวอย่าง 14.1 เทียนไขสูง 20 เซนติเมตรตั้งอยู่บนแกนมุขสำคัญของกระจกเว้าที่มีความยาวโฟกัส 10 เซนติเมตร ทำให้เกิดภาพหน้ากระจกเว้า ณ ที่ห่างจากกระจกเว้า 15 เซนติเมตร เทียนไขอยู่ห่างกระจกเว้ากี่เซนติเมตรและภาพเทียนไขสูงกี่เซนติเมตร

วิธีทำ เพราะภาพเทียนไขเกิดหน้ากระจกเว้าดังนั้นภาพจึงเป็นภาพจริง และเพราะโฟกัสอยู่หน้ากระจกเว้า

ดังนั้น $S' = +15$ cm. และ $f = +10$ cm.

หาระยะวัตถุ $S = ?$

จาก $\frac{1}{S} + \frac{1}{S'} = \frac{1}{f}$

แทนค่า $\frac{1}{S} + \frac{1}{15} = \frac{1}{+10}$

$S = +30$ cm.

หาขนาดภาพ

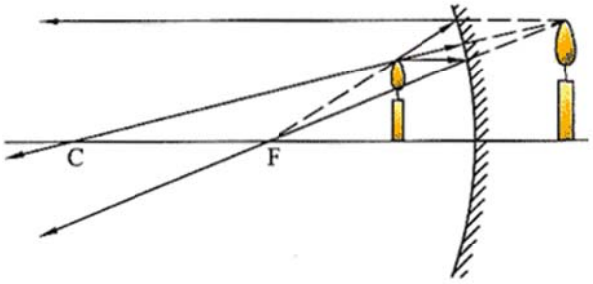
จาก $M = \frac{\text{ขนาดภาพ}}{\text{ขนาดวัตถุ}} = \frac{\text{ระยะภาพ}}{\text{ระยะวัตถุ}}$

แทนค่า $\frac{\text{ขนาดภาพ}}{20} = \frac{15}{30}$

ขนาดภาพ $= 10$ cm.

คำตอบ เทียนไขอยู่หน้ากระจกเว้า 30 เซนติเมตร และ ภาพเทียนไขสูง 10 เซนติเมตร

ตัวอย่าง 14.2 จากตัวอย่าง 14.1 ถ้าวางเทียนไขห่างกระจกเว้า 5 เซนติเมตร ภาพเทียนไขเป็นภาพชนิดใด และ อยู่ห่างกระจกเว้าเท่าใด เขียนภาพประกอบ



รูป 14.16 รูปประกอบตัวอย่าง 14.2

วิธีทำ S = +5 cm. f = +10 cm.

หาระยะภาพ

จาก $\frac{1}{S}+\frac{1}{S'} = \frac{1}{f}$

แทนค่า $\frac{1}{+5}+\frac{1}{S'} = \frac{1}{+10}$

S' = -10 cm.

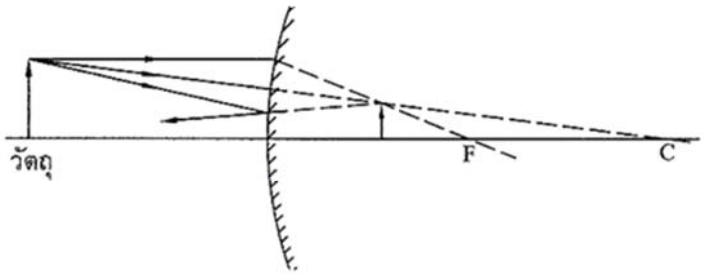
คำตอบ ระยะภาพเป็นเครื่องหมาย – แสดงว่า ภาพเทียนไขเกิดหลังกระจกเว้า จึงเป็นภาพเสมือน จากการเขียนรูป ภาพเทียนไขเกิดจากรังสีสะท้อนที่เสมือนตัดกันที่หลังกระจกจึงเป็นการยืนยันคำตอบที่ได้จากการคำนวณว่าถูกต้อง

ตัวอย่าง 14.3 วางวัตถุไว้หน้ากระจกนูนที่มีรัศมีความโค้ง 24 เซนติเมตร ให้ห่างกระจก 20 เซนติเมตร

ก. ภาพเกิดขึ้นที่ใดและเป็นภาพชนิดใด

ข. การขยายของภาพเป็นเท่าใด

วิธีทำ ก.



รูป 14.17 สำหรับตัวอย่าง 14.3

จาก $\frac{1}{S}+\frac{1}{S'} = \frac{1}{f}$

$f = -\frac{R}{2} = -12$ cm.

(มีเครื่องหมาย - เพราะโฟกัสอยู่หลังกระจกนูน)

s = +20 cm.

(มีเครื่องหมาย + เพราะวัตถุอยู่หน้ากระจกนูน)

แทนค่า $\frac{1}{20}+\frac{1}{S'} = -\frac{1}{12}$

S' = -7.5 cm.

คำตอบ ภาพเกิดที่หลังกระจกนูนและอยู่ห่างจากกระจกนูน 7.5 เซนติเมตรและเป็นภาพเสมือน

ข. การขยายของภาพ $= \frac{\text{ระยะภาพ}}{\text{ระยะวัตถุ}}$

$= \frac{7.5}{20}$

$= 0.38$

คำตอบ การขยายของภาพเท่ากับ 0.38 (ภาพเล็กกว่าวัตถุ)

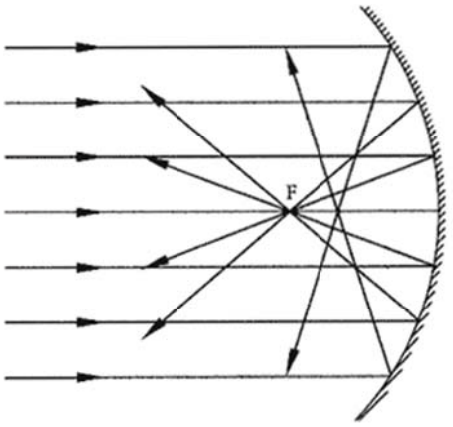
ภาพที่เกิดจากการวางวัตถุไว้หน้ากระจกโค้งนั้นตามปกติมีทั้งภาพจริงและภาพเสมือน โดยภาพจริงจะอยู่หน้ากระจก และภาพเสมือนจะอยู่หลังกระจก และเมื่อนำฉากไปวางที่ตำแหน่งของภาพเสมือนจะไม่ปรากฏภาพใดๆ บนฉาก สำหรับขนาดของภาพมีทั้งขยาย เท่าเดิม และลด ทั้งนี้ขึ้นกับระยะวัตถุและระยะภาพ ในชีวิตประจำวันเราได้รับประโยชน์จากการใช้กระจกเงาราบ กระจกนูนและกระจกเว้าในหลายๆ เรื่องเช่น

กระจกเงาราบ ใช้ส่องเพื่อช่วยในการแต่งตัว ใช้ติดรถยนต์หรือรถจักรยานยนต์เพื่อดูรถที่อยู่ด้านหลังคนขับ ใช้ในเครื่องฉายภาพข้ามศีรษะเพื่อสะท้อนภาพบนฉาก

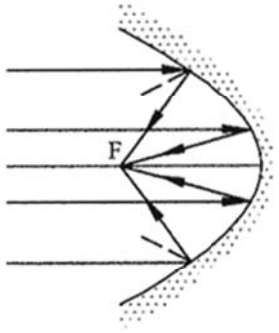
กระจกนูน ใช้ติดรถยนต์ หรือ รถจักรยานยนต์เพื่อดูรถที่ตามมาข้างหลังเช่นเดียวกับกระจกเงาราบ แต่ภาพที่เห็นจะอยู่ใกล้กว่า นอกจากนี้ก็ยังใช้ติดตั้งบริเวณทางเลี้ยวเพื่อช่วยให้มองเห็นรถยนต์ที่วิ่งสวนทางหรืออ้อมมาก็ได้

กระจกเว้า ใช้ในกล้องจุลทรรศน์เพื่อช่วยรวมแสงให้ตกที่แผ่นสไลด์เพื่อทำให้เราเห็นภาพชัดขึ้น ทันตแพทย์ใช้ส่องดูฟันคนไข้เพื่อให้เห็นภาพของฟันมีขนาดใหญ่กว่าปกติ ทำให้สะดวกต่อการรักษา จึงเห็นได้ว่า กระจกเว้าซึ่งเป็นกระจกเงาโค้งทรงกลมมีประโยชน์ในหลายด้าน แต่กระจกเว้าก็ยังมีข้อเสียบ้างเหมือนกัน

พิจารณารูป 14.18 เมื่อรังสีขนานเมื่อตกกระทบกระจกเว้าแล้ว รังสีสะท้อนจากผิวกระจกเว้าจะไปตัดกันที่จุดเกิดภาพ F แต่รังสีสะท้อนบางรังสีจะไม่ตัดกันที่จุด F โดยจะตัดกันที่จุดอื่น เหตุการณ์นี้จะเกิดเมื่อรังสีตกกระทบที่ผิวกระจกเว้าอยู่ไกลจากแกนมุขสำคัญจึงทำให้ภาพที่ได้มัวผลที่เกิดขึ้นนี้ เรียกว่า **ความคลาดทรงกลม** วิธีแก้ความบกพร่องเนื่องจากความคลาดทรงกลมให้ใช้กระจกเว้าขนาดเล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางสั้นหรือใช้กระจกเงารูป โค้งพาราโบลา ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของพาราโบลาทรง 3 มิติ เพราะรังสีของแสงตกกระทบที่ขนานกับแกนมุขสำคัญของกระจกเงารูปโค้งพาราโบลา จะสะท้อนที่ผิวของกระจกเงารูปโค้งพาราโบลาแล้วตัดกันที่จุดโฟกัส



รูป 14.18 แสดงความคลาดทรงกลมของกระจกเว้า



รูป 14.19 แสดงรังสีสะท้อนที่ผิวกระจกเงารูปโค้งพาราโบลา

ทุกรังสีทั้งหมด ดังรูป 14.19 ด้วยคุณสมบัตินี้จึงมีการนำกระจกเงารูปโค้งพาราโบลาไปใช้ในกล้องโทรทรรศน์ชนิดสะท้อนแสง

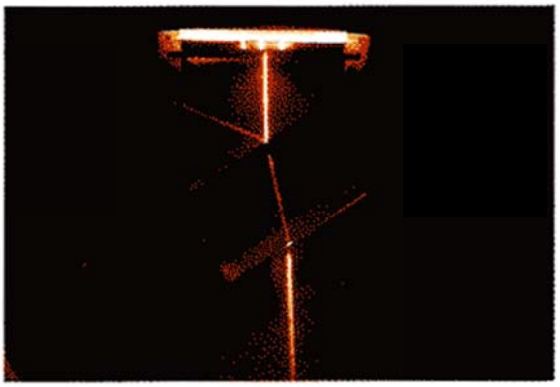
14.3 การหักเหของแสง

เมื่อมองดินสอที่ส่วนหนึ่งจุ่มอยู่ในน้ำและอีกส่วนหนึ่งอยู่เหนือผิวน้ำ จะเห็นดินสอทั้งสองส่วนไม่เป็นแท่งตรง และเห็นดินสอส่วนที่อยู่ในน้ำอยู่ที่ตำแหน่งสูงกว่าความเป็นจริง แสงจากดินสอที่อยู่ในน้ำเดินทางผ่านน้ำสู่อากาศมาเข้าตาอย่างไร

รูป 14.20 การเห็นดินสอไม่เป็นแท่งตรง

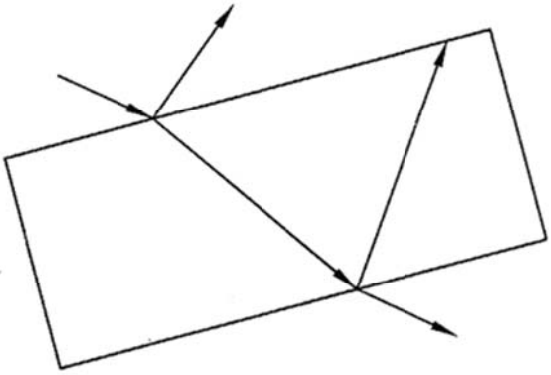
14.3.1 กฎการหักเหของแสง

วางแท่งพลาสติกบนแผ่นกระดาษขาวซึ่งอยู่บนโต๊ะ ฉายลำแสงตกกระทบด้านข้างของแท่งพลาสติก จะพบว่า ลำแสงส่วนหนึ่งสะท้อนจากผิว และลำแสงอีกส่วนหนึ่งผ่านเข้าไปในพลาสติก จากนั้นลำแสงก็ผ่านแท่งพลาสติกออกสู่อากาศ ดังรูป 14.21 จะเห็นได้ว่า เมื่อแสงผ่านผิวรอยต่อระหว่างอากาศกับแท่งพลาสติก หรือระหว่างแท่งพลาสติกกับอากาศ แสงจะเปลี่ยนทิศการเคลื่อนที่โดยเบนออกจากแนวเดิม เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า **การหักเหของแสง** สรุปเป็นกรณีทั่วๆ ไปได้ว่า การเคลื่อนที่ของแสงผ่านผิวรอยต่อของตัวกลางสองตัวกลาง เรียกว่า การหักเหของแสง และแสงที่เคลื่อนที่ผ่านผิวรอยต่อเข้าไปอีกตัวกลางหนึ่ง เรียกว่า แสงหักเห ถ้าแสงตกกระทบที่ผิวรอยต่อไม่ตั้งฉากกับผิวรอยต่อของตัวกลางทั้งสอง แสงหักเหจะเปลี่ยนทิศการเคลื่อนที่

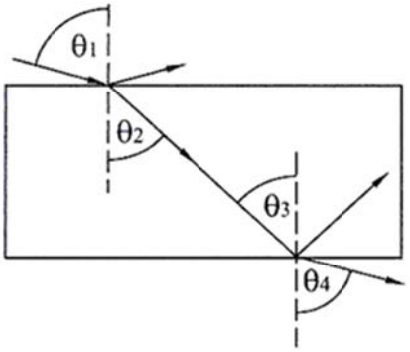


รูป 14.21 การสะท้อนและการหักเหของแสงที่แท่งพลาสติก

เมื่อแสงมีการหักเหขณะเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อระหว่างตัวกลาง 2 ชนิด ทราบหรือไม่ว่ากฎการหักเหของแสงเป็นอย่างไร ให้ศึกษาจากการทดลอง 14.1 เรื่องการหักเหของแสง



รูป 14.22 แสดงการสะท้อนและการหักเหของแสงด้วยรังสี



รูป 14.23 การหักเหของแสงเมื่อผ่านแท่งพลาสติก

เมื่อแสงตกกระทบแท่งพลาสติกเป็นมุม θ_1 ดังรูป 14.23 จะพบว่ามุมตกกระทบ θ_1 มีค่ามากกว่ามุมหักเห θ_2 ในแท่งพลาสติกเสมอ นั่นคือ รังสีหักเหจะเบนเข้าหาเส้นแนวฉาก และอัตราส่วน $\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2}$ มีค่าคงตัว หรืออัตราส่วนระหว่างไซน์ของมุมตกกระทบกับไซน์ของมุมหักเหมีค่าคงตัว ไม่ว่ามุมตกกระทบ θ_1 จะเป็นเท่าใดมุมหักเห θ_2 ก็จะเปลี่ยนตามจน $\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2}$ มีค่าคงตัว

ถ้าเขียนรังสีแทนลำแสงที่ตกกระทบแท่งพลาสติกจะได้ภาพ 14.23

θ_1 เป็นมุมตกกระทบในอากาศ

θ_2 เป็นมุมหักเหในแท่งพลาสติก

θ_3 เป็นมุมตกกระทบในแท่งพลาสติก

และ θ_4 เป็นมุมหักเหในอากาศ

หากเปลี่ยนแท่งพลาสติกเป็นวัตถุอื่นจะพบว่าอัตราส่วน $\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2}$ ก็ยังมีค่าคงตัว แต่ค่าคงตัวสำหรับตัวกลางคู่หนึ่งๆ นั้น จะมีค่าไม่เท่ากัน เช่น เมื่อให้แสงจากอากาศผ่านเข้าไปในเพชรจะได้ค่าคงตัวเท่ากับ 2.42 และถ้าแสงจากอากาศผ่านเข้าไปในน้ำจะได้ค่าคงตัวเท่ากับ 1.33

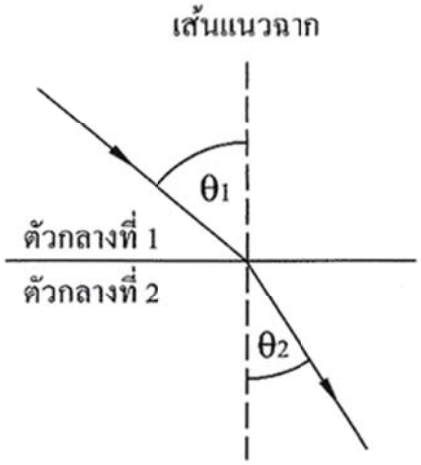
เมื่อพิจารณามุมตกกระทบ θ_3 ในแท่งพลาสติกในรูป 14.23 จะเห็นว่ามีค่าน้อยกว่ามุมหักเห θ_4 เสมอ และ $\frac{\sin\theta_3}{\sin\theta_4}$ ก็มีค่าคงตัว ถ้าเปลี่ยนแท่งพลาสติกเป็นวัตถุอื่น มุมตกกระทบ θ_3 ก็ยังน้อยกว่ามุมหักเห θ_4 และ $\frac{\sin\theta_3}{\sin\theta_4}$ ก็ยังคงมีค่าคงตัวเช่นกันแต่ค่าคงตัวนี้จะแตกต่างจากค่าคงตัวระหว่างแท่งพลาสติกกับอากาศ

สำหรับตัวกลางคู่หนึ่ง **อัตราส่วนระหว่างไซน์ของมุมตกกระทบกับไซน์ของมุมหักเหมีค่าคงตัวเสมอความสัมพันธ์นี้เรียกว่า กฎของสเนลล์**

จากรูป 14.24 แสงผ่านจากตัวกลาง 1 และหักเหเข้าไปในตัวกลาง 2 ในที่นี้ θ_1 เป็น มุมตกกระทบ และ θ_2 เป็นมุมหักเห สามารถเขียนกฎของสเนลล์เป็น

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \text{ค่าคงตัว}$$

ถ้าแสงเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว V_1 และ V_2 ในตัวกลาง 1 และตัวกลาง 2 ตามลำดับ จากความรู้เรื่องการหักเหของคลื่นในบทคลื่นกล



รูป 14.24 รังสีตกกระทบในตัวกลาง 1 และรังสีหักเหในตัวกลาง 2

จะได้

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{V_1}{V_2} \qquad \textbf{(14.5)}$$

ถ้าตัวกลาง 1 เป็นสุญญากาศ และตัวกลาง 2 เป็นตัวกลางใดๆ

ให้ C เป็นอัตราเร็วของแสงในสุญญากาศ

V เป็นอัตราเร็วของแสงในตัวกลางใดๆ

จะได้

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{C}{V}$$

ให้คำนิยามของ**ดรรชนีหักเหของตัวกลาง** ว่า **ดรรชนีหักเหของตัวกลาง** คือ **อัตราส่วนระหว่างอัตราเร็วของแสงในสุญญากาศกับอัตราเร็วของแสงในตัวกลางนั้น**

ถ้าให้ n แทน ดรรชนีหักเหของตัวกลาง

จะได้

$$n = \frac{C}{V} \qquad \textbf{(14.6)}$$

ดรรชนีหักเหมีหน่วยหรือไม่ ค่าของดรรชนีหักเหคิดจากอัตราส่วนระหว่างอัตราเร็วของแสงในสุญญากาศกับอัตราเร็วของแสงในตัวกลาง ดังนั้นดรรชนีหักเหจึงเป็นปริมาณที่ไม่มีหน่วย เช่น ดรรชนีหักเหของอากาศมีค่าประมาณ 1.0003 จึงอาจประมาณได้ว่ามีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งเป็นการประมาณค่าโดยให้อัตราเร็วของแสงในอากาศเท่ากับอัตราเร็วของแสงในสุญญากาศ ในการหาค่าดรรชนีหักเหของวัตถุหรือตัวกลาง ให้แสงเดินทางจากอากาศผ่านเข้าไปในวัตถุหรือตัวกลางและถือว่าเป็นค่าเดียวกับที่ให้แสงเดินทางจากสุญญากาศผ่านเข้าไปในวัตถุหรือตัวกลาง

ตาราง 14.1 แสดงดรรชนีหักเหของสสารชนิดต่างๆ เมื่อใช้แสงที่มีความยาวคลื่น 589 นาโนเมตร

ของแข็งที่อุณหภูมิ 20°C		ของเหลวที่อุณหภูมิ 20°C	
สสาร	ดรรชนีหักเห	สสาร	ดรรชนีหักเห
น้ำแข็ง	1.309	น้ำ	1.333
ฟลูออไรด์	1.434	กลีเซอรีน	1.473
ซิลิก้า	1.458	เอทิลอัลกอฮอล์	1.361
โพลิสไทรีน	1.49	คาร์บอนไดซัลไฟด์	1.628
แก้วคราวน์	1.52	เบนซีน	1.501
โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)	1.544		
แก้วฟลินท์	1.66		

แก๊สที่อุณหภูมิ 0°C ความดัน 1 บรรยากาศ	
แก๊ส	ดรรชนีหักเห
อากาศ	1.000293
คาร์บอนไดออกไซด์	1.00045

พิจารณารูป 14.24 ให้ n_1 เป็นดรรชนีหักเหของตัวกลาง 1

จากสมการ (14.5) จะได้ $n_1 = \frac{C}{V_1}$

$V_1 = \frac{C}{n_1}$

ให้ n_2 เป็นดรรชนีหักเหของตัวกลาง 2

จะได้ $V_2 = \frac{C}{n_2}$

แทนค่า V_1 และ V_2 ในสมการ (14.5)

จะได้ $\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2 \qquad (14.7)$$

สมการ (14.7) นี้ เป็นอีกรูปหนึ่งของกฎของสเนลล์ ซึ่งใช้กับสถานการณ์ต่างๆ ได้อย่างกว้างขวาง และ**กฎของสเนลล์นี้เป็นกฎหนึ่งของการหักเหของแสง**

การหักเหของแสงเกิดขึ้นเมื่อแสงเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อระหว่างตัวกลางคู่หนึ่งๆ โดยจะเป็นไปตาม**กฎการหักเหของแสง** ดังนี้

1. **รังสีตกกระทบ เส้นแนวฉาก และรังสีหักเหอยู่ในระนาบเดียวกันเสมอ**
2. **สำหรับตัวกลางคู่หนึ่ง อัตราส่วนระหว่างไซน์ของมุมตกกระทบในตัวกลางหนึ่งกับไซน์ของมุมหักเหในอีกตัวกลางหนึ่งมีค่าคงตัวเสมอ นี่คือกฎของสเนลล์**

ตัวอย่าง 14.4 แสงเดินทางออกจากแก้วคราวน์สู่อากาศ ทำมุมตกกระทบ 30° ที่ผิวรอยต่อระหว่างแก้วคราวน์กับอากาศ มุมหักเหเป็นเท่าใด กำหนดดรรชนีหักเหของอากาศ = 1.00 และ ดรรชนีหักเหของแก้วคราวน์ 1.52

วิธีทำ ใช้กฎของสเนลล์หามุมหักเห

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

$n_1 = 1.52$, $\theta_1 = 30^\circ$, $n_2 = 1.00$, $\theta_2 = ?$

แทนค่า $1.52 \sin 30^\circ = 1.00 \sin\theta_2$

$$\sin\theta_2 = \frac{1.52 \times 0.5}{1.00} = 0.760$$

$$\theta_2 = 49.5^\circ$$

คำตอบ แสงที่ออกจากแก้วคราวน์จะหักเหที่ผิวรอยต่อระหว่างแก้วคราวน์กับอากาศโดยมีมุมหักเหเท่ากับ 49.5°

ตัวอย่าง 14.5 แสงความยาวคลื่น 589 nm. เดินทางจากสุญญากาศเข้าสู่ซิลิกาด้วยอัตราเร็ว 2.06×10^8 m/s ดรรชนีหักเหของซิลิกาเป็นเท่าใด

กำหนดอัตราเร็วของแสงในสุญญากาศเท่ากับ 3.00×10^8 m/s

วิธีทำ การหาค่าดรรชนีหักเหของซิลิกา หาได้จาก

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

C เป็นอัตราเร็วของแสงในสุญญากาศ = 3.00×10^8 m/s

V เป็นอัตราเร็วของแสงในซิลิกา = 2.06×10^8 m/s

แทนค่า $n = \frac{3.00\times10^{8} m/s}{2.06\times10^{8} m/s}$

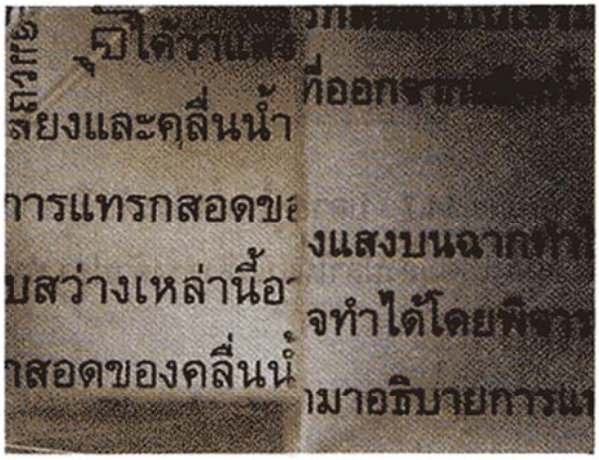
จะได้ $n = 1.46$

คำตอบ ดรรชนีหักเหของซิลิกาเท่ากับ 1.46

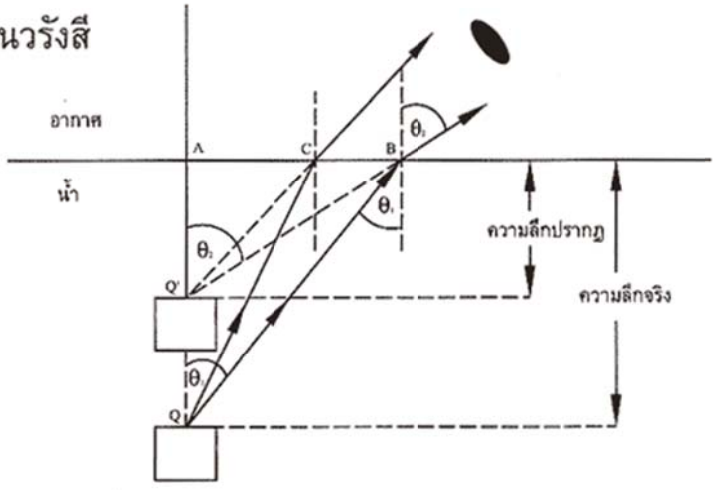
14.3.2 ความลึกจริงความลึกปรากฏ

นำแท่งพลาสติกใสผิวระนาบวางทับตัวหนังสือ ดังรูป 14.25 เมื่อมองดูตัวหนังสือใต้แท่งพลาสติก จะมองเห็นตัวหนังสือที่ตำแหน่งที่ไม่ใช่ตำแหน่งจริง เป็นตำแหน่งที่สูงขึ้นกว่าตำแหน่งเดิม เหตุใดจึงเป็นเช่นนั้น

ในการมองวัตถุที่อยู่ในน้ำโดยผู้มองอยู่ในอากาศดังรูป 14.26 การจะเห็นวัตถุได้ก็ต้องมีแสงจากวัตถุเคลื่อนที่ผ่านน้ำแล้วหักเหออกสู่อากาศเข้าตา เนื่องจากอากาศมีดรรชนีหักเหน้อยกว่าน้ำ ดังนั้นมุมหักเหในอากาศจึงมีค่ามากกว่ามุมตกกระทบในน้ำ เมื่อต่อแนวรังสีหักเหที่ B และ C รังสีเหล่านี้จะตัดกันที่ Q' ซึ่งอยู่เหนือ Q ซึ่งเป็นตำแหน่งของวัตถุ และ Q' เป็นภาพที่ตามองเห็น ระยะ $Q'A$ เรียกว่า **ความลึกปรากฏ** ระยะ QA เรียกว่า **ความลึกจริง** จากที่กล่าวมาสรุปได้ว่า **ในการมองวัตถุที่อยู่ในน้ำ เราจะเห็นวัตถุอยู่ตื้นกว่าเดิม** และเราสามารถหาตำแหน่งภาพที่ตามองเห็นได้ด้วยการต่อแนวรังสีหักเหย้อนไปพบกัน



รูป 14.25 การเห็นตัวหนังสือปรากฏตื้นกว่าตำแหน่งจริง



รูป 14.26 ความลึกของวัตถุที่ปรากฏสายตาและความลึกจริงของวัตถุ

การหาตำแหน่งภาพหรือความลึกปรากฏของวัตถุในน้ำ ทำได้ดังนี้

จากรูป 14.26 $\frac{AC}{AQ'} = \tan\theta_2$ และ $\frac{AC}{AQ} = \tan\theta_1$

ดังนั้น $\frac{AQ}{AQ'} = \frac{\tan\theta_2}{\tan\theta_1}$

หรือ $\frac{\text{ความลึกจริง}}{\text{ความลึกปรากฏ}} = \frac{\tan\theta_2}{\tan\theta_1}$

แต่ในการมองวัตถุซึ่งอยู่ในน้ำ ถ้ามองตรงๆ มุม θ_1 และ θ_2 จะเล็กมากซึ่งทำให้ $\tan\theta_2 \approx \sin\theta_2$ และ $\tan\theta_1 \approx \sin\theta_1$ ดังนั้น จากสมการที่ได้และกฎของสเนลล์เมื่อ n_1 และ n_2 คือ ดรรชนีหักเหของน้ำและอากาศตามลำดับ จะได้

$$\frac{\text{ความลึกจริง}}{\text{ความลึกปรากฏ}} = \frac{\sin\theta_2}{\sin\theta_1} = \frac{n_1}{n_2} \qquad \textbf{(14.8)}$$

ตัวอย่าง 14.7 ปลาอยู่ในน้ำที่ระดับลึกจากผิวน้ำ 2 เมตร ความลึกปรากฏของปลาเป็นเท่าใด เมื่อผู้สังเกตมองปลาในแนวดิ่งตรงตัวปลา กำหนดดรรชนีหักเหของอากาศ = 1.00 และดรรชนีหักเหของน้ำ = $\frac{4}{3}$

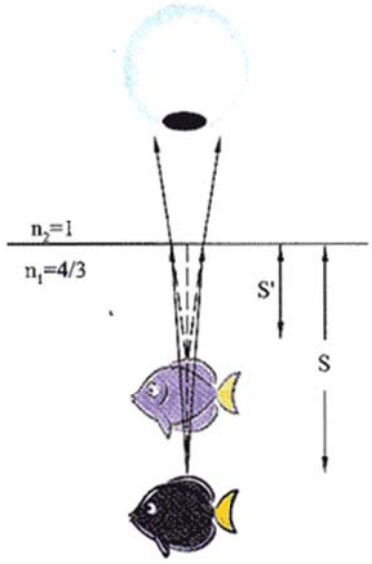
วิธีทำ ตามโจทย์ $n_2 = 1$, $n_1 = \frac{4}{3}$

จาก $\frac{\text{ความลึกปรากฏ}}{\text{ความลึกจริง}} = \frac{n_2}{n_1}$

$= \frac{3}{4} \times 2$

ความลึกปรากฏ = 1.5 เมตร

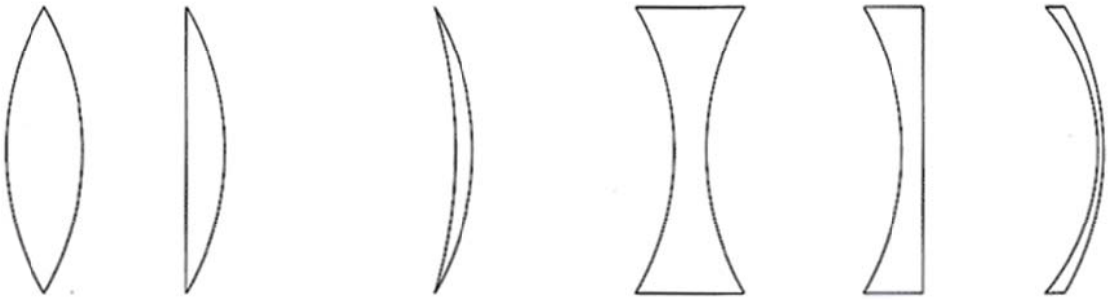
คำตอบ ระยะลึกปรากฏของปลาเท่ากับ 1.5 เมตร



รูป 14.27 สำหรับตัวอย่าง 14.7

14.4 เลนส์บาง

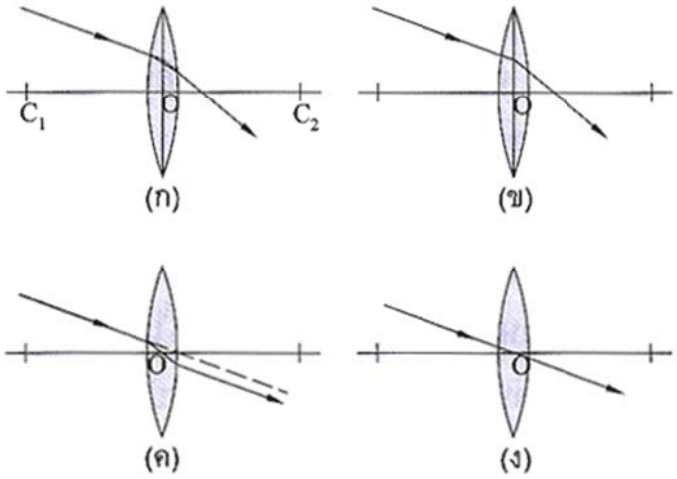
กล้องจุลทรรศน์ กล้องดูดาว และกล้องถ่ายรูป ล้วนเป็นอุปกรณ์ที่ใช้เลนส์ช่วยในการทำให้เกิดภาพ โดยใช้หลักการหักเหของแสง เลนส์ทำด้วยแก้วหรือพลาสติกที่มีผิวโค้งทรงกลมสองข้างไม่ขนานกัน เลนส์มี 2 ชนิด คือ เลนส์นูนและเลนส์เว้า ดังรูป 14.28



รูป 14.28 เลนส์นูนและเลนส์เว้าแบบต่าง ๆ

เลนส์ที่ใช้ศึกษาในบทเรียนเป็นเลนส์บาง ซึ่งเป็นเลนส์ที่มีความหนาน้อยเมื่อเทียบกับระยะวัตถุ ระยะภาพ และรัศมีความโค้งของผิวโค้งทรงกลมทั้งสองผิวและผิวโค้งทรงกลมทั้งสองของเลนส์อยู่ใกล้กันมาก เมื่อมีวัตถุอยู่หน้าเลนส์บาง จะเกิดภาพของวัตถุ

ส่วนสำคัญของเลนส์มีอะไรบ้าง เมื่อรังสีต่างๆ ผ่านเลนส์ การหักเหของรังสีจะเป็นอย่างไร เมื่อเลนส์ทำให้เกิดภาพ ภาพจะมีลักษณะอย่างไร จะได้ศึกษากันต่อไป



รูป 14.29

ก. แสดงแกนมุขสำคัญและจุดศูนย์กลางเลนส์นูน

ข. แสดงการเขียนรังสีหักเหเมื่อผ่านเลนส์นูน

ค. แสดงรังสีหักเหเมื่อผ่านจุดกึ่งกลางเลนส์นูน

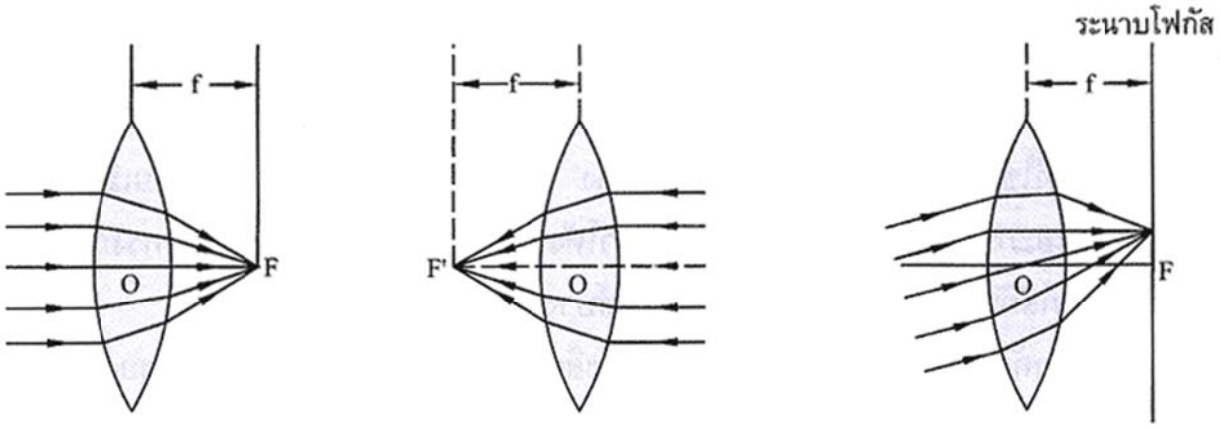
ง. แสดงแนวของรังสีที่ผ่านจุดกึ่งกลางเลนส์นูน

รูป 14.29 ก. แสดงเลนส์นูนบาง C_1 และ C_2 เป็นศูนย์กลางความโค้งของผิวทั้งสองเส้นตรงที่ผ่าน C_1 และ C_2 เรียกว่า **แกนมุขสำคัญ** O เป็นจุดบนแกนมุขสำคัญที่ห่างจากผิวทั้งสองของเลนส์เท่ากัน เรียกว่า **ศูนย์กลางเลนส์**

เวลารังสีหักเหผ่านผิวทั้งสองของเลนส์บาง จะสามารถเขียนได้เหมือนกับได้หักเหที่ระนาบกลางเลนส์ ซึ่งตัดผ่านจุดกึ่งกลาง O ของเลนส์ ดังรูป 14.29 ก. และ ข.

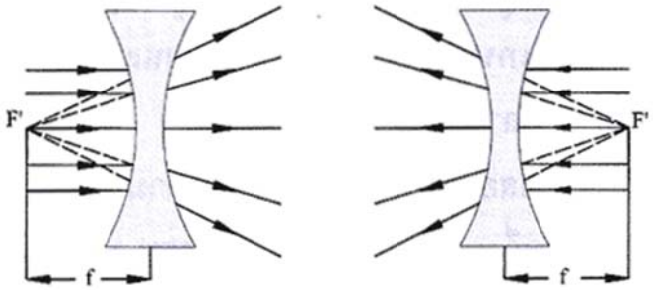
รังสีที่หักเหผ่านจุดกึ่งกลาง O เมื่อผ่านเลนส์จะเบนจากแนวเดิมเล็กน้อย โดยขนานกับแนวรังสีตกกระทบ ดังรูป 14.29 ค. ดังนั้น สำหรับเลนส์บาง จึงถือว่ารังสีตกกระทบที่มีทิศผ่านจุด O จะผ่านเลนส์โดยไม่เบนดังรูป 14.29 ง.

สำหรับการเขียนรังสีที่หักเห ผ่านเลนส์เว้าก็ทำได้ในลักษณะเดียวกัน



รูป 14.30 แสดงจุดรวมแสงขนานเมื่อผ่านเลนส์นูน

ถ้ามีรังสีขนานกับแกนมุขสำคัญตกกระทบเลนส์นูน และถ้ารังสีเหล่านี้อยู่ใกล้แกนมุขสำคัญ เมื่อผ่านเลนส์นูนจะหักเหไปรวมกันที่จุดๆ หนึ่งบนแกนมุขสำคัญของเลนส์นูน ดังรูป 14.30 ก. จุดนี้เรียกว่า **จุดโฟกัส** ในรูปคือจุด F แต่รังสีขนานทั้งหลายที่มาทางด้านขวามือของเลนส์ก็จะมารวมกันที่จุดโฟกัสอีกด้านหนึ่งบนแกนมุขสำคัญ คือ จุด F' ดังรูป 14.30 ข. ระยะ OF ซึ่งเท่ากับ OF' คือ f ซึ่งเรียกว่า **ความยาวโฟกัสของเลนส์** แต่ถ้ารังสีขนานเหล่านี้ไม่ขนานกับแกนมุขสำคัญ (แต่ทำมุมเล็กๆ กับแกน) ก็จะไปรวมกันที่จุดหนึ่งบนระนาบโฟกัส ดังรูป 14.30 ค.

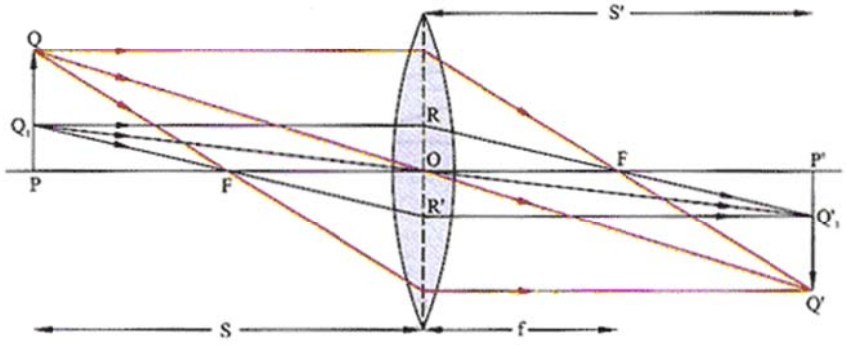


รูป 14.31 แสดงโฟกัสของเลนส์เว้า

ในกรณีของเลนส์เว้า รังสีทั้งหลายที่ขนานกับแกนมุขสำคัญเมื่อผ่านเลนส์เว้าแล้ว รังสีจะเบนหรือกระจายออก ถ้ารังสีเหล่านี้ถ้าต่อย้อนกลับไปก็จะพบกันที่จุด F' ดังรูป 14.31 ก. จุด F' เป็นจุดโฟกัสเสมือนของเลนส์เว้า ถ้ามีรังสีขนานมาจากทางขวาของเลนส์ก็จะทำให้เกิดจุดโฟกัสเสมือน F' ขึ้นอีกด้านเดียวกัน ดังรูป 14.31 ข. ความยาวโฟกัสของเลนส์เว้าทั้งสองกรณีนี้เท่ากัน ในกรณีที่รังสีขนานไม่ขนานกับแกนมุขสำคัญ ก็สามารถเขียนแนวของรังสีหักเหได้ในทำนองเดียว กับกรณีของเลนส์นูน 14.30 ค.

ในกรณีที่วัตถุอยู่บนแกนมุขสำคัญและอยู่ไกลๆ จากเลนส์มาก รังสีจากวัตถุที่ตกกระทบเลนส์จะขนานกัน เมื่อรังสีเหล่านี้ผ่านเลนส์แล้วจะพบกันที่จุดโฟกัส F ในกรณีของเลนส์นูนหรือเสมือนพบกันที่จุดโฟกัส F ในกรณีของเลนส์เว้า ดังนั้น F ก็คือภาพของวัตถุที่อยู่ไกลจากเลนส์นูนและเป็นภาพจริงใช้ฉากรับภาพได้ แต่ในกรณีของเลนส์เว้าภาพจะเป็นภาพเสมือน รูป 14.31

ถ้านำเลนส์นูนมารับแสงจากวัตถุ ซึ่งวางอยู่ห่างจากเลนส์ไกลยิ่งกว่าความยาวโฟกัสของเลนส์นั้น สามารถหาตำแหน่งของภาพได้ด้วยการนำฉากมารับแสงที่หักเหผ่านเลนส์นูน การหาตำแหน่งภาพซึ่งเกิดจากเลนส์บาง ทำได้โดยการเขียนแผนภาพของรังสี ทราบแล้วว่ารังสีออกจากวัตถุทุกทิศทาง เมื่อรังสีเหล่านี้ผ่านเลนส์จะหักเหไปพบกันจึงทำให้เกิดภาพ แต่จะใช้รังสีจากวัตถุเพียง 3 รังสีเท่านั้นในการเขียนแผนภาพตามกฎการหักเหของแสง รูป 14.32 แสดงการหาตำแหน่งภาพที่เกิดจากเลนส์นูน ด้วยวิธีการดังนี้



รูป 14.32 การเขียนรังสีของแสงเพื่อ หาตำแหน่งภาพที่เกิดจากเลนส์นูน

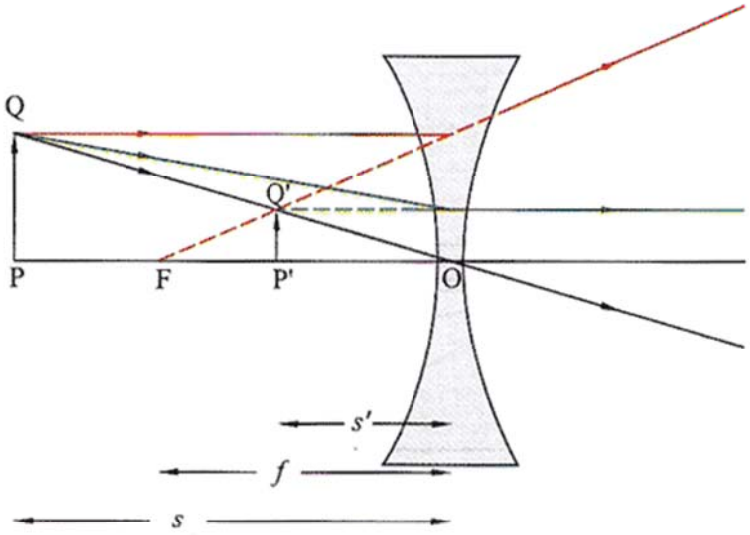
วัตถุ PQ ตั้งฉากกับแกนมุขสำคัญและห่างจากเลนส์นูนเป็นระยะ S เลนส์นูนมีความยาวโฟกัส f เขียนรังสีเพื่อหาตำแหน่งภาพดังนี้

1. เขียนรังสีตกกระทบ QR ขนานกับเส้นแกนมุขสำคัญ รังสีหักเหจะผ่านโฟกัส F
2. เขียนรังสีตกกระทบ QO ผ่านศูนย์กลางเลนส์ O รังสีหักเหจะผ่านเลนส์ออกไปในแนวเดิม
3. เขียนรังสีตกกระทบ QR' ผ่านโฟกัส F' รังสีจะขนานกับเส้นแกนมุขสำคัญของเลนส์

จุดตัดของรังสีหักเหทั้ง 3 เป็นตำแหน่งภาพของ Q คือ Q' ในทำนองเดียวกันจะได้ Q_1' เป็นภาพของ Q_1 และ P' เป็นภาพของ P ดังนั้น $P'Q'$ จึงเป็นภาพของวัตถุ PQ เพราะ $P'Q'$ เป็นภาพที่เกิดด้านหลังเลนส์นูนและมีรังสีหักเหมาตัดกันจริง ดังนั้นจึงเป็น**ภาพจริง** ตามรูป 14.32 s เป็นระยะวัตถุ และ s' เป็นระยะภาพ

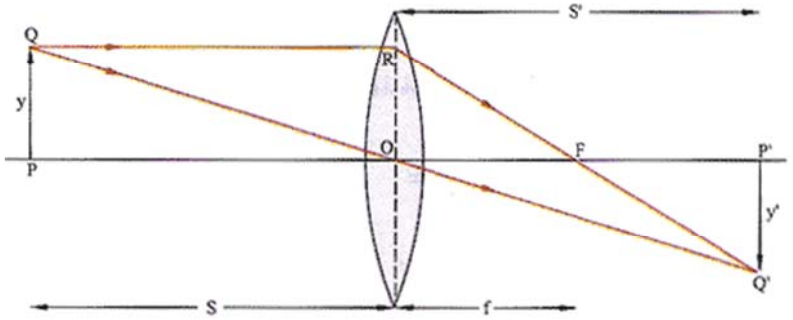
ในกรณีที่วัตถุอยู่ระหว่างจุดโฟกัส F และจุด O การเขียนภาพ จะพบว่า เกิดภาพหน้าเลนส์นูนและเป็นภาพที่รังสีหักเหเสมือนย้อนมาตัดกัน จึงเป็น**ภาพเสมือน** ขนาดของภาพที่เกิดจากเลนส์นูนมีทั้งขนาดขยาย เท่า และเล็กกว่าวัตถุและภาพที่เกิดมีทั้งภาพจริงและภาพเสมือน ซึ่งทั้งนี้ขึ้นกับระยะวัตถุ

ถ้าใช้เลนส์เว้าแทนเลนส์นูนก็สามารถเขียนรังสีของแสงเพื่อหาตำแหน่งภาพได้ ดังรูป 14.33 ในกรณีนี้ภาพที่ได้เป็นภาพเสมือน เพราะไม่ได้เกิดจากรังสีหักเหไปตัดกันจริง พบว่าภาพจากเลนส์เว้าจะเป็นภาพเสมือนหัวตั้งที่มีขนาดเล็กลงเสมอ



รูป 14.33 การเขียนรังสีของแสงเพื่อหาภาพที่เกิดจากเลนส์เว้า

การหาตำแหน่งภาพที่ผ่านมา ใช้วิธีเขียนแผนภาพของรังสี ยังมีอีกวิธีที่ใช้หาตำแหน่งภาพ คือ วิธีคำนวณ ดังนี้



รูป 14.34 การเกิดภาพเนื่องจากเลนส์นูน

วางวัตถุ PQ ไว้ที่หน้าเลนส์นูนและเกิดภาพ $P'Q'$ หลังเลนส์นูน ดังรูป 14.34 ให้ s เป็นระยะวัตถุ s' เป็นระยะภาพและ f เป็นความยาวโฟกัส

เนื่องจาก ΔOPQ คล้ายกับ $\Delta OP'Q'$

จะได้ $$\frac{y'}{y} = \frac{s'}{s} \quad (1)$$

เพราะ ΔFOR คล้ายกับ $\Delta FP'Q'$

จะได้ $$\frac{y'}{y} = \frac{s'-f}{f} \quad (2)$$

จาก (1) และ (2) $$\frac{s'}{s} = \frac{s'-f}{f}$$

จะได้ $$\frac{1}{s}+\frac{1}{s'} = \frac{1}{f} \quad \textbf{(14.9)}$$

พบว่าสมการ (14.9) ใช้ได้ทั้งกรณีเลนส์นูนและเลนส์เว้า แต่ในการหาตำแหน่งภาพและชนิดของภาพ จะต้องมีการกำหนดเครื่องหมาย + และ - สำหรับปริมาณต่างๆ ในสมการดังนี้

1. s มีเครื่องหมาย + ถ้าวัตถุอยู่หน้าเลนส์ และ s มีเครื่องหมาย - ถ้าวัตถุอยู่หลังเลนส์
2. s' มีเครื่องหมาย + ถ้าภาพอยู่หลังเลนส์ และ s' มีเครื่องหมาย - ถ้าภาพอยู่หน้าเลนส์
3. f ของเลนส์นูนมีเครื่องหมาย + และ f ของเลนส์เว้ามีเครื่องหมาย -

ความสัมพันธ์ระหว่าง s , s' และ f ตามสมการ (14.9) สามารถแสดงให้เห็นจริงโดยการทดลองได้หรือไม่ ให้ศึกษาการทดลอง 14.2 เรื่องการหักเหของแสงผ่านเลนส์นูน

จากการทดลองจะเห็นว่า กราฟระหว่าง $\frac{1}{s}$ กับ $\frac{1}{s'}$ เป็นเส้นตรงที่ตัดแกนทั้งสองโดยมีความชันเป็น -1 นอกจากนี้จุดตัดบนแกนยืนและนอนยังมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{f}$

นั่นคือ $$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$$

จากรูป 14.34 ขนาดภาพ y' และขนาดวัตถุ y มีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\frac{y'}{y} = \frac{s'}{s}$$

เพราะในกรณีภาพเสมือนที่ s' มีค่าเป็นลบ ดังนั้นความสัมพันธ์นี้อาจเขียนได้เป็น

$$\frac{y'}{y} = \frac{|s'|}{s} \qquad \textbf{(14.10)}$$

ตัวอย่าง 14.8 เลนส์นูนที่มีความยาวโฟกัส 10 เซนติเมตร เมื่อวางวัตถุห่างเลนส์นูน 30 เซนติเมตร ภาพที่เกิดขึ้นเป็นภาพชนิดใด และอยู่ที่ใด และถ้าวัตถุอยู่ห่างเลนส์นูน 6 เซนติเมตร ภาพที่เกิดขึ้นเป็นภาพชนิดใด

วิธีทำ เมื่อวัตถุอยู่ห่างเลนส์นูน 30 เซนติเมตร

จาก $$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$$

แทนค่า $$\frac{1}{+30} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{+10}$$

$$s' = +15 \text{ cm.}$$

s' มีเครื่องหมาย + แสดงว่าภาพที่ได้เป็นภาพจริง

คำตอบ ได้ภาพจริงที่อยู่ห่างเลนส์นูน 15 เซนติแมตร

เมื่อวัตถุอยู่ห่างเลนส์นูน 6 เซนติเมตร

จาก $$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$$

แทนค่า $$\frac{1}{+6} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{10}$$

$$s' = -15 \text{ cm.}$$

s' มีเครื่องหมาย - แสดงว่า ภาพเป็นภาพเสมือน จากการเขียนรูปพบว่าเป็นภาพหัวตั้ง

คำตอบ ภาพที่ได้เป็นภาพเสมือนหัวตั้งและอยู่ห่างจากเลนส์ 15 เซนติเมตร

ตัวอย่าง 14.9 วางวัตถุที่ยาว 1.4 เซนติเมตร ในแนวตั้งฉากกับแกนมุขสำคัญหน้าเลนส์เว้าที่มีความยาวโฟกัส 20 เซนติเมตร โดยอยู่ห่างเลนส์เว้า 15 เซนติเมตร ภาพที่เกิดขึ้นเป็นภาพชนิดใดและอยู่ห่างเลนส์เว้าเท่าใด และภาพมีขนาดเท่าใด

วิธีทำ จาก $\frac{1}{f} = \frac{1}{s}+\frac{1}{s'}$

$f = -20$ cm. $\quad s = 15$ cm.

แทนค่า $\frac{1}{-20} = \frac{1}{15}+\frac{1}{s'}$

$s' = \frac{-60}{7} = -8.57$ cm.

แสดงว่า ภาพเป็นภาพเสมือน เพราะ s' มีเครื่องหมาย - และเป็นภาพหัวตั้ง

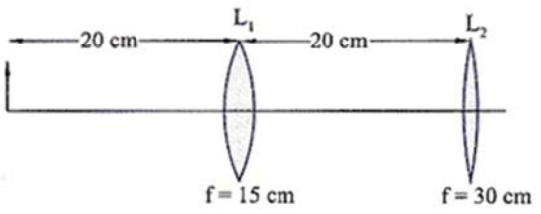
หาขนาดของภาพจาก $\frac{y'}{y} = \frac{|s'|}{s}$

แทนค่า $\frac{y'}{1.4\,cm} = \frac{60\,cm}{7}\times\frac{1}{20cm}$

$y' = 0.6$ cm.

คำตอบ เกิดภาพเสมือนหัวตั้งหน้าเลนส์เว้าที่ระยะ 8.57 เซนติเมตรและภาพมีขนาดยาว 0.6 เซนติเมตร

ตัวอย่าง 14.10 เลนส์นูน L_1 และ L_2 ซึ่งมีความยาวโฟกัส 15 เซนติเมตร และ 30 เซนติเมตร ตามลำดับ อยู่ห่างกัน 20 เซนติเมตร วางวัตถุไว้หน้าเลนส์ L_1 ห่างจากเลนส์ 20 เซนติเมตร จงหาตำแหน่งของภาพสุดท้าย



รูป 14.35 สำหรับตัวอย่าง 14.10

วิธีทำ หาภาพของวัตถุที่เกิดเลนส์ L_1 ซึ่งที่มี $f = 15$ cm.

จาก $\frac{1}{s}+\frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$

$s = +20$ cm. $\quad f = +15$ cm. $\quad s' = ?$

แทนค่า $\frac{1}{+20}+\frac{1}{s'} = \frac{1}{+15}$

$s' = 60$ cm.

เพราะ L_2 อยู่ห่างจาก L_1 เพียง 20 cm. ดังนั้นภาพเกิดทางด้านขวามือของเลนส์ L_2 และภาพนี้จะทำหน้าที่เป็นวัตถุของเลนส์ L_2 และเป็นวัตถุที่อยู่หลังเลนส์

ดังนั้น ระยะวัตถุ $s = -(60-20) = -40$ cm.

หาภาพเนื่องจากเลนส์อันที่ L_2

จาก $\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$

s = - 40 cm. f = + 30 cm. s' = ?

แทนค่า $\frac{1}{-40} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{+30}$

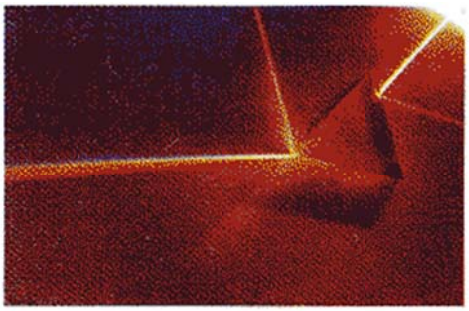
s' = 17.14 cm.

คำตอบ จะได้ ภาพสุดท้ายเกิดขึ้นทางขวาของเลนส์ L_2 และห่างจากเลนส์ 17.14 เซนติเมตร และเป็นภาพจริง

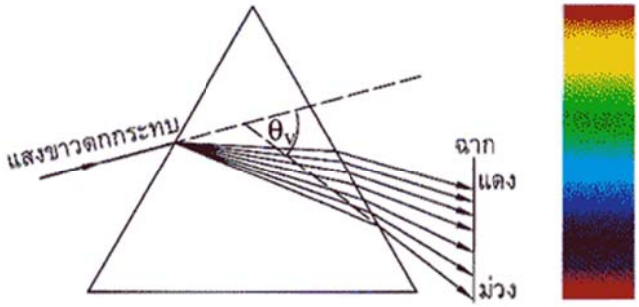
14.5 ปรากฏการณ์ที่เกี่ยวกับแสง

14.5.1 การกระจายแสง

เมื่อให้แสงขาวซึ่งประกอบด้วยแสงหลายสีผ่านปริซึมสามเหลี่ยม พบว่าแสงที่หักเหออกมาจากปริซึมจะไม่เป็นแสงขาว แต่จะมีสีต่างๆ กัน แสงแต่ละสีที่หักเหออกมาจะทำมุมหักเหต่างๆ กัน แสงแต่ละสีจึงปรากฏบนฉาก ณ ตำแหน่งต่างๆ กัน ดังรูป 14.36 ก. ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า **การกระจายแสง**



ก.



ข.

รูป 14.36 การกระจายแสง

มุมที่รังสีหักเหออกจากปริซึมทำกับรังสีตกกระทบที่ผิวแรกของปริซึม เรียกว่า **มุมเบี่ยงเบน** จากรูป 14.36 ข. θ_V คือมุมเบี่ยงเบนของแสงสีม่วงซึ่งมีค่ามากที่สุด ส่วนมุมเบี่ยงเบนของแสงสีแดง θ_R นั้นมีค่าน้อยที่สุด ถ้าให้ปริซึมนี้รับแสงอาทิตย์ แถบสีที่ได้ก็จะมีลักษณะเช่นเดียวกับที่ใช้รับแสงจากกล่องแสง เรียกแถบสีนี้ว่า **สเปกตรัมของแสงขาว**

ทราบหรือไม่ เหตุใดแสงแต่ละสีจึงทำมีมุมเบี่ยงเบนต่างกัน

จากการพิจารณาพบว่า เมื่อแสงจากสุญญากาศหรืออากาศผ่านเข้าไปในปริซึม แสงสีม่วงจะหักเหมากที่สุด ส่วนแสงสีอื่นๆ ในสเปกตรัมจะหักเหน้อยลดหลั่นกันไป และแสงสีแดงจะหักเหน้อยที่สุด

จากรูป 14.24 และจากสมการ (14.7) หรือกฎของสเนลล์

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

ถ้าตัวกลาง 1 เป็น สุญญากาศหรืออากาศ จะได้ $n_1 = 1$ และตัวกลาง 2 เป็นแก้ว ถ้าให้ดรรชนีหักเหของแก้วเท่ากับ n นั่นคือ $n_2 = n$ จะได้

$$\sin\theta_2 \quad = \quad \frac{1}{n}\sin\theta_1$$

สมการนี้แสดงว่าสำหรับมุมตกกระทบ θ_1 ค่าหนึ่ง มุกหักเห θ_2 จะขึ้นกับค่า n และถ้า θ_2 น้อยที่สุด การหักเหจะมากที่สุดนั่นคือการหักเหจะมากถ้า n มีค่ามาก จากการทดลองในรูป 14.36 เพราะแสงสีม่วงหักเหมากที่สุด ดังนั้น n สำหรับแสงสีม่วงจึงมีค่ามากที่สุด และ n สำหรับแสงสีอื่นๆ จะมีค่าน้อยลงและน้อยที่สุดสำหรับแสงสีแดง

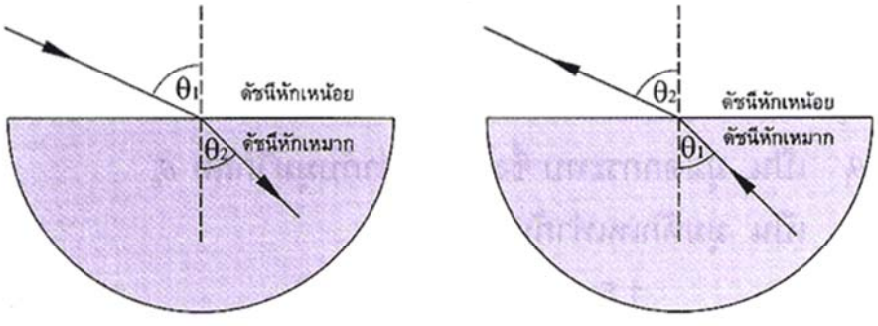
เมื่อพิจารณาความยาวคลื่น (λ) และความถี่ (f) ของแสง

เพราะ $\lambda_{\text{ม่วง}} < \lambda_{\text{แดง}}$

จะได้ $f_{\text{ม่วง}} > f_{\text{แดง}}$

รูป 14.36 แสดงว่า สำหรับแสงที่มี λ สั้นกว่าคือมี f มากกว่า n จะมีค่ามากกว่า และแสงจะหักเหได้มากกว่า ในตัวกลางอื่นๆ เช่น น้ำ หรือพลาสติกใส ฯลฯ ก็มีสมบัติเช่นเดียวกับแก้ว คือ ดรรชนีหักเหของตัวกลางสำหรับแสงสีต่างๆ จะมีค่าไม่เท่ากัน

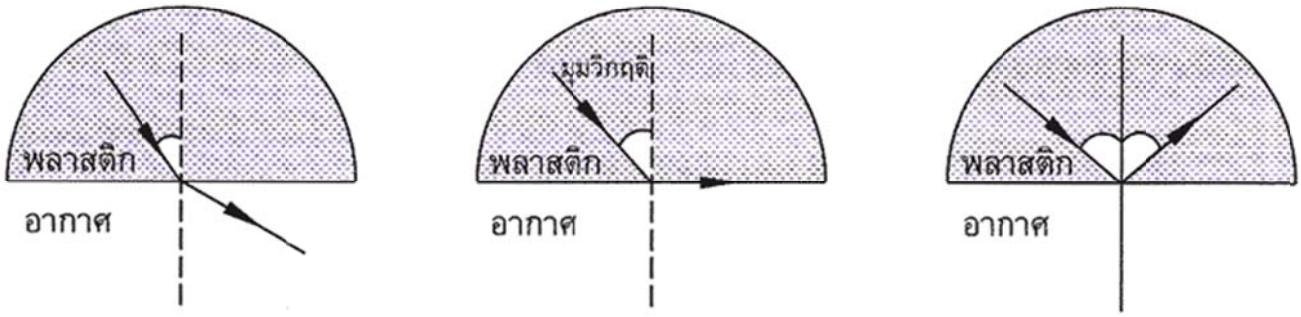
14.5.2 การสะท้อนกลับหมดของแสง



รูป 14.37 การหักเหของแสงในตัวกลางที่มีดรรชนีหักเหต่างกัน

เมื่อแสงจากตัวกลางหนึ่งผ่านเข้าไปในอีกตัวกลางหนึ่ง ซึ่งมีดรรชนีหักเหมีค่ามากกว่าพบว่ามุมหักเห θ_2 ในตัวกลางที่ดรรชนีหักเหมีค่ามากกว่าจะเล็กกว่ามุมตกกระทบ θ_1 ดังรูป 14.37 ก. แต่ถ้าแสงเดินทางกลับกัน มุมหักเห θ_2 ในตัวกลางที่ดรรชนีหักเหมีค่าน้อยกว่าจะใหญ่กว่ามุมตกกระทบ θ_1 ดังรูป 14.37 ข. สำหรับกรณีที่ 2 นี้ ถ้าเพิ่มมุมตกกระทบ θ_1 ไปเรื่อยๆ มุมหักเห θ_2 ก็มีโอกาสเท่ากับ 90° ถ้าเพิ่ม θ_1 ต่อไปอีกการหักเหจะเป็นอย่างไร

เมื่อแสงจากแท่งพลาสติกผ่านเข้าไปในตัวกลางที่ดรรชนีหักเหมีค่าน้อยกว่า เช่น อากาศ มุมตกกระทบที่ผิวรอยผิวต่อระหว่างตัวกลางทั้งสอง ทำให้เกิดมุมหักเหเท่ากับ 90° เรียกมุมตกกระทบดังกล่าวว่า **มุมวิกฤต** θ_c ถ้ามุมตกกระทบใหญ่กว่ามุมวิกฤตจะไม่มีรังสีหักเห แต่จะมีรังสีสะท้อนเท่านั้น ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า **การสะท้อนกลับหมด** ดังแสดงในรูป 14.38 หามุมวิกฤตในตัวกลางต่างๆ ได้โดยใช้กฎของสเนลล์



รูป 14.38 การสะท้อนกลับหมดในตัวกลางที่มีดรรชนีหักเหมาก

ตัวอย่าง 14.12 จงหามุมวิกฤตของแท่งพลาสติก ดรรชนีหักเหมีค่าประมาณ 1.5

วิธีทำ เพราะพลาสติกมีความหนาแน่นมากกว่าอากาศ ดังนั้น แสงเกิดปรากฏการณ์สะท้อนกลับหมด จะต้องคิดว่าแสงเดินทางจากแท่งพลาสติกไปยังอากาศ แท่งพลาสติกจึงเป็นตัวกลาง 1 และอากาศเป็นตัวกลาง 2

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

n_1 เป็น ดรรชนีหักเหของแท่งพลาสติก เท่ากับ 1.5

n_2 เป็น ดรรชนีหักเหของอากาศเท่ากับ 1

θ_1 เป็น มุมตกกระทบ ซึ่งในที่นี้เท่ากับมุมวิกฤต θ_c

θ_2 เป็น มุมหักเหเท่ากับ 90 องศา

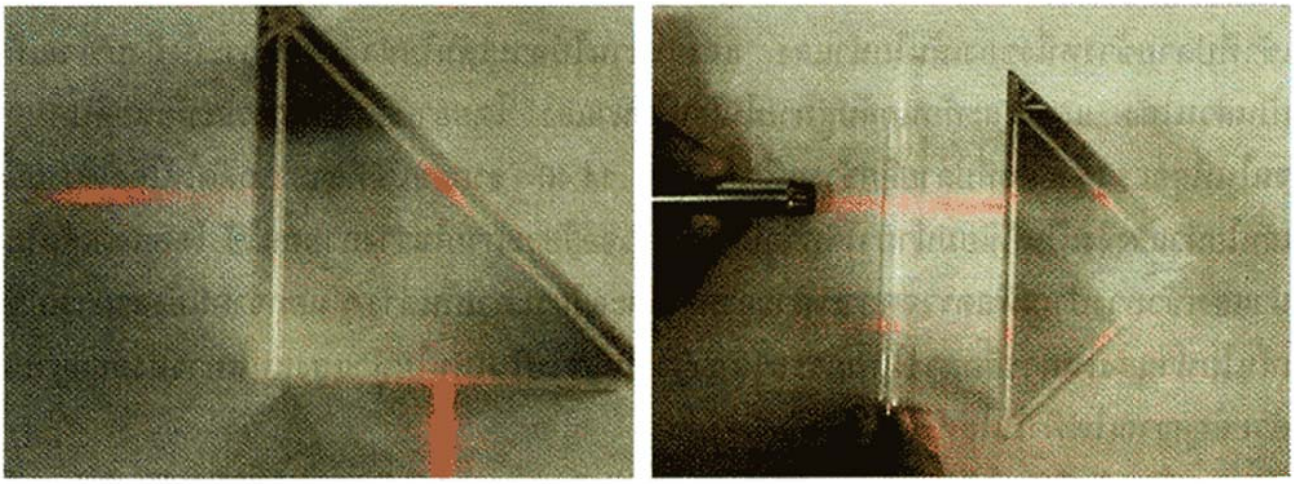
แทนค่า $$1.5 \sin\theta_c = 1 \sin 90^\circ$$

ดังนั้น $$\sin\theta_c = 0.667$$

$$\theta_c = 42^\circ$$

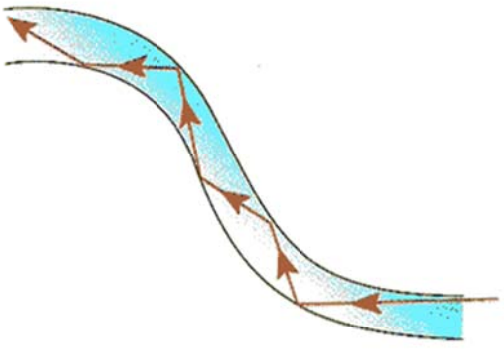
คำตอบ นั่นคือ มุมวิกฤตของแท่งพลาสติก มีค่าประมาณ 42 องศา

สำหรับแท่งแก้วที่ใช้โดยทั่วไปมีดรรชนีหักเหมีค่าประมาณ 1.5 ดังนั้นมุมวิกฤตในแก้วจะมีค่าประมาณ 42 องศาด้วย



รูป 14.39 การสะท้อนกลับหมดจากปริซึมที่มีมุม 45 องศา - 45 องศา - 90 องศา เมื่อวางปริซึมรับแสงในลักษณะต่างกัน

เหตุใดจึงเกิดการสะท้อนกลับหมดในปริซึมตามรูป 14.39 การสะท้อนแบบนี้ให้ภาพคมชัดกว่าการสะท้อนจากกระจกเงาราบที่ใช้ปรอทหรือโลหะบางชนิดฉาบไว้ที่ผิวของกระจก เนื่องจากปรอทหรือโลหะที่ฉาบที่ผิวกระจกนั้นติดไม่ทน ดังจะเห็นได้จากกระจกเงาที่ใช้อยู่ทั่วไป นอกจากนี้การใช้ปริซึมลักษณะดังกล่าว เราอาจกำหนดทิศทางของแสงที่ผ่านออกมาได้ด้วย ปริซึมลักษณะนี้มีใช้อย่างแพร่หลายในทัศนอุปกรณ์หลายชนิด



รูป 14.40 การสะท้อนกลับหมดของแสงอย่างต่อเนื่องภายในเส้นใยนำแสง

การนำเส้นใยนำแสงมาใช้งานอาศัยหลักการสะท้อนกลับหมด โดยทั่วไปเส้นใยนำแสงทำด้วยแก้วและมีเส้นผ่านศูนย์กลางยาวประมาณ 0.01 - 0.1 มิลลิเมตร โดยการนำเส้นใยเหล่านี้จำนวนพันมามัดรวมกัน และใช้สารที่มีดรรชนีหักเหน้อยกว่าแก้วยึดเส้นใยเหล่านี้ไว้ด้วยกัน (เพราะเส้นใยนำแสงมีขนาดเล็กมากจึงสามารถดัดให้โค้งงอได้โดยไม่แตกหัก) เมื่อให้แสงผ่านเข้าที่ปลายข้างหนึ่งของเส้นใยนำแสง แสงจะผ่านไปตามเส้นใยนำแสงจนกระทั่งถึงบริเวณที่เป็นส่วนโค้ง แสงจะสะท้อนกลับสู่ภายในเส้นใยนำแสง โดยอาศัยสมบัติการสะท้อนกลับหมดจนในที่สุดแสงพุ่งออกที่ปลายอีกข้างหนึ่ง ดังรูป 14.40 จากสมบัติที่สามารถดัดให้โค้งได้ง่ายนี้ เส้นใยนำแสงจึงเป็นที่นิยมนำมาใช้ทำอุปกรณ์ตรวจอวัยวะภายในร่างกายคนไข้ โดยสอดเส้นใยนำแสงเข้าทางปากเพื่อตรวจดูกระเพาะอาหารและอวัยวะภายในต่างๆ นอกจากนี้ยังสามารถใช้เส้นใยนำแสงในการสื่อสารโดยการส่งสัญญาณแสงไปในเส้นใยนำแสงแทนการส่งสัญญาณด้วยสัญญาณไฟฟ้าในโลหะตัวนำ

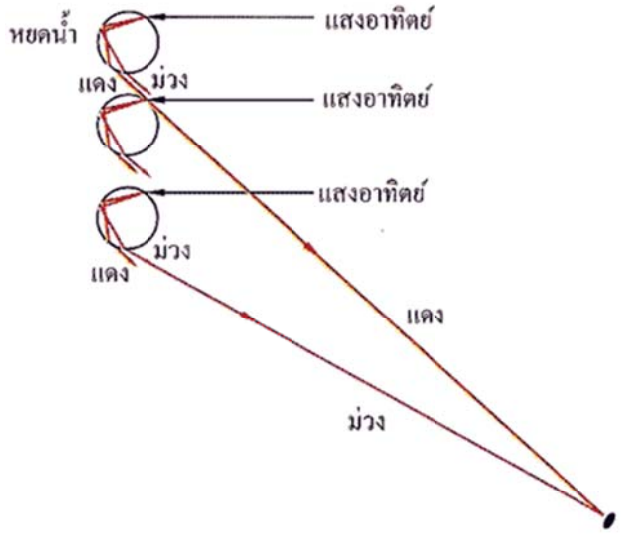
ปัจจุบันมีการใช้เส้นใยนำแสงในงานต่างๆ เช่น แพทย์ใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า ไฟเบอร์สโคปหรือเอนโดสโคปดังรูป 14.41 ซึ่งประกอบด้วยเส้นใยนำแสง 2 มัด สำหรับมาช่วยตรวจอวัยวะภายใน เช่น ในการตรวจดูสภาพภายในกระเพาะอาหาร โดยแพทย์จะสอดมัดเส้นใยนำแสงด้านขวามือลงในกระเพาะของคนไข้ และให้แสงเข้าตามมัดเส้นใยนำแสง ด้านซ้ายมือซึ่งจะผ่านกลุ่มเส้นใยนำแสงรอบนอกของเส้นใยมัดแรก เมื่อแสงตกกระทบที่ผนังอวัยวะภายในตรงบริเวณที่ต้องการตรวจ แสงก็จะสะท้อนกลับออกมาทางกลุ่มเส้นใยนำแสงด้านใน ทำให้แพทย์สามารถเห็นภาพของบริเวณที่ตรวจ ภาพที่เห็นเกิดจากเส้นใยนำแสงแต่ละเส้นนำแสงสะท้อนจากบริเวณเล็กๆ ดังนั้นเมื่อรวมกันทั้งกลุ่มจึงได้ภาพที่สมบูรณ์ กลุ่มเส้นใยนำแสงนี้จึงเปรียบเสมือนตาประกอบของแมลงนั่นเองและเมื่อต่ออุปกรณ์นี้กับกล้องถ่ายรูปก็สามารถถ่ายภาพบริเวณนั้นได้

รูป 14.41 ไฟเบอร์สโคป

14.5.3 รุ้ง

รุ้งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเพราะการกระจายของแสง ซึ่งเราอาจเห็นก่อนหรือหลังฝนตกเล็กน้อย โดยสังเกตได้จากตำแหน่งยืนที่เหมาะสม รุ้งเกิดจากการที่แสงอาทิตย์ส่องผ่านละอองน้ำ หรือหยดน้ำซึ่งมีมากก่อนหรือหลังฝนตก แล้วหยดน้ำทำให้แสงเกิดการกระจาย และสะท้อนกลับหมด ทำให้ได้สเปกตรัมของแสงขาว รุ้งมี 2 ชนิด แต่จะเป็นชนิดใดนั้นขึ้นกับลักษณะการสะท้อนของแสงเมื่อตกกระทบหยดน้ำ ดังนี้

รุ้งปฐมภูมิ

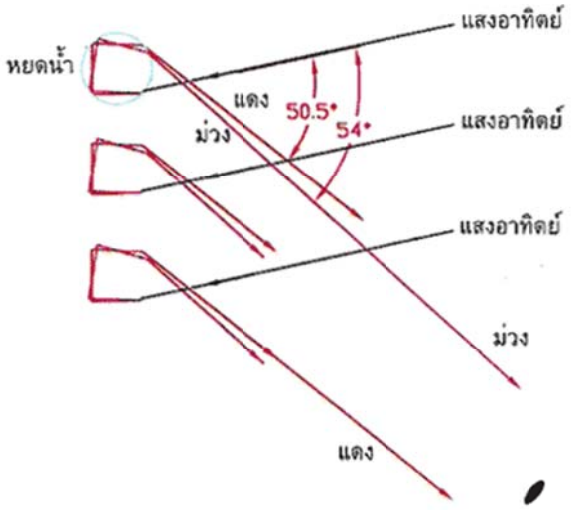


รูป 14.42 การเกิดรุ้งปฐมภูมิ

เมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบผิวด้านบนของหยดน้ำ แสงจะหักเหผ่านผิวโค้งแรกนี้เข้าสู่หยดน้ำ ทำให้เกิดการกระจายแสงและแสงสีม่วงจะหักเหมากที่สุด ส่วนแสงสีแดงจะหักเหน้อยที่สุด จากนั้นแสงแต่ละสีจะตกกระทบผิวด้านในของหยดน้ำ แล้วสะท้อนกลับไปสู่ผิวของหยดน้ำด้านที่รับแสงอาทิตย์อีกและหักเหออกสู่อากาศ โดยแสงสีม่วงทำมุม 40° กับแนวระดับและแสงสีแดงทำมุม 42° กับแนวระดับ ดังรูป 14.42

เมื่อผู้สังเกตมองหยดน้ำที่อยู่สูง แสงสีแดงจะเข้าตาผู้สังเกต โดยทำมุมยกสูงกว่าและแสงสีม่วงจะเข้าสู่ตาผู้สังเกตในระดับต่ำกว่า ดังนั้นผู้สังเกตจะเห็นรุ้งซึ่งมีสีเรียงตามสเปกตรัมของแสงอาทิตย์ โดยมีสีแดงอยู่ด้านบน และสีอื่นๆ อยู่ลดหลั่นลงมาโดยสีม่วงจะอยู่ต่ำสุด

รุ้งทุติยภูมิ

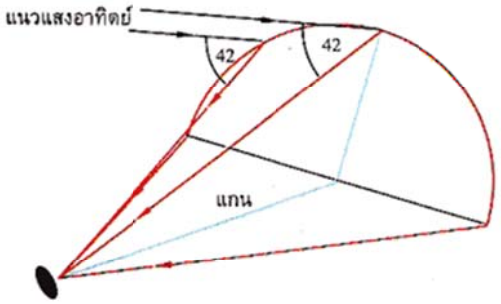


รูป 14.43 การเกิดรุ้งทุติยภูมิ

เมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบผิวด้านล่างของหยดน้ำ จะเกิดการกระจายของแสงภายในหยดน้ำ และการสะท้อนแสงที่ผิวด้านในของหยดน้ำสองครั้งแล้ว แสงทุกสีจะหักเหออกสู่อากาศ โดยสีม่วงหักเหออกทำมุม 54° กับแนวระดับและแสงสีแดงหักเหออกทำมุม 50.5° กับแนวระดับ รุ้งทุติยภูมิจึงอยู่เหนือรุ้งปฐมภูมิ

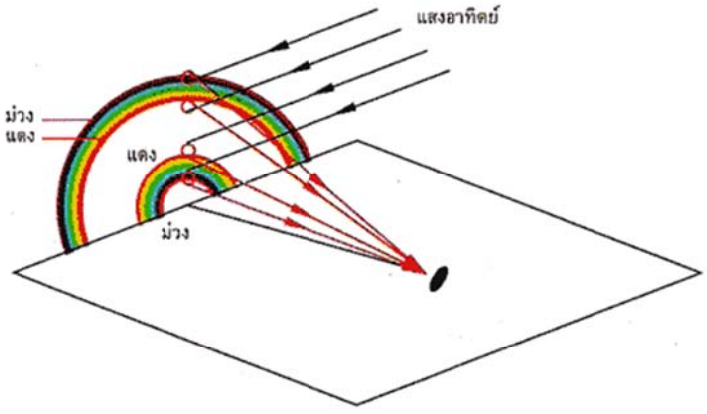
การเห็นแสงสีต่างๆ จากหยดน้ำในกรณีนี้ อธิบายได้เช่นเดียวกันกับกรณีการเกิดรุ้งปฐมภูมิ แต่ผู้สังเกตจะมองเห็นรุ้งทุติยภูมิมีลำดับสีที่กลับกับรุ้งปฐมภูมิ คือ สีม่วงอยู่ด้านบนและสีแดงอยู่ด้านล่าง ดังรูป 14.43

รุ้งที่ปรากฏบนท้องฟ้าจะเป็นส่วนโค้งของวงกลม เมื่อเขียนรังสีต่างๆ จากรุ้งมายังตาผู้สังเกตจะทำให้เกิดรูปกรวย ที่มีผู้สังเกตเป็นจุดยอด และรุ้งเป็นฐานกรวย ดังรูป 14.44 แกนของกรวยนี้จะขนานกับแนวของแสงอาทิตย์ และแสงที่เข้าตาผู้สังเกต แสงสีเดียวกันจะทำมุมกับแนวของแสงอาทิตย์เท่ากันเสมอ เช่น แสงสีแดงจากรุ้งปฐมภูมิ จะทำมุม 42° กับแนวของแสงอาทิตย์เสมอ



รูป 14.44 แสงสีแดงทุกรังสีจากรุ้งปฐมภูมิทำมุม 42° กับแนวของแสงอาทิตย์

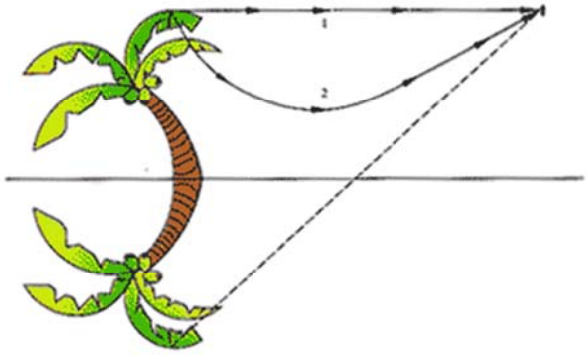
ตามปกติแสงที่หักเหออกจากหยดน้ำหยดหนึ่งๆ จะมีสเปกตรัมของแสงครบทุกสี และเนื่องจากหยดน้ำในอากาศมีจำนวนมาก จึงให้สเปกตรัมของแสงได้ครบทุกสี เราจึงมองเห็นรุ้งเป็นสีต่างๆ และเห็นรุ้งทุติยภูมิอยู่เหนือรุ้งปฐมภูมิ ดังรูป 14.45 และมีสีจางกว่ารุ้งปฐมภูมิ



รูป 14.45 การเห็นรุ้งปฐมภูมิและรุ้งทุติยภูมิ

☐ จากรูป 14.45 รุ้งใดเป็นรุ้งปฐมภูมิและทุติยภูมิ

14.5.4 มิราจ



รูป 14.46 มิราจ

มิราจ เป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติชนิดหนึ่งที่เกิดจากการหักเหของแสงในบรรยากาศชั้นต่างๆ เพราะความหนาแน่นของอากาศในชั้นต่างๆ ไม่เท่ากัน คนในทะเลทรายอาจเห็นต้นไม้ต้นหนึ่งเป็นสองต้นพร้อมๆ กัน คือ ต้นเดิมกับภาพต้นที่มียอดต้นไม้ปรากฏใต้พื้นทราย ดังรูป 14.46 ปรากฏการณ์ที่เห็นนี้ คือ **มิราจ** ซึ่งมักเกิดในบริเวณที่อากาศมีความหนาแน่นแตกต่างกันมาก เช่น ทะเลทรายหรือถนน ซึ่งถูกแดดจัด เพราะในบริเวณนี้อุณหภูมิของอากาศเหนือผิวถนนจะสูงมาก และจะลดลงอย่างรวดเร็วตามความสูง ทำให้ดรรชนีหักเหของอากาศเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามความสูง ในกรณีที่เห็นต้นไม้อยู่ใต้พื้นทราย อธิบายได้ดังนี้ เมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบต้นไม้แล้ว แสงจะสะท้อนออกในทุกทิศทาง พิจารณารังสีจากต้นไม้หมายเลข 1 เป็นรังสีที่เดินทางเป็นแนวตรงมายังตา ทำให้ตามองเห็นต้นไม้ในสภาพปกติ พิจารณารังสีหมายเลข 2 มีทิศพุ่งสู่พื้น รังสีนี้จะผ่านชั้นอากาศที่มีดรรชนีหักเหสูงไปหาชั้นอากาศที่มีดรรชนีหักเหต่ำแล้วกลับสู่ชั้นที่มีดรรชนีหักเหสูงอีก รังสีจะได้ ดังรูป 14.46 ทำให้ตามองเห็นต้นไม้ในลักษณะดังกล่าว

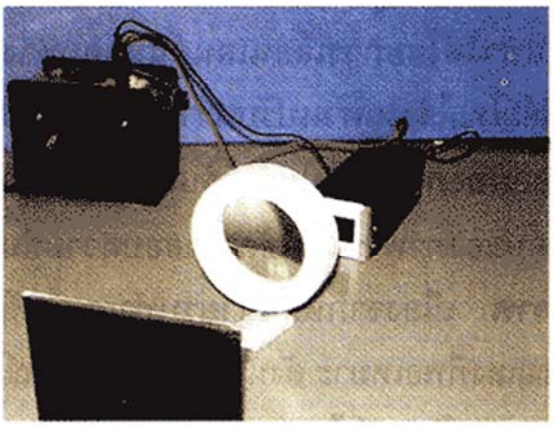
ตัวอย่างของมิราจนอกจากที่กล่าวมาได้แก่ การเห็นน้ำปรากฏบนผิวถนนที่ร้อน ทั้งๆ ที่ถนนแห้ง การเห็นเรือลอยคว่ำอยู่ในอากาศเหนือท้องทะเล เป็นต้น

14.6 ทัศนอุปกรณ์

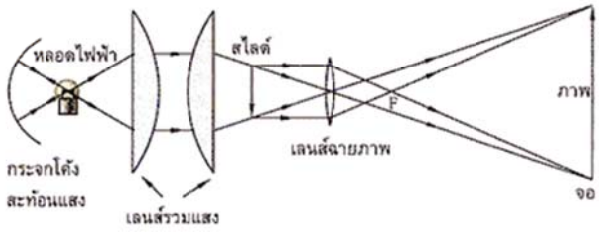
เราสามารถนำความรู้เรื่องการหักเหของแสงผ่านเลนส์ มาสร้างอุปกรณ์ต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ได้หลายอย่าง เช่น เครื่องฉายภาพนิ่ง กล้องถ่ายรูป กล้องจุลทรรศน์ กล้องโทรทรรศน์และกล้องส่องทางไกล เป็นต้น หลักการทำงานของอุปกรณ์เหล่านี้เป็นอย่างไร จะได้ศึกษาต่อไป

14.6.1 เครื่องฉายภาพนิ่ง

หลักการทำงานของเครื่องฉายภาพนิ่งเป็นอย่างไร ให้ศึกษาจากการทดลอง 14.3 ซึ่งจัดอุปกรณ์การทดลอง ดังรูป 14.47



รูป 14.47 การประกอบเครื่องฉายภาพนิ่ง

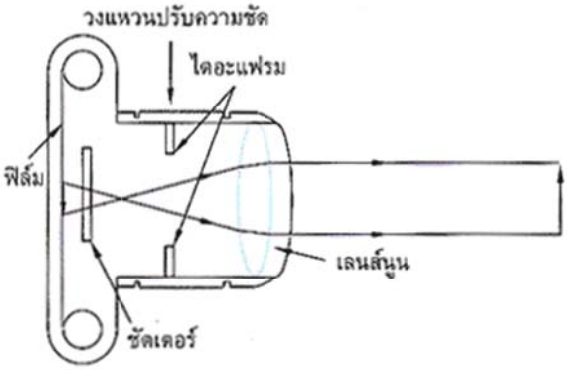


รูป 14.48 การหักเหของแสงภายในเครื่องฉายภาพนิ่ง

การใช้อุปกรณ์ดังกล่าวจะทำให้เข้าใจเหตุผลที่ทำให้เกิดภาพจริงหัวกลับขนาดขยายบนฉาก หลักการนี้เป็นพื้นฐานของเครื่องฉายภาพนิ่ง เครื่องฉายภาพยนตร์และเครื่องฉายข้ามศีรษะ เนื่องจากแสงจากวัตถุ (แผ่นสไลด์ แผ่นฟิล์ม แผ่นใส) เมื่อหักเหผ่านเลนส์ฉายภาพจะทำให้เกิดภาพจริงขนาดขยายและความสว่างของภาพที่ปรากฏบนจอจะลดลง ภาพมีขนาดใหญ่ขึ้นเพียงใดความสว่างก็จะลดลงเพียงนั้น ดังนั้นในเครื่องฉายภาพนิ่งหรือเครื่องฉายภาพยนตร์จึงจำเป็นต้องมีเลนส์รวมแสง กระจกสะท้อนแสง และหลอดไฟชนิดพิเศษที่ให้แสงสว่างมากเพื่อให้แสงที่มากระทบแผ่นสไลด์มีปริมาณมากจนเมื่อเวลาฉายภาพขนาดใหญ่จะได้ภาพที่มีความสว่างพอเหมาะสำหรับการเห็น มิฉะนั้นจะได้ภาพที่มัว ยิ่งเป็นการฉายถาพในห้องที่มีแสงภายนอกมารบกวน ภาพที่ได้จะยิ่งไม่ชัด ดังนั้นห้องโสตทัศนศึกษา ห้องฉายภาพยนตร์จึงต้องเป็นห้องที่มืดสนิท เพื่อให้ได้ภาพที่ชัดเจนนั่นเอง

14.6.2 กล้องถ่ายรูป

เมื่อใช้เลนส์นูนรับแสงจากวัตถุที่อยู่ไกล เช่น ดาวบนท้องฟ้า จะได้ภาพที่คมชัด ปรากฏบนแผ่นกระดาษแข็งสีขาว ขณะนี้เลนส์นูนทำหน้าที่เป็นเลนส์ถ่ายรูป แต่แทนที่จะใช้แผ่นกระดาษแข็งสีขาวรับภาพ ก็ใช้ฟิล์มถ่ายรูปแทนพร้อมกันนั้นก็บรรจุอุปกรณ์ทั้งเลนส์และฟิล์มถ่ายรูปลงในกล่องทึบแสงที่ภายในทาสีดำ เพื่อกันแสงจากภายนอกรบกวนและกันการสะท้อนของแสงภายในกล่อง เราจะได้กล้องถ่ายรูปอย่างง่าย



รูป 14.49 ส่วนประกอบภายในกล้องถ่ายรูปอย่างง่าย

หลักการทำงานของกล้องถ่ายรูป **เลนส์นูน** ทำหน้าที่รับภาพจากวัตถุที่อยู่ไกลกว่าระยะ $2f$ ภาพที่เกิดขึ้นจะเป็นภาพจริงหัวกลับขนาดลด ภาพนี้จะปรากฏบนฟิล์มถ่ายรูป การปรับความชัดของภาพสามารถทำได้โดยการเลื่อนเลนส์นูนออกห่างหรือเข้าใกล้ฟิล์มโดยใช้**วงแหวนปรับความชัด** และใช้การดูผ่าน**ช่องมองภาพ** ซึ่งใช้สำหรับมองภาพเพื่อจัดองค์ประกอบของภาพ และใช้ตรวจสอบความคมชัดเจนของภาพ เนื่องจากฟิล์มถ่ายรูปทำงานได้ดีหากมีปริมาณแสงที่พอเหมาะ ดังนั้นจึงต้องมีอุปกรณ์ควบคุมปริมาณแสงที่จะตกลงบนฟิล์ม อันได้แก่ ไดอะแฟรมและชัตเตอร์ **ไดอะแฟรม** เป็นช่องกลมที่เปิดให้แสงเข้ากล้องมากน้อยตามขนาดของช่อง ส่วน**ชัตเตอร์** เป็นแผ่นทึบแสงที่ทำหน้าที่ปิดเปิดให้แสงผ่านเข้ามาในกล้อง เราสามารถตั้งช่วงเวลาการปิดเปิดนี้ได้โดยการปรับ **ความเร็วชัตเตอร์** ถ้าวัตถุมีความสว่างมาก เราต้องลดขนาดช่องของไดอะแฟรมหรือเพิ่มความเร็วชัตเตอร์ แต่ถ้าวัตถุมีความสว่างน้อย เราก็ต้องเพิ่มขนาดของไดอะแฟรมหรือลดความเร็วชัตเตอร์

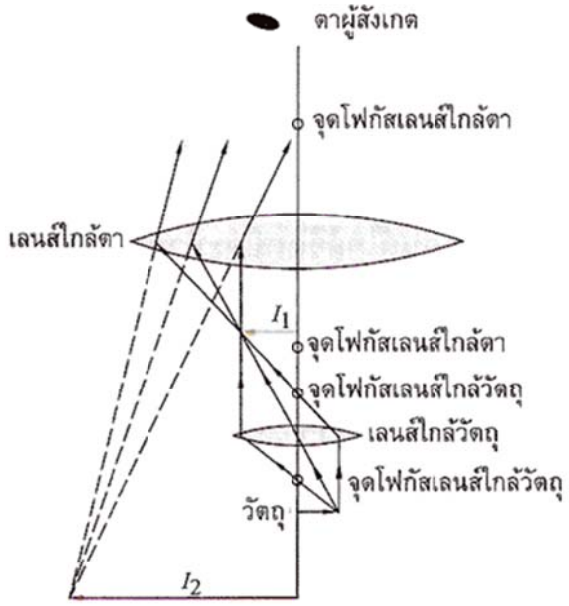
ส่วนประกอบดังกล่าวเป็นอุปกรณ์พื้นฐานของกล้องถ่ายรูปอย่างง่าย สำหรับกล้องถ่ายรูปที่มีคุณภาพดีจะมีอุปกรณ์อื่นๆ ประกอบอีกมากมาย

ภาพที่เกิดในกล้องถ่ายรูปเป็นภาพจริงหัวกลับที่ชนิดเล็กกว่าวัตถุ เมื่อแสงจากวัตถุกระทบฟิล์มจะเกิดปฏิกิริยาเคมี และเมื่อนำฟิล์มไปล้างตามกรรมวิธีทางเคมีแล้วก็จะได้ภาพตามที่ต้องการ

14.6.3 กล้องจุลทรรศน์

ทัศนอุปกรณ์ที่ได้ศึกษามาแล้วเป็นทัศนอุปกรณ์ที่มีเลนส์นูนเป็นองค์ประกอบเพียงเลนส์เดียว ต่อไปเราจะศึกษาทัศนอุปกรณ์ที่ประกอบด้วยเลนส์นูน 2 อัน หรือมากกว่า อุปกรณ์นั้นได้แก่ กล้องจุลทรรศน์ ที่ช่วยขยายภาพของวัตถุที่มีขนาดเล็กๆ เช่น เชื้อโรคหรือเซลล์ ให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้เราสามารถเห็นสิ่งดังกล่าวได้อย่างละเอียดและชัดเจน ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์มีอะไรบ้าง และกล้องจุลทรรศน์ขยายภาพได้อย่างไร ให้ศึกษาจากการทดลอง 14.4 เรื่องกล้องจุลทรรศน์

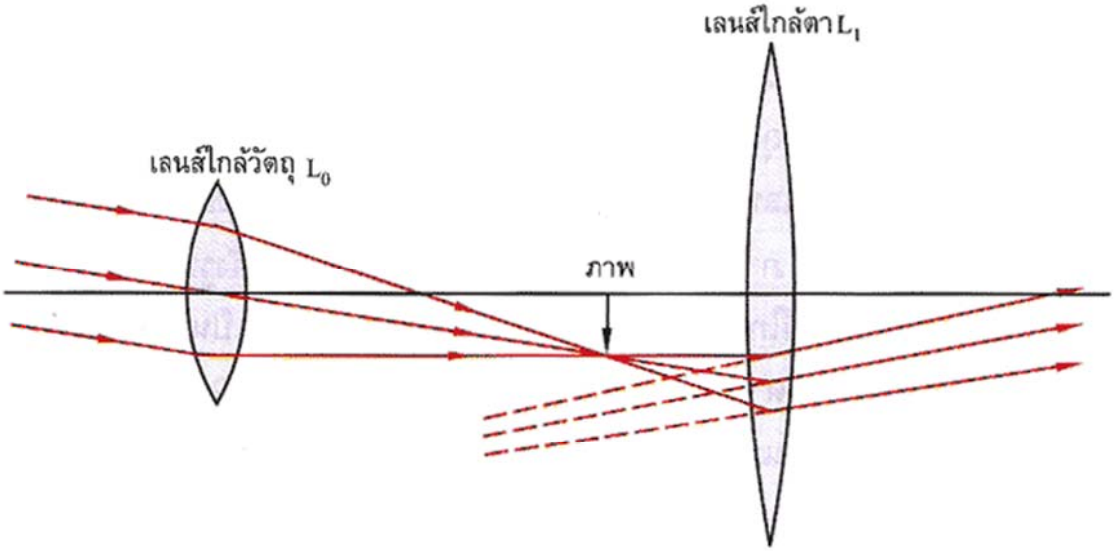
กล้องจุลทรรศน์ประกอบด้วยเลนส์นูน 2 อัน เลนส์ซึ่งอยู่ใกล้วัตถุเรียกว่า **เลนส์ใกล้วัตถุ** ซึ่งต้องมีความยาวโฟกัสสั้นๆ เพราะเวลาใช้งานผู้สังเกตต้องวางวัตถุขนาดเล็ก ที่จะดูให้อยู่ใกล้เลนส์มาก เพื่อให้แสงจากวัตถุผ่านเลนส์มากที่สุด ภาพจะได้สว่างพอ ส่วนเลนส์ที่อยู่ใกล้ตาเรียกว่า **เลนส์ใกล้ตา** ถ้าปรับเลนส์ใกล้วัตถุให้ห่างจากวัตถุไกลกว่า ความยาวโฟกัสจะได้ภาพจริง I_1 ที่มีขนาดใหญ่กว่าวัตถุ ภาพจริงนี้จะเกิดระหว่างเลนส์ทั้งสอง ดังรูป 14.50 แล้ว I_1 จะทำหน้าที่เป็นวัตถุของเลนส์ใกล้ตา ภาพ I_2 ที่เกิดขึ้นจากเลนส์นี้ เป็นภาพเสมือนที่มีขนาดใหญ่กว่า I_1 และเป็นภาพที่ตาเห็น ซึ่งควรอยู่ห่างจากตาไม่ต่ำกว่า 25 เซนติเมตร เพื่อให้มองสบาย การที่ภาพ I_2 เป็นภาพเสมือน เพราะระยะที่ I_1 อยู่ห่างจากเลนส์ใกล้ตาน้อยกว่าความยาวโฟกัส ดังนั้นระยะระหว่างเลนส์ทั้งสองซึ่งเป็นความยาวของกล้องจุลทรรศน์จึงมีค่ามากกว่าผลรวมของความยาวโฟกัสของเลนส์ทั้งสอง



รูป 14.50 การขยายภาพของกล้องจุลทรรศน์

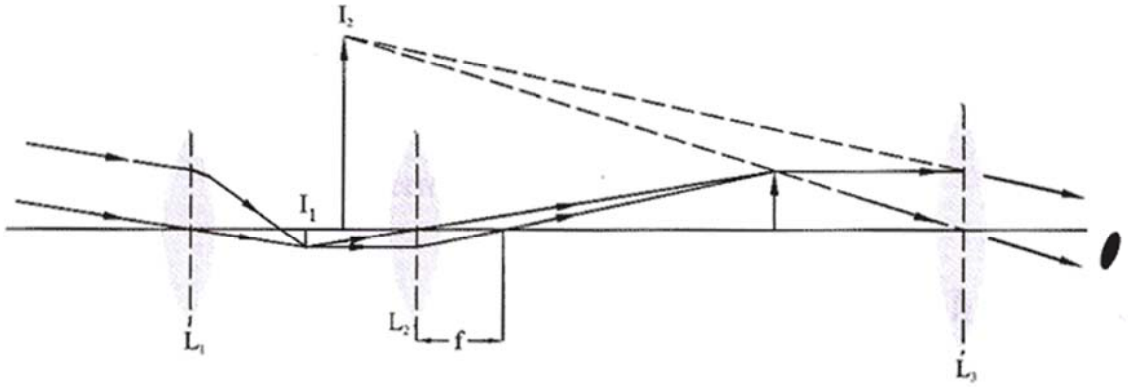
14.6.4 กล้องโทรทรรศน์

กล้องโทรทรรศน์เป็นทัศนอุปกรณ์ที่ใช้ส่องดูวัตถุที่อยู่ไกล หลักการทำงานของกล้องโทรทรรศน์เป็นอย่างไร จะศึกษาจากการทดลอง 14.5 เรื่องกล้องโทรทรรศน์



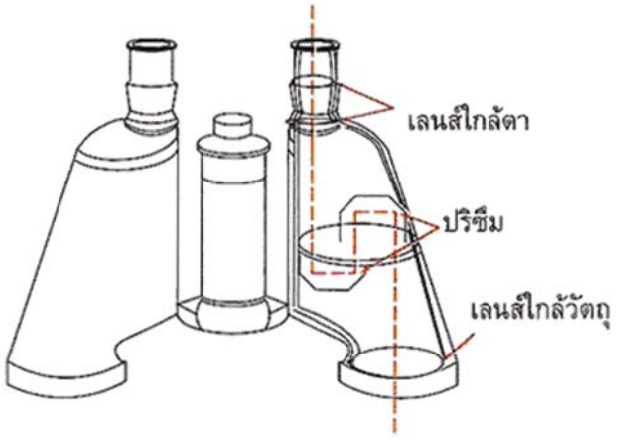
รูป 14.51 ส่วนประกอบที่สำคัญและการเกิดภาพของกล้องโทรทรรศน์

กล้องโทรทรรศน์ประกอบด้วยเลนส์นูน 2 อัน คือเลนส์ใกล้วัตถุซึ่งมีความยาวโฟกัสมาก และเลนส์ใกล้ตาซึ่งมีความยาวโฟกัสน้อย โดยระยะระหว่างเลนส์ทั้งสองซึ่งเป็นความยาวของกล้องโทรทรรศน์ จะมีค่าเท่ากับผลรวมของความยาวโฟกัสของเลนส์ทั้งสอง เมื่อใช้กล้องโทรทรรศน์ส่องดูวัตถุที่อยู่ไกล รังสีขนานจากวัตถุจะผ่านเลนส์ใกล้วัตถุแล้วมาตัดกันหลังเลนส์ ภาพ I_1 ที่เกิดจากเลนส์ใกล้วัตถุนี้จะทำหน้าที่เป็นวัตถุของเลนส์ใกล้ตา ซึ่งทำหน้าที่ขยายภาพ ภาพที่เกิดขึ้นในกล้องโทรทรรศน์ เมื่อใช้ส่องดูวัตถุที่อยู่ไกล ๆ จึงเป็นภาพหัวกลับ สมบัตินี้จึงเหมาะกับการใช้งานทางดาราศาสตร์ ดังนั้นถ้าต้องการทำให้ภาพที่เห็นเป็นภาพหัวตั้งก็อาจทำได้โดยนำเลนส์อีกอัน หนึ่งวางระหว่างภาพ I_1 กับเลนส์ใกล้ตา ดังรูป 14.52



รูป 14.52 การทำให้เกิดภาพหัวตั้งในกล้องโทรทรรศน์

จากรูป 14.52 จะเห็นว่าเลนส์ L_3 ที่ใส่เข้ามาใหม่ ซึ่งมีความยาวโฟกัส f ต้องอยู่ห่างจากภาพ I_1 เป็นระยะไกลกว่า f จึงจะได้ภาพ I_2 เป็นภาพหัวตั้ง และเลนส์ใกล้ตาก็ต้องอยู่ห่างจากภาพ I_2 เป็นระยะน้อยกว่าความยาวโฟกัสของเลนส์ใกล้ตา จึงจะได้ภาพหัวตั้ง I_3 ที่มีขนาดขยาย ในการทำให้เกิดภาพหัวตั้งนี้จะพบว่าระยะระหว่างเลนส์ใกล้ตากับเลนส์ใกล้วัตถุจะเพิ่มขึ้น นั่นคือ กล้องต้องยาวเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเราอาจลดความยาวของกล้องได้ โดยใช้ปริซึมเพื่อทำให้เกิดการสะท้อนกลับหมด ปริซึมอันแรกจะทำให้เกิดการกลับภาพจากซ้ายไปขวา ส่วนปริซึมอันที่สองจะทำให้เกิดภาพกลับหัว อุปกรณ์ชนิดนี้ได้แก่ กล้องส่องทางไกล ดังรูป 14.53



รูป 14.53 กล้องส่องทางไกลที่ใช้ปริซึมช่วยในการลดความยาวของกล้อง

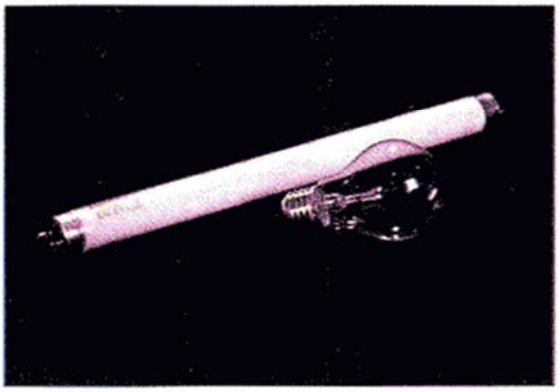
ยังมีกล้องโทรทรรศน์อีกประเภทหนึ่งที่ใช้กระจกเงาในการรับแสงจากวัตถุ แทนการใช้เลนส์แล้วให้แสงสะท้อนไปผ่านระบบเลนส์อีกต่อหนึ่ง เรียกว่า กล้องโทรทรรศน์ชนิดนี้ว่ากล้องโทรทรรศน์แบบสะท้อนแสง กล้องโทรทรรศน์แบบสะท้อนแสงที่ใหญ่ที่สุดในปัจจุบันอยู่ในอวกาศ คือ กล้องโทรทรรศน์อวกาศฮับเบิลที่ยาว 14.3 เมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.3 เมตรและ หนัก 11 ตัน กล้องโทรทรรศน์อวกาศฮับเบิลถูกส่งขึ้นโคจรในอวกาศด้วยกระสวยอวกาศดิสคัฟเวอรี (Space Shuttle Discovery) เมื่อเดือนเมษายน พ.ศ. 2533

14.7 ความสว่าง

เป็นที่ทราบกันดีว่าแสงเป็นพลังงานรูปหนึ่งที่สามารถทำให้พื้นที่ที่แสงตกกระทบสว่าง ปริมาณพลังงานแสงที่เปล่งออกจากแหล่งกำเนิดแสงใดๆ ต่อหนึ่งหน่วยเวลา เรียกฟลักซ์ส่องสว่าง (Luminous Flux) มีหน่วยวัดเป็น**ลูเมน** หลอดไฟฟ้าซึ่งที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่นิยมใช้กันตามบ้านเรือนมี 2 ชนิด คือหลอดไฟฟ้าแบบไส้ และหลอดไฟฟ้าฟลูออเรสเซนต์ ตาราง 14.2 แสดงฟลักซ์ส่องสว่างของหลอดไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิด

ตาราง 14.2 แสดงการเปรียบเทียบฟลักซ์ส่องสว่างของหลอดไฟฟ้าสองชนิด

กำลังไฟฟ้าของหลอด (วัตต์)	ฟลักซ์ส่องสว่าง (ลูเมน)	
	หลอดไฟฟ้าแบบไส้ (ชนิดใส)	หลอดฟลูออเรสเซนต์
15	120	750
40	500	2,700



รูป 14.54 หลอดไฟฟ้าแบบไส้และหลอดฟลูออเรสเซนต์

ถ้าพิจารณาพื้นที่รับแสง ความสว่างบนพื้นที่หาได้จาก

$$\text{ความสว่าง} = \frac{\text{ฟลักซ์ส่องสว่างที่ตกตั้งฉากกับพื้น}}{\text{พื้นที่รับแสง}}$$

$$E = \frac{F}{A} \qquad \textbf{(14.10)}$$

เมื่อ F เป็น ฟลักซ์ส่องสว่างที่ตกกระทบพื้น มีหน่วยเป็นลูเมน

A เป็น พื้นที่รับแสง มีหน่วยเป็นตารางเมตร

E เป็น ความสว่าง มีหน่วยเป็นลักซ์

ดังนั้น **1 ลักซ์ = 1 ลูเมนต่อตารางเมตร**

จากตาราง 14.2 จะเห็นได้ว่าฟลักซ์ส่องสว่างของหลอดฟลูออเรสเซนต์มากกว่าหลอดแบบไส้ประมาณ 6 เท่า ดังนั้นเมื่อหลอดทั้งสองใช้กำลังไฟฟ้าเท่ากันประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นความสว่างของหลอดฟลูออเรสเซนต์จึงสูงกว่าหลอดแบบไส้

ตัวอย่าง 14.13 ติดหลอดไฟฟ้าฟลูออเรสเซนต์ 40 วัตต์ 3 หลอด โดยมีตัวสะท้อนแสงให้พลังงานแสงทั้งหมดตกบนพื้นโต๊ะที่มีพื้นที่ 10 ตารางเมตร ให้หาความสว่างบนพื้นโต๊ะนี้

วิธีทำ เนื่องจากมีตัวสะท้อนแสงจึงอาจถือได้ว่าพลังงานแสงทั้งหมดตกบนโต๊ะ เพราะฉะนั้น

ฟลักซ์ส่องสว่างที่ตกบนพื้นโต๊ะ = ฟลักซ์ส่องสว่างของหลอดไฟฟ้า

$$\text{ความสว่างบนโต๊ะ} = \frac{\text{ฟลักซ์ส่องสว่างที่ตกบนโต๊ะ}}{\text{พื้นที่ของโต๊ะ}}$$

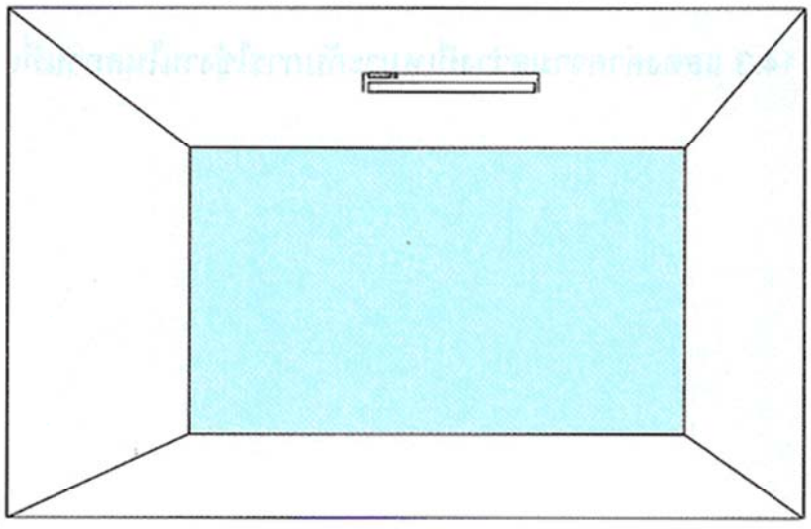
$$= \frac{2,700 \times 3}{10} \quad \text{ลูเมนต่อตารางเมตร}$$

$$= 810 \quad \text{ลูเมนต่อตารางเมตร}$$

คำตอบ ความสว่างบนพื้นโต๊ะเท่ากับ 810 ลักซ์

หมายเหตุ ความสว่างขนาด 810 ลักซ์ เป็นความสว่างที่เหมาะสำหรับทำงานเขียนหนังสือพิมพ์ดีด หรือทดลองวิทยาศาสตร์ แต่ถ้าเราพิจารณาความสูญเสียเนื่องจากตัวสะท้อนแสงไม่สมบูรณ์ ความสว่างที่คำนวณได้ก็จะลดลง

ตัวอย่าง 14.14 ติดหลอดไฟฟ้าฟลูออเรสเซนต์ 40 วัตต์ ที่มีฟลักซ์ส่องสว่าง 2,700 ลูเมน ในห้องสี่เหลี่ยมที่มีขนาด $3 \times 2 \times 2$ เมตร ความสว่างของห้องนี้โดยเฉลี่ยมีค่าเท่าไร ให้ฟลักซ์ส่องสว่างที่สูญเสียไปเนื่องจากตัวสะท้อนแสงเท่ากับ 500 ลูเมน และแสงกระทบเพดานห้องน้อยมาก



รูป 14.55 รูปประกอบตัวอย่าง 14.14

วิธีทำ พื้นที่ของห้องนี้ = พื้นที่ของพื้นห้อง + พื้นที่ของผนังทั้งสี่

$$= (2\times3)+\{(3\times2)+(2\times2)+(3\times2)+(2\times2)\}$$

$$= 6+(6+4+6+4)$$

= 26 ตารางเมตร

ฟลักซ์ส่องสว่างที่ตกกระทบพื้นทั้งหมด = 2,700 – 500 ลูเมน

= 2,200 ลูเมน

เพราะฉะนั้นความสว่างโดยเฉลี่ย $= \frac{2,200}{26}$ ลูเมนต่อตารางเมตร

= 84.6 ลักซ์

คำตอบ ดังนั้นความสว่างโดยเฉลี่ยของห้องเท่ากับ 84.6 ลักซ์

หมายเหตุ เหตุที่ใช้คำว่าความสว่างโดยเฉลี่ยเพราะผนังห้องมิได้อยู่ในแนวตั้งฉากกับหลอดไฟฟ้า ดังนั้นบริเวณพื้นห้องจะสว่างกว่าบริเวณผนัง แต่เพื่อความสะดวก ได้พิจารณาให้ทุกผิวมีความสว่างเท่ากัน ซึ่งให้ผลไม่แตกต่างจากความเป็นจริงมาก ความสว่างขนาด 84.6 ลักซ์ นี้ เหมาะสำหรับทางเดินภายในอาคาร

โดยปกติความสว่างในสถานที่ต่างๆ นั้น ได้มาจากแหล่งกำเนิดต่างๆ กัน เช่นจากหลอดไฟ การสะท้อนที่ผนัง ดวงอาทิตย์ หรือแสงจากห้องข้างเคียง การคำนวณหาค่าความสว่างโดยตรงจึงยุ่งยากมาก ในทางปฏิบัติการหาความสว่างทำโดยใช้มาตรวัดความสว่าง (Lux meter)

ประโยชน์ที่ได้จากการศึกษาเรื่องความสว่างนี้คือช่วยในการจัดหลอดไฟตามอาคารบ้านเรือน และห้องทำงานเพื่อให้ความสว่างได้อย่างเหมาะสม คือให้ความสว่างที่พอเหมาะสำหรับการใช้งาน ตาราง 14.3 แสดงค่าความสว่างที่เหมาะกับการใช้งานในสถานที่ต่างๆ

ตาราง 14.3 แสดงความสว่างที่เหมาะสมในสถานที่ต่างๆ

สถานที่	ความสว่าง (ลักซ์)
บ้าน	
ห้องนั่งเล่น ห้องครัว ห้องอาหาร	150-300
ห้องอ่านหนังสือ ห้องทำงาน	500-1,000
โรงเรียน	
โรงพลศึกษา หอประชุม	75-300
ห้องเรียน	300-750
ห้องสมุด ห้องปฏิบัติการ ห้องเขียนแบบ	750-1,500
โรงพยาบาล	
ห้องตรวจโรค	200-750
ห้องผ่าตัด	5,000-10,000
สำนักงาน	
บันไดฉุกเฉิน	30-75
ทางเดินในอาคาร	75-200
ห้องประชุม ห้องรับรอง	200-750

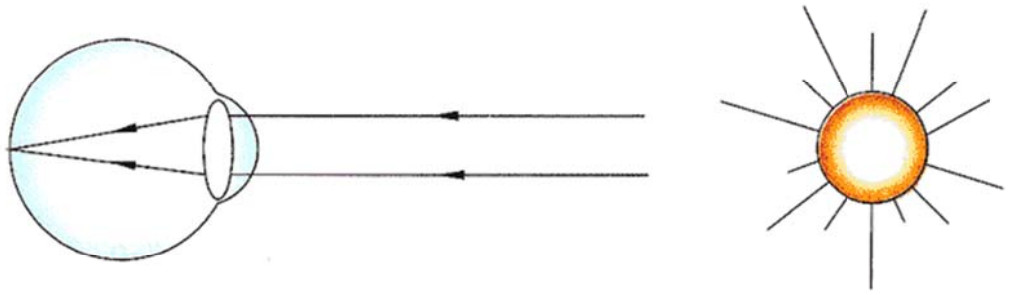
การติดตั้งหลอดไฟในสถานที่ต่างๆ นั้น นอกจากจะเพื่อให้ได้ความสว่างที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานแล้ว ยังต้องคำนึงถึงการประหยัดพลังงานด้วย ซึ่งสามารถทำได้โดยการเลือกใช้หลอดไฟที่สูญเสียพลังงานน้อยที่สุด หรือเลือกใช้หลอดที่มีอัตราการให้พลังงานแสงสูงที่สุด เช่น ถ้าเปรียบเทียบหลอดฟลูออเรสเซนต์กับหลอดไฟฟ้า จะพบว่า ถ้าค่ากำลังไฟฟ้าของหลอดไฟฟ้าทั้งสองเท่ากัน หลอดฟลูออเรสเซนต์จะให้ความสว่างมากกว่า ทั้งนี้เพราะหลอดฟลูออเรสเซนต์มีการสูญเสียพลังงานไปเป็นพลังงานความร้อนน้อยกว่า นอกจากนี้ความสว่างที่เหมาะสมยังเป็นเรื่องจำเป็นต่อนัยน์ตาอีกด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับผู้ทำงานที่ต้องใช้สายตามาก เช่น ช่างนาฬิกา หรือ ศัลยแพทย์ เป็นต้น ด้วยเหตุนี้คนทุกคนที่ใช้แสงไฟจึงจำเป็นต้องรู้จักวิธีถนอมสายตา

14.8 การถนอมสายตา

14.8.1 การดูวัตถุที่มีความสว่างมาก

นัยน์ตาเป็นอวัยวะที่มีความไวสูง ถึงแม้ว่าจะมีแสงสว่างเพียงเล็กน้อยแต่ตาก็สามารถรับรู้ได้ เช่นกรณีแสงจากดาวที่อยู่ไกลในคืนเดือนมืดเป็นต้น ในการดูวัตถุที่มีความสว่างมากเพื่อป้องกันไม่ให้สายตาเสีย ต้องรีบหลับตาทันทีเมื่อมีแสงสว่างมากๆ มาเข้าตา

เรตินา เป็นส่วนของตาที่เสียหายได้ เมื่อได้รับแสงที่มีความสว่างเกินความสามารถของการรับรู้ของมัน เมื่อเราดูวัตถุหรือสิ่งต่างๆ ที่วางอยู่กลางแดดหรือบนหาดทรายขาว เราจะรู้สึกตาพร่า หรือบางครั้งก็รู้สึกตามัวทั้งนี้เป็นเพราะว่า เรตินาของตาถูกกระตุ้นจนเกินไปทำให้การตอบสนองช้า ถ้าเราจ้องดูวัตถุที่มีความสว่างมากต่อไป การตอบสนองก็จะยิ่งช้าลง สำหรับในกรณีที่ดูวัตถุที่มีความสว่างสูงมาก เรตินาจะถูกทำลายจนใช้การไม่ได้ตลอดไปคือตาคนๆ นั้นจะบอด



รูป 14.56 การหักเหของแสงภายในตาเมื่อมองดวงอาทิตย์

เพราะเหตุใดเรตินาจึงถูกทำลาย เวลาตาดูวัตถุหรือแหล่งกำเนิดแสงที่มีความสว่างมาก เราทราบดีว่ากล้ามเนื้อตาสามารถปรับความนูนของเลนส์ตาเพื่อให้เห็นภาพที่ชัดเจนบนเรตินา แต่เมื่อตามองแหล่งกำเนิดที่มีความสว่างสูงมากจะเกิดเหตุการณ์ทำนองเดียวกับการใช้เลนส์นูนรวมแสงอาทิตย์ให้เผากระดาษที่วางอยู่ที่โฟกัสของเลนส์ ทำให้เรตินาได้รับแสงปริมาณมากเกินไป จนเป็นเหตุให้เรตินาเสียหาย ถ้าเป็นกรณีที่ไม่ร้ายแรงมาก หลังจากคนมองหลับตาครู่หนึ่งตาจะกลับมองเห็นได้อีก แต่ถ้าเป็นกรณีที่ร้ายแรงเรตินาจะถูกทำลายอย่างถาวร

ดังนั้นนักเรียนจะต้องระมัดระวัง อย่าจ้องวัตถุหรือแหล่งกำเนิดที่มีความสว่างมากและนานแหล่งกำเนิดแสงดังกล่าวได้แก่ ดวงอาทิตย์ หลอดไฟฟ้า สปอตไลท์ แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ แสงสว่างจากการเชื่อมโลหะ หลอดฉายภาพนิ่ง ภาพยนตร์ หรือเครื่องฉายภาพข้ามศีรษะ เป็นต้น เพราะการมองย้อนลำแสงไปยังแหล่งกำเนิดจะทำให้ภาพของแหล่งกำเนิดที่มีความสว่างสูงมากทำลายเรตินา สำหรับดวงอาทิตย์นั้นเราอาจมองตรงๆ ได้เฉพาะเวลาดวงอาทิตย์กำลังขึ้น

หรือกำลังตกเท่านั้นเพราะขณะนั้นดวงอาทิตย์เป็นสีแสดอ่อนๆ แต่สำหรับช่วงเวลาอื่นห้ามมองโดยตรงอย่างเด็ดขาด

14.8.2 การดูวัตถุที่มีความสว่างน้อย

ที่กล่าวมาแล้วเป็นการกล่าวถึงอันตรายจากการดูวัตถุที่มีความสว่างมาก แต่สำหรับการดูวัตถุที่มีความสว่างน้อย จะเป็นอันตรายต่อสายตาอย่างไร และจากการดูวัตถุที่มีความสว่างน้อยไม่ทำอันตรายเรตินาเหมือนกรณีที่เกิดกับการดูวัตถุที่มีความสว่างมาก แต่เป็นการดูที่ต้องเพ่งพิจารณา เช่น การอ่านหนังสือ กล้ามเนื้อตาจะต้องทำงานหนักกว่าปกติ และถ้าอ่านในที่มีความสว่างน้อยเป็นระยะเวลานานหรือบ่อย กล้ามเนื้อตาจะเสื่อมเร็วกว่าที่ควร

14.8.3 การดูผ่านทัศนอุปกรณ์

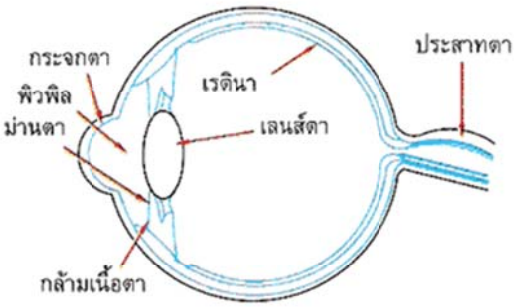
การใช้ทัศนอุปกรณ์ อันได้แก่ กล้องส่องทางไกล กล้องโทรทรรศน์ดูวัตถุหรือแหล่งกำเนิดแสงที่มีความสว่างมาก จะทำให้เรตินาเป็นอันตราย เช่นเดียวกับการใช้ตาเปล่าดูวัตถุหรือแหล่งกำเนิดที่มีความสว่างมาก อุบัติเหตุที่เกิดขึ้นบ่อย คือ การดูดวงอาทิตย์ขณะเกิดสุริยุปราคาไม่ว่าจะด้วยตาเปล่า หรือด้วยกล้องส่องทางไกล ความสว่างที่เกิดจากการมองตรงเช่นนั้นมากเพียงพอให้เรตินาพิการอย่างถาวรได้ ดังนั้นในการดูหรือถ่ายภาพดวงอาทิตย์เมื่อเกิดสุริยุปราคา จึงต้องทำด้วยความระมัดระวัง โดยดูผ่านฟิล์มกรองแสง หรือดูโดยมีผู้เชี่ยวชาญด้านดาราศาสตร์ดูแลทั่วไป เมื่ออยู่กลางแจ้งที่มีความสว่างมากกว่า 10,000 ลักซ์ ควรใส่แว่นกันแดด เพื่อลดความสว่างของแสงที่เข้าตา ตาราง 14.4 แสดงความสว่างบนพื้นบริเวณกลางแจ้ง

ตาราง 14.4 แสดงความสว่างบนพื้น บริเวณกลางแจ้ง

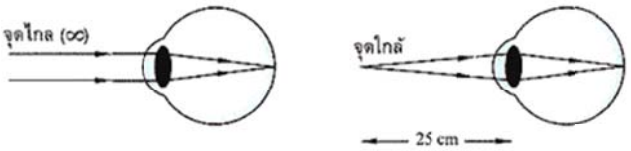
สภาพอากาศ	ความสว่าง (ลักซ์)
เวลา 8.00 น. ท้องฟ้ามีเมฆเต็ม	5,000 - 6,000
เวลา 10.00 น. ท้องฟ้ามีเมฆเต็ม	17,000 - 20,000
เวลา 12.00 น. ท้องฟ้าแจ่มใส	54,000 - 57,000

14.9 ตาและการมองเห็นสี

ตาคนและกล้องถ่ายรูปมีส่วนประกอบที่ทำหน้าที่คล้ายกันมาก ตาประกอบด้วยเลนส์ตา เป็นเลนส์รับแสง เรตินาทำหน้าที่คล้ายฟิล์มถ่ายรูป ถัดจากเรตินาเป็นใยประสาทซึ่งติดต่อกับประสาทตา ผ่านไปยังสมอง เวลามีแสงจากวัตถุตกบนเลนส์ตาจะเกิดภาพชัดที่เรตินา ตาจะเห็นวัตถุในลักษณะเดียวกับภาพของวัตถุที่ตกบนฟิล์มถ่ายรูป นอกจากนี้ตายังมีม่านตาเพื่อทำหน้าที่ปรับความเข้มของแสงบนเรตินาให้พอเหมาะโดยเปลี่ยนขนาดของพิวพิล ม่านตาจึงทำหน้าที่คล้ายไดอะแฟรมของกล้องถ่ายรูป นอกจากนี้ตายังมีกล้ามเนื้อยึดเลนส์ตาทำหน้าที่บังคับเลนส์ตาให้นูนมากหรือน้อย เพื่อให้เกิดภาพชัดบนเรตินา ส่วนนี้แตกต่างจากกล้องถ่ายรูป เพราะกล้องถ่ายรูปใช้วิธีเลื่อนตำแหน่งเลนส์เพื่อให้เกิดภาพชัดบนฟิล์ม

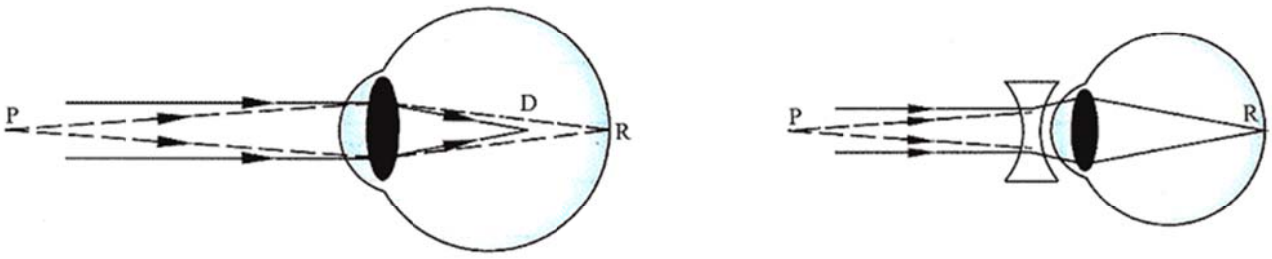


รูป 14.57 ส่วนประกอบที่สำคัญของตา



รูป 14.58 จุดไกลและจุดใกล้ของคนสายตาปกติ

ในการมองวัตถุ ตำแหน่งใกล้สุดที่ตาเห็นภาพชัดเรียกว่า **จุดใกล้** และตำแหน่งไกลสุดที่ตาเห็นภาพชัด เรียกว่า **จุดไกล** สำหรับคนที่มีสายตาปกติ จุดใกล้อยู่ที่ระยะประมาณ 25 เซนติเมตร จากตา และจุดไกลจะอยู่ที่ระยะไกลมากหรือที่ระยะอนันต์ ดังรูป 14.58

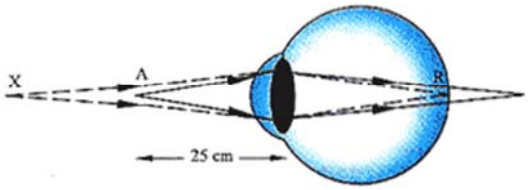


ก. สายตาสั้น ข. การแก้ไขสายตาสั้น

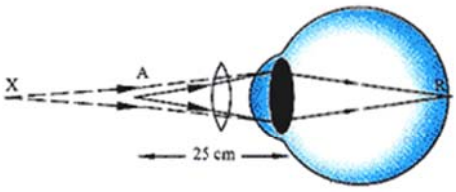
รูป 14.59 สายตาสั้นและการแก้ไข

สำหรับคนที่มีสายตาสั้น ระยะไกลที่ตามองเห็นจะไม่ใช่ระยะอนันต์แต่จะอยู่ที่จุด P ซึ่งอยู่ใกล้ตาเข้ามา รังสีขนานจะตัดกันที่จุด D ในตาก่อนถึงเรตินา R ดังรูป 14.59 ก. การแก้ไขสายตาสั้นให้มองเห็นชัดเจนเหมือนสายตาปกติจะต้องสวมแว่นที่ทำด้วยเลนส์เว้าเพื่อช่วยให้รังสีขนานจากวัตถุไปรวมกันที่เรตินาพอดี ดังรูป 14.59 ข.

คนที่มีสายตายาวจะเห็นจุดไกลเหมือนคนสายตาปกติ คือ เห็นภาพชัดที่ระยะอนันต์ แต่จะเห็นจุดใกล้อยู่ที่จุด x ซึ่งอยู่ห่างจากตาไกลกว่า 25 เซนติเมตร ทำให้ต้องวางวัตถุเล็กๆ หรือหนังสือในระยะไกลเกิน 25 เซนติเมตร จุดใกล้ของสายตาคนบางคนอาจจะถึง 80 เซนติเมตร ดังรูป 14.60 ก. สำหรับการแก้ไขสายตายาว ใช้แว่นที่ทำด้วยเลนส์นูนเพื่อให้รังสีจากวัตถุที่จุดใกล้ไปรวมกันที่เรตินาพอดี ดังรูป 14.60 ข.



ก. สายตายาว



ข. การแก้ไขสายตา

รูป 14.60 สายตายาวและการแก้ไข

ตัวอย่าง 14.15 คนสายตาสั้นไม่สามารถมองเห็นวัตถุที่อยู่ไกลเกิน 2.8 เมตรได้ชัดเจน เขาควรแก้ปัญหานี้โดยใช้เลนส์ชนิดใด และเลนส์มีความยาวโฟกัสเท่าใด

วิธีทำ คนสายตาสั้นต้องใช้เลนส์เว้าช่วยทำให้ภาพของวัตถุ ซึ่งอยู่ที่อนันต์ มาเกิดที่ตำแหน่ง 2.8 เมตรตามโจทย์ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ตาเห็นชัดเจน แต่ภาพนี้เป็นภาพเสมือนเพราะอยู่หน้าเลนส์เว้า

จาก $$\frac{1}{S}+\frac{1}{S'}=\frac{1}{f}$$

แทนค่า $$\frac{1}{\infty}+\frac{1}{-2.8}=\frac{1}{f}\ ,\quad f = -2.8\ \text{m}$$

คำตอบ การแก้ปัญหาใช้เลนส์เว้าที่มีความยาวโฟกัส 2.8 เมตร

ในการมองเห็นสีต่างๆ ส่วนสำคัญของตาที่ทำหน้าที่นี้คือ เรตินา ซึ่งมีเซลล์รับแสงเป็นจำนวนมาก เซลล์เหล่านี้มี 2 ชนิด คือเซลล์รูปกรวยและเซลล์รูปแท่ง เซลล์รูปแท่งจะไวเฉพาะต่อแสงที่มีความเข้มน้อย แต่ไม่สามารถจำแนกสีของแสงได้ ส่วนเซลล์รูปกรวยจะไวเฉพาะต่อแสงที่มีความเข้มสูงน้อยกว่าความไวของเซลล์รูปแท่ง และสามารถจำแนกแสงแต่ละสีได้ด้วย เซลล์รูปกรวยยังแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด แต่ละชนิดมีความไวต่อแสงสีปฐมภูมิแต่ละสี

คือชนิดที่หนึ่งมีความไวสูงสุดต่อแสงสีน้ำเงิน ชนิดที่สองมีความไวสูงสุดต่อแสงสีเขียว และชนิดสุดท้ายมีความไวสูงสุดต่อแสงสีแดง เวลามีแสงสีต่างๆ ผ่านเข้าตาเมื่อกระทบเรตินา เซลล์รับแสงรูปกรวยที่ไวต่อแสงสีนั้นๆ จะถูกกระตุ้น สัญญาณที่เกิดขึ้นจะถูกส่งผ่านประสาทตาไปสู่สมองเพื่อให้สมองแปลความหมายออกมาเป็นความรู้สึกของการเห็นสีของแสงนั้น

ถ้ามีแสงสีอื่นนอกจากสีแดง สีเขียว หรือสีน้ำเงินมาเข้าตา เซลล์รับแสงรูปกรวยจำนวนมากกว่าหนึ่งชนิด จะถูกกระตุ้นพร้อมกันด้วยปริมาณมากน้อยของแสงสีที่ตกกระทบ สัญญาณทุกสัญญาณจะถูกส่งไปสู่สมองเพื่อให้สมองแปลออกเป็นความรู้สึกในการเห็นสีผสมของแสงนั้น

ในการมองแสงสีเขียวที่มีความสว่างมากเป็นเวลานานแล้วหันไปมองแสงขาวในทันทีจะเห็นเป็นสีแดงม่วงแทนที่จะเห็นเป็นสีขาว ทั้งนี้เพราะเซลล์รูปกรวยที่ไวต่อแสงสีเขียวนั้นเมื่อยล้าจนไม่พร้อมที่จะรับรู้ แสงสีเขียวใดๆ เมื่อสัญญาณที่ส่งไปสู่สมองมีแต่แสงสีแดงและแสงสีน้ำเงิน ดังนั้นเราจึงเห็นแต่แสงสีแดงม่วง

ตาของคนบางคนอาจเห็นได้ไม่ครบทุกสี ทั้งนี้เพราะเซลล์รูปกรวยชนิดใดชนิดหนึ่งทำงานบกพร่อง เช่น ถ้าเซลล์รูปกรวยที่ไวต่อแสงสีเขียวบกพร่องก็จะไม่สามารถเห็นสีเขียว แต่จะเห็นเป็นสีอื่นที่ต่างไปจากตาคนปกติ เราเรียกความผิดปกติในการเห็นสีว่า **การบอดสี**

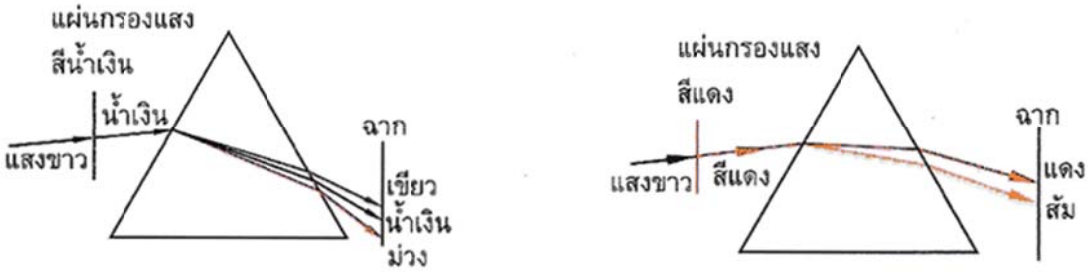
คนตาบอดสีส่วนมากจะบอดสีแดง และส่วนน้อยจะบอดสีน้ำเงิน การบอดสีนี้มักเป็นแต่กำเนิดและที่เกิดจากการถ่ายทอดทางกรรมพันธุ์จึงไม่สามารถรักษาให้หายเป็นปกติได้ การบอดสีมักเกิดกับผู้ชายมากกว่าผู้หญิง อย่างไรก็ตามการบอดสีอาจเกิดภายหลังการถือกำเนิดก็ได้ ถ้าเซลล์รูปกรวยได้รับการกระทบกระเทือนอย่างรุนแรง หรือเวลาคนคนนั้นแพ้ยาบางชนิด หรือถ้ามีเชื้อโรคบางชนิดทำลายเซลล์รับแสงรูปกรวยให้บกพร่อง การบอดสีด้วยสาเหตุเหล่านี้อาจรักษาให้ตาเป็นปกติได้ถ้าเซลล์รับแสงยังไม่เสื่อมสภาพอย่างถาวร

14.10 สี

เมื่อให้แสงขาวตกกระทบวัตถุต่างๆ เราจะเห็นวัตถุมีสีแตกต่างกัน การมองเห็นสีของวัตถุขึ้นกับปัจจัยอะไรบ้าง แสงสีมีอิทธิพลต่อการเห็นวัตถุอย่างไร เราจะศึกษาจากการทดลอง 14.6 สีของวัตถุ

เมื่อให้แสงขาวซึ่งประกอบด้วยแสงหลายสีตกกระทบแผ่นพลาสติกใสจะเป็นสีใดก็ตามก็จะเห็นพลาสติกใสเป็นสีนั้น แต่ถ้าใช้ปริซึมสามเหลี่ยมกระจายแสงที่ผ่านแผ่นพลาสติกใสสีต่างๆ จะพบว่ามีแสงสีอื่นทะลุผ่านไปได้บ้างแต่แสงบางสีจะถูกดูดกลืนไว้ เช่น ถ้าใช้แผ่นพลาสติกใสสีแดงกั้นจะเห็นเป็นแถบแสงสีแดง ซึ่งอาจมีสีส้มปน ส่วนแสงสีม่วง สีน้ำเงิน สีเขียวจะถูกดูดกลืน โดยปริมาณของแสงสีแดงที่ออกมาจะมากที่สุด เราจึงเห็นแผ่นพลาสติกมีสีแดง

ในทำนองเดียวกันแผ่นพลาสติกใสสีน้ำเงินก็จะมีแสงสีน้ำเงินออกมามาก และอาจมีแสงสีเขียวและสีม่วงปนออกมาด้วย ดังรูป 14.61 เราเรียกแผ่นพลาสติกใสซึ่งกั้นแสงสีบางสีไว้ และยอมให้แสงบางสีผ่านไปได้นี้ว่า **แผ่นกรองแสงสี**



รูป 14.61 แสงสีที่ทะลุผ่านแผ่นกรองแสงสี

ประโยชน์ของแผ่นกรองแสงสี คือ สามารถนำมาใช้ในเครื่องมือบางชนิดเวลาต้องการลดปริมาณแสงสีให้น้อยลง หรือเวลาต้องการให้แสงเพียงบางสีเท่านั้นผ่าน ตัวอย่างของการใช้แผ่นกรองแสงสี เช่นในการถ่ายรูป การแยกสีการพิมพ์ และแว่นตากันแดด

จากการให้แสงตกกระทบวัตถุ จะพบว่าเราอาจแบ่งชนิดวัตถุตามปริมาณ และลักษณะที่แสงผ่านวัตถุ ดังนี้

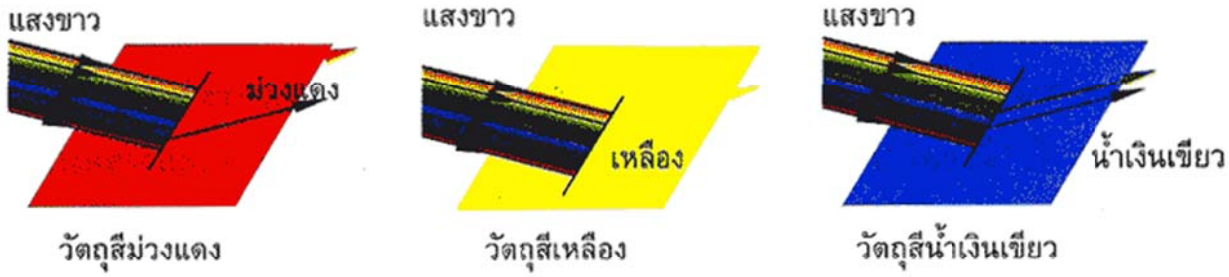
1. วัตถุโปร่งใส หมายถึง วัตถุที่ให้แสงผ่านไปได้เกือบทั้งหมดอย่างเป็นระเบียบ เราจึงสามารถมองผ่านวัตถุชนิดนี้ได้ชัดเจน ตัวอย่างวัตถุชนิดนี้ได้แก่ กระจกใส และ แก้วใส เป็นต้น
2. วัตถุโปร่งแสง หมายถึง วัตถุที่ให้แสงผ่านไปได้อย่างไม่เป็นระเบียบ ดังนั้นเราจึงไม่สามารถมองผ่านวัตถุนี้ได้ชัดเจน ตัวอย่างวัตถุชนิดนี้ได้แก่ น้ำขุ่น กระจกฝ้า และกระดาษชุบไข
3. วัตถุทึบแสง หมายถึง วัตถุที่ไม่ให้แสงผ่านเลย แสงทั้งหมดจะถูกดูดกลืนไว้หรือสะท้อนกลับ เราจึงไม่สามารถมองผ่านวัตถุชนิดนี้ได้ ตัวอย่างของวัตถุชนิดนี้ได้แก่ ไม้ ผนังตึก และกระจกเงา

ในกรณีที่แสงขาวตกกระทบวัตถุทึบแสง วัตถุนั้นจะดูดกลืนแสงแต่ละสีที่ประกอบเป็นแสงขาวนั้นไว้ในปริมาณต่างๆ กัน แสงส่วนที่เหลือจากการดูดกลืนจะสะท้อนกลับเข้าตา ทำให้เราเห็นวัตถุเป็นสีเดียวกับแสงที่สะท้อนมาเข้าตามากที่สุด ตามปกติวัตถุมีสารที่เรียกว่า สารสี ซึ่งทำหน้าที่ดูดกลืนแสง วัตถุที่มีสีต่างกันจะมีสารสีต่างกัน การเห็นใบไม้เป็นสีเขียว เป็นเพราะใบไม้มีคลอโรฟิลเป็นสารที่ดูดกลืนแสงสีม่วงและสีแดง แล้วปล่อยแสงสีเขียวและสีใกล้เคียงให้สะท้อนกลับมาเข้าตามากที่สุด ส่วนดอกไม้ที่มีสีแดงเพราะดอกมีสารสีสีแดงซึ่งดูดกลืนแสงสีม่วง สีน้ำเงิน และสีเขียวส่วนใหญ่ไว้ แล้วปล่อยให้แสงสีแดงปนสีส้มและสีเหลืองให้สะท้อนกลับมา

เข้าตามากที่สุด ส่วนสารสีสีดำนั้นจะดูดกลืนแสงทุกสีที่ตกกระทบทำให้ไม่มีแสงสีใดสะท้อนกลับเข้าสู่ตาเลย เราจึงเห็นวัตถุเป็นสีดำ แต่สารสีสีขาวนั้นจะสะท้อนแสงทุกสีที่ตกกระทบ

14.10.1 การผสมสารสี

ในการเห็นสีของวัตถุเมื่อแสงไปกระทบวัตถุจะดูดกลืนแสงบางสีไว้ และสะท้อนแสงสีที่เหลือทำให้เรามองเห็นวัตถุเป็นสีต่างๆ เช่นสีแดง เหลือง หรือน้ำเงิน ซึ่งเป็นการเห็นสีที่สะท้อนจากวัตถุ ดังนั้นในชีวิตประจำวัน เรามักเห็นสีเนื่องจากแสงที่สะท้อนจากวัตถุ มากกว่าจะเห็นสีจากแสงที่ทะลุผ่านวัตถุ ดังนั้นการศึกษาการผสมสีของสารสีจึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจ



รูป 14.62 การดูดกลืนแสงสีของสารสีปฐมภูมิ

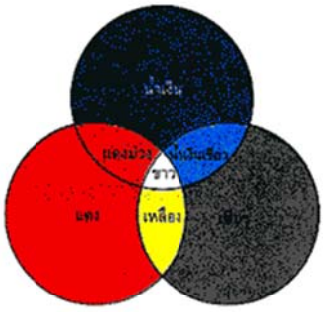
เราอาจเห็นวัตถุชิ้นเดียวกันเป็นสีต่างกัน ถ้าฉายแสงสีต่างกันไปกระทบวัตถุ และต้องการเห็นสีธรรมชาติของวัตถุเราจะต้องดูวัตถุนั้นด้วยแสงขาวของดวงอาทิตย์ อย่างไรก็ตามสิ่งที่กำหนดสีของวัตถุนั้นนอกเหนือไปจากแสงที่ตกกระทบแล้วก็คือมีสารสีบนผิววัตถุ หรือสารสีที่อยู่ในเนื้อวัตถุด้วย สารสีนั้นทำหน้าที่ดูดกลืนแสงสีที่มาตกกระทบผิววัตถุ โดยเลือกดูดกลืนสีและสะท้อนบางสี สารสีที่ไม่อาจสร้างขึ้นได้จากการผสมสารสีต่างๆ เข้าด้วยกันมี 3 สี คือ สีเหลือง สีแดงม่วง และสีน้ำเงินเขียว ซึ่งเรียกว่า**สารสีปฐมภูมิ** สารสีปฐมภูมิแต่ละสีสามารถดูดกลืนแถบสีต่างๆ ในสเปกตรัมแสงอาทิตย์แต่ละช่วงได้อย่างต่อเนื่อง คือ สารสีแดงม่วงจะไม่ดูดกลืนแสงในแถบสีแดงและสีม่วงแต่จะดูดกลืนเป็นแสงอื่นๆ สารสีเหลืองจะไม่ดูดกลืนแสงในแถบสีเหลืองที่อยู่ถัดจากสีแดง แต่จะดูดกลืนแสงอื่นๆ ส่วนใหญ่ สารสีน้ำเงินเขียวจะไม่ดูดกลืนแสงแถบสีน้ำเงิน ม่วง เขียวแต่จะดูดกลืนแสงแถบสีอื่นๆ เป็นส่วนใหญ่ดังแสดงในรูป 14.62

รูป 14.63 การผสมสารสีปฐมภูมิ

ถ้านำสารสีปฐมภูมิทั้งสามมาผสมกันด้วยปริมาณที่เท่ากัน จะได้สีผสมที่มีสมบัติดูดกลืนแสงสีทุกแถบสีในสเปกตรัมแสงขาวที่มาตกกระทบ สารสีผสมนี้คือ **สารสีดำ** ดังแสดงในรูป 14.63 ถ้านำสารสีปฐมภูมิมาผสมกันด้วยสัดส่วนต่างๆ กัน จะเกิดเป็นสารผสมได้หลายสี ยกเว้น **สารสีขาว**ที่ไม่อาจทำให้เกิดได้ด้วยการผสมสารสีต่างๆ

14.10.2 การผสมแสงสี

แสงที่สะท้อนหรือทะลุผ่านวัตถุต่างๆ มักไม่เป็นแสงเพียงสีเดียว ดังนั้นการเห็นสีของวัตถุจะเกิดการเห็นสีที่เป็นผลจากการผสมแสงสีต่างๆ การผสมแสงสีนี้มีผลอย่างไร จะได้ศึกษาจากการทดลอง 14.64



รูป 14.64 การผสมแสงสีปฐมภูมิบนฉากขาว

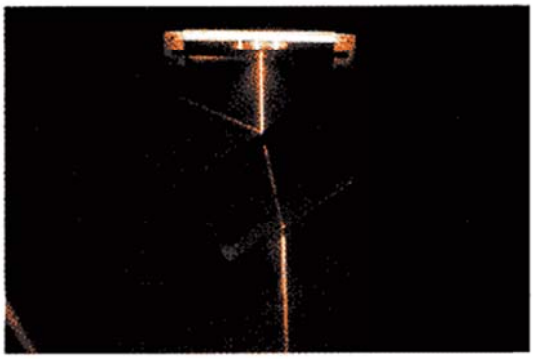
เมื่อนำแสงสีแดง แสงสีเขียว และแสงสีน้ำเงิน มาผสมกันบนฉากขาวด้วยสัดส่วนเท่าๆ กัน จะให้ผลเหมือนกับเราฉายแสงขาวลงบนฉากขาว นั่นคือ แถบแสงสีต่างๆ ในแสงสีแดง แสงสีเขียว และแสงสีน้ำเงินจะรวมกันเป็นสเปกตรัมของแสงขาวพอดี ดังรูป 14.64 แสงสีทั้งสามนี้เรียกว่า **แสงสีปฐมภูมิ** เราอาจนำแสงสีปฐมภูมิมาผสมกันเพื่อให้แสงสีต่างๆ กันได้หลายสี ยกเว้นแสงสีดำ

การทดลองและกิจกรรม

การทดลอง 14.1 การหักเหของแสง

จุดประสงค์ เพื่อศึกษาการหักเหของแสง

วิธีทำ ต่อสายไฟจากกล่องแสงเข้ากับหม้อแปลงขนาด 12 โวลต์ ใส่แผ่นช่องแสงที่ให้ลำแสง 1 ลำ เข้ากับกล่องแสง วางแท่งพลาสติกสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยให้หน้าแท่งพลาสติกที่ขุ่นทาบกับกระดาษขาวบนโต๊ะ จัดลำแสงให้ทำมุมตกกระทบค่าหนึ่งที่ผิวด้านข้างของแท่งพลาสติก ลากเส้นดินสอตามขอบแท่งพลาสติกทั้งสี่ด้านบนกระดาษขาวลากรังสีตกกระทบ และรังสีหักเหในแท่งพลาสติกซึ่งเป็นรังสีตกกระทบในแท่งพลาสติกที่ผิวอีกด้านหนึ่งของแท่งพลาสติก และรังสีหักเหในอากาศ



รูป 14.65 การจัดอุปกรณ์ทดลองการหักเหของแสง

วัดมุมตกกระทบ θ_1 มุมหักเหในแท่งพลาสติก θ_2 มุมตกกระทบในแท่งพลาสติก θ_3 และมุมหักเหในอากาศ θ_4 แล้วบันทึกผลลงในตาราง

เปลี่ยนค่ามุม θ_1 อีก 2 ค่า แล้ววัดมุม θ_2 θ_3 และ θ_4 บันทึกผลลงในตาราง จากนั้นหาค่า $\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2}$ และ $\frac{\sin\theta_3}{\sin\theta_4}$ บันทึกผลลงในตาราง

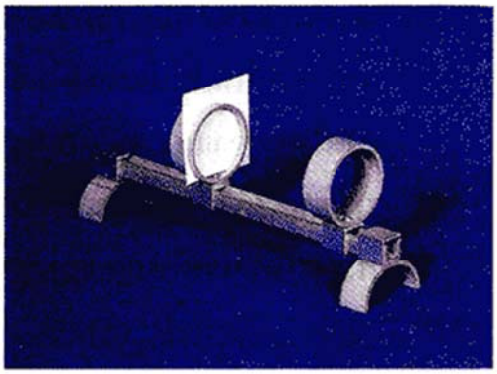
- ☐ $\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2}$ และ $\frac{\sin\theta_3}{\sin\theta_4}$ ที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง เท่ากันหรือไม่
- ☐ ค่าของ $\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2}$ แตกต่างจาก $\frac{\sin\theta_3}{\sin\theta_4}$ อย่างไร

การทดลอง 14.2 การหักเหของแสงผ่านเลนส์นูน

จุดประสงค์ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง s, s' และ f

ตอนที่ 1 การหาความยาวโฟกัสของเลนส์นูน

จัดเลนส์นูนและฉาก ดังรูป 14.66 เลื่อนเลนส์นูนไปที่ตำแหน่งปลายสุดของราง จัดเลนส์นูนให้รับแสงจากวัตถุที่อยู่ไกลจากเลนส์ประมาณ 100 เมตร จากนั้นเลื่อนฉากจนได้ภาพวัตถุคมชัดที่สุดบนฉาก เพื่อวัดความยาวโฟกัสของเลนส์นูน



รูป 14.66 แสดงการจัดเครื่องมือสำหรับหาความยาวโฟกัสของเลนส์นูน

ตอนที่ 2 การหาความสัมพันธ์ระหว่าง s, s' และ f

วางกล่องแสงไว้ที่ปลายข้างหนึ่งของไม้เมตร วางเลนส์บนไม้เมตรให้ห่างจากไส้หลอดไฟของกล่องแสงไกลกว่าความยาวโฟกัสเล็กน้อย จากนั้นเลื่อนฉากไปมาจนได้ภาพของไส้หลอดบนฉากคมชัดที่สุด วัดระยะวัตถุ (s) และระยะภาพ (s') บันทึกค่าที่ได้ในตาราง

เลื่อนเลนส์ให้ห่างหลอดไฟเป็นระยะต่างๆ อีก 4 ค่า ทำการทดลองซ้ำกับที่ได้ทำในข้างต้น จะได้ s และ s' อย่างละ 5 ค่า

คำนวณค่า $\frac{1}{s}$ และ $\frac{1}{s'}$ พร้อมทั้งบันทึกลงตาราง จากนั้นเขียนกราฟระหว่าง $\frac{1}{s}$ กับ $\frac{1}{s'}$ โดยให้ $\frac{1}{s}$ อยู่บนแกนยืน และ $\frac{1}{s'}$ อยู่บนแกนนอน

- ☐ กราฟที่ได้มีลักษณะอย่างไร ถ้าต่อเส้นกราฟให้ตัดแกนทั้งสอง จุดตัดบนแกนทั้งสองมีค่าเท่ากันหรือไม่
- ☐ ความชันของกราฟมีค่าเท่าใด
- ☐ จุดตัดบนแกนยืนมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{f}$ หรือไม่
- ☐ จากกราฟนี้สรุปความสัมพันธ์ระหว่าง s, s' และ f ได้อย่างไร

การทดลอง 14.3 เครื่องฉายภาพนิ่ง

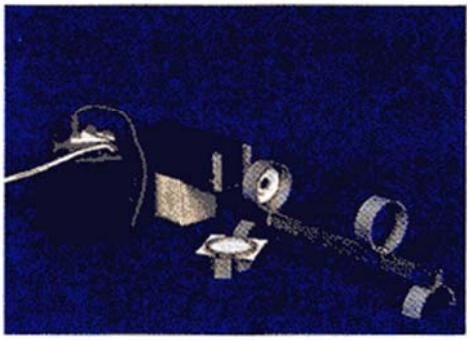
จุดประสงค์ ศึกษาหลักการทำงานของเครื่องฉายภาพนิ่ง

วิธีทำ นำฟิล์มสไลด์ที่มีกรอบพลาสติก (หรือกรอบกระดาษแข็ง) ใส่ลงในช่องที่หน้ากล่องแสง วางหน้าเลนส์นูนแผ่นสไลด์นี้ โดยให้เลนส์อยู่ห่างจากแผ่นสไลด์ในช่วง f ถึง $2f$ เปิดไฟกล่องแสง ใช้แผ่นกระดาษแข็งสีขาววางหน้าเลนส์ เลื่อนกระดาษไปมาช้าๆ จนได้ภาพของสไลด์ชัดบนแผ่นกระดาษ (ควรทดลองในห้องที่ค่อนข้างมืด หรือใช้กล่องกระดาษขนาดใหญ่ครอบชุดทดลองเพื่อมิให้แสงจากภายนอกมารบกวน)

การทดลอง 14.4 กล้องจุลทรรศน์

จุดประสงค์ เพื่อศึกษาหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์

วิธีทำ ตัดแผ่นกระดาษแข็งขนาด 5 × 5 ตารางเซนติเมตร เจาะเป็นรูปลูกศรที่สูงประมาณ 0.3 เซนติเมตร ที่บริเวณกลางกระดาษซึ่งต่อไปนี้จะเรียกว่า แผ่นลูกศร นำแผ่นลูกศรเสียบหน้ากล่องแสง เอาเลนส์นูนที่มีความยาวโฟกัสวางหน้าแผ่นลูกศร โดยให้ระยะระหว่างเลนส์นูนกับแผ่นลูกศรมากกว่าความยาวโฟกัสของเลนส์นูนเล็กน้อย นำกระดาษฝ้าขนาด 6 × 6 ตารางเซนติเมตร ซึ่งจะเรียกว่าแผ่นฉาก ไปเสียบไว้กับที่เสียบฉาก จัดแผ่นฉากให้รับภาพจริงหัวกลับขนาดขยายแล้วใช้เลนส์นูนที่มีความยาวโฟกัสมากมองภาพที่แผ่นฉากจนเห็นภาพขนาดขยาย ต่อไปเปลี่ยนแผ่นลูกศรโดยใช้ภาพสไลด์ที่มีกระดาษฝ้าปิดทับด้านหลัง แล้วดูภาพของสไลด์ผ่านเลนส์นูนที่มีความยาวโฟกัสมาก โดยไม่ต้องมีแผ่นฉากกั้น ดังรูป 14.57



รูป 14.67 การประกอบกล้องจุลทรรศน์

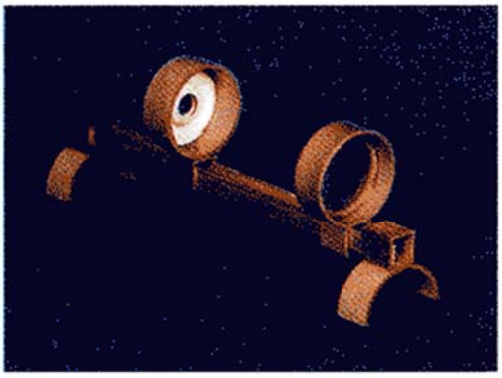
- ☐ ขนาดและลักษณะของภาพของสไลด์ที่มองผ่านเลนส์นูนที่มีความยาวโฟกัสมากเป็นอย่างไร
- ☐ ระยะระหว่างเลนส์ทั้งสองมีค่าเท่าใด และระยะนี้แตกต่างจากความยาวโฟกัสของเลนส์นูนทั้งสองอย่างไร

การทดลอง 14.5 กล้องโทรทรรศน์

จุดประสงค์ เพื่อศึกษาหลักการทำงานของกล้องโทรทรรศน์

วิธีทำ หาความยาวโฟกัสของเลนส์ทั้งสอง แล้ววางเลนส์บนรางเลื่อน ดังรูป 14.68 จัดเลนส์ทั้งสองให้อยู่ห่างกันประมาณ 19 เซนติเมตร เมื่อมองดูวัตถุที่อยู่ไกลๆ ผ่านเลนส์ทั้งสอง (ไม่ควรดูวัตถุที่มีความสว่างสูงมาก เช่น ดวงอาทิตย์) โดยให้เลนส์ที่มีความยาวโฟกัสมากเป็นเลนส์ใกล้วัตถุปรับความชัดของภาพที่เห็น โดยเลื่อนเลนส์ใกล้วัตถุไปมาอย่างช้าๆ จนกระทั่งได้ภาพชัดที่สุด

- ☐ ระยะระหว่างเลนส์ทั้งสองขณะเห็นภาพชัดที่สุดเป็นอย่างไร เมื่อเปรียบเทียบความยาวโฟกัสของเลนส์แต่ละอัน
- ☐ ภาพที่เห็นแตกต่างจากวัตถุหรือไม่ อย่างไร



รูป 14.68 การประกอบกล้องโทรทรรศน์

การทดลอง 14.6 สีของวัตถุ

จุดประสงค์ เพื่อศึกษาสมบัติของแผ่นกรองแสงสีต่างๆ

วิธีทำ ต่อหลอดไฟฟ้าของกล่องแสงเข้ากับหม้อแปลงขนาด 12 โวลต์ ใช้แผ่นช่องแสงที่มี 1 ช่องปิดหน้ากล่องแสง ให้แสงผ่านปริซึมสามเหลี่ยมที่วางบนกระดาษขาวปรับมุมตกกระทบที่ปริซึม เพื่อให้เห็นการกระจายแสงมากที่สุด นำแผ่นพลาสติกใสสีม่วง สีน้ำเงิน สีเขียว สีเหลือง สีส้ม และสีแดง มาวางกั้นหน้าช่องแสง ทีละแผ่น สังเกตและบันทึกแถบสี

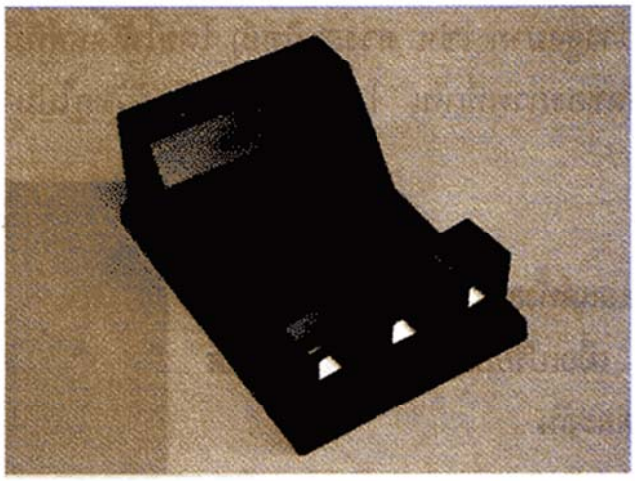
- ☐ เมื่อกั้นแสงหน้าช่องแสงด้วยแผ่นพลาสติกใสแต่ละสี เปรียบเทียบกับแถบสีที่เห็นกรณีที่ไม่มีแผ่นพลาสติกใสกั้น แตกต่างกันอย่างไร

การทดลอง 14.7 การผสมแสงสีบนฉากขาว

จุดประสงค์ เพื่อศึกษาการผสมแสงสี

วิธีทดลอง ถือกล่องผสมแสงสีโดยหันด้านที่มีแผ่นกรองแสงสี แดง เขียว และน้ำเงินรับแสงจากดวงอาทิตย์ จัดแสงที่ผ่านช่องปรับแนวลำแสงให้ตกกระทบ ณ ที่ที่กำหนดไว้ ปรับแผ่นกรองแสงสีทั้งสามจนกระทั่งเห็นวงสีทั้งสามบนฉากสีขาว

จากนั้นปรับแผ่นกรองแสงสีทั้งสามให้วงสีซ้อนกันตามลำดับ ดังนี้ แดงและเขียว แดงและน้ำเงิน เขียวและน้ำเงิน แดง เขียว และน้ำเงิน สังเกตแสงสีผสมที่ปรากฏบนฉาก ในแต่ละครั้งแล้วบันทึกผล



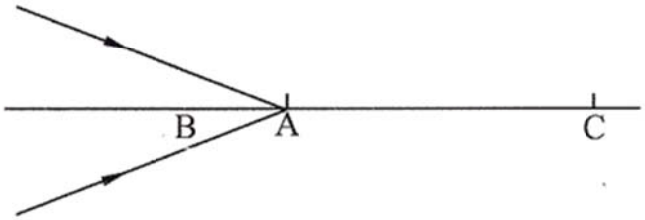
รูป 14.69 อุปกรณ์การผสมแสงสี

☐ สีที่ปรากฏบนฉาก ณ บริเวณที่วงสีซ้อนกันเหมือนกับสีของแสงที่มาซ้อนสีใดสีหนึ่งหรือไม่

โจทย์แบบฝึกหัดบทที่ 14

คำถาม

1. ภาพของวัตถุที่วางหน้ากระจกเงาราบเป็นภาพเสมือนเสมอ เพราะเหตุใด
2. ภาพของวัตถุที่วางหน้ากระจกนูนเป็นภาพเสมือนเสมอ เพราะเหตุใด
3. กระจกติดรถยนต์สำหรับใช้ดูยวดยานที่อยู่ข้างหลัง มักเป็นกระจกนูนมากกว่ากระจกเงาราบ เพราะเหตุใด
4. ทำไมทันตแพทย์จึงใช้กระจกเว้าส่องดูฟันของคนไข้
5. เมื่อแสงผ่านละอองฝนและแท่งปริซึมจะเกิดสเปกตรัมของแสง การเกิดสเปกตรัมในทั้งสองกรณีเพราะสมบัติใดของแสง
6. รังสีของแสงเบนเข้าหากันที่จุด A ถ้านำเลนส์ไปวางไว้ที่จุด B รังสีของแสงคู่นี้จะเบนไปพบกันที่จุด C เลนส์ที่นำไปวางเป็นเลนส์ชนิดใด อธิบาย



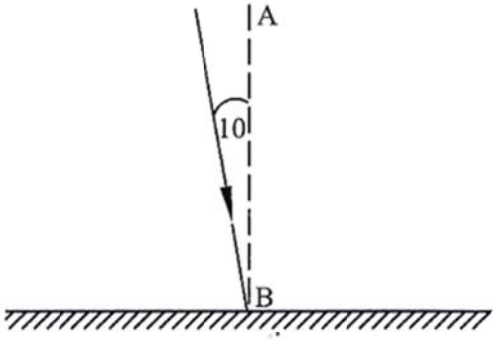
รูปสำหรับแบบฝึกหัดข้อ 6

7. ในตอนเช้าขณะดวงอาทิตย์ยังไม่ขึ้นจากขอบฟ้า และตอนเย็นเมื่อดวงอาทิตย์ตกลับขอบฟ้าไปแล้ว เราก็ยังมองเห็นดวงอาทิตย์ เพราะเหตุใด อธิบาย
8. จงอธิบายว่า แผ่นกรองแสงมีอิทธิพลต่อความสว่างอย่างไร
9. เมื่อใช้กล้องโทรทรรศน์ที่มีกำลังขยายเท่ากัน ส่องดูดาวในเวลากลางคืน พบว่ากล้องที่มีพื้นที่หน้าตัดของเลนส์ใกล้วัตถุมากกว่า จะเห็นดาวได้ชัดกว่าเพราะเหตุใด
10. เมื่อฉายวัตถุด้วยแสงขาว เห็นวัตถุ ก. มีสีขาว และวัตถุ ข. มีสีเขียว (วัตถุทั้งสองเป็นวัตถุโปร่งแสง) ถ้าฉายวัตถุด้วยแสงสีแดง อยากทราบว่าวัตถุ ก. และ ข. ปรากฏเป็นสีอะไร

ปัญหา

1. ถ้ารัศมีวงโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์เท่ากับ 1.47×10^{11} เมตร จงหาว่าแสงจากดวงอาทิตย์ต้องใช้เวลานานเท่าใดจึงจะเคลื่อนที่ถึงโลก
2. พรอกซิมา เซนทอรี เป็นดาวฤกษ์ที่อยู่ใกล้ดวงอาทิตย์ที่สุด คือ อยู่ห่างจากโลก 4.3 ปีแสง ถ้ายานอวกาศเดินทางไปยังดาวฤกษ์ดวงนี้ ด้วยอัตราเร็ว 30 กิโลเมตรต่อวินาที ยานอวกาศนั้นจะต้องใช้เวลาเดินทางกี่ปี

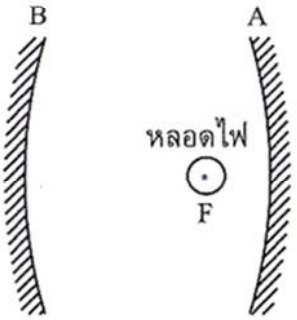
3. วัตถุที่สูงกว่ากระจกเงาราบวางอยู่หน้ากระจกเงาราบ จะเห็นภาพของวัตถุทุกส่วนได้หรือไม่ แสดงวิธีการหาคำตอบด้วยการเขียนรังสีของแสง
4. ชายคนหนึ่งสูง 1.80 เมตร ต้องการกระจกเงาราบเพื่อจะใช้ส่องมองเห็นได้ตลอดตัว กระจกเงาราบจะต้องมีความยาวอย่างน้อยที่สุดกี่เซนติเมตร ถ้าวางกระจกเงาราบห่างจากตัวเขาที่ระยะต่างๆ กัน เขาจะยังคงมองเห็นตลอดตัวต่อไปหรือไม่
5. รังสีของแสง CB ตกกระทบกระจกเงาราบทำมุม 10 องศากับเส้นแนวฉาก AB ดังรูป เมื่อบิดกระจกเงาราบ
   ก. ในทิศทวนเข็มนาฬิการอบจุด B
   ข. ในทิศตามเข็มนาฬิการอบจุด B



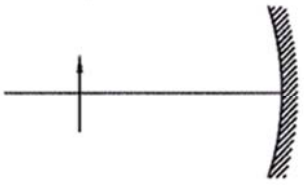
รูปสำหรับแบบฝึกหัดข้อ 5

จนกระทั่งกระจกเงาราบทำมุม 10 องศากับแนวเดิมของกระจกเงาราบ รังสีสะท้อนในแต่ละกรณีทำมุมเท่าใดกับเส้น AB

6. วัตถุสูง 5 cm. อยู่ห่างจากกระจกเว้า 10 cm. ถ้ากระจกเว้ามีรัศมีความโค้ง 50 cm. จงเขียนทางเดินของแสงและคำนวณหาตำแหน่ง ลักษณะ และขนาดของภาพ
7. วางหลอดไฟฟ้าที่จุดโฟกัสของกระจกเว้า ดังรูป ถ้านำกระจกเว้าอีกบานหนึ่งมารับแสงจากกระจกบานแรก ภาพของหลอดไฟฟ้านี้จะเกิดขึ้น ณ ตำแหน่งใดบ้าง และเป็นภาพจริงหรือภาพเสมือน
8. วางวัตถุไว้หน้ากระจกเว้าดังรูป ถ้านำกระดาษทึบแสงมาปิดที่ช่วงครึ่งล่างของกระจกเว้า ภาพของวัตถุที่เกิดขึ้นจะเหมือนภาพตอนที่ไม่มีกระดาษปิดหรือไม่ ให้เขียนทางเดินแสงประกอบคำตอบ
9. กระจกเว้า P รัศมีความโค้ง 50 cm. และกระจกเว้า Q รัศมีความโค้ง 68 cm. วางหันหน้าเข้าหากันและห่างกัน 150 cm. โดยมีแกนมุขสำคัญร่วมกัน ดังรูป เมื่อวางวัตถุเล็กๆ A ที่โฟกัสของกระจกเว้า P พิจารณาแสงจากวัตถุ A ที่กระทบกระจกเว้า P แล้วสะท้อนกลับไปที่กระจกเว้า Q แล้วสะท้อนกลับมาพบกันที่จุด B จุด B อยู่ห่างกระจกเว้า P เท่าใด

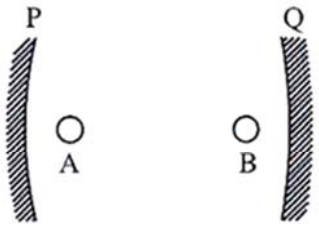


รูปสำหรับแบบฝึกหัดข้อ 7



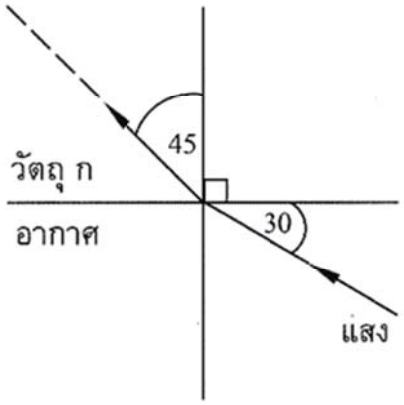
รูปสำหรับแบบฝึกหัดข้อ 8

10. สุภาพสตรีผู้หนึ่งใช้กระจกเว้าส่องดูหน้า การให้ใบหน้าอยู่ห่างกระจก 20 cm. และกระจกเว้ามีรัศมีความโค้ง 60 cm. จงตอบคำถามต่อไปนี้
    ก. มีปัจจัยอะไรบ้างที่จะทำให้เห็นใบหน้าใหญ่ขึ้น
    ข. ภาพใบหน้าของเขาอยู่ที่ไหน
    ค. เขาต้องทำอย่างไรจึงจะเห็นภาพใบหน้าขยายขนาดขึ้น



รูปสำหรับแบบฝึกหัดข้อ 9

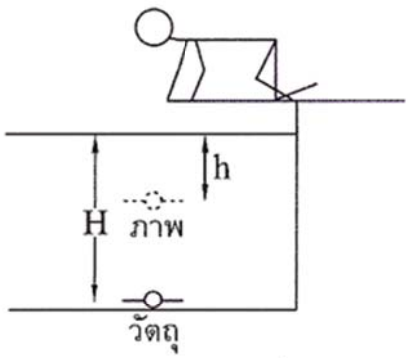
11. กระจกในข้อใด สามารถให้ภาพเสมือนที่มีขนาดใหญ่กว่าวัตถุ เขียนทางเดินของแสงแสดงการเกิดภาพประกอบคำอธิบาย
    ก. กระจกเงาราบ
    ข. กระจกนูน
    ค. กระจกเว้า
12. ถ้าจะทำให้เกิดภาพหลังกระจกนูนและอยู่ห่างจากกระจกนูน 20 cm. สมมติกระจกนูนมีรัศมีความโค้ง 60 cm. จะต้องวางวัตถุ ณ ตำแหน่งใด ให้เขียนทางเดินของแสง และคำนวณหาตำแหน่งวัตถุ
13. ถ้าวัตถุอยู่ห่างกระจกเว้า 36.4 cm. จะเกิดภาพจริงที่มีความสูงเท่ากับวัตถุ กระจกเว้านี้มีรัศมีความโค้งเท่าใด
14. จากรูป จงหาดรรชนีหักเหของวัตถุ ก.



รูปสำหรับแบบฝึกหัดข้อ 14

15. ถ้าเทคาร์บอนไดซัลไฟด์ซึ่งเป็นของเหลวใสที่มีดรรชนีหักเห 1.63 ลงไปในอ่างแก้วใบใหญ่ที่สูง 10 cm. จนเต็มเปี่ยม อ่างมีหลอดไฟเล็กดวงหนึ่งเปิดสว่างอยู่ที่ก้นอ่าง จงคำนวณพื้นที่ผิวที่มากที่สุดของคาร์บอนไดซัลไฟด์ที่แสงลอดผ่านขึ้นมาได้
16. จงหามุมวิกฤตของเพชรเมื่อแสงผ่านจากเพชรไปยังน้ำ กำหนดดรรชนีหักเหของเพชรและของน้ำมีค่าเท่ากับ 2.42 และ 1.33 ตามลำดับ
17. ให้หามุมวิกฤตในน้ำซึ่งมีดรรชนีหักเหเท่ากับ 1.33 ขณะแสงผ่านจากน้ำสู่อากาศ
18. ที่ทับกระดาษรูปทรงกลมทำด้วยอำพันซึ่งดรรชนีหักเหมีค่าเท่ากับ 1.6 และทรงกลมมีรัศมี 4 cm. มีดอกไม้เล็กๆ สีม่วงอยู่ในทรงกลมบนแนวแกนและห่างจากผิวทรงกลม 3 cm. เมื่อมองดูดอกไม้ตามแนวแกนของทรงกลม จะมองเห็นภาพดอกไม้อยู่ลึกจากผิวทรงกลมด้านที่มองเท่าใด กำหนดค่าดรรชนีหักเหของอากาศเป็น 1.0
19. นักกระโดดน้ำยืนบนที่กระโดดได้มองตรงดิ่งลงไปในสระน้ำในแนวดิ่ง เพื่อมองหานาฬิกาที่ตกลงไปในสระ ปรากฏว่าเขาเห็นนาฬิกาอยู่ลึกจากผิวน้ำ h แต่สระน้ำลึก H ถ้าน้ำมีดรรชนีหักเห n จงแสดงให้เห็นว่า

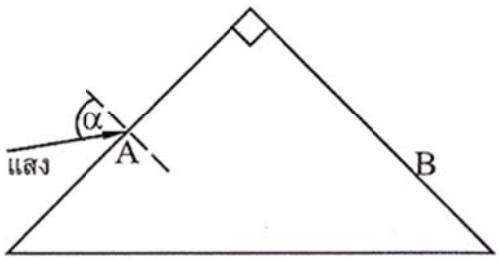
$$h = \frac{H}{n}$$



รูปสำหรับแบบฝึกหัดข้อ 19

(**คำแนะนำ** รังสีของแสงทุกรังสีอยู่ใกล้เส้นแนวฉากมาก มุมตกกระทบและมุมหักเหจึงเป็นมุมเล็กๆ)

20. แสงทำมุมตกกระทบบนด้านของแท่งปริซึมสามเหลี่ยมมุมฉากที่ A แล้วหักเหเข้าไปในแท่งปริซึมและเมื่อแสงกระทบผิวปริซึมที่ B จะหักเหเป็นมุม 90° ดังรูป



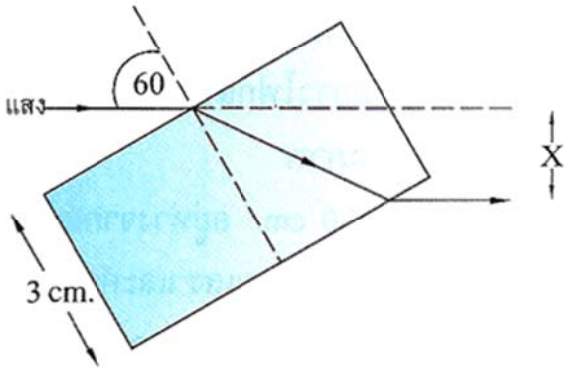
รูปสำหรับแบบฝึกหัดข้อ 20

ก. ดรรชนีหักเหของปริซึมอยู่ในเทอมของ α มีค่าเท่าใด

ข. วัสดุที่ใช้ทำปริซึมมีค่าดรรชนีหักเหมากที่สุดเท่าใด เมื่อแสงตกกระทบที่ A แล้ว ผ่านเข้าไปในปริซึม จาก A ไป B และหักเหในลักษณะเดิม

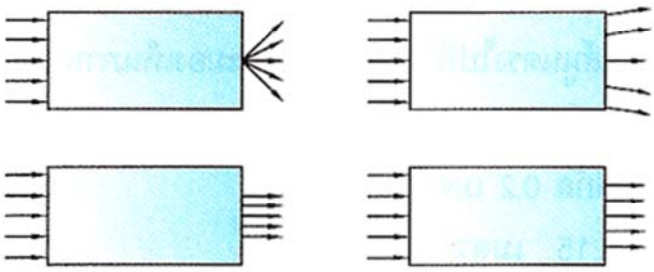
ค. ถ้ามุมตกกระทบที่ B เพิ่มขึ้นเล็กน้อย จะเกิดอะไรกับแสงที่ B

21. เอาแท่งพลาสติกสี่เหลี่ยมกว้าง 3 cm. วางขวางทางเดินของแสง ทำให้แสงมีการหักเหดังรูป แท่งพลาสติกมีดรรชนีหักเห 1.50 จงหาระยะ X



รูปสำหรับแบบฝึกหัดข้อ 21

22. ลำแสงสีเดียวส่องขนานเข้าไปใน กล่อง ดังรูป จากการสังเกตลักษณะรังสีที่ทะลุออกมา จงหาชนิดของเลนส์ที่จะต้องนำไปวางไว้ในกล่องเพื่อให้เกิดผลดังที่แสดงไว้ ในการนี้อาจใช้เลนส์มากกว่า 1 อันก็ได้ ในกล่องใบหนึ่งๆ

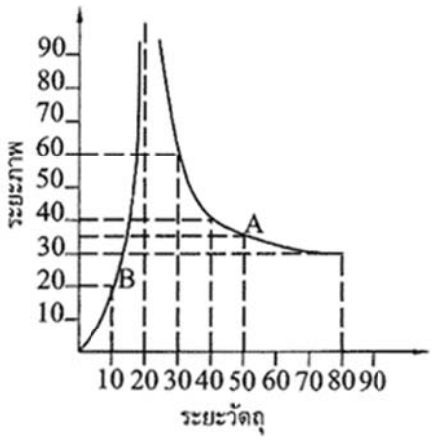


รูปสำหรับแบบฝึกหัดข้อ 22

23. จงเขียนแผนภาพแสดงการเกิดภาพ วัตถุอยู่หน้าเลนส์นูนและเลนส์เว้า โดยวัตถุอยู่ตั้งฉากกับแกนมุขสำคัญของเลนส์ วัตถุห่างจากเลนส์ทั้งสองเป็นระยะต่างๆ กันดังนี้

ก. $s > 2f$ ข. $s = 2f$ ค. $f < s < 2f$ ง. $s = f$ จ. $s < f$

24. นักเรียนวางวัตถุไว้หน้าเลนส์นูนที่ระยะต่างๆ แล้วบันทึกระยะวัตถุและระยะภาพที่สัมพันธ์กัน แล้วเขียนกราฟดังรูป



ก. ความยาวโฟกัสของเลนส์นูนเป็นเท่าใด

ข. ถ้าวางวัตถุที่ระยะ 40 cm. จากเลนส์ระยะภาพจะเป็นเท่าใด

ค. จุด A ในกราฟ ระยะวัตถุ และระยะภาพเป็นเท่าใด

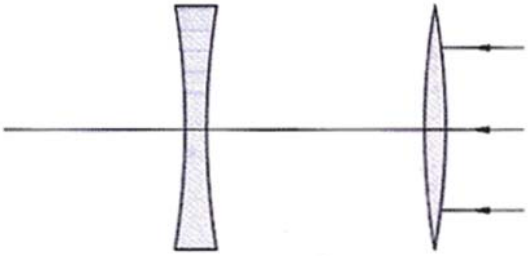
ง. ณ ตำแหน่ง A จะได้ภาพจริงหรือเสมือนขนาดขยายหรือย่อ

จ. ณ ตำแหน่ง B จะได้ภาพแบบใด และระยะภาพเป็นเท่าใด

ฉ. จุดบนกราฟที่จะได้ภาพจริงขนาดขยายใหญ่เป็น 2 เท่าของวัตถุเป็นจุดใด

รูปสำหรับแบบฝึกหัดข้อ 24

25. วัตถุสูง 2.0 cm. อยู่ห่างจากเลนส์นูน 20.0 cm. เกิดภาพจริงห่างจากเลนส์ 10.0 cm. จงเขียนภาพทางเดินของแสง และคำนวณหา
    ก. ความยาวโฟกัสของเลนส์นูน
    ข. ขนาดภาพ
26. วัตถุสูง 3.0 cm. อยู่ห่างจากเลนส์เว้า 15.0 cm. เกิดภาพห่างจากเลนส์ 5.0 cm. ให้เขียนภาพทางเดินของแสง และคำนวณหา
    ก. ความยาวโฟกัสของเลนส์เว้า
    ข. ขนาดภาพ
27. วางวัตถุหน้าเลนส์นูนและห่างจากเลนส์นูน 1.0 เมตร ถ้าเลนส์นูนมีความยาวโฟกัส 0.50 เมตร และอยู่หน้ากระจกเงาราบโดยห่างจากกระจกเงาราบ 2.0 เมตร
    ก. เมื่อตามองผ่านเลนส์นูนตรงไปที่กระจกเงาราบ จะมองเห็นภาพของวัตถุห่างจากเลนส์นูนเท่าใด
    ข. ภาพสุดท้ายที่เกิดเป็นภาพจริงหรือภาพเสมือน
28. เลนส์นูนมีความยาวโฟกัส 0.2 เมตรและเลนส์เว้ามีความยาวโฟกัส 0.15 เมตร วางอยู่ดังรูป เมื่อให้ลำแสงขนานตกกระทบเลนส์นูน ลำแสงจะผ่านเลนส์นูนสู่เลนส์เว้า ถ้าลำแสงที่ผ่านเลนส์เว้ามาเป็นลำแสงขนานอีกครั้งหนึ่ง เลนส์ทั้งสองจะต้องอยู่ห่างกันเท่าใด



รูปสำหรับแบบฝึกหัดข้อ 28

29. เลนส์ของกล้องถ่ายรูปมีความยาวโฟกัส 5 เซนติเมตร และอยู่ห่างจากฟิล์มในกล้องเท่ากับความยาวโฟกัส ถ้าต้องการถ่ายรูปของวัตถุที่อยู่ห่างจากเลนส์ 2 เมตร ผู้ถ่ายภาพจะต้องทำอย่างไรจึงจะได้ภาพชัด
30. หลอดไฟฟ้าที่มีตัวสะท้อนแสงที่ดีบรรจุภายใน ให้แสงสว่างตกกระทบพื้นโต๊ะเป็นรูปวงกลมที่มีรัศมีเท่ากับ 20 เซนติเมตร ถ้าหลอดไฟฟ้ามีฟลักซ์ส่องสว่าง 500 ลูเมน ความสว่างบนพื้นโต๊ะเป็นเท่าใด
31. หอประชุมในโรงเรียนแห่งหนึ่งมีพื้นที่ 800 ตารางเมตร ถ้าต้องการให้ความสว่างเฉลี่ยที่พื้นหอประชุมมีค่า 200 ลักซ์ จะต้องใช้หลอดไฟฟ้า 40 วัตต์ อย่างน้อยที่สุดกี่หลอด (พิจารณาทั้งหลอดแบบไส้ และหลอดฟลูออเรสเซนต์)

32. หลอดฉายภาพยนตร์หลอดหนึ่ง มีฟลักซ์ส่องสว่างเท่ากับ 1,020 ลูเมน จะสามารถฉายภาพได้ขนาดใหญ่ที่สุดเท่าไร ถ้าคิดการสูญเสียพลังงานแสงเนื่องจากตัวสะท้อนและอุปกรณ์ต่างๆ เท่ากับ 18% และให้ความสว่างเฉลี่ยบนจอเท่ากับ 250 ลักซ์
33. ภาพเสมือนที่เห็นในกล้องจุลทรรศน์ซึ่งมีกำลังขยาย 600 เท่า มีความสว่าง 300 ลักซ์และมีพื้นที่ของภาพเท่ากับ 0.005 ตารางเมตร ถ้าไม่คิดการสูญเสียใดๆ เนื่องจากการดูดกลืนแสงของเลนส์
    ก. ฟลักซ์ส่องสว่างของวัตถุมีค่าเท่าไร
    ข. ความสว่างบนวัตถุมีค่าเท่าไร
34. ถ้าต้องการให้ความสว่างบนโต๊ะผ่าตัดพื้นที่ 1 ตารางเมตร มีค่าเพียงพอ จะต้องใช้หลอดไฟฟ้าที่มีฟลักซ์ส่องสว่างเท่าใด กำหนดความสูญเสียเนื่องจากตัวสะท้อนแสงเท่ากับ 20%

บรรณานุกรม

ส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, สถาบัน. **หนังสือเรียนวิชาฟิสิกส์ เล่ม 1 ว.421.** กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์คุรุสภาลาดพร้าว, 2545.

ส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, สถาบัน. **หนังสือเรียนวิชาฟิสิกส์ เล่ม 2 ว.021.** กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์คุรุสภาลาดพร้าว, 2543.

ส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, สถาบัน. **หนังสือเรียนวิชาฟิสิกส์ เล่ม 5 ว.024.** กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์คุรุสภาลาดพร้าว, 2543.

ส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, สถาบัน. **หนังสือเรียนวิชาฟิสิกส์ เล่ม 6 ว.025.** กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์คุรุสภาลาดพร้าว, 2543.

ส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, สถาบัน. **หนังสือเรียนวิชาฟิสิกส์ 1 ว.422.** กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์คุรุสภาลาดพร้าว, 2543.

ส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, สถาบัน. **หนังสือเรียนวิชาฟิสิกส์ 3 ว.027.** กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์คุรุสภาลาดพร้าว, 2542.

ส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, สถาบัน. **หนังสือเรียนวิชาฟิสิกส์ 5 ว.029.** กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์คุรุสภาลาดพร้าว, 2542.

Anderson, J.D.Jr. **Introduction to Flight.** Fourth Edition. Boston : McGraw-Hill, 2000.

Brown, W. and Others. **Advanced Physics.** London : Longman,1995.

Donal, H.E. **Basic Acoustics.** New York : John Wiley & Sons, Inc., 1987.

Giancoli, D.C. **Physics : Principle and Applications.** London : Prentice-Hall,Inc.,1995.

Halliday, D., Resnick, R. and Walker, J. **Fundamentals of Physics .** Fourth Edition. New York : John Wiley & Sons, Inc.,1993.

Jardine, J. **Physics Through Applications.** Oxford : Oxford University Press,1989.

Jones, G and Others. **Cambridge Coordinated Science : Physics.** Cambrigde : Cambrigde University Press, 1997.

Neville, F.H. and Rossing, T.D. **The Physics of Musical Instruments.** New York : Springer-Verlag , 1991.

Pople, S. **Complete Physics.** Oxford : Oxford University Press,1989.

Serway, R.A. **Physics.** Fourth Edition. Philadelphia : Saunders College Publishing,1996.

Serway, R.A. and Faughn,J.S. **Holt Physics.** Austin : Holt, Rinehart and Winston,1999.

คำตอบโจทย์แบบฝึกหัดบทที่ 9

(เฉพาะปัญหา)

1. 4.75×10^{17} กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
2. 147 นิวตัน
3. 89.37 เมตร
4. 7.65 เซนติเมตร
5. 1.23×10^{5} นิวตัน และ 6.15×10^{4} นิวตัน
6. ข้อความ 1 และ 2 ถูกต้อง
   ข้อความ 3 ไม่ถูกต้อง
7. ก. เท่ากัน ข. ไม่เท่ากัน
8. 10.08 เมตร
9. 1.96×10^{4} พาสคัล
   และ 9.8×10^{3} พาสคัล
10. ก. 1.113×10^{5} นิวตัน
    ข. 1.63×10^{5} นิวตัน
11. ก. 1.111×10^{5} พาสคัล
    ข. 1.307×10^{5} นิวตัน
    ค. 1.258×10^{5} นิวตัน
13. ข. 7.35×10^{-3} เมตร^2
12. ดูเฉลยในคู่มือครูฟิสิกส์ เล่ม 2
14. 533.12 พาสคัล, 799.68 พาสคัล,
    1066.24 พาสคัล ,..
15. 1130.95 เมตร
16. 1.133×10^{5} พาสคัล
17. 1822.2 นิวตัน
18. ก. 100 นิวตัน ข. 10^{5} พาสคัล
    ค. 10^{5} พาสคัล ง. 200 นิวตัน
19. ก. 4 เมตร^3 ข. 3.92×10^{4} นิวตัน
20. ก. 9.8×10^{-3} นิวตัน
    ข. 7.84×10^{-3} นิวตัน
21. 9.8 นิวตัน และ 6.174 นิวตัน
22. ก. 0.4 เมตร ข. 245 นิวตัน
23. ข. 91.7 และ 8.3 ค. 89.6
24. 0.363 นิวตันต่อเมตร
25. $\gamma\pi(d_1 + d_2) + mg$
26. 0.267 นิวตัน
27. ความหนืดของของเหลวชนิดที่ 2
    มากกว่าชนิดที่ 1
28. 0.135 เมตรต่อวินาที
29. 3.5×10^{-8} นิวตัน และ 1.032 เมตรต่อวินาที
30. $2^{2/3}v$
31. 2.12 เมตรต่อวินาที
32. ก. 9.0×10^{-4} เมตร^{3}ต่อวินาที
    ข. 9 เมตรต่อวินาที
33. 107.2 เมตรต่อวินาที
34. 135 พาสคัล และ 23 625 นิวตัน
35. 1.30×10^{6} พาสคัล
36. 2.9×10^{5} พาสคัล
37. 29.5 เมตรต่อวินาที

คำตอบโจทย์แบบฝึกหัดบทที่ 10

(เฉพาะปัญหา)

1. 73.6 °F
2. –220.62 °C หรือ 52.38 เคลวิน
3. –53.33
4. 47.947 °C, 3,664.5 จูล
5. 152,450 จูล
6. 0.4 กรัม
7. 21.83 ลูกบาศก์มิลลิเมตร
8. ก. 5.36×10^{24} โมเลกุล
   ข. i) 2.02×10^{5} พาสคัล
   ii) 2.02×10^{5} พาสคัล
9. 5.7 กิโลกรัม
10. 683,069.55 จูล
11. 516.82 เมตรต่อวินาที, 598.5×10^{-23} จูล
12. 749 เมตรต่อวินาที, 897.75×10^{-23} จูล
13. 10.08×10^{24} นิวตันต่อตารางเมตร
14. ก. $\frac{3}{2}k_BT$, $\frac{3}{2}k_BT$
    ข. $\frac{3}{2}N_Ak_BT$, $\frac{3}{2}N_Bk_BT$
15. ก. $V_1 = 2\,V_2$ ข. $\rho_1 = \rho_2$
    ค. $N_1 = N_2$ ง. $E_{K_1} = E_{K_2}$
16. 249.3 จูล
17. 18 จูล
18. หดตัว
19. 168 จูล, 96 จูล

คำตอบโจทย์แบบฝึกหัดบทที่ 11

(เฉพาะปัญหา)

1. $4\pi^2mf^2$, $2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$
2. 27.5 รอบ, π เรเดียน
3. 1800 ลูก
4. จ. 0.2 เมตร, 0.5 เฮิรตซ์
5. 0.1 เมตรต่อวินาที
6. 2.5 เซนติเมตร, 8 เฮิรตซ์.
7. 4 เซนติเมตร
8. ข. 65 องศา
9. ก. 30 องศา ค. 30 องศา
10. ดูเฉลยในคู่มือครูฟิสิกส์ เล่ม 2
11. ก. 0.68 เซนติเมตร
    ข. 10 เฮิรตซ์
    ค. 6.8 เซนติเมตรต่อวินาที
12. 73 องศา
13. ดูเฉลยในคู่มือครูฟิสิกส์ เล่ม 2
14. 5 เฮิรตซ์
15. 6 บัพ
16. 0.4 เมตร
17. ก. 8 บัพ, 2 เซนติเมตร ข. 7 แถบ

คำตอบโจทย์แบบฝึกหัดบทที่ 12

(เฉพาะปัญหา)

1. 0.35 เมตร, 1.5 เมตร, 5.2 เมตร ตามลำดับ
2. 3,625 เมตร
3. 887.5 เมตร
4. 7.07×10^{-5} วัตต์ต่อตารางเมตร
5. 0.64 เท่า
6. ดูเฉลยในคู่มือครูฟิสิกส์ เล่ม 2
7. 440, 1320, 2200, 3960 และ 4840 เฮิรตซ์
8. ดูเฉลยในคู่มือครูฟิสิกส์ เล่ม 2
9. 334.6 เฮิรตซ์
10. ดูเฉลยในคู่มือครูฟิสิกส์ เล่ม 2
11. 35.7 เฮิรตซ์
12. 1,619 เฮิรตซ์
13. 508.7 เฮิรตซ์
14. 54 เซนติเมตร
15. 341 เมตรต่อวินาที

คำตอบโจทย์แบบฝึกหัดบทที่ 13

(เฉพาะปัญหา)

1. 10 เมตร
2. 5.9×10^{-4} เมตร
3. 8.6×10^{-3} เมตร
4. 8.5×10^{-7} เมตร, 11,806 ช่องต่อเซนติเมตร
5. 7.5×10^{-4} เมตร
6. 6×10^{-2} เมตร
7. 0.25 เมตร
8. 3.5×10^{-2} เมตร
9. 437.3 นาโนเมตร

คณะกรรมการพิจารณาหนังสือเรียนฟิสิกส์ เล่ม 2 (ฉบับร่าง)

นายไชยยันต์ ศิริโชติ	สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
นายไพรัตน์ วรภักดี	สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
นายรังสรรค์ ศรีสาคร	สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
นายราม ติวารี	สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
นายสัญญลักขณ์ นิรัติศัยรักษ์	สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
นางสาวนันท์นภัส ลิ้มสันติธรรม	สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
นายวิจิตร เส็งหะพันธุ์	ที่ปรึกษา สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
นายอนันตสิน เตชะกำพุช	ผู้เชี่ยวชาญ (พนักงานสมทบ)
นางกิ่งแก้ว คูอมรพัฒนะ	นักวิชาการอิสระ
นายบุญชัย ตันไถง	มหาวิทยาลัยบูรพา
นางสาวโสภาพรรณ แสงศัพท์	โรงเรียนสาธิตแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
นายสุมิตร สวนสุข	โรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัย
นางสุจิตรา เต็มเมืองปัก	โรงเรียนบดินทรเดชา (สิงห์ สิงหเสนี)
นายปราโมทย์ ฉลูกัลป์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
นายวิรัตน์ วัฒนฤกษ์	โรงเรียนเทพลีลา
นางสุชาดา เสตวรรณา	โรงเรียนสายน้ำผึ้ง

คณะกรรมการดำเนินการพัฒนาหลักสูตรฟิสิกส์

นายไชยยันต์ ศิริโชติ	สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
นายรังสรรค์ ศรีสาคร	สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
นายราม ติวารี	สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
นายสัญญลักขณ์ นิรัติศัยรักษ์	สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
นายพรจักร ศรีพัชราวุธ	สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
นางสาวสุนทรี พงศ์รักธรรม	สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
นางสาวนันท์นภัส ลิ้มสันติธรรม	สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
นายวิจิตร เส็งหะพันธุ์	ที่ปรึกษาสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
นายอนันตสิน เตชะกำพุช	ผู้เชี่ยวชาญ (พนักงานสมทบ)
นายไพรัตน์ วรภักดี	ผู้ชำนาญ (พนักงานสมทบ)
นายบุญชัย ตันไถง	มหาวิทยาลัยบูรพา
นางสาวโสภาพรรณ แสงศัพท์	โรงเรียนสาธิตแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
นายปราโมทย์ ฉลูกัลป์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
นางกิ่งแก้ว คูอมรพัฒนะ	นักวิชาการอิสระ
นายสุมิตร สวนสุข	โรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัย

คณะที่ปรึกษา

นายพิศาล สร้อยธุหร่ำ	ผู้อำนวยการสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
นางสุนีย์ คล้ายนิล	ผู้เชี่ยวชาญพิเศษ สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
นายประมวล ศิริผันแก้ว	ผู้ช่วยผู้อำนวยการ สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

คณะบรรณาธิการ

นายสุทัศน์ ยกส้าน	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
นายประมวล ศิริผันแก้ว	ผู้ช่วยผู้อำนวยการ สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
นายพิเชษฐ์ ลิ้มสุวรรณ	มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี
นายไชยยันต์ ศิริโชติ	สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

พิมพ์ที่โรงพิมพ์คุรุสภาลาดพร้าว นายชาติชัย พาราสุข ผู้พิมพ์และผู้โฆษณา พ.ศ. 2547