หนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ ๕

ฟิสิกส์
เล่ม ๔

ตามผลการเรียนรู้
กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐)
ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช ๒๕๕๑

ตัวอักษรกรีก

ตัวอักษรเล็ก	ตัวอักษรใหญ่	ชื่อ	
α	A	alpha	แอลฟา
β	B	beta	บีตา
γ	Γ	gamma	แกมมา
δ, ∂	Δ	delta	เดลตา
ε	E	epsilon	เอปไซลอน
ζ	Z	zeta	ซีตา
η	H	eta	อีตา
θ	Θ	theta	ทีตา
ι	I	iota	ไอโอตา
κ	K	kappa	แคปปา
λ	Λ	lambda	แลมบ์ดา
μ	M	mu	มิว

ตัวอักษรเล็ก	ตัวอักษรใหญ่	ชื่อ	
ν	N	nu	นิว
ξ	Ξ	xi	ไซ
o	O	omicron	โอไมครอน
π	Π	pi	พาย
ρ	P	rho	โร
σ	Σ	sigma	ซิกมา
τ	T	tau	เทา
υ	Y	upsilon	อิปไซลอน
ϕ	Φ	phi	ฟาย, ฟี
χ	X	chi	ไค
ψ	Ψ	psi	ซาย
ω	Ω	omega	โอเมกา

ราชบัณฑิตยสถาน ศัพท์คณิตศาสตร์ ฉบับราชบัณฑิตยสถาน พิมพ์ครั้งที่ ๙ แก้ไขเพิ่มเติม กรุงเทพ : ราชบัณฑิตยสถาน, ๒๕๔๙.

หนังสือเรียน

รายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ฟิสิกส์

ชั้น

มัธยมศึกษาปีที่ ๕ เล่ม ๔

ตามผลการเรียนรู้
กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐)
ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช ๒๕๕๑

จัดทำโดย
สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กระทรวงศึกษาธิการ

จัดทำเป็นฉบับ e-book ครั้งที่ ๑ พ.ศ. ๒๕๖๓

มีลิขสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติ

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) ได้จัดทำหนังสือเรียนฉบับ e-book นี้ขึ้น โดยมีเนื้อหาเช่นเดียวกันกับหนังสือเรียน สสวท. ฉบับสื่อสิ่งพิมพ์ที่ได้จัดทำตามมาตรฐานหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช ๒๕๕๑ (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐) ทุกประการ เพื่ออำนวยความสะดวกในการเข้าถึงหนังสือเรียน สสวท. ผ่านเทคโนโลยีดิจิทัลเพื่อให้นักเรียน ครู ผู้ปกครอง นักวิชาการ และ ผู้สนใจทั่วไปเข้าถึงได้ง่ายและสะดวกรวดเร็ว รวมทั้งสามารถเลือกใช้ตามความเหมาะสมกับจุดประสงค์ต่าง ๆ

ทั้งนี้ สสวท. ขอสงวนสิทธิ์ในหนังสือเรียน ฉบับ e-book นี้ตามกฎหมายลิขสิทธิ์ ห้ามผู้ใดทำซ้ำ คัดลอก ดัดแปลง เลียนแบบ จำหน่าย หรือ เผยแพร่โดยมิได้รับอนุญาต

คำชี้แจง

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) ได้จัดทำตัวชี้วัดและสาระการเรียนรู้แกนกลาง กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐) ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช ๒๕๕๑ โดยมีจุดเน้นเพื่อพัฒนาผู้เรียนให้มีความรู้ความสามารถที่ทัดเทียมกับนานาชาติ ได้เรียนรู้วิทยาศาสตร์ที่เชื่อมโยงความรู้กับกระบวนการ ใช้กระบวนการสืบเสาะหาความรู้และแก้ปัญหาที่หลากหลาย มีการทำกิจกรรมด้วยการลงมือปฏิบัติเพื่อให้ผู้เรียนได้ใช้ทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์และทักษะแห่งศตวรรษที่ ๒๑ ซึ่งในปีการศึกษา ๒๕๖๑ เป็นต้นไป โรงเรียนจะต้องใช้หลักสูตรกลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐) สสวท. จึงได้จัดทำหนังสือเรียนที่เป็นไปตามมาตรฐานหลักสูตรเพื่อให้โรงเรียนได้ใช้สำหรับจัดการเรียนการสอนในชั้นเรียน

หนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์ ฟิสิกส์ ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ ๕ เล่ม ๔ นี้ มีผลการเรียนรู้และสาระการเรียนรู้เพิ่มเติมที่ครอบคลุมเนื้อหาบางส่วนที่ปรากฏตามตัวชี้วัดรายวิชาพื้นฐานวิทยาศาสตร์ วิทยาศาสตร์กายภาพ เล่ม ๒ โดยเมื่อผู้เรียนเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์ ฟิสิกส์ เล่ม ๑ - เล่ม ๖ ครบทุกชั้นปีในชั้นมัธยมศึกษาปีที่ ๔ – ๖ แล้วก็สามารถบรรลุผลสัมฤทธิ์ตามตัวชี้วัดของรายวิชาพื้นฐานวิทยาศาสตร์ วิทยาศาสตร์กายภาพ เล่ม ๒ ได้ และในขณะเดียวกันก็สามารถต่อยอดเนื้อหาจากรายวิชาพื้นฐานไปสู่เนื้อหาในรายวิชาเพิ่มเติมได้โดยไม่ต้องเสียเวลาเรียนซ้ำซ้อน ทั้งนี้หนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์ ฟิสิกส์ เล่ม ๔ นี้ มีเนื้อหาที่จำเป็นที่ต้องเรียนประกอบด้วยเรื่องเสียง ไฟฟ้าสถิต และไฟฟ้ากระแส ซึ่งเป็นพื้นฐานที่สำคัญสำหรับการศึกษาต่อในระดับอุดมศึกษาในด้านวิทยาศาสตร์ หรือประกอบอาชีพในสาขาที่ใช้วิทยาศาสตร์เป็นฐาน เช่น แพทย์ ทันตแพทย์ สัตวแพทย์ เทคโนโลยีชีวภาพ เทคนิคการแพทย์ วิศวกรรม สถาปัตยกรรม วัสดุศาสตร์ อุตุนิยมวิทยา ธรณีวิทยา ฯลฯ โดยเน้นกระบวนการคิดวิเคราะห์และการแก้ปัญหา เชื่อมโยงความรู้สู่การนำไปใช้ในชีวิตจริง ผู้เรียนจะได้ทำกิจกรรมที่เป็นพื้นฐานที่สำคัญ รวมทั้งกิจกรรมที่ผู้เรียนสามารถคิดค้นและออกแบบการทดลองด้วยตนเอง มีแบบฝึกหัดเพื่อให้ตรวจทานความรู้หลังจากที่เรียนไปแล้ว รวมทั้งสรุปความรู้ในแต่ละบทด้วย ในการจัดทำหนังสือเรียนเล่มนี้ ได้รับความร่วมมือเป็นอย่างดียิ่งจากผู้ทรงคุณวุฒิ นักวิชาการอิสระ คณาจารย์ทั้งหลาย รวมทั้งครูผู้สอน นักวิชาการ จากสถาบันและสถานศึกษาทั้งภาครัฐและเอกชน จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

สสวท. หวังเป็นอย่างยิ่งว่าหนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์ ฟิสิกส์ เล่ม ๔ นี้ จะเป็นประโยชน์แก่ผู้เรียนและผู้ที่เกี่ยวข้องทุกฝ่าย ที่จะช่วยให้การจัดการศึกษาด้านวิทยาศาสตร์มีประสิทธิภาพและประสิทธิผล หากมีข้อเสนอแนะใดที่จะทำให้หนังสือเรียนเล่มนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น โปรดแจ้ง สสวท. ทราบด้วย จะขอบคุณยิ่ง

(ศาสตราจารย์ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)
ผู้อำนวยการสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
กระทรวงศึกษาธิการ

คำอธิบายรายวิชาเพิ่มเติม

ฟิสิกส์ เล่ม ๔ **กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**

(ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐)

ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ ๕ **เวลา ๘๐ ชั่วโมง จำนวน ๒ หน่วยกิต**

ศึกษาการเกิดเสียง การเคลื่อนที่ของเสียง การสะท้อน การหักเห การแทรกสอด และการเลี้ยวเบนของคลื่นเสียง การได้ยินเสียง ความเข้มเสียง คุณภาพเสียง มลพิษทางเสียง คลื่นนิ่งของเสียง การสั่นพ้องของเสียง การเกิดบีต ปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ คลื่นกระแทกของเสียง ธรรมชาติของไฟฟ้าสถิต การเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิต กฎของคูลอมบ์ สนามไฟฟ้า ศักย์ไฟฟ้า ความต่างศักย์ ความจุและพลังงานสะสมในตัวเก็บประจุ การต่อตัวเก็บประจุ กระแสไฟฟ้าในลวดตัวนำ กฎของโอห์ม สภาพต้านทาน การต่อตัวต้านทาน อีเอ็มเอฟของแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง พลังงานไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า การต่อแบตเตอรี่ การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้ากระแสตรง การเปลี่ยนพลังงานทดแทนเป็นพลังงานไฟฟ้า และเทคโนโลยีด้านพลังงาน โดยใช้กระบวนการทางวิทยาศาสตร์ การสืบเสาะหาความรู้ การสืบค้นข้อมูล การสังเกต วิเคราะห์ เปรียบเทียบ อธิบาย อภิปราย และสรุป เพื่อให้เกิดความรู้ ความเข้าใจ มีความสามารถในการตัดสินใจ มีทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ รวมทั้งทักษะแห่งศตวรรษที่ ๒๑ ในด้านการใช้เทคโนโลยีสารสนเทศ ด้านการคิดและการแก้ปัญหา สามารถสื่อสารสิ่งที่เรียนรู้และนำความรู้ไปใช้ในชีวิตของตนเอง มีจิตวิทยาศาสตร์ จริยธรรม คุณธรรม และค่านิยมที่เหมาะสม

ผลการเรียนรู้

๑. อธิบายการเกิดเสียง การเคลื่อนที่ของเสียง ความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นการกระจัดของอนุภาคกับคลื่นความดัน ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของเสียงในอากาศที่ขึ้นกับอุณหภูมิในหน่วยองศาเซลเซียส การสะท้อน การหักเห การแทรกสอด การเลี้ยวเบน ของคลื่นเสียง รวมทั้งคำนวณปริมาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง

๒. อธิบายความเข้มเสียง ระดับเสียง องค์ประกอบของการได้ยิน คุณภาพเสียง และมลพิษทางเสียง รวมทั้งคำนวณปริมาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง

๓. ทดลอง และอธิบายการเกิดการสั่นพ้องของอากาศในท่อปลายเปิดหนึ่งด้าน รวมทั้งสังเกตและอธิบายการเกิดบีต คลื่นนิ่ง ปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ คลื่นกระแทกของเสียง คำนวณปริมาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง และนำความรู้เรื่องเสียงไปใช้ในชีวิตประจำวัน

๔. ทดลอง และอธิบายการทำวัตถุที่เป็นกลางทางไฟฟ้าให้มีประจุไฟฟ้าโดยการขัดสีกันและการเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิต

๕. อธิบาย และคำนวณแรงไฟฟ้าตามกฎของคูลอมบ์

๖. อธิบาย และคำนวณสนามไฟฟ้าและแรงไฟฟ้าที่กระทำกับอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าที่อยู่ในสนามไฟฟ้า รวมทั้งหาสนามไฟฟ้าลัพธ์เนื่องจากระบบจุดประจุโดยรวมกันแบบเวกเตอร์

๗. อธิบาย และคำนวณพลังงานศักย์ไฟฟ้า ศักย์ไฟฟ้า และ ความต่างศักย์ระหว่างสองตำแหน่งใด ๆ

๘. อธิบายส่วนประกอบของตัวเก็บประจุ ความสัมพันธ์ระหว่างประจุไฟฟ้า ความต่างศักย์ และความจุของตัวเก็บประจุ และอธิบายพลังงานสะสมในตัวเก็บประจุ และความจุสมมูล รวมทั้งคำนวณปริมาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง

๙. นำความรู้เรื่องไฟฟ้าสถิตไปอธิบายหลักการทำงานของเครื่องใช้ไฟฟ้าบางชนิด และปรากฏการณ์ในชีวิตประจำวัน

๑๐. อธิบายการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระและกระแสไฟฟ้าในลวดตัวนำ ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าในลวดตัวนำกับความเร็วลอยเลื่อนของอิเล็กตรอนอิสระ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในลวดตัวนำและพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำ และคำนวณปริมาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง

๑๑. ทดลอง และอธิบายกฎของโอห์ม อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับความยาว พื้นที่หน้าตัด และสภาพต้านทานของตัวนำโลหะที่อุณหภูมิคงตัว และคำนวณปริมาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง รวมทั้ง อธิบายและคำนวณความต้านทานสมมูลเมื่อนำตัวต้านทานมาต่อกันแบบอนุกรมและแบบขนาน

๑๒. ทดลอง อธิบาย และคำนวณอีเอ็มเอฟของแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง รวมทั้งอธิบายและคำนวณพลังงานไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า

๑๓. ทดลอง และคำนวณอีเอ็มเอฟสมมูลจากการต่อแบตเตอรี่แบบอนุกรมและแบบขนาน รวมทั้งคำนวณปริมาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในวงจรไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งประกอบด้วยแบตเตอรี่และตัวต้านทาน

๑๔. อธิบายการเปลี่ยนพลังงานทดแทนเป็นพลังงานไฟฟ้า รวมทั้งสืบค้นและอภิปรายเกี่ยวกับเทคโนโลยีที่นำมาแก้ปัญหาหรือตอบสนองความต้องการทางด้านพลังงาน โดยเน้นด้านประสิทธิภาพและความคุ้มค่าด้านค่าใช้จ่าย

รวมทั้งหมด ๑๔ ผลการเรียนรู้

ข้อแนะนำทั่วไปในการใช้หนังสือเรียน

หนังสือเรียนเป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อให้นักเรียนได้ใช้ในการศึกษาเนื้อหาที่สำคัญและเกิดทักษะที่จำเป็นที่สอดคล้องกับมาตรฐานและสาระการเรียนรู้ รวมทั้งยังมีสื่อที่ช่วยเสริมการเรียนรู้ของนักเรียน โดยสามารถเชื่อมต่อไปยังหน้าเว็บไซต์รายการสื่อได้จาก QR code หรือ URL ที่อยู่ประจำแต่ละบท การทำความเข้าใจเกี่ยวกับสัญลักษณ์หรือข้อความตามหัวข้อต่าง ๆ ที่ปรากฏในหนังสือเรียน จะช่วยให้นักเรียนใช้หนังสือเรียนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสัญลักษณ์หรือข้อความตามหัวข้อต่าง ๆ ที่ปรากฏในหนังสือเรียน มีดังนี้

- คำถามสำคัญ
- จุดประสงค์การเรียนรู้
- ความรู้ก่อนเรียน
- ข้อสังเกต
- ชวนคิด
- กิจกรรม
- คำถามท้ายกิจกรรม
- กิจกรรมลองทำดู
- ความรู้เพิ่มเติม
- รู้หรือไม่
- สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน
- แบบฝึกหัดท้ายหัวข้อ
- แบบฝึกหัดท้ายบท

คำถามสำคัญ

คำถามประจำบทที่นักเรียนต้องอาศัยความรู้ทั้งหมดในบทเรียนในการตอบคำถาม ซึ่งนักเรียนควรตอบได้หลังจากได้เรียนรู้ในบทนั้นแล้ว

จุดประสงค์การเรียนรู้

เป้าหมายของการจัดการเรียนรู้ที่ต้องการให้นักเรียนเกิดความรู้หรือทักษะหลังจากผ่านกิจกรรมการจัดการเรียนรู้ในแต่ละหัวข้อ ซึ่งนักเรียนควรศึกษาทำความเข้าใจก่อนเริ่มเรียนรู้ในแต่ละหัวข้อ

ความรู้ก่อนเรียน

คำสำคัญหรือข้อความสั้น ๆ ที่เกี่ยวกับความรู้ที่นักเรียนควรมีสำหรับเป็นพื้นฐานของการศึกษาความรู้ใหม่ในแต่ละบท

ข้อสังเกต

ความรู้ที่เกี่ยวข้องเพื่อให้นักเรียนเห็นแนวคิดสำคัญและความเชื่อมโยงของเนื้อหา

ชวนคิด

คำถามระหว่างเรียนที่เชื่อมโยงหรือต่อยอดความรู้เดิมที่ศึกษาแล้วกับความรู้ใหม่หรือความรู้ในศาสตร์อื่น เพื่อให้นักเรียนเห็นความสัมพันธ์หรือความต่อเนื่องของเนื้อหา

กิจกรรม

การปฏิบัติที่ช่วยในการเรียนรู้เนื้อหาหรือฝึกฝนให้เกิดทักษะตามจุดประสงค์การเรียนรู้ของบทเรียน โดยอาจเป็นการทดลอง การสืบค้นข้อมูล หรือกิจกรรมอื่น ๆ ซึ่งนักเรียนควรลงมือปฏิบัติกิจกรรมด้วยตนเอง

คำถามท้ายกิจกรรม

คำถามที่เกี่ยวข้องกับกิจกรรมนั้น ๆ ช่วยเป็นแนวทางในการวิเคราะห์ อภิปรายและสรุปผลการทำกิจกรรม

กิจกรรมลองทำดู

การปฏิบัติที่ช่วยเสริมความรู้ที่เกี่ยวข้องกับเนื้อหาในบทเรียน ซึ่งอาจเป็นกิจกรรมที่ลงมือปฏิบัติในห้องเรียนหรือนอกเวลาเรียนได้

ความรู้เพิ่มเติม

ความรู้ที่เพิ่มเติมจากเนื้อหาในบทเรียน เพื่อให้นักเรียนมีความรู้ความเข้าใจมากขึ้น โดยไม่มีการวัดและประเมินผล

รู้หรือไม่

ความรู้ที่เชื่อมโยงให้เห็นความสอดคล้องของเนื้อหาบทเรียนกับปรากฏการณ์หรือสถานการณ์ในชีวิตประจำวัน

สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน

การสรุปเนื้อหาสำคัญภายในบทเรียน เพื่อช่วยให้เห็นภาพรวมของเนื้อหาทั้งหมด

แบบฝึกหัดท้ายหัวข้อ

ประกอบด้วย 2 ส่วน ดังนี้

คำถามตรวจสอบความเข้าใจ

คำถามระหว่างเรียนที่ช่วยประเมินการเรียนรู้ ซึ่งนักเรียนสามารถใช้ตรวจสอบว่า ตนเองมีความรู้ความเข้าใจในเนื้อหาแล้วหรือยัง

แบบฝึกหัด

แบบฝึกหัดระหว่างเรียนที่ช่วยฝึกทักษะการคิด การคำนวณ และการแก้ปัญหาเบื้องต้น โดยใช้ความรู้ในหัวข้อนั้น ๆ ซึ่งนักเรียนสามารถใช้ตรวจสอบความเข้าใจของเนื้อหาและฝึกฝนตนเองให้มีทักษะที่จำเป็นตามจุดประสงค์การเรียนรู้ได้

แบบฝึกหัดท้ายบท

ประกอบด้วย 3 ส่วน ดังนี้

คำถาม

คำถามที่เน้นให้นักเรียนตอบโดยการเขียนบรรยายแสดงความเข้าใจจนถึงการวิเคราะห์

ปัญหา

ปัญหาที่มีความซับซ้อนน้อยจนถึงปานกลาง เน้นให้นักเรียนได้ใช้ทักษะการคำนวณและการแก้ปัญหา

ปัญหาท้าทาย

ปัญหาที่มีความซับซ้อนมาก เน้นให้นักเรียนได้ใช้ทักษะการคิดระดับสูงในการคำนวณและการแก้ปัญหา

สารบัญ | บทที่ 12-13

บทที่	เนื้อหา	หน้า
12	**เสียง**	
	12.1 ธรรมชาติของเสียง	3
	12.1.1 การเคลื่อนที่ของเสียง	4
	12.1.2 อัตราเร็วเสียง	9
	12.1.3 พฤติกรรมของเสียง	12
	12.2 การได้ยินเสียง	21
	12.2.1 ความเข้มเสียง	21
	12.2.2 ระดับเสียงและความถี่เสียงกับการเริ่มได้ยิน	23
	12.2.3 ระดับสูงต่ำของเสียงและคุณภาพเสียง	28
	12.2.4 มลพิษทางเสียงและการป้องกัน	31
	12.3 ปรากฏการณ์เกี่ยวกับเสียง	34
	12.3.1 คลื่นนิ่งของเสียง	35
	12.3.2 การสั่นพ้องของอากาศในท่อ	39
	12.3.3 บีต	47
	12.3.4 ปรากฏการณ์ดอปเพลอร์	51
	12.4 การประยุกต์ใช้ความรู้เรื่องเสียง	59
	สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน	65
	แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 12	67
13	**ไฟฟ้าสถิต**	
	13.1 ธรรมชาติของไฟฟ้าสถิต	78
	13.1.1 ประจุไฟฟ้าและกฎการอนุรักษ์ประจุไฟฟ้า	78
	13.1.2 การเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิต	84
	13.2 กฎของคูลอมบ์	92
	13.3 สนามไฟฟ้า	99
	13.3.1 ความหมายสนามไฟฟ้า	99
	13.3.2 สนามไฟฟ้าของจุดประจุ	100
	13.3.3 สนามไฟฟ้าของระบบประจุ	102

สารบัญ | บทที่ 13-14

บทที่	เนื้อหา	หน้า
	13.3.4 เส้นสนามไฟฟ้า	106
	13.3.5 แรงกระทำต่ออนุภาคที่มีประจุในสนามไฟฟ้า	111
	13.4 ศักย์ไฟฟ้าและความต่างศักย์	115
	13.4.1 ความต่างศักย์เนื่องจากสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ	117
	13.4.2 ศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากจุดประจุ	119
	13.5 ตัวเก็บประจุ	129
	13.5.1 หลักการทำงานของตัวเก็บประจุ	129
	13.5.2 ความจุของตัวเก็บประจุ	131
	13.5.3 พลังงานสะสมในตัวเก็บประจุ	135
	13.5.4 การต่อตัวเก็บประจุ	136
	13.6 การนำความรู้เกี่ยวกับไฟฟ้าสถิตไปใช้ประโยชน์	141
	13.6.1 เครื่องถ่ายเอกสารและเครื่องพิมพ์เลเซอร์	141
	13.6.2 การเคลือบสีฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต	142
	13.6.3 เครื่องฟอกอากาศ และเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต	143
	13.6.4 การอธิบายปรากฏการณ์ฟ้าผ่าและฟ้าแลบ	144
	13.6.5 การใช้สายรัดข้อมือของช่างอิเล็กทรอนิกส์	144
	13.6.6 การเติมน้ำมัน	145
	สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน	147
	แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 13	150
14	**ไฟฟ้ากระแส**	
	14.1 กระแสไฟฟ้า	170
	14.1.1 กระแสไฟฟ้าในตัวนำ	170
	14.1.2 กระแสไฟฟ้าในลวดตัวนำ	175

สารบัญ | บทที่ 14-ภาคผนวก

บทที่	เนื้อหา	หน้า
	14.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์	181
	14.2.1 กฎของโอห์มและความต้านทาน	181
	14.2.2 สภาพต้านทานไฟฟ้าและสภาพนำไฟฟ้า	186
	14.2.3 ตัวต้านทาน	188
	14.2.4 การต่อตัวต้านทาน	192
	14.3 พลังงานในวงจรไฟฟ้ากระแสตรง	201
	14.3.1 พลังงานไฟฟ้าและความต่างศักย์	202
	14.3.2 พลังงานไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของเครื่องใช้ไฟฟ้ากระแสตรง	210
	14.4 แบตเตอรี่และวงจรไฟฟ้ากระแสตรงเบื้องต้น	215
	14.4.1 การต่อแบตเตอรี่	215
	14.4.2 การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้ากระแสตรง	226
	14.5 พลังงานไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนและเทคโนโลยีด้านพลังงาน	234
	14.5.1 พลังงานทดแทน	235
	14.5.2 เทคโนโลยีด้านพลังงาน	242
	สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน	247
	แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 14	250
ภาคผนวก	**ภาคผนวก ก** คณิตศาสตร์สำหรับฟิสิกส์	268
	ภาคผนวก ข ระบบหน่วยระหว่างชาติ	278
	ภาคผนวก ค ตารางฟังก์ชันตรีโกณมิติ	281
	ภาคผนวก ง ตารางเลขกำลังสอง รากที่สองและส่วนกลับ	282
	ภาคผนวก จ ตัวอย่างการบันทึกการทดลอง	283
	ภาคผนวก ฉ ลอการิทึม	286

สารบัญ

ภาคผนวก

บทที่	เนื้อหา	หน้า
	คำศัพท์	289
	บรรณานุกรม	291
	ที่มาของรูป	292
	คณะกรรมการจัดทำหนังสือเรียน	294
	คำอธิบายรายวิชาเพิ่มเติม	297

บทที่ 12 เสียง

ipst.me/8891

เราคงเคยได้ยินเสียงจากเครื่องดนตรีในงานแสดงและกิจกรรมต่าง ๆ เช่น เสียงกีตาร์ เสียงกลองจากงานแสดงดนตรีหรืองานพิธี เสียงจากเครื่องดนตรีเหล่านี้เกิดขึ้นมาได้อย่างไร มีรูปแบบอย่างไรทำให้เสียงของเครื่องดนตรีมีความแตกต่างกัน แม้จะเล่นโน้ตตัวเดียวกัน และเสียงเครื่องดนตรีมีความแตกต่างหรือเหมือนกันกับเสียงจากการพูดคุยหรือการร้องเพลง เสียงจากเครื่องยนต์ นอกจากนั้นเสียงจากแหล่งกำเนิดต่าง ๆ มีพฤติกรรมอะไรบ้าง ส่งผลต่อผู้ฟังอย่างไร และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ได้อย่างไร เราจะศึกษาได้ในบทนี้

คำถามสำคัญ

- เสียงเดินทางมาถึงเราได้อย่างไร และแสดงพฤติกรรมอะไรบ้าง
- การได้ยินเสียงขึ้นกับปัจจัยอะไร ปรากฏการณ์ที่เกี่ยวกับเสียง มีอะไรบ้าง

จุดประสงค์การเรียนรู้

12.1 ธรรมชาติของเสียง

1. อธิบายการเกิดเสียงและการเคลื่อนที่ของเสียง
2. อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นการกระจัดของอนุภาคกับคลื่นความดันขณะคลื่นเสียงเคลื่อนที่ผ่าน
3. อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของเสียงในอากาศกับอุณหภูมิในหน่วยองศาเซลเซียส และคำนวณปริมาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง
4. สังเกตและอธิบายการสะท้อน การหักเห การเลี้ยวเบน และการแทรกสอดของเสียง

12.2 การได้ยินเสียง

5. อธิบายและคำนวณปริมาณที่เกี่ยวข้องกับความเข้มเสียง
6. อธิบายระดับเสียง ความสัมพันธ์ระหว่างระดับเสียงกับความเข้มเสียง และคำนวณปริมาณที่เกี่ยวข้อง
7. อธิบายระดับเสียงและความถี่ที่มีผลต่อการได้ยิน
8. อธิบายระดับสูงต่ำของเสียงและคุณภาพเสียง
9. อธิบายมลพิษทางเสียงที่มีต่อสุขภาพและการป้องกัน

12.3 ปรากฏการณ์เกี่ยวกับเสียง

10. ทดลองและอธิบายการเกิดคลื่นนิ่งของเสียง
11. อธิบายและคำนวณปริมาณที่เกี่ยวข้องกับการเกิดการสั่นพ้องของอากาศในท่อปลายปิดหนึ่งด้าน
12. ทดลองการสั่นพ้องของอากาศในท่อปลายปิดหนึ่งด้านและการวัดความยาวคลื่นของเสียงในอากาศ
13. ทดลองและอธิบายการเกิดบีต

14. อธิบายปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ และคลื่นกระแทกของเสียง

12.4 การประยุกต์ใช้ความรู้เรื่องเสียง

15. นำความรู้เรื่องเสียงไปใช้ประโยชน์ในชีวิตประจำวัน

ความรู้ก่อนเรียน

การสั่น คลื่น การกระจัด ความดัน แอมพลิจูด ความยาวคลื่น ความถี่ อัตราเร็ว พฤติกรรมคลื่น กำลัง คลื่นนิ่ง การสั่นพ้อง

ในชีวิตประจำวัน เราเกี่ยวข้องกับเสียงในหลายลักษณะ เสียงทำให้เกิดภาษาพูด ช่วยถ่ายทอดความรู้ ประสบการณ์ ความคิด และอารมณ์สู่ผู้ฟัง เสียงจึงมีอิทธิพลอย่างมากต่อมนุษย์ แต่มนุษย์สามารถรับรู้เสียงในขอบเขตจำกัด สิ่งมีชีวิตอื่น ๆ ก็มีการรับรู้เสียงที่แตกต่างกันไป เสียงยังมีพฤติกรรมเหมือนคลื่นอื่น ๆ และทำให้เกิดปรากฏการณ์ทางเสียงที่นำไปใช้ประโยชน์ในชีวิตประจำวัน ซึ่งเราจะศึกษาได้ในบทนี้

12.1 ธรรมชาติของเสียง

คลื่นเสียง (sound wave) เป็นคลื่นกลชนิดหนึ่ง ซึ่งต้องอาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่ คลื่นเสียงเกิดจากการสั่นของวัตถุ และเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง เมื่อคลื่นเสียงเคลื่อนที่ไปก็จะเกิดการถ่ายโอนพลังงานจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งเช่นเดียวกับคลื่นทุกชนิด

ชวนคิด

การสั่นทุกชนิดทำให้เกิดเสียงที่มนุษย์ได้ยินหรือไม่

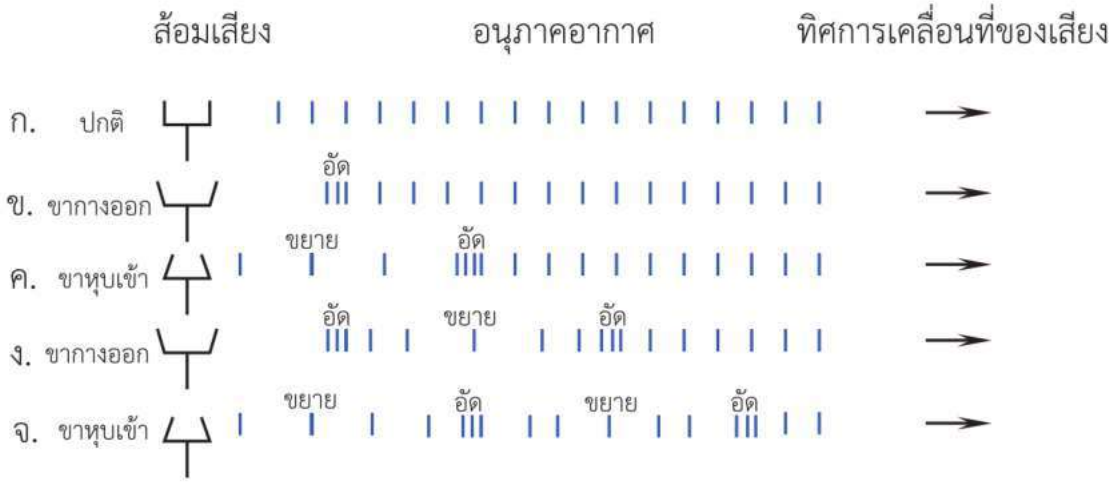
เสียงเกิดจากการสั่นของวัตถุ แต่การสั่นของวัตถุทุกชนิดไม่จำเป็นต้องทำให้เกิดเสียง เนื่องจากเมื่อเราพูดถึง "เสียง" เรามักเชื่อมโยงกับการได้ยินของมนุษย์ ซึ่งการได้ยินเสียงของมนุษย์ขึ้นกับปัจจัยหลายด้านซึ่งจะได้ศึกษาต่อไป เช่น ความถี่ของคลื่นที่เกิดขึ้น แอมพลิจูดของคลื่น เป็นต้น วัตถุที่สั่นและมีการถ่ายโอนพลังงานไปยังตัวกลางที่ทำให้หูของมนุษย์ตอบสนองต่อการสั่นดังกล่าวได้ เราก็จะเรียกคลื่นที่เกิดจากการสั่นนั้นว่า **เสียง** (sound) อย่างไรก็ตาม นักฟิสิกส์ได้จำแนกชนิดของคลื่นเสียงตามความถี่ของคลื่นและความสามารถในการได้ยินของมนุษย์ ดังนี้

1. **คลื่นที่ได้ยิน** หรือ **เสียง** (audible waves หรือ sounds) เป็นคลื่นเสียงที่มีความถี่ที่อยู่ในช่วงที่มนุษย์ได้ยินคืออยู่ในช่วง $20 - 20\,000$ เฮิรตซ์ โดยทั่วไปเมื่อเราพูดถึงเสียง เราจึงหมายถึงคลื่นเสียงในช่วงความถี่นี้
2. **คลื่นใต้เสียง** (infrasonic waves หรือ infrasounds) เป็นคลื่นเสียงที่มีความถี่ต่ำกว่าช่วงความถี่ที่มนุษย์ได้ยิน คือ ต่ำกว่า 20 เฮิรตซ์ เช่น คลื่นเสียงความถี่ต่ำที่ช้างใช้ในการสื่อสารระหว่างกัน แต่มนุษย์ไม่สามารถได้ยินคลื่นเสียงนั้น
3. **คลื่นเหนือเสียง** (ultrasonic waves หรือ ultrasounds) เป็นคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงกว่าช่วงความถี่ที่มนุษย์ได้ยิน คือ สูงกว่า $20\,000$ เฮิรตซ์ เช่น สุนัขสามารถตอบสนองต่อเสียง (หรือได้ยิน) นกหวีดความถี่สูง ในขณะที่มนุษย์ไม่สามารถได้ยินเสียงนกหวีดดังกล่าว

12.1.1 การเคลื่อนที่ของเสียง

เสียงเกิดจากการสั่นของแหล่งกำเนิดเสียง และถ่ายโอนพลังงานการสั่นไปยังอนุภาคของตัวกลางที่อยู่ติดกับแหล่งกำเนิดเสียง ทำให้อนุภาคของตัวกลางสั่นและเกิดการถ่ายโอนพลังงานต่อไปยังอนุภาคที่อยู่ถัดกันไปเรื่อย ๆ จนถึงหูผู้ฟัง หากไม่มีตัวกลางเพื่อถ่ายโอนพลังงานจากแหล่งกำเนิดเสียง เราจะไม่สามารถได้ยินเสียงได้ ขณะเกิดคลื่นเสียง อนุภาคของตัวกลางมีการเคลื่อนที่อย่างไร และเคลื่อนที่ไปกับคลื่นหรือไม่

พิจารณาการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงที่เกิดจากการเคาะส้อมเสียงด้วยค้อนยาง ขาส้อมเสียงจะสั่นกางออกและหุบเข้า ทำให้ความหนาแน่นของอากาศบริเวณรอบส้อมเสียงเปลี่ยนไป กล่าวคือ ขณะที่ขาส้อมเสียงกางออก อนุภาคของอากาศที่อยู่ด้านที่คลื่นเสียงผ่านไป จะอยู่ชิดกันมากขึ้น ความดันอากาศจึงสูงกว่าปกติ เรียกว่า **ส่วนอัด** (compression) เมื่อขาส้อมเสียงหุบเข้า อนุภาคของอากาศด้านนั้น จะอยู่ห่างกันมาก ความดันอากาศจึงต่ำกว่าปกติ เรียกว่า **ส่วนขยาย** (rarefaction) ทำให้อากาศถูกอัดและขยายอย่างต่อเนื่อง ตามการสั่นของส้อมเสียง เกิดเป็นคลื่นเสียงเคลื่อนที่แผ่ออกไป ดังรูป 12.1 ก. ถึง จ.



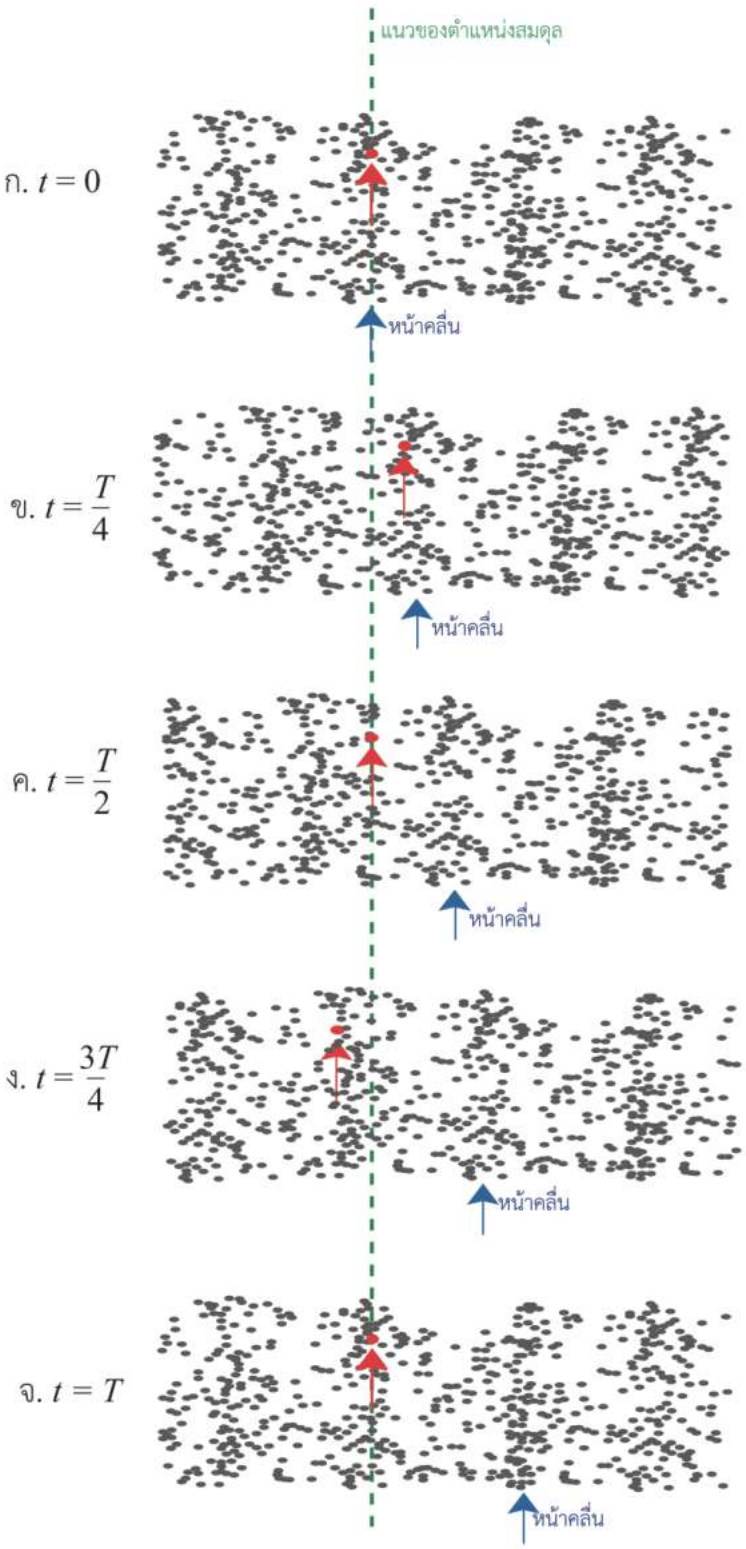
รูป 12.1 อากาศบริเวณรอบส้อมเสียงถูกอัดและขยาย ตามการสั่นของส้อมเสียง

ความรู้เพิ่มเติม

ส้อมเสียง (tuning fork) เป็นแท่งโลหะรูปตัวยู (U) มีลักษณะคล้ายส้อม เมื่อเคาะขาส้อมเสียงจะทำให้เกิดคลื่นเสียงความถี่ค่าหนึ่ง ๆ ค่านี้เป็นความถี่ธรรมชาติของส้อมเสียงนั้น โดยปกติส้อมเสียงแต่ละอันจะมีตัวเลขบอกความถี่เสียงระบุไว้เป็นเฮิรตซ์ (Hz) อุปกรณ์ชนิดนี้ถูกใช้ในการเทียบความถี่เสียงของเครื่องดนตรี

รูป ส้อมเสียง

เมื่อส้อมเสียงสั่น จะเกิดการถ่ายโอนพลังงานไปยังอนุภาคของอากาศที่อยู่ข้างเคียง เกิดการชนกันระหว่างอนุภาคที่อยู่ติดกัน ทำให้อนุภาคเหล่านั้นเคลื่อนที่กลับไปกลับมารอบตำแหน่งสมดุลในลักษณะเดียวกับการสั่นของแหล่งกำเนิด ซึ่งจุดสีแดงแทนอนุภาคของอากาศที่กำลังพิจารณาในช่วงเวลา 0 ถึง 1 คาบ (T) ดังรูป 12.2 ก.-จ. จะเห็นว่าที่เวลา t=0 (รูป 12.2 ก.) จุดสีแดงอยู่ที่ตำแหน่งสมดุล ที่เวลา $t=\frac{T}{4}$ (รูป 12.2 ข.) จุดสีแดงมีการกระจัดในทิศทางหนึ่ง ที่เวลา $t=\frac{T}{2}$ (รูป 12.2 ค.) จุดสีแดงกลับมาอยู่ที่ตำแหน่งสมดุล ที่เวลา $t=\frac{3}{4}T$ (รูป 12.2 ง.) จุดสีแดงมีการกระจัดในทิศทางตรงข้าม และที่เวลา t=T (รูป 12.2 จ.) จุดสีแดงกลับมาอยู่ที่ตำแหน่งสมดุลอีกครั้ง นั่นคือ อนุภาคของอากาศจะเคลื่อนที่กลับไปกลับมาในแนวเดียวกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียง โดยไม่เคลื่อนที่ไปพร้อมกับคลื่นเสียง ดังนั้น **เสียงจึงเป็นคลื่นตามยาว**

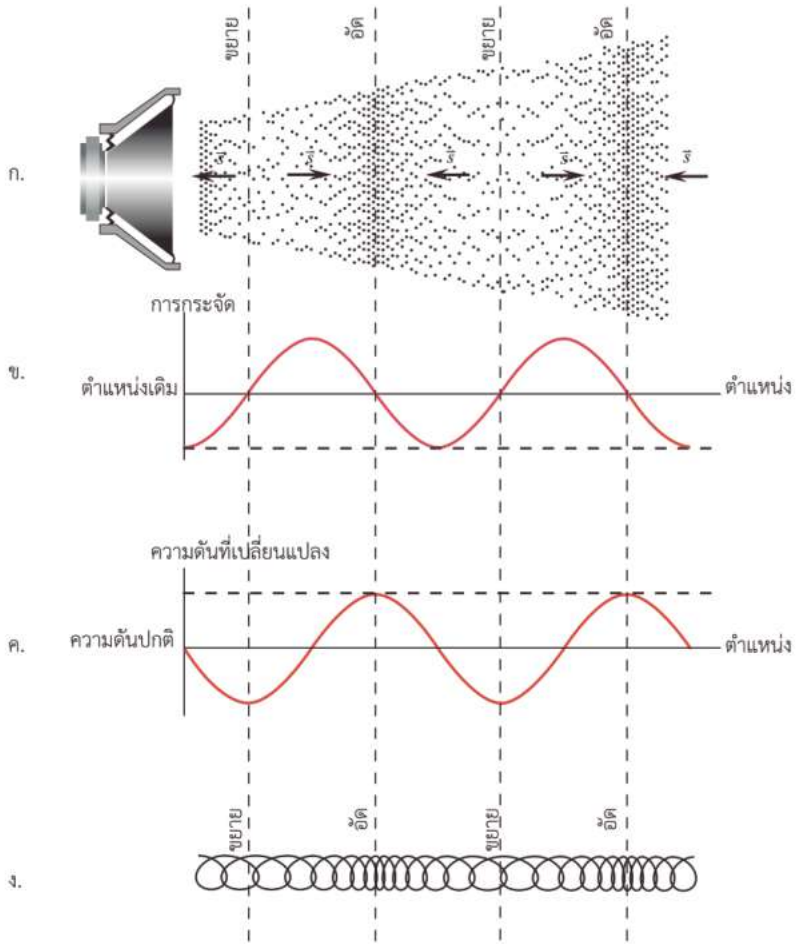


รูป 12.2 การเคลื่อนที่ของเสียงและการสั่นของอนุภาคของอากาศ

ชวนคิด

หลายคนคงเคยเห็นการสร้างคลื่นมนุษย์ในเทศกาลสงกรานต์ที่ถนนข้าวเหนียว ในจังหวัดขอนแก่น ประชาชนร่วมกันลุกขึ้นยืน-นั่ง-ยืนอย่างต่อเนื่องเป็นทางยาว ทำให้เกิดรูปคลื่นตามขวาง เป็นไปได้หรือไม่ที่จะสร้างคลื่นมนุษย์ที่เป็นคลื่นตามยาวเหมือนคลื่นเสียง

พิจารณารูป 12.3 ก. ซึ่งแสดงการกระจายตัวของอนุภาคของอากาศที่ตำแหน่งต่าง ๆ เมื่อคลื่นเสียงเคลื่อนที่ผ่านไป ณ เวลาหนึ่ง เมื่อพิจารณาการกระจัดของอนุภาคอากาศที่ตำแหน่งต่าง ๆ จะเห็นว่า อนุภาคของอากาศไม่มีการกระจัด ณ ตำแหน่งที่อากาศถูกอัดหรือขยายมากที่สุด และอนุภาคของอากาศจะเคลื่อนที่จากตำแหน่งสมดุลมากที่สุดหรือมีการกระจัดสูงสุด ณ ตำแหน่งซึ่งอยู่กึ่งกลางระหว่างส่วนที่อากาศถูกอัดและขยายมากที่สุด เมื่อเขียนกราฟระหว่างการกระจัดของอนุภาคอากาศกับตำแหน่งตามแนวที่คลื่นเสียงเคลื่อนที่ ดังรูป 12.3 ข.



รูป 12.3 การกระจายตัวของอนุภาคอากาศที่ตำแหน่งต่าง ๆ เมื่อคลื่นเสียงเคลื่อนที่ผ่านไป ณ เวลาหนึ่งเปรียบเทียบกับคลื่นตามยาวในสปริง

เมื่อพิจารณาความดันอากาศที่เปลี่ยนไปตำแหน่งต่าง ๆ ดังรูป 12.3 ค. พบว่า เมื่ออนุภาคอากาศอยู่ห่างกันเป็นระยะเท่ากับตอนไม่มีคลื่นเสียง ความดันอากาศในบริเวณนั้นเท่ากับความดันบรรยากาศ หรือความดันที่เปลี่ยนไปเท่ากับศูนย์ แต่ในขณะที่คลื่นเสียงเคลื่อนที่ผ่านอนุภาคของอากาศ ระยะห่างระหว่างอนุภาคจะเปลี่ยนไป ความดันอากาศในบริเวณนั้นไม่เท่ากับความดันบรรยากาศ หรือ ความดันที่เปลี่ยนไปไม่เท่ากับศูนย์ โดยความดันอากาศที่เปลี่ยนไปมีค่าเป็นบวกในบริเวณที่อนุภาคอยู่ชิดกัน เนื่องจากมีความดันมากกว่าความดันบรรยากาศ และความดันอากาศที่เปลี่ยนไปมีค่าเป็นลบในบริเวณที่อนุภาคอยู่ห่างกัน เนื่องจากมีความดันน้อยกว่าความดันบรรยากาศ

ความดันที่เปลี่ยนไปของตัวกลางนี้เปลี่ยนแปลงไปตามจังหวะหรือความถี่การสั่นของแหล่งกำเนิดเสียง คลื่นเสียงที่เกิดขึ้นจึงมีความถี่เดียวกันกับความถี่การสั่นของแหล่งกำเนิดเสียงนั่นเอง

กราฟระหว่างความดันอากาศที่เปลี่ยนไปกับตำแหน่ง ดังรูป 12.3 ค. มีลักษณะเป็น**คลื่นรูปไซน์** (sinusoidal wave) เช่นเดียวกับกราฟระหว่างการกระจัดของอนุภาคอากาศกับตำแหน่ง ดังรูป 12.3 ข. แต่มีเฟสต่างกัน 90 องศา โดยความดันอากาศที่เปลี่ยนไปมีค่าสูงสุดเมื่อการกระจัดของอนุภาคของอากาศมีค่าเป็นศูนย์ และความดันอากาศที่เปลี่ยนไปมีค่าเป็นศูนย์เมื่อการกระจัดของอนุภาคของอากาศมีค่าสูงสุด

ด้วยเหตุที่ขณะคลื่นเสียงเคลื่อนที่ การกระจัดของอนุภาคอากาศและความดันอากาศที่เปลี่ยนแปลงไป เทียบกับตำแหน่ง เป็นคลื่นรูปไซน์ บางครั้งเรียกการเปลี่ยนแปลงการกระจัดว่า คลื่นการกระจัด และเรียกการเปลี่ยนแปลงความดันอากาศว่า คลื่นความดัน

การเคลื่อนที่ของเสียงในตัวกลาง อาจเปรียบเทียบกับการเคลื่อนที่ของอนุภาคของขดลวดสปริงที่ถูกดึงและดันตามแนวสปริง ดังรูป 12.3 ง.

ชวนคิด

ขณะที่เสียงเคลื่อนที่ผ่านอากาศ ความหนาแน่นของอากาศเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร แสดงในรูปกราฟระหว่างความหนาแน่นกับตำแหน่ง

เราทราบแล้วว่า คลื่นน้ำซึ่งเป็นคลื่นกลชนิดหนึ่งมีอัตราเร็วต่างกันเมื่อเคลื่อนที่ในตัวกลางที่มีสมบัติต่างกัน เสียงซึ่งก็เป็นคลื่นกลอีกชนิดหนึ่งจะมีอัตราเร็วที่ต่างกันในตัวกลางที่มีสมบัติต่างกันหรือไม่ จะได้ศึกษาในหัวข้อต่อไป

12.1.2 อัตราเร็วเสียง

เนื่องจากเสียงเป็นคลื่นชนิดหนึ่ง อัตราเร็วเสียงจึงสัมพันธ์กับความยาวคลื่น λ และความถี่ของคลื่นเสียง f เช่นเดียวกับคลื่นต่อเนื่อง ดังสมการ

$$v = f\lambda$$

นอกจากนี้อัตราเร็วเสียง ยังขึ้นอยู่กับสมบัติของตัวกลางนั้น ๆ ได้แก่ ความยืดหยุ่นและความหนาแน่นของตัวกลาง หรือกล่าวได้ว่า อัตราเร็วเสียงในตัวกลางแต่ละชนิดมีค่าไม่เท่ากัน โดยทั่วไป อัตราเร็วเสียงในตัวกลางที่เป็นของแข็งมีค่ามากกว่าในของเหลว และอัตราเร็วเสียงในของเหลวมากกว่าในแก๊ส เนื่องจากอนุภาคในของแข็งอยู่ชิดกันมากกว่าในของเหลวและแก๊ส การถ่ายโอนพลังงานระหว่างอนุภาคจึงเกิดได้เร็วกว่า ดังตาราง 12.1

ตาราง 12.1 อัตราเร็วเสียงในตัวกลางชนิดต่าง ๆ

	ตัวกลาง	อัตราเร็วเสียง (เมตรต่อวินาที)
แก๊ส	อากาศ (0°C)	331
	อากาศ (20°C)	343
	คาร์บอนไดออกไซด์ (0°C)	259
	ออกซิเจน (0°C)	316
	ฮีเลียม (0°C)	965
ของเหลว	คลอโรฟอร์ม (20°C)	1004
	เอทิลแอลกอฮอล์ (20°C)	1162
	ปรอท (20°C)	1450
	น้ำกลั่น (20°C)	1482
	น้ำทะเล (20°C)	1552
ของแข็ง	อะลูมิเนียม (20°C)	6420
	เหล็ก (20°C)	5941
	แกรนิต (20°C)	6000

ชวนคิด

1. คลื่นเสียงที่เดินทางได้ระยะทางเท่ากับสามเท่าของความยาวคลื่น ใช้เวลาเป็นกี่เท่าของคาบ
2. คลื่นที่ได้ยินมีความถี่ระหว่าง 20 เฮิรตซ์ ถึง 20000 เฮิรตซ์ ช่วงความยาวคลื่นของคลื่นที่ได้ยิน ในอากาศอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส มีค่าประมาณเท่าใด
3. เมื่อเคาะส้อมเสียงอันหนึ่งในอากาศ เกิดคลื่นเสียงที่มีความถี่ 225 เฮิรตซ์ ถ้าเคาะส้อมเสียงนั้นในแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ความถี่ของคลื่นเสียงที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนไปหรือไม่
4. อัตราเร็วของคลื่นดลของคลื่นเสียงสามารถหาได้อย่างไร

เนื่องจากทั้งสมบัติความยืดหยุ่นและความหนาแน่นของตัวกลางต่างก็ขึ้นกับอุณหภูมิ ดังนั้น อัตราเร็วเสียงในตัวกลางแต่ละชนิดจึงขึ้นกับอุณหภูมิเช่นกัน เมื่อพิจารณาคลื่นเสียงในอากาศพบว่า อัตราเร็วเสียงในอากาศมีค่าขึ้นกับอุณหภูมิ (ในหน่วยองศาเซลเซียส) ดังสมการ (12.1)

$$v = 331 + 0.6T_C \qquad (12.1)$$

เมื่อ v เป็นอัตราเร็วเสียงในอากาศที่มีอุณหภูมิ T_C มีหน่วยเมตรต่อวินาที
และ T_C เป็นอุณหภูมิของอากาศ มีหน่วยองศาเซลเซียส

ข้อสังเกต

จาก $v = 331 + 0.6T_C$ ตัวเลข 331 และ 0.6 เป็นค่าคงตัวที่มีหน่วย คือ 331 มีหน่วยเมตรต่อวินาที ($331\,\text{m/s}$) ซึ่งเป็นอัตราเร็วเสียงในอากาศที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส และ 0.6 มีหน่วยเมตรต่อวินาทีต่อองศาเซลเซียส ($0.6\,\text{m/s}^{\circ}\text{C}$) ซึ่งเป็นอัตราเร็วเสียงในอากาศที่เปลี่ยนไปทุก 1 องศาเซลเซียส แต่เพื่อความกระชับในการเขียนสมการ จึงละที่จะระบุหน่วย สมการนี้ใช้ได้ในกรณีที่อุณหภูมิอากาศอยู่ในช่วง -50 องศาเซลเซียส ถึง 50 องศาเซลเซียส หากอุณหภูมิอยู่นอกช่วงนี้จะทำให้ค่าที่คำนวณได้มีความคลาดเคลื่อนมากขึ้นอีก

ตัวอย่าง 12.1 อัตราเร็วเสียงในอากาศในห้องที่มีอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มีค่าเท่าใด

แนวคิด แทนค่าอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ในสมการ (12.1)

วิธีทำ จาก
$$v = 331 + 0.6T_C$$
$$= (331\ \text{m/s}) + (0.60\ \text{m/s}\ ^\circ\text{C})(25^\circ\text{C})$$
$$= 346\ \text{m/s}$$

ตอบ อัตราเร็วเสียงในอากาศในห้องที่มีอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มีค่า 346 เมตรต่อวินาที

ตัวอย่าง 12.2 จงหาความยาวคลื่นเสียงในตัวอย่าง 12.1 หากความถี่เสียงมีค่าเท่ากับ 256 เฮิรตซ์

แนวคิด ใช้สมการ $v = f\lambda$ เพื่อหาความยาวคลื่นเสียง

วิธีทำ จาก
$$v = f\lambda$$
จะได้
$$\lambda = \frac{v}{f}$$
$$= \frac{346\ \text{m/s}}{256\ \text{Hz}}$$
$$= 1.35\ \text{m}$$

ตอบ ความยาวคลื่นของเสียงที่มีอัตราเร็ว 346 เมตรต่อวินาที และมีความถี่ 256 เฮิรตซ์ มีค่าเท่ากับ 1.35 เมตร

ข้อสังเกต

อัตราเร็วเสียงในอากาศขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอากาศ เพื่อความสะดวกในบทนี้ จะใช้อัตราเร็วเสียงในอากาศที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่า 346 เมตรต่อนาที เว้นแต่จะมีการกำหนดเป็นค่าอื่น

ชวนคิด

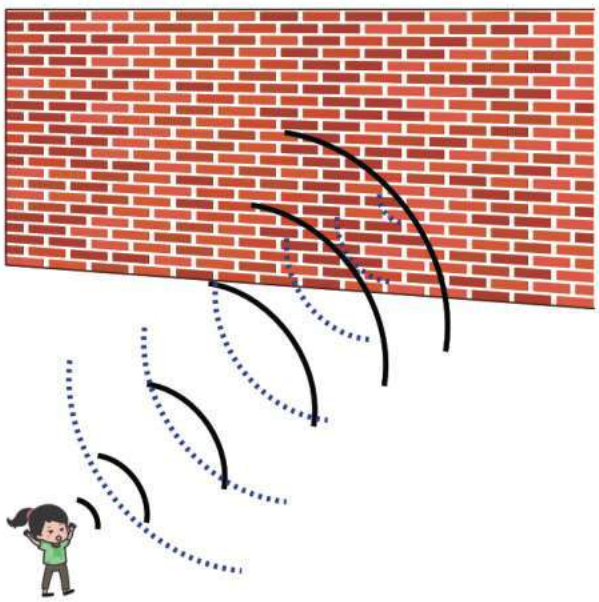
เมื่ออุณหภูมิในตัวกลางเปลี่ยน การเปลี่ยนแปลงของอัตราเร็วเสียงในตัวกลางทำให้เกิดการเปลี่ยนความยาวคลื่นหรือความถี่ อย่างไร

12.1.3 พฤติกรรมของเสียง

เสียงเป็นคลื่นชนิดหนึ่งจึงมีการสะท้อน การหักเห การเลี้ยวเบน และการแทรกสอด เช่นเดียวกับคลื่นทุกชนิด เราสามารถศึกษาพฤติกรรมของเสียงได้จากปรากฏการณ์ต่อไปนี้

การสะท้อนของเสียง

บางคนอาจเคยส่งเสียงตะโกนออกไปแล้วได้ยินเสียงที่ตัวเองตะโกนออกไปกลับเข้ามาที่หูอีกครั้งหนึ่ง เสียงที่ได้ยินครั้งหลังนี้เกิดจากการสะท้อนของเสียงที่ส่งออกไปครั้งแรกกับพื้นผิวขนาดใหญ่ เช่น ผนังตึก หรือหน้าผา โดยทั่วไปเสียงที่ส่งผ่านไปยังสมองจะยังคงค้างอยู่นาน 0.1 วินาที ถ้าเสียงที่เปล่งออกไปนั้นเกิดการสะท้อนกลับมาให้ได้ยินในช่วงเวลาที่มากกว่า 0.1 วินาที เราจะสามารถแยกเสียงสะท้อนกับเสียงที่เปล่งออกไปได้ เรียกเสียงสะท้อนในกรณีนี้ว่า **เสียงสะท้อนกลับ** (echo) ดังรูป 12.4 แต่ถ้าเราส่งเสียงในห้องที่แคบ เช่น ในห้องน้ำ เสียงสะท้อนที่เกิดขึ้นจะกลับเข้ามาที่หูในช่วงเวลาที่สั้นกว่า 0.1 วินาที ซึ่งเราไม่สามารถแยกเสียงที่เปล่งออกไปกับเสียงที่สะท้อนกลับมาออกจากกันได้ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า **การกังวาน** (reverberation)



รูป 12.4 การเกิดเสียงสะท้อนกลับจากผนังตึก

ชวนคิด

ขนาดของห้องที่ทำให้ไม่ได้ยินเสียงสะท้อนกลับ ควรมีขนาดความกว้างหรือความยาวอย่างมากประมาณเท่าใด และขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นใดได้บ้าง

การสะท้อนของเสียงขึ้นอยู่กับลักษณะผิวที่สะท้อน โดยพื้นผิวแข็งจะสะท้อนเสียงได้ดีกว่าผิวอ่อนนุ่ม เนื่องจากเสียงเป็นคลื่น การสะท้อนของคลื่นเสียงจะเกิดได้ดีเมื่อความยาวคลื่นมีค่าเท่ากับหรือน้อยกว่าขนาดวัตถุที่คลื่นตกกระทบ เช่น ค้างคาวส่งคลื่นเหนือเสียงซึ่งมีความถี่สูงหรือมีความยาวคลื่นสั้นไปกระทบเหยื่อที่มีขนาดเล็ก แต่ใหญ่กว่าความยาวคลื่นที่ค้างคาวส่งไป ทำให้ค้างคาวรู้ตำแหน่งของเหยื่อได้

ตัวอย่าง 12.3 ชายคนหนึ่งอยู่ในบริเวณหุบเขา เขาตะโกนเข้าหาหน้าผาและได้ยินเสียงที่ตะโกนอีกครั้งในเวลา 1.4 วินาที เขาอยู่ห่างจากหน้าผาเป็นระยะทางเท่าใด กำหนดให้อัตราเร็วเสียงในอากาศขณะนั้นมีค่า 340 เมตรต่อวินาที

แนวคิด เนื่องจากเขาได้ยินเสียงตนเองสะท้อนกลับใช้เวลา 1.4 วินาที นั่นคือ เสียงเดินทางไปตกกระทบหน้าผาแล้วสะท้อนกลับมาถึงหูของเขา คิดเป็นระยะทางเท่ากับสองเท่าของระยะห่างระหว่างชายคนนั้นกับหน้าผา

วิธีทำ ให้ชายคนนั้นอยู่ห่างจากหน้าผาเป็นระยะทาง d จะได้ว่า $2d = vt$

แทนค่า $v = 340\ \text{m/s}$ และ $t = 1.4\ \text{s}$ จะได้

$$d = \frac{vt}{2}$$

$$= \frac{(340\ \text{m/s})(1.4\ \text{s})}{2}$$

$$= 238\ \text{m}$$

ตอบ ชายคนนั้นยืนอยู่ห่างจากหน้าผา 238 เมตร

ตัวอย่าง 12.4 ค้างคาวส่งคลื่นเหนือเสียงไปตกกระทบเหยื่อและรับคลื่นสะท้อน ถ้าคลื่นที่ค้างคาวส่งออกไปมีความถี่ 25 กิโลเฮิรตซ์ ค้างคาวจะสามารถตรวจพบเหยื่อที่มีขนาดเล็กสุดเท่าใดสำหรับคลื่นความถี่นี้

แนวคิด เหยื่อต้องมีขนาดใหญ่กว่าหรือเท่ากับความยาวคลื่นเสียง โดยใช้สมการ $v = f\lambda$ เพื่อหาความยาวคลื่นเสียง

วิธีทำ ความถี่ของคลื่นเสียง $f = 25\ \text{kHz} = 25\times10^{3}\text{Hz}$

อัตราเร็วของคลื่นเสียง $v = 346\ \text{m/s}$

จาก $v = f\lambda$

จะได้ $\lambda = \dfrac{v}{f}$

$$\lambda = \frac{346\ \text{m/s}}{25\times10^{3}\ \text{Hz}}$$

$$\lambda = 1.38\times10^{-2}\ \text{m}$$

$$= 1.38\ \text{cm}$$

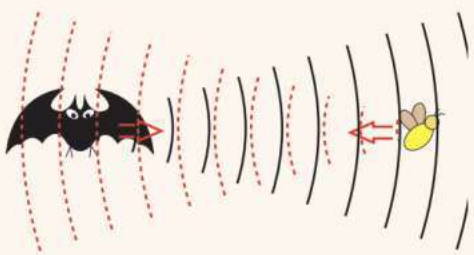
ตอบ ค้างคาวจะสามารถตรวจพบเหยื่อที่มีขนาดเล็กสุดเท่ากับ 1.38 เซนติเมตร

ชวนคิด

ในการวินิจฉัยเนื้อเยื่อ แพทย์ใช้คลื่นเหนือเสียงที่มีความถี่ในช่วง 1-10 เมกะเฮิรตซ์ เนื้อเยื่อที่เล็กที่สุดที่สามารถตรวจพบได้มีขนาดเท่าใด โดยอัตราเร็วของคลื่นเสียงในเนื้อเยื่อของร่างกายมนุษย์มีค่า 1540 เมตรต่อวินาที

รู้หรือไม่

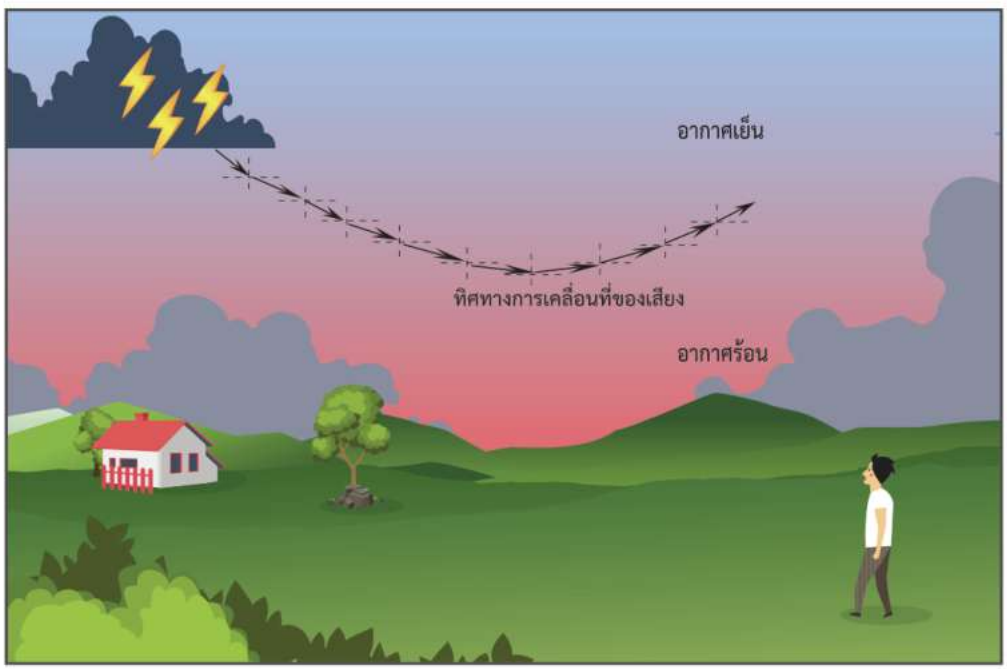
สัตว์หลายชนิดดำรงชีพโดยอาศัยหลักการสะท้อนของคลื่น เช่น ค้างคาวซึ่งเป็นสัตว์ที่ออกหากินตอนกลางคืน สามารถบินหลบหลีกสิ่งกีดขวางและรู้ตำแหน่งของแมลงเล็ก ๆ ที่เป็นอาหารได้ เพราะค้างคาวส่งคลื่นเสียงความถี่สูงออกไปเป็นจังหวะ ๆ หรือ**พัลส์** (pulse) และรับคลื่นเสียงที่สะท้อนกลับมาได้ โลมาก็ส่งและรับสัญญาณโดยใช้หลักการสะท้อนของเสียงเช่นเดียวกัน



รูป ค้างคาวหาอาหารโดยใช้หลักการสะท้อนของคลื่น

การหักเหของเสียง

ขณะเกิดฟ้าคะนองบางครั้งเราเห็นฟ้าแลบแต่ไม่ได้ยินเสียงฟ้าร้อง เนื่องจากอากาศเหนือผิวโลกมีอุณหภูมิไม่เท่ากัน โดยอากาศบริเวณที่ห่างจากผิวโลกมากจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าอากาศบริเวณใกล้ผิวโลก เสียงฟ้าร้องที่เกิดขึ้นบนท้องฟ้าจะเคลื่อนที่ลงมายังพื้นโลกจากอากาศเย็นด้านบนลงมายังอากาศร้อนด้านล่าง ทำให้อัตราเร็วเพิ่มขึ้นทีละน้อย เกิดการหักเหของเสียงฟ้าร้องโดยมีมุมหักเหโตขึ้นทีละน้อย เมื่อต่ำถึงระดับหนึ่ง จนสะท้อนกลับหมดขึ้นสู่อากาศด้านบนแทนที่จะเคลื่อนที่ลงมายังพื้นดิน เราจึงไม่ได้ยินเสียงฟ้าร้อง แสดงว่าเสียงมีการหักเห



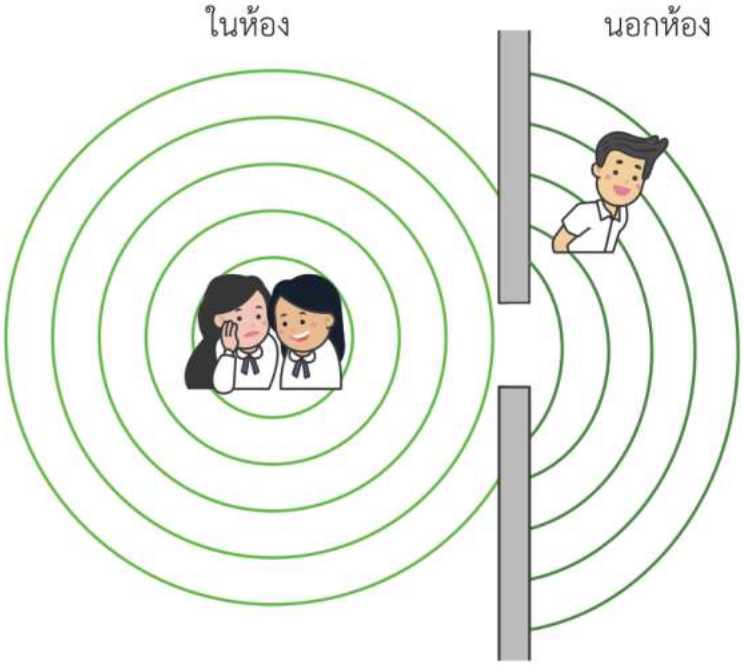
รูป 12.5 การสะท้อนกลับหมดของเสียงในอากาศ

ชวนคิด

เมื่อคลื่นเสียงเคลื่อนที่จากอากาศเข้าสู่น้ำ ความถี่และความยาวคลื่นมีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่ เพราะเหตุใด

การเลี้ยวเบนของเสียง

การได้ยินเสียงคนพูดคุยกันในห้อง ทั้งที่ผู้ฟังอยู่นอกห้อง ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะเสียงเลี้ยวเบนออกมาด้านนอกของห้องผ่านทางช่องหน้าต่างหรือช่องประตู ทำให้ผู้ที่อยู่อีกด้านหนึ่งของผนังห้องได้ยินเสียงของคนที่พูดกันอยู่ในห้องได้แม้จะมีผนังกั้นทางเดินของเสียงก็ตาม ดังรูป 12.6



รูป 12.6 การเลี้ยวเบนของเสียงออกนอกห้อง

กิจกรรมลองทำดู การเลี้ยวเบนของเสียง

จุดประสงค์

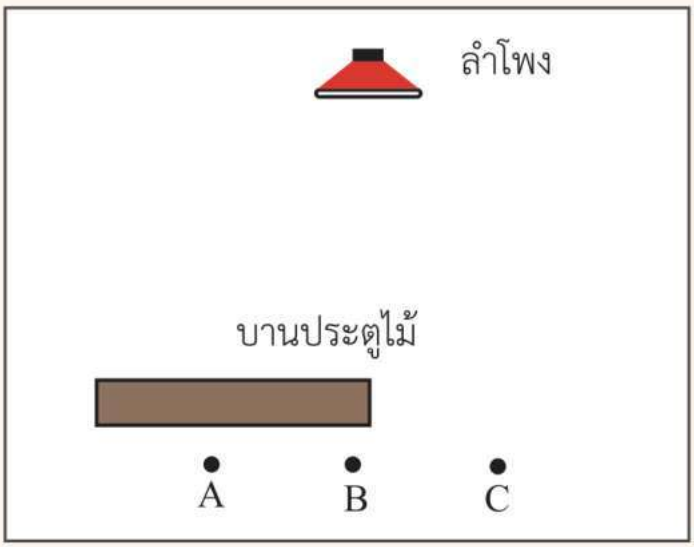
ศึกษาความสัมพันธ์ของการเลี้ยวเบนของเสียงกับตำแหน่ง

วัสดุและอุปกรณ์

1. เครื่องกำเนิดสัญญาณเสียง	1 เครื่อง
2. ลำโพง	1 ตัว
3. สายไฟ	2 เส้น

วิธีทำกิจกรรม

1. ต่อเครื่องกำเนิดสัญญาณเสียงกับลำโพง 1 ตัว หมุนปุ่มเลือกความถี่ไปที่ 1 กิโลเฮิรตซ์ และปรับความดังของเสียงให้ดังพอสมควร
2. นำลำโพงไปวางไว้ด้านหลังประตูห้องเรียนซึ่งเปิดอยู่ แล้วฟังเสียงที่อีกด้านหนึ่งของประตูนอกห้องเรียนซึ่งบังลำโพงไว้ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ดังรูป



คำถามท้ายกิจกรรม

- ☐ ณ ตำแหน่ง A B และ C จะได้ยินเสียงดังแตกต่างกันหรือไม่ อย่างไร
- ☐ ถ้าเสียงจากลำโพงเคลื่อนที่ไปถึงบานประตู ไม่อ้อมขอบบานประตู จะได้ยินเสียง ณ ตำแหน่ง A และ B หรือไม่

จากกิจกรรม พบว่าได้ยินเสียงทั้งสามตำแหน่ง โดยเสียงที่ได้ยิน ณ ตำแหน่ง A ซึ่งอยู่ด้านหลังสิ่งกีดขวางจะดังน้อยกว่าเสียงที่ได้ยิน ณ ตำแหน่ง B และ C ซึ่งอธิบายได้ว่า การได้ยินเสียงที่ตำแหน่ง A และ B ทั้งที่มีสิ่งกีดขวางกั้นเสียงไว้ เพราะเสียงสามารถเคลื่อนที่อ้อมไปยังด้านหลังของสิ่งกีดขวางได้ เช่นเดียวกับคลื่นน้ำ หรือกล่าวได้ว่า เสียงมีการเลี้ยวเบน

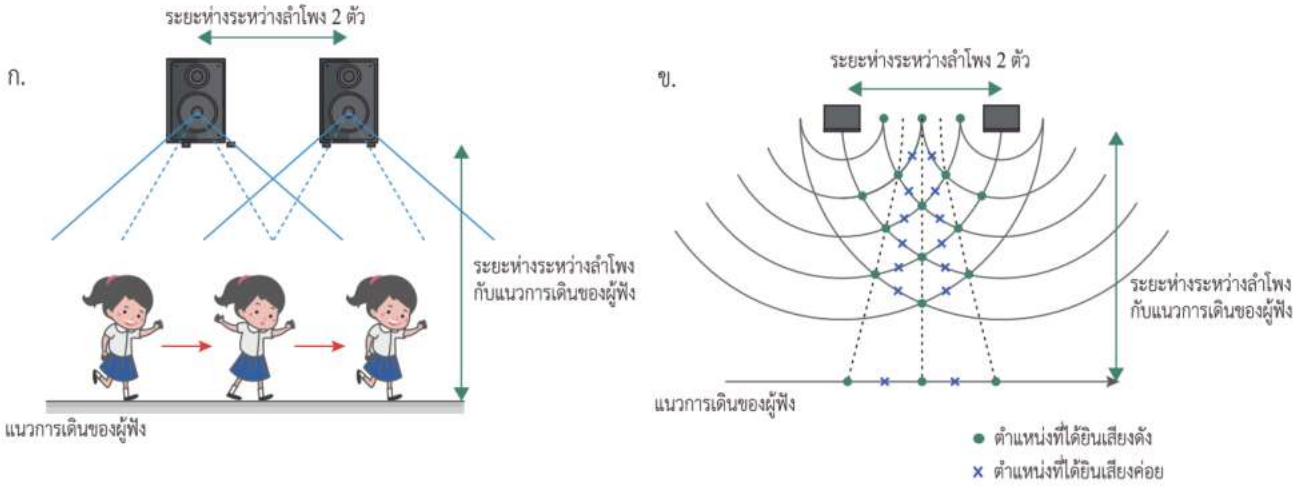
ชวนคิด

เสียงความถี่ต่ำกับเสียงความถี่สูง เสียงความถี่ใดสามารถเลี้ยวเบนได้ดีกว่ากัน

การแทรกสอดของเสียง

เคยสังเกตหรือไม่ว่า ในห้องหรือบริเวณที่มีการเปิดลำโพงเสียง 2 ตัว เมื่อไปยืนในตำแหน่งต่าง ๆ ในแนวที่ขนานกับแนวของลำโพงทั้งสองตัว ดังรูป 12.7 ก. จะพบว่า บางตำแหน่งจะได้ยินเสียงไม่ชัดเจน และเมื่อเดินตามแนวเส้นตรงนั้นจะได้ยินเสียงชัดเจนบ้าง ไม่ชัดเจนบ้างสลับกันไป หากพิจารณาลำโพงทั้งสองเป็นแหล่งกำเนิดเสียงอาพันธ์ ดังรูป 12.7 ข. จะเกิดการแทรกสอดของเสียง เกิดเสียงดัง-ค่อย

ในลักษณะเดียวกันกับการเกิดปฏิบัพและบัพจากการแทรกสอดของคลื่นผิวน้ำหรือการเกิดแถบสว่าง-แถบมืดจากการแทรกสอดของแสง นั่นคือ เสียงมีการแทรกสอดเช่นเดียวกับคลื่นชนิดต่าง ๆ โดยตำแหน่งที่เกิดปฏิบัพจะได้ยินเสียงดัง และตำแหน่งที่เกิดบัพจะไม่ได้ยินเสียงหรือได้ยินเสียงค่อย



รูป 12.7 ตำแหน่งที่ได้ยินเสียงดัง-ค่อยตามแนวเส้นตรงที่ขนานกับลำโพงทั้งสอง

กิจกรรมลองทำดู การแทรกสอดของเสียง

จุดประสงค์

ศึกษาความสัมพันธ์ของการแทรกสอดของเสียงกับตำแหน่ง

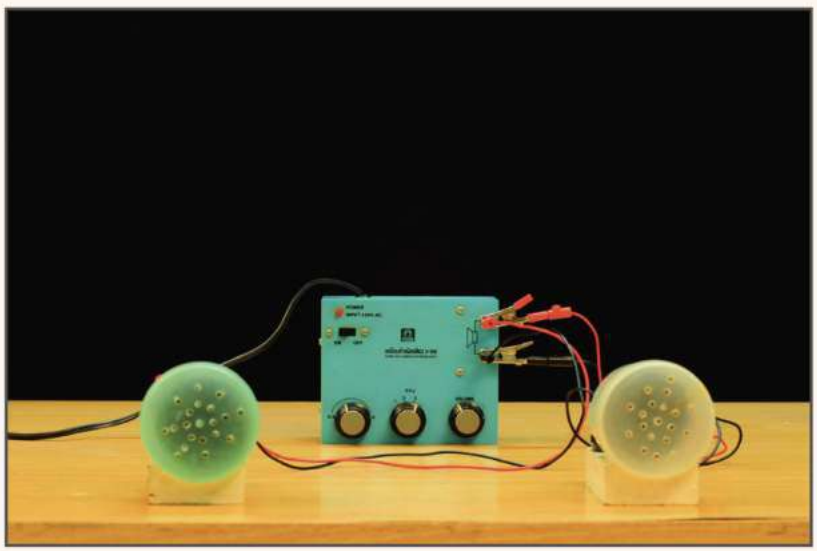
วัสดุและอุปกรณ์

1. เครื่องกำเนิดสัญญาณเสียง	1 เครื่อง
2. ลำโพง	2 ตัว
3. สายไฟ	4 เส้น

วิธีทำกิจกรรม

1. ต่อเครื่องกำเนิดสัญญาณเสียงกับลำโพง 2 ตัว หมุนปุ่มเลือกความถี่ 3 กิโลเฮิรตซ์ และหมุนปุ่มปรับความดังให้ได้ยินเสียงดังพอสมควร

2. วางลำโพงไว้ที่ขอบโต๊ะ จัดหน้าลำโพงหันออกนอกโต๊ะ ดังรูป



3. ฟังเสียงทางด้านหน้าลำโพง ณ ตำแหน่งต่าง ๆ กันในแนวขนานกับขอบโต๊ะ เปรียบเทียบความดังของเสียง ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ตามแนวที่ฟังเสียง

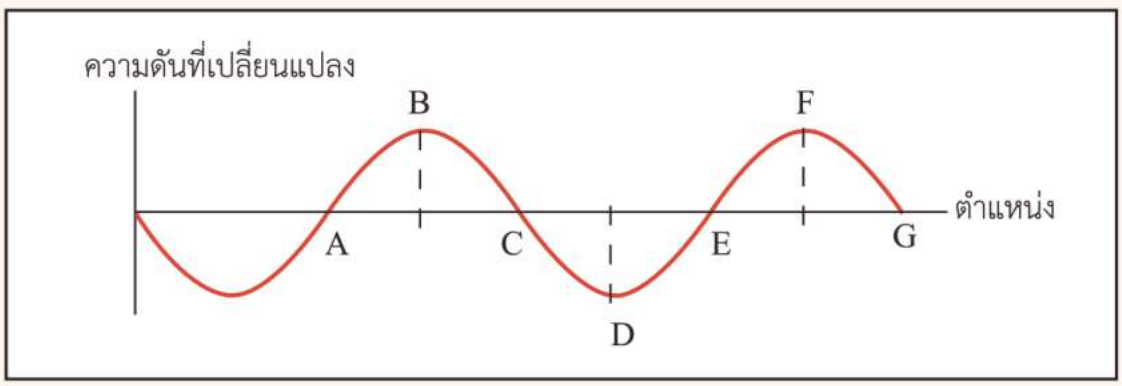
คำถามท้ายกิจกรรม

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

จากกิจกรรม เมื่อใช้ลำโพง 2 ตัวต่อพ่วงกัน จะมีความถี่เท่ากันเพราะเป็นเสียงจากเครื่องกำเนิดสัญญาณเสียงเดียวกัน ในการยืนฟังเสียง ณ บางตำแหน่งจะได้ยินเสียงดัง แต่บางตำแหน่งจะได้ยินเสียงค่อย เนื่องจากตำแหน่งที่ได้ยินเสียงดังเกิดจากการรวมกันแบบเสริมกันของคลื่นเสียง และตำแหน่งที่ได้ยินเสียงค่อย ก็เกิดจากการรวมกันแบบหักล้างกันของคลื่นเสียง ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า เสียงมีการแทรกสอดเช่นเดียวกับคลื่นอื่น ๆ โดยสามารถพิจารณาการแทรกสอดได้เช่นเดียวกับการพิจารณาการแทรกสอดของคลื่นที่ผิวน้ำ

คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 12.1

1. เสียงเกิดขึ้นได้อย่างไร และแผ่ออกไปได้อย่างไร
2. ยาน A และยาน B อยู่ในอวกาศที่เป็นสุญญากาศ ถ้ายาน A กระแทกกับยาน B คนในยานทั้งสองจะได้ยินเสียงหรือไม่ เพราะเหตุใด
3. ขณะเกิดคลื่นเสียงในอากาศ ปริมาณต่อไปนี้มีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร
   ก. การกระจัดของอนุภาคของอากาศ
   ข. ความดันของอากาศ
4. กราฟระหว่างความดันอากาศที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของอนุภาคของอากาศกับตำแหน่งตามแนวการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียง เป็นดังรูป



ก. ตำแหน่งใดบ้าง ที่ขนาดการกระจัดของอนุภาคของอากาศมีค่ามากที่สุด
ข. ตำแหน่งใดบ้าง ที่เป็นตำแหน่งกึ่งกลางส่วนอัดของอนุภาคของอากาศ
ค. ตำแหน่งใดบ้าง ที่เป็นตำแหน่งกึ่งกลางส่วนขยายของอนุภาคของอากาศ

แบบฝึกหัด 12.1

1. เสียงความถี่ 1000 เฮิรตซ์ และความยาวคลื่น 1.5 เมตร เคลื่อนที่ผ่านน้ำ อัตราเร็วเสียงในน้ำมีค่าเท่าใด
2. ถ้าอุณหภูมิของอากาศ 30 องศาเซลเซียส อัตราเร็วเสียงในอากาศมีค่าเท่าใด
3. ถ้าอัตราเร็วเสียงในอากาศเท่ากับ 347.2 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิของอากาศขณะนั้นมีค่าเท่าใด
4. ปรบมือ 1 ครั้ง หน้าผนังตึกซึ่งอยู่ห่างออกไป 15 เมตร จะได้ยินเสียงสะท้อนจากการปรบมือ

หรือไม่ เพราะเหตุใด กำหนด อัตราเร็วเสียงในอากาศเท่ากับ 350 เมตรต่อวินาที และแยกเสียงได้ถ้าช่วงเวลาห่างมากกว่า 0.1 วินาที

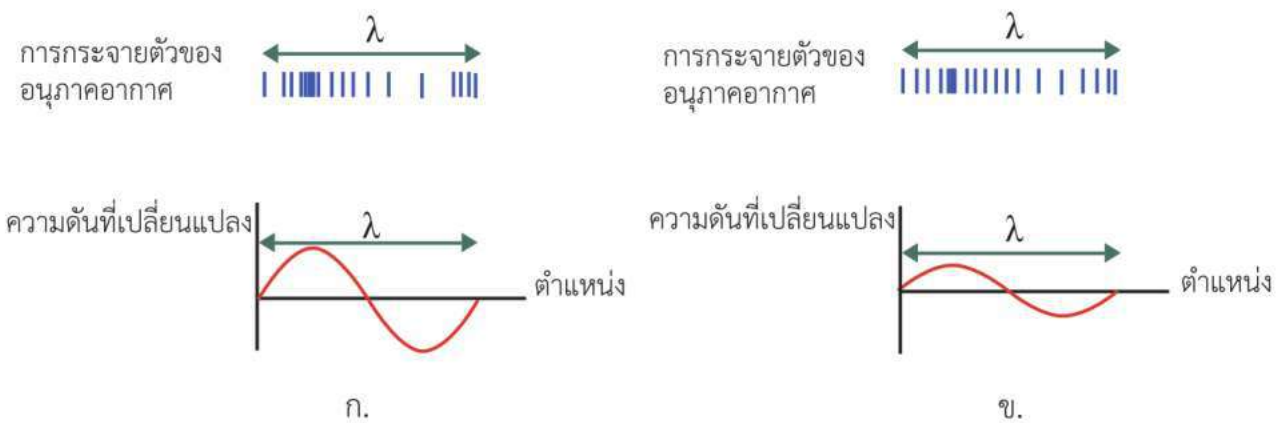
5. นาย ก กดแตรในที่โล่ง หลังจากนั้นนาน 1.5 วินาที นาย ข ซึ่งอยู่ห่างออกไป ได้ยินเสียงแตร นาย ข อยู่ห่างจาก นาย ก เป็นระยะเท่าใด
   กำหนด อุณหภูมิของอากาศขณะนั้นเป็น 20 องศาเซลเซียส
6. แหล่งกำเนิดคลื่นเสียงให้เสียงที่มีความยาวคลื่น 0.70 เมตร ถ้าอุณหภูมิของอากาศขณะนั้นเป็น 40 องศาเซลเซียส ความถี่ของเสียงมีค่าเท่าใด

12.2 การได้ยินเสียง

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่า การที่เราจะได้ยินเสียงนั้น นอกจากปัจจัยด้านความถี่ของเสียงที่หูของมนุษย์สามารถตอบสนองได้แล้ว พลังงานเสียงซึ่งเกี่ยวข้องกับแอมพลิจูดของคลื่นเสียงก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการได้ยินเสียงเช่นกัน จะได้ศึกษาดังต่อไปนี้

12.2.1 ความเข้มเสียง

เสียงเกิดจากการสั่นของแหล่งกำเนิดเสียงและเกิดการถ่ายโอนพลังงานไปยังอนุภาคอากาศที่อยู่รอบ ๆ จนกระทั่งถึงหูเรา ทำให้เราได้ยินเสียง เสียงที่หูได้ยินอาจจะดังหรือค่อย ขึ้นอยู่กับพลังงานของคลื่นเสียง โดยพลังงานของคลื่นเสียงจะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับแอมพลิจูดของคลื่นเสียงนั้น ทั้งนี้แอมพลิจูดของคลื่นเสียงขึ้นอยู่กับแอมพลิจูดการสั่นของแหล่งกำเนิดเสียงหรือขึ้นอยู่กับพลังงานของแหล่งกำเนิดเสียงนั่นเอง รูป 12.8 แสดงการเปรียบเทียบเสียงที่มีความยาวคลื่นเท่ากันแต่มีแอมพลิจูดต่างกัน จะเห็นว่า เสียงที่มีแอมพลิจูดมากกว่า (รูป 12.8 ก.) จะมีความดันอากาศที่เปลี่ยนไปมากกว่า (อนุภาคของตัวกลางเบียดเข้าใกล้กันได้ชิดมากกว่า หรือความสูงของรูปคลื่นสูงกว่า) เมื่อเทียบกับเสียงที่มีแอมพลิจูดน้อยกว่า (รูป 12.8 ข.) ซึ่งมีความดันอากาศที่เปลี่ยนไปน้อยกว่า (อนุภาคของตัวกลางเบียดเข้าใกล้กันได้ชิดน้อยกว่า หรือความสูงของรูปคลื่นต่ำกว่า)



รูป 12.8 การเปรียบเทียบเสียงที่มีแอมพลิจูดมาก (ก.) กับเสียงที่มีแอมพลิจูดน้อย (ข.)

อัตราการถ่ายโอนพลังงานเสียงของแหล่งกำเนิด มีค่าเท่ากับพลังงานเสียงที่ออกจากแหล่งกำเนิดต่อหน่วยเวลา ซึ่งเรียกว่า **กำลังเสียง** (power of a sound) ผู้ฟังจะได้ยินเสียงจากแหล่งกำเนิดเสียงที่มีกำลังเสียงมาก ดังกว่าเสียงจากแหล่งกำเนิดเสียงที่มีกำลังเสียงน้อย เมื่ออยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดเสียงเท่ากัน

กำลังเสียงที่แหล่งกำเนิดเสียงส่งออกไปต่อหน่วยพื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียง เรียกว่า **ความเข้มเสียง** (sound intensity)

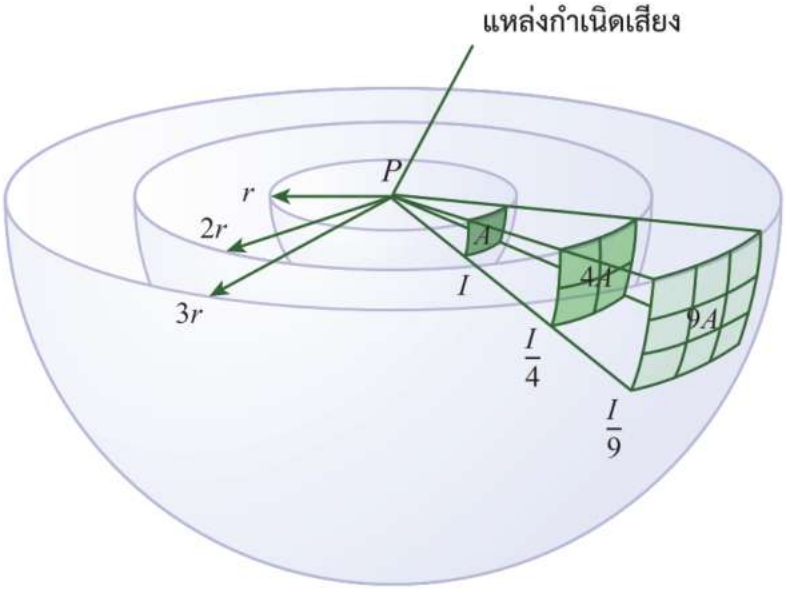
$$I = \frac{P}{A} \qquad (12.2)$$

เมื่อ I คือ ความเข้มเสียง มีหน่วยวัตต์ต่อตารางเมตร
P คือ กำลังเสียงของแหล่งกำเนิดเสียง มีหน่วยวัตต์
A คือ พื้นที่ที่เสียงเคลื่อนที่ผ่านในทิศตั้งฉาก มีหน่วยตารางเมตร

โดยความเข้มเสียงมีค่าลดลงเมื่อระยะห่างจากแหล่งกำเนิดเสียงมากขึ้น สำหรับแหล่งกำเนิดเสียงที่เป็นจุดจะแผ่คลื่นเสียงออกมาทุกทิศทาง โดยมีลักษณะเป็นพื้นผิวทรงกลมที่มีแหล่งกำเนิดเสียงอยู่ที่ศูนย์กลางของทรงกลม ความเข้มเสียงจากแหล่งกำเนิด ณ ตำแหน่งที่อยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดเสียงเป็นระยะ r มีค่า

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

นั่นคือ ความเข้มเสียงแปรผกผันกับกำลังสองของระยะห่างจากแหล่งกำเนิดเสียง เช่น ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดเสียง (ที่เป็นจุด) เป็นระยะ r, $2r$, และ $3r$ มีความเข้มเสียงเป็น I, $I/4$ และ $I/9$ ตามลำดับ ดังรูป 12.9



รูป 12.9 การเปรียบเทียบความเข้มเสียงที่ตำแหน่งห่างจากแหล่งกำเนิดเสียงเป็นระยะต่าง ๆ

ตัวอย่าง 12.5 แหล่งกำเนิดเสียงที่มีกำลังเสียง 80.0 วัตต์ ความเข้มเสียงที่ตำแหน่งซึ่งอยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดเสียง 2.50 เมตร มีค่าเท่าใด

แนวคิด ใช้ความสัมพันธ์ $I = \frac{P}{4\pi r^2}$ เพื่อหาปริมาณที่เกี่ยวข้อง

วิธีทำ

จาก
$$I = \frac{P}{4\pi r^2}$$
$$= \frac{(80.0\ \text{W})}{4(3.1416)(2.50\ \text{m})^2}$$
$$= 1.02\ \text{W/m}^2$$

ตอบ ความเข้มเสียงที่ตำแหน่งซึ่งอยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดเสียง 2.50 เมตร มีค่า 1.02 วัตต์ต่อตารางเมตร

12.2.2 ระดับเสียงและความถี่เสียงกับการเริ่มได้ยิน

จากการทดลองเกี่ยวกับการได้ยินของคนปกติ พบว่า ความเข้มเสียงที่มนุษย์สามารถได้ยินอยู่ในช่วงที่กว้างมาก เช่น ที่ความถี่เสียง 1000 เฮิรตซ์ เสียงที่เบาที่สุดที่มนุษย์สามารถได้ยินมีความเข้ม 10^{-12} วัตต์ต่อตารางเมตร และเสียงที่ดังที่สุดที่ไม่เป็นอันตรายต่อแก้วหูมีความเข้ม 1 วัตต์ต่อตารางเมตร เพื่อลดช่วงที่กว้างมาก จึงพิจารณาการได้ยินจากปริมาณที่ใช้**สเกลลอการิทึม** (logarithmic scale) และเรียกปริมาณนี้ว่า **ระดับเสียง** (sound level) ดังนี้

$$\beta = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right) \qquad (12.4)$$

เมื่อ β คือ ระดับเสียง มีหน่วย เดซิเบล (dB)

I คือ ความเข้มเสียงที่พิจารณา มีหน่วยวัตต์ต่อตารางเมตร

I_o คือ ความเข้มเสียงอ้างอิง มีค่าเท่ากับ 1.0×10^{-12} วัตต์ต่อตารางเมตร

ตาราง 12.2 ระดับเสียงจากแหล่งกำเนิดต่าง ๆ

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

รู้หรือไม่

เครื่องวัดระดับเสียง (sound level meter) เป็นอุปกรณ์สำหรับวัดระดับเสียงในสภาพแวดล้อมทั่วไป เช่น ห้องเรียน ห้องทำงาน ท้องถนน โดยวัดได้ระหว่าง 30-130 เดซิเบล ส่วนประกอบของเครื่องวัด ได้แก่ ไมโครโฟน จอแสดงผล สวิตช์เลือกการทำงาน เช่น ตัวอย่างเครื่องวัดดังรูป นอกจากนี้ยังมีแอปพลิเคชันใช้กับโทรศัพท์เคลื่อนที่สามารถวัดปริมาณต่าง ๆ เกี่ยวกับเสียงได้ เช่น แอปพลิเคชัน sound experiment ของ สสวท. สำหรับระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ (ดาวน์โหลดได้จาก QR code ประจำบท)

รูป ตัวอย่างเครื่องวัดระดับเสียง

ตัวอย่าง 12.6 ระดับเสียงของเสียงซึ่งมีความเข้มเสียง 3.2×10^{-7} วัตต์ต่อตารางเมตร มีค่าเท่าใด

แนวคิด ใช้ความสัมพันธ์ $\beta = 10\log\left(\frac{I}{I_0}\right)$ เพื่อหาปริมาณที่เกี่ยวข้อง

วิธีทำ

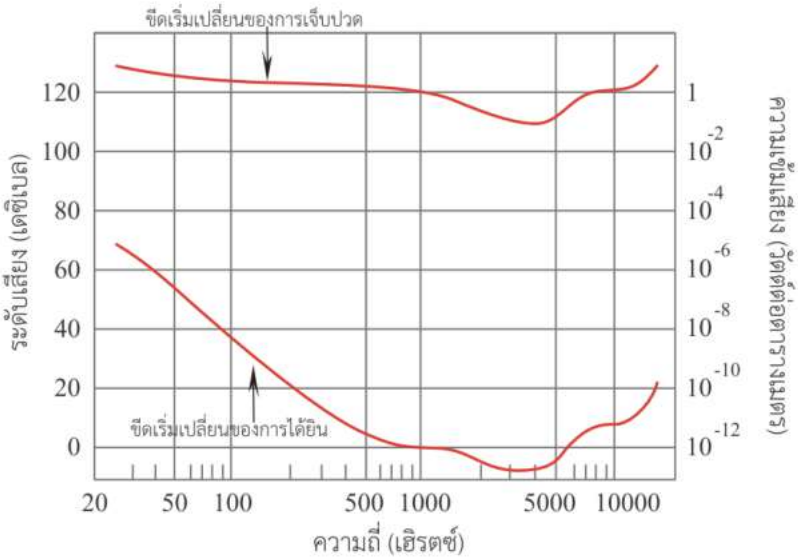
จาก
$$\begin{aligned}\beta &= 10\log\left(\frac{I}{I_0}\right)\\ &= 10\log\left(\frac{3.2\times10^{-7}\ \text{W/m}^2}{1.0\times10^{-12}\ \text{W/m}^2}\right)\\ &= 10\log(3.2\times10^{5})\\ &= 10\log(3.2)+10\log(10^{5})\\ &= 10(0.505)+10(5)\\ &= 55\ \text{dB}\end{aligned}$$

ตอบ ระดับเสียงมีค่า 55 เดซิเบล

ชวนคิด

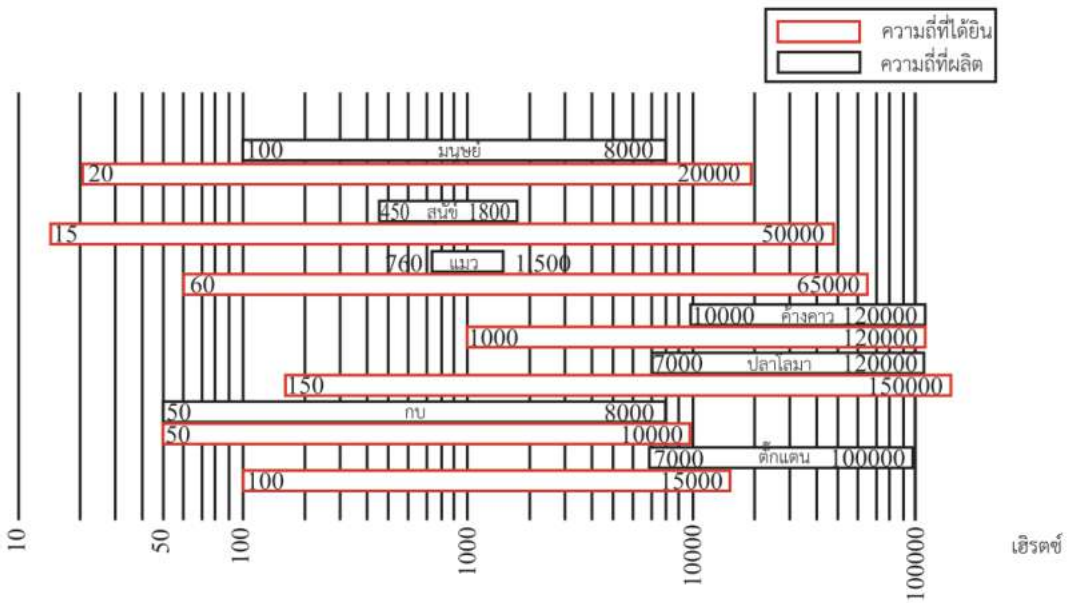
ถ้าเสียงในตัวอย่าง 12.6 มีความเข้มเสียงลดลงครึ่งหนึ่ง ระดับเสียงจะเปลี่ยนไปอย่างไร

สำหรับเสียงที่มีความถี่ 1000 เฮิรตซ์ ระดับเสียงที่มนุษย์ได้ยินจะอยู่ในช่วง 0 จนถึง 120 เดซิเบล หากเสียงมีความถี่เปลี่ยนไป ระดับเสียงที่ได้ยินก็จะเปลี่ยนไปด้วย เช่น เสียงความถี่ 100 เฮิรตซ์ ระดับเสียงที่เบาที่สุดที่มนุษย์ได้ยินมีค่าประมาณ 35 เดซิเบล ดังรูป 12.10 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับเสียงที่ความถี่ต่าง ๆ จะเห็นว่า การที่เราจะได้ยินเสียงที่มีความถี่ต่ำนั้น เสียงนั้นจะต้องมีระดับเสียงสูงกว่าการได้ยินเสียงที่มีความถี่สูงกว่า นอกจากนี้ จะเห็นว่า **ขีดเริ่มเปลี่ยนของการได้ยิน** (threshold of hearing) และ**ขีดเริ่มเปลี่ยนของการเจ็บปวด** (threshold of pain) สำหรับเสียงแต่ละความถี่นั้นมีค่าไม่เท่ากัน



รูป 12.10 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับเสียงที่มนุษย์ได้ยินที่ความถี่ต่าง ๆ

มนุษย์ได้ยินเสียงในช่วงความถี่หนึ่ง สำหรับสัตว์อื่น ๆ จะได้ยินเสียงในช่วงความถี่หนึ่ง ๆ เช่นกัน และต่างก็สามารถให้เสียงที่มีช่วงความถี่ต่าง ๆ กันด้วย ซึ่งพิจารณาได้จากรูป 12.11



รูป 12.11 แผนภาพแสดงช่วงความถี่เสียงที่สัตว์-มนุษย์ผลิตและช่วงความถี่เสียงที่มนุษย์-สัตว์ได้ยิน

ชวนคิด

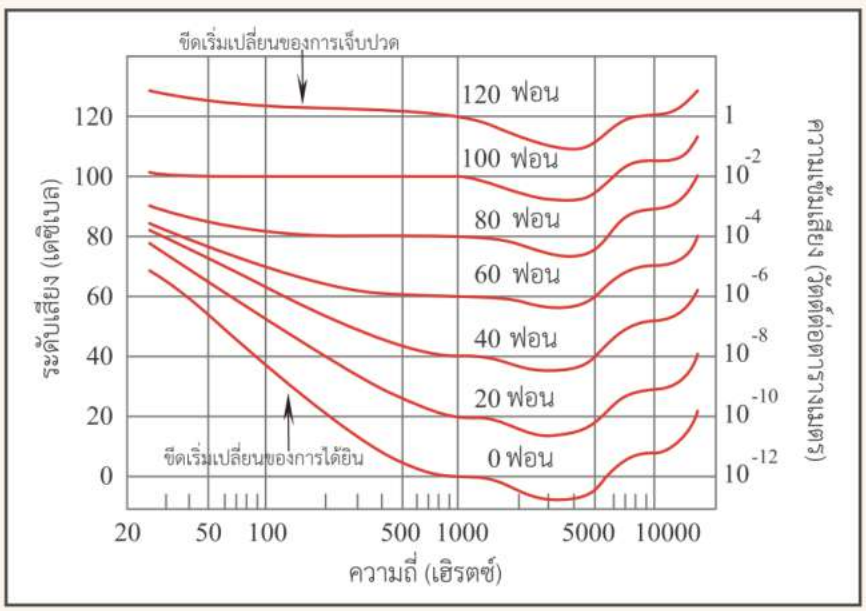
1. มนุษย์สามารถได้ยินเสียงที่มีระดับเสียงต่ำกว่า 0 เดซิเบล ได้หรือไม่
2. มนุษย์สามารถได้ยินเสียงที่มีระดับเสียงเกินกว่า 120 เดซิเบล โดยไม่เจ็บปวดได้หรือไม่

รู้หรือไม่

เดซิเบลไม่ใช่หน่วยของความดังเสียง แต่หน่วยของความดังเสียง คือ **ฟอน** (phon)

ความรู้เพิ่มเติม

ความดัง (loudness) ของเสียงเป็นการรับรู้ซึ่งขึ้นกับแต่ละคน แม้เสียงที่มีความเข้มเสียงเท่ากัน เราอาจรู้สึกว่ามีความดังที่ต่างกัน การพิจารณาว่าเสียงที่ได้ยินนั้นมีความดังกี่ฟอน จะเปรียบเทียบกับระดับเสียง (หน่วยเดซิเบล) ของเสียงที่มีความถี่ 1000 เฮิรตซ์ เช่น ข้อมูลจากการทดลอง ดังรูป



คนส่วนใหญ่จะบอกว่า เสียงความถี่ 50 เฮิรตซ์ ที่มีระดับเสียงประมาณ 75 เดซิเบล มีความดังเท่ากับเสียงความถี่ 1000 เฮิรตซ์ ที่มีระดับเสียง 40 เดซิเบล หรือมีความดังเท่ากับ 40 ฟอน นั่นเอง ดังนั้น แต่ละเส้นในรูปจึงเป็นเส้นที่บอกถึงความดังของเสียงที่แต่ละความถี่ที่คนเรารู้สึก

ว่ามีความดังเท่ากับเสียงที่มีความถี่ 1000 เฮิรตซ์ หรือกล่าวได้ว่า เสียงที่ได้ยินว่าดังเท่ากับเสียงความถี่ 1000 เฮิรตซ์ ที่มีระดับเสียง n เดซิเบล มีความดังเท่ากับ n ฟอน

อย่างไรก็ตาม เสียงที่มีความดัง 40 ฟอน ไม่ได้หมายความว่ามีความดังเป็น 2 เท่าของเสียงที่มีความดัง 20 ฟอน

ชวนคิด

เสียงความถี่ 100 เฮิรตซ์ ที่ระดับเสียง 60 เดซิเบล มีความดังประมาณกี่ฟอน

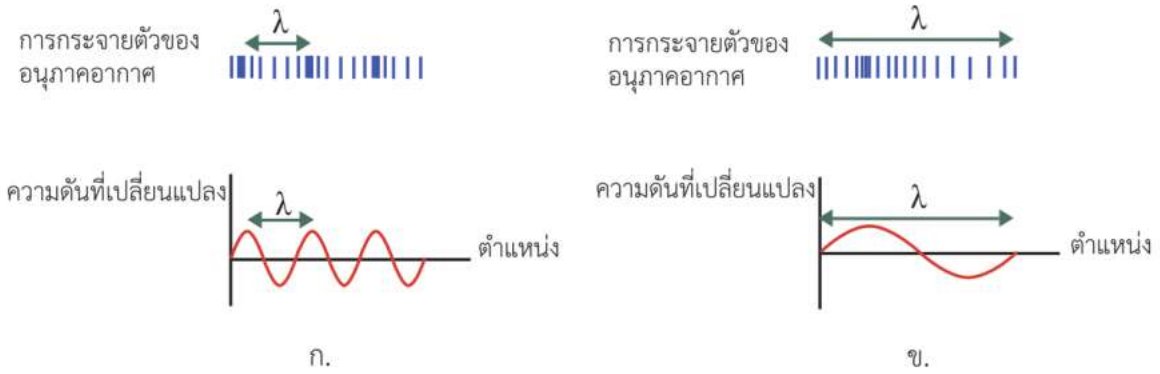
12.2.3 ระดับสูงต่ำของเสียงและคุณภาพเสียง

การได้ยินเสียงของเรา นอกจากจะขึ้นกับระดับเสียงและความถี่ของเสียงแล้ว ในชีวิตประจำวันเสียงเป็นสิ่งสำคัญที่มีผลต่อความรู้สึกและอารมณ์ของผู้ฟังอย่างมาก เมื่อได้ยินเสียง เราจะบอกได้ว่าเสียงนั้นเป็นเสียงสูงหรือเสียงต่ำ นอกจากนี้เรายังจำแนกเสียงต่าง ๆ ว่าเป็นเสียงจากแหล่งกำเนิดใดได้

ระดับสูงต่ำของเสียง

เมื่อเราได้ยินเสียงพูด เสียงดนตรีหรือเสียงร้องเพลง บางคนอาจบอกว่า เสียงนี้เป็นเสียงสูงหรือเสียงต่ำ การระบุว่าเป็นเสียงสูง เสียงต่ำ เสียงแหลม เสียงทุ้ม นี้เป็นการบอกถึง**ระดับสูงต่ำของเสียง** (pitch) ซึ่งเป็นการบอกในเชิงคุณภาพ ขึ้นอยู่กับผู้ฟังแต่ละคน บางคนอาจบอกว่าเสียงนี้สูงมาก ในขณะที่อีกคนหนึ่งอาจบอกว่าเป็นเสียงสูงธรรมดา อย่างไรก็ตาม ปริมาณที่สัมพันธ์กับระดับสูงต่ำของเสียงก็คือ **ความถี่ของเสียง** ซึ่งเป็นการบอกในเชิงปริมาณ สามารถวัดค่าเป็นตัวเลขเพื่อใช้เปรียบเทียบกันได้โดยตรง โดยทั่วไป เมื่อกล่าวถึง**เสียงสูง** (high pitch) หรือ**เสียงแหลม** (treble) จะหมายถึง**เสียงที่มีความถี่สูง** และ**เสียงต่ำ** (low pitch) หรือ**เสียงทุ้ม** (bass) หมายถึง**เสียงที่มีความถี่ต่ำ**

รูป 12.12 แสดงการเปรียบเทียบเสียงที่มีความถี่สูง (รูป 12.12 ก) กับเสียงที่มีความถี่ต่ำ (รูป 12.12 ข) จะเห็นว่า คลื่นเสียงทั้งสองนี้มีแอมพลิจูดเท่ากัน (ความสูงของรูปคลื่นเท่ากัน) เสียงที่มีความถี่สูงจะมีความยาวคลื่นสั้นกว่า (ระยะระหว่างสันคลื่นถึงสันคลื่นถัดไปสั้นกว่า) เสียงที่มีความถี่ต่ำ (ระยะระหว่างสันคลื่นถึงสันคลื่นถัดไปยาวกว่า)

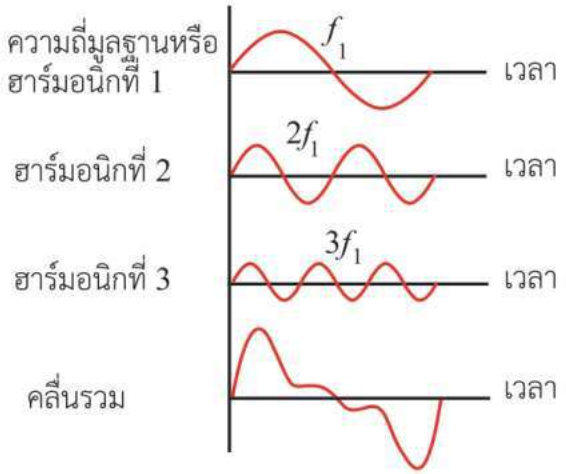


รูป 12.12 การเปรียบเทียบเสียงที่มีความถี่สูง (ก.) กับเสียงที่มีความถี่ต่ำ (ข.)

คุณภาพเสียง

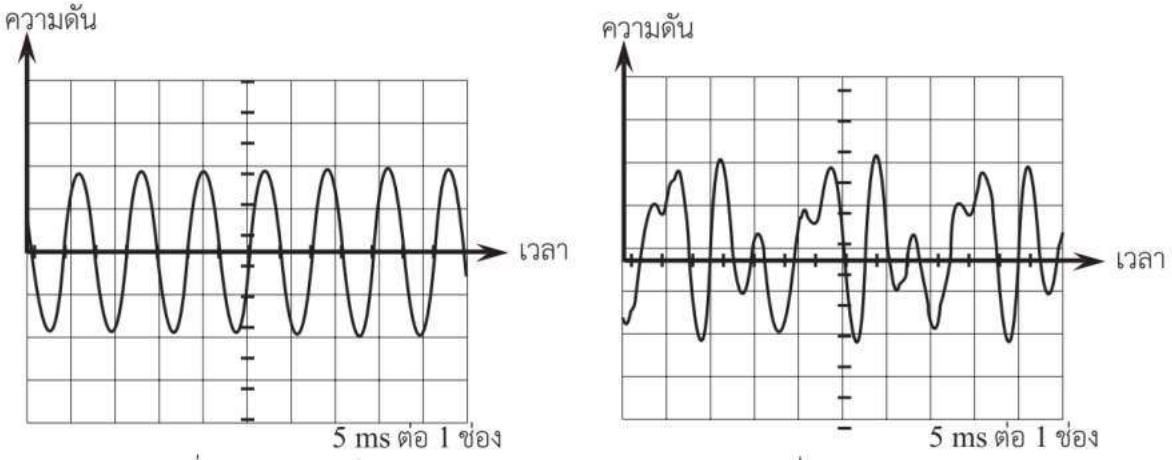
เครื่องดนตรีสองชนิด เช่น เปียโน และ ขลุ่ย เล่นตัวโน้ตตัวเดียวกันที่มีความถี่เท่ากัน แต่เราก็สามารถแยกได้ว่า เสียงใดเป็นเสียงจากเปียโน เสียงใดเป็นเสียงจากขลุ่ย ในวิชาฟิสิกส์ เราบอกว่า เสียงจากเครื่องดนตรีทั้งสองนี้มี **คุณภาพเสียง** (quality of sound) แตกต่างกัน คุณภาพเสียงในวิชาฟิสิกส์จึงไม่ใช่การระบุว่า เสียงจากเครื่องดนตรีชนิดใดดีกว่ากันหรือไพเราะกว่ากัน แต่เป็นการบอกถึงรูปแบบของเสียงที่มีความเฉพาะตัวของเครื่องดนตรีแต่ละชนิด คล้ายกับลายนิ้วมือของแต่ละคน

เมื่อเครื่องดนตรีเล่นโน้ตตัวหนึ่ง เครื่องดนตรีจะผลิตเสียงที่มีความถี่หลายค่าออกมาพร้อมกัน เรียกว่า **ฮาร์มอนิก** (harmonics) เสียงที่มีความถี่ต่ำสุด เรียกว่า **ฮาร์มอนิกที่หนึ่ง** (first harmonic) หรือ **ความถี่มูลฐาน** (fundamental frequency) เสียงที่เหลือจะมีความถี่เป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่มูลฐาน โดยฮาร์มอนิกที่หนึ่งมีความถี่เท่ากับความถี่มูลฐาน ฮาร์มอนิกที่สองมีความถี่เป็นสองเท่าของความถี่มูลฐาน ฮาร์มอนิกที่สามมีความถี่เป็นสามเท่าของความถี่มูลฐาน เป็นต้น หรือเขียนแทนด้วย $f_n = nf_1$ โดย f_n คือความถี่ของฮาร์มอนิกที่ n และ f_1 คือความถี่ของฮาร์มอนิกที่ 1 หรือ ความถี่มูลฐาน ซึ่งเป็นความถี่ต่ำสุดของการสั่น ฮาร์มอนิกเหล่านี้จะรวมกันเป็นเสียงที่เราได้ยิน ดังตัวอย่างในรูป 12.13



รูป 12.13 การรวมฮาร์มอนิกต่าง ๆ ที่มีแอมพลิจูดต่างกัน

ทำนองเดียวกัน ขณะที่แหล่งกำเนิดเสียงต่าง ๆ สั่น จะให้เสียงซึ่งมีฮาร์มอนิกต่าง ๆ จะออกมาพร้อมกันเสมอ แต่จำนวนฮาร์มอนิกและแอมพลิจูดของแต่ละฮาร์มอนิกจะแตกต่างกันไป เมื่อมารวมกัน ทำให้ลักษณะของคลื่นเสียงที่ออกมาแตกต่างกันสำหรับแหล่งกำเนิดเสียงที่ต่างกัน โดยจะมีลักษณะเฉพาะตัว หรือที่เรียกว่ามีคุณภาพเสียงต่างกันนั่นเอง คุณภาพเสียงช่วยให้เราสามารถแยกประเภทของแหล่งกำเนิดเสียงได้ ดังรูป 12.14



ก. รูปคลื่นเสียงของขลุ่ยไทย ข. รูปคลื่นเสียงของทรัมเปต

รูป 12.14 คุณภาพเสียงจากขลุ่ยและทรัมเปตที่เล่นโน้ตเดียวกัน

12.2.4 มลพิษทางเสียงและการป้องกัน

เมื่อเราไปอยู่ใกล้ ๆ บริเวณที่กำลังมีการตอกเสาเข็มหรือมีการขุดเจาะถนนด้วยเครื่องเจาะหรือบริเวณโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้เครื่องจักรขนาดใหญ่ หรือในบริเวณสนามบิน เสียงที่เกิดขึ้นในบริเวณเหล่านี้ มีระดับเสียงสูง นอกจากนี้ยังมีเสียงที่ก่อให้เกิดความรำคาญ เสียงดังกล่าว จัดว่าเป็น**เสียงรบกวน** (noise) หากฟังเป็นเวลานานอาจเป็นอันตรายต่อสุขภาพและจิตใจ

เสียงรบกวนที่ดังและมีระดับเสียงสูง และก่อให้เกิดความรำคาญแก่ผู้ฟัง เป็น **มลพิษทางเสียง** (noise pollution) ซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อผู้ฟังได้

องค์การอนามัยโลก (World Health Organization; WHO) ได้ให้ข้อแนะนำเกี่ยวกับระดับเสียงของเสียงรบกวนในชุมชนและเสียงรบกวนในสถานประกอบการที่ไม่ก่อให้เกิดอันตราย ดังนี้

- เสียงรบกวนในชุมชนที่มีระดับเสียงเฉลี่ยไม่เกิน 70 เดซิเบล จะไม่เป็นอันตรายต่อการได้ยิน
- เสียงรบกวนในสถานประกอบการ องค์การอนามัยโลกได้กำหนดระดับเสียงและช่วงเวลาทำงานสูงสุดไว้ที่ 85 เดซิเบล วันละ 8 ชั่วโมง ค่าจำกัดนี้จะป้องกันไม่ให้ผู้ปฏิบัติงานสูญเสียการได้ยินอย่างถาวรได้ แต่ถ้าได้รับเสียงรบกวนเกิน 85 เดซิเบล มากกว่า 8 ชั่วโมงต่อวันจะก่อให้เกิดอันตรายได้ และถ้าได้รับเสียงรบกวนเกิน 90 เดซิเบล มากกว่า 8 ชั่วโมงต่อวัน จะสูญเสียการได้ยินชั่วคราว

ในประเทศไทยได้กำหนดมาตรฐานระดับเสียงต่าง ๆ เพื่อควบคุมระดับเสียงให้อยู่ในระดับที่ไม่เป็นอันตรายต่อร่างกายและจิตใจ อันเป็นการแก้ไขปัญหามลพิษทางเสียงได้ทางหนึ่ง เช่น

มาตรฐานระดับเสียงที่เกี่ยวข้องกับสถานประกอบการ ดังนี้

ประกาศกระทรวงมหาดไทย เรื่องความปลอดภัยในการทำงานเกี่ยวกับภาวะแวดล้อม กำหนดให้ภายในสถานประกอบการที่มีลูกจ้างคนใดคนหนึ่งทำงานดังต่อไปนี้

- ไม่เกินวันละ 7 ชั่วโมง จะต้องมีระดับเสียงที่ลูกจ้างได้รับติดต่อกันไม่เกิน 91 เดซิเบล
- เกินวันละ 7 ชั่วโมง แต่ไม่เกิน 8 ชั่วโมง จะต้องมีระดับเสียงที่ลูกจ้างได้รับติดต่อกันไม่เกิน 90 เดซิเบล
- เกินวันละ 8 ชั่วโมง จะต้องมีระดับเสียงที่ลูกจ้างได้รับติดต่อกันไม่เกิน 80 เดซิเบล
- นายจ้างจะให้ลูกจ้างทำงานในที่มีระดับเสียงเกินกว่า 140 เดซิเบล ไม่ได้

นอกจากนี้ยังมี พระราชบัญญัติ และประกาศต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในการควบคุมเสียงรบกวนอีกหลายฉบับ

มลพิษทางเสียงเป็นปัญหาสำคัญอย่างหนึ่ง นอกจากการบังคับใช้กฎหมายข้างต้นแล้ว เราก็สามารถช่วยลดมลพิษทางเสียงได้เช่นกัน

แนวทางการลดมลพิษทางเสียง อาจทำได้ 3 วิธี

1. การควบคุมที่แหล่งกำเนิดเสียง เช่น ใช้วัสดุดูดซับเสียงบริเวณที่มีการสั่นสะเทือน ใช้การปิดครอบใช้น้ำมันหล่อลื่นช่วยลดการเสียดสีระหว่างชิ้นส่วนของเครื่องจักร เป็นต้น
2. การควบคุมทางผ่านของเสียง อาจทำได้ 2 ลักษณะคือการเพิ่มระยะทางระหว่างแหล่งกำเนิดเสียงกับผู้ปฏิบัติงานหรือประชาชน และการใช้วัสดุดูดกลืนเสียง กั้นเสียงหรือเบี่ยงเบนทิศทางของเสียง เช่น กำแพงแนวต้นไม้
3. การควบคุมที่ผู้รับฟังเสียง อาจทำได้ 2 วิธี คือ การกำหนดเวลาทำงานให้เป็นไปตามมาตรฐานระดับเสียงที่กำหนดไว้ และการใช้เครื่องป้องกันอันตรายต่อหูเพื่อลดระดับเสียงซึ่งมี 2 แบบ คือ **เครื่องอุดหู** (ear plugs) สามารถลดระดับเสียงได้ 15 - 25 เดซิเบล และ**เครื่องครอบหู** (ear muffs) สามารถลดระดับเสียงได้ 30 - 40 เดซิเบล

ก. การใช้แผ่นยางรองรับ

ข. การปลูกกำแพงแนวต้นไม้กั้นเสียง

ค. การใช้เครื่องครอบหู

รูป 12.15 วิธีการต่าง ๆ ที่ใช้ลดมลพิษทางเสียง

รู้หรือไม่

คลื่นใต้เสียงกับมลพิษทางเสียง

ประชาชนจำนวนมากอยู่ในสภาพแวดล้อมที่ได้รับคลื่นใต้เสียงที่มีความถี่ต่ำกว่าคลื่นเสียงที่หูคนปกติได้ยิน กล่าวคือมีความถี่น้อยกว่า 20 เฮิรตซ์ แหล่งกำเนิดของคลื่นใต้เสียง เช่น ยานพาหนะโดยสารทั้งทางบก น้ำและอากาศ เครื่องจักรขนาดใหญ่ รถที่วิ่งบนถนน รวมทั้งแผ่นดินไหว ซึ่งทำให้เกิดการสั่นที่เราไม่รู้สึกและคิดว่าไม่มีอันตราย แต่ในระยะยาวอาจมีผลต่อผู้ที่อยู่ใกล้บริเวณแหล่งกำเนิด ถ้าร่างกายมีการสั่นเป็นประจำและเป็นเวลาหลายปี อาจก่อให้เกิดโรคต่าง ๆ จากการศึกษากับคนที่มีอาชีพขับรถบรรทุกและรถประจำทาง พบว่าการสั่นของรถมีส่วนทำให้เกิดผลกระทบต่อร่างกาย เช่น ระบบหายใจ ระบบหมุนเวียนโลหิต ช่องท้อง กล้ามเนื้อและกระดูกสันหลัง

ชวนคิด

1. เสียงที่มีความถี่สูง จัดเป็นมลพิษทางเสียงหรือไม่ เพราะเหตุใด
2. รถจักรยานยนต์หรือรถยนต์ที่ถอดท่อเก็บเสียงออก หรือดัดแปลงท่อไอเสียเพื่อทำให้เกิดเสียงดังมาก รถดังกล่าวไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในเขตชุมชนเพราะเหตุใด

คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 12.2

1. กำลังเสียงและความเข้มเสียงมีความสัมพันธ์กันอย่างไร และเกี่ยวข้องความดังของเสียงที่เราได้ยินหรือไม่
2. ในการอ้างอิงหรือการใช้งานในชีวิตประจำวัน นิยมใช้ ระดับเสียง เป็นสิ่งบอกความดังของเสียงแทนความเข้มเสียง เพราะเหตุใด
3. ในบางครั้งเราอาจเรียกสุนัขด้วยการเป่านกหวีดชนิดพิเศษที่คนไม่ได้ยินเสียง นกหวีดชนิดนี้ให้เสียงความถี่เป็นอย่างไร
4. เล่นไวโอลินและกีตาร์ด้วยเสียง A ความถี่ 440 เฮิรตซ์ แต่เสียงที่ออกมาจากเครื่องดนตรีทั้งสองมีคุณภาพเสียงต่างกัน เป็นเพราะเหตุใด

5. ความถี่ต่ำสุดที่เกิดจากเครื่องดนตรีมีชื่อเรียกว่าอย่างไร
6. รถที่วิ่งบนทางด่วนสายหนึ่ง ทำให้เกิดเสียงรบกวนที่มีระดับเสียงเฉลี่ย 80 เดซิเบล ที่ระยะห่างจากถนน 20 เมตร ถ้าท่านมีบ้านในบริเวณดังกล่าว จะมีวิธีการอย่างไรจึงจะทำให้ได้ยินเสียงนี้โดยมีระดับเสียงลดลง

แบบฝึกหัด 12.2

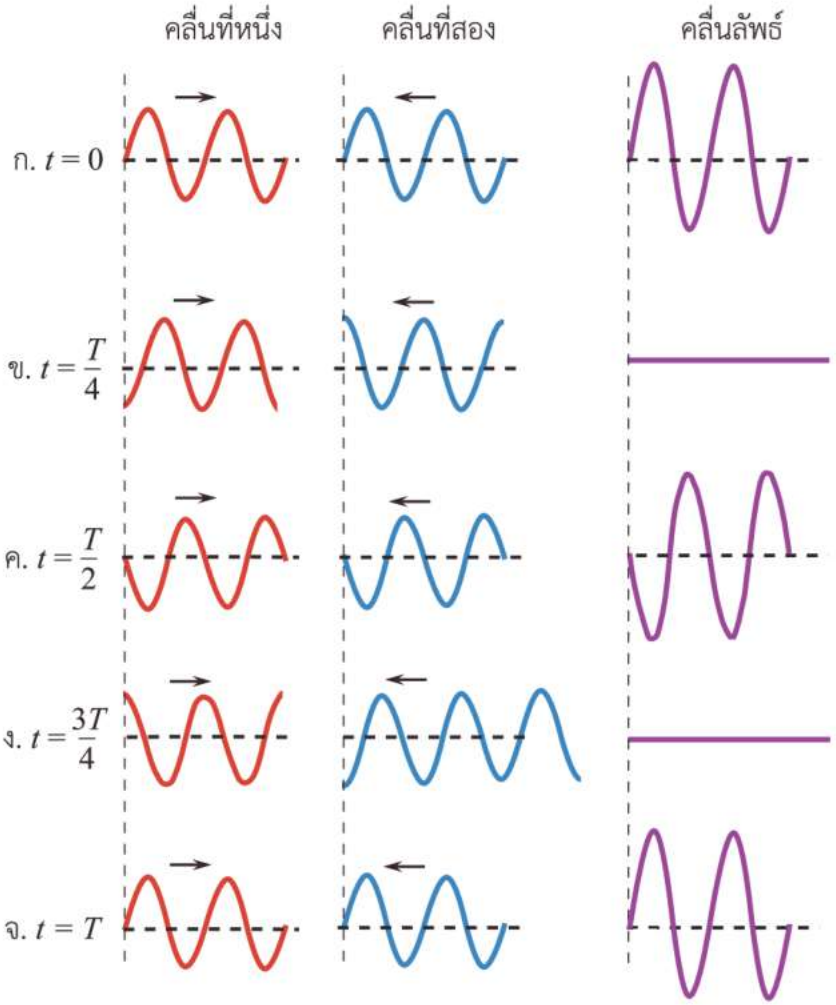
1. หวูดในโรงงานมีกำลังเสียง 20 วัตต์ ถ้าคลื่นเสียงจากหวูดแผ่หน้าคลื่นออกไปเป็นรูปทรงกลม จงหาความเข้มเสียงที่ผิวทรงกลม ซึ่งอยู่ห่างจากหวูด 150 เมตร
2. เครื่องเสียงเครื่องหนึ่ง ในเวลา 5 วินาที ส่งพลังงานออกไป 750π จูล ที่ระยะห่างจากเครื่องเสียง 50 เมตร มีความเข้มเสียงเท่าใด
3. เสียงที่มีความเข้มเสียง 4.9×10^{-7} วัตต์ต่อตารางเมตร จะมีระดับเสียงเท่าใด
4. เสียงที่เกิดจากอุปกรณ์ชิ้นหนึ่งขณะทำงานมีระดับเสียง 50 เดซิเบล จะมีความเข้มเสียงเท่าใด
5. ขลุ่ยไทยเล่นโน้ต “เร” ความถี่มูลฐาน 289 เฮิรตซ์ ถ้า 4 ฮาร์มอนิกแรกที่เกิด ได้แก่ ฮาร์มอนิกที่หนึ่ง ฮาร์มอนิกที่สาม ฮาร์มอนิกที่ห้า และฮาร์มอนิกที่เจ็ด แต่ละฮาร์มอนิกมีความถี่เท่าใด

12.3 ปรากฏการณ์เกี่ยวกับเสียง

มนุษย์มีความเกี่ยวข้องกับเสียงตั้งแต่วินาทีแรกที่ถือกำเนิดขึ้นมา บางคนอาจได้รับการกระตุ้นให้ฟังเสียงดนตรีตั้งแต่อยู่ในครรภ์ หรือได้รับการตรวจดูความสมบูรณ์ของทารกในครรภ์ด้วยคลื่นเหนือเสียง หรือที่นิยมเรียกว่า “ทำอัลตราซาวด์” เมื่อคลอดออกมา เราได้ยินและรับรู้เสียงต่าง ๆ อยู่ตลอดเวลา ในหัวข้อนี้จะได้ศึกษาและทำความเข้าใจปรากฏการณ์บางอย่างเกี่ยวกับเสียงที่สามารถพบได้ในชีวิตประจำวัน

12.3.1 คลื่นนิ่งของเสียง

เมื่อคลื่น 2 ขบวนที่มีแอมพลิจูด ความถี่ และความยาวคลื่น เท่ากัน เคลื่อนที่ในทิศสวนทางกัน คลื่นลัพธ์หาได้จากหลักการซ้อนทับ



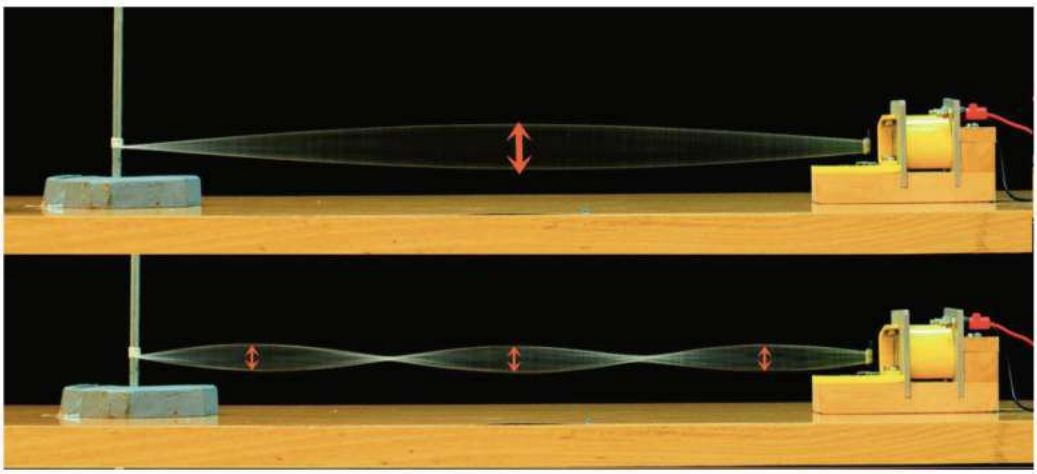
รูป 12.16 การซ้อนทับของคลื่นสองขบวน

จากรูป 12.16 (ก) ณ เวลา $t = 0$ คลื่นทั้งสองขบวนมีเฟสตรงกัน คลื่นลัพธ์จะมีความถี่และความยาวคลื่นเท่าเดิม แต่จะมีแอมพลิจูดเป็น 2 เท่าของแอมพลิจูดเดิม เมื่อเวลาผ่านไป ณ เวลา $t = \frac{T}{4}$ หรือหนึ่งส่วนสี่ของคาบการเคลื่อนที่ของคลื่น รูป 12.16 (ข) ขณะนั้นคลื่นทั้งสองจะมีเฟสตรงข้ามกัน แอมพลิจูดของคลื่นลัพธ์จึงเป็นศูนย์ และเมื่อเวลาผ่านไป ณ เวลา $t = \frac{T}{2}$ รูป 12.16 (ค) คลื่นทั้งสองจะมีเฟสตรงกันอีกครั้ง ทำให้คลื่นลัพธ์มีแอมพลิจูดเป็น 2 เท่าของแอมพลิจูดเดิม แต่คลื่นลัพธ์จะมีเฟสตรงข้ามกับคลื่นลัพธ์ที่เวลา $t = 0$ เมื่อเวลาผ่านไป ณ เวลา $t = \frac{3T}{4}$ รูป 12.16 (ง) คลื่นทั้งสองจะมีเฟสตรงข้ามกันอีกครั้งหนึ่ง และมีแอมพลิจูดของคลื่นลัพธ์เป็นศูนย์เช่นเดียวกับรูป 12.16 (ข) แต่มีลักษณะของรูปคลื่นตรงข้ามกับรูป 12.16 (ข) และเมื่อเวลาผ่านไปครบ 1 คาบ รูป 12.16 (จ) ก็จะมีรูปคลื่นเช่นเดียวกับรูป 12.16 (ก) และเป็นเช่นเดียวกับช่วงคาบแรกที่ผ่านมาและเกิดเช่นนี้ซ้ำไปเรื่อย ๆ

ตำแหน่งซึ่งการกระจัดของอนุภาคของตัวกลางเป็นศูนย์ตลอดเวลา เรียกว่า บัพ เป็นตำแหน่งที่อนุภาคของตัวกลางอยู่นิ่ง และตำแหน่งซึ่งการกระจัดของอนุภาคของตัวกลางมีค่าสูงสุด เรียกว่า ปฏิบัพ เป็นตำแหน่งที่อนุภาคของตัวกลางเคลื่อนที่ไปจากตำแหน่งสมดุลมากที่สุดซึ่งอนุภาคที่ตำแหน่งนี้จะสั่นไปมาด้วยแอมพลิจูดสูงสุด โดยระยะระหว่างบัพ หรือ ระยะระหว่างปฏิบัพที่อยู่ถัดกันมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น $\left(\frac{\lambda}{2}\right)$ และระยะระหว่างบัพกับปฏิบัพที่อยู่ถัดกันมีค่าเป็นหนึ่งในสี่เท่าของความยาวคลื่น $\left(\frac{\lambda}{4}\right)$

เนื่องจากคลื่นลัพธ์ที่เกิดขึ้นจะมีตำแหน่งที่อยู่นิ่งตลอดเวลา (บัพ) และตำแหน่งที่เปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดตลอดเวลา (ปฏิบัพ) โดยมีบัพและปฏิบัพอยู่กับที่ คลื่นลัพธ์นี้จึงไม่มีการเคลื่อนที่ไปตามการเคลื่อนที่ของคลื่นทั้งสอง ลักษณะของคลื่นลัพธ์ที่เกิดขึ้นนี้ เรียกว่า คลื่นนิ่ง

เราสามารถสังเกตการเกิดคลื่นนิ่งของคลื่นตามขวางในเส้นเชือกได้ง่ายกว่าการเกิดคลื่นนิ่งในเสียง โดยการสั่นเส้นเชือกที่ขึงตรึงทั้งสองปลายด้วยความถี่การสั่นที่เหมาะสม ดังรูป 12.17



รูป 12.17 คลื่นนิ่งในเส้นเชือกที่ขึงตรึงที่ปลายทั้งสองด้าน

กิจกรรม 12.1 คลื่นนิ่งของเสียง

จุดประสงค์

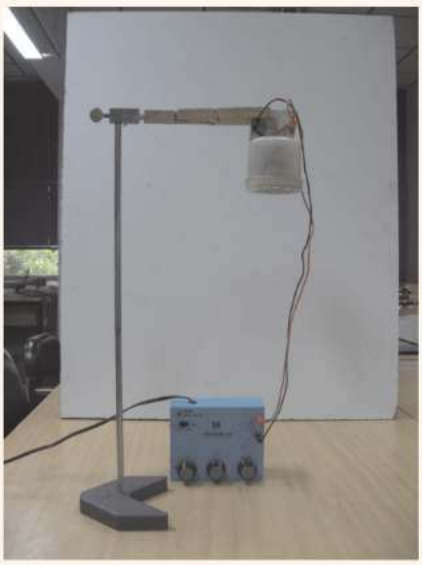
ศึกษาคลื่นนิ่งของเสียง

วัสดุและอุปกรณ์

1. เครื่องกำเนิดสัญญาณเสียง	1 เครื่อง
2. ชุดขาตั้งพร้อมตัวยึด	1 ชุด
3. ชุดท่อรับฟังเสียง	1 ชุด
4. ลำโพง	1 ตัว
5. สายไฟ	4 เส้น

วิธีทำกิจกรรม

1. ต่อสายไฟจากเครื่องกำเนิดสัญญาณเสียงกับลำโพง ทำให้เกิดเสียงความถี่ 3 กิโลเฮิรตซ์ ปรับความดังของเสียงให้ดังชัดเจน
2. ยึดลำโพงกับขาตั้งโดยปรับให้ลำโพงอยู่เหนือพื้นโต๊ะประมาณ 60 เซนติเมตร ดังรูป

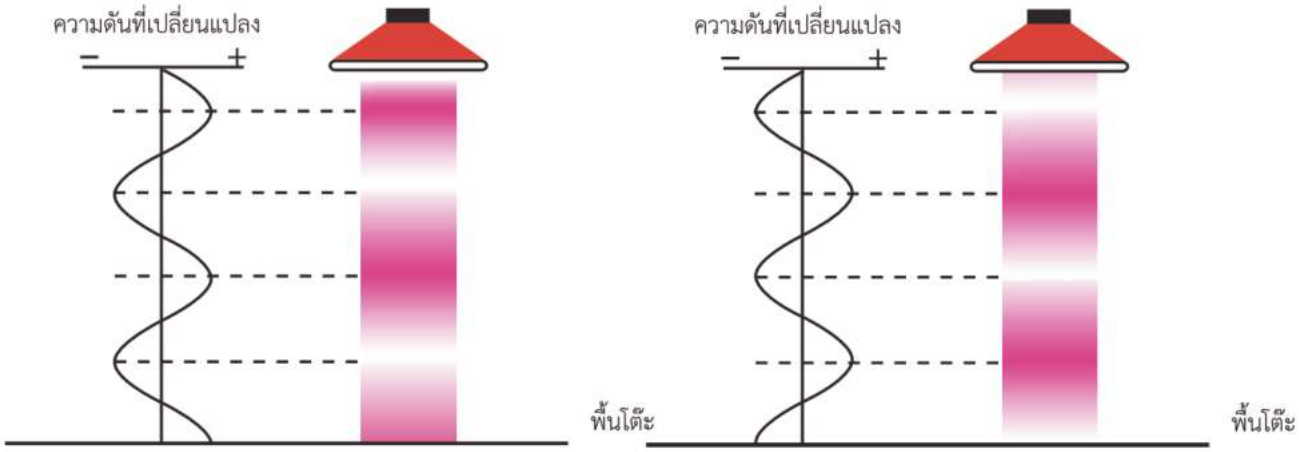


จากนั้นใช้ชุดท่อรับฟังเสียงสังเกตเสียง ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในแนวดิ่งระหว่างลำโพงกับพื้นโต๊ะ

คำถามท้ายกิจกรรม

☐ เสียงที่ได้ยิน จากการรับฟังเสียง ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ระหว่างลำโพงกับพื้นโต๊ะมีความดังเท่ากันหรือไม่ อย่างไร

จากกิจกรรม 12.1 เมื่อเสียงจากลำโพงเคลื่อนที่ไปกระทบพื้นโต๊ะจะสะท้อน และเสียงที่สะท้อนจากพื้นโต๊ะนี้จะซ้อนทับกับเสียงที่ออกจากลำโพงโดยตรง ทำให้เกิดการแทรกสอดที่มีลักษณะเป็นคลื่นนิ่งได้ ดังรูป 12.18 โดยเราจะได้ยินเสียงดังและค่อยสลับกันไป เมื่อได้ยินเสียง ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ระหว่างลำโพงกับพื้นโต๊ะ ตำแหน่งที่ได้ยินเสียงดัง แสดงว่า มีการเปลี่ยนแปลงความดันตลอดเวลา (ปฏิบัพความดัน) ส่วนตำแหน่งที่ได้ยินเสียงค่อย แสดงว่า ความดันปกติตลอดเวลา (บัพความดัน)



รูป 12.18 คลื่นนิ่งของเสียงที่เวลาแตกต่างกันครึ่งคาบ

ชวนคิด

1. ขณะที่เกิดคลื่นนิ่งของเสียง ระยะระหว่างบัพของความดันคู่หนึ่งที่อยู่ถัดกันมีค่าเท่าใด เมื่อเทียบกับความยาวคลื่นของคลื่นเสียง
2. วางลำโพงใกล้กำแพง ขณะที่ลำโพงให้เสียงออกมาอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอ ผู้ที่เดินในแนวระหว่างลำโพงกับกำแพงจะได้ยินเสียงที่มีความดังไม่สม่ำเสมอ ปรากฏการณ์นี้เกิดจากพฤติกรรมใดของเสียง

12.3.2 การสั่นพ้องของอากาศในท่อ

จากที่ทราบมาแล้วว่าเมื่อทำให้วัตถุสั่นอย่างอิสระ วัตถุจะสั่นด้วยความถี่ธรรมชาติค่าหนึ่ง หากวัตถุถูกกระตุ้นด้วยความถี่เท่ากับหรือใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของวัตถุนั้นอย่างต่อเนื่อง วัตถุก็จะเกิดการสั่นพ้อง หรือ เรโซแนนซ์ และเรียกความถี่ที่ทำให้เกิดการสั่นพ้องนี้ว่า **ความถี่การสั่นพ้อง** หรือ **ความถี่เรโซแนนซ์** (resonant frequency)

ในทำนองเดียวกัน ถ้าพิจารณาลำอากาศที่อยู่ในท่อที่มีปลายปิดหนึ่งด้าน เมื่ออนุภาคของอากาศในท่อนี้ถูกกระตุ้น จะสั่นด้วยความถี่ธรรมชาติค่าหนึ่ง หากเรากระตุ้นอนุภาคอากาศในท่อให้สั่นด้วยเสียงความถี่ต่าง ๆ เมื่อปรับความยาวของลำอากาศในท่อ ทำให้เกิดการสั่นพ้องของลำอากาศในท่อได้ ซึ่งเกิดขึ้นได้อย่างไร ศึกษาได้จากกิจกรรมต่อไปนี้

กิจกรรม 12.2 การทดลองการสั่นพ้องของอากาศในหลอดเรโซแนนซ์

จุดประสงค์

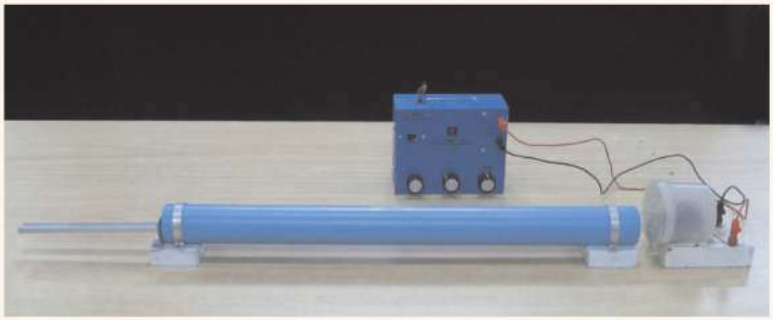
ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับตำแหน่งของการสั่นพ้องของเสียง ที่เกิดจากท่อปลายปิดหนึ่งด้าน

วัสดุและอุปกรณ์

1. เครื่องกำเนิดสัญญาณเสียง 1 เครื่อง
2. ลำโพง 1 ตัว
3. หลอดเรโซแนนซ์ 1 ชุด
   (ท่อปลายปิดหนึ่งด้านที่ปรับความยาวของลำอากาศในท่อ)
4. สายไฟ 4 เส้น

วิธีทำกิจกรรม

1. ต่อลำโพงกับเครื่องกำเนิดสัญญาณเสียง และนำลำโพงไปวางใกล้กับปลายหลอด ด้านที่เปิดของหลอดเรโซแนนซ์ ดังรูป



2. ปรับความถี่ของเสียงเป็น 1 กิโลเฮิรตซ์ พร้อมทั้งปรับความดังของเสียงให้พอเหมาะ
3. เลื่อนลูกสูบของหลอดเรโซแนนซ์มาชิดปลายหลอดด้านที่วางลำโพงเสียงแล้วเลื่อนลูกสูบออกจากลำโพงช้า ๆ จนได้ยินเสียงดังที่สุด และบันทึกตำแหน่งที่ได้ยินเสียงดังที่สุดนั้น
4. ทำซ้ำข้อ 2-3 แต่เปลี่ยนความถี่ของเสียงเป็น 2 และ 3 กิโลเฮิรตซ์ ตามลำดับ

คำถามท้ายกิจกรรม

- ☐ ความดังของเสียงที่ได้ยินเมื่อเลื่อนลูกสูบไปอยู่ที่ตำแหน่งต่าง ๆ แตกต่างกันหรือไม่ อย่างไร
- ☐ เมื่อความถี่เปลี่ยนไป ตำแหน่งที่ได้ยินเสียงดังที่สุด มีความสัมพันธ์กับความถี่อย่างไร

จากกิจกรรม 12.2 เมื่อนำลำโพงไปไว้ใกล้หลอดเรโซแนนซ์ ลำอากาศในหลอดเรโซแนนซ์ถูกกระตุ้นให้สั่นด้วยความถี่ของเสียงจากลำโพง การเลื่อนลูกสูบไปจนกระทั่งลูกสูบอยู่ ณ ตำแหน่งหนึ่งจะทำให้ได้ยินเสียงดังที่สุด ลำอากาศในหลอดจะสั่นมากที่สุด (การเปลี่ยนแปลงความดันของลำอากาศในหลอดมากที่สุด) จึงได้ยินเสียงดังที่สุด เมื่อเพิ่มความถี่ของเสียงจากลำโพง ตำแหน่งที่ได้ยินเสียงดังที่สุดจะลดลง การที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากความถี่ของเสียงจากลำโพงมีค่าเท่ากันกับความถี่ธรรมชาติของลำอากาศในหลอดพอดีจึงทำให้เกิดการสั่นพ้อง เรียกว่า การสั่นพ้องของเสียง

ขณะที่เกิดการสั่นของเสียงในท่อปลายปิดหนึ่งด้าน ระยะทางระหว่างตำแหน่งของลูกสูบขณะได้ยินเสียงดังที่สุดซึ่งอยู่ถัดกันมีความสัมพันธ์กับความยาวคลื่นเสียงที่ใช้ทดลองได้อย่างไร ศึกษาได้จากกิจกรรมต่อไปนี้

กิจกรรม 12.3 การทดลองการวัดความยาวคลื่นเสียง

จุดประสงค์

ศึกษาวิธีการวัดความยาวคลื่นเสียงในอากาศโดยอาศัยปรากฏการณ์การสั่นพ้องของเสียง

วัสดุและอุปกรณ์

1. เครื่องกำเนิดสัญญาณเสียง	1 เครื่อง
2. ลำโพง	1 ตัว
3. หลอดเรโซแนนซ์	1 ชุด
4. สายไฟ	4 เส้น
5. เทอร์มอมิเตอร์	1 อัน

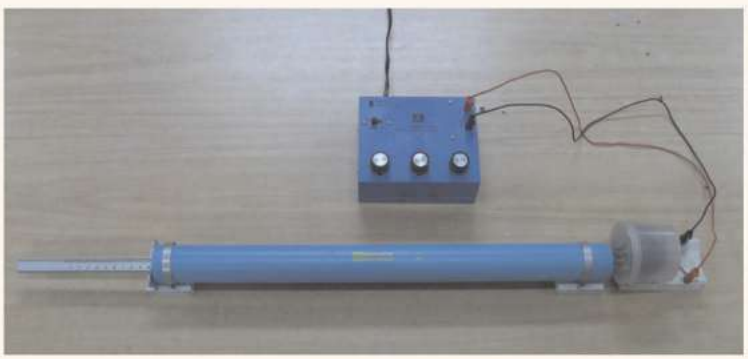
วิธีทำกิจกรรม

ตอนที่ 1

1. ใช้เทอร์มอมิเตอร์วัดอุณหภูมิของอากาศ ขณะนั้น คำนวณอัตราเร็วเสียงในอากาศโดยใช้ความสัมพันธ์ $v = 331 + 0.6T_c$
2. นำอัตราเร็วเสียงที่ได้มาคำนวณหาความยาวคลื่นเสียงในอากาศ เมื่อความถี่ของเสียงเท่ากับความถี่เสียงจากเครื่องกำเนิดสัญญาณเสียงคือ 1, 2 และ 3 กิโลเฮิรตซ์ ตามลำดับ บันทึกความยาวคลื่นเสียงเมื่อความถี่ของเสียงมีค่าต่าง ๆ กัน

ตอนที่ 2

1. ต่อเครื่องกำเนิดสัญญาณเสียงเข้ากับลำโพง นำลำโพงไปวางชิดกับปลายข้างหนึ่งของหลอดเรโซแนนซ์ ดังรูป



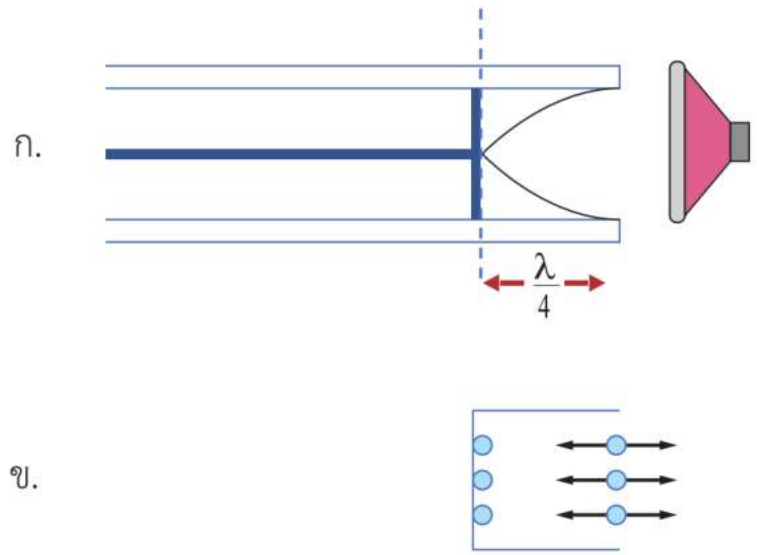
2. หมุนปุ่มปรับความถี่ของเครื่องกำเนิดสัญญาณเสียงไปที่ 1 กิโลเฮิรตซ์ พร้อมทั้งปรับความดังให้เหมาะสม
3. เลื่อนลูกสูบมาชิดกับปลายหลอดเรโซแนนซ์ด้านที่อยู่ใกล้กับลำโพง แล้วเลื่อนลูกสูบออกช้า ๆ จนกระทั่งได้ยินเสียงดังเพิ่มขึ้นมากที่สุด บันทึกตำแหน่ง x_1 ของลูกสูบที่ห่างจากปลายหลอดเรโซแนนซ์
4. ค่อย ๆ เลื่อนลูกสูบออกไปอีก จนกระทั่งได้ยินเสียงดังเพิ่มขึ้นมากที่สุดเป็นครั้งที่ 2 บันทึกตำแหน่ง x_2 ค่อย ๆ เลื่อนลูกสูบออกไปอีกจนกระทั่งได้ยินเสียงดังเพิ่มขึ้นมากที่สุดเป็นครั้งที่ 3, 4, ... บันทึกตำแหน่ง $x_3, x_4, \ldots$
5. หาระยะระหว่างตำแหน่งของลูกสูบที่ได้ยินเสียงดังที่สุดสองตำแหน่งที่อยู่ถัดกัน แล้วหาค่าเฉลี่ยของระยะดังกล่าว บันทึกผล ทำการทดลองซ้ำ โดยเปลี่ยนความถี่ของเครื่องกำเนิดสัญญาณเสียงเป็น 2 และ 3 กิโลเฮิรตซ์ ตามลำดับ บันทึกผล

คำถามท้ายกิจกรรม

- ☐ ระยะระหว่างตำแหน่งของลูกสูบ ขณะได้ยินเสียงดังที่สุดสองครั้ง โดยตำแหน่งทั้งสองอยู่ถัดกันจะเปลี่ยนไปหรือไม่ เมื่อความถี่ของเสียงเปลี่ยนไป
- ☐ ระยะเฉลี่ยระหว่างตำแหน่งของลูกสูบขณะได้ยินเสียงดังที่สุดสองครั้งถัดกัน กับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นเสียงที่คำนวณได้จากตอนที่ 1 มีค่าเท่ากันหรือไม่

จากกิจกรรม 12.3 เสียงเกิดการสั่นพ้องในท่อปลายปิดหนึ่งด้าน เมื่อลำอากาศในท่อสั่นด้วยความถี่เดียวกับความถี่ของแหล่งกำเนิดเสียง เราสามารถอธิบายการสั่นพ้องของลำอากาศในท่อปลายปิดได้โดยพิจารณาการแทรกสอดของคลื่นเสียงในท่อปลายปิด ดังนี้

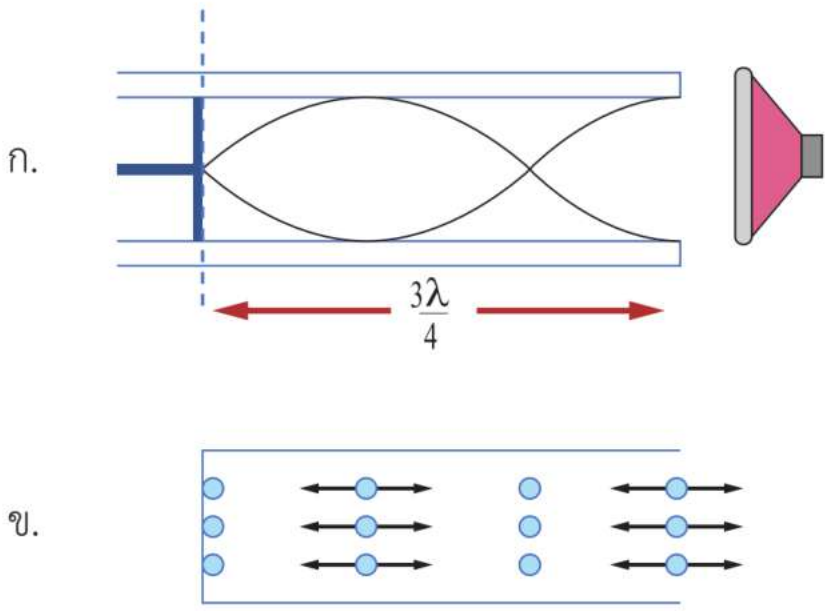
เมื่อเปิดลำโพงให้คลื่นเสียงเข้าสู่ท่อปลายปิดหนึ่งด้าน จะเกิดการแทรกสอดกันของคลื่นเสียงจากลำโพงและคลื่นเสียงที่สะท้อนจากลูกสูบ เมื่อค่อย ๆ เลื่อนลูกสูบออกจากปลายท่อด้านที่ใกล้กับลำโพงจนถึงตำแหน่งหนึ่งจนเกิดคลื่นนิ่งของลำอากาศในท่อ จะได้ยินเสียงดังที่สุดเป็นครั้งแรก ดังรูป 12.19 ก.



รูป 12.19 การเกิดการสั่นพ้องครั้งแรกในท่อปลายปิดหนึ่งด้าน

ณ ตำแหน่งนี้ ลำอากาศในท่อมีความยาวเท่ากับหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่นเสียง โดยอนุภาคอากาศที่ตำแหน่งติดกับลูกสูบไม่มีการเคลื่อนที่ หรือเป็นตำแหน่งบัพของการกระจัด ส่วนอนุภาคอากาศที่บริเวณปลายท่อด้านที่เปิดสู่อากาศจะมีการสั่นมากที่สุด หรือเป็นตำแหน่งปฏิบัพของการกระจัด ดังรูป 12.19 ข. บริเวณปลายเปิดของท่อนี้มีความดันเท่ากับความดันอากาศนอกท่อตลอดเวลา จึงเป็นบัพของความดัน และเราได้ยินเสียงดังที่สุดเมื่อในท่อเกิดการสั่นพ้องที่ความยาวลำอากาศนี้

เมื่อค่อย ๆ เลื่อนลูกสูบให้ห่างออกจากปลายท่อเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เสียงที่เคยดังที่สุดก็จะดังลดลงเป็นปกติ (ไม่เกิดการสั่นพ้อง) แต่เมื่อเลื่อนมาถึงตำแหน่งหนึ่งก็จะได้ยินเสียงดังกว่าปกติขึ้นอีกครั้งหนึ่ง พบว่า ความยาวของลำอากาศในท่อมีค่าเท่ากับสามในสี่ของความยาวคลื่นเสียง หรือเมื่อวัดระยะห่างระหว่างตำแหน่งของลูกสูบเมื่อเกิดการสั่นพ้องครั้งแรกกับตำแหน่งของลูกสูบเมื่อเกิดการสั่นพ้องครั้งที่สองนี้ พบว่ามีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นเสียง หรือเขียนกราฟการกระจัดของอนุภาคอากาศในท่อเมื่อเกิดคลื่นนิ่งได้ดังรูป 12.20 ก.

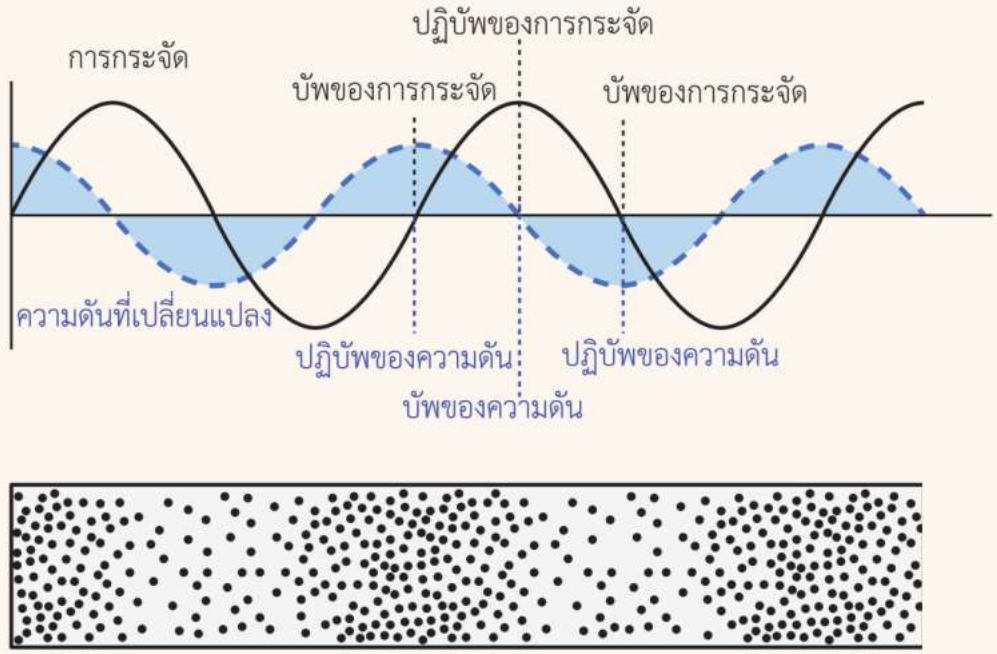


รูป 12.20 การเกิดการสั่นพ้องครั้งที่สองในท่อปลายปิดหนึ่งด้าน

ณ ตำแหน่งที่เกิดการสั่นพ้องครั้งที่สองนี้ อนุภาคอากาศที่บริเวณปลายท่อด้านที่เปิดสู่อากาศจะมีการสั่นมากที่สุด หรือเป็นตำแหน่งปฏิบัพของการกระจัดเช่นกัน ดังรูป 12.20 ข. บริเวณปลายท่อนี้เป็นบัพของความดันเช่นเดียวกับการสั่นพ้องครั้งแรก และเราได้ยินเสียงดังที่สุดเมื่ออนุภาคอากาศในท่อเกิดการสั่นพ้องที่ความยาวลำอากาศนี้

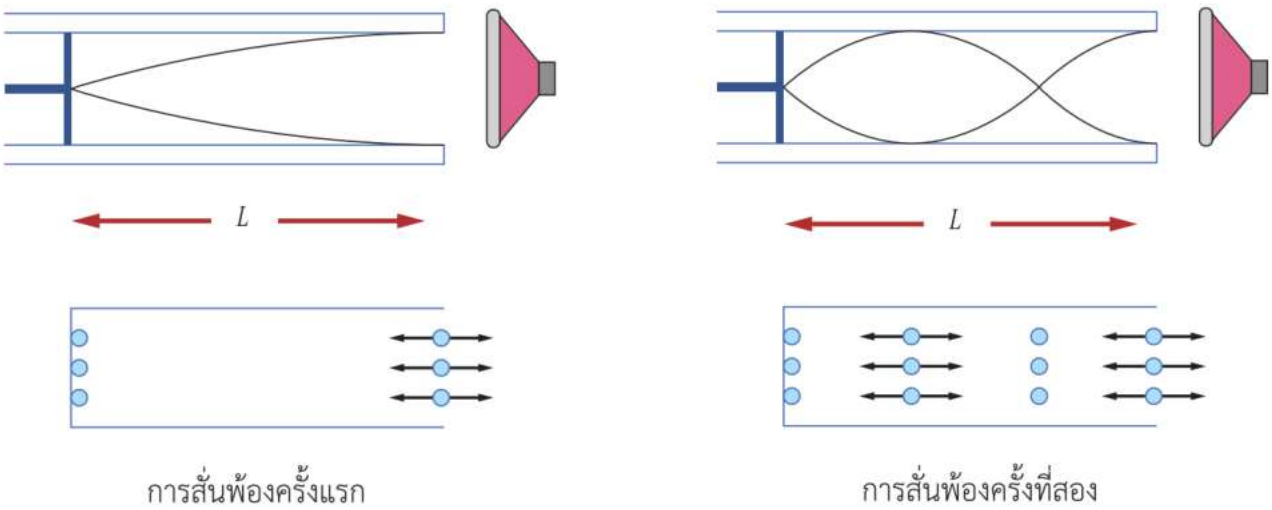
ข้อสังเกต

รูปคลื่นที่วาดประกอบในท่อปลายปิดหนึ่งด้านขณะเกิดการสั่นพ้องนั้นเป็นกราฟการกระจัด หากพิจารณากราฟการเปลี่ยนแปลงความดันอากาศในท่อจะได้กราฟที่มีเฟสต่างกัน 90 องศา โดยตำแหน่งที่เป็นบัพของการกระจัด (ติดลูกสูบ) เป็นปฏิบัพของความดัน ส่วนตำแหน่งที่เป็นปฏิบัพของการกระจัด (ปลายท่อด้านเปิดสู่อากาศ) เป็นบัพของความดัน ดังรูป



รูป กราฟการกระจัดและกราฟความดันที่เปลี่ยนแปลงของอากาศเมื่อเกิดการสั่นพ้องในท่อปลายปิดหนึ่งด้าน

ในทำนองเดียวกันถ้าให้ท่อปลายปิดหนึ่งด้านมีความยาวคงตัว แล้วเปลี่ยนความถี่ของเสียงที่ใส่ให้กับท่อ จะพบว่ามีความถี่หลายค่าที่สามารถทำให้เกิดเสียงดังที่สุดหรือเกิดการสั่นพ้องกับลำอากาศในท่อ ซึ่งสามารถเขียนภาพแสดงการเกิดคลื่นนิ่งในท่อได้ดังรูป 12.21



รูป 12.21 การเกิดการสั่นพ้องของท่อปลายปิดหนึ่งด้านที่มีความยาวคงตัว

จะเห็นว่าการสั่นพ้องครั้งแรกเกิดขึ้นเมื่อลำอากาศในท่อมีความยาว $L = \frac{\lambda}{4}$ และการสั่นพ้องครั้งที่สองเกิดขึ้นเมื่อลำอากาศในท่อมีความยาว $L = \frac{3\lambda}{4}$ จาก $v = f\lambda$ จะได้

การสั่นพ้องครั้งแรก $$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{4L}$$

การสั่นพ้องครั้งที่สอง $$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{3v}{4L}$$

จากการสังเกตความสัมพันธ์ข้างต้น ถ้าให้ f_1 เป็นความถี่ต่ำสุดที่เกิดการสั่นพ้อง เรียกว่าความถี่มูลฐาน ความถี่การสั่นพ้องถัด ๆ ไปมีค่าสูงขึ้นเป็น $3f_1$, $5f_1$, $7f_1$,... ตามลำดับ เราสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความถี่การสั่นพ้องกับความยาวของลำอากาศในท่อปลายปิดหนึ่งด้านได้ดังสมการ (12.5)

$$f_n = \frac{nv}{4L} \qquad (12.5)$$

โดย f_n คือ ความถี่การสั่นพ้องซึ่งเป็น n เท่าของความถี่มูลฐาน $f_1 = \frac{v}{4L}$

n คือ จำนวนคี่เท่า มีค่าเป็น $1, 3, 5, \ldots$

v คือ อัตราเร็วเสียงในอากาศ

L คือ ความยาวของลำอากาศในท่อปลายปิดหนึ่งด้าน

จะเห็นว่า ความถี่การสั่นพ้องในท่อปลายปิดหนึ่งด้านจะมีค่าเป็นจำนวนคี่เท่าของความถี่มูลฐาน

ตัวอย่าง 12.7 จากการทดลองเรื่องการสั่นพ้องของเสียงโดยใช้หลอดเรโซแนนซ์ พบว่าเมื่อใช้เสียงความถี่ค่าหนึ่ง จะเกิดการสั่นพ้องสองครั้งถัดกันเมื่อตำแหน่งของลูกสูบอยู่ห่างกัน 0.40 เมตร จงหาความถี่ของเสียงที่ใช้

แนวคิด การสั่นพ้องเกิดเมื่อความถี่ของลำอากาศในท่อเท่ากับความถี่ของแหล่งกำเนิดเสียง โดยตำแหน่งการสั่นพ้องสองครั้งที่เกิดถัดกัน จะอยู่ห่างกันเป็นระยะทางเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นเสียง หรือ $\frac{\lambda}{2}$

วิธีทำ จากโจทย์ $\frac{\lambda}{2} = 0.40\ \text{m}$

$\lambda = 0.80\ \text{m}$

จาก $v = f\lambda$

ดังนั้น $346\ \text{m/s} = f(0.80\ \text{m})$

$f = 432.5\ \text{s}^{-1}$

ตอบ ความถี่ของเสียงที่ใช้เท่ากับ 432.5 เฮิรตซ์

ตัวอย่าง 12.8 ความถี่มูลฐานและฮาร์มอนิกที่สามของท่อปลายปิดหนึ่งด้านที่มีความยาว 0.5 เมตร มีค่าเท่าใด

แนวคิด ความถี่การสั่นพ้องในท่อปลายปิดหนึ่งด้านมีค่าเป็นจำนวนคี่เท่าของความถี่มูลฐาน หรือ

$$f_n = nf_1 = n\left(\frac{v}{4L}\right)$$

วิธีทำ ความถี่มูลฐานคือ f_1 จะได้ $f_1 = (1)\frac{v}{4L}$

$$f_1 = \frac{346\ \text{m/s}}{4(0.5\ \text{m})} = 173\ \text{Hz}$$

ความถี่ฮาร์มอนิกที่สามคือ f_3 จะได้ $f_3 = (3)\frac{v}{4L}$

$$f_3 = \frac{3(346\ \text{m/s})}{4(0.5\ \text{m})} = 519\ \text{Hz}$$

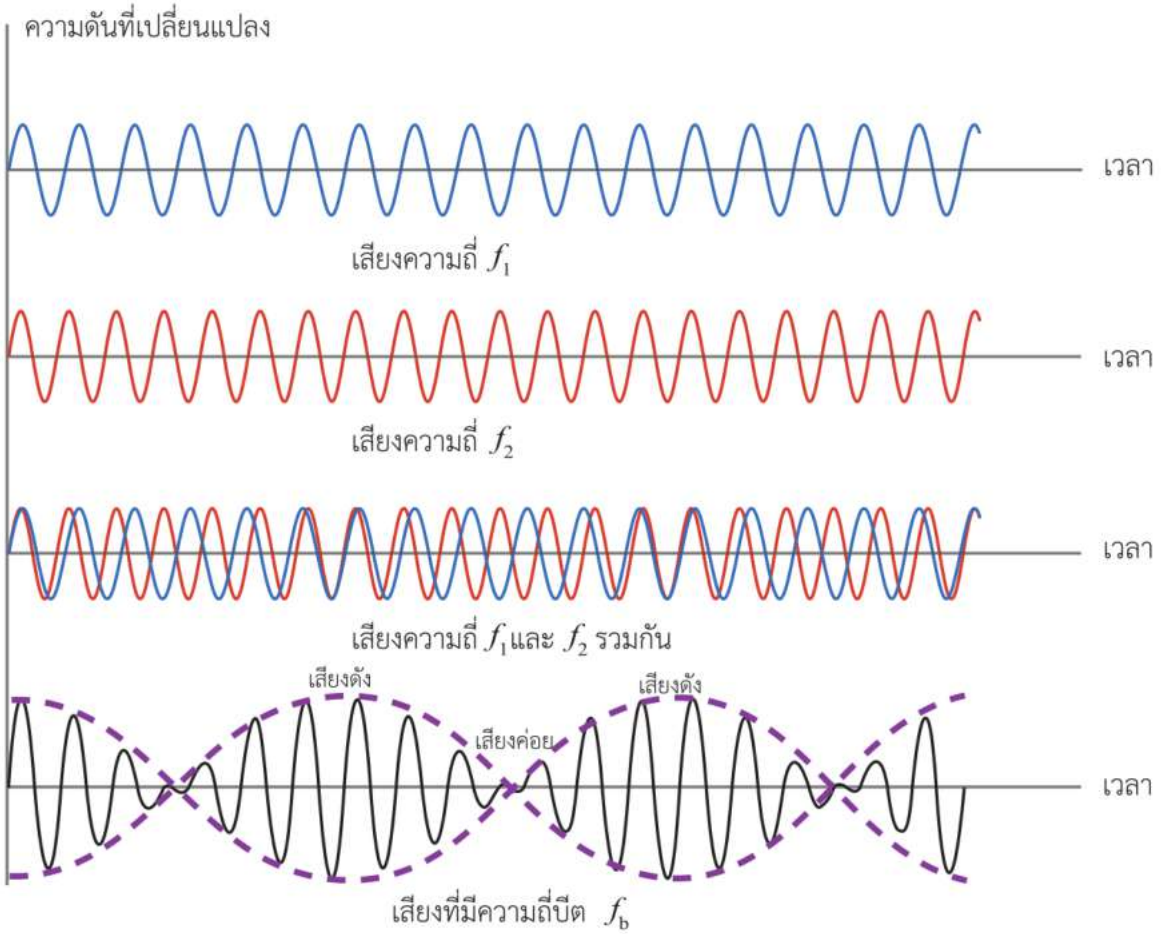
ตอบ ความถี่มูลฐานและฮาร์มอนิกที่สามเท่ากับ 173 เฮิรตซ์ และ 519 เฮิรตซ์ ตามลำดับ

12.3.3 บีต

เมื่อคลื่นเสียงจากแหล่งกำเนิดเสียงสองแหล่งที่มีความต่างกันเล็กน้อยเคลื่อนที่มาพบกัน จะเกิดปรากฏการณ์ที่ได้ยินเสียงดัง-ค่อยสลับกันเป็นจังหวะคงตัว เรียกว่า **บีต** (beats) โดยจำนวนครั้งที่ได้ยินเสียงดัง-ค่อยในหนึ่งวินาที เรียกว่า **ความถี่บีต** (beat frequency) ซึ่งหาได้จากผลต่างของความถี่ของคลื่นเสียงทั้งสอง

$$f_b = |f_1 - f_2| \qquad (12.6)$$

บีตเกิดจากการรวมกันของคลื่นที่มีความถี่ต่างกันเล็กน้อย เช่น การรวมกันของคลื่นเสียงที่มีความถี่ f_1, f_2 เป็นเสียงซึ่งมีความถี่บีต f_b แสดงได้ดังรูป 12.22



รูป 12.22 การรวมกันระหว่างคลื่นจากแหล่งกำเนิดสองแหล่ง เป็นผลให้เกิดเสียงบีต

ถ้าความถี่จากแหล่งกำเนิดทั้งสองต่างกันน้อย เสียงบีตที่ได้ยินจะเป็นจังหวะช้า ๆ แต่ถ้าความถี่จากแหล่งกำเนิดทั้งสองต่างกันมาก เสียงบีตที่ได้ยินจะเป็นจังหวะเร็วขึ้น โดยทั่วไป หูของเราสามารถจำแนกเสียงบีตที่ได้ยินเป็นจังหวะที่มีความถี่ไม่เกิน 7 เฮิรตซ์ เสียงบีตเป็นอย่างไร ศึกษาได้จากกิจกรรมต่อไปนี้

กิจกรรม 12.4 การบีตของเสียง

จุดประสงค์

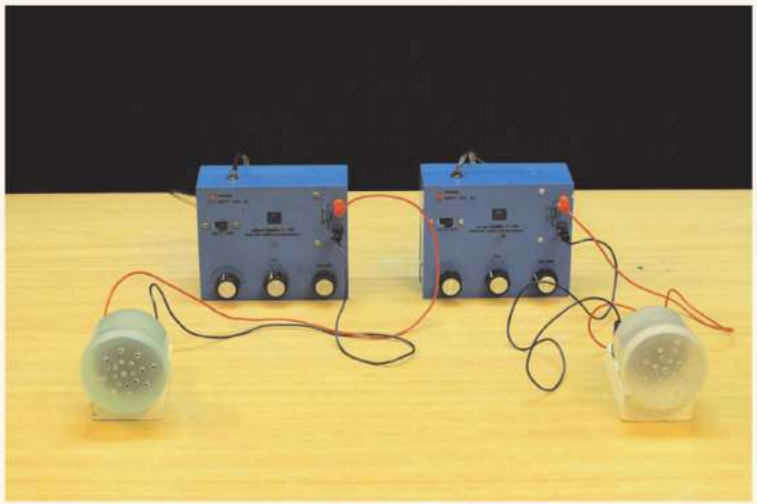
ศึกษาผลของการซ้อนทับระหว่างคลื่นเสียงจากแหล่งกำเนิดเสียง 2 แหล่งที่มีความถี่ต่างกันเล็กน้อย

วัสดุและอุปกรณ์

1. เครื่องกำเนิดสัญญาณเสียง 2 เครื่อง
2. ลำโพง 2 ตัว
3. สายไฟ 4 เส้น

วิธีทำกิจกรรม

1. ต่อเครื่องกำเนิดสัญญาณเสียงเข้ากับลำโพง โดยต่อลักษณะเดียวกันเป็น 2 ชุด ดังรูป



2. หมุนปุ่มเลือกความถี่ของเครื่องกำเนิดสัญญาณเสียงทั้งสองไปที่ 1 กิโลเฮิรตซ์ ปรับความดังของเครื่องกำเนิดสัญญาณเสียงทั้งสองให้พอเหมาะและเท่ากัน
3. ค่อย ๆ หมุนปุ่มปรับความถี่อย่างละเอียดของเครื่องกำเนิดสัญญาณเสียงตัวใดตัวหนึ่งให้มีความถี่ต่างกันเล็กน้อย แล้วรับฟังเสียงที่ด้านหน้าของลำโพงทั้ง 2 ตัว
4. หลังจากนั้นปิดเครื่องกำเนิดสัญญาณเสียงตัวใดตัวหนึ่ง แล้วรับฟังเสียงจากลำโพงที่เหลือเปรียบเทียบกับเสียงที่ได้ยินจากลำโพงทั้งสองตัว

คำถามท้ายกิจกรรม

☐ เสียงที่ได้ยินจากแหล่งกำเนิดเสียงแหล่งเดียวกับเสียงที่ได้ยินจากแหล่งกำเนิดเสียงสองแหล่งที่มีความถี่ต่างกันเล็กน้อย แตกต่างกันอย่างไร

จากกิจกรรม 12.4 เสียงที่ได้ยินจากแหล่งกำเนิดเสียงแหล่งเดียว จะเป็นเสียงดังสม่ำเสมอต่อเนื่องกัน ส่วนเสียงที่ได้ยินจากแหล่งกำเนิดเสียงสองแหล่งที่มีความถี่ต่างกันเล็กน้อย จะเป็นเสียงดังและค่อยสลับกันเป็นจังหวะ เนื่องจากคลื่นเสียงจากแหล่งกำเนิดทั้งสองมารวมกันทำให้เกิดเสียงบีต

ตัวอย่าง 12.9 นักดนตรีทำการปรับเสียงของกีตาร์โดยการเทียบเสียงกับหลอดเทียบเสียงที่มีความถี่ 392 เฮิรตซ์ ได้ยินเสียงดัง-ค่อยเป็นจังหวะ 6 ครั้ง ใน 2 วินาที

ก. ความถี่บีตมีค่าเท่าใด

ข. ความถี่ของเสียงจากกีตาร์มีค่าเท่าใด

แนวคิด ในการปรับเสียงของเครื่องดนตรี ถ้าเสียงจากสายกีตาร์มีความถี่ไม่ตรงกับเสียงจากหลอดเทียบเสียง จะได้ยินเสียงบีตที่มีความถี่ค่าหนึ่ง แสดงว่าเสียงจากสายกีตาร์อาจมีความถี่สูงกว่าหรือต่ำกว่าเสียงจากหลอดเทียบเสียง นักดนตรีต้องปรับความตึงของสายกีตาร์ จนไม่เกิดเสียงบีต แสดงว่าเสียงจากสายกีตาร์มีความถี่ตรงกับความถี่ของหลอดเทียบเสียง

วิธีทำ ก. การปรับเสียงของกีตาร์ เกิดเสียงดัง-ค่อยเป็นจังหวะ 6 ครั้ง ใน 2 วินาที หรือ 3 ครั้งต่อวินาที ดังนั้นความถี่บีตเท่ากับ 3 ครั้งต่อวินาที หรือ 3 เฮิรตซ์

ข. จาก $$f_b = |f_1 - f_2|$$

ให้ f_1 เป็นความถี่ของเสียงจากหลอดเทียบเสียง

f_2 เป็นความถี่ของเสียงจากสายกีตาร์

f_b เป็นความถี่บีตเท่ากับ 3 Hz

$$3\ \text{Hz} = |392\ \text{Hz} - f_2|$$

f_2 มี 2 ค่า คือ $f_2 = 392\ \text{Hz} - 3\ \text{Hz} = 389\ \text{Hz}$

หรือ $f_2 = 392\ \text{Hz} + 3\ \text{Hz} = 395\ \text{Hz}$

$f_2 = 389\ \text{Hz}$ หรือ $395\ \text{Hz}$

ตอบ ก. ความถี่บีตเท่ากับ 3 เฮิรตซ์

ข. ความถี่ของเสียงจากกีตาร์มีค่าเท่ากับ 389 เฮิรตซ์ หรือ 395 เฮิรตซ์

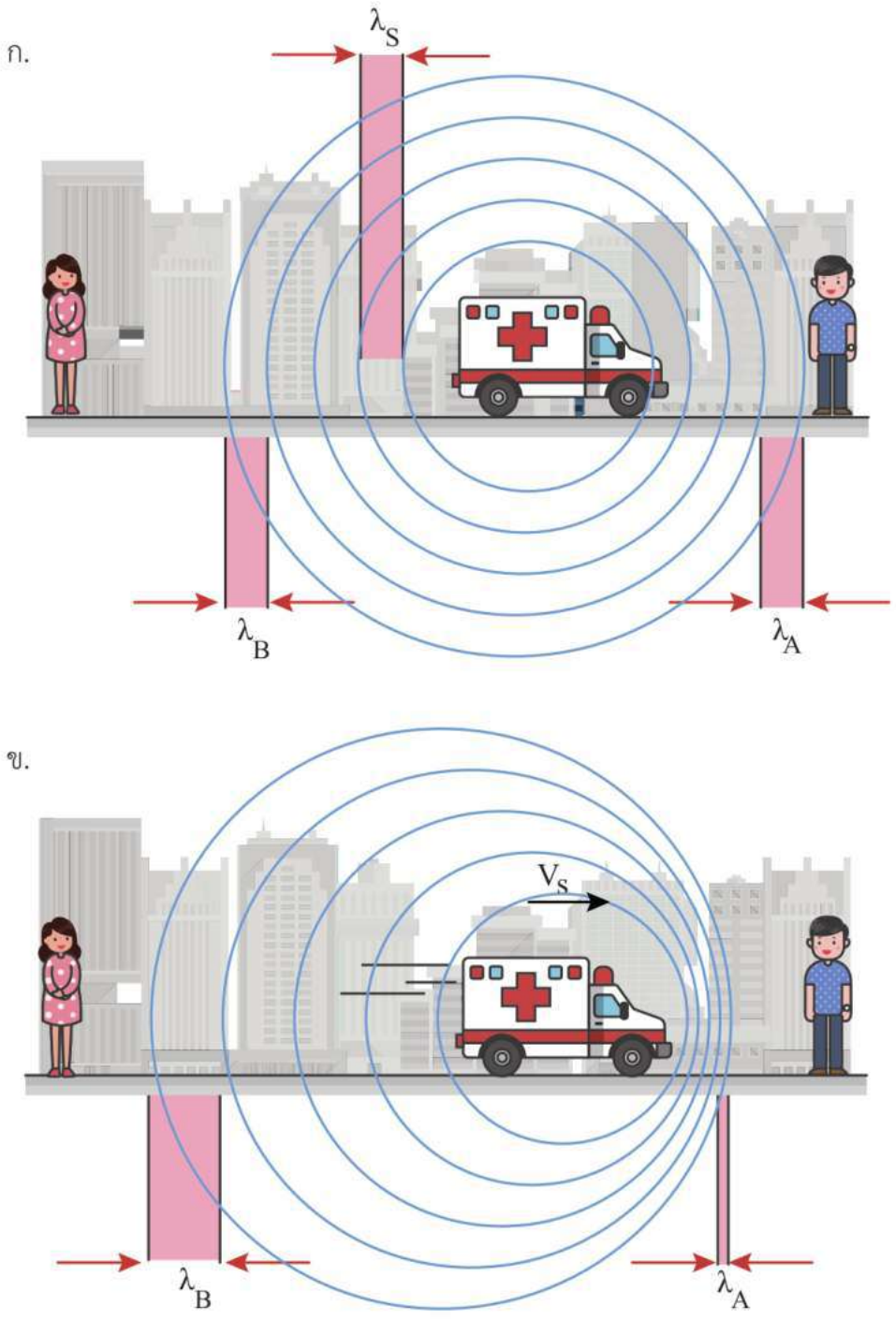
12.3.4 ปรากฏการณ์ดอปเพลอร์

เคยสังเกตหรือไม่ว่า ขณะที่รถพยาบาลหรือรถกู้ภัยที่เปิดไซเรนและเคลื่อนที่เข้าหาหรือออกจากเรา เสียงไซเรนที่ได้ยินจากรถจะมีความถี่เปลี่ยนไป การที่เราได้ยินเสียงจากแหล่งกำเนิดเสียงมีความถี่เปลี่ยนไปจากเดิมเนื่องจากการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างแหล่งกำเนิดเสียงและผู้สังเกต เรียกว่า **ปรากฏการณ์ดอปเพลอร์** (Doppler effect) ซึ่งสามารถแบ่งการพิจารณาออกเป็น 3 กรณี คือ

1. แหล่งกำเนิดเสียงเคลื่อนที่ ผู้สังเกตอยู่นิ่ง
2. แหล่งกำเนิดเสียงอยู่นิ่ง ผู้สังเกตเคลื่อนที่
3. แหล่งกำเนิดเสียงและผู้สังเกตเคลื่อนที่

แหล่งกำเนิดเสียงเคลื่อนที่ ผู้สังเกตอยู่นิ่ง

พิจารณาสถานการณ์รถพยาบาลเปิดไซเรนและอยู่นิ่ง ต่อมารถพยาบาลเคลื่อนที่แต่ผู้สังเกตอยู่นิ่ง ดังรูป 12.23



รูป 12.23 ก. รถพยาบาลและผู้สังเกตอยู่นิ่ง
ข. รถพยาบาลเคลื่อนที่ โดยผู้สังเกตอยู่นิ่ง

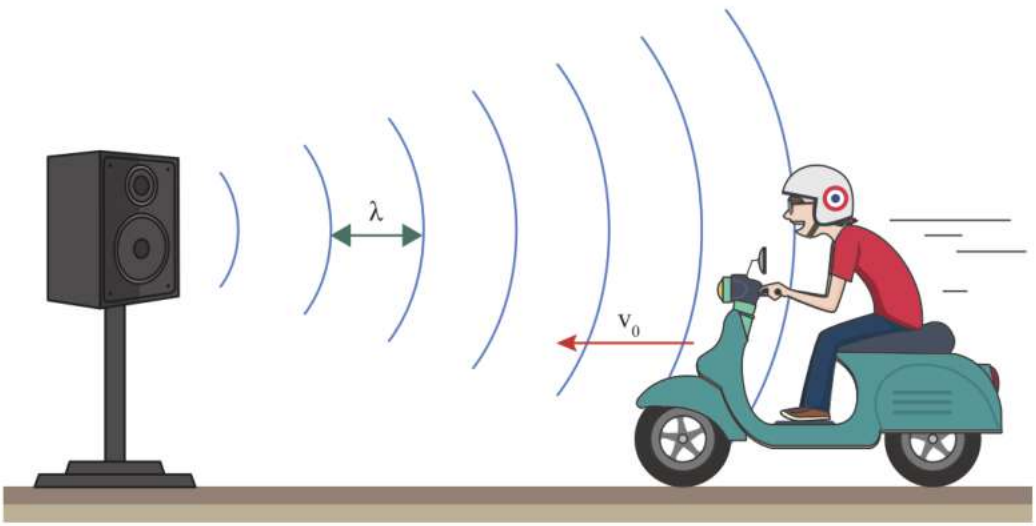
ขณะรถพยาบาลอยู่นิ่งส่งเสียงไซเรนที่มีความถี่คงตัวค่าหนึ่งออกมา ความยาวคลื่นของเสียงที่ผู้สังเกตทั้งสองได้รับมีค่าเท่ากันและเท่ากับความยาวคลื่นเสียงไซเรน ดังรูป 12.23 ก. ($\lambda_B = \lambda_A = \lambda_S$) จากนั้นรถพยาบาลเคลื่อนที่ออกจากผู้สังเกต B และเข้าหาผู้สังเกต A ด้วยอัตราเร็วคงตัว โดยผู้สังเกตทั้งสองอยู่นิ่ง ความยาวคลื่นของเสียงที่ผู้สังเกต B ได้รับจะมากกว่าความยาวคลื่นของเสียงไซเรน และ

ความยาวคลื่นของเสียงไซเรนจะมากกว่าความยาวคลื่นที่ผู้สังเกต A ได้รับ ดังรูป 12.23 ข. $(\lambda_B > \lambda_S > \lambda_A)$ และเนื่องจากอัตราเร็วเสียงที่เคลื่อนที่เข้าหาผู้สังเกตทั้งสองคนเท่ากัน ผู้สังเกต A จึงได้ยินเสียงที่มีความถี่มากกว่าความถี่เสียงของแหล่งกำเนิดเสียง ในขณะที่ผู้สังเกต B จะได้ยินเสียงที่มีความถี่น้อยกว่าความถี่เสียงของแหล่งกำเนิดเสียง $(f_A > f_S > f_B)$

ดังนั้น เมื่อแหล่งกำเนิดเสียงเคลื่อนที่เข้าหาผู้สังเกต ผู้สังเกตจะได้ยินเสียงที่มีความถี่มากขึ้น แต่เมื่อแหล่งกำเนิดเสียงเคลื่อนที่ออกจากผู้สังเกต ผู้สังเกตจะได้ยินเสียงที่มีความถี่น้อยลง

แหล่งกำเนิดเสียงอยู่นิ่ง แต่ผู้สังเกตเคลื่อนที่

เมื่อพิจารณาสถานการณ์ซึ่งแหล่งกำเนิดเสียงอยู่นิ่ง แต่ผู้สังเกตเคลื่อนที่ ดังรูป 12.24



รูป 12.24 แหล่งกำเนิดเสียงอยู่นิ่ง แต่ผู้สังเกตเคลื่อนที่

แหล่งกำเนิดเสียงที่อยู่นิ่ง ส่งเสียงซึ่งมีความถี่คงตัวค่าหนึ่งออกมา ถ้าผู้สังเกตเคลื่อนที่เข้าหาแหล่งกำเนิดเสียงด้วยอัตราเร็วคงตัว จะพบจำนวนหน้าคลื่นเสียงในหนึ่งหน่วยเวลาเพิ่มขึ้น ผู้สังเกตจึงได้ยินเสียงมีความถี่มากกว่าความถี่เสียงที่แหล่งกำเนิดแผ่ออกมา

แต่ถ้าผู้สังเกตเคลื่อนที่ออกห่างจากแหล่งกำเนิดเสียงด้วยอัตราเร็วคงตัว จะพบจำนวนหน้าคลื่นเสียงในหนึ่งหน่วยเวลาลดลง ผู้สังเกตจึงได้ยินเสียงมีความถี่น้อยกว่าความถี่เสียงที่แหล่งกำเนิดแผ่ออกมา

ดังนั้น เมื่อแหล่งกำเนิดเสียงอยู่นิ่ง ผู้สังเกตที่เคลื่อนที่เข้าหาแหล่งกำเนิดเสียงจะได้ยินเสียงที่มีความถี่มากขึ้น แต่ผู้สังเกตที่เคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิดเสียงจะได้ยินเสียงที่มีความถี่น้อยลง

แหล่งกำเนิดเสียงและผู้สังเกตเคลื่อนที่

จากกรณีข้างต้นทั้งสอง อาจกล่าวได้ว่า เมื่อแหล่งกำเนิดเสียงและผู้สังเกตเคลื่อนที่เข้าหากัน ผู้สังเกตจะได้ยินเสียงที่มีความถี่มากขึ้น แต่ถ้าแหล่งกำเนิดเสียงและผู้สังเกตเคลื่อนที่ออกจากกัน ผู้สังเกตจะได้ยินเสียงที่มีความถี่น้อยลง

ชวนคิด

1. ความถี่ของเสียงที่ผู้สังเกตได้ยินในกรณีต่อไปนี้จะมากขึ้น เท่าเดิม หรือลดลง เพราะเหตุใด
   (ก) เมื่อผู้สังเกตเคลื่อนที่อยู่ด้านหน้าของแหล่งกำเนิดเสียง โดยเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกัน
   (ข) เมื่อผู้สังเกตเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกับแหล่งกำเนิดเสียงแต่ตามหลังแหล่งกำเนิด
2. แหล่งกำเนิดเสียงและผู้สังเกตอยู่นิ่ง ถ้ามีลมพัดด้วยอัตราเร็วสม่ำเสมอจากผู้สังเกตเข้าหาแหล่งกำเนิดเสียง จะเกิดปรากฏการณ์ดอปเพลอร์หรือไม่ เพราะเหตุใด

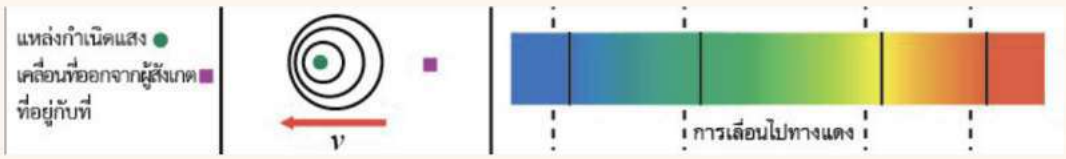
ปรากฏการณ์ดอปเพลอร์นี้ใช้ในระบบเรดาร์ของตำรวจเพื่อวัดอัตราเร็วของรถ นอกจากนั้นยังสามารถใช้ปรากฏการณ์นี้เพื่อตรวจวัดอัตราเร็วของดาวฤกษ์ หรือกาแล็กซี ได้อีกด้วย

รู้หรือไม่

เรดาร์ (radar : radio detection and ranging) เป็นระบบที่ใช้คลื่นวิทยุในการตรวจหาตำแหน่ง ทิศทางและอัตราเร็วของวัตถุที่กำลังเคลื่อนที่ เช่น เครื่องบิน เรือ ขีปนาวุธ รถ รวมทั้งพายุที่กำลังก่อตัว โดยเครื่องส่งของเรดาร์ปล่อยคลื่นวิทยุที่ทราบความถี่ (เรียกว่าสัญญาณเรดาร์) ในทิศทางที่คาดว่ามีวัตถุที่กำลังตรวจหา เมื่อคลื่นวิทยุไปกระทบวัตถุ คลื่นจะสะท้อนกลับไปยังเครื่องรับ ซึ่งไม่จำเป็นต้องอยู่ที่เดียวกับเครื่องส่ง สัญญาณเรดาร์จะสะท้อนได้ดีกับวัตถุที่เป็นโลหะ โดยคลื่นที่รับได้จะมีความถี่เปลี่ยนไปเล็กน้อย ตามหลักการของปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ ความถี่ที่เปลี่ยนไป (Δf) มีความสัมพันธ์กับอัตราเร็ว (v) ของวัตถุ ทำให้สามารถวิเคราะห์ได้ว่า วัตถุนั้นอยู่ที่ตำแหน่งใด กำลังเคลื่อนที่ไกลออกไปหรือใกล้เข้ามาในทิศทางใด และมีอัตราเร็วเท่าใด หลักการเรดาร์ยังใช้ได้กับ**โซนาร์** (sonar : sound navigation and ranging) ซึ่งใช้คลื่นเหนือเสียง

ความรู้เพิ่มเติม

การศึกษาทางดาราศาสตร์ เอ็ดวิน ฮับเบิล (Edwin P Hubble) ได้ศึกษาสเปกตรัมของแสงจากดาวฤกษ์ในกาแล็กซีอื่น เขาพบว่า สเปกตรัมของแสงมีการเลื่อนไปทางด้านที่ความยาวคลื่นมากขึ้น (ความถี่ลดลง) หรือ **การเลื่อนไปทางแดง** (red shift) ดังรูป

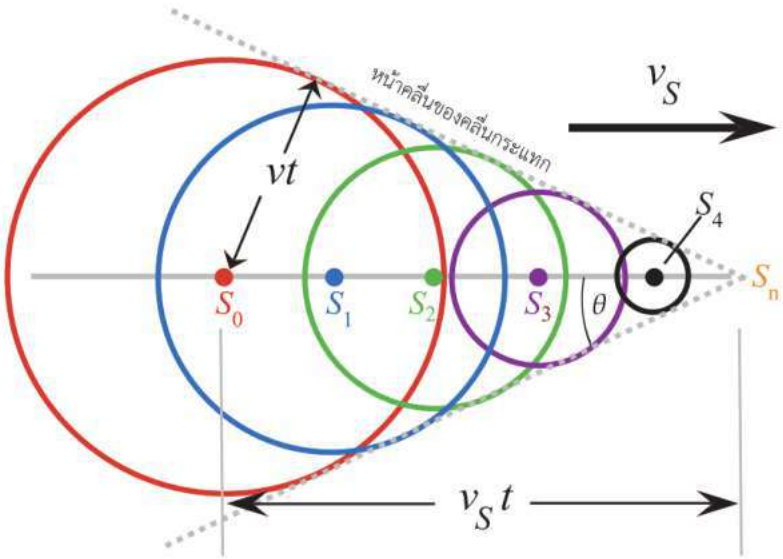


รูป การเลื่อนไปทางแดง

ซึ่งผลนี้เกิดจากปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ ความยาวคลื่นที่เปลี่ยนไป (เพิ่มขึ้น) มีความสัมพันธ์กับอัตราเร็วของกาแล็กซี่ ทำให้เขาหาอัตราเร็วของกาแล็กซีได้ และสรุปว่า กาแลกซีทั้งหลายกำลังเคลื่อนที่ห่างจากเราด้วยอัตราเร็วสูง การค้นพบนี้สำคัญมาก เพราะเป็นหลักฐานที่แสดงว่า เอกภพกำลังขยายตัว

คลื่นกระแทก

จากที่ผ่านมา เราได้ศึกษาการเคลื่อนที่ของแหล่งกำเนิดเสียงที่มีอัตราเร็วน้อยกว่าอัตราเร็วเสียงในอากาศ จะเกิดอะไรขึ้นถ้าแหล่งกำเนิดเสียงเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว (v_S) ที่มากกว่าอัตราเร็วเสียงในอากาศ (v)



รูป 12.25 แนวหน้าคลื่นเมื่อแหล่งกำเนิดเสียงเคลื่อนที่เร็วกว่าเสียง

พิจารณารูป 12.25 แสดงหน้าคลื่นที่แผ่ออกจากแหล่งกำเนิดด้วยอัตราเร็ว v วงกลมสีแดงแทนหน้าคลื่นที่แผ่ออกจากแหล่งกำเนิดเสียง ณ เวลาเริ่มต้น ที่ตำแหน่ง S_0 ในช่วงเวลา t หน้าคลื่นจะเคลื่อนที่ได้ระยะทาง vt ในขณะเดียวกัน แหล่งกำเนิดเสียงซึ่งเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว v_S จะเคลื่อนที่ได้ระยะทาง $v_S t$ และจะไปอยู่ที่ตำแหน่ง S_n ทั้งนี้ แหล่งกำเนิดเสียงจะแผ่คลื่นออกมาตลอดเวลาระหว่างที่เคลื่อนที่จากตำแหน่ง S_0 ไปยังตำแหน่ง S_n โดยเมื่อแหล่งกำเนิดเสียงอยู่ที่ตำแหน่ง $S_0, S_1, S_2, \ldots, S_n$ จะแผ่คลื่นออกมาโดยหน้าคลื่นที่ตำแหน่งเหล่านั้นจะเคลื่อนที่จากแหล่งกำเนิดเสียง แทนด้วยวงกลมที่มี $S_0, S_1, S_2, \ldots, S_n$ เป็นศูนย์กลางตามลำดับ ที่ตำแหน่ง S_n แหล่งกำเนิดยังไม่แผ่คลื่นออกมา จึงมีลักษณะเป็นจุด เมื่อลากเส้นสัมผัสหน้าคลื่นจากตำแหน่ง S_n ไปยังหน้าคลื่นที่ศูนย์กลางวงกลมอยู่ที่ S_0 ได้เป็นแนวหน้าคลื่นอัดตัวกัน เรียกว่าหน้าคลื่นของ**คลื่นกระแทก** (shock wave) โดยแนวหน้าคลื่นกระแทกทำมุมกับแนวการเคลื่อนที่ของแหล่งกำเนิดเป็นมุม เรียกว่า**มุมมัค** (Mach angle)

ความรู้เพิ่มเติม

เลขมัค (Mach number) เป็นอัตราส่วนระหว่างอัตราเร็วของแหล่งกำเนิดเสียงต่ออัตราเร็วเสียงในตัวกลาง หรือ

$$\text{Mach number} = \frac{v_s}{v}$$

นั่นคือ ถ้า $v_s > v$ หรือแหล่งกำเนิดเคลื่อนที่ด้วย**อัตราเร็วเหนือเสียง** (supersonic speed) จะเกิดคลื่นกระแทก

จากรูป 12.26 สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างเลขมัคและมุมมัคได้ดังสมการ

$$\sin\theta = \frac{vt}{v_s t} = \frac{v}{v_s} = \frac{1}{\text{mach number}}$$

เครื่องบินที่บินด้วยอัตราเร็วเหนือเสียงจะเกิดคลื่นกระแทก และจะทำให้เกิดเสียงดังที่เรียกว่า **ซอนิกบูม** (sonic boom) ดังรูป 12.26 ก. ตัวอย่างคลื่นกระแทกในชีวิตประจำวัน เช่น เรือที่เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วมากกว่าอัตราเร็วของคลื่นผิวน้ำ ดังรูป 12.26 ข.

รูป 12.26 ก. ซอนิกบูมจากเครื่องบินที่เคลื่อนที่เร็วเหนือเสียง

12.26 ข. คลื่นกระแทกจากเรือที่เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วมากกว่าอัตราเร็วของคลื่นผิวน้ำ

คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 12.3

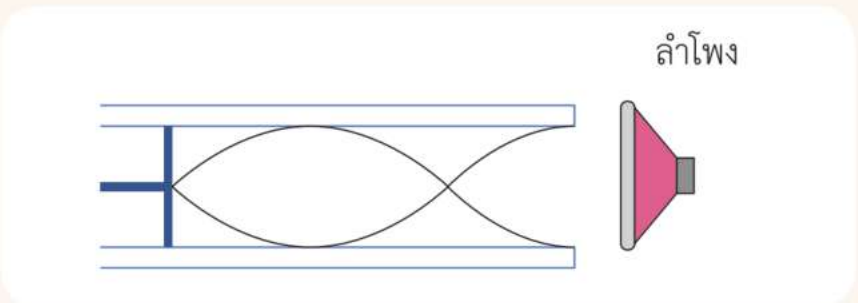
1. การสั่นพ้องของเสียงเกิดขึ้นได้อย่างไร
2. แหล่งกำเนิดเสียงสองตัวให้เสียงความถี่ 438 และ 440 เฮิรตซ์ พร้อมกัน จะเกิดปรากฏการณ์ใดของเสียง
3. เรือลำหนึ่งกำลังแล่นเข้าหาหน้าผา กัปตันเรือเปิดหวูดส่งสัญญาณเสียงด้วยความถี่คงตัว โดยเปิดสัญญาณอย่างต่อเนื่อง พบว่า ผู้ฟังบนเรือได้ยินเสียงบีต เพราะเหตุใด
4. เด็กคนหนึ่งยืนที่ป้ายรถเมล์ ได้ยินเสียงไซเรนของรถพยาบาลซึ่งกำลังแล่นบนถนนตรงมายังตนเองด้วยอัตราเร็วคงตัว จนกระทั่งผ่านไป จงเปรียบเทียบความถี่เสียงปรากฏต่อเด็กกับความถี่เสียงไซเรน

   ก. ขณะที่รถยังไม่ผ่านเด็ก ข. ขณะที่รถกำลังผ่านเด็ก ค. ขณะที่รถผ่านเด็กไปแล้ว

แบบฝึกหัด 12.3

ข้อตกลง
ในกรณีที่ไม่ได้กำหนดเป็นค่าอื่น ให้อัตราเร็วเสียงในอากาศเท่ากับ 346 เมตรต่อวินาที

1. ท่อปลายปิดหนึ่งด้าน เกิดการสั่นพ้องกับลำโพงที่ความถี่ 2400 เฮิรตซ์ เกิดคลื่นนิ่งของเสียงในท่อ ดังรูป



   ความถี่มูลฐานที่จะทำให้เกิดการสั่นพ้องได้มีค่าเท่าใด
2. ส้อมเสียงสามอันมีความถี่ 396 เฮิรตซ์ 400 เฮิรตซ์ และ 403 เฮิรตซ์ ส้อมเสียงชุดนี้ทำให้เกิดความถี่บีตกี่ค่า เท่าใดบ้าง
3. นักดนตรีไทยสองคนกำลังเปรียบเทียบขลุ่ย ขลุ่ยเลาแรกให้เสียงที่มีความถี่ 353 เฮิรตซ์ เมื่อ

เป่าขลุ่ยทั้งสองพร้อมกัน ปรากฏว่าเกิดเสียงดังค่อยเป็นจังหวะ 2 ครั้งต่อวินาที เสียงจากขลุ่ยเลาที่สองมีค่าความถี่เท่าใด

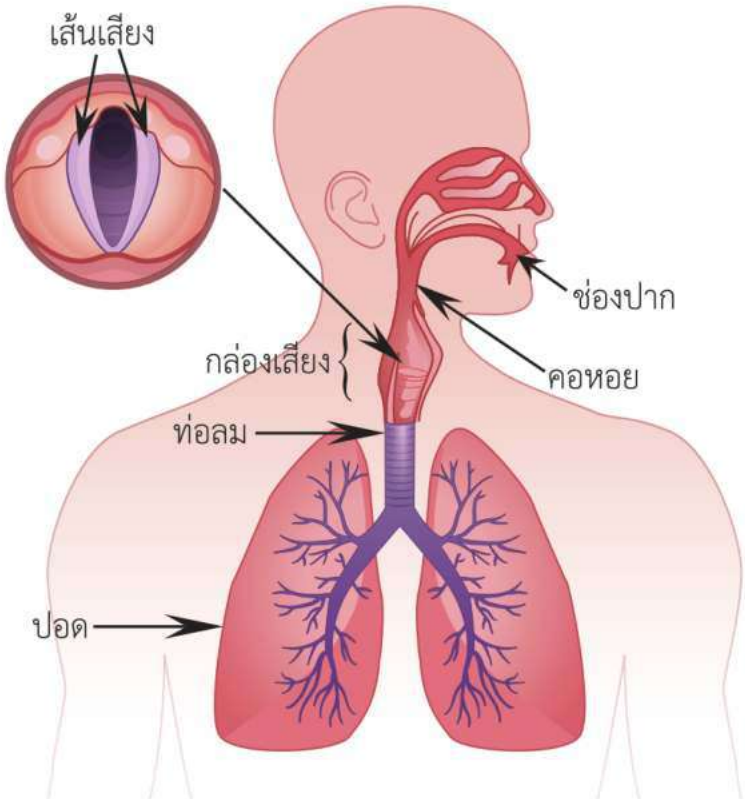
4. จงหาความถี่มูลฐานและความถี่ฮาร์มอนิกที่สามของขวดที่สูง 0.20 เมตร
5. ท่อปลายปิดหนึ่งด้านให้เสียงฮาร์มอนิกที่ห้ามีความถี่ 1250 เฮิรตซ์ ท่อนี้ยาวเท่าใด
6. ท่อทรงกระบอกปลายปิดข้างหนึ่งยาว 2.40 เมตร ถ้าเสียงมีอัตราเร็ว 343 เมตรต่อวินาที เสียงจากท่อนี้จะมีความถี่ต่ำสุดเท่าใด
7. ในการทดลองการสั่นพ้องของอากาศ ขณะเกิดการสั่นพ้องครั้งแรก ลูกสูบอยู่ห่างจากปากหลอดเรโซแนนซ์ 18 เซนติเมตร และเมื่อเกิดการสั่นพ้องครั้งถัดไปจะต้องดึงลูกสูบห่างจากปากหลอดเรโซแนนซ์กี่เซนติเมตร
8. นักดนตรีผู้หนึ่งดีดกีตาร์ทำให้เกิดเสียงความถี่ f ขณะเดียวกับที่มีเสียงออกมาจากแหล่งกำเนิดเสียงอื่น ทำให้เกิดการบีตมีความถี่ 5 เฮิรตซ์ เมื่อเขาปรับความถี่ของเสียงจากสายกีตาร์ลดลงเป็น 329.6 เฮิรตซ์ ปรากฏว่าได้ยินเสียงที่มีระดับสูงต่ำของเสียงเดียวกัน จงหาความถี่ f
9. หลอดแก้วรูปทรงกระบอกปลายปิดข้างหนึ่งถ้านำมาใส่น้ำให้มีระดับต่าง ๆ กันแล้วนำส้อมเสียงที่กำลังสั่นให้เกิดเสียงไปไว้ใกล้ปากหลอดจะพบว่ามีความสูงของน้ำในหลอดแก้ว 2 ค่าที่ทำให้เกิดเสียงดังกว่าเดิม ครั้งแรกมีน้ำในหลอดแก้วสูง 12 เซนติเมตร ครั้งที่ 2 มีน้ำในหลอดแก้วสูง 37 เซนติเมตร ถ้าส้อมเสียงสั่นด้วยความถี่ 682 เฮิรตซ์ อัตราเร็วเสียงในอากาศ ขณะนั้นมีค่าเท่าใด

12.4 การประยุกต์ใช้ความรู้เรื่องเสียง

ในชีวิตประจำวันของเรา มีการนำเสียงมาใช้ทั้งในการสื่อสาร และทำกิจกรรมต่าง ๆ เช่น การร้องเพลง การเล่นดนตรี การสนทนา การเรียนการสอนเป็นต้น ซึ่งเป็นเสียงที่มีความถี่อยู่ในช่วงเฉลี่ยประมาณ 20 - 20000 เฮิรตซ์ และระดับเสียงในช่วง 0 - 120 เดซิเบล นอกจากนี้เสียงยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้ประโยชน์ในด้านอื่น ๆ ได้ เช่น ด้านการเดินเรือและการประมง ด้านการแพทย์ เป็นต้น

การเปล่งเสียงของมนุษย์

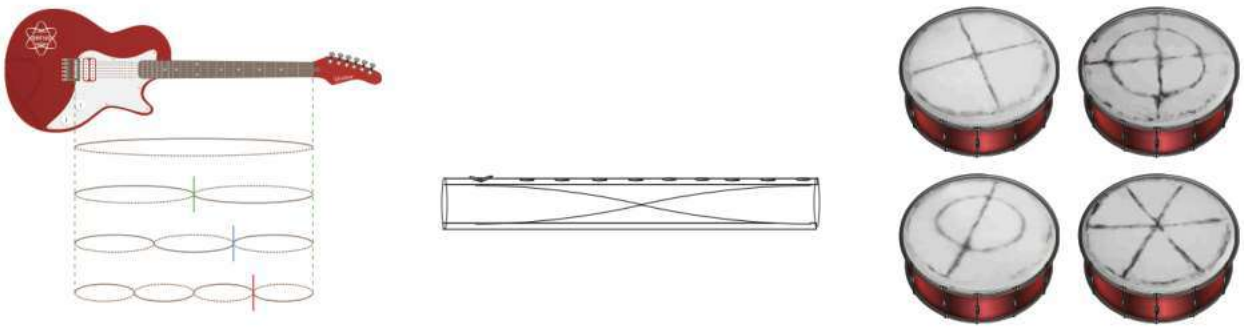
การเปล่งเสียงของมนุษย์เกิดจากการทำงานร่วมกันของอวัยวะหลายส่วน โดยลมที่ออกมาจากปอดจะผ่าน**ท่อลม** (trachea) **กล่องเสียง** (voice box หรือ larynx) **คอหอย** (throat หรือ pharynx) **ช่องปาก** (oral cavity) ซึ่งกล่องเสียงเป็นอวัยวะที่ทำให้เกิดเสียง ภายในมี**เส้นเสียง** (vocal cords) ที่ขึงอยู่ตรงกลางกล่องเสียง เมื่อลมผ่านเส้นเสียงจะสั่นสะเทือนเกิดเป็นเสียงสูงต่ำ ดังรูป 12.27



รูป 12.27 อวัยวะในการเปล่งเสียงของมนุษย์

การทำงานของเครื่องดนตรี

เครื่องดนตรี (musical instruments) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแสดงโดยให้เสียงที่มีความถี่และคุณภาพเสียงที่แตกต่างกันตามแต่ละประเภท เครื่องดนตรีอาจถูกแบ่งได้เป็น **เครื่องสาย** (stringed instruments หรือ chordophones) เช่น กีตาร์ ซอ **เครื่องเป่า** (wind instruments หรือ aerophones) เช่น ขลุ่ย แคน **เครื่องตี** (percussion instruments หรือ idiophones/membranophones) เช่น กลองระนาด แต่การเกิดเสียงของเครื่องดนตรีทุกประเภท เกิดจากการสั่นของตัวกลางหรือแหล่งกำเนิดที่มีลักษณะเป็นคลื่นนิ่ง เช่น การเกิดเสียงของกีตาร์มาจากคลื่นนิ่งที่เกิดจากการสั่นของสายกีตาร์ การเกิดเสียงของขลุ่ยมาจากคลื่นนิ่งของลำอากาศภายในขลุ่ยซึ่งมีลักษณะเป็นท่อปลายเปิด หรือการเกิดเสียงของกลองมาจากคลื่นนิ่งที่เกิดจากการสั่นของแผ่นหนังที่ขึงอยู่บนหน้ากลอง ดังรูป 12.28



ก. ข. ค.

รูป 12.28 คลื่นนิ่งบนแหล่งกำเนิดจาก ก. สายกีตาร์ ข. ลำขลุ่ย ค. หนังกลอง

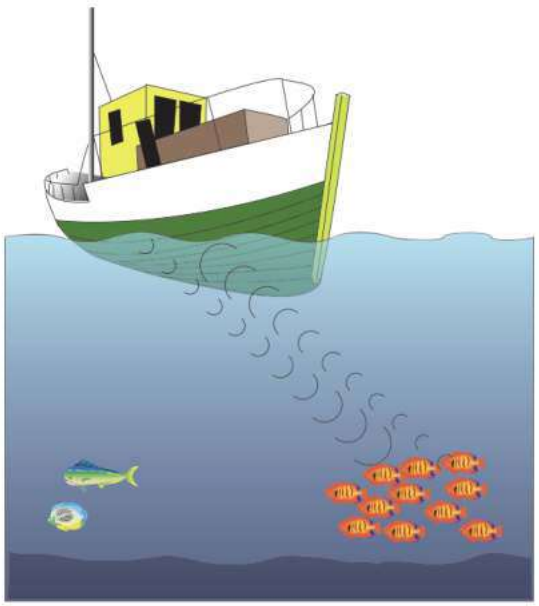
การปรับเทียบเสียงเครื่องดนตรี

นักดนตรีนำความรู้เรื่องบีตมาประยุกต์ใช้ในการปรับเสียงของเครื่องดนตรีประเภทเครื่องสาย เช่น กีตาร์ ไวโอลิน โดยการเทียบเสียงจากหลอดเทียบเสียงที่มีความถี่มาตรฐาน และทำให้เสียงที่มาจากไวโอลินดังพร้อม ๆ กับเสียงจากหลอดเทียบเสียงมาตรฐาน ดังรูป12.29 หากยังได้ยินเสียงบีต แสดงว่าความถี่ของสายไวโอลินเส้นนั้นยังไม่เท่ากับความถี่ของเสียงที่ต้องการจากหลอดเทียบเสียง ต้องปรับความตึงของสายไวโอลินให้พอเหมาะ จนกระทั่งไม่เกิดบีต ความถี่ในการสั่นของสายไวโอลินจะมีค่าเท่ากับความถี่จากหลอดเทียบเสียง นั่นเอง

รูป 12.29 หลอดเทียบเสียงไวโอลิน

การเดินเรือและการประมง

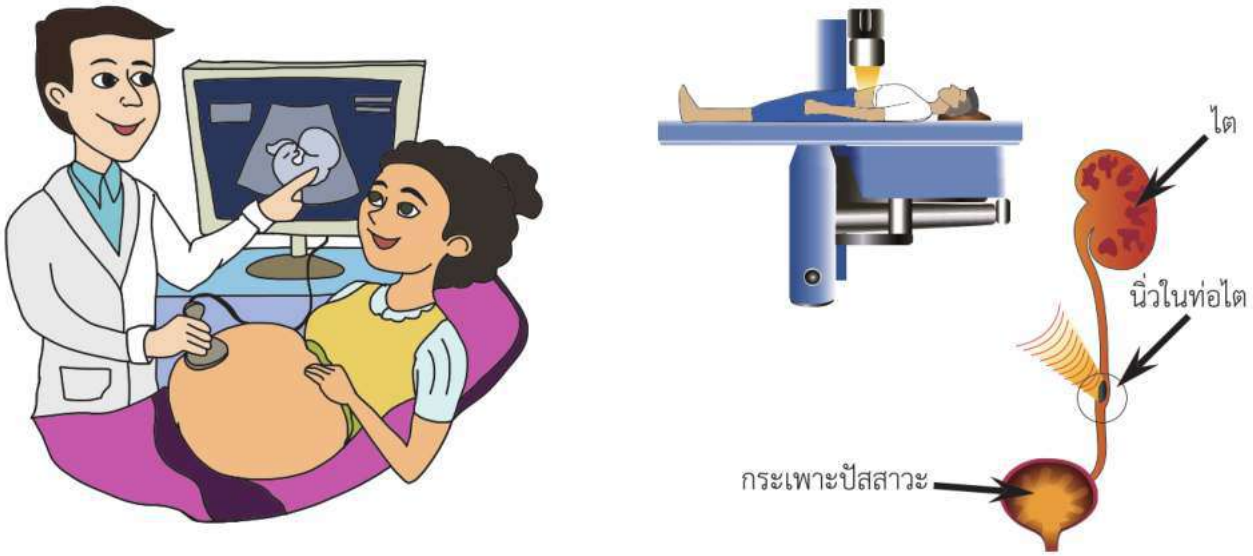
คลื่นเสียงความถี่สูงจากเครื่องโซนาร์ ถูกนำมาใช้ในการระบุตำแหน่งของวัตถุในการเดินเรือหรือการประมง เป็นระบบที่ใช้การสะท้อนคลื่นเสียงใต้น้ำ คลื่นเสียงถูกปล่อยออกไปสู่ก้นทะเลเมื่อไปกระทบสิ่งกีดขวางก็จะสะท้อนกลับมาที่ตัวรับสัญญาณบนเรือแล้วแปลผลประมาณขนาด รูปร่าง ระยะห่าง และความลึกของวัตถุใต้น้ำ หรือเรือประมงสามารถค้นพบฝูงปลา ดังรูป 12.30



รูป 12.30 การใช้คลื่นเสียงด้านการประมง

ด้านการแพทย์

คลื่นเสียงความถี่สูงที่เรียกว่า คลื่นอัลตราซาวด์ ถูกมาใช้ในการตรวจร่างกายคนไข้โดยส่งคลื่นอัลตราซาวด์เข้าไปในบริเวณที่ต้องการตรวจ โดยการสะท้อนของคลื่นจากอวัยวะเป้าหมาย หรือเนื้อเยื่อสามารถนำมาแปลผลฉายภาพขึ้นจอ เพื่อตรวจดูทารกในครรภ์ ดังรูปที่ 12.31 ก. นอกจากนี้คลื่นอัลตราซาวด์ยังสามารถใช้สลายนิ่วในท่อไต ดังรูปที่ 12.31 ข. ซึ่งเป็นส่วนประกอบของแคลเซียม หรือแร่ธาตุในไต ในอดีตแพทย์จะผ่าตัดเพื่อนำก้อนนิ่วออกมา แต่ในปัจจุบันรักษาได้ด้วยการใช้คลื่นอัลตราซาวด์ทำให้นิ่วแตกสลายเป็นชิ้นเล็ก ๆ และขับออกจากร่างกายโดยการปัสสาวะ



รูป 12.31 ก. การใช้คลื่นอัลตราซาวด์ในการตรวจครรภ์ ข. การใช้คลื่นอัลตราซาวด์ในการสลายนิ่วในท่อไต

ด้านธรณีวิทยา

การใช้คลื่นเสียงที่มีความถี่ในช่วง 1- 3 กิโลเฮิรตซ์ ในการสำรวจ**ปิโตรเลียม** (petroleum) ที่สะสมตัวอยู่ใต้พื้นดินด้วยการวิเคราะห์ข้อมูลจากลำดับชั้นหินบริเวณหลุมเจาะสำรวจ การเก็บข้อมูลจะทำโดยการหย่อนหัววัดลงไปในหลุมสำรวจ หนึ่งในหัววัดที่ใช้คือ **หัววัดคลื่นเสียง** (acoustic log หรือ sonic log) ซึ่งจะส่งคลื่นเสียงผ่านชั้นหิน ชั้นหินที่มีความหนาแน่นต่างกัน ทำให้คลื่นเสียงเดินทางผ่านด้วยความเร็วที่ไม่เท่ากัน เมื่อเก็บข้อมูลได้จะนำไปวิเคราะห์เพื่อหาค่า**ความพรุน** (porosity) ของชั้นหินนั้น เพื่อนำไปคำนวณหาปริมาณปิโตรเลียมที่สะสมตัวอยู่ในชั้นหิน

ด้านวิศวกรรมและอุตสาหกรรม

การใช้คลื่นเหนือเสียงในการตรวจสอบรอยร้าวหรือรอยตำหนิในเนื้อโลหะ แก้ว หรือเซรามิก โดยการส่งคลื่นเสียงในช่วงความถี่ 500 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 15 เมกะเฮิรตซ์ ผ่านเข้าไปในชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบแล้ววิเคราะห์ลักษณะของคลื่นสะท้อนกลับ หรือวิเคราะห์ลักษณะการรบกวนที่เกิดขึ้นต่อคลื่นที่ผ่านออกไป วิธีการนี้นอกจากจะใช้ตรวจสอบชิ้นงานประเภทโลหะหล่อหรือเซรามิกแล้ว ยังถูกนำไปใช้ตรวจสอบยางรถยนต์ที่ผลิตใหม่อีกด้วย เครื่องมือวัดความหนาของแผ่นโลหะหรือวัสดุที่มีความแข็งอื่น ๆ สามารถทำได้โดยใช้คลื่นเหนือเสียง แม้ว่าจะไม่สามารถเข้าถึงอีกด้านหนึ่งของผิวแผ่นโลหะนั้นได้ เช่น การตรวจสอบความหนาของหม้อต้มน้ำความดันสูงสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น

คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 12.4

1. เป็นไปได้หรือไม่ ที่จะใช้คลื่นเหนือเสียงทำความสะอาดภาชนะที่สกปรกด้วยฝุ่นละอองคราบไขมัน จงอธิบายเหตุผล
2. จงอธิบายการนำหลักการสะท้อนของเสียงไปใช้ในการระบุตำแหน่งของฝูงปลาในทะเล
3. การประยุกต์ใช้ความรู้เรื่องเสียงนอกจากที่กล่าวข้างต้นแล้ว ยังมีการประยุกต์ด้านอื่น ๆ อีก ให้ยกตัวอย่างพร้อมรายละเอียดมา 1 อย่าง

สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน

12.1 ธรรมชาติของเสียง

- เสียงเป็นคลื่นกลและคลื่นตามยาว เกิดจากการถ่ายโอนพลังงานจากการสั่นของแหล่งกำเนิดเสียงผ่านอนุภาคตัวกลางทำให้อนุภาคของตัวกลางสั่น
- กราฟระหว่างความดันอากาศที่เปลี่ยนไปกับตำแหน่งและกราฟระหว่างการกระจัดของอนุภาคอากาศกับตำแหน่ง มีลักษณะเป็นคลื่นรูปไซน์เช่นเดียวกัน แต่มีเฟสต่างกัน 90 องศา
- อัตราเร็วเสียง v มีความสัมพันธ์กับความยาวคลื่น λ และความถี่ของคลื่นเสียง f ตามสมการ $v = f\lambda$
- อัตราเร็วเสียงในอากาศมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิของอากาศ ตามสมการ $v = 331 + 0.6T_C$ โดยอุณหภูมิอากาศอยู่ในช่วง -50 องศาเซลเซียส ถึง 50 องศาเซลเซียส
- เสียงมีการสะท้อน การหักเห การเลี้ยวเบน และการแทรกสอด

12.2 การได้ยินเสียง

- กำลังเสียงเป็นอัตราการถ่ายโอนพลังงานเสียงจากแหล่งกำเนิดเสียง กำลังเสียงต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของเสียง เรียกว่า ความเข้มเสียง คำนวณได้จาก $I = \frac{P}{A}$
- ระดับเสียงเป็นปริมาณที่บอกความดังของเสียง โดยหาได้จากลอการิทึมของอัตราส่วนระหว่างความเข้มเสียงกับความเข้มเสียงอ้างอิงที่มนุษย์เริ่มได้ยิน ตามสมการ

$$\beta = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

- ระดับสูงต่ำของเสียงเป็นการบอกถึงความถี่ของเสียงในเชิงความรู้สึก คุณภาพเสียงเป็นการบอกถึงรูปแบบของเสียงที่มีความเฉพาะตัวของแหล่งกำเนิดเสียงต่าง ๆ นอกจากให้เสียงที่มีความถี่มูลฐานซึ่งเป็นความถี่ต่ำสุดแล้ว ยังมีเสียงจากฮาร์มอนิกต่าง ๆ เกิดขึ้นแล้วรวมกันทำให้คุณภาพเสียงของแหล่งกำเนิดเสียงต่างกัน ตามจำนวนฮาร์มอนิกที่แตกต่างกัน
- เสียงที่มีระดับเสียงสูง และเสียงที่ก่อให้เกิดความรำคาญแก่ผู้ฟัง ถือได้ว่าเป็นมลพิษทางเสียง การปรับปรุงหรือแก้ไขแหล่งกำเนิดเสียงให้มีกำลังเสียงลดลงจะมีผลทำให้ระดับเสียงลดลงด้วย จัดว่าเป็นการลดมลพิษทางเสียงส่วนหนึ่ง

12.3 ปรากฏการณ์เกี่ยวกับเสียง

- คลื่นนิ่งเป็นการซ้อนทับของคลื่น 2 ขบวนที่มีแอมพลิจูด ความถี่ และความยาวคลื่นเท่ากัน เคลื่อนที่สวนทางกัน ทำให้เกิดคลื่นลัพธ์ไม่มีการเคลื่อนที่ไปตามการเคลื่อนที่ของคลื่นทั้งสอง โดยมีตำแหน่งบัพและปฏิบัพอยู่กับที่ และระยะห่างระหว่างบัพกับปฏิบัพที่อยู่ถัดกันมีค่าเท่ากับ $\frac{\lambda}{4}$
- ถ้าลำอากาศในท่อถูกกระตุ้นด้วยคลื่นเสียงที่มีความถี่เท่ากับความถี่ธรรมชาติของลำอากาศในท่อนั้น จะเกิดการสั่นพ้องของเสียง โดยความถี่ในการเกิดการสั่นพ้องของท่อปลายปิดหนึ่งด้านคำนวณได้จากสมการ $f_n = n\frac{v}{4L}$ เมื่อ n = 1, 3, 5, ...
- ถ้าเสียงจากแหล่งกำเนิดเสียงสองแหล่งที่มีความถี่ต่างกันมาพบกันจะเกิดบีต มีความถี่บีตเท่ากับ $f_b = |f_1 - f_2|$ หากความถี่ต่างกันไม่เกิน 7 เฮิรตซ์ จะทำให้ได้ยินเสียงดังและค่อยสลับกันเป็นจังหวะ
- เมื่อแหล่งกำเนิดเสียงและผู้ฟังเคลื่อนที่สัมพัทธ์กัน ผู้ฟังจะได้ยินเสียงที่มีความถี่เปลี่ยนไปจากความถี่ของแหล่งกำเนิดเสียง เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์ดอปเพลอร์
- ถ้าแหล่งกำเนิดเสียงเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วมากกว่าอัตราเร็วเสียงในอากาศ จะเกิดคลื่นกระแทก ทำให้เสียงตามแนวหน้าคลื่นกระแทกมีพลังงานสูง มีผลทำให้ผู้ที่อยู่ ณ ตำแหน่งขณะหน้าคลื่นกระแทกเคลื่อนที่ผ่านได้ยินเสียงดังมาก

12.4 การประยุกต์ใช้ความรู้เรื่องเสียง

- ความรู้เรื่องเสียงนำไปอธิบายและประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ เช่น การเปล่งเสียงของมนุษย์ การทำงานของเครื่องดนตรี การปรับเทียบเสียงเครื่องดนตรี การประมง การแพทย์ ธรณีวิทยา อุตสาหกรรม เป็นต้น

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 12

คำถาม

1. ขณะเกิดคลื่นเสียงในอากาศ การกระจัดของอนุภาคและความดันของอากาศมีความสัมพันธ์กันอย่างไร
2. ขณะเกิดคลื่นเสียงในอากาศ ทั้งการกระจัดของอนุภาคและความดันของอากาศมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณใดมีผลต่อความดังของเสียง (การได้ยิน) มากกว่ากัน
3. อัตราเร็วเสียงในตัวกลางต่าง ๆ กับสถานะของตัวกลางมีความสัมพันธ์กันหรือไม่
4. การประมาณว่าฟ้าแลบอยู่ห่างเท่าใด โดยการนับเวลาเป็นวินาทีตั้งแต่เห็นฟ้าแลบจนได้ยินเสียงฟ้าร้อง แล้วหารด้วย 3 ผลที่ได้คือระยะทางที่มีหน่วยกิโลเมตร วิธีการนี้ว่าเป็นไปได้เพียงใด ให้เหตุผลประกอบ
5. ถ้าปรบมือหลังห้องประชุมที่มีความยาว 30 เมตร จะได้ยินเสียงสะท้อนกลับหรือไม่
6. เครื่องดนตรีชนิดเดียวกัน เมื่อเล่นโน้ตตัวเดียวกันมีคุณภาพเสียงต่างกันหรือไม่ เพราะเหตุใด
7. ถ้าระดับสูงต่ำของเสียงหนึ่งเพิ่มขึ้น ปริมาณใดต่อไปนี้มีการเปลี่ยนแปลง
   ก. ความถี่ ข. ความยาวคลื่น ค. อัตราเร็วของคลื่น ง. แอมพลิจูดของคลื่น
8. ยกตัวอย่างเสียงรบกวนจากบ้านใกล้เคียง และจากภายในบ้าน
9. ถ้าต้องการหาความถี่ของเสียงจากส้อมเสียงอันหนึ่ง โดยใช้ปรากฏการณ์การสั่นพ้องของเสียง จะมีวิธีการทดลองอย่างไร
10. ขณะที่เกิดการสั่นพ้อง ความดันของอากาศ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของหลอดเรโซแนนซ์เป็นอย่างไรเมื่อเทียบกับความดันปกติ
11. นางสาว ก ยืนกับที่และถือแหล่งกำเนิดเสียงที่ให้เสียงที่ได้ยินซึ่งมีความถี่ f_S ส่วน นาย ข กำลังเคลื่อนที่ออกด้วยอัตราเร็วคงตัว ดังรูป

รูป ประกอบคำถามข้อ 11

ก และ ข จะได้ยินเสียงที่มีความถี่เท่ากันหรือไม่ เพราะเหตุใด

12. อัตราเร็วของแหล่งกำเนิดเสียงที่กำลังเคลื่อนที่เข้าหาหรือออกจากผู้สังเกตที่อยู่นิ่ง มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ของเสียงที่ผู้สังเกตได้ยินหรือไม่ อย่างไร
    ก. เมื่ออัตราเร็วคงตัว ข. เมื่ออัตราเร็วไม่คงตัว
13. การออกหาอาหารของค้างคาวในตอนกลางคืนโดยส่งคลื่นเหนือเสียงแล้วรับคลื่นที่สะท้อนกลับสถานการณ์นี้เกิดปรากฏการณ์ดอปเพลอร์หรือไม่

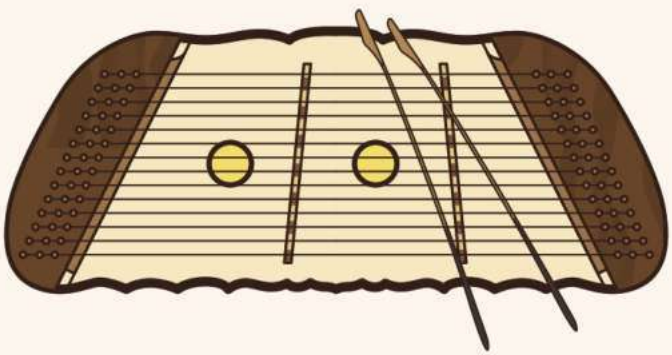
ปัญหา

1. หอนาฬิกาอยู่ห่างออกไป 500 เมตร ถ้าอาศัยเสียงตีของนาฬิกาจากหอนาฬิกาในการตั้งเวลาของนาฬิกาข้อมือ เราจะตั้งเวลาได้ตรงกับนาฬิกาของหอนาฬิกาหรือไม่ จงอธิบาย กำหนดอัตราเร็วเสียงในอากาศขณะนั้นเป็น 350 เมตรต่อวินาที
2. ชายคนหนึ่งยืนอยู่ห่างจากหน้าผา ยิงปืนและได้ยินเสียงก้องหลังจากยิงปืนแล้ว 5 วินาที ต่อมาเดินเข้าหาหน้าผาอีก 340 เมตร แล้วยิงปืนอีกครั้งหนึ่ง คราวนี้เขาได้ยินเสียงก้องหลังจากยิง 3 วินาที อัตราเร็วเสียงขณะนั้นเป็นเท่าใด และในการยิงปืนครั้งแรกชายคนนั้นอยู่ห่างจากหน้าผาเท่าใด
3. ในขณะหนึ่งอากาศมีอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส คลื่นเสียงความถี่ 2000 เฮิรตซ์ เคลื่อนที่ไปในอากาศ ระยะห่างระหว่างกึ่งกลางส่วนอัด และกึ่งกลางส่วนขยายของอนุภาคอากาศมีค่าเท่าใด
4. เป่าขลุ่ยให้เกิดเสียงความถี่ 266 เฮิรตซ์ เสียงเดียว เมื่อความดันอากาศสูงสุดที่เกิดจากเสียงนี้มาถึงเยื่อแก้วหู ความดันอากาศสูงสุดที่อยู่ถัดไปจะอยู่ห่างจากเยื่อแก้วหูเท่าใด กำหนดอุณหภูมิของอากาศขณะนั้นเป็น 25 องศาเซลเซียส
5. ความเข้มเสียงที่ตกกระทบบนพื้นที่ 2 ตารางเมตร มีค่า 10^{-4} วัตต์ต่อตารางเมตร พลังงานเสียงที่ตกกระทบบนพื้นที่นี้ในเวลา 1 นาที มีค่าเท่าใด

6. ตำแหน่งที่ห่างจากลำโพง 100 เมตร มีความเข้มเสียงได้ 1.0×10^{-6} วัตต์ต่อตารางเมตร ลำโพงมีกำลังเสียงเท่าใด

7. ผู้ฟังคนที่ 1 อยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดเสียง 2 เมตร วัดความเข้มเสียงได้ 10^{-4} วัตต์ต่อตารางเมตร ถ้าผู้ฟังคนที่ 2 อยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดเสียง 20 เมตร กำหนดความเข้มเสียงอ้างอิงที่มนุษย์ได้ยินเท่ากับ 10^{-12} วัตต์ต่อตารางเมตร จงหา
   ก. ความเข้มเสียง ณ ตำแหน่งผู้ฟังคนที่ 2
   ข. ระดับเสียง ณ ตำแหน่งผู้ฟังคนที่ 2

8. ขิมเป็นเครื่องดนตรีที่มีลวดหลายเส้นเรียงกัน โดยมีจุดค้ำเส้นละ 2 จุด ดังรูป

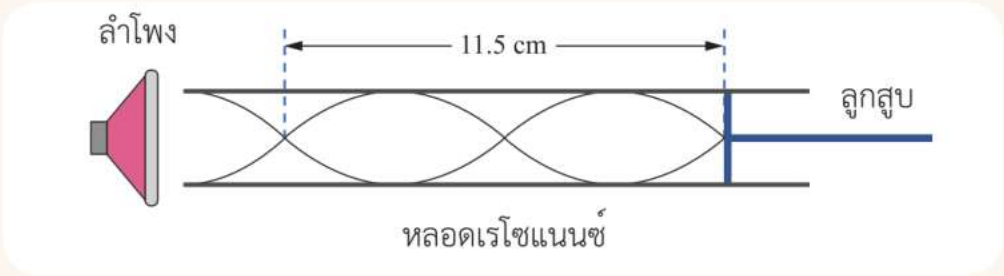


รูป ประกอบปัญหาข้อ 8

ถ้าตีลวดเส้นหนึ่งที่ได้ยินเสียงที่มีความถี่ 512 เฮิรตซ์ โดยลวดเส้นนี้มีระยะห่างระหว่างจุดค้ำเท่ากับ 30 เซนติเมตร จงหาอัตราเร็วของคลื่นบนลวด

9. ท่อปลายปิดหนึ่งด้านยาว 34 เซนติเมตร เมื่อใส่น้ำลงไปแล้วเป่าลมผ่านปากท่อจะทำให้เกิดเสียงต่างกันเมื่อระดับน้ำในท่อต่างกัน จะต้องเติมน้ำให้สูงจากก้นท่อเท่าใด เมื่อเป่าลมผ่านปากท่อจึงจะเกิดเสียงที่มีความถี่ 420 เฮิรตซ์ ได้ โดยกำหนดให้ อัตราเร็วเสียงในอากาศขณะนั้น เป็น 340 เมตรต่อวินาที

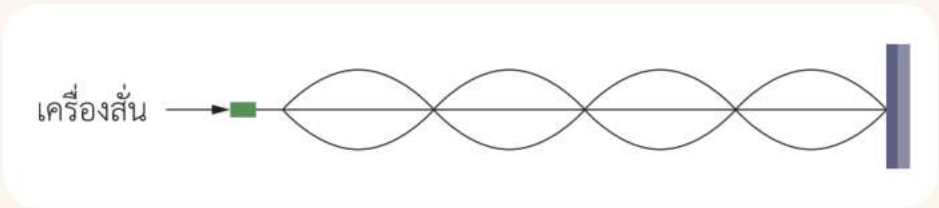
10. ในการทดลองโดยใช้หลอดเรโซแนนซ์กับลำโพงที่มีความถี่ 3 กิโลเฮิรตซ์ เมื่อเลื่อนลูกสูบในหลอดเรโซแนนซ์จนเกิดการสั่นพ้องของอากาศในหลอด ดังรูป



รูป ประกอบปัญหาข้อ 10

อัตราเร็วเสียงในอากาศมีค่าเท่าใด

11. เชือกเส้นหนึ่งขึงตึงโดยปลายด้านหนึ่งติดกับเครื่องสั่นที่มีความถี่ 1000 เฮิรตซ์ เกิดคลื่นนิ่ง ดังรูป



รูป ประกอบปัญหาข้อ 11

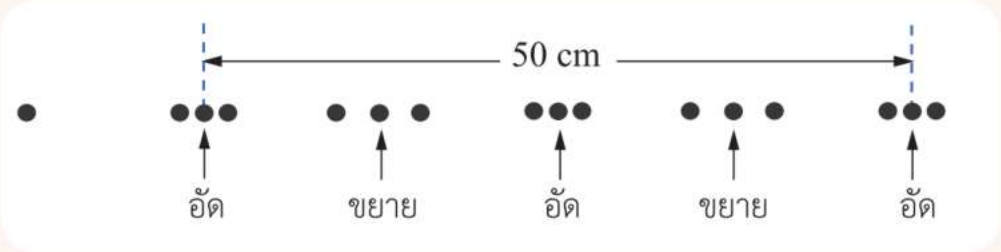
ต่อมา ลดความถี่ของเครื่องสั่นเป็น 250 เฮิรตซ์ จงเขียนรูปคลื่นนิ่งที่เกิด

12. ส้อมเสียง ก ข และ ค มีความถี่การสั่นต่างกัน โดยที่ส้อมเสียง ก มีความถี่สูงสุด และ ส้อมเสียง ค มีความถี่ต่ำสุด เท่ากับ 640 เฮิรตซ์ เมื่อเคาะส้อมเสียง ก และ ข พร้อมกัน ได้ยินเสียงความถี่บีต 3 เฮิรตซ์ เมื่อเคาะส้อมเสียง ข และ ค พร้อมกัน ได้ยินเสียงความถี่บีต 4 เฮิรตซ์ ความถี่ของส้อมเสียง ก มีค่าเท่าใด

13. ลำโพงสองตัวอยู่ที่ตำแหน่ง A และ B วางห่างกัน 2 เมตรในที่โล่ง ผู้ฟังยืนที่จุด P ห่างจาก A และ B เป็นระยะ 4 และ 3 เมตร ตามลำดับ จงหาความถี่ของเสียงต่ำสุดที่ทำให้ผู้ฟังที่จุด P ได้ยินเสียงค่อยสุด กำหนดให้อัตราเร็วเสียงในอากาศเท่ากับ 344 เมตรต่อวินาที

14. เมื่อเคาะที่ปลายข้างหนึ่งของท่อเหล็กยาว L ผู้ฟังที่อยู่ที่ปลายอีกข้างจะได้ยินเสียงดังสองครั้ง เป็นเวลาต่างกันเท่าใด กำหนด อัตราเร็วเสียงในอากาศเป็น v และอัตราเร็วเสียงในเหล็กเป็น $17v$

15. คลื่นเสียงเคลื่อนที่ผ่านอากาศ ทำให้อนุภาคอากาศเกิดส่วนอัดและส่วนขยาย ดังแสดงในแผนภาพด้านล่าง

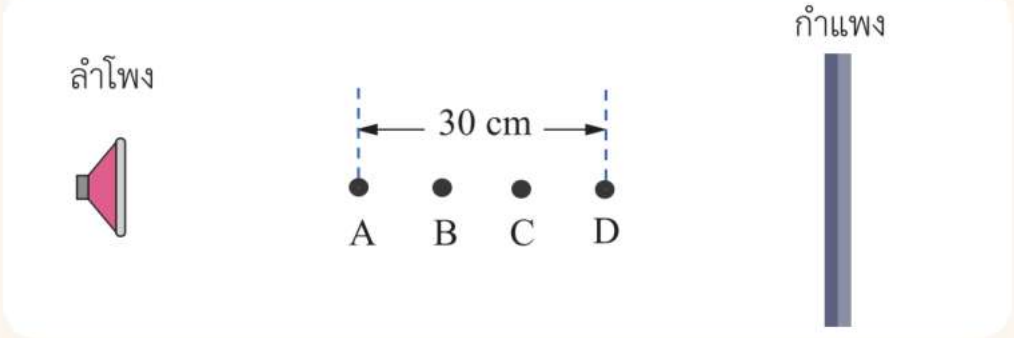


รูป ประกอบปัญหาข้อ 15

ความถี่ของเสียงมีค่าเท่าใด กำหนดให้ อัตราเร็วเสียงในอากาศขณะนั้นเป็น 350 เมตรต่อวินาที

16. นายต้นยืนในที่โล่งห่างจากลำโพง 100 เมตร วัดระดับเสียงได้ 60 เดซิเบล ลำโพงมีกำลังเสียงเท่าใด (ให้คำตอบติดค่า π)

17. หันลำโพงเข้าหากำแพง ฟังเสียงที่ตำแหน่งต่าง ๆ ระหว่างลำโพงกับกำแพง ได้ยินเสียงดังที่สุดที่ตำแหน่ง A, B, C และ D ดังรูป



รูป ประกอบปัญหาข้อ 17

ถ้า AD เท่ากับ 30 เซนติเมตร ลำโพงให้เสียงความถี่เท่าใด
กำหนดให้ อัตราเร็วเสียงในอากาศเท่ากับ 350 เมตรต่อวินาที

ปัญหาท้าทาย

18. ในการหาความสูงของหน้าผา โดยใช้ความรู้เกี่ยวกับการตกแบบเสรีและพฤติกรรมของเสียง เมื่อวัดเวลาตั้งแต่ปล่อยก้อนหินจากหน้าผา จนได้ยินเสียงก้อนหินกระทบพื้นได้เท่ากับ 3 วินาที และวัดอุณหภูมิของอากาศขณะนั้นได้ 15 องศาเซลเซียส จงหาความสูงของหน้าผา

19. การแสดงดนตรีในสถานที่แห่งหนึ่งที่มีการติดตั้งวัสดุดูดกลืนเสียง ผู้ชมการแสดงคนหนึ่งอยู่ห่างจากผู้เล่นดนตรีเป็นระยะทาง r ถ้าต้องการได้ยินเสียงที่มีความเข้มเสียงเป็นสองเท่า ผู้ชมจะต้องเปลี่ยนที่นั่งให้อยู่ห่างผู้เล่นเป็นระยะทางเท่าใด

20. โรงงานแห่งหนึ่งมีเครื่องจักรสามเครื่อง เครื่องที่หนึ่งและสองให้เสียงที่มีระดับเสียงเท่ากันคือ 70 เดซิเบล ส่วนเครื่องที่สามให้เสียงที่มีระดับเสียง 90 เดซิเบล จงหาระดับเสียง
    ก. เมื่อเครื่องจักรสองเครื่องแรกทำงานพร้อมกัน
    ข. เมื่อเครื่องจักรเครื่องแรกและเครื่องที่สามทำงานพร้อมกัน

21. เสียงเชียร์กีฬาของผู้ชมหนึ่งคนมีระดับเสียง 60 เดซิเบล เสียงเชียร์แบบเดียวกันของผู้ชมจำนวน 40000 คน จะทำให้เกิดเสียงที่มีระดับเสียงเกิน 120 เดซิเบล หรือไม่

22. คนส่วนมากสามารถแยกเสียงที่มีระดับเสียงที่ต่างกัน 1 เดซิเบลได้ อัตราส่วนระหว่างความเข้มเสียงที่มีระดับเสียงต่างกัน 1 เดซิเบล เป็นเท่าใด

23. เสียงที่เกิดจากอุปกรณ์ชิ้นหนึ่งขณะทำงานมีระดับเสียง 48 เดซิเบล จะมีความเข้มเสียงเท่าใด

24. เสียงที่มีระดับเสียงเท่ากับ 63.4 เดซิเบล จะมีความเข้มเสียงเท่าใด

25. ในการยิงพลุขึ้นฟ้า หลังจากพลุระเบิดตำแหน่งที่อยู่ห่างจากตำแหน่งพลุระเบิด 100 เมตร และ 1000 เมตร จะมีระดับเสียงต่างกันกี่เดซิเบล

26. เมื่อได้ยินเสียงที่ระดับเสียง 60 เดซิเบล และ 70 เดซิเบล พร้อมกัน ระดับเสียงรวมที่ได้ยินจะมีค่าเท่าใด

27. เปิดลำโพง 1 ตัว ที่ระยะห่างจากลำโพง 100 เมตร มีระดับเสียง 50 เดซิเบล
    ก. ลำโพงมีกำลังเสียงเท่าใด
    ข. ถ้าเปิดลำโพง 10 ตัว ระดับเสียงที่ตำแหน่งเดียวกันจะเป็นเท่าใด
    ค. ถ้าผู้ฟังเดินห่างออกไปจนกระทั่งห่างลำโพงเป็นระยะ 1000 เมตร ระดับเสียงที่ได้ยินจะมีค่าเท่าใด

28. สำหรับแหล่งกำเนิดเสียงเดียวกัน ตำแหน่ง 1 มีความเข้มเสียงเป็น I_1 ที่ตำแหน่ง 2 มีความเข้มเสียงเป็น I_2 จงแสดงว่าตำแหน่งทั้งสองมีระดับเสียงต่างกัน

29. ที่ตำแหน่งหนึ่งมีความเข้มเสียงเป็น 40 เท่าของความเข้มเสียงอีกตำแหน่งหนึ่ง ตำแหน่งทั้งสองมีระดับเสียงต่างกันกี่เดซิเบล

30. ส้อมเสียง x ไม่ทราบความถี่ธรรมชาติและส้อมเสียง A ที่มีความถี่ธรรมชาติ 90 เฮิรตซ์ เมื่อทำการเทียบเสียงส้อมเสียงทั้งสองกับสายกีตาร์เส้นหนึ่งพบว่าเกิดบีต 5 ครั้งต่อวินาทีเหมือนกัน แต่เมื่อทำการเทียบเสียงส้อมเสียงทั้งสองกับหลอดเรโซแนนซ์ พบว่าตำแหน่งที่เกิดการสั่นพ้องครั้งแรกของส้อมเสียง x ลูกสูบจะต่ำจากปากหลอดมากกว่าตำแหน่งการเกิดการสั่นพ้องครั้งแรกของส้อมเสียง A ส้อมเสียง x มีความถี่ธรรมชาติเท่าใด

31. ในการเป่าอากาศผ่านปากหลอดทรงกระบอกปลายปิดข้างหนึ่ง ถ้าหลอดยาว 0.10 เมตร และอุณหภูมิของอากาศขณะนั้นเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส ความถี่มูลฐานและความถี่ฮาร์มอนิกที่สามของเสียงจากหลอดนี้มีค่าเท่าใด

32. ลำโพง 2 ตัวต่อกับเครื่องกำเนิดสัญญาณเสียงความถี่ 700 เฮิรตซ์ จัดลำโพงหันหน้าเข้าหากัน ห่างกัน 1.1 เมตร ทำให้เกิดคลื่นนิ่งระหว่างลำโพงทั้งสอง ตำแหน่งในแนวเส้นตรงระหว่างลำโพงทั้งสองมีความดันเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุดกี่ตำแหน่ง ถ้าอัตราเร็วเสียงในบริเวณนั้นเท่ากับ 350 เมตรต่อวินาที

33. แหล่งกำเนิดเสียงส่งคลื่นเสียงความถี่ 2000 เฮิรตซ์ ไปกระทบตัวสะท้อนอันหนึ่ง เมื่อใช้เครื่องรับฟังเสียงเคลื่อนไป ตามแนวตรงระหว่างแหล่งกำเนิดเสียงกับตัวสะท้อนได้ยินเสียงดัง-ค่อยสลับกัน ถ้าต้องการให้ตำแหน่งเสียงดังสองตำแหน่งที่อยู่ถัดกันอยู่ห่างกันมากกว่าเดิม 2 เซนติเมตร

แหล่งกำเนิดเสียงจะต้องส่งเสียงความถี่เท่าใดไปกระทบตัวสะท้อน ถ้าอัตราเร็วเสียงในอากาศเท่ากับ 340 เมตรต่อวินาที

34. เมื่อให้เสียงความถี่ 500 เฮิรตซ์ ผ่านเข้าไปในหลอดเรโซแนนซ์ ขณะอุณหภูมิอากาศเป็น 20 องศาเซลเซียส จะเกิดการสั่นพ้องของอากาศ ถ้าอุณหภูมิอากาศเป็น 30 องศาเซลเซียส คลื่นเสียงจะต้องมีความถี่เท่าใดจึงจะเกิดการสั่นพ้องของอากาศได้อีกครั้งหนึ่ง

บทที่ 13 ไฟฟ้าสถิต

ipst.me/8892

ฟ้าแลบและฟ้าผ่าเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติที่คนในยุคโบราณเชื่อว่าเกิดจากอำนาจหรือการกระทำของเทพเจ้า ส่วนคนไทยในอดีตเชื่อว่าเป็นเพราะรามสูรขว้างขวาน เมื่อมีการศึกษาทางวิทยาศาสตร์พบว่าฟ้าแลบและฟ้าผ่าเกิดจากการถ่ายโอนประจุไฟฟ้าในบรรยากาศ

เรื่องราวของประจุไฟฟ้าเป็นพื้นฐานในการศึกษาไฟฟ้าสถิต ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับอะไรบ้างนั้น จะได้ศึกษาในบทนี้

คำถามสำคัญ

- วัตถุแสดงประจุไฟฟ้าได้อย่างไร และไฟฟ้าสถิต คืออะไร
- ปริมาณที่เกี่ยวข้องกับไฟฟ้าสถิต มีปริมาณใดบ้างและมีความสัมพันธ์กันอย่างไร
- ความรู้เกี่ยวกับไฟฟ้าสถิตสามารถนำไปใช้ในชีวิตประจำวันได้อย่างไร

จุดประสงค์การเรียนรู้

13.1 ธรรมชาติของไฟฟ้าสถิต

1. อธิบายการทำวัตถุที่เป็นกลางทางไฟฟ้าให้มีประจุไฟฟ้าโดยการขัดสีกัน
2. อธิบายกฎการอนุรักษ์ประจุไฟฟ้า
3. อธิบายการเกิดแรงระหว่างประจุไฟฟ้าขึ้นกับชนิดของประจุไฟฟ้า
4. อธิบายและทดลองการทำวัตถุที่เป็นกลางทางไฟฟ้าให้มีประจุไฟฟ้าโดยการเหนี่ยวนำ

13.2 กฎของคูลอมบ์

5. อธิบายและคำนวณแรงที่กระทำต่อกันระหว่างจุดประจุ ตามกฎของคูลอมบ์
6. อธิบายและคำนวณแรงไฟฟ้าลัพธ์ที่กระทำต่อจุดประจุ

13.3 สนามไฟฟ้า

7. อธิบายสนามไฟฟ้าและเส้นสนามไฟฟ้าของจุดประจุ ตัวนำทรงกลม และแผ่นโลหะคู่ขนาน
8. คำนวณปริมาณที่เกี่ยวข้องกับสนามไฟฟ้าของจุดประจุ
9. อธิบายและคำนวณสนามไฟฟ้าลัพธ์ของระบบจุดประจุ
10. อธิบายแรงไฟฟ้าที่กระทำต่ออนุภาคที่มีประจุที่อยู่ในสนามไฟฟ้า และคำนวณปริมาณที่เกี่ยวข้อง

13.4 ศักย์ไฟฟ้าและความต่างศักย์

11. อธิบายพลังงานศักย์ไฟฟ้า ศักย์ไฟฟ้า และคำนวณปริมาณที่เกี่ยวข้อง
12. อธิบายความต่างศักย์ระหว่างสองตำแหน่งใด ๆ และคำนวณปริมาณที่เกี่ยวข้อง

13.5 ตัวเก็บประจุ

13. อธิบายส่วนประกอบของตัวเก็บประจุ
14. อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างประจุไฟฟ้า ความต่างศักย์ และความจุของตัวเก็บประจุ
15. อธิบายพลังงานสะสมในตัวเก็บประจุ และความจุสมมูล
16. คำนวณปริมาณที่เกี่ยวข้องกับตัวเก็บประจุ และความจุสมมูล

13.6 การนำความรู้เกี่ยวกับไฟฟ้าสถิตไปใช้ประโยชน์

17. ยกตัวอย่างการนำความรู้เรื่องไฟฟ้าสถิตไปอธิบายหลักการทำงานของเครื่องใช้ไฟฟ้าบางชนิด
18. อธิบายปรากฏการณ์ในชีวิตประจำวันโดยใช้ความรู้เรื่องไฟฟ้าสถิต

ความรู้ก่อนเรียน

เวกเตอร์และสเกลาร์ ประจุไฟฟ้า อะตอมและโมเลกุล กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน งานและพลังงาน กฎการอนุรักษ์พลังงาน

ในบทนี้ จะกล่าวถึงสมบัติทางไฟฟ้าของสสาร ได้แก่ ประจุไฟฟ้า และสมบัติต่าง ๆ ของประจุไฟฟ้า เช่น ชนิดของประจุไฟฟ้า ความไม่ต่อเนื่องของประจุไฟฟ้า การอนุรักษ์ประจุไฟฟ้า แรงไฟฟ้าที่กระทำระหว่างอนุภาคมีประจุไฟฟ้าและกฎของคูลอมบ์ สนามไฟฟ้าที่เกิดจากประจุไฟฟ้า ศักย์ไฟฟ้า พลังงานศักย์ไฟฟ้า ความจุไฟฟ้า และรวมทั้งการประยุกต์ใช้ความรู้เกี่ยวกับไฟฟ้าสถิต

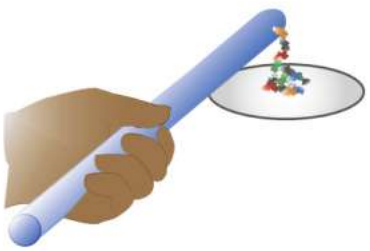
13.1 ธรรมชาติของไฟฟ้าสถิต

นักฟิสิกส์ได้จัดแรงพื้นฐานในธรรมชาติออกเป็น 4 แรง ได้แก่ แรงโน้มถ่วง แรงแม่เหล็กไฟฟ้า แรงอ่อน และแรงเข้ม นอกเหนือจากแรงโน้มถ่วงที่ได้ศึกษาไปแล้ว แรงไฟฟ้าซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าก็เป็นอีกหนึ่งแรงที่เกี่ยวข้องในชีวิตประจำวันของเรา ซึ่งในบทนี้จะได้ศึกษาแรงไฟฟ้า

13.1.1 ประจุไฟฟ้าและกฎการอนุรักษ์ประจุไฟฟ้า

ในวันที่อากาศเย็นและแห้ง เมื่อเราจับลูกบิดโลหะของประตู บางครั้งอาจรู้สึกเหมือนถูกไฟฟ้าดูด หรือเมื่อหวีผมที่แห้ง จะรู้สึกว่าผมฟู เพราะเหตุใดจึงเป็นเช่นนั้น เราจะศึกษาได้จากกิจกรรม ดังนี้

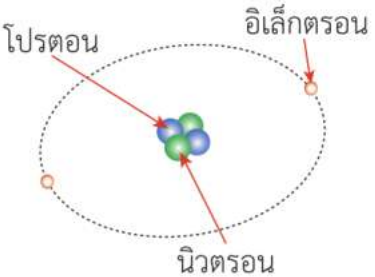
เมื่อใช้ผ้าสักหลาดถูท่อพีวีซี แล้วนำท่อพีวีซีเข้าใกล้เศษกระดาษ พบว่า ท่อพีวีซีสามารถดูดเศษกระดาษให้ติดขึ้นมาได้ ดังรูป 13.1 เหตุใดจึงเป็นเช่นนั้น



รูป 13.1 ท่อพีวีซีที่สามารถดูดเศษกระดาษให้ขึ้นมาติดได้

คำแนะนำ กิจกรรมนี้ควรทำในห้องที่ความชื้นต่ำ หรือในห้องปรับอากาศ

เราทราบแล้วว่า วัตถุต่าง ๆ ประกอบด้วยโมเลกุล โดยโมเลกุลประกอบด้วยอะตอมของธาตุต่าง ๆ ภายในอะตอมมีโปรตอนซึ่งมีประจุไฟฟ้าบวก และนิวตรอนที่เป็นกลางทางไฟฟ้าอยู่รวมกันภายในนิวเคลียส โดยมีอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุไฟฟ้าลบเคลื่อนที่อยู่รอบ ๆ นิวเคลียส ตามแบบจำลองอะตอมดังรูป 13.2



รูป 13.2 แบบจำลองอะตอม

ความรู้เพิ่มเติม

โปรตอนและอิเล็กตรอนมีประจุไฟฟ้าเท่ากัน มีค่าเท่ากับ 1.6×10^{-19} คูลอมบ์ ต่างกันที่โปรตอนมีประจุไฟฟ้าบวกแต่อิเล็กตรอนมีประจุไฟฟ้าลบ โปรตอนถูกยึดให้อยู่ภายในนิวเคลียสด้วยแรงนิวเคลียร์ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของแรงเข้ม ส่วนอิเล็กตรอนถูกยึดให้อยู่ในอะตอมด้วยแรงไฟฟ้าซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของแรงแม่เหล็กไฟฟ้า

โดยทั่วไปวัตถุจะมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า นั่นคือ ภายในอะตอมจะมีโปรตอนและอิเล็กตรอนในจำนวนที่เท่ากัน เมื่อนำวัตถุ 2 ชนิดซึ่งเดิมเป็นกลางทางไฟฟ้ามาถูกัน จะเกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างวัตถุทั้ง 2 ชนิดนั้น โดยวัตถุหนึ่งจะทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอนและอีกวัตถุจะทำหน้าที่รับอิเล็กตรอน สำหรับวัตถุที่มีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า เมื่อสูญเสียอิเล็กตรอนไปบางส่วน ทำให้มีประจุสุทธิเป็นบวก ส่วนวัตถุที่รับอิเล็กตรอนจะมีประจุสุทธิเป็นลบ ดังนั้น เราสามารถทำให้วัตถุที่เป็นกลางทางไฟฟ้าเป็นวัตถุมีประจุไฟฟ้าได้ โดยการถ่ายโอนอิเล็กตรอนเข้าหรือออกจากวัตถุนั้น ทั้งนี้ประจุไม่สามารถสร้างขึ้นใหม่หรือทำลายได้ ดังนั้นในการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ผลรวมของประจุของระบบก่อนการเปลี่ยนแปลงต้องเท่ากับผลรวมของประจุหลังการเปลี่ยนแปลง ซึ่งเป็นไปตาม**กฎการอนุรักษ์ประจุไฟฟ้า** (law of conservation of electric charge) ดังนั้น เมื่อถูผ้าสักหลาดกับท่อพีวีซี จะเกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างผ้าสักหลาดกับท่อพีวีซี โดยจำนวนอิเล็กตรอนที่ถ่ายโอนให้กับท่อพีวีซีเท่ากับจำนวนอิเล็กตรอนที่ผ้าสักหลาดเสียไปเนื่องจากวัตถุที่เป็นกลางทางไฟฟ้า มีประจุได้โดยการถ่ายโอนอิเล็กตรอนเข้าหรือออกจากวัตถุนั้น ดังนั้นวัตถุใด ๆ จะมี**ประจุไฟฟ้ามีค่าเป็นจำนวนเต็มเท่าของขนาดประจุของอิเล็กตรอนเสมอ** ให้ e เป็นประจุของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 1.6×10^{-19} คูลอมบ์ และให้ N เป็นจำนวนอิเล็กตรอนที่ถูกถ่ายโอน จะได้ว่าวัตถุมีขนาดประจุไฟฟ้าเท่ากับ

$$q = Ne \tag{13.1}$$

นั่นคือ ประจุไฟฟ้าของวัตถุมีค่าเป็นจำนวนเท่าของค่า 1.6×10^{-19} เช่น 3.2×10^{-19} คูลอมบ์ หรือ 6.4×10^{-19} คูลอมบ์ ซึ่งมีค่าไม่ต่อเนื่อง

ข้อสังเกต

วัตถุที่ได้รับอิเล็กตรอนจะมีประจุเป็นลบ วัตถุที่สูญเสียอิเล็กตรอนจะมีประจุเป็นบวก ในการบอกขนาดของประจุตามสมการ (13.1) เมื่อจะบอกค่าประจุต้องบอกค่าเป็นบวกหรือลบขึ้นอยู่กับวัตถุสูญเสียหรือรับอิเล็กตรอน

ตัวอย่าง 13.1 แท่งแก้วอันหนึ่งสูญเสียอิเล็กตรอนไป 10^4 อิเล็กตรอน แท่งแก้วมีประจุไฟฟ้าเท่าใด

แนวคิด วัตถุใด ๆ สูญเสียอิเล็กตรอนจะมีประจุไฟฟ้าเป็นบวกเท่ากับจำนวนเต็มเท่าของประจุอิเล็กตรอนที่สูญเสีย

วิธีทำ จำนวนอิเล็กตรอนที่สูญเสีย $(N) = 10^4$

จาก $q = Ne$

แทนค่า $= (10^4)(1.6\times10^{-19}\ \text{C})$

$= 1.6\times10^{-15}\ \text{C}$

ตอบ แท่งแก้วมีประจุไฟฟ้าเท่ากับ 1.6×10^{-15} คูลอมบ์

จากกิจกรรมก่อนหน้า เมื่อนำท่อพีวีซีที่ถูกับผ้าสักหลาดแล้ว เข้าใกล้เศษกระดาษ มีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า ท่อพีวีซีสามารถดึงดูดเศษกระดาษให้ติดขึ้นมาได้ เราจะทราบได้อย่างไรว่าเมื่อถูหรือขัดสีวัตถุแล้ว วัตถุใดทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน และวัตถุใดทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน

วัตถุใดจะทำหน้าที่ให้หรือรับอิเล็กตรอนขึ้นอยู่กับวัตถุนั้นจะสูญเสียอิเล็กตรอนได้มากกว่าหรือน้อยกว่า โดยวัตถุที่สูญเสียอิเล็กตรอนมากกว่า วัตถุนั้นทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอน ซึ่งอาจพิจารณาลำดับการสูญเสียอิเล็กตรอนเมื่อนำวัสดุแต่ละชนิดมาขัดถูกันได้ดังตาราง 13.1

ตาราง 13.1 แสดงลำดับการสูญเสียอิเล็กตรอนเมื่อนำวัสดุแต่ละชนิดมาขัดถูกัน

ลำดับ	การสูญเสียอิเล็กตรอน
1.	แก้ว
2.	เส้นผม
3.	แผ่นเปอร์สเปกซ์
4.	ไนลอน
5.	ผ้าสักหลาด
6.	ผ้าไหม
7.	ผ้าฝ้าย
8.	อำพัน
9.	โพลีไวนิลคลอไรด์ (พีวีซี)
10.	เทฟลอน

โดยวัสดุที่อยู่ลำดับก่อน (เลขน้อยกว่า) มีแนวโน้มที่จะสูญเสียอิเล็กตรอนมากกว่าวัสดุที่อยู่ลำดับหลัง (เลขมากกว่า) เมื่อถูกัน วัสดุที่อยู่ลำดับก่อนมีประจุสุทธิเป็นบวก ส่วนวัสดุที่อยู่ลำดับหลังมีประจุสุทธิเป็นลบ เช่น ถ้านำผ้าไหมมาถูกับแท่งแก้ว แท่งแก้วจะมีประจุสุทธิเป็นบวก ผ้าไหมจะมีประจุสุทธิเป็นลบ

ประจุไฟฟ้ามี 2 ชนิด คือ ประจุไฟฟ้าบวก และประจุไฟฟ้าลบ (อาจเรียกสั้น ๆ ว่า ประจุบวกและประจุลบ) เมื่อวัตถุมีประจุไฟฟ้า นอกจากส่งแรงดึงดูดวัตถุที่เป็นกลางทางไฟฟ้า ยังมีการส่งแรงกระทำซึ่งกันและกันระหว่างวัตถุที่มีประจุไฟฟ้า เรียกว่า **แรงระหว่างประจุไฟฟ้า** แรงนี้มีกี่ชนิดขึ้นกับชนิดของประจุไฟฟ้าอย่างไร ศึกษาได้จากกิจกรรม 13.1

กิจกรรม 13.1 ชนิดของแรงระหว่างประจุไฟฟ้า

จุดประสงค์

1. สังเกตและบอกชนิดของแรงระหว่างประจุไฟฟ้า
2. สังเกตและอธิบายชนิดแรงระหว่างประจุไฟฟ้าขึ้นกับชนิดประจุไฟฟ้า

วัสดุและอุปกรณ์

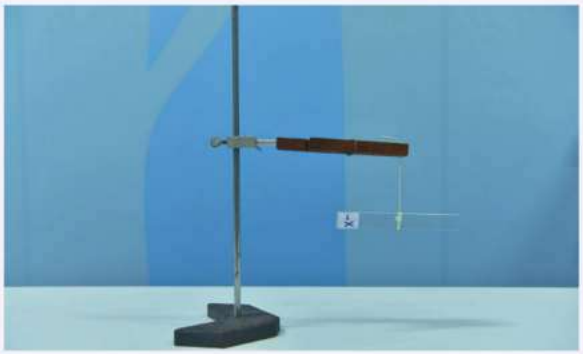
1. แผ่นพีวีซี	2 อัน
2. แผ่นเปอร์สเปกซ์	2 แผ่น
3. ผ้าสักหลาด	1 ผืน
4. ขาตั้ง	1 อัน
5. เส้นด้าย	1 เมตร

วิธีทำกิจกรรม

1. ระบุเลขแผ่นและทำเครื่องหมายกากบาทไว้ที่ปลายด้านใดด้านหนึ่งดังรูป

รูป แผ่นพีวีซีและแผ่นเปอร์สเปกซ์ที่ทำเครื่องหมายไว้ด้านหนึ่ง

2. ใช้ด้ายยาวประมาณ 15 – 20 เซนติเมตร ผูกกับตรงกลางของแผ่นพีวีซีและแผ่นเปอร์สเปกซ์ นำแผ่นพีวีซีแผ่นที่ 1 ที่ผูกเชือกแล้วนำปลายเชือกอีกด้านผูกติดกับขาตั้ง โดยจัดให้แผ่นพีวีซีแขวนนิ่งในแนวระดับ ดังรูป



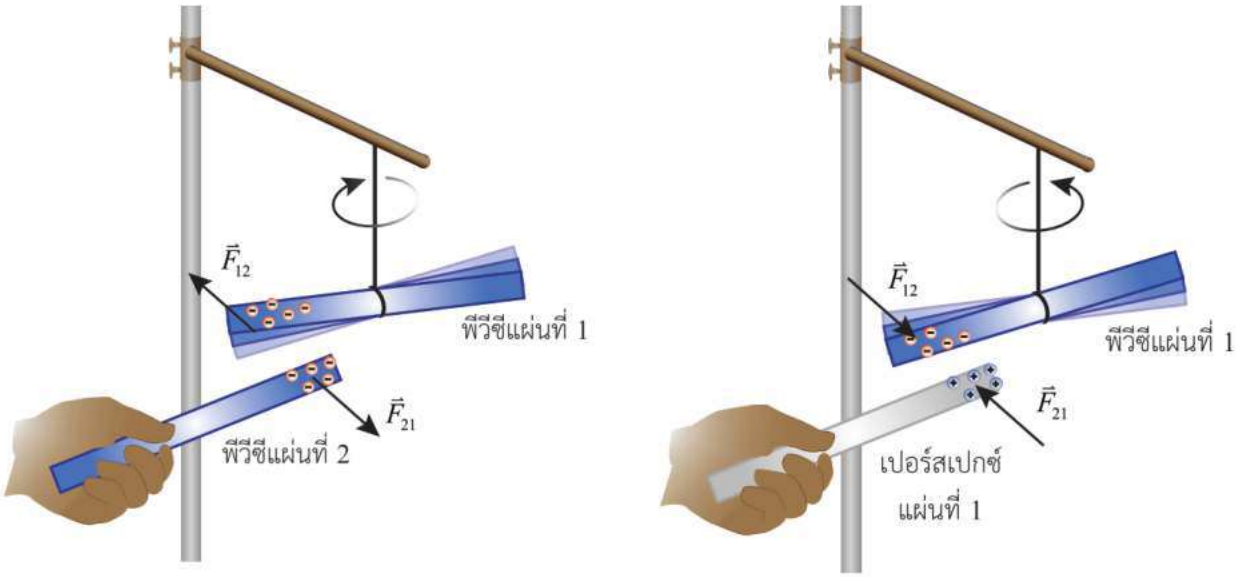
รูป แผ่นพีวีซีที่แขวนนิ่งในแนวระดับ

3. จับปลายแผ่นพีวีซีแผ่นที่ 1 ด้านที่ทำเครื่องหมายไว้ ใช้ผ้าสักหลาดถูปลายอีกด้านหนึ่งของแผ่นพีวีซีเพื่อให้มีประจุ แล้วจัดให้วางตัวในแนวเดิม โดยต้องระวังปลายแผ่นพีวีซีที่ถูแล้วไม่ให้สัมผัสกับสิ่งอื่น ๆ
4. จับปลายแผ่นพีวีซีแผ่นที่ 2 ด้านที่ทำเครื่องหมายไว้ ใช้ผ้าสักหลาดถูปลายอีกด้านหนึ่งของแผ่นเพื่อให้เกิดประจุ จากนั้นนำปลายแผ่นพีวีซีเข้าใกล้ปลายแผ่นพีวีซีที่แขวนไว้ด้านที่มีประจุสังเกตการเบนของแผ่นพีวีซีที่แขวนและบันทึกผล
5. ทำซ้ำข้อ 2-4 โดยเปลี่ยนแผ่นพีวีซีเป็นแผ่นเปอร์สเปกซ์ สังเกตการเบนของแผ่นเปอร์สเปกซ์ที่แขวนและบันทึกผล
6. ทำซ้ำข้อ 2-4 โดยเปลี่ยนเป็นแผ่นพีวีซีและแผ่นเปอร์สเปกซ์อย่างละแผ่น ให้แผ่นหนึ่งเป็นแผ่นที่แขวนอีกแผ่นเป็นแผ่นเข้าใกล้ สังเกตการเบนของแผ่นที่แขวนและบันทึกผล

คำถามท้ายกิจกรรม

- ☐ แรงระหว่างแผ่นพีวีซีกับแผ่นพีวีซีในข้อ 4 เป็นแรงดึงดูดหรือแรงผลัก
- ☐ แรงระหว่างแผ่นเปอร์สเปกซ์กับแผ่นเปอร์สเปกซ์ในข้อ 5 เป็นแรงดึงดูดหรือแรงผลัก
- ☐ แรงระหว่างแผ่นพีวีซีกับแผ่นเปอร์สเปกซ์ในข้อ 6 เป็นแรงดึงดูดหรือแรงผลัก
- ☐ การถูผ้าสักหลาดกับแผ่นพีวีซี และผ้าสักหลาดกับแผ่นเปอร์สเปกซ์ แผ่นพีวีซีและแผ่นเปอร์สเปกซ์มีประจุไฟฟ้าชนิดใด
- ☐ ชนิดของแรงระหว่างประจุขึ้นกับชนิดของประจุไฟฟ้าอย่างไร

จากกิจกรรม 13.1 พบว่าแรงระหว่างประจุไฟฟ้ามี 2 ชนิด คือ **แรงดึงดูด** (attractive force) และ**แรงผลัก** (repulsive fore) เนื่องจากแผ่นพีวีซีทั้งแผ่นที่ 1 และแผ่นที่ 2 ถูด้วยผ้าสักหลาดเช่นเดียวกัน แผ่นพีวีซีทั้งสองจึงมีประจุชนิดเดียวกัน (ในทำนองเดียวกันกับกรณีใช้แผ่นเปอร์สเปกซ์) แต่ในกรณีแผ่นพีวีซีกับแผ่นเปอร์สเปกซ์ที่ถูด้วยผ้าสักหลาด แผ่นวัตถุทั้งสองจะมีประจุต่างชนิดกัน ทำให้พิจารณาได้ว่าแรงระหว่างประจุชนิดเดียวกันผลักกันและแรงระหว่างประจุต่างชนิดกันดึงดูดกัน สามารถแสดงทิศทางของแรงระหว่างวัตถุที่มีประจุได้ดังรูป 13.3 ก. และ ข. เมื่อ $\vec{F}_{12}$ เป็นแรงแผ่นที่ 2 กระทำต่อแผ่นที่ 1 และ $\vec{F}_{21}$ เป็นแรงแผ่นที่ 1 กระทำต่อแผ่นที่ 2



ก. แรงระหว่างประจุชนิดเดียวกัน ข. แรงระหว่างประจุต่างชนิดกัน

รูป 13.3 แรงระหว่างประจุไฟฟ้า

ข้อสังเกต

เนื่องจากประจุไฟฟ้ามี 2 ชนิดคือประจุบวกและประจุลบ จึงใช้เครื่องหมาย + และ − ตามลำดับแสดงชนิดของประจุ

รู้หรือไม่

แรงดึงดูดทางไฟฟ้านี้ถูกนำมาใช้ในการออกแบบผลิตภัณฑ์ เช่น พลาสติกที่ใช้ทำคอนแทกต์เลนส์มีโมเลกุลที่ทำให้เกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้ากับโมเลกุลโปรตีนซึ่งอยู่ในของเหลวที่ให้ความชุ่มชื้นกับลูกนัยน์ตาของคน ทำให้โมเลกุลโปรตีนนี้เคลือบติดกับพลาสติกคอนแทกต์เลนส์ ทำให้คอนแทกต์เลนส์มีส่วนประกอบเช่นเดียวกับของเหลวในลูกนัยน์ตาของผู้สวมใส่ ไม่รู้สึกว่าเป็นสิ่งแปลกปลอมในดวงตา เราจึงรู้สึกสบายตา อีกตัวอย่างคือ เครื่องสำอาง ซึ่งใช้สารที่เกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้ากับผิวหนังหรือเส้นผม จึงทำให้สารดังกล่าวติดอยู่ที่ผิวหนังหรือเส้นผมได้ดี

13.1.2 การเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิต

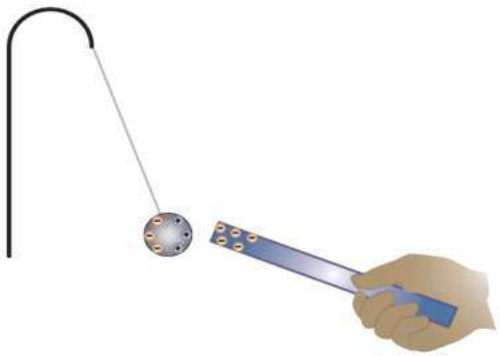
เราสามารถจำแนกชนิดของวัสดุโดยพิจารณาจากความสามารถในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในวัสดุ ซึ่งอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ไปมาอย่างอิสระโดยไม่ยึดติดกับอะตอมใดอะตอมหนึ่ง เรียกว่า **ตัวนำไฟฟ้า** (electrical conductor) หรือเรียกสั้น ๆ ว่า **ตัวนำ** นั่นคือ เมื่ออิเล็กตรอนถูกถ่ายโอนมายังตัวนำ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่อย่างอิสระในตัวนำ ส่วนวัสดุซึ่งอิเล็กตรอนไม่สามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระ เรียกว่า **ฉนวนไฟฟ้า** (electrical insulator) หรือเรียกสั้น ๆ ว่า **ฉนวน** เมื่ออิเล็กตรอนถูกถ่ายโอนมายังฉนวน อิเล็กตรอนจะอยู่ ณ ตำแหน่งที่มีการสัมผัสกัน ตัวอย่างของตัวนำและฉนวนที่พบในชีวิตประจำวัน เช่น แกนโลหะสายไฟเป็นตัวนำไฟฟ้า และเปลือกหุ้มสายไฟเป็นฉนวนไฟฟ้า

เมื่อนำวัตถุที่มีประจุไฟฟ้าเข้าใกล้ตัวนำ จะเกิดผลอย่างไร ศึกษาได้ดังต่อไปนี้

แขวนเม็ดโฟมตัวนำ (เม็ดโฟมที่เคลือบผิวด้วยโลหะบาง ๆ) เมื่อนำแผ่นพีวีซีที่มีประจุไฟฟ้าลบเข้าใกล้เม็ดโฟมตัวนำ เม็ดโฟมจะเบนเข้าหาแผ่นพีวีซีอย่างเห็นได้ชัด ดังรูป 13.4

รูป 13.4 เม็ดโฟมตัวนำเบนเข้าหาแผ่นพีวีซี

การเบนของเม็ดโฟมตัวนำดังกล่าว อธิบายได้ดังนี้ ประจุลบบนแผ่นพีวีซีจะออกแรงผลักอิเล็กตรอนบนเม็ดโฟมตัวนำ ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากผิวด้านที่ใกล้แผ่นพีวีซีไปยังผิวด้านตรงข้ามทำให้ผิวด้านใกล้แผ่นพีวีซีมีประจุเป็นบวก และผิวด้านไกลมีประจุเป็นลบ ดังรูป 13.5



รูป 13.5 ประจุไฟฟ้าบนเม็ดโฟมตัวนำ

ประจุไฟฟ้าบนเม็ดโฟมตัวนำทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างประจุลบบนแผ่นพีวีซีกับประจุบวกที่ผิวเม็ดโฟมตัวนำด้านใกล้แผ่นพีวีซี และแรงผลักระหว่างประจุลบบนแผ่นพีวีซีกับประจุลบที่ผิวเม็ดโฟมตัวนำด้านไกล โดยแรงดึงดูดมากกว่าแรงผลัก สังเกตได้จากเม็ดโฟมตัวนำเคลื่อนที่เข้าหาแผ่นพีวีซี

การนำวัตถุที่มีประจุเข้าใกล้ตัวนำไฟฟ้าจะทำให้เกิดประจุชนิดตรงข้ามบนด้านใกล้ของตัวนำ และเกิดประจุชนิดเดียวกันบนด้านไกลของตัวนำ วิธีทำให้เกิดประจุในลักษณะเช่นนี้เรียกว่า **การเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิต** (electrostatic induction)

จากสถานการณ์ข้างต้น มีการนำความรู้ดังกล่าวมาประยุกต์และสร้างเป็นอุปกรณ์ในการตรวจสอบประจุไฟฟ้าได้ ดังรูป 13.6 ซึ่งเรียกว่า **อิเล็กโทรสโคปลูกพิท** (pith ball electroscope) สามารถตรวจสอบได้โดยนำวัตถุที่ต้องการตรวจสอบเข้าใกล้ลูกพิทที่เป็นกลางทางไฟฟ้าซึ่งแขวนอยู่ในแนวดิ่ง ถ้าลูกพิทเบนเข้าหาวัตถุดังกล่าวแสดงว่าวัตถุที่ตรวจสอบเป็นวัตถุที่มีประจุ

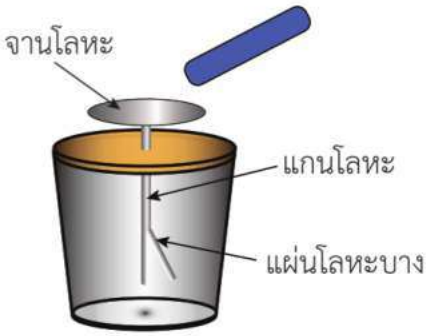
รูป 13.6 อิเล็กโทรสโคปลูกพิท

ชวนคิด

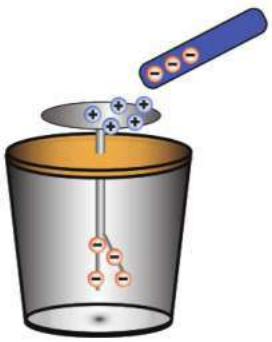
เมื่อนำวัตถุเข้าใกล้ลูกพิท หากลูกพิทเบนออกจากวัตถุสามารถสรุปเกี่ยวกับประจุไฟฟ้าได้อย่างไร

นอกจากนี้ยังมี**อิเล็กโทรสโคปแผ่นโลหะ** (leaf electroscope) โดยประกอบด้วยจานโลหะหรือทรงกลมโลหะที่เชื่อมกับแกนโลหะซึ่งมีแผ่นโลหะบางติดอยู่ และบรรจุในภาชนะใสที่ป้องกันการรบกวนจากภายนอก ดังรูป 13.7 ก. ซึ่งสามารถตรวจสอบการมีประจุไฟฟ้าได้ โดยสังเกตจากการกางหรือหุบของแผ่นโลหะบาง และอธิบายได้ดังนี้

ขณะที่อิเล็กโทรสโคปเป็นกลาง แผ่นโลหะจะหุบ แต่เมื่อนำวัตถุที่เป็นประจุลบเข้าใกล้จานโลหะ ประจุลบบนวัตถุจะผลักอิเล็กตรอนของจานโลหะ ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่มายังบริเวณแกนและแผ่นโลหะบางเป็นผลให้แผ่นโลหะบางกางออก เนื่องจากแผ่นโลหะบางและแกนมีประจุชนิดเดียวกัน ดังรูป 13.7 ข. แต่เมื่อนำวัตถุที่มีประจุลบออกห่างจากจานโลหะ อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่มายังบริเวณแกนและแผ่นโลหะบางมีจำนวนลดลงจนไม่มี ทำให้แผ่นโลหะบางกางน้อยลงจนหุบ



ก. ส่วนประกอบของอิเล็กโทรสโคปแผ่นโลหะ



ข. ประจุไฟฟ้าบนอิเล็กโทรสโคปแผ่นโลหะ

รูป 13.7 อิเล็กโทรสโคปแผ่นโลหะ

ชวนคิด

ถ้านำวัตถุที่มีประจุบวกเข้าหาจานโลหะของอิเล็กโทรสโคปที่เป็นกลาง จะอธิบายการกางของแผ่นโลหะบางได้อย่างไร

ความเข้าใจการกางและหุบของแผ่นโลหะบางของอิเล็กโทรสโคปแผ่นโลหะ สามารถนำมาใช้เป็นพื้นฐานทำให้อิเล็กโทรสโคปมีประจุไฟฟ้าโดยการเหนี่ยวนำ ศึกษาได้จากกิจกรรม 13.2

กิจกรรม 13.2 การทำให้อิเล็กโทรสโคปมีประจุไฟฟ้าโดยการเหนี่ยวนำ

จุดประสงค์

1. บอกขั้นตอนการทำให้อิเล็กโทรสโคปแผ่นโลหะที่เป็นกลางมีประจุไฟฟ้า
2. อธิบายการเหนี่ยวนำให้อิเล็กโทรสโคปแผ่นโลหะที่เป็นกลางให้มีประจุไฟฟ้า

วัสดุและอุปกรณ์

1. อิเล็กโทรสโคปแผ่นโลหะ	1 ชุด
2. ท่อพีวีซี ยาว 30 เซนติเมตร	1 อัน
3. ผ้าสักหลาด	1 ผืน

วิธีทำกิจกรรม

รูป แผ่นโลหะบางของอิเล็กโทรสโคปก่อนเริ่มกิจกรรม

ให้นักเรียนทำตามขั้นตอนต่อเนื่องกันและวาดภาพการกางหรือหุบของแผ่นโลหะบาง ในแต่ละข้อของการทำกิจกรรม

1. นำผ้าสักหลาดถูกับท่อพีวีซี และนำเข้าใกล้จานโลหะอิเล็กโทรสโคป สังเกตแผ่นโลหะบางและวาดรูป

2. ใช้นิ้วมือแตะจานโลหะ สังเกตแผ่นโลหะบางและวาดรูป

3. ยกนิ้วมือออกจากจานโลหะ สังเกตแผ่นโลหะบางและวาดรูป

4. นำท่อพีวีซีออกห่างจากจานโลหะอิเล็กโทรสโคป สังเกตแผ่นโลหะบางและวาดรูป

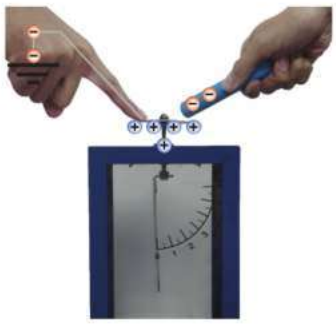
คำถามท้ายกิจกรรม

- ☐ ในวิธีทำข้อ 1 ท่อพีวีซีและจานโลหะมีประจุชนิดใด
- ☐ ในวิธีทำข้อ 2, 3 และ 4 แผ่นโลหะบางมีการกางหรือหุบ และสรุปเกี่ยวกับประจุบนแผ่นโลหะบางได้อย่างไร

จากกิจกรรม 13.2 เมื่อเลื่อนปลายท่อพีวีซีที่มีประจุเป็นลบเข้าใกล้จานโลหะเป็นการเหนี่ยวนำให้จานโลหะมีประจุเป็นบวก และแผ่นโลหะบางมีประจุเป็นลบและกางออก ดังรูป 13.8 ก.

ก. ประจุไฟฟ้าบริเวณจานโลหะและแผ่นโลหะบาง

เมื่อใช้นิ้วแตะด้านบนส่วนที่เป็นจานโลหะ แผ่นโลหะบางหุบลง เนื่องจากอิเล็กตรอนบริเวณแผ่นโลหะบางเคลื่อนที่ไปยังนิ้วมือและร่างกายของเรา เสมือนการต่อสายดิน บริเวณแผ่นโลหะบางจึงมีประจุลบน้อยลงจนไม่มีประจุจึงมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า ดังรูป 13.8 ข.



ข. ประจุไฟฟ้าที่จานโลหะ เมื่อใช้นิ้วแตะที่จานโลหะ

เมื่อยกนิ้วออก โดยที่ท่อพีวีซียังอยู่ที่เดิม แผ่นโลหะบางยังคงหุบเนื่องจากแผ่นโลหะบางยังมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า ขณะนั้นจานโลหะมีประจุเป็นบวก เพราะถูกเหนี่ยวนำไว้ด้วยประจุลบจากท่อพีวีซี ดังรูป 13.8 ค.

ค. ประจุไฟฟ้าที่จานโลหะ เมื่อนำนิ้วแตะออก

เมื่อนำท่อพีวีซีห่างออกไป แผ่นโลหะบางกางออก เนื่องจากอิเล็กตรอนจากแผ่นโลหะบางเคลื่อนที่ไปรวมกับประจุบวกบนจานโลหะ ทำให้บริเวณแกนและแผ่นโลหะบาง มีประจุบวก ดังรูป 13.8 ง.

ง. ประจุไฟฟ้าบนอิเล็กโทรสโคป

รูป 13.8 การทำให้อิเล็กโทรสโคปที่เป็นกลางทางไฟฟ้ามีประจุไฟฟ้า

ข้อสังเกต

การต่อสายดิน (grounding) เป็นการทำให้วัตถุที่มีประจุ มีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า โดยต่อวัตถุนั้นกับวัตถุที่เป็นกลางทางไฟฟ้า เช่น โลก ซึ่งมีขนาดใหญ่มาก สามารถให้ประจุและรับประจุจากภายนอกได้อย่างไม่จำกัด และถือว่าโลกมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า จากกิจกรรมข้างต้น เนื่องจากประจุบนอิเล็กโทรสโคปมีเพียงเล็กน้อยร่างกายสามารถรับประจุจากแผ่นโลหะบางเสมือนเป็นโลก ซึ่งพิจารณาได้ดังนี้ หากวัตถุนั้นมีประจุเป็นลบ ประจุลบจะถ่ายโอนให้วัตถุที่เป็นกลางทางไฟฟ้า แต่ถ้าวัตถุนั้นมีประจุเป็นบวก ประจุลบจากวัตถุที่เป็นกลางทางไฟฟ้าจะถ่ายโอนสู่วัตถุที่มีประจุเป็นบวก การต่อสายดินเขียนแสดงเป็นสัญลักษณ์ทางวงจรไฟฟ้าได้ ดังรูป

คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 13.1

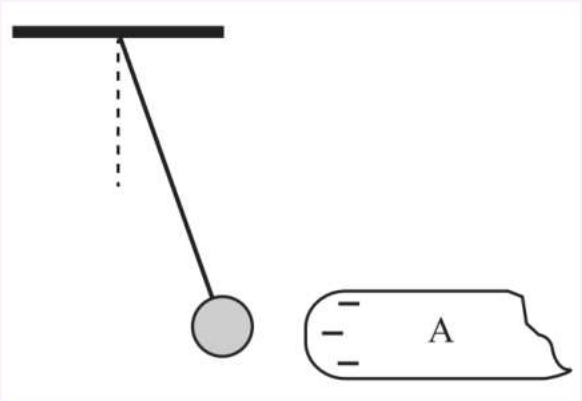
1. แท่งแก้วถูกับผ้าไหมและแท่งพีวีซีถูกับผ้าสักหลาด เมื่อแขวนแท่งทั้งสองใกล้กัน จะเกิดอะไรขึ้น เพราะอะไร
2. จงบอกลักษณะของฉนวนและตัวนำที่เกี่ยวข้องกับหัวข้อต่าง ๆ ในตาราง

หัวข้อ	ฉนวน	ตัวนำ
การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระ		
ความสามารถในการนำไฟฟ้า		
วิธีการทำให้เกิดประจุ		
ตัวอย่าง		

3. ถ้าต้องการให้อิเล็กโทรสโคปแผ่นโลหะมีประจุบวกโดยการเหนี่ยวนำไฟฟ้า จะต้องทำอย่างไร
4. ถ้าต้องการให้วัตถุที่มีประจุ มีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า จะต้องทำอย่างไร

แบบฝึกหัด 13.1

1. A B C เป็นแผ่นวัตถุสามชนิดที่ทำให้มีประจุโดยการขัดสี ซึ่งได้ผลดังนี้
   A และ B ดูดกัน A และ C ผลักกัน ข้อความต่อไปนี้ ข้อใดไม่ถูกต้อง
   ก. A และ C มีประจุบวก แต่ B มีประจุลบ
   ข. A และ B มีประจุลบ แต่ C มีประจุบวก
   ค. A และ C มีประจุบลบ แต่ B มีประจุบวก
   ง. B และ C มีประจุบลบ แต่ A มีประจุบวก
2. ถ้ามีลูกพิทจำนวน 3 ลูก เมื่อทดลองนำลูกพิทเข้าใกล้กันทีละคู่จนครบ 3 คู่ ปรากฏว่าแรงกระทำระหว่างลูกพิททั้ง 3 คู่ เป็นแรงดึงดูด ประจุบนลูกพิทแต่ละลูกเป็นชนิดใด
3. นำวัตถุ A ที่มีประจุลบเข้าใกล้ลูกพิทที่มีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า ทำให้ลูกพิทเบนเข้าหาวัตถุ A ดังรูป ถ้าใช้วัตถุ B ซึ่งมีจำนวนประจุเท่ากับวัตถุ A แต่เป็นประจุต่างชนิดกันวางแทนที่วัตถุ A ลูกพิทจะเบนในลักษณะใด

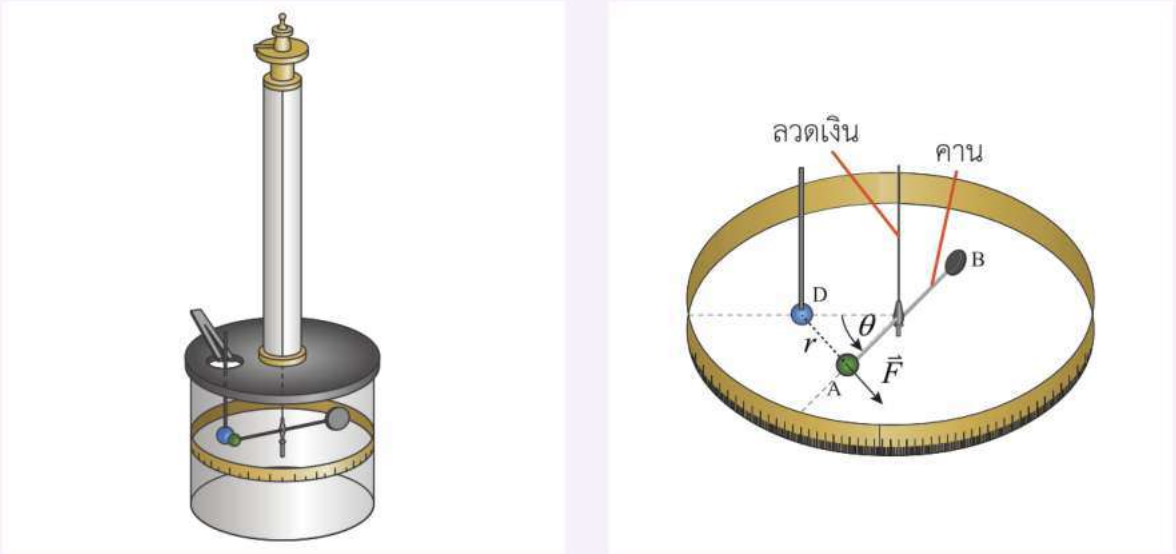


รูป ประกอบแบบฝึกหัด 13.1 ข้อ 3

13.2 กฎของคูลอมบ์

ในหัวข้อ 13.1 ที่ผ่านมา นักเรียนได้เห็นว่าท่อพีวีซีที่มีประจุไฟฟ้าสามารถดูดเศษกระดาษชิ้นเล็ก ๆ ได้ หรือทำให้แผ่นโลหะบางในอิเล็กโทรสโคปกางออก เมื่อมีการเหนี่ยวนำประจุไฟฟ้า แสดงว่ามีแรงระหว่างวัตถุเกิดขึ้น เมื่อวัตถุนั้นมีประจุไฟฟ้า

ความรู้เพิ่มเติม



ก. ข.

รูป การทดลองของคูลอมบ์

คูลอมบ์ได้ทดลองเพื่อศึกษาแรงระหว่างประจุไฟฟ้า โดยใช้อุปกรณ์ ดังรูป ก. ซึ่งมีส่วนประกอบสำคัญ ได้แก่ คานเล็ก ๆ ที่ทำด้วยฉนวนและมีทรงกลมเล็ก ๆ ติดที่ปลายคาน A และ B ข้างละลูก ดังรูป ข. โดยแขวนคานกับลวดเงินเส้นเล็ก ๆ ให้คานวางตัวอยู่ในแนวระดับ ทรงกลมเล็ก ๆ อีกลูกหนึ่งคือ C อยู่ใกล้ A เมื่อทำให้ C และ A มีประจุจะเกิดแรง F ระหว่างประจุบน C และ A ซึ่งอยู่ห่างกันเป็นระยะ r คูลอมบ์พบว่า ขนาดของแรงระหว่างประจุขึ้นอยู่กับขนาดของประจุ และระยะห่างระหว่างประจุทั้งสอง

คูลอมบ์ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาแรงระหว่างประจุไฟฟ้า สรุปได้ดังนี้

ขนาดของแรงระหว่างประจุไฟฟ้าทั้งสอง มีค่าแปรผันตามผลคูณขนาดประจุแต่ละตัว และแปรผกผันกับกำลังสองของระยะห่างระหว่างประจุทั้งสอง เรียกว่า **กฎของคูลอมบ์** (Coulomb's law) ตามสมการ

$$F = \frac{kq_1q_2}{r^2} \qquad (13.2)$$

เมื่อ k คือ ค่าคงตัวคูลอมบ์ $k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$ มีค่าประมาณ 9.0×10^9 นิวตัน เมตร^2 ต่อคูลอมบ์^{2} $(\mathrm{Nm^2/C^2})$

q_1 และ q_2 คือ ขนาดของประจุทั้งสอง มีหน่วยเป็น คูลอมบ์ (C)

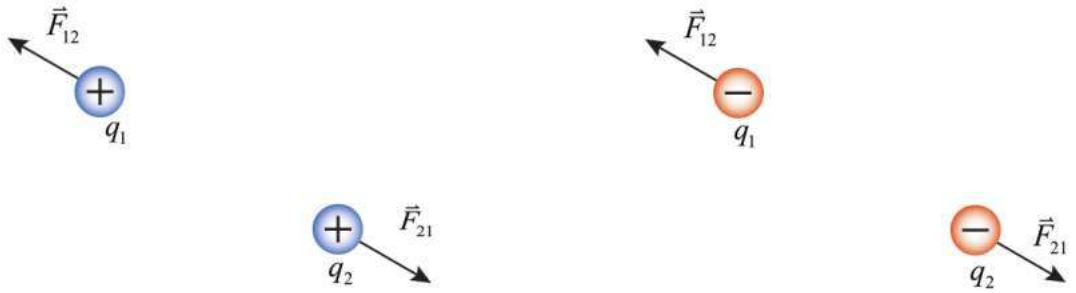
r คือ ระยะห่างระหว่างจุดประจุทั้งสอง มีหน่วยเป็น เมตร (m)

F คือ แรงระหว่างประจุไฟฟ้าทั้งสอง มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

ความรู้เพิ่มเติม

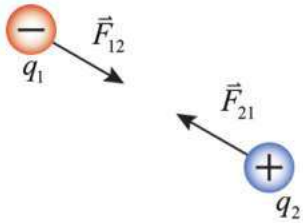
ε_o คือ **สภาพยอมในสุญญากาศ** (permittivity of free space) มีค่าประมาณ $8.8542\times10^{-12}\ \mathrm{C^2/Nm^2}$

ทิศทางของแรงที่ประจุกระทำต่อกันจะอยู่ในแนวเส้นตรงที่ลากเชื่อมต่อระหว่างประจุคู่นั้น ๆ ถ้าประจุทั้งสองเป็นชนิดเดียวกัน (บวกทั้งคู่ หรือ ลบทั้งคู่) แรงที่กระทำต่อประจุทั้งสองเป็นแรงผลัก และมีทิศชี้ออกจากกันในแนวเส้นตรงที่เชื่อมระหว่างประจุทั้งสอง ดังรูป 13.9



รูป 13.9 แรงระหว่างประจุไฟฟ้าชนิดเดียวกัน

แต่ถ้าประจุทั้งสองเป็นคนละชนิด (บวกและลบ) แรงที่กระทำต่อประจุทั้งสองเป็นแรงดึงดูด และมีทิศทางชี้เข้าหากันในแนวเส้นตรงที่เชื่อมระหว่างประจุทั้งสอง ดังรูป 13.10



รูป 13.10 แรงระหว่างประจุไฟฟ้าต่างชนิดกัน

จากกฎการเคลื่อนที่ข้อที่สามของนิวตัน แรงที่วัตถุที่หนึ่งกระทำต่อวัตถุที่สองมีขนาดเท่ากับแรงที่วัตถุที่สองกระทำต่อวัตถุที่หนึ่ง แต่มีทิศทางตรงข้ามกัน ดังนั้น แรงที่ประจุ q_1 กระทำต่อประจุ q_2 และแรงที่ประจุ q_2 กระทำต่อประจุ q_1 จึงเป็นแรงคู่กิริยา-ปฏิกิริยาตามกฎการเคลื่อนที่ข้อที่สามของนิวตัน นั่นคือ

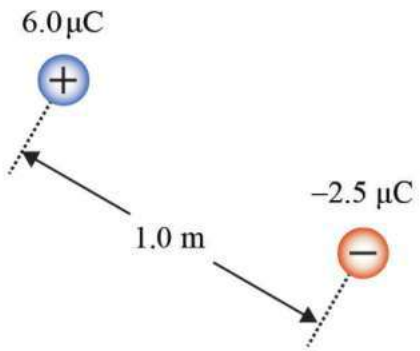
$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$$
$$\left|\vec{F}_{12}\right| = \left|\vec{F}_{21}\right| \qquad (13.3)$$

เมื่อ $\vec{F}_{12}$ คือ แรงที่ประจุ q_2 กระทำต่อประจุ q_1
$\vec{F}_{21}$ คือ แรงที่ประจุ q_1 กระทำต่อประจุ q_2

ข้อสังเกต

เมื่อคำนวณหาแรง ไม่ต้องแทนเครื่องหมายของประจุ ส่วนทิศทางของแรงระหว่างประจุคู่หนึ่ง ๆ พิจารณาจากชนิดของประจุ สำหรับประจุต่างชนิดกันจะเป็นแรงดึงดูด ประจุชนิดเดียวกันจะเป็นแรงผลัก

ตัวอย่าง 13.2 ประจุ –2.5 ไมโครคูลอมบ์ และ 6.0 ไมโครคูลอมบ์ วางอยู่ห่างกัน 1.0 เมตร ดังรูป



จงหาแรงไฟฟ้าที่กระทำต่อประจุ –2.5 ไมโครคูลอมบ์

แนวคิด หาขนาดแรงไฟฟ้าจาก $F = \frac{kq_1q_2}{r^2}$ ระบบนี้ประกอบด้วยประจุบวกและประจุลบ ซึ่งจะเกิดแรงดึงดูดระหว่างกัน โดยทิศทางของแรงที่กระทำจะอยู่ในแนวเส้นตรงซึ่งเชื่อมระหว่างประจุทั้งสอง โดยมีทิศทางพุ่งเข้าหากัน

วิธีทำ แทนค่า $q_1 = -2.5\times10^{-6}\,\text{C}$ $q_2 = 6.0\times10^{-6}\,\text{C}$ $r = 1.0\,\text{m}$ $k = 9.0\times10^{9}\,\text{Nm}^2/\text{C}^2$

$$F = \frac{kq_1q_2}{r^2}$$
$$= \frac{(9.0\times10^9\ \text{Nm}^2/\text{C}^2)(2.5\times10^{-6}\ \text{C})(6.0\times10^{-6}\ \text{C})}{(1.0\ \text{m})^2}$$
$$= 0.135\ \text{N}$$

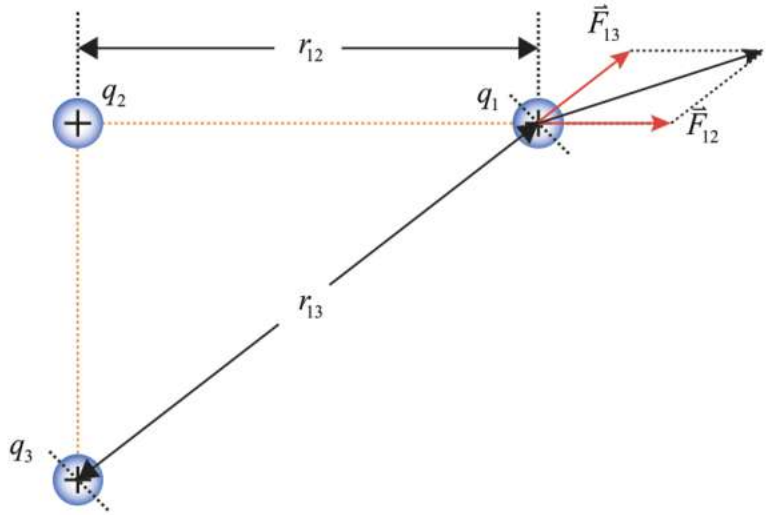
ตอบ แรงไฟฟ้าที่กระทำต่อประจุ –2.5 ไมโครคูลอมบ์ เมื่ออยู่ห่าง 1.0 เมตร มีค่า 0.14 นิวตัน โดยมีทิศไปทางขวา

สำหรับระบบหลายประจุ N เมื่อพิจารณาแรงลัพธ์ที่กระทำต่อประจุหนึ่ง ๆ ในระบบ ต้องหาแรงไฟฟ้าลัพธ์เนื่องจากประจุอื่น ๆ ในระบบที่กระทำต่อประจุนั้น ๆ โดยหาได้จากผลรวมแบบเวกเตอร์ของแรงไฟฟ้าที่กระทำต่อประจุนั้น เช่น แรงไฟฟ้าที่กระทำต่อประจุ q_1 เนื่องจากประจุ q_2, q_3, ..., q_N เท่ากับ

$$\vec{F}_1 = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{13} + \vec{F}_{14} + \cdots + \vec{F}_{1N}$$
$$\vec{F}_1 = \sum_{i=2}^{N} \vec{F}_{1i} \qquad (13.4)$$

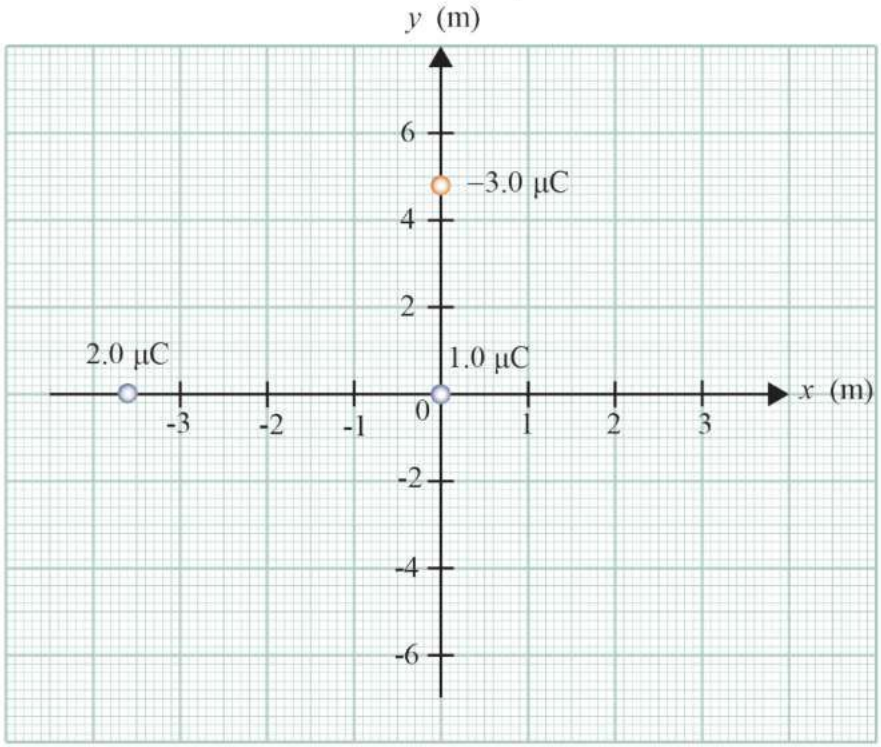
เมื่อ $$\left|\vec{F}_{12}\right| = \frac{kq_1q_2}{r_{12}^2},\ \left|\vec{F}_{13}\right| = \frac{kq_1q_3}{r_{13}^2},\ldots,\left|\vec{F}_{1N}\right| = \frac{kq_1q_N}{r_{1N}^2}$$

จากรูป 13.11 แรงไฟฟ้าของระบบประจุ 3 ประจุ และการผลรวมแบบเวกเตอร์ของแรงไฟฟ้าที่กระทำต่อประจุ q_1



รูป 13.11 แรงไฟฟ้าที่กระทำต่อประจุ q_1 เนื่องจากประจุ q_2 และ q_3

ตัวอย่าง 13.3 จุดประจุ 1.0 ไมโครคูลอมบ์ 2.0 ไมโครคูลอมบ์ และ -0.3 ไมโครคูลอมบ์ อยู่ที่ตำแหน่ง (0.0,0.0) , $(-3.6,0.0)$ และ (0.0,4.8) เมตร ตามลำดับ ดังรูป



จงหาแรงไฟฟ้าลัพธ์ที่กระทำต่อประจุ 1.0 ไมโครคูลอมบ์

แนวคิด แรงไฟฟ้าลัพธ์ที่กระทำต่อประจุ 1.0 ไมโครคูลอมบ์ มาจากแรงผลักของประจุ 2.0 ไมโครคูลอมบ์ ในทิศทาง $+x$ และแรงดึงดูดของประจุ -0.3 ไมโครคูลอมบ์ ในทิศทาง $+y$ โดยหาขนาดของแรงทั้งสองจาก $F = \frac{kq_1q_2}{r^2}$ แล้วจึงรวมแรงทั้งสองแบบเวกเตอร์

วิธีทำ ให้ $\vec{F}_{12}$ แทนแรงที่ประจุ 2.0 ไมโครคูลอมบ์ กระทำต่อประจุ 1.0 ไมโครคูลอมบ์ และ $\vec{F}_{13}$ แทนแรงที่ประจุ -0.3 ไมโครคูลอมบ์ กระทำต่อประจุ 1.0 ไมโครคูลอมบ์ จะได้

$$F_{12} = \frac{kq_1q_2}{r_{12}^2}$$

$$= \frac{(9.0\times10^{9}\ \text{Nm}^2/\text{C}^2)(1.0\times10^{-6}\ \text{C})(2.0\times10^{-6}\ \text{C})}{(3.6\ \text{m})^2}$$

$$= 1.39\times10^{-3}\ \text{N}$$

โดยแรง F_{12} อยู่ในทิศ $+x$

$$F_{13} = \frac{kq_1q_3}{r_{13}^2}$$
$$= \frac{(9.0\times10^9\ \text{Nm}^2/\text{C}^2)(1.0\times10^{-6}\ \text{C})(3.0\times10^{-6}\ \text{C})}{(4.8\ \text{m})^2}$$
$$= 1.17\times10^{-3}\,\text{N}$$

และแรง F_{13} นี้อยู่ในทิศ $+y$ ขนาดแรงไฟฟ้าลัพธ์ที่กระทำต่อประจุ 1.0 ไมโครคูลอมบ์ หาได้จาก

$$F_1 = \sqrt{F_{12}^2 + F_{13}^2}$$
$$= \sqrt{(1.39\times10^{-3}\ \text{N})^2 + (1.17\times10^{-3}\ \text{N})^2}$$
$$= 1.817\times10^{-3}\ \text{N}$$

ทิศของแรงลัพธ์หาได้จาก

$$\tan\theta = \frac{F_{13}}{F_{12}}$$

หรือ
$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{F_{13}}{F_{12}}\right)$$
$$= \tan^{-1}\left(\frac{1.17\times10^{-3}\ \text{N}}{1.39\times10^{-3}\ \text{N}}\right)$$
$$= \tan^{-1}(0.842)$$
$$= 40.1^\circ$$

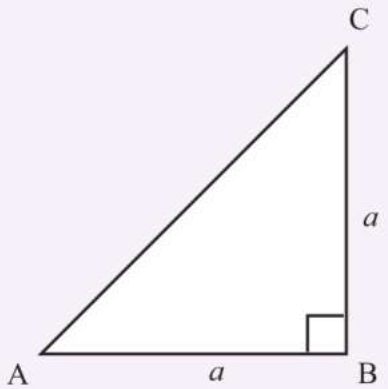
ตอบ แรงไฟฟ้าลัพธ์ที่กระทำต่อประจุ 1.0 ไมโครคูลอมบ์ มีขนาด 1.82×10^{-3} นิวตัน ในทิศทำมุม 40.1 องศากับแกน x

คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 13.2

1. จงอธิบายกฎของคูลอมบ์
2. จงอธิบายแรงระหว่างประจุไฟฟ้า 2 ประจุ $\vec{F}_{12}$ และ $\vec{F}_{21}$ เหมือนหรือแตกต่างกันอย่างไร

แบบฝึกหัด 13.2

1. ลูกพิทสองลูก แต่ละลูกมีประจุ 1.0 ไมโครคูลอมบ์ เมื่อศูนย์กลางของลูกพิทอยู่ห่างกัน 1.0 เมตร ขนาดของแรงระหว่างประจุที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเท่าใด
2. เมื่อวางลูกพิทที่มีประจุห่างกัน 10.0 เซนติเมตร ปรากฏว่ามีแรงกระทำต่อกัน 10^{-6} นิวตัน ถ้าวางลูกพิททั้งสองห่างกัน 2.0 เซนติเมตร จะมีแรงกระทำระหว่างกันเท่าใด
3. จุดประจุขนาด 2 ไมโครคูลอมบ์ 3 จุดประจุ วางเรียงกันเป็นแนวเส้นตรงห่างกันช่วงละ 30 เซนติเมตร จงหาขนาดและทิศทางของแรงที่กระทำต่อประจุตรงจุดกึ่งกลาง เมื่อ
   ก. จุดประจุทั้งสามเป็นประจุบวก
   ข. จุดประจุที่ปลายทั้งสองข้างเป็นประจุบวกและที่ตรงจุดกึ่งกลางเป็นประจุลบ
   ค. จุดประจุที่ปลายข้างหนึ่งเป็นประจุลบและตรงจุดกึ่งกลางกับปลายอีกข้างหนึ่งเป็นประจุบวก
4. ABC เป็นสามเหลี่ยมมุมฉาก มีด้านประกอบมุมฉากยาวด้านละ a ดังรูป



รูป ประกอบแบบฝึกหัด 13.2 ข้อ 4

ถ้าที่จุด A B และ C มีประจุไฟฟ้า $+q$ $+\frac{q}{2}$ และ $-q$ ตามลำดับ ขนาดของแรงที่กระทำต่อประจุที่ B มีค่าเท่าใด

13.3 สนามไฟฟ้า

ในหัวข้อที่แล้ว นักเรียนทราบว่ามีแรงไฟฟ้ากระทำระหว่างประจุแต่ละคู่ แม้ประจุทั้งสองจะไม่สัมผัสกันก็ตาม ในหัวข้อนี้จะพิจารณาต่อไปว่าแรงไฟฟ้ากระทำต่อวัตถุที่มีประจุไฟฟ้าเกี่ยวข้องกับสนามไฟฟ้า เช่นเดียวกับแรงโน้มถ่วงที่กระทำต่อวัตถุที่มีมวลเกี่ยวข้องกับสนามโน้มถ่วง ซึ่งมีแนวคิดว่าหากเราต้องการทราบว่าบริเวณใดมีสนามโน้มถ่วง เราต้องนำวัตถุที่มีมวลมาทดสอบ หากมีแรงกระทำต่อวัตถุมีมวลนั้น แสดงว่าบริเวณนั้นมีสนามโน้มถ่วง

ไมเคิล ฟาราเดย์ นำแนวคิดเกี่ยวกับ "**สนาม** (field)" เพื่อแสดงว่า ประจุไฟฟ้าหนึ่งรับรู้ถึงการมีอยู่ของประจุไฟฟ้าอื่นและส่งแรงไฟฟ้ากระทำต่อประจุนั้นได้อย่างไร โดยเสนอว่า โดยรอบประจุไฟฟ้าหนึ่ง ๆ จะมีสนามไฟฟ้าที่แผ่ออกไปทั่ว**อวกาศ** (space) เมื่อประจุไฟฟ้าอีกประจุหนึ่งอยู่ในสนามไฟฟ้าของประจุดังกล่าวก็จะรับรู้ถึงแรงไฟฟ้าที่ประจุนั้นกระทำได้

ข้อสังเกต

อวกาศในวิชาฟิสิกส์ คือ ทุกหนทุกแห่ง อาจเป็นบริเวณที่ว่าง ไม่มีสสารใด ๆ อยู่เลย หรือบริเวณที่มีสสารก็ได้ ไม่ใช่อวกาศที่อยู่นอกโลก (outer space) ที่คนทั่วไปนึกถึง

13.3.1 ความหมายสนามไฟฟ้า

หากต้องการแสดงว่าในบริเวณหนึ่งมีสนามไฟฟ้าหรือไม่ สามารถแสดงได้โดยนำประจุบวก q เรียกว่า **ประจุทดสอบ** (test charge) ไปวาง ณ ตำแหน่งที่ต้องการ หากมีแรงไฟฟ้า $\vec{F}$ กระทำต่อประจุทดสอบ ณ ตำแหน่งนั้น แสดงว่าตำแหน่งนั้นมีสนามไฟฟ้า $\vec{E}$ เช่น ที่จุด P หากมีแรง $\vec{F}$ กระทำต่อประจุทดสอบ q ดังรูป 13.12 ก. แสดงว่า ที่จุด P มีสนามไฟฟ้า $\vec{E}$ เนื่องจากวัตถุมีประจุ ดังรูป 13.12 ข.

ก. แรงไฟฟ้าที่กระทำต่อประจุ q ข. สนามไฟฟ้าที่จุด P

รูป 13.12 แรงไฟฟ้าที่กระทำต่อประจุทดสอบ q และสนามไฟฟ้า ที่จุด P

สนามไฟฟ้า $\vec{E}$ ที่จุด P เนื่องจากวัตถุที่มีประจุ นิยามได้เป็น

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \qquad (13.5)$$

โดยประจุทดสอบ q ควรมีค่าประจุน้อย ๆ หากประจุทดสอบมีค่าประจุมาก สนามไฟฟ้าจากประจุทดสอบจะไปเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าในบริเวณที่พิจารณาได้ สนามไฟฟ้าเป็นปริมาณเวกเตอร์เช่นเดียวกับแรงไฟฟ้า มีหน่วยเป็น นิวตันต่อคูลอมบ์ (N/C) และมีทิศทางเดียวกับแรงไฟฟ้าที่กระทำต่อประจุบวกที่ใช้ทดสอบ แต่จะมีทิศทางตรงข้ามกับทิศทางของแรงไฟฟ้าที่กระทำต่อประจุลบเมื่อวางในสนามไฟฟ้า ดังตัวอย่าง 13.4

ตัวอย่าง 13.4 เมื่อนำประจุไฟฟ้าขนาด -3×10^{-6} คูลอมบ์ไปวาง ณ จุด ๆ หนึ่ง ปรากฏว่ามีแรง 9×10^{-6} นิวตัน กระทำต่อประจุนี้ ในทิศทาง $-x$ ขนาดของสนามไฟฟ้ามีค่าเท่าใดและมีทิศทางใด

แนวคิด เมื่อนำประจุไฟฟ้าไปวาง ณ จุด ๆ หนึ่ง แล้วพบว่ามีแรงกระทำต่อประจุนั้น ซึ่งแรงดังกล่าวเป็นแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้า สามารถหาขนาดสนามไฟฟ้าได้จาก $E = \frac{F}{q}$ ส่วนทิศทางของสนามไฟฟ้าจะมีทิศทางตรงข้ามกับกับทิศทางของแรงเนื่องจากประจุที่ไปวางเป็นประจุลบ

วิธีทำ จาก $$E = \frac{F}{q}$$

จะได้ $$E = \frac{(9.0\times10^{-6}\ \text{N})}{(3.0\times10^{-6}\ \text{C})}$$

$$= 3\ \text{N/C}$$

ประจุไฟฟ้าที่นำไปวางเป็นประจุลบ แสดงว่าสนามไฟฟ้ามีทิศทางตรงข้ามกับแรงกระทำต่อประจุ เนื่องจากแรงมีทิศทาง $-x$ จะได้ว่าสนามไฟฟ้ามีทิศทาง $+x$

ตอบ ขนาดของสนามไฟฟ้ามีค่า 3 นิวตันต่อคูลอมบ์ มีทิศทาง $+x$

13.3.2 สนามไฟฟ้าของจุดประจุ

แรงไฟฟ้าที่กระทำระหว่างสองจุดประจุ เกิดจากประจุไฟฟ้าหนึ่งอยู่ในสนามไฟฟ้าของอีกประจุไฟฟ้าหนึ่งนั่นเอง เช่น ให้ประจุ q เป็นประจุทดสอบที่อยู่ในสนามไฟฟ้าที่มาจากประจุ Q ซึ่งเป็น**ประจุต้นกำเนิด** (source charge) ณ ตำแหน่งห่างเป็นระยะทาง r

จากกฎของคูลอมบ์ $$F = \frac{kqQ}{r^2}$$

และ $$E = \frac{F}{q}$$

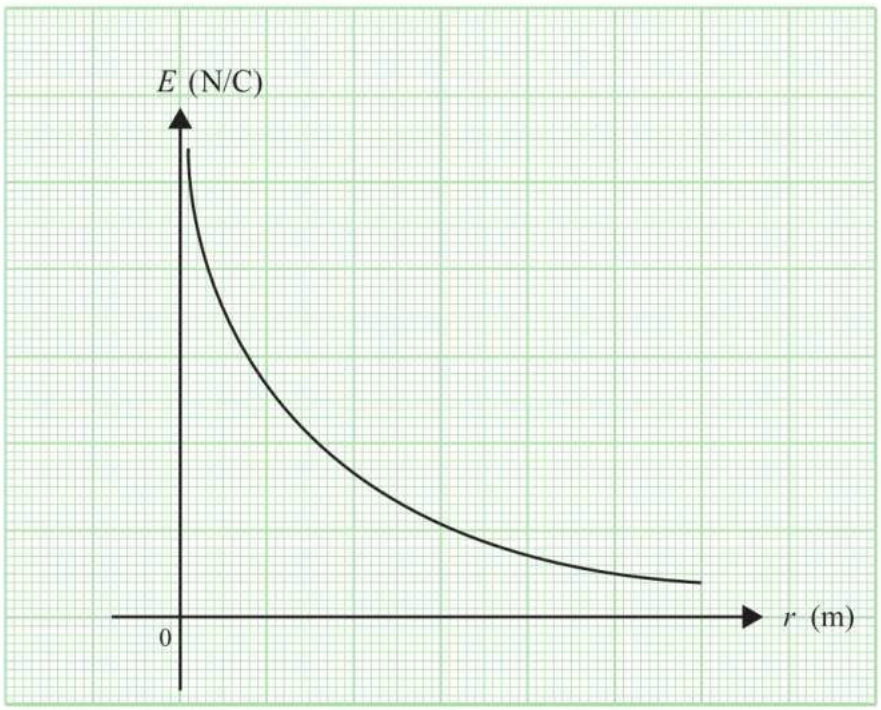
จะได้ว่า ขนาดของสนามไฟฟ้าเนื่องจากจุดประจุ Q ที่ตำแหน่งหนึ่ง ๆ ที่ห่างจากประจุ Q เป็นระยะทาง r มีค่า

$$E = \frac{\left(\frac{kqQ}{r^2}\right)}{q}$$

นั่นคือ

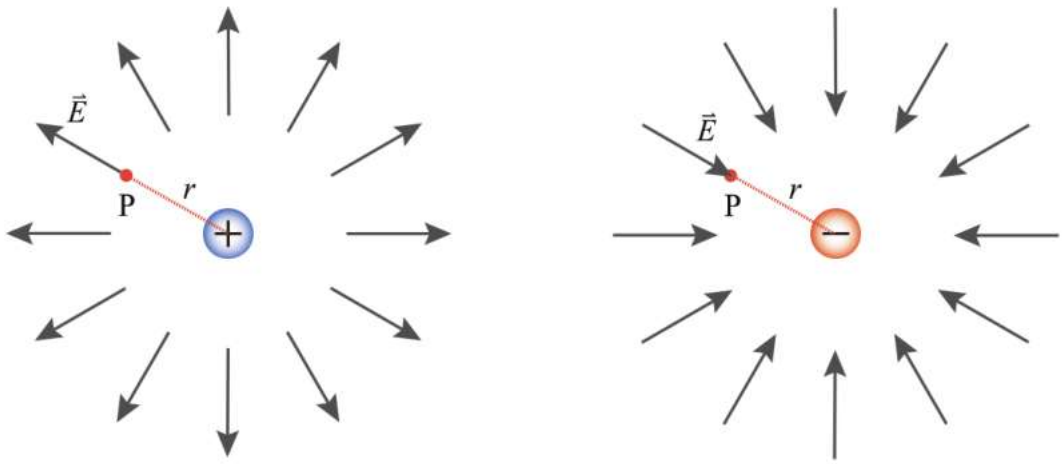
$$E = \frac{kQ}{r^2} \qquad (13.6)$$

จากสมการ (13.6) ขนาดสนามไฟฟ้าเนื่องจากจุดประจุ Q แปรผันตรงกับประจุไฟฟ้า Q และแปรผกผันกับกำลังสองของระยะห่างจากจุดประจุ Q โดยสนามไฟฟ้ามีค่ามากเมื่ออยู่ใกล้จุดประจุต้นกำเนิดและมีค่าลดลงเมื่อไกลออกไป กราฟระหว่างสนามไฟฟ้า (E) กับระยะห่าง (r) จากประจุต้นกำเนิดเป็นดังรูป 13.13



รูป 13.13 กราฟระหว่างขนาดสนามไฟฟ้า (E) กับระยะห่างจากจุดประจุ (r)

เนื่องจากทิศทางของสนามไฟฟ้า พิจารณาจากแรงกระทำต่อประจุบวกทดสอบ และเนื่องจากประจุชนิดเดียวกันจะผลักกัน ประจุชนิดตรงข้ามกันดึงดูดกัน จะสรุปได้ว่าสนามไฟฟ้ามีทิศทางออกจากประจุต้นกำเนิดที่เป็นประจุบวก และเข้าหาประจุต้นกำเนิดที่เป็นประจุลบ ดังรูป 13.14



ก. ทิศทางของสนามไฟฟ้าที่จุด P ห่างจากประจุต้นกำเนิด $+Q$ เป็นระยะ r

ข. ทิศทางของสนามไฟฟ้าที่จุด P ห่างจากประจุต้นกำเนิด $-Q$ เป็นระยะ r

รูป 13.14 ทิศของสนามไฟฟ้าเนื่องจากสนามไฟฟ้าประจุต้นกำเนิดแต่ละชนิด

ตัวอย่าง 13.5 จงหาสนามไฟฟ้า ณ ตำแหน่งห่างจากประจุไฟฟ้าขนาด 4×10^{-6} คูลอมบ์ เป็นระยะ 10 เซนติเมตร

แนวคิด หาขนาดของสนามไฟฟ้า ณ ตำแหน่งประจุไฟฟ้าขนาด 4×10^{-6} คูลอมบ์ เป็นระยะ 10 เซนติเมตร ได้จาก $E=\frac{kQ}{r^2}$ และหาทิศทางจากชนิดของประจุต้นกำเนิด

วิธีทำ จาก
$$E=\frac{kQ}{r^2}$$
$$=\frac{(9.0\times10^{9}\ \mathrm{Nm^2/C^2})(4\times10^{-6}\ \mathrm{C})}{(10\times10^{-2}\ \mathrm{m})^2}$$

จะได้
$$E=3.6\times10^{6}\ \mathrm{N/C}$$

ประจุต้นกำเนิดเป็นประจุบวก แสดงว่าสนามไฟฟ้ามีทิศทางออกจากประจุต้นกำเนิด

ตอบ สนามไฟฟ้า มีขนาด 3.6×10^{6} นิวตันต่อคูลอมบ์ และมีทิศทางออกจากประจุ

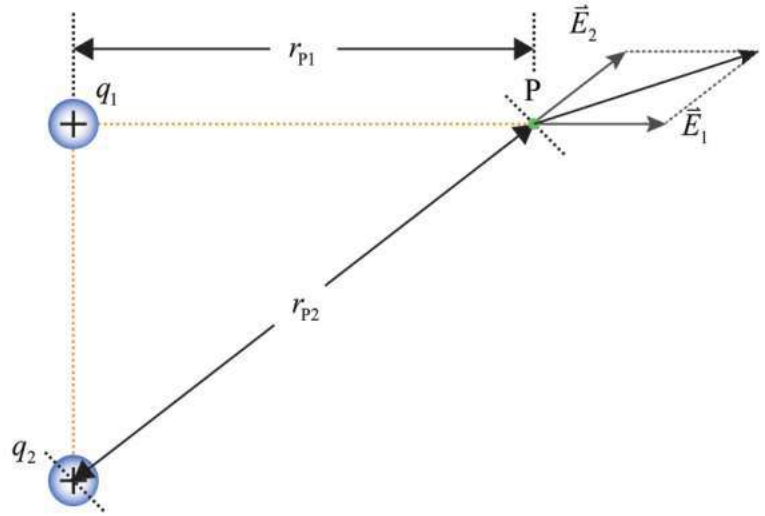
13.3.3 สนามไฟฟ้าของระบบประจุ

สำหรับระบบประจุ N ประจุ สนามไฟฟ้าลัพธ์ที่ตำแหน่งหนึ่ง ๆ มีค่าเท่ากับผลรวมแบบเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าเนื่องจากจุดประจุแต่ละประจุ

$$\vec{E}=\vec{E}_1+\vec{E}_2+\ldots+\vec{E}_N$$

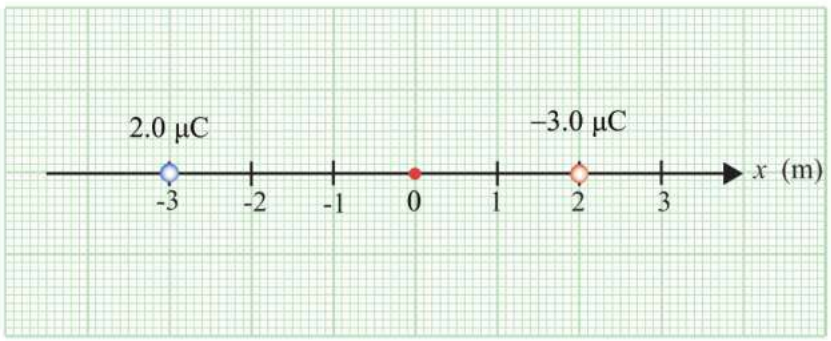
$$\vec{E}=\sum_{i=1}^{N}\vec{E}_i \qquad (13.7)$$

เช่น สนามไฟฟ้าของระบบประจุ 2 ประจุ และการรวมแบบเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่ง P



รูป 13.15 สนามไฟฟ้าที่ตำแหน่ง P จาก 2 ประจุ

ตัวอย่าง 13.6 จุดประจุ 2.0 และ -3.0 ไมโครคูลอมบ์ อยู่ที่ตำแหน่ง (-3.0) และ (2.0) เมตร ตามลำดับ ดังรูป



จงหาสนามไฟฟ้าที่จุดกำเนิด

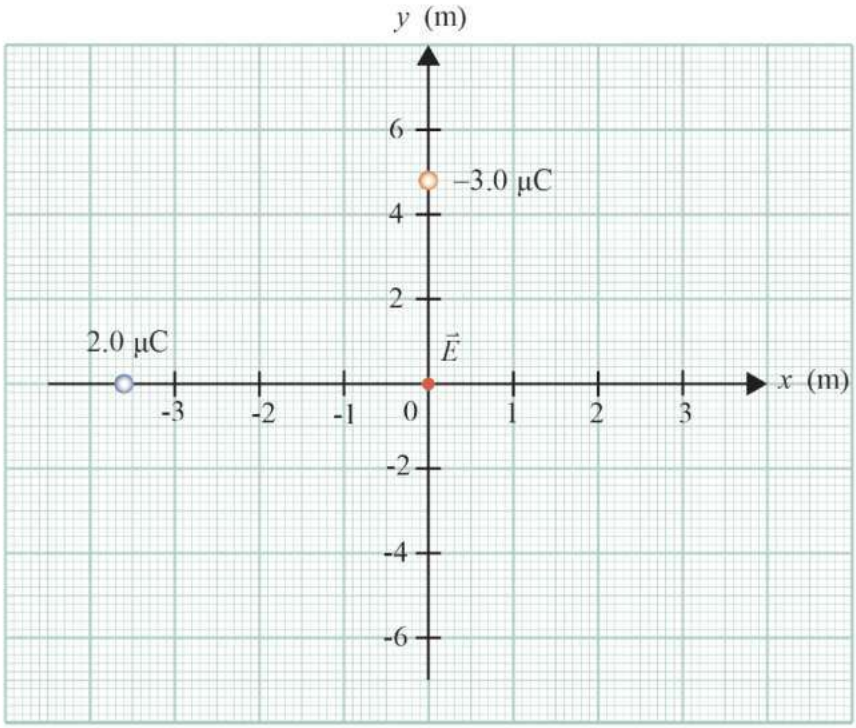
แนวคิด ให้ $\vec{E}_1$ และ $\vec{E}_2$ แทนสนามไฟฟ้าที่จุด $(0,0)$ เนื่องจากจุดประจุ จากนั้นพิจารณาทิศทางของ $\vec{E}_1$ และ $\vec{E}_2$ จากชนิดของประจุต้นกำเนิด และหาขนาดของ $\vec{E}_1$ และ $\vec{E}_2$ จาก $E = \frac{kQ}{r^2}$ แล้วจึงหาสนามไฟฟ้าเนื่องจากประจุทั้งสองจากการรวมแบบเวกเตอร์

วิธีทำ ให้ $\vec{E}_1$ และ $\vec{E}_2$ แทนสนามไฟฟ้าที่จุด $(0,0)$ เนื่องจากจุดประจุ 2.0 และ -3.0 ไมโครคูลอมบ์ ตามลำดับ พิจารณาทิศของ $\vec{E}_1$ และ $\vec{E}_2$ จากชนิดของประจุได้ทิศของ $\vec{E}_1$ และ $\vec{E}_2$ มีทิศไปทางขวา หาขนาดของ $\vec{E}_1$ และ $\vec{E}_2$ จาก $E = \frac{kQ}{r^2}$ แล้วหาสนามไฟฟ้าลัพธ์จากการรวมแบบเวกเตอร์

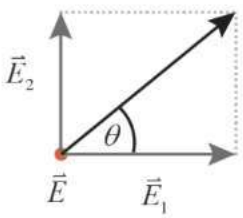
$$
\begin{aligned}
E &= E_1 + E_2 \\
&= k\left(\frac{Q_1}{r_1^2} + \frac{Q_2}{r_2^2}\right) \\
&= \left(9.0\times10^9\ \mathrm{Nm^2/C^2}\right)\left(\frac{2.0\times10^{-6}\ \mathrm{C}}{(3.0\ \mathrm{m})^2} + \frac{3.0\times10^{-6}\ \mathrm{C}}{(2.0\ \mathrm{m})^2}\right) \\
&= 8.75\times10^3\ \mathrm{N/C}
\end{aligned}
$$

ตอบ สนามไฟฟ้าที่จุดกำเนิดมีค่า 8.8×10^3 นิวตันต่อคูลอมบ์ และมีทิศทางไปทาง $+x$

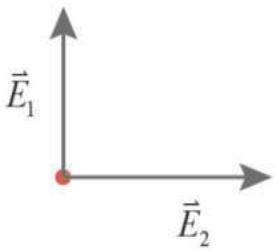
ตัวอย่าง 13.7 จุดประจุ 2.0 และ -3.0 ไมโครคูลอมบ์ อยู่ที่ตำแหน่ง $(-3.6,0.0)$ และ $(0.0,4.8)$ เมตร ตามลำดับ จงหาสนามไฟฟ้าลัพธ์ที่จุดกำเนิด



แนวคิด ให้ $\vec{E}_1$ และ $\vec{E}_2$ แทนสนามไฟฟ้าที่จุด $(0,0)$ เนื่องจากจุดประจุ จากนั้นพิจารณาทิศทางของ $\vec{E}_1$ และ $\vec{E}_2$ จากชนิดของประจุต้นกำเนิด และหาขนาดของ $\vec{E}_1$ และ $\vec{E}_2$ จาก $E = \dfrac{kQ}{r^2}$ แล้วจึง หาสนามไฟฟ้าเนื่องจากประจุทั้งสองจาก การรวมแบบเวกเตอร์ และหาทิศทางจาก $\tan\theta = \dfrac{E_2}{E_1}$



วิธีทำ ให้ $\vec{E}_1$ และ $\vec{E}_2$ แทนสนามไฟฟ้าที่จุด (0,0) พิจารณาทิศทางของ $\vec{E}_1$ และ $\vec{E}_2$ จากชนิดของประจุหาขนาดของสนามไฟฟ้าจาก $E = \frac{kQ}{r^2}$ เนื่องจากประจุ $q_1 = +2.0$ ไมโครคูลอมบ์ และประจุ $q_2 = -3.0$ ไมโครคูลอมบ์ มีทิศทาง ดังรูป



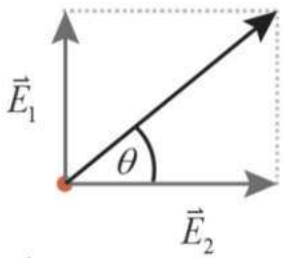
$$E_1 = \frac{kq_1}{r_1^2}$$
$$= \left(9.0\times10^9\ \text{Nm}^2/\text{C}^2\right)\left(\frac{2.0\times10^{-6}\ \text{C}}{(3.6\ \text{m})^2}\right)$$
$$= 1.39\times10^3\ \text{N/C}$$
$$E_2 = \frac{kq_2}{r_2^2}$$
$$= \left(9.0\times10^9\ \text{Nm}^2/\text{C}^2\right)\left(\frac{3.0\times10^{-6}\ \text{C}}{(4.8\ \text{m})^2}\right)$$
$$= 1.17\times10^3\ \text{N/C}$$

เนื่องจาก $\vec{E}_1$ ตั้งฉากกับ $\vec{E}_2$ ขนาดของสนามไฟฟ้าลัพธ์หาได้จาก

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}$$
$$= \sqrt{(1.39\times10^3\ \text{N/C})^2 + (1.17\times10^3\ \text{N/C})^2}$$
$$= 1.82\times10^3\ \text{N/C}$$

ทิศทางของสนามไฟฟ้าลัพธ์หาได้จาก

$$\tan\theta = \frac{E_2}{E_1}$$



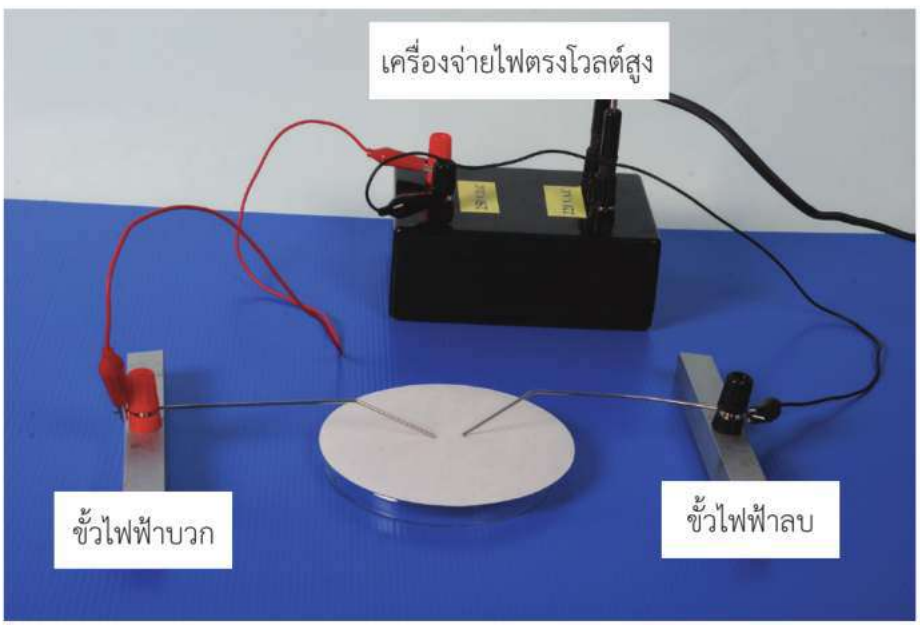
หรือ
$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{E_2}{E_1}\right)$$
$$= \tan^{-1}\left(\frac{1.17\times10^3\ \text{N/C}}{1.39\times10^3\ \text{N/C}}\right)$$
$$= \tan^{-1}(0.84)$$
$$= 40.1^\circ$$

ตอบ สนามไฟฟ้าลัพธ์ที่จุดกำเนิดมีขนาด 1.82×10^3 นิวตันต่อคูลอมบ์ ในทิศทำมุม 40.1 องศากับแกน x

13.3.4 เส้นสนามไฟฟ้า

เราทราบแล้วว่า สนามไฟฟ้ามีอยู่ในบริเวณที่มีแรงไฟฟ้ากระทำต่อประจุทดสอบ โดยมีสนามไฟฟ้ามีทิศทางออกจากประจุต้นกำเนิดที่เป็นประจุบวก และมีทิศทางเข้าหาประจุต้นกำเนิดที่เป็นประจุลบ ดังแสดงในรูป 13.14 จากทิศทางของสนามไฟฟ้าดังกล่าว นำมาใช้เป็นเส้นต่อเนื่องในบริเวณที่มีสนามไฟฟ้า เรียกว่า **เส้นสนามไฟฟ้า** (electric field line) ซึ่งมีลักษณะอย่างไรนั้น จะได้ศึกษาผ่านสถานการณ์ดังต่อไปนี้

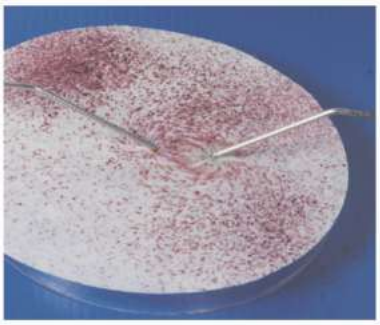
นำกระดาษกรองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 เซนติเมตร มาชุบน้ำแล้วทิ้งไว้ให้แห้งพอหมาด ๆ หรืออาจใช้กระบอกฉีดน้ำ ฉีดให้ทั่วแผ่นแล้ว นำกระดาษกรองนี้ไปวางบนแผ่นแก้ว ใช้ขั้วไฟฟ้า 2 อันที่ต่อกับเครื่องจ่ายไฟตรงโวลต์สูง โดยให้ปลายแหลมของแต่ละขั้วไฟฟ้าสัมผัสกับกระดาษกรองห่างกันประมาณ 3 – 5 เซนติเมตร ดังรูป 13.16



รูป 13.16 การจัดอุปกรณ์

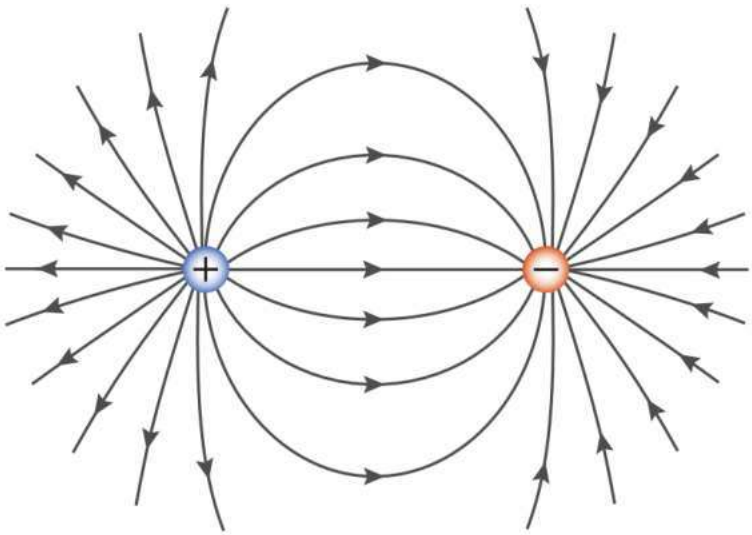
กดสวิตช์ให้เครื่องจ่ายไฟตรงโวลต์สูงทำงาน จากนั้นให้โรยผงด่างทับทิม ($KMnO_4$) ที่บดละเอียดอย่างสม่ำเสมอ โดยให้กระจายบาง ๆ รอบ ๆ ขั้วไฟฟ้าทั้งสอง สังเกตและอภิปรายผลที่เกิดขึ้นในประเด็นต่อไปนี้

1. เมื่อผงด่างทับทิมละลายน้ำจะแตกตัวเป็นไอออนชนิดใดบ้าง
2. ผงด่างทับทิมที่ละลายน้ำแล้ว มีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร
3. เมื่อเวลาผ่านไป ผงด่างทับทิมที่กระจายรอบ ๆ ขั้วไฟฟ้า มีลักษณะอย่างไร



รูป 13.17 การแผ่กระจายของด่างทับทิม

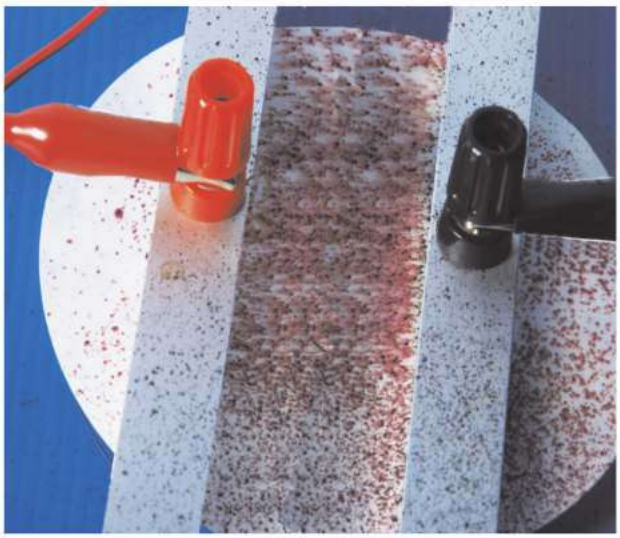
เมื่อโรยผงด่างทับทิมลงบนกระดาษผงด่างทับทิมจะละลายน้ำจะแตกตัวเป็นโพแทสเซียมไอออน (K^+) ซึ่งเป็นไอออนบวกที่ไม่มีสี กับเปอร์แมงกาเนตไอออน (MnO_4^-) ซึ่งเป็นไอออนลบสีม่วง จากรูป 13.17 เมื่อเวลาผ่านไปด่างทับทิมมีการเปลี่ยนแปลง มีลักษณะเป็นเส้นสีม่วงแผ่กระจายเป็นแนวจากขั้วลบไปขั้วบวก โดยแนวเส้นสีม่วงที่แผ่กระจายหรือเส้นสนามไฟฟ้าที่พิจารณาจะมีลักษณะเป็นเส้นสนามไฟฟ้าของประจุสองประจุต่างชนิดกันดังรูป 13.18



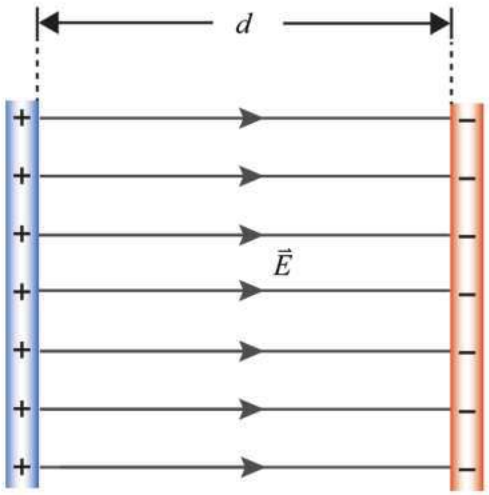
รูป 13.18 เส้นสนามไฟฟ้าของประจุสองประจุต่างชนิดกัน

ถ้าเปลี่ยนปลายขั้วบวกและขั้วลบที่สัมผัสกับกระดาษกรอง จากปลายแหลมเป็นแผ่นโลหะตัวนำ สองแผ่นวางขนานกันหลังจากโรยผงด่างทับทิม การแผ่กระจายของด่างทับทิมและเส้นสนามไฟฟ้ามีลักษณะอย่างไร

สำหรับตัวนำแผ่นโลหะคู่ขนานวางห่างกันเป็นระยะ d แผ่นซ้ายมีประจุบวกสะสมอยู่ และแผ่นขวามีประจุลบสะสมอยู่ เมื่อโรยผงด่างทับทิมระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง การแผ่กระจายของผงสีม่วงเป็นดังรูป 13.19 ก. สนามไฟฟ้าที่เกิดภายในบริเวณแผ่นโลหะคู่ขนานนี้จะสม่ำเสมอ หรือมีขนาดคงตัวและทิศทางเดียวกัน โดยเขียนแทนด้วยเส้นสนามไฟฟ้าที่มีระยะห่างระหว่างเส้นเท่า ๆ กัน ซึ่งแสดงถึงความสม่ำเสมอของสนามไฟฟ้า ดังรูป 13.19 ข.



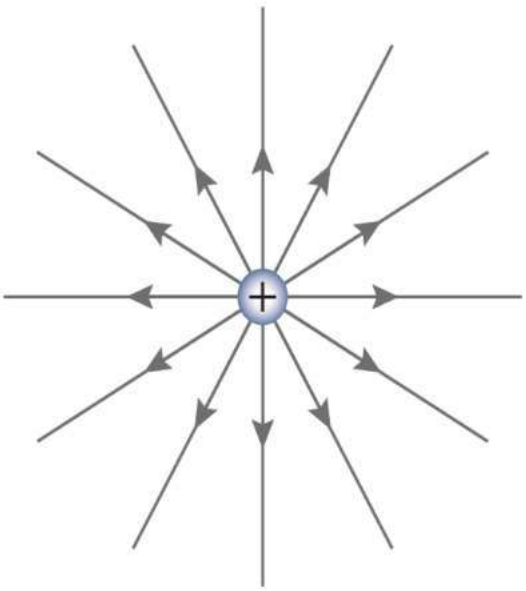
ก. ลักษณะการแผ่กระจายของด่างทับทิมระหว่างแผ่นโลหะคู่ขนาน



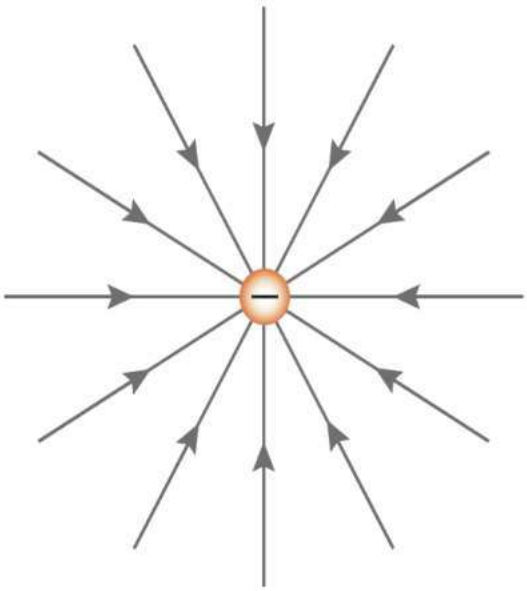
ข. เส้นสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นโลหะคู่ขนาน

รูป 13.19 ลักษณะการแผ่กระจายของด่างทับทิมและเส้นสนามไฟฟ้ากรณีแผ่นโลหะคู่ขนาน

จากวิธีการดังกล่าว เมื่อพิจารณาเส้นสนามไฟฟ้าที่ได้ประกอบรูป 13.14 จะได้ว่าเส้นสนามไฟฟ้าในบริเวณรอบจุดประจุแสดงทิศทางของสนามไฟฟ้าพุ่งออกจากประจุบวกเข้าหาประจุลบตามแนวรัศมี ดังรูป 13.20 ก. และ ข.



ก. เส้นสนามไฟฟ้ารอบจุดประจุบวก จะมีทิศทางออกจากประจุบวก

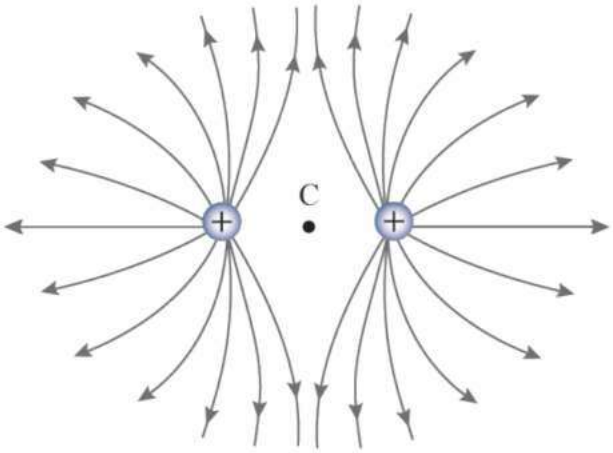


ข. เส้นสนามไฟฟ้ารอบจุดประจุลบ จะมีทิศทางเข้าหาประจุลบ

รูป 13.20 เส้นสนามไฟฟ้าในบริเวณรอบประจุบวกและประจุลบ

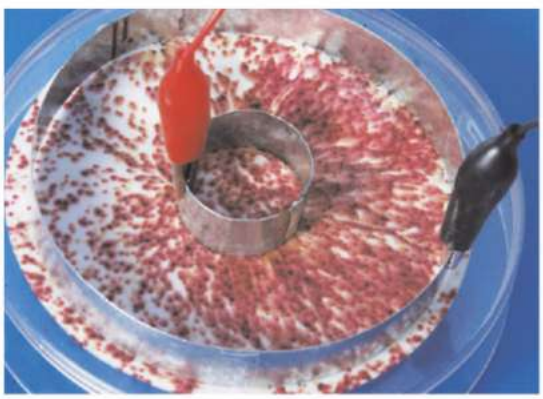
เมื่อพิจารณาทิศทางสนามไฟฟ้าตำแหน่งหนึ่ง ๆ พบว่าสนามไฟฟ้ามีทิศทางอยู่ในแนวสัมผัสเส้นสนามไฟฟ้าในทิศทางหนึ่ง แสดงถึง ณ ตำแหน่งหนึ่ง ๆ มีเส้นสนามไฟฟ้าผ่านได้เส้นหนึ่ง นั่นคือ เส้นสนามไฟฟ้าจะไม่ตัดกัน เมื่อพิจารณาความหนาแน่นของเส้นสนามไฟฟ้าจะพบว่าเส้นสนามไฟฟ้าในบริเวณใกล้จุดประจุจะอยู่ชิดกันมาก หรือความหนาแน่นของเส้นสนามไฟฟ้ามาก และเส้นสนามไฟฟ้าในบริเวณที่ไกลจากจุดประจุจะอยู่ห่างกันมากขึ้น หรือความหนาแน่นของเส้นสนามไฟฟ้าน้อย ความหนาแน่นของเส้นสนามไฟฟ้าในบริเวณหนึ่ง ๆ แสดงถึงขนาดสนามไฟฟ้า ณ บริเวณนั้น ๆ

จากที่กล่าวมาข้างต้นพิจารณาระบบสองประจุ ซึ่งเป็นประจุบวกเหมือนกัน เส้นสนามไฟฟ้าจะออกจากประจุบวกทั้งสองประจุ โดยโค้งแยกจากกัน ทำให้เกิดตำแหน่งที่ไม่มีเส้นสนามไฟฟ้า ณ ตำแหน่งนั้น สนามไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์ เช่น ที่จุด C ในรูป 13.21 เรียกตำแหน่งนั้นว่า **จุดสะเทิน** (neutral point)

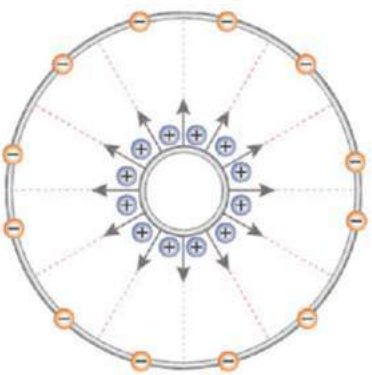


รูป 13.21 เส้นสนามไฟฟ้าของประจุบวกสองประจุ

จากการแสดงเส้นสนามไฟฟ้าโดยสังเกตจากแนวการแผ่กระจายของด่างทับทิม ถ้าเปลี่ยนขั้วบวกและขั้วลบที่สัมผัสกับกระดาษกรอง จากแผ่นโลหะคู่ขนานเป็นตัวนำวงกลม 2 วงขนาดต่างกัน วางซ้อนกัน โดยมีจุดศูนย์กลางร่วมกัน หลังจากโรยผงด่างทับทิม การแผ่กระจายของด่างทับทิมและเส้นสนามไฟฟ้า มีลักษณะ ดังรูป 13.22 ก. โดยภายในของวงกลมวงในไม่มีการกระจายของผงสีม่วงออกเป็นเส้น ๆ ส่วนในบริเวณระหว่างวงกลมทั้งสองมีการแผ่กระจายของผงสีม่วงตามแนวรัศมี แสดงว่าภายในตัวนำวงกลมวงในไม่มีสนามไฟฟ้า ส่วนในบริเวณระหว่างตัวนำวงกลมทั้งสองมีสนามไฟฟ้าในทิศทางตามแนวรัศมี ในลักษณะเดียวกับสนามไฟฟ้าของจุดประจุ ดังรูป 13.22 ข.



ก. ลักษณะการแผ่กระจายของด่างทับทิม

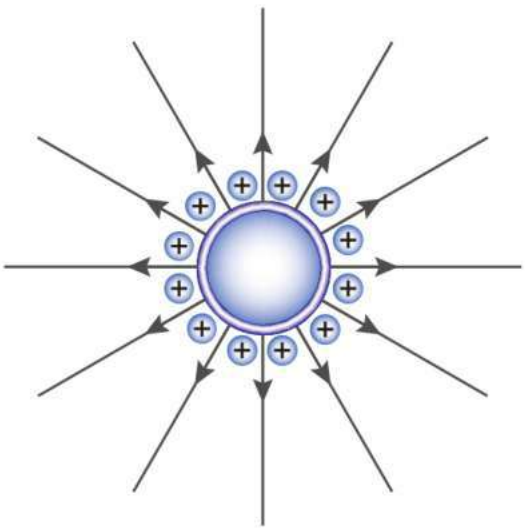


ข. เส้นสนามไฟฟ้าของตัวนำวงกลม 2 วง

รูป 13.22 ลักษณะการแผ่กระจายของด่างทับทิมและเส้นสนามไฟฟ้า กรณีตัวนำวงกลม 2 วง

ถ้าตัวนำวงกลมวงนอกมีรัศมีมากกว่าตัวนำวงกลมวงในมาก ๆ สนามไฟฟ้าภายในและภายนอกตัวนำวงกลมวงในยังมีลักษณะเช่นเดิม ซึ่งถือว่าเป็นลักษณะสนามไฟฟ้าของวงกลมตัวนำใด ๆ ที่มีประจุไฟฟ้า ในทำนองเดียวกันสำหรับตัวนำทรงกลมที่มีประจุไฟฟ้าสามารถพิจารณาสนามไฟฟ้าได้ดังนี้

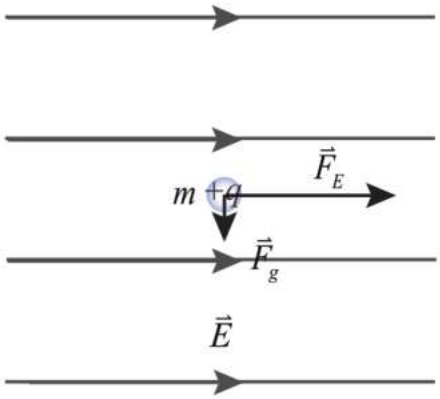
ตัวนำทรงกลมจะมีประจุไฟฟ้ากระจายอย่างสม่ำเสมอบนผิวตัวนำทรงกลมและมีสนามไฟฟ้าภายในตัวนำเป็นศูนย์ สนามไฟฟ้าบนตัวนำมีทิศทางตั้งฉากกับผิวตัวนำนั้น และต่อเนื่องออกไปจากผิวในแนวรัศมีทรงกลม ดังรูป 13.23 แสดงว่าสนามไฟฟ้าเนื่องจากประจุบนตัวนำทรงกลมที่ตำแหน่งห่างจากผิวออกไป หาได้เช่นเดียวกับสนามไฟฟ้าเนื่องจากจุดประจุที่มีประจุ Q เท่ากัน แต่อยู่ที่จุดศูนย์กลางของตัวนำทรงกลม ตามสมการ $E = \frac{kQ}{r^2}$



รูป 13.23 เส้นสนามไฟฟ้าของตัวนำทรงกลม

13.3.5 แรงกระทำต่ออนุภาคที่มีประจุในสนามไฟฟ้า

เมื่อนำประจุบวก q มวล m วางในบริเวณที่มีสนามไฟฟ้า $\vec{E}$ บนโลก แรงที่กระทำต่อประจุมี 2 แรง คือ แรงโน้มถ่วง ($\vec{F}_g$) และแรงไฟฟ้า ($\vec{F}_E$) ดังรูป 13.24



รูป 13.24 แรงที่กระทำต่อประจุบวก q ที่อยู่ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

ในกรณีมวล m น้อยมาก แรงโน้มถ่วงจะมีขนาดน้อยมากเมื่อเทียบกับแรงไฟฟ้า จึงอาจไม่พิจารณาแรงโน้มถ่วง ทำให้แรงลัพธ์ที่กระทำต่อประจุ คือ แรงไฟฟ้าซึ่งมีค่า $q\vec{E}$ จากกฎการเคลื่อนที่ข้อสองของนิวตัน จะได้

$$m\vec{a} = \vec{F}_E = q\vec{E}$$

ประจุไฟฟ้าจึงมีความเร่ง

$$\vec{a} = \frac{q\vec{E}}{m} \qquad (13.8)$$

ถ้าสนามไฟฟ้า $\vec{E}$ สม่ำเสมอ (คงตัวทั้งขนาดและทิศทาง) ความเร่งจะมีค่าคงตัว โดยความเร่งจะมีทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้าสำหรับประจุบวก และมีทิศทางตรงข้ามกับสนามไฟฟ้าสำหรับประจุลบ ดังรูป 13.25 ก. และ ข.

ก. ทิศทางความเร่งของประจุบวก q ในสนามไฟฟ้า **ข. ทิศทางความเร่งของประจุลบ q ในสนามไฟฟ้า**

รูป 13.25 ทิศทางความเร่งของประจุไฟฟ้า เมื่อประจุไฟฟ้าอยู่ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

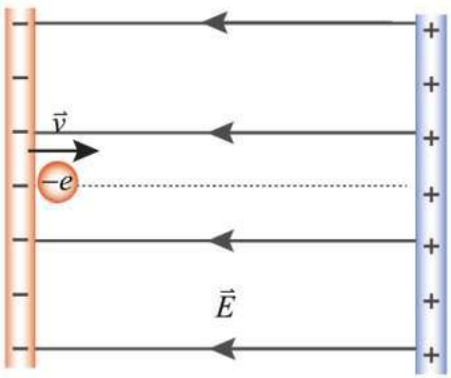
ตัวอย่าง 13.8 แผ่นโลหะคู่ขนานวางตัวในแนวดิ่งอยู่ห่างกันเป็นระยะ 3.0 เซนติเมตร แผ่นซ้ายมีประจุลบและแผ่นขวามีประจุบวก อิเล็กตรอนถูกปล่อยจากหยุดนิ่งให้เคลื่อนที่จากผิวของแผ่นโลหะประจุลบและเคลื่อนเข้าชนกับแผ่นโลหะประจุบวก ในเวลา 1.5×10^{-8} วินาที โดยไม่คิดแรงโน้มถ่วง จงหา

ก. อัตราเร็วของอิเล็กตรอนขณะชนแผ่นโลหะประจุบวก

ข. ขนาดของความเร่งที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ระหว่างแผ่นโลหะทั้งสอง

ค. ขนาดของสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นโลหะทั้งสอง

แนวคิด ขณะที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จะถูกแรงสองแรงกระทำ คือ แรงโน้มถ่วงในแนวดิ่ง และแรงไฟฟ้าในแนวระดับ แต่อิเล็กตรอนมีมวลน้อยมาก จึงสามารถตัดแรงโน้มถ่วงทิ้งได้ ดังรูป



เนื่องจากอิเล็กตรอนมีประจุลบถูกปล่อยให้เคลื่อนที่จากตำแหน่งทางซ้ายซึ่งมีประจุลบ ทำให้อิเล็กตรอนถูกแรงผลักทางไฟฟ้าจากประจุลบบนแผ่นโลหะให้เคลื่อนที่ไปทางขวา ในบริเวณซึ่งสนามไฟฟ้ามีทิศจากขวาไปซ้าย ดังนั้นอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่เร็วขึ้น โดยมีความเร่งคงตัว จึงสามารถใช้สมการการเคลื่อนที่ในกรณีความเร่งคงตัว หาอัตราเร็วเมื่อชนแผ่นโลหะบวกได้จาก $\Delta x = \frac{1}{2}(u+v)t$ จากนั้นหาความเร่งจาก $\Delta x = ut + \frac{1}{2}at^2$ แล้วแทนค่าใน $a = \frac{qE}{m}$ เพื่อหาขนาดของสนามไฟฟ้า (E)

วิธีทำ ก. หาอัตราเร็วที่ชนแผ่นบวกได้จาก

$$\Delta x = \frac{1}{2}(u+v)t$$

$$3.0\text{ cm} = \frac{1}{2}(0+v)(1.5\times10^{-8}\text{ s})$$

$$v = 4.0\times10^{6}\text{ m/s}$$

ข. หาขนาดของความเร่งของอิเล็กตรอน จาก

$$\Delta x = ut + \frac{1}{2}at^2$$

$$3.0 \text{ cm} = (0)(1.5\times10^{-8} \text{ s}) + \frac{1}{2}(a)(1.5\times10^{-8} \text{ s})^2$$

$$a = 2.67\times10^{14} \text{ m/s}^2$$

ค. หาขนาดของสนามไฟฟ้าจาก

$$a = \frac{qE}{m}$$

$$2.67\times10^{14} \text{ m/s}^2 = \frac{(1.6\times10^{-19} \text{ C})}{(9.1\times10^{-31} \text{ kg})}(E)$$

$$E = 1.52\times10^{3} \text{ N/C}$$

ตอบ ก. อัตราเร็วของอิเล็กตรอนขณะชนแผ่นโลหะบวกมีค่า 4.0×10^{6} เมตรต่อวินาที

ข. ขนาดของความเร่งที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ระหว่างแผ่นโลหะทั้งสองมีค่า 2.7×10^{14} เมตรต่อวินาที^{2}

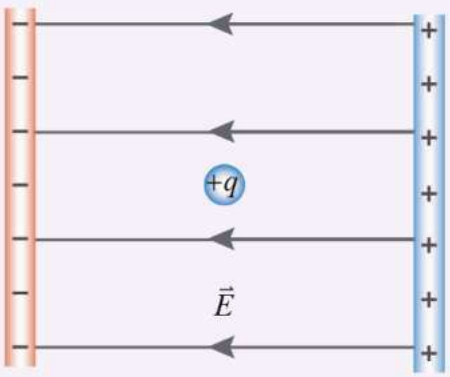
ค. ขนาดของสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นโลหะทั้งสองมีค่า 1.5×10^{3} นิวตันต่อคูลอมบ์

คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 13.3

1. สมการหาสนามไฟฟ้า $E = \frac{F}{q}$ และ $E = \frac{kQ}{r^2}$ สองสมการใช้ต่างกันอย่างไร
2. จงเขียนเส้นสนามไฟฟ้าของสองจุดประจุที่วาง ดังรูป

รูป ประกอบคำถามตรวจสอบความเข้าใจ 13.3 ข้อ 2

3. เส้นสนามไฟฟ้าเป็นเส้นตรงขนานกัน ดังรูป แสดงว่าสนามไฟฟ้ามีขนาดและทิศทางเป็นอย่างไร และถ้ามีจุดประจุไฟฟ้าอยู่ในบริเวณนั้น แรงที่กระทำต่อประจุไฟฟ้านั้น จะมีค่าคงตัวหรือไม่ เพราะเหตุใด



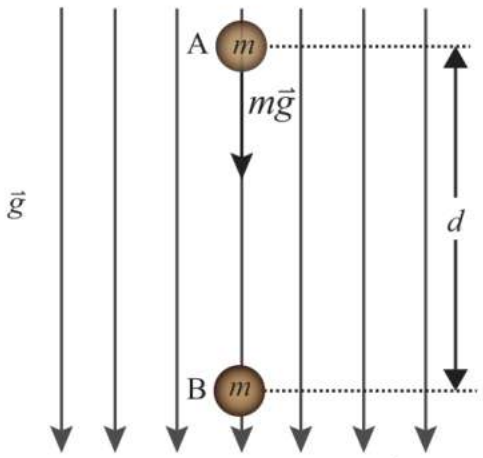
รูป ประกอบคำถามตรวจสอบความเข้าใจ 13.3 ข้อ 3

แบบฝึกหัด 13.3

1. ประจุลบขนาด 2.5 ไมโครคูลอมบ์ อยู่ในสนามไฟฟ้า เกิดแรงกระทำต่อประจุนี้ขนาด 1.2×10^{5} นิวตัน ทิศทางไปทางซ้าย ขนาดของสนามไฟฟ้ามีค่าเท่าใด และมีทิศทางใด
2. ที่ตำแหน่งซึ่งห่างจากจุดประจุต้นกำเนิดเป็นระยะ 2.0 เซนติเมตร มีขนาดของสนามไฟฟ้าเป็น 1.0×10^{5} นิวตันต่อคูลอมบ์ จงหาขนาดของจุดประจุ
3. จุดประจุ 4×10^{-8} คูลอมบ์ และ 9×10^{-8} คูลอมบ์ อยู่ห่างกัน 0.5 เมตร จงหาตำแหน่งที่สนามไฟฟ้าลัพธ์มีค่าเป็นศูนย์จะอยู่ตำแหน่งใด

13.4 ศักย์ไฟฟ้าและความต่างศักย์

เราได้ศึกษาแล้วว่า วัตถุที่มีมวล m เมื่ออยู่ในสนามโน้มถ่วงของโลก จะถูกแรงโน้มถ่วงกระทำ ทำให้วัตถุเคลื่อนที่เข้าสู่ศูนย์กลางโลก มีงานของแรงโน้มถ่วงเกิดขึ้น ซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์โน้มถ่วง เช่น

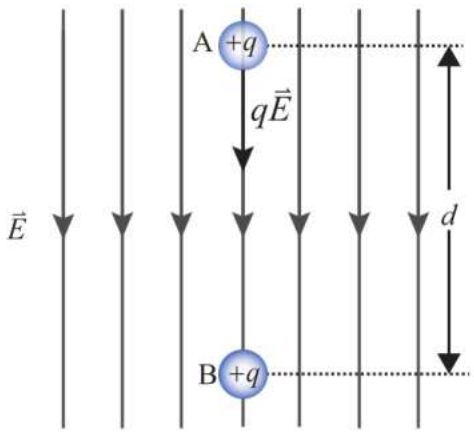


รูป 13.26 แรงกระทำต่อมวล m เมื่ออยู่ในสนามโน้มถ่วงของโลก

เมื่อปล่อยวัตถุจากตำแหน่ง A วัตถุจะเคลื่อนที่มายังตำแหน่ง B ได้เองและมีงานเนื่องจากแรงโน้มถ่วงเกิดขึ้น โดยงานของแรงโน้มถ่วง $m\vec{g}$ ที่กระทำต่อวัตถุมวล m ดังรูป 13.26 เมื่อเคลื่อนที่จากตำแหน่ง A ไปยังตำแหน่ง B ซึ่งมีการกระจัด $(\Delta y = d)$ ในทิศทางเดียวกับแรงโน้มถ่วงมีค่า $W_{A\to B} = mgd$ โดยงานนี้มีค่าเท่ากับพลังงานศักย์โน้มถ่วงของวัตถุที่ลดลง และมีค่าเท่ากับพลังงานจลน์ของวัตถุที่เพิ่มขึ้น สามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ว่า

$$W_{A\to B} = mgd = -\Delta E_p = \Delta E_k \qquad (13.9)$$

ในทำนองเดียวกัน ถ้านำประจุ $+q$ ไปวางที่ตำแหน่ง A ซึ่งอยู่ในบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ $\vec{E}$ ดังรูป 13.27



รูป 13.27 แรงกระทำต่อประจุ q เมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

ประจุ $+q$ จะถูกแรงไฟฟ้า $q\vec{E}$ กระทำ ทำให้ประจุนี้เคลื่อนที่จากตำแหน่ง A ไปยังตำแหน่ง B มีขนาดการกระจัด d ในทิศทางเดียวกับแรงไฟฟ้ามีค่างานของแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าเป็น

$$W_{A\to B} = qEd \qquad (13.10)$$

โดยงานนี้มีค่าเท่ากับพลังงานศักย์ไฟฟ้าของประจุ $+q$ ที่ลดลงและเท่ากับพลังงานจลน์ของประจุ $+q$ ที่เพิ่มขึ้น ดังสมการ

$$W_{A\to B} = qEd = -\Delta E_p = \Delta E_k \qquad (13.11)$$

จากที่กล่าวมาข้างต้นแสดงว่า การเคลื่อนที่ของวัตถุภายใต้สนามโน้มถ่วงและการเคลื่อนที่ของประจุภายใต้สนามไฟฟ้า มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ของวัตถุสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์ตามสมการ

$$\Delta E_k = -\Delta E_p$$

จะได้ $$\Delta E_k + \Delta E_p = 0$$

แสดงว่า $$E = E_{k_A} + E_{p_A} = E_{k_B} + E_{p_B} = \text{คงตัว} \qquad (13.12)$$

ซึ่งเป็นไปตามกฎการอนุรักษ์พลังงานกล

ในกรณีประจุ q อยู่ในสนามไฟฟ้า ณ ตำแหน่งหนึ่งจะเกิดพลังงานศักย์ไฟฟ้า (ของประจุ q) ซึ่งแทนด้วย U จะมีพลังงานศักย์ไฟฟ้าต่อหน่วยประจุ ณ ตำแหน่งนั้น เรียกว่า **ศักย์ไฟฟ้า** (electric potential) แทนด้วย V ตามสมการ

$$V = \frac{U}{q}$$

ศักย์ไฟฟ้าเป็นปริมาณสเกลาร์ มีหน่วยเป็นจูลต่อคูลอมบ์ (J/C) ซึ่งเรียกว่า โวลต์ (volt, V)

จากความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับพลังงานศักย์ไฟฟ้า เราสามารถพิจารณาความต่างศักย์ระหว่างสองตำแหน่งในสนามไฟฟ้า จากการเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์ไฟฟ้า ตามสมการ

$$V_B - V_A = -\frac{W_{A\to B}}{q} \qquad (13.13)$$

$$V_B - V_A = \frac{\Delta U}{q} = \Delta V \qquad (13.14)$$

โดย $V_B - V_A$ หมายถึง ความต่างศักย์ระหว่างตำแหน่ง B เทียบกับตำแหน่ง A แทนด้วย ΔV มีหน่วยโวลต์เช่นเดียวกับศักย์ไฟฟ้า และเป็นปริมาณสเกลาร์ ถ้าให้ตำแหน่งอ้างอิงมีศักย์ไฟฟ้าเป็นศูนย์ ($V_{ref} = 0$) จะได้ ความต่างศักย์ระหว่างตำแหน่งที่พิจารณาเทียบกับตำแหน่งอ้างอิง คือศักย์ไฟฟ้า ณ ตำแหน่งนั้น ตามสมการ

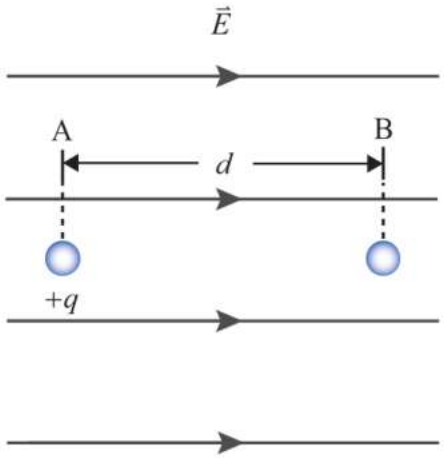
$$V_A - V_{ref} = V_A$$

ข้อสังเกต

การเคลื่อนที่ประจุ q จากตำแหน่ง A ไปตำแหน่ง B ในสนามไฟฟ้า งานของแรงไฟฟ้าเป็นไปตามสมการ $W_{A\to B} = -\Delta U = -q\Delta V = -q(V_B - V_A) = q(V_A - V_B)$

13.4.1 ความต่างศักย์เนื่องจากสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

ในกรณีสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอหาความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับสนามไฟฟ้าได้ดังนี้



รูป 13.28 ประจุไฟฟ้าจุ $+q$ เมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ $\vec{E}$

จากรูป 13.28 ความต่างศักย์ระหว่างตำแหน่ง B เทียบกับตำแหน่ง A หาได้จากสมการ (13.13)

$$V_B - V_A = -\frac{W_{A\to B}}{q}$$

โดย $W_{A\to B}$ ตามรูป 13.28 มีค่าเป็น qEd จะได้

$$V_B - V_A = -\frac{qEd}{q}$$

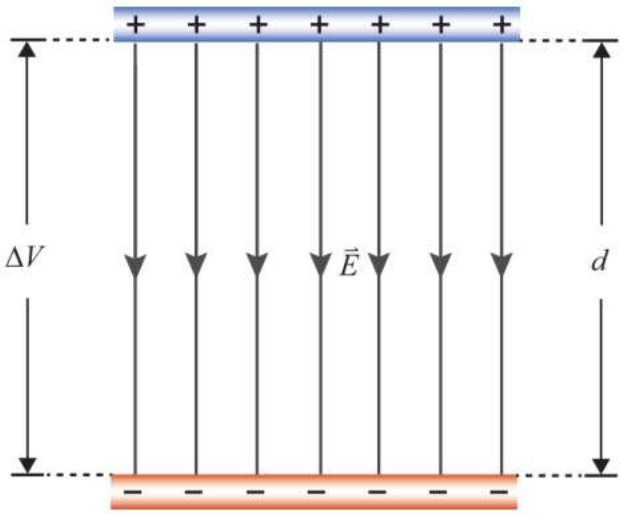
$$V_B - V_A = -Ed \qquad (13.15)$$

ความต่างศักย์ที่ได้มีค่าเป็นลบ แสดงว่าศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่ง A มีค่าสูงกว่าศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่ง B

ข้อสังเกต

1) งานของแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าที่เป็นบวก ทำให้ประจุ $+q$ มีพลังงานศักย์ไฟฟ้าลดลง
2) สนามไฟฟ้ามีทิศทางจากตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าสูงไปยังตำแหน่งที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำ หรือชี้ไปทางตำแหน่งที่มีศักย์ไฟฟ้าลดลง

ตัวอย่างความต่างศักย์ของสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ เช่น แผ่นโลหะคู่ขนาน ดังรูป 13.29



รูป 13.29 แผ่นโลหะคู่ขนานที่มีสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

พิจารณาแผ่นโลหะคู่ขนานตามรูป 13.29 โลหะแผ่นประจุบวก (แผ่นบน) และโลหะแผ่นประจุลบ (แผ่นล่าง) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ $\vec{E}$ มีทิศทางจากโลหะแผ่นประจุบวกไปยังโลหะแผ่นประจุลบ โดยความต่างศักย์ระหว่างแผ่นประจุลบเทียบกับแผ่นประจุบวกมีค่า ΔV เป็น

$$\Delta V = -Ed \tag{13.16}$$

เครื่องหมายลบ แสดงว่า แผ่นประจุบวกมีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าแผ่นประจุลบ

ชวนคิด

ถ้าใช้แรงภายนอกเคลื่อนที่ประจุ $+q$ ในทิศทางตรงข้ามกับสนามไฟฟ้า พลังงานศักย์ไฟฟ้าของประจุ $+q$ มีค่าเปลี่ยนแปลงหรือไม่ อย่างไร

ตัวอย่าง 13.9 แผ่นโลหะสองแผ่นที่วางขนานกันในแนวดิ่งและอยู่ห่างกัน 5 มิลลิเมตร ถ้าความต่างศักย์ระหว่างแผ่นโลหะทั้งสองเท่ากับ 100 โวลต์ ขนาดของสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นโลหะมีค่าเท่าใด

แนวคิด หาสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นโลหะจากสมการ $\Delta V = -Ed$ โดย ΔV เป็นค่าความต่างศักย์ระหว่างแผ่นโลหะที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำ(ประจุลบ) เทียบกับแผ่นโลหะที่มีศักย์ไฟฟ้าสูง (ประจุบวก) มีค่าเป็นลบ แสดงว่า $\Delta V = -100$ V

วิธีทำ ความต่างศักย์ $(\Delta V) = -100$ V

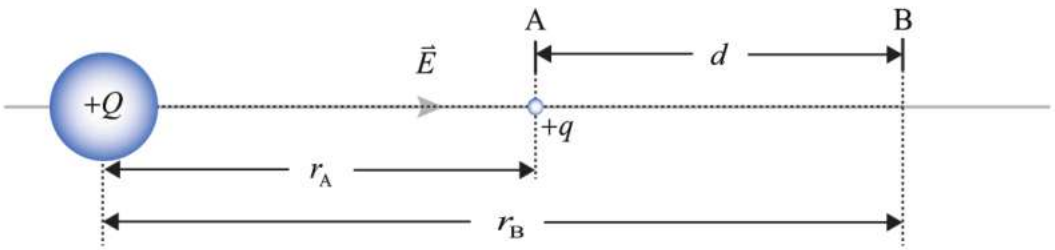
ระยะห่างของแผ่นโลหะคู่ขนาน $(d) = 5\times10^{-3}$ m

จาก
$$\Delta V = -Ed$$
$$-100 \text{ V} = -E(5\times10^{-3} \text{ m})$$
$$E = \frac{-100}{-5\times10^{-3}} \text{ V/m}$$
$$= 2\times10^{4} \text{ V/m}$$

ตอบ ขนาดของสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นโลหะมีค่าเท่ากับ 2×10^{4} โวลต์ต่อเมตร

13.4.2 ศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากจุดประจุ

จากที่ได้ศึกษามาแล้ว พบว่าขนาดของสนามไฟฟ้าเนื่องจากจุดประจุมีค่าเท่ากับ $E = \frac{kQ}{r^2}$ เนื่องจากประจุ $+Q$ นั่นคือ สนามไฟฟ้าเนื่องจากจุดประจุมีค่าไม่คงตัว แสดงว่าถ้านำประจุไฟฟ้า $+q$ ไปวางในสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่ง A ดังรูป 13.30 ประจุไฟฟ้า $+q$ จะเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้าของประจุ $+Q$ จากตำแหน่ง A ไปยังตำแหน่ง B



รูป 13.30 ประจุไฟฟ้า $+q$ วางที่ตำแหน่ง A ในสนามไฟฟ้าของจุดประจุ $+Q$

จะมีแรงไฟฟ้า $q\vec{E}$ กระทำกับประจุ $+q$ มีขนาดเป็น

$$F_E = q\left(\frac{kQ}{r^2}\right)$$

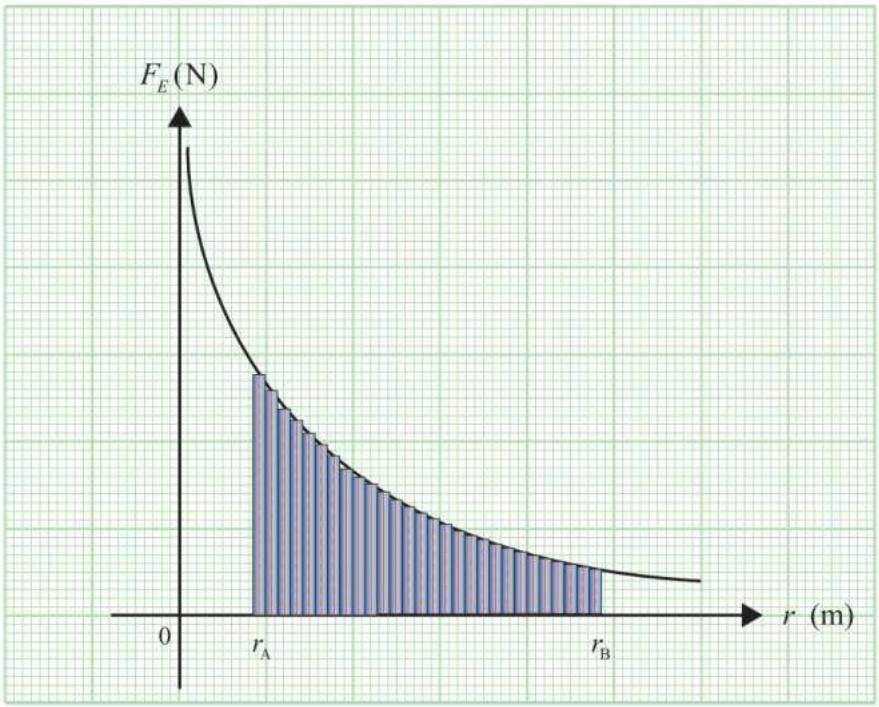
$$F_E = \frac{kQq}{r^2}$$

ซึ่งเป็นแรงไม่คงตัว เมื่อหาศักย์ไฟฟ้าจากพลังงานศักย์ไฟฟ้าต่อหน่วยประจุ ที่หาจากงานของแรงไฟฟ้าจะต้องใช้วิธีหาจากงานของแรงไม่คงตัว ด้วยวิธีแบ่งช่วงการหางานเป็นช่วงเล็ก ๆ ที่เล็กพอพิจารณาได้ว่าแรงในช่วงนั้นมีค่าใกล้เคียงกันจนถือได้ว่ามีค่าคงตัว จากนั้นหางานในแต่ละช่วงเล็ก ๆ เป็นงานย่อย (ในแต่ละช่วงเล็ก ๆ) จากตำแหน่งเริ่มต้นถึงตำแหน่งสุดท้าย แล้วหางานจากผลรวมของงานย่อยทั้งหมดตามสมการ

งานทั้งหมด = ผลบวกของงานย่อย

วิธีหางานจากผลรวมของงานย่อย หาจากพื้นที่ใต้กราฟระหว่างแรงกับตำแหน่งทำได้ดังต่อไปนี้

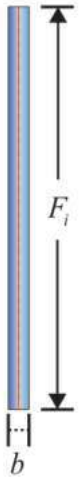
จากแรง $F_E = \frac{kQq}{r^2}$ แสดงว่า F_E มีค่าลดลงเป็นสัดส่วนกับกำลังสองของระยะห่างจากจุดประจุที่ให้สนามไฟฟ้า การหางานจากตำแหน่งเริ่มต้นถึงตำแหน่งสุดท้าย หาได้จากพื้นที่ใต้กราฟดังรูป 13.31



รูป 13.31 การหางานจากพื้นที่ใต้กราฟ F_E กับ r

ซึ่งทำได้โดยแบ่งพื้นที่ใต้กราฟระหว่างตำแหน่ง r_A และ r_B ออกเป็นแถบสี่เหลี่ยมผืนผ้าเล็ก ๆ จำนวน N แถบ โดยแต่ละแถบมีความกว้าง b เท่า ๆ กัน แต่ตัวอย่างแถบในรูป 13.32 แต่มีความสูงแตกต่างกัน โดยผลรวมของพื้นที่แถบสี่เหลี่ยมผืนผ้า N แถบ จะมีค่าใกล้เคียงกับพื้นที่ใต้กราฟ เมื่อ N มีค่ามาก ๆ หรือ b มีค่าน้อยมาก ๆ จนเข้าใกล้ศูนย์นั่นเอง โดยค่า b หาได้จาก

$$b = \frac{r_B - r_A}{N}$$



รูป 13.32 ตัวอย่างแถบสี่เหลี่ยมผืนผ้าเล็ก ๆ

ดังนั้นงานของแรงไฟฟ้าในการเคลื่อนที่ประจุจาก A ไป B มีค่าเท่ากับพื้นที่ใต้กราฟระหว่างแรงไฟฟ้ากับตำแหน่ง หาได้จาก

$$W_{A\to B} = F_1 b + F_2 b + \ldots + F_N b \qquad (13.17)$$
$$= \sum_{i=1}^{N} F_i b$$

เมื่อ F_1 คือ แรงไฟฟ้า ณ ตำแหน่งห่างจากจุดประจุ Q เป็นระยะ r_A

F_2 คือ แรงไฟฟ้า ณ ตำแหน่งห่างจากจุดประจุ Q เป็นระยะ r_A+b

...

F_N คือ แรงไฟฟ้าของแถบที่ N ห่างจากจุดประจุ Q เป็นระยะ $r_A+(N-1)b$ จากจุดประจุ Q และมีค่าเท่ากับความสูงของสี่เหลี่ยมผืนผ้ารูปที่ N

พิจารณา $$F_1 = \frac{kQq}{r_A^2}$$

เนื่องจาก b มีค่าน้อยมาก ๆ จนเข้าใกล้ศูนย์ เราสามารถประมาณ r_A^2 ด้วย $r_A(r_A+b)$

$$F_1 \approx \frac{kQq}{r_A(r_A+b)} = kQq\left(\frac{1}{r_A(r_A+b)}\right) = kQq\left(\frac{(r_A+b)-r_A}{r_A(r_A+b)}\right)\frac{1}{b}$$

จัดรูปใหม่ได้เป็น

$$F_1 = \frac{kQq}{b}\left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_A+b}\right)$$

ในทำนองเดียวกัน

$$F_2 = \frac{kQq}{b}\left(\frac{1}{r_A+b} - \frac{1}{r_A+2b}\right)$$

และ

$$F_N = \frac{kQq}{b}\left(\frac{1}{r_A + (N-1)b} - \frac{1}{r_B}\right)$$

ซึ่งนำมาหางานทั้งหมดจากตำแหน่ง A ถึงตำแหน่ง B ได้

$$W_{A\to B} = kQq\left[\left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_A + b}\right) + \left(\frac{1}{r_A + b} - \frac{1}{r_A + 2b}\right) + \left(\frac{1}{r_A + 2b} - \frac{1}{r_A + 3b}\right) + \ldots + \left(\frac{1}{r_A + (N-1)b} - \frac{1}{r_B}\right)\right]$$

จะได้

$$W_{A\to B} = kQq\left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B}\right) \tag{13.18}$$

แทนค่าในสมการ

$$V_B - V_A = -\frac{W_{A\to B}}{q}$$

จะได้

$$V_B - V_A = -\frac{1}{q}\left[kQq\left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B}\right)\right]$$

$$V_B - V_A = kQ\left(\frac{1}{r_B} - \frac{1}{r_A}\right) \tag{13.19}$$

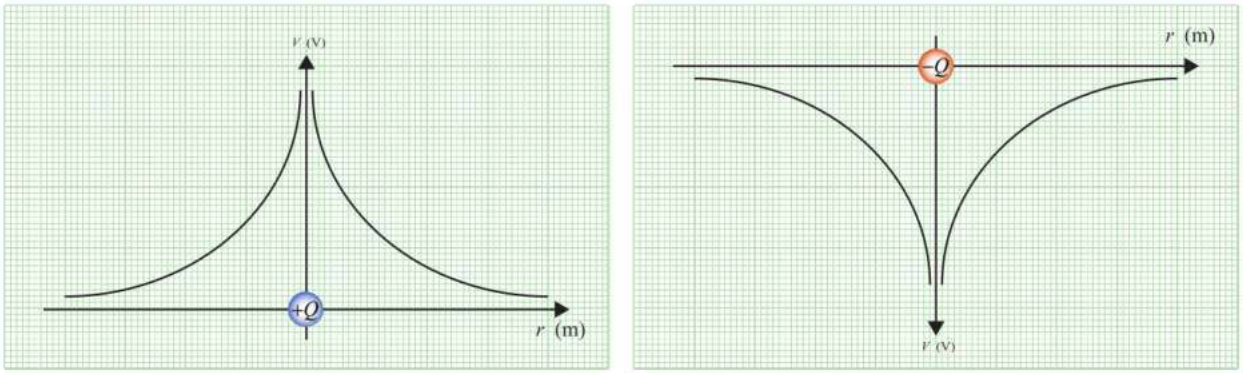
โดยกำหนดให้ตำแหน่ง B เป็นตำแหน่งที่ระยะอนันต์ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเป็นศูนย์ จะได้

$$V_A = \frac{kQ}{r_A}$$

ซึ่งสรุปได้ว่าศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากจุดประจุ Q ที่ตำแหน่งห่างจากจุดประจุ Q เป็นระยะ r หาได้จาก

$$V = \frac{kQ}{r} \tag{13.20}$$

จากความสัมพันธ์ในสมการ (13.20) กรณีจุดประจุ Q เป็นประจุบวก ศักย์ไฟฟ้ามีค่ามากเมื่ออยู่ใกล้จุดประจุ Q แต่ขนาดลดลงเมื่ออยู่ไกลออกไปจากจุดประจุ Q โดยศักย์ไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์ที่ระยะอนันต์ ศักย์ไฟฟ้าสำหรับประจุบวกมีค่ามากกว่าศูนย์ ดังรูป 13.33 ก. สำหรับจุดประจุ Q เป็นประจุลบสนามไฟฟ้ามีทิศพุ่งเข้าหาประจุ Q ทำให้งานของแรงไฟฟ้าในการเคลื่อนที่ประจุ $+q$ จากตำแหน่งใด ๆ ไปยังระยะอนันต์ มีค่าเป็นลบ ดังนั้นศักย์ไฟฟ้าของจุดประจุลบจะมีค่าเป็นลบและเป็นศูนย์ที่ระยะอนันต์ ดังรูป 13.33 ข. ดังนั้น ในการคำนวณหาศักย์ไฟฟ้าตามสมการ (13.20) จะต้องแทนเครื่องหมายของประจุด้วยเสมอ

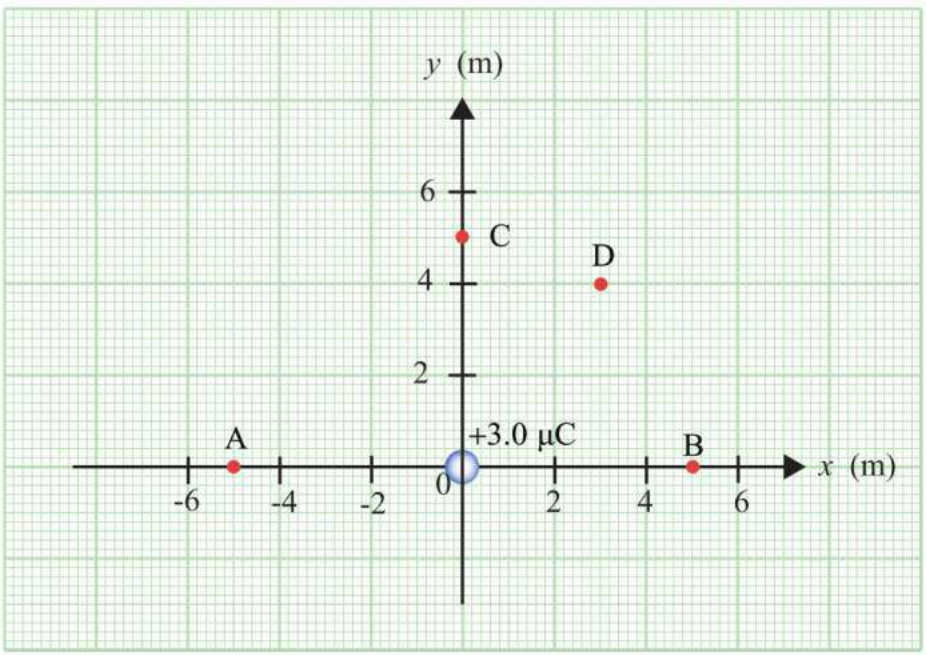


ก. จุดประจุ Q เป็นประจุบวก ข. จุดประจุ Q เป็นประจุลบ

รูป 13.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าของจุดประจุ Q กับระยะห่างจากจุดประจุ

จากสมการ (13.20) ข้างต้น และความสัมพันธ์ $V = \frac{U}{q}$ พิจารณาได้ว่า พลังงานศักย์ไฟฟ้าเกิดขึ้นเมื่อจุดประจุ q วางอยู่ในสนามไฟฟ้าของจุดประจุ Q โดยพลังงานศักย์ไฟฟ้าของจุดประจุ q มีค่าเท่ากับงานของแรงไฟฟ้าที่นำประจุ q จากระยะอนันต์มายังจุดนั้น หรือ $U = \frac{kQq}{r}$

ตัวอย่าง 13.10 ประจุ 3.0 ไมโครคูลอมบ์ อยู่ที่ตำแหน่ง (0.0,0.0) เมตร จงหาศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่ง A (−5.0,0.0) B (5.0,0.0) C (0.0,5.0) และ D (3.0,4.0) เมตร



แนวคิด ศักย์ไฟฟ้าของจุดประจุหาจาก $V = k\dfrac{Q}{r}$

วิธีทำ ศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่ง A

ตำแหน่ง A อยู่ห่างจุดประจุ 3.0 ไมโครคูลอมบ์ เป็นระยะ $r_A = 5.0$ เมตร

$$V_A = k\frac{Q}{r_A}$$

$$= \left(9.0\times10^{9}\ \text{Nm}^2/\text{C}^2\right)\left(\frac{3.0\times10^{-6}\ \text{C}}{5.0\ \text{m}}\right)$$

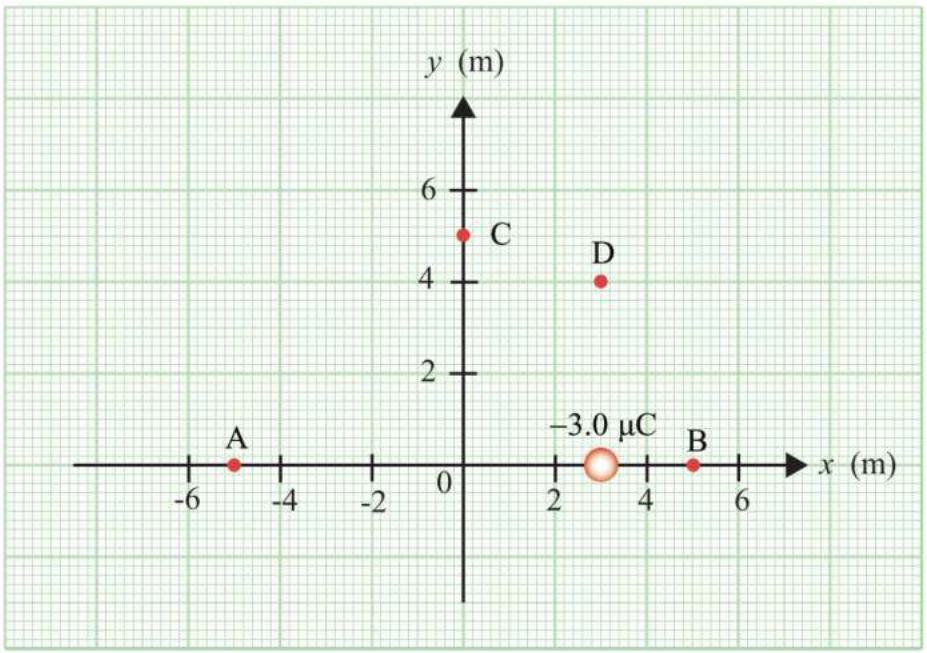
$$= 5.4\times10^{3}\ \text{V}$$

ศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่ง B

ตำแหน่ง B อยู่ห่างจุดประจุ 3.0 ไมโครคูลอมบ์ เป็นระยะ 5.0 เมตร เช่นเดียวกับตำแหน่ง A, C และ D ดังนั้น ศักย์ไฟฟ้าจึงมีค่าเท่ากันหมด

ตอบ ศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่ง A B C และ D มีค่าเท่ากับ 5.4×10^{3} โวลต์

ตัวอย่าง 13.11 ประจุ 3.0 ไมโครคูลอมบ์ อยู่ที่ตำแหน่ง (3.0,0.0) เมตร จงหาศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่ง A (−5.0,0.0) B (5.0,0.0) C (0.0,5.0) และ D (3.0,4.0) เมตร



แนวคิด ศักย์ไฟฟ้าของจุดประจุหาจาก $V = k\frac{Q}{r}$

วิธีทำ ศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่ง A

ตำแหน่ง A อยู่ห่างจุดประจุ -3.0 ไมโครคูลอมบ์ เป็นระยะ $r_A = 8.0$ เมตร

$$V_A = k\frac{Q}{r_A}$$

$$= \left(9.0\times10^9\ \text{Nm}^2/\text{C}^2\right)\left(\frac{-3.0\times10^{-6}\ \text{C}}{8.0\ \text{m}}\right)$$

$$= -3.4\times10^3\ \text{V}$$

ศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่ง B

ตำแหน่ง B อยู่ห่างจุดประจุ -3.0 ไมโครคูลอมบ์ เป็นระยะ $r_B = 2.0$ เมตร

$$V_B = k\frac{Q}{r_B}$$

$$= \left(9.0\times10^9\ \text{Nm}^2/\text{C}^2\right)\left(\frac{-3.0\times10^{-6}\ \text{C}}{2.0\ \text{m}}\right)$$

$$= -13.5\times10^3\ \text{V}$$

ศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่ง C

ตำแหน่ง C อยู่ห่างจุดประจุ -3.0 ไมโครคูลอมบ์ เป็นระยะ $r_C = \sqrt{3.0^2 + 5.0^2} = 5.8$ เมตร

$$V_C = k\frac{Q}{r_C}$$

$$= \left(9.0\times10^9\ \text{Nm}^2/\text{C}^2\right)\left(\frac{-3.0\times10^{-6}\ \text{C}}{5.8\ \text{m}}\right)$$

$$= -4.7\times10^3\ \text{V}$$

ศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่ง D

ตำแหน่ง D อยู่ห่างจุดประจุ -3.0 ไมโครคูลอมบ์ เป็นระยะ $r_D = 4.0$ เมตร

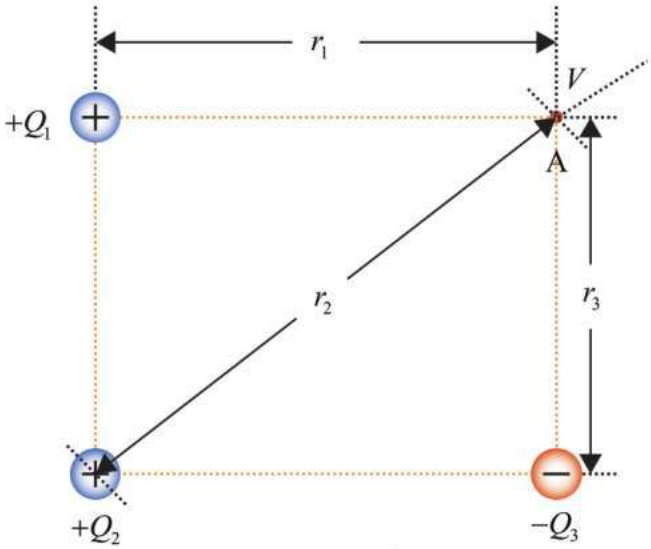
$$V_D = k\frac{Q}{r_D}$$

$$= \left(9.0\times10^9\ \text{Nm}^2/\text{C}^2\right)\left(\frac{3.0\times10^{-6}\ \text{C}}{4.0\ \text{m}}\right)$$

$$= -6.8\times10^3\ \text{V}$$

ตอบ ศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่ง A B C และ D มีค่าเท่ากับ -3.4×10^3 โวลต์ -1.4×10^3 โวลต์ -4.7×10^3 โวลต์ และ -6.8×10^3 โวลต์ ตามลำดับ

สำหรับระบบซึ่งประกอบด้วยประจุ N ตัว ดังรูป 13.34



รูป 13.34 ศักย์ไฟฟ้ารวมที่ตำแหน่ง A

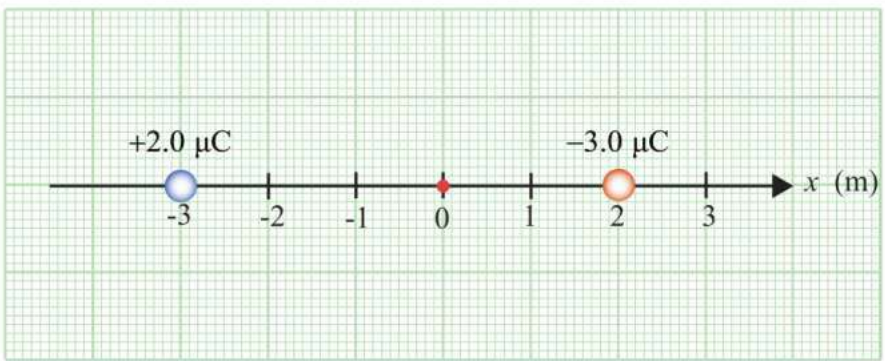
ศักย์ไฟฟ้ารวม (V) ที่ตำแหน่ง A หาได้จากผลรวมแบบสเกลาร์ของศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากจุดประจุทั้งหมดในระบบ ดังสมการ

$$V = k\frac{Q_1}{r_1} + k\frac{Q_2}{r_2} + k\frac{Q_3}{r_3} + \ldots + k\frac{Q_N}{r_N}$$

$$V = k\sum_{i=1}^{N}\frac{Q_i}{r_i} \qquad (13.21)$$

เมื่อ Q_i คือ ประจุตัวที่ i และ r_i คือ ระยะห่างระหว่างจุดประจุตัวที่ i ถึงตำแหน่งที่จะหาศักย์ไฟฟ้า

ตัวอย่าง 13.12 ระบบหนึ่งประกอบด้วยจุดประจุ +2 และ −3 ไมโครคูลอมบ์ อยู่ที่ตำแหน่ง (−3.0, 0.0) เมตร และ (2.0, 0.0) เมตร ตามลำดับ จงหาศักย์ไฟฟ้ารวมที่จุดกำเนิด O



แนวคิด ศักย์ไฟฟ้ารวมของระบบจุดประจุหาจาก $V = k\sum_{i=1}^{N}\frac{Q_i}{r_i}$

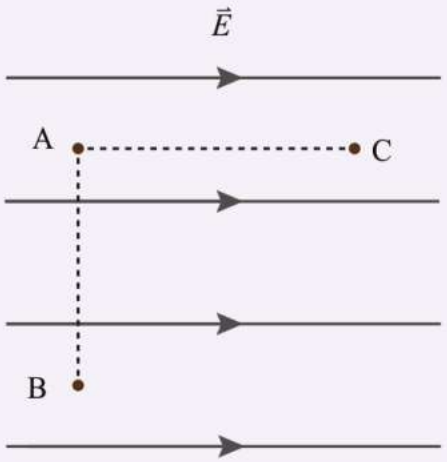
วิธีทำ หาศักย์ไฟฟ้าที่จุดกำเนิด O จุดประจุ +2 ไมโครคูลอมบ์ ซึ่งอยู่ห่างจากจุดกำเนิดไปทางซ้าย 3.0 เมตร และ จุดประจุ −3 ไมโครคูลอมบ์ ซึ่งอยู่ห่างจากจุดกำเนิดไปทางขวา 2.0 เมตร

จาก
$$V = k\sum_{i=1}^{N}\frac{Q_i}{r_i}$$
$$V = k\left(\frac{Q_1}{r_1}+\frac{Q_2}{r_2}\right)$$
$$= \left(9.0\times10^{9}\ \mathrm{Nm^2/C^2}\right)\left(\frac{2.0\times10^{-6}\ \mathrm{C}}{3.0\ \mathrm{m}}+\frac{-3.0\times10^{-6}\ \mathrm{C}}{2.0\ \mathrm{m}}\right)$$
$$= 6.0\times10^{3}-1.35\times10^{4}\ \ \mathrm{V}$$
$$= -7.5\times10^{3}\ \mathrm{V}$$

ตอบ ศักย์ไฟฟ้าที่จุดกำเนิด O เนื่องจากจุดประจุ +2 และ −3 ไมโครคูลอมบ์ มีค่า -7.5×10^{3} โวลต์

คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 13.4

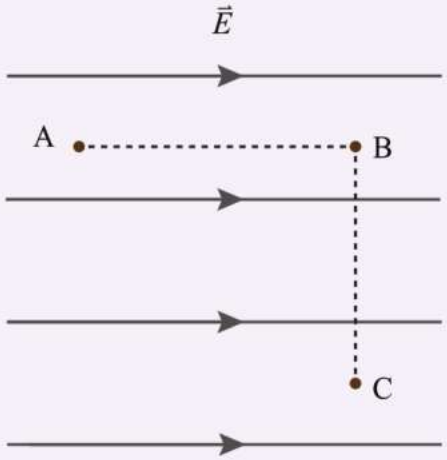
1. ความต่างศักย์ระหว่างตำแหน่ง A กับ B มีค่า 8 โวลต์ หมายความว่าอย่างไร
2. สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (E) จุด A จุด B และ จุด C อยู่ที่ตำแหน่ง ดังรูป จงพิจารณาข้อความต่อไปนี้ ข้อใดถูกต้อง
   ก. ศักย์ไฟฟ้าที่จุด A มากกว่าศักย์ไฟฟ้าที่จุด B
   ข. ศักย์ไฟฟ้าที่จุด A มากกว่าศักย์ไฟฟ้าที่จุด C



รูป ประกอบคำถามตรวจสอบความเข้าใจ 13.4 ข้อ 2

แบบฝึกหัด 13.4

1. ประจุ $-Q$ เคลื่อนที่จากแผ่นโลหะที่มีศักย์ไฟฟ้าบวก ไปยังแผ่นโลหะที่มีศักย์ไฟฟ้าลบตามแนวเส้นตรง ถ้าเขียนกราฟระหว่างแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าที่กระทำต่อประจุ $-Q$ กับระยะทางที่ประจุ $-Q$ เคลื่อนที่ได้ จะได้กราฟลักษณะอย่างไร
2. ในบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ดังรูป ข้อความใดต่อไปนี้ ข้อความใดถูกต้อง
   ก. สนามไฟฟ้าที่จุด A B และ C มีขนาดเท่ากัน
   ข. แรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าที่กระทำต่อประจุ $+q$ $-q$ และ $-q$ เมื่อประจุอยู่ที่ตำแหน่ง A B และ C ตามลำดับ มีขนาดเท่ากัน
   ค. ศักย์ไฟฟ้าที่ A มากกว่าศักย์ไฟฟ้าที่ B และศักย์ไฟฟ้าที่ B มากกว่าศักย์ไฟฟ้าที่ C

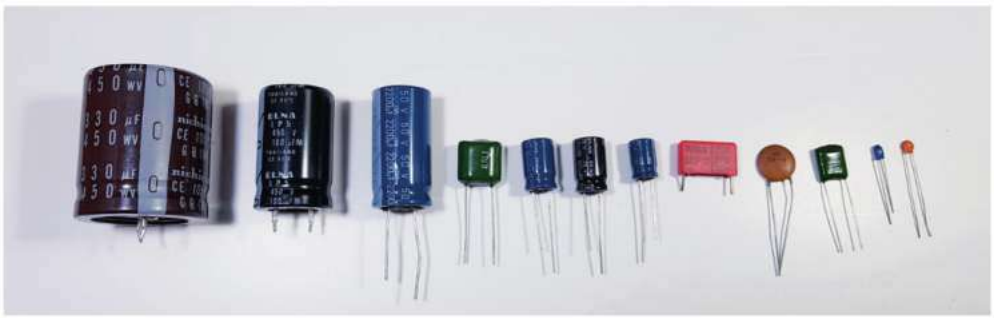


รูป ประกอบแบบฝึกหัด 13.4 ข้อ 2

3. ในการนำประจุ 5.0×10^{-4} คูลอมบ์ จากระยะอนันต์ มายังที่จุดหนึ่งในสนามไฟฟ้าต้องทำงาน 5.0×10^{-2} จูล จุดนั้นมีศักย์ไฟฟ้าเท่าใด

13.5 ตัวเก็บประจุ

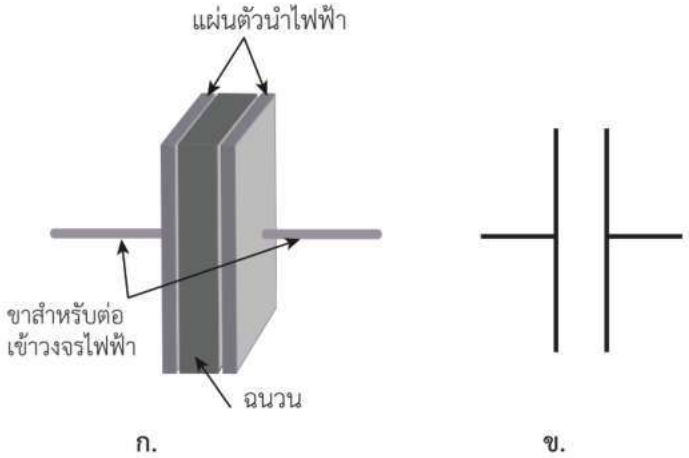
ตัวเก็บประจุ (capacitor) เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าซึ่งทำหน้าที่เก็บสะสมและคายประจุไฟฟ้า สามารถนำไปประยุกต์ใช้หลากหลายด้าน เช่น เป็นแหล่งสำรองพลังงานไฟฟ้าให้กับเครื่องใช้ไฟฟ้า ให้แสงแฟลชสำหรับกล้องถ่ายรูป จอสัมผัสของโทรศัพท์เคลื่อนที่ ตัวอย่างของตัวเก็บประจุชนิดต่าง ๆ ดังรูป 13.35



รูป 13.35 ตัวเก็บประจุชนิดต่าง ๆ

โครงสร้างพื้นฐานของตัวเก็บประจุประกอบด้วยตัวนำสองชิ้นที่คั่นด้วยฉนวน เช่น ตัวเก็บประจุที่ประกอบด้วยแผ่นตัวนำสองแผ่นวางขนานกันและมีฉนวนคั่นกลาง ดังรูป 13.36 ก. ตัวเก็บประจุลักษณะนี้เรียกว่า **ตัวเก็บประจุแผ่นคู่ขนาน** (parallel-plate capacitor) ซึ่งเป็นชนิดของตัวเก็บประจุที่ใช้ในการศึกษาในช่วงเริ่มต้น และเป็นชนิดที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน

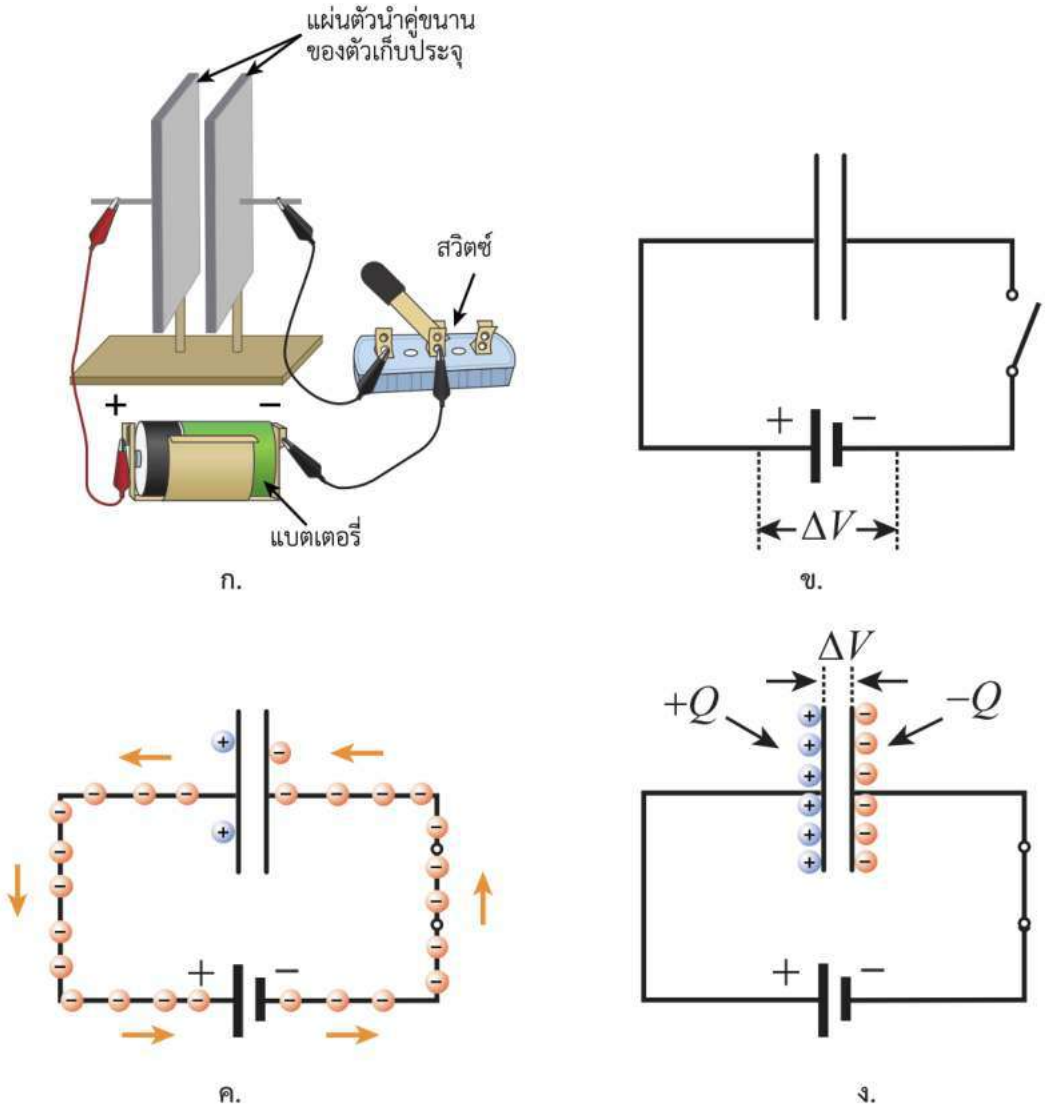
สัญลักษณ์ที่ใช้แทนตัวเก็บประจุในวงจรไฟฟ้าจะเขียนเป็นขีดยาวสองขีดขนานกัน ดังรูป 13.36 ข.



รูป 13.36 ก. โครงสร้างของตัวเก็บประจุแผ่นคู่ขนาน ข. สัญลักษณ์ที่ใช้แทนตัวเก็บประจุ

13.5.1 หลักการทำงานของตัวเก็บประจุ

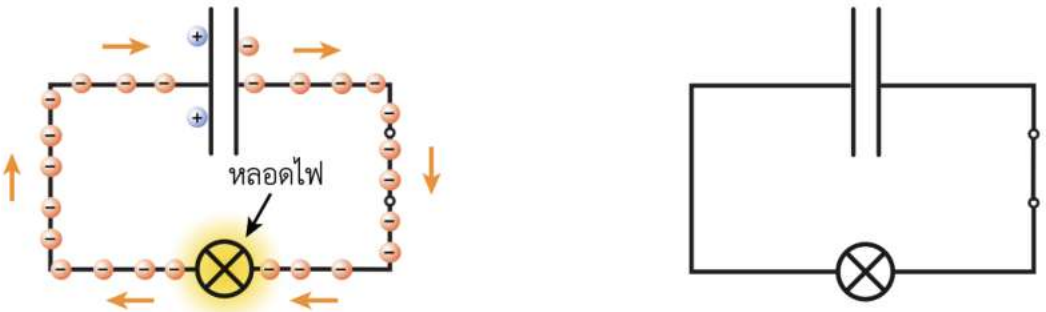
พิจารณาตัวเก็บประจุแผ่นคู่ขนานที่ประกอบด้วยแผ่นตัวนำสองแผ่นวางขนานกันและระหว่างกลางมีช่องว่าง มีอากาศทำหน้าที่เป็นฉนวน เมื่อนำตัวเก็บประจุไปต่อกับแบตเตอรี่และสวิตช์เป็นวงจร โดยแผ่นตัวนำแผ่นด้านขวามือต่อกับสวิตช์ที่ต่ออยู่กับขั้วลบของแบตเตอรี่ (ศักย์ไฟฟ้าต่ำ) และแผ่นตัวนำด้านซ้ายมือต่อกับขั้วบวกของแบตเตอรี่ (ศักย์ไฟฟ้าสูง) ดังรูป 13.37 ก. ซึ่งแสดงเป็นวงจรไฟฟ้าได้ ดังรูป 13.37 ข.



รูป 13.37 ขั้นตอนการประจุตัวเก็บประจุแผ่นคู่ขนาน

เริ่มต้น ตัวเก็บประจุมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า เมื่อเปิดสวิตช์เพื่อทำให้วงจรปิด อิเล็กตรอนอิสระจะเคลื่อนที่ออกจากขั้วลบของแบตเตอรี่ไปยังแผ่นตัวนำด้านขวามือ ขณะเดียวกัน อิเล็กตรอนอิสระบนแผ่นตัวนำด้านซ้ายมือจะถูกแรงผลักจากอิเล็กตรอนบนแผ่นตัวนำด้านขวามือให้เคลื่อนที่ไปยังขั้วบวกของแบตเตอรี่ ดังรูป 13.37 ค. กระบวนการนี้เรียกว่า **การประจุ** (charging) ซึ่งทำให้แผ่นตัวนำด้านขวามือมีประจุสะสมเป็นลบ และแผ่นตัวนำด้านซ้ายมือมีประจุสะสมเป็นบวกในขนาดที่เท่ากับประจุลบบนแผ่นตัวนำด้านขวามือ การที่มีประจุชนิดตรงข้ามกันสะสมเพิ่มขึ้นบนแผ่นตัวนำทั้งสองทำให้ความต่างศักย์ระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสองเพิ่มขึ้น จนกระทั่งเมื่อความต่างศักย์ระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสองเท่ากับความต่างศักย์ระหว่างขั้วของแบตเตอรี่ อิเล็กตรอนอิสระจะหยุดการเคลื่อนที่ ทำให้แผ่นตัวนำทั้งสองมีประจุสะสมจำนวนหนึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับ $-Q$ และ $+Q$ ดังรูป 13.37 ง. ซึ่งกล่าวได้ว่า ตัวเก็บประจุมีประจุสะสมเท่ากับ Q

เมื่อนำตัวเก็บประจุที่มีประจุสะสมเท่ากับ Q ไปต่อกับเครื่องใช้ไฟฟ้า เช่น หลอดไฟ แล้วเปิดสวิตซ์ อิเล็กตรอนอิสระในตัวเก็บประจุจะเคลื่อนที่ผ่านหลอดไฟในทิศทางตรงข้ามกับขั้นตอนการประจุ ดังรูป 13.38 ก. กระบวนการนี้เรียกว่า **การคายประจุ** (discharging) ซึ่งทำให้พลังงานไฟฟ้าที่สะสมในตัวเก็บประจุถูกถ่ายโอนไปยังหลอดไฟ หลอดไฟจึงสว่าง จนกระทั่ง เมื่อประจุปริมาณ Q เคลื่อนที่ผ่านหลอดไฟจนหมดแล้ว การคายประจุของตัวเก็บประจุจะหยุดลง หลอดไฟจึงดับ ดังรูป 13.38 ข.



รูป 13.38 ขั้นตอนการคายประจุตัวเก็บประจุแผ่นคู่ขนาน

13.5.2 ความจุของตัวเก็บประจุ

ความสามารถในการเก็บประจุของตัวเก็บประจุ เรียกว่า **ความจุ** (capacitance) แทนด้วย C หาได้จากอัตราส่วนระหว่างประจุที่สะสมบนตัวเก็บประจุ Q กับความต่างศักย์ที่ตัวเก็บประจุ ΔV เขียนแทนได้ด้วยสมการ

$$C = \frac{Q}{\Delta V} \qquad (13.22)$$

ความจุมีหน่วยคูลอมบ์ต่อโวลต์ (C/V) หรือ ฟารัด (farad, F) ซึ่ง ตัวเก็บประจุที่ใช้งานทั่วไปมีความจุไม่มากนัก จึงระบุหน่วยความจุเป็น ไมโครฟารัด (μF) นาโนฟารัด (nF) หรือ พิโกฟารัด (pF) จากสมการ (13.22) เมื่อนำตัวเก็บประจุไปใช้งาน จะสามารถหาประจุที่สะสมบนตัวเก็บประจุได้จากสมการ

$$Q = C\Delta V$$

ชวนคิด

ความจุของตัวเก็บประจุเหมือนหรือแตกต่างอย่างไรกับความจุของภาชนะใส่น้ำ

ตัวอย่าง 13.13 ตัวเก็บประจุต่ออยู่กับความต่างศักย์ 12 โวลต์ มีประจุสะสมในตัวเก็บประจุ 3.0 ไมโครคูลอมบ์ ตัวเก็บประจุนี้มีความจุเท่าใด ในหน่วยฟารัด ไมโครฟารัด และ พิโกฟารัด

แนวคิด หาความจุของตัวเก็บประจุจากสมการ $C = \frac{Q}{\Delta V}$

วิธีทำ แทนค่าลงในสมการ จะได้

$$C = \frac{3.0\times10^{-6}\ \text{C}}{12\ \text{V}}$$

$$= 2.5\times10^{-7}\ \text{F}$$

ในหน่วยไมโครฟารัด $2.5\times10^{-7}\ \text{F} = 0.25\times10^{-6}\ \text{F} = 0.25\ \mu\text{F}$

ในหน่วยพิโกฟารัด $2.5\times10^{-7}\ \text{F} = 2.5\times10^{5}\times10^{-12}\ \text{F} = 2.5\times10^{5}\ \text{pF}$

ตอบ ตัวเก็บประจุมีความจุ 2.5×10^{-7} ฟารัด หรือ 0.25 ไมโครฟารัด หรือ 2.5×10^{5} พิโกฟารัด

กิจกรรมลองทำดู ตัวเก็บประจุอย่างง่าย

จุดประสงค์

- สร้างตัวเก็บประจุอย่างง่าย
- สังเกตและอธิบายการประจุและการคายประจุของตัวเก็บประจุอย่างง่าย

วัสดุและอุปกรณ์

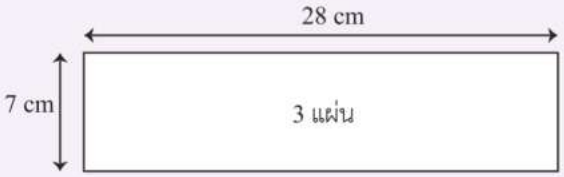
1. แผ่นพลาสติกใส ขนาดกระดาษ A4 1 แผ่น
2. แผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ขนาดกระดาษ A4 1 แผ่น
3. หลอดนีออน 1 หลอด
4. เครื่องจ่ายไฟตรงโวลต์สูง 1 เครื่อง
5. เทปใส 1 ม้วน
6. ลวดตัวนำ 1 เส้น
7. สายไฟพร้อมปากหนีบ 1 เส้น

รูป วัสดุและอุปกรณ์ กิจกรรมตัวเก็บประจุอย่างง่าย

วิธีทำกิจกรรม

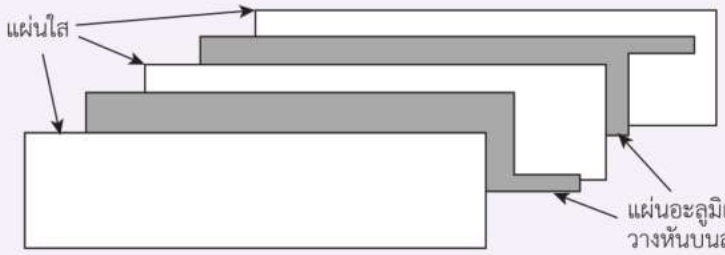
1. ตัดแผ่นใสให้มีขนาดประมาณ 7 cm × 28 cm ดังรูป ก. จำนวน 3 แผ่น
2. ตัดแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ให้มีขนาดยาวกว่าแผ่นใสที่ตัดแล้วเล็กน้อย แต่มีความกว้างน้อยกว่า จำนวน 2 แผ่น โดยอาจตัดให้มีขนาด 6 cm × 30 cm จากนั้น ตัดที่มุมใดมุมหนึ่งให้มีขนาด 5 cm × 4 cm ดังรูป ข.

3. นำแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์และแผ่นใสที่ตัดแล้ว มาซ้อนกันโดยจัดให้สลับกัน ดังรูป ค



ก. แผ่นใสที่ตัดแล้ว

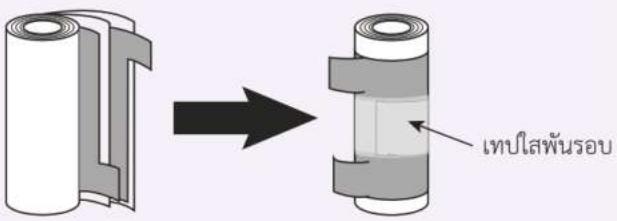
ข. แผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ที่ตัดแล้ว



ค. การซ้อนแผ่นใสกับแผ่นอลูมิเนียม

รูป การสร้างตัวเก็บประจุอย่างง่าย

4. ม้วนแผ่นที่ซ้อนกันให้แน่นเป็นรูปทรงกระบอก แล้วพันด้วยเทปใส ดังรูป ง. (ระวังอย่าให้แผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ทั้งสองสัมผัสกัน) ซึ่งจะได้ตัวเก็บประจุอย่างง่าย



ง. การม้วนแผ่นใสกับแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์

5. ทำการคายประจุของตัวเก็บประจุให้หมดด้วยการแตะปลายของแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ทั้งสองด้วยลวดตัวนำ
6. ทำการประจุให้กับตัวเก็บประจุ โดยการต่อปลายของแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ทั้งสองกับเครื่องจ่ายไฟตรงโวลต์สูงเป็นเวลาประมาณ 10 วินาที
7. นำขาของหลอดนีออนไปแตะที่ปลายของแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ทั้งสองของตัวเก็บประจุ สังเกตและอภิปรายผลที่เกิดขึ้น

คำถามท้ายกิจกรรม

☐ เมื่อต่อตัวเก็บประจุอย่างง่ายกับเครื่องจ่ายไฟตรงโวลต์สูง เกิดผลอย่างไรกับตัวเก็บประจุ

☐ เมื่อนำขาของหลอดนีออนไปแตะที่ปลายของตัวเก็บประจุ ผลที่เกิดขึ้นเป็นอย่างไร เพราะเหตุใด

ตัวเก็บประจุรูปทรงกระบอกที่ใช้ทั่วไป ทำจากแผ่นตัวนำยาวสองแผ่นวางซ้อนกันและมีแผ่นฉนวนคั่นระหว่างกลาง แล้วม้วนเป็นรูปทรงกระบอก ดังรูป 13.39 ก. ซึ่งการสร้างตัวเก็บประจุลักษณะนี้ช่วยให้มีพื้นที่ของแผ่นตัวนำสำหรับเก็บประจุมากและมีระยะระหว่างแผ่นตัวนำน้อย ทำให้สามารถการเก็บประจุต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรได้มาก

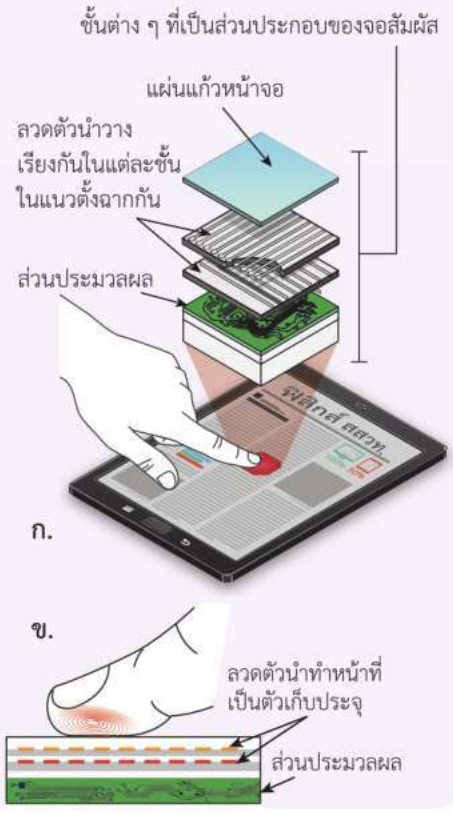
ก. ข.

รูป 13.39 ก. โครงสร้างของตัวเก็บประจุรูปทรงกระบอก ข. ตัวเลขบอกความจุและความต่างศักย์บนตัวเก็บประจุ

บนผิวของตัวเก็บประจุ จะมีการระบุความจุและความต่างศักย์สูงสุดที่ใช้กับตัวเก็บประจุ ดังรูป 13.39 ข. ถ้านำตัวเก็บประจุไปต่อกับความต่างศักย์ที่มากกว่าค่าที่ระบุ จะทำให้ตัวเก็บประจุชำรุดเสียหายได้และอาจเกิดอันตรายได้ นอกจากนี้ ตัวเก็บประจุบางชนิดยังมีการระบุขั้วบวกและลบสำหรับต่อเข้าในวงจร ถ้าต่อตัวเก็บประจุชนิดดังกล่าวไม่ถูกขั้ว สามารถทำให้ตัวเก็บประจุเสียหายและวงจรไฟฟ้าทำงานผิดพลาดได้

รู้หรือไม่

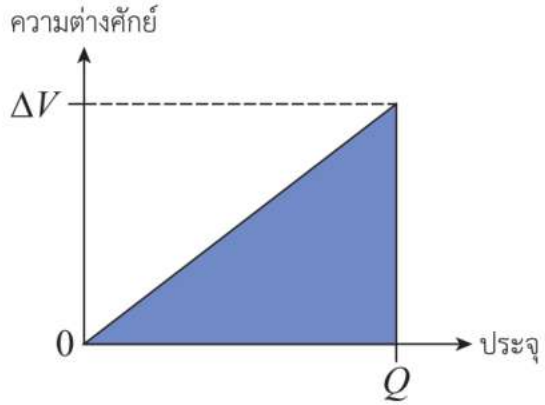
จอสัมผัส (touch screen) และเครื่องสแกนลายนิ้วมือ (fingerprint scanner) ของโทรศัพท์เคลื่อนที่และอุปกรณ์พกพาบางรุ่นเป็นแบบใช้ตัวเก็บประจุ (capacitive touch screen และ capacitive fingerprint scanner) โดยภายใต้หน้าจอที่ทำจากแก้วหรือส่วนที่นิ้วสัมผัสกับเครื่องสแกน จะมีชั้นของลวดตัวนำเส้นเล็ก ๆ หลายเส้นวางเรียงกันในแนวตั้งฉากกันและมีฉนวนคั่นกลาง เปรียบเสมือนตัวเก็บประจุแผ่นคู่ขนาน เมื่อเราใช้นิ้วสัมผัส ประจุไฟฟ้าที่นิ้วมือจะเหนี่ยวนำทำให้ประจุไฟฟ้าที่สะสมบนลวดตัวนำมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งจะถูกตรวจวัดและประมวลผลเป็นคำสั่งโดยวงจรอิเล็กทรอนิกส์



รูป ก. จอสัมผัสแบบใช้ตัวเก็บประจุ
ข. เครื่องสแกนลายนิ้วมือแบบใช้ตัวเก็บประจุ

13.5.3 พลังงานสะสมในตัวเก็บประจุ

ความสามารถในการเก็บสะสมพลังงานไฟฟ้าทำให้ตัวเก็บประจุมีประโยชน์และมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย เมื่อประจุสะสมบนตัวเก็บประจุมีปริมาณมากขึ้น ความต่างศักย์ระหว่างปลายของตัวเก็บประจุจะมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน ถ้าเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับประจุที่สะสมบนตัวเก็บประจุ จะได้กราฟดังรูป 13.40



จากกราฟ เมื่อประจุสะสมบนตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับ Q และความต่างศักย์ระหว่างปลายของตัวเก็บประจุเท่ากับ ΔV เราสามารถหางาน W ที่กระทำต่อประจุให้เคลื่อนที่ไปสะสมบนตัวเก็บประจุได้จากพื้นที่ใต้กราฟ ซึ่งเป็นรูปสามเหลี่ยมและเท่ากับ

$$W = \frac{1}{2}Q\Delta V$$

รูป 13.40 กราฟระหว่างความต่างศักย์กับประจุบนตัวเก็บประจุ

ซึ่งงานนี้เท่ากับพลังงานศักย์ที่สะสมในตัวเก็บประจุ แทนด้วย U ดังนั้น จะได้

$$U = \frac{1}{2}Q\Delta V \qquad (13.23)$$

เมื่อแทน $Q = C\Delta V$ ในสมการ (13.23) จะได้

$$U = \frac{1}{2}C(\Delta V)^2$$

และเมื่อแทน $\Delta V = \frac{Q}{C}$ ในสมการ (13.23) จะได้

$$U = \frac{1}{2}\frac{Q^2}{C}$$

ตัวอย่าง 13.14 ตัวเก็บประจุต่ออยู่กับความต่างศักย์ 200 โวลต์ มีประจุสะสม 0.02 คูลอมบ์ จงหาพลังงานที่สะสมในตัวเก็บประจุ

แนวคิด หาพลังงานที่สะสมบนตัวเก็บประจุจากสมการ $U = \frac{1}{2}Q\Delta V$

วิธีทำ จาก $Q = 0.02$ C และ $\Delta V = 200$ V แทนค่าลงในสมการ $U = \frac{1}{2}Q\Delta V$

จะได้ $$U = \frac{1}{2}(0.02\text{ C})(200\text{ V})$$
$$= 2\text{ J}$$

ตอบ พลังงานที่สะสมบนตัวเก็บประจุเท่ากับ 2 จูล

รู้หรือไม่

เครื่องกระตุกหัวใจด้วยไฟฟ้า (defibrillator) ใช้วินิจฉัยการเต้นผิดจังหวะของหัวใจ และสามารถส่งกระแสไฟฟ้าไปกระตุกให้หัวใจกลับมาเต้นได้ตามปกติ โดยกระแสไฟฟ้าที่ได้ มาจากการคายประจุของตัวเก็บประจุที่อยู่ภายในตัวเครื่อง

ปัจจุบัน มีการติดตั้งกล่องบรรจุเครื่องกระตุกหัวใจด้วยไฟฟ้าชนิดอัตโนมัติ หรือ AED (automatic external defibrillator) ในสถานที่สาธารณะต่าง ๆ เช่น สวนสาธารณะ สถานีขนส่ง ห้างสรรพสินค้า โดยผู้ที่ผ่านการฝึกฝนเบื้องต้นสามารถใช้ช่วยผู้ป่วยในกรณีฉุกเฉินในที่สาธารณะได้

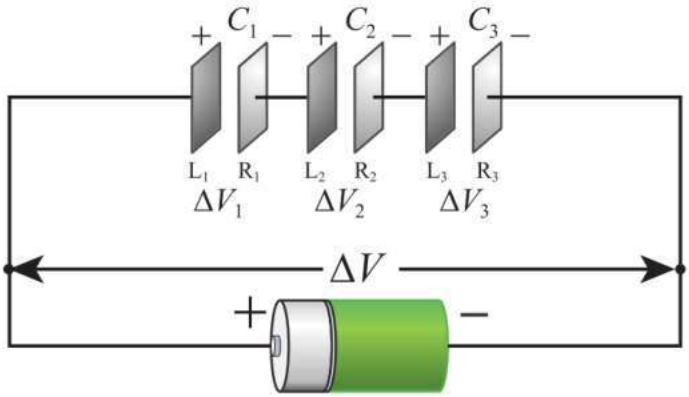
รูป การฝึกใช้เครื่องกระตุกหัวใจชนิดอัตโนมัติ (AED)

13.5.4 การต่อตัวเก็บประจุ

ในการนำตัวเก็บประจุไปใช้งาน บางครั้งต้องนำตัวเก็บประจุมากกว่าหนึ่งตัวมาต่อกันเพื่อให้ได้ความจุที่ต้องการ ความจุรวมที่ได้จากการต่อตัวเก็บประจุมากกว่าหนึ่งตัวขึ้นไปเรียกว่า **ความจุสมมูล** (equivalent capacitance) โดยวิธีการต่อตัวเก็บประจุมี 2 วิธีหลักได้แก่ การต่อแบบอนุกรมและการต่อแบบขนาน ซึ่งสามารถพิจารณาหาความจุสมมูลได้ดังต่อไปนี้

1. การต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรม

พิจารณาการต่อตัวเก็บประจุสามตัว ที่มีความจุ C_1, C_2 และ C_3 แบบอนุกรมและต่อกับแบตเตอรี่ ดังรูป 13.41



รูป 13.41 การต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรม

อิเล็กตรอนอิสระที่แผ่นตัวนำ L_1 จะเคลื่อนที่ไปยังขั้วบวกของแบตเตอรี่ และในขณะเดียวกัน อิเล็กตรอนอิสระที่ขั้วลบของแบตเตอรี่ จะเคลื่อนที่ไปยังแผ่นตัวนำ R_3 โดยปริมาณประจุที่เคลื่อนที่เข้าและออกจากแบตเตอรี่จะมีค่าเท่ากัน ถ้ากำหนดให้ อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ไปเข้าขั้วบวกของแบตเตอรี่ทำให้มีประจุบนตัวนำ L_1 เท่ากับ $+Q$ และอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ออกจากขั้วลบของแบตเตอรี่ทำให้มีประจุบนแผ่นตัวนำ R_3 เท่ากับ $-Q$ ประจุที่อยู่บนแผ่นตัวนำทั้งสองจะเหนี่ยวนำให้แผ่นตัวนำที่อยู่ใกล้เคียงมีประจุในปริมาณเท่ากัน แต่มีชนิดตรงข้าม นั่นคือ แผ่นตัวนำ R_1, L_2, R_2 และ L_3 จะถูกเหนี่ยวนำให้มีประจุเป็น $-Q$, $+Q$, $-Q$ และ $+Q$ ตามลำดับ ดังนั้น ประจุที่สะสมบนตัวเก็บประจุแต่ละตัวที่นำมาต่ออนุกรมกันจึงมีค่าเท่ากันและเท่ากับประจุที่เคลื่อนที่เข้าและออกจากแบตเตอรี่ Q ซึ่งเป็นประจุสุทธิในวงจร

ถ้าให้ Q_1, Q_2 และ Q_3 เป็นประจุสะสมที่ตัวเก็บประจุที่มีความจุ C_1, C_2 และ C_3 ตามลำดับ จะได้

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q \qquad \text{(a)}$$

ข้อสังเกต

ขณะที่ตัวเก็บประจุต่อกันแบบอนุกรม ตัวเก็บประจุแต่ละตัวมีประจุสะสมเท่ากัน และเท่ากับประจุจากแบตเตอรี่ Q ซึ่งเป็นประจุสุทธิที่ตัวเก็บประจุสะสมได้ เมื่อนำชุดตัวเก็บประจุที่ต่อแบบอนุกรมไปคายประจุ จะคายประจุได้เท่ากับประจุสุทธิ Q

ในการต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรม ความต่างศักย์ระหว่างขั้วของแบตเตอรี่จะเท่ากับผลรวมของความต่างศักย์ระหว่างปลายของตัวเก็บประจุแต่ละตัว เขียนแทนได้ด้วยสมการ

$$\Delta V = \Delta V_1 + \Delta V_2 + \Delta V_3 \qquad \text{(b)}$$

โดย ΔV เป็นความต่างศักย์ระหว่างขั้วแบตเตอรี่ ส่วน ΔV_1, ΔV_2, ΔV_3 เป็นความต่างศักย์ระหว่างปลายของตัวเก็บประจุที่มีความจุ C_1, C_2, C_3 ตามลำดับ

ถ้ากำหนดให้ C เป็นความจุสมมูลของตัวเก็บประจุทั้งสามตัวที่ต่อแบบอนุกรมกัน และ Q เป็นประจุที่เคลื่อนที่เข้าและออกจากแบตเตอรี่ จะได้ $\Delta V = \frac{Q}{C}$ และในทำนองเดียวกัน $\Delta V_1 = \frac{Q_1}{C_1}$, $\Delta V_2 = \frac{Q_2}{C_2}$, $\Delta V_3 = \frac{Q_3}{C_3}$ แทนค่าลงใน (b) จะได้

$$\frac{Q}{C} = \frac{Q_1}{C_1} + \frac{Q_2}{C_2} + \frac{Q_3}{C_3}$$

จาก (a) จะได้

$$\frac{1}{C}=\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\frac{1}{C_3}$$

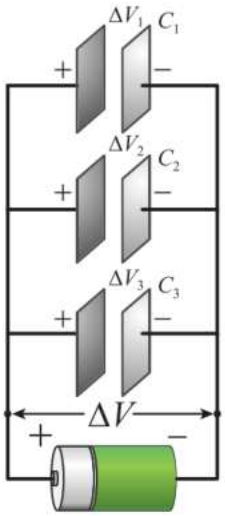
นั่นคือ เมื่อนำตัวเก็บประจุสามตัวมาต่อแบบอนุกรมกัน จะได้ส่วนกลับของความจุสมมูลเท่ากับผลบวกของส่วนกลับของความจุของตัวเก็บประจุแต่ละตัว

ในกรณีที่นำตัวเก็บประจุมากกว่า 3 ตัวมาต่อกันแบบอนุกรม จะได้ความจุสมมูลเป็น

$$\frac{1}{C}=\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\frac{1}{C_3}+..... \qquad (13.24)$$

2. การต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน

พิจารณาการต่อตัวเก็บประจุสามตัวที่มีความจ C_1, C_2 และ C_3 แบบขนาน และต่อกับแบตเตอรี่ ดังรูป 13.42 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระบนแผ่นตัวนำแต่ละแผ่นที่ต่อกับขั้วบวกของแบตเตอรี่จะเข้าสู่ขั้วบวกของแบตเตอรี่ และในขณะเดียวกัน อิเล็กตรอนอิสระจากขั้วลบของแบตเตอรี่ จะเคลื่อนที่ไปสะสมบนแผ่นตัวนำด้านที่ต่อกับขั้วลบของแบตเตอรี่ โดยเป็นการแยกเคลื่อนที่ไปแต่ละแผ่น



รูป 13.42 การต่อตัวเก็บประจุสามตัวแบบขนาน

ถ้าให้ประจุทั้งหมดที่เคลื่อนที่เข้าและออกจากแบตเตอรี่ เท่ากับ Q และให้ประจุที่สะสมบนตัวเก็บประจุความจุ C_1, C_2 และ C_3 มีขนาดเป็น Q_1, Q_2 และ Q_3 ตามลำดับ จะได้ว่า ประจุที่เคลื่อนที่เข้าและออกจากแบตเตอรี่จะเท่ากับผลรวมของประจุที่สะสมบนตัวเก็บประจุ ดังสมการ

$$Q=Q_1+Q_2+Q_3 \qquad (c)$$

ในการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน ความต่างศักย์ระหว่างปลายของตัวเก็บประจุแต่ละตัว ΔV_1, ΔV_2 และ ΔV_3 มีค่าเท่ากันและเท่ากับความต่างศักย์ระหว่างขั้วของแบตเตอรี่ ดังสมการ

$$\Delta V=\Delta V_1=\Delta V_2=\Delta V_3 \qquad (d)$$

กำหนดให้ C เป็นความจุสมมูลของตัวเก็บประจุทั้งสามตัวที่ต่อแบบขนานกัน และ Q เป็นประจุที่เคลื่อนที่เข้าและออกจากแบตเตอรี่ จะได้ $Q=C\Delta V$ และในทำนองเดียวกัน $Q_1=C_1\Delta V_1$, $Q_2=C_2\Delta V_2$, $Q_3=C_3\Delta V_3$ แทนค่าลงใน (c) จะได้

$$C\Delta V=C_1\Delta V_1+C_2\Delta V_2+C_3\Delta V_3$$

จาก (d) จะได้

$$C=C_1+C_2+C_3$$

นั่นคือ เมื่อนำตัวเก็บประจุสามตัวมาต่อแบบขนานกัน จะได้ความจุสมมูลเท่ากับผลบวกความจุของตัวเก็บประจุแต่ละตัว

ในกรณีที่นำตัวเก็บประจุมากกว่า 3 ตัวมาต่อกันแบบขนาน จะได้ความจุสมมูลเป็น

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + \ldots \qquad (13.25)$$

ตัวอย่าง 13.15 ตัวเก็บประจุมีค่าความจุไฟฟ้า 2 และ 3 ไมโครฟารัด ต่อกับแบตเตอรี่ซึ่งมีความต่างศักย์ระหว่างขั้วเท่ากับ 6 โวลต์ จงหาความจุสมมูล และประจุที่สะสมบนตัวเก็บประจุแต่ละตัว เมื่อต่อตัวเก็บประจุ ก. แบบอนุกรม และ ข. แบบขนาน

ก แนวคิด ใช้สมการ $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$ เพื่อหาความจุสมมูลสำหรับการต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรม

วิธีทำ เมื่อต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรม ความจุสมมูล หาได้จาก

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

$$= \frac{1}{2\times10^{-6}\ \text{F}} + \frac{1}{3\times10^{-6}\ \text{F}}$$

$$= \frac{5}{6\times10^{-6}\ \text{F}}$$

จะได้ $C = 1.2\times10^{-6}\ \text{F}$

ประจุที่เคลื่อนที่ออกจากแบตเตอรี่หาได้จาก

$$Q = C\Delta V$$

$$= (1.2\times10^{-6}\ \text{F})(6\ \text{V})$$

$$= 7.2\times10^{-6}\ \text{C}$$

ตอบ เมื่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรม ความจุสมมูลมีค่า 1.2 ไมโครฟารัด
ประจุที่สะสมบนตัวเก็บประจุแต่ละตัวมีค่า 7.2 ไมโครคูลอมบ์เท่ากัน

ข แนวคิด ใช้สมการ $C = C_1 + C_2 + C_3$ เพื่อหาความจุสมมูลสำหรับการต่อตัวเก็บประจุขนาน

วิธีทำ เมื่อต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน ความจุสมมูล หาได้จาก

$$C = C_1 + C_2$$

$$= (2\times10^{-6}\ \text{F}) + (3\times10^{-6}\ \text{F})$$

$$= 5\times10^{-6}\ \text{F}$$

ความต่างศักย์ระหว่างปลายของตัวเก็บประจุทั้งสองจะมีค่าเท่ากันและเท่ากับความต่างศักย์ระหว่างขั้วของแบตเตอรี่ สามารถหาประจุบนตัวเก็บประจุแต่ละตัวได้จาก

$$Q_1 = C_1\Delta V$$

$$= (2\times10^{-6}\ \text{F})(6\ \text{V})$$

$$= 12\times10^{-6}\ \text{C}$$

และ

$$\begin{aligned} Q_2 &= C_2 \Delta V \\ &= (3\times10^{-6}\ \text{F})(6\ \text{V}) \\ &= 18\times10^{-6}\ \text{C} \end{aligned}$$

ตอบ เมื่อต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน ความจุสมมูลมีค่า 5 ไมโครฟารัด ประจุสะสมบนตัวเก็บประจุที่มีความจุ 2 และ 3 ไมโครฟารัด มีค่า 12 และ 18 ไมโครคูลอมบ์ ตามลำดับ

คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 13.5

1. ตัวเก็บประจุมีส่วนประกอบสำคัญคืออะไร
2. ถ้าต้องการเพิ่มปริมาณประจุที่สะสมบนตัวเก็บประจุ ควรเพิ่มหรือลดความต่างศักย์ระหว่างปลายของตัวเก็บประจุ
3. พลังงานที่สะสมในตัวเก็บประจุตัวใดตัวหนึ่ง แปรผันตรงกับปริมาณใด หรือไม่ อย่างไร
4. การต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรม ความจุสมมูลมีค่าเป็นอย่างไร
5. การต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน ความจุสมมูลมีค่าเป็นอย่างไร

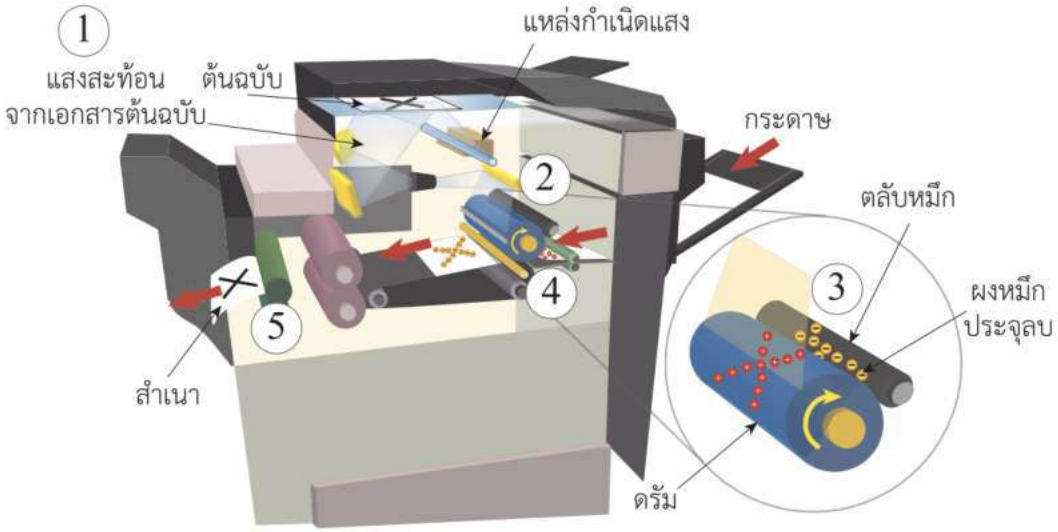
แบบฝึกหัด 13.5

1. ตัวเก็บประจุมีความจุ 6 ไมโครฟารัด เมื่อนำมาต่อกับความต่างศักย์ 1.5 โวลต์ ประจุที่สะสมในตัวเก็บประจุมีค่าเท่าใด
2. เมื่อต่อตัวเก็บประจุกับความต่างศักย์ 500 โวลต์ จะมีพลังงานสะสม 4.0×10^{-3} จูล จงหาความจุของตัวเก็บประจุ
3. ตัวเก็บประจุแบบแผ่นตัวนำคู่ขนานมีความจุ 50 ไมโครฟารัด เริ่มต้นไม่มีพลังงานสะสมอยู่ ถ้าต้องการให้มีพลังงานสะสม 0.36 จูล ต้องนำไปต่อกับความต่างศักย์เท่าใด
4. ตัวเก็บประจุ 4 และ 12 ไมโครฟารัด จะมีความจุสมมูลเป็นเท่าใดเมื่อนำมาต่อกัน
   ก. แบบอนุกรม
   ข. แบบขนาน
5. ตัวเก็บประจุ 4 ไมโครฟารัด ต่อแบบอนุกรมกับตัวเก็บประจุ 6 ไมโครฟารัด แล้วต่อเข้ากับความต่างศักย์ 500 โวลต์ ประจุที่สะสมบนตัวเก็บประจุแต่ละตัวมีค่าเท่าใด
6. ตัวเก็บประจุ 1 ไมโครฟารัด ต่อแบบขนานกับตัวเก็บประจุ 3 ไมโครฟารัด แล้วต่อเข้ากับความต่างศักย์ 800 โวลต์ ประจุที่สะสมบนตัวเก็บประจุแต่ละตัวมีค่าเท่าใด

13.6 การนำความรู้เกี่ยวกับไฟฟ้าสถิตไปใช้ประโยชน์

13.6.1 เครื่องถ่ายเอกสารและเครื่องพิมพ์เลเซอร์

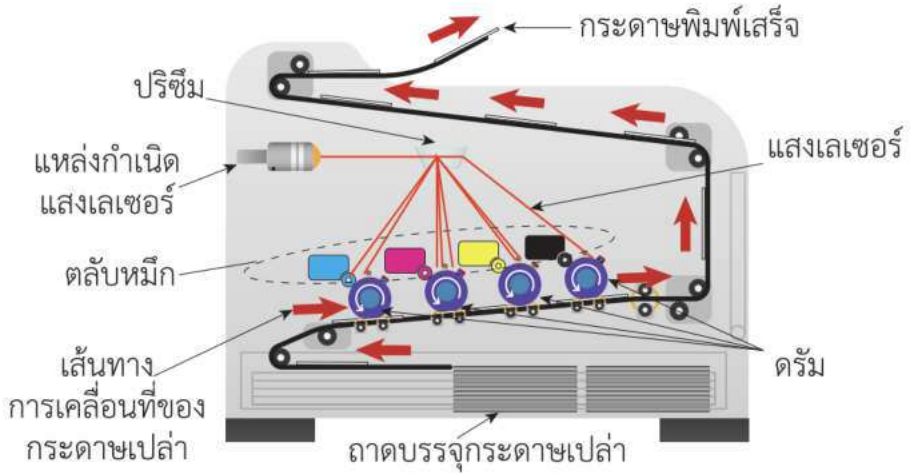
เครื่องถ่ายเอกสารและเครื่องพิมพ์เลเซอร์ใช้ประโยชน์จากแรงระหว่างประจุไฟฟ้าในการทำให้ผงหมึกยึดติดกับกระดาษ โดยอุปกรณ์สำคัญ คือ ดรัม (drum) ที่มีรูปทรงกระบอกและที่ผิวด้านนอกฉาบด้วยวัสดุตัวนำไวแสง การทำงานของ**เครื่องถ่ายเอกสาร** (photocopier) ประกอบด้วย 5 ขั้นตอนหลัก แสดงได้ดังรูป 13.43



รูป 13.43 ขั้นตอนการทำงานของเครื่องถ่ายเอกสาร

1. เมื่อกดสวิตซ์ให้เครื่องทำงาน แหล่งกำเนิดแสงจะฉายแสงไปทั่วเอกสารต้นฉบับขณะเดียวกัน ดรัมจะถูกทำให้มีประจุไฟฟ้าชนิดหนึ่งไปทั่วผิวของดรัม
2. แสงที่ฉายไปที่เอกสารต้นฉบับจะสะท้อนไปตกลงบนผิวของดรัม โดยบริเวณที่มีสีดำบนต้นฉบับ แสงจะสะท้อนได้น้อย ผิวของดรัมจึงมีประจุชนิดเดิมอยู่ ส่วนบริเวณที่มีสีขาว แสงจะสะท้อนมาตกกระทบได้มาก ผิวของดรัมจึงมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า
3. ดรัมจะหมุนต่อไป จนส่วนที่มีประจุไฟฟ้าไปพบกับอุปกรณ์ปล่อยผงหมึกที่มีประจุตรงข้ามอยู่ แรงดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างประจุตรงข้ามทำให้ผงหมึกติดกับบริเวณที่มีประจุไฟฟ้าบนดรัม ซึ่งมีรูปแบบและลวดลายเหมือนกับลายเส้นบนเอกสารต้นฉบับ
4. ดรัมจะหมุนต่อไป จนส่วนของดรัมที่มีผงหมึกติดอยู่ไปพบกับแผ่นกระดาษเปล่าที่เคลื่อนที่มาตามสายพาน โดยแผ่นกระดาษเปล่านี้ ได้ถูกทำให้มีประจุชนิดเดียวกับที่อยู่บนดรัม แต่มีปริมาณมากกว่า จึงทำให้ผงหมึกที่อยู่บนดรัมถูกดึงดูดด้วยแรงไฟฟ้าที่มากกว่าให้ไปติดอยู่บนแผ่นกระดาษเปล่า
5. แผ่นกระดาษที่มีผงหมึกจะเคลื่อนที่ผ่านลูกกลิ้ง ที่ให้ความร้อนและแรงกด ทำให้ผงหมึกยึดติดกับเนื้อกระดาษได้แน่นไม่หลุดออกมาได้ง่าย

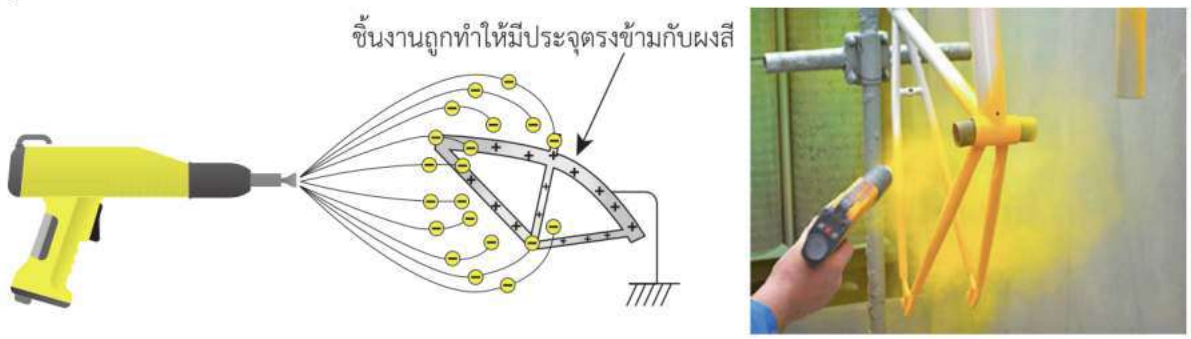
สำหรับ**เครื่องพิมพ์เลเซอร์สี** (color laser printer) ขั้นตอนการทำงานหลักจะคล้ายกับเครื่องถ่ายเอกสาร แต่จะใช้แหล่งกำเนิดแสงเป็นแสงเลเซอร์ และจะฉายแสงเลเซอร์ผ่านปริซึมไปตกลงที่ผิวของดรัมดังรูป 13.44 โดยดรัมที่ผ่านการฉายแสงเลเซอร์จะมีประจุไฟฟ้าในรูปแบบและลวดลายที่สอดคล้องกับไฟล์ต้นฉบับในหน้าจอคอมพิวเตอร์



รูป 13.44 ขั้นตอนการทำงานของเครื่องพิมพ์เลเซอร์สี

13.6.2 การเคลือบสีฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต

การเคลือบสีฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต (electrostatic powder coating) เป็นการเคลือบสีด้วยผงหรือละอองสีที่มีประจุไฟฟ้าชนิดตรงข้ามกับที่อยู่บนชิ้นงาน เพื่อให้สีเกาะติดชิ้นงานได้ดีกว่าการพ่นแบบธรรมดา และช่วยให้ประหยัดปริมาณสีที่ใช้ในการพ่น เนื่องจากละอองสีไม่ฟุ้งกระจายมาก โดยเครื่องพ่นสีฝุ่นจะทำให้ผงหรือละอองสีกลายเป็นอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเมื่อถูกพ่นออกจากเครื่อง ส่วนชิ้นงานจะถูกทำให้มีประจุไฟฟ้าชนิดตรงข้ามกับผงหรือละอองสีพ่น ดังรูป 13.45 ก. ทำให้แรงไฟฟ้าดึงดูดผงหรือละอองสีให้ยึดกับผิวชิ้นงาน

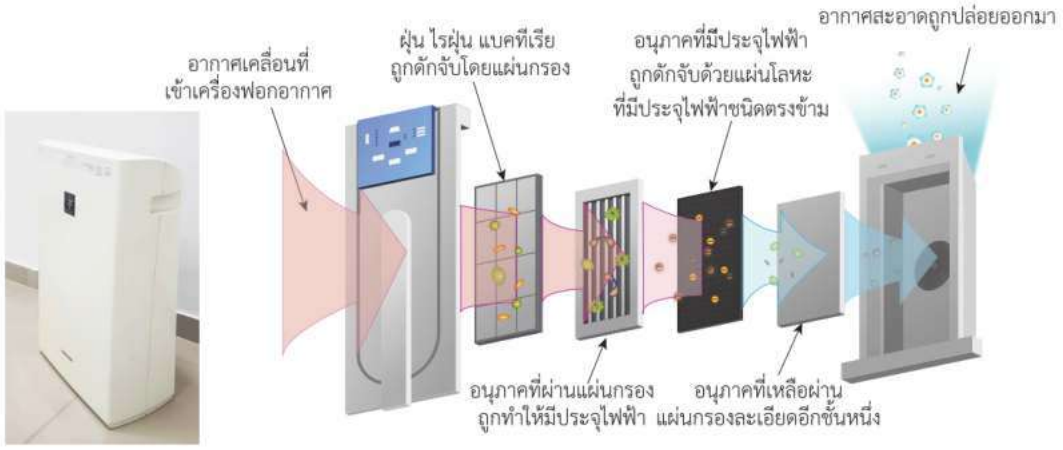


ก. ข.

รูป 13.45 ก. เครื่องพ่นสีฝุ่นพ่นละอองสีที่มีประจุไฟฟ้าลบไปยังชิ้นงานที่มีประจุไฟฟ้าบวก ข. การพ่นสีชิ้นงานที่เป็นโลหะ

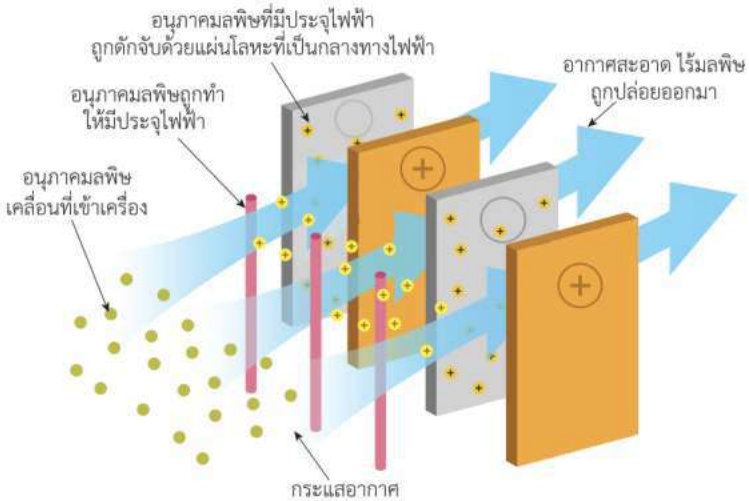
13.6.3 เครื่องฟอกอากาศ และเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต

เครื่องฟอกอากาศ (air purifier) เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยลดไรฝุ่น เชื้อรา ไวรัส แบคทีเรีย และกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ในอากาศ การทำงานของเครื่องฟอกอากาศส่วนใหญ่ ใช้หลายวิธีร่วมกัน เช่น การใช้แผ่นกรองดักจับอนุภาคฝุ่นและมลพิษ การใช้รังสีอัลตราไวโอเลตในการกำจัดไวรัสและแบคทีเรีย รวมทั้ง การทำให้อนุภาคมลพิษมีประจุไฟฟ้าเพื่อการดักจับไว้ด้วยแผ่นกรองที่มีประจุไฟฟ้าชนิดตรงข้าม ดังรูป 13.46



รูป 13.46 ก. เครื่องฟอกอากาศ ข. กระบวนการฟอกอากาศของเครื่องฟอกอากาศ

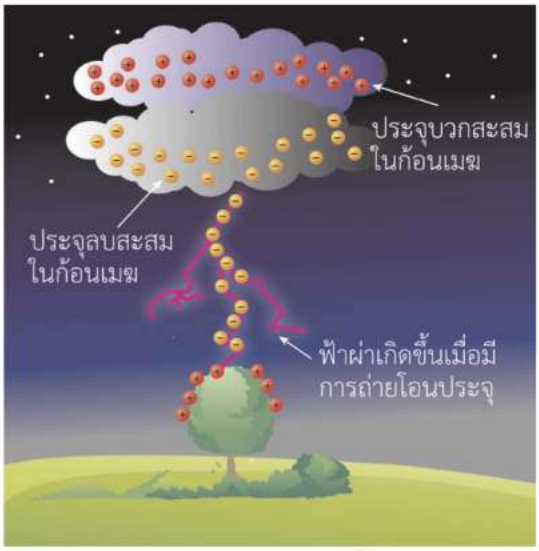
เครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต (electrostatic precipitator) ใช้หลักการเดียวกับเครื่องฟอกอากาศ ดังรูป 13.47 โดยมีการนำมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมมลพิษอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรม โรงโม่หิน การทำปูนซีเมนต์ เขม่าควันจากไอเสียของเครื่องยนต์ หรือ จากปรากฏการณ์ธรรมชาติ เช่น ไฟป่า เป็นต้น



รูป 13.47 ขั้นตอนการทำให้อากาศสะอาดของเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต

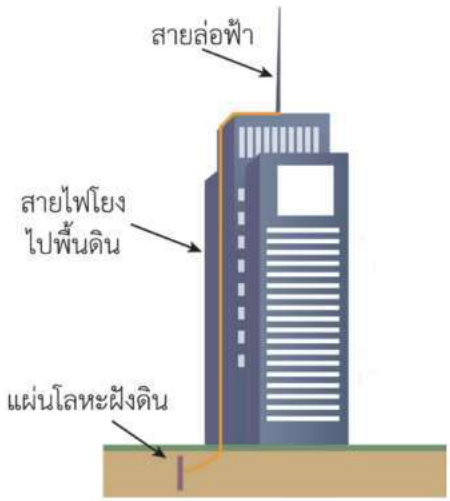
13.6.4 การอธิบายปรากฏการณ์ฟ้าผ่าและฟ้าแลบ

ฟ้าผ่า (lightning) และ**ฟ้าแลบ** (flash) เป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติที่เกิดจากการเสียดสีกันระหว่างโมเลกุลของน้ำและอากาศที่เคลื่อนที่ในก้อนเมฆ เมื่อก้อนเมฆมีประจุไฟฟ้ามากพอ จะถ่ายโอนประจุไฟฟ้าไปยังบริเวณอื่น ทำให้ประจุจำนวนมากเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วสูงผ่านอากาศ เกิดความร้อนและแสงสว่างตามเส้นทางที่ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ ซึ่งถ้าเป็นการถ่ายโอนประจุระหว่างก้อนเมฆกับพื้นดิน จะเรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวว่า ฟ้าผ่า ถ้าเป็นการถ่ายโอนประจุระหว่างก้อนเมฆกับก้อนเมฆ จะเรียกว่า ฟ้าแลบ



รูป 13.48 ปรากฏการณ์ฟ้าผ่า

สายล่อฟ้า (lightning rod) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ป้องกันอันตรายจากฟ้าผ่า ซึ่งจะติดตั้งบริเวณยอดของตึกหรือสิ่งก่อสร้างที่มีความสูงกว่าบริเวณรอบ ๆ โดยจะมีสายไฟโยงจากสายล่อฟ้าไปยังพื้นดิน เมื่อมีประจุไฟฟ้าจำนวนมากในก้อนเมฆที่ลอยอยู่ใกล้ ๆ ตึกหรือสิ่งก่อสร้าง การถ่ายโอนประจุจากก้อนเมฆมายังพื้นดินจะเป็นการถ่ายโอนผ่านสายล่อฟ้า เป็นการลดประจุไฟฟ้าในบรรยากาศรอบ ๆ ทำให้ไม่เกิดฟ้าผ่าตึกหรือสิ่งก่อสร้างที่มีสายล่อฟ้า



รูป 13.49 สายล่อฟ้าบนตึกสูงช่วยให้ประจุจากฟ้าผ่าเคลื่อนที่ลงไปยังพื้นดิน

13.6.5 การใช้สายรัดข้อมือของช่างอิเล็กทรอนิกส์

ในการทำงานกับชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความไวต่อไฟฟ้าสถิตสูง อย่างเช่น อุปกรณ์ของเครื่องคอมพิวเตอร์ การถ่ายโอนประจุไฟฟ้าเพียงเล็กน้อย สามารถทำให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์เหล่านี้ได้ จึงต้องมีการป้องกันด้วยการใช้สายรัดข้อมือที่ต่อกับพื้น ดังรูป 13.50 เพื่อให้ประจุไฟฟ้าที่เกิดจากการเคลื่อนที่หรือเสียดสีของร่างกาย ถ่ายโอนไปที่พื้น แทนที่จะไปที่อุปกรณ์

รูป 13.50 การใช้สายรัดข้อมือป้องกันอันตรายจากไฟฟ้าสถิต

13.6.6 การเติมน้ำมัน

ในการเติมน้ำมันยานพาหนะ บางครั้ง ผู้ขับขี่อาจมีโอกาสได้สัมผัสกับหัวจ่ายน้ำมัน ดังรูป 13.51 ก. ถ้าผู้ขับขี่ใส่เสื้อผ้าที่ทำให้เกิดการสะสมประจุไฟฟ้าได้ง่ายจากการเสียดสีกับเบาะรถหรือจากวัสดุอื่น ๆ และเมื่อผู้ขับขี่ได้สัมผัสกับส่วนของหัวจ่ายน้ำมันที่เป็นโลหะ อาจทำให้มีการถ่ายโอนประจุอย่างรวดเร็วจนเกิดเป็นประกายไฟ ที่ทำให้ไอน้ำมันที่ระเหยออกมาลุกติดไฟและเกิดอันตรายได้

ดังนั้น ถ้าต้องมีการเติมน้ำมัน ควรระวังไม่สัมผัสกับหัวจ่ายน้ำมัน หรือ ถ้าจำเป็นต้องสัมผัสให้ถ่ายโอนประจุไฟฟ้าออกจากร่างกายให้เหลือน้อยลงก่อน โดยอาจใช้ส่วนที่เป็นโลหะของกุญแจแตะกับส่วนที่เป็นโลหะของรถบริเวณห่างจากหัวจ่ายน้ำมัน ดังรูป 13.51 ข.

ก. ข.

รูป 13.51 ก. หัวจ่ายน้ำมันในสถานีบริการน้ำมัน ข. การใช้กุญแจแตะตัวถังรถเพื่อลดประจุไฟฟ้าที่สะสมในร่างกาย

สำหรับรถขนส่งน้ำมันที่เดินทางระยะไกล น้ำมันเชื้อเพลิงภายในถังจะมีการเสียดสีกับถังเป็นเวลานาน ทำให้มีประจุไฟฟ้าสถิตสะสมบนถังเป็นจำนวนมาก ซึ่งสามารถทำให้เกิดประกายไฟได้ในขั้นตอนการถ่ายเทน้ำมันจากรถไปยังที่เก็บซึ่งอาจทำให้เกิดการลุกไหม้ได้ ดังนั้น ในกระบวนการถ่ายเทน้ำมันจึงต้องมีการต่อตัวนำระหว่างถังเก็บของรถขนส่งน้ำมันกับจุดต่อลงดิน ดังรูป 13.52 เพื่อให้มีการถ่ายโอนประจุไฟฟ้าออกจากรถลงสู่พื้นดิน

รูป 13.52 การต่อตัวนำระหว่างถังเก็บน้ำมันของรถขนส่งน้ำมันกับจุดต่อลงดิน

คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 13.6

1. ขั้นตอนการทำงานของเครื่องถ่ายเอกสารขั้นตอนใด ที่สามารถอธิบายได้โดยใช้ความรู้ทางไฟฟ้าสถิต
2. การพ่นสีโดยอาศัยไฟฟ้าสถิต มีข้อดีอย่างไร
3. เครื่องฟอกอากาศและเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตใช้ความรู้ทางไฟฟ้าสถิตอย่างไรในการกำจัดมลพิษ
4. เพราะเหตุใดปรากฏการณ์ฟ้าผ่าและฟ้าแลบจึงมักเกิดในช่วงก่อนหรือระหว่างมีฝนตก
5. จงระบุวิธีการป้องกันอันตรายจากไฟฟ้าสถิตมา 2 วิธี

สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน

13.1 ธรรมชาติของไฟฟ้าสถิต

- วัตถุที่เป็นกลางทางไฟฟ้าสามารถทำให้เป็นวัตถุมีประจุไฟฟ้าได้โดยการขัดถู ซึ่งจะทำให้เกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนเข้าหรือออกจากวัตถุนั้น โดยวัตถุใดจะทำหน้าที่รับหรือให้อิเล็กตรอนขึ้นอยู่กับวัตถุจะเสียหรือรับอิเล็กตรอนได้มากกว่า ซึ่งประจุไม่สามารถสร้างขึ้นใหม่หรือทำลายได้ ดังนั้นในการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ผลรวมของประจุของระบบก่อนการเปลี่ยนแปลงต้องเท่ากับผลรวมของประจุหลังการเปลี่ยนแปลง เรียกว่า กฎการอนุรักษ์ประจุไฟฟ้า ประจุไฟฟ้ามี 2 ชนิด คือ ประจุไฟฟ้าบวกและประจุไฟฟ้าลบ แรงระหว่างประจุไฟฟ้าสองประจุ ถ้าประจุทั้งสองมีประจุชนิดเดียวกันจะผลักกันและหากประจุทั้งสองมีประจุต่างชนิดกันจะดึงดูดกัน
- การนำวัตถุที่มีประจุเข้าใกล้ตัวนำใด ๆ จะมีการเหนี่ยวนำไฟฟ้าเกิดขึ้นเรียกว่า การเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิต โดยอุปกรณ์สำหรับตรวจสอบประจุไฟฟ้า เรียกว่า อิเล็กโทรสโคป

13.2 กฎของคูลอมบ์

- แรงระหว่างจุดประจุเป็นไปตามกฎของคูลอมบ์ ตามสมการ $F = \frac{kq_1q_2}{r^2}$

13.3 สนามไฟฟ้า

- รอบประจุไฟฟ้าหนึ่ง ๆ จะมีสนามไฟฟ้าที่แผ่ออกไปทั่วอวกาศ เมื่อประจุไฟฟ้าอีกประจุหนึ่งอยู่ในสนามไฟฟ้าของประจุดังกล่าวก็จะรับรู้ถึงแรงไฟฟ้าที่ประจุนั้นกระทำได้ มีค่าเท่ากับแรงที่กระทำต่อจุดประจุบวกขนาดหนึ่งหน่วยซึ่งวาง ณ ตำแหน่งใด ๆ ตามสมการ $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{+q}$
- สนามไฟฟ้าจะมีทิศทางพุ่งออกจากประจุบวกและพุ่งเข้าหาประจุลบ แสดงได้ด้วยเส้นสนามไฟฟ้า สนามไฟฟ้าภายในตัวนำรูปทรงใด ๆ มีค่าเป็นศูนย์และสนามไฟฟ้า ณ ตำแหน่งติดกับผิวของตัวนำจะมีทิศทางตั้งฉากกับผิวเสมอ
- เมื่อนำประจุ q มวล m วางในบริเวณที่มีสนามไฟฟ้า $\vec{E}$ แรงไฟฟ้าที่กระทำต่อประจุมีค่าเท่ากับ $q\vec{E}$

13.4 ศักย์ไฟฟ้าและความต่างศักย์

- เมื่อนำประจุไปอยู่ ณ ตำแหน่งหนึ่งในบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าทำให้เกิดพลังงานศักย์ไฟฟ้า U
- เมื่อมีประจุเคลื่อนที่ในบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์ไฟฟ้าและพลังงานจลน์ของประจุเป็นไปตามกฎการอนุรักษ์พลังงานกลรอบประจุไฟฟ้าหนึ่ง ๆ จะมีศักย์ไฟฟ้า แทนด้วย V โดยมีค่าเท่ากับพลังงานศักย์ไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยประจุที่ถูกกระทำตามสมการ $V = \frac{U}{q} = \frac{kQ}{r}$
- ศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่งหนึ่งเทียบกับอีกตำแหน่งหนึ่งเรียก ความต่างศักย์ ความต่างศักย์ระหว่างตำแหน่ง B เทียบกับตำแหน่ง A หาได้จาก $V_B - V_A = \frac{\Delta U}{q}$ ซึ่งมีค่าเท่ากับงานเนื่องจากแรงไฟฟ้าในการเคลื่อนที่หนึ่งหน่วยประจุบวก จาก A ไป B ตามสมการ $V_B - V_A = -\frac{W_{A\to B}}{q}$
- พลังงานศักย์ไฟฟ้าของจุดประจุ q ที่วางในสนามไฟฟ้าของจุดประจุ Q มีค่าเท่ากับงานของแรงไฟฟ้าที่นำประจุ q จากระยะอนันต์มายังจุดนั้น ตามสมการ $U = \frac{kQq}{r}$
- เมื่อนำประจุจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ความต่างศักย์ระหว่างสองจุดนั้นในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หาได้จากสมการ $E = \frac{V_B - V_A}{d}$

13.5 ตัวเก็บประจุ

- ตัวเก็บประจุประกอบด้วยตัวนำสองชิ้นที่คั่นด้วยฉนวน โดยความจุของตัวเก็บประจุ C หาได้จากอัตราส่วนระหว่างปริมาณประจุที่เก็บได้กับความต่างศักย์ระหว่างปลายของตัวเก็บประจุ ตามสมการ $C = \frac{Q}{\Delta V}$
- พลังงานสะสมของตัวเก็บประจุ มีค่าขึ้นกับความต่างศักย์และปริมาณประจุตามสมการ $U = \frac{1}{2}Q\Delta V$
- การต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรม ทำให้ความจุสมมูลลดลง ตามสมการ $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + ...$
- การต่อตัวเก็บประจุแบบขนานทำให้ความจุสมมูลเพิ่มขึ้น ตามสมการ $C = C_1 + C_2 + C_3 + ...$

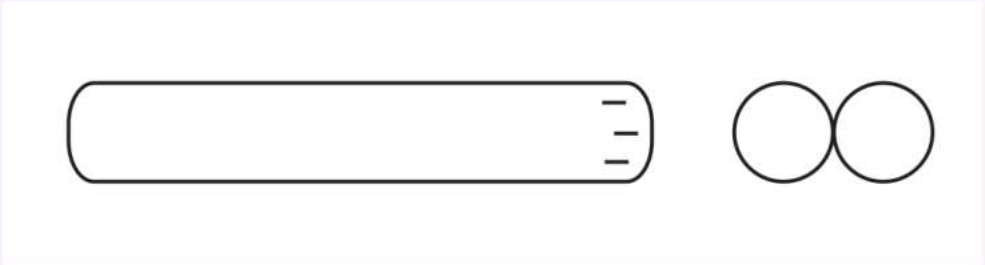
13.6 การนำความรู้เกี่ยวกับไฟฟ้าสถิตไปใช้ประโยชน์

- ความรู้เกี่ยวกับไฟฟ้าสถิตสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างเครื่องมือเครื่องใช้หรืออุปกรณ์ไฟฟ้าหลายอย่าง เช่น เครื่องถ่ายเอกสาร เครื่องพิมพ์เลเซอร์สี เครื่องพ่นสี เครื่องฟอกอากาศ หรือ เครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต
- ความรู้เกี่ยวกับไฟฟ้าสถิตสามารถนำไปอธิบายปรากฏการณ์ในชีวิตประจำวันได้ เช่น ฟ้าผ่า ฟ้าแลบ การเกิดประกายไฟจากการเสียดสีของวัตถุ ซึ่งช่วยให้สามารถป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นได้

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 13

คำถาม

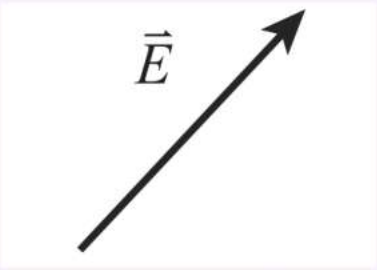
1. ลูกพิทลูกหนึ่งสูญเสียอิเล็กตรอนไป 10^4 ตัว ลูกพิทนี้มีประจุไฟฟ้าเท่าใด ถ้าเดิมลูกพิทมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า
2. เมื่อนำวัตถุที่มีประจุลบเข้าใกล้โลหะทรงกลมสองอันที่มีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้าวางสัมผัสกัน ดังรูป



รูป ประกอบคำถามข้อ 2

เมื่อแยกทรงกลมทั้งสองออกจากกันทรงกลมทางซ้ายและขวามีประจุชนิดใด

3. ถ้าให้ทรงกลมตัวนำ A มีประจุเป็น Q_1 ทรงกลมตัวนำ B มีประจุเป็น Q_2 โดย Q_1 มากกว่า Q_2 แรงระหว่างประจุที่กระทำต่อ A และ B มีขนาดเท่ากันหรือไม่
4. ณ บริเวณหนึ่งมีค่าสนามไฟฟ้าเท่ากับ E และมีทิศทางดังรูป ถ้าวางประจุ $+q$ และ $-q$ ในบริเวณดังกล่าว แรงที่กระทำต่อประจุแต่ละตัวมีขนาดเท่าใด และมีทิศทางใด



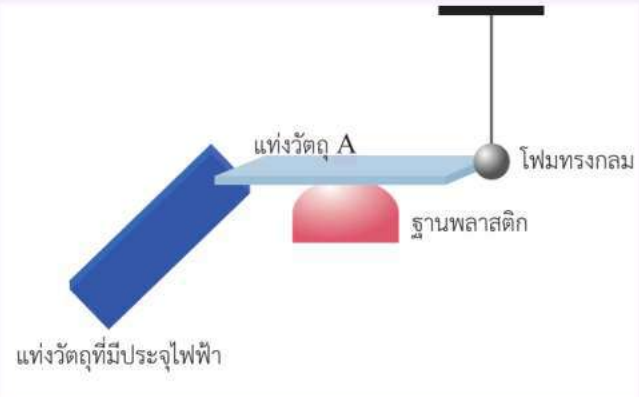
รูป ประกอบคำถามข้อ 4

5. ที่ตำแหน่งห่างจากจุดประจุหนึ่งเป็นระยะ 2.0 เซนติเมตร มีขนาดของสนามไฟฟ้าเป็น 10^5 นิวตันต่อคูลอมบ์ จงหาขนาดของสนามไฟฟ้าที่ห่างจากจุดประจุนี้ 1.0 เซนติเมตร
6. ประจุ $+Q$ เคลื่อนที่จากแผ่นโลหะที่มีประจุบวกไปยังแผ่นโลหะที่มีประจุลบตามแนวเส้นตรง จงเขียนกราฟระหว่างแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าที่กระทำต่อประจุ $+Q$ กับระยะทางที่ประจุ $+Q$ เคลื่อนที่ได้ กราฟที่ได้จะเป็นอย่างไร

7. แผ่นโลหะขนานสองแผ่น วางห่างกันเป็นระยะ x แต่ละแผ่นมีประจุไฟฟ้าชนิดตรงกันข้ามอนุภาคมวล m มีประจุไฟฟ้า $-Q$ หลุดออกจากแผ่นโลหะที่มีประจุลบเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง a ไปยังแผ่นโลหะที่มีประจุบวก แผ่นโลหะทั้งสองมีความต่างศักย์เท่าใด
8. ตัวเก็บประจุแผ่นคู่ขนานสามารถเก็บประจุได้อย่างไร
9. ถ้าความต่างศักย์ระหว่างปลายของตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า
   ก. ปริมาณประจุที่ตัวเก็บประจุเก็บได้จะเปลี่ยนแปลงไปหรือไม่ อย่างไร
   ข. พลังงานศักย์ที่สะสมในตัวเก็บประจุจะเปลี่ยนแปลงไปหรือไม่ อย่างไร
10. ตัวเก็บประจุ 3 ตัวเดิมที่ต่อกันแบบอนุกรม ถ้าเปลี่ยนไปต่อกันแบบขนาน ความจุสมมูลจะแตกต่างไปอย่างไร
11. เครื่องพิมพ์เลเซอร์สี ใช้หลักการไฟฟ้าสถิตในการทำงานอย่างไร
12. อันตรายจากไฟฟ้าสถิตส่วนใหญ่ เกิดขึ้นจากสาเหตุใด

ปัญหา

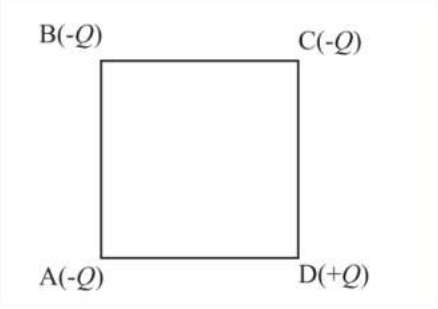
1. โฟมทรงกลมห่อผิวด้วยโลหะ ไปแขวนกับด้ายแขวนในแนวดิ่งโดยผิวของทรงกลมสัมผัสกับแท่งวัตถุ A ที่วางอยู่บนฐานพลาสติก จากนั้นนำแท่งวัตถุที่มีประจุไฟฟ้า มาแตะปลายอีกด้านของวัตถุ A ดังรูป



รูป ประกอบปัญหาข้อ 1

โฟมทรงกลมจะวางตัวอย่างไร ถ้า
ก. วัตถุ A เป็นตัวนำ
ข. วัตถุ A เป็นฉนวน

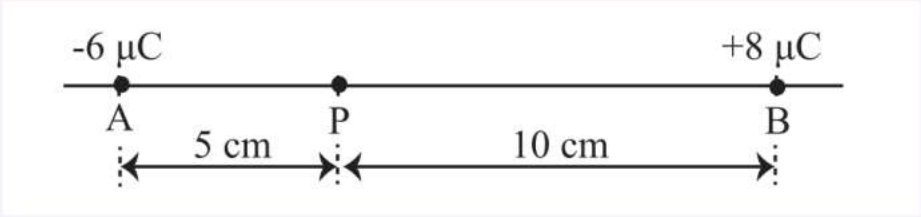
2. ประจุไฟฟ้า $-Q$ จำนวน 3 ประจุ วางอยู่ที่มุม A B และ C ของสี่เหลี่ยมจัตุรัส และมีประจุไฟฟ้า $+Q$ วางอยู่ที่มุม D ดังรูป



รูป ประกอบปัญหาข้อ 2

แรงไฟฟ้าลัพธ์ที่กระทำต่อประจุ $+Q$ มีทิศทางใด

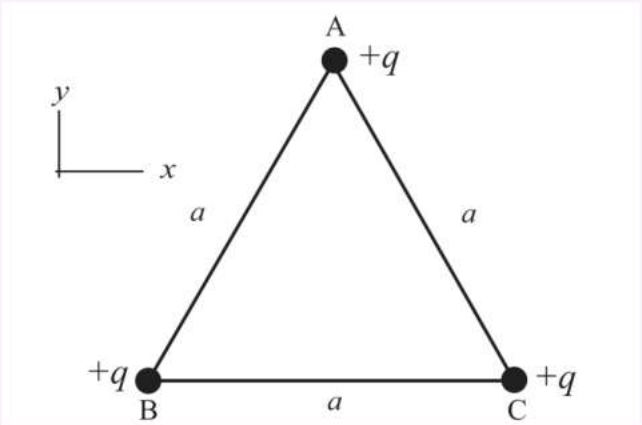
3. ประจุ –6 และ +8 ไมโครคูลอมบ์วางไว้ที่จุด A และ B ตามลำดับ โดยระยะ AB เท่ากับ 15 เซนติเมตร และระยะ AP เท่ากับ 5 เซนติเมตร ดังรูป



รูป ประกอบปัญหาข้อ 3

ถ้านำประจุ $-q$ ไปวางที่จุด P ทำให้เกิดแรงไฟฟ้าที่จุด P เท่ากับ 57.6 นิวตัน ประจุ $-q$ มีค่าเท่าใด

4. สามเหลี่ยมด้านเท่า ABC ยาวด้านละ a ที่แต่ละมุมมีจุดประจุ $+q$ ดังรูป

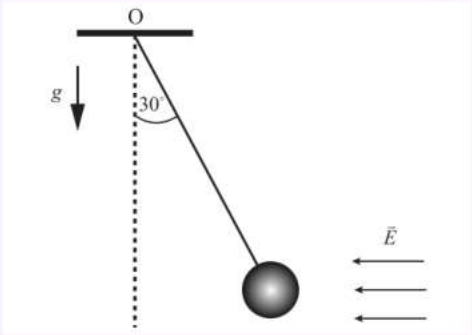


รูป ประกอบปัญหาข้อ 4

ก. หาขนาดและทิศทางของสนามไฟฟ้าลัพธ์ที่ตำแหน่ง A

ข. สนามไฟฟ้าลัพธ์เนื่องจากจุดประจุทั้งสามมีค่าเป็นศูนย์ที่ตำแหน่งใด

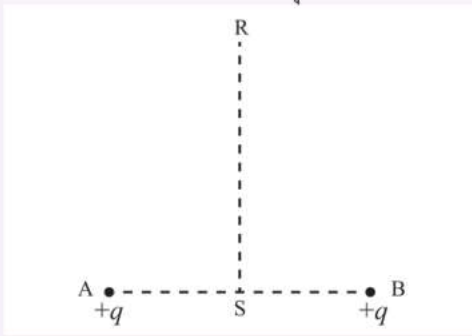
5. ทรงกลมขนาดเล็กมีมวล $\sqrt{3}$ กรัม แขวนด้วยเชือกเบาที่เป็นฉนวน อีกปลายตรึงไว้ที่จุด O เมื่อทรงกลมหยุดนิ่งในสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอขนาด 2×10^{5} นิวตันต่อคูลอมบ์ ซึ่งมีทิศทางในแนวระดับ ปรากฏว่าเชือกเอียงทำมุม 30 องศา กับแนวดิ่ง ดังรูป



รูป ประกอบปัญหาข้อ 5

ประจุของทรงกลมเป็นชนิดใด และมีขนาดเท่าใด

6. วางจุดประจุขนาดเท่ากันและชนิดเดียวกันที่ตำแหน่ง A และ B ให้ RS เป็นเส้นตรงที่ลากแบ่งครึ่งและตั้งฉากกับเส้นตรงที่ต่อเชื่อมระหว่างจุด A และ B ที่จุด S ดังรูป



รูป ประกอบปัญหาข้อ 6

ข้อความต่อไปนี้ ถูกต้องหรือไม่ เพราะเหตุใด

ก. ตำแหน่ง S เป็นจุดสะเทิน

ข. ทุกจุดบนเส้นตรง RS มีทิศทางของสนามไฟฟ้าตั้งฉากกับแนว AB

ค. ทุกจุดบนเส้นตรง RS มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับศูนย์

7. ถ้าต่อตัวเก็บประจุตัวหนึ่งเข้ากับความต่างศักย์ 9.0 โวลต์ จะมีประจุบนตัวเก็บประจุ 6.0 ไมโครคูลอมบ์ ถ้าต่อตัวเก็บประจุตัวนี้เข้ากับความต่างศักย์ 12.0 โวลต์ จะมีประจุบนตัวเก็บประจุเท่าใด

8. ตัวเก็บประจุแบบแผ่นคู่ขนาน เมื่อต่อเข้ากับความต่างศักย์ 500 โวลต์ จะมีพลังงานถูกเก็บไว้ 4.0×10^{-3} จูล จงหาความจุของตัวเก็บประจุ

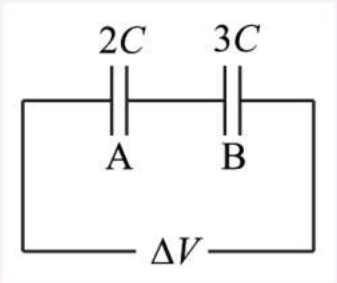
9. ตัวเก็บประจุตัวหนึ่งมีความจุ 40 ไมโครฟารัด เดิมมีความต่างศักย์เป็นศูนย์ ถ้าต้องการให้มีความต่างศักย์เป็น 100 โวลต์ งานที่ต้องทำในการใส่ประจุเข้าไปมีค่าเท่าใด

10. ตัวเก็บประจุ 3 ตัว มีความจุ 6 ไมโครฟารัดเท่ากัน ต่อตัวเก็บประจุทั้งสามแบบอนุกรม แล้วต่อกับความต่างศักย์ ΔV ถ้าพลังงานที่เก็บไว้ในตัวเก็บประจุตัวหนึ่งเท่ากับ 3×10^{-4} จูล จงหา ก. ความต่างศักย์ ΔV

    ข. ประจุสะสมบนตัวเก็บประจุแต่ละตัว

11. ตัวเก็บประจุ 2 ตัวมีความจุ 4 และ 6 ไมโครฟารัด ตามลำดับ ถ้าต่อตัวเก็บประจุทั้งสองแบบอนุกรมได้ความจุรวม C_S และถ้าต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน ได้ความจุรวม C_P จงหาอัตราส่วนระหว่าง C_S ต่อ C_P

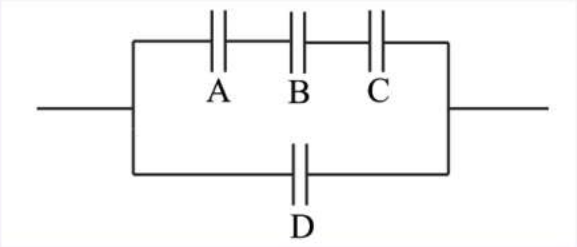
12. ตัวเก็บประจุ A และ B มีความจุ $2C$ และ $3C$ ตามลำดับ เริ่มต้นไม่มีประจุไฟฟ้า นำมาต่ออนุกรมและต่อกับความต่างศักย์ ΔV ดังรูป



รูป ประกอบปัญหาข้อ 12

อัตราส่วนของพลังงานที่สะสมในตัวเก็บประจุ A ต่อ B มีค่าเท่าใด

13. ตัวเก็บประจุ A B C และ D มีความจุ C $2C$ $3C$ และ $4C$ ตามลำดับ เมื่อนำมาต่อกัน ดังรูป ได้ความจุสมมูลเท่ากับ $\frac{250}{11}$ ไมโครฟารัด



รูป ประกอบปัญหาข้อ 13

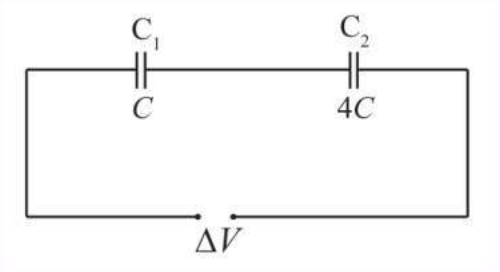
ตัวเก็บประจุ A มีความจุเท่าใด

14. ตัวเก็บประจุ 3 ตัว แต่ละตัวมีความจุ 60 ไมโครฟารัด เมื่อนำตัวเก็บประจุทั้งสามต่อแบบอนุกรมแล้วต่อเข้ากับความต่างศักย์ 30 โวลต์ ต่อมา นำตัวเก็บประจุทั้งสามมาต่อแบบขนานแล้วต่อเข้ากับความต่างศักย์ 30 โวลต์ จงตอบคำถามต่อไปนี้

    ก. ในการต่อแบบอนุกรม จะมีประจุบนตัวเก็บประจุแต่ละตัวเท่าใด

    ข. ในการต่อแบบขนาน จะมีประจุบนตัวเก็บประจุแต่ละตัวเท่าใด

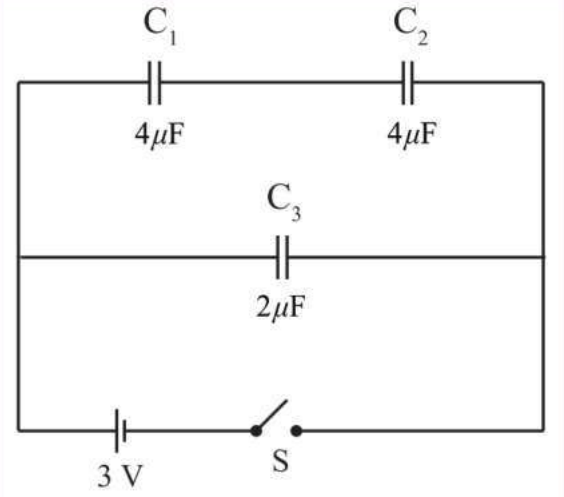
15. ตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 มีความจุ C และ $4C$ ตามลำดับ ต่ออนุกรมกันแล้วต่อกับความต่างศักย์ ΔV ดังรูป



รูป ประกอบปัญหาข้อ 15

ความต่างศักย์ระหว่างปลายของตัวเก็บประจุ C_1 มีค่าเท่าใด

16. ตัวเก็บประจุ C_1, C_2 และ C_3 มีความจุ 4 ไมโครฟารัด 4 ไมโครฟารัด และ 2 ไมโครฟารัด ตามลำดับ แบตเตอรี่ 3 โวลต์ และสวิตช์ S ต่อกันเป็นวงจร ดังรูป



รูป ประกอบปัญหาข้อ 16

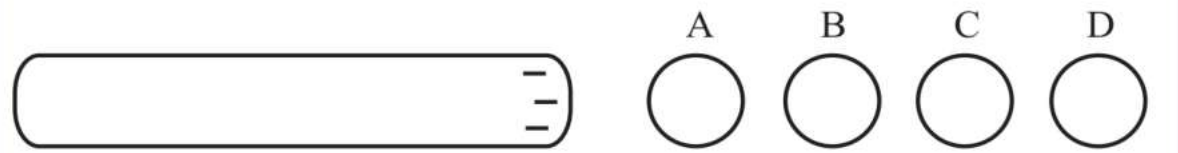
ถ้าขณะวงจรเปิด ตัวเก็บประจุยังไม่มีประจุ เมื่อสับสวิตช์ S ลงให้ครบวงจร จะเกิดการประจุเข้าตัวเก็บประจุ

ก. ตัวเก็บประจุแต่ละตัวมีประจุเท่าใด

ข. พลังงานไฟฟ้าที่สะสมในตัวเก็บประจุ C_3 มีค่าเท่าใด

ปัญหาท้าทาย

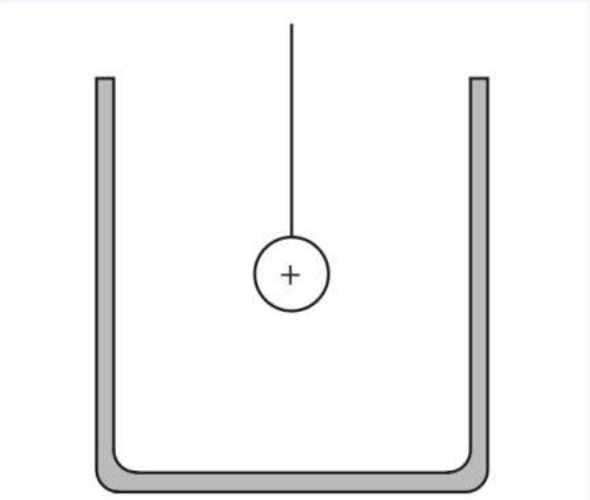
17. มีทรงกลมตัวนำ 2 ลูก ลูกหนึ่งมีรัศมี 3.0 เซนติเมตร และมีประจุ −20 นาโนคูลอมบ์ อีกลูกหนึ่งมีรัศมี 5.0 เซนติเมตร และมีประจุ 100 นาโนคูลอมบ์ ใช้ลวดตัวนำแตะที่ผิวทรงกลมตัวนำทั้งสองลูก จะมีการถ่ายโอนประจุจากทรงกลมหนึ่งไปยังอีกทรงกลมหนึ่ง เมื่อประจุหยุดถ่ายโอน จงหาประจุบนทรงกลมตัวนำแต่ละลูก
18. นำแท่งวัตถุที่มีประจุลบมาไว้ใกล้ ๆ ทรงกลมตัวนำ A, B, C และ D ที่มีขนาดเท่ากันและเป็นกลาง ดังรูป



รูป ประกอบปัญหาท้าทายข้อ 18

หลังจากนั้นเลื่อนทรงกลม B และทรงกลม C มาสัมผัสกันสักครู่ แล้วแยกทรงกลม B และทรงกลม C ออกมาไว้ที่เดิม ต่อจากนั้นนำแท่งวัตถุที่มีประจุลบออก ทรงกลมตัวนำ A, B, C และ D จะมีประจุชนิดใด

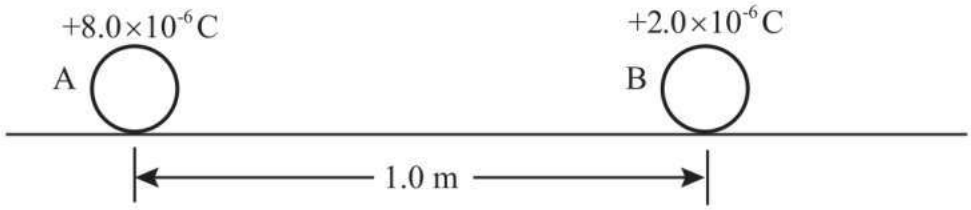
19. เมื่อหย่อนทรงกลมตัวนำที่มีประจุบวกลงไปไว้ที่ตำแหน่งกลางของกระป๋องโลหะ ดังรูป



รูป ประกอบปัญหาท้าทายข้อ 19

ในขณะหนึ่ง ถ้าทรงกลมตัวนำเอียงไปแตะผนังด้านในของกระป๋องโลหะ แล้ววกกลับมาอยู่ที่ตำแหน่งเดิม ประจุบนทรงกลมตัวนำและกระป๋องโลหะเป็นประจุชนิดใด

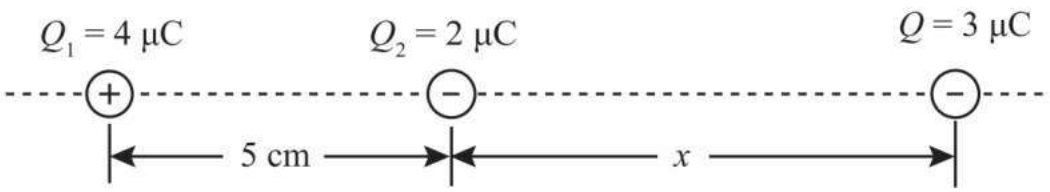
20. ในการเกิดฟ้าผ่าครั้งหนึ่ง มีอิเล็กตรอนถ่ายโอนจากก้อนเมฆไปยังพื้นดินจำนวน 2.50×10^{19} ตัว ซึ่งเกิดขึ้นในช่วงเวลา 160 ไมโครวินาที ถ้าประจุของอิเล็กตรอนเท่ากับ 1.60×10^{-19} คูลอมบ์ จงหาอัตราการถ่ายโอนประจุระหว่างก้อนเมฆกับพื้นดิน
21. ลูกพิท 2 ลูกมีประจุ Q_1 และ Q_2 ตามลำดับ ถ้าลูกพิททั้งสองวางห่างกัน 20 เซนติเมตร จะเกิดแรงระหว่างลูกพิทมีขนาด F ถ้าต้องการให้แรงระหว่างลูกพิทมีขนาด $4F$ ต้องวางลูกพิทห่างกันเท่าใด
22. ทรงกลมตัวนำขนาดเล็ก A และ B มีประจุ $+8.0\times10^{-6}$ คูลอมบ์ และ $+2.0\times10^{-6}$ คูลอมบ์ ตามลำดับ วางทรงกลมทั้งสองบนโต๊ะฉนวนลื่นห่างกัน 1.0 เมตร ดังรูป



รูป ประกอบปัญหาท้าทายข้อ 22

ถ้าทรงกลม B มีมวล 1.0 กรัม และถูกแรงผลักจากทรงกลม A ทำให้เคลื่อนที่ ทรงกลม B จะเคลื่อนที่ด้วยความเร่งเริ่มต้นเท่าใด

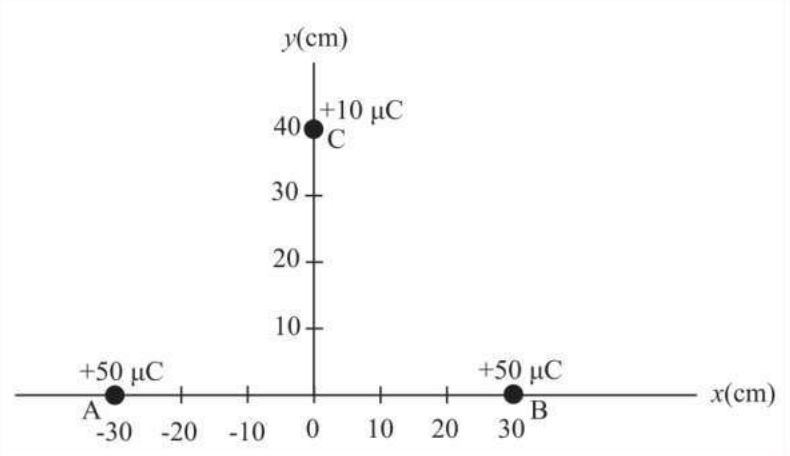
23. จุดประจุ Q_1 และ Q_2 วางในแนวเส้นตรง ดังรูป



รูป ประกอบปัญหาท้าทายข้อ 23

จงหาค่าของ x ที่ทำให้แรงลัพธ์ที่กระทำต่อจุดประจุ Q เป็นศูนย์ ในหน่วยเซนติเมตร

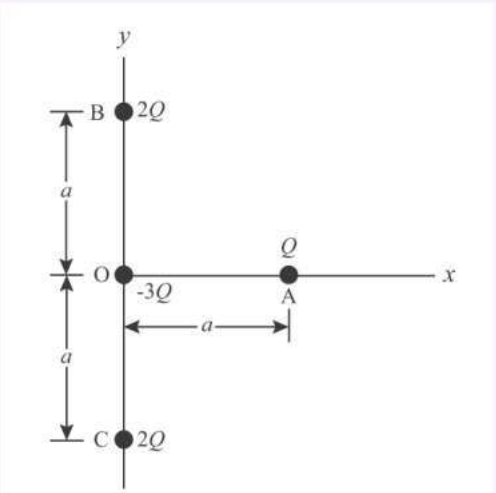
24. จุดประจุ +50 ไมโครคูลอมบ์ 2 จุดประจุ วางอยู่บนแกน x ที่จุด A และ B ตามลำดับ ส่วนจุดประจุ +10 ไมโครคูลอมบ์ วางอยู่บนแกน y ที่จุด C ดังรูป



รูป ประกอบปัญหาท้าทายข้อ 24

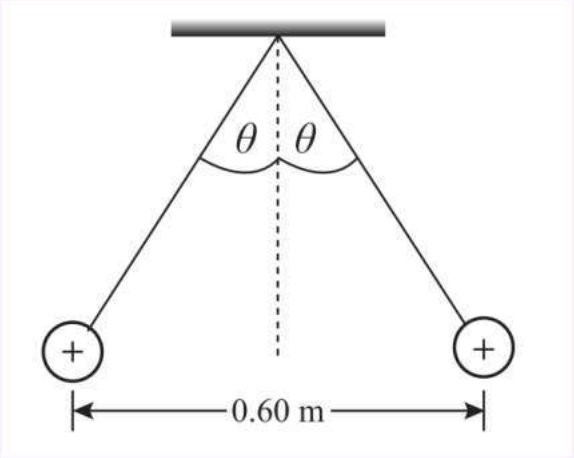
จงหาขนาดและทิศทางของแรงลัพธ์ที่กระทำต่อจุดประจุที่จุด C

25. จุดประจุ Q $2Q$ $2Q$ และ $-3Q$ ที่จุด A B C และ O ดังรูป จงหาขนาดของแรงลัพธ์ที่กระทำต่อจุดประจุ $-3Q$ ในเทอมของ k Q และ a พร้อมระบุทิศทางของแรงลัพธ์



รูป ประกอบปัญหาท้าทายข้อ 25

26. ทรงกลมตัวนำขนาดเล็ก 2 ลูก มีมวล 10 กรัมเท่ากัน ผูกทรงกลมทั้งสองกับเส้นด้ายยาว 1.00 เมตร แล้วแขวนจุดกึ่งกลางไว้ที่จุด ๆหนึ่ง เมื่อให้ประจุบวกจำนวนเท่ากันแก่ทรงกลมตัวนำทั้งสองลูก แรงผลักระหว่างประจุไฟฟ้า ทำให้ทรงกลมตัวนำอยู่ห่างกัน 0.60 เมตร และเส้นด้ายเอียงทำมุม θ กับแนวดิ่ง ดังรูป

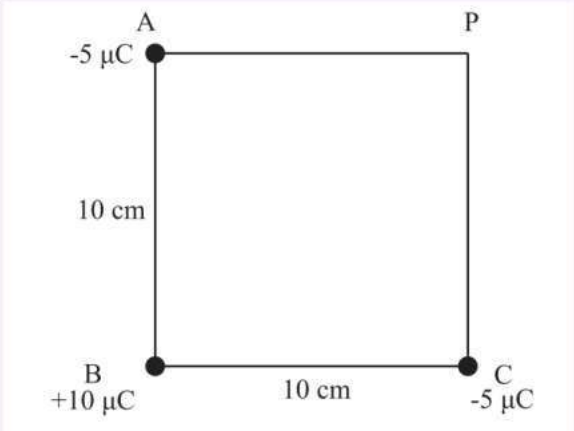


รูป ประกอบปัญหาท้าทายข้อ 26

จงหาปริมาณประจุบนทรงกลมตัวนำแต่ละลูก

27. จุดประจุ $+Q$ สองจุดประจุ วางบนแกน y ที่ตำแหน่ง $(0,a)$ และ $(0,-a)$ จงหาขนาดของสนามไฟฟ้าลัพธ์ที่จุด P ซึ่งอยู่ตำแหน่ง $(b,0)$ ในเทอม k Q a และ b พร้อมทั้งระบุทิศทางของสนามไฟฟ้าลัพธ์

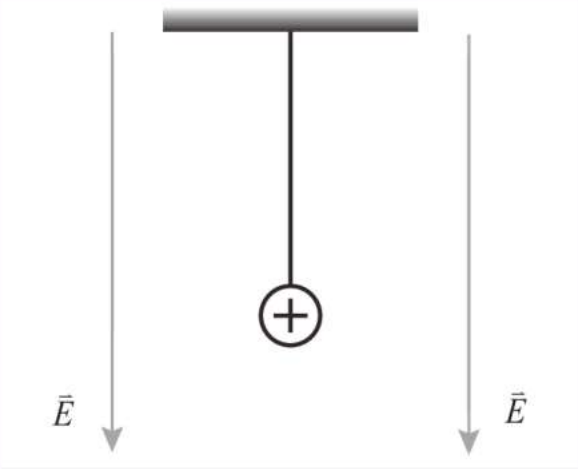
28. จุดประจุ -5 $+10$ และ -5 ไมโครคูลอมบ์ อยู่บนมุมทั้งสามของรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีด้านยาว 10 เซนติเมตร ดังรูป



รูป ประกอบปัญหาท้าทายข้อ 28

จงหาขนาดและทิศทางของสนามไฟฟ้าลัพธ์ที่จุด P

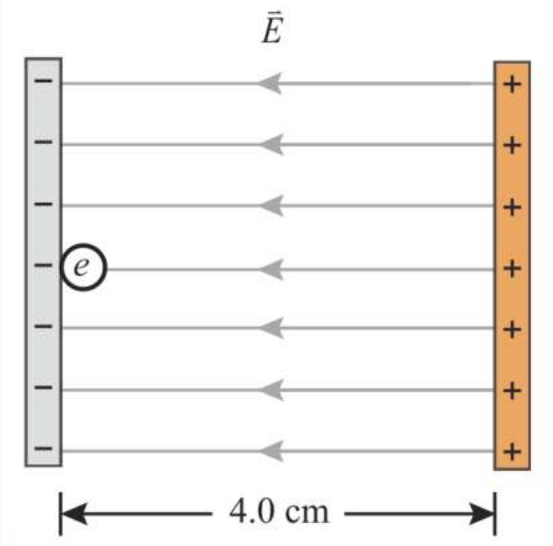
29. ทรงกลมขนาดเล็กมวล 0.50 กรัม มีประจุ $+6.0\times10^{-6}$ คูลอมบ์ แขวนอยู่ในแนวดิ่งด้วยเส้นด้ายและอยู่ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอขนาด 400 นิวตันต่อคูลอมบ์ มีทิศพุ่งลงในแนวดิ่งดังรูป



รูป ประกอบปัญหาท้าทายข้อ 29

จงหาแรงดึงในเส้นด้าย

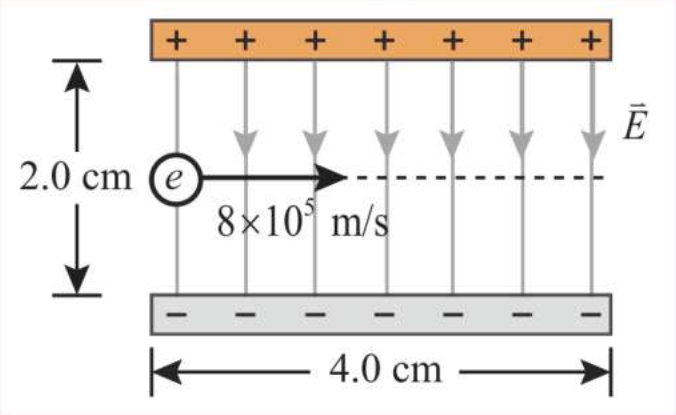
30. แผ่นตัวนำขนานที่วางห่างกัน 4.0 เซนติเมตร ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอมีขนาด 45.5 นิวตันต่อคูลอมบ์ มีทิศดังรูป



รูป ประกอบปัญหาท้าทายข้อ 30

ถ้าอิเล็กตรอนหลุดจากแผ่นลบแล้วเคลื่อนที่ไปยังแผ่นบวก จงหาความเร็วของอิเล็กตรอนขณะกระทบแผ่นบวก (ไม่คิดแรงเนื่องจากน้ำหนักของอิเล็กตรอน) กำหนด อิเล็กตรอนมีมวลเท่ากับ 9.1×10^{-31} กิโลกรัม และประจุเท่ากับ 1.60×10^{-19} คูลอมบ์

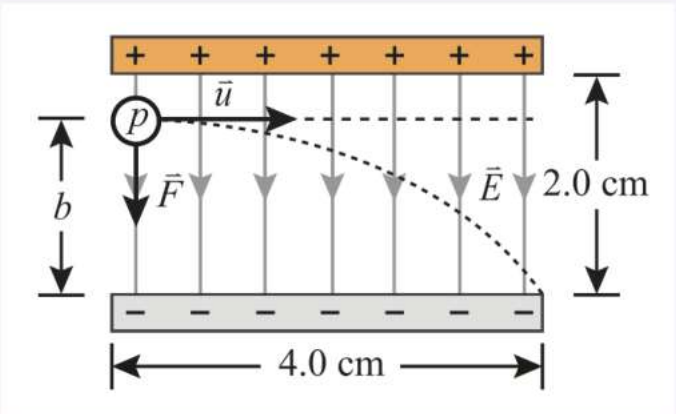
31. แผ่นตัวนำคู่ขนานยาว 4.0 เซนติเมตร วางห่างกัน 2.0 เซนติเมตร และมีประจุต่างชนิดกันกระจายอย่างสม่ำเสมอ ถ้าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 8×10^5 เมตรต่อวินาที จากจุดกึ่งกลางระหว่างแผ่นตัวนำในทิศขนานกับแผ่นตัวนำ ดังรูป



รูป ประกอบปัญหาท้าทายข้อ 31

อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่พ้นสนามไฟฟ้าที่ขอบของแผ่นตัวนำพอดี จงหาขนาดของสนามไฟฟ้า

32. แผ่นตัวนำขนานยาว 4.0 เซนติเมตร วางห่างกัน 2.0 เซนติเมตร และมีประจุต่างชนิดกันกระจายอย่างสม่ำเสมอ ถ้าโปรตอนเคลื่อนที่เข้าไปในสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นคู่ขนานจากจุดที่เหนือแผ่นลบเป็นระยะ b ด้วยความเร็ว $\vec{u}$ ขนาด 6.0×10^5 เมตรต่อวินาทีในทิศขนานกับแผ่นคู่ขนาน ดังรูป

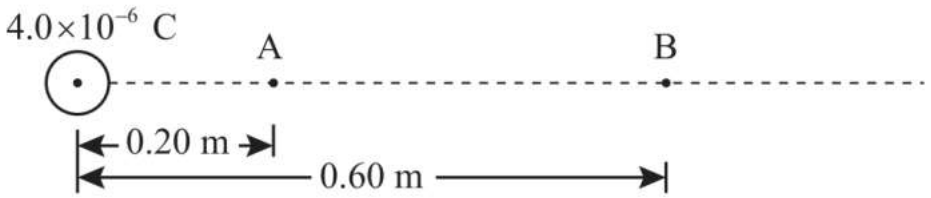


รูป ประกอบปัญหาท้าทายข้อ 32

ถ้าสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ $\vec{E}$ มีขนาด 7.0×10^4 นิวตันต่อคูลอมบ์ โปรตอนจะเคลื่อนที่ออกจากสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำที่ขอบของแผ่นลบพอดี จงหาค่าของ b ในหน่วยเซนติเมตร

33. จงหางานในการนำจุดประจุ 4.0×10^{-6} คูลอมบ์ จากจุด A ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเป็นศูนย์ขึ้นไปยังจุด B ที่มีศักย์ไฟฟ้า 100 โวลต์ ด้วยความเร็วคงตัว
34. โปรตอนเคลื่อนที่จากหยุดนิ่งขนานกับสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอในแนวระดับจากจุด A ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้า 4.0×10^{5} โวลต์ ไปยังจุด B ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้า 6.6×10^{4} โวลต์ จงหาอัตราเร็วของโปรตอนขณะผ่านจุด B

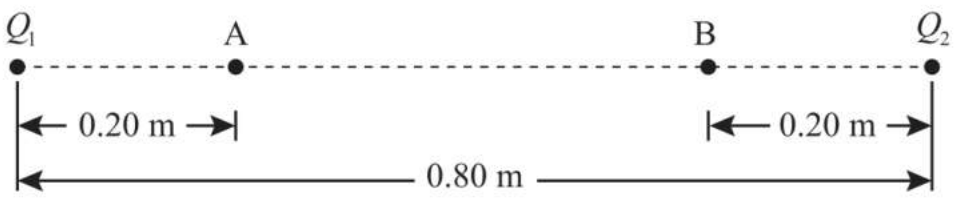
    กำหนด โปรตอนมีมวล 1.67×10^{-27} กิโลกรัม และประจุเท่ากับ $+1.60\times10^{-19}$ คูลอมบ์
35. A และ B เป็นจุดที่อยู่ห่างจากศูนย์กลางของประจุ 4.0×10^{-6} คูลอมบ์ เป็นระยะ 0.20 เมตร และ 0.60 เมตร ตามลำดับ ดังรูป



รูป ประกอบปัญหาท้าทายข้อ 35

ถ้าปล่อยลูกพิทมวล 0.030 มิลลิกรัม ประจุ 2.0×10^{-8} คูลอมบ์ จากจุด A เมื่อลูกพิทวิ่งผ่านจุด B จะมีอัตราเร็วเท่าใด

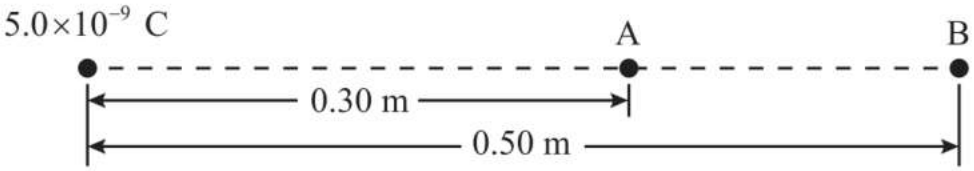
36. จุดประจุ Q_1 เท่ากับ 2.0 นาโนคูลอมบ์ และ Q_2 เท่ากับ -3.0 นาโนคูลอมบ์ อยู่ห่างกันเป็นระยะ 0.80 เมตร A และ B เป็นจุดที่อยู่บนเส้นตรงที่ลากจาก Q_1 ไปยัง Q_2 โดยจุด A และ B อยู่ห่างจาก Q_1 และ Q_2 เป็นระยะ 0.20 เมตร ดังรูป



รูป ประกอบปัญหาท้าทายข้อ 36

ถ้าต้องการให้จุดประจุ q เท่ากับ 200 ไมโครคูลอมบ์ เคลื่อนที่จากจุด A ไปยังจุด B ด้วยความเร็วคงตัว งานที่ต้องทำมีค่าเท่าใด

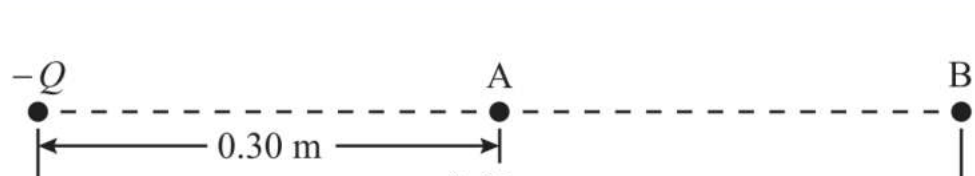
37. A และ B เป็นจุดที่อยู่ห่างจากจุดประจุ 5.0×10^{-9} คูลอมบ์ เป็นระยะ 0.30 และ 0.50 เมตร ตามลำดับ ดังรูป



รูป ประกอบปัญหาท้าทายข้อ 37

จงหาความต่างศักย์ระหว่างจุด A และ B

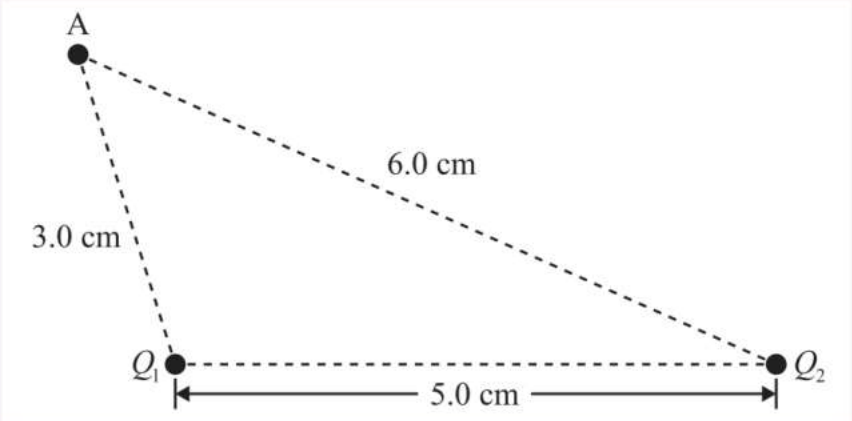
38. A และ B เป็นจุดที่อยู่ห่างจากจุดประจุ $-Q$ เป็นระยะ 0.30 และ 0.60 เมตร ตามลำดับ ดังรูป



รูป ประกอบปัญหาท้าทายข้อ 38

ถ้า A มีศักย์ไฟฟ้า V_A เท่ากับ –180 โวลต์ จงหาความต่างศักย์ระหว่างจุด A และ B

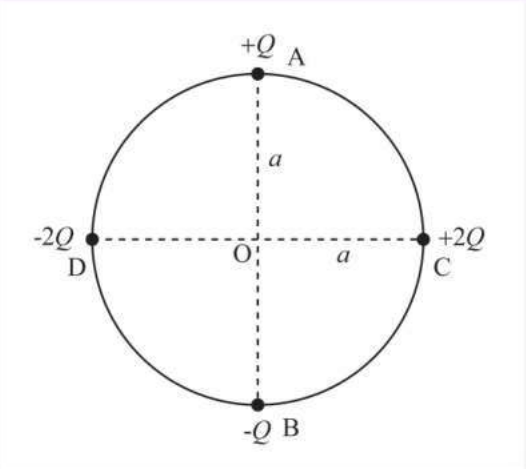
39. จุดประจุ Q_1 และ Q_2ห่างกัน 5.0 เซนติเมตร A เป็นจุดที่อยู่ห่างจุดประจุ Q_1 และ Q_2 เป็นระยะ 3.0 และ 6.0 เซนติเมตร ตามลำดับ ดังรูป



รูป ประกอบปัญหาท้าทายข้อ 39

ถ้าศักย์ไฟฟ้าที่จุด A เนื่องจากประจุ Q_1 และ Q_2 มีขนาดเท่ากัน จงหาอัตราส่วนของ Q_1 ต่อ Q_2

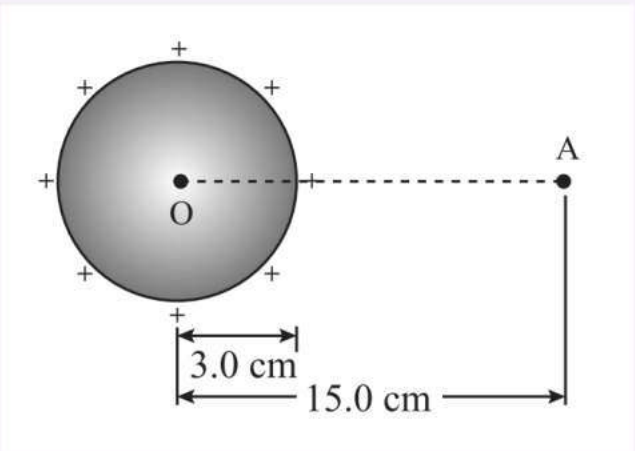
40. ประจุ $+Q$, $-Q$, $+2Q$ และ $-2Q$ อยู่บนเส้นรอบวงของวงกลมรัศมี a ที่จุด A, B, C และ D ตามลำดับ ดังรูป



รูป ประกอบปัญหาท้าทายข้อ 40

จงหางานที่ต้องทำในการนำประจุเหล่านี้ไปยังระยะอนันต์ ในเทอม k Q และ a

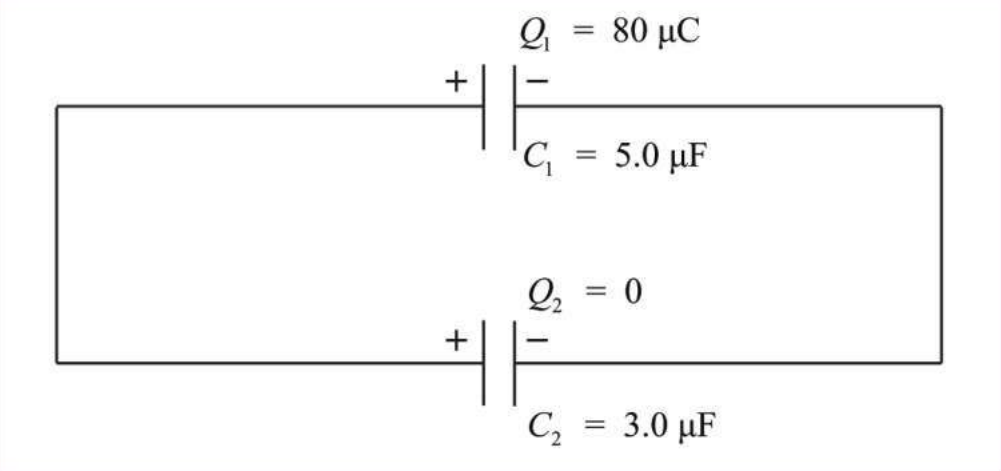
41. ทรงกลมตัวนำรัศมี 3.0 เซนติเมตร มีประจุ 5.0 นาโนคูลอมบ์ ถ้า A เป็นจุดที่อยู่ห่างจากจุดศูนย์กลาง O ของทรงกลมตัวนำ 15.0 เซนติเมตร ดังรูป



รูป ประกอบปัญหาท้าทายข้อ 41

จงหาความต่างศักย์ระหว่างจุด O และ A

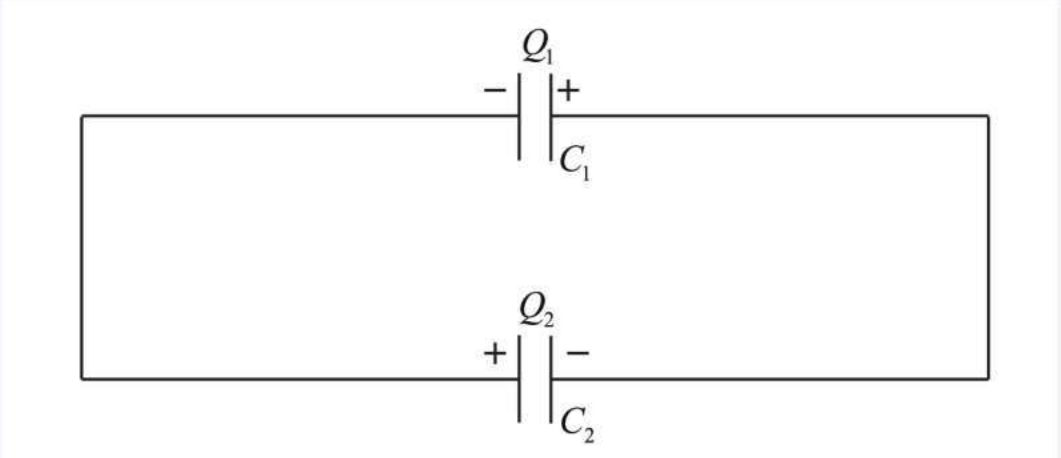
42. ตัวเก็บประจุตัวหนึ่งมีความจุ C_1 เท่ากับ 5.0 ไมโครฟารัด และมีประจุ Q_1 เท่ากับ 80 ไมโครคูลอมบ์ ต่อกับตัวเก็บประจุอีกตัวหนึ่งที่มีความจุ C_2 เท่ากับ 3.0 ไมโครฟารัด และมีประจุ Q_2 เท่ากับ 0 ดังรูป



รูป ประกอบปัญหาท้าทายข้อ 42

เมื่อประจุหยุดถ่ายโอน จงหาประจุบนตัวเก็บประจุแต่ละตัว

43. ถ้ามีตัวเก็บประจุ 2 ตัว ตัวเก็บประจุตัวหนึ่งมีความจุ C_1 เท่ากับ 2 ไมโครฟารัด และมีประจุ Q_1 เท่ากับ 50 ไมโครคูลอมบ์ ส่วนตัวเก็บประจุอีกตัวหนึ่งมีความจุ C_2 เท่ากับ 8 ไมโครฟารัด และมีประจุ Q_2 เท่ากับ 110 ไมโครคูลอมบ์ ถ้าใช้ลวดตัวนำ 2 เส้น ต่อแผ่นที่มีประจุเหมือนกันเข้าด้วยกันดังรูป



รูป ประกอบปัญหาท้าทายข้อ 43

เมื่อประจุหยุดถ่ายโอน จงหาประจุบนตัวเก็บประจุแต่ละตัว

บทที่ 14 ไฟฟ้ากระแส

ipst.me/8893

ไฟฟ้ากระแสเกี่ยวข้องกับการดำเนินชีวิตประจำวันของทุกคน อุปกรณ์พกพาต่าง ๆ ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการทำงานและการติดต่อสื่อสาร รวมทั้งรถยนต์ไฟฟ้าที่กำลังจะเข้ามามีบทบาทสำคัญในการแก้ปัญหาด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม ล้วนทำงานโดยอาศัยไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ นอกจากนี้เทคโนโลยีใหม่ ๆ ที่มนุษย์คิดค้นและประดิษฐ์ขึ้นส่วนใหญ่ ล้วนทำงานโดยอาศัยไฟฟ้าทั้งสิ้น ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับไฟฟ้าจึงเป็นเรื่องสำคัญ ซึ่งจะศึกษาได้ในบทนี้

คำถามสำคัญ

- กระแสไฟฟ้าในตัวนำเกิดขึ้นได้อย่างไรและมีความสัมพันธ์กับพลังงานไฟฟ้าและปริมาณอื่น ๆ ในวงจรไฟฟ้าอย่างไร
- การแก้ปัญหาหรือตอบสนองความต้องการด้านพลังงานไฟฟ้าโดยใช้พลังงานทดแทนและเทคโนโลยีด้านพลังงานมีแนวทางอย่างไร

จุดประสงค์การเรียนรู้

14.1 กระแสไฟฟ้า

1. อธิบายกระแสไฟฟ้าในตัวนำ
2. อธิบายการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระและกระแสไฟฟ้าในลวดตัวนำ
3. อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าในลวดตัวนำกับความเร็วลอยเลื่อนของอิเล็กตรอนอิสระ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในลวดตัวนำ และพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำ รวมทั้งคำนวณปริมาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง

14.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์

4. ทดลองเพื่ออภิปรายและสรุปกฎของโอห์ม รวมทั้งนำความเข้าใจเกี่ยวกับกฎของโอห์มไปคำนวณปริมาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง
5. บอกความหมายของความต้านทาน สภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพนำไฟฟ้า
6. อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับความยาว พื้นที่หน้าตัด และสภาพต้านทานของตัวนำโลหะที่อุณหภูมิคงตัว รวมทั้งคำนวณปริมาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง
7. อ่านความต้านทานของตัวต้านทานจากแถบสีบนตัวต้านทาน
8. คำนวณความต้านทานสมมูลเมื่อนำตัวต้านทานมาต่อกันแบบอนุกรมและแบบขนาน

14.3 พลังงานในวงจรไฟฟ้ากระแสตรง

9. ทดลองเพื่อบอกความแตกต่างและอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างอีเอ็มเอฟของแบตเตอรี่กับความต่างศักย์ระหว่างขั้วของแบตเตอรี่
10. อธิบายและคำนวณปริมาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับอีเอ็มเอฟของแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง
11. อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า ความต่างศักย์ และกระแสไฟฟ้า ของเครื่องใช้ไฟฟ้า รวมทั้งคำนวณปริมาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องจากสถานการณ์ที่กำหนดให้

14.4 แบตเตอรี่และวงจรไฟฟ้ากระแสตรงเบื้องต้น

12. ทดลองเพื่ออธิบายอีเอ็มเอฟสมมูลและความต้านทานภายในสมมูล เมื่อต่อแบตเตอรี่แบบอนุกรมและแบบขนาน
13. คำนวณปริมาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในวงจรไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งประกอบด้วยแบตเตอรี่และตัวต้านทาน

14.5 พลังงานไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนและเทคโนโลยีด้านพลังงาน

14. อธิบายการเปลี่ยนพลังงานทดแทนเป็นพลังงานไฟฟ้า
15. อธิบายประสิทธิภาพของพลังงานทดแทน
16. ประเมินความคุ้มค่าด้านค่าใช้จ่ายของพลังงานทดแทน
17. สืบค้นและยกตัวอย่างเทคโนโลยีที่นำมาแก้ปัญหาหรือตอบสนองความต้องการด้านพลังงาน

ความรู้ก่อนเรียน

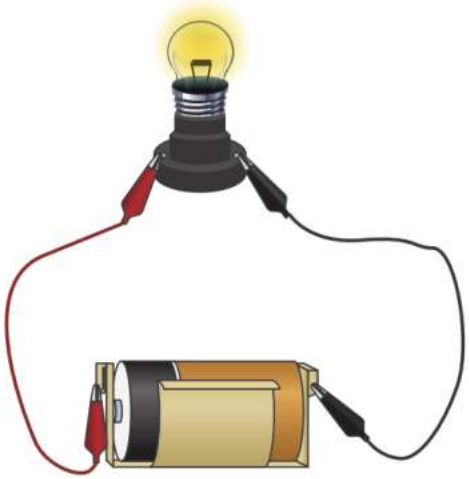
ประจุไฟฟ้า แรงไฟฟ้า สนามไฟฟ้า ศักย์ไฟฟ้า ความต่างศักย์ พลังงาน กำลัง การต่อวงจรไฟฟ้าเบื้องต้น

จากบทที่ผ่านมา เราได้ศึกษาเกี่ยวกับอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าที่อยู่นิ่ง ซึ่งพบว่า ความรู้ความเข้าใจที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้หลากหลายด้าน ในบทนี้ เราจะศึกษาเกี่ยวกับประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ ซึ่งเกี่ยวข้องกับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในเครื่องใช้ไฟฟ้าต่าง ๆ ในชีวิตประจำวัน เช่น โทรศัพท์เคลื่อนที่ คอมพิวเตอร์ นาฬิกา ฯลฯ

ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ได้อย่างไรและมีความสัมพันธ์กับพลังงานไฟฟ้าและปริมาณอื่น ๆ ในวงจรไฟฟ้าอย่างไร ศึกษาได้ดังต่อไป

14.1 กระแสไฟฟ้า

เมื่อใช้สายไฟต่อเครื่องใช้ไฟฟ้าเข้ากับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าให้ครบวงจร จะทำให้เครื่องใช้ไฟฟ้าสามารถทำงานได้ เช่น เมื่อใช้สายไฟต่อกับหลอดไฟและแบตเตอรี่ให้ครบวงจร จะทำให้หลอดไฟสว่าง ดังรูป 14.1 แสดงว่า มี **กระแสไฟฟ้า** (electric current) ผ่านหลอดไฟ จึงทำให้มีการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ไปยังหลอดไฟซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานแสงและความร้อน

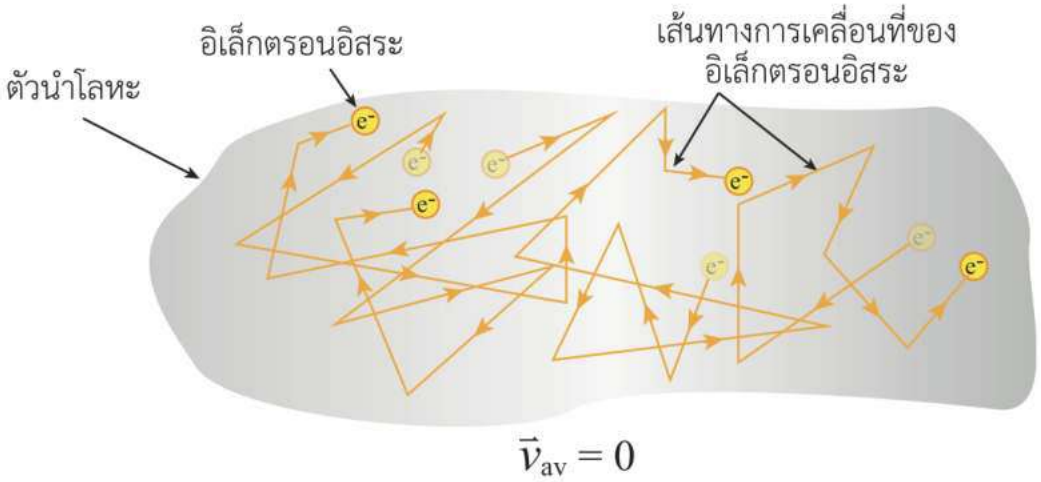


รูป 14.1 การต่อหลอดไฟเข้ากับแบตเตอรี่ให้ครบวงจร

14.1.1 กระแสไฟฟ้าในตัวนำ

เมื่อมีกระแสไฟฟ้าในตัวกลางใด เรากล่าวว่ามี**การนำไฟฟ้า** (electrical conduction) ในตัวกลางนั้น และเรียกตัวกลางที่ให้กระแสไฟฟ้าผ่านได้ว่า **ตัวนำไฟฟ้า** (electrical conductor) หรือ เรียกสั้น ๆ ว่า ตัวนำ ตัวอย่างของตัวนำไฟฟ้า เช่น โลหะ อิเล็กโทรไลต์ แก๊สภายใต้บางสภาวะ ซึ่งตัวนำไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวันเรามากที่สุดคือ ตัวนำที่เป็นโลหะ เพราะเป็นวัสดุที่ใช้เป็นตัวนำในสายไฟตามบ้านและในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของเครื่องใช้ไฟฟ้าต่าง ๆ

ในตัวนำที่เป็นโลหะ อิเล็กตรอนบางส่วนไม่ได้ถูกยึดติดกับอะตอมใดอะตอมหนึ่ง แต่จะเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ เรียกว่า **อิเล็กตรอนอิสระ** (free electron) โดยปกติ อิเล็กตรอนอิสระจะเคลื่อนที่ไปทั่วภายในตัวนำและชนกับอะตอมที่อยู่รอบ ๆ ทำให้ทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเหล่านี้ไม่แน่นอน ดังรูป 14.2 ดังนั้น ความเร็วเฉลี่ยของอิเล็กตรอนจึงเป็นศูนย์ ($\vec{v}_{av} = 0$) กล่าวคือ ไม่มีประจุไฟฟ้าลัพธ์เคลื่อนที่ผ่านในทิศทางใดที่แน่นอน หรือ ไม่มีกระแสไฟฟ้าในตัวนำนั่นเอง

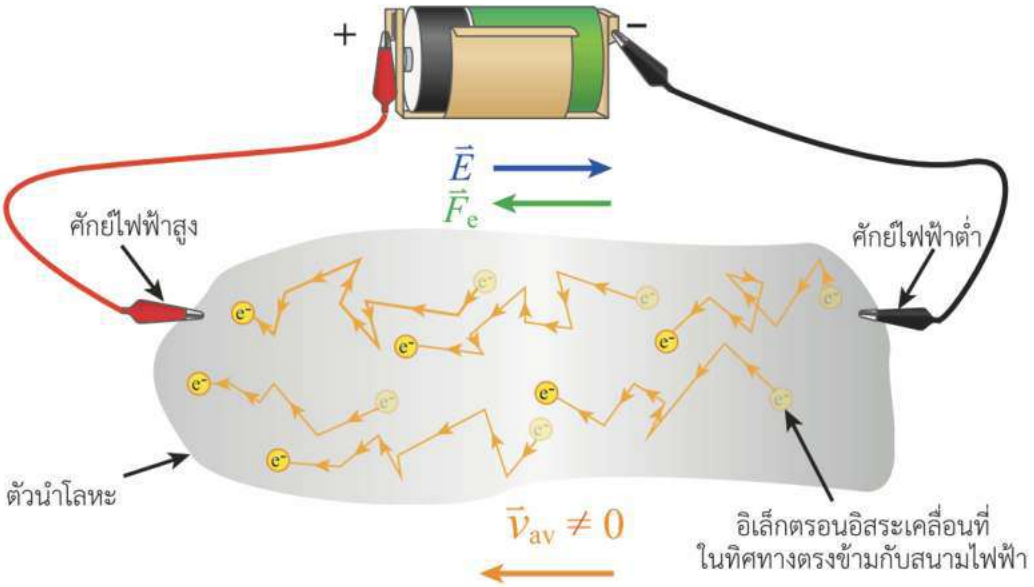


รูป 14.2 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระในสภาวะปกติไม่มีทิศทางแน่นอน

การที่จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าในตัวนำ อิเล็กตรอนอิสระต้องมีการเคลื่อนที่โดยเฉลี่ยไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง ซึ่งจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีแรงไฟฟ้ากระทำต่ออิเล็กตรอน ทั้งนี้ แรงไฟฟ้าเกิดขึ้นเมื่อมีสนามไฟฟ้า และสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีความต่างศักย์ระหว่างจุดสองจุด ดังนั้น การจะทำให้อิเล็กตรอนอิสระในตัวนำมีการเคลื่อนที่โดยเฉลี่ยไปในทิศทางเดียวกันได้นั้น จะต้องมีแหล่งพลังงานที่สามารถทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างจุดสองจุดในตัวนำได้ แหล่งพลังงานที่ทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างจุดสองจุดในตัวนำอย่างต่อเนื่องเรียกว่า **แหล่งกำเนิดไฟฟ้า** (electrical energy source)

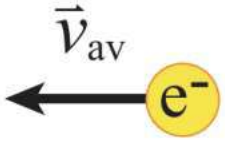
ตัวอย่างของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า เช่น แบตเตอรี่ เซลล์สุริยะ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งในการทำความเข้าใจเบื้องต้นเกี่ยวกับกระแสไฟฟ้า จะยกตัวอย่างในกรณีที่ใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากแบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์ที่มีใช้กันทั่วไปและให้กระแสไฟฟ้าที่เป็นไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งง่ายต่อการทำความเข้าใจ

เมื่อนำแบตเตอรี่มาต่อเข้ากับตัวนำโลหะดังรูป 14.3 จะทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างจุดสองจุดในตัวนำ โดยจุดที่อยู่ด้านขั้วบวกจะมีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าจุดที่อยู่ด้านขั้วลบ ส่งผลให้เกิดสนามไฟฟ้า ($\vec{E}$) และแรงไฟฟ้ากระทำต่ออิเล็กตรอนอิสระ ($\vec{F}_e$) ทำให้อิเล็กตรอนอิสระเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเฉลี่ยที่ไม่เป็นศูนย์ ($\vec{v}_{av} \neq 0$) ไปในทิศทางตรงข้ามกับสนามไฟฟ้า (เนื่องจากอิเล็กตรอนมีการชนกับอะตอมอื่น ๆ ที่อยู่รอบ ๆ ระหว่างเส้นทางการเคลื่อนที่ จึงมีทิศทางตลอดเส้นทางการเคลื่อนที่ไม่เป็นแนวตรง) ทำให้มีประจุไฟฟ้าลัพธ์ผ่านตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งในตัวนำ นั่นคือ ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าในตัวนำโลหะนั่นเอง



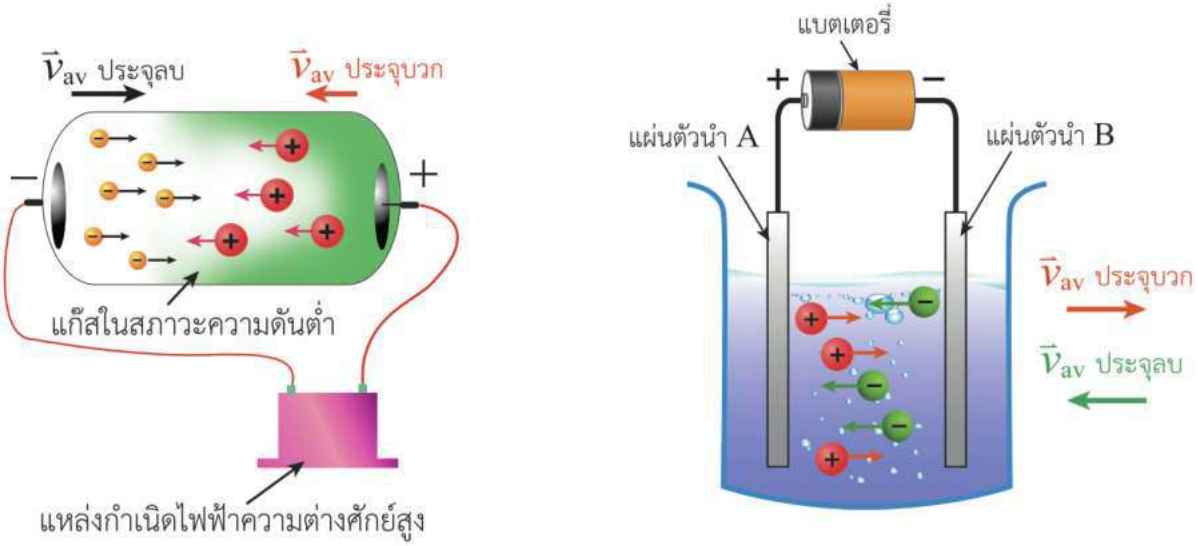
รูป 14.3 ภาพจำลองการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระในตัวนำโลหะเมื่อมีสนามไฟฟ้า

เพื่อการง่ายต่อการทำความเข้าใจการเขียนสัญลักษณ์แทนการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนหรืออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าในตัวนำเมื่อมีสนามไฟฟ้า จึงระบุด้วยเวกเตอร์ของความเร็วเฉลี่ย ดังรูป 14.4



รูป 14.4 การแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระในตัวนำด้วยเวกเตอร์ความเร็วเฉลี่ย

สำหรับตัวนำไฟฟ้าชนิดอื่น เช่น แก๊สที่อยู่ภายใต้สภาวะความดันต่ำและสนามไฟฟ้าที่มีค่าสูง โมเลกุลของแก๊สจะแตกตัวได้ง่าย ทำให้มีอิเล็กตรอนอิสระและไอออนบวกของแก๊สเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงข้ามกัน แต่ไอออนบวกจะเคลื่อนที่ช้ามาก จึงส่งผลให้มีประจุไฟฟ้าลัพธ์ผ่านตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งในแก๊ส จึงทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าในแก๊ส ดังรูป 14.5 ก. ส่วนในตัวนำไฟฟ้าอย่างอิเล็กโทรไลต์ ไอออนลบและบวกที่เกิดจากการแตกตัวของกรด เบส หรือ เกลือ จะเคลื่อนที่เข้าหาแผ่นตัวนำโลหะที่มีศักย์ไฟฟ้าต่างกัน ดังรูป 14.5 ข. ทำให้มีประจุไฟฟ้าลัพธ์ผ่านตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งในอิเล็กโทรไลต์ จึงส่งผลให้เกิดกระแสไฟฟ้าเช่นเดียวกัน



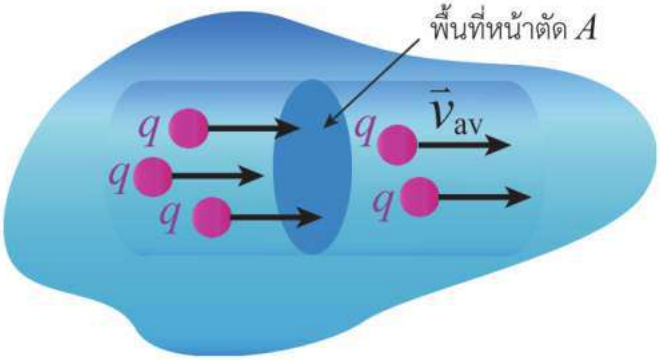
รูป 14.5 ก. การเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุลบและประจุบวกในแก๊ส
ข. การเคลื่อนที่ของไอออนบวกและไอออนลบในอิเล็กโทรไลต์

เนื่องจาก กระแสไฟฟ้าเกิดจากการมีประจุไฟฟ้าลัพธ์เคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งในช่วงเวลาหนึ่ง จึงได้มีการกำหนดว่า **กระแสไฟฟ้าในตัวนำใด ๆ คือปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดของตัวนำนั้นในหนึ่งหน่วยเวลา**

ถ้าพิจารณาตัวนำที่มีอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หน้าตัด A ดังรูป 14.6 สมมติในเวลา Δt อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าจำนวน N ตัว เคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ ถ้าอนุภาคแต่ละตัวมีประจุไฟฟ้า q ดังนั้น ประจุไฟฟ้าทั้งหมด Q ที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดจะเท่ากับ Nq และจะได้ว่า กระแสไฟฟ้า I มีค่าดังนี้

$$I = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{Nq}{\Delta t}$$

จากสมการ จะได้ว่าหน่วยของกระแสไฟฟ้าคือ คูลอมบ์ต่อวินาที หรือ **แอมแปร์** (ampere) แทนด้วยสัญลักษณ์ A



รูป 14.6 การเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าผ่านพื้นที่หน้าตัดของตัวนำชนิดหนึ่ง

ความรู้เพิ่มเติม

Andre Marie Ampere (ค.ศ. 1775–1836 หรือ พ.ศ. 2318–2379) เป็นนักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศส มีผลงานทางไฟฟ้าและแม่เหล็กหลายเรื่อง เช่น ค้นพบความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าในตัวนำ และสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น และพบกฎบางกฎที่เกี่ยวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

รูป อองเตร-มารี แอมแปร์

ในการกำหนดทิศทางของกระแสไฟฟ้า ได้มีการกำหนดให้ **กระแสไฟฟ้าในตัวนำมีทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้า ซึ่งเป็นทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน** ทั้งนี้ เนื่องจาก ในอดีต ช่วงที่เริ่มมีการศึกษาเกี่ยวกับกระแสไฟฟ้า นักวิทยาศาสตร์ได้กำหนดให้**กระแสไฟฟ้ามีทิศทางจากตำแหน่งที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงไปยังตำแหน่งที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำ** ซึ่งเป็นทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าบวก หรือ ทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้า ถึงแม้ว่า ภายหลังจะพบว่า กระแสไฟฟ้าในตัวนำโลหะจะเกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าลบ แต่การกำหนดทิศทางของกระแสไฟฟ้าดังกล่าวยังคงยึดตามแบบที่กำหนดไว้เดิม

ข้อสังเกต

การที่กระแสไฟฟ้ามีทิศทาง มิได้หมายความว่า กระแสไฟฟ้าเป็นปริมาณเวกเตอร์ แต่กำหนดขึ้นเพื่อให้สะดวกในการบอกทิศทางการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้า

ตัวอย่าง 14.1 โทรศัพท์เคลื่อนที่รุ่นหนึ่งสามารถใช้งานเป็นเวลา 5 ชั่วโมง เมื่อมีกระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ผ่าน 200 mA จงคำนวณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านโทรศัพท์เครื่องนี้ ในช่วงเวลาดังกล่าว

แนวคิด คำนวณประจุไฟฟ้าที่ผ่านโทรศัพท์เคลื่อนที่จากสมการ $I = \frac{Q}{\Delta t}$

วิธีทำ เปลี่ยนชั่วโมงเป็นวินาทีจะได้

$$\begin{aligned}\Delta t &= 5\,\text{h} \times 60\,\text{min} \times 60\,\text{s} \\ &= 1.8 \times 10^{4}\,\text{s}\end{aligned}$$

แทนค่าลงในสมการ

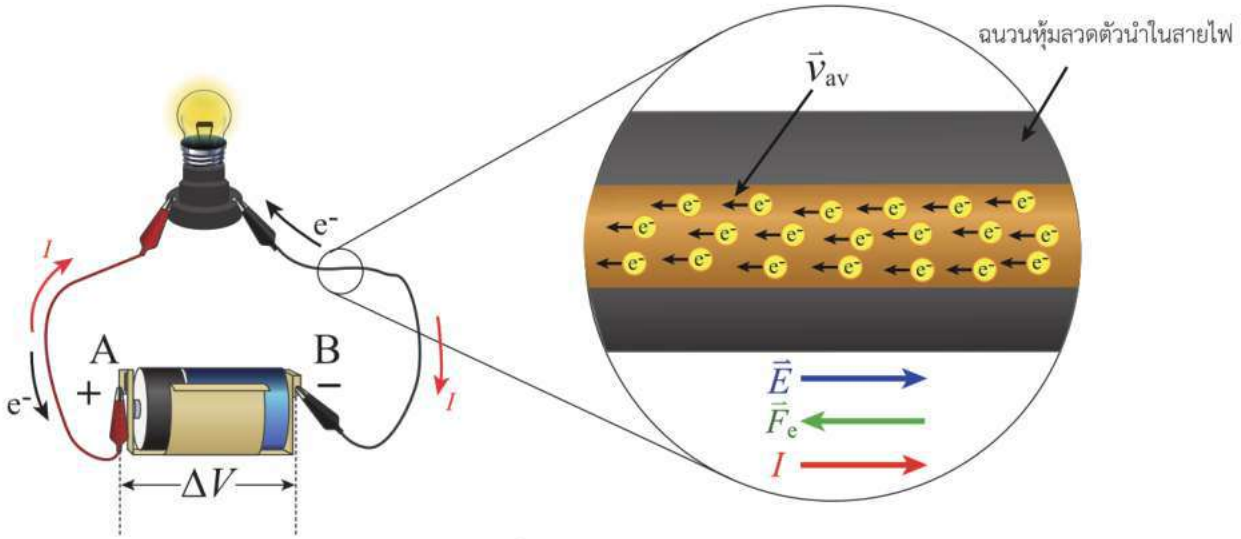
$$\begin{aligned}Q &= I\Delta t \\ &= (200 \times 10^{-3}\,\text{A}) \times (1.8 \times 10^{4}\,\text{s}) \\ &= 3\,600\ \text{C}\end{aligned}$$

ตอบ มีประจุไฟฟ้าผ่านโทรศัพท์เคลื่อนที่ 3 600 คูลอมบ์

14.1.2 กระแสไฟฟ้าในลวดตัวนำ

ในกรณีที่ตัวนำไฟฟ้าเป็นโลหะและมีลักษณะเป็นเส้นทรงกระบอกยาว เราเรียกตัวนำดังกล่าวว่า ลวดตัวนำ เช่น ลวดทองแดงในสายไฟที่ใช้ในวงจรไฟฟ้าตามอาคารบ้านเรือน การเกิดกระแสไฟฟ้าและการหาค่าของกระแสไฟฟ้าในลวดตัวนำ พิจารณาได้ดังนี้

เมื่อนำสายไฟที่ภายในมีลวดตัวนำมาต่อเข้ากับแบตเตอรี่และหลอดไฟ ดังรูป 14.7 จะทำให้เกิดความต่างศักย์ (ΔV) ระหว่างปลายของลวดตัวนำด้านที่ต่อกับขั้วบวก กับปลายที่ต่อกับขั้วลบของแบตเตอรี่ กำหนดให้เป็นจุด A และ B ตามลำดับ ความต่างศักย์ระหว่างปลายทั้งสองทำให้เกิดสนามไฟฟ้า $\vec{E}$ ภายในลวดตัวนำ ทำให้มีแรงไฟฟ้ากระทำต่ออิเล็กตรอน $\vec{F}_e$ ในทิศทางตรงข้ามกับสนามไฟฟ้า และทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเฉลี่ย $\vec{v}_{av}$ ไม่เป็นศูนย์จาก B ไป A เกิดเป็น**กระแสอิเล็กตรอน** (electron current) ดังรูป 14.7 **ซึ่งมีทิศทางการเคลื่อนที่ตรงข้ามกับทิศทางของกระแสไฟฟ้าในลวดตัวนำ**

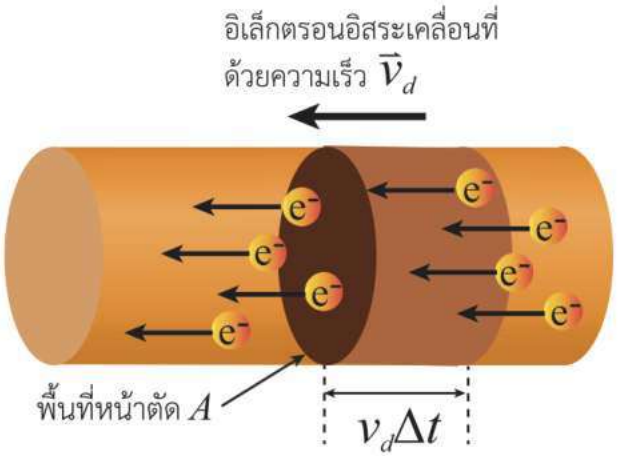


รูป 14.7 กระแสอิเล็กตรอนและกระแสไฟฟ้าในลวดตัวนำ

ชวนคิด

เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในลวดตัวนำแล้วทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า จำนวนอิเล็กตรอนในลวดตัวนำจะลดลงหรือไม่

ความเร็วเฉลี่ยของอิเล็กตรอนอิสระ ($\vec{v}_{av}$) ที่เคลื่อนที่ในลวดตัวนำเนื่องจากสนามไฟฟ้า $\vec{E}$ (หรือความเร็วเฉลี่ยของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ในตัวนำไฟฟ้าเนื่องจากสนามไฟฟ้า) มีชื่อเรียกเฉพาะว่า **ความเร็วลอยเลื่อน** (drift velocity) แทนด้วยสัญลักษณ์ $\vec{v}_d$ ดังนั้น จากรูป 14.8 ในช่วงเวลา Δt สามารถพิจารณาได้ว่าแต่ละอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้เป็นระยะ $v_d \Delta t$



รูป 14.8 อิเล็กตรอนอิสระเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำ

ถ้ากำหนดให้ n เป็นจำนวนอิเล็กตรอนอิสระต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร จะได้ว่า ในช่วงเวลา Δt จำนวนอิเล็กตรอนอิสระที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หน้าตัด A ของตัวนำไฟฟ้าทั้งหมด คือจำนวนอิเล็กตรอนในลวดตัวนำที่มีปริมาตรเท่ากับ $(v_d \Delta t)A$ ดังนั้น จะมีจำนวนอิเล็กตรอนเท่ากับ $n(v_d \Delta t)A$

เนื่องจากอิเล็กตรอนแต่ละตัวมีประจุ e ดังนั้น ประจุไฟฟ้าทั้งหมด Q ที่ผ่านพื้นที่หน้าตัด A ในช่วงเวลาดังกล่าวจึงเท่ากับ

$$Q = en(v_d \Delta t)A$$

จาก $I = \frac{Q}{\Delta t}$ แทนค่า Q จะได้

$$I = \frac{nev_d \Delta tA}{\Delta t}$$

$$I = nev_d A \qquad (14.1)$$

นั่นคือ กระแสไฟฟ้าในลวดตัวนำ ขึ้นกับความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระในตัวนำ (n) ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน (e) ความเร็วลอยเลื่อนของอิเล็กตรอน (v_d) และ พื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำ (A)

ข้อสังเกต

ขณะมีกระแสไฟฟ้าในลวดตัวนำ ทุก ๆ ตำแหน่งบนลวดตัวนำ กระแสไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากัน แม้ว่าขนาดของลวดตัวนำจะไม่สม่ำเสมอก็ตาม

ความรู้เพิ่มเติม

สำหรับวัสดุแต่ละชนิด ค่า n หรือจำนวนอิเล็กตรอนต่อปริมาตร มีค่าแตกต่างกันไป ดังแสดงตัวอย่างในตาราง 14.1

ตาราง 14.1 จำนวนอิเล็กตรอนอิสระต่อปริมาตรของโลหะแต่ละชนิด

ชนิดของโลหะ	จำนวนอิเล็กตรอนอิสระต่อลูกบาศก์เมตร
ทองแดง	8.47×10^{28}
เงิน	5.86×10^{28}
ทอง	5.90×10^{28}
เหล็ก	17.0×10^{28}
สังกะสี	13.2×10^{28}
อะลูมิเนียม	18.1×10^{28}
ตะกั่ว	13.2×10^{28}

การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนด้วยความเร็วลอยเลื่อนในลวดตัวนำ เร็วหรือช้ากว่าการเคลื่อนที่ของวัตถุทั่วไปในชีวิตประจำวัน พิจารณาได้จากตัวอย่าง 14.2

ตัวอย่าง 14.2 ขณะมีกระแสไฟฟ้า 1.0 แอมแปร์ผ่านลวดทองแดงเส้นหนึ่งมีพื้นที่หน้าตัด 1.0 ตารางมิลลิเมตร อิเล็กตรอนอิสระมีขนาดของความเร็วลอยเลื่อนเป็นเท่าใด กำหนดให้ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอนอิสระเท่ากับ 1.6×10^{-19} คูลอมบ์ และทองแดงมีอิเล็กตรอนอิสระ 8.4×10^{28} ต่อลูกบาศก์เมตร

แนวคิด หาขนาดความเร็วลอยเลื่อน จากสมการ $I = nev_dA$

วิธีทำ จัดรูปสมการ $I = nev_dA$ และแทนค่า $I = 1.0\ \text{A}$, $n = 8.4\times10^{28}\ \text{m}^{-3}$,

$e = 1.6\times10^{-19}\ \text{C}$ และ $A = 1.0\times10^{-6}\ \text{m}^2$

จะได้

$$v_d = \frac{1.0\ \text{A}}{(8.4\times10^{28}\ \text{m}^{-3})(1.6\times10^{-19}\ \text{C})(1.0\times10^{-6}\ \text{m}^2)}$$

$$= 0.0738\times10^{-3}\ \text{m/s}$$

$$= 7.4\times10^{-5}\ \text{m/s}$$

ตอบ ขนาดความเร็วลอยเลื่อนของอิเล็กตรอนในเส้นลวดนี้เท่ากับ 7.4×10^{-5} เมตรต่อวินาที หรือ 0.074 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่าง 14.2 เป็นตัวอย่างของสถานการณ์หนึ่งในชีวิตประจำวัน ซึ่งจะเห็นว่า ขนาดของความเร็วลอยเลื่อนของอิเล็กตรอน มีค่าประมาณ

$$7.4\times10^{-5}\ \text{m/s}\times\frac{3600\ \text{s}}{1\ \text{h}}=27\ \text{cm/h}$$

ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการเคลื่อนที่ของวัตถุต่าง ๆ ในชีวิตประจำวัน จะพบว่าเป็นความเร็วที่ช้ากว่าปกติมาก และถึงแม้ว่าขนาดของกระแสไฟฟ้าจะมากขึ้นถึง 10 แอมแปร์ หรือ ขนาดของพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำจะลดลงอีกสองเท่า อิเล็กตรอนอิสระที่เคลื่อนที่ในสายไฟจะยังคงมีความเร็วลอยเลื่อนไม่มากเกิน 10 เมตรต่อชั่วโมง ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ที่ช้ากว่าหอยทากซึ่งมีอัตราเร็วเฉลี่ย 46.8 เมตรต่อชั่วโมง เสียอีก (ข้อมูลจาก The World Almanac and Book of Facts 1999)

ชวนคิด

ขณะมีกระแสไฟฟ้าในสายไฟ อิเล็กตรอนในสายไฟมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วลอยเลื่อน ซึ่งค่อนข้างช้ามากเมื่อเทียบกับการเคลื่อนที่ของวัตถุต่าง ๆ ทั่วไปในชีวิตประจำวัน เหตุใดเมื่อเปิดสวิตช์แล้ว หลอดไฟซึ่งอยู่ไกลจากสวิตช์จึงสว่างทันที

จากที่ได้กล่าวมาแล้ว ในการทำความเข้าใจเบื้องต้นเกี่ยวกับกระแสไฟฟ้า จะพิจารณากระแสไฟฟ้าที่ได้จากแบตเตอรี่เป็นส่วนใหญ่ ดังนั้น กระแสไฟฟ้าที่ศึกษาในบทนี้ จึงเป็นชนิดของกระแสไฟฟ้าที่ได้จากแบตเตอรี่เรียกว่า **ไฟฟ้ากระแสตรง** (direct current หรือ DC) ซึ่งมีทิศทางเดิมตลอดวงจร แตกต่างจากกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในบ้านเรือนทั่วไปที่เป็น**ไฟฟ้ากระแสสลับ** (alternating current หรือ AC) ซึ่งมีทิศทางของกระแสไฟฟ้ากลับไปกลับมา และเป็นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังนั้น ในบทนี้เมื่อกล่าวถึงวงจรไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า จึงหมายถึง **วงจรไฟฟ้ากระแสตรง** (direct-current circuit) และกระแสไฟฟ้าที่เป็นไฟฟ้ากระแสตรงเท่านั้น

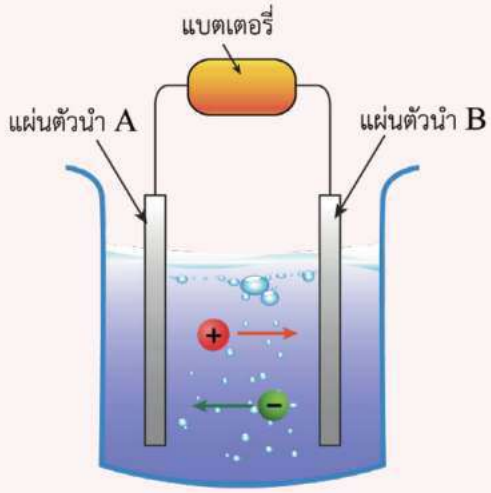
ความรู้เพิ่มเติม

การนำอุปกรณ์ที่ใช้กับไฟฟ้ากระแสตรง เช่น โทรศัพท์เคลื่อนที่ หรือ คอมพิวเตอร์ มาใช้กับไฟฟ้ากระแสสลับภายในบ้านจะต้องมีอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนชนิดของกระแสไฟฟ้าเสียก่อน ไม่เช่นนั้นจะเกิดความเสียหายกับอุปกรณ์ได้ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ดังกล่าวเรียกว่า เช่น ตัวปรับต่อ หรือ อะแดปเตอร์ (adapter)

รูป ตัวอย่างอะแดปเตอร์ของโทรศัพท์เคลื่อนที่รุ่นหนึ่ง

คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 14.1

1. อะไรเป็นสาเหตุทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าในตัวนำไฟฟ้า
2. กระแสไฟฟ้าในตัวนำโลหะเกิดจากการเคลื่อนที่ของอะไร
3. จากรูปการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าบวกและลบในสารละลายนำไฟฟ้าที่ต่อกับแบตเตอรี่ด้วยสายไฟ ให้ตอบคำถามต่อไปนี้
   ก. แผ่นตัวนำใดมีศักย์ไฟฟ้าสูง
   ข. กระแสไฟฟ้าในสารละลายมีทิศทางจากแผ่นตัวนำใดไปแผ่นตัวนำใด
   ค. อิเล็กตรอนอิสระในสายไฟมีทิศทางจากสายไฟที่ต่อกับแผ่นตัวนำใดไปแผ่นตัวนำใด
4. ความเร็วลอยเลื่อนคืออะไร มีค่ามากหรือน้อยเมื่อเทียบกับการเคลื่อนของวัตถุทั่ว ๆ ไปในชีวิตประจำวัน



รูป ประกอบคำถามตรวจสอบความเข้าใจ 14.1 ข้อ 3

แบบฝึกหัด 14.1

1. ลวดตัวนำมีพื้นที่หน้าตัด 3 ตารางมิลลิเมตร ถ้าอิเล็กตรอนอิสระในลวดตัวนำเคลื่อนที่จนกระทั่งทำให้มีประจุไฟฟ้าลัพธ์ขนาด 0.05 คูลอมบ์ผ่านพื้นที่หน้าตัดในเวลา 10 วินาที จะมีกระแสไฟฟ้าในลวดตัวนำขนาดเท่าใด
2. ลวดตัวนำมีพื้นที่หน้าตัด 1.0 ตารางมิลลิเมตร มีกระแสไฟฟ้า 0.5 แอมแปร์ โดยโลหะที่ใช้ทำลวดตัวนำนี้มีจำนวนอิเล็กตรอนอิสระ 4.0×10^{28} ต่อลูกบาศก์เมตร จงหาความเร็วลอยเลื่อนของอิเล็กตรอนอิสระ
3. ถ้ามีกระแสไฟฟ้า 1.25 แอมแปร์ ในเส้นลวดโลหะเส้นหนึ่ง ประจุไฟฟ้าทั้งหมดที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดโลหะเส้นนั้นในเวลา 5.0 นาที จะมีค่าเท่าใด

14.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์

สำหรับวงจรไฟฟ้ากระแสตรงที่มีแบตเตอรี่ต่ออยู่กับหลอดไฟ เมื่อเพิ่มหรือลดจำนวนแบตเตอรี่ เช่น เพิ่มจำนวนแบตเตอรี่จาก 2 เป็น 3 ก้อน หรือ ลดจำนวนแบตเตอรี่จาก 2 เป็น 1 ก้อน เราจะพบว่า หลอดไฟให้ความสว่างแตกต่างไปจากเดิม แสดงว่า กระแสไฟฟ้าที่ผ่านสายไฟและหลอดไฟมีการเปลี่ยนแปลง นอกจากนี้ ถ้าลองเปลี่ยนจากการใช้สายไฟต่อระหว่างหลอดไฟกับแบตเตอรี่เป็นวัสดุต่าง ๆ เช่น อะลูมิเนียม ทองแดง เหล็ก หรือ สังกะสี จะพบว่า กระแสไฟฟ้าที่ผ่านหลอดไฟแตกต่างไปจากเดิมเช่นกัน

จำนวนแบตเตอรี่มีความสัมพันธ์อย่างไรกับกระแสไฟฟ้าที่ผ่านลวดตัวนำ และเพราะเหตุใด ชนิดของวัสดุที่ใช้เป็นตัวนำจึงส่งผลกับกระแสไฟฟ้าในวงจร ศึกษาได้ต่อไปนี้

14.2.1 กฎของโอห์มและความต้านทาน

แบตเตอรี่เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่ทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างปลายของลวดตัวนำในสายไฟ การเพิ่มหรือลดจำนวนแบตเตอรี่ในวงจรไฟฟ้าทำให้ความต่างศักย์ระหว่างปลายของลวดตัวนำเปลี่ยนไป การเปลี่ยนแปลงนี้มีความสัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้าที่ผ่านลวดตัวนำอย่างไร ศึกษาได้จากกิจกรรมต่อไปนี้

กิจกรรม 14.1 การทดลองเรื่องกฎของโอห์ม

จุดประสงค์

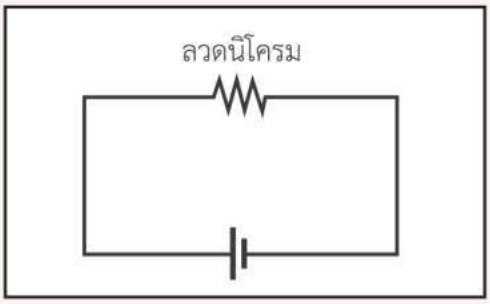
เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ผ่านลวดตัวนำกับความต่างศักย์ระหว่างปลายของลวดตัวนำ

วัสดุและอุปกรณ์

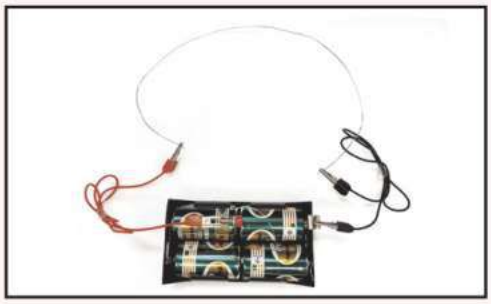
1. แบตเตอรี่ขนาด 1.5 V 4 ก้อน พร้อมกระบะ	1 ชุด
2. แอมมิเตอร์	1 เครื่อง
3. สายไฟพร้อมปากหนีบ	4 เส้น
4. โวลต์มิเตอร์	1 เครื่อง
5. ลวดนิโครมยาวประมาณ 50 เซนติเมตร (หรือตัวต้านทานขนาด 8-15 โอห์ม)	1 เส้น

วิธีทำกิจกรรม

1. จัดให้แผ่นโลหะในกระบะแบตเตอรี่อยู่ในตำแหน่งของแบตเตอรี่ 1 ก้อน จากนั้นต่อแบตเตอรี่ 1 ก้อนกับลวดนิโครม ดังวงจรในรูป ก. ซึ่งแสดงการต่ออุปกรณ์ได้ดังรูป ข.

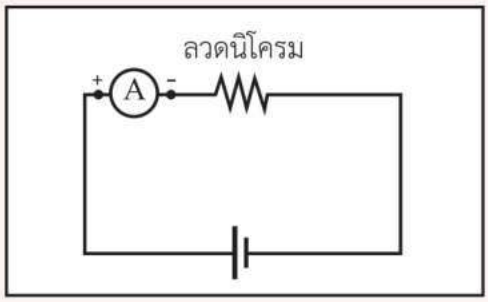


ก.



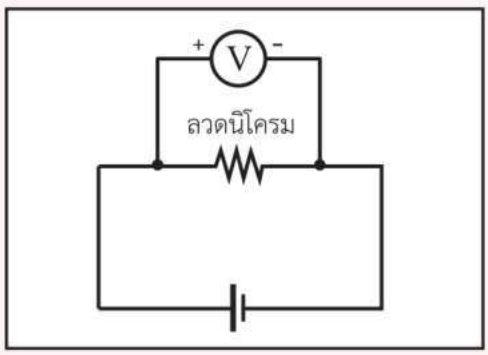
ข.

2. ต่อแอมมิเตอร์เข้ากับวงจร เพื่อวัดกระแสไฟฟ้าในวงจร ดังวงจรในรูป ค. ซึ่งแสดงการต่ออุปกรณ์ได้ดังรูป ง. อ่านและบันทึกกระแสไฟฟ้า จากนั้นปลดแอมมิเตอร์แล้วต่อโวลต์มิเตอร์เพื่อวัดความต่างศักย์ระหว่างปลายของลวดนิโครม ดังวงจรในรูป จ. ซึ่งแสดงการต่ออุปกรณ์ได้ดังรูป ฉ. อ่านและบันทึกความต่างศักย์

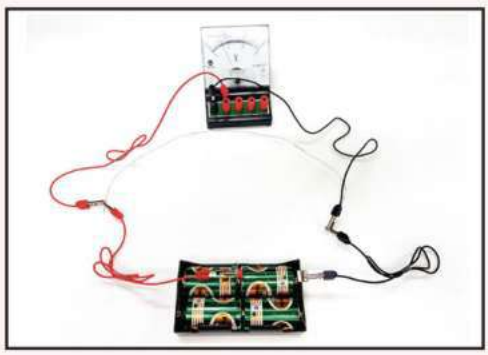


ค.

ง.



จ.



ฉ.

รูป วงจรและการต่ออุปกรณ์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์

3. ทดลองซ้ำข้อ 1. และ 2. โดยเปลี่ยนตำแหน่งแผ่นโลหะในกระบะไปที่ตำแหน่งของแบตเตอรี่ 2, 3 และ 4 ก้อน ตามลำดับ
4. นำข้อมูลที่ได้ไปเขียนกราฟ โดยให้กระแสไฟฟ้าอยู่บนแกนตั้ง และความต่างศักย์อยู่บนแกนนอน

คำถามท้ายกิจกรรม

- ☐ กราฟระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์มีลักษณะอย่างไร
- ☐ จากกราฟที่ได้ กระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์มีความสัมพันธ์กันอย่างไร

จากกิจกรรม 14.1 จะเห็นได้ว่ากราฟระหว่างกระแสไฟฟ้าในลวดนิโครมกับความต่างศักย์ระหว่างปลายของลวดนิโครม มีลักษณะเป็นเส้นตรงผ่านจุดกำเนิด จึงสรุปได้ว่า กระแสไฟฟ้าที่ผ่านลวดนิโครม (I) แปรผันโดยตรงกับความต่างศักย์ระหว่างปลายของลวดนิโครม (ΔV) เขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$I \propto \Delta V$$

ถ้าให้ k เป็นค่าคงตัวของการแปรผัน

จะได้ $$I = k\Delta V$$

และถ้าให้ R เป็นค่าคงตัวอีกค่าหนึ่ง โดยที่ $$k = \frac{1}{R}$$

จะได้ $$I = (\frac{1}{R})\Delta V \qquad (14.2)$$

ค่าคงตัว R นี้เรียกว่า **ความต้านทาน** (resistance) ของลวดนิโครมที่ใช้ในการทำกิจกรรม ความต้านทานมีหน่วย โวลต์ต่อแอมแปร์ (V/A) หรือเรียกว่า **โอห์ม** (ohm) แทนด้วยสัญลักษณ์ Ω

ความรู้เพิ่มเติม

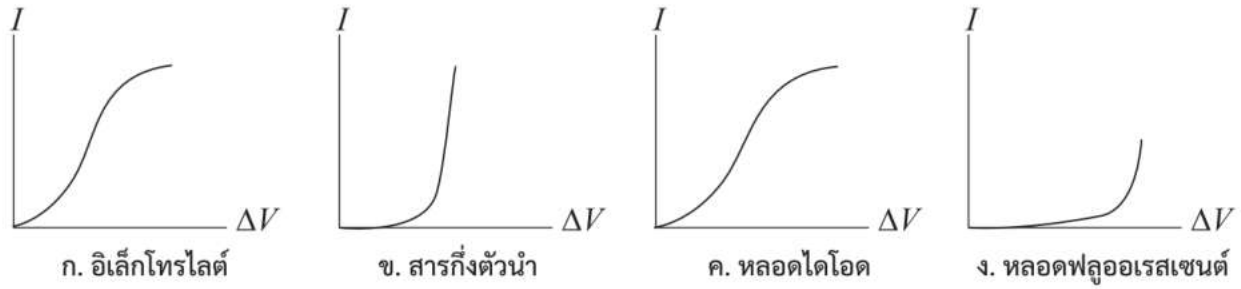
Georg Simon Ohm (ค.ศ. 1787 –1854 หรือ พ.ศ. 2330 –2397) นักฟิสิกส์ชาวเยอรมันที่เคยเป็นครูสอนระดับมัธยมปลายมาก่อน เขาเสนอแนวคิดเกี่ยวกับความต้านทาน จากการค้นพบความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ ซึ่งถือว่าเป็นกฎพื้นฐานสำคัญของไฟฟ้ากระแส

รูป เกออร์ก ซีมอน โอห์ม

โอห์มได้ค้นพบความสัมพันธ์ตามสมการ (14.2) เมื่อ ค.ศ. 1826 (พ.ศ. 2369) ความสัมพันธ์นี้เรียก **กฎของโอห์ม** (Ohm's law) มีใจความสำคัญว่า **เมื่ออุณหภูมิคงตัว กระแสไฟฟ้าในตัวนำโลหะจะแปรผันตรงกับความต่างศักย์ระหว่างปลายของตัวนำนั้น**

ภายหลังการค้นพบของโอห์ม ได้มีการศึกษาการนำไฟฟ้าโดยใช้ตัวนำไฟฟ้าชนิดอื่น ที่ไม่ใช่โลหะ เช่น อิเล็กโทรไลต์ สารกึ่งตัวนำ รวมทั้ง ได้ทดสอบกับอุปกรณ์ไฟฟ้าบางชนิด เช่น หลอดไดโอด

หลอดฟลูออเรสเซนต์ ซึ่งพบว่า ถึงแม้อุณหภูมิจะคงตัว กราฟความสัมพันธ์ ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์ที่ได้ไม่เป็นเส้นตรง ดังรูป 14.9



ก. อิเล็กโทรไลต์ ข. สารกึ่งตัวนำ ค. หลอดไดโอด ง. หลอดฟลูออเรสเซนต์

รูป 14.9 กราฟระหว่างกระแสไฟฟ้า (I) กับความต่างศักย์ (ΔV)

ดังนั้น ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์เป็นไปตามกฎของโอห์มเฉพาะตัวนำและอุปกรณ์บางชนิดเท่านั้น

ตัวอย่าง 14.3 ลวดตัวนำโลหะเส้นหนึ่ง ต่อกับแบตเตอรี่ที่ให้ความต่างศักย์ระหว่างปลายเท่ากับ 12 โวลต์ วัดกระแสไฟฟ้าที่ผ่านลวดตัวนำนี้ได้ 2.4 แอมแปร์ หากเพิ่มความต่างศักย์ระหว่างปลายเป็น 18 โวลต์ จะวัดกระแสไฟฟ้าที่ผ่านลวดตัวนำนี้ได้เท่าใด กำหนดให้อุณหภูมิของลวดตัวนำคงตัว

แนวคิด ที่อุณหภูมิคงตัว ความต้านทานของโลหะมีค่าคงตัวและเป็นไปตามกฎของโอห์ม ดังนั้น หาความต้านทานของลวดตัวนำโดยใช้กฎของโอห์ม จากนั้น หากระแสไฟฟ้าจากความต้านทานที่คำนวณได้และความต่างศักย์ที่เปลี่ยนไป

วิธีทำ จากกฎของโอห์ม $I = (\frac{1}{R})\Delta V$

จัดรูปใหม่ จะได้ $R = \frac{\Delta V}{I}$

แทนค่าจากการวัดครั้งแรก $\Delta V = 12\,\text{V}, I = 2.4\,\text{A}$

จะได้ $R = \frac{12\,\text{V}}{2.4\,\text{A}}$

$= 5\Omega$

จากสมการตามกฎของโอห์ม หากระแสไฟฟ้าโดยแทนความต่างศักย์ที่เพิ่มเป็น $\Delta V = 18\,\text{V}$ และความต้านทานซึ่งมีค่าคงตัวคือ $R = 5\Omega$

จะได้ $I = \frac{1}{5\Omega}18\,\text{V}$

$= 3.6\,\text{A}$

ตอบ จะวัดกระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำได้เท่ากับ 3.6 แอมแปร์

14.2.2 สภาพต้านทานไฟฟ้าและสภาพนำไฟฟ้า

เมื่อนำลวดตัวนำที่ทำจากโลหะชนิดเดียวกันและมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากันแต่มีความยาวต่างกัน มาต่อกับแบตเตอรี่แล้ววัดกระแสไฟฟ้าที่ผ่านลวดตัวนำทีละเส้น จะพบว่า กระแสไฟฟ้า I ที่วัดได้จะยิ่งมีค่าน้อย เมื่อลวดตัวนำมีความยาว ℓ มากขึ้น เขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ว่า

$$I \propto \frac{1}{\ell}$$

จากสมการที่ใช้ในการหากระแสไฟฟ้าในลวดตัวนำ $I = nev_dA$ เราสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำได้ว่า

$$I \propto A$$

จึงได้ $$I \propto \frac{A}{\ell}$$

จากกฎของโอห์ม $$I \propto \Delta V$$

ดังนั้น $$I \propto \frac{A}{\ell}\Delta V$$

ถ้าให้ค่าคงตัวของการแปรผันนี้เป็น σ

จะได้ว่า $$I = \sigma\frac{A}{\ell}\Delta V$$

จากความสัมพันธ์ข้างต้น ถ้าเราเปลี่ยนชนิดของลวดตัวนำ เป็นลวดตัวนำที่ทำจากสารชนิดอื่น โดยที่ให้ปริมาณอื่น ๆ ยังมีค่าคงตัว จะพบว่า กระแสไฟฟ้าที่ผ่านลวดตัวนำจะมีค่าเปลี่ยนไป กล่าวคือ สำหรับตัวนำที่ทำจากสารต่างกัน σ จะมีค่าต่างกัน กล่าวคือ σ เป็นสมบัติเฉพาะของสารชนิดต่าง ๆ ค่าคงตัว σ นี้เรียกว่า **สภาพนำไฟฟ้า** (electrical conductivity) มีหน่วย (โอห์ม เมตร)$^{-1}$ หรือ $(\Omega\ \text{m})^{-1}$

ด้วยเหตุนี้ เมื่อใช้สารต่างชนิดกันเป็นตัวนำในวงจรไฟฟ้า จะพบว่า กระแสไฟฟ้าที่ผ่านตัวนำมีค่าแตกต่างกัน

เมื่อเปรียบเทียบสมการตามกฎของโอห์ม $I = (\frac{1}{R})\Delta V$ กับสมการ $I = \sigma\frac{A}{\ell}\Delta V$ จะได้ว่า

$$(\frac{1}{R})\Delta V = \sigma\frac{A}{\ell}\Delta V$$

ซึ่งจัดรูปใหม่ได้เป็น $$R = \frac{1}{\sigma}(\frac{\ell}{A})$$

ถ้าให้ $\frac{1}{\sigma} = \rho$ โดย ρ เป็นค่าคงตัวอีกค่าหนึ่ง

จะได้ $$R = \rho(\frac{\ell}{A}) \qquad (14.3)$$

ค่าคงตัว ρ ที่เป็นส่วนกลับของสภาพนำไฟฟ้านี้เรียกว่า **สภาพต้านทานไฟฟ้า** (electrical resistivity) มีหน่วย โอห์ม เมตร หรือ Ω m ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะของสารชนิดต่าง ๆ เช่นเดียวกัน ตาราง 14.2 แสดงสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารบางชนิด

ตาราง 14.2 สภาพต้านทานไฟฟ้าของสารบางชนิด

สาร	สภาพต้านทานไฟฟ้า (Ω m) ที่อุณหภูมิ 20°C
เงิน	1.59×10^{-8}
ทองแดง	1.72×10^{-8}
ทอง	2.44×10^{-8}
อะลูมิเนียม	2.65×10^{-8}
เหล็ก	9.71×10^{-8}
ตะกั่ว	2.20×10^{-7}

ดังนั้น จากความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานและความต้านทานตามสมการ (14.3) จึงกล่าวได้ว่า สำหรับลวดตัวนำที่ทำจากสารชนิดเดียวกัน สภาพต้านทานของลวดตัวนำจะมีค่าเท่ากัน แต่ความต้านทานอาจมีค่าแตกต่างกันได้ ขึ้นอยู่กับความยาวและพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำนั้น

ตัวอย่าง 14.4 ลวดโลหะเส้นหนึ่งยาว 1.00 เมตร มีพื้นที่หน้าตัด 0.10 ตารางมิลลิเมตร และความต้านทาน 0.10 โอห์ม ลวดเส้นนี้มีสภาพต้านทานเท่าใด

แนวคิด หาสภาพต้านทานโดยใช้สมการ (14.3) $R = \rho(\frac{\ell}{A})$

วิธีทำ จัดรูปสมการ (14.3) จะได้ $\rho = \frac{RA}{\ell}$

แทนค่า $\ell = 1.00$ m, $A = 0.10\times10^{-6}$ m^2 และ $R = 0.10\ \Omega$

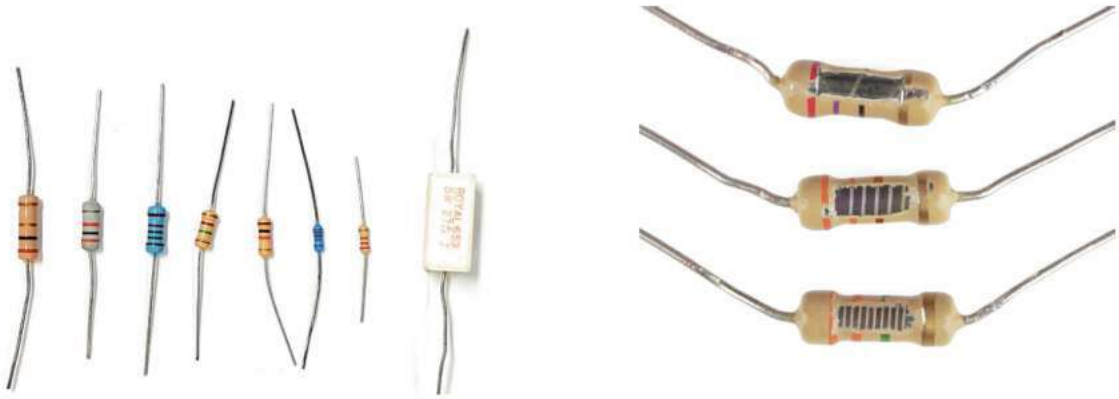
$$\rho = \frac{(0.10\ \Omega)(0.10\times10^{-6}\ \text{m}^2)}{1.00\ \text{m}}$$

$$= 1.0\times10^{-8}\ \Omega\ \text{m}$$

ตอบ ลวดโลหะเส้นนี้มีสภาพต้านทาน 1.0×10^{-8} โอห์ม เมตร

14.2.3 ตัวต้านทาน

ในการออกแบบและพัฒนาวงจรไฟฟ้า ได้มีการประดิษฐ์ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความต้านทาน เรียกว่า **ตัวต้านทาน** (resistor) เพื่อควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ในวงจรไฟฟ้าให้พอเหมาะกับการใช้งานต่าง ๆ โดยตัวต้านทานที่ใช้ในวงจรส่วนใหญ่ เป็นชนิดที่เรียกว่า **ตัวต้านทานค่าคงตัว** (fixed resistor) ซึ่งมักทำมาจากฟิล์มคาร์บอน ฟิล์มโลหะ หรือ ฟิล์มออกไซด์ของโลหะ พันเอาไว้เป็นเกลียว และหุ้มด้วยฉนวนไฟฟ้าอีกชั้นหนึ่ง ตัวอย่างตัวต้านทานค่าคงตัวขนาดต่าง ๆ ดังรูป 14.10 ก. ซึ่งเมื่อขูดผิวออก ภายในจะมีลักษณะดังรูป 14.10 ข.



ก. ข.

รูป 14.10 ก. ตัวอย่างตัวต้านทานค่าคงตัวขนาดต่าง ๆ ข. ลักษณะภายในของตัวต้านทานค่าคงตัว

ในวงจรไฟฟ้า ตัวต้านทานแทนด้วยสัญลักษณ์ดังรูป 14.11 ก. หรือ 14.11 ข.

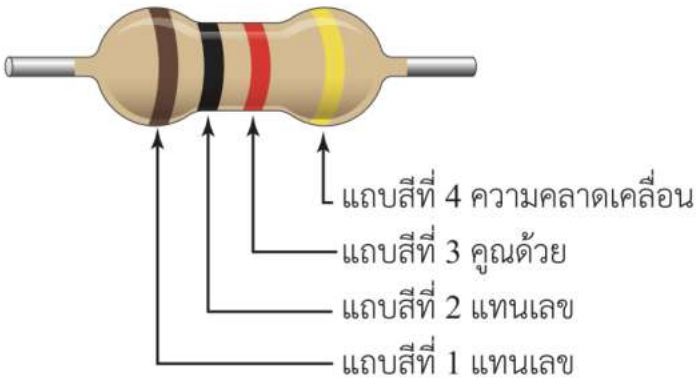
ก. ข.

รูป 14.11 สัญลักษณ์ตัวต้านทานในวงจรไฟฟ้า

ในการบอกความต้านทานของตัวต้านทานค่าคงตัว จะบอกโดยการอ่านแถบสีที่อยู่บนตัวต้านทาน ซึ่งส่วนใหญ่ จะมีแถบสี 4 แถบ ดังรูป 14.12

วิธีการอ่านความต้านทานให้อ่านจากรหัสสีดังตาราง 14.3 โดยแถบสีที่ 1 และแถบสีที่ 2 บอกตัวเลขที่หนึ่งและตัวเลขที่สอง แถบสีที่ 3 บอกตัวเลขพหุคูณ และแถบสีที่ 4 เป็นแถบแสดงความคลาดเคลื่อนเป็นร้อยละ อาจแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{ความต้านทาน} = \left[(\text{เลขแถบสีที่ 1}\ \text{เลขแถบสีที่ 2}) \times 10^{\text{เลขแถบสีที่ 3}}\right] \pm \text{เลขแถบสีที่ 4}$$



รูป 14.12 ความหมายของแถบสีบนตัวต้านทานค่าคงตัว

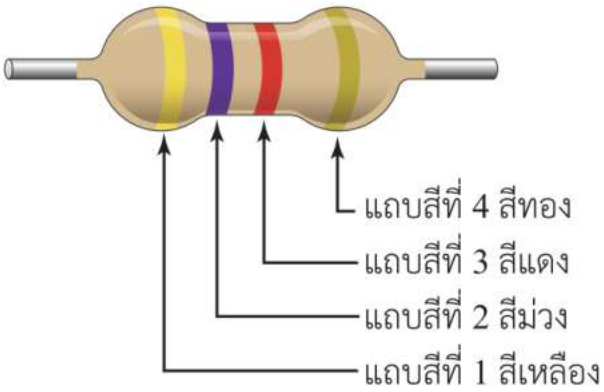
ตาราง 14.3 รหัสสีของแถบสีบนตัวต้านทาน

แถบสี	แถบสีที่ 1 ตัวตั้งหลักที่ 1	แถบสีที่ 2 ตัวตั้งหลักที่ 2	แถบสีที่ 3 ตัวคูณ	แถบสีที่ 4 ความคลาดเคลื่อน
ดำ	0	0	10^0	-
น้ำตาล	1	1	10^1	$\pm$ 1%(F)
แดง	2	2	10^2	$\pm$ 2%(G)
ส้ม	3	3	10^3	-
เหลือง	4	4	10^4	-
เขียว	5	5	10^5	$\pm$ 0.5%(D)
น้ำเงิน	6	6	10^6	$\pm$ 0.25%(C)
ม่วง	7	7	10^7	$\pm$ 0.1%(B)
เทา	8	8	10^8	$\pm$ 0.05%(A)
ขาว	9	9	10^9	-
ทอง	-	-	10^{-1}	$\pm$ 5%(J)
เงิน	-	-	10^{-2}	$\pm$ 10%(K)
ไม่มีสี	-	-	-	$\pm$ 20%(M)

ข้อสังเกต

โดยทั่วไป แถบสีที่ 4 ที่บอกความคลาดเคลื่อนบนตัวต้านทานจะแยกห่างจากแถบสีอื่น ๆ มากกว่า และจะมีสีทองหรือสีเงิน ทำให้ผู้ใช้สามารถพิจารณาได้ว่าแถบสีใดเป็นแถบสีที่ 4 หรือแถบสีที่ 1

ตัวอย่าง 14.5 ตัวต้านทานมีแถบสีดังรูปมีความต้านทานเท่าไร



แนวคิด แทนแถบสีต่าง ๆ ด้วยตัวเลขตามรหัสสีในตาราง 14.3 จากนั้น นำไปแทนค่าลงในสมการ

$$\text{ความต้านทาน} = [(\text{เลขแถบสีที่ 1 เลขแถบสีที่ 2}) \times 10^{\text{เลขแถบสีที่ 3}}] \pm \text{เลขแถบสีที่ 4}$$

วิธีทำ แทนค่าแถบที่หนึ่งสีเหลืองด้วยเลข 4 แถบที่สองสีม่วงด้วยเลข 7 แถบที่สามสีแดงด้วยเลข 2 แถบที่สี่สีทองแทนความคลาดเคลื่อนเป็น $\pm 5\%$

จะได้ ความต้านทาน $= 47\times10^{2}\ \Omega\ \pm 5\%$

$= 4.7\times10^{3}\ \Omega\ \pm 5\%$

$= 4.7\ \text{k}\Omega\ \pm 5\%$

ตอบ ตัวต้านทานที่มีแถบสีดังรูป มีความต้านทาน 4.7 กิโลโอห์ม และมีความคลาดเคลื่อน 5%

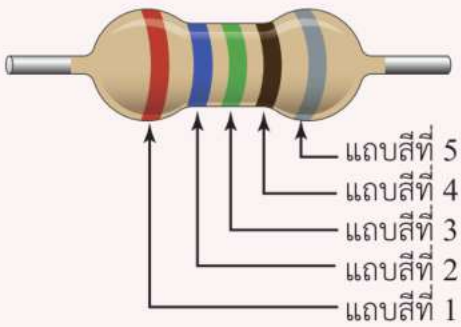
ข้อสังเกต

ตัวต้านทานที่มีความต้านทานเป็น $4.7 \pm 5\%$ กิโลโอห์ม คือตัวต้านทานที่มีความต้านทาน 4.7 ± 0.24 กิโลโอห์ม เนื่องจาก 5% ของ 4.7 กิโลโอห์ม เท่ากับ 0.24 กิโลโอห์ม ซึ่งหมายความว่าตัวต้านทานนี้มีความต้านทานระหว่าง 4.36 กิโลโอห์ม ถึง 4.94 กิโลโอห์ม

ความรู้เพิ่มเติม

สำหรับวงจรไฟฟ้าของเครื่องมือหรืออุปกรณ์ไฟฟ้าบางชนิดที่ต้องการความเที่ยงตรงและความแม่นยำสูง เช่น เครื่องมือวัดทางวิศวกรรม เครื่องมือทางการแพทย์ หรือ เครื่องมือวิเคราะห์ทางวิทยาศาสตร์ จำเป็นต้องใช้ตัวต้านทานค่าคงตัวที่มีค่าความผิดพลาดต่ำ ซึ่งเป็นตัวต้านทานชนิดที่มีแถบสี 5 แถบ ดังรูป

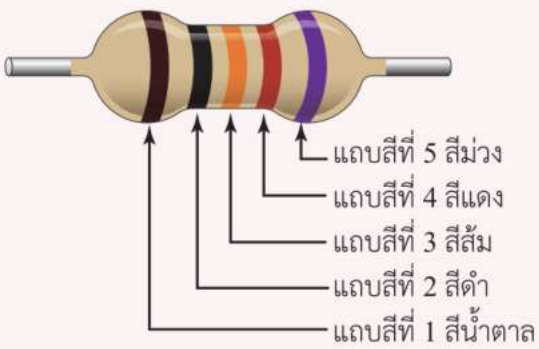
วิธีการอ่านความต้านทานของตัวต้านทานแบบ 5 แถบสีคล้ายกันกับกรณีของตัวต้านทานแบบมีแถบสี 4 แถบ โดยแถบสี 3 แถบแรกแสดงค่าตัวเลขที่เรียงกัน 3 ตัว แถบสีที่ 4 เป็นตัวเลขพหุคูณ และแถบสีที่ 5 เป็นแถบแสดงค่าความคลาดเคลื่อนเป็นร้อยละ โดยอาจแสดงเป็นสมการได้ดังนี้



ค่าความต้านทาน = เลขแถบสีที่ 1 เลขแถบสีที่ 2 เลขแถบสีที่ 3 $\times 10^{\text{เลขแถบสีที่ 4}} \pm$ เลขแถบสีที่ 5

ชวนคิด

ตัวต้านทานมีแถบสีดังรูป มีความต้านทานกี่โอห์ม



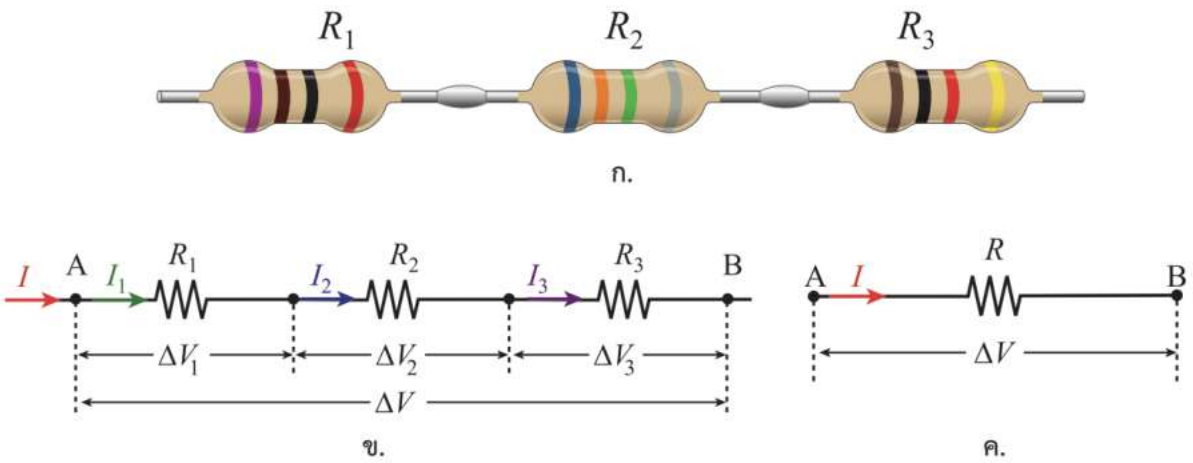
14.2.4 การต่อตัวต้านทาน

ถึงแม้ตัวต้านทานจะมีหลายแบบและให้ความต้านทานที่หลากหลาย แต่ในวงจรไฟฟ้าบางวงจรต้องใช้ความต้านทานที่ไม่ตรงกับค่าที่มีอยู่ เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว จึงได้มีการนำตัวต้านทานมากกว่าหนึ่งตัวมาต่อกันเพื่อให้ได้ความต้านทานที่ต้องการ

ความต้านทานรวมที่ได้จากการต่อตัวต้านทานมากกว่าหนึ่งตัวขึ้นไปเรียกว่า **ความต้านทานสมมูล** (equivalent resistance) โดยวิธีการต่อตัวต้านทานมี 2 วิธีหลักได้แก่ การต่อแบบอนุกรมและการต่อแบบขนาน ซึ่งสามารถพิจารณาหาความต้านทานสมมูลได้ดังต่อไปนี้

1. การต่อตัวต้านทานแบบอนุกรม

การต่อตัวต้านทานแบบอนุกรม คือการนำตัวต้านทานมาต่อเรียงกัน ดังรูป 14.13 ก. ซึ่งถ้านำชุดตัวต้านทานนี้ไปต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเป็นวงจร จะทำให้มีกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ระหว่างปลายของตัวต้านทานแต่ละตัวดังรูป 14.13 ข. ซึ่งเขียนวงจรของความต้านทานสมมูลได้ดังรูป 14.13 ค.



รูป 14.13 ตัวอย่างการต่อตัวต้านทานแบบอนุกรม

กำหนดให้ I เป็นกระแสไฟฟ้าในวงจร และ I_1 I_2 และ I_3 เป็นกระแสไฟฟ้าที่ผ่านตัวต้านทานที่มีความต้านทาน R_1 R_2 และ R_3 ตามลำดับ ในการต่อตัวต้านทานแบบอนุกรม กระแสไฟฟ้าที่ผ่านตัวต้านทานแต่ละตัวจะเท่ากัน และเท่ากับกระแสไฟฟ้าในวงจรที่ผ่านตัวต้านทานจาก A ไป B นั่นคือ

$$I = I_1 = I_2 = I_3 \qquad \text{(a)}$$

ส่วนความต่างศักย์ระหว่างปลายของตัวต้านทานแต่ละตัว ΔV_1 , ΔV_2 และ ΔV_3 จะมีค่ารวมกันเท่ากับความต่างศักย์ระหว่าง A กับ B นั่นคือ

$$\Delta V = \Delta V_1 + \Delta V_2 + \Delta V_3 \qquad \text{(b)}$$

จากกฎของโอห์ม จะได้ว่า $\Delta V = IR$, $\Delta V_1 = I_1 R_1$, $\Delta V_2 = I_2 R_2$ และ $\Delta V_3 = I_3 R_3$

แทนลงใน (b) จะได้

$$IR = I_1 R_1 + I_2 R_2 + I_3 R_3$$

จาก (a) จะได้

$$IR = IR_1 + IR_2 + IR_3$$

ดังนั้น $$R = R_1 + R_2 + R_3$$

นั่นคือ เมื่อนำตัวต้านทานสามตัวมาต่ออนุกรมกัน จะได้ความต้านทานสมมูลเท่ากับผลบวกความต้านทานแต่ละตัว

ในกรณีที่นำตัวต้านทาน n ตัวมาต่อกันแบบอนุกรม จะได้ความต้านทานสมมูลเป็น

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + ... + R_n$$

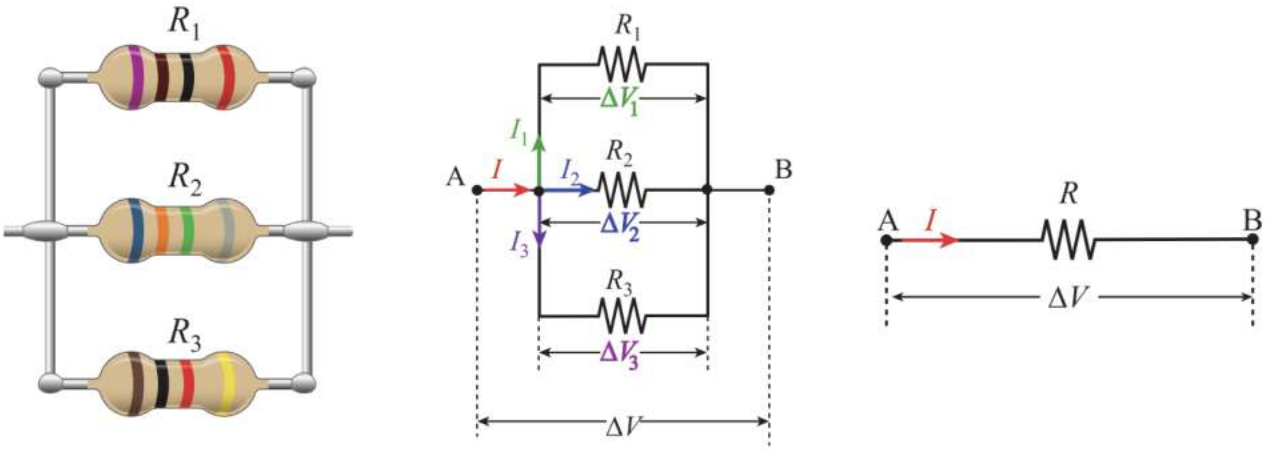
หรือ อาจเขียนในรูปทั่วไปได้เป็น

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + ... \qquad (14.4)$$

นั่นคือ เมื่อนำตัวต้านทานมาต่ออนุกรมกัน จะได้ความต้านทานสมมูลเพิ่มขึ้น

2. การต่อตัวต้านทานแบบขนาน

การต่อตัวต้านทานแบบขนาน คือ การนำตัวต้านทานมาต่อกันในลักษณะดังรูป 14.14 ก. ซึ่งถ้านำชุดตัวต้านทานนี้ไปต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเป็นวงจร จะทำให้มีกระแสไฟฟ้าผ่านและความต่างศักย์ระหว่างปลายของตัวต้านทานแต่ละตัวดังรูป 14.14 ข. และเขียนวงจรของความต้านทานสมมูลได้ดังรูป 14.14 ค.



ก. ข. ค.

รูป 14.14 ตัวอย่างการต่อตัวต้านทานแบบขนาน

ในการต่อตัวต้านทานแบบขนาน จะได้ว่า กระแสไฟฟ้าที่ผ่านจาก A ไป B จะแยกไปยังตัวต้านทานแต่ละตัวเป็น I_1 , I_2 และ I_3 นั่นคือ

$$I = I_1 + I_2 + I_3 \qquad \text{(c)}$$

ในขณะที่ความต่างศักย์ระหว่างปลาย A กับ B หรือ ΔV จะเท่ากับความต่างศักย์ระหว่างปลายตัวต้านทานแต่ละตัว นั่นคือ

$$\Delta V = \Delta V_1 = \Delta V_2 = \Delta V_3 \qquad \text{(d)}$$

จากกฎของโอห์มจะได้ว่า $I = \frac{\Delta V}{R}$, $I_1 = \frac{\Delta V_1}{R_1}$, $I_2 = \frac{\Delta V_2}{R_2}$ และ $I_3 = \frac{\Delta V_3}{R_3}$ แทนลงใน (c) จะได้

$$\frac{\Delta V}{R} = \frac{\Delta V_1}{R_1} + \frac{\Delta V_2}{R_2} + \frac{\Delta V_3}{R_3}$$

จาก (d) จะได้

$$\frac{\Delta V}{R} = \frac{\Delta V}{R_1} + \frac{\Delta V}{R_2} + \frac{\Delta V}{R_3}$$

ดังนั้น

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

นั่นคือ เมื่อนำตัวต้านทานมาต่อขนานกัน จะได้ส่วนกลับของความต้านทานสมมูลจะเท่ากับผลบวกของส่วนกลับของความต้านทานแต่ละตัว

ในกรณีที่นำตัวต้านทาน n ตัวมาต่อกันแบบขนาน จะได้ความต้านทานสมมูลเป็น

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + ... + \frac{1}{R_n}$$

หรือ อาจเขียนในรูปทั่วไปได้เป็น

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + ... \qquad (14.5)$$

นั่นคือ เมื่อนำตัวต้านทานมาต่อขนานกัน จะได้ความต้านทานสมมูลมีค่าลดลง ตามสมการ (14.5)

จากความรู้เกี่ยวกับความต้านทานสมมูลของการต่อตัวต้านทานแต่ละวิธี เราสามารถเลือกตัวต้านทานสองตัวหรือมากกว่ามาต่อกัน เพื่อให้ได้ความต้านทานที่ต้องการ ซึ่งนอกจากจะใช้วิธีการต่อแบบอนุกรมหรือแบบขนานอย่างใดอย่างหนึ่งแล้ว อาจต่อตัวต้านทานด้วยวิธีทั้งสองมาผสมกัน เรียกว่า การต่อแบบผสม

ตัวอย่าง 14.6 ตัวต้านทานสามตัวมีความต้านทานเป็น 6 โอห์ม 9 โอห์ม และ 15 โอห์ม ตามลำดับ

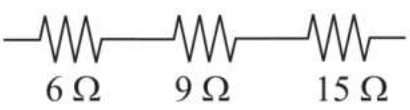
ก. เมื่อนำตัวต้านทานทั้งสามตัวมาต่อกันแบบอนุกรม จะมีความต้านทานสมมูลเท่าไร

ข. เมื่อนำตัวต้านทานทั้งสามตัวมาต่อกันแบบขนาน จะมีความต้านทานสมมูลเท่าไร

ค. เมื่อนำตัวต้านทานตัวที่หนึ่งต่ออนุกรมกับตัวที่สอง แล้วจึงนำทั้งสองตัวมาต่อขนานกับตัวที่สาม ความต้านทานสมมูลจะเป็นเท่าไร

แนวคิด ใช้สมการที่เกี่ยวข้องกับการหาความต้านทานสมมูลของการต่อตัวต้านทานแต่ละวิธี เพื่อหาคำตอบของข้อ ก. และ ข. จากนั้นใช้สมการของความต้านทานสมมูลในกรณีของการต่อแบบอนุกรมและแบบขนานร่วมกัน เพื่อหาคำตอบของข้อ ค.

ก. วิธีทำ เมื่อนำตัวต้านทานทั้งสามต่อกันแบบอนุกรม ดังรูป



ความต้านทานสมมูลของตัวต้านทานที่ต่อแบบอนุกรมหาได้จากสมการ

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + ...$$

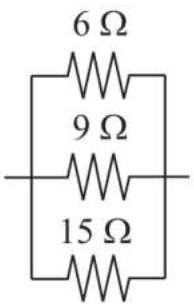
แทนค่า $R_1 = 6\Omega,\ R_2 = 9\Omega,\ R_3 = 15\Omega$

จะได้ $R = 6\Omega + 9\Omega + 15\Omega$

$= 30\ \Omega$

ตอบ ความต้านทานของตัวต้านทานทั้งสามตัวที่ต่อกันแบบอนุกรมเท่ากับ 30 โอห์ม

ข. วิธีทำ เมื่อนำตัวต้านทานทั้งสามต่อกันแบบขนาน ดังรูป



ความต้านทานสมมูลของตัวต้านทานที่ต่อแบบขนาน

หาได้จากสมการ $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + ...$

แทนค่า $R_1 = 6\Omega,\ R_2 = 9\Omega,\ R_3 = 15\Omega$

จะได้ $\frac{1}{R} = \frac{1}{6\Omega} + \frac{1}{9\Omega} + \frac{1}{15\Omega}$

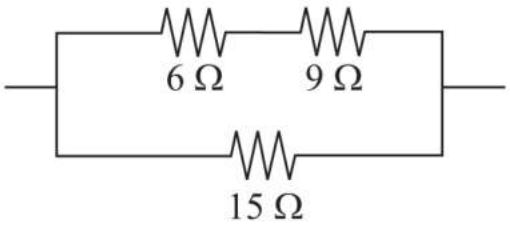
$= \frac{15+10+6}{90\Omega}$

$= \frac{31}{90\Omega}$

ดังนั้น $R = 2.90\Omega$

ตอบ ความต้านทานของตัวต้านทานทั้งสามตัวที่ต่อกันแบบขนานเท่ากับ 2.90 โอห์ม

ค. วิธีทำ เมื่อนำตัวต้านทานตัวที่หนึ่งต่ออนุกรมกับตัวที่สอง แล้วจึงนำทั้งสองตัวมาต่อขนานกับตัวที่สามดังรูป



แทนความต้านทานสมมูลของตัวต้านทานสองตัวที่ต่อกันแบบอนุกรมด้วย

จะได้ $R_s = R_1 + R_2$

แทนค่า $R_1 = 6\Omega$ และ $R_2 = 9\Omega$

$$R_s = 6\Omega + 9\Omega$$
$$= 15\Omega$$

เมื่อนำตัวต้านทานสองตัวที่ต่อกันแบบอนุกรมมาต่อแบบขนานกับตัวต้านทานตัวที่สาม แล้วแทนความต้านทานสมมูลด้วย R หาความต้านทานสมมูลได้จากสมการ

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_s} + \frac{1}{R_3}$$

แทนค่า $R_s = 15\Omega$ และ $R_3 = 15\Omega$

จะได้ $$\frac{1}{R} = \frac{1}{15\,\Omega} + \frac{1}{15\,\Omega}$$
$$= \frac{2}{15\,\Omega}$$

ดังนั้น $R = 7.5\Omega$

ตอบ ความต้านทานของตัวต้านทานทั้งสามตัวที่ต่อกันแบบผสมเท่ากับ 7.5 โอห์ม

ในวงจรไฟฟ้า นอกจากจะมีการใช้ตัวต้านทานค่าคงตัวควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ในส่วนต่าง ๆ ของวงจรแล้ว ยังมีการใช้ตัวต้านทานชนิดอื่น ๆ อีก ดังตัวอย่างต่อไปนี้

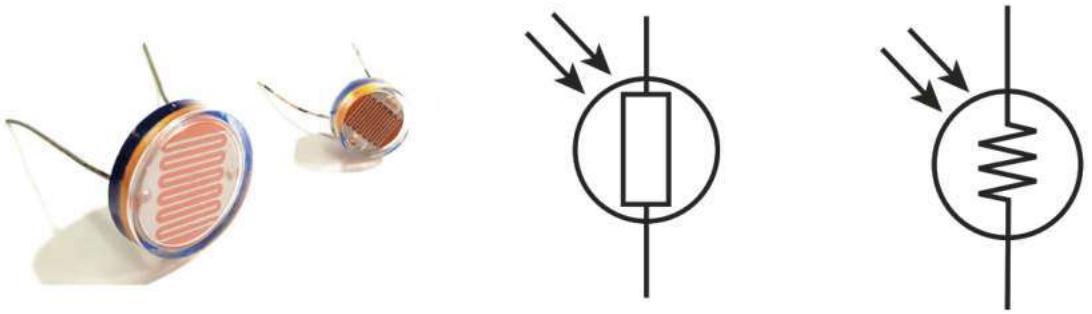
1. **ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้** (variable resistor) ตัวต้านทานชนิดนี้สามารถเปลี่ยนค่าความต้านทานได้ด้วยการหมุนปรับตำแหน่งสัมผัส สัญลักษณ์ในวงจร และตัวอย่างบางลักษณะของตัวต้านทานชนิดนี้ ดังรูป

ก. ข. ค.

รูป 14.15 ก. ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ขนาดเล็ก ข. ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ขนาดใหญ่ ค. สัญลักษณ์ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ในวงจรฟ้า

ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ขนาดเล็กใช้ปรับเพื่อตั้งค่า ส่วนขนาดใหญ่ใช้ปรับเปลี่ยนค่าได้บ่อย ๆ ขณะวงจรกำลังทำงาน เช่น การเปลี่ยนความดังของเครื่องขยายเสียง

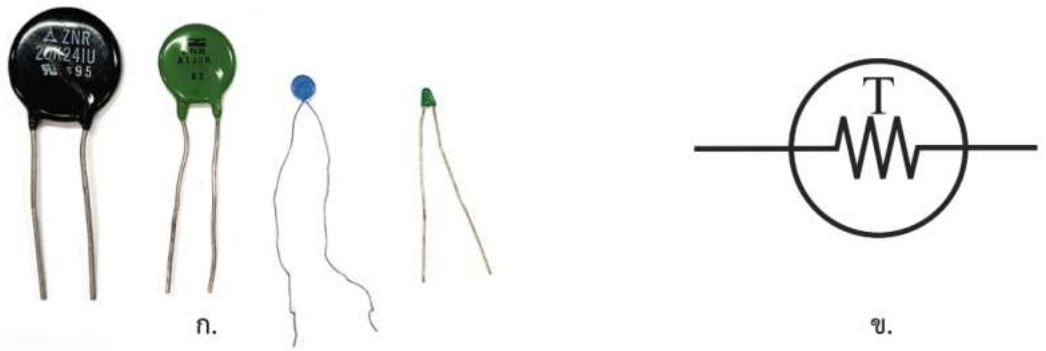
2. **ตัวต้านทานที่เปลี่ยนค่าตามปริมาณแสง** หรือ **LDR** (light dependent resistor) เป็นตัวต้านทานที่ความต้านทานเปลี่ยนไปตามปริมาณแสงที่ตกกระทบ ใช้ในงานตัวรับรู้แสง (light sensor) นำไปควบคุมการทำงานของวงจรตามปริมาณแสง เช่น วงจรเตือนเมื่อมีหรือไม่มีแสงสว่าง หรือ วงจรเปิดปิดไฟส่องสว่างอัตโนมัติ ตัวอย่าง LDR และสัญลักษณ์ในวงจรไฟฟ้า ดังรูป



ก. ข. ค.

รูป 14.16 ก. ตัวอย่างตัวต้านทานที่เปลี่ยนค่าตามปริมาณแสง (LDR) ข. และ ค. สัญลักษณ์ LDR ในวงจรฟ้า

3. **ตัวต้านทานที่เปลี่ยนตามอุณหภูมิ** (thermistor) เป็นตัวต้านทานที่มีความต้านทานเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ ใช้เป็นตัวรับรู้อุณหภูมิ อาจนำไปใช้ในวงจรเครื่องวัดอุณหภูมิ เครื่องควบคุมให้วงจรทำงานและหยุดทำงานในช่วงอุณหภูมิที่กำหนด เช่น เครื่องทำความเย็น ตัวอย่างตัวต้านทานที่เปลี่ยนตามอุณหภูมิและสัญลักษณ์ในวงจรไฟฟ้า ดังรูป



ก. ข.

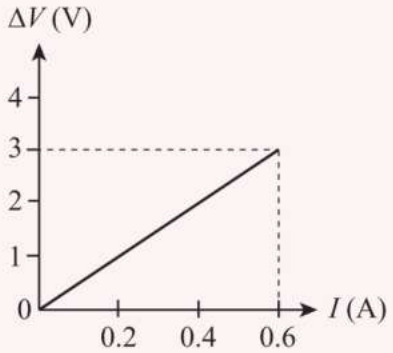
รูป 14.17 ก. ตัวอย่างตัวต้านทานที่เปลี่ยนตามอุณหภูมิ ข. สัญลักษณ์ตัวต้านทานที่เปลี่ยนตามอุณหภูมิในวงจรไฟฟ้า

คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 14.2

1. อัตราส่วนระหว่างความต่างศักย์ระหว่างปลายของลวดตัวนำกับกระแสไฟฟ้าที่ผ่านลวดตัวนำ บอกถึงปริมาณใดของลวดตัวนำ
2. พิจารณาข้อความต่อไปนี้ ข้อใดถูก ข้อใดผิด
   ก. ที่อุณหภูมิคงตัว ความต้านทานของตัวนำโลหะมีค่าคงตัว
   ข. ถ้าลวดตัวนำมีความยาวมากขึ้น ความต้านทานของลวดตัวนำจะมากขึ้น
   ค. ถ้าลวดตัวนำมีพื้นที่หน้าตัดมากขึ้น ความต้านทานของลวดตัวนำจะน้อยลง
   ง. สภาพต้านทานไฟฟ้าขึ้นอยู่กับความยาวและพื้นที่หน้าตัดของวัสดุ
3. ตัวต้านทานทำหน้าที่อะไรในวงจรไฟฟ้า
4. แถบสีที่ 4 ของตัวต้านทานค่าคงตัวแบบมีแถบสี 4 แถบ แทนค่าอะไร
5. เมื่อต่อตัวต้านทานจำนวนหนึ่งแบบอนุกรม กระแสไฟฟ้าที่ผ่านตัวต้านทานแต่ละตัวจะเป็นอย่างไร
6. เมื่อต่อตัวต้านทานจำนวนหนึ่งแบบขนาน ความต้านทานสมมูลจะแตกต่างจากความต้านทานของตัวต้านทานแต่ละตัวอย่างไร

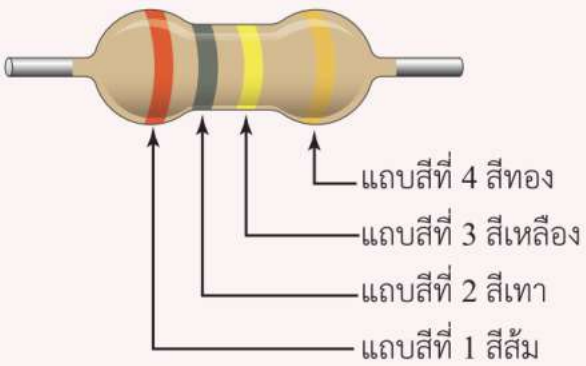
แบบฝึกหัด 14.2

1. จากการทดลองวัดความต่างศักย์ระหว่างปลายของตัวต้านทาน และกระแสไฟฟ้าที่ผ่านตัวต้านทานซึ่งต่ออยู่กับแหล่งกำเนิดไฟฟ้า เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าได้กราฟ ดังรูป จงหาความต้านทานของตัวต้านทาน



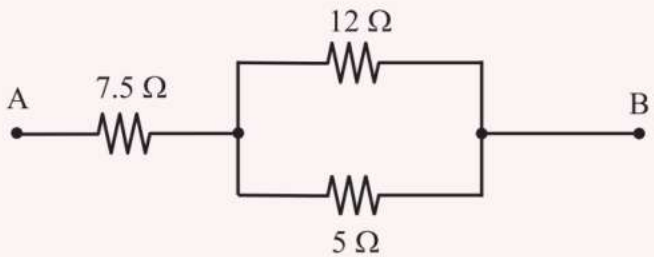
รูป ประกอบแบบฝึกหัด 14.2 ข้อ 1

2. ต่อหลอดไฟที่มีความต้านทาน 3.0 โอห์มกับแบตเตอรี่ขนาด 1.5 โวลต์ จะมีกระแสไฟฟ้าที่ผ่านหลอดไฟเท่าใด
3. ลวดเงินยาว 5.0 เมตร พื้นที่หน้าตัด 2.0 ตารางมิลลิเมตร ลวดเงินเส้นนี้มีความต้านทานเท่าใด กำหนด สภาพนำไฟฟ้าของเงินเท่ากับ 6.14×10^{7} (โอห์ม เมตร)$^{-1}$
4. ลวดโลหะชนิดหนึ่ง มีสภาพต้านทานไฟฟ้า 6×10^{-8} โอห์ม เมตร มีพื้นที่หน้าตัด 0.5 ตารางมิลลิเมตร ต้องใช้ลวดยาวเท่าใดจึงจะได้ความต้านทาน 2.5 โอห์ม
5. ตัวต้านทานมีแถบสีดังรูป มีความต้านทานเท่าใด



รูป ประกอบแบบฝึกหัด 14.2 ข้อ 5

6. จะต้องต่อตัวต้านทาน 1.0 เมกะโอห์ม กับความต่างศักย์เท่าใด จึงจะมีกระแสไฟฟ้า 1.0 มิลลิแอมแปร์ ผ่านตัวต้านทานดังกล่าว
7. จากรูป ถ้าความต่างศักย์ระหว่างปลายของตัวต้านทานขนาด $12\,\Omega$ เท่ากับ 18 โวลต์ จงหาความต่างศักย์ระหว่าง A กับ B



รูป ประกอบแบบฝึกหัด 14.2 ข้อ 7

8. ตัวต้านทาน 3 ตัว มีความต้านทาน 30 โอห์ม 60 โอห์มและ X โอห์ม ถ้าต่อตัวต้านทานทั้งสามแบบขนาน จะได้ความต้านทานสมมูล $\frac{120}{7}$ โอห์ม จงหาค่าของ X

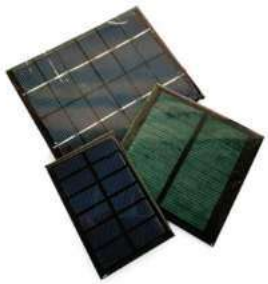
14.3 พลังงานในวงจรไฟฟ้ากระแสตรง

จากการศึกษาที่ผ่านมา เราทราบว่า แหล่งกำเนิดไฟฟ้าทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างปลายของลวดตัวนำ ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าและแรงไฟฟ้ากระทำต่อประจุไฟฟ้าให้เคลื่อนที่ และเมื่อประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่จะถ่ายโอนพลังงานให้กับส่วนต่าง ๆ ของวงจร จึงทำให้เครื่องใช้ไฟฟ้าต่าง ๆ ในวงจรไฟฟ้าสามารถทำงานได้ กล่าวได้ว่าพลังงานที่ทำให้ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ ได้รับจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้า นำไปถ่ายโอนให้กับส่วนต่าง ๆ ของวงจร ซึ่งในบทนี้จะเรียกว่า **พลังงานไฟฟ้า** (electrical energy) พลังงานไฟฟ้าส่วนที่ได้รับจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากับส่วนที่ถ่ายโอนให้กับวงจร มีความสัมพันธ์กันอย่างไร ศึกษาได้ดังต่อไปนี้

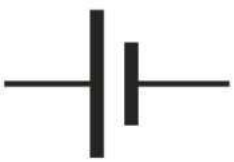
14.3.1 พลังงานไฟฟ้าและความต่างศักย์

แบตเตอรี่ และเซลล์สุริยะ ที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าของวงจรไฟฟ้ากระแสตรงทั่วไปมีหลากหลายชนิด แต่ละชนิดมีรูปร่างและขนาดแตกต่างกันไป ดังรูป 14.18 ก. และ 14.18 ข. สัญลักษณ์ที่ใช้แทนแหล่งกำเนิดไฟฟ้าของวงจรไฟฟ้ากระแสตรงมีลักษณะเป็นเส้นขนานสองเส้น โดยเส้นยาวแทนขั้วบวก และเส้นสั้นแทนขั้วลบ ดังรูป 14.18 ค. และอาจมีการแสดงสัญลักษณ์ของความต้านทานภายในไว้ด้วย ดังรูป 14.18 ง.

ก.



ข.

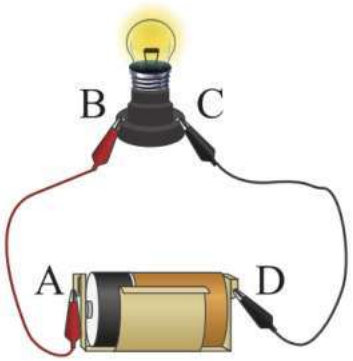


ค.

ง.

รูป 14.18 ก. แบตเตอรี่แบบต่าง ๆ ข. เซลล์สุริยะ ค. และ ง. สัญลักษณ์แบตเตอรี่ในวงจรไฟฟ้า

เมื่อนำแหล่งกำเนิดไฟฟ้า เช่น แบตเตอรี่ มาต่อกับเครื่องใช้ไฟฟ้า เช่น หลอดไฟ ดังรูป 14.19 สามารถพิจารณาพลังงานของประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ในวงจรโดยใช้กราฟในรูป 14.20 ประกอบได้ดังนี้



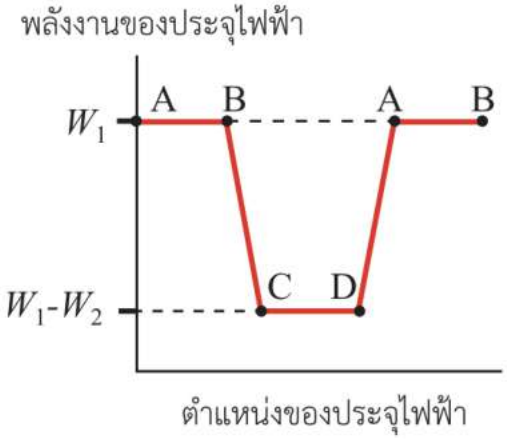
รูป 14.19 วงจรไฟฟ้าที่ประกอบด้วยหลอดไฟและแบตเตอรี่

ให้ประจุไฟฟ้า Q มีพลังงานไฟฟ้า W_1 เคลื่อนที่ออกจากขั้วบวกของแบตเตอรี่ที่ A ไปตามลวดตัวนำในสายไฟถึง B (กำหนดให้ในลวดตัวนำและส่วนอื่น ๆ ของวงจรไฟฟ้าไม่มีความต้านทาน) เมื่อประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านหลอดไฟจาก B ไปยัง C จะถ่ายโอนพลังงาน W_2 ให้กับหลอดไฟ ทำให้หลอดไฟ

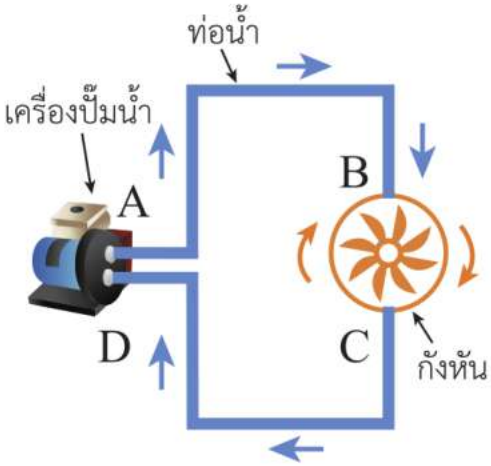
สว่างและพลังงานของประจุไฟฟ้าลดลง เท่ากับ W_1-W_2 จากนั้น ประจุไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ต่อไปยังขั้วลบของแบตเตอรี่ที่ D ระหว่างที่ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่จาก D ไปยัง A จะได้รับพลังงานจากแบตเตอรี่ W_2 ทำให้มีพลังงานเท่ากับ W_1 ทำให้ประจุไฟฟ้าสามารถเคลื่อนที่ได้ครบวงจรอีก และเป็นแบบนี้ต่อไปเรื่อย ๆ จนแบตเตอรี่ไม่สามารถจ่ายพลังงาน

การเปลี่ยนแปลงพลังงานของประจุไฟฟ้าในวงจรดังรูป 14.19 เปรียบได้กับการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ของน้ำในระบบท่อที่มีเครื่องปั๊มน้ำและกังหัน ดังรูป 14.21 โดยแหล่งกำเนิดไฟฟ้าหรือแบตเตอรี่เปรียบเสมือนเครื่องปั๊มน้ำ ประจุไฟฟ้าในลวดตัวนำเปรียบเสมือนน้ำในท่อ และกังหันเปรียบเสมือนเครื่องใช้ไฟฟ้า เมื่อน้ำออกจากเครื่องปั๊มที่ A จะมีพลังงานจลน์ที่ทำให้สามารถเคลื่อนที่ไปตามท่อ และเมื่อน้ำไหลจาก B ไปยัง C จะผ่านกังหัน จะทำให้กังหันหมุน

การที่น้ำจะสามารถไหลมาหมุนกังหันได้อีกครั้ง จะต้องได้รับการปั๊มโดยเครื่องปั๊มน้ำให้มีพลังงานจลน์เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับ ประจุไฟฟ้าที่ต้องได้รับพลังงานจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้า จึงจะสามารถเคลื่อนที่ผ่านเครื่องใช้ไฟฟ้าและครบวงจรได้



รูป 14.20 กราฟระหว่างพลังงานกับตำแหน่งของประจุไฟฟ้า



รูป 14.21 น้ำในระบบท่อที่ประกอบด้วยเครื่องปั๊มน้ำและกังหัน

ชวนคิด

เมื่อเปรียบเทียบการไหลของน้ำในท่อที่มีน้ำเต็ม กับ กระแสไฟฟ้าในตัวนำ มีข้อเหมือนและแตกต่างกันอย่างไร

พลังงานจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่ประจุไฟฟ้าได้รับต่อหนึ่งหน่วยประจุเมื่อเคลื่อนที่ผ่านแหล่งกำเนิดไฟฟ้า เรียกว่า **อีเอ็มเอฟ** (emf หรือ electromotive force) แทนด้วยสัญลักษณ์ $\mathcal{E}$ มีหน่วยเป็นจูลต่อคูลอมบ์ หรือ โวลต์ (V) ซึ่งในแบตเตอรี่ พลังงานนี้มาจากการเปลี่ยนพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้า ส่วนในเซลล์สุริยะ พลังงานนี้มาจากการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า

ข้อสังเกต

ในแหล่งเรียนรู้หรือบริบทอื่น ๆ อาจมีการใช้คำว่า แรงเคลื่อนไฟฟ้า หรือ แรงดันไฟฟ้า แทนคำว่า อีเอ็มเอฟ แต่ทั้งนี้ อีเอ็มเอฟไม่ใช่ “แรง” หรือ “force” ในความหมายเดียวกับ แรงที่มีหน่วยเป็นนิวตัน (N) แต่การที่คำในภาษาอังกฤษใช้คำว่า electromotive force ซึ่งทำให้คำในภาษาไทยใช้คำว่า แรงเคลื่อนไฟฟ้า หรือ แรงดันไฟฟ้า เนื่องจากในอดีต ก่อนที่นักวิทยาศาสตร์จะเข้าใจหลักการทำงานของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าได้ดี ได้มีการใช้คำดังกล่าวจนเป็นที่นิยม และยังคงใช้มาจนปัจจุบัน

ดังนั้น ในวงจรไฟฟ้า ประจุไฟฟ้า Q เคลื่อนที่ผ่านแหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่มีอีเอ็มเอฟเท่ากับ $\mathcal{E}$ จะได้รับพลังงานไฟฟ้า เท่ากับ $Q\mathcal{E}$ ซึ่งพลังงานนี้จะถ่ายโอนไปยังส่วนต่าง ๆ ของวงจร โดยพลังงานไฟฟ้าที่ถ่ายโอนให้ส่วนต่าง ๆ ของวงจรต่อหนึ่งหน่วยประจุไฟฟ้า เรียกว่า **ความต่างศักย์** (potential difference) แทนด้วยสัญลักษณ์ ΔV นั่นคือ เมื่อประจุไฟฟ้า Q เคลื่อนที่ผ่านส่วนต่าง ๆ ของวงจรที่มีความต่างศักย์ระหว่างปลายเป็น ΔV พลังงานไฟฟ้าที่ถ่ายโอนให้กับส่วนนั้นจะเท่ากับ $Q\Delta V$

พลังงานที่ประจุไฟฟ้าถ่ายโอนให้กับวงจรไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าในวงจรมีความสัมพันธ์กันอย่างไร ศึกษาได้จากกิจกรรม 14.2

กิจกรรม 14.2 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ระหว่างขั้วแบตเตอรี่กับกระแสไฟฟ้าในวงจร

จุดประสงค์

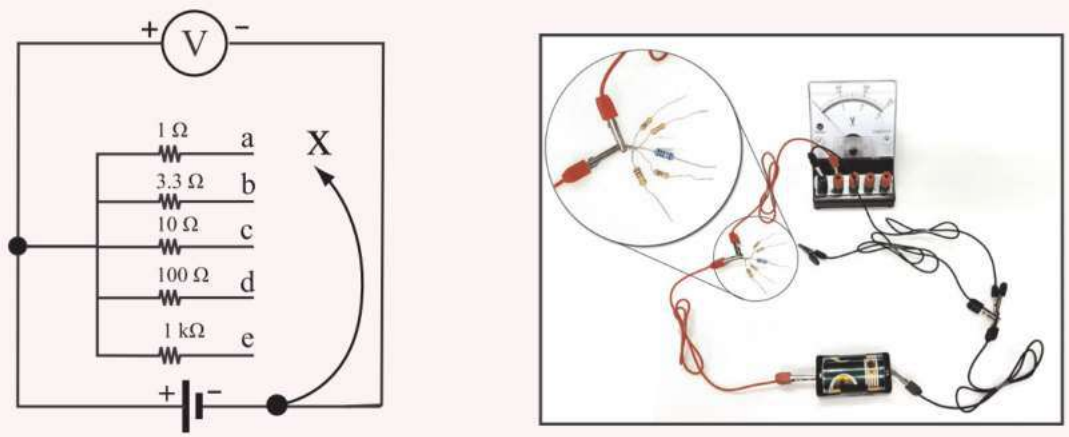
1. ทดลองเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ระหว่างขั้วแบตเตอรี่และกระแสไฟฟ้าในวงจร

วัสดุและอุปกรณ์

1.	ตัวต้านทาน $1\,\Omega$, $3.3\,\Omega$, $10\,\Omega$, $100\,\Omega$ และ $1\,k\Omega$	อย่างละ 1 ตัว
2.	แบตเตอรี่ 1 ก้อนพร้อมกระบะ	1 ชุด
3.	โวลต์มิเตอร์	1 เครื่อง
4.	สายไฟพร้อมปากหนีบ	4 เส้น

วิธีทำกิจกรรม

1. นำปลายข้างหนึ่งของตัวต้านทานที่มีความต้านทาน 1 โอห์ม 3.3 โอห์ม 10 โอห์ม 100 โอห์ม และ 1 กิโลโอห์ม มาต่อกัน แล้วต่อปลายรวมเข้ากับขั้วบวกของแบตเตอรี่ ส่วนปลายที่เหลือของตัวต้านทานปล่อยอิสระ และต่อสาย X เข้ากับขั้วลบของแบตเตอรี่ ดังรูป ก. ซึ่งแสดงการต่ออุปกรณ์ได้ดังรูป ข.
2. วัดความต่างศักย์ระหว่างขั้วแบตเตอรี่ซึ่งค่านี้ คือพลังงานที่ประจุไฟฟ้าหนึ่งหน่วยถ่ายโอนให้กับวงจรไฟฟ้า โดยต่อขั้วบวกของแบตเตอรี่กับขั้วบวกของโวลต์มิเตอร์ ต่อขั้วลบของแบตเตอรี่กับขั้วลบของโวลต์มิเตอร์ ดังรูป อ่านและบันทึกค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วแบตเตอรี่จากโวลต์มิเตอร์



ก. ข.

รูป การวัดความต่างศักย์ระหว่างขั้วของแบตเตอรี่

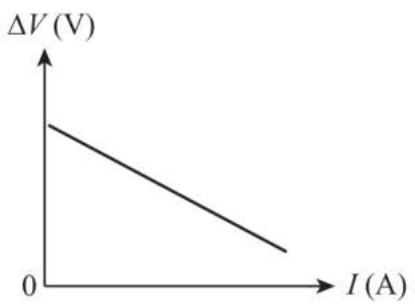
3. ใช้สายไฟ X ต่อกับตัวต้านทาน 1 โอห์ม ที่ตำแหน่ง a ดังรูป อ่านและบันทึกความต่างศักย์ระหว่างขั้วแบตเตอรี่จากโวลต์มิเตอร์
4. ทำซ้ำข้อ 3. แต่เปลี่ยนให้สายไฟต่อกับตัวต้านทาน 3.3 โอห์ม 10 โอห์ม 100 โอห์ม และ 1 กิโลโอห์ม ทีละตัว ที่ตำแหน่ง b, c, d และ e ตามลำดับ
5. คำนวณกระแสไฟฟ้าสำหรับแต่ละค่าของความต่างศักย์ระหว่างขั้ว จากนั้น เขียนกราฟระหว่างความต่างศักย์ระหว่างขั้วกับกระแสไฟฟ้า โดยให้ความต่างศักย์อยู่บนแกนตั้ง และกระแสไฟฟ้าอยู่บนแกนนอน

คำถามท้ายกิจกรรม

- ☐ ในขณะที่ยังไม่ต่อสายไฟ X กับตัวต้านทาน ความต่างศักย์ระหว่างขั้วแบตเตอรี่และกระแสไฟฟ้าในวงจรมีค่าแตกต่างจากเมื่อต่อสายไฟ X กับตัวต้านทานอื่น ๆ อย่างไร
- ☐ เมื่อต่อสายไฟ X กับตัวต้านทานที่มีความต้านทานเพิ่มขึ้น ความต่างศักย์ระหว่างขั้วแบตเตอรี่และกระแสไฟฟ้าในวงจรมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร
- ☐ กราฟระหว่างความต่างศักย์ระหว่างขั้วแบตเตอรี่กับกระแสไฟฟ้า มีลักษณะอย่างไร และสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทั้งสองได้อย่างไร

จากกิจกรรม 14.2 เราพบว่า เมื่อแบตเตอรี่ไม่ต่ออยู่กับตัวต้านทาน ความต่างศักย์ระหว่างขั้วของแบตเตอรี่จะมีค่ามากที่สุด ส่วนกระแสไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์ และเมื่อต่อแบตเตอรี่กับตัวต้านทานที่มีความต้านทานเพิ่มขึ้น ความต่างศักย์ระหว่างขั้วของแบตเตอรี่จะมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนกระแสไฟฟ้ามีค่าลดลง โดยขณะต่อแบตเตอรี่กับตัวต้านทานที่มีค่าน้อย (กระแสไฟฟ้ามาก) ความต่างศักย์ระหว่างขั้วแบตเตอรี่จะมีค่าน้อยกว่า เมื่อต่อกับตัวต้านทานค่ามาก (กระแสไฟฟ้าน้อย)

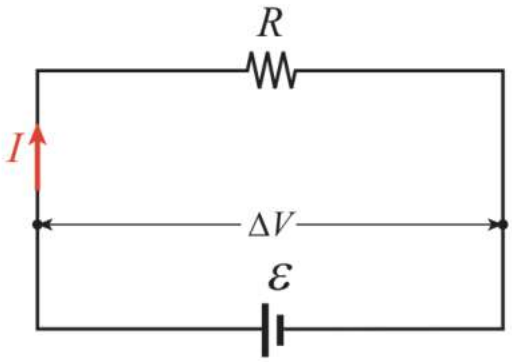
เมื่อเขียนกราฟระหว่างความต่างศักย์ระหว่างขั้วแบตเตอรี่กับกระแสไฟฟ้า พบว่า กราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรงที่มีความชันเป็นลบ ดังรูป 14.22 แสดงว่า ความต่างศักย์ระหว่างขั้วแบตเตอรี่แปรผันเชิงเส้นกับกระแสไฟฟ้า



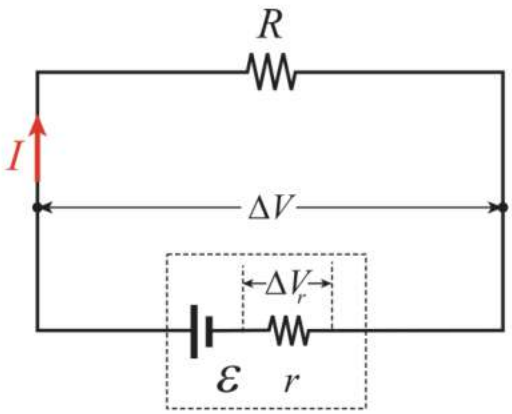
รูป 14.22 กราฟระหว่างความต่างศักย์ระหว่างขั้วแบตเตอรี่ ΔV กับกระแสไฟฟ้า I

สามารถวิเคราะห์ผลการทำกิจกรรม 14.2 โดยใช้วงจรไฟฟ้าดังรูป 14.23 ประกอบได้ดังนี้

กำหนดให้วงจรไฟฟ้ามีตัวต้านทานความต้านทาน R และแบตเตอรี่อีเอ็มเอฟ $\mathcal{E}$ ถ้าพิจารณาประจุไฟฟ้า Q เคลื่อนที่จากแบตเตอรี่ไปในวงจร ประจุจะได้รับพลังงานจากแบตเตอรี่เท่ากับ $Q\mathcal{E}$ และเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวต้านทาน จะถ่ายโอนพลังงานให้เท่ากับ $Q\Delta V$ เมื่อพิจารณากฎการอนุรักษ์พลังงาน $Q\mathcal{E}$ ควรมีค่าเท่ากับ $Q\Delta V$ แต่จากกิจกรรม พบว่า ΔV มีค่าลดลง แต่ $\mathcal{E}$ มีค่าเท่าเดิม แสดงว่า มีพลังงานอีกส่วนหนึ่งถ่ายโอนให้ส่วนใดส่วนหนึ่งของวงจร ซึ่งจากความเข้าใจเกี่ยวกับความต้านทาน เราทราบว่า วัตถุมีความต้านทานค่าหนึ่ง ดังนั้น จึงพิจารณาได้ว่า ภายในแบตเตอรี่มีความต้านทาน เรียก **ความต้านทานภายใน** (internal resistance) ที่ทำให้ประจุไฟฟ้าเสียพลังงานขณะเคลื่อนผ่านแบตเตอรี่ ใช้สัญลักษณ์ r แทนความต้านทานภายในแบตเตอรี่แสดงได้ดังรูป 14.24 โดยให้ ΔV_r เป็นความต่างศักย์ที่ความต้านทานภายในแบตเตอรี่ ซึ่งจะมีพลังงานถ่ายโอนเท่ากับ $Q\Delta V_r$



รูป 14.23 วงจรไฟฟ้าที่ประกอบด้วยตัวต้านทานความต้านทาน R และแบตเตอรี่อีเอ็มเอฟ $\mathcal{E}$



รูป 14.24 วงจรไฟฟ้าที่แสดงความต้านทานภายในแบตเตอรี่ และ ΔV_r

จากกฎการอนุรักษ์พลังงาน จะได้ว่า พลังงานที่ประจุไฟฟ้า Q ได้รับจากแบตเตอรี่ เท่ากับพลังงานไฟฟ้าที่ประจุไฟฟ้าถ่ายโอนหรือสูญเสียไปทั้งหมดในวงจร ตามสมการ

$$Q\mathcal{E} = Q\Delta V + Q\Delta V_r$$

นั่นคือ
$$\mathcal{E} = \Delta V + \Delta V_r$$

จากกฎของโอห์ม จะได้
$$\mathcal{E} = \Delta V + Ir \qquad (14.6)$$

พลังงานที่สูญเสียให้กับความต้านทานภายในแบตเตอรี่ $Q\Delta V_r$ ทำให้เกิดความร้อนที่ตัวแบตเตอรี่ ด้วยเหตุนี้ การใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ทำให้มีกระแสไฟฟ้าในวงจรมาก ๆ แบตเตอรี่อาจเกิดการระเบิดหรือมีสารเคมีรั่วไหลได้

จากสมการ (14.6) จะเห็นได้ว่า เมื่อกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่อีเอ็มเอฟของแบตเตอรี่มีค่าคงตัวความต่างศักย์จะมีค่าลดลง สอดคล้องกับผลจากกิจกรรม 14.2

ข้อสังเกต

ถ้านำสมการ (14.6) มาจัดให้อยู่ในรูป $\Delta V = -Ir + \mathcal{E}$ แล้วพิจารณาให้ ΔV และ I เป็นตัวแปร ส่วนปริมาณอื่น ๆ เป็นค่าคงตัว จะเห็นว่า สมการนี้เป็นสมการของกราฟเส้นตรง ซึ่งเมื่อเทียบกับรูปทั่วไปของสมการของกราฟเส้นตรง $y = \mathrm{m}x + \mathrm{c}$ จะได้ว่า ความชันของกราฟระหว่าง ΔV กับ I ที่ได้จากกิจกรรม 14.2 คือความต้านทานภายใน และจุดตัดแกนตั้งคือจุดที่ความต่างศักย์ระหว่างขั้วแบตเตอรี่เท่ากับอีเอ็มเอฟของแบตเตอรี่ นั่นคือ อีเอ็มเอฟของแบตเตอรี่เท่ากับความต่างศักย์ระหว่างขั้วแบตเตอรี่ เมื่อยังไม่ต่อแบตเตอรี่เข้ากับวงจร

ตัวอย่าง 14.7 เมื่อนำหลอดไฟมาต่อกับแบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ ที่มีความต้านทานภายใน 0.5 โอห์ม พบว่า มีกระแสไฟฟ้าผ่านหลอด 1.0 แอมแปร์ จงหาความต่างศักย์ระหว่างขั้วของหลอดไฟ

แนวคิด ใช้สมการ (14.6) หาความต่างศักย์ระหว่างขั้วหลอดไฟในรูป $\Delta V = \mathcal{E} - Ir$

วิธีทำ หาความต่างศักย์ระหว่างขั้วหลอดไฟ

จากความสัมพันธ์ $\Delta V = \mathcal{E} - Ir$

แทนค่า จะได้ $\Delta V = 12\ \mathrm{V} - (1.0\mathrm{A})(0.5\,\Omega)$

$= 12\ \mathrm{V} - 0.5\ \mathrm{V}$

$= 11.5\ \mathrm{V}$

ตอบ ความต่างศักย์ระหว่างขั้วหลอดไฟหลอดเท่ากับ 11.5 โวลต์

ข้อสังเกต

จากตัวอย่าง 14.7 แสดงให้เห็นว่า หากนำแบตเตอรี่ก้อนเดียวกันไปใช้กับเครื่องใช้ไฟฟ้าต่างกัน ยิ่งเครื่องใช้ไฟฟ้าเป็นชนิดที่ต้องการกระแสไฟฟ้ามาก ความต่างศักย์ระหว่างขั้วของเครื่องใช้ไฟฟ้านั้นยิ่งมีค่าน้อยกว่า หรือ อาจกล่าวได้ว่า ยิ่งมีการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าให้กับความต้านทานภายในของแบตเตอรี่มากนั่นเอง

ชวนคิด

ความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ มีค่าคงตัวหรือไม่

รู้หรือไม่

ข้อควรปฏิบัติในการใช้แบตเตอรี่

1. ควรใช้แบตเตอรี่ที่ได้มาตรฐาน แนวทางหนึ่งที่สังเกตแบตเตอรี่มีมาตรฐานคือ มีสัญลักษณ์ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ดังรูป
2. ไม่ควรใช้แบตเตอรี่ใหม่กับแบตเตอรี่เก่า เพราะจะทำให้แบตเตอรี่ใหม่ทำงานได้ไม่ดีเท่าที่ควร
3. หลีกเลี่ยงการใช้งานเครื่องใช้ไฟฟ้าขณะประจุ (ชาร์จ) แบตเตอรี่กับเต้ารับ เพราะอาจทำให้แบตเตอรี่มีความร้อนสูง และเกิดความเสียหายกับแบตเตอรี่และเครื่องใช้ไฟฟ้าได้
4. ควรถอดแบตเตอรี่เมื่อไม่ได้ใช้เครื่องใช้ไฟฟ้าเป็นเวลานาน (มากกว่า 1 เดือน)
5. ไม่ควรเก็บหรือชาร์จแบตเตอรี่ในที่มีอุณหภูมิสูง เช่น ในรถยนต์ที่จอดไว้กลางแดด หรือ ในลิ้นชักใกล้เตาไฟในครัว

รูป แบตเตอรี่ที่มีสัญลักษณ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.)

6. ในการประจุแบตเตอรี่ควรใช้อุปกรณ์ที่ได้มาตรฐาน และควรประจุในบริเวณที่มีอากาศถ่ายเทได้ดี ไม่ควรประจุใต้หมอน ผ้าห่ม หรือบนวัสดุที่ติดไฟง่าย
7. ไม่ควรใช้แบตเตอรี่ที่มีลักษณะผิดปกติ เช่น มีรอยแตกร้าวหรือบวม
8. แบตเตอรี่ที่ใช้แล้ว ไม่ควรทิ้งรวมกับขยะทั่วไป เพราะมีสารเคมีในแบตเตอรี่อาจปนเปื้อนกับสิ่งแวดล้อม (สารเคมีในแบตเตอรี่บางชนิดเป็นสารพิษ) ควรนำไปทิ้งที่จุดรับทิ้ง หรือแยกใส่ถุงนำไปให้เจ้าหน้าที่เก็บขยะได้นำไปกำจัดอย่างถูกวิธีต่อไป

รูป สัญลักษณ์บนแบตเตอรี่ที่ระบุถึงการไม่ควรทิ้งแบตเตอรี่รวมกับขยะทั่วไป

14.3.2 พลังงานไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของเครื่องใช้ไฟฟ้ากระแสตรง

ในเรื่องเกี่ยวกับงานและพลังงาน **กำลัง** (power) หมายถึงงานที่ทำได้ในหนึ่งหน่วยเวลา ดังนั้น **กำลังไฟฟ้า** (electric power) จึงหมายถึง งานที่ประจุไฟฟ้าทำได้ในหนึ่งหน่วยเวลา หรือ พลังงานไฟฟ้าของประจุไฟฟ้าที่ถ่ายโอนไปยังส่วนต่าง ๆ ของวงจรในหนึ่งหน่วยเวลา ซึ่งเมื่อพิจารณาการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องใช้ไฟฟ้าแล้ว สามารถกล่าวได้ว่า กำลังไฟฟ้าคือพลังงานไฟฟ้าที่เครื่องใช้ไฟฟ้าใช้ไปในหนึ่งหน่วยเวลานั่นเอง

จากนิยามของกำลังไฟฟ้า เราจะได้ว่า

$$P = \frac{W}{\Delta t} \qquad \text{(e)}$$

โดยที่ P เป็นกำลังไฟฟ้า W เป็นพลังงานไฟฟ้าที่เครื่องใช้ไฟฟ้าใช้ไปในเวลา Δt ซึ่งพลังงานไฟฟ้า W มีความสัมพันธ์กับความต่างศักย์ระหว่างขั้วของเครื่องใช้ไฟฟ้า ΔV ตามสมการ

$$W = Q\Delta V \qquad \text{(f)}$$

โดยที่ Q เป็นประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านเครื่องใช้ไฟฟ้าในเวลา Δt

จาก $Q = I\Delta t$ แทนค่าใน (f) จะได้

$$W = I\Delta t\Delta V \qquad (14.7)$$

แทน W จาก (14.7) ลงใน (e) จะได้

$$P = \frac{I\Delta t\Delta V}{\Delta t}$$
$$= I\Delta V$$

ดังนั้นเราสามารถหากำลังไฟฟ้าได้จากผลคูณระหว่างกระแสไฟฟ้าในวงจรกับความต่างศักย์ ตามสมการ

$$P = I\Delta V \qquad (14.8)$$

นอกจากนี้ แทนค่า I จากความสัมพันธ์ตามกฎของโอห์ม $I = (\frac{1}{R})\Delta V$ ลงในสมการ (14.8) จะได้

$$P = \frac{(\Delta V)^2}{R}$$

หรือถ้าแทนค่า $\Delta V = IR$ ลงในสมการ 14.8 จะได้

$$P = I^2R$$

บนเครื่องใช้ไฟฟ้าโดยส่วนใหญ่ จะมีฉลากที่ระบุกำลังไฟฟ้า ดังรูป 14.25 เพื่อบอกให้ผู้บริโภคทราบว่า เครื่องใช้ไฟฟ้าที่ซื้อไปนั้น มีการใช้พลังงานไฟฟ้าสิ้นเปลืองมากน้อยเพียงไร ซึ่งส่วนใหญ่ เครื่องใช้ไฟฟ้ากระแสตรงจะมีกำลังไฟฟ้าไม่สูงมากนัก แต่สำหรับเครื่องใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ เช่น เครื่องปรับอากาศ เครื่องทำน้ำอุ่น จะมีกำลังไฟฟ้าค่อนข้างสูง การใช้เครื่องใช้ไฟฟ้าเหล่านี้ จึงต้องระมัดระวังการปิดเปิดในช่วงเวลาการใช้งาน เพื่อไม่ให้สิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำนวนมากโดยไม่จำเป็น

รูป 14.25 ตัวเลขบอกกำลังไฟฟ้าบนเครื่องใช้ไฟฟ้า

ตัวอย่าง 14.8 โทรศัพท์เคลื่อนที่กำลังไฟฟ้า 4 วัตต์ ใช้กับแบตเตอรี่ที่ให้ความต่างศักย์ 5 โวลต์ จงหา

ก. กระแสไฟฟ้าที่ผ่านโทรศัพท์เคลื่อนที่

ข. พลังงานไฟฟ้าที่โทรศัพท์เคลื่อนที่ใช้ไปในเวลา 30 นาที ในหน่วยจูล

ก. แนวคิด หากระแสไฟฟ้าจากสมการ $P = I\Delta V$

วิธีทำ แทนค่ากำลังไฟฟ้าและความต่างศักย์ที่กำหนดให้ ลงในสมการ $I = \frac{P}{\Delta V}$

จะได้ $$I = \frac{4\,\text{W}}{5\,\text{V}}$$
$$= 0.8\,\text{A}$$

ตอบ กระแสไฟฟ้าที่ผ่านโทรศัพท์เคลื่อนที่เท่ากับ 0.8 แอมแปร์

ข. แนวคิด หาพลังงานไฟฟ้า W โดยใช้สมการ $W = P\Delta t$

วิธีทำ แปลงเวลา 30 นาทีเป็นวินาที จะได้ $30\,\text{min} \times 60\,\text{s} = 1800\,\text{s}$

แทนค่ากำลังไฟฟ้าและเวลา ในสมการ $W = P\Delta t$

$$W = (4\,\text{W})(1800\,\text{s})$$
$$= 7.2 \times 10^3\,\text{J}$$

ตอบ พลังงานไฟฟ้าที่โทรศัพท์เคลื่อนที่ใช้ไปในเวลา 30 นาทีเท่ากับ 7.2×10^3 จูล

ตัวอย่าง 14.9 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเครื่องหนึ่งใช้กระแสไฟฟ้า 2.0 แอมแปร์จากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงที่ทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างขั้วของมอเตอร์ขนาด 12 โวลต์ จงหา

ก. กำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้า

ข. พลังงานไฟฟ้าที่มอเตอร์ไฟฟ้าใช้ไปในเวลา 2 ชั่วโมง ในหน่วยจูล

ก. แนวคิด ใช้สมการ $P = I\Delta V$ หากำลังไฟฟ้า

วิธีทำ แทนค่ากระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้าในสมการ $P = I\Delta V$

จะได้ $$P = (2.0\,\text{A})(12\,\text{V})$$
$$= 24\,\text{W}$$

ตอบ ดังนั้น กำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเครื่องนี้เท่ากับ 24 วัตต์

ข. แนวคิด หาพลังงานไฟฟ้า W โดยใช้สมการ $W = P\Delta t$

วิธีทำ แปลงเวลา 2 ชั่วโมงเป็นวินาทีได้เป็น $2\,\text{h} \times 60\,\text{min} \times 60\,\text{s} = 7\,200\,\text{s}$

แทนค่ากำลังไฟฟ้าจาก ก. และเวลา $7\,200$ วินาที ในสมการ $W = P\Delta t$

จะได้ $$W = (24\,\text{W})(7\,200\,\text{s})$$
$$= 1.7 \times 10^5\,\text{J}$$

ตอบ พลังงานไฟฟ้าที่มอเตอร์ไฟฟ้าเครื่องนี้ใช้ไปในเวลา 2 ชั่วโมงเท่ากับ 1.7×10^5 จูล

จากตัวอย่าง 14.8 และ 14.9 จะเห็นว่า พลังงานไฟฟ้าที่เครื่องใช้ไฟฟ้าในหน่วย จูล มีค่าค่อนข้างสูง ทำให้ไม่สะดวกกับการนำมาใช้ในชีวิตประจำวัน ดังนั้น ในทางปฏิบัติ จึงได้พิจารณาหน่วยของพลังงานไฟฟ้าเป็น กิโลวัตต์ ชั่วโมง (kw h) หรือที่ทั่วไปเรียกว่า หน่วย (unit) ซึ่งเป็นหน่วยที่ใหญ่ขึ้น โดยพลังงานไฟฟ้า 1 กิโลวัตต์ ชั่วโมง หรือ 1 หน่วย มีค่าเท่ากับ $(1\,000\,\text{W})(3\,600\,\text{s}) = 3.6 \times 10^6$ จูล ดังจะเห็นได้จากใบแจ้งค่าไฟฟ้า ที่ระบุหน่วยของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในแต่ละเดือนเป็น หน่วย

รู้หรือไม่

กำลังไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดไฟฟ้ามีความหมายแตกต่างจากกำลังไฟฟ้าของเครื่องใช้ไฟฟ้า โดยกำลังไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจะบอกถึงความสามารถในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้แก่วงจรไฟฟ้าหรือเครื่องใช้ไฟฟ้าในหนึ่งหน่วยเวลา สำหรับแบตเตอรี่ จะเรียกกำลังไฟฟ้าว่า ความจุของแบตเตอรี่ (capacity) ซึ่งอาจระบุบนตัวแบตเตอรี่ในหน่วย วัตต์ ชั่วโมง (Wh) หรือ แอมแปร์ ชั่วโมง (Ah) หากใช้งานที่กำลังไฟฟ้าหรือ กระแสไฟฟ้าน้อยกว่าที่ระบุ จะใช้ได้นานขึ้นเป็นสัดส่วน เช่น

7 Wh หมายถึง ใช้งานที่อีเอ็มเอฟปกติ แบตเตอรี่นี้สามารถให้กำลังไฟฟ้าขนาด 7 วัตต์ คงตัวต่อเนื่อง เป็นเวลานาน 1 ชั่วโมง ในขณะที่ 45 Ah หมายถึง ใช้งานที่อีเอ็มเอฟปกติ แบตเตอรี่นี้สามารถให้กระแสไฟฟ้าขนาด 45 แอมแปร์คงตัวต่อเนื่อง เป็นเวลานาน 1 ชั่วโมง ส่วน 3000 mAh หมายถึง ใช้งานที่อีเอ็มเอฟปกติ แบตเตอรี่นี้สามารถให้กระแสไฟฟ้าขนาด 3000 มิลลิแอมแปร์คงตัว (หรือ 3A) ต่อเนื่องเป็นเวลานาน 1 ชั่วโมง (หากใช้งานที่อีเอ็มเอฟปกติ แต่ใช้กระแสไฟฟ้าเพียง 1000 มิลลิแอมแปร์คงตัว จะใช้ได้ต่อเนื่องยาวนานขึ้นเป็น 3 ชั่วโมง) และหากใช้พลังงานเกินจำนวนที่ระบุไปแล้วพลังงานที่แบตเตอรี่จ่ายออกอาจน้อยจนไม่เพียงพอให้เครื่องใช้ไฟฟ้าทำงานต่อไปได้อีก

แบตเตอรี่ที่มีความจุไฟฟ้ามาก จะใช้งานได้ยาวนานกว่า สำหรับแบตเตอรี่ที่นำมาใช้ซ้ำได้เมื่อแบตเตอรี่เก่าลง หลังจากถูกใช้งานมานาน แบตเตอรี่จะเสื่อมสภาพ ความจุไฟฟ้าจริงจะน้อยกว่าที่ระบุไว้ ทำให้เราพบว่า หลังประจุไฟฟ้าเต็ม ระยะเวลาการใช้งานจะสั้นลง ไม่สามารถใช้ได้นานเหมือนตอนแบตเตอรี่ที่ซื้อมาใหม่ ซึ่งจำเป็นต้องเปลี่ยนแบตเตอรี่

คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 14.3

1. อีเอ็มเอฟคืออะไร
2. สำหรับวงจรไฟฟ้าที่มีแบตเตอรี่และตัวต้านทาน การถ่ายโอนพลังงานจากแบตเตอรี่ไปยังตัวต้านทานเป็นไปตามกฎการอนุรักษ์พลังงานหรือไม่ อย่างไร
3. เพราะเหตุใด เมื่อใช้พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ จึงทำให้แบตเตอรี่ร้อน
4. ถ้านำโทรศัพท์เคลื่อนที่รุ่นใหม่ที่ประหยัดพลังงานกว่ารุ่นเก่า มาใช้กับแบตเตอรี่ขนาดเท่าเดิม กระแสไฟฟ้าที่แบตเตอรี่ให้กับโทรศัพท์รุ่นใหม่จะมากขึ้นหรือลดลง จงอธิบาย
5. การพิจารณาพลังงานไฟฟ้าที่เครื่องใช้ไฟฟ้าเครื่องหนึ่งใช้ไปในช่วงเวลาหนึ่ง ให้พิจารณาจากปริมาณอะไรที่ระบุบนฉลากของเครื่องใช้ไฟฟ้า
6. กิโลวัตต์ ชั่วโมง เป็นหน่วยของปริมาณใด

แบบฝึกหัด 14.3

1. แบตเตอรี่มีอีเอ็มเอฟ 3 โวลต์ และความต้านทานภายใน 1 โอห์ม ต่อกับตัวต้านทานแล้วพบว่ามีกระแสไฟฟ้าในวงจร 0.5 แอมแปร์ จงหาความต่างศักย์ระหว่างปลายของตัวต้านทาน
2. แบตเตอรี่มีอีเอ็มเอฟ 6 โวลต์ ต่อใช้งานกับเครื่องใช้ไฟฟ้าพบว่าความต่างศักย์ที่เครื่องใช้ไฟฟ้าได้รับมีค่า 4.5 โวลต์ จงหา
   ก. ความต่างศักย์ที่ความต้านทานภายในเป็นเท่าใด
   ข. ถ้าในวงจรไฟฟ้ามีกระแสไฟฟ้า 0.5 แอมแปร์ ความต้านทานภายในของแบตเตอรี่มีค่าเท่าใด
3. หลอดไฟของไฟฉายมีกำลังไฟฟ้า 20 วัตต์ ใช้กับแบตเตอรี่ที่มีอีเอ็มเอฟ 9 โวลต์ จงหา
   ก. กระแสไฟฟ้าที่ผ่านหลอดไฟ
   ข. ถ้าใช้งานไฟฉายเป็นเวลานาน 10 นาที ไฟฉายนี้ใช้พลังงานไฟฟ้าไปกี่จูล
4. เมื่อต่อมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเข้ากับวงจรไฟฟ้าพบว่า ความต่างศักย์ระหว่างขั้วของมอเตอร์มีค่า 10 โวลต์ และมีกระแสไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้า 2 แอมแปร์ มอเตอร์นี้มีกำลังไฟฟ้ากี่วัตต์
5. เตารีดเครื่องหนึ่ง ใช้ไฟฟ้า 1400 วัตต์ เมื่อต่อใช้งานกับแหล่งจ่ายไฟฟ้า 220 โวลต์ จงหา
   ก. กระแสไฟฟ้าที่ผ่านเตารีด
   ข. ความต้านทานของวงจรไฟฟ้าของเตารีด
   ค. พลังงานไฟฟ้าที่เตารีดใช้ไปเมื่อใช้งานเป็นเวลา 10 นาที

14.4 แบตเตอรี่และวงจรไฟฟ้ากระแสตรงเบื้องต้น

การนำแบตเตอรี่มาใช้กับเครื่องใช้ไฟฟ้าส่วนใหญ่จะต้องมีการนำแบตเตอรี่หลายก้อนมาต่อกันเพื่อให้ได้อีเอ็มเอฟที่เหมาะกับการทำงานของเครื่องใช้ไฟฟ้านั้น ๆ ดังตัวอย่างในรูป 14.26

ก. ข.

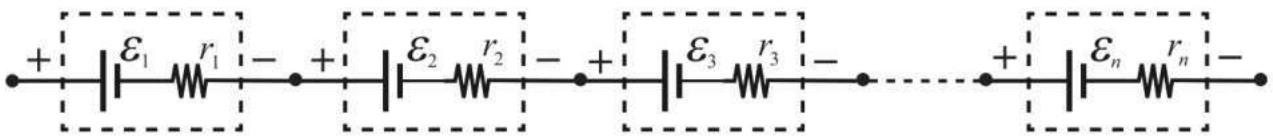
รูป 14.26 ก. การนำแบตเตอรี่หลายก้อนมาต่อกันสำหรับใช้กับโน๊ตบุ๊ค ข. ภายในแบตเตอรี่สำรองบางรุ่น

การนำแบตเตอรี่หลายก้อนมาต่อกันจะทำให้ได้อีเอ็มเอฟสมมูลและความต้านทานภายในสมมูลเป็นอย่างไร และ ในวงจรไฟฟ้ากระแสตรงที่ประกอบด้วยแบตเตอรี่หลายก้อนและตัวต้านทานหลายตัวต่อกันในรูปแบบต่าง ๆ จะมีปริมาณทางไฟฟ้าเป็นอย่างไร ศึกษาได้ต่อไปนี้

14.4.1 การต่อแบตเตอรี่

การนำแบตเตอรี่หลายก้อนมาต่อกันสามารถทำได้ 2 รูปแบบคือ แบบอนุกรม และแบบขนาน เช่นเดียวกับการต่อตัวต้านทาน โดยการต่อแบตเตอรี่แบบอนุกรมเป็นการนำแบตเตอรี่มาต่อเรียงขั้วกัน ดังรูป 14.27 ก. ซึ่งเขียนสัญลักษณ์ของการต่อแบตเตอรี่แบบอนุกรมจำนวน n ก้อน ได้ดังรูป 14.27 ข.

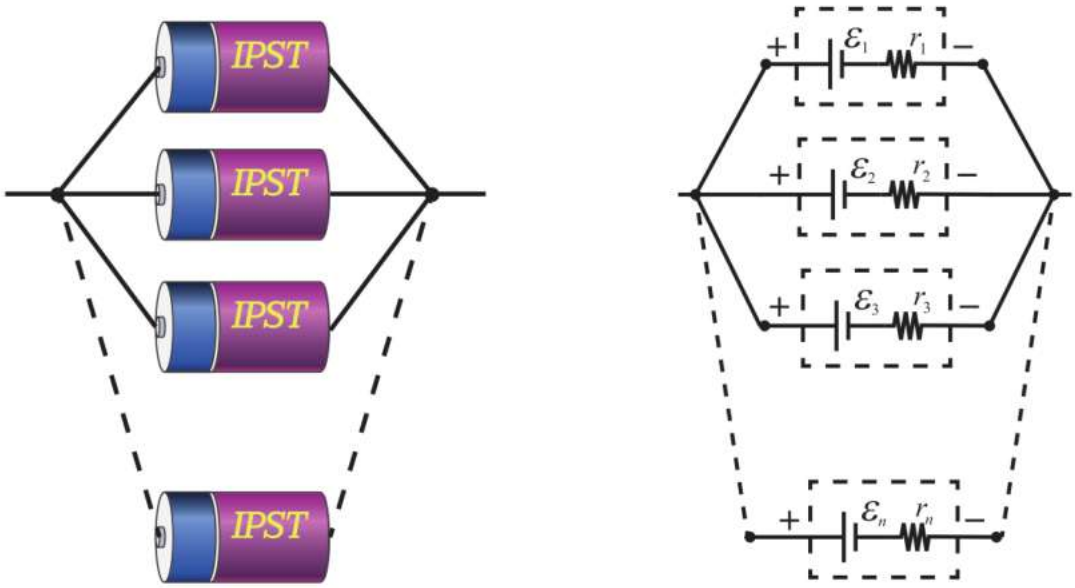
ก.



ข.

รูป 14.27 ก. การต่อแบตเตอรี่แบบอนุกรม ข. สัญลักษณ์การต่อแบตเตอรี่แบบอนุกรม

ส่วนการต่อแบตเตอรี่แบบขนาน เป็นการนำแบตเตอรี่มาต่อแบบขั้วเดียวกันต่อรวมกัน ดังรูป 14.28 ก. ซึ่งเขียนสัญลักษณ์ของการต่อแบตเตอรี่แบบขนานจำนวน n ก้อน ได้ดังรูป 14.28 ข.



ก. ข.

รูป 14.28 ก. การต่อแบตเตอรี่แบบขนาน ข. สัญลักษณ์การต่อแบตเตอรี่แบบขนาน

การต่อแบตเตอรี่แต่ละแบบ จะให้อีเอ็มเอฟสมมูลกับความต้านทานภายในสมมูลแตกต่างกันอย่างไร และแตกต่างจากการต่อตัวต้านทานหรือไม่ ศึกษาได้จากกิจกรรม 14.3

กิจกรรม 14.3 อีเอ็มเอฟสมมูลและความต้านทานภายในสมมูลของแบตเตอรี่

จุดประสงค์

1. หาอีเอ็มเอฟสมมูลของแบตเตอรี่ที่ต่อแบบอนุกรมและแบบขนาน
2. หาความต้านทานภายในสมมูลของแบตเตอรี่ที่ต่อแบบอนุกรม
3. หาความต้านทานภายในสมมูลของแบตเตอรี่ที่ต่อแบบขนาน

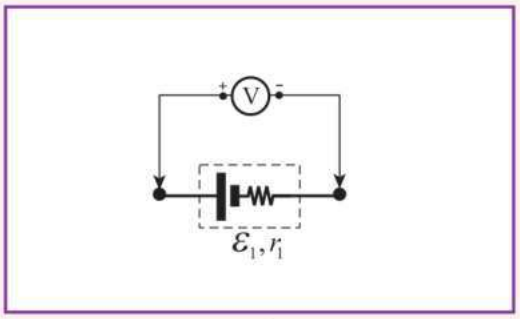
วัสดุและอุปกรณ์

1. แบตเตอรี่ขนาด 1.5 โวลต์ 1 ก้อน พร้อมกระบะ	2 ชุด
2. แอมมิเตอร์	1 เครื่อง
3. ตัวต้านทานขนาด 10 - 100 Ω	1 ตัว
4. โวลต์มิเตอร์	1 เครื่อง
5. สายไฟพร้อมปากหนีบ	8 เส้น

วิธีทำกิจกรรม

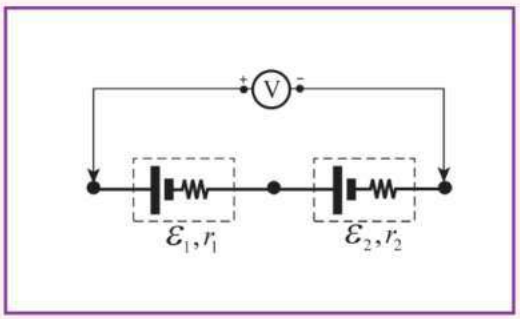
ตอนที่ 1 อีเอ็มเอฟสมมูลของแบตเตอรี่ที่ต่อแบบอนุกรมและแบบขนาน

1. ใช้โวลต์มิเตอร์วัดความต่างศักย์ระหว่างขั้วแบตเตอรี่ที่อยู่ในกระบะแต่ละก้อน ดังรูป ก. ซึ่งแสดงการต่ออุปกรณ์ได้ดังรูป ข. อ่านและบันทึกค่าที่วัดได้ ค่าสองค่านี้ใช้แทนอีเอ็มเอฟของแบตเตอรี่แต่ละก้อน ($\mathcal{E}_1$ และ $\mathcal{E}_2$)
2. นำแบตเตอรี่มาต่อแบบอนุกรม ใช้โวลต์มิเตอร์วัดความต่างศักย์ระหว่างขั้วของชุดแบตเตอรี่ ดังรูป ค. ซึ่งแสดงการต่ออุปกรณ์ได้ดังรูป ง. อ่านและบันทึกค่าที่วัดได้ ค่านี้ใช้แทนอีเอ็มเอฟสมมูลของการต่อแบบอนุกรม ($\mathcal{E}_s$)
3. เปลี่ยนการต่อแบตเตอรี่เป็นการต่อแบบขนาน ใช้โวลต์มิเตอร์วัดความต่างศักย์ระหว่างขั้วของชุดแบตเตอรี่ ดังรูป จ. ซึ่งแสดงการต่ออุปกรณ์ได้ดังรูป ฉ. อ่านและบันทึกค่าที่วัดได้ ค่านี้ใช้แทนอีเอ็มเอฟสมมูลของการต่อแบบขนาน ($\mathcal{E}_p$)

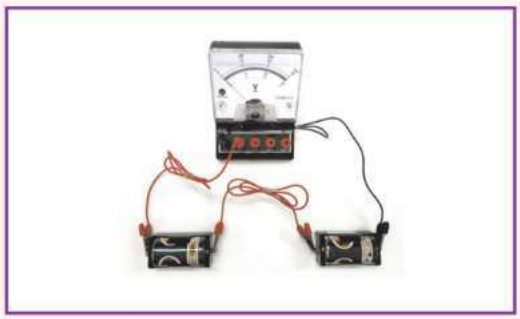


ก.

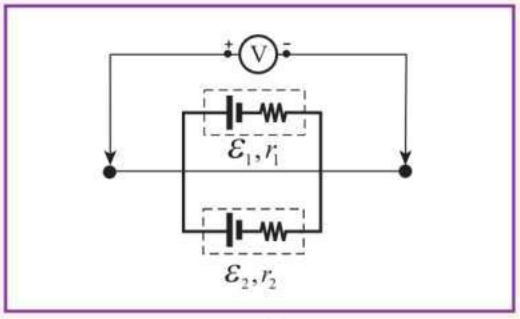
ข.



ค.



ง.



จ.

ฉ.

รูปกิจกรรม 14.3 ตอนที่ 1

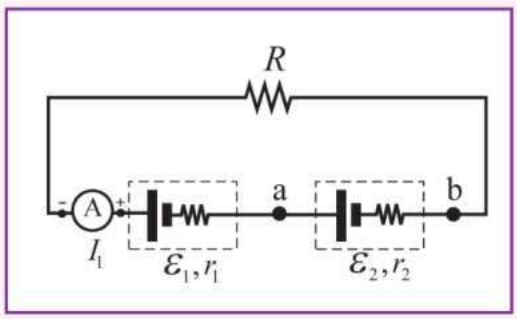
คำถามท้ายกิจกรรม ตอนที่ 1

☐ ในการต่อแบตเตอรี่แบบอนุกรม อีเอ็มเอฟสมมูลแตกต่างจากอีเอ็มเอฟของแบตเตอรี่แต่ละก้อนหรือไม่ อย่างไร

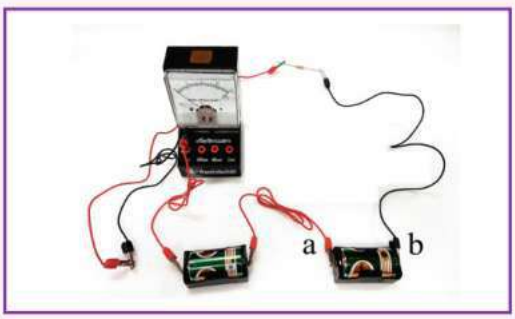
☐ ในการต่อแบตเตอรี่แบบขนาน อีเอ็มเอฟสมมูลแตกต่างจากอีเอ็มเอฟของแบตเตอรี่แต่ละก้อนหรือไม่ อย่างไร

ตอนที่ 2 ความต้านทานภายในสมมูลของแบตเตอรี่ที่ต่อแบบอนุกรม

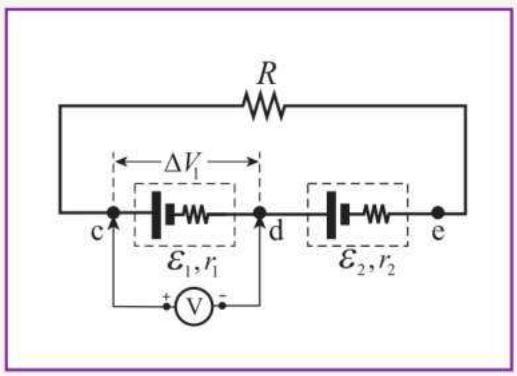
1. นำแบตเตอรี่พร้อมกระบะ 2 ชุดมาต่อแบบอนุกรมแล้วต่อกับตัวต้านทานและแอมมิเตอร์ ดังรูปกิจกรรมตอนที่ 2 ก. ซึ่งแสดงการต่ออุปกรณ์ดังรูป ข. วัดกระแสไฟฟ้าที่ผ่านแบตเตอรี่ก้อนที่ 1 (I_1) อ่านและบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้
2. เปลี่ยนตำแหน่งแอมมิเตอร์ไปต่อเข้ากับวงจรที่จุด a เพื่อวัดกระแสไฟฟ้าที่ผ่านแบตเตอรี่ก้อนที่ 2 (I_2) จากนั้น เปลี่ยนไปที่จุด b เพื่อวัดกระแสไฟฟ้าในวงจร (I) อ่านและบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้แต่ละครั้ง



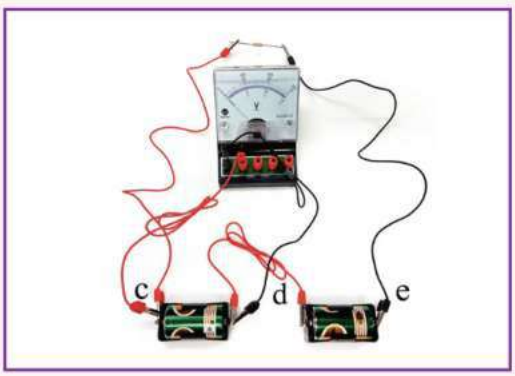
ก.



ข.



ค.



ง.

รูปกิจกรรม 14.3 ตอนที่ 2

3. นำแอมมิเตอร์ออก จากนั้นต่อโวลต์มิเตอร์เข้าในวงจร เพื่อวัดความต่างศักย์ระหว่างขั้วแบตเตอรี่ก้อนที่ 1 (ΔV_1) ดังรูป ค. ซึ่งแสดงการต่ออุปกรณ์ดังรูป ง. อ่านและบันทึกค่าความต่างศักย์ที่วัดได้
4. เปลี่ยนตำแหน่งการวัดของโวลต์มิเตอร์ไปวัดความต่างศักย์ระหว่างจุด d กับ e ซึ่งเป็นความต่างศักย์ระหว่างขั้วแบตเตอรี่ก้อนที่ 2(ΔV_2) จากนั้น เปลี่ยนไปวัดความต่างศักย์ระหว่างจุด c กับ e(ΔV_{ce})อ่านและบันทึกค่าความต่างศักย์ที่วัดได้แต่ละครั้ง
5. จากค่ากระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ที่วัดได้ รวมทั้งค่าอีเอ็มเอฟสมมูลของการต่อแบตเตอรี่แบบอนุกรมในกิจกรรมตอนที่ 1 คำนวณความต้านทานภายในของแบตเตอรี่แต่ละก้อน (r_1 และ r_2) และความต้านทานภายในสมมูล (r) ของแบตเตอรี่ที่ต่อแบบอนุกรม บันทึกผล

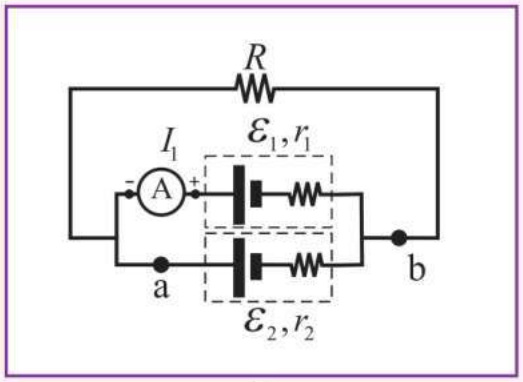
คำถามท้ายกิจกรรม ตอนที่ 2

☐ ในการต่อแบตเตอรี่แบบอนุกรม กระแสไฟฟ้า I_1 I_2 และ I ต่างกันหรือไม่ และผลรวมของ ΔV_1 และ ΔV_2 เท่ากับ ΔV_{ce} หรือไม่ อย่างไร

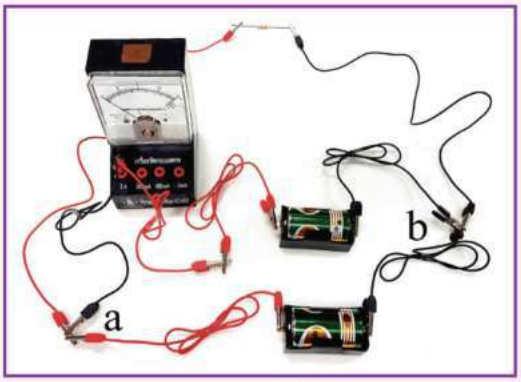
☐ ในการต่อแบตเตอรี่แบบอนุกรม ผลรวมของ r_1 และ r_2 เท่ากับ r หรือไม่ อย่างไร

ตอนที่ 3 ความต้านทานภายในสมมูลของแบตเตอรี่ที่ต่อแบบขนาน

1. นำแบตเตอรี่ 2 ชุดมาต่อแบบขนานแล้วต่อกับตัวต้านทานและแอมมิเตอร์ ดังรูปกิจกรรมตอนที่ 3 ก. ซึ่งแสดงการต่ออุปกรณ์ดังรูป ข. วัดกระแสไฟฟ้าที่ผ่านแบตเตอรี่ก้อนที่ 1 (I_1) อ่านและบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้
2. เปลี่ยนตำแหน่งแอมมิเตอร์ไปต่อเข้ากับวงจรที่จุด a เพื่อวัดกระแสไฟฟ้าที่ผ่านแบตเตอรี่ก้อนที่ 2 (I_2) จากนั้น เปลี่ยนไปที่จุด b เพื่อวัดกระแสไฟฟ้าในวงจร (I) อ่านและบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้แต่ละครั้ง

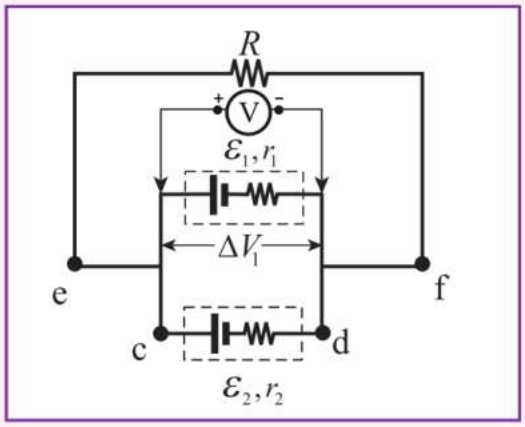


ก.

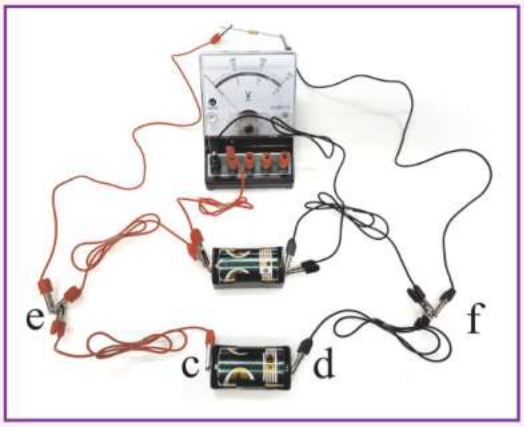


ข.

รูปกิจกรรม 14.3 ตอนที่ 3



ค.



ง.

รูปกิจกรรม 14.3 ตอนที่ 3

3. นำแอมมิเตอร์ออก จากนั้นต่อโวลต์มิเตอร์เข้าในวงจร เพื่อวัดความต่างศักย์ระหว่างขั้วแบตเตอรี่ก้อนที่ 1 (ΔV_1) ดังรูป ค. ซึ่งแสดงการต่ออุปกรณ์ดังรูป ง. อ่านและบันทึกค่าความต่างศักย์ที่วัดได้
4. เปลี่ยนตำแหน่งการวัดของโวลต์มิเตอร์ไปวัดความต่างศักย์ระหว่างจุด c กับ d ซึ่งเป็นความต่างศักย์ระหว่างขั้วแบตเตอรี่ก้อนที่ $2(\Delta V_2)$ จากนั้น เปลี่ยนไปวัดความต่างศักย์ระหว่างจุด e กับ f (ΔV_{ef}) อ่านและบันทึกค่าความต่างศักย์ที่วัดได้แต่ละครั้ง
5. จากค่ากระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ที่วัดได้ รวมทั้งค่าอีเอ็มเอฟสมมูลของการต่อแบตเตอรี่แบบขนานในกิจกรรมตอนที่ 1 คำนวณความต้านทานภายในสมมูลของแบตเตอรี่ที่ต่อแบบขนาน (r)

คำถามท้ายกิจกรรม ตอนที่ 3

☐ ในการต่อแบตเตอรี่แบบขนาน ผลรวมของกระแสไฟฟ้า I_1 และ I_2 เท่ากับ I หรือไม่ และความต่างศักย์ ΔV_1 ΔV_2 และ ΔV_{ef} ต่างกันหรือไม่ อย่างไร

☐ ในการต่อแบตเตอรี่แบบขนาน ผลรวมของส่วนกลับของ r_1 กับส่วนกลับของ r_2 เท่ากับส่วนกลับของ r หรือไม่ อย่างไร

จากกิจกรรม 14.3 พบว่า ในวงจรไฟฟ้าที่มีการต่อแบตเตอรี่แบบอนุกรม

1. อีเอ็มเอฟสมมูลเท่ากับผลบวกของอีเอ็มเอฟของแบตเตอรี่แต่ละก้อน หรือ $\mathcal{E}_s = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2$
2. กระแสไฟฟ้าในวงจรเท่ากับกระแสไฟฟ้าที่ผ่านแบตเตอรี่แต่ละก้อน หรือ $I = I_1 = I_2$
3. ความต่างศักย์ระหว่างขั้วแบตเตอรี่ที่ต่อแบบอนุกรมเท่ากับผลบวกของความต่างศักย์ระหว่างขั้วแบตเตอรี่แต่ละก้อน หรือ $\Delta V_{ce} = \Delta V_1 + \Delta V_2$

ส่วนในวงจรไฟฟ้าที่มีการต่อแบตเตอรี่แบบขนาน

1. อีเอ็มเอฟสมมูลเท่ากับของอีเอ็มเอฟของแบตเตอรี่แต่ละก้อน หรือ $\mathcal{E}_p = \mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_2$
2. กระแสไฟฟ้าในวงจรเท่ากับผลบวกของกระแสไฟฟ้าที่ผ่านแบตเตอรี่แต่ละก้อน หรือ $I = I_1 + I_2$
3. ความต่างศักย์ระหว่างขั้วแบตเตอรี่ที่ต่อแบบขนานเท่ากับความต่างศักย์ระหว่างขั้วแบตเตอรี่แต่ละก้อน หรือ $\Delta V_{ef} = \Delta V_1 = \Delta V_2$

จากข้อมูลข้างต้น สามารถนำมาวิเคราะห์หา **ความต้านทานภายในสมมูล** (equivalent internal resistance) ของแบตเตอรี่ที่ต่อกันแบบอนุกรมและแบบขนาน ได้ดังนี้

ก. ความต้านทานภายในสมมูลของแบตเตอรี่ที่ต่อแบบอนุกรม

จากผลการทำกิจกรรม 14.3 ตอนที่ 2

$$\Delta V_{ce} = \Delta V_1 + \Delta V_2 \qquad \text{(g)}$$

และจาก $\mathcal{E} = \Delta V + Ir$ จะได้ว่า $\Delta V_1 = \mathcal{E}_1 - I_1 r_1$ และ $\Delta V_2 = \mathcal{E}_2 - I_2 r_2$

แทนลงใน (g) จะได้

$$\begin{aligned} \Delta V_{ce} &= (\mathcal{E}_1 - I_1 r_1) + (\mathcal{E}_2 - I_2 r_2) \\ &= (\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2) - (I_1 r_1 + I_2 r_2) \end{aligned} \qquad \text{(h)}$$

และ จากกิจกรรม 14.3 ตอนที่ 2 $I = I_1 = I_2$

ดังนั้น อาจเขียนสมการ (h) ได้ในรูปของกระแสไฟฟ้าในวงจรเป็น

$$\Delta V_{ce} = (\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2) - I(r_1 + r_2) \qquad \text{(i)}$$

พิจารณาสมการ (i) เทียบกับสมการ $\mathcal{E} = \Delta V + Ir$ จะได้ว่า การต่อแบตเตอรี่แบบอนุกรม อีเอ็มเอฟสมมูลเท่ากับ

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2$$

ซึ่งสอดคล้องกับผลการทำกิจกรรม ส่วนความต้านทานภายในสมมูล จะได้ว่า

$$r = r_1 + r_2$$

นั่นคือ ความต้านทานภายในสมมูลของแบตเตอรี่ที่ต่อแบบอนุกรม มีค่าสูงขึ้นและเท่ากับผลบวกของความต้านภายในของแบตเตอรี่แต่ละก้อน

ข. ความต้านทานภายในสมมูลของแบตเตอรี่ที่ต่อแบบขนาน

จากผลการทำกิจกรรม 14.3 ตอนที่ 3

$$\Delta V_{ef} = \Delta V_1 = \Delta V_2 \qquad \text{(j)}$$

และจาก $\Delta V = \mathcal{E} - Ir$ จะได้ $\Delta V_1 = \mathcal{E}_1 - I_1 r_1$ และ $\Delta V_2 = \mathcal{E}_2 - I_2 r_2$

แทนลงใน (j) จะได้

$$\Delta V_{ef} = \mathcal{E}_1 - I_1 r_1 = \mathcal{E}_2 - I_2 r_2 \qquad \text{(k)}$$

และ จากกิจกรรม 14.3 ตอนที่ 3 $I = I_1 + I_2$

เนื่องจากแบตเตอรี่ที่นำมาต่อกันมีสมบัติต่าง ๆ เหมือนกัน กระแสไฟฟ้าที่ผ่านแบตเตอรี่แต่ละก้อน จึงเท่ากัน นั่นคือ $I_1 = I_2$

ดังนั้น $I = 2I_1 = 2I_2$

หรือ $I_1 = I_2 = \frac{I}{2}$

แทนค่าลงใน (k) จะได้

$$\Delta V_{ef} = \mathcal{E}_1 - \frac{I}{2} r_1 = \mathcal{E}_2 - \frac{I}{2} r_2 \qquad \text{(l)}$$

พิจารณาสมการ (1) เทียบกับ $\Delta V = \mathcal{E} - Ir$ จะได้อีเอ็มเอฟสมมูลของการต่อแบตเตอรี่แบบขนานเท่ากับ

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_2$$

ซึ่งสอดคล้องกับผลการทำกิจกรรม

ส่วนความต้านทานสมมูล $$r = \frac{r_1}{2} = \frac{r_2}{2}$$

นั่นคือ ความต้านทานภายในสมมูลของแบตเตอรี่ที่ต่อแบบขนานมีค่าลดลงและเท่ากับความต้านภายในของแบตเตอรี่ก้อนเดียวหารด้วยจำนวนแบตเตอรี่

จากแนวทางการวิเคราะห์ผลการทำกิจกรรม 14.3 เราสามารถนำมาพิจารณาในกรณีที่มีการนำแบตเตอรี่จำนวน n ก้อน มาต่อกันแบบอนุกรมและแบบขนาน ดังนี้

ให้แบตเตอรี่จำนวน n ก้อนมีอีเอ็มเอฟ $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, ..., \mathcal{E}_n$ และความต้านทานภายใน r_1, r_2,...r_n ตามลำดับ เมื่อนำมาต่อแบบอนุกรม อีเอ็มเอฟสมมูล $\mathcal{E}$ และความต้านทานภายในสมมูล r มีค่าดังนี้

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + ... + \mathcal{E}_n \qquad (14.9\ a)$$

$$r = r_1 + r_2 + ... + r_n \qquad (14.9\ b)$$

เมื่อนำมาต่อแบบขนาน อีเอ็มเอฟสมมูล $\mathcal{E}$ และความต้านทานภายในสมมูล r มีค่าดังนี้

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_2 = ... = \mathcal{E}_n \qquad (14.10\ a)$$

และ $$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + ... + \frac{1}{r_n} \qquad (14.10\ b)$$

ดังนั้น การนำแหล่งกำเนิดไฟฟ้ามาต่อแบบอนุกรม จะช่วยให้ได้อีเอ็มเอฟเพียงพอต่อการใช้งาน เช่น การต่อเซลล์ไฟฟ้าเคมีภายในแบตเตอรี่ของรถยนต์ เป็นการต่ออนุกรม ของเซลล์ 6 เซลล์ ที่แต่ละเซลล์มีอีเอ็มเอฟ 2 โวลต์ ทำให้แบตเตอรี่รถยนต์มีอีเอ็มเอฟ 12 โวลต์ สำหรับใช้งาน ดังรูป 14.29 ก.

ก.

ข.

รูป 14.29 ก. แบตเตอรี่รถยนต์ ข. ภายในแบตเตอรี่สำรอง

ส่วนการนำแหล่งกำเนิดไฟฟ้ามาต่อแบบขนาน จะช่วยให้แหล่งกำเนิดไฟฟ้าสามารถให้พลังงานไฟฟ้าได้นานมากขึ้น เช่น การต่อแบตเตอรี่ภายในกล่องบรรจุแบตเตอรี่สำรอง (power bank) เป็นการต่อแบบขนาน เพื่อให้สามารถให้พลังงานไฟฟ้ากับอุปกรณ์พกพาได้นาน และลดความต้านทานภายในสมมูล ดังรูป 14.29 ข.

ความรู้เพิ่มเติม

ข้อควรระวังในการต่อแบตเตอรี่แบบอนุกรมและแบบขนาน

- ☐ ในการต่อแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบอนุกรม ระวังไม่ให้มีการกลับขั้วของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าอันใดอันหนึ่ง เพราะจะทำให้ไฟฟ้ามีความร้อนสูง ถ้าเป็นแบตเตอรี่ อาจทำให้แบตเตอรี่แตกหรือระเบิดได้
- ☐ ในการต่อแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบขนาน ต้องใช้แหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่มีอีเอ็มเอฟเท่ากันหรือใกล้เคียงกันมาก เพราะถ้าอีเอ็มเอฟต่างกันมาก จะทำให้เกิดความร้อนสูงจนทำให้แหล่งกำเนิดไฟฟ้าเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็ว อายุการใช้งานสั้นลง ถ้าเป็นแบตเตอรี่ อาจทำให้แบตเตอรี่แตกหรือระเบิดได้เช่นกัน

ตัวอย่าง 14.10 นำแบตเตอรี่ขนาด 1.2 โวลต์ ความต้านทานภายใน 0.15 โอห์ม จำนวน 4 ก้อนมาต่อแบบอนุกรมสำหรับนำไปเป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าให้กับเครื่องใช้ไฟฟ้า จงหา

ก. อีเอ็มเอฟสมมูลของแบตเตอรี่ที่ต่อแบบอนุกรม

ข. ความต้านทานภายในสมมูลของแบตเตอรี่ที่ต่อแบบอนุกรม

ก. แนวคิด อีเอ็มเอฟสมมูลของแบตเตอรี่ที่ต่อแบบอนุกรมมีค่าสูงขึ้น โดยมีค่าเท่ากับผลบวกของอีเอ็มเอฟของแบตเตอรี่แต่ละก้อนที่นำมาต่ออนุกรมกัน ดังสมการ

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + ... + \mathcal{E}_n$$

วิธีทำ แทนค่าเพื่อหาอีเอ็มเอฟสมมูลของแบตเตอรี่ที่ต่อแบบอนุกรม จะได้

$$\begin{aligned}\mathcal{E} &= 1.2\,\text{V} + 1.2\,\text{V} + 1.2\,\text{V} + 1.2\,\text{V} \\ &= 4(1.2)\,\text{V} \\ &= 4.8\,\text{V}\end{aligned}$$

ตอบ อีเอ็มเอฟสมมูลของแบตเตอรี่ที่นำมาต่อแบบอนุกรมนี้ เท่ากับ 4.8 โวลต์

ข. แนวคิด ความต้านทานภายในสมมูลของแบตเตอรี่ที่ต่อแบบอนุกรมจะมีค่าสูงขึ้น โดยมีค่าเท่ากับผลบวกของความต้านทานภายในของแต่ละแบตเตอรี่แต่ละก้อนที่นำมาต่ออนุกรมกัน ดังสมการ

$$r = r_1 + r_2 + ... + r_n$$

วิธีทำ แทนค่าเพื่อหาความต้านทานภายในสมมูลของแบตเตอรี่ที่ต่อแบบอนุกรม จะได้

$$\begin{aligned}r &= 0.15\,\Omega + 0.15\,\Omega + 0.15\,\Omega + 0.15\,\Omega \\ &= 4(0.15\,\Omega) \\ &= 0.60\,\Omega\end{aligned}$$

ตอบ ความต้านทานภายในสมมูลของแบตเตอรี่ที่นำมาต่อแบบอนุกรมนี้ เท่ากับ 0.60 โอห์ม

ตัวอย่าง 14.11 นำแบตเตอรี่ขนาด 3.7 โวลต์ ความต้านทานภายใน 0.18 โอห์ม จำนวน 3 ก้อนมาต่อแบบขนานสำหรับนำไปเป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าให้กับเครื่องใช้ไฟฟ้า จงหา

ก. อีเอ็มเอฟสมมูลของแบตเตอรี่ที่ต่อแบบขนาน

ข. ความต้านทานภายในสมมูลของแบตเตอรี่ที่ต่อแบบขนาน

ก. แนวคิด อีเอ็มเอฟสมมูลของแบตเตอรี่ที่ต่อแบบขนานมีค่าเท่าเดิม ดังสมการ

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + ... + \mathcal{E}_n$$

วิธีทำ แทนค่าเพื่อหาอีเอ็มเอฟสมมูลของแบตเตอรี่ที่ต่อแบบขนาน จะได้

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_2 = 3.7 \text{ V}$$

ตอบ อีเอ็มเอฟสมมูลของแบตเตอรี่ที่นำมาต่อแบบขนานนี้ เท่ากับ 3.7 โวลต์

ข. แนวคิด ความต้านทานภายในสมมูลของแบตเตอรี่ที่ต่อแบบขนานมีค่าลดลง ดังสมการ

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + ... + \frac{1}{r_n}$$

วิธีทำ แทนค่าเพื่อหาความต้านทานภายในสมมูลของแบตเตอรี่ที่ต่อแบบขนาน จะได้

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{0.18\Omega} + \frac{1}{0.18\Omega} + \frac{1}{0.18\Omega}$$

$$= \frac{3}{0.18\Omega}$$

จะได้

$$r = \frac{0.18\Omega}{3}$$

$$= 0.06\Omega$$

ตอบ ความต้านทานภายในสมมูลของแบตเตอรี่ที่นำมาต่อแบบขนานนี้ เท่ากับ 0.06 โอห์ม

14.4.2 การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้ากระแสตรง

วงจรไฟฟ้ากระแสตรงเป็นวงจรที่ประกอบด้วยเครื่องใช้ไฟฟ้าหรือตัวต้านทานที่ต่ออยู่กับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่ให้ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งจากการศึกษาเกี่ยวกับกระแสไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าที่ผ่านมา เราสามารถนำความรู้ความเข้าใจที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อคำนวณปริมาณต่าง ๆ ในวงจรไฟฟ้ากระแสตรงได้ ดังตัวอย่างต่อไปนี้

ตัวอย่าง 14.12 แบตเตอรี่อีเอ็มเอฟ 12 โวลต์ มีความต้านทานภายใน 0.20 โอห์ม ต่ออยู่กับตัวต้านทาน ที่มีความต้านทาน 3.8 โอห์ม จงหา

ก. กระแสไฟฟ้าในวงจร

ข. ความต่างศักย์ระหว่างปลายของตัวต้านทาน

ก. แนวคิด กระแสไฟฟ้าในวงจรหาได้จากสมการ (14.6) ซึ่งสามารถจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$$

วิธีทำ แทนค่าลงในสมการ จะได้

$$\begin{aligned} I &= \frac{\mathcal{E}}{R+r} \\ &= \frac{12\,\text{V}}{3.8\,\Omega + 0.2\,\Omega} \\ &= 3.0\,\text{A} \end{aligned}$$

ตอบ กระแสไฟฟ้าในวงจรเท่ากับ 3.0 แอมแปร์

ข. แนวคิด หาความต่างศักย์ระหว่างขั้วของตัวต้านทานจากสมการตามกฎของโอห์ม ซึ่งสามารถจัดรูปใหม่ได้เป็น $\Delta V = IR$

วิธีทำ แทนค่าลงในสมการ จะได้

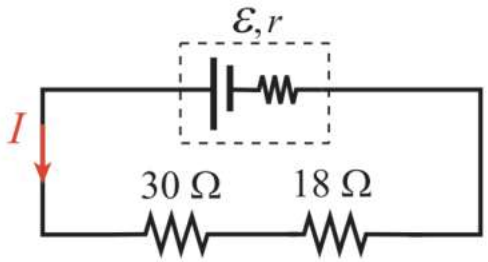
$$\begin{aligned} \Delta V &= IR \\ &= (3.0\,\text{A})(3.8\,\Omega) \\ &= 11.4\,\text{V} \end{aligned}$$

ตอบ ความต่างศักย์ระหว่างปลายของตัวต้านทานเท่ากับ 11.4 โวลต์

ตัวอย่าง 14.13 จากวงจรไฟฟ้าดังรูป แบตเตอรี่มีอีเอ็มเอฟ 6.0 โวลต์ ความต้านทานภายใน 0.5 โอห์ม จงหากระแสไฟฟ้าในกรณีที่

ก. คำนึงถึงความต้านทานภายในของแบตเตอรี่

ข. ไม่คำนึงถึงความต้านทานภายในของแบตเตอรี่



รูป ประกอบตัวอย่าง 14.12

ก. แนวคิด หาความต้านทานสมมูล จากผลรวมของความต้านทานของตัวต้านทานแต่ละตัว จากนั้นนำไปหากระแสไฟฟ้าโดยใช้สมการ (14.6)

วิธีทำ ความต้านทานสมมูลของวงจรไฟฟ้านี้เท่ากับ

$$\begin{aligned} R &= R_1 + R_2 \\ &= 30\,\Omega + 18\,\Omega \\ &= 48\,\Omega \end{aligned}$$

เมื่อคำนึงถึงความต้านทานภายใน จากสมการ (14.6) จะได้กระแสไฟฟ้าในวงจร

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$$

แทนค่าลงในสมการ จะได้

$$\begin{aligned} I &= \frac{6.0\,\text{V}}{48\,\Omega + 0.5\,\Omega} \\ &= 0.124\,\text{A} \end{aligned}$$

ตอบ เมื่อคำนึงถึงความต้านทานภายใน กระแสไฟฟ้าในวงจรเท่ากับ 0.124 แอมแปร์

ข. แนวคิด หาความต้านทานสมมูล และกระแสไฟฟ้าด้วยวิธีเดียวกับข้อ ก. แต่พิจารณาให้ $r = 0\ \Omega$

วิธีทำ เมื่อไม่คำนึงถึงความต้านทานภายใน จะได้กระแสไฟฟ้าในวงจร

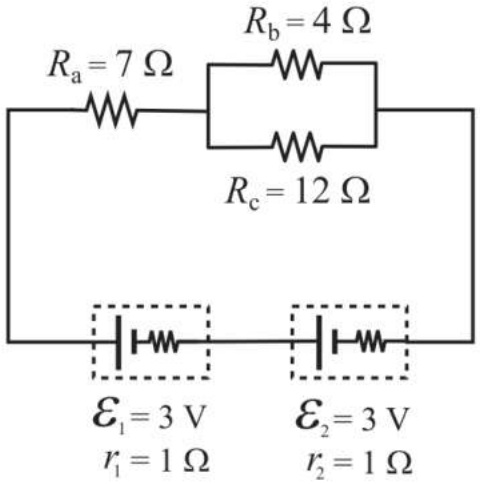
$$\begin{aligned} I &= \frac{6.0\,\text{V}}{48\,\Omega + 0\,\Omega} \\ &= 0.125\,\text{A} \end{aligned}$$

ตอบ เมื่อไม่คำนึงถึงความต้านทานภายใน กระแสไฟฟ้าในวงจรเท่ากับ 0.125 แอมแปร์

ข้อสังเกต

จะเห็นได้ว่า ในกรณีที่ความต้านทานของวงจรมากกว่าความต้านทานภายในมาก ๆ เมื่อคำนวณกระแสไฟฟ้า จากกรณีที่คิดความต้านทานภายในและไม่คิดความต้านทานภายใน จะได้ค่าที่คำนวณออกมาต่างกันเพียงเล็กน้อย

ตัวอย่าง 14.14 จงหากระแสไฟฟ้าที่ผ่านตัวต้านทานที่มีความต้านทาน R_a R_b และ R_c ในวงจรไฟฟ้าดังรูป



รูป ประกอบตัวอย่าง 14.13

แนวคิด ใช้สมการที่เกี่ยวข้องหาความต้านทานภายนอกสมมูลของวงจร จากนั้นหาอีเอ็มเอฟสมมูลและความต้านทานภายในสมมูลของแบตเตอรี่ แล้วนำไปหากระแสไฟฟ้าในวงจร จากกระแสไฟฟ้าที่ได้นำไปพิจารณาหากระแสไฟฟ้าที่ผ่านตัวต้านทานแต่ละตัวที่ต้องการ

วิธีทำ ตัวต้านทาน R_a ต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน R_b และ R_c ที่ต่อขนานกัน หาความต้านทานภายนอกสมมูลได้ดังนี้

ให้ R_{bc} เป็นความต้านทานสมมูลของความต้านทาน R_b และ R_c ที่ต่อขนานกัน จะได้

$$\begin{aligned}\frac{1}{R_{bc}} &= \frac{1}{R_b} + \frac{1}{R_c} \\ &= \frac{1}{4\Omega} + \frac{1}{12\Omega} \\ &= \frac{1}{3\Omega}\end{aligned}$$

ดังนั้น $R_{bc} = 3\Omega$

ให้ R เป็นความต้านทานสมมูลของความต้านทาน R_a และ R_b กับ R_c จะได้

$$\begin{aligned}R &= R_a + R_{bc} \\ &= 7\Omega + 3\Omega \\ &= 10\Omega\end{aligned}$$

วงจรไฟฟ้าดังรูป จึงเสมือนมีความต้านทานค่าเดียวเท่ากับ $10\,\Omega$ ต่อกับแบตเตอรี่ และเนื่องจากแบตเตอรี่ต่อกันแบบอนุกรม ดังนั้น

อีเอ็มเอฟสมมูล $\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2$

$= 6\,\text{V}$

ความต้านทานภายในสมมูล $r = r_1 + r_2$

$= 2\,\Omega$

หากระแสไฟฟ้าในวงจรจากสมการ $I = \dfrac{\mathcal{E}}{R+r}$

แทนค่า จะได้ $I = \dfrac{6\,\text{V}}{10\,\Omega + 2\,\Omega}$

$= 0.5\,\text{A}$

ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่ผ่านความต้านทาน R_a เท่ากับ 0.5 แอมแปร์

ให้ I_b และ I_c เป็นกระแสไฟฟ้าผ่านความต้านทาน R_b และ R_c ตามลำดับ จะได้

$$I_b + I_c = 0.5\,\text{A}$$

และให้ V_b และ V_c เป็นความต่างศักย์ระหว่างปลายของความต้านทาน R_b และ R_c ตามลำดับ

จะได้ $V_b = V_c$

จากกฎของโอห์มได้ $I_b R_b = I_c R_c$

แทนค่า $(I_b)(4\,\Omega) = (0.5\,\text{A} - I_b)(12\,\Omega)$

จะได้ $I_b = 0.375\,\text{A}$

และ $I_c = 0.5\,\text{A} - I_b$

$= 0.125\,\text{A}$

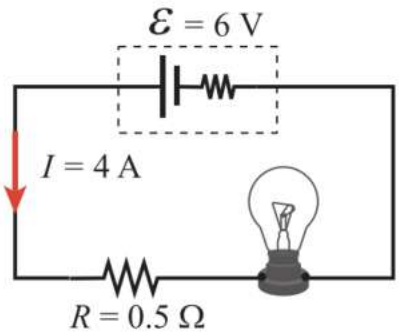
ตอบ กระแสไฟฟ้าที่ผ่านความต้านทาน R_a R_b และ R_c เท่ากับ 0.5 แอมแปร์ 0.375 แอมแปร์ และ 0.125 แอมแปร์ ตามลำดับ

ตัวอย่าง 14.15 วงจรไฟฟ้าดังรูป มีกระแสไฟฟ้า 4 แอมแปร์ ผ่านความต้านทาน 0.5 โอห์ม ต่อกับหลอดไฟ และ แบตเตอรี่ 6 โวลต์ ถ้าไม่คิดความต้านทานภายในแบตเตอรี่ จงหา

ก. กระแสไฟฟ้าที่ผ่านหลอดไฟ

ข. ความต่างศักย์ระหว่างปลายของตัวต้านทาน

ค. ความต้านทานของหลอดไฟ



รูป ประกอบตัวอย่าง 14.14

ง. พลังงานไฟฟ้าที่ถูกใช้ไปใน 10 วินาที

จ. กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไปในตัวต้านทาน

แนวคิด ใช้กฎของโอห์ม และ ความสัมพันธ์ระหว่างอีเอ็มเอฟกับกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ หากระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์ และ ความต้านทานที่ต้องการ จากนั้นหาพลังงานไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ต้องการจากสมการ $W = Q\mathcal{E}$ และ $P = I\Delta V$

วิธีทำ ก. ตัวต้านทานและหลอดไฟต่อแบบอนุกรมกัน กระแสไฟฟ้าที่ผ่านตัวต้านทานและหลอดไฟจึงมีค่าเท่ากันโดยกระแสไฟฟ้าที่ผ่านตัวต้านทานเท่ากับ 4 แอมแปร์ ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่ผ่านหลอดไฟมีค่าเท่ากับ 4 แอมแปร์ ด้วย

ข. ความต่างศักย์ระหว่างปลายของตัวต้านทาน หาได้จาก $\Delta V = IR$

แทนค่าได้ $$\Delta V = (4\,\text{A})(0.5\,\Omega) = 2\,\text{V}$$

ค. ให้ R_1 เป็นความต้านทานของหลอดไฟ จาก $I = \dfrac{\mathcal{E}}{(R + R_1) + r}$

หรือ $\mathcal{E} = I(R + R_1)$ เมื่อความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ $r = 0$

แทนค่า $$6\,\text{V} = (4\,\text{A})(0.5\,\Omega + R_1)$$

จะได้ $$R_1 = 1\,\Omega$$

ง. พลังงานไฟฟ้าที่ถูกใช้ไปใน 10 วินาทีเท่ากับพลังงานไฟฟ้าที่ได้รับจากแบตเตอรี่จาก

$$W = \Delta Q \Delta V = I \Delta t \Delta V$$

ซึ่ง $\Delta V = \mathcal{E} = 6\,\text{V}$

แทนค่าจะได้ $$W = (4\,\text{A})(10\,\text{s})(6\,\text{V}) = 240\,\text{J}$$

จ. กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไปในตัวต้านทานหาได้จาก $P = I^2R$

แทนค่าจะได้ $$P = (4\,\text{A})^2(0.5\,\Omega) = 8\,\text{W}$$

ตอบ ก. กระแสไฟฟ้าที่ผ่านหลอดไฟเท่ากับ 4 แอมแปร์

ข. ความต่างศักย์ระหว่างปลายของตัวต้านทานเท่ากับ 2 โวลต์

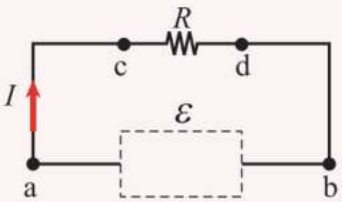
ค. ความต้านทานของหลอดไฟเท่ากับ 1 โอห์ม

ง. พลังงานไฟฟ้าที่ถูกใช้ไปใน 10 วินาที เท่ากับ 240 จูล

จ. กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไปในตัวต้านทานเท่ากับ 8 วัตต์

คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 14.4

1. เมื่อต่อแบตเตอรี่ที่เหมือนกันจำนวนหนึ่งแบบอนุกรมกับตัวต้านทานให้ครบวงจร ปริมาณใดต่อไปนี้ของแบตเตอรี่แต่ละก้อนมีค่าเท่ากัน
   ก. กระแสไฟฟ้าที่ผ่านแบตเตอรี่
   ข. ความต่างศักย์ระหว่างขั้วแบตเตอรี่
   ค. อีเอ็มเอฟ
   ง. ความต้านทานภายใน
2. ถ้าต้องการต่อแบตเตอรี่ให้มีอีเอ็มเอฟสูงขึ้น จะต้องต่อแบตเตอรี่แบบใด และเมื่อนำไปใช้งานกับเครื่องใช้ไฟฟ้า จะมีผลดีและผลเสียอย่างไร
3. การต่อแบตเตอรี่แบบขนานมีผลดีอย่างไร ให้ระบุมา 2 ข้อ
4. ในวงจรไฟฟ้าที่ประกอบด้วยแบตเตอรี่อีเอ็มเอฟ $\mathcal{E}$ และตัวต้านทานที่มีความต้านทาน R มีกระแสไฟฟ้าในวงจร I ดังรูป ให้ตอบคำถามต่อไปนี้

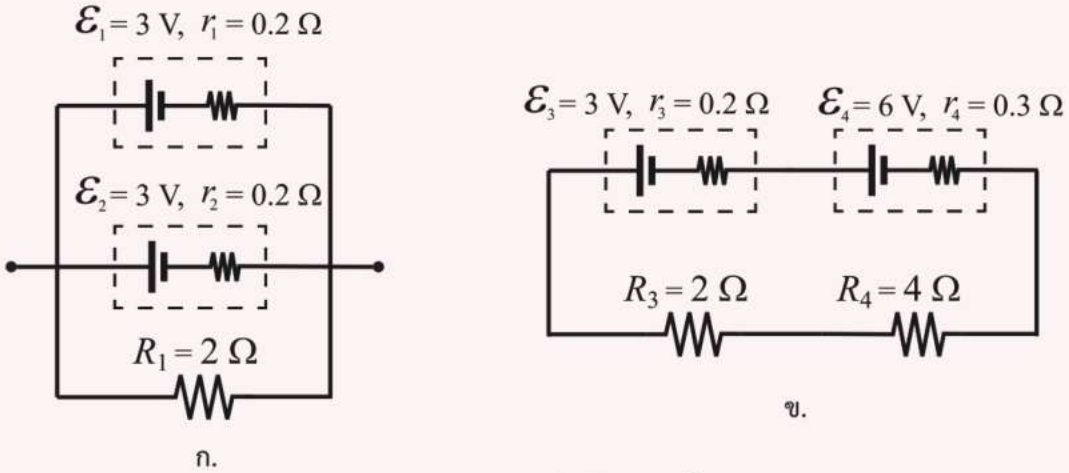


   ก. ขั้วของแบตเตอรี่ที่ต่อกับจุด a เป็นขั้วบวกหรือลบ
   ข. กระแสไฟฟ้าที่ผ่านแต่ละจุด มีค่าแตกต่างกันหรือไม่ อย่างไร
   ค. ความต่างศักย์ระหว่างจุด a กับ b และระหว่างจุด c กับ d มีค่าแตกต่างกันหรือไม่ อย่างไร
5. ในวงจรไฟฟ้าที่ประกอบด้วยแบตเตอรี่อีเอ็มเอฟ $\mathcal{E}$ ที่มีความต้านทานภายในเป็นศูนย์ และตัวต้านทานที่มีความต้านทาน R_1 ถ้ามีการต่อตัวต้านทานที่มีความต้านทาน R_2 เพิ่มอีกตัวแบบอนุกรม โดยที่ R_2 เท่ากับ R_1 ให้ตอบคำถามต่อไปนี้
   ก. กระแสไฟฟ้าที่ผ่าน R_1 เปลี่ยนแปลงหรือไม่ อย่างไร
   ข. ความต่างศักย์ระหว่างปลาย R_1 เปลี่ยนแปลงไปหรือไม่ อย่างไร

แบบฝึกหัด 14.4

1. นำแบตเตอรี่ขนาด 1.5 โวลต์ ความต้านทานภายใน 0.2 โอห์ม จำนวน 4 ก้อนมาต่อแบบอนุกรมสำหรับนำไปเป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าให้กับเครื่องใช้ไฟฟ้า จงหา
   ก. อีเอ็มเอฟสมมูลของแบตเตอรี่ที่ต่อแบบอนุกรม
   ข. ความต้านทานภายในสมมูลของแบตเตอรี่ที่ต่อแบบอนุกรม

2. นำแบตเตอรี่ขนาด 3 โวลต์ ความต้านทานภายใน 0.3 โอห์ม จำนวน 3 ก้อนมาต่อแบบขนาน สำหรับนำไปเป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าให้กับเครื่องใช้ไฟฟ้า จงหา
   ก. อีเอ็มเอฟสมมูลของแบตเตอรี่ที่ต่อแบบขนาน
   ข. ความต้านทานภายในสมมูลของแบตเตอรี่ที่ต่อแบบขนาน
3. เมื่อนำแบตเตอรี่สี่ก้อนซึ่งต่อกันแบบอนุกรมไปต่อกับตัวต้านทานขนาด 5.6 โอห์ม กระแสไฟฟ้าในวงจรจะมีค่าเท่าใด ถ้าแบตเตอรี่แต่ละก้อนมีอีเอ็มเอฟ 1.5 โวลต์ และความต้านทานภายใน 0.1 โอห์ม
4. ตัวต้านทานสามตัวมีความต้านทาน 1 โอห์ม 100 โอห์ม และ 1000 โอห์ม ถ้านำตัวต้านทานแต่ละตัวไปต่อกับแบตเตอรี่ที่มีอีเอ็มเอฟ 3 โวลต์ และความต้านทานภายใน 0.5 โอห์ม ความต่างศักย์ระหว่างปลายของตัวต้านทานเป็นเท่าใด และความต่างศักย์ระหว่างปลายของตัวต้านทานใด มีค่าใกล้อีเอ็มเอฟของแบตเตอรี่มากกว่า เพราะเหตุใด
5. ในวงจรไฟฟ้า ดังรูป ก. และ ข.

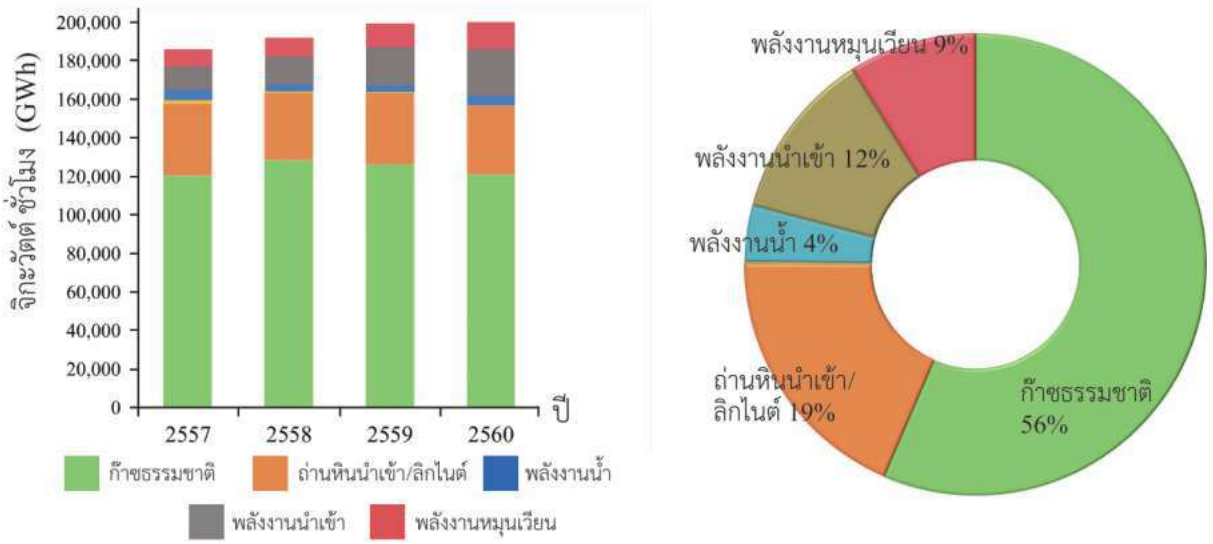


รูป ประกอบแบบฝึกหัด 14.4 ข้อ 5

มีกระแสไฟฟ้าผ่านตัวต้านทานแต่ละตัวเท่าใด

14.5 พลังงานไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนและเทคโนโลยีด้านพลังงาน

พลังงานไฟฟ้าเป็นปัจจัยพื้นฐานสำคัญในการพัฒนาคุณภาพชีวิต ขับเคลื่อนเศรษฐกิจ และพัฒนาประเทศในด้านต่าง ๆ แต่แหล่งพลังงานที่นำมาผลิตไฟฟ้าที่ประเทศไทยใช้อยู่ในปัจจุบันส่วนใหญ่มาจากเชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์ (fossil fuel) เช่น ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน และ น้ำมัน ซึ่งมีอยู่อย่างจำกัด



รูป 14.30 ก. กราฟแท่งแสดงสัดส่วนที่มาของไฟฟ้าที่ใช้ในประเทศไทยระหว่างปี พ.ศ. 2557 – พ.ศ. 2560
ข. แผนภูมิวงกลมแสดงสัดส่วนของที่มาของไฟฟ้าที่ใช้ในประเทศไทยระหว่างเดือน มกราคม - เมษายน พ.ศ. 2561 (ที่มา: กระทรวงพลังงาน)

ในอนาคต เมื่อความต้องการพลังงานไฟฟ้าในการดำรงชีวิตและขับเคลื่อนประเทศมีมากยิ่งขึ้น ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าของประเทศจะยิ่งเพิ่มสูงขึ้น และถ้าแหล่งพลังงานหลักของประเทศไทยยังคงเป็นเชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์ประเทศจะต้องเผชิญกับปัญหาการขาดแคลนพลังงานอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

แนวทางหนึ่งในการแก้ปัญหาและตอบสนองความต้องการด้านพลังงานไฟฟ้าในอนาคตคือ การนำความรู้ความเข้าใจทางวิทยาศาสตร์มาประยุกต์ใช้ในการเปลี่ยนพลังงานอื่น ๆ ให้อยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้าเพื่อทดแทนการใช้เชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์ หรือ การพัฒนาเทคโนโลยีต่าง ๆ ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้พลังงาน ซึ่งจะได้ศึกษาต่อไปนี้

14.5.1 พลังงานทดแทน

พลังงานที่นำมาใช้ทดแทนแหล่งพลังงานหลักของประเทศเรียกว่า **พลังงานทดแทน** (alternative energy) ซึ่งประเทศไทยมีศักยภาพด้านการนำพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานชีวมวลมาเป็นพลังงานทดแทน นอกจากนี้ ในบางพื้นที่ของประเทศ ยังมีความเหมาะสมในการนำพลังงานลม พลังงานน้ำ และ พลังงานความร้อนใต้พิภพ มาใช้เป็นพลังงานทดแทนได้อีกด้วย

การนำพลังงานเหล่านี้มาเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า มีหลักการอย่างไร ศึกษาได้ต่อไปนี้

พลังงานแสงอาทิตย์ (solar energy) มาเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้านั้น มีหลากหลายวิธี โดยวิธีที่นิยมที่สุดคือ การใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า **เซลล์สุริยะ** หรือ **เซลล์แสงอาทิตย์** (solar cell) หรือในทางวิทยาศาสตร์ มีชื่อเรียกว่า **เซลล์โฟโตโวลตาอิก** (photovoltaic cell หรือ PV cell) เซลล์สุริยะมีหลายชนิด แต่ละชนิดมีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับการใช้งานแตกต่างกัน โดยเซลล์สุริยะที่เป็นที่นิยมใช้มากที่สุดคือ เซลล์สุริยะชนิดผลึกซิลิคอน (crystalline silicon solar cell) ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นแข็งและบาง สีน้ำเงินเข้ม ดังรูป 14.31 เซลล์สุริยะชนิดนี้มีความคงทนต่อสภาพแวดล้อม ราคาต่ำกว่าชนิดอื่น และมีประสิทธิภาพประมาณ 13% – 20% ซึ่งค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับเซลล์สุริยะชนิดอื่น ๆ

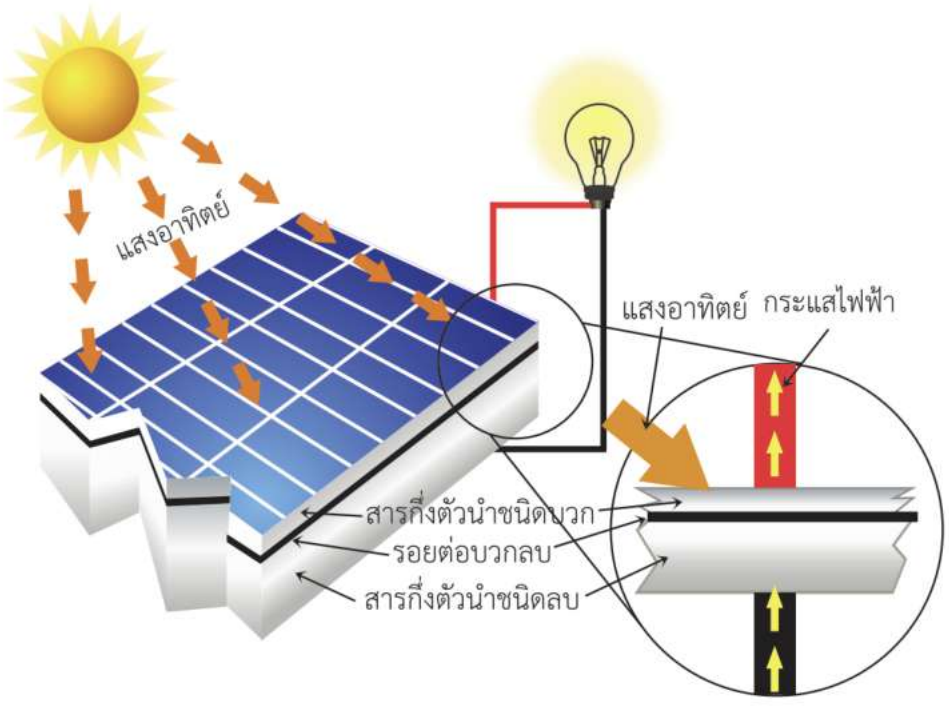
รูป 14.31 แผงเซลล์สุริยะ

ความรู้เพิ่มเติม

ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะ (solar cell efficiency) หมายถึงอัตราส่วนระหว่างพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์สุริยะกับพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งหมดที่ตกกระทบเซลล์สุริยะ ซึ่งโดยส่วนใหญ่ จะระบุเป็นเปอร์เซ็นต์ เขียนเป็นความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้ว่า

$$\text{ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะ} = \frac{\text{พลังงานไฟฟ้าที่ได้จาก เซลล์สุริยะ}}{\text{พลังงานแสงอาทิตย์ทั้งหมดที่ตกกระทบเซลล์สุริยะ}} \times 100\ \%$$

เซลล์สุริยะที่ใช้ทั่วไปทำจาก**สารกึ่งตัวนำ** (semiconductor) ที่แตกต่างกันสองชนิด เมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบเซลล์สุริยะ พลังงานจากแสงอาทิตย์จะถ่ายโอนพลังงานให้กับอิเล็กตรอนบางตัวในเซลล์สุริยะ ทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานมากพอและประพฤติตนเป็นอิเล็กตรอนอิสระ และถ้ามีการต่อเซลล์สุริยะกับวงจรไฟฟ้า จะทำให้อิเล็กตรอนอิสระดังกล่าวเคลื่อนที่ไปตามสายไฟ ส่งผลให้เกิดกระแสไฟฟ้าและการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าให้กับเครื่องใช้ไฟฟ้าในวงจร ช่วยให้เครื่องใช้ไฟฟ้าทำงานได้ ดังรูป 14.32



รูป 14.32 แผนภาพแสดงการทำงานของเซลล์สุริยะ

กิจกรรมลองทำดู ปัจจัยที่มีผลต่อพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์สุริยะ

เซลล์สุริยะที่ติดตั้งบนหลังคาบ้านหรือด้านบนของอาคาร มีการจัดวางในลักษณะเอียงทำมุมกับแนวระดับ การจัดวางดังกล่าวเกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์สุริยะหรือไม่ แล้วนักเรียนคิดว่ามีปัจจัยอะไรอีกบ้าง นักเรียนจะออกแบบการทดลองอย่างไร

รูป แผงเซลล์สุริยะบนหลังคาบ้าน

ถ้าบ้านนักเรียนจะเปลี่ยนมาใช้พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากพลังงานแสงอาทิตย์ นักเรียนคิดว่าจะคุ้มค่าหรือไม่ ศึกษาได้จากกิจกรรม 14.4

กิจกรรม 14.4 บ้านพลังงานแสงอาทิตย์

จุดประสงค์

1. คำนวณปริมาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการนำเซลล์สุริยะมาใช้เป็นแหล่งให้พลังงานไฟฟ้าสำหรับที่พักอาศัย
2. ประเมินความคุ้มค่าของการใช้เซลล์สุริยะเป็นแหล่งให้พลังงานไฟฟ้าสำหรับที่พักอาศัย

วัสดุและอุปกรณ์

1. อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ช่วยในการคำนวณ เช่น เครื่องคิดเลข โทรศัพท์เคลื่อนที่
2. ใบแจ้งค่าไฟฟ้าที่ใช้ในบ้านของนักเรียน

วิธีทำกิจกรรม

1. จากที่ระบุในใบแจ้งค่าไฟฟ้าในบ้านของนักเรียน ให้คำนวณพลังงานไฟฟ้าโดยเฉลี่ยที่บ้านนักเรียนใช้ต่อหนึ่งวัน (ถ้าไม่มีใบแจ้งค่าไฟฟ้า ให้ใช้ตัวเลข 170 หน่วย ซึ่งเป็นค่าของพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยต่อเดือนที่ครัวเรือนหนึ่งครัวเรือนในประเทศไทยใช้)
2. ถ้าในเวลา 1 วัน จำนวนชั่วโมงที่แสงอาทิตย์ส่องมาบริเวณบ้านของนักเรียนเฉลี่ย 5 ชั่วโมง และถ้านักเรียนเลือกใช้มอดูลเซลล์สุริยะขนาด 250 วัตต์ ให้คำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์สุริยะในเวลา 1 วันต่อมอดูล
3. จากผลการคำนวณในข้อ 1. และ 2. ให้คำนวณจำนวนมอดูลเซลล์สุริยะขนาด 250 วัตต์ที่ต้องใช้กับบ้านของนักเรียน ในกรณีที่บ้านของนักเรียนเปลี่ยนมาใช้พลังงานจากเซลล์สุริยะเพียงอย่างเดียว
4. ถ้ามอดูลเซลล์สุริยะขนาด 250 วัตต์มีราคาพร้อมค่าติดตั้งและอุปกรณ์เสริมต่าง ๆ เป็น 9000 บาทต่อมอดูล ให้คำนวณค่าใช้จ่ายที่บ้านของนักเรียนจะต้องใช้ในการติดตั้งมอดูลเซลล์สุริยะทั้งหมด
5. สมมติให้ค่าไฟฟ้าที่ได้จากระบบไฟฟ้าปกติของบ้านนักเรียนเฉลี่ยต่อเดือนเท่ากับค่าไฟฟ้าในใบแจ้งค่าไฟฟ้าที่นักเรียนนำมา (หรือถ้าใครไม่มีใบแจ้งค่าไฟฟ้า ให้ใช้ค่าไฟฟ้า 4 บาทต่อหน่วย) ให้คำนวณค่าไฟฟ้าที่นักเรียนต้องจ่ายในเวลา 1 ปี
6. จากผลการคำนวณในข้อ 4. และ 5. ให้คำนวณจำนวนปีที่ ค่าไฟฟ้าที่ต้องจ่ายปกติจะเท่ากับค่าใช้จ่ายในการติดตั้งมอดูลเซลล์สุริยะในข้อ 4.

คำถามท้ายกิจกรรม

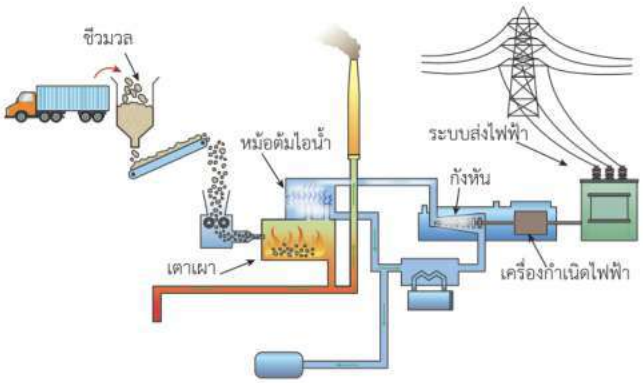
- ☐ ในการเปลี่ยนมาใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์สุริยะเพียงอย่างเดียว ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งเซลล์สุริยะน้อยหรือมากกว่าค่าไฟฟ้าที่ต้องเสียในเวลา 1 ปี
- ☐ การที่บ้านหลังหนึ่งจะเปลี่ยนมาใช้พลังงานจากเซลล์สุริยะเพียงอย่างเดียว มีความคุ้มค่าด้านค่าใช้จ่ายหรือไม่ อย่างไร

การนำเซลล์สุริยะมาเป็นอุปกรณ์ให้พลังงานภายในที่พักอาศัย นอกจากจะมีค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อแผงเซลล์สุริยะแล้ว ยังมีค่าติดตั้ง ค่าอุปกรณ์เสริมอื่น ๆ ค่าบำรุงรักษา และค่าอุปกรณ์ที่มีอายุการใช้งานจำกัด เช่น แบตเตอรี่ ดังนั้น การนำแผงเซลล์สุริยะมาเป็นแหล่งให้พลังงานไฟฟ้าแทนไฟฟ้าที่ได้จากระบบปกติ ต้องพิจารณาให้รอบคอบ เพื่อความคุ้มค่าด้านค่าใช้จ่าย

พลังงานชีวมวล (biomass energy) เป็นพลังงานที่ได้จากส่วนต่าง ๆ ของสิ่งมีชีวิต แนวทางในการนำพลังงานชีวมวลมาเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้ามี 2 แนวทางหลักได้แก่

1) การนำชีวมวลมาเป็นเชื้อเพลิงโดยตรง โดยอาจนำชีวมวลไปผ่านกระบวนการบางอย่าง เช่น การกำจัดความชื้น การอัดแท่ง โดยการเผาไหม้ชีวมวลโดยตรงจะทำให้ได้พลังงานความร้อนสำหรับมาใช้ทำให้น้ำเดือดเพื่อนำไอน้ำไปหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังแผนภาพแสดงขั้นตอนการเปลี่ยนชีวมวลเป็นพลังงานไฟฟ้าในรูป 14.33 ก. และตัวอย่างโรงไฟฟ้าพลังงานชีวมวลในรูป 14.33 ข.

> ชีวมวล หมายถึง สารอินทรีย์ที่ได้จากสิ่งมีชีวิต ซึ่งมีองค์ประกอบพื้นฐานเป็นธาตุคาร์บอนและธาตุไฮโดรเจน ยกตัวอย่างเช่น กิ่งไม้ มูลสัตว์ เศษอาหาร หรือ น้ำเสียจากฟาร์ม

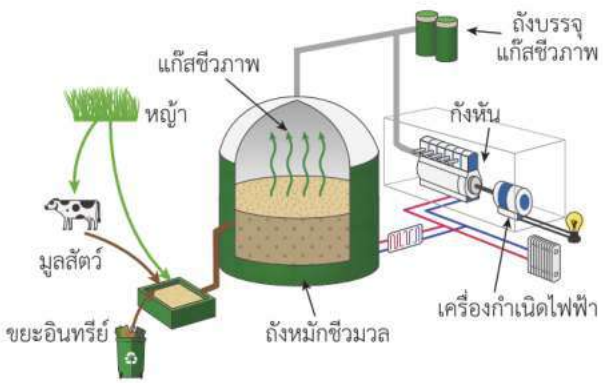


ก.

ข.

รูป 14.33 ก. ขั้นตอนการผลิตไฟฟ้าด้วยเชื้อเพลิงชีวมวล ข. โรงไฟฟ้าพลังงานชีวมวล

2) การนำชีวมวลมาหมักจนได้แก๊สชีวภาพ เช่น การหมักมูลสัตว์ ขยะ หรือน้ำเสียจากฟาร์ม จนได้แก๊สที่นำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังขั้นตอนในรูป 14.34 ก. และตัวอย่างบ่อหมักแก๊สชีวภาพ ดังรูป 14.34 ข.

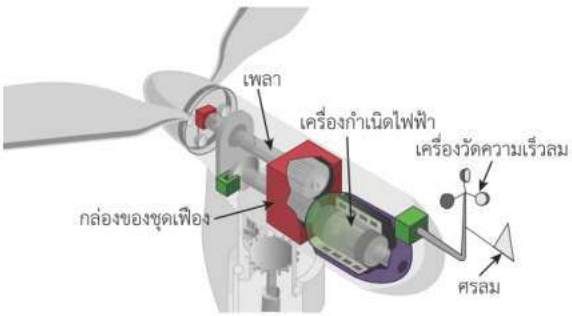


ก.

ข.

รูป 14.34 ก. ขั้นตอนการนำชีวมวลมาหมักจนได้แก๊สชีวภาพสำหรับนำไปผลิตไฟฟ้า ข. บ่อหมักแก๊สชีวภาพ

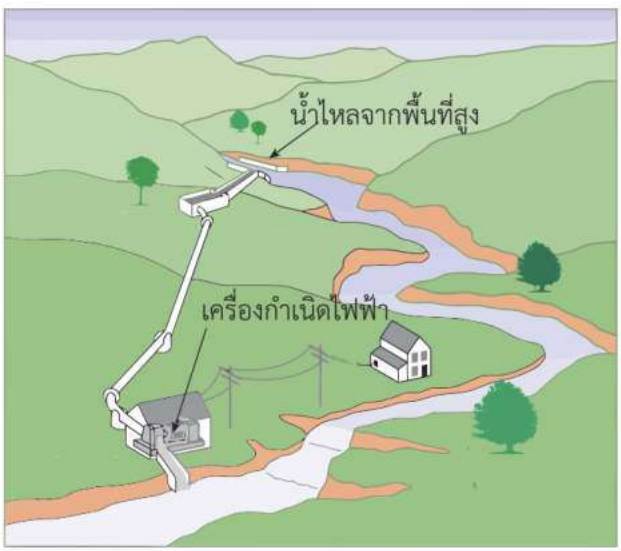
พลังงานลม (wind energy) เป็นพลังงานที่มาจากการเคลื่อนที่ของอากาศ ซึ่งเกิดจากความแตกต่างทางสภาพอากาศที่บริเวณต่าง ๆ อากาศที่กำลังเคลื่อนที่จะมีพลังงานจลน์ และเมื่อไปปะทะกับวัตถุใด ๆ จะมีการถ่ายโอนพลังงานให้กับวัตถุนั้น การผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานลมเป็นการนำกังหันที่มีแกนเชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไปติดตั้งในบริเวณที่มีลมแรงเพียงพอและสม่ำเสมอ เมื่อลมเคลื่อนที่มาปะทะกังหัน จะทำให้กังหันและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมุน เกิดการเปลี่ยนพลังงานจลน์เป็นพลังงานไฟฟ้าในที่สุด



ก. ข.

รูป 14.35 ก. ส่วนประกอบหลักของกังหันลมผลิตไฟฟ้า ข. กังหันลมผลิตไฟฟ้า

พลังงานน้ำ (hydropower) เป็นพลังงานที่เริ่มจากพลังงานศักย์ของมวลน้ำที่สะสมอยู่ในระดับสูงกว่าพื้นที่ด้านล่าง และเมื่อปล่อยให้น้ำไหลจากที่สูงลงสู่ที่ต่ำ พลังงานศักย์จะเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์ โดยพลังงานจลน์ที่มาจากการเคลื่อนที่ของมวลน้ำสามารถนำไปหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทำให้มีการเปลี่ยนพลังงานจลน์เป็นพลังงานไฟฟ้า



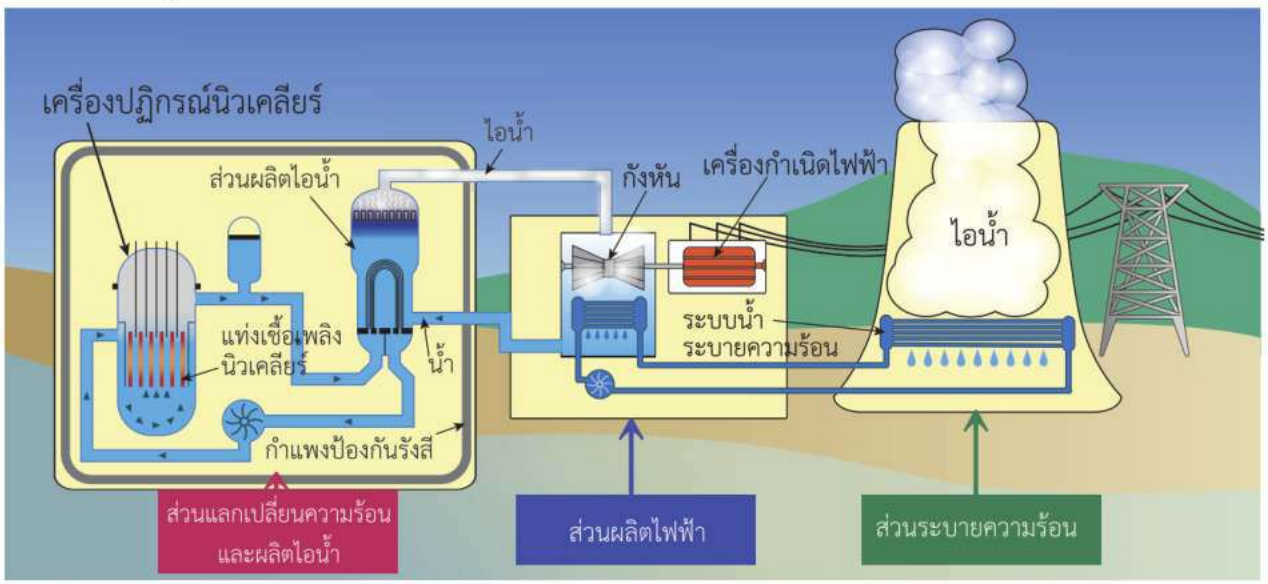
รูป 14.36 โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก

พลังงานนิวเคลียร์ (nuclear power) เป็นพลังงานที่สะสมอยู่ในนิวเคลียสของอะตอม การทำให้อะตอมปลดปล่อยพลังงานนิวเคลียร์ออกมาภายนอก ต้องทำให้นิวเคลียสของอะตอมเกิดการเปลี่ยนแปลงที่เรียกว่า **ปฏิกิริยานิวเคลียร์** (nuclear reaction) จากนั้นพลังงานนิวเคลียร์ที่ได้สามารถนำไปเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยอาศัยอุปกรณ์สำคัญเรียกว่า **เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์** (nuclear reactor) ซึ่งทำหน้าที่สร้างและควบคุมปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง หรือ **ปฏิกิริยาลูกโซ่** (chain reaction) ให้เกิดขึ้นในอัตราที่เหมาะสม เพื่อให้มีการปลดปล่อยพลังงานนิวเคลียร์ออกมาในปริมาณที่พอเหมาะสำหรับการนำไปใช้ในขั้นตอนผลิตไฟฟ้า

ในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ มีส่วนประกอบ 3 ส่วนหลัก ได้แก่

1. ส่วนแลกเปลี่ยนความร้อนและผลิตไอน้ำ
2. ส่วนผลิตไฟฟ้า และ
3. ส่วนระบายความร้อน

ดังรูป 14.37



รูป 14.37 แผนภาพแสดงส่วนประกอบหลักของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์

ในส่วนที่ 1 พลังงานนิวเคลียร์ที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์จะถูกถ่ายโอนในรูปของพลังงานความร้อนให้กับน้ำ ทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้นจนกระทั่งกลายเป็นไอน้ำที่มีแรงดันสูงมาก จากนั้น ไอน้ำจะถูกส่งต่อไปยังส่วนที่ 2 ส่วนผลิตไฟฟ้า ซึ่งในส่วนนี้ ไอน้ำ จะถูกควบคุมให้เคลื่อนที่ไปปะทะกับกังหันขนาดใหญ่ที่มีเพลาเชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แรงดันจากไอน้ำส่งผลให้กังหันหมุนและทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมุนไปด้วย เกิดการเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าสำหรับส่งไประบบจ่ายพลังงานไฟฟ้า ส่วนไอน้ำที่ใช้ในการหมุนกังหัน จะถูกส่งไปยังส่วนที่ 3 เพื่อระบายออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยอาจเป็น ลักษณะของ

การระบายผ่านหอคอยระบายความร้อน หรือ ระบายสู่แหล่งน้ำในบริเวณใกล้เคียงกับโรงไฟฟ้า ดังแสดงในรูป 14.38 ก. และ 14.38 ข. ทั้งนี้ เนื่องจากน้ำที่ใช้ในการระบายความร้อนมีระบบที่แยกออกจากระบบของน้ำที่ใช้รับการถ่ายโอนความร้อนจากพลังงานนิวเคลียร์ ไอน้ำและน้ำที่ระบายออกสู่สิ่งแวดล้อมจึงไม่มีสารกัมมันตรังสีปนเปื้อน

ก.

ข.

รูป 14.38 ก. โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ที่ระบายความร้อนโดยใช้หอระบายความร้อน และ ข. โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ที่ระบายความร้อนโดยการปล่อยน้ำออกสู่แหล่งน้ำใกล้เคียง

นอกจากพลังงานทดแทนทั้ง 5 ชนิดที่ได้กล่าวมา ยังมีการนำแหล่งพลังงานในธรรมชาติอื่น ๆ มาทดแทนการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์อีก เช่น พลังงานความร้อนใต้พิภพ (geothermal energy) พลังงานจากคลื่นในมหาสมุทร (oceanic wave energy) หรือ พลังงานไฮโดรเจน (hydrogen energy) ซึ่งสามารถศึกษาเพิ่มเติมในรายละเอียดได้จากแหล่งเรียนรู้ต่าง ๆ

ในธรรมชาติ มีแหล่งพลังงานต่าง ๆ มากมายที่เราสามารถนำมาใช้ประโยชน์ เพื่อทดแทนแหล่งพลังงานหลักที่กำลังจะหมดไป ถึงแม้การใช้พลังงานทดแทนบางประเภทจะสามารถช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศได้ แต่พลังงานทดแทนแต่ละชนิดต่างมีข้อจำกัดและส่งผลกระทบกับสิ่งแวดล้อมในด้านอื่น ๆ ที่แตกต่างกันไป การพิจารณาตัดสินใจเลือกใช้พลังงานทดแทนชนิดใด จึงต้องมีความรู้ความเข้าใจที่ถูกต้อง รอบด้าน เพียงพอ และทันสมัย เพื่อที่ในอนาคต ทุกคนจะได้มีพลังงานไว้ใช้อย่างเพียงพอ ช่วยให้สามารถดำรงชีวิตที่มีคุณภาพร่วมกับสิ่งแวดล้อมได้อย่างสมดุลและยั่งยืน

14.5.2 เทคโนโลยีด้านพลังงาน

นอกจากการนำความรู้ความเข้าใจทางวิทยาศาสตร์มาประยุกต์ใช้ในการเปลี่ยนพลังงานต่าง ๆ ในธรรมชาติให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมกับการนำไปใช้ประโยชน์แล้ว ความรู้ความเข้าใจทางวิทยาศาสตร์ยังได้นำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบและสร้างชิ้นงาน วัสดุ อุปกรณ์ หรือ กระบวนการต่าง ๆ ที่ช่วยให้มีการเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้พลังงาน หรือ สามารถนำพลังงานที่ปล่อยทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์ อีกด้วย ซึ่งมีส่วนช่วยในการแก้ปัญหาและตอบสนองความต้องการด้านพลังงานได้อีกทางหนึ่ง

ตัวอย่างเทคโนโลยีด้านพลังงานที่มีบทบาทสำคัญกับการดำเนินชีวิตในปัจจุบัน เช่น แบตเตอรี่ เทคโนโลยีประหยัดพลังงานในอาคารและที่พักอาศัย และ เซลล์เชื้อเพลิง เทคโนโลยีเหล่านี้มีหลักการที่สำคัญเกี่ยวข้องอย่างไร และสามารถนำมาใช้แก้ปัญหาและตอบสนองความต้องการด้านพลังงานได้อย่างไร ศึกษาได้ในหัวข้อนี้

แบตเตอรี่

ปัจจุบันนี้แบตเตอรี่มีความสำคัญและเกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวันของเรามากขึ้น เช่น แบตเตอรี่สำรอง หรือ power bank ที่หลายคนใช้ในกับโทรศัพท์เคลื่อนที่ แบตเตอรี่สำหรับรถยนต์ไฮบริด (hybrid car) หรือรถยนต์ไฟฟ้า (electric car) ที่ใช้แบตเตอรี่ในการช่วยขับเคลื่อน แบตเตอรี่ที่ใช้กันมีอยู่หลายชนิด ซึ่งอาจแบ่งได้เป็น 2 ชนิดใหญ่ ได้แก่ ชนิดที่ไม่สามารถประจุหรือชาร์จได้ เรียกว่า **แบตเตอรี่แบบปฐมภูมิ** (primary battery) และ ชนิดที่สามารถประจุหรือชาร์จเพื่อนำกลับมาใช้ซ้ำได้หลายครั้ง เรียกว่า **แบตเตอรี่แบบทุติยภูมิ** (secondary battery) ถึงแม้แบตเตอรี่แต่ละรูปแบบได้รับการออกแบบมาให้ใช้กับงานที่แตกต่างกัน แต่หลักการพื้นฐานของแบตเตอรี่ทุกรูปแบบเหมือนกันคือ เปลี่ยนพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้า

พัฒนาการทางเทคโนโลยีเกี่ยวกับแบตเตอรี่ส่งผลให้การดำรงชีวิตของผู้คนสะดวกสบายขึ้น แบตเตอรี่ที่มีขนาดเล็ก เบา และมีความจุมาก ช่วยให้การติดต่อสื่อสารและการใช้งานแอพพลิเคชันต่าง ๆ ทำได้สะดวกสบายด้วยช่วงเวลาที่ยาวนาน การประยุกต์ใช้งานแบตเตอรี่มากักเก็บพลังงานแสงอาทิตย์ หรือ พลังงานลม ทำให้การใช้พลังงานทดแทนมีประสิทธิภาพและแก้ปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม แบตเตอรี่จึงเป็นเทคโนโลยีด้านพลังงานที่สำคัญของโลกอนาคต การเรียนรู้แนวทางการใช้แบตเตอรี่ที่ถูกต้อง ปลอดภัย และ เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม จึงเป็นเรื่องสำคัญสำหรับทุกคน

เทคโนโลยีด้านพลังงานในอาคารและที่พักอาศัย

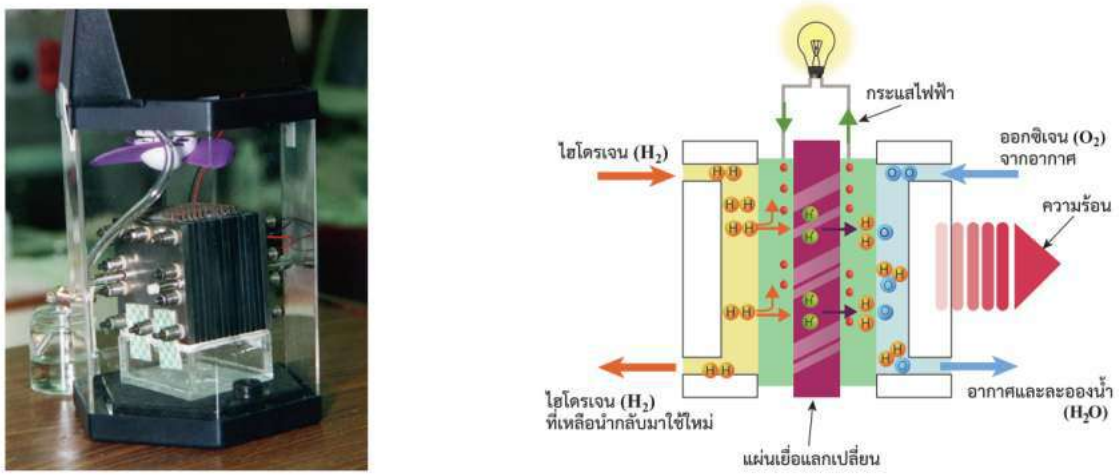
การนำเทคโนโลยีด้านพลังงานชนิดต่าง ๆ มาใช้ในอาคารและที่พักอาศัย สามารถช่วยให้การใช้พลังงานมีประสิทธิภาพ และลดค่าใช้จ่าย ยกตัวอย่างเช่น การใช้เทคโนโลยีวัสดุในการลดการถ่ายโอนความร้อนจากภายนอก เช่น การใช้วัสดุที่เป็นฉนวนความร้อนหรือวัสดุที่ไม่เก็บสะสมความร้อนสร้างผนังหรือปูที่ฝ้าเพดาน หรือ การใช้กระจกเขียวตัดแสงสำหรับช่วยดูดซับความร้อน ดังรูป 14.39 ก. และ ข. หรือ การใช้เครื่องใช้ไฟฟ้าประหยัดพลังงาน ซึ่งเป็นเครื่องใช้ไฟฟ้าที่ใช้พลังงานน้อยกว่าเครื่องใช้ไฟฟ้าแบบธรรมดา และทำงานได้ดีไม่แตกต่างกัน เช่น หลอดแอลอีดี เครื่องปรับอากาศแบบอินเวอร์เตอร์ ตู้เย็นแบบอินเวอร์เตอร์ โดยเครื่องไฟฟ้าแบบประหยัดพลังงานที่มีประสิทธิภาพในระดับดีมากจะมีเลข 5 ระบุบนฉลากของกระทรวงพลังงานที่ติดไว้บนเครื่องใช้ไฟฟ้า ดังรูป 14.39 ค.

ก. ข. ค.

รูป 14.39 ก. การใช้ผนังสองชั้นเป็นฉนวนความร้อน ข. การใช้กระจกเขียวตัดแสง ค. เครื่องใช้ไฟฟ้าประหยัดพลังงาน

อย่างไรก็ตาม การเลือกใช้เครื่องใช้ไฟฟ้าเพื่อการประหยัดพลังงานไม่เพียงแต่ควรคำนึงถึงประสิทธิภาพการใช้งานเท่านั้น แต่ควรคำนึงถึงขนาดที่เหมาะสมและความจำเป็นต่อการใช้งานจริงด้วย เพื่อไม่ให้เกิดการสิ้นเปลืองพลังงานในส่วนที่ไม่จำเป็น เช่น การเลือกซื้อหลอดไฟควรเลือกหลอดที่ให้แสงสว่างพอดีกับการใช้งาน หรือ การเลือกซื้อเครื่องปรับอากาศควรเลือกซื้อขนาดที่พอดีกับขนาดของห้อง นอกจากนี้ การติดตั้งการใช้งาน และการบำรุงรักษาที่ถูกวิธี ล้วนมีผลต่อประสิทธิภาพของการใช้พลังงานของเครื่องใช้ไฟฟ้า ดังนั้นจึงควรพิจารณาสิ่งเหล่านี้เพื่อใช้ของเครื่องใช้ไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพและความคุ้มค่ากับค่าใช้จ่ายที่ต้องเสียไป

เซลล์เชื้อเพลิง (fuel cell) เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้าคล้ายแบตเตอรี่ แต่มีวิธีการและสารที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเคมีแตกต่างกัน การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงต้องมีการจ่ายไฮโดรเจนเข้าไปทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (ที่ได้จากอากาศ) ตลอดเวลา ซึ่งแตกต่างจากแบตเตอรี่ที่มีสารเคมีพร้อมทำปฏิกิริยาอยู่ภายในแล้ว



ก. ข.

รูป 14.40 ก. เซลล์เชื้อเพลิงสาธิต ข. การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

การทำปฏิกิริยาเคมีในเซลล์เชื้อเพลิงนอกจากจะให้พลังงานไฟฟ้าที่นำไปใช้ประโยชน์ได้แล้ว ยังมีการปล่อยความร้อนและน้ำออกสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งไม่เป็นมลพิษ โดยเซลล์เชื้อเพลิงที่ให้พลังงานไฟฟ้ามากพอสำหรับขับเคลื่อนรถยนต์ทั่วไปมีขนาดไม่ใหญ่มาก มีน้ำหนักเบา และไม่ทำให้เกิดเสียงดัง อีกทั้ง มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้าได้สูงถึง 75% หรือประมาณสองเท่าของเครื่องยนต์ที่ใช้ในรถยนต์ทั่วไป จึงได้มีการพยายามนำเซลล์เชื้อเพลิงมาเป็นแหล่งพลังงานสำหรับขับเคลื่อนยานพาหนะ ดังรูป 14.41 ก. และ 14.41 ข.

ก. ข.

รูป 14.41 ก. ส่วนประกอบหลักของรถยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยพลังงานจากเซลล์เชื้อเพลิง
ข. ต้นแบบรถไฟในประเทศเยอรมนีที่ขับเคลื่อนด้วยพลังงานจากเซลล์เชื้อเพลิง

นอกจากเทคโนโลยีด้านพลังงานต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาแล้ว การนำความรู้ทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมาช่วยแก้ปัญหาและตอบสนองความต้องการด้านพลังงานยังมีอีกมากมายหลากหลายด้าน เราทุกคนล้วนต้องมีส่วนเกี่ยวข้องกับการพิจารณาเพื่อตัดสินใจในการนำเทคโนโลยีด้านพลังงานต่าง ๆ มาใช้ ทั้งกับตนเอง ครอบครัว หรือ ชุมชน จึงควรมีการทำความเข้าใจที่ถูกต้อง มีข้อมูลที่เพียงพอ และ รอบด้าน เพื่อที่จะได้มีพลังงานไว้ใช้อย่างเพียงพอและยั่งยืน

คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 14.5

1. เซลล์สุริยะเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้อย่างไร
2. ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะสามารถหาได้จากอัตราส่วนระหว่างปริมาณใด
3. การนำพลังงานน้ำมาเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า มีลำดับการเปลี่ยนพลังงานอย่างไร
4. เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์มีหน้าที่หลักคืออะไร
5. โรงไฟฟ้านิวเคลียร์เปลี่ยนพลังงานนิวเคลียร์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้อย่างไร
6. เหตุใดโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ส่วนใหญ่จึงต้องตั้งอยู่ใกล้แหล่งน้ำ
7. แบตเตอรี่เปลี่ยนพลังงานชนิดใดเป็นพลังงานไฟฟ้า
8. ยกตัวอย่างเทคโนโลยีที่ช่วยลดการถ่ายโอนความร้อนจากสิ่งแวดล้อมเข้าสู่ภายในอาคารหรือที่พักอาศัยมา 2 ชนิด
9. เซลล์เชื้อเพลิงใช้อะไรเป็นเชื้อเพลิงและได้ผลผลิตคืออะไร

สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน

14.1 กระแสไฟฟ้า

- กระแสไฟฟ้า ในตัวนำไฟฟ้าเกิดขึ้นเมื่อมีประจุไฟฟ้าลัพธ์เคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งในตัวนำไฟฟ้า โดยอาจเป็นการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าบวกหรือลบ หรือทั้งสองชนิดประจุไฟฟ้า
- กระแสไฟฟ้าในตัวนำโลหะมีทิศทางตรงข้ามกับทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระหรือทิศทางของกระแสอิเล็กตรอน แต่มีทิศทางเดียวกับทิศทางของสนามไฟฟ้า หรือมีทิศทางจากตำแหน่งที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงไปยังตำแหน่งที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่า
- กระแสไฟฟ้า I ในตัวนำไฟฟ้า มีค่าดังสมการ $I = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{Nq}{\Delta t}$
- กระแสไฟฟ้า I ในลวดตัวนำมีค่าขึ้นกับจำนวนอิเล็กตรอนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร n และความเร็วลอยเลื่อน v_d ของอิเล็กตรอนอิสระ รวมทั้งประจุของอิเล็กตรอน e และ ขนาดพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำ A เขียนแทนด้วยสมการได้ว่า $I = nev_dA$

14.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์

- กฎของโอห์ม มีใจความว่า ถ้าอุณหภูมิคงตัว กระแสไฟฟ้าที่ผ่านตัวนำจะแปรผันตรงกับความต่างศักย์ระหว่างปลายของตัวนำนั้น เขียนในรูปสมการได้เป็น $I = (\frac{1}{R})\Delta V$
- ความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิคงตัวขึ้นอยู่กับชนิดและรูปร่างของวัตถุ เป็นไปตามสมการ $R = \rho(\frac{\ell}{A})$ เมื่อ ρ เป็นสภาพต้านทานไฟฟ้า
- ความต้านทานของตัวต้านทานค่าคงตัวบอกได้โดยการอ่านแถบสีที่อยู่บนตัวต้านทาน ในกรณีที่มี 4 แถบสี แถบสีที่ 1 และแถบสีที่ 2 บอกตัวเลขที่หนึ่งและตัวเลขที่สอง แถบสีที่ 3 บอกตัวเลขพหุคูณ และแถบสีที่ 4 เป็นแถบแสดงค่าความคลาดเคลื่อนเป็นร้อยละ

- การต่อตัวต้านทานแบบอนุกรม n ตัว จะได้ความต้านทานสมมูล R มีค่าเพิ่มขึ้นตามสมการ $R = R_1 + R_2 + R_3 + ... + R_n$
- การต่อตัวต้านทานแบบขนาน n ตัว จะได้ความต้านทานสมมูล R มีค่าลดลงตามสมการ $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + ... + \frac{1}{R_n}$

14.3 พลังงานในวงจรไฟฟ้ากระแสตรง

- อีเอ็มเอฟ คือ พลังงานไฟฟ้าที่ประจุไฟฟ้าได้รับต่อหนึ่งหน่วยประจุไฟฟ้าเมื่อเคลื่อนที่ผ่านแหล่งกำเนิดไฟฟ้า แทนด้วยสัญลักษณ์ $\mathcal{E}$
- อีเอ็มเอฟของแบตเตอรี่ $\mathcal{E}$ มีความสัมพันธ์กับความต่างศักย์ระหว่างขั้วแบตเตอรี่ ΔV กระแสไฟฟ้าในวงจร I และ ความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ r ตามสมการ $\mathcal{E} = \Delta V + Ir$
- พลังงานไฟฟ้า W ที่ถูกใช้ไปในเครื่องใช้ไฟฟ้าในเวลา t มีค่าเป็น $W = It\Delta V$
- กำลังไฟฟ้า P เป็นพลังงานไฟฟ้าที่ถูกใช้ไปหรือเปลี่ยนไปในหนึ่งหน่วยเวลาหรืออัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า มีค่าเป็น $P = I\Delta V$

14.4 แบตเตอรี่และวงจรไฟฟ้ากระแสไฟฟ้าตรงเบื้องต้น

- การต่อแบตเตอรี่แบบอนุกรม n ก้อน จะได้อีเอ็มเอฟสมมูล $\mathcal{E}$ และความต้านทานภายในสมมูล r มีค่าเพิ่มขึ้นตามสมการ $\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + ... + \mathcal{E}_n$ และ $r = r_1 + r_2 + ... + r_n$ ตามลำดับ
- การต่อแบตเตอรี่แบบขนาน n ก้อน จะได้อีเอ็มเอฟสมมูล $\mathcal{E}$ มีค่าคงเดิม และความต้านทานภายในสมมูล r มีค่าลดลงตามสมการ $\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + ... + \mathcal{E}_n$ และ $\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + ... + \frac{1}{r_n}$ ตามลำดับ
- กระแสไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้ากระแสตรงที่ประกอบด้วยแบตเตอรี่และตัวต้านทาน มีค่าเป็น $I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$

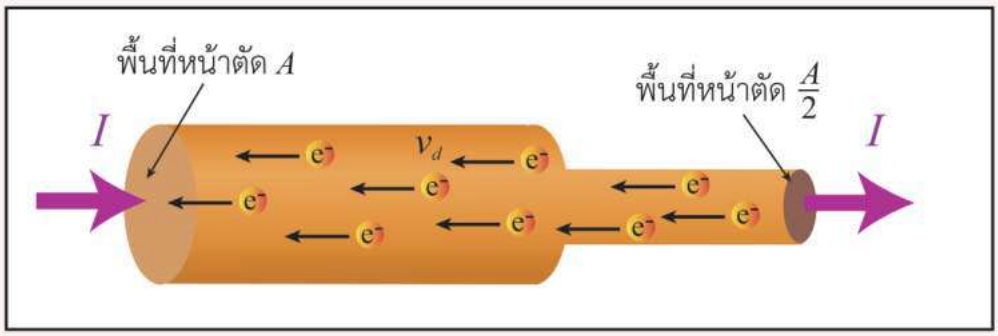
14.5 พลังงานไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนและเทคโนโลยีด้านพลังงาน

- พลังงานทดแทน คือ พลังงานที่นำมาใช้ทดแทนแหล่งพลังงานหลัก ซึ่งประเทศไทยมีศักยภาพด้านการนำพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานชีวมวลมาเป็นพลังงานทดแทน
- เซลล์สุริยะ คือ อุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า เซลล์สุริยะที่ใช้ทั่วไปทำจากสารกึ่งตัวนำที่แตกต่างกันสองชนิด เมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบเซลล์สุริยะที่ต่อกับเครื่องใช้ไฟฟ้า จะทำให้มีกระแสไฟฟ้าในวงจร ทำให้เครื่องใช้ไฟฟ้าสามารถทำงานได้
- พลังงานทดแทนบางชนิด เช่น พลังงานชีวมวล พลังงานลม พลังงานน้ำ และ พลังงานนิวเคลียร์ ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าในการเปลี่ยนพลังงานเหล่านี้เป็นพลังงานไฟฟ้า
- พลังงานนิวเคลียร์ คือพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาจากปฏิกิริยานิวเคลียร์
- อุปกรณ์สำคัญในการเปลี่ยนพลังงานนิวเคลียร์เป็นพลังงานไฟฟ้าคือ เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ซึ่งทำหน้าที่สร้างและควบคุมปฏิกิริยาลูกโซ่เพื่อให้มีการปลดปล่อยพลังงานนิวเคลียร์ในปริมาณที่เหมาะสม
- แบตเตอรี่ วัสดุฉนวนความร้อน เครื่องใช้ไฟฟ้าประหยัดพลังงาน และ เซลล์เชื้อเพลิง เป็นตัวอย่างของเทคโนโลยีด้านพลังงานที่นำมาใช้แก้ปัญหาหรือตอบสนองความต้องการทางด้านพลังงาน
- การพิจารณาเลือกเทคโนโลยีมาช่วยแก้ปัญหาพลังงาน ไม่เพียงควรคำนึงถึงการประหยัดพลังงานเท่านั้น แต่ควรคำนึงถึงประสิทธิภาพและความคุ้มค่าด้านค่าใช้จ่าย ขนาดที่เหมาะสม และความจำเป็นต่อการใช้งานจริง ๆ

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 14

คำถาม

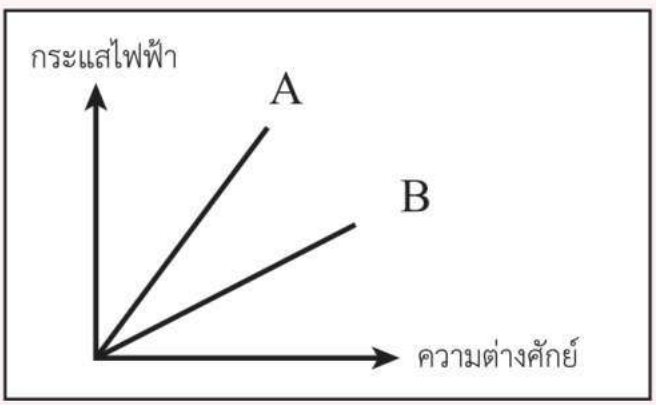
1. เพราะเหตุใด การทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าในลวดตัวนำจึงต้องอาศัยแหล่งกำเนิดไฟฟ้า
2. กระแสไฟฟ้าในลวดตัวนำที่ต่อกับแบตเตอรี่ มีทิศจากขั้วใดเข้าสู่ขั้วใดของแบตเตอรี่ เพราะเหตุใด
3. ถ้าลวดตัวนำเส้นหนึ่งมีขนาดไม่สม่ำเสมอ โดยในส่วนแรกมีพื้นที่หน้าตัด A และส่วนที่สองมีพื้นที่หน้าตัด $\frac{A}{2}$ ดังรูป



รูป ประกอบคำถามข้อ 3

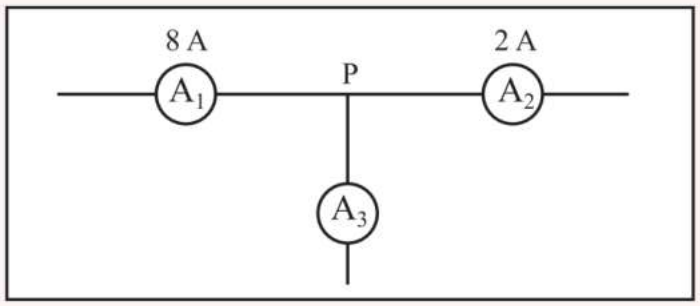
ถ้ามีกระแสไฟฟ้าขนาด I ผ่านลวดตัวนำเส้นนี้ ความเร็วลอยเลื่อนของอิเล็กตรอนในส่วนแรกจะแตกต่างกับส่วนที่สองอย่างไร

4. ถ้าให้กระแสไฟฟ้าขนาด I ผ่านลวดตัวนำขนาดเท่ากันสองเส้น โดยเส้นหนึ่งที่ทำจากเหล็กและอีกเส้นหนึ่งทำจากทองแดง ความเร็วลอยเลื่อนของอิเล็กตรอนอิสระในลวดตัวนำทั้งสองจะแตกต่างกันหรือไม่ อย่างไร จงอธิบาย
5. เส้นตรง A และ B ในรูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ในตัวนำสองชนิด ตัวนำใด (A หรือ B) มีความต้านทานมากกว่า



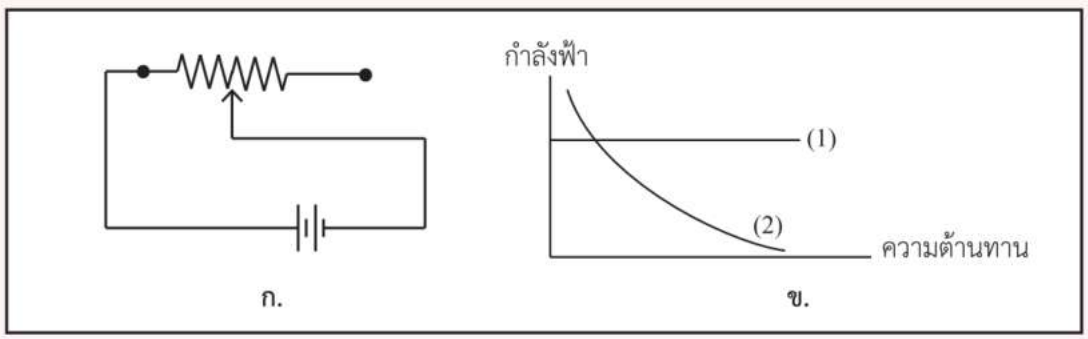
รูป ประกอบคำถามข้อ 5

6. ถ้าความต่างศักย์ระหว่างปลายของตัวนำชนิดหนึ่งเพิ่มเป็นสองเท่า พบว่ากระแสไฟฟ้าที่ผ่านตัวนำเพิ่มเป็นสามเท่า ตัวนำนี้มีพฤติกรรมที่เป็นไปตามกฎของโอห์มหรือไม่ อธิบาย
7. เมื่อต่อตัวต้านทานจำนวนหนึ่งแบบ ก. อนุกรม และ ข. ขนาน สำหรับตัวต้านทานแต่ละตัว ปริมาณใดต่อไปนี้มีค่าเท่ากัน ความต่างศักย์ กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า
8. ต่อหลอดไฟกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง 6 โวลต์ โดยใช้สายต่อสั้น จะให้ความสว่างมากกว่าเมื่อต่อด้วยสายต่อที่ยาวมาก หรือไม่ เพราะเหตุใด
9. ราวหลอดไฟที่ประดับตามต้นไม้ รั้วและอาคาร เมื่อหลอดหนึ่งขาด หลอดอื่นๆ ยังสว่าง จะอธิบายได้อย่างไร
10. A_1 A_2 และ A_3 เป็นแอมมิเตอร์ที่ต่อไว้ใกล้จุด P และเป็นส่วนหนึ่งของวงจรไฟฟ้า ดังรูป ถ้าแอมมิเตอร์ A_1 อ่านได้ 8 แอมแปร์ แอมมิเตอร์ A_2 อ่านได้ 2 แอมแปร์ แอมมิเตอร์ A_3 จะอ่านได้เท่าใด



รูป ประกอบคำถามข้อ 10

11. อีเอ็มเอฟแตกต่างจากความต่างศักย์อย่างไร
12. ภายใต้เงื่อนไขใดที่ความต่างศักย์ระหว่างขั้วของแบตเตอรี่จะเท่ากับอีเอ็มเอฟ และความต่างศักย์ระหว่างขั้วของแบตเตอรี่จะมีค่ามากกว่าอีเอ็มเอฟได้หรือไม่
13. ตัวต้านทานแปรค่าต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่ไม่มีความต้านทานภายใน ดังรูป ก.



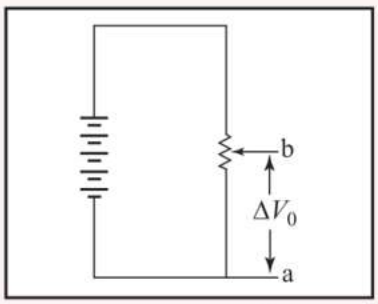
รูป ประกอบคำถามข้อ 13

เมื่อปรับความต้านทานของตัวต้านทานแปรค่า กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าบนตัวต้านทานกับความต้านทานควรเป็นเส้นใดในรูป ข. อธิบาย

14. ถ้าภายในบ้านมีหลอดไฟขนาด 70 วัตต์ และ ขนาด 80 วัตต์ ต่อแบบขนานกับวงจรไฟฟ้าที่ให้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 220 โวลต์ หลอดไฟหลอดใดมีกระแสไฟฟ้าผ่านมากกว่ากัน จงอธิบาย

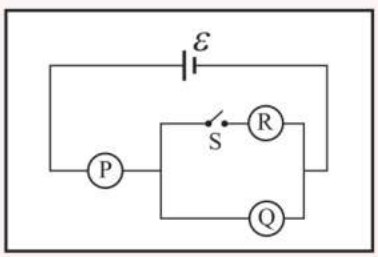
15. เมื่ออุณหภูมิของหลอดไฟสูงขึ้น ความต้านทานของหลอดไฟจะเพิ่มขึ้น จะมีผลทำให้พลังงานไฟฟ้าที่หลอดไฟใช้ในช่วงเวลาเท่ากันเพิ่มขึ้นหรือลดลง เพราะเหตุใด

16. จากรูป ΔV_0 เป็นความต่างศักย์ระหว่าง จุด a และ b ขณะที่ต่อเครื่องใช้ไฟฟ้าระหว่าง 2 จุดนี้กับ เมื่อไม่ต่อกับเครื่องใช้ไฟฟ้าระหว่าง 2 จุดดังกล่าว ค่า ΔV_0 จะเหมือนหรือแตกต่างกัน เพราะเหตุใด



รูป ประกอบคำถามข้อ 16

17. P Q และ R เป็นหลอดไฟที่เหมือนกันทุกประการและนำมาต่อเป็นวงจรกับแบตเตอรี่ ดังรูป ถ้าสับสวิตซ์ S ความสว่างของหลอดไฟ P และ Q จะเปลี่ยนแปลงอย่างไร



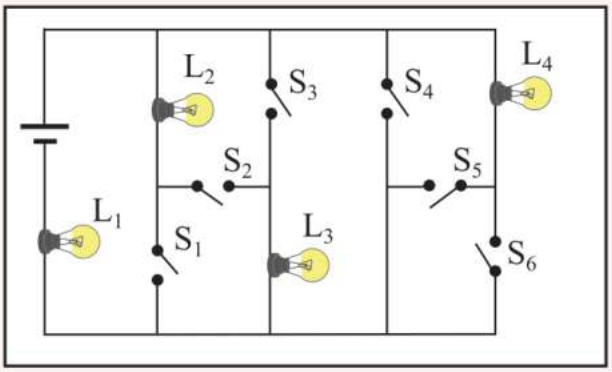
รูป ประกอบคำถามข้อ 17

18. แบตเตอรี่ หลอดไฟสี่หลอด (L_1, L_2, L_3 และ L_4) สวิตช์ (S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 และ S_6) ต่อกันเป็นวงจรไฟฟ้า ดังรูป หลอดใดสว่างถ้า

ก. สับสวิตช์ S_2 เท่านั้น

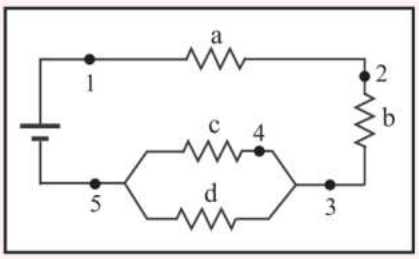
ข. สับสวิตช์ S_3 เท่านั้น

ค. สับสวิตช์ S_3 และ S_4 เท่านั้น



รูป ประกอบคำถามข้อ 18

19. วงจรไฟฟ้าดังรูป a b c และ d เป็นตัวต้านทานมีความต้านทานเท่ากัน พิจารณา จุด 1, 2, 3, 4 และ 5 ซึ่งเป็นจุดในวงจร
    ก. จุดใดที่มีกระแสไฟฟ้าผ่านน้อยที่สุด
    ข. จุดคู่ใดที่มีความต่างศักย์เท่ากับศูนย์
    ค. จุดคู่ใดที่มีความต่างศักย์มากที่สุด

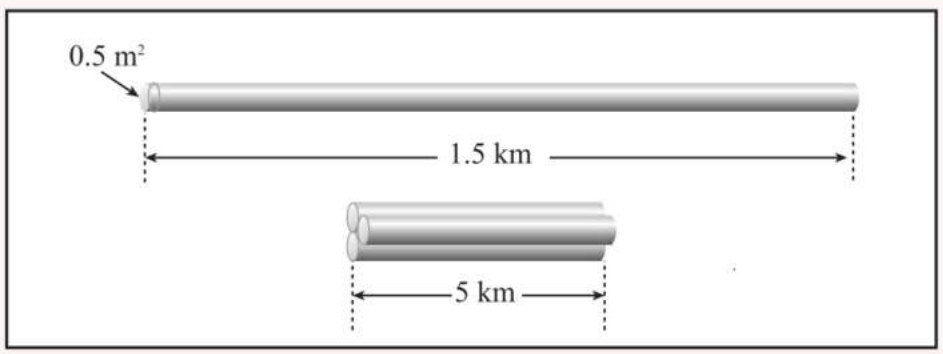


รูป ประกอบคำถามข้อ 19

ปัญหา

1. หลอดบรรจุแก๊สหลอดหนึ่ง ในเวลา 10 วินาที มีอนุภาคประจุบวกจำนวน 10^{16} อนุภาค และอนุภาคประจุลบจำนวน 10^{18} อนุภาค เคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดของหลอดทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าผ่านเท่าใด (อิเล็กตรอนมีประจุไฟฟ้าขนาด 1.6×10^{-19} คูลอมบ์)
2. ตัวนำมีพื้นที่หน้าตัด 2 ตารางมิลลิเมตร ถ้ามีประจุไฟฟ้า -7.8 คูลอมบ์เคลื่อนที่ผ่านพื้นที่นี้ในเวลา 3.0 วินาที จงหากระแสไฟฟ้าที่ผ่านตัวนำนี้
3. ลวดทองแดงพื้นที่หน้าตัด 0.5 ตารางมิลลิเมตร ยาว 50 เมตร เมื่อให้กระแสไฟฟ้าผ่านเส้นลวดทำให้อิเล็กตรอนอิสระเคลื่อนที่ด้วยความเร็วลอยเลื่อน 2 มิลลิเมตรต่อวินาที (จำนวนอิเล็กตรอนอิสระของทองแดงเท่ากับ 8.47×10^{28} ต่อลูกบาศก์เมตร) จงหาจำนวนอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดของลวดนี้แต่ละวินาที
4. ลวดตัวนำโลหะขนาดสม่ำเสมอมีพื้นที่หน้าตัด 1.0 ตารางมิลลิเมตร วัดปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ผ่านได้ 1.5 แอมแปร์ จะมีขนาดของความเร็วลอยเลื่อนของอิเล็กตรอนอิสระเท่าไร (กำหนดให้จำนวนอิเล็กตรอนอิสระ 4.0×10^{28} ต่อลูกบาศก์เมตร)
5. ลวดโลหะเงินเส้นหนึ่งมีอิเล็กตรอนอิสระจำนวน 5.86×10^{28} ต่อลูกบาศก์เมตร มีพื้นที่หน้าตัด 4 ตารางมิลลิเมตร เมื่ออิเล็กตรอนอิสระเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วลอยเลื่อน 3.8×10^{-2} เมตรต่อวินาที ในช่วงเวลา 30 วินาที จำนวนอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดเส้นลวดนี้มีปริมาณเท่าใด
6. แบตเตอรี่ก้อนหนึ่ง เมื่อนำมาใช้งานสามารถทำให้มีประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านแบตเตอรี่ได้ทั้งสิ้น 5.0×10^{4} คูลอมบ์ ถ้าใช้งานแบตเตอรี่นี้โดยมีกระแสไฟฟ้า 20 มิลลิแอมแปร์ อย่างสม่ำเสมอ จะสามารถใช้งานแบตเตอรี่ได้นานกี่ชั่วโมง
7. ลวดโลหะเส้นหนึ่งมีอิเล็กตรอนอิสระ 5.0×10^{28} ต่อลูกบาศก์เมตร ลวดมีพื้นที่หน้าตัด 2.5 ตารางมิลลิเมตร ถ้าอิเล็กตรอนแต่ละตัวเคลื่อนที่ด้วยขนาดความเร็วลอยเลื่อน 0.30 มิลลิเมตรต่อวินาที จะมีกระแสไฟฟ้าเท่าใดในเส้นลวดนี้

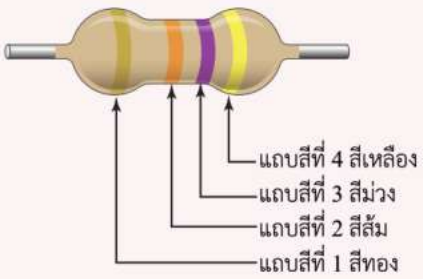
8. ถ้าใช้เตารีดไอน้ำที่มีความต้านทาน 55.0 โอห์ม กับความต่างศักย์ 220 โวลต์ กระแสไฟฟ้าที่ผ่านเตารีดมีค่าเท่าใด
9. จะต้องต่อตัวต้านทาน 1.0 เมกะโอห์ม กับความต่างศักย์เท่าใด จึงจะมีกระแสไฟฟ้า 1.0 มิลลิแอมแปร์ ผ่านตัวต้านทานดังกล่าว
10. สายไฟ 2 เส้น ทำด้วยโลหะ 2 ชนิด เส้นแรกมีสภาพต้านทานไฟฟ้าเป็น 4 เท่าของเส้นที่สอง ถ้าความยาวและความต้านทานเท่ากัน จงหาอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของเส้นที่หนึ่งต่อเส้นที่สอง
11. ถ้ามีลวดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดลดลงไปครึ่งหนึ่ง ความต้านทานของเส้นลวดจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร
12. ลวดตัวนำขนาดสม่ำเสมอเส้นหนึ่งยาว 2.0 เมตร มีความต้านทาน 0.5 โอห์ม ถ้าลวดตัวนำชนิดเดียวกัน แต่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าเป็นครึ่งหนึ่ง หากต้องการให้มีความต้านทาน 2.0 โอห์ม จะต้องใช้ลวดยาวเท่าไร
13. ลวดโลหะเส้นหนึ่งมีความต้านทาน 8.0 โอห์ม ถ้านำลวดโลหะเส้นนี้มารีดทำเป็นลวดเส้นใหม่ให้ยาวเป็น 4 เท่าของความยาวเดิม ความต้านทานของลวดโลหะจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงเป็นเท่าใด
14. ต้องการทำลวดสายไฟที่มีความต้านทาน 5.0 โอห์ม จากโลหะซึ่งมีสภาพต้านทาน $8.0\times10^{-8}\ \Omega\ m$ โดยมีปริมาตรของลวดเป็น 12.0 ลูกบาศก์เซนติเมตร
    ก. ลวดเส้นนี้มีความยาวเท่าไร
    ข. ลวดเส้นนี้มีพื้นที่หน้าตัดเท่าไร
15. ลวดตัวนำในสายไฟเส้นหนึ่งทำจากทองแดงซึ่งมีสภาพต้านทานไฟฟ้า $1.72\times10^{-8}\ \Omega\ m$ มีความยาว 1.5 กิโลเมตร และมีพื้นที่หน้าตัด 0.5 ตารางมิลลิเมตร
    ก. จงหาค่าความต้านทานของลวดตัวนำเส้นนี้
    ข. ถ้าตัดสายไฟออกเป็น 3 ส่วนเท่า ๆ กัน แล้วนำมาต่อขนานกันดังรูป ความต้านทานจะเป็นเท่าใด



รูป ประกอบปัญหาข้อ 15

16. ตัวต้านทานขนาด 560 กิโลโอห์มและมีความคลาดเคลื่อน 5% จะมีแถบสีแบบสี่แถบ และแบบห้าแถบอย่างไร

17. ตัวต้านทานหนึ่งมีแถบสี ดังรูป มีความต้านทานเท่าไร

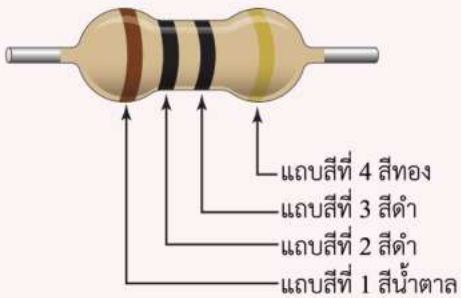


รูป ประกอบปัญหาข้อ 17

18. ตัวต้านทานตัวหนึ่งมีแถบสี ดังรูป กำหนด รหัสแถบสี ดังนี้

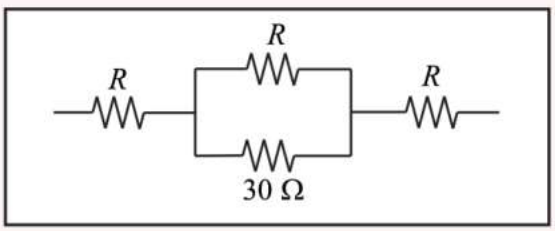
ดำ แทนเลข ศูนย์
น้ำตาล แทนเลข 1
ทอง แทนความคลาดเคลื่อน

ตัวต้านทานนี้มีความต้านทานอยู่ในช่วงกี่โอห์ม



รูป ประกอบปัญหาข้อ 18

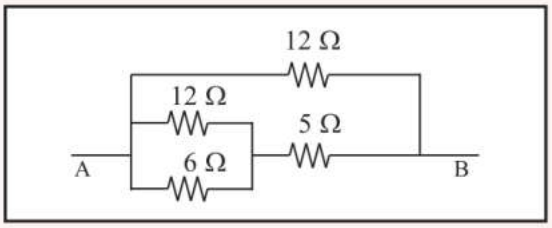
19. ตัวต้านทาน 3 ตัว มีความต้านทานเท่ากัน นำมาต่อกับแบตเตอรี่ ต้องนำตัวต้านทานมาต่ออย่างไร จึงทำให้กระแสไฟฟ้าในวงจรมากที่สุด จงวาดรูป
20. ตัวต้านทานที่มีความต้านทาน 3 โอห์ม และ 6 โอห์ม ต่อขนานกันและต่ออนุกรมกับตัวต้านทานที่มีความต้านทาน R_1 เมื่อนำมาต่อกับแบตเตอรี่ซึ่งมีอีเอ็มเอฟ 6 โวลต์ ความต้านทานภายใน 0.5 โอห์ม มีกระแสไฟฟ้าในวงจร 2 แอมแปร์ ความต้านทาน R_1 มีค่าเท่าใด
21. ตัวต้านทานสี่ตัวนำมาต่อกันดังรูป



รูป ประกอบปัญหาข้อ 21

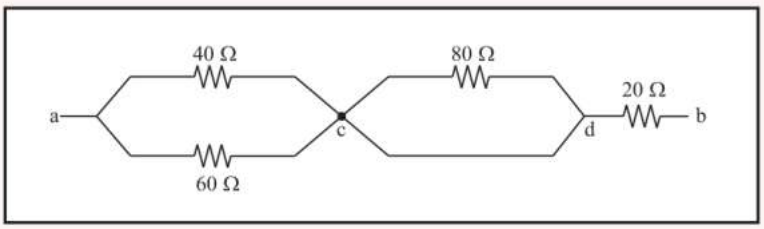
ถ้าความต้านทานสมมูลเป็น 40 โอห์ม ความต้านทาน R มีค่าเท่าใด

22. จากรูป จงหาความต้านทานระหว่าง A กับ B



รูป ประกอบปัญหาข้อ 22

23. นำตัวต้านทานมาต่อกันดังรูป

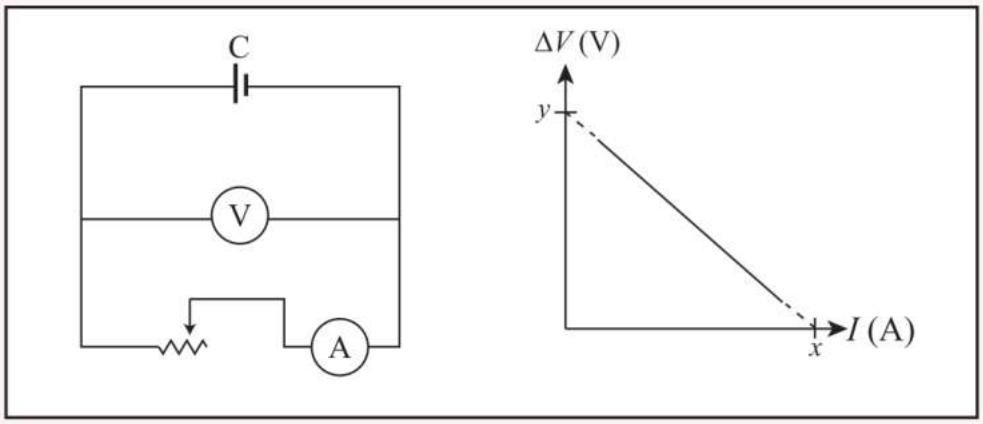


รูป ประกอบปัญหาข้อ 23

ความต้านทานสมมูลระหว่างปลาย a และ b มีค่าเท่าใด

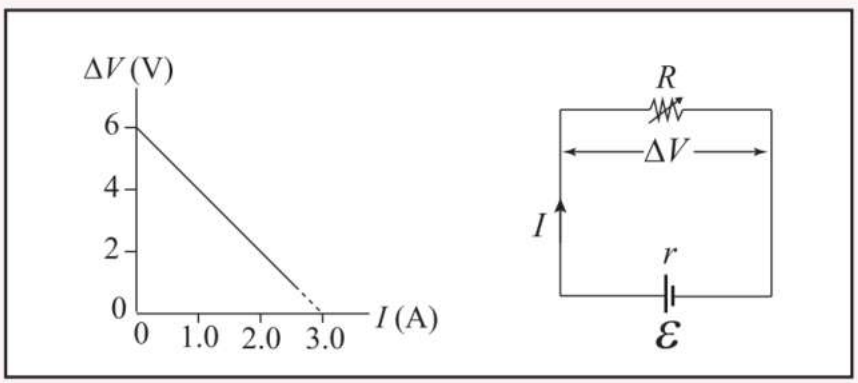
24. ตัวต้านทานสี่ตัว แต่ละตัวมีความต้านทาน 10 โอห์ม จะต้องนำมาต่อกันอย่างไร จึงจะได้ความต้านทานสมมูล 2.5 โอห์ม และ 25 โอห์ม
25. กำหนดให้แบตเตอรี่มีอีเอ็มเอฟ 12 โวลต์ และความต้านทานภายใน 0.5 โอห์ม ถ้าประจุไฟฟ้า +1 คูลอมบ์เคลื่อนที่ผ่านแบตเตอรี่นี้ ประจุไฟฟ้าจะมีพลังงานไฟฟ้ากี่จูล
26. เมื่อนำหลอดไฟมาต่อกับแบตเตอรี่ขนาด 9 โวลต์ ที่มีความต้านทานภายใน 2 โอห์ม พบว่า มีกระแสไฟฟ้าผ่านหลอด 0.7 แอมแปร์ และเมื่อเปลี่ยนเป็นหลอดไฟอีกหลอด พบว่า มีกระแสไฟฟ้าผ่าน 1.2 แอมแปร์ จงหาความต่างศักย์ระหว่างขั้วของหลอดไฟแต่ละหลอด
27. เมื่อใช้โวลต์มิเตอร์วัดความต่างศักย์ระหว่างขั้วแบตเตอรี่ พบว่าอ่านค่าได้ 6.0 โวลต์ เมื่อนำตัวต้านทานขนาด 12 โอห์มมาต่อกับแบตเตอรี่ พบว่า ความต่างศักย์ที่วัดได้ลดลงเป็น 5.6 โวลต์ ความต้านทานภายในของแบตเตอรี่มีค่าเท่าใด
28. แบตเตอรี่ก้อนหนึ่งมีอีเอ็มเอฟ 12.0 โวลต์ และความต้านทานภายใน 2.0 โอห์ม ต่อกับตัวต้านทาน 70 โอห์ม จงหาความต่างศักย์ระหว่างขั้วของแบตเตอรี่ ค่าที่คำนวณได้นี้จะแตกต่างกับค่าที่วัดด้วยโวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทานสูงมากโดยไม่มีตัวต้านทานต่ออยู่หรือไม่ เพราะเหตุใด

29. วงจรไฟฟ้าดังรูป แสดงการทดลองเพื่อหาอีเอ็มเอฟและความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ ส่วนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ระหว่างขั้วของแบตเตอรี่ ΔV และกระแสไฟฟ้าที่ผ่านแบตเตอรี่ I เมื่อความต้านทานเปลี่ยนไป เส้นกราฟมีแนวโน้มตัดแกนตั้งและแกนนอนที่ค่า x และ y ตามลำดับ จงหาอีเอ็มเอฟและความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ C



รูป ประกอบปัญหาข้อ 29

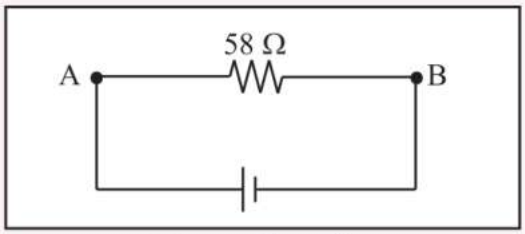
30. เครื่องเป่าผมเครื่องหนึ่งมีกำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ ใช้กับไฟบ้าน 220 โวลต์ ถ้าใช้เครื่องเป่าผมนี้ 2 นาที ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ผ่านเครื่องเป่าผมในเวลา 2 นาที มีค่าเท่าใด
31. เตารีดไฟฟ้าเครื่องหนึ่ง เมื่อต่อกับความต่างศักย์ 220 โวลต์ ทำให้มีกระแสไฟฟ้าผ่านเตารีด 6 แอมแปร์ มีผลทำให้เกิดความร้อนในเตารีดในเวลา 1 ชั่วโมง เท่าใด ถ้าร้อยละ 80 ของพลังงานไฟฟ้าเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน
32. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ระหว่างขั้วของแบตเตอรี่ กับกระแสไฟฟ้าที่ผ่านแบตเตอรี่โดยใช้วงจรไฟฟ้า ดังรูป



รูป ประกอบปัญหาข้อ 32

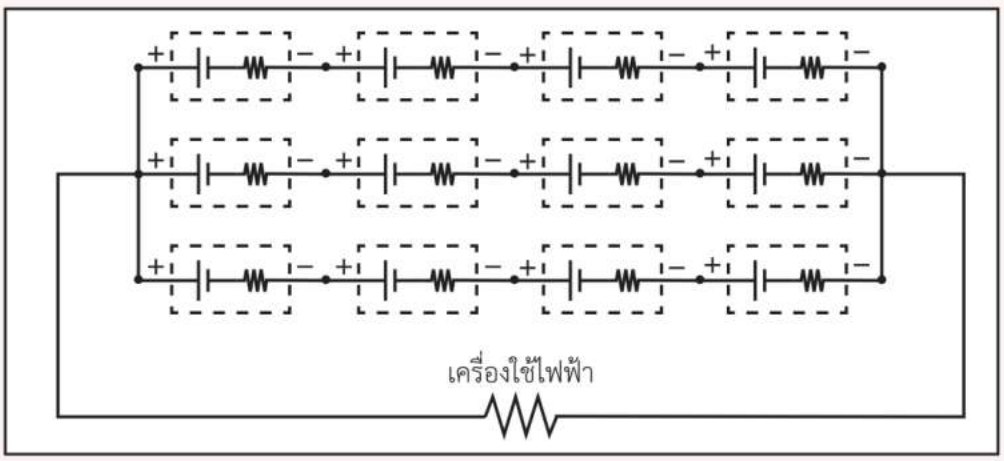
ขณะที่วัดความต่างศักย์ที่ปลายของตัวต้านทาน R ได้ 5 โวลต์ จะเกิดกำลังไฟฟ้าในตัวต้านทาน R กี่วัตต์

33. เมื่อต่อแบตเตอรี่เข้ากับตัวต้านทาน 58 โอห์ม ในวงจรดังรูป ถ้าความต่างศักย์ระหว่างจุด A และ B มีค่า 11.6 โวลต์ อีเอ็มเอฟของแบตเตอรี่มีค่าเท่าใด ถ้าความต้านทานภายในเท่ากับ 2.0 โอห์ม



รูป ประกอบปัญหาข้อ 33

34. เตาไฟฟ้าเครื่องหนึ่งมีฉลากบอกกำลังไฟฟ้าและความต่างศักย์ 600 วัตต์ 220 โวลต์ ถ้านำเตาไฟฟ้านี้มาใช้กับความต่างศักย์ 200 โวลต์ กระแสไฟฟ้าที่ผ่านลวดให้ความร้อนของเตาไฟฟ้าจะลดลงร้อยละเท่าใด
35. ในวันหยุดราชการ บ้านหลังหนึ่ง ใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาด 40 วัตต์ จำนวน 6 หลอด เป็นเวลานาน 6 ชั่วโมง ใช้เตารีดกำลังขนาด 1200 วัตต์ เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง ใช้เตาไฟฟ้าขนาด 1500 วัตต์ เป็นเวลานาน 3 ชั่วโมง และใช้เครื่องซักผ้าขนาด 1000 วัตต์ เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง จงหาพลังงานไฟฟ้าของเครื่องใช้ไฟฟ้าในบ้านที่ใช้ในวันนั้น เป็นกิโลวัตต์ ชั่วโมง
36. นำแบตเตอรี่ขนาด 6 โวลต์ ความต้านทานภายใน 0.2 โอห์ม นำมาต่ออนุกรมกับแบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ ความต้านทานภายใน 0.3 โอห์ม อีเอ็มเอฟสมมูลและความต้านทานภายในสมมูลเป็นเท่าใด
37. นำแบตเตอรี่ขนาด 1.5 โวลต์ ความต้านทานภายใน 0.25 โอห์ม จำนวน 12 ก้อน มาต่อกันเพื่อนำไปใช้เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าให้กับเครื่องใช้ไฟฟ้า โดยเริ่มจากนำแบตเตอรี่จำนวน 4 ก้อนมาต่อแบบอนุกรมให้ได้ 3 ชุด แล้วนำชุดแบตเตอรี่แต่ละชุดมาต่อแบบขนานดังรูป



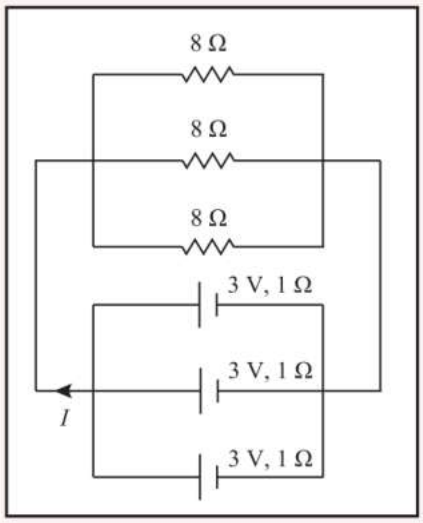
รูป ประกอบปัญหาข้อ 37

จงหา

ก. อีเอ็มเอฟสมมูลของแบตเตอรี่ที่ต่อกันทั้งหมด

ข. ความต้านทานภายในสมมูลของแบตเตอรี่ที่ต่อกันทั้งหมด

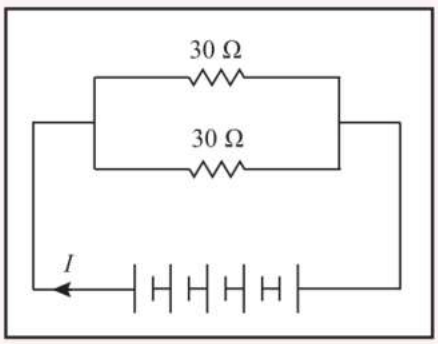
38. แบตเตอรี่ 3 ก้อน แต่ละก้อนมีอีเอ็มเอฟ 3 โวลต์ และความต้านทานภายใน 1 โอห์ม ต่อขนานกัน แล้วต่อกับตัวต้านทาน 3 ตัวที่ต่อขนานกัน ดังรูป จงหากระแสไฟฟ้าที่ผ่านตัวต้านทานแต่ละตัว



รูป ประกอบปัญหาข้อ 38

39. แบตเตอรี่ชุดหนึ่งประกอบด้วยแบตเตอรี่ 5 ก้อน ที่ต่ออนุกรมกัน โดยมีการนำขั้วชนิดเดียวกันของแบตเตอรี่มาต่อกับตัวต้านทานภายนอกที่มีความต้านทานดังรูป

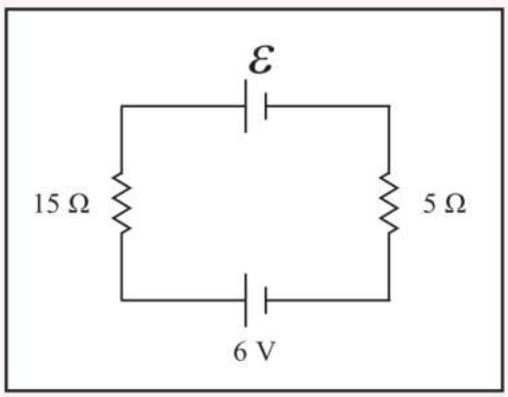
ถ้าแบตเตอรี่แต่ละก้อนมีอีเอ็มเอฟ 2.0 โวลต์ และความต้านทานภายใน 1.0 โอห์ม จงหากระแสไฟฟ้าที่ผ่านตัวต้านทานแต่ละตัว



รูป ประกอบปัญหาข้อ 39

40. แบตเตอรี่ 2 ก้อนมีอีเอ็มเอฟ 6 โวลต์ และ $\mathcal{E}$ โดยไม่มีความต้านทานภายใน แบตเตอรี่ทั้งสองต่ออนุกรมกับความต้านทานภายนอก 15 และ 5 โอห์ม ดังรูป

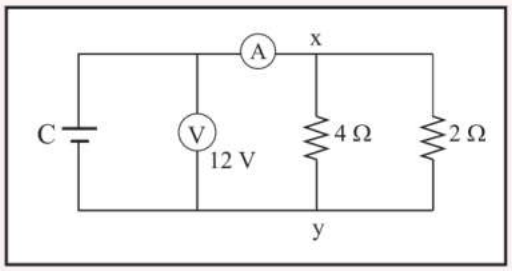
ถ้ากระแสไฟฟ้าที่ผ่านตัวต้านทานมีค่า 0.60 แอมแปร์ จงหาค่าของ $\mathcal{E}$



รูป ประกอบปัญหาข้อ 40

41. วงจรไฟฟ้าดังรูป C เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้า A เป็นแอมมิเตอร์ V เป็นโวลต์มิเตอร์ และอ่านได้ 12 โวลต์ จงหา

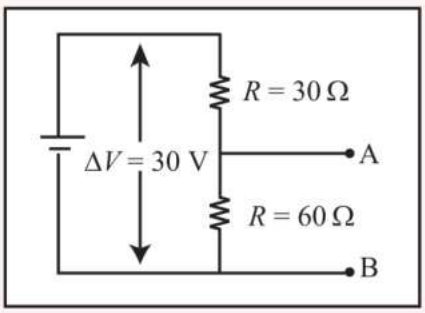
    ก. ความต้านทานรวมระหว่าง x และ y
    ข. กระแสไฟฟ้าที่อ่านได้จากแอมมิเตอร์ A
    ค. กระแสไฟฟ้าที่ผ่านตัวต้านทาน 4 โอห์ม
    ง. อัตราของพลังงานไฟฟ้าที่สิ้นเปลืองไปกับตัวต้านทานขนาด 4 โอห์ม
    จ. พลังงานไฟฟ้าที่สิ้นเปลืองไปในตัวต้านทานทั้งสองในวงจร ในเวลา 30 วินาที



รูป ประกอบปัญหาข้อ 41

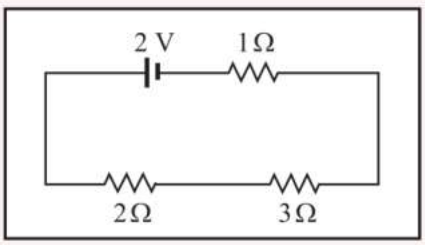
42. แบตเตอรี่วิทยุเครื่องหนึ่งมีอีเอ็มเอฟ 9 โวลต์ ขณะที่ให้กระแสไฟฟ้า 0.4 แอมแปร์ วัดความต่างศักย์ระหว่างขั้วแบตเตอรี่ได้ 8.8 โวลต์ ความต้านทานภายในของแบตเตอรี่มีค่าเท่าใด

43. จากรูป ความต่างศักย์ระหว่างจุด A กับ B มีค่าเท่าใด และเมื่อนำตัวต้านทาน 30 โอห์ม ต่อระหว่างจุด A และ B ความต่างศักย์ระหว่างจุด A และ B ในครั้งหลังนี้จะมีค่าเท่าใด



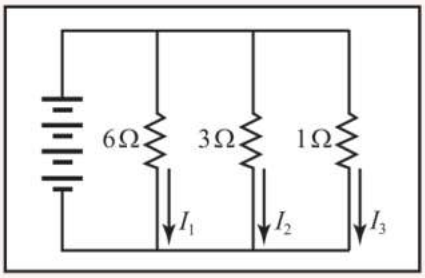
รูป ประกอบปัญหาข้อ 43

44. วงจรไฟฟ้า ดังรูป ถ้าแบตเตอรี่ไม่มีความต้านทานภายใน ความต่างศักย์ระหว่างปลายของตัวต้านทาน 3 โอห์ม มีค่าเท่าใด



รูป ประกอบปัญหาข้อ 44

45. วงจรไฟฟ้าดังรูป จงหาอัตราส่วนของกระแสไฟฟ้า $I_1 : I_2 : I_3$

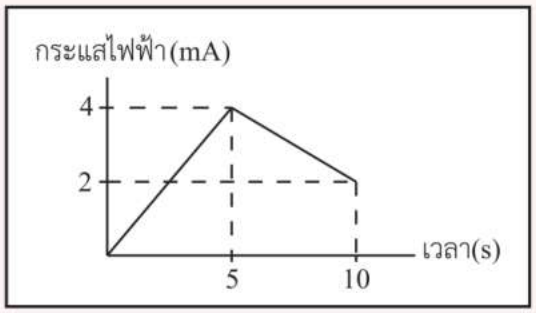


รูป ประกอบปัญหาข้อ 45

ปัญหาท้าทาย

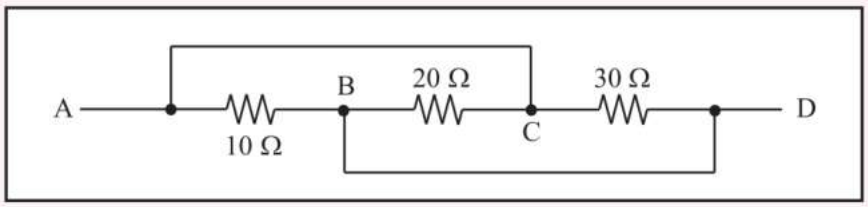
46. เครื่องเร่งอนุภาคโดยใช้ความต่างศักย์สูงเร่งอนุภาคโปรตอน วัดกระแสโปรตอนได้ 2 มิลลิแอมแปร์ จำนวนโปรตอนที่กระทบเป้าต่อวินาที มีกี่อนุภาค

47. กระแสไฟฟ้าที่ผ่านตัวนำ ที่เวลาต่าง ๆ เป็นดังกราฟ ประจุไฟฟ้าที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดของตัวนำนี้ในเวลา 10 วินาที มีค่าเท่าใด



รูป ประกอบปัญหาท้าทายข้อ 47

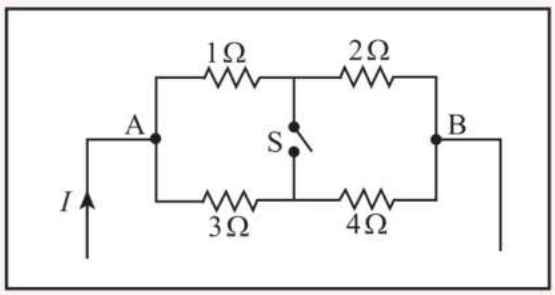
48. จากรูป



รูป ประกอบปัญหาท้าทายข้อ 48

ความต้านทานสมมูลของความต้านทานระหว่างปลาย A และ D มีค่าเท่าใด

49. จากรูป

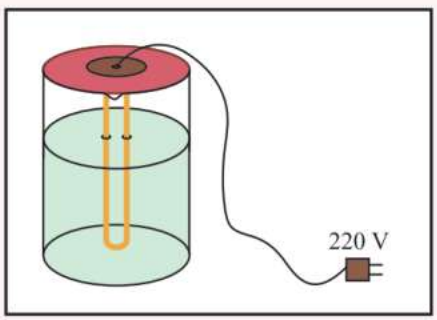


รูป ประกอบปัญหาท้าทายข้อ 49

ความต้านทานสมมูลมีค่าเท่าใด เมื่อ ก. สวิตช์ S เปิด ข. สวิตช์ S ปิด

50. ความต้านทานของลวดเหล็กกล้าเส้นหนึ่งที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร จะลดลงเหลือหนึ่งในสามเมื่อถูกเคลือบด้วยทองแดง จงหาความหนาของทองแดงที่เคลือบ กำหนดให้สภาพต้านทานของเหล็กกล้าและทองแดงเท่ากับ 9.71×10^{-8} และ 1.7×10^{-8} โอห์ม เมตร ตามลำดับ

51. เมื่อจุ่มตัวทำความร้อนที่ใช้ไฟฟ้าลงในน้ำที่บรรจุในบีกเกอร์ แล้วต่อกับความต่างศักย์ 220 โวลต์ มีกระแสไฟฟ้าผ่านตัวทำความร้อน 5 แอมแปร์ ดังรูป ถ้าน้ำเดือดในเวลา 4 นาที จงหาพลังงานความร้อนที่ทำให้น้ำเดือด ถ้าพลังงานไฟฟ้าถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนที่ให้แก่น้ำที่บรรจุในบีกเกอร์ได้ร้อยละ 90



รูป ประกอบปัญหาท้าทายข้อ 51

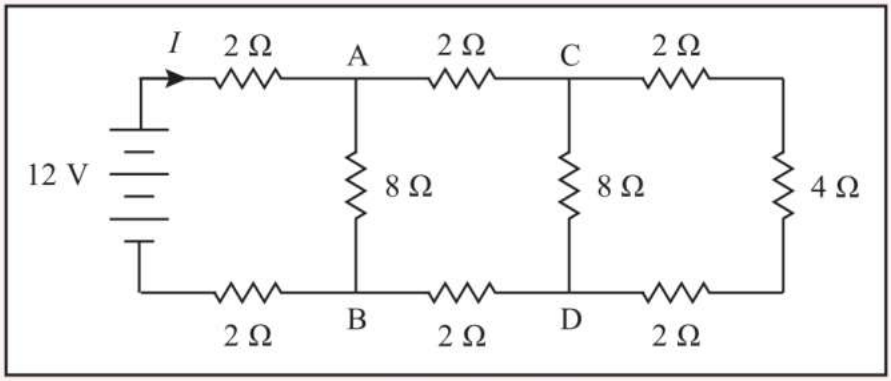
52. แบตเตอรี่ของรถยนต์มีอีเอ็มเอฟ 12 โวลต์ และความต้านทานภายใน 0.05 โอห์ม เมื่อสตาร์ทรถยนต์ มอเตอร์ของระบบสตาร์ทจะใช้กระแสไฟฟ้า 100 แอมแปร์ จงหา
    ก. ความต่างศักย์ระหว่างขั้วของแบตเตอรี่เมื่อมอเตอร์ของระบบสตาร์ทรถยนต์ทำงาน
    ข. ถ้าหลอดไฟของไฟหน้าของรถยนต์มีขนาด 40 วัตต์ ความต้านทานของหลอดไฟนี้มีค่าเท่าใด

53. จากการทดลองเพื่อหาอีเอ็มเอฟและความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ก้อนหนึ่ง ได้ผลดังตาราง

ความต่างศักย์ระหว่างขั้วแบตเตอรี่ (โวลต์)	2.87	2.62	2.36	2.23	1.89
กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	0.13	0.38	0.64	0.87	1.11

จงเขียนกราฟเพื่อหาอีเอ็มเอฟและความต้านภายในของแบตเตอรี่ก้อนนี้

54. ในวงจรไฟฟ้า ดังรูป



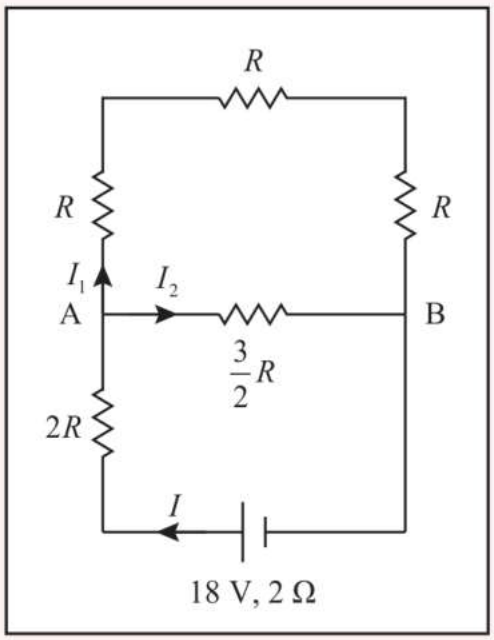
รูป ประกอบปัญหาท้าทายข้อ 54

ถ้าแบตเตอรี่ไม่มีความต้านทานภายใน จงหา

ก. ความต้านทานสมมูลทั้งวงจร

ข. กระแสไฟฟ้าในวงจร I

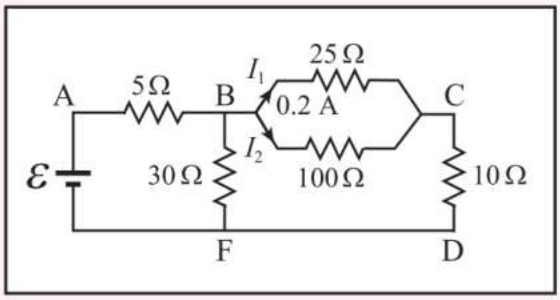
55. วงจรไฟฟ้า ดังรูป



รูป ประกอบปัญหาท้าทายข้อ 55

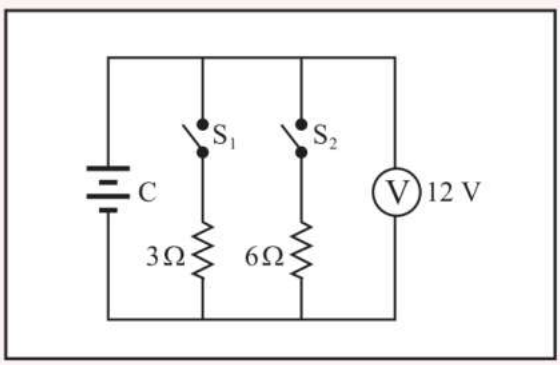
ถ้า R เท่ากับ 6 โอห์ม จงหาค่าของกระแสไฟฟ้า I I_1 และ I_2

56. วงจรไฟฟ้าดังรูป จงหาอีเอ็มเอฟ $\mathcal{E}$ ของแบตเตอรี่ และกระแสไฟฟ้าที่ผ่านแบตเตอรี่



รูป ประกอบปัญหาท้าทายข้อ 56

57. วงจรไฟฟ้าดังรูป ประกอบด้วยสวิตช์ S_1 และ S_2 โวลต์มิเตอร์ V แบตเตอรี่ C และตัวต้านทานขนาด 3 โอห์ม และ 6 โอห์ม เมื่อสับสวิตช์ S_1 อย่างเดียวโวลต์มิเตอร์อ่านได้ 12 โวลต์ เมื่อสับสวิตช์ S_2 อย่างเดียว โวลต์มิเตอร์อ่านได้ 16 โวลต์



รูป ประกอบปัญหาท้าทายข้อ 57

ก. จงหาความต้านทานภายในของแบตเตอรี่

ข. ถ้ายังไม่ได้สับสวิตช์ S_1 และ S_2 โวลต์มิเตอร์อ่านได้เท่าใด

58. จุ่มลวดให้ความร้อนเส้นหนึ่งที่ต่อกับความต่างศักย์ 220 โวลต์ ลงในน้ำที่มีมวล 1 กิโลกรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ปรากฏว่าน้ำเดือดในเวลา 5 นาที จงหากำลังไฟฟ้าของลวดให้ความร้อน กำหนดให้ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำเท่ากับ 4.2 กิโลจูลต่อกิโลกรัม เคลวิน

59. หลอดไฟ ระบุขนาด 24 วัตต์ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 12 โวลต์ ต้องการนำไปใช้กับแบตเตอรี่อีเอ็มเอฟ 18 โวลต์ที่มีความต้านทานภายในน้อยมาก ให้มีกำลังไฟฟ้าตามที่ระบุไว้ จะต้องใช้ตัวต้านทานเท่าใดมาต่ออย่างไรกับหลอดไฟและตัวต้านทานนี้ต้องทนกำลังไฟฟ้าได้อย่างน้อยกี่วัตต์

60. ลุงดำเป็นชาวสวน ต้องการต่อไฟฟ้าความต่างศักย์ 220 โวลต์จากในบ้าน ไปใช้กับเครื่องอบแห้งในสวนซึ่งอยู่ห่างบ้านออกไป 1 กิโลเมตร ด้วยสายไฟขนาดพื้นที่หน้าตัด 1 ตารางมิลลิเมตร หากเครื่องอบแห้งมีกำลังไฟฟ้าปกติ 1.1 กิโลวัตต์ที่ 220 โวลต์ กำหนดสภาพต้านทานของทองแดงที่ใช้ทำลวดสายไฟเท่ากับ 1.72×10^{-8} โอห์ม เมตร ตอบคำถามต่อไปนี้

ก. เครื่องอบแห้งจะได้รับความต่างศักย์เท่าใด

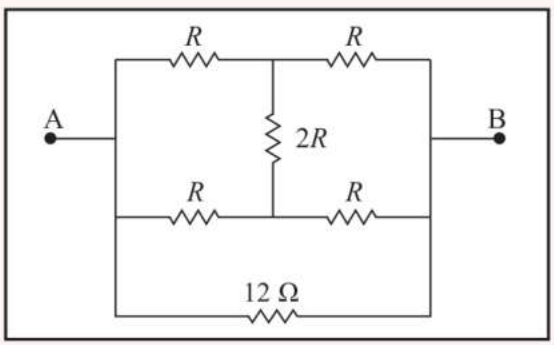
ข. เครื่องอบแห้งมีกำลังเท่าใดเมื่อใช้งาน และคิดเป็นกี่เปอร์เซ็นต์ของกำลังไฟฟ้าปกติของเครื่องอบแห้ง

ค. ถ้าเครื่องอบแห้งกำหนดใช้งานได้กับไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์ในช่วง 180-250 โวลต์ จะสามารถใช้งานเครื่องอบแห้งนี้ได้หรือไม่

ง. จากข้อมูลเครื่องอบแห้งตามข้อ ค. นักเรียนจะแนะนำลุงดำอย่างไร ให้สามารถใช้งานเครื่องอบแห้งได้

61. หลอดไฟหลอดที่ 1 ขนาด 6 โวลต์ 9 วัตต์ หลอดที่ 2 ขนาด 6 โวลต์ 18 วัตต์ นำหลอดทั้งสองมาต่ออนุกรมกันแล้วนำไปต่อระหว่างขั้วแบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ ความต่างศักย์ระหว่างขั้วหลอดแต่ละหลอดและกำลังไฟฟ้าของแต่ละหลอดเป็นเท่าใด และหากใช้งานต่อไปหลอดใดมีโอกาสขาดเพราะเหตุใด

62. ตัวต้านทานต่อกันอยู่ระหว่างจุด A กับ B ดังรูป โดยมีความต้านทานระหว่างจุด A กับ B เป็น 3 โอห์ม หากปลดตัวต้านทาน 12 โอห์มออก ความต้านทานระหว่างจุด A กับ B จะเป็นเปลี่ยนเป็นเท่าใด



รูป ประกอบปัญหาท้าทายข้อ 62

63. นำหลอดไฟขนาด 12 วัตต์ 12 โวลต์ มาต่ออนุกรมกับหลอดขนาด 6 วัตต์ 6 โวลต์ แล้วนำไปต่อกับแบตเตอรี่ 9 โวลต์ ซึ่งมีความต้านทานภายในน้อยมาก จงหากำลังไฟฟ้ารวมของหลอดไฟทั้งสองหลอด

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก คณิตศาสตร์สำหรับฟิสิกส์

1. พื้นฐานทั่วไปทางคณิตศาสตร์

1.1 เศษส่วน ทศนิยม ร้อยละหรือเปอร์เซ็นต์

1.2 อัตราส่วน อัตรา สัดส่วน

1.3 การแปรผันและสมการ

2. พีชคณิต

2.1 เลขชี้กำลัง

2.2 การแก้สมการ

2.3 สมการกำลังสอง

2.4 สมการเชิงเส้น

3. เรขาคณิตและตรีโกณมิติ

3.1 การหาความยาวระหว่างจุดสองจุดในระบบพิกัดฉาก

3.2 ข้อมูลรูปทรงทางเรขาคณิต

3.3 ทฤษฎีบทพีทาโกรัส

3.4 ฟังก์ชันตรีโกณมิติ

1. พื้นฐานทั่วไปทางคณิตศาสตร์

1.1 เศษส่วน ทศนิยม ร้อยละหรือเปอร์เซ็นต์

เศษส่วน (fraction) ในทางเลขคณิต หมายถึง จำนวนที่อยู่ในรูป $\frac{A}{B}$ โดยที่ $B \neq 0$ เรียก A ว่า ตัวเศษ เรียก B ว่า ตัวส่วน เช่น $\frac{2}{5}$, $\frac{1+\sqrt{2}}{2-\sqrt{3}}$ ในทางพีชคณิต ตัวเศษและตัวส่วนอาจเป็นตัวแปรหรือตัวไม่รู้ค่า (unknown) เช่น $\frac{x}{2}$, $\frac{1}{f}$ เราอาจแสดงเศษส่วนในรูปทศนิยม (decimal) โดยหารตัวเศษด้วยตัวส่วน หรือแสดงในรูปร้อยละหรือเปอร์เซ็นต์ (percent) โดยการคูณด้วย 100% เช่น $\frac{1}{4}$ ในรูปทศนิยมเขียนได้ดังนี้ $\frac{1}{4} = 0.25$ และในรูปเปอร์เซ็นต์ เขียนได้ดังนี้ $0.25 \times 100\% = 25\ \%$

1.2 อัตราส่วน อัตรา สัดส่วน

อัตราส่วน (ratio) เป็นการเปรียบเทียบปริมาณสองปริมาณโดยการหาร ซึ่งจะเขียนเหมือนเศษส่วน

อัตรา (rate) เป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณสองปริมาณที่มีหน่วยต่างกัน เช่น $\frac{\text{ระยะทาง}}{\text{เวลา}}$ โดยที่ระยะทางมีหน่วย เมตร (m) และเวลามีหน่วย วินาที (s) ในฟิสิกส์ ปริมาณที่เป็นตัวส่วน มักเป็น เวลา

สัดส่วน (proportion) เป็นสมการหรือข้อความที่แสดงการเท่ากันของอัตราส่วนสองอัตราส่วน เช่น $\frac{3}{6} = \frac{1}{2}$ บางสัดส่วนอาจมีตัวไม่รู้ค่า เช่น $\frac{4}{x} = \frac{2}{3}$, $\frac{x}{y} = \frac{a}{b}$

1.3 การแปรผันและสมการ

ในการค้นหาความรู้ทางวิทยาศาสตร์ จะพบว่าเมื่อปริมาณหนึ่งมีการเปลี่ยนแปลงจะส่งผลถึงปริมาณอื่น ปัญหาสำคัญประการหนึ่ง ก็คือ การหาว่าปริมาณต่าง ๆ เหล่านั้นมีความสัมพันธ์กันอย่างไร

นักวิทยาศาสตร์พบว่า เมื่อให้ความต่างศักย์ระหว่างปลายของลวดตัวนำ จะเกิดกระแสไฟฟ้าในลวดตัวนำนั้น ถ้าเพิ่มความต่างศักย์เป็นสองเท่า กระแสไฟฟ้าในลวดตัวนำจะเป็นสองเท่า และถ้าเพิ่มความต่างศักย์เป็นสามเท่า กระแสไฟฟ้าในลวดตัวนำก็จะเป็นสามเท่า จึงกล่าวได้ว่า กระแสไฟฟ้าแปรผันกับความต่างศักย์ เขียนในรูปสัญลักษณ์ ได้ดังนี้ $I \propto V$ โดย I คือกระแสไฟฟ้า V คือความต่างศักย์ และ $\propto$ มีความหมายว่า “แปรผันกับ (is proportional to)”

การที่ปริมาณสองปริมาณมีความสัมพันธ์ในลักษณะที่เมื่อปริมาณหนึ่งเพิ่ม ทำให้อีกปริมาณหนึ่งเพิ่มขึ้นอย่างได้สัดส่วนกัน เรียกว่า การแปรผันตรง (direct proportion)

บางครั้ง ปริมาณสองปริมาณอาจมีความสัมพันธ์ในลักษณะที่เมื่อปริมาณหนึ่งเพิ่ม ทำให้อีกปริมาณหนึ่งลดลงอย่างได้สัดส่วนกัน เรียกว่า การแปรผันกลับ (inverse proportion) เช่น นักวิทยาศาสตร์พบว่าเมื่อเพิ่มความดันให้แก๊สจำนวนหนึ่ง แก๊สจะมีปริมาตรลดลง ถ้าเพิ่มความดันเป็นสองเท่า ปริมาตรลดลงเหลือ $\frac{1}{2}$ และถ้าเพิ่มความดันเป็นสามเท่า ปริมาตรลดลงเหลือ $\frac{1}{3}$ จึงกล่าวได้ว่า ความดันของแก๊สแปรผันกับส่วนกลับของปริมาตร เขียนในรูปสัญลักษณ์ ได้ดังนี้ $P \propto \frac{1}{V}$ โดย P คือความดัน V คือปริมาตร และ $\propto$ มีความหมายว่า “แปรผันกับ” ซึ่งในกรณีนี้ กล่าวได้ว่า P แปรผันกับ $\frac{1}{V}$ หรือ P แปรผันกลับกับ V

ขั้นตอนต่อไปคือเปลี่ยน การแปรผัน (proportionality) เป็นสมการ (equation) (หรือเปลี่ยน $\propto$ เป็น =) ซึ่งทำได้โดยการใส่ ค่าคงตัวการแปรผัน (proportionality constant) k ดังนี้

จาก $I \propto V$ จะได้ $I = kV$ (1)

และ $P \propto \frac{1}{V}$ จะได้ $P = \frac{k}{V}$ (2)

นอกจากนี้ยังมีการแปรผันอื่น เช่น $T \propto \sqrt{l}$, $F \propto \frac{1}{r^2}$, $F \propto a$, $W \propto g$ ซึ่งจะทราบเกี่ยวกับความสัมพันธ์ (1) (2) และอื่น ๆ เมื่อศึกษาในรายวิชาเพิ่มเติม ฟิสิกส์

การหาความสัมพันธ์ของปริมาณในรูปแบบของสมการ จะทำให้เราสามารถเชื่อมโยงความสัมพันธ์ของปริมาณทั้งสองในเชิงปริมาณ (quantitative) หรือเชิงตัวเลขได้ ซึ่งนำไปสู่การทำนายการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของปรากฏการณ์ต่าง ๆ ได้

2. พีชคณิต

2.1 เลขชี้กำลัง

เลขชี้กำลัง (exponent) หมายถึง ตัวเลขหรือสัญลักษณ์ที่เขียนไว้ด้านบนขวาของจำนวนหรือนิพจน์ใด ๆ เช่น $5^3, 9^{\frac{1}{2}}, 4^a$ และ $(x+1)^2$ มี 3 , $\frac{1}{2}$, a และ 2 เป็นเลขชี้กำลัง ตามลำดับ ส่วนจำนวนหรือนิพจน์ 5, 9, 4 และ $x+1$ เรียกว่า ฐานเลขชี้กำลังจะบอกให้ทราบว่า จะต้องคูณจำนวนหรือนิพจน์ (ฐาน) กี่ครั้ง เช่น a^3 หมายถึง $a \times a \times a$ หรือ $a \cdot a \cdot a$

สมบัติของเลขชี้กำลัง

สำหรับ a ไม่เท่ากับศูนย์ และ p เป็นจำนวนเต็มใด ๆ จะได้

$$a^0 = 1,\ a^1 = a,\ \frac{1}{a^p} = a^{-p}$$

สำหรับ a และ b เป็นจำนวนเต็มและไม่เท่ากับศูนย์ r , s และ t เป็นจำนวนเต็ม จะได้

$$a^r a^s = a^{r+s}, (a^r)^s = a^{rs},\ \frac{a^r}{a^s} = a^{r-s},\ (ab)^r = a^r b^r,\ (a^r b^s)^t = a^{rt} b^{st}$$

2.2 การแก้สมการ

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณต่าง ๆ ในฟิสิกส์ มักอยู่ในรูปสมการที่มีสัญลักษณ์แทนปริมาณเหล่านั้น และมีเครื่องหมาย = ซึ่งบอกให้ทราบว่าปริมาณทั้งหลายที่อยู่ข้างซ้ายและข้างขวาของ = มีค่าเท่ากัน เช่น $\rho = \frac{m}{V}$, $v = \frac{s}{t}$, $v^2 = u^2 + 2as$, $v = 2\pi rf$, $F = ma$ และ $E = mc^2$ ในวิชาพีชคณิตนิยมใช้สัญลักษณ์ x y และ z แทนปริมาณที่ไม่ทราบค่าหรือ**ตัวไม่รู้ค่า** (unknown) เราต้องแก้สมการเพื่อหาค่าของปริมาณหรือตัวไม่รู้ค่านั้น

การแก้สมการที่มีตัวไม่รู้ค่า 1 ตัว

ในการแก้สมการที่มีตัวไม่รู้ค่า 1 ตัว เช่น $2x + 5 = 8$ ให้จัดกระทำกับสมการโดยอาศัยหลักการ ได้แก่ (1) การบวกหรือลบด้วยตัวเลขหรือสัญลักษณ์ (2) การคูณหรือหารด้วยตัวเลขหรือสัญลักษณ์ และ (3) การยกกำลังหรือใส่รากด้วยตัวเลขหรือสัญลักษณ์ **การจัดกระทำดังกล่าวต้องทำทั้งสองข้างของสมการเพื่อให้ทั้งสองข้างของสมการยังคงเท่ากัน**จนกระทั่งได้ ตัวไม่รู้ค่า อยู่ข้างซ้ายของ = ดังตัวอย่าง

ตัวอย่าง จงหา x จากสมการ ก. $x+6 = 2$ ข. $4x = 12$ ค. $\frac{x}{2} = 5$

วิธีทำ ก. ลบทั้งสองข้างด้วย 6

$$x+6-6 = 2-6$$
$$x = -4$$

ข. หารทั้งสองข้างด้วย 4

$$\frac{4x}{4} = \frac{12}{4}$$
$$x = 3$$

ค. คูณทั้งสองข้างด้วย 2

$$\frac{x}{2}\times 2 = 5\times 2$$
$$x = 10$$

การแก้สมการ (กำลังหนึ่ง) ที่มีตัวไม่รู้ค่า 2 ตัว

ในการแก้สมการที่มีตัวไม่รู้ค่า 1 ตัว ต้องการเพียง 1 สมการ แต่การแก้สมการ (กำลังหนึ่ง) ที่มีตัวไม่รู้ค่า 2 ตัว ต้องใช้ 2 สมการ โดยมีขั้นตอนดังนี้ (1) เลือกสมการใดสมการหนึ่ง แล้วหา x ในเทอมของ y (หรือหา y ในเทอมของ x) (2) นำ x ไปแทนในอีกสมการหนึ่ง จะได้ค่าของ y (3) นำค่าของ y ไปแทนในอีกสมการหนึ่ง จะได้ค่าของ x ในการจัดกระทำกับขั้นตอนแต่ละขั้น ใช้หลักการเดียวกับการแก้สมการที่มีตัวไม่รู้ค่า 1 ตัว ดังตัวอย่าง

[หมายเหตุ การแก้สมการในตัวอย่างต่อไปนี้ เป็นวิธีการหนึ่ง ยังมีวิธีการอื่น ซึ่งให้ผลเหมือนกัน]

ตัวอย่าง จงหา x และ y ในสมการ ก. $x-2y=4$ และ สมการ ข. $3x+y=5$

วิธีทำ ขั้นที่ (1) เลือกสมการ ก. เพื่อหา x ในเทอมของ y [หรือเลือกสมการ ข. เพื่อหา y ในเทอมของ x ก็ได้]

$$x-2y = 4$$
$$x = 4+2y \qquad \text{[บวกทั้งสองข้างด้วย 2y]}$$

ขั้นที่ (2) นำ $x = 4+2y$ ไปแทนในสมการ ข. จะได้

$$3(4+2y)+y = 5$$
$$12+6y+y = 5$$
$$12+7y = 5$$
$$7y = -7 \qquad \text{[ลบทั้งสองข้างด้วย 12]}$$
$$y = -1 \qquad \text{[หารทั้งสองข้างด้วย 7]}$$

ขั้นที่ (3) $y=-1$ นำ ไปแทนในสมการ $x=2y+4$ จะได้ $x = 2(-1)+4 = 2$

คำตอบ $x=2$ และ $y=-1$

การตรวจคำตอบ โดยการนำคำตอบที่หาได้ไปแทนในสมการทั้งสองในโจทย์ ดังนี้

จากสมการ ก. $x-2y = 4$

$2-2(-1) = 4$ [แทน $x=2$ และ $y=-1$]

$2+2 = 4$

$4 = 4$ [สองข้างของ = มีค่าเท่ากัน]

และสมการ ข. $3x+y = 5$

$3(2)+(-1) = 5$ [แทน $x=2$ และ $y=-1$]

$6-1 = 5$

$5 = 5$ [สองข้างของ = มีค่าเท่ากัน]

จะเห็นว่า สองข้างของ = มีค่าเท่ากัน แสดงว่า $x=2$ และ $y=-1$ ถูกต้อง

2.3 สมการกำลังสอง

สมการกำลังสอง (quadratic equation) อยู่ในรูป $ax^2+bx+c=0$ เมื่อ x เป็นตัวไม่รู้ค่า a, b และ c เป็นตัวคงค่า โดยที่ $a \neq 0$

รากของสมการกำลังสองคือ $x = \dfrac{-b \pm \sqrt{b^2-4ac}}{2a}$ ถ้า $b^2-4ac \geq 0$ รากจะเป็นจำนวนจริง 2 ค่า

ตัวอย่าง จงหา x จากสมการ $x^2+3x+2 = 0$

วิธีทำ รากของสมการคือ $x = \dfrac{-b \pm \sqrt{b^2-4ac}}{2a}$

$$x = \frac{-3 \pm \sqrt{3^2-4(1)(2)}}{2(1)} = \frac{-3 \pm \sqrt{1}}{2} = \frac{-3 \pm 1}{2}$$

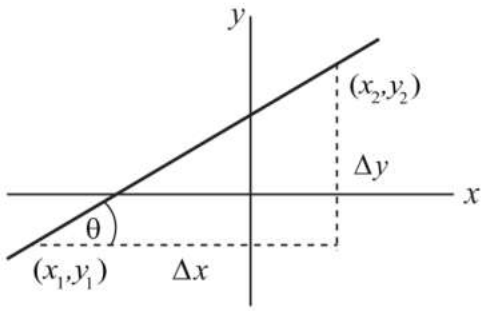
$x = \dfrac{-3+1}{2} = -1$ และ $x = \dfrac{-3-1}{2} = -2$

$x = -1, -2$

ตอบ x เท่ากับ -1 หรือ -2

2.4 สมการเชิงเส้น

สมการเชิงเส้น (linear equation) หรือสมการเส้นตรง มีรูปแบบดังนี้ $y = mx + b$ โดยที่ m และ b เป็นตัวคงค่า สมการนี้เป็นเชิงเส้นเพราะเมื่อเขียนกราฟของ y และ x จะได้กราฟเป็นเส้นตรง ดังรูป ก. 1



รูป ก. 1

ตัวคงค่า b เรียกว่า ระยะตัดแกน y (y-intercept) เป็นค่าของ y ที่เส้นตรงตัดกับแกน y

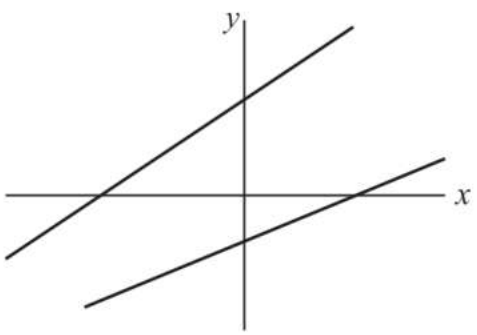
ตัวคงค่า m เท่ากับ ความชัน (slope, gradient) ของเส้นตรง และเท่ากับ tan ของมุมที่เส้นตรงทำกับแกน x (ในกรณีแกนทั้งสองใช้สเกลเดียวกัน)

ถ้า (x_1, y_1) และ (x_2, y_2) เป็นจุดสองจุดบนเส้นตรง ดังรูป ก. 1 ความชันของเส้นตรงมีค่าดังนี้

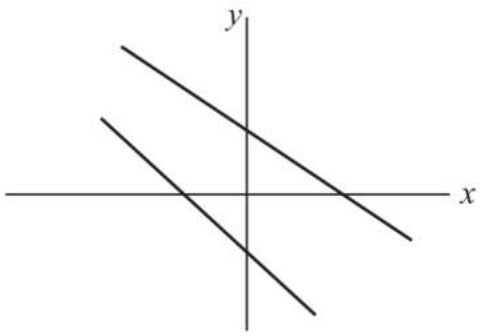
$$\text{ความชัน} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \tan\theta$$

ถ้า $m > 0$ เส้นตรงมีความชันเป็นบวก ดังรูป ก. 2 ถ้า $m < 0$ เส้นตรงมีความชันเป็นลบ ดังรูป ก. 3

สังเกตว่า m และ b มีค่าได้ทั้งบวกและลบ



รูป ก. 2 $m > 0$

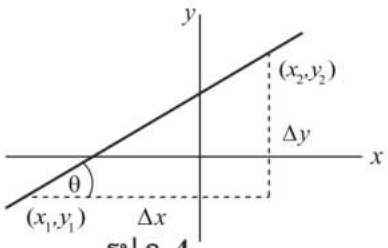


รูป ก. 3 $m < 0$

3. เรขาคณิตและตรีโกณมิติ

3.1 การหาความยาวระหว่างจุดสองจุดในระบบพิกัดฉาก

ความยาวระหว่างจุดสองจุดที่มีพิกัด (x_1, y_1) และ (x_2, y_2) หาได้จาก $s = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$



รูป ก. 4

3.2 ข้อมูลรูปทรงทางเรขาคณิต

ข้อมูลเกี่ยวกับรูปทรงทางเรขาคณิต ได้แก่ เส้นรอบรูป พื้นที่ พื้นที่ผิวและปริมาตร แสดงในตาราง ก. 1

ตาราง ก. 1 ข้อมูลรูปทรงทางเรขาคณิต

รูปทรง	เส้นรอบรูป	พื้นที่	พื้นที่ผิว	ปริมาตร
วงกลม รัศมี r	$2\pi r$	πr^2		
จัตุรัส ความยาวด้าน a	$4a$	a^2		
สี่เหลี่ยมผืนผ้า ยาว l กว้าง w	$2l + 2w$	lw		
สามเหลี่ยม ฐาน a สูง h		$\frac{1}{2}ah$		
ทรงกระบอก รัศมี r สูง h			$2\pi rh + 2\pi r^2$	$\pi r^2 h$
ทรงกลม รัศมี r			$4\pi r^2$	$\frac{4}{3}\pi r^3$
ลูกบาศก์ ความยาวด้าน a			$6a^2$	a^3

3.3 ทฤษฎีบทพีทาโกรัส

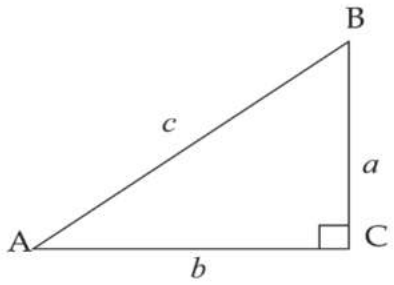
ทฤษฎีบทพีทาโกรัส (Pythagoras' theorem) เป็นทฤษฎีบทที่เกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างด้านทั้งสามของสามเหลี่ยมมุมฉาก กล่าวว่า ในสามเหลี่ยมมุมฉากใด ๆ ผลรวมของพื้นที่จัตุรัสบนด้านประกอบมุมฉากเท่ากับพื้นที่ของจัตุรัสบนด้านตรงข้ามมุมฉาก

ถ้า a และ b แทนความยาวของด้านประกอบมุมฉาก

และ c แทนความยาวของด้านตรงข้ามมุมฉาก ดังรูป ก. 5

จะเขียนทฤษฎีบทพีทาโกรัส ในรูปสมการได้ดังนี้

$$c^2 = a^2 + b^2 \quad \text{หรือ} \quad c = \sqrt{a^2 + b^2}$$



รูป ก. 5

ตัวอย่าง จงหาความยาว c ของด้าน AB ของสามเหลี่ยมมุมฉาก ABC ในรูป ก. 5 เมื่อ $a = 3$ cm และ $b = 4$ cm

วิธีทำ ความยาวของด้าน $AC = b = 4$ cm

ความยาวของด้าน $BC = a = 3$ cm

$$c = \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$= \sqrt{(3\,\text{cm})^2 + (4\,\text{cm})^2} = \sqrt{9\,\text{cm}^2 + 16\,\text{cm}^2} = \sqrt{25\,\text{cm}^2}$$

$$= 5 \text{ cm}$$

ตอบ C มีค่าความยาวเท่ากับ 5 เซนติเมตร

3.4 ฟังก์ชันตรีโกณมิติ

ฟังก์ชันตรีโกณมิติเป็นอัตราส่วนระหว่างความยาวของด้านสองด้านของสามเหลี่ยมมุมฉาก ฟังก์ชันตรีโกณมิติ ได้แก่ sine (sin), cosine (cos), tangent (tan), cosecant (csc), secant (sec) และ cotangent (cot) แต่ฟังก์ชันตรีโกณมิติที่ใช้บ่อย ได้แก่ sin cos และ tan

พิจารณา สามเหลี่ยมมุมฉาก ABC มี C เป็นมุมฉาก

a เป็นความยาวของด้านตรงข้ามมุม θ

b เป็นความยาวของด้านประชิดมุม θ

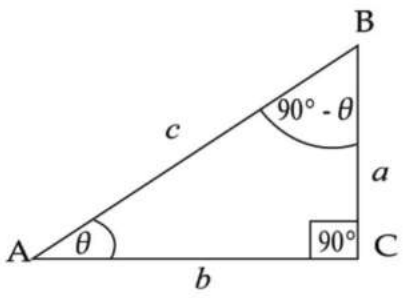
c เป็นความยาวของด้านตรงข้ามมุมฉาก

ฟังก์ชันตรีโกณมิติของมุม θ ถูกกำหนดดังนี้

$$\sin\theta = \frac{a}{c} \qquad \csc\theta = \frac{c}{a} = \frac{1}{\sin\theta}$$

$$\cos\theta = \frac{b}{c} \qquad \sec\theta = \frac{c}{b} = \frac{1}{\cos\theta}$$

$$\tan\theta = \frac{a}{b} \qquad \cot\theta = \frac{b}{a} = \frac{1}{\tan\theta}$$



รูป ก. 6

จากสามเหลี่ยมมุมฉาก ในรูป ก. 6 จะได้

$\sin\theta = \cos(90^\circ - \theta)$, $\cos\theta = \sin(90^\circ - \theta)$, $\tan\theta = \cot(90^\circ - \theta)$, $\tan\theta = \dfrac{\sin\theta}{\cos\theta}$

จากทฤษฎีบทพีทาโกรัส $c^2 = a^2 + b^2$ สามารถพิสูจน์ได้ว่า

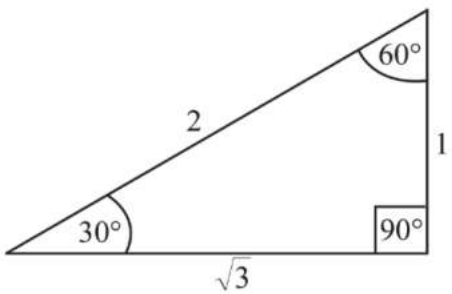
$\sin^2\theta + \cos^2\theta = 1$, $\sec^2\theta - \tan^2\theta = 1$, $\csc^2\theta - \cot^2\theta = 1$

ความสัมพันธ์อื่น ๆ ของฟังก์ชันตรีโกณมิติ

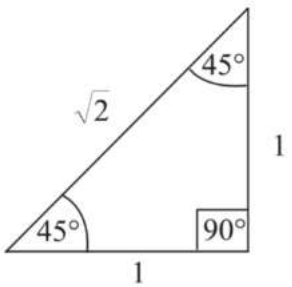
$\sin 2\theta = 2\sin\theta\cos\theta$	$\sin(A \pm B) = \sin A\cos B \pm \cos A\sin B$
$\cos 2\theta = \cos^2\theta - \sin^2\theta$	$\cos(A \pm B) = \cos A\cos B \mp \sin A\sin B$
$\tan 2\theta = \dfrac{2\tan\theta}{1-\tan^2\theta}$	$\tan(A \pm B) = \dfrac{\tan A \pm \tan B}{1 \mp \tan A\tan B}$

ฟังก์ชันตรีโกณมิติของมุมที่พบบ่อย

สามเหลี่ยมมุมฉากที่พบบ่อยคือสามเหลี่ยมมุมฉากที่มีมุม 30° -60° -90° และ 45° -45° -90° สามเหลี่ยมทั้งสองมีความยาวของด้านทั้งสามดังรูป ก. 7 และ ก. 8 ฟังก์ชันตรีโกณมิติของมุมต่าง ๆ มีค่าดังตาราง ก. 2 [ถ้าจำได้ จะช่วยแก้ปัญหาทางฟิสิกส์ได้เร็วขึ้น]

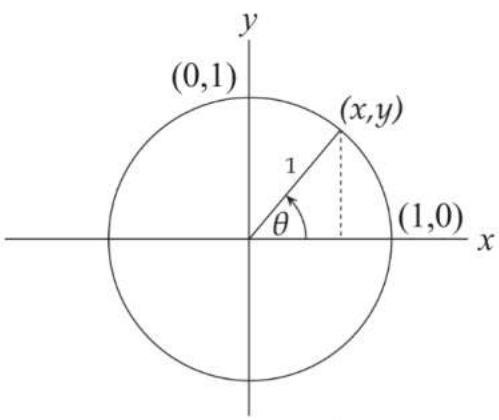


รูป ก. 7 สามเหลี่ยมมุมฉาก 30°-60°-90°



รูป ก. 8 สามเหลี่ยมมุมฉาก 45°-45°-90°

ส่วนฟังก์ชันตรีโกณมิติของมุมอื่น ๆ ที่พบบ่อย เช่น 90°, 120°, 180° หาได้จากค่าของ x, y บนส่วนโค้งของวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วย ดังรูป ก. 9 โดย $\sin\theta = y$, $\cos\theta = x$ และ $\tan\theta = \dfrac{y}{x}$ เช่น ที่ $\theta = 90^\circ$ $x = 0, y = 1$ ได้ $\sin 90^\circ = 1$, $\cos 90^\circ = 0$ และ $\tan 90^\circ = \infty$



รูป ก. 9 วงกลมรัศมีหนึ่งหน่วย

ตาราง ก. 2 ฟังก์ชันตรีโกณมิติของมุมที่พบบ่อย

ฟังก์ชันตรีโกณมิติ	มุม								
	0°	30°	45°	60°	90°	120°	180°	270°	360°
sin	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	1	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	0	-1	0
cos	1	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	$\frac{1}{2}$	0	$-\frac{1}{2}$	-1	0	1
tan	0	$\frac{1}{\sqrt{3}}$	1	$\sqrt{3}$	∞	$-\sqrt{3}$	0	∞	0

การใช้งานฟังก์ชันตรีโกณมิติในฟิสิกส์ระดับนี้ อาจแบ่งได้ 3 กรณี

1. การหาค่าของฟังก์ชันตรีโกณมิติที่มีมุมไม่ตรงกับมุมในตาราง ก. 2 ซึ่งสามารถหาค่าของฟังก์ชันตรีโกณมิติของมุมต่าง ๆ ได้จาก ภาคผนวก ค ตารางฟังชันตรีโกณมิติ เช่น $\sin 23^\circ, \cos 47^\circ, \tan 62^\circ$ จะได้ $\sin 23^\circ = 0.3907, \cos 47^\circ = 0.6820, \tan 62^\circ = 1.8807$ ตามลำดับ

2. การหามุมของฟังก์ชันตรีโกณมิติ เช่น การหา ϕ ของ $\tan\phi = 1.3519$ สามารถหาค่าได้จากภาคผนวก ค ตารางฟังชันตรีโกณมิติ จะได้ $\phi = 53.5^\circ$

3. การหามุมของฟังก์ชันตรีโกณมิติที่อยู่ในเทอมของตัวแปร เช่น $\sin\theta = \frac{a}{\omega^2 L}$ อาจแสดงค่าของมุมได้ 2 แบบ ดังนี้ $\theta = \sin^{-1}\left(\frac{a}{\omega^2 L}\right)$ หรือ $\theta = \arcsin\left(\frac{a}{\omega^2 L}\right)$

ความสัมพันธ์ระหว่างด้านและมุมภายในของสามเหลี่ยมใด ๆ

สมมติสามเหลี่ยมใด ๆ มี α, β และ γ เป็นมุมภายใน และมี a, b และ c เป็นความยาวของด้านตรงข้ามมุม α, β และ γ ตามลำดับ ดังรูป ก. 10 ด้านและมุมภายในของสามเหลี่ยมมีความสัมพันธ์กันดังนี้

กฎของไซน์ (law of sines)

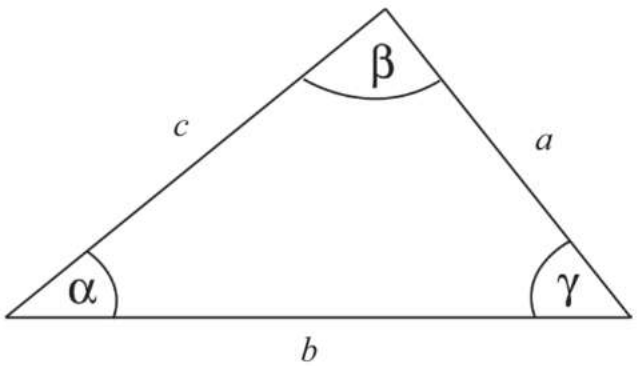
$$\frac{a}{\sin\alpha} = \frac{b}{\sin\beta} = \frac{c}{\sin\gamma}$$

กฎของโคไซน์ (law of cosines)

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc\cos\alpha$$

$$b^2 = a^2 + c^2 - 2ac\cos\beta$$

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab\cos\gamma$$



รูป ก. 10

ภาคผนวก ข ระบบหน่วยระหว่างชาติ

ระบบหน่วยระหว่างชาติ (The International System of Units **หรือ** Le Système international d'unités) หรือเอสไอ ประกอบด้วย หน่วยฐาน หน่วยอนุพัทธ์ และคำนำหน้าหน่วย ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. หน่วยฐาน (base units) เป็นหน่วยหลักของเอสไอ มีทั้งหมด 7 หน่วย ดังตาราง ข. 1

ตาราง ข. 1 ชื่อและสัญลักษณ์ของของหน่วยฐาน

หน่วยฐาน	ศัพท์บัญญัติ	สัญลักษณ์	ปริมาณฐาน
meter	เมตร	m	ความยาว
kilogram	กิโลกรัม	kg	มวล
second	วินาที	s	เวลา
ampere	แอมแปร์	A	กระแสไฟฟ้า
kelvin	เคลวิน	K	อุณหภูมิอุณพลวัติ
mole	โมล	mol	ปริมาณของสาร
candela	แคนเดลา	cd	ความเข้มของการส่องสว่าง

2. หน่วยอนุพัทธ์ (derived units)

หน่วยอนุพัทธ์เป็นหน่วยที่มีหน่วยฐานหลายหน่วยมาเกี่ยวเนื่องกัน หน่วยอนุพัทธ์มีหลายหน่วยซึ่งมีชื่อและสัญลักษณ์ที่กำหนดขึ้นโดยเฉพาะ ดังตาราง ข. 2

ตาราง ข. 2 ชื่อและสัญลักษณ์ของหน่วยอนุพัทธ์

ปริมาณอนุพัทธ์	หน่วยอนุพัทธ์				
	ชื่อหน่วย	ศัพท์บัญญัติ	สัญลักษณ์	ในเทอมของเอสไออื่น	ในเทอมของหน่วยฐาน
ความถี่	เฮิรตซ์	hertz	Hz	-	s^{-1}
แรง	นิวตัน	newton	N	-	$m\ kg\ s^{-2}$
ความดัน	พาสคัล	pascal	Pa	N/m^2	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
พลังงาน งาน ปริมาณความร้อน	จูล	joule	J	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
กำลัง ฟลักซ์การแผ่รังสี	วัตต์	watt	W	J/s	$m^2\ kg\ s^{-3}$
ประจุไฟฟ้า ปริมาณไฟฟ้า	คูลอมบ์	coulomb	C	-	s A

ตาราง ข. 2 ชื่อและสัญลักษณ์ของหน่วยอนุพัทธ์ (ต่อ)

ปริมาณอนุพัทธ์	หน่วยอนุพัทธ์				
	ชื่อหน่วย	ศัพท์บัญญัติ	สัญลักษณ์	ในเทอมของเอสไออื่น	ในเทอมของหน่วยฐาน
ศักย์ไฟฟ้า ความต่างศักย์ อีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำ	โวลต์	volt	V	W/A	$m^2\ kg\ s^{-3}A^{-1}$
ความจุ	ฟารัด	farad	F	C/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^4A^2$
ความต้านทาน	โอห์ม	ohm	Ω	V/ A	$m^2\ kg\ s^{-3}A^{-2}$
ความนำ	ซีเมนส์	siemens	S	A/V	$m^{-2}kg^{-1}\ s^3\ A^2$
ฟลักซ์แม่เหล็ก	เวเบอร์	weber	Wb	V s	$m^2\ kg\ s^{-2}A^{-1}$
ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก	เทสลา	tesla	T	Wb/m^2	$kg\ s^{-2}A^{-1}$
ความเหนี่ยวนำ	เฮนรี	henry	H	Wb/A	$m^2\ kg\ s^{-2}A^{-2}$
ฟลักซ์ส่องสว่าง	ลูเมน	lumen	lm	cd sr	cd
ความสว่าง	ลักซ์	lux	lx	lm/m^2	$m^{-2}cd$
กัมมันตภาพ	เบ็กเคอเรล	becquerel	Bq	-	s^{-1}
ขนาดกำหนดของกัมมันตภาพรังสี	ซีเวิร์ต	sievert	Sv	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
ขนาดกำหนดของการดูดกลืนของรังสีที่ทำให้แตกตัวเป็นไอออน	เกรย์	gray	Gy	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
มุมระนาบ	เรเดียน	radian	rad	-	m/m
มุมตัน	สตีเรเดียน	steradian	sr	-	m^2/m^2

3. คำนำหน้าหน่วย (prefixes)

เมื่อค่าในหน่วยฐานหรือหน่วยอนุพัทธ์มากหรือน้อยเกินไป เราสามารถเขียนค่านั้นเป็นตัวเลขคูณด้วยตัวคูณ (เลขสิบยกกำลังบวกหรือลบ) ได้ เช่น 0.000005 แอมแปร์ เขียนเป็น 5×10^{-6} แอมแปร์ หรือ 6000000 วัตต์ เขียนเป็น 6×10^6 วัตต์ ตัวคูณ 10^{-6} และ 10^6 ให้เขียนแทนด้วยคำนำหน้าหน่วย ไมโครและเมกะ กำกับไว้หน้าแอมแปร์และวัตต์ ตามลำดับ คำนำหน้าหน่วยที่ใช้แทนตัวคูณและสัญลักษณ์แสดงไว้ในตาราง 3

ตาราง ข. 3 คำนำหน้าหน่วยและสัญลักษณ์

ตัวคูณ	คำนำหน้าหน่วย		สัญลักษณ์
	ชื่อ	ศัพท์บัญญัติ	
10^{-24}	yocto	ยอคโต	y
10^{-21}	zepto	เซพโต	z
10^{-18}	atto	อัตโต	a
10^{-15}	femto	เฟมโต	f
10^{-12}	pico	พิโก	p
10^{-9}	nano	นาโน	n
10^{-6}	micro	ไมโคร	μ
10^{-3}	milli	มิลลิ	m
10^{-2}	centi	เซนติ	c
10^{-1}	deci	เดซิ	d

ตัวคูณ	คำนำหน้าหน่วย		สัญลักษณ์
	ชื่อ	ศัพท์บัญญัติ	
10^{1}	deca	เดคา	da
10^{2}	hecto	เฮกโต	h
10^{3}	kilo	กิโล	k
10^{6}	mega	เมกะ	M
10^{9}	giga	จิกะ	G
10^{12}	tera	เทระ	T
10^{15}	peta	เพตะ	P
10^{18}	exa	เอกซะ	E
10^{21}	zetta	เซตตะ	Z
10^{24}	yotta	ยอตตะ	Y

จากตัวอย่างข้างต้น

0.000005 แอมแปร์ = 5×10^{-6} แอมแปร์ = 5 ไมโครแอมแปร์ (μA)

6000000 วัตต์ = 6×10^{6} วัตต์ = 6 เมกะวัตต์ (MW)

หมายเหตุ

1. การใช้คำนำหน้าหน่วยควรใช้เพียงครั้งเดียว ไม่นิยมเขียนคำนำหน้าหน่วยซ้อนกัน เช่นไม่ควรเขียนมิลลิไมโครวินาที (mμs) ควรเขียนนาโนวินาที (ns)

2. การนำสัญลักษณ์ของคำนำหน้าหน่วยไปกำกับหน้าสัญลักษณ์ของหน่วย จะถือว่าได้สัญลักษณ์ใหม่เป็นสัญลักษณ์เดียว เมื่อนำไปยกกำลังไม่ต้องใส่วงเล็บ เช่น mm^3, μs^{-1}, GHz^{-1}

ภาคผนวก ค ตารางฟังก์ชันตรีโกณมิติ

มุม (องศา)	มุม (เรเดียน)	sine	cosine	tangent	มุม (องศา)	มุม (เรเดียน)	sine	cosine	tangent	มุม (องศา)	มุม (เรเดียน)	sine	cosine	tangent
0	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	31	0.5411	0.5150	0.8572	0.6009	61	1.0647	0.8746	0.4848	1.8040
1	0.0175	0.0175	0.9998	0.0175	32	0.5585	0.5299	0.8480	0.6249	62	1.0821	0.8829	0.4695	1.8807
2	0.0349	0.0349	0.9994	0.0349	33	0.5760	0.5446	0.8387	0.6494	63	1.0996	0.8910	0.4540	1.9626
3	0.0524	0.0524	0.9986	0.0524	34	0.5934	0.5592	0.8290	0.6745	64	1.1170	0.8988	0.4384	2.0503
4	0.0698	0.0697	0.9976	0.0699	35	0.6109	0.5736	0.8192	0.7002	65	1.1345	0.9063	0.4226	2.1445
5	0.0873	0.0872	0.9962	0.0875	36	0.6283	0.5878	0.8090	0.7265	66	1.1519	0.9135	0.4067	2.2460
6	0.1047	0.1045	0.9945	0.1051	37	0.6458	0.6018	0.7986	0.7536	67	1.1694	0.9205	0.3907	2.3559
7	0.1222	0.1219	0.9925	0.1228	38	0.6632	0.6157	0.7880	0.7813	68	1.1868	0.9272	0.3746	2.4751
8	0.1396	0.1391	0.9903	0.1405	39	0.6807	0.6293	0.7771	0.8098	69	1.2043	0.9336	0.3584	2.6051
9	0.1571	0.1565	0.9877	0.1584	40	0.6981	0.6428	0.7660	0.8391	70	1.2217	0.9397	0.3420	2.7475
10	0.1745	0.1736	0.9848	0.1763	41	0.7156	0.6561	0.7547	0.8693	71	1.2392	0.9455	0.3256	2.9042
11	0.1920	0.1908	0.9816	0.1944	42	0.7330	0.6691	0.7431	0.9004	72	1.2566	0.9511	0.3090	3.0777
12	0.2094	0.2079	0.9782	0.2126	43	0.7505	0.6820	0.7314	0.9325	73	1.2741	0.9563	0.2924	3.2709
13	0.2269	0.2250	0.9744	0.2309	44	0.7679	0.6947	0.7193	0.9657	74	1.2915	0.9613	0.2756	3.4874
14	0.2443	0.2419	0.9703	0.2493	45	0.7854	0.7071	0.7071	1.0000	75	1.3090	0.9659	0.2588	3.7321
15	0.2618	0.2588	0.9659	0.2679	46	0.8029	0.7193	0.6947	1.0724	76	1.3265	0.9703	0.2419	4.0108
16	0.2793	0.2756	0.9613	0.2867	47	0.8203	0.7314	0.6820	1.0724	77	1.3439	0.9744	0.2250	4.3315
17	0.2967	0.2924	0.9563	0.3057	48	0.8378	0.7431	0.6691	1.1106	78	1.3614	0.9781	0.2079	4.7046
18	0.3142	0.3090	0.9511	0.3249	49	0.8552	0.7547	0.6561	1.1504	79	1.3788	0.9816	0.1908	5.1446
19	0.3316	0.3256	0.9455	0.3443	50	0.8727	0.7660	0.6428	1.1918	80	1.3963	0.9848	0.1736	5.6713
20	0.3491	0.3421	0.9397	0.3640	51	0.8901	0.7771	0.6293	1.2349	81	1.4137	0.9877	0.1564	6.3138
21	0.3665	0.3584	0.9336	0.3839	52	0.9076	0.7880	0.6157	1.2799	82	1.4312	0.9903	0.1392	7.1154
22	0.3840	0.3746	0.9272	0.4040	53	0.9250	0.7986	0.6018	1.3270	83	1.4486	0.9925	0.1219	8.1443
23	0.4014	0.3907	0.9205	0.4245	54	0.9425	0.8090	0.5878	1.3764	84	1.4661	0.9945	0.1045	9.5144
24	0.4189	0.4067	0.9135	0.4452	55	0.9599	0.8192	0.5736	1.4281	85	1.4835	0.9962	0.0872	11.430
25	0.4363	0.4226	0.9063	0.4663	56	0.9774	0.8290	0.5592	1.4826	86	1.5010	0.9976	0.0698	14.301
26	0.4538	0.4384	0.8988	0.4877	57	0.9948	0.8387	0.5446	1.5399	87	1.5184	0.9986	0.0523	19.081
27	0.4712	0.4540	0.8910	0.5095	58	1.0123	0.8480	0.5299	1.6003	88	1.5359	0.9994	0.0349	28.636
28	0.4887	0.4695	0.8829	0.5317	59	1.0297	0.8572	0.5150	1.6643	89	1.5533	0.9998	0.0175	57.290
29	0.5061	0.4848	0.8746	0.5543	60	1.0472	0.8660	0.5000	1.7321	90	1.5708	1.0000	0.0000	∞
30	0.5236	0.5000	0.8660	0.5774	61	1.0647	0.8746	0.4848	1.8040					

ภาคผนวก ง ตารางเลขกำลังสอง รากที่สองและส่วนกลับ

n	n^2	$\sqrt{n}$	$10/n$
1	1	1.000	10.000
2	4	1.414	5.000
3	9	1.732	3.333
4	16	2.000	2.500
5	25	2.236	2.000
6	36	2.449	1.667
7	49	2.646	1.429
8	64	2.828	1.250
9	81	3.000	1.111
10	100	3.162	1.000
11	121	3.317	0.909
12	144	3.464	0.833
13	169	3.606	0.769
14	196	3.742	0.714
15	225	3.873	0.667
16	256	4.000	0.625
17	289	4.123	0.588
18	324	4.243	0.556
19	361	4.359	0.526
20	400	4.472	0.500
21	441	4.583	0.476
22	484	4.690	0.455
23	529	4.796	0.435
24	576	4.899	0.417
25	625	5.000	0.400
26	676	5.099	0.385
27	729	5.196	0.370
28	784	5.292	0.357
29	841	5.385	0.345
30	900	5.477	0.333
31	961	5.568	0.323
32	1024	5.657	0.313
33	1089	5.745	0.303
34	1156	5.831	0.294
35	1225	5.916	0.286
36	1296	6.000	0.278
37	1369	6.083	0.270
38	1444	6.164	0.263
39	1521	6.245	0.256
40	1600	6.325	0.25

n	n^2	$\sqrt{n}$	$10/n$
41	1681	6.403	0.244
42	1764	6.481	0.238
43	1849	6.557	0.233
44	1936	6.633	0.227
45	2025	6.708	0.222
46	2116	6.782	0.217
47	2209	6.856	0.213
48	2304	6.928	0.208
49	2401	7.000	0.204
50	2500	7.071	0.200
51	2601	7.141	0.196
52	2704	7.211	0.192
53	2809	7.280	0.189
54	2916	7.348	0.185
55	3025	7.416	0.182
56	3136	7.483	0.179
57	3249	7.550	0.175
58	3364	7.616	0.172
59	3481	7.681	0.169
60	3600	7.746	0.167
61	3721	7.810	0.164
62	3844	7.874	0.161
63	3969	7.937	0.159
64	4096	8.000	0.156
65	4225	8.062	0.154
66	4356	8.124	0.152
67	4489	8.185	0.149
68	4624	8.246	0.147
69	4761	8.307	0.145
70	4900	8.367	0.143
71	5041	8.426	0.141
72	5184	8.485	0.139
73	5329	8.544	0.137
74	5476	8.602	0.135
75	5625	8.660	0.133
76	5776	8.718	0.132
77	5929	8.775	0.130
78	6084	8.832	0.128
79	6241	8.888	0.127
80	6400	8.944	0.125

n	n^2	$\sqrt{n}$	$10/n$
81	6561	9.000	0.123
82	6724	9.055	0.122
83	6889	9.110	0.120
84	7056	9.165	0.119
85	7225	9.220	0.118
86	7396	9.274	0.116
87	7569	9.327	0.115
88	7744	9.381	0.114
89	7921	9.434	0.112
90	8100	9.487	0.111
91	8281	9.539	0.110
92	8464	9.592	0.109
93	8649	9.644	0.108
94	8836	9.695	0.106
95	9025	9.747	0.105
96	9216	9.798	0.104
97	9409	9.849	0.103
98	9604	9.899	0.102
99	9801	9.950	0.101
100	10000	10.000	0.100
101	10201	10.049	0.099
102	10404	10.100	0.098
103	10609	10.149	0.097
104	10816	10.198	0.096
105	11025	10.247	0.095
106	11236	10.296	0.094
107	11449	10.344	0.093
108	11664	10.392	0.093
109	11881	10.440	0.092
110	12100	10.488	0.091
111	12321	10.536	0.090
112	12544	10.583	0.089
113	12769	10.630	0.088
114	12996	10.677	0.088
115	13225	10.724	0.087
116	13456	10.770	0.086
117	13689	10.817	0.085
118	13924	10.863	0.085
119	14161	10.909	0.084
120	14400	10.954	0.083

ภาคผนวก จ ตัวอย่างการบันทึกการทดลอง

การศึกษาหาความรู้ทางวิทยาศาสตร์นั้นจำเป็นต้องมีการทดลอง เพื่อให้รู้จักและเข้าใจกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ที่ใช้ในการหาเหตุผลหรือหลักฐานทางวิทยาศาสตร์ การบันทึกรายละเอียดต่าง ๆ จากการสังเกตสิ่งที่เกิดขึ้นในการทดลองจึงเป็นสิ่งที่สำคัญมาก เพราะการสรุปเหตุผลหรือการอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจะใช้ข้อมูลที่ได้จากสังเกตเท่านั้นถ้าการบันทึกรายละเอียดในการทดลองมีความบกพร่อง เราอาจไม่สามารถสรุปได้ หรือต้องทำการทดลองซ้ำใหม่ ดังนั้น เราจะบันทึกผลการทดลองอย่างไร

การบันทึกการทดลอง ควรจัดลำดับของรายละเอียดต่าง ๆ ให้เหมาะสมและควรบันทึกด้วยข้อความที่กะทัดรัด เข้าใจง่ายและชัดเจน รายการที่บันทึกอาจเรียงลำดับดังนี้

1. หัวข้อการทดลอง
2. วัน เวลา สถานที่ทดลอง และสภาพแวดล้อมขณะนั้น
3. จุดประสงค์
4. วัสดุอุปกรณ์
5. วิธีทำกิจกรรม
6. ภาพการจัดอุปกรณ์การทดลอง
7. ตารางบันทึกผลการทดลอง
8. กราฟแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณที่วัดได้
9. การคำนวณจากตารางบันทึกผลการทดลองหรือจากกราฟ
10. การสรุปและอภิปรายผล หัวข้อนี้ควรประกอบด้วย การสรุป การแปลความหมาย การบอกความคลาดเคลื่อน (ในกรณีที่มีการหาความคลาดเคลื่อน) รวมทั้งข้อเสนอแนะเพื่อการปรับปรุงแก้ไขสำหรับการทดลองนี้ในครั้งต่อๆไป

เพื่อให้เกิดความเข้าใจในขั้นตอนการทำการทดลองข้างต้น ขอให้ศึกษาตัวอย่างการบันทึกการทดลองต่อไปนี้

กิจกรรม 5.3 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของแรงที่ใช้ดึงสปริงกับระยะที่สปริงยืดออก

จุดประสงค์

1. เขียนและวิเคราะห์กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้ดึงสปริงกับระยะที่สปริงยืดออกจากตำแหน่งสมดุล
2. อภิปรายเพื่อสรุปเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้ดึงสปริงกับระยะที่สปริงยืดออกจากตำแหน่งสมดุล
3. อภิปรายเพื่อสรุปเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างงานของแรงที่ใช้ดึงสปริงกับพลังงานศักย์ยืดหยุ่นของสปริง

วัสดุและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่งสปริง 1 เครื่อง
2. สปริง 1 อัน
3. ไม้บรรทัด 1 อัน
4. นอต 1 ตัว

วิธีทำกิจกรรม

1. ยึดนอตกับปลายสปริงด้านหนึ่งแล้วยึดปลายสปริงอีกด้านไว้กับดินสอ จากนั้นใช้ตะขอของเครื่องชั่งสปริงเกี่ยวนอตตัวเดียวกันไว้ แล้ววางสปริงและเครื่องชั่งสปริงให้อยู่ในแนวขนานกับไม้บรรทัด ให้ปลายสุดของสปริงด้านที่เกี่ยวกับเครื่องชั่งสปริงอยู่ตรงขีดศูนย์ของไม้บรรทัด ดังแสดงในรูปด้านล่าง

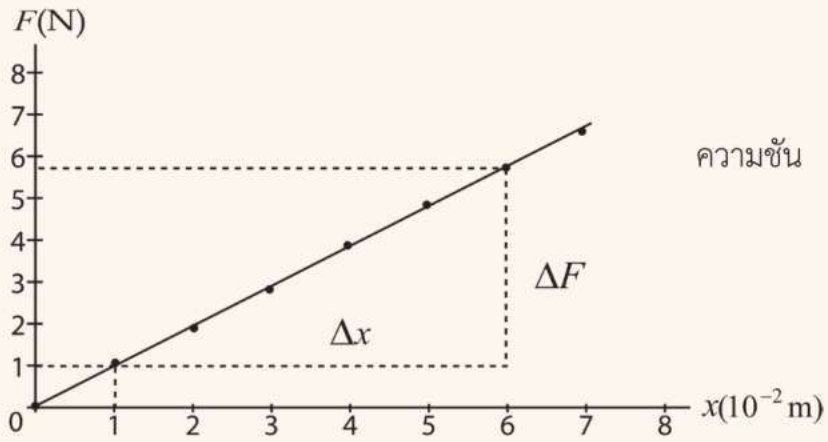
รูป การจัดอุปกรณ์สำหรับกิจกรรม 5.3

2. ใช้เครื่องชั่งสปริงออกแรงดึงสปริงผ่านนอตสให้ปริงยืดออกจากตำแหน่งสมดุลครั้งละ 1 เซนติเมตร เมื่อนอตหยุดนิ่ง บันทึกขนาดของแรงดึงกับระยะที่สปริงยืดออกจากตำแหน่งสมดุลจนสปริงยืดออกเป็น 5 เซนติเมตร
3. เขียนกราฟระหว่างขนาดของแรงดึงกับระยะที่สปริงยืดออกโดยให้ขนาดของแรงดึงอยู่ในแกนตั้ง และระยะที่สปริงยืดออกอยู่ในแกนนอน
4. หาความชันของกราฟ
5. หางานของแรงที่ดึงที่ตำแหน่งต่าง ๆ จากตำแหน่งสมดุล จากกราฟในข้อ 3.
6. เขียนกราฟระหว่างงานของแรงที่ดึงที่ตำแหน่งต่าง ๆ จากตำแหน่งสมดุลอยู่ในแกนตั้งกับกำลังสองของระยะที่สปริงยืดออกอยู่ในแกนนอน และหาความชันของกราฟ

ตารางบันทึกผลการทดลอง

ระยะที่สปริงยืดออก (cm)	0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0
ขนาดของแรงที่ใช้ดึงสปริง (N)	0	1.00	1.85	2.80	3.85	4.80	5.70	6.60

กราฟระหว่างขนาดของแรงที่ใช้ดึงสปริงกับระยะที่สปริงยืดออกเป็นดังนี้



$$\text{ความชัน} = \frac{\Delta F}{\Delta x}$$

$$= \frac{5.70\ \text{N} - 1.00\ \text{N}}{0.06\ \text{m} - 0.01\ \text{m}}$$

$$= 94\ \text{N/m}$$

รูป กราฟระหว่างขนาดของแรงที่ใช้ดึงสปริงกับระยะที่สปริงยืดออก

การสรุปและอภิปรายผล

จากการทดลองพบว่า เมื่อออกแรงที่ใช้ดึงสปริงเพิ่มขึ้น ระยะที่สปริงยืดออกจะเพิ่มขึ้นด้วย เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของแรงที่ใช้ดึงสปริงกับระยะที่สปริงยืดออก จะได้เส้นตรงผ่านจุดกำเนิด แสดงว่า ขนาดของแรงที่ใช้ดึงสปริง F แปรผันกับระยะที่สปริงยืดออก x ซึ่งเขียนได้ว่า

$$F \propto x$$

หรือเขียนเป็นสมการได้ว่า $F = kx$

เมื่อ k เป็นค่าคงตัวของการแปรผัน และเป็นความชันของกราฟเส้นตรงที่ผ่านจุดกำเนิด ความชันของกราฟระหว่างแรงที่ใช้ดึงสปริง F กับระยะที่สปริงยืดออก x มีค่า 94 นิวตันต่อเมตร

ข้อเสนอแนะ

1. การจัดอุปกรณ์ ควรให้ตะขอของเครื่องชั่งสปริง และตะขอของสปริงอยู่ในแนวระดับ
2. ควรทำเครื่องหมายที่ปลายสุดท้ายของสปริงเป็นตำแหน่งของการสังเกตเพื่อวัดระยะยืด
3. วางไม้บรรทัดให้ใกล้กับสปริงมากที่สุด และขณะอ่านระยะยืดของสปริงควรให้สายตาอยู่ในแนวตั้งฉากกับไม้บรรทัดกับปลายสุดท้ายที่ทำเครื่องหมาย
4. การกำหนดสเกลของกราฟควรกำหนดให้เหมาะสม เพื่อให้ง่ายต่อการบันทึก
5. ระวังอย่าดึงสปริงจนเกินขีดจำกัดความยืดหยุ่นของสปริง เพราะอาจทำให้ตำแหน่งสมดุลของสปริงเปลี่ยนไป

ภาคผนวก ฉ ลอการิทึม

ลอการิทึม (logarithm) เรียกย่อว่า ล็อก (log) ถูกกำหนดดังนี้

ถ้า $N = A_x$ ดังนั้น $\log_A N = x$

$\log_A N = x$ อ่านว่า ลอการิทึมของจำนวน N บนฐาน A เท่ากับจำนวน x (ซึ่งเป็นเลขชี้กำลังของ A)

ลอการิทึมที่ใช้กันมี 2 ชนิด คือ

1. ลอการิทึมสามัญ (common logarithm) เป็นลอการิทึมที่มีฐานเป็น 10 เขียนแทนด้วย $\log_{10}$ หรือ log ถ้า $N = 10^x$ ดังนั้น $x = \log_{10} N = \log N$

2. ลอการิทึมธรรมชาติ (natural logarithm) เป็นลอการิทึมที่มีฐานเป็น $e = 2.718$ เขียนแทนด้วย $\log_e$ หรือ ln ถ้า $N = e^x$ ดังนั้น $x = \log_e N = \ln N$

สมบัติสำคัญของลอการิทึม มีดังนี้

$$\log(ab) = \log a + \log b \quad (1)$$

$$\log\left(\frac{a}{b}\right) = \log a - \log b \quad (2)$$

$$\log a^n = n \log a \quad (3)$$

สมบัติทั้งสามข้อนี้ใช้ได้ทั้งลอการิทึมสามัญ ลอการิทึมธรรมชาติ และแบบอื่น ๆ

ลอการิทึมสามัญและลอการิทึมธรรมชาติมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$\log N = 0.4343 \ln N \text{ หรือ} \quad (4)$$

$$\ln N = 2.3026 \log N \quad (5)$$

ในหนังสือเรียนฟิสิกส์ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย มีสูตรและสมการที่เกี่ยวกับลอการิทึม ดังนี้

$\beta = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$, $m = m_0 e^{-\lambda t}$, $N = N_0 e^{-\lambda t}$ และ $A = A_0 e^{-\lambda t}$

ลอการิทึมของจำนวนบางจำนวนที่ควรจำได้ ได้แก่

$\log 1 = 0$, $\log 2 = 0.301$, $\log e = 0.434$, $\log 5 = 0.699$, $\log 10 = 1$, $\ln 2 = 0.693$, $\ln e = 1$

ในการหาค่าของลอการิทึมของจำนวนใด ๆ ต้องอาศัยตารางต่อไปนี้

ตาราง ฉ. 1 ลอการิทึมสามัญ

N	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
1	0.000	0.041	0.079	0.114	0.146	0.176	0.204	0.230	0.255	0.279
2	0.301	0.322	0.342	0.362	0.380	0.398	0.415	0.431	0.447	0.462
3	0.477	0.491	0.505	0.519	0.531	0.544	0.556	0.568	0.580	0.591
4	0.602	0.613	0.623	0.633	0.643	0.653	0.663	0.672	0.681	0.690
5	0.699	0.708	0.716	0.724	0.732	0.740	0.748	0.756	0.763	0.771
6	0.778	0.785	0.792	0.799	0.806	0.813	0.820	0.826	0.833	0.839
7	0.845	0.851	0.857	0.863	0.869	0.875	0.881	0.886	0.892	0.898
8	0.903	0.908	0.914	0.919	0.924	0.929	0.935	0.940	0.944	0.949
9	0.954	0.959	0.964	0.968	0.973	0.978	0.982	0.987	0.991	0.996

ตารางนี้สามารถหาค่าของลอการิทึมของจำนวนระหว่าง 1.0 และ 9.9 จำนวนที่น้อยกว่า 1.0 และมากกว่า 9.9 ให้ใช้สมบัติข้อ (1) $\log(ab) = \log a = \log b$ ดังตัวอย่าง

ตัวอย่าง 1 จงหา log(420) และ log(0.73)

แนวคิด ในที่นี้ $N = 420$ และ 0.73 ซึ่งเราไม่สามารถหาค่าของ log(420) และ log(0.73) โดยตรงจากตารางได้ ต้องใช้สมบัติของลอการิทึม จากนั้นใช้ตาราง

วิธีทำ

$$\begin{aligned}\log(420) = \log(4.2\times10^{2}) &= \log(4.2) + \log(10^{2})\\ &= 0.623 + 2\\ &= 2.623\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\log(0.73) = \log(7.3\times10^{-1}) &= \log(7.3) + \log(10^{-1})\\ &= 0.863 + (-1)\\ &= -0.137\end{aligned}$$

ตอบ ค่า log(42) และ log(0.73) เท่ากับ 2.623 และ -0.137 ตามลำดับ

ในกรณีที่ทราบค่าของลอการิทึม เช่น $\log N = 3.748$ เราสามารถหา N โดยการกระทำย้อนกลับ ดังตัวอย่าง

ตัวอย่าง 2 จงหา $\log N = 3.748$ จงหา N

แนวคิด เปรียบเทียบค่า N กับ ลอการิทึมที่ให้ค่า 3.748

วิธีทำ

$$\log N = 3 + 0.748$$
$$= \log(10^3) + \log(5.6) = \log(5.6 \times 10^3) = \log(5600)$$
$$N = 5600$$

ตอบ N เท่ากับ 5600

คำศัพท์

บทที่ 12 เสียง

คลื่นเสียง (sound wave)
เสียง (sound)
คลื่นที่ได้ยิน หรือ เสียง (audible waves หรือ sounds)
คลื่นใต้เสียง (infrasonic waves หรือ infrasounds)
คลื่นเหนือเสียง (ultrasonic waves หรือ ultrasounds)
ส่วนอัด (compression)
ส่วนขยาย (rarefaction)
ส้อมเสียง (tuning fork)
คลื่นรูปไซน์ (sinusoidal wave)
เสียงสะท้อนกลับ (echo)
การกังวาน (reverberation)
พัลส์ (pulse)
กำลังเสียง (power of a sound wave)
ความเข้มเสียง (sound intensity)
สเกลลอการิทึม (logarithmic scale)
ระดับเสียง (sound level)
เครื่องวัดระดับเสียง (sound level meter)
ขีดเริ่มเปลี่ยนของการได้ยิน (threshold of hearing)
ขีดเริ่มเปลี่ยนของการเจ็บปวด (threshold of pain)
ฟอน (phon)
ความดัง (loudness)
ระดับสูงต่ำของเสียง (pitch)
เสียงสูง (high pitch)
เสียงแหลม (treble)
เสียงต่ำ (low pitch)
เสียงทุ้ม (bass)
คุณภาพเสียง (quality of sound)
ฮาร์มอนิก (harmonics)
ฮาร์มอนิกที่หนึ่ง (first harmonic)
ความถี่มูลฐาน (fundamental frequency)
เสียงรบกวน (noise)
มลพิษทางเสียง (noise pollution)
เครื่องอุดหู (ear plugs)
เครื่องครอบหู (ear muffs)
ความถี่การสั่นพ้อง, ความถี่เรโซแนนซ์ (resonant frequency)
บีต (beats)
ความถี่บีต (beat frequency)
ปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ (Doppler effect)
เรดาร์ (radar)
โซนาร์ (sonar)
การเลื่อนไปทางแดง (red shift)
คลื่นกระแทก (shock wave)
มุมมัค (Mach angle)
เลขมัค (Mach number)
อัตราเร็วเหนือเสียง (supersonic speed)
ซอนิกบูม (sonic boom)
ท่อลม (trachea)
กล่องเสียง (voice box หรือ larynx)
คอหอย (throat หรือ pharynx)
ช่องปาก (oral cavity)
เส้นเสียง (vocal cords)
เครื่องดนตรี (musical instruments)
เครื่องสาย (stringed instruments หรือ chordophones)
เครื่องเป่า (wind instruments หรือ aerophones)
เครื่องตี (percussion instruments หรือ idiophones/membranophones)
ปิโตรเลียม (petroleum)
หัววัดคลื่นเสียง (acoustic log หรือ sonic log)
ความพรุน (porosity)

บทที่ 13 ไฟฟ้าสถิต

กฎการอนุรักษ์ประจุไฟฟ้า (law of conservation of electric charge)
แรงดึงดูด (attractive force)
แรงผลัก (repulsive fore)
ตัวนำไฟฟ้า (electrical conductor)
ฉนวนไฟฟ้า (electrical insulator)
การเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิต (electrostatic induction)
อิเล็กโทรสโคปลูกพิท (pith ball electroscope)
อิเล็กโทรสโคปแผ่นโลหะ (leaf electroscope)
การต่อสายดิน (grounding)
กฎของคูลอมบ์ (Coulomb's law)
สภาพยอมในสุญญากาศ (permittivity in free space)
สนาม (field)
อวกาศ (space)

ประจุทดสอบ (test charge)
ประจุต้นกำเนิด (source charge)
เส้นสนามไฟฟ้า (electric field line)
จุดสะเทิน (neutral point)
พลังงานศักย์ไฟฟ้า (electric potential energy)
ศักย์ไฟฟ้า (electric potential)
ตัวเก็บประจุ (capacitor)
ตัวเก็บประจุแผ่นคู่ขนาน (parallel-plate capacitor)
การประจุ (charging)
การคายประจุ (discharging)
ความจุ (capacitance)
ความจุสมมูล (equivalent capacitance)
ดรัม (drum)
เครื่องถ่ายเอกสาร (photocopier)
เครื่องพิมพ์เลเซอร์สี (color laser printer)
การเคลือบสีฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต (electrostatic powder coating)
เครื่องฟอกอากาศ (air purifier)
เครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต (electrostatic precipitator)
ฟ้าผ่า (lightning)
ฟ้าแลบ (flash)
สายล่อฟ้า (lightning rod)

บทที่ 14 ไฟฟ้ากระแส

กระแสไฟฟ้า (electric current)
การนำไฟฟ้า (electrical conduction)
ตัวนำไฟฟ้า (electrical conductor)
อิเล็กตรอนอิสระ (free electron)
แหล่งกำเนิดไฟฟ้า (electrical energy source)
กระแสอิเล็กตรอน (electron current)
ความเร็วลอยเลื่อน (drift velocity)
ไฟฟ้ากระแสตรง (direct current หรือ DC)
ไฟฟ้ากระแสสลับ (alternating current หรือ AC)
วงจรไฟฟ้ากระแสตรง (direct-current circuit)
ความต้านทาน (resistance)
กฎของโอห์ม (Ohm's law)
สภาพนำไฟฟ้า (electrical conductivity)
สภาพต้านทานไฟฟ้า (electrical resistivity)
ตัวต้านทาน (resistor)
ตัวต้านทานค่าคงตัว (fixed resistor)
ความต้านทานสมมูล (equivalent resistance)
ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ (variable resistor)
ตัวต้านทานที่เปลี่ยนค่าตามปริมาณแสง (light dependent resistor หรือ LDR)
ตัวต้านทานที่เปลี่ยนตามอุณหภูมิ (thermistor)
พลังงานไฟฟ้า (electrical energy)
อีเอ็มเอฟ (electromotive force หรือ emf)
ความต่างศักย์ (potential difference)
ความต้านทานภายใน (internal resistance)
กำลังไฟฟ้า (electric power)
ความต้านทานภายในสมมูล (equivalent internal resistance)
พลังงานทดแทน (alternative energy)
แสงอาทิตย์ (solar energy)
เซลล์สุริยะ (solar cell)
เซลล์โฟโตโวลตาอิก (photovoltaic cell หรือ PV cell)
เซลล์สุริยะชนิดผลึกซิลิคอน (crystalline silicon solar cell)
ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะ (solar cell efficiency)
สารกึ่งตัวนำ (semiconductor)
พลังงานชีวมวล (biomass energy)
พลังงานลม (wind energy)
พลังงานน้ำ (hydropower)
พลังงานนิวเคลียร์ (nuclear power)
ปฏิกิริยานิวเคลียร์ (nuclear reaction)
เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (nuclear reactor)
ปฏิกิริยาลูกโซ่ (chain reaction)
แบตเตอรี่ปฐมภูมิ (primary battery)
แบตเตอรี่ทุติยภูมิ (secondary battery)
เซลล์เชื้อเพลิง (fuel cell)

บรรณานุกรม

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. (2548). **หนังสือเรียนสาระการเรียนรู้พื้นฐานและเพิ่มเติม ฟิสิกส์ เล่ม 2.** (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์คุรุสภาลาดพร้าว.

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. (2548). **หนังสือเรียนสาระการเรียนรู้พื้นฐานและเพิ่มเติม ฟิสิกส์ เล่ม 3.** (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์คุรุสภาลาดพร้าว.

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. (2557). **หนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติม ฟิสิกส์ เล่ม 4.** (พิมพ์ครั้งที่ 6). กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์ สกสค. ลาดพร้าว.

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. (2548). **หนังสือเรียนรู้เพิ่มเติมเพื่อเสริมศักยภาพ ฟิสิกส์ เล่ม 3.** (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ : บริษัท พัฒนาคุณภาพวิชาการ (พว.) จำกัด.

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. (2548). **หนังสือเรียนรู้เพิ่มเติมเพื่อเสริมศักยภาพ ฟิสิกส์ เล่ม 4.** (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ : บริษัท พัฒนาคุณภาพวิชาการ (พว.) จำกัด.

Giancoli, D. C. (2014). Physics: **Principles with Applications.** (7th ed). Pearson.

Halliday, D., Resnick, R., Walker, J. (2013). **Fundamentals of Physics.** (10th ed). John Wiley & Sons, Inc.

Serway, R. A., Faughn, J. S. (2009). **Holt Physics.** Holt, Rinehart and Winston.

Serway, R. A., Jewett, Jr., J. W. (2014). **Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics.** (9th ed). Brooks/Cole.

Young, H. D., Freedman, R. A. (2015). **Sears and Zemansky's University Physics with Modern Physics.** (14th ed). Pearson.

ที่มาของรูป

หน้า	รูป	ที่มา
รูปหน้าปก	รูป ฟ้าผ่า	นายอาณัติ นาคศิริ นักวิชาการอิสระ
1	รูป การตีกลอง	Leo_65 from Pixabay
57	รูป 12.26 ก.ซอนิกบูมจากเครื่องบินที่เคลื่อนที่เร็วเหนือเสียง	skeeze from Pixabay
57	รูป 12.26 ข.คลื่นกระแทกจากเรือที่เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วมากกว่าอัตราเร็วของน้ำ	นายแพทย์ พากพูม สัจไพบูลย์กิจ โรงพยาบาลชะอำ อ.ชะอำ จ.เพชรบุรี
75	รูป ฟ้าผ่าเมื่อมองจากระเบียง	นายพอยสัน ฝึกใจดี
136	รูป การฝึกหัดใช้เครื่องกระตุกหัวใจชนิดอัตโนมัติ (AED)	นางจุไรรัตน์ กิตติลักขณานนท์
145	รูป 13.52 การต่อตัวนำระหว่างถังเก็บน้ำมันของรถขนส่งน้ำมันกับจุดต่อลงดิน	freevector.me
167	รูป รถยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็กในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	นายรักษพล ธนานุวงศ์
224	รูป 14.29 ก. แบตเตอรี่รถยนต์	Bruce Emmerling from Pixabay
234	รูป 14.30 ก.กราฟแท่งแสดงแสดงสัดส่วนที่มาของไฟฟ้าที่ใช้ในประเทศไทยระหว่างปี พ.ศ. 2557 – พ.ศ. 2560	กระทรวงพลังงาน
234	รูป 14.30 ข. แผนภูมิวงกลมแสดงสัดส่วนของที่มาของไฟฟ้าที่ใช้ในประเทศไทยระหว่างเดือนมกราคม – เมษายน พ.ศ. 2561	กระทรวงพลังงาน
235	รูป 14.31 แผงเซลล์สุริยะ	AB27 from Pixabay
237	รูป แผงเซลล์สุริยะบนหลังคาบ้าน	skeeze from Pixabay_
239	รูป 14.33 ข. โรงไฟฟ้าพลังงานชีวมวล	WikimediaImages from Pixabay

หน้า	รูป	ที่มา
239	รูป 14.34 ข. บ่อหมักแก๊สชีวภาพ	สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
240	รูป 14.35 ข. กังหันลมผลิตไฟฟ้า	Candelario Gomez Lopez from Pixabay
242	รูป 14.38 ก. โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ที่ระบายความร้อนโดยใช้หอระบายความร้อน	Iva Balk from Pixabay
242	รูป 14.38 ข. โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ที่ระบายความร้อนโดยการปล่อยน้ำออกสู่แหล่งน้ำใกล้เคียง	falco from Pixabay
244	รูป 14.40 ก. เซลล์เชื้อเพลิง	NASA
245	รูป 14.41 ข. ต้นแบบรถไฟในประเทศเยอรมนีที่ขับเคลื่อนด้วยพลังงานจากเซลล์เชื้อเพลิง	-FelixM-

คณะกรรมการจัดทำหนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ฟิสิกส์ เล่ม 4 ตามผลการเรียนรู้ กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. 2560) ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช 2551

คณะที่ปรึกษา

1. ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์	ผู้อำนวยการสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
2. ดร.วนิดา ธนประโยชน์ศักดิ์	ผู้ช่วยผู้อำนวยการสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

คณะผู้จัดทำหนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ฟิสิกส์ ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 5 เล่ม 4

1. ผศ. ดร.บุรินทร์ อัศวพิภพ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2. ผศ. ดร.นฤมล สุวรรณจันทร์ดี	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
3. ผศ. ดร.ขวัญ อารยะธนิตกุล	มหาวิทยาลัยมหิดล
4. รศ. ดร.พวงรัตน์ ไพเราะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
5. ผศ. ดร.พรรัตน์ วัฒนกสิวิชช์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
6. รศ. ดร.วิวัธน์ ยังดี	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
7. นายสุมิตร สวนสุข	โรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร
8. นายรังสรรค์ ศรีสาคร	ผู้เชี่ยวชาญ สาขาวิทยาศาสตร์มัธยมศึกษาตอนปลาย สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
9. นายบุญชัย ตันไถง	ผู้ชำนาญ สาขาวิทยาศาสตร์มัธยมศึกษาตอนปลาย สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
10. นายวัฒนะ มากชื่น	ผู้ชำนาญ สาขาวิทยาศาสตร์มัธยมศึกษาตอนปลาย สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
11. นายโฆสิต สิงหสุต	ผู้ชำนาญ สาขาวิทยาศาสตร์มัธยมศึกษาตอนปลาย สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
12. นายรักษพล ธนานุวงศ์	นักวิชาการอาวุโส สาขาวิทยาศาสตร์มัธยมศึกษาตอนปลาย สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
13. ดร.กวิน เชื่อมกลาง	นักวิชาการอาวุโส สาขาวิทยาศาสตร์มัธยมศึกษาตอนปลาย สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

14. ดร.ปรีดา พัชรมณีปกรณ์	นักวิชาการ สาขาวิทยาศาสตร์มัธยมศึกษาตอนปลาย สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
15. ดร.จำเริญตา ปริญญาธารมาศ	นักวิชาการ สาขาวิทยาศาสตร์มัธยมศึกษาตอนปลาย สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
16 นายสรจิตต์ อารีรัตน์	นักวิชาการ สาขาวิทยาศาสตร์มัธยมศึกษาตอนปลาย สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
17. นายจอมพรรค นวลดี	นักวิชาการ สาขาวิทยาศาสตร์มัธยมศึกษาตอนปลาย สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
18. นายเทพนคร แสงหัวช้าง	นักวิชาการ สาขาวิทยาศาสตร์มัธยมศึกษาตอนปลาย สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
19. นายธนะรัชต์ คัณทักษ์	นักวิชาการ สาขาวิทยาศาสตร์มัธยมศึกษาตอนปลาย สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

คณะผู้ร่วมพิจารณาหนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ฟิสิกส์ ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 5 เล่ม 4 (ฉบับร่าง)

1. นายประสิทธิ์ สลัดทุกข์	โรงเรียนย่านตาขาวรัฐชนูปถัมภ์ จ.ตรัง
2. นายนิกรณ์ นิลพงษ์	โรงเรียนศรีคูณวิทยบัลลังก์ จ.อำนาจเจริญ
3. นางอรชา ชูเชื้อ	โรงเรียนดีบุกพังงาวิทยายน. จ. พังงา
4. นางมลิวัลย์ เลาหสูต	โรงเรียนกันทรลักษ์วิทยา จ.ศรีสะเกษ
5. นางสาวสายพิณ สุวรรณฤทธิ์	โรงเรียนวังไกลกังวล จ.ประจวบคีรีขันธ์
6. นางสาวสายชล สุขโข	โรงเรียนจ่านกร้อง จ.พิษณุโลก
7. นายชรินทร์ วัฒนธีรางกูร	โรงเรียนพระปฐมวิทยาลัย จ.นครปฐม
8. นายบุญโฮม สุขล้วน	โรงเรียนรัตนโกสินทร์สมโภชลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร
9. นายเอกพงษ์ หิรัญสิริสวัสดิ์	โรงเรียนดรุณสิกขาลัย (โครงการ วมว.) กรุงเทพมหานคร
10. นายศักดิ์ สุวรรณฉาย	มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์
11. นางสาวเพ็ญพนัส เค้ากล้า	โรงเรียนปทุมคงคา กรุงเทพมหานคร
12. นายพลพิพัฒน์ วัฒนเศรษฐานุกุล	สำนักงานเขตพื้นที่การศึกษามัธยมศึกษาเขต 2 กรุงเทพมหานคร

คณะบรรณาธิการ

1. รศ. ดร.อนันตสิน เตชะกำพุช	นักวิชาการอิสระ
2. ผศ. ดร.บุรินทร์ อัศวพิภพ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
3. นายบุญชัย ตันไถง	ผู้ชำนาญ สาขาวิทยาศาสตร์มัธยมศึกษาตอนปลาย สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
4. นายวัฒนะ มากชื่น	ผู้ชำนาญ สาขาวิทยาศาสตร์มัธยมศึกษาตอนปลาย สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
5. นายโฆสิต สิงหสุต	ผู้ชำนาญ สาขาวิทยาศาสตร์มัธยมศึกษาตอนปลาย สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
6. นายรักษพล ธนานุวงศ์	นักวิชาการอาวุโส สาขาวิทยาศาสตร์มัธยมศึกษาตอนปลาย สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ค่าคงตัวและข้อมูลทางกายภาพอื่น ๆ

ค่าคงตัว

ปริมาณ	สัญลักษณ์	ค่าประมาณ
อัตราเร็วของแสง	c , c_0	3.0×10^{8} m s^{-1}
ค่าคงตัวโน้มถ่วง	G	6.6726×10^{-11} m^{3} kg^{-1} s^{-2}
ค่าคงตัวพลังค์	h	6.6261×10^{-34} J s
ประจุมูลฐาน	e	1.6022×10^{-19} C
ค่าคงตัวริดเบิร์ก	R_{∞}	1.0974×10^{7} m^{-1}
รัศมีโบร์	a_0	5.2918×10^{-11} m
มวลอิเล็กตรอน	m_e	9.1094×10^{-31} kg
มวลโปรตอน	m_p	1.6726×10^{-27} kg
มวลนิวตรอน	m_n	1.6749×10^{-27} kg
มวลดิวเทอรอน	m_d	3.3436×10^{-27} kg
ค่าคงตัวอาโวกาโดร	N_A , L	6.0221×10^{23} mol^{-1}
ค่าคงตัวมวลอะตอม	m_u	1.6605×10^{-27} kg
ค่าคงตัวแก๊ส	R	8.3145 J mol^{-1} K^{-1}
ค่าคงตัวโบลต์ซมันน์	k_B	1.3807×10^{-23} J K^{-1}

ข้อมูลทางกายภาพอื่น ๆ

ปริมาณ	ค่า
มวลของโลก	5.97×10^{24} kg
มวลของดวงจันทร์	7.36×10^{22} kg
มวลของดวงอาทิตย์	1.99×10^{30} kg
รัศมีของโลก (เฉลี่ย)	6.38×10^{3} km
รัศมีของดวงจันทร์ (เฉลี่ย)	1.74×10^{3} km
รัศมีของดวงอาทิตย์ (เฉลี่ย)	6.96×10^{5} km
ระยะทางระหว่างโลกและดวงจันทร์ (เฉลี่ย)	3.84×10^{5} km
ระยะทางระหว่างโลกและดวงอาทิตย์ (เฉลี่ย)	1.496×10^{8} km

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
กระทรวงศึกษาธิการ