หนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

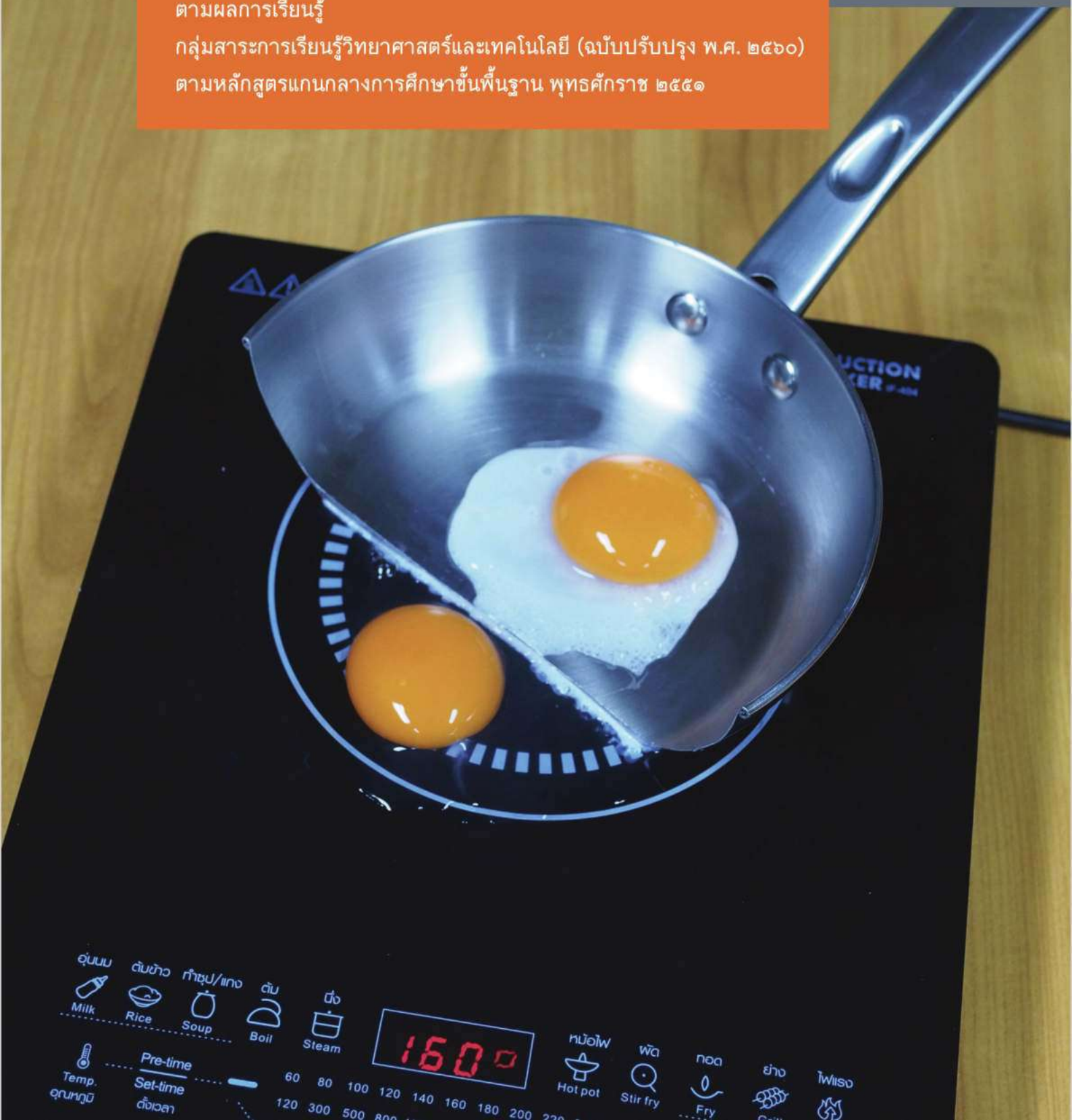
ชั้นมัธยมศึกษาปีที่

ฟิสิกส์

เล่ม ๕

๖

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 ๖ เล่ม ๕

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 กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐) ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช ๒๕๕๑ โดยมีจุดเน้นเพื่อพัฒนาผู้เรียนให้มีความรู้ความสามารถที่ทัดเทียมกับนานาชาติ ได้เรียนรู้วิทยาศาสตร์ที่เชื่อมโยงความรู้กับกระบวนการ ใช้กระบวนการสืบเสาะหาความรู้และแก้ปัญหาที่หลากหลาย มีการทำกิจกรรมด้วยการลงมือปฏิบัติเพื่อให้ผู้เรียนได้ใช้ทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์และทักษะแห่งศตวรรษที่ ๒๑ ซึ่งในปีการศึกษา ๒๕๖๑ เป็นต้นไป โรงเรียนจะต้องใช้หลักสูตรกลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐) สสวท. จึงได้จัดทำหนังสือเรียนที่เป็นไปตามมาตรฐานหลักสูตรเพื่อให้โรงเรียนได้ใช้สำหรับจัดการเรียนการสอนในชั้นเรียน

หนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ฟิสิกส์ ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ ๖ เล่ม ๕ มีผลการเรียนรู้และสาระการเรียนรู้เพิ่มเติมที่ครอบคลุมเนื้อหาบางส่วนที่ปรากฏตามตัวชี้วัดรายวิชาพื้นฐานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี วิทยาศาสตร์กายภาพ เล่ม ๒ โดยเมื่อผู้เรียนเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ฟิสิกส์ เล่ม ๑ – เล่ม ๖ ครบทุกชั้นปีในชั้นมัธยมศึกษาปีที่ ๔ – ๖ แล้วจะสามารถบรรลุผลสัมฤทธิ์ตามตัวชี้วัดของรายวิชาพื้นฐานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี วิทยาศาสตร์กายภาพ เล่ม ๒ ได้ และในขณะเดียวกันก็สามารถต่อยอดเนื้อหาจากรายวิชาพื้นฐานไปสู่เนื้อหาในรายวิชาเพิ่มเติมได้โดยไม่ต้องเสียเวลาเรียนซ้ำซ้อน ทั้งนี้หนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ฟิสิกส์ เล่ม ๕ นี้ มีเนื้อหาที่จำเป็นที่ต้องเรียนประกอบด้วยเรื่อง แม่เหล็ก โมเมนต์ของแรงคู่ควบกระทำต่อขวดลวดที่มีกระแสไฟฟ้าผ่านเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ อีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำ ไฟฟ้ากระแสสลับ ความร้อน ทฤษฎีจลน์ของแก๊ส ของแข็งและของไหล ซึ่งเป็นพื้นฐานที่สำคัญสำหรับการศึกษาต่อในระดับอุดมศึกษาในด้านวิทยาศาสตร์ หรือประกอบอาชีพในสาขาที่ใช้วิทยาศาสตร์เป็นฐาน เช่น แพทย์ วิศวกร สถาปนิก นักอุตุนิยมวิทยา นักธรณีวิทยา ฯลฯ โดยเน้นกระบวนการคิดวิเคราะห์และการแก้ปัญหา เชื่อมโยงความรู้สู่การนำไปใช้ในชีวิตจริง ผู้เรียนจะได้ทำกิจกรรมที่เป็นพื้นฐานที่สำคัญ รวมทั้งกิจกรรมที่ผู้เรียนสามารถคิดค้นและออกแบบการทดลองด้วยตนเอง มีแบบตรวจสอบความรู้ความเข้าใจก่อนเรียน มีแบบฝึกหัดเพื่อให้ตรวจทานความรู้หลังจากที่เรียนไปแล้ว รวมทั้งสรุปความรู้ในแต่ละบทด้วย ในการจัดทำหนังสือเรียนเล่มนี้ได้รับความร่วมมือเป็นอย่างดียิ่งจากผู้ทรงคุณวุฒิ นักวิชาการอิสระ คณาจารย์ทั้งหลาย รวมทั้งครูผู้สอน นักวิชาการ จากสถาบันและสถานศึกษาทั้งภาครัฐและเอกชน จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

สสวท. หวังเป็นอย่างยิ่งว่าหนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ฟิสิกส์ เล่ม ๕ นี้ จะเป็นประโยชน์แก่ผู้เรียน และผู้ที่เกี่ยวข้องทุกฝ่าย ที่จะช่วยให้การจัดการศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมีประสิทธิภาพและประสิทธิผล หากมีข้อเสนอแนะใดที่จะทำให้หนังสือเรียนเล่มนี้ มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น โปรดแจ้ง สสวท. ทราบด้วย จะขอบคุณยิ่ง

(ศาสตราจารย์ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)
ผู้อำนวยการสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
กระทรวงศึกษาธิการ

คำอธิบายรายวิชาเพิ่มเติม

ฟิสิกส์ เล่ม ๕ กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐)

ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ ๖ เวลา ๘๐ ชั่วโมง จำนวน ๒ หน่วยกิต

ศึกษาสนามแม่เหล็ก แรงแม่เหล็ก โมเมนต์ของแรงคู่ควบกระทำกับขดลวดที่มีกระแสไฟฟ้าผ่านเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ อีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำ ไฟฟ้ากระแสสลับ ความร้อน แก๊สอุดมคติ ทฤษฎีจลน์ของแก๊ส ของแข็ง สภาพยืดหยุ่นของของแข็ง ความตึงผิว ความหนืดของของเหลว ความดันในของไหล แรงพยุง ของไหลอุดมคติ สมการความต่อเนื่อง และสมการแบร์นูลี โดยใช้กระบวนการทางวิทยาศาสตร์ การสืบเสาะหาความรู้ การสืบค้นข้อมูล การสังเกต วิเคราะห์ เปรียบเทียบ อธิบาย อภิปราย และสรุป เพื่อให้เกิดความรู้ ความเข้าใจ มีความสามารถในการตัดสินใจ มีทักษะปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ รวมทั้งทักษะแห่งศตวรรษที่ ๒๑ ในด้านการใช้เทคโนโลยีสารสนเทศ ด้านการคิดและการแก้ปัญหา ด้านการสื่อสาร สามารถสื่อสารสิ่งที่เรียนรู้และนำความรู้ไปใช้ในชีวิตของตนเอง มีจิตวิทยาศาสตร์ จริยธรรม คุณธรรม และค่านิยมที่เหมาะสม

ผลการเรียนรู้

๑. สังเกตและอธิบายเส้นสนามแม่เหล็ก อธิบายและคำนวณฟลักซ์แม่เหล็กในบริเวณที่กำหนด รวมทั้งสังเกตและอธิบายสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าในลวดตัวนำเส้นตรงและโซเลนอยด์

๒. อธิบายและคำนวณแรงแม่เหล็กที่กระทำต่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็ก แรงแม่เหล็กที่กระทำต่อเส้นลวดที่มีกระแสไฟฟ้าผ่านและวางในสนามแม่เหล็ก รัศมีความโค้งของการเคลื่อนที่เมื่อประจุเคลื่อนที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก รวมทั้งอธิบายแรงระหว่างเส้นลวดตัวนำคู่ขนานที่มีกระแสไฟฟ้าผ่าน

๓. อธิบายหลักการทำงานของแกลแวนอมิเตอร์และมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง รวมทั้งคำนวณปริมาณต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง

๔. สังเกตและอธิบายการเกิดอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำ กฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ และคำนวณปริมาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งนำความรู้เรื่องอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำไปอธิบายการทำงานของเครื่องใช้ไฟฟ้า

๕. อธิบายและคำนวณความต่างศักย์อาร์เอ็มเอส และกระแสไฟฟ้าอาร์เอ็มเอส

๖. อธิบายหลักการทำงานและประโยชน์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ ๓ เฟส การแปลงอีเอ็มเอฟของหม้อแปลง และคำนวณปริมาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง

๗. อธิบายและคำนวณความร้อนที่ทำให้สสารเปลี่ยนอุณหภูมิ ความร้อนที่ทำให้สสารเปลี่ยนสถานะ และความร้อนที่เกิดจากการถ่ายโอนตามกฎการอนุรักษ์พลังงาน

๘. อธิบายกฎของแก๊สอุดมคติและคำนวณปริมาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง

๙. อธิบายแบบจำลองของแก๊สอุดมคติ ทฤษฎีจลน์ของแก๊ส และอัตราเร็วอาร์เอ็มเอสของโมเลกุลของแก๊ส รวมทั้งคำนวณปริมาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง

๑๐. อธิบายและคำนวณงานที่ทำโดยแก๊สในภาชนะปิดโดยความดันคงตัว และอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความร้อน พลังงานภายในระบบ และงาน รวมทั้งคำนวณปริมาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง และนำความรู้เรื่องพลังงานภายในระบบไปอธิบายหลักการทำงานของเครื่องใช้ในชีวิตประจำวัน

๑๑. อธิบายสภาพยืดหยุ่นและลักษณะการยืดและหดตัวของวัสดุที่เป็นแท่งเมื่อถูกกระทำด้วยแรงค่าต่าง ๆ รวมทั้งทดลอง อธิบายและคำนวณความเค้นตามยาว ความเครียดตามยาว และมอดุลัสของยัง และนำความรู้เรื่องสภาพยืดหยุ่นไปใช้ในชีวิตประจำวัน

๑๒. อธิบายและคำนวณความดันเกจ ความดันสัมบูรณ์ และความดันบรรยากาศ รวมทั้งอธิบายหลักการทำงานของแมนอมิเตอร์ บารอมิเตอร์ และเครื่องอัดไฮดรอลิก

๑๓. ทดลอง อธิบายและคำนวณขนาดแรงพยุงจากของไหล

๑๔. ทดลอง อธิบายและคำนวณความตึงผิวของของเหลว รวมทั้งสังเกตและอธิบายแรงหนืดของของเหลว

๑๕. อธิบายสมบัติของของไหลอุดมคติ สมการความต่อเนื่อง และสมการแบร์นูลลี รวมทั้งคำนวณปริมาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง และนำความรู้เกี่ยวกับสมการความต่อเนื่องและสมการแบร์นูลลีไปอธิบายหลักการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ

รวมทั้งหมด ๑๕ ผลการเรียนรู้

ข้อแนะนำทั่วไปในการใช้หนังสือเรียน

หนังสือเรียนเป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อให้นักเรียนได้ใช้ในการศึกษาเนื้อหาที่สำคัญและเกิดทักษะที่จำเป็นที่สอดคล้องกับมาตรฐานและสาระการเรียนรู้ รวมทั้งยังมีสื่อที่ช่วยเสริมการเรียนรู้ของนักเรียน โดยสามารถเชื่อมต่อไปยังหน้าเว็บไซต์รายการสื่อได้จาก QR code หรือ URL ที่อยู่ประจำแต่ละบท การทำความเข้าใจเกี่ยวกับสัญลักษณ์หรือข้อความตามหัวข้อต่าง ๆ ที่ปรากฏในหนังสือเรียนจะช่วยให้นักเรียนใช้หนังสือเรียนได้อย่างมีประสิทธิภาพ 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 เกี่ยวกับความรู้ที่นักเรียนควรมีสำหรับเป็นพื้นฐานของการศึกษาความรู้ใหม่ในแต่ละบท

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 15

บทที่	เนื้อหา	หน้า
15	**แม่เหล็กและไฟฟ้า**	
	15.1 สนามแม่เหล็ก	4
	15.1.1 เส้นสนามแม่เหล็ก	6
	15.1.2 ฟลักซ์แม่เหล็ก	9
	15.1.3 สนามแม่เหล็กจากกระแสไฟฟ้าผ่านเส้นลวดตัวนำ	15
	15.2 แรงแม่เหล็ก	26
	15.2.1 แรงแม่เหล็กกระทำต่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า	26
	15.2.2 แรงแม่เหล็กกระทำต่อลวดตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าผ่าน	38
	15.2.3 แรงระหว่างลวดตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้า	45
	15.3 โมเมนต์ของแรงคู่ควบกระทำต่อขดลวดที่มีกระแสไฟฟ้าผ่าน เมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก	53
	15.3.1 โมเมนต์ของแรงคู่ควบ	53
	15.3.2 แกลแวนอมิเตอร์	57
	15.3.3 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	58
	15.4 กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำและอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำ	62
	15.4.1 กฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์	62
	15.4.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	69
	15.4.3 การประยุกต์ใช้หลักการอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำ	79
	15.5 ไฟฟ้ากระแสสลับ	86
	15.5.1 ค่ายังผลของความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าของไฟฟ้ากระแสสลับ	86
	15.5.2 การผลิตและการส่งไฟฟ้ากระแสสลับ	90
	สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน	102
	แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 15	107

สารบัญ บทที่ 16

บทที่	เนื้อหา	หน้า
16	**ความร้อนและแก๊ส**	
	16.1 ความร้อน	124
	16.1.1 อุณหภูมิ	124
	16.1.2 ความจุความร้อนและความร้อนจำเพาะ	128
	16.1.3 ความร้อนแฝง	133
	16.1.4 การถ่ายโอนความร้อนและสมดุลความร้อน	139
	16.2 แก๊สอุดมคติ	145
	16.2.1 แบบจำลองแก๊สอุดมคติ	145
	16.2.2 กฎของแก๊สอุดมคติ	147
	16.3 ทฤษฎีจลน์ของแก๊ส	154
	16.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอัตราเร็วอาร์เอ็มเอสของโมเลกุลของแก๊ส	155
	16.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สกับอุณหภูมิ	160
	16.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วอาร์เอ็มเอสของโมเลกุลของแก๊สกับอุณหภูมิ	161
	16.4 กฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์	165
	16.4.1 พลังงานภายในระบบ	165
	16.4.2 งานที่ทำโดยแก๊ส	166
	16.4.3 กฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์	167
	16.4.4 การประยุกต์ของอุณหพลศาสตร์	172
	สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน	179
	แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 16	181

สารบัญ | บทที่ 17

บทที่	เนื้อหา	หน้า
17	**ของแข็งและของไหล**	
	17.1 ของแข็งและสภาพยืดหยุ่นของของแข็ง	192
	17.1.1 สภาพยืดหยุ่นของของแข็ง	192
	17.1.2 ความเค้นและความเครียดของของแข็ง	193
	17.1.3 มอดุลัสของยัง	197
	17.1.4 การประยุกต์ใช้สภาพยืดหยุ่นในชีวิตประจำวัน	200
	17.2 ความตึงผิวและความหนืดของของเหลว	203
	17.2.1 ความตึงผิวของของเหลว	203
	17.2.2 ความหนืดของของเหลว	213
	17.3 ของไหลสถิต	216
	17.3.1 ความดันในของไหล	216
	17.3.2 อุปกรณ์ที่ใช้วัดความดัน	223
	17.3.3 แรงพยุงจากของไหล	232
	17.4 พลศาสตร์ของของไหล	237
	17.4.1 ของไหลอุดมคติ	237
	17.4.2 สมการความต่อเนื่อง	238
	17.4.3 สมการแบร์นูลี	241
	สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน	246
	แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 17	248

บทที่	เนื้อหา	หน้า

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก หน่วยของอุณหภูมิ 255
ภาคผนวก ข คณิตศาสตร์สำหรับฟิสิกส์ 258
ภาคผนวก ค ระบบหน่วยระหว่างชาติ 269
ภาคผนวก ง ตารางฟังก์ชันตรีโกณมิติ 272
ภาคผนวก จ ตารางเลขกำลังสอง รากที่สองและส่วนกลับ 273
ภาคผนวก ฉ ตัวอย่างการบันทึกการทดลอง 274
ภาคผนวก ช ลอการิทึม 277
คำศัพท์ 280
บรรณานุกรม 282
ที่มาของรูป 283
คณะกรรมการจัดทำหนังสือเรียน 284

บทที่ 15 แม่เหล็กและไฟฟ้า

ipst.me/11064

ออโรรา เป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่เกิดบริเวณขั้วโลกเหนือและขั้วโลกใต้ เรียกว่า **แสงเหนือ** (northern light หรือ aurora borealis) และ**แสงใต้** (southern light หรือ aurora australis) ตามลำดับ ปรากฏการณ์นี้จะเห็นได้ชัดเจนตอนฟ้ามืด ในบริเวณใกล้ขั้วโลก ลักษณะคล้ายผ้าม่านสะบัดพลิ้วไปมาช้า ๆ มักมีสีเขียว สีฟ้า สีเหลือง สีแดง เป็นปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับสนามแม่เหล็ก ซึ่งเกี่ยวข้องอย่างไรนักเรียนจะได้ศึกษาในบทนี้

คำถามสำคัญ

- แรงแม่เหล็กเกิดขึ้นได้อย่างไร เกี่ยวข้องกับปริมาณใดบ้างและสัมพันธ์กันอย่างไร
- แม่เหล็กกับไฟฟ้าเกี่ยวข้องกันอย่างไร สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวันอย่างไร

จุดประสงค์การเรียนรู้

15.1 สนามแม่เหล็ก

1. สังเกตและอธิบายสนามแม่เหล็กและเส้นสนามแม่เหล็ก
2. อธิบายและคำนวณฟลักซ์แม่เหล็กในบริเวณที่กำหนด รวมทั้งปริมาณที่เกี่ยวข้อง
3. สังเกตและอธิบายสนามแม่เหล็กของลวดตัวนำเส้นตรง ลวดตัวนำวงกลม และโซเลนอยด์ที่มีกระแสไฟฟ้าผ่าน

15.2 แรงแม่เหล็ก

4. อธิบายและคำนวณแรงแม่เหล็กที่กระทำต่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็ก รวมทั้งปริมาณที่เกี่ยวข้อง
5. อธิบายและคำนวณรัศมีความโค้งของการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก รวมทั้งปริมาณที่เกี่ยวข้อง
6. อธิบายและคำนวณแรงแม่เหล็กที่กระทำต่อเส้นลวดตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าผ่าน และวางในสนามแม่เหล็ก รวมทั้งปริมาณที่เกี่ยวข้อง
7. อธิบายแรงระหว่างเส้นลวดตัวนำคู่ขนานที่มีกระแสไฟฟ้าผ่าน

15.3 โมเมนต์ของแรงคู่ควบกระทำต่อขดลวดที่มีกระแสไฟฟ้าผ่าน เมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก

8. อธิบายและคำนวณโมเมนต์ของแรงคู่ควบกระทำต่อขดลวดตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าผ่านเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก รวมทั้งปริมาณที่เกี่ยวข้อง
9. อธิบายหลักการทำงานของแกลแวนอมิเตอร์ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และคำนวณปริมาณที่เกี่ยวข้อง

15.4 กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำและอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำ

10. สังเกตและอธิบายการเกิดอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำโดยใช้กฎของฟาราเดย์
11. อธิบายและหาทิศทางของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยใช้กฎของเลนซ์
12. อธิบายการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยใช้ความรู้เกี่ยวกับอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำ
13. อธิบายการทำงานของเครื่องใช้ไฟฟ้าต่าง ๆ โดยใช้ความรู้เกี่ยวกับอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำ

15.5 ไฟฟ้ากระแสสลับ

14. อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ กระแสไฟฟ้ากับเวลา ในรูปของฟังก์ชันแบบไซน์ของไฟฟ้ากระแสสลับ
15. อธิบายและคำนวณ ความต่างศักย์อาร์เอ็มเอสและกระแสไฟฟ้าอาร์เอ็มเอส
16. อธิบายหลักการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส และการส่งไฟฟ้ากระแสสลับไปตามบ้านเรือน
17. อธิบายหลักการทำงานของหม้อแปลง และคำนวณปริมาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง

ความรู้ก่อนเรียน

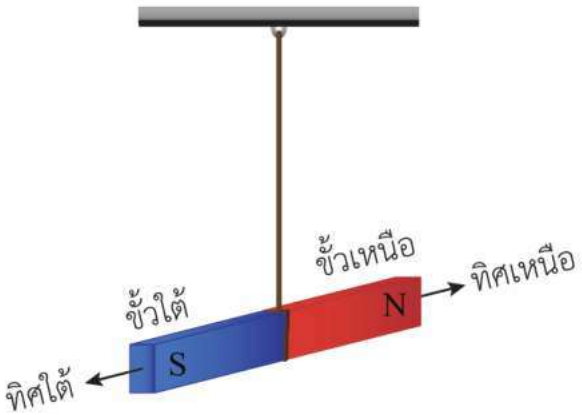
ปริมาณเวกเตอร์ การเคลื่อนที่แบบวงกลม โมเมนต์ของแรง ประจุไฟฟ้า สนามไฟฟ้า ศักย์ไฟฟ้า อีเอ็มเอฟ กระแสไฟฟ้า

จากการเรียนในบทที่ผ่านมา นักเรียนได้รู้จักสนามไฟฟ้าและปริมาณต่างๆที่เกี่ยวข้องกับสนามไฟฟ้า ในบทนี้จะกล่าวถึงแม่เหล็กและไฟฟ้า โดยนักเรียนจะได้รู้จักกับสนามแม่เหล็ก ผลของสนามแม่เหล็กกับอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กกับตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าผ่าน ความสัมพันธ์ของสนามแม่เหล็กกับปริมาณทางไฟฟ้า รวมทั้งการนำผลของสนามแม่เหล็กไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ

15.1 สนามแม่เหล็ก

ชาวกรีกโบราณค้นพบแร่ชนิดหนึ่งที่สามารถดึงดูดเหล็กได้ เรียกแร่นั้นว่า **แมกนีไทต์** (magnetite) ปัจจุบันเรียกวัสดุที่ดึงดูดเหล็กได้ว่า **แม่เหล็ก** (magnet) ด้วยสมบัติการวางตัวของแม่เหล็ก จึงมีการประยุกต์นำไปสร้างเป็นเข็มทิศเพื่อใช้ในการบอกทิศทาง

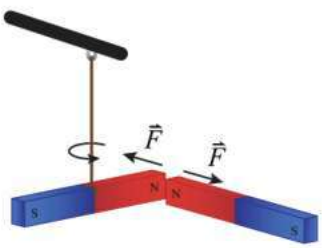
เมื่อแขวนแท่งแม่เหล็กให้หมุนได้อย่างอิสระในแนวราบดังรูป 15.1 แท่งแม่เหล็กจะวางตัวในแนวทิศเหนือ – ทิศใต้ เสมอ โดยปลายแท่งแม่เหล็กที่ชี้ไปทางทิศเหนือ เรียกว่า **ขั้วเหนือ** (north pole) ใช้อักษรตัวย่อ N ส่วนปลายอีกด้านที่ชี้ไปทางทิศใต้ เรียกว่า **ขั้วใต้** (south pole) ใช้อักษรตัวย่อ S



รูป 15.1 แท่งแม่เหล็กจะวางตัวในทิศเหนือ – ทิศใต้ เสมอ

แท่งแม่เหล็กจะมีขั้วเหนือและขั้วใต้เสมอ โดยจะไม่มีแม่เหล็กที่มีเฉพาะขั้วเหนือหรือขั้วใต้เพียงอย่างเดียว เมื่อนำขั้วแม่เหล็กของแท่งแม่เหล็กสองแท่งมาไว้ใกล้กัน ขั้วชนิดเดียวกันจะผลักกัน ขั้วต่างชนิดกันจะดึงดูดกัน ดังรูป 15.2

ก. นำขั้วใต้ของแท่งแม่เหล็กมาไว้ใกล้กัน



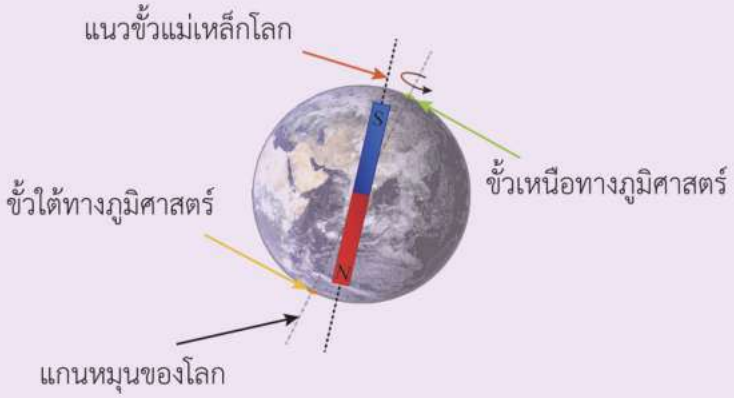
ข. นำขั้วเหนือของแท่งแม่เหล็กมาไว้ใกล้กัน

ค. นำขั้วใต้และขั้วเหนือของแท่งแม่เหล็กมาไว้ใกล้กัน

รูป 15.2 แรงระหว่างขั้วแม่เหล็ก

ความรู้เพิ่มเติม

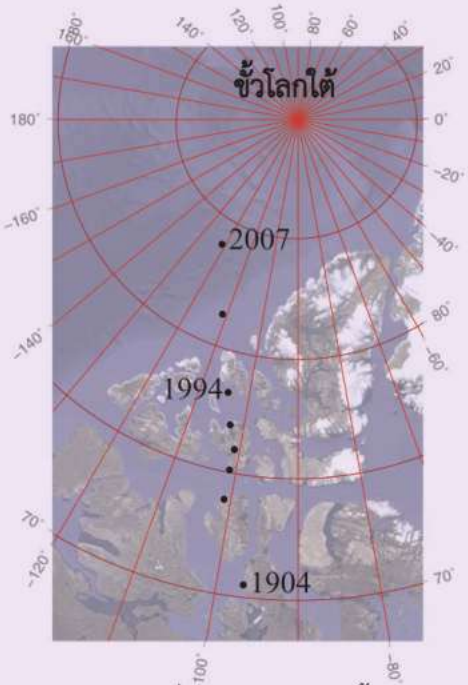
โลกมีสนามแม่เหล็ก **ขั้วแม่เหล็กโลก** (geomagnetic pole) จะอยู่ใกล้กับ **ขั้วเหนือทางภูมิศาสตร์** (geographical north pole) และ**ขั้วใต้ทางภูมิศาสตร์** (geographical south pole) ซึ่งเปรียบเสมือนแท่งแม่เหล็กวางตัวในแนวเหนือ-ใต้ ดังรูป



รูป ขั้วแม่เหล็กโลก

เมื่อวางเข็มทิศในบริเวณที่ไม่มีแม่เหล็กอื่นรบกวน เข็มชี้ทิศเหนือของเข็มทิศ จะชี้ไปยังขั้วใต้ของขั้วแม่เหล็กโลกซึ่งเป็นด้านขั้วโลกเหนือทางภูมิศาสตร์ และเข็มชี้ทิศใต้ของเข็มทิศจะชี้ไปยังขั้วเหนือของขั้วแม่เหล็กโลกซึ่งเป็นด้านขั้วโลกใต้ทางภูมิศาสตร์ จะเห็นว่าเข็มชี้ของเข็มทิศจะชี้ไปยังขั้วแม่เหล็กโลกซึ่งจะตรงข้ามกับขั้วทางภูมิศาสตร์

ขั้วแม่เหล็กของโลกนั้นไม่ได้อยู่นิ่งที่ตำแหน่งเดิมตลอด แต่มีการเปลี่ยนตำแหน่งไปในแต่ละปี ดังรูป



รูป การเปลี่ยนตำแหน่งของขั้วเหนือของขั้วแม่เหล็กโลก

ชวนคิด

หากนำแท่งแม่เหล็กแท่งหนึ่งดังรูป ก. มาตัดแบ่งเป็นสองแท่ง ดังรูป ข. ตรงปลายที่ตัดแบ่งจะมีขั้วแม่เหล็กหรือไม่ อย่างไร

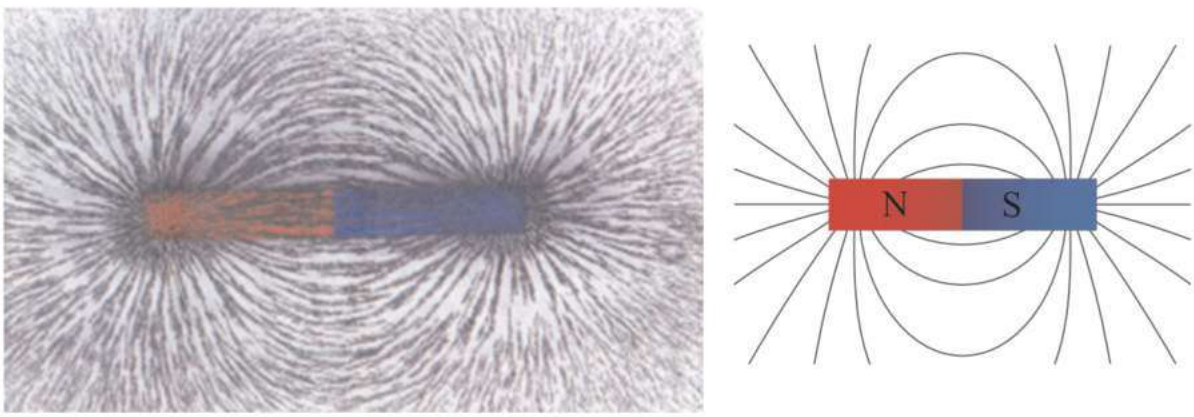
ก. แท่งแม่เหล็กก่อนตัดแบ่ง ข. แท่งแม่เหล็กหลังตัดแบ่ง

รูป แท่งแม่เหล็กก่อนและหลังตัดแบ่ง

15.1.1 เส้นสนามแม่เหล็ก

เมื่อนำแม่เหล็กเข้าใกล้โลหะบางชนิด เช่น เหล็ก นิกเกิล แม่เหล็กจะดึงดูดโลหะข้างต้น เรียกสารที่ถูกดึงดูดดังกล่าวว่า **สารแม่เหล็ก** (magnetic substance) และหากใช้สารแม่เหล็กที่มีลักษณะเป็นผงสารแม่เหล็ก เช่น ผงเหล็ก จะพบว่าผงเหล็กวางตัวหนาแน่นบริเวณที่เป็น **ขั้วแม่เหล็ก** (magnetic pole) หากพิจารณาบริเวณอื่น ๆ รอบแท่งแม่เหล็ก ผงเหล็กจะวางตัวอย่างไร ศึกษาได้จากสถานการณ์ต่อไปนี้

วางกระดาษขาวบนแท่งแม่เหล็ก แล้วยึดกระดาษขาวให้แน่น จากนั้นโรยผงเหล็กกระจายรอบแท่งแม่เหล็กพร้อมทั้งเคาะกระดาษเบา ๆ จนผงเหล็กขยับเรียงตัวเป็นแนว ดังรูป 15.3 ก. แสดงว่าบริเวณรอบแท่งแม่เหล็กมีแรงจากแม่เหล็กกระทำกับผงเหล็ก เรียกบริเวณนี้ว่าบริเวณที่มี**สนามแม่เหล็ก** (magnetic field)

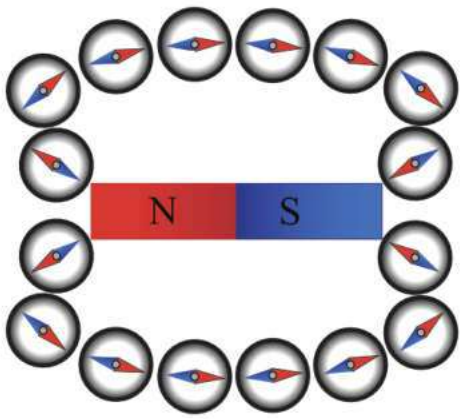


ก. การเรียงตัวของผงเหล็ก ข. เส้นสนามแม่เหล็กของแท่งแม่เหล็ก

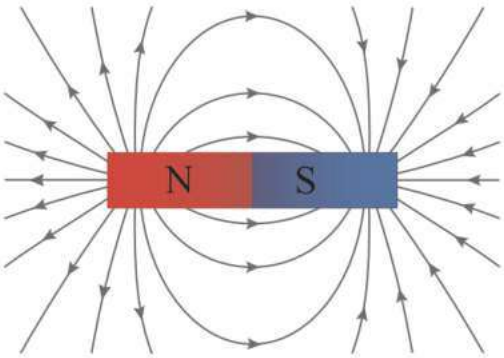
รูป 15.3 การเรียงตัวของผงเหล็กรอบแท่งแม่เหล็ก

เมื่อพิจารณาแนวการเรียงตัวของผงเหล็กสามารถเขียนเส้นแสดงการเรียงตัวของผงเหล็กได้ดังรูป 15.3 ข. เส้นเหล่านี้เป็นผลจากสนามแม่เหล็ก เรียกว่า **เส้นสนามแม่เหล็ก** (magnetic field lines) เส้นสนามแม่เหล็กมีทิศทางอย่างไร พิจารณาได้ดังนี้

หากนำเข็มทิศวางใกล้แท่งแม่เหล็กตามแนวเส้นสนามแม่เหล็ก จะมีแรงกระทำต่อเข็มทิศให้เบนไปวางตัวอยู่ในแนวเส้นสนามแม่เหล็ก ดังรูป 15.4 ก. แสดงให้เห็นว่าเส้นสนามแม่เหล็กมีทิศออกจากขั้วเหนือเข้าสู่ขั้วใต้ของแท่งแม่เหล็ก ดังนั้นเส้นสนามแม่เหล็กแสดงทิศทางได้ดังรูป 15.4 ข.



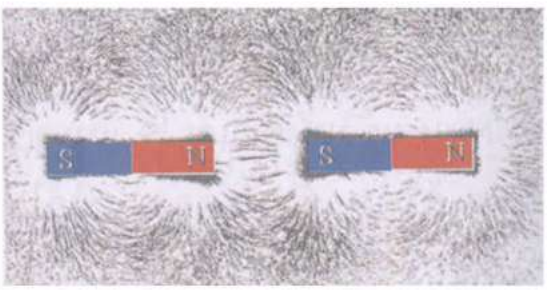
ก. การเรียงตัวของเข็มทิศตามแนวเส้นสนามแม่เหล็ก



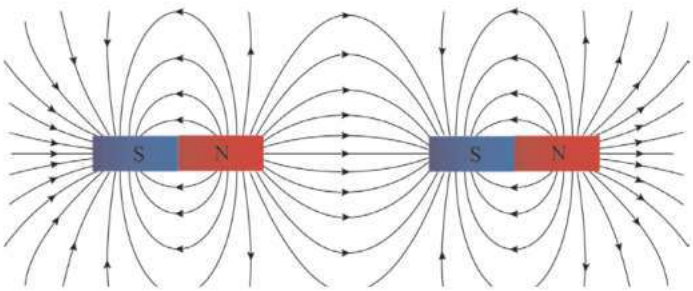
ข. เส้นสนามแม่เหล็กมีทิศทางออกจากขั้วเหนือเข้าสู่ขั้วใต้ของแท่งแม่เหล็ก

รูป 15.4 การหาทิศทางของเส้นสนามแม่เหล็ก

หากนำแท่งแม่เหล็กสองอันมาวางโดยหันขั้วต่างกันเข้าหากัน แล้วโรยผงเหล็กรอบแท่งแม่เหล็กทั้งสอง ผงเหล็กจะเรียงตัว ดังรูป 15.5 ก. และเขียนเส้นสนามแม่เหล็กได้ ดังรูป 15.5 ข.



ก. แนวการเรียงตัวของผงเหล็ก

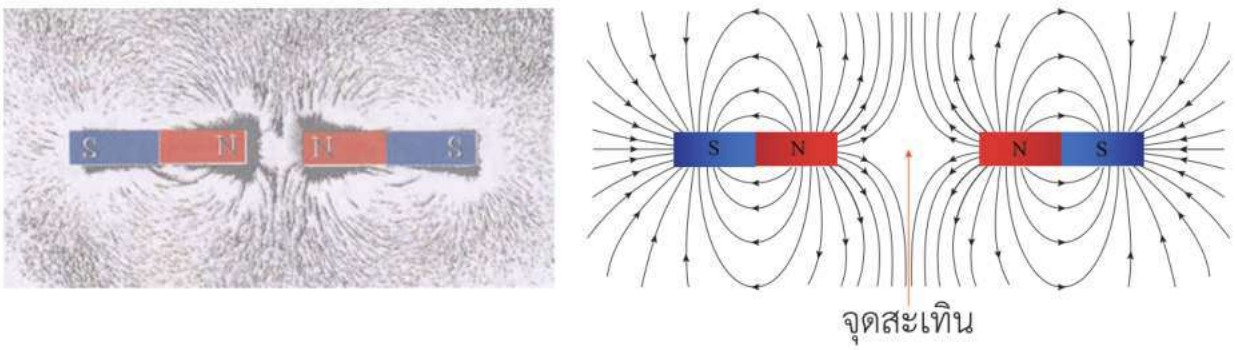


ข. เส้นสนามแม่เหล็กที่เกิดจากแท่งแม่เหล็กสองแท่งเมื่อวางขั้วต่างกันเข้าหากัน

รูป 15.5 วางแท่งแม่เหล็กสองอันใกล้กัน โดยหันขั้วต่างกันเข้าหากัน

จากรูป 15.5 ข. บริเวณระหว่างแท่งแม่เหล็กทั้งสองที่หันขั้วต่างกันเข้าหากัน จะมีเส้นสนามแม่เหล็กอยู่หนาแน่นมากขึ้น แสดงว่าสนามแม่เหล็กบริเวณนี้มีค่ามากขึ้น

กรณีนำแท่งแม่เหล็กสองอันมาวางโดยหันขั้วเหมือนกันเข้าหากัน เช่น ขั้วเหนือกับขั้วเหนือ แล้วโรยผงเหล็กรอบแท่งแม่เหล็กทั้งสอง ผงเหล็กจะเรียงตัว ดังรูป 15.6 ก. และเขียนเส้นสนามแม่เหล็กได้ดังรูป 15.6 ข.



ก. แนวการเรียงตัวของผงเหล็ก

ข. เส้นสนามแม่เหล็กที่เกิดจากแท่งแม่เหล็กสองแท่งเมื่อวางขั้วเหมือนกันเข้าหากัน

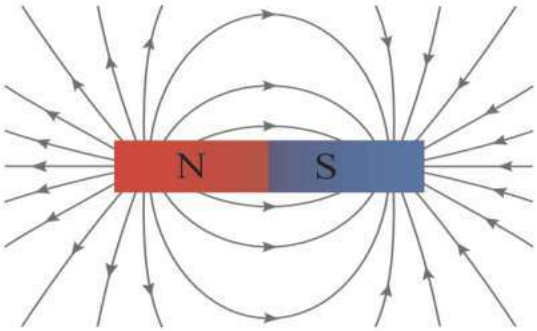
รูป 15.6 วางแท่งแม่เหล็กสองอันใกล้กัน โดยหันขั้วเหมือนกันเข้าหากัน

จากรูป 15.6 ข. เมื่อนำแท่งแม่เหล็กที่มีขั้วเหมือนกันมาวางไว้ใกล้กัน จะสังเกตเห็นว่ามีบริเวณที่อยู่ระหว่างขั้วแม่เหล็กนั้น มีเส้นสนามแม่เหล็กหนาแน่นน้อย แสดงว่าบริเวณนั้นสนามแม่เหล็กมีค่าน้อยและตำแหน่งที่สนามแม่เหล็กมีค่าเป็นศูนย์ เรียกตำแหน่งนี้ว่า **จุดสะเทิน** (neutral point)

15.1.2 ฟลักซ์แม่เหล็ก

สนามแม่เหล็กที่เกิดจากแท่งแม่เหล็กจะมีอยู่รอบแท่งแม่เหล็กเป็น 3 มิติ เมื่อให้ดึงดูดผงเหล็ก การเรียงตัวของผงเหล็กมีลักษณะ ดังรูป 15.7 ก. สามารถเขียนแสดงได้ด้วยเส้นสนามแม่เหล็กที่เป็นเส้นโค้งชี้ออกจากขั้วเหนือไปสู่ขั้วใต้แบบ 2 มิติได้ดังรูป 15.7 ข.

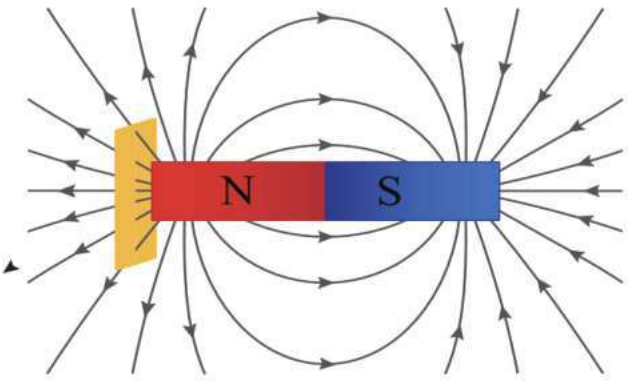
ก. ผงเหล็กบริเวณขั้วแม่เหล็กแบบ 3 มิติ



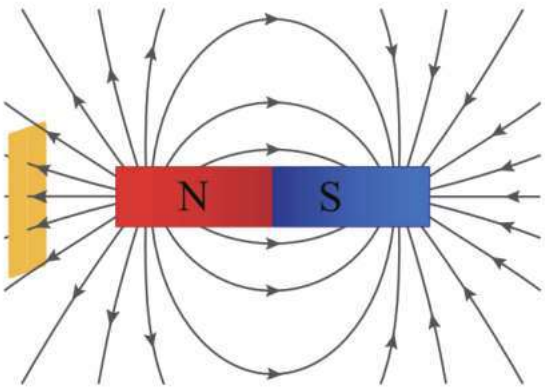
ข. เส้นสนามแม่เหล็กใน 2 มิติ

รูป 15.7 สนามแม่เหล็กรอบแท่งแม่เหล็ก

หากพิจารณาความหนาแน่นของเส้นสนามแม่เหล็ก หรือจำนวนเส้นสนามแม่เหล็กต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ที่ตั้งฉากกับเส้นสนามแม่เหล็กเช่น ในบริเวณพื้นที่สีเหลือง จะพบว่าบริเวณใกล้ขั้วแม่เหล็ก ดังรูป 15.8 ก. มีความหนาแน่นของเส้นสนามแม่เหล็กมากกว่าบริเวณที่ห่างออกไป ดังรูป 15.8 ข.



ก. จำนวนเส้นสนามแม่เหล็กที่ผ่านหนึ่งหน่วยพื้นที่บริเวณใกล้ขั้วแม่เหล็ก

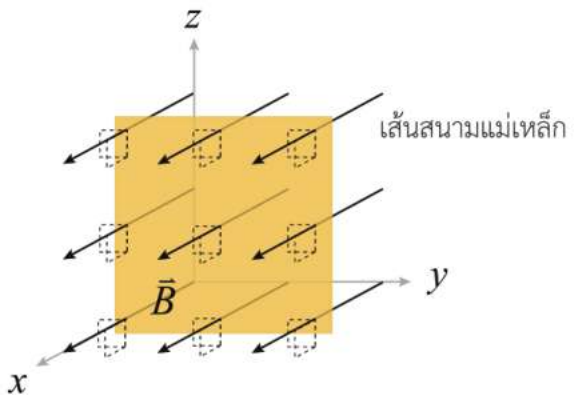


ข. จำนวนเส้นสนามแม่เหล็กที่ผ่านหนึ่งหน่วยพื้นที่บริเวณห่างออกไปจากขั้วแม่เหล็ก

รูป 15.8 ความหนาแน่นของเส้นสนามแม่เหล็ก

ความหนาแน่นของเส้นสนามแม่เหล็กในบริเวณที่พิจารณา แสดงถึงความเข้มหรือขนาดสนามแม่เหล็กบริเวณนั้น โดยบริเวณที่มีความหนาแน่นของเส้นสนามแม่เหล็กมาก จะมีขนาดสนามแม่เหล็กมากด้วย เช่น สนามแม่เหล็กบริเวณใกล้ขั้วแม่เหล็กในรูป 15.8 ก. มีค่ามากกว่าในบริเวณที่ห่างออกไปในรูป 15.8 ข.

พิจารณารูป 15.9 จำนวนเส้นสนามแม่เหล็กที่ผ่านพื้นที่ที่พิจารณานี้ แสดงถึง **ฟลักซ์แม่เหล็ก** (magnetic flux) ในพื้นที่นั้น ซึ่งกล่าวได้ว่า ฟลักซ์แม่เหล็ก คือ จำนวนเส้นสนามแม่เหล็กที่ผ่านพื้นที่ที่พิจารณา และ อัตราส่วนระหว่างฟลักซ์แม่เหล็กต่อพื้นที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก เรียกว่า **ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก** (magnetic flux density) คือ ความเข้มหรือขนาดของสนามแม่เหล็ก เขียนแทนได้ด้วยสมการ



รูป 15.9 ฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดจากเส้นสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับพื้นที่

$$B = \frac{\phi}{A} \qquad (15.1)$$

โดย B คือ ขนาดสนามแม่เหล็ก (หรือความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก) มีหน่วยเป็น เวเบอร์ต่อตารางเมตร (Wb/m^2) หรือเทสลา (T)

ϕ คือ ฟลักซ์แม่เหล็ก มีหน่วยเป็น เวเบอร์ (Wb)

A คือ พื้นที่ที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น ตารางเมตร (m^2)

ทิศทางของสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งใดมีทิศทางเดียวกับทิศทางเส้นสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งนั้น

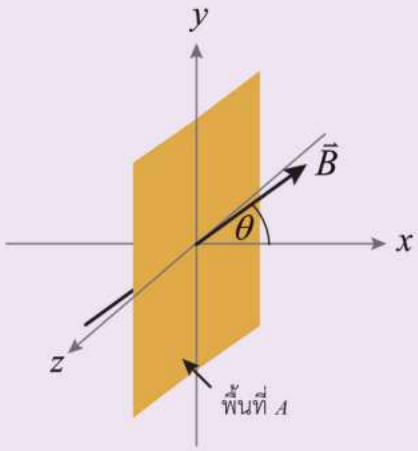
ตัวอย่างขนาดของสนามแม่เหล็กจากแหล่งต่าง ๆ แสดงดังตาราง

ตาราง 15.1 สนามแม่เหล็กจากแหล่งต่าง ๆ

แหล่ง	ขนาดสนามแม่เหล็ก (T)
แม่เหล็กโลก	2×10^{-5} - 6×10^{-5}
แม่เหล็กติดตู้เย็น	5×10^{-3} - 10×10^{-3}
แม่เหล็กนีโอไดเมียม	1.0 - 1.4
แม่เหล็กเครื่องเอ็มอาร์ไอ	0.5 - 3.0
แม่เหล็กตัวนำยวดยิ่ง	2 - 32

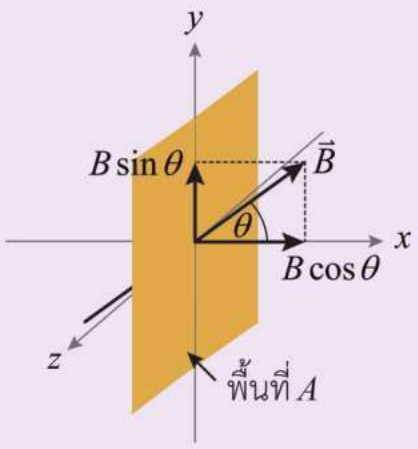
ข้อสังเกต

การหาฟลักซ์แม่เหล็กในกรณีสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอ ($\vec{B}$) ผ่านพื้นที่ขนาด A ทำมุม θ กับเส้นตั้งฉากพื้นที่ ดังรูป



รูป สนามแม่เหล็กผ่านพื้นที่ทำมุม θ กับเส้นตั้งฉากพื้นที่

สามารถหาฟลักซ์แม่เหล็กผ่านพื้นที่ตั้งฉากได้โดย แยกองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กเป็นองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกับพื้นที่ ได้แก่ $B\cos\theta$ และองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กที่ขนานกับพื้นที่ ได้แก่ $B\sin\theta$ ดังรูป



รูป องค์ประกอบของสนามแม่เหล็ก

สนามแม่เหล็กที่ใช้คำนวณตามสมการ (15.1) เป็นสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกับพื้นที่ ในที่นี้คือ $B\cos\theta$ จากสมการ (15.1) จะได้ว่า
ดังนั้น

$$\phi = BA\cos\theta$$

ตัวอย่าง 15.1 สนามแม่เหล็กของเครื่องเอ็มอาร์ไอเครื่องหนึ่ง มีความสม่ำเสมอขนาด 1.5 เทสลา ที่บริเวณแกนกลางของเครื่องสำหรับผู้ป่วยที่เข้าไปรับการตรวจด้วยเครื่องนี้ มีพื้นที่ในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก 0.4 ตารางเมตร จงหาฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านพื้นที่นี้

แนวคิด ฟลักซ์แม่เหล็กคำนวณได้จากสมการ $B = \dfrac{\phi}{A}$

วิธีทำ จากสมการ $B = \dfrac{\phi}{A}$ จะได้ว่า

$$\phi = BA$$

แทนค่าลงในสมการจะได้ $\phi = (1.5\ \text{T})(0.4\,\text{m}^2)$

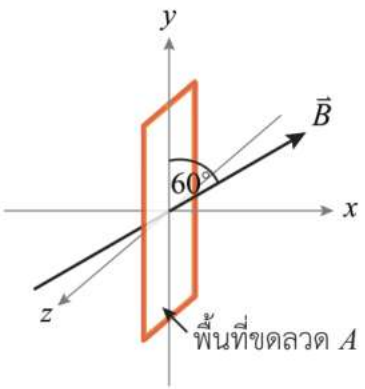
$$= 0.60\ \text{Wb}$$

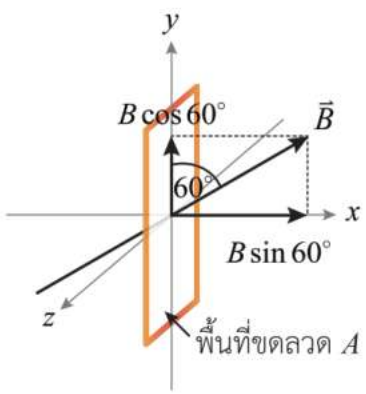
ตอบ ฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านพื้นที่บริเวณแกนกลางของเครื่องเอ็มอาร์ไอเท่ากับ 0.60 เวเบอร์

ตัวอย่าง 15.2 ถ้ามีสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอขนาด 0.20 เทสลา ผ่านขดลวดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีด้านยาว 20 เซนติเมตรและด้านกว้าง 10 เซนติเมตร ในทิศทางทำมุม 60 องศากับระนาบของขดลวด จงหาฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านขดลวด

แนวคิด หาฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านขดลวดจาก $\phi = BA$ โดย B ตั้งฉากกับพื้นที่ ในที่นี้ B ไม่ตั้งฉากกับพื้นที่ หา B ตั้งฉากได้จากองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กในทิศทางตั้งฉากกับพื้นที่ของขดลวด

วิธีทำ จากโจทย์สนามแม่เหล็กสม่ำเสมอผ่านขดลวดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าในทิศทางทำมุม 60 องศากับระนาบของขดลวด ดังรูป





จากรูป จะได้ว่าขนาดองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกับพื้นที่ของขดลวด (B ตั้งฉาก) เท่ากับ $B\sin 60^\circ$

จากสมการ $\phi = BA$

แทนค่า $\phi = \left(B\sin 60^{\circ}\right)A$

$$= (0.20\ \text{T})\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)(0.20\,\text{m})(0.10\,\text{m})$$

$$= 3.46\times10^{-3}\ \text{Wb}$$

ตอบ ฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านขดลวดเท่ากับ 3.5×10^{-3} เวเบอร์

15.1.3 สนามแม่เหล็กจากกระแสไฟฟ้าผ่านเส้นลวดตัวนำ

ในปี พ.ศ. 2363 **ฮันส์ คริสเตียน เออร์สเตด** (Hans C. Oersted) ชาวเดนมาร์กสังเกตเห็นเข็มทิศเบนไป เมื่อมีกระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำที่วางบนเข็มทิศ แสดงว่า กระแสไฟฟ้าทำให้เกิดสนามแม่เหล็กได้ สนามแม่เหล็กที่ได้จากกระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำที่เออร์สเตดพบ รวมทั้งกรณีอื่น ๆ เช่น กระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำที่มีฉนวนหุ้มมาขดเป็นวงกลมหลาย ๆ วง เรียงซ้อนกันเป็นรูปทรงกระบอกที่เรียกว่า **โซเลนอยด์** (solenoid) มีลักษณะอย่างไร นักเรียนจะได้ศึกษาจากกิจกรรม 15.1

ความรู้เพิ่มเติม

ฮันส์ คริสเตียน เออร์สเตด (Hans C. Oersted) (ค.ศ. 1777-1851 หรือ พ.ศ. 2320-2394) เป็นนักวิทยาศาสตร์ชาวเดนมาร์ก พบความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับสนามแม่เหล็ก เขาพบว่าลวดตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าผ่านจะมีสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นรอบลวดตัวนำนั้น

รูป เออร์สเตด

กิจกรรม 15.1 สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำ

จุดประสงค์

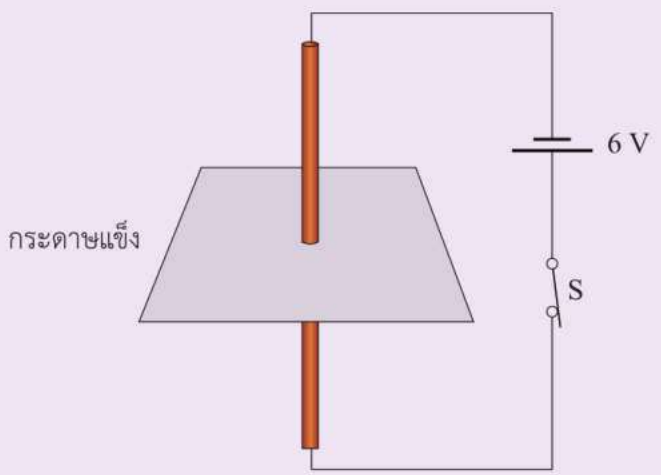
เพื่อสังเกตทิศทางของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำเส้นตรง ลวดตัวนำวงกลม และโซเลนอยด์

วัสดุและอุปกรณ์

1. ลวดตัวนำเส้นตรง	1 เส้น
2. ลวดตัวนำวงกลม	1 ขด
3. โซเลนอยด์	1 ขด
4. แบตเตอรี่ขนาด 1.5 โวลต์ 4 ก้อน พร้อมกระบะ	1 ชุด
5. เข็มทิศ	5 อัน
6. ผงเหล็ก	1 กล่อง
7. สายไฟ	4 เส้น
8. กระดาษแข็ง	3 แผ่น
9. สวิตช์	1 อัน

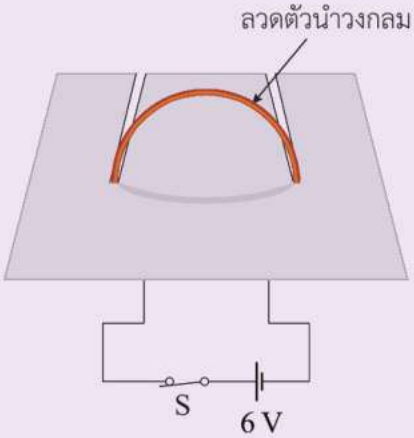
วิธีทำกิจกรรม

1. สอดลวดตัวนำเส้นตรงผ่านกระดาษแข็งตั้งฉากกับระนาบกระดาษ แล้วต่อปลายทั้งสองของลวดตัวนำกับไฟฟ้ากระแสตรง 6 โวลต์ จากแบตเตอรี่และสวิตช์ ดังรูป

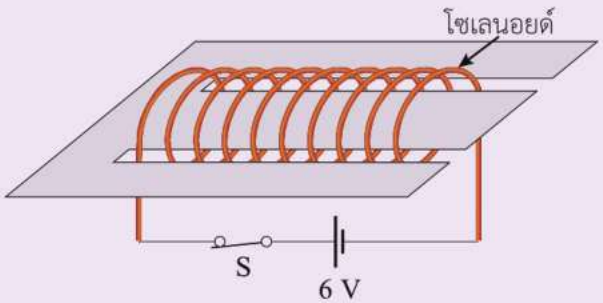


รูป ลวดตัวนำเส้นตรงวางตั้งฉากกับระนาบกระดาษ

2. เปิดสวิตซ์แล้วโรยผงเหล็กรอบ ๆ จากนั้นเคาะกระดาษแข็งจนกระทั่งผงเหล็กเรียงตัวเป็นแนว
3. ปิดสวิตซ์ สังเกตและวาดเส้นแนวการเรียงตัวของผงเหล็ก
4. วางเข็มทิศบนกระดาษแข็งตามแนวการเรียงตัวของผงเหล็ก ณ ตำแหน่งต่าง ๆ เปิดสวิตซ์ สังเกตการวางตัวของเข็มทิศ ปิดสวิตซ์ เขียนทิศทางบนเส้นแนวการเรียงตัวของเข็มทิศ
5. ทำซ้ำ ข้อ 1-4 โดยเปลี่ยนลวดตัวนำเส้นตรงเป็นลวดตัวนำวงกลมและโซเลนอยด์ดังรูป



รูป การวางลวดตัวนำวงกลมตั้งฉากกับระนาบกระดาษ



รูป การวางลวดตัวนำโซเลนอยด์กับระนาบกระดาษ

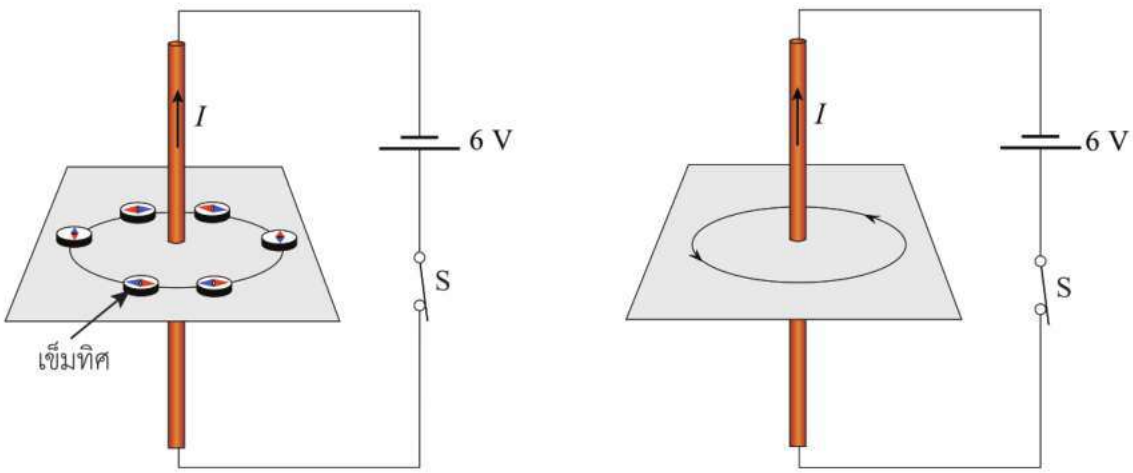
คำถามท้ายกิจกรรม

- ☐ แนวการเรียงตัวของผงเหล็กของสามกรณีเมื่อมีกระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำ เหมือนหรือต่างกันอย่างไร
- ☐ ขณะไม่มีกระแสไฟฟ้ากับขณะมีกระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำ การวางตัวของเข็มทิศต่างกันหรือไม่ อย่างไร

จากกิจกรรม 15.1 ในกรณีกระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำเส้นตรง แล้วโรยผงเหล็กรอบ ๆ จะสังเกตเห็นผงเหล็กเรียงตัวเป็นวงกลมรอบลวดตัวนำ ดังรูป 15.10

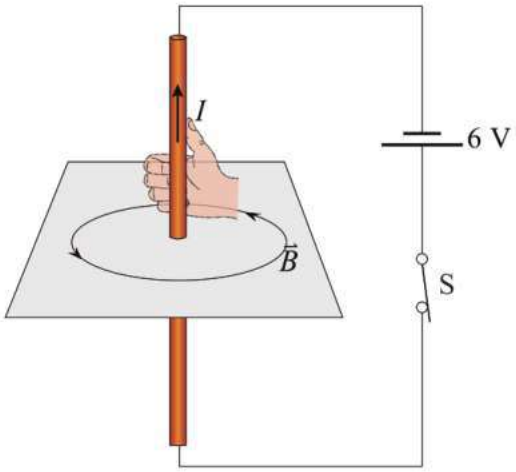
เมื่อนำเข็มทิศมาวางรอบลวดตัวนำเส้นตรงตามการเรียงตัวของผงเหล็ก จะทราบทิศทางของสนามแม่เหล็ก ดังรูป 15.11 ก. โดยทิศทางของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเมื่อมีกระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำเส้นตรงมีทิศทางดังรูป 15.11 ข.

รูป 15.10 แนวการเรียงตัวของผงเหล็กรอบลวดตัวนำเส้นตรงที่มีกระแสไฟฟ้าผ่าน



ก. การวางตัวของเข็มทิศรอบลวดตัวนำเส้นตรง ข. ทิศทางสนามแม่เหล็กรอบลวดตัวนำเส้นตรง

รูป 15.11 สนามแม่เหล็กรอบลวดตัวนำเส้นตรงเมื่อมีกระแสไฟฟ้าผ่าน



รูป 15.12 การหาทิศทางสนามแม่เหล็กรอบเส้นลวดที่มีกระแสไฟฟ้าผ่านโดยใช้มือขวา

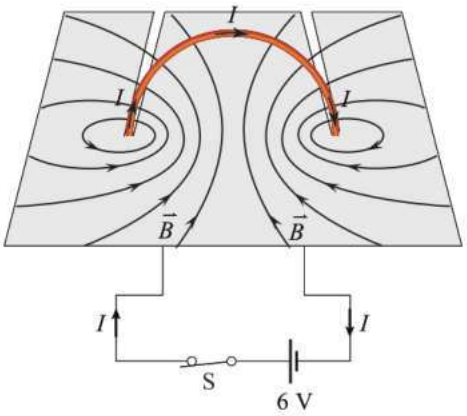
การหาทิศทางของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำเส้นตรงทำได้โดย ใช้นิ้วหัวแม่มือของมือขวาชี้ไปตามทิศทางของกระแสไฟฟ้า จากนั้นกำมือขวารอบลวดตัวนำเส้นตรง ทิศทางการวนของนิ้วทั้งสี่จะแสดงทิศทางของสนามแม่เหล็ก ดังรูป 15.12

ชวนคิด

จากรูป 15.11 เมื่อกลับทิศทางของกระแสไฟฟ้า สนามแม่เหล็กจะมีทิศทางอย่างไร

กรณีลวดตัวนำวงกลม เมื่อให้กระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำวงกลม จะสังเกตเห็นผงเหล็กเรียงตัวเป็นวงรอบลวดตัวนำดังรูป 15.13 ก. เมื่อนำเข็มทิศวางรอบเส้นลวดตัวนำทั้งสองข้าง จะได้ทิศทางของสนามแม่เหล็ก บริเวณโดยรอบมีทิศทาง ดังรูป 15.13 ข.

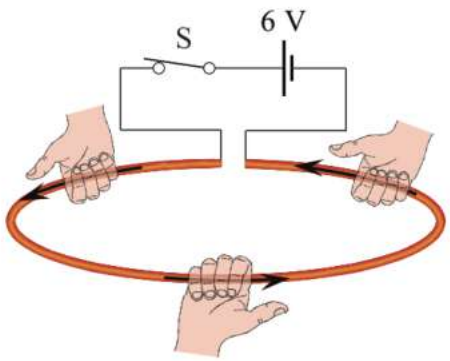
ก. การเรียงตัวของผงเหล็กรอบลวดตัวนำวงกลม



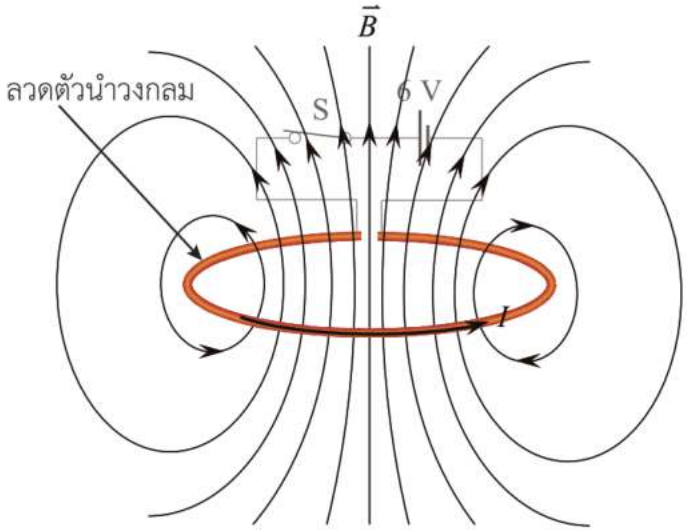
ข. ทิศทางสนามแม่เหล็กรอบลวดตัวนำวงกลม

รูป 15.13 สนามแม่เหล็กรอบลวดตัวนำวงกลมเมื่อมีกระแสไฟฟ้าผ่าน

จากรูป 15.13 ข. จะเห็นว่าสนามแม่เหล็กบริเวณภายในของลวดตัวนำวงกลมมีทิศทางเดียวกัน หากพิจารณากรณีตัวนำวงกลมอยู่ในแนวขนานกับระนาบระดับ ใช้นิ้วหัวแม่มือของมือขวาชี้ไปตามทิศทางของกระแสไฟฟ้าของลวดตัวนำวงกลมในแต่ละส่วน จะได้ทิศทางของสนามแม่เหล็กตามทิศทางการวนของนิ้วทั้งสี่ ดังรูป 15.14 ก. จึงสรุปได้ว่าบริเวณพื้นที่ภายในขดลวดตัวนำวงกลม สนามแม่เหล็กมีทิศทางตั้งฉากกับระนาบของลวดตัวนำ สามารถเขียนเส้นสนามแม่เหล็กภายในลวดตัวนำวงกลมได้ดังรูป 15.14 ข.



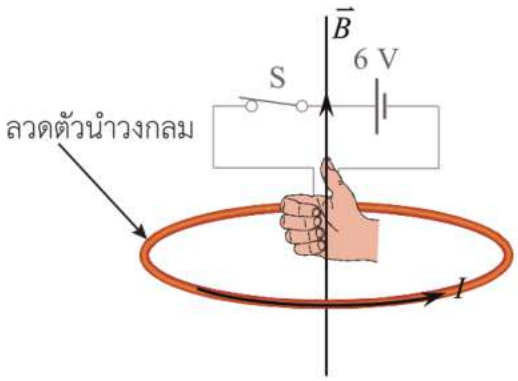
ก. การหาทิศทางสนามแม่เหล็กภายในลวดตัวนำวงกลมโดยใช้มือขวา



ข. ทิศทางสนามแม่เหล็กภายในลวดตัวนำวงกลม

รูป 15.14 สนามแม่เหล็กรอบลวดตัวนำวงกลมเมื่อระนาบขดลวดอยู่ในแนวขนานกับระนาบระดับและมีกระแสไฟฟ้าผ่าน

นอกจากวิธีการข้างต้นอาจหาทิศทางของสนามแม่เหล็กได้อีกวิธีหนึ่ง ดังนี้ กำมือขวาบนระนาบขดลวดตัวนำ โดยให้นิ้วทั้งสี่วนตามทิศทางของกระแสไฟฟ้า นิ้วหัวแม่มือจะชี้ไปตามทิศทางของสนามแม่เหล็กที่ผ่านพื้นที่ขดลวดดังรูป 15.15



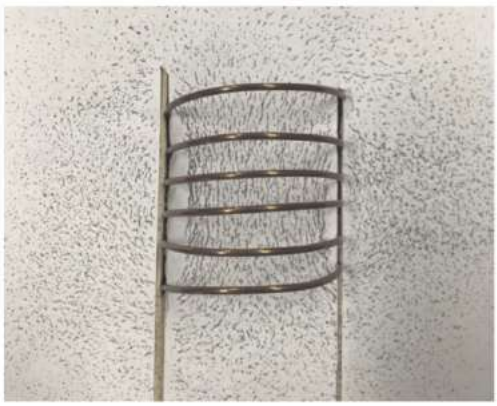
รูป 15.15 การหาทิศทางของสนามแม่เหล็กของลวดตัวนำวงกลมที่มีกระแสไฟฟ้าผ่านอีกวิธีหนึ่ง

ชวนคิด

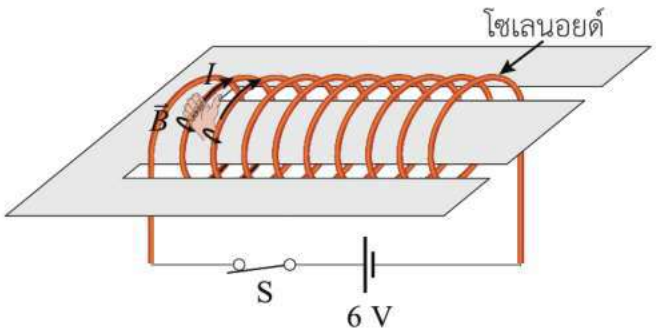
หากกลับทิศทางของกระแสไฟฟ้าในลวดตัวนำวงกลม ทิศทางของสนามแม่เหล็กที่ผ่านพื้นที่ขดลวดจะเป็นอย่างไร

กรณีเมื่อมีกระแสไฟฟ้าผ่านโซเลนอยด์ จะสังเกตเห็นการเรียงตัวของผงเหล็ก มีลักษณะดังรูป 15.16

เริ่มพิจารณาขดลวดวงกลมสองวงของโซเลนอยด์ สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นสามารถใช้มือขวาในการหาทิศทางได้ โดยใช้นิ้วหัวแม่มือชี้ไปตามทิศทางของกระแสไฟฟ้า ทิศทางการวนของนิ้วทั้งสี่จะแสดงทิศทางของสนามแม่เหล็ก แสดงได้ดังรูป 15.17

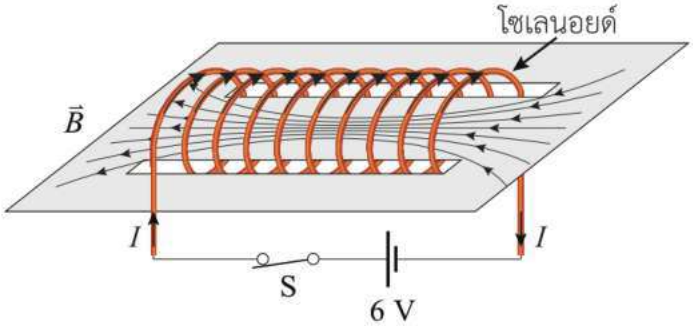


รูป 15.16 การเรียงตัวของผงเหล็กเมื่อมีกระแสไฟฟ้าผ่านโซเลนอยด์



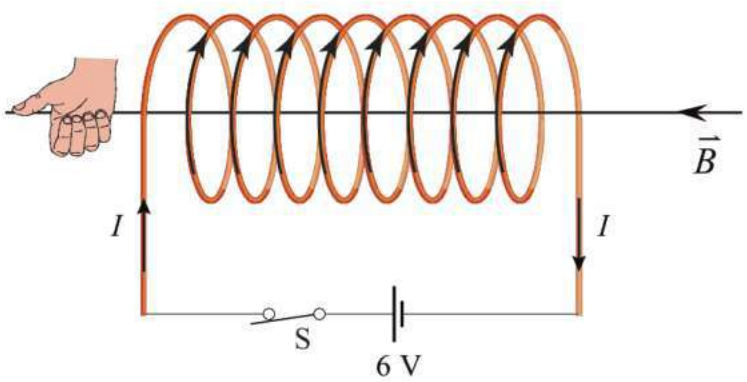
รูป 15.17 การหาทิศทางสนามแม่เหล็กเมื่อมีกระแสไฟฟ้าผ่านโซเลนอยด์

จะเห็นว่าบริเวณภายในของขดลวดวงกลมสองวงที่อยู่ถัดกัน ทิศทางของสนามแม่เหล็กจะมีทิศทางเดียวกัน เมื่อพิจารณาขดลวดวงกลมซ้อนกันหลายวง สนามแม่เหล็กจึงรวมกันทำให้เกิดสนามแม่เหล็กบริเวณแกนของโซเลนอยด์มีขนาดมากกว่าบริเวณอื่น ทิศทางสนามแม่เหล็กด้านนอกโซเลนอยด์จะมีทิศทางออกจากปลายด้านหนึ่ง และเข้าสู่ปลายอีกด้านหนึ่งตามแกนโซเลนอยด์ มีลักษณะคล้ายกับสนามแม่เหล็กจากแท่งแม่เหล็ก จึงสรุปได้ว่าโซเลนอยด์ที่มีกระแสไฟฟ้าผ่าน สามารถเขียนเส้นสนามแม่เหล็กได้ ดังรูป 15.18



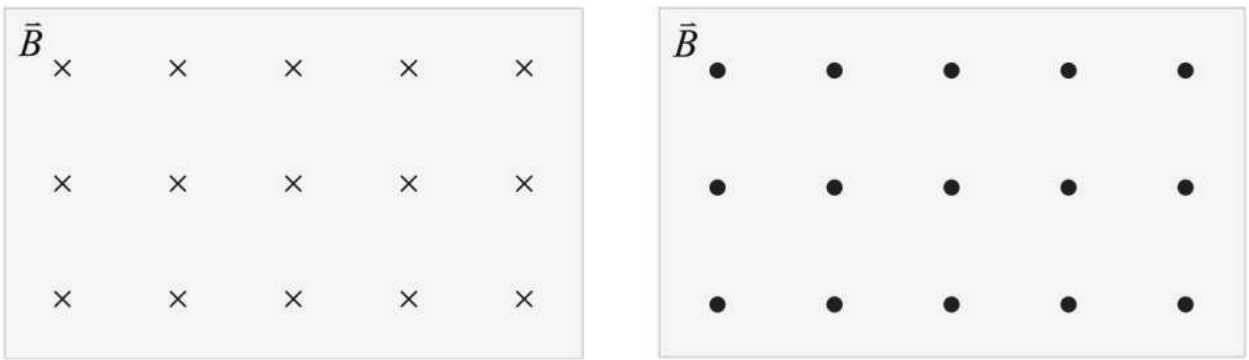
รูป 15.18 เส้นสนามแม่เหล็กของโซเลนอยด์เมื่อมีกระแสไฟฟ้าผ่าน

การหาทิศทางของสนามแม่เหล็กในแนวแกนของโซเลนอยด์ อีกวิธีหนึ่งคล้ายกับการหาทิศทางของสนามแม่เหล็กของลวดตัวนำวงกลม โดยใช้มือขวา วนนิ้วทั้งสี่ไปตามทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่ผ่านลวดตัวนำ นิ้วหัวแม่มือจะชี้ทิศทางของสนามแม่เหล็ก ดังรูป 15.19



รูป 15.19 การหาทิศทางสนามแม่เหล็กของโซเลนอยด์โดยใช้มือขวา

การเขียนทิศทางของสนามแม่เหล็กนอกจากการเขียนเส้นลูกศรแสดงทิศทางแล้ว ยังใช้สัญลักษณ์ × แสดงสนามแม่เหล็กที่ชี้เข้าตั้งฉากกับกระดาษ ดังรูป 15.20 ก. และใช้สัญลักษณ์ ● แสดงสนามแม่เหล็กที่ชี้ออกตั้งฉากกับกระดาษ ดังรูป 15.20 ข.

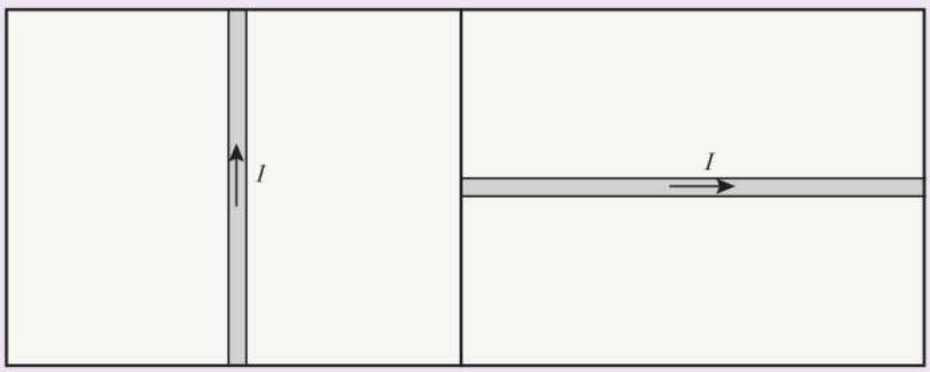


ก. สนามแม่เหล็กชี้เข้าตั้งฉากกับกระดาษ ข. สนามแม่เหล็กชี้ออกตั้งฉากกับกระดาษ

รูป 15.20 การใช้สัญลักษณ์ × และ ● แสดงทิศทางของสนามแม่เหล็ก

ชวนคิด

จงเขียนสัญลักษณ์ × และ ● แสดงทิศทางของสนามแม่เหล็กในระนาบกระดาษที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำเส้นตรง ทางด้านซ้ายและทางด้านขวาของลวดตัวนำของรูป ก. และทางด้านบนและด้านล่างของลวดตัวนำในรูป ข.



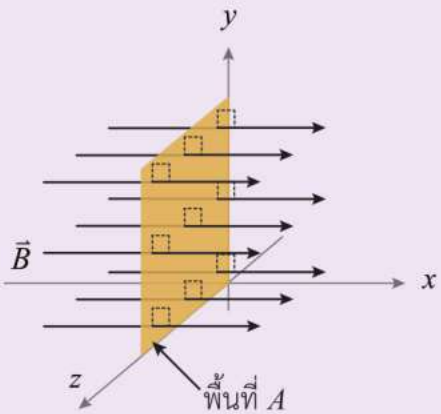
ก. ลวดตัวนำวางตัวในแนวดิ่ง ข. ลวดตัวนำวางตัวในแนวระดับ

รูป ลวดตัวนำเส้นตรงที่มีกระแสไฟฟ้าผ่าน

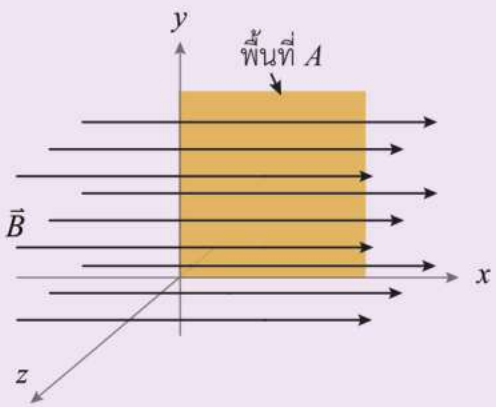
คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 15.1

1. จงหาฟลักซ์แม่เหล็กในแต่ละข้อต่อไปนี้ โดยพื้นที่ A มีค่าเท่ากับ 0.8 ตารางเมตร และมีสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอตลอดพื้นที่เท่ากับ 0.5 เทสลา ในแนวแกน x

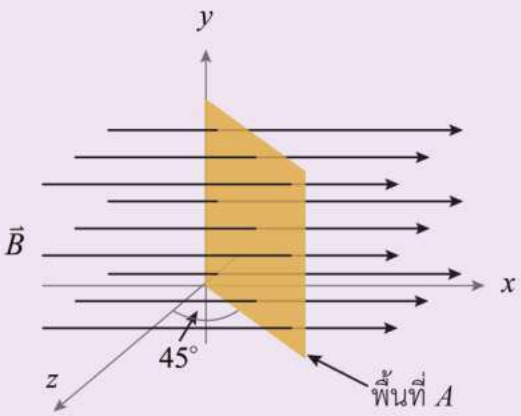
1.1 พื้นที่ A อยู่ในระนาบ yz



1.2 พื้นที่ A อยู่ในระนาบ xy

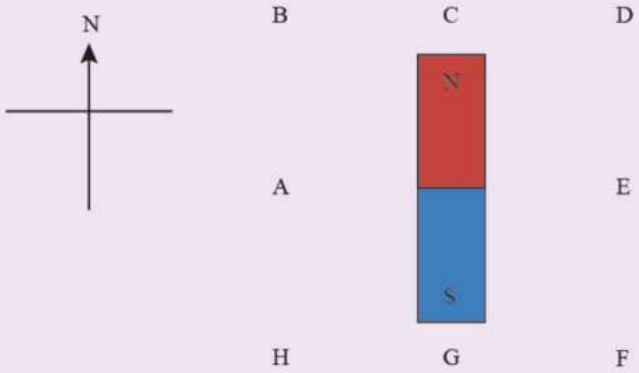


1.3 พื้นที่ A ระนาบทำมุม 45 องศา กับแกน z



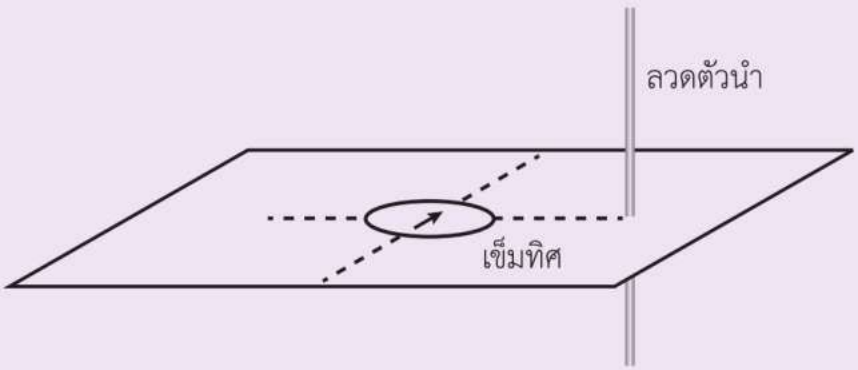
2. จงบอกทิศทางของเส้นสนามแม่เหล็กโลกบริเวณเส้นศูนย์สูตรของโลก บริเวณขั้วโลกเหนือ และบริเวณขั้วโลกใต้ทางภูมิศาสตร์

3. เมื่อวางแท่งแม่เหล็กแท่งหนึ่งไว้ที่บริเวณเส้นศูนย์สูตรโลกในลักษณะทิศทางการวางตัวดังรูป บริเวณใดบ้างที่อาจมีจุดสะเทิน



รูป ประกอบคำถามตรวจสอบความเข้าใจข้อ 3

4. วางลวดตัวนำเส้นตรงที่ไม่มีกระแสไฟฟ้าผ่าน ให้อยู่ในแนวดิ่งและใกล้เข็มทิศ ดังรูป



รูป ประกอบคำถามตรวจสอบความเข้าใจข้อ 4

ต่อมาให้กระแสไฟฟ้าขนาดมากพอ ผ่านลวดตัวนำนี้ในทิศทางจากล่างขึ้นบน เข็มทิศจะชี้ไปทิศทางใด

แบบฝึกหัด 15.1

1. สนามแม่เหล็กขนาดสม่ำเสมอ 1.0 เทสลา จงหาฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านระนาบขดลวดที่มีพื้นที่ 10 ตารางเซนติเมตร ขณะระนาบขดลวดทำมุม 0 องศาและ 90 องศา กับสนามแม่เหล็ก
2. ฟลักซ์แม่เหล็ก 6.28×10^{-3} เวเบอร์ ผ่านตั้งฉากกับระนาบของขดลวดวงกลมรัศมี 10 เซนติเมตร จงหาความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก
3. ถ้ามีสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอขนาด 0.20 เทสลา ผ่านขดลวดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีด้านยาว 20 เซนติเมตร และด้านกว้าง 10 เซนติเมตร ในทิศทำมุม 30 องศา กับระนาบของขดลวด จงหาฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านขดลวด

15.2 แรงแม่เหล็ก

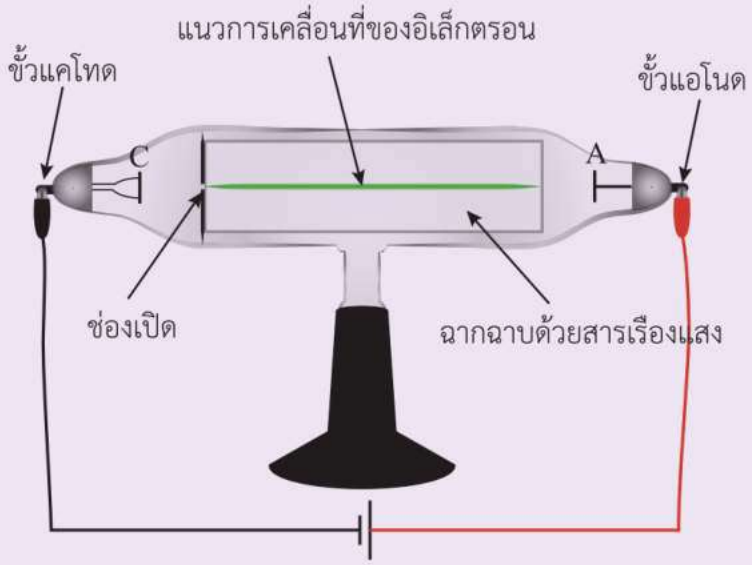
ในหัวข้อที่ผ่านมาทราบแล้วว่าหากนำแม่เหล็กหรือสารแม่เหล็กเข้าใกล้บริเวณที่มีสนามแม่เหล็กจะมีแรงแม่เหล็กกระทำกับขั้วแม่เหล็กหรือกระทำกับสารแม่เหล็กนั้น นอกจากที่กล่าวมาข้างต้นมีกรณีอื่นหรือไม่ที่ทำให้เกิดแรงแม่เหล็ก จะได้ศึกษาในหัวข้อนี้

15.2.1 แรงแม่เหล็กกระทำต่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า

เมื่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าอยู่ในสนามไฟฟ้า จะเกิดแรงไฟฟ้ากระทำต่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้านั้น หากอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็ก จะเกิดแรงแม่เหล็กกระทำต่ออนุภาคนั้นหรือไม่ และลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคเป็นอย่างไร จะได้ศึกษาจากสถานการณ์ต่อไปนี้

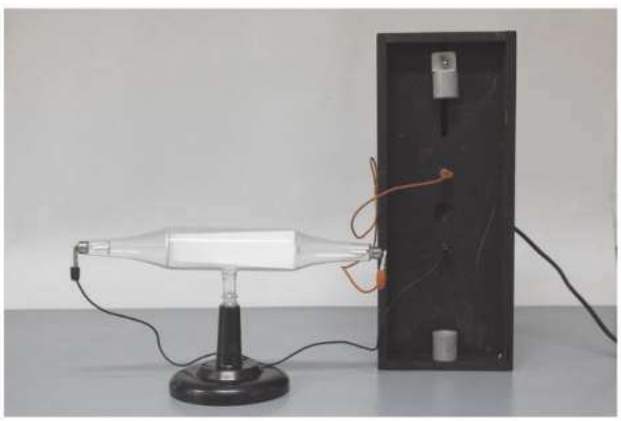
ความรู้เพิ่มเติม

หลอดรังสีแคโทดเป็นหลอดสุญญากาศชนิดหนึ่ง ประกอบด้วยขั้วแคโทดและขั้วแอโนด สำหรับต่อเข้ากับขั้วลบและขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงโวลต์สูง ตามลำดับ ดังรูป



รูป ตัวอย่างหลอดรังสีแคโทด

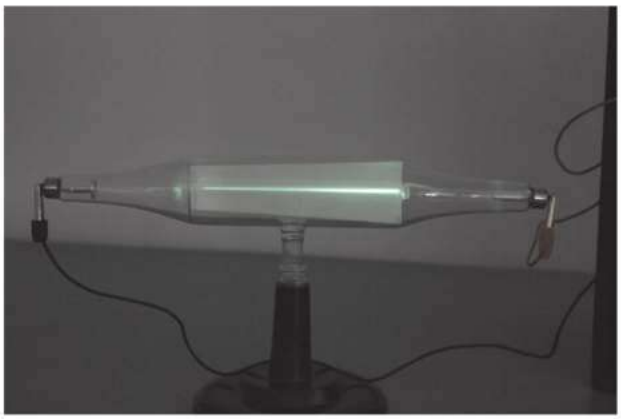
เมื่อต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงโวลต์สูงเข้ากับขั้วแคโทดและแอโนด ทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากแผ่นแคโทด C เคลื่อนที่ผ่านฉากที่ฉาบด้วย**สารเรืองแสง** (phosphor) ไปยังแผ่นแอโนด A ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าแผ่นแคโทด C ทำให้ปรากฏเป็นแนวสว่างขึ้น เรียกว่า แนวการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน



รูป 15.21 การจัดอุปกรณ์

ต่อขั้วแคโทดของหลอดรังสีแคโทดเข้ากับขั้วลบ และต่อขั้วแอโนดเข้ากับขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงโวลต์สูง (12 000 - 15 000 โวลต์) ดังรูป 15.21

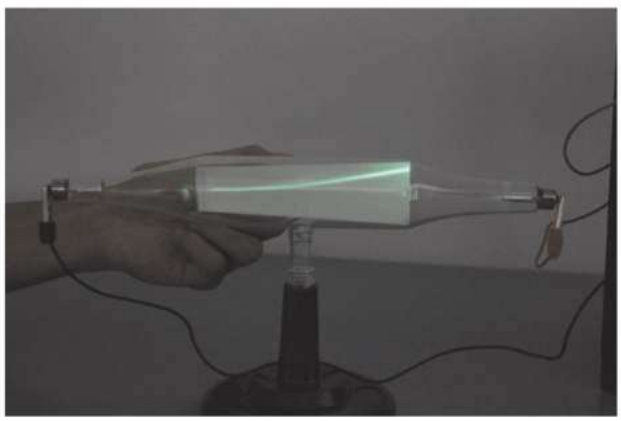
เปิดสวิตซ์ให้เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงโวลต์สูงทำงาน สังเกตผลที่เกิดขึ้น ในกรณีนำขั้วเหนือของแท่งแม่เหล็กเข้าใกล้หลอดรังสีแคโทด ในทิศทางตั้งฉากกับแนวการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน และในกรณีสลับขั้วแท่งแม่เหล็กเป็นขั้วใต้



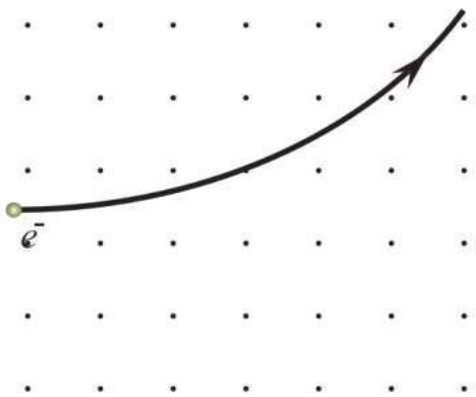
รูป 15.22 แนวการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนระหว่างขั้วแคโทดและขั้วแอโนด

จากสถานการณ์ข้างต้น เมื่อเปิดสวิตซ์แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงโวลต์สูง หลอดรังสีแคโทดทำงาน จะเห็นแนวสว่างหรือแนวการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเป็นเส้นตรงเกิดขึ้นระหว่างขั้วแคโทดและขั้วแอโนด ดังรูป 15.22

เมื่อนำขั้วเหนือของแท่งแม่เหล็กเข้าใกล้ในทิศทางตั้งฉากกับแนวการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน จะเห็นว่าแนวการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเบนไปจากแนวเดิม ดังรูป 15.23 ก. อิเล็กตรอนเป็นอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าลบเคลื่อนที่ในทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กที่มีทิศทางออกจากฉาก แนวการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะเบนโค้งขึ้น ดังรูป 15.23 ข.



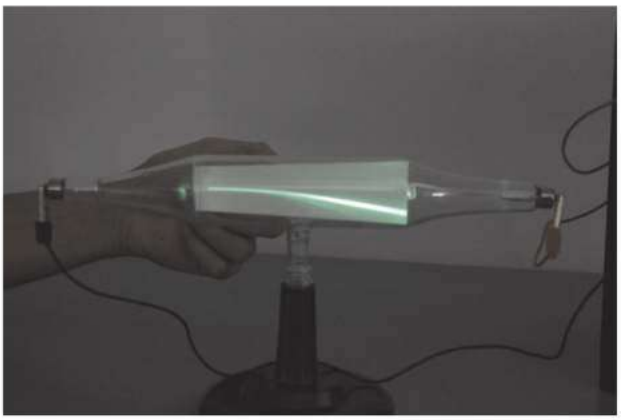
ก. การเบนของแนวการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเมื่อนำขั้วเหนือของแท่งแม่เหล็กเข้าใกล้



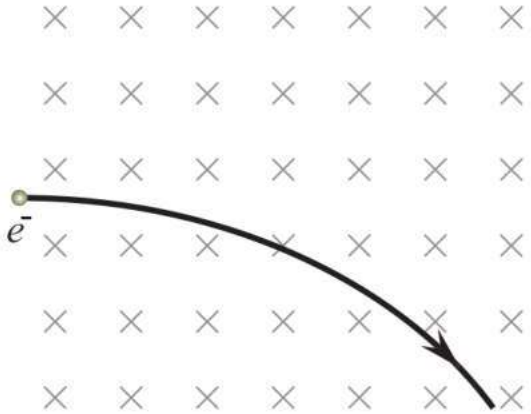
ข. อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เบนโค้งขึ้นเมื่อสนามแม่เหล็กมีทิศทางออกจากฉาก

รูป 15.23 การเบนของแนวการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเมื่อนำแม่เหล็กขั้วเหนือเข้าใกล้

เมื่อสลับขั้วแท่งแม่เหล็ก โดยนำขั้วใต้ของแท่งแม่เหล็กเข้าใกล้หลอดรังสีแคโทด แนวการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะเบนจากแนวเดิมในทิศทางเบนโค้งลง ดังรูป 15.24 ก. การสลับขั้วแท่งแม่เหล็กเป็นการเปลี่ยนทิศทางของสนามแม่เหล็ก ทำให้สนามแม่เหล็กมีทิศทางเข้าสู่ฉาก ทำให้แนวการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเบนโค้งลง ดังรูป 15.24 ข.



ก. การเบนของแนวการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน เมื่อนำขั้วใต้ของแท่งแม่เหล็กเข้าใกล้



ข. อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เบนโค้งลง เมื่อสนามแม่เหล็กมีทิศทางเข้าสู่ฉาก

รูป 15.24 การเบนของแนวการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเมื่อนำแม่เหล็กขั้วใต้เข้าใกล้

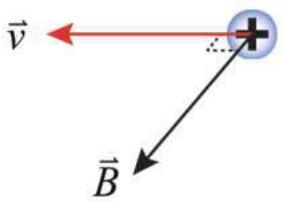
การที่อิเล็กตรอนภายในหลอดรังสีแคโทดเคลื่อนที่เบนโค้งในสนามแม่เหล็ก แสดงว่ามีแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กกระทำต่ออิเล็กตรอน

ชวนคิด

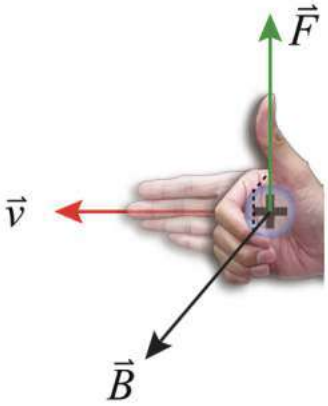
หากอนุภาคเคลื่อนที่เข้าสู่สนามแม่เหล็กตามสถานการณ์ข้างต้น แต่มีประจุไฟฟ้าบวกอนุภาคจะมีทิศทางการเคลื่อนที่เป็นอย่างไร

ทิศทางของแรงแม่เหล็ก

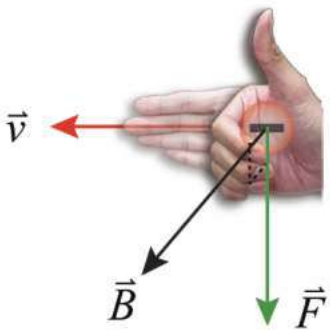
เมื่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ในทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก จะมีแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กกระทำต่ออนุภาคนั้น หรือเรียกว่า **แรงแม่เหล็ก** (magnetic force) พิจารณาทิศทางและขนาดของแรงได้ดังนี้



ก. อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าบวกเคลื่อนที่ทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก



ข. ทิศทางของแรงแม่เหล็กที่กระทำต่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าบวก โดยใช้มือขวา



ค. ทิศทางของแรงแม่เหล็กที่กระทำต่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าลบ โดยใช้มือขวา

รูป 15.25 การหาทิศทางของแรงกระทำต่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็ก

ทิศทางของแรงแม่เหล็กที่กระทำต่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าบวกเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว (v) ในทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก ($\vec{B}$) ดังรูป 15.25 ก. หาทิศทางของแรงแม่เหล็กที่กระทำต่ออนุภาคโดยใช้มือขวา ชี้นิ้วทั้งสี่ไปตามทิศทางของความเร็ว แล้ววนนิ้วทั้งสี่ไปหาทิศทางสนามแม่เหล็ก นิ้วหัวแม่มือจะชี้ทิศทางของแรง ($\vec{F}$) ดังรูป 15.25 ข.

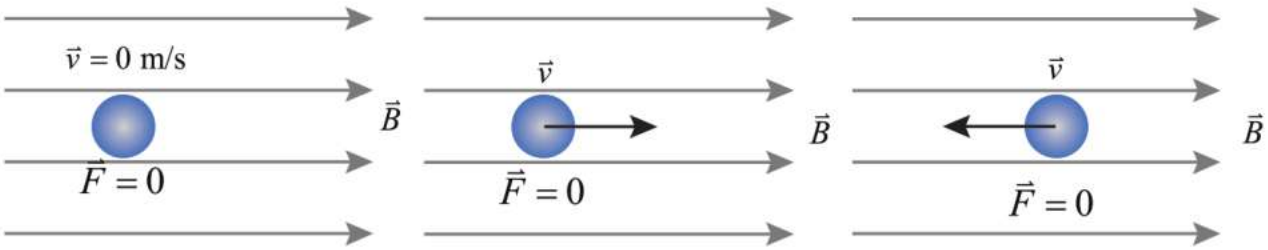
สำหรับการหาทิศทางของแรงที่กระทำต่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าลบ ยังคงใช้มือขวา ในการหาทิศทางของแรง $\vec{F}$ ได้ แต่ทิศทางของแรงที่กระทำต่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าลบจะมีทิศทางตรงข้ามกับทิศของนิ้วหัวแม่มือ ดังรูป 15.25 ค.

ข้อสังเกต

แรงแม่เหล็ก $\vec{F}$ จะอยู่ในทิศทางที่ตั้งฉากกับความเร็ว v และสนามแม่เหล็ก $\vec{B}$ เสมอ

ขนาดของแรงแม่เหล็ก

สำหรับอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าแต่อยู่นิ่ง ในสนามแม่เหล็กดังรูป 15.26 ก. หรือเคลื่อนที่ในแนวขนานกับทิศทางของสนามแม่เหล็กดังรูป 15.26 ข. และ 15.26 ค. ตามลำดับ จะไม่มีแรงแม่เหล็กกระทำกับอนุภาคนั้น



ก. อนุภาคอยู่นิ่งในสนามแม่เหล็ก

ข. อนุภาคเคลื่อนที่ในแนวขนานทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็ก

ค. อนุภาคเคลื่อนที่ในแนวขนานทิศทางตรงข้ามกับสนามแม่เหล็ก

รูป 15.26 แรงแม่เหล็กที่กระทำต่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าที่อยู่นิ่ง หรือเคลื่อนที่ขนานกับสนามแม่เหล็กมีค่าเป็นศูนย์

ก. อนุภาคเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับทิศทางของสนามแม่เหล็ก

ข. แรงแม่เหล็กกระทำต่ออนุภาค

รูป 15.27 แรงแม่เหล็กที่กระทำต่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าและเคลื่อนที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก

แต่ในกรณีอนุภาคเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับทิศทางของสนามแม่เหล็กดังรูป 15.27 ก. จะมีแรงแม่เหล็กกระทำต่ออนุภาค ดังรูป 15.27 ข. โดยขนาดแรงแม่เหล็กหาได้จากสมการ

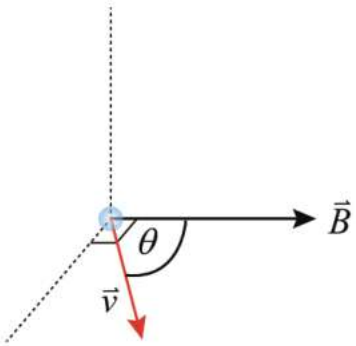
$$F = qvB \qquad (15.2)$$

เมื่อ q คือ ขนาดของประจุไฟฟ้า มีหน่วย คูลอมบ์ (C)

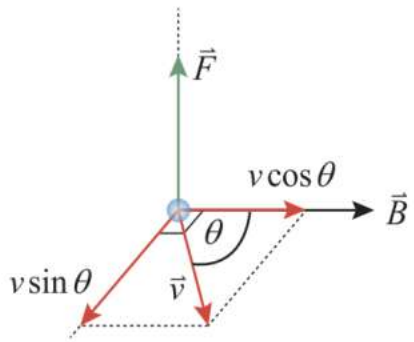
v คือ ขนาดของความเร็ว มีหน่วย เมตรต่อวินาที (m/s)

B คือ ขนาดของสนามแม่เหล็ก มีหน่วย เทสลา (T)

F คือ ขนาดของแรง มีหน่วย นิวตัน (N)



ก. อนุภาคมีประจุไฟฟ้าด้วยความเร็ว v ทำมุม θ กับสนามแม่เหล็ก $\vec{B}$



ข. ความเร็วของอนุภาคที่พิจารณาทั้งในแนวขนานและแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก

รูป 15.28 อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v ทำมุม θ กับสนามแม่เหล็ก $\vec{B}$

ในกรณีอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v ทำมุม θ กับสนามแม่เหล็ก $\vec{B}$ ดังรูป 15.28 ก.

พิจารณาได้ว่าอนุภาคนี้มีองค์ประกอบความเร็วของการเคลื่อนที่ทั้งในแนวขนานกับสนามแม่เหล็ก และในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กพร้อมกันดังรูป 15.28 ข.

การเคลื่อนที่ในแนวขนานกับสนามแม่เหล็กจะไม่มีแรงแม่เหล็กกระทำต่ออนุภาค ส่วนการเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กจะมีแรงแม่เหล็กกระทำตามสมการ (15.2) โดยความเร็วในสมการนี้มีค่าเท่ากับองค์ประกอบความเร็วในแนวตั้งฉาก ($v\sin\theta$) นั่นคือในกรณีนี้ขนาดของแรง $\vec{F}$ ที่กระทำต่ออนุภาค หาได้จากสมการ

$$F = q(v\sin\theta)B$$

$$F = qvB\sin\theta \qquad (15.3)$$

เมื่อ θ เป็นมุมระหว่างความเร็ว v ของอนุภาคกับสนามแม่เหล็ก $\vec{B}$

ข้อสังเกต

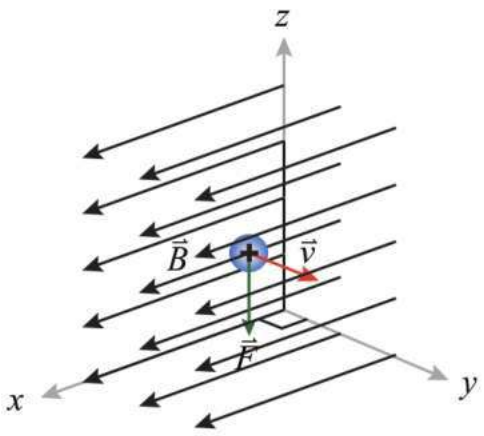
สำหรับอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยความเร็วค่าหนึ่ง แรงแม่เหล็กที่กระทำจะมีขนาดมากที่สุดเมื่อความเร็วตั้งฉากกับทิศทางของสนามแม่เหล็ก และจะมีค่าเป็นศูนย์เมื่อความเร็วมีทิศทางขนานกับทิศทางของสนามแม่เหล็ก

ตัวอย่าง 15.3 ในบริเวณหนึ่งมีสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอเท่ากับ 0.2 มิลลิเทสลา ในทิศทาง $+x$ โปรตอนถูกยิงให้มีความเร็วในทิศทาง $+y$ ด้วยอัตราเร็ว 3.0×10^6 เมตรต่อวินาที จงหาทิศทางและขนาดของแรงที่กระทำต่อโปรตอน ณ ขณะนั้น (กำหนดให้อิเล็กตรอนมีประจุไฟฟ้า 1.6×10^{-19} คูลอมบ์)

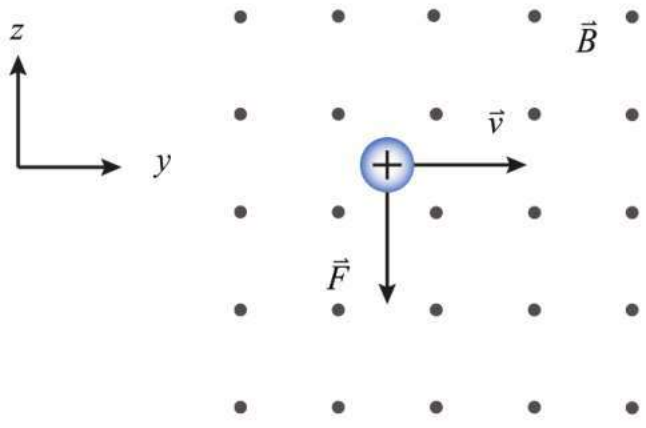
แนวคิด อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ในทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กด้วยความเร็ว v จะเกิดแรงแม่เหล็กกระทำต่ออนุภาค ใช้มือขวาในการหาทิศทางของแรงและหาขนาดของแรงที่กระทำต่ออนุภาคจากสมการ

$$F = qvB$$

วิธีทำ จากโจทย์เขียนรูปแสดงทิศทางของสนามแม่เหล็ก และทิศทางของความเร็วของโปรตอนในทิศทาง $+x$ $+y$ ตามลำดับ ได้ดังรูป ก. หากพิจารณาให้แกน $+x$ ชี้ออกตั้งฉากกับกระดาษ โดยแกน $+y$ และ $+z$ อยู่ในระนาบกระดาษ แล้วใช้มือขวาหาทิศทางของแรง จะได้ทิศทางของแรง $\vec{F}$ ดังรูป ข.



รูป ก.



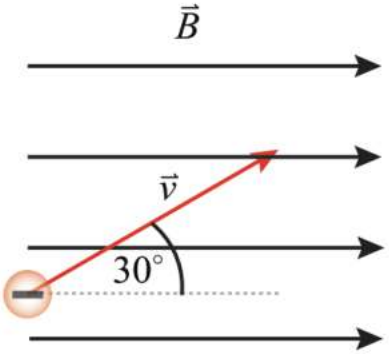
รูป ข.

และขนาดของแรงที่กระทำต่ออนุภาคหาได้จาก

$$\begin{aligned} F &= qvB \\ &= (1.6\times10^{-19}\,\text{C})(3.0\times10^{6}\,\text{m/s})(0.2\times10^{-3}\,\text{T}) \\ &= 9.6\times10^{-17}\,\text{N} \end{aligned}$$

ตอบ แรงที่กระทำต่อโปรตอน ณ ขณะนั้นมีทิศทาง $-z$ และมีขนาดเท่ากับ 9.6×10^{-17} นิวตัน

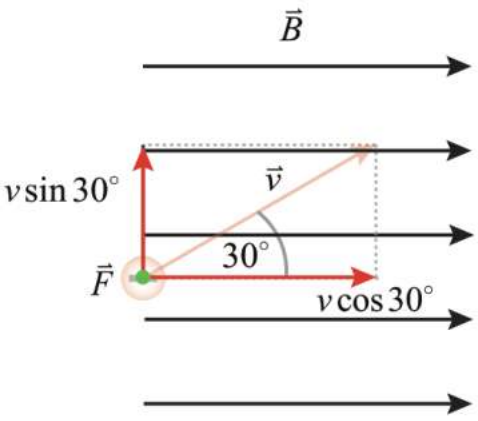
ตัวอย่าง 15.4 อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงตัวขนาด 2.0×10^{6} เมตรต่อวินาที เข้าไปในสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอขนาด 5.0×10^{-3} เทสลา ในทิศทางทำมุม 30 องศากับสนามแม่เหล็ก ดังรูป ทิศทางและขนาดของแรงแม่เหล็กที่กระทำต่ออิเล็กตรอนมีค่าเท่าใด (กำหนดให้ อิเล็กตรอนมีประจุไฟฟ้า 1.6×10^{-19} คูลอมบ์)



รูป ประกอบตัวอย่าง 15.4

แนวคิด อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็กด้วยความเร็ว v จะเกิดแรงแม่เหล็กกระทำต่ออิเล็กตรอน ใช้มือขวาหาทิศทางของแรงที่กระทำต่ออิเล็กตรอนและทิศทางของความเร็วทำมุม θ กับสนามแม่เหล็ก หาขนาดของแรงที่กระทำต่ออิเล็กตรอนจากสมการ $F = qvB\sin\theta$

วิธีทำ ใช้มือขวาหาทิศทางของแรง จะได้ทิศทางของแรงแม่เหล็ก มีทิศทางออกจากกระดาษ ดังรูป



ขนาดของแรงที่กระทำต่ออิเล็กตรอน หาได้จากสมการ

$$F = qvB\sin\theta$$

แทนค่า $$= (1.6\times10^{-19}\,\text{C})(2.0\times10^{6}\,\text{m/s})(5.0\times10^{-3}\,\text{T})(0.5)$$

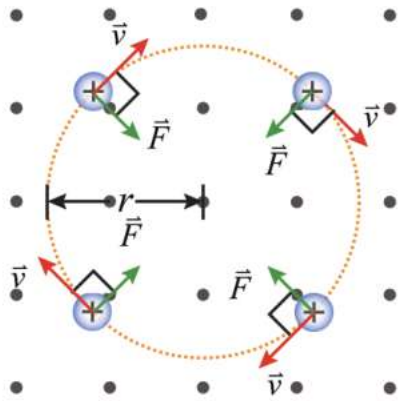
$$= 8.0\times10^{-16}\ \text{N}$$

ตอบ ขนาดของแรงแม่เหล็กที่กระทำต่ออิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 8.0×10^{-16} นิวตัน มีทิศทางออกจากกระดาษ

การเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าในสนามแม่เหล็ก

เมื่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็กจะมีแรงแม่เหล็กกระทำต่ออนุภาคดังกล่าว หากความเร็วของอนุภาคนี้มีทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กตลอดเวลา อนุภาคจะมีการเคลื่อนที่เป็นแบบใด พิจารณาได้ดังนี้

เมื่ออนุภาคมีประจุไฟฟ้าบวก q มวล m เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v ในทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก $\vec{B}$ แรงแม่เหล็ก $\vec{F}$ ที่เกิดขึ้นมีทิศทางตั้งฉากกับความเร็วตลอดเวลา ทำให้อนุภาคมีประจุไฟฟ้าบวกเคลื่อนที่แบบวงกลมในสนามแม่เหล็ก ดังรูป 15.29



รูป 15.29 อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าบวกเคลื่อนที่แบบวงกลมในสนามแม่เหล็ก

ชวนคิด

จากรูป 15.29 หากอนุภาคที่เคลื่อนที่มีประจุไฟฟ้าลบ อนุภาคจะมีการเคลื่อนที่เป็นแบบใด

พิจารณารัศมีการเคลื่อนที่แบบวงกลม (r) ของอนุภาคมีประจุไฟฟ้าได้ดังนี้ แรงแม่เหล็กตั้งฉากกับความเร็วตลอดเวลาและทำหน้าที่เป็นแรงสู่ศูนย์กลาง จะได้

$$F = F_c$$

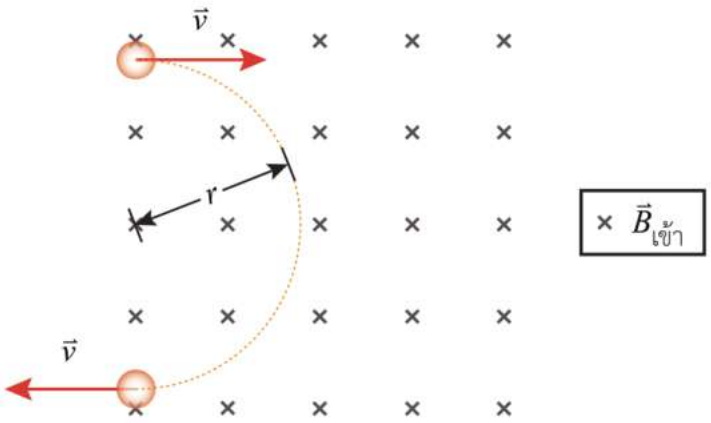
$$qvB = \frac{mv^2}{r}$$

หรือ

$$r = \frac{mv}{qB} \qquad (15.4)$$

เมื่อ r คือ รัศมีการเคลื่อนที่แบบวงกลมของอนุภาคมวล m ที่มีประจุไฟฟ้า q

ตัวอย่าง 15.5 ในการทดลองวัดอัตราเร็วของอิเล็กตรอนที่ถูกยิงเข้าไปในทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก ดังรูป



รูป ประกอบตัวอย่าง 15.5

พบว่าอิเล็กตรอนมีรัศมีการเคลื่อนที่ 8.5 เซนติเมตร สนามแม่เหล็กมีขนาด 0.2 มิลลิเทสลา จงหา

ก. อัตราเร็วของอิเล็กตรอนที่ถูกยิงเข้าไป

ข. ขนาดของแรงแม่เหล็กที่กระทำต่ออิเล็กตรอน

(กำหนดให้อิเล็กตรอนมีมวล 9.1×10^{-31} กิโลกรัม และมีประจุไฟฟ้า 1.6×10^{-19} คูลอมบ์)

แนวคิด อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v ในทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก $\vec{B}$ อิเล็กตรอนเคลื่อนที่แบบวงกลมมีรัศมีของการเคลื่อนที่ r หาอัตราเร็วของอิเล็กตรอนได้จากสมการ $r = \frac{mv}{qB}$ จากนั้นนำอัตราเร็วที่คำนวณได้ไปหาขนาดของแรงแม่เหล็กที่กระทำต่ออิเล็กตรอนโดยใช้สมการ $F = qvB$

วิธีทำ ก. หาอัตราเร็วของอิเล็กตรอนที่ถูกยิงเข้าไป เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่เข้าไปในสนามแม่เหล็กจะเคลื่อนที่แบบวงกลม

จากสมการ $$r = \frac{mv}{qB}$$

จะได้ $$v = \frac{rqB}{m}$$

แทนค่า $$v = \frac{(8.5\times10^{-2}\ \text{m})(1.6\times10^{-19}\ \text{C})(0.2\times10^{-3}\ \text{T})}{(9.1\times10^{-31}\ \text{kg})}$$

$$= 3.0\times10^{6}\ \text{m/s}$$

ข. หาขนาดของแรงแม่เหล็กที่กระทำต่ออิเล็กตรอน

จากสมการ $$F = qvB$$

แทนค่า $$= (1.6\times10^{-19}\text{C})(3.0\times10^{6}\text{m/s})(0.2\times10^{-3}\ \text{T})$$

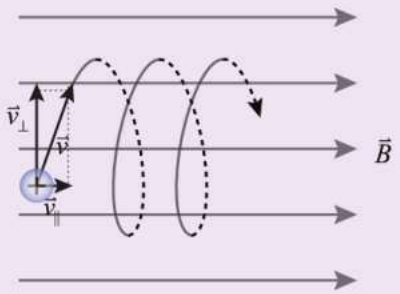
$$= 9.6\times10^{-17}\ \text{N}$$

ตอบ ก. อัตราเร็วของอิเล็กตรอนที่ถูกยิงเข้าไปเท่ากับ 3.0×10^{6} เมตรต่อวินาที

ข. ขนาดของแรงแม่เหล็กที่กระทำต่ออิเล็กตรอนเท่ากับ 9.6×10^{-17} นิวตัน

ความรู้เพิ่มเติม

ถ้าความเร็วของอนุภาคมีทิศทางไม่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก จะมีองค์ประกอบของความเร็วทั้งในแนวตั้งฉาก ($\vec{v}_{\perp}$) กับสนามแม่เหล็ก ทำให้อนุภาคนี้เคลื่อนที่เป็นวงกลม และองค์ประกอบของความเร็วในแนวขนาน ($\vec{v}_{\parallel}$) กับสนามแม่เหล็ก ส่งผลให้อนุภาคเคลื่อนที่ในแนวขนานกับสนามแม่เหล็ก มี**ลักษณะการเคลื่อนที่เป็นเกลียว** (helical path) ดังรูป



รูป การเคลื่อนที่เป็นเกลียวของอนุภาคที่มีประจุบวก เมื่อความเร็วไม่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก

ลักษณะการเคลื่อนที่ดังกล่าวนำมาใช้อธิบาย**ออโรรา** (aurora) หรือแสงเหนือแสงใต้ ซึ่งเป็นปรากฏการณ์เกิดจากอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าที่มาพร้อมกับ **ลมสุริยะ** (solar wind) จากดวงอาทิตย์ เมื่ออนุภาคเหล่านี้เคลื่อนที่เข้ามาในสนามแม่เหล็กโลก จะเกิดแรงแม่เหล็กกระทำต่ออนุภาคมีประจุไฟฟ้า ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่เป็นเกลียวไปตามเส้นสนามแม่เหล็กไปยังขั้วแม่เหล็กโลก ระหว่างทางที่ผ่านชั้นบรรยากาศอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเหล่านี้จะชนกับโมเลกุลของออกซิเจนและไฮโดรเจน เกิดแสงสีต่าง ๆ ออกมา ทำให้ผู้ที่อาศัยอยู่ที่ละติจูดในช่วง 10 ถึง 20 องศาจากขั้วโลกสังเกตเห็นออโรราที่ปรากฏบนท้องฟ้า

15.2.2 แรงแม่เหล็กกระทำต่อลวดตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าผ่าน

จากการศึกษาในหัวข้อที่ผ่านมา เมื่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็ก จะเกิดแรงแม่เหล็กกระทำต่ออนุภาคนั้นได้ ถ้านำลวดตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าผ่านและอยู่ในสนามแม่เหล็ก จะเกิดแรงกระทำต่อลวดตัวนำหรือไม่ ศึกษาได้จากกิจกรรม 15.2

กิจกรรม 15.2 แรงกระทำต่อลวดตัวนำที่อยู่ในสนามแม่เหล็กขณะมีกระแสไฟฟ้าผ่าน

จุดประสงค์

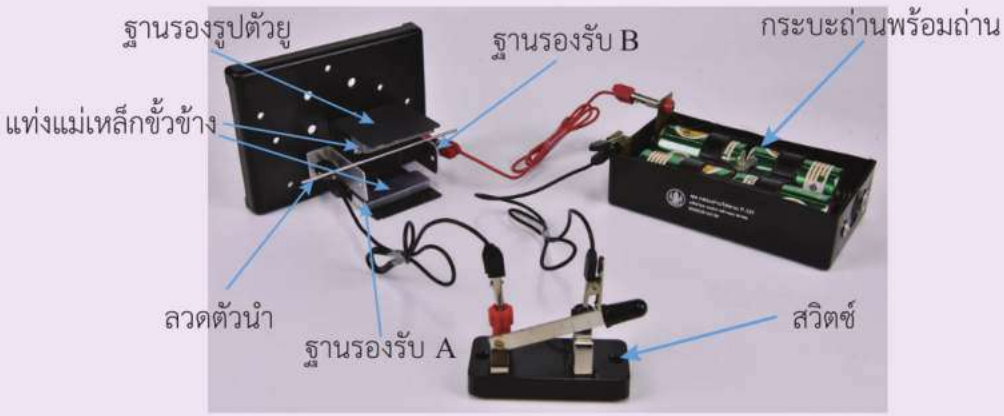
สังเกตและอธิบายแรงกระทำต่อลวดตัวนำเส้นตรงที่มีกระแสไฟฟ้าผ่านและอยู่ในสนามแม่เหล็ก

วัสดุและอุปกรณ์

1. แท่งแม่เหล็กขั้วข้าง	2 อัน
2. ลวดตัวนำตรง	3 เส้น
3. ฐานรองรับรูปตัวยู	1 อัน
4. เข็มทิศ	1 อัน
5. สายไฟ	2 เส้น
6. แบตเตอรี่ขนาด 1.5 โวลต์ 4 ก้อน พร้อมกระบะ	1 ชุด
7. สวิตช์	1 อัน

วิธีทำกิจกรรม

1. ติดแม่เหล็กขั้วข้างเข้ากับฐานรองรับรูปตัวยู โดยหันขั้วต่างกันเข้าหากัน จากนั้นใช้เข็มทิศหาทิศทางของสนามแม่เหล็ก และต่อลวดตัวนำ 2 เส้น เข้าเป็นฐานรองรับ A และ B
2. ต่อวงจรไฟฟ้ากับฐานรองรับ A และ B แล้ววางลวดตัวนำตรงเส้นที่ 3 บนฐาน จัดลวดตัวนำเส้นตรงให้อยู่ระหว่างขั้วทั้งสองของแม่เหล็กรูปตัวยูและให้ลวดตัวนำตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก โดยให้ทิศทางของสนามแม่เหล็กอยู่ในแนวดิ่ง ดังรูป



รูป การจัดอุปกรณ์การทดลอง

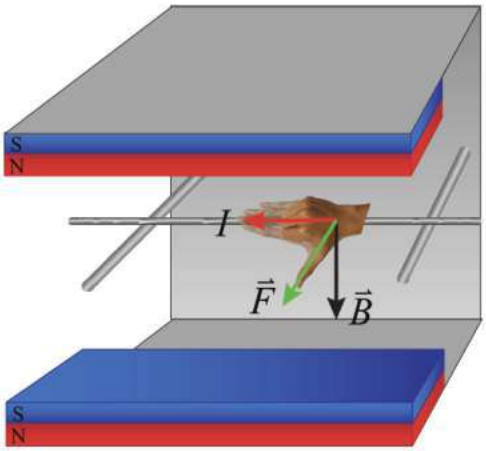
3. เปิดสวิตช์และสังเกตการเคลื่อนที่ของลวดตัวนำเส้นตรง แล้วปิดสวิตช์

4. เขียนแผนภาพแสดงทิศทางของกระแสไฟฟ้า ทิศทางของสนามแม่เหล็กและทิศทางการเคลื่อนที่ของลวดตัวนำ
5. ทดลองซ้ำข้อ 2 - 4 โดยกลับทิศทางของกระแสไฟฟ้า
6. ทดลองซ้ำข้อ 2 - 4 โดยกลับทิศทางของสนามแม่เหล็ก ด้วยการกลับขั้วของแม่เหล็กรูปตัวยู ให้มีทิศทางตรงข้ามกับทิศทางในข้อ 2

คำถามท้ายกิจกรรม

- ☐ กระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำเส้นตรงมีทิศทางจาก B ไป A สนามแม่เหล็กมีทิศทางชี้ลง ลวดตัวนำเส้นตรงเคลื่อนที่ไปทางใด
- ☐ กระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำเส้นตรงมีทิศทางจาก A ไป B สนามแม่เหล็กมีทิศทางชี้ลง ลวดตัวนำเส้นตรงเคลื่อนที่ไปทางใด
- ☐ ทิศทางของกระแสไฟฟ้ามีผลต่อการเคลื่อนที่ของลวดตัวนำเส้นตรงหรือไม่ อย่างไร
- ☐ เมื่อกลับขั้วของแม่เหล็กรูปตัวยู สนามแม่เหล็กมีทิศทางไปทางใด และลวดตัวนำเคลื่อนที่อย่างไร เมื่อเทียบกับตอนแรก
- ☐ ทิศทางของสนามแม่เหล็กมีผลต่อการเคลื่อนที่ของลวดตัวนำเส้นตรงที่มีกระแสไฟฟ้าผ่านหรือไม่ อย่างไร
- ☐ เพราะเหตุใด เมื่อกระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำเส้นตรงจึงเคลื่อนที่ได้
- ☐ ในแต่ละกรณี ลวดตัวนำเส้นตรงเคลื่อนที่ในทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทางของกระแสไฟฟ้า และทิศทางของสนามแม่เหล็กหรือไม่

จากกิจกรรม 15.2 พบว่า เมื่อลวดตัวนำเส้นตรงมีกระแสไฟฟ้าผ่านขณะอยู่ในสนามแม่เหล็ก จะมีแรงแม่เหล็กกระทำต่อลวดตัวนั้น และเมื่อกลับทิศทางของกระแสไฟฟ้าหรือทิศทางของสนามแม่เหล็ก พบว่าแรงกระทำจะกลับทิศทางด้วย แสดงว่าแรงที่กระทำต่อลวดตัวนำมีความสัมพันธ์กับทิศทางของกระแสไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก หาทิศทางของแรงได้โดยใช้มือขวาชี้นิ้วทั้งสี่ไปตามทิศทางของกระแสไฟฟ้า I แล้ววนนิ้วทั้งสี่ไปหาทิศทางสนามแม่เหล็ก $\vec{B}$ นิ้วหัวแม่มือจะชี้ทิศทางของแรง $\vec{F}$ ดังรูป 15.30



รูป 15.30 ทิศทางของกระแสไฟฟ้า สนามแม่เหล็ก และแรงกระทำต่อลวดตัวนำ

จากแรงแม่เหล็กกระทำต่อลวดตัวนำเส้นตรงดังกล่าว พิจารณาขนาดของแรงได้ดังนี้

กระแสไฟฟ้าในลวดตัวนำเส้นตรงเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระด้วยความเร็วลอยเลื่อน v_d ดังนั้นเมื่อลวดตัวนำวางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กจะเกิดแรงแม่เหล็กกระทำต่ออิเล็กตรอนอิสระประจุ e เหล่านี้ตามสมการ

$$F_e = ev_dB$$

เมื่อ F_e คือ แรงแม่เหล็กกระทำต่ออิเล็กตรอนอิสระประจุ e

พิจารณาตลอดความยาวลวดมีอิเล็กตรอนอิสระจำนวน N อนุภาคอยู่ภายในลวดตัวนำ ดังนั้นขนาดแรงลัพธ์ F ที่กระทำต่อลวดตัวนำเท่ากับผลรวมแรงแม่เหล็กที่กระทำต่ออิเล็กตรอนอิสระ N อนุภาค ตามสมการ

$$F = Nev_dB$$

แทนค่า $Q = Ne$ ในสมการนี้จะได้

$$F = Qv_dB$$

ถ้าประจุไฟฟ้า Q เคลื่อนที่ผ่านภาคตัดขวางของลวดตัวนำในเวลา Δt เป็นระยะทางเท่ากับความยาวลวดตัวนำ L ที่อยู่ในสนามแม่เหล็ก จากนิยามของกระแสไฟฟ้า เขียนได้ว่า

$$Q = I\Delta t$$

และ $$v_d = \frac{L}{\Delta t}$$

จะได้ $$F = (I\Delta t)\left(\frac{L}{\Delta t}\right)B$$

$$F = ILB \qquad (15.5)$$

เมื่อ F คือ ขนาดของแรงแม่เหล็กที่กระทำต่อลวดตัวนำ มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

I คือ กระแสไฟฟ้าที่ผ่านลวดตัวนำ มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (A)

L คือ ความยาวลวดตัวนำที่อยู่ในสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น เมตร (m)

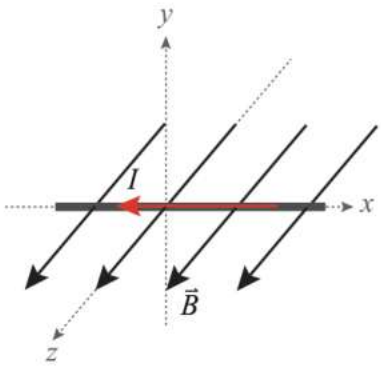
B คือ ขนาดของสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น เทสลา (T)

พิจารณาทำนองเดียวกันกับกรณีอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v ไม่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก $\vec{B}$ ทำให้เกิดแรงกระทำต่อประจุไฟฟ้า q ตามสมการ $F = qvB\sin\theta$ จะนำมาใช้หาแรงกระทำต่อลวดตัวนำมีกระแสไฟฟ้าผ่าน ขณะลวดตัวนำวางตัวในแนวทำมุม θ กับสนามแม่เหล็ก $\vec{B}$ เป็นไปตามสมการ

$$F = ILB\sin\theta \qquad (15.6)$$

โดย θ คือ มุมระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ผ่านลวดตัวนำกับสนามแม่เหล็ก

ตัวอย่าง 15.6 ลวดตัวนำเส้นหนึ่งมีความยาว 20 เซนติเมตร วางในแนวแกน x อยู่ในสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอทิศทาง $+z$ ขนาด 0.4 เทสลา ถ้าเส้นลวดนี้มีกระแสไฟฟ้าผ่าน 0.5 แอมแปร์ ในทิศทาง $-x$ ดังรูป ขนาดและทิศทางของแรงที่กระทำต่อลวดตัวนำเป็นเท่าใด



รูป ประกอบตัวอย่าง 15.6

แนวคิด ขนาดของแรงที่กระทำต่อลวดตัวนำหาได้จากสมการ $F = ILB$ หาทิศทางของแรงที่กระทำต่อลวดตัวนำโดยใช้มือขวา

วิธีทำ เนื่องจากทิศทางของกระแสไฟฟ้าตั้งฉากกับทิศทางของสนามแม่เหล็ก จะได้

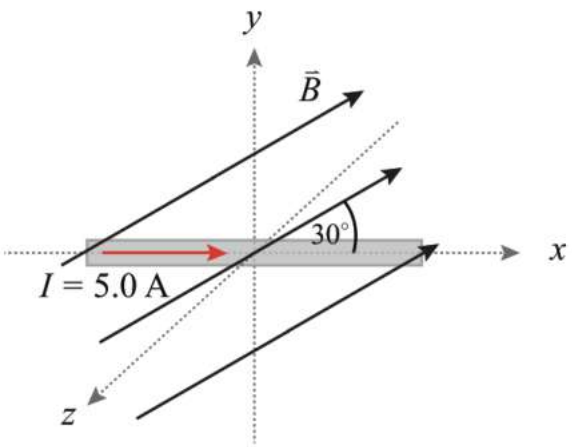
$$F = ILB$$

แทนค่า
$$= (0.5\,\text{A})(20\times10^{-2}\,\text{m})(0.4\,\text{T})$$
$$= 0.04\,\text{N}$$

หาทิศทางของแรงที่กระทำต่อลวดตัวนำโดยใช้มือขวา นิ้วทั้งสี่ชี้ทิศทางของกระแสไฟฟ้าตามแนวแกน $-x$ วนนิ้วทั้งสี่ไปหาทิศทางสนามแม่เหล็กที่อยู่ในแนวแกน z นิ้วหัวแม่มือ จะได้ทิศทางของแรงตามแนวแกน $+y$

ตอบ แรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กกระทำต่อลวดตัวนำมีขนาด 0.04 นิวตัน ทิศทางตามแนวแกน $+y$

ตัวอย่าง 15.7 ลวดตัวนำยาว 15 เซนติเมตร วางตัวในแนวแกน x โดยจุดกึ่งกลางอยู่ที่จุดกำเนิด ถ้ามีสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอ $\vec{B}$ ในระนาบ xy โดย $\vec{B}$ ทำมุม 30 องศา กับแกน x ดังรูป เมื่อกระแสไฟฟ้า 5.0 แอมแปร์ผ่านขดลวดตัวนำในทิศทาง $+x$ จงหาขนาดและทิศทางของแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กที่กระทำต่อลวดตัวนำ กำหนดให้ขนาดสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอเท่ากับ 1.0 เทสลา



รูป ประกอบตัวอย่าง 15.7

แนวคิด กรณีลวดตัวนำทำมุม θ กับทิศทางของสนามแม่เหล็ก หาขนาดของแรงที่กระทำต่อลวดตัวนำได้จากสมการ $F = ILB\sin\theta$ และใช้มือขวาในการหาทิศทางของแรงที่กระทำต่อลวดตัวนำ

วิธีทำ หาขนาดของแรงจาก $F = ILB\sin\theta$

$= ILB\sin 30^\circ$

แทนค่า $= (5.0\,\text{A})(0.15\,\text{m})(1.0\,\text{T})(0.5)$

$= 0.375$ N

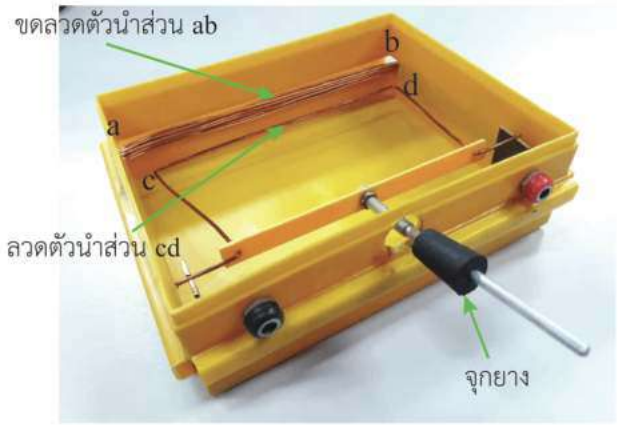
ใช้มือขวาหาทิศทางของแรงที่กระทำต่อลวดตัวนำ โดยนิ้วทั้งสี่ชี้ทิศทางของกระแสไฟฟ้าตามแนวแกน $+x$ วนนิ้วทั้งสี่ไปหาทิศทางสนามแม่เหล็กตามองค์ประกอบแกน y ซึ่งเป็นสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับลวดตัวนำและทำให้เกิดแรง นิ้วหัวแม่มือจะได้ทิศทางของแรง ตามแนวแกน $+z$

ตอบ แรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กกระทำต่อลวดตัวนำมีขนาด 0.38 นิวตัน ทิศทางตามแนวแกน $+y$

15.2.3 แรงระหว่างลวดตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้า

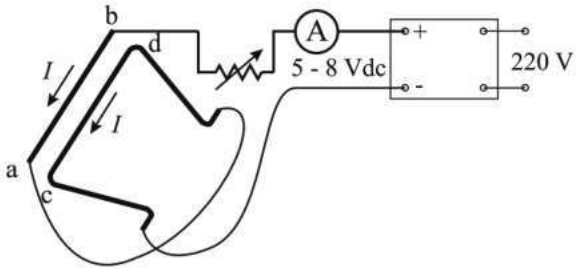
เมื่อกระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำเส้นตรงจะเกิดสนามแม่เหล็กโดยรอบ หากนำลวดตัวนำเส้นตรงสองเส้นมาวางใกล้กัน เมื่อกระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำทั้งสองจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร จะได้ศึกษาจากสถานการณ์ต่อไปนี้

เครื่องชั่งกระแสประกอบด้วยขดลวดตัวนำ ที่มีจำนวนประมาณ 10 รอบติดกับกล่องและลวดตัวนำ ที่ต่อกับคาน 1 เส้น ซึ่งสามารถปรับสมดุลได้โดยการเลื่อนจุกยาง และมีฝากล่องใสใช้ปิดด้านบน ดังรูป 15.31

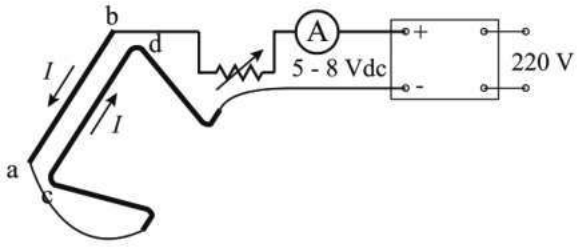


รูป 15.31 เครื่องชั่งกระแส

ปรับคานของลวดตัวนำให้ลวดตัวนำอยู่ในแนวระดับโดยเลื่อนจุกยาง จากนั้นต่อเครื่องชั่งกระแสเป็นวงจรไฟฟ้าดังรูป 15.32 ก. เพื่อให้กระแสไฟฟ้าที่ผ่านขดลวดตัวนำส่วน ab และลวดตัวนำส่วน cd มีทิศทางเดียวกัน เปิดสวิตช์ สังเกตการเคลื่อนที่ของลวดตัวนำส่วน cd ทำซ้ำโดยต่อวงจรไฟฟ้าดังรูป 15.32 ข. เพื่อกระแสไฟฟ้าที่ผ่านขดลวดตัวนำส่วน ab และลวดตัวนำส่วน cd มีทิศทางตรงข้ามกัน



ก. กระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดตัวนำส่วน ab และลวดตัวนำส่วน cd มีทิศทางเดียวกัน



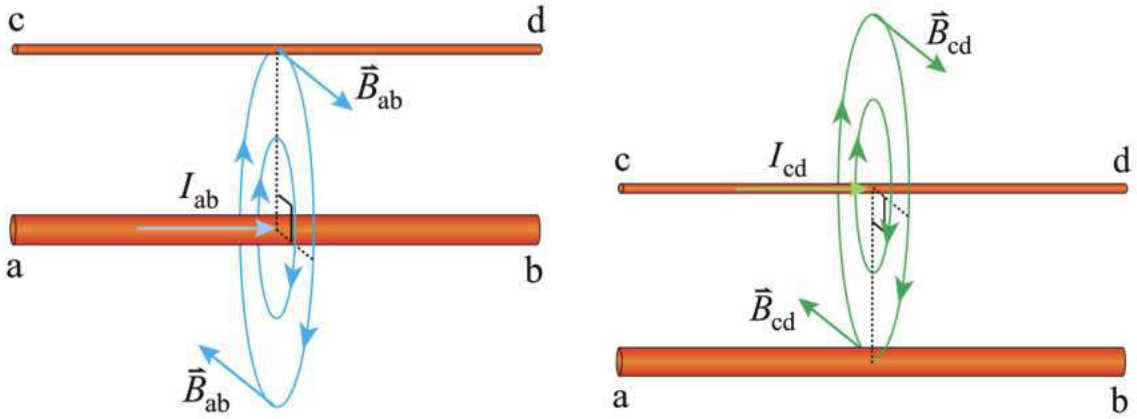
ข. กระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดตัวนำส่วน ab และลวดตัวนำส่วน cd มีทิศทางตรงข้ามกัน

รูป 15.32 การต่อเครื่องชั่งกระแสกับวงจรไฟฟ้า

หลังเปิดสวิตช์ เมื่อกระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำทั้งสองส่วนมีทิศทางเดียวกัน พบว่าลวดตัวนำส่วน cd เคลื่อนที่เข้าหาส่วน ab และเมื่อต่อวงจรไฟฟ้าให้กระแสไฟฟ้าที่ผ่านลวดตัวนำทั้งสองมีทิศทางตรงข้ามกัน พบว่าลวดตัวนำส่วน cd ออกห่างจากส่วน ab

จากสถานการณ์แสดงว่ามีแรงกระทำต่อลวดตัวนำส่วน cd อธิบายได้ดังนี้

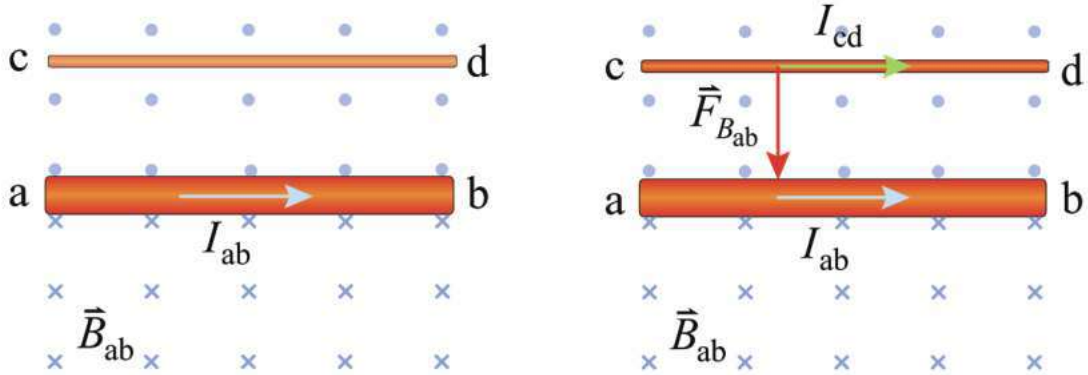
กรณีกระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดตัวนำส่วน ab และลวดตัวนำส่วน cd ในทิศเดียวกัน เมื่อกระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำทั้งสองจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กรอบลวดตัวนำ โดยลวดตัวนำส่วน cd อยู่ในสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดตัวนำส่วน ab ($\vec{B}_{ab}$)และขดลวดตัวนำส่วน ab อยู่ในสนามแม่เหล็กที่เกิดจากลวดตัวนำส่วน cd ($\vec{B}_{cd}$) ดังรูป 15.33 ก. และ 15.33 ข. ตามลำดับ



ก. ลวดตัวนำส่วน **cd** อยู่ใน $\vec{B}_{ab}$ ข. ขดลวดตัวนำส่วน **ab** อยู่ใน $\vec{B}_{cd}$

รูป 15.33 สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า I_{ab} ผ่านขดลวดตัวนำส่วน **ab** และสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า I_{cd} ผ่านลวดตัวนำส่วน **cd**

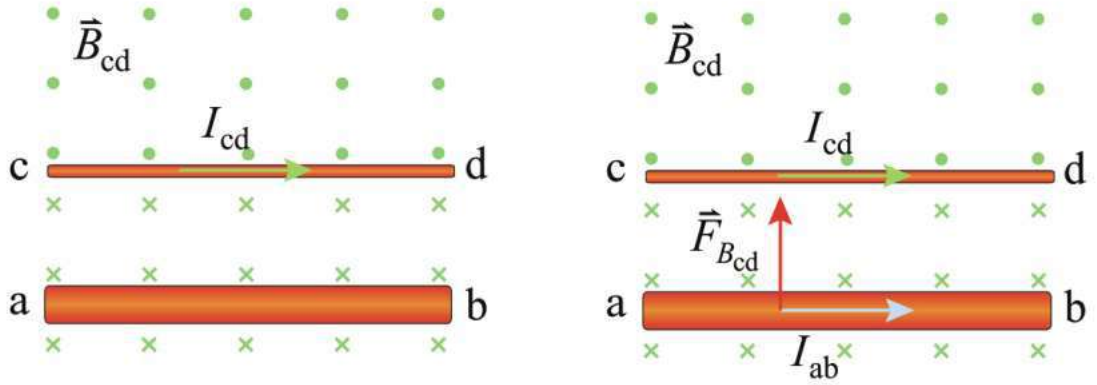
ลวดตัวนำส่วน cd อยู่ในสนามแม่เหล็ก $\vec{B}_{ab}$ ที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า I_{ab} ผ่านขดลวดตัวนำส่วน ab ดังรูป 15.34 ก. เมื่อกระแสไฟฟ้า I_{cd} ผ่านลวดตัวนำส่วน cd จะเกิดแรงแม่เหล็ก $\vec{F}_{\vec{B}_{ab}}$ กระทำต่อลวดตัวนำ ทิศทางของแรงหาได้โดยใช้มือขวา ดังรูป 15.34 ข.



ก. สนามแม่เหล็ก $\vec{B}_{ab}$ รอบขดลวดตัวนำส่วน **ab** ข. แรงแม่เหล็กที่กระทำต่อลวดตัวนำส่วน **cd**

รูป 15.34 แรงแม่เหล็กเนื่องจากสนามแม่เหล็กของขดลวดตัวนำส่วน **ab** ที่กระทำต่อลวดตัวนำส่วน **cd**

ในทำนองเดียวกัน ขดลวดตัวนำส่วน ab อยู่ในสนามแม่เหล็ก $\vec{B}_{cd}$ ที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า I_{cd} ผ่านลวดตัวนำส่วน cd ดังรูป 15.35 ก. เมื่อกระแสไฟฟ้า I_{ab} ผ่านขดลวดตัวนำส่วน ab จะเกิดแรงแม่เหล็ก $\vec{F}_{\vec{B}_{cd}}$ กระทำต่อลวดตัวนำส่วน cd ดังรูป 15.35 ข.

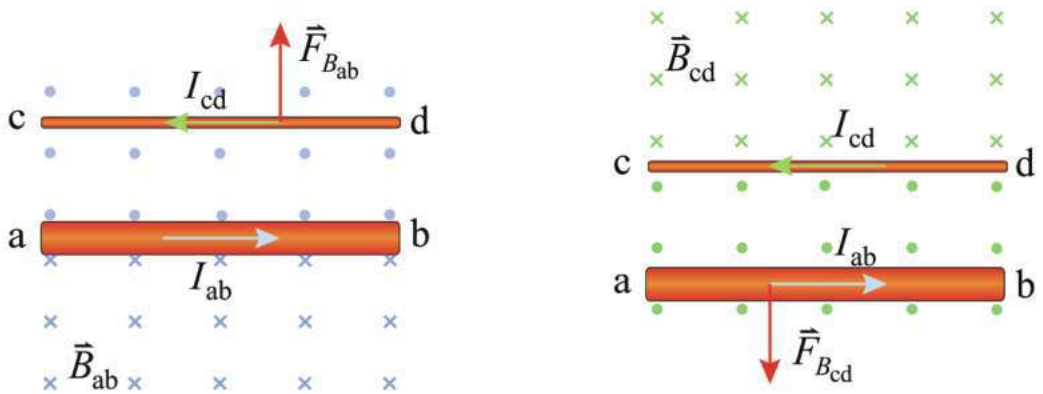


ก. สนามแม่เหล็ก $\vec{B}_{cd}$ รอบลวดตัวนำส่วน cd ข. แรงเหล็กที่กระทำต่อลวดตัวนำส่วน ab

รูป 15.35 แรงแม่เหล็กจากสนามแม่เหล็กของลวดตัวนำส่วน cd ที่กระทำต่อขดลวดตัวนำส่วน ab

จะเห็นว่าแรง $\vec{F}_{\vec{B}_{ab}}$ และ $\vec{F}_{\vec{B}_{cd}}$ มีทิศทางเข้าหากัน แต่เนื่องจากขดลวดตัวนำส่วน ab ถูกตรึงไว้กับกล่องจึงทำให้สังเกตเห็นเฉพาะลวดตัวนำส่วน cd เคลื่อนที่ในทิศลงเข้าหาขดลวดตัวนำส่วน ab

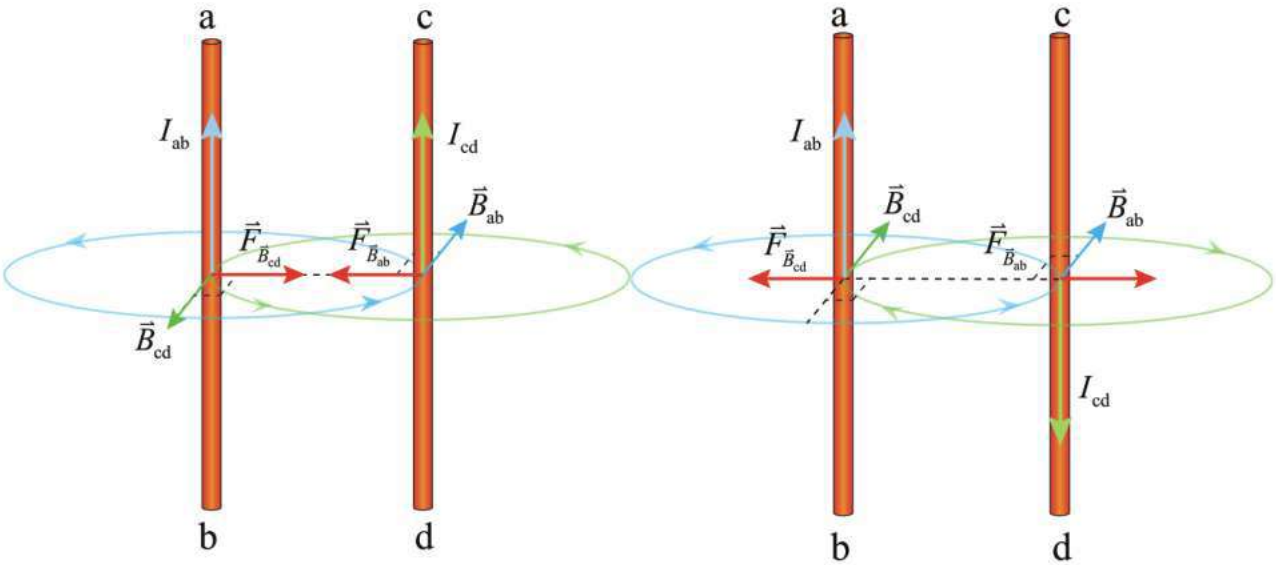
กรณีกลับทิศทางกระแสไฟฟ้าที่ผ่านลวดตัวนำส่วน cd ให้มีทิศทางตรงข้ามกับกระแสไฟฟ้าที่ผ่านขดลวดตัวนำส่วน ab หลังเปิดสวิตช์ พิจารณาแรงแม่เหล็กที่กระทำต่อขดลวดตัวนำส่วน ab และลวดตัวนำส่วน cd ในทำนองเดียวกับกรณีข้างต้นจะได้ว่า เมื่อกระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดตัวนำส่วน ab และลวดตัวนำส่วน cd ในทิศทางตรงข้ามกัน จะเกิดแรงแม่เหล็กกระทำต่อลวดตัวนำส่วน cd และแรงแม่เหล็กกระทำต่อลวดตัวนำส่วน ab ดังรูป 15.36 ก. และ 15.36 ข. ตามลำดับ



ก. แรงแม่เหล็กที่กระทำต่อลวดตัวนำส่วน **cd** ข. แรงแม่เหล็กที่กระทำต่อลวดตัวนำส่วน **ab**

รูป 15.36 แรงแม่เหล็กที่กระทำลวดตัวนำทั้งสอง เมื่อกระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำในทิศทางตรงข้ามกัน

จะเห็นว่าแรง $\vec{F}_{\vec{B}_{ab}}$ และ $\vec{F}_{\vec{B}_{cd}}$ มีทิศทางตรงข้ามกัน แต่เนื่องจากขดลวดตัวนำส่วน ab ถูกตรึงไว้กับกล่องจึงทำให้สังเกตเห็นเฉพาะลวดตัวนำส่วน cd เคลื่อนที่ในทิศขึ้นออกจากขดลวดตัวนำส่วน ab จึงสรุปได้ว่า ถ้าวางลวดตัวนำเส้นตรงสองเส้นขนานกัน เมื่อกระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำทั้งสองในทิศทางเดียวกัน จะเกิดแรงดึงดูดระหว่างลวดตัวนำทั้งสองดังรูป 13.37 ก. แต่ถ้ากระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำในทิศทางของตรงข้ามกัน จะเกิดแรงผลักระหว่างลวดตัวนำทั้งสอง ดังรูป 13.37 ข.



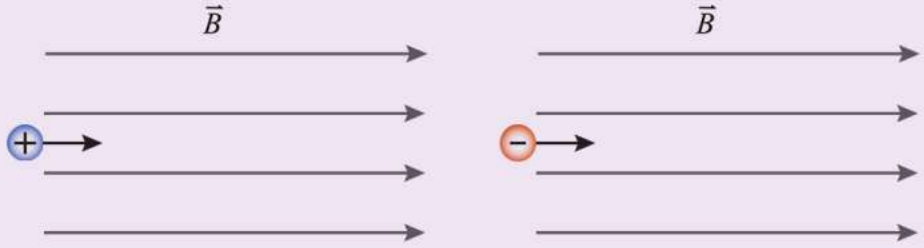
ก. แรงดึงดูด เมื่อกระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำสองเส้นในทิศทางเดียวกัน

ข. แรงผลัก เมื่อกระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำสองเส้นในทิศทางตรงข้ามกัน

รูป 15.37 แรงระหว่างลวดตัวนำสองเส้นที่วางขนานกันและมีกระแสไฟฟ้าผ่าน

คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 15.2

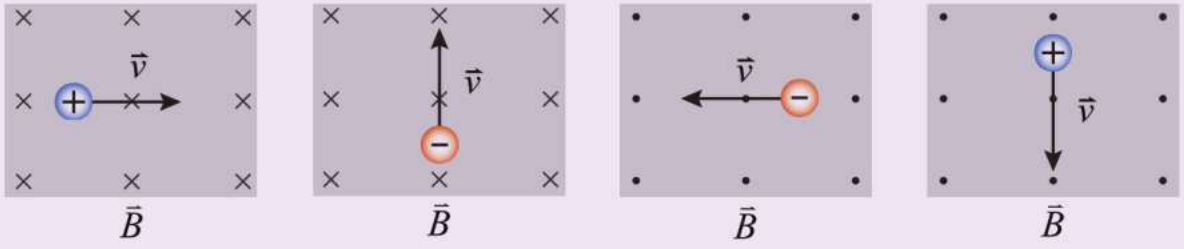
1. อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าบวกและลบเคลื่อนที่เข้าไปในแนวขนานกับสนามแม่เหล็ก $\vec{B}$ ที่มีค่าสม่ำเสมอดังรูป



รูป ประกอบคำถามตรวจสอบความเข้าใจข้อ 1

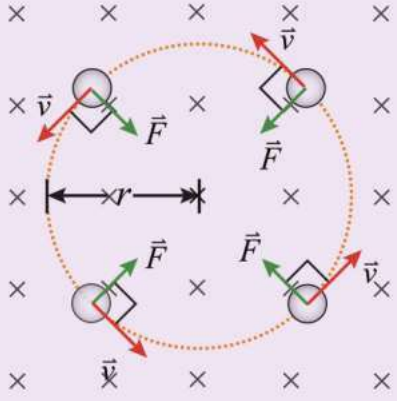
การเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็กของอนุภาคทั้งสองจะเป็นอย่างไร

2. จงเขียนทิศของแรงที่กระทำต่อประจุที่เคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็กจากรูปต่อไปนี้



รูป ประกอบคำถามตรวจสอบความเข้าใจข้อ 2

3. การเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าด้วยอัตราเร็วคงตัวในสนามแม่เหล็ก ประจุไฟฟ้าจะเคลื่อนที่เป็นวงกลมในระนาบที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กเสมอ ดังรูป



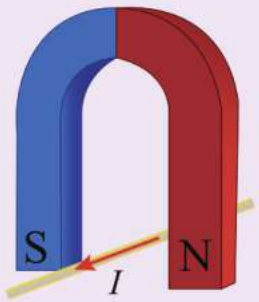
รูป ประกอบคำถามตรวจสอบความเข้าใจข้อ 3

ข้อใดกล่าวถูกต้อง

ก. แรงแม่เหล็กมีทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กเสมอ

ข. อนุภาคมีประจุไฟฟ้าเป็นลบ

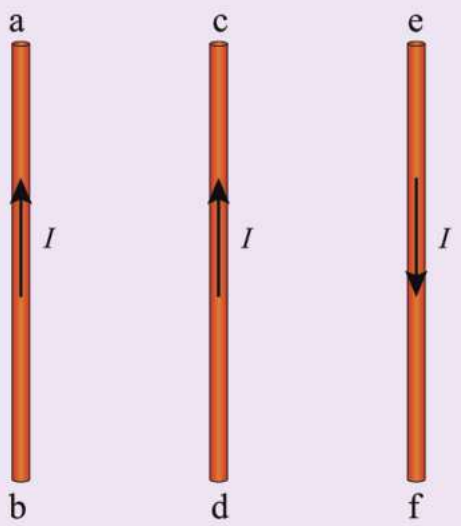
4. เมื่อมีกระแสไฟฟ้าผ่านลวดทองแดงที่วางตัวในแนวระดับระหว่างแม่เหล็กรูปเกือกม้า ดังรูป



รูป ประกอบคำถามตรวจสอบความเข้าใจข้อ 4

ลวดทองแดงจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางใด

5. ลวดตัวนำสามเส้น ab cd และ ef วางตัวขนานกัน โดยลวด cd อยู่กึ่งกลางระหว่าง ab และ ef และมีกระแสไฟฟ้า I ผ่านแต่ละเส้นเท่ากันโดยมีทิศทาง ดังรูป

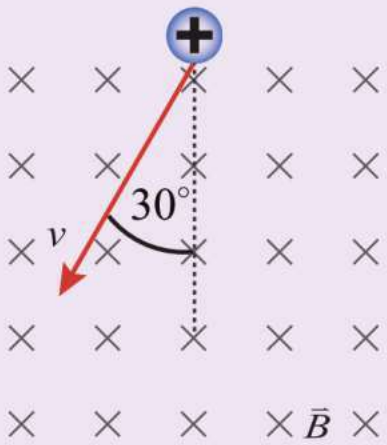


รูป ประกอบคำถามตรวจสอบความเข้าใจข้อ 5

แรงที่กระทำต่อลวดแต่ละเส้นมีทิศทางใด

แบบฝึกหัด 15.2

1. อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า q เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v เข้าไปในสนามแม่เหล็ก $\vec{B}$ ดังรูป



รูป ประกอบแบบฝึกหัดข้อ 1

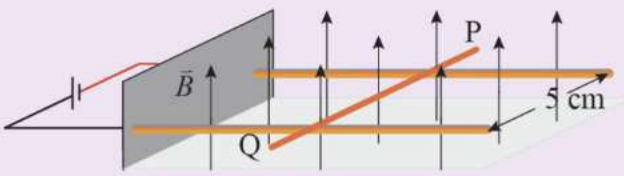
ขนาดของแรงแม่เหล็กที่กระทำต่ออนุภาคนี้มีขนาดเท่าใด

2. อิเล็กตรอนตัวหนึ่งเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงตัวขนาด 2.0×10^{6} เมตรต่อวินาที เข้าไปในสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอขนาด 5.0×10^{-3} เทสลา ในทิศทางทำมุม 30 องศากับสนามแม่เหล็ก ขนาดของแรงแม่เหล็กที่กระทำต่ออิเล็กตรอนมีค่าเท่าใด

3. ลวด PQ มวล 20 กรัม วางบนรางตัวนำคู่ขนานในระนาบระดับที่ต่อกับวงจรไฟฟ้าและอยู่ในสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอที่มีขนาด 0.2 เทสลา ดังรูป ถ้ามีกระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำ 4 แอมแปร์

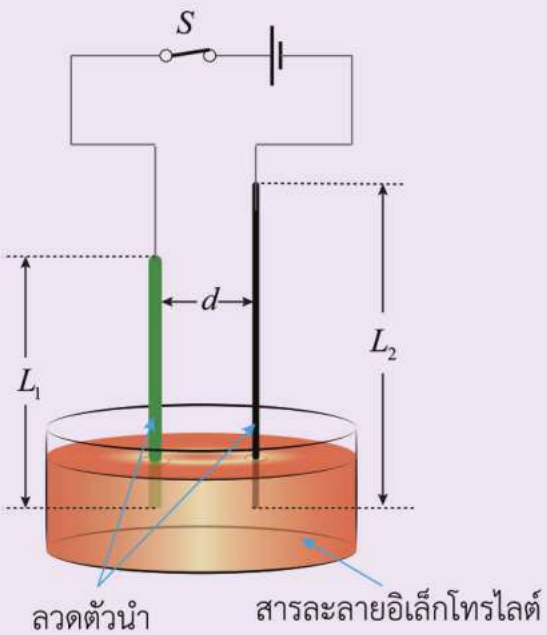
   ก. ลวดนี้จะเคลื่อนที่ในทิศทางใด

   ข. ลวดนี้มีความเร่งเท่าใด



รูป ประกอบแบบฝึกหัดข้อ 3

4. เมื่อกดสวิตซ์ S ให้กระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำ L_1 และ L_2 ที่แขวนขนานห่างกัน d และปลายลวดทั้งสองจุ่มในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ดังรูป



รูป ประกอบแบบฝึกหัดข้อ 4

ก. แรงกระทำต่อกันระหว่างลวดตัวนำ L_1 และ L_2 เป็นแรงดึงดูดหรือแรงผลัก เพราะเหตุใด

ข. ขนาดแรงกระทำต่อกันขึ้นกับกระแสไฟฟ้าอย่างไร

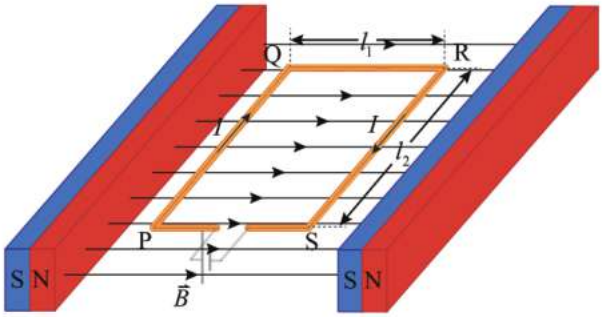
ค. กรณีใดที่ทำให้แรงบนลวดตัวนำ L_1 และ L_2 มีค่าเท่ากัน

15.3 โมเมนต์ของแรงคู่ควบกระทำต่อขดลวดที่มีกระแสไฟฟ้าผ่าน เมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก

ในหัวข้อที่ผ่านมา เมื่อกระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำเส้นตรงจะเกิดสนามแม่เหล็กรอบลวดตัวนำ หากนำลวดตัวนำดังกล่าววางในสนามแม่เหล็ก จะมีแรงแม่เหล็กกระทำต่อลวดตัวนำนั้น ในหัวข้อนี้จะศึกษาเกี่ยวกับแรงกระทำต่อขดลวดตัวนำรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางในสนามแม่เหล็ก เมื่อกระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดตัวนำจะมีผลอย่างไรกับขดลวด และการนำความรู้ดังกล่าวไปอธิบายหลักการทำงานของแกลแวนอมิเตอร์ มอเตอร์กระแสตรง ซึ่งจะได้ศึกษาต่อไป

15.3.1 โมเมนต์ของแรงคู่ควบ

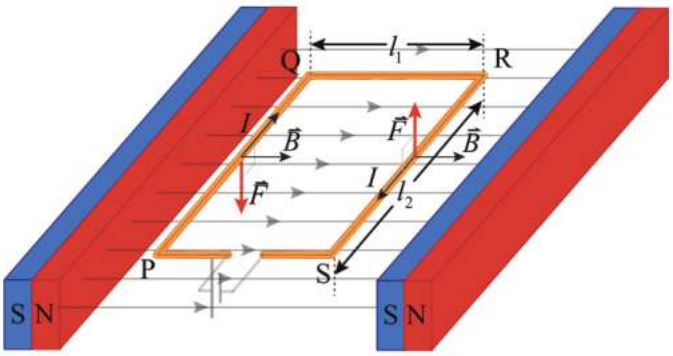
พิจารณาขดลวดตัวนำสี่เหลี่ยมมุมฉาก (PQRS) วางให้ระนาบขดลวดขนานกับสนามแม่เหล็ก ($\vec{B}$) สม่ำเสมอมีความยาวด้าน $PS = QR = l_1$ และความยาวด้าน $PQ = RS = l_2$ เมื่อให้กระแสไฟฟ้า (I) ผ่านขดลวดในทิศทาง P→Q→ R→S ดังรูป 15.38



รูป 15.38 ทิศทางที่กระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดตัวนำ

พิจารณาแรงแม่เหล็กกระทำต่อเส้นลวดแต่ละส่วนดังนี้ ด้าน PS และ QR กระแสไฟฟ้าในขดลวดตัวนำอยู่ในทิศทางขนานกับสนามแม่เหล็ก ทำให้ไม่มีแรงกระทำต่อด้านทั้งสองนี้ ส่วนด้าน PQ และ RS เป็นด้านที่กระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดในทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก จึงเกิดแรงกระทำต่อด้านทั้งสองมีขนาดเท่ากัน โดยขนาดของแรงหาได้จากสมการ (15.5) จะได้

$$F = Il_2B \qquad \text{(a)}$$



รูป 15.39 ทิศทางของแรงกระทำต่อขดลวดตัวนำขณะระนาบขดลวดขนานกับสนามแม่เหล็ก

ในการหาทิศทางของแรงโดยใช้มือขวา พบว่าแรงที่กระทำต่อด้าน PQ มีทิศทางตรงข้ามกับแรงที่กระทำต่อด้าน RS ดังรูป 15.39 จะเห็นว่าแรงที่กระทำต่อด้านทั้งสองมีขนาดเท่ากัน ทิศทางตรงข้ามกันและขนานกันจึงเป็นแรงคู่ควบ ทำให้เกิดโมเมนต์ของแรงคู่ควบหาขนาดได้จากสมการ

$$M_c = Fl \quad \text{(b)}$$

เมื่อ M_c คือ โมเมนต์ของแรงคู่ควบ

F คือ ขนาดของแรงคู่ควบ

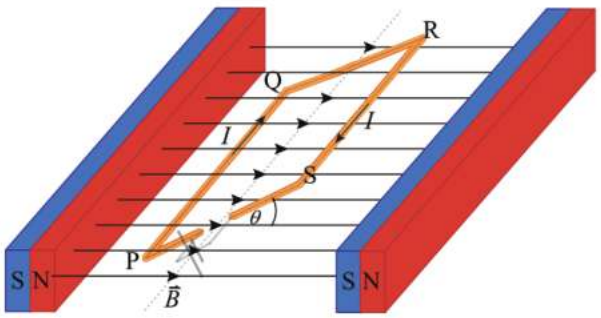
l คือ ระยะทางตั้งฉากระหว่างแนวแรงทั้งสอง

แทนค่า F จากสมการ (a) และแทน l ด้วย l_1 ในสมการ (b) จะได้โมเมนต์ของแรงคู่ควบ (M) ที่กระทำต่อขดลวด ดังนี้

$$M = (Il_2B)l_1 \quad \text{(c)}$$

กำหนดให้ A เป็นพื้นที่ของขดลวด มีค่าเท่ากับ l_1l_2 เขียนสมการขนาดโมเมนต์ของแรงคู่ควบได้เป็น

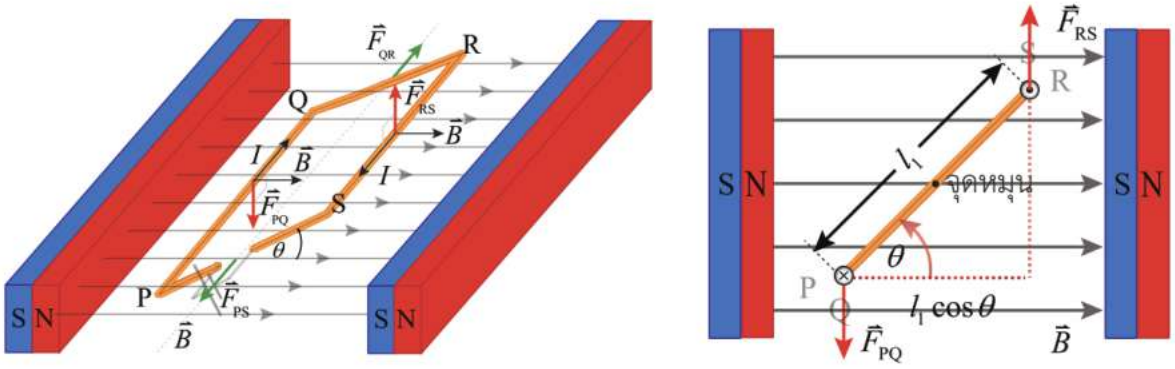
$$M = IAB \quad \text{(d)}$$



รูป 15.40 ระนาบขดลวดทำมุม θ กับสนามแม่เหล็ก

ถ้าวางขดลวดตัวนำสี่เหลี่ยมมุมฉาก (PQRS) ให้ระนาบขดลวดทำมุม θ กับสนามแม่เหล็ก ($\bar{B}$) มีด้าน PS และ QR ทำมุม θ กับสนามแม่เหล็ก ดังรูป 15.40

พิจารณาด้าน PS กับ QR พบว่ามีแรงกระทำขนาดเท่ากัน ทิศทางตรงข้ามกัน คือ F_{PS} และ F_{QR} และอยู่ในแนวเดียวกัน ทำให้โมเมนต์ของแรงคู่นี้เป็นศูนย์ ดังรูป 15.41 ก. ส่วนด้าน PQ กับ RS จะมีแรงคู่ควบกระทำ ได้แก่ F_{PQ} และ F_{RS} มีทิศทางดังรูป 15.41 ข.



ก. ทิศทางของแรงกระทำต่อขดลวดตัวนำขณะระนาบขดลวดขนานกับสนามแม่เหล็ก

ข. แรงกระทำต่อขดลวดด้าน PQ และ RS

รูป 15.41 ขดลวดตัวนำสี่เหลี่ยมมุมฉากเอียงทำมุมกับสนามแม่เหล็กและมีกระแสไฟฟ้าผ่าน

โดยขนาดของแรงเท่ากับ Il_2B และระยะทางตั้งฉากระหว่างแนวแรงทั้งสองเท่ากับ $l_1 \cos\theta$ จากสมการ $M_c = Fl$ จะได้ขนาดของโมเมนต์ของแรงคู่ควบกระทำต่อขดลวด ตามสมการ

$$M = (Il_2B)l_1 \cos\theta$$

$$M = IAB\cos\theta$$

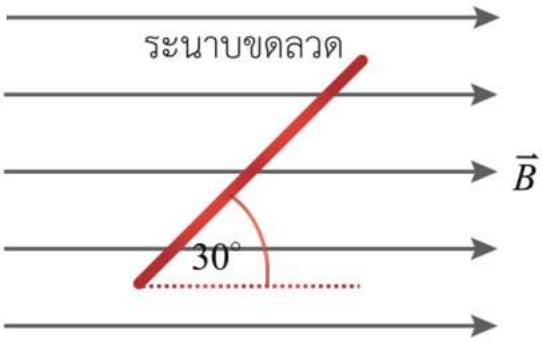
ในกรณีขดลวดตัวนำจำนวน N รอบ จะทำให้เกิดโมเมนต์ของแรงคู่ควบกระทำต่อขดลวดเป็นจำนวน N เท่าของขดลวด 1 รอบ จะได้ขนาดโมเมนต์ของแรงคู่ควบกระทำต่อขดลวด ตามสมการ

$$M = NIAB\cos\theta \qquad (15.6)$$

เมื่อ θ คือ มุมระหว่างระนาบขดลวดตัวนำกับสนามแม่เหล็ก

ในกรณีที่พื้นที่ของขดลวดเป็นขดลวดระนาบรูปทรงอื่น เช่น ขดลวดระนาบรูปวงกลม โมเมนต์ของแรงคู่ควบกระทำต่อขดลวดยังคงหาได้จากสมการ (15.6)

ตัวอย่าง 15.8 ขดลวดสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีพื้นที่ 100 ตารางเซนติเมตร มีจำนวน 200 รอบ และมีกระแสไฟฟ้าผ่าน 0.1 แอมแปร์ ขดลวดนี้วางอยู่ในสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอขนาด 0.5 เทสลา โดยระนาบของขดลวดทำมุม 30 องศากับสนามแม่เหล็ก ดังรูป โมเมนต์ของแรงคู่ควบที่กระทำต่อขดลวดมีค่าเท่าใด



รูป ประกอบตัวอย่าง 15.8

แนวคิด หาโมเมนต์ของแรงคู่ควบจากสมการ $M = NIAB\cos\theta$

วิธีทำ จากสมการ $M = NIAB\cos\theta$

$= NIAB\cos 30^\circ$

แทนค่า $M = (200)(0.1\text{ A})(100\times10^{-4}\text{m}^2)(0.5\text{ T})\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)$

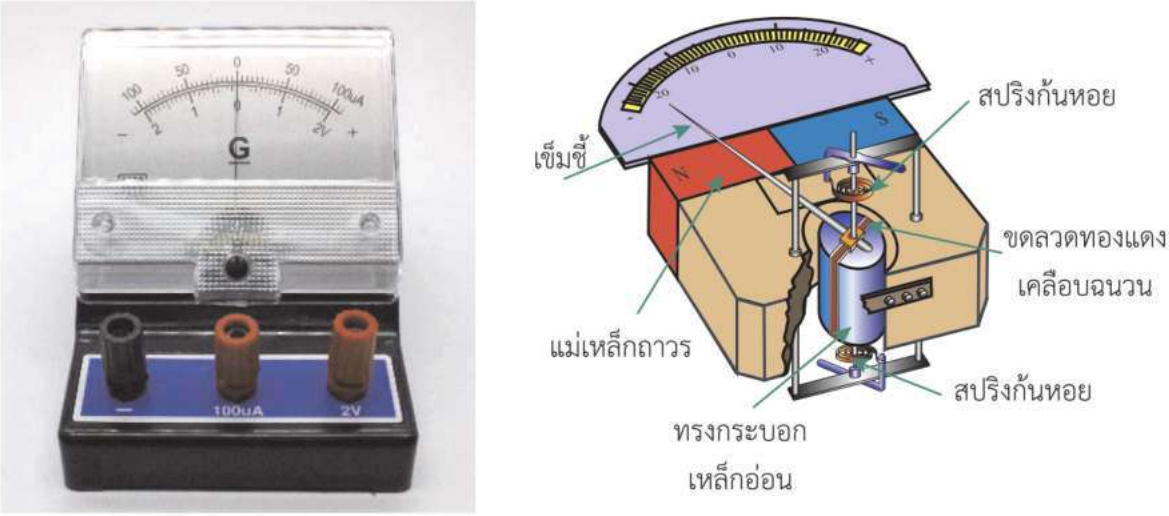
$= 8.66\times10^{-2}\text{ N m}$

ตอบ โมเมนต์ของแรงคู่ควบที่กระทำต่อขดลวดมีค่าเท่ากับ 8.66×10^{-2} นิวตัน เมตร

ความรู้เกี่ยวกับโมเมนต์ของแรงคู่ควบที่กระทำต่อขดลวดซึ่งอยู่ในสนามแม่เหล็กถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างแกลแวนอมิเตอร์และมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งจะได้ศึกษาในหัวข้อต่อไป

15.3.2 แกลแวนอมิเตอร์

แกลแวนอมิเตอร์ (galvanometer) เป็นเครื่องวัดทางไฟฟ้า ดังรูป 15.42 ก. ประกอบด้วยขดลวดทองแดงเคลือบฉนวน พันหลายรอบบนกรอบรูปสี่เหลี่ยมที่ติดเข็มชี้และแกนหมุนได้คล่องทำให้ขดลวดหมุนรอบทรงกระบอกเหล็กอ่อนที่ตรึงอยู่กับที่ โดยปลายของแกนหมุนติดกับสปริงก้นหอย ดังรูป 15.42 ข.



ก. แกลแวนอมิเตอร์ ข. ส่วนประกอบภายในแกลแวนอมิเตอร์

รูป 15.42 แกลแวนอมิเตอร์และส่วนประกอบภายในแกลแวนอมิเตอร์

ทรงกระบอกเหล็กอ่อนทำให้แรงแม่เหล็ก (ที่ทำให้เกิดโมเมนต์ของแรงคู่ควบกระทำต่อขดลวด) ตั้งฉากกับระนาบขดลวดตลอดเวลา จึงทำให้โมเมนต์ของแรงคู่ควบจากกระแสไฟฟ้าที่กระทำต่อขดลวดขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้าที่ผ่านขดลวดเท่านั้น เมื่อให้กระแสไฟฟ้าผ่าน ขดลวดจะหมุนพร้อมกับเข็มชี้เบนไป และแกนหมุนทำให้สปริงก้นหอยบิดตัว จนกระทั่งโมเมนต์ของแรงบิดกลับของสปริงก้นหอยเท่ากับโมเมนต์ของแรงคู่ควบที่กระทำต่อขดลวด ขดลวดและเข็มชี้จะหยุดนิ่ง มุมที่เข็มชี้เบนไปจึงขึ้นกับกระแสไฟฟ้าที่ผ่านขดลวด โดยทั่วไปแกลแวนอมิเตอร์มีวัตถุประสงค์ให้มีความไวต่อกระแสไฟฟ้า จึงใช้เส้นลวดที่มีขนาดเล็กมาก เพื่อให้ขดลวดมีน้ำหนักน้อย และสปริงก้นหอยที่มีค่าคงตัวสปริงน้อย ๆ เมื่อกระแสไฟฟ้าผ่านเพียงเล็กน้อย ก็สามารถทำให้เข็มชี้เบนได้

ความรู้เพิ่มเติม

แกลแวนอมิเตอร์ สามารถนำไปดัดแปลงให้วัดกระแสไฟฟ้าได้มากขึ้น เรียกว่า แอมมิเตอร์ โดยการต่อตัวต้านทานค่าเหมาะสมแบบขนานกับแกลแวนอมิเตอร์และสามารถดัดแปลงให้สามารถวัดความต่างศักย์ได้มากขึ้น เรียกว่า โวลต์มิเตอร์ โดยต่อตัวต้านทานค่าเหมาะสมแบบอนุกรมกับแกลแวนอมิเตอร์

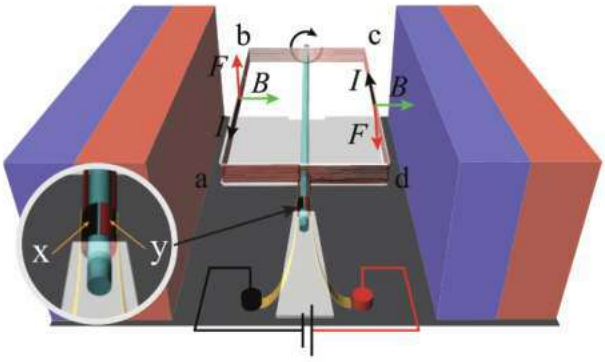
15.3.3 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เป็นการประยุกต์ใช้ความรู้โมเมนต์ของแรงคู่ควบที่กระทำต่อขดลวดในสนามแม่เหล็กเมื่อมีกระแสไฟฟ้าผ่าน ทำให้สามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลได้ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงอย่างง่าย ประกอบด้วยขดลวดทองแดงเคลือบฉนวน พันเป็นรูปสี่เหลี่ยมติดกับแกนหมุนได้คล่องในสนามแม่เหล็ก และส่วนที่ทำหน้าที่เปลี่ยนทิศทางของกระแสไฟฟ้าในขดลวด คือ **คอมมิวเทเตอร์วงแหวนผ่าซีก** (split-ring commutator) และ**แปรงสัมผัส** (contact brush) ดังรูป 15.43

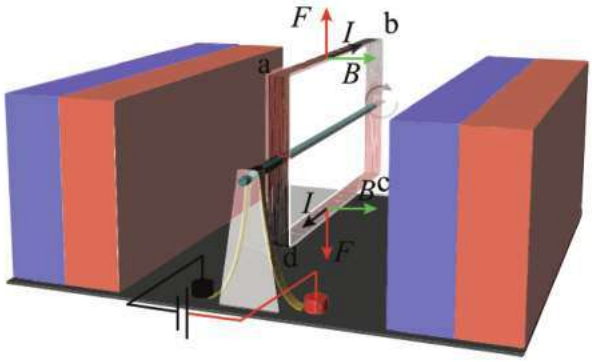
รูป 15.43 ส่วนประกอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

เมื่อกระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดตัวนำในทิศทาง d→ c→b→a จะเกิดโมเมนต์ของแรงคู่ควบหมุนขดลวดรอบแกนหมุนตามเข็มนาฬิกา ดังรูป 15.44 ก. เมื่อขดลวดหมุนไปจนระนาบของขดลวดตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กดังรูป 15.44 ข. โมเมนต์ของแรงคู่ควบมีค่าเป็นศูนย์ แต่เนื่องจากความเฉื่อย จึงทำให้ขดลวดหมุนต่อไป โดยแปรงสัมผัส P และ Q จะเปลี่ยนจากสัมผัสคอมมิวเทเตอร์ x และ y ไปสัมผัสกับคอมมิวเทเตอร์ y และ x ทำให้กระแสไฟฟ้าในขดลวดมีทิศทาง a→b →c→d โมเมนต์ของแรงคู่ควบที่เกิดขึ้นในขณะนี้ จะทำให้ขดลวดหมุนในทางเดิมต่อไป ดังรูป 15.44 ค.

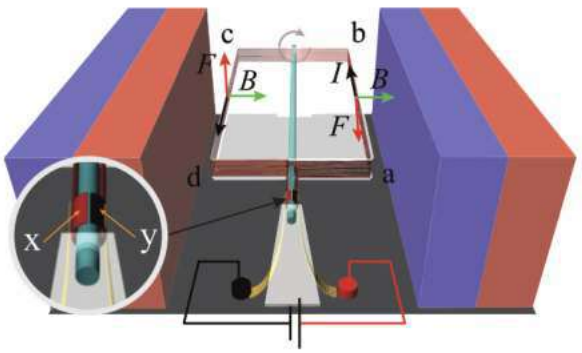
จะเห็นว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงนี้มีขดลวดเพียงระนาบเดียว จึงใช้คอมมิวเทเตอร์ 1 คู่ ถ้าพิจารณาในขณะที่ระนาบของขดลวดตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก โมเมนต์ของแรงคู่ควบจะมีค่าเป็นศูนย์ (ตามสมการ (15.6) เพราะ $\cos 90^\circ = 0$) แต่ขดลวดจะหมุนต่อไปได้อีกเนื่องจากความเฉื่อย ดังนั้นตำแหน่งที่ระนาบของขดลวดตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กจึงเป็นตำแหน่งที่มอเตอร์ไม่มีโมเมนต์ของแรงคู่ควบกระทำ เพื่อให้โมเมนต์ของแรงคู่ควบที่กระทำต่อขดลวดตลอดเวลา จึงต้องเพิ่มขดลวดในระนาบอื่นอีก โดยอาจใช้ตั้งแต่ 3 ระนาบขึ้นไป ดังรูป 15.45



ก. กระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดในทิศทาง d→ c→b→a แปรงสัมผัส P และ Q สัมผัสกับคอมมิวเทเตอร์ x และ y ตามลำดับ



ข. ระนาบขดลวดตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก



ค. กระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดในทิศทาง a→ b→c→d แปรงสัมผัส P และ Q สัมผัสกับคอมมิวเทเตอร์ y และ x ตามลำดับ

รูป 15.44 แรงกระทำต่อขดลวดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

รูป **15.45** ตัวอย่างมอเตอร์กระแสตรงแบบ 3 ระนาบ

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงถูกนำไปใช้ทำให้เกิดการเคลื่อนที่หรือการหมุนของอุปกรณ์ในเครื่องยนต์ เครื่องมือและเครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ เช่น ชิ้นส่วนในของเล่นเด็ก มอเตอร์ที่ใช้ในอุปกรณ์รถยนต์

ตัวอย่าง 15.9 มอเตอร์ไฟฟ้าอย่างง่ายเครื่องหนึ่ง พันเป็นเส้นลวดทองแดงรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า กว้าง 4.0 เซนติเมตร ยาว 5.0 เซนติเมตร จำนวน 50 รอบ หมุนได้รอบแกน วางไว้ในสนามแม่เหล็กขนาด 30 มิลลิเทสลา ถ้าให้กระแสไฟฟ้าในขดลวดขนาด 200 มิลลิแอมแปร์ จะเกิดโมเมนต์ของแรงคู่ควบกับขดลวดมากที่สุดเท่าใด

แนวคิด หาโมเมนต์ของแรงคู่ควบจากสมการ $M = NIAB\cos\theta$

วิธีทำ จากสมการของโมเมนต์ของแรงคู่ควบที่เกิดกับขดลวดในสนามแม่เหล็ก

$$M = NIAB\cos\theta$$

โมเมนต์ของแรงคู่ควบจะมีค่ามากที่สุดเมื่อ $\cos\theta = 1$ ดังนั้น จะได้สมการเป็น

$$M = NIAB$$

แทนค่า
$$M = (50)(200\times10^{-3}\ \text{A})(0.04\ \text{m})(0.05\ \text{m})(30\times10^{-3}\ \text{T})$$
$$= 6.0\times10^{-4}\ \text{N m}$$

ตอบ โมเมนต์ของแรงคู่ควบที่มากที่สุดที่เกิดกับขดลวด เท่ากับ 6.0×10^{-4} นิวตัน เมตร

คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 15.3

1. จงเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ของแรงคู่ควบที่กระทำต่อขดลวดกับมุมที่ระนาบของขดลวดทำกับสนามแม่เหล็ก
2. เพราะเหตุใดการสร้างแกลแวนอมิเตอร์จึงใช้ขดลวดขนาดเล็ก และมีน้ำหนักเบา
3. โมเมนต์ที่กระทำกับขดลวดของมอเตอร์จะมากขึ้นหรือน้อยลง ถ้า
    ก. กระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดตัวนำมากขึ้น จงอธิบายเหตุผลประกอบ
    ข. สนามแม่เหล็กในมอเตอร์มีค่ามากขึ้น จงอธิบายเหตุผลประกอบ
    ค. จำนวนรอบของขดลวดมีค่ามากขึ้น จงอธิบายเหตุผลประกอบ

แบบฝึกหัด 15.3

1. ขดลวดวงกลมมีพื้นที่หน้าตัด 60 ตารางเซนติเมตร มีขดลวดพันอยู่จำนวน 600 รอบและมีกระแสไฟฟ้าผ่าน 1 แอมแปร์ วางไว้ในสนามแม่เหล็กที่มีขนาดเท่ากับ 1 เทสลา จงหาโมเมนต์สูงสุดที่กระทำต่อขดลวด
2. ขดลวดตัวนำรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีพื้นที่ 10 ตารางเซนติเมตร วางอยู่ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กขนาดเท่ากับ 5 เทสลา ถ้าจำนวนขดของลวดตัวนำเท่ากับ 400 รอบ จงหาโมเมนต์ของแรงคู่ควบที่เกิดขึ้นเมื่อระนาบขดลวดทำมุม 60 องศากับทิศทางของสนามแม่เหล็ก (กำหนดให้กระแสไฟฟ้าที่ผ่านขดลวดเท่ากับ 6 แอมแปร์)
3. ขดลวดวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร จำนวน 12 รอบ มีกระแสไฟฟ้าผ่าน 5 แอมแปร์ วางอยู่ในสนามแม่เหล็กขนาด 0.6 เทสลา จงหา
    ก. โมเมนต์มากที่สุดที่กระทำต่อขดลวด
    ข. มุมระหว่างระนาบของขดลวดกับสนามแม่เหล็กที่มีโมเมนต์เป็นครึ่งหนึ่งของโมเมนต์มากที่สุดที่กระทำต่อขดลวด

15.4 กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำและอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำ

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยใช้หลักการเกี่ยวกับการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งถูกค้นพบโดย **ไมเคิล ฟาราเดย์** (Michael Faraday) การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าและการนำความรู้เกี่ยวกับอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำไปประยุกต์ใช้ ศึกษาได้จากหัวข้อต่อไปนี้

15.4.1 กฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์

จากการศึกษาในหัวข้อ 15.1 ทราบว่า กระแสไฟฟ้าในลวดตัวนำทำให้เกิดสนามแม่เหล็กรอบลวดตัวนำ ในทางกลับกัน สนามแม่เหล็กทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าในลวดตัวนำได้หรือไม่ อย่างไร ศึกษาได้จากกิจกรรม 15.3 กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

กิจกรรม 15.3 กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

จุดประสงค์

สังเกตการเกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดตัวนำ

วัสดุและอุปกรณ์

1. ขดลวดทองแดงเคลือบฉนวน	1 ขด
2. แกลแวนอมิเตอร์	1 เครื่อง
3. แท่งแม่เหล็ก	1 อัน
4. สายไฟ	2 เส้น

วิธีทำกิจกรรม

1. นำแท่งแม่เหล็กโดยใช้ปลายขั้วแม่เหล็กสอดไว้ในขดลวดทองแดงเคลือบฉนวน แล้วต่อกับแกลแวนอมิเตอร์ ดังรูป สังเกตเข็มแกลแวนอมิเตอร์ขณะแท่งแม่เหล็กอยู่นิ่ง

รูป ประกอบวิธีทำกิจกรรม 15.3 ข้อ 1

2. เคลื่อนแท่งแม่เหล็กให้ปลายขั้วแม่เหล็กเคลื่อนที่ออกแล้วเข้าขดลวด พร้อมทั้งสังเกตเข็มของแกลแวนอมิเตอร์
3. ทำซ้ำข้อ 2 โดยเคลื่อนแท่งแม่เหล็กให้เร็วมากขึ้น

คำถามท้ายกิจกรรม

- ☐ ขณะแท่งแม่เหล็กอยู่นิ่งในขดลวดเคลือบฉนวน เข็มแกลแวนอมิเตอร์เบนจากเดิมหรือไม่
- ☐ ขณะเคลื่อนที่ปลายขั้วแม่เหล็กออกแล้วเข้าขดลวด เข็มแกลแวนอมิเตอร์เบนอย่างไร
- ☐ ขณะเคลื่อนที่ปลายขั้วแม่เหล็กออกแล้วเข้าขดลวดเร็วมากขึ้น เข็มแกลแวนอมิเตอร์เบนต่างจากตอนแรกอย่างไร
- ☐ ขณะเคลื่อนที่ปลายขั้วแม่เหล็กออกแล้วเข้า ขดลวดมีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นหรือไม่ สังเกตได้อย่างไร
- ☐ ขณะเคลื่อนที่ปลายขั้วแม่เหล็กออกและขณะเคลื่อนที่เข้าขดลวด กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีทิศเดียวกันหรือไม่ สังเกตได้อย่างไร
- ☐ การเคลื่อนที่ปลายขั้วแม่เหล็กออกแล้วเข้าขดลวดด้วยความเร็วต่างกัน เกิดกระแสไฟฟ้าภายในขดลวดมีขนาดเท่ากันหรือไม่ สังเกตได้อย่างไร

จากกิจกรรม 15.3 ขณะแท่งแม่เหล็กอยู่นิ่งในขดลวด เข็มแกลแวนอมิเตอร์อยู่นิ่งและชี้ตำแหน่งศูนย์ตลอดเวลา แต่เมื่อเคลื่อนที่ปลายขั้วแม่เหล็กออกจากขดลวด เข็มแกลแวนอมิเตอร์เบนไปทางหนึ่ง และเมื่อเคลื่อนที่ปลายขั้วแม่เหล็กเข้าขดลวด เข็มแกลแวนอมิเตอร์เบนไปในทิศทางตรงข้าม แล้วเมื่อเคลื่อนปลายขั้วแม่เหล็กให้เร็วขึ้นเข็มแกลแวนอมิเตอร์จะเบนเช่นเดิมแต่เบนห่างจากตำแหน่งศูนย์มากขึ้น

จากการศึกษาในหัวข้อ 15.3.2 เรื่องแกลแวนอมิเตอร์ ขณะแท่งแม่เหล็กอยู่นิ่งเข็มแกลแวนอมิเตอร์อยู่ที่ตำแหน่งศูนย์แสดงว่าไม่มีกระแสไฟฟ้าจากขดลวดผ่านแกลแวนอมิเตอร์ แต่เมื่อเคลื่อนปลายขั้วแม่เหล็กออกแล้วเข้า เข็มแกลแวนอมิเตอร์เบนไปจากตำแหน่งศูนย์แสดงว่ามีกระแสไฟฟ้าจากขดลวดผ่านแกลแวนอมิเตอร์ และการที่เข็มแกลแวนอมิเตอร์เบนในทิศตรงข้ามกันเมื่อเคลื่อนแท่งแม่เหล็กออกและเข้า แสดงว่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีทิศตรงข้ามด้วย และเมื่อเคลื่อนปลายขั้วแม่เหล็กเร็วขึ้นเข็มแกลแวนอมิเตอร์เบนมากขึ้นแสดงว่ามีกระแสไฟฟ้าจากขดลวดมากขึ้น

ชวนคิด

จากกิจกรรม 15.3 หากกลับปลายขั้วแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ออกแล้วเข้าจากขดลวด การเบนของเข็มแกลแวนอมิเตอร์จะมีลักษณะเหมือนหรือแตกต่างจากกิจกรรมหรือไม่ อย่างไร

จากการเคลื่อนที่ปลายขั้วแม่เหล็กข้างต้นเป็นการทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดขดลวดเปลี่ยนแปลงจึงทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าในขดลวด เรียกกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากวิธีนี้ว่า **กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ** (induced electric current) และเรียกการทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าในตัวนำด้วยสนามแม่เหล็กว่า **การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า** (electromagnetic induction)

การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ทำได้โดยการเคลื่อนแท่งแม่เหล็กหรือขดลวดอย่างใดอย่างหนึ่ง หรือทั้งสองอย่างก็ได้ เพื่อทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดขดลวดเปลี่ยนแปลง โดยฟาราเดย์ได้ทำการทดลอง และเสนอ**กฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์** (Faraday's law of induction) สรุปได้ว่าเมื่อมี ฟลักซ์แม่เหล็กที่ตัดขดลวดตัวนำมีการเปลี่ยนแปลง ทำให้เกิด **อีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำ** (induced electromotive force) ในขดลวดตัวนำนั้นมีค่าขึ้นกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของ ฟลักซ์แม่เหล็กที่ตัดขดลวดตัวนำส่วนทิศทางของกระแสเหนี่ยวนำเป็นไปตาม **กฎของเลนซ์** (Lenz's law)

เมื่อนำกฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์และกฎของเลนซ์ มาเขียนสมการอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำได้ดังนี้

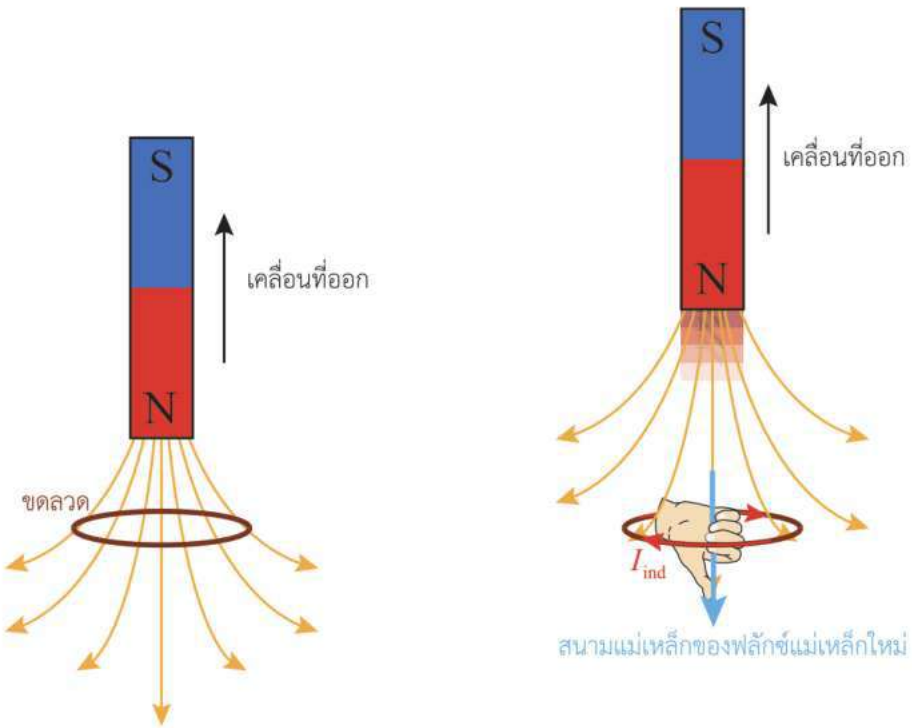
$$\varepsilon = -\frac{\Delta\phi_B}{\Delta t} \qquad (15.7)$$

โดย ε เป็นอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำ

$\frac{\Delta\phi_B}{\Delta t}$ เป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กที่ตัดขดลวดตัวนำเทียบกับเวลา

เครื่องหมายลบในสมการ (15.7) เป็นไปตามกฎของเลนซ์ มีความหมายว่า อีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น มีทิศทางต้านการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กที่มาเหนี่ยวนำ และจากกิจกรรม 15.3 สามารถใช้กฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์และกฎของเลนซ์มาอธิบายการเกิดกระแสเหนี่ยวนำในขดลวดตัวนำได้ดังนี้

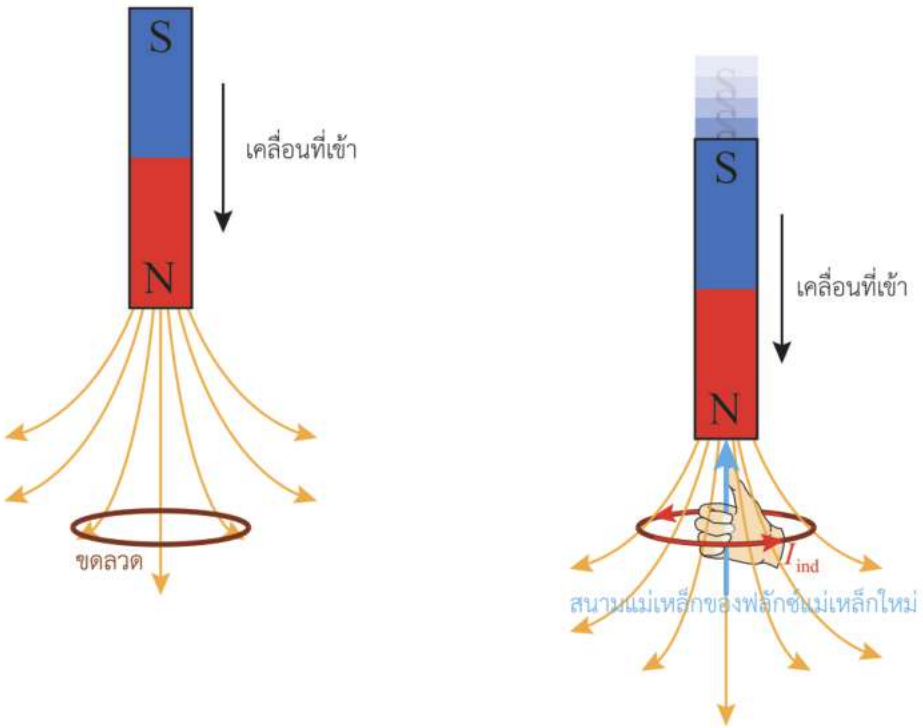
เมื่อเคลื่อนที่ปลายขั้วแม่เหล็กออกจากขดลวดตัวนำ เช่น เคลื่อนที่ปลายขั้วเหนือ (N) ออกจากขดลวดตัวนำ โดยขั้วเหนือเริ่มเคลื่อนที่จากใกล้ขดลวด ดังรูป 15.46 ก. จนขั้วเหนือกำลังเคลื่อนที่ไกลจากขดลวด ดังรูป 15.46 ข. ทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านขดลวดตัวนำมีปริมาณลดลง เกิดอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำตามกฎของฟาราเดย์ และเกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (I_{ind}) ในขดลวดในทิศทางที่ทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กใหม่ต้านการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กเดิมตามกฎของเลนซ์ (โดยสนามแม่เหล็กของฟลักซ์แม่เหล็กใหม่ชี้ไปในทิศทางเดียวกับทิศทางสนามแม่เหล็กของฟลักซ์แม่เหล็กเดิม ตามที่แสดงในรูป 15.46 ข.)



ก. ขั้วเหนือแม่เหล็กเริ่มเคลื่อนที่จากใกล้ขดลวด **ข. ขั้วเหนือแม่เหล็กกำลังเคลื่อนที่ไกลจากขดลวด**

รูป 15.46 การเกิดอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำและกระแสเหนี่ยวนำในขดลวดเมื่อฟลักซ์แม่เหล็กลดลง

ในทางตรงกันข้าม ถ้าเคลื่อนที่ปลายขั้วเหนือของแท่งแม่เหล็กเข้าหาขดลวดตัวนำ โดยขั้วเหนือเริ่มเคลื่อนที่จากไกลขดลวด ดังรูป 15.47 ก. จนขั้วเหนือกำลังเคลื่อนที่อยู่ใกล้ขดลวด ดังรูป 15.47 ข. ทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านขดลวดตัวนำมีปริมาณเพิ่มขึ้น เกิดอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำตามกฎของฟาราเดย์ และเกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดในทิศทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กใหม่ต้านการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กเดิมตามกฎของเลนซ์ (โดยสนามแม่เหล็กของฟลักซ์แม่เหล็กใหม่ชี้ไปในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางสนามแม่เหล็กของฟลักซ์แม่เหล็กเดิม ตามที่แสดงในรูป 15.47 ข.)



ก. ขั้วเหนือแม่เหล็กเริ่มเคลื่อนที่จากไกลขดลวด ข. ขั้วเหนือแม่เหล็กกำลังเคลื่อนที่เข้าใกล้ขดลวด

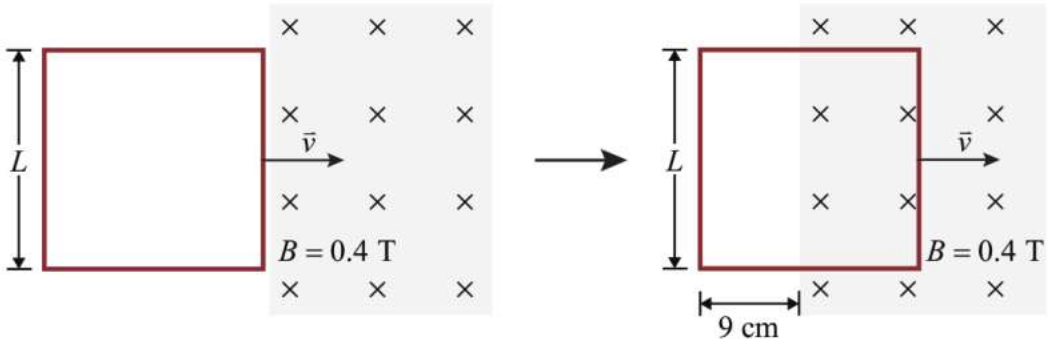
รูป 15.47 การเกิดอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำและกระแสเหนี่ยวนำในขดลวดเมื่อฟลักซ์แม่เหล็กเพิ่มขึ้น

ข้อสังเกต

เมื่อฟลักซ์แม่เหล็กเดิมตัดขดลวดมีปริมาณเพิ่มขึ้น สนามแม่เหล็กใหม่จะมีทิศทางตรงข้ามกับสนามแม่เหล็กเดิม แต่เมื่อฟลักซ์แม่เหล็กเดิมตัดขดลวดมีปริมาณลดลง สนามแม่เหล็กใหม่จะมีทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กเดิม

กฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ นำไปหาอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำและกฎของเลนซ์นำไปหาทิศทางของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ในกรณีอื่นๆ ได้อีก ดังตัวอย่าง 15.10

ตัวอย่าง 15.10 ขดลวดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขดหนึ่งยาวด้านละ 20 เซนติเมตร กำลังเคลื่อนที่ไปทางขวาเข้าไปในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอ 0.4 เทสลา ด้วยอัตราเร็ว 3.0 เมตรต่อวินาที จงหาอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำและทิศทางของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวด ในขณะที่เหลือบริเวณนอกสนามอีก 9 เซนติเมตรจากทางด้านหนึ่ง ดังรูป



รูป ประกอบตัวอย่าง 15.10

แนวคิด ให้ขดลวดเคลื่อนที่เข้าไปในสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอเป็นระยะ Δx ใช้เวลา Δt เนื่องจากขดลวดเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วสม่ำเสมอ ฟลักซ์แม่เหล็กที่ตัดขดลวดจะเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ ตามสมการ $\Delta\phi = B\Delta A$ เกิดอีเอ็มเอฟคงตัว หาอีเอ็มเอฟเฉลี่ยได้จากกฎของฟาราเดย์และทิศทางกระแสเหนี่ยวนำจากกฎของเลนซ์ ตามสมการ (15.7)

วิธีทำ หาพื้นที่ของขดลวดที่มีสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้น จากสมการ

$$\begin{aligned}\Delta A &= L\Delta x \\ &= L(v\Delta t)\end{aligned}$$

จากสมการ $\phi = BA$

หาการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็ก ได้จาก

$$\begin{aligned}\Delta\phi &= B\Delta A \\ &= BL(v\Delta t)\end{aligned}$$

หาขนาดอีเอ็มเอฟจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กตัดขดลวด

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \left|\frac{\Delta\phi}{\Delta t}\right| \\ &= \frac{BL(v\Delta t)}{\Delta t} \\ &= BLv\end{aligned}$$

แทนค่า $$\varepsilon = (0.4\ \text{T})(0.20\ \text{m})(3.0\ \text{m/s})$$
$$= 0.24\ \text{V}$$

หาทิศทางของกระแสเหนี่ยวนำจากฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านขดลวดเพิ่มขึ้น จะเกิดการเหนี่ยวนำทำให้เกิดสนามแม่เหล็กในทิศทางออกจากกระดาษตรงข้ามกับสนามแม่เหล็กเดิม โดยใช้มือขวาจะได้ทิศทางของกระแสเหนี่ยวนำในขดลวดในทิศทวนเข็มนาฬิกา

ตอบ อีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับ 0.24 โวลต์ และกระแสเหนี่ยวนำในขดลวดมีทิศทวนเข็มนาฬิกา

15.4.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

การหมุนขดลวดตัวนำในสนามแม่เหล็กทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กที่ตัดขดลวดตัวนำมีการเปลี่ยนแปลง จึงทำให้มีอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำเกิดขึ้นในขดลวด ซึ่งเป็นพื้นฐานในการสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้า อย่างไร จะได้ศึกษาจากกิจกรรม 15.4

กิจกรรม 15.4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

จุดประสงค์

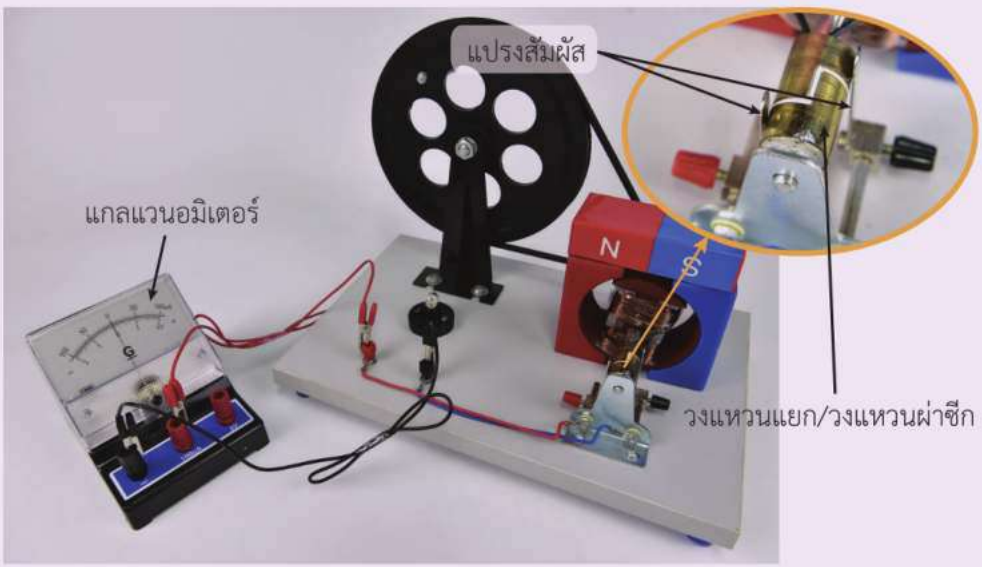
สังเกตทิศทางกระแสไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอย่างง่าย

วัสดุและอุปกรณ์

1. ชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	1 เครื่อง
2. แกลแวนอมิเตอร์	1 เครื่อง
3. สายไฟ	2 เส้น

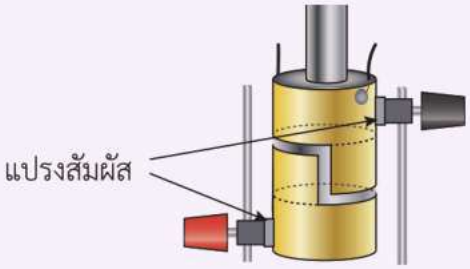
วิธีทำกิจกรรม

1. ต่อแกลแวนอมิเตอร์เข้ากับชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังรูป



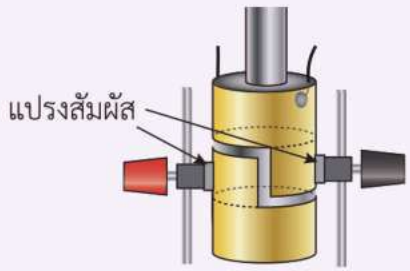
รูป การจัดอุปกรณ์สำหรับกิจกรรม 15.4

2. เลื่อนแปรงสัมผัสจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไปแตะที่วงแหวนแยก



รูป แปรงสัมผัสแตะกับวงแหวนแยก

3. หมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า พร้อมสังเกตทิศทางการเบนของเข็มของเครื่องแกลแวนอมิเตอร์
4. หมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในทิศทางตรงข้ามกับข้อ 3 พร้อมสังเกตทิศทางการเบนของแกลแวนอมิเตอร์
5. ทำซ้ำข้อ 3 – 4 โดยเลื่อนแปรงสัมผัสไปแตะที่บริเวณวงแหวนผ่าซีก ดังรูป



รูป แปรงสัมผัสแตะกับวงแหวนผ่าซีก

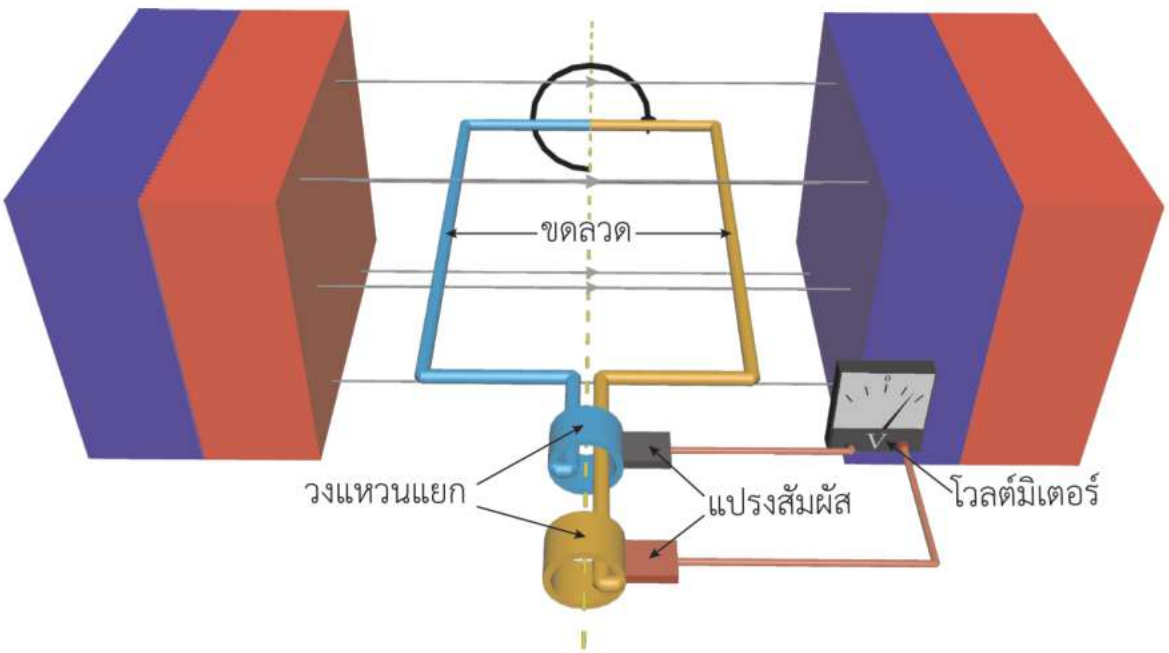
คำถามท้ายกิจกรรม

- ☐ ในกรณีที่แปรงสัมผัสแตะกับวงแหวนแยก เมื่อหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าการเบนของเข็มแกลแวนอมิเตอร์มีลักษณะเป็นอย่างไร
- ☐ ในกรณีที่แปรงสัมผัสแตะกับวงแหวนแยก ทิศทางของกระแสไฟฟ้ามีลักษณะอย่างไร สังเกตได้อย่างไร
- ☐ ในกรณีที่แปรงสัมผัสแตะกับวงแหวนผ่าซีก เมื่อหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าการเบนของเข็มแกลแวนอมิเตอร์มีลักษณะเป็นอย่างไร
- ☐ ในกรณีที่แปรงสัมผัสแตะกับวงแหวนผ่าซีก เมื่อหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในทิศทางตรงข้ามการเบนของเข็มแกลแวนอมิเตอร์ มีลักษณะเป็นอย่างไร

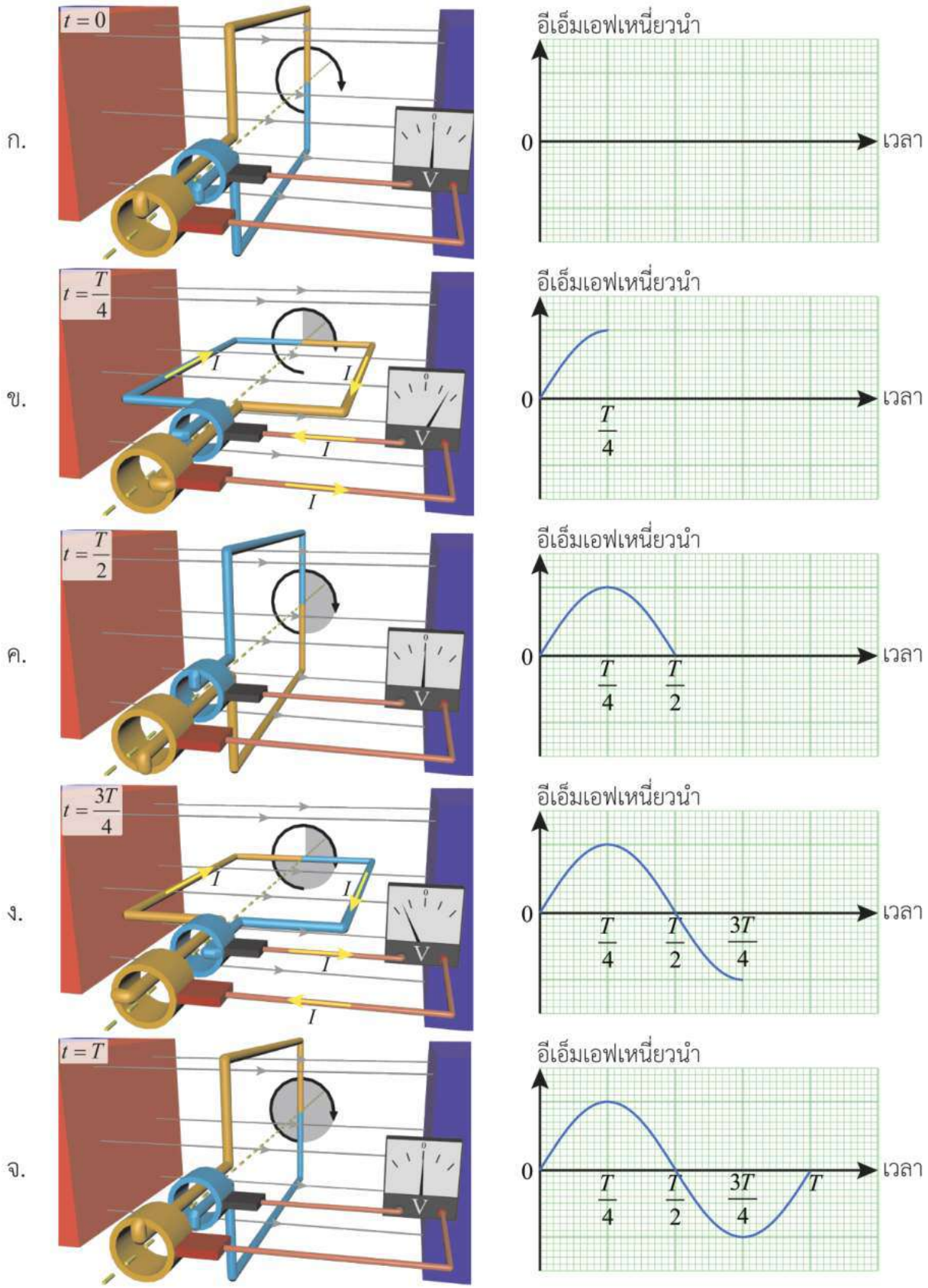
จากกิจกรรม 15.4 จะสังเกตเห็นว่า กระแสไฟฟ้าจากกรณีที่แปรงสัมผัสแตะกับวงแหวนผ่าซีก มีทิศทางเดียว เรียกกระแสไฟฟ้านี้ว่า **กระแสตรง** (Direct Current : DC) แต่สำหรับกระแสไฟฟ้ากรณีที่แปรงสัมผัสแตะกับวงแหวนแยก จะมีทิศทางสลับไปมา เรียกกระแสไฟฟ้านี้ว่า **กระแสสลับ** (Alternating Current : AC)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ

พิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ ดังรูป 15.48 ประกอบด้วยขดลวดหมุนได้คล่องอยู่ระหว่างขั้วแม่เหล็ก ปลายขดลวดแต่ละด้านต่อกับวงแหวนแยกที่หมุนไปพร้อมกับขดลวด และแตะอยู่กับแปรงสัมผัสอันเดิมตลอดเวลา ซึ่งต่อกับอุปกรณ์ไฟฟ้าภายนอก เช่น โวลต์มิเตอร์ เมื่อขดลวดหมุนด้วยอัตราเร็วเชิงมุม ω คงตัว ครบหนึ่งรอบโดยใช้เวลา T อีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังนี้



รูป 15.48 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ



รูป 15.49 การหมุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับจากเวลา 0 ถึง T และกราฟอีเอ็มเอฟที่เกิดขึ้น

พิจารณาช่วงเวลา $0 \le t \le \frac{T}{4}$ โดยเริ่มต้นที่เวลา $t = 0$ ระนาบขดลวดวางตัวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก ดังรูป 15.49 ก. ฟลักซ์แม่เหล็กที่ตัดขดลวดมีค่าสูงสุด แต่อัตราการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กเป็นศูนย์ ทำให้อีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำเป็นศูนย์ หลังจากนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์จะมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้อีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นตามเวลาที่เปลี่ยนไป จนที่เวลา $t = \frac{T}{4}$ ขดลวดหมุนไปเป็นมุม 90 องศา ฟลักซ์แม่เหล็กที่ตัดขดลวดมีค่าเป็นศูนย์ แต่อัตราการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าสูงสุด ทำให้อีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำมีค่าสูงสุด และเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำกับเวลา ในช่วงเวลา $0 \le t \le \frac{T}{4}$ ได้ดังรูป 15.49 ข.

ในช่วงเวลา $\frac{T}{4} < t \le \frac{T}{2}$ ขดลวดหมุนต่อไป อัตราการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กจะมีค่าลดลง ทำให้อีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำมีค่าลดลง จนที่เวลา $t = \frac{T}{2}$ ขดลวดหมุนไปเป็นมุม 180 องศา กับตำแหน่งเริ่มต้น ($t = 0$) ฟลักซ์แม่เหล็กที่ตัดขดลวดมีค่าสูงสุด แต่อัตราการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าเป็นศูนย์ และเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำกับเวลา ในช่วงเวลาครึ่งรอบแรกได้ดังรูป 15.49 ค.

ทำนองเดียวกันในช่วงเวลา $\frac{T}{2} < t \le \frac{3T}{4}$ อัตราการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กมีลักษณะคล้ายกับช่วงเวลา $0 \le t \le \frac{T}{4}$ แต่เนื่องจากขดลวดจะเปลี่ยนตำแหน่งตรงข้าม (ลวดสีเหลืองสลับที่กับลวดสีฟ้า) ดังนั้นทิศทางของอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำในขดลวดจึงตรงข้ามกับช่วงเวลา $0 \le t \le \frac{T}{4}$ สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำกับเวลาได้ดังรูป 15.49 ง.

ทำนองเดียวกันในช่วงเวลา $\frac{3T}{4} < t \le T$ อัตราการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กมีลักษณะคล้ายกับช่วงเวลา $\frac{T}{4} < t \le \frac{T}{2}$ แต่เนื่องจากขดลวดจะเปลี่ยนตำแหน่งตรงข้าม (ลวดสีเหลืองสลับที่กับลวดสีฟ้า) ดังนั้นทิศทางของอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำในขดลวดจึงตรงข้ามกับช่วงเวลา $\frac{T}{4} < t \le \frac{T}{2}$ สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำกับเวลาตั้งแต่ $0 \le t \le T$ หรือจนครบ 1 รอบ ได้ดังรูป 15.49 จ.

หากหมุนขดลวดในรอบต่อ ๆ ไปจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำกับเวลาเช่นเดียวกับรอบที่พิจารณาข้างต้น ซึ่งมีความสัมพันธ์ในรูปของฟังก์ชันแบบไซน์

ข้อสังเกต

การพิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์เป็นการพิจารณาค่าขณะใดขณะหนึ่ง (Δt เข้าใกล้ศูนย์) ที่ขดลวดกำลังหมุน ขณะฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านขดลวดมีค่าสูงสุด (ระนาบขดลวดตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก) จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กผ่านขดลวดเป็นศูนย์ (ทิศการเคลื่อนที่ขดลวดทิศเดียวกับสนามแม่เหล็ก) ทำให้มีอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำขณะนั้นมีค่าเป็นศูนย์ แต่ขณะฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านขดลวดมีค่าเป็นศูนย์ (ระนาบขดลวดขนานกับสนามแม่เหล็ก) จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กผ่านขดลวดมีค่าสูงสุด (ทิศการเคลื่อนที่ขดลวดตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก) ทำให้มีอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำขณะนั้นมีค่าสูงสุด

จากการเปลี่ยนแปลงของอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับเมื่อขดลวดหมุนด้วยอัตราเร็วเชิงมุม ω คงตัว จากรูป 15.49 ก. (ที่ $t = 0$ ระนาบขดลวดตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก) จนครบรอบ ดังรูป 15.49 จ. กราฟการเปลี่ยนแปลงของอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำจะอยู่ในรูปของฟังก์ชันแบบไซน์ สามารถเขียนสมการอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับขณะเวลา t ใด ๆ ได้ดังนี้

$$\varepsilon(t) = \mathcal{E}_0 \sin \omega t \qquad (15.8)$$

เมื่อ $\varepsilon(t)$ เป็นอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำขณะเวลา t ใด ๆ

$\mathcal{E}_0$ เป็นอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำสูงสุด

ω เป็นความถี่เชิงมุม (เท่ากับอัตราเร็วเชิงมุมของการหมุนขดลวด)

ค่า ω จะบอกให้ทราบคาบ (T) และความถี่ (f) ในการเปลี่ยนค่าซ้ำเดิมของอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำ ซึ่งความถี่เชิงมุม คาบ และความถี่ของการหมุนขดลวดสัมพันธ์กันตามสมการ

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

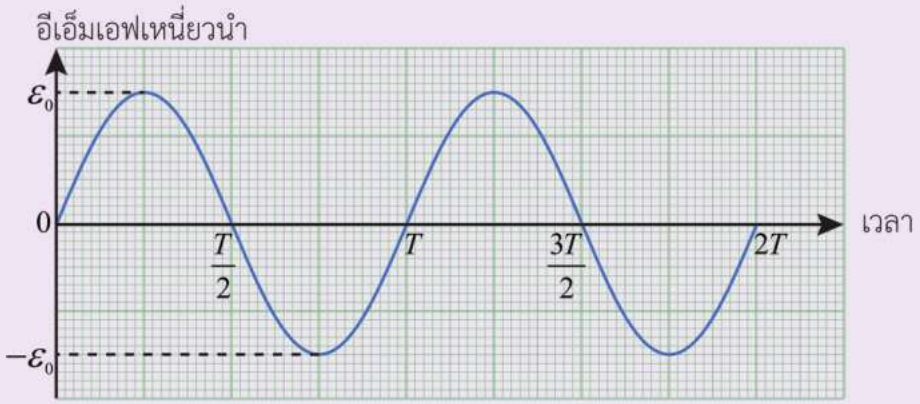
$$= 2\pi f$$

โดย ω มีหน่วยเป็นเรเดียนต่อวินาที T มีหน่วยเป็นวินาที และ f มีหน่วยเป็นรอบต่อวินาที หรือเฮิรตซ์ (Hz)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ ในวงจรไฟฟ้าแทนด้วยสัญลักษณ์ดังนี้

ชวนคิด

หากต่อตัวต้านทานแทนอุปกรณ์ไฟฟ้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับกับเวลาเป็นดังรูป



รูป กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับกับเวลา

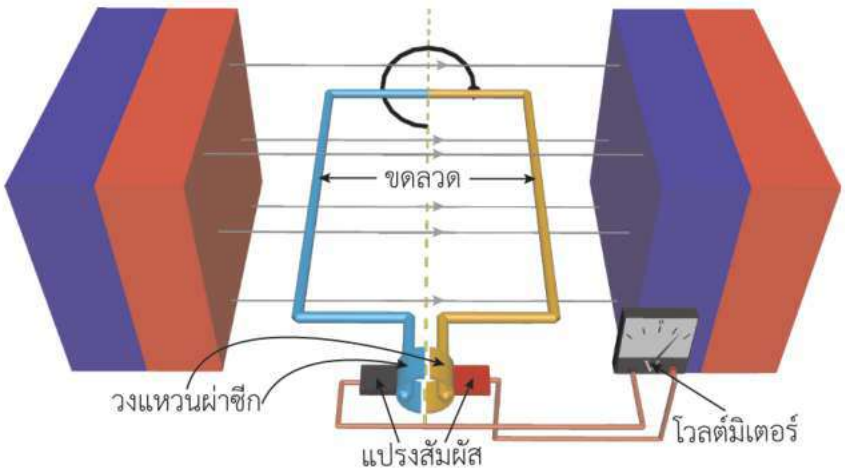
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ผ่านตัวต้านทานกับเวลาจะมีลักษณะอย่างไร

ความรู้เพิ่มเติม

เมื่อนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับต่อเข้ากับตัวต้านทาน กระแสไฟฟ้าที่ผ่านตัวต้านทานจะมีทิศทางเปลี่ยนสลับไปมาตามเวลา เนื่องจากศักย์แต่ละปลายของตัวต้านทานมีการเปลี่ยนแปลงค่าสูงต่ำสลับไปมาตามเวลา แตกต่างจากไฟฟ้ากระแสตรง ที่มีทิศทางของกระแสไฟฟ้าในทิศทางเดิมตลอดเวลา เนื่องจากศักย์แต่ละปลายของตัวต้านทานยังคงค่าสูงหรือต่ำเช่นเดิมตลอดเวลา เช่น ไฟฟ้าจากแบตเตอรี่

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

พิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ดังรูป 15.50 ประกอบด้วยขดลวดหมุนได้คล่องอยู่ระหว่างขั้วแม่เหล็ก เช่นเดียวกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ ต่างกันที่ปลายขดลวดแต่ละด้านของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงต่อกับวงแหวนผ่าซีกที่หมุนไปพร้อมกับขดลวด และสลับการแตะกับแปรงสัมผัสทุกครึ่งรอบ ซึ่งจะทำให้กระแสไฟฟ้าจากแปรงสัมผัสไปผ่านอุปกรณ์ไฟฟ้าภายนอกมีทิศเดิมเสมอที่เรียกว่าไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งอธิบายได้ดังนี้

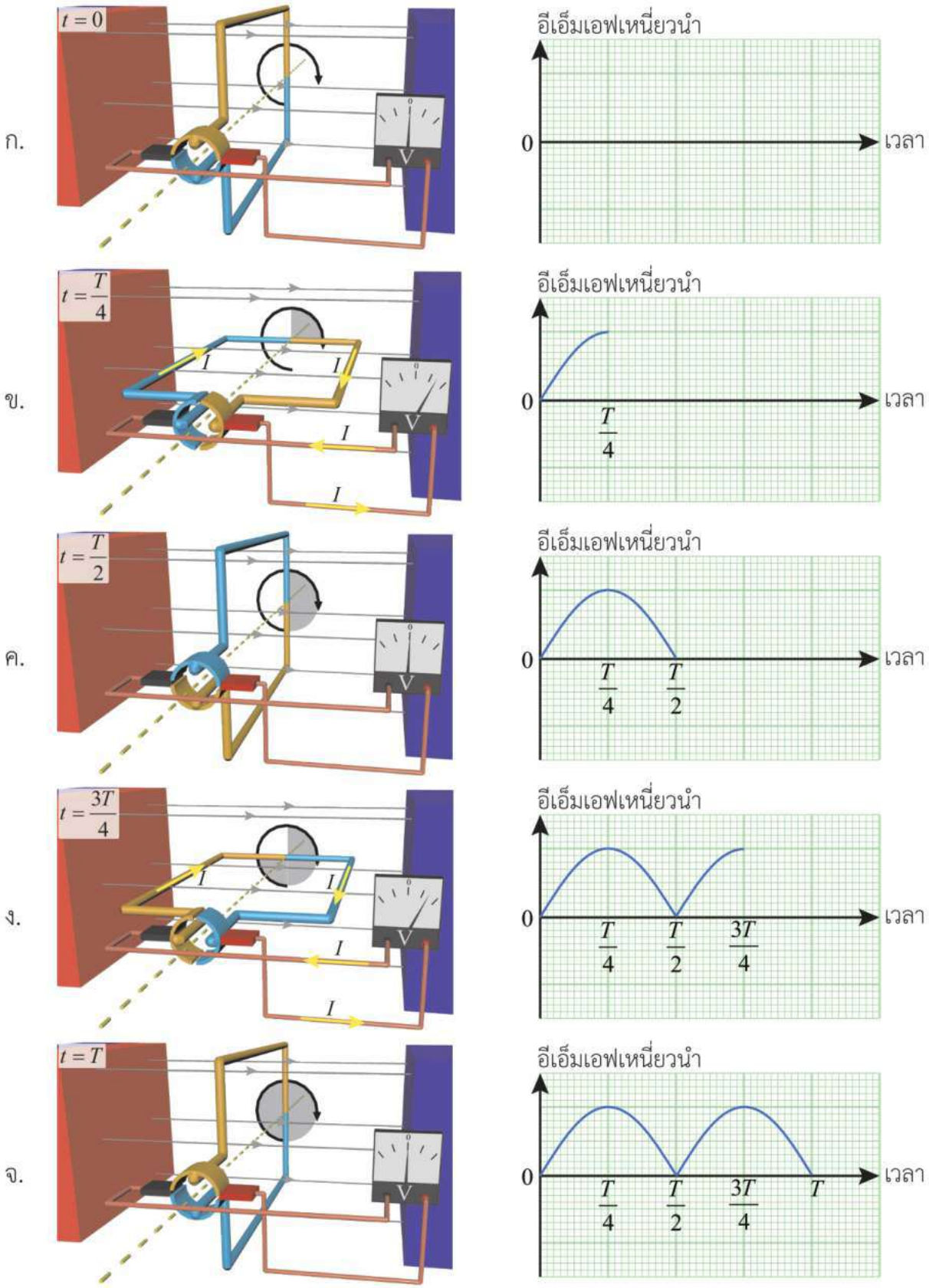


รูป 15.50 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

พิจารณาการหมุนขดลวดในลักษณะเดียวกับขดลวดเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับก่อนหน้า ในช่วงเวลา $0 < t \leq \frac{T}{2}$ ครึ่งรอบนี้แหวนซีกสีเหลืองแตะอยู่กับแปรงสัมผัสสีแดง และแหวนสีฟ้าจะแตะกับแปรงสัมผัสสีดำ อีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำทำให้มีกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำผ่านออกทางปลายเส้นลวดสีเหลืองซึ่งต่ออยู่กับแหวนซีกสีเหลือง ผ่านแปรงสัมผัสสีแดง ไปยังโวลต์มิเตอร์และกลับเข้าทางแปรงสัมผัสสีดำ ผ่านแหวนสีฟ้า เข้าสู่ลวดสีฟ้า และสามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำ (ความต่างศักย์) กับเวลาที่ผ่านโวลต์มิเตอร์ ได้ดังรูป 15.51 ก. ถึง 15.51 ค.

และเมื่อขดลวดหมุนครึ่งรอบต่อไปในช่วงเวลา $\frac{T}{2} < t \leq T$ ครึ่งรอบนี้แหวนซีกสีฟ้าจะเปลี่ยนมาแตะกับแปรงสัมผัสสีแดง และแหวนสีเหลืองจะเปลี่ยนมาแตะกับแปรงสีดำ อีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำทำให้มีกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำผ่านออกทางปลายเส้นลวดสีฟ้าซึ่งต่ออยู่กับแหวนซีกสีฟ้า ผ่านแปรงสัมผัสสีแดง ไปยังโวลต์มิเตอร์ และกลับเข้าทางแปรงสัมผัสสีดำ ผ่านแหวนสีเหลือง เข้าสู่ลวดสีเหลือง และสามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำกับเวลาที่ผ่านโวลต์มิเตอร์ ในช่วงเวลาถัดมาจนครบรอบ ได้ดังรูป 15.51 ง. ถึง 15.51 จ.

หากหมุนขดลวดในรอบต่อๆ ไปจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำกับเวลาเช่นเดียวกับรอบที่พิจารณาข้างต้น



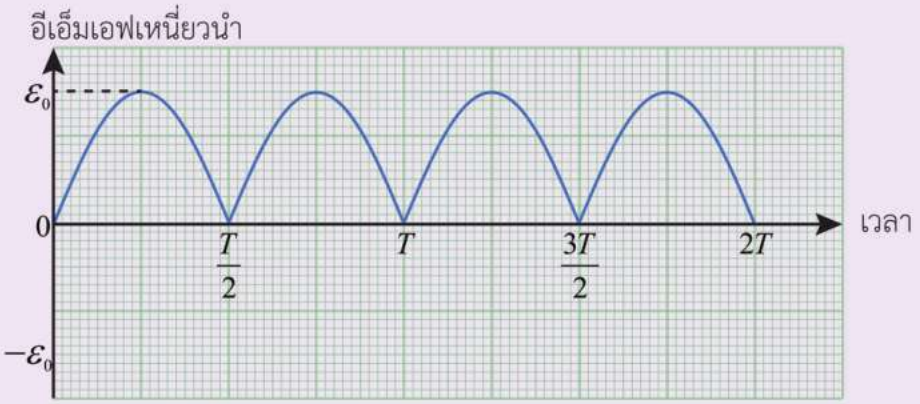
รูป 15.51 การหมุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง จากเวลา **0** ถึง T และอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น

ข้อสังเกต

อีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาในขดลวดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองแบบมีลักษณะเดียวกัน ต่างกันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับใช้แหวนแยกซึ่งแตะกับแปรงเดิมตลอดเวลาจึงทำให้ได้กระแสไฟฟ้าที่ออกมาภายนอกเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ แต่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงใช้แหวนผ่าซีกซึ่งสลับการแตะกับแปรงสัมผัสทุกครึ่งรอบ ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ออกมาภายนอกมีทิศทางเดียว เป็นไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งในทั้งสองกรณีนี้กระแสไฟฟ้าที่ได้จะไม่คงตัวแตกต่างจากกระแสไฟฟ้าที่ได้จากแบตเตอรี่ที่ให้กระแสไฟฟ้าคงตัว

ชวนคิด

หากต่อตัวต้านทานกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงกับเวลาจะเป็นดังรูป



รูป กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงกับเวลา

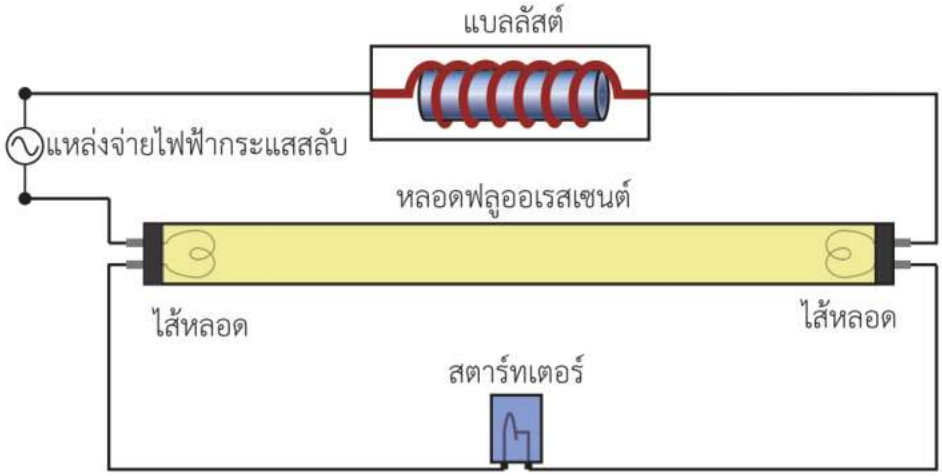
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ผ่านตัวต้านทานกับเวลาจะมีลักษณะอย่างไร

15.4.3 การประยุกต์ใช้หลักการอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำ

ในปัจจุบัน หลักการอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำนอกจากนำไปใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ายังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ เช่น แบลลัสต์แบบขดลวดของหลอดฟลูออเรสเซนต์ มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ กีตาร์ไฟฟ้า เตาแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งจะได้อธิบายหลักการทำงาน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

แบลลัสต์แบบขดลวดของหลอดฟลูออเรสเซนต์

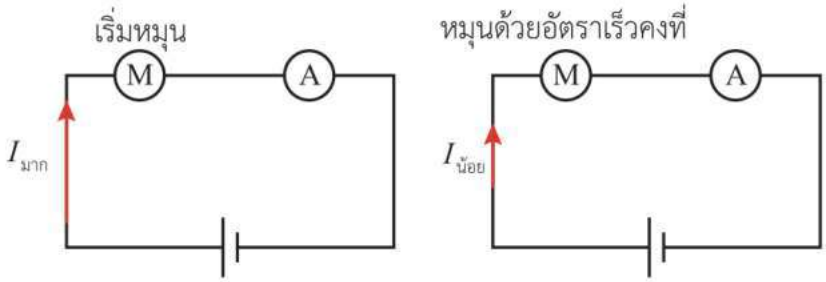
แบลลัสต์แบบขดลวดเป็นอุปกรณ์สำคัญในวงจรหลอดฟลูออเรสเซนต์ประกอบด้วยขดลวดพันอยู่รอบแกนเหล็ก ต่อในวงจรหลอดฟลูออเรสเซนต์ดังรูป 15.52



รูป 15.52 แผนภาพแสดงส่วนประกอบของวงจรหลอดฟลูออเรสเซนต์

เมื่อต่อไฟฟ้ากระแสสลับเข้ากับวงจรหลอดฟลูออเรสเซนต์ ทันทีที่เปิดสวิตช์ กระแสไฟฟ้าจะผ่านแบลลัสต์ ไส้หลอด สตาร์ทเตอร์ และไส้หลอดอีกด้านหนึ่งจนครบวงจร เมื่อไส้หลอดร้อนและสตาร์ทเตอร์ตัดวงจรและหยุดทำงาน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าลดลงอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ฟลักซ์แม่เหล็กในขดลวดของแบลลัสต์ มีอัตราการเปลี่ยนแปลงมาก เกิดอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำที่สูงมากในขดลวดและระหว่างขั้วหลอดทั้งสอง ทำให้แก๊สในหลอดฟลูออเรสเซนต์แตกตัวและสามารถนำไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าจึงเคลื่อนที่จากปลายหลอดด้านหนึ่งผ่านแก๊สภายในหลอดไปยังขั้วหลอดอีกด้านหนึ่ง ส่งผลให้แก๊สในหลอดปล่อยรังสีอัลตราไวโอเลต ไปกระตุ้นสารเรืองแสงที่ฉาบอยู่ภายหลอด เปล่งแสงสว่างออกมา หลังจากนั้นแบลลัสต์ยังคงทำให้เกิดอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำ และคุมกระแสไฟฟ้าที่ผ่านหลอดทำให้หลอดสว่างสม่ำเสมอได้อย่างต่อเนื่อง

การเกิดอีเอ็มเอฟกลับในมอเตอร์ไฟฟ้า

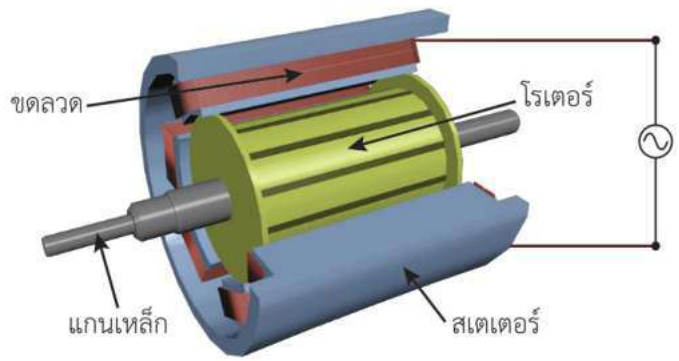


รูป 15.53 แสดงกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำระหว่างมอเตอร์เริ่มหมุนและหมุนด้วยอัตราเร็วคงที่

เมื่อพิจารณามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะพบว่าประกอบด้วยขดลวดส่วนที่หมุนอยู่ในสนามแม่เหล็ก เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในขดลวดทำให้เกิดโมเมนต์แรงคู่ควบหมุนขดลวด ขณะเดียวกันการหมุนของขดลวดตัดผ่านสนามแม่เหล็กก็ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กตัดขดลวด เกิดอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำ ตามกฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีทิศตรงข้ามกับกระแสไฟฟ้าที่ทำให้มอเตอร์หมุน ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ผ่านมอเตอร์มีค่าน้อยลง โดยมีค่าเท่ากับผลต่างของกระแสไฟฟ้าทั้งสอง กระแสไฟฟ้าที่ผ่านมอเตอร์ขณะหมุนด้วยอัตราเร็วคงตัวจึงมีค่าน้อยกว่ากระแสไฟฟ้าที่ผ่านมอเตอร์ขณะเริ่มหมุน ดังรูป 15.53 อีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นขณะมอเตอร์หมุนเรียกว่า **อีเอ็มเอฟกลับ** (back emf) ถ้ามอเตอร์ถูกขัดขวางให้หมุนช้าลงจะเกิดอีเอ็มเอฟกลับน้อยลงทำให้มีกระแสไฟฟ้าผ่านมอเตอร์มากกว่าขณะก่อนถูกขัดขวาง ซึ่งส่งผลให้ขดลวดในมอเตอร์ร้อนจนเสียหายได้

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (induction motors) มีหลายแบบตามวัตถุประสงค์ตามการใช้ประโยชน์ใช้หลักการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบที่พบทั่วไป ประกอบด้วยส่วนที่หมุนได้ เรียกว่า โรเตอร์ ติดกับแกนเหล็กที่หมุนได้คล่อง และส่วนที่อยู่กับที่ ได้แก่ โครงมอเตอร์และชุดขดลวด เรียกว่า สเตเตอร์ ดังรูป 15.54

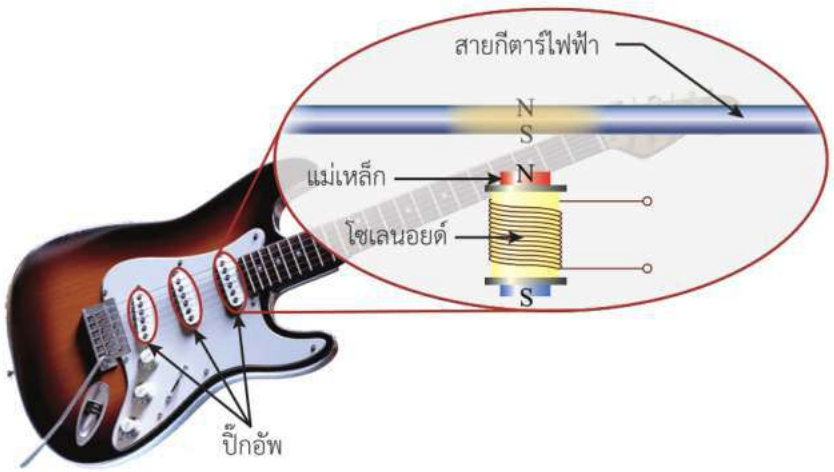


รูป 15.54 แสดงส่วนประกอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

การหมุนของมอเตอร์เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าที่ขดลวดในสเตเตอร์ และเนื่องจากกระแสไฟฟ้าสลับที่จ่ายให้มอเตอร์ ทำให้ขดลวดในสเตเตอร์สร้างฟลักซ์แม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลง และเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในโรเตอร์ เกิดแรงแม่เหล็กผลักกันระหว่างขดลวดของสเตเตอร์กับโรเตอร์ ส่งผลให้โรเตอร์หมุน ปกติขดลวดที่สเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะมี 3 ชุด เกิดการเหนี่ยวนำทำให้มีแรงผลักกันตามลักษณะดังกล่าวทำให้โรเตอร์ของมอเตอร์หมุนได้อย่างต่อเนื่อง โดยมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำลักษณะนี้จะมีราคาถูก บำรุงรักษาง่าย และมีความเร็วคงที่ ทำให้นิยมนำมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดนี้มาใช้ประโยชน์ เช่น มอเตอร์พัดลม มอเตอร์ปั๊มน้ำ

กีตาร์ไฟฟ้า

กีตาร์ไฟฟ้ามีส่วนประกอบที่สำคัญที่ทำหน้าที่เปลี่ยนการสั่นของสายกีตาร์เป็นสัญญาณไฟฟ้าของเสียง คือ **ปิ๊กอัพ** (pickup) หรืออีกชื่อหนึ่งคือคอนแทคท์ ภายในปิ๊กอัพจะมีโซเลนอยด์ที่พันอยู่บนแท่งแม่เหล็ก ตรงกับตำแหน่งของสายกีตาร์ โดยแท่งแม่เหล็กในขดลวดจะเหนี่ยวนำสายกีตาร์ที่อยู่ใกล้ให้เป็นแม่เหล็ก ดังรูป 15.55

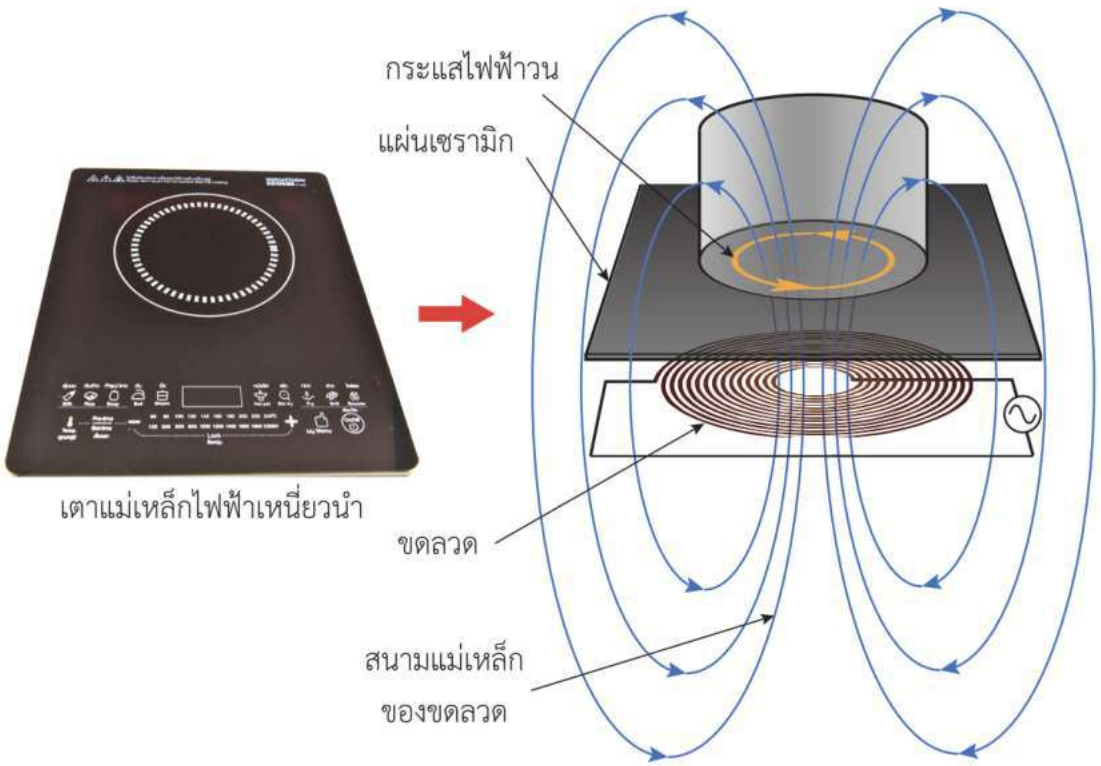


รูป 15.55 แสดงปิ๊กอัพที่ใช้กับกีตาร์เพื่อรับสัญญาณไฟฟ้าจากการสั่นของสายกีตาร์

เมื่อดีดสายกีตาร์ทำให้สั่นไปมา การเหนี่ยวนำระหว่างแท่งแม่เหล็กกับสายกีตาร์จะทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กในโซเลนอยด์เกิดการเปลี่ยนแปลง และเกิดอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำตามกฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในโซเลนอยด์ส่งไปยังเครื่องขยายสัญญาณและเปลี่ยนเป็นเสียงต่อไป

เตาแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

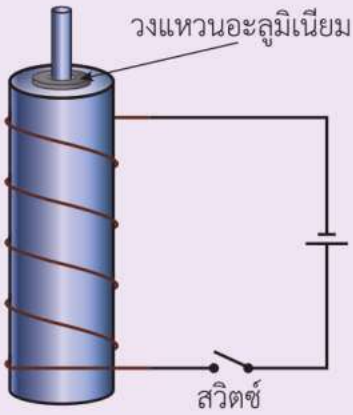
เตาแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำงานโดยให้กระแสไฟฟ้าสลับผ่านขดลวดที่อยู่ภายในเตา ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ส่งผลให้เกิดการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นในภาชนะโลหะเกิด **กระแสไฟฟ้าวน** (eddy current) กลับไป-มาที่ก้นภาชนะ ตามความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ให้กับขดลวดภายในเตา ดังรูป 15.56 ซึ่งกระแสไฟฟ้าวนนี้จะทำให้ภาชนะโลหะเกิดความร้อน อย่างไรก็ดีภาชนะโลหะที่ใช้กับเตาแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้องถูกออกแบบให้เหมาะสมจึงจะนำมาใช้กับเตาชนิดนี้ได้



รูป 15.56 แสดงเตาแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และแผนภาพส่วนประกอบที่ทำให้เกิดความร้อนจากการเหนี่ยวนำที่ก้นภาชนะ

คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 15.4

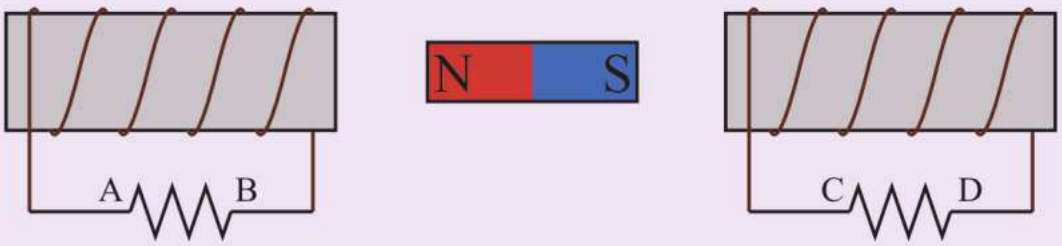
1.



รูป ประกอบคำถามตรวจสอบความเข้าใจข้อ 1

จากรูปเมื่อกดสวิตช์ให้วงจรปิด ปรากฏว่าวงแหวนอะลูมิเนียมจะกระเด็นขึ้นจากตำแหน่งเดิม จงอธิบายว่าวงแหวนอะลูมิเนียมกระเด็นขึ้นได้เพราะเหตุใด

2.



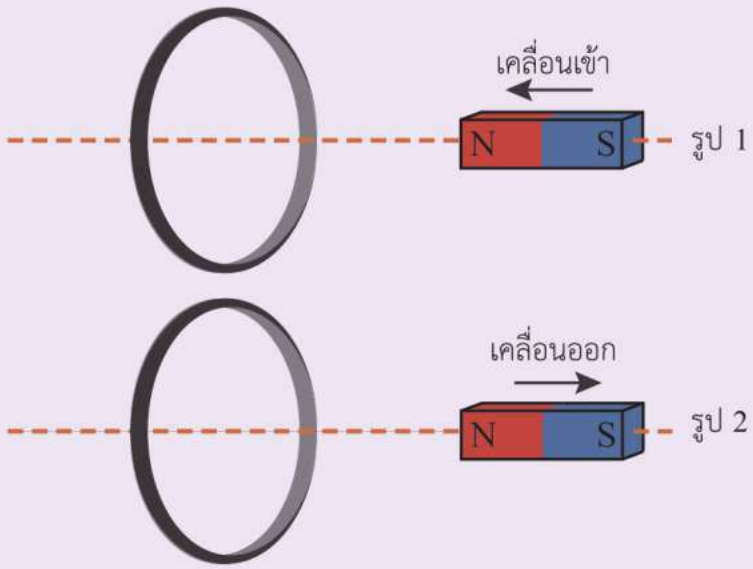
รูป ประกอบคำถามตรวจสอบความเข้าใจข้อ 2

จากรูป กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะผ่านตัวต้านทาน AB และ CD ในทิศทางใด เมื่อ

ก. เคลื่อนแท่งแม่เหล็กไปทางขวา

ข. เคลื่อนแท่งแม่เหล็กไปทางซ้าย

3.

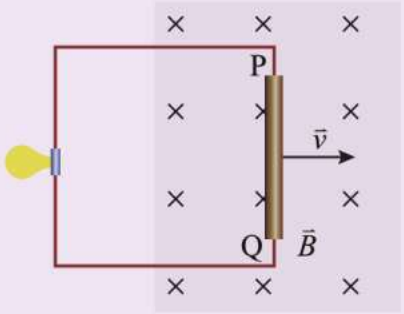


รูป ประกอบคำถามตรวจสอบความเข้าใจข้อ 3

จากรูป 1 ถ้าเคลื่อนขั้ว N ของแท่งแม่เหล็กเข้าหาศูนย์กลางของขดลวด และจากรูป 2 เคลื่อนขั้ว N ของแม่เหล็กออกจากศูนย์กลางของขดลวด จงเขียนทิศทางของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ I_{ind} ที่เกิดขึ้นในขดลวด ทั้งสอง

แบบฝึกหัด 15.4

1. ในการเคลื่อนแท่งแม่เหล็กเข้าหาขดลวดวงกลม ปรากฏว่าฟลักซ์แม่เหล็กที่ตัดกับขดลวดเพิ่มจาก 1.0×10^{-4} เวเบอร์ เป็น 1.2×10^{-4} เวเบอร์ ในเวลา 0.2 วินาที จงหาขนาดอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำเฉลี่ยที่เกิดขึ้นมีค่าเป็นเท่าใด
2. วงจรหนึ่งประกอบด้วยหลอดไฟและลวดตัวนำตรง PQ ที่เคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอด้วยความเร็วคงตัว v ในทิศทางจากซ้ายไปขวา ดังรูป



รูป ประกอบแบบฝึกหัดข้อ 2

ก. กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ผ่านหลอดไฟมีทิศทางใด

ข. ปลายข้างใดของลวดตัวนำ (P หรือ Q) มีศักย์ไฟฟ้าสูง

15.5 ไฟฟ้ากระแสสลับ

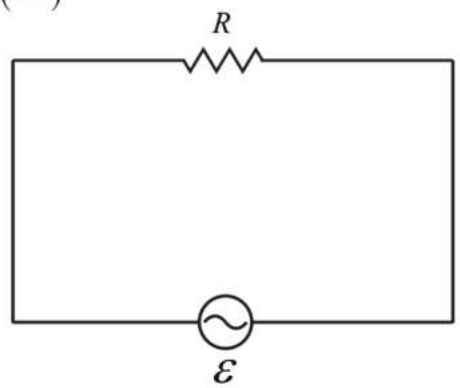
จากหัวข้อที่ผ่านมา นักเรียนทราบแล้วว่าไฟฟ้ากระแสสลับ คือกระแสไฟฟ้าที่มีทิศทางเปลี่ยนสลับไปมา และมีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลา เช่น กระแสไฟฟ้าในรูปของฟังก์ชันแบบไซน์ ในหัวข้อนี้จะได้ศึกษา เกี่ยวกับความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าของไฟฟ้ากระแสสลับ การผลิตและการส่งไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อนำไปใช้ตามบ้านเรือน ดังต่อไปนี้

15.5.1 ค่าอาร์เอ็มเอสของความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าของไฟฟ้ากระแสสลับ

จากการพิจารณาการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับทำให้ทราบว่าอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับเปลี่ยนแปลงกับเวลาตามสมการ

$$\varepsilon(t) = \mathcal{E}_0 \sin(\omega t)$$

หากนำตัวต้านทาน R มาต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับเป็นวงจร ดังรูป 15.57 ความต่างศักย์ระหว่างปลายตัวต้านทาน จะมีค่าเปลี่ยนแปลงกับเวลาเช่นเดียวกับอีเอ็มเอฟ ε สามารถเขียนความต่างศักย์ v และความต่างศักย์สูงสุด V_0 ระหว่างปลายตัวต้านทาน ได้ดังนี้



รูป 15.57 วงจรตัวต้านทานต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ

$$v = \varepsilon$$

จะได้ $$v = \mathcal{E}_0 \sin(\omega t)$$

$$v = V_0 \sin(\omega t)$$

โดย $$V_0 = \mathcal{E}_0$$

จากกฎของโอห์มสามารถเขียนให้อยู่ในรูปกระแสไฟฟ้า i ดังนี้

$$i = \frac{v}{R}$$

$$= \frac{V_0 \sin(\omega t)}{R}$$

$$= \frac{V_0}{R}\sin(\omega t)$$

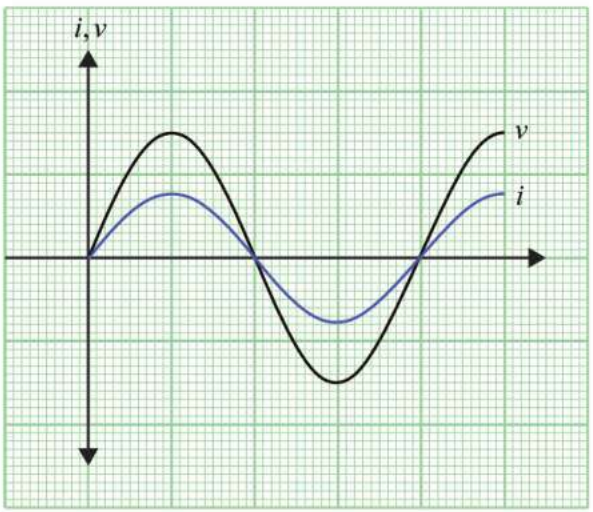
เมื่อกระแสไฟฟ้าสูงสุด I_0 หาได้จาก

$$I_0 = \frac{V_0}{R}$$

จะได้

$$i = I_0 \sin(\omega t)$$

จากที่พิจารณาข้างต้นจะเห็นว่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าของไฟฟ้ากระแสสลับเปลี่ยนแปลงตามเวลาในรูปของฟังก์ชันแบบไซน์ โดยความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าของไฟฟ้ากระแสสลับที่ตัวต้านทานมีค่ามากที่สุดพร้อมกัน และเป็นศูนย์พร้อมกัน กล่าวคือมีเฟสตรงกัน ดังรูป 15.58



รูป 15.58 กราฟความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าของตัวต้านทานกับเวลา

จากที่ศึกษามาข้างต้น กระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของไฟฟ้ากระแสสลับมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา แต่ในชีวิตประจำวันค่าต่าง ๆ เหล่านี้ ถูกวัดหรือระบุเป็นค่าคงตัว เช่น ความต่างศักย์ที่ใช้ตามบ้านเรือนมีค่า 230 โวลต์ การวัดหรือระบุค่าเช่นนี้เป็นการเทียบค่ากับไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งเรียกว่า **ค่ายังผล** (effective value) หรือเป็นค่าที่ได้จากการวัดเรียกว่า **ค่ามิเตอร์** (meter value) ค่านี้จะเป็น **ค่าเฉลี่ยแบบรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย** (root mean square) หรือ **ค่าอาร์เอ็มเอส** (rms value) จะได้ศึกษาดังนี้

ค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสไฟฟ้า I_{rms} คำนวณได้จาก

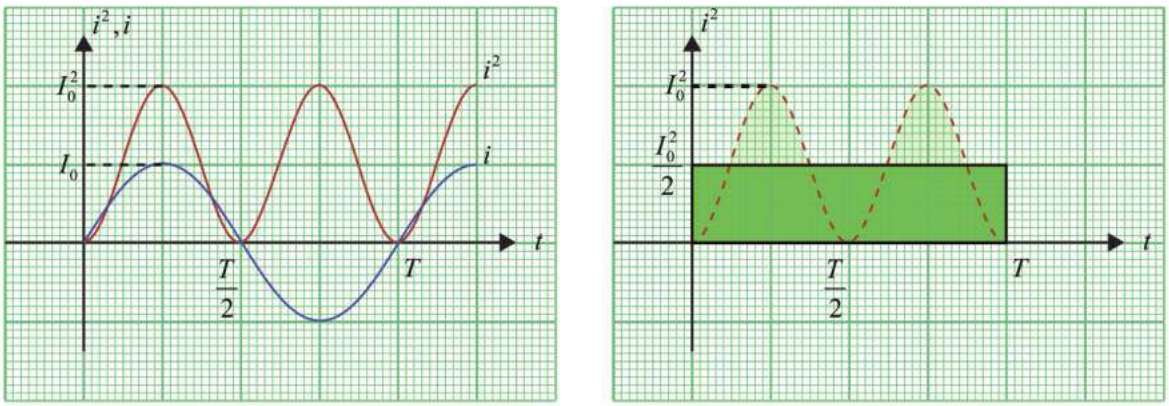
$$I_{\text{rms}} = \sqrt{\overline{i^2}}$$

พิจารณากระแสไฟฟ้าของไฟฟ้ากระแสสลับที่ผ่านตัวต้านทาน ตามสมการ

$$i = I_0 \sin(\omega t)$$

ยกกำลังสองจะได้ $$i^2 = \left(I_0 \sin(\omega t)\right)^2$$

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้ากับเวลา และกระแสไฟฟ้ายกกำลังสองกับเวลา จะได้กราฟดังรูป 15.59 ก.



ก. กราฟระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลาและกระแสไฟฟ้ายกกำลังสองกับเวลา

ข. พื้นที่ใต้กราฟกระแสไฟฟ้ายกกำลังสองกับเวลา

รูป 15.59 การหาค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้ายกกำลังสองจากพื้นที่ใต้กราฟ

จากรูป 15.59 ข. หาค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้ายกกำลังสองจากพื้นที่ใต้กราฟกระแสไฟฟ้ายกกำลังสองกับเวลาในช่วงเวลาหนึ่งคาบ จะได้

$$\overline{i^2} = \frac{I_0^2}{2}$$

$$\sqrt{\overline{i^2}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$$

หรือ $$I_{\text{rms}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}} \qquad (15.9)$$

ในทำนองเดียวกัน ความต่างศักย์ของไฟฟ้ากระแสสลับ สามารถหาความต่างศักย์อาร์เอ็มเอส (V_{rms}) มีความสัมพันธ์ในลักษณะเช่นเดียวกับกระแสไฟฟ้า เขียนได้เป็น

$$V_{\text{rms}} = \frac{V_0}{\sqrt{2}} \qquad (15.10)$$

ชวนคิด

ไฟฟ้าตามบ้านเรือน ที่ระบุความต่างศักย์ไฟฟ้า 230 โวลต์ จะมีความต่างศักย์สูงสุดเท่าใด

ตัวอย่าง 15.11 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ ต่ออยู่กับตัวต้านทานตัวหนึ่ง จงหา
ก. ความต่างศักย์สูงสุดระหว่างปลายของตัวต้านทานนี้ เมื่อวัดความต่างศักย์ได้ 45 โวลต์
ข. กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ผ่านตัวต้านทาน เมื่อวัดกระแสไฟฟ้าได้ 2.5 แอมแปร์

แนวคิด ความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าที่วัดได้เป็นค่าอาร์เอ็มเอส นำไปคำนวณความต่างศักย์สูงสุดและกระแสไฟฟ้าสูงสุด ได้จากสมการ

$$V_{\text{rms}} = \frac{V_0}{\sqrt{2}}$$

$$I_{\text{rms}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$$

วิธีทำ ก. ความต่างศักย์ที่วัดได้คือค่า V_{rms} เท่ากับ 45 โวลต์ จากสมการ

$$V_{\text{rms}} = \frac{V_0}{\sqrt{2}}$$

จะได้ว่า $V_0 = \sqrt{2}V_{\text{rms}}$

แทนค่า $V_0 = \sqrt{2}\,(45\,\text{V})$

$= 63.640\ \text{V}$

ข. กระแสไฟฟ้าที่วัดได้คือค่า I_{rms} เท่ากับ 2.5 แอมแปร์ จากสมการ

$$I_{\text{rms}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$$

จะได้ว่า $I_0 = \sqrt{2}I_{\text{rms}}$

แทนค่า $I_0 = \sqrt{2}\,(2.5\,\text{A})$

$= 3.536\,\text{A}$

ตอบ ก. ความต่างศักย์สูงสุดระหว่างปลายของตัวต้านทานเท่ากับ 63.64 โวลต์
ข. กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ผ่านตัวต้านทานเท่ากับ 3.54 แอมแปร์

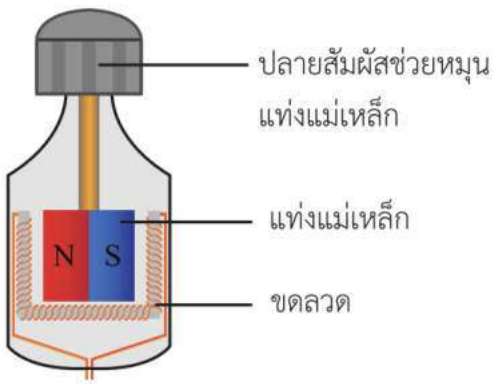
15.5.2 การผลิตและการส่งไฟฟ้ากระแสสลับ

ในหัวข้อที่ผ่านมา นักเรียนได้ศึกษาเกี่ยวกับการทำให้เกิดไฟฟ้ากระแสสลับ โดยการหมุนขดลวดเพื่อทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กที่ตัดผ่านขดลวดมีการเปลี่ยนแปลง นอกจากนี้การทำให้เกิดไฟฟ้ากระแสสลับโดยการหมุนแม่เหล็กเพื่อทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กที่ตัดผ่านขดลวดมีการเปลี่ยนแปลงได้หรือไม่ และการส่งไฟฟ้ากระแสสลับจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ไปยังบ้านเรือนที่อยู่ไกลจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำได้อย่างไร จะได้ศึกษาได้จากหัวข้อต่อไปนี้

การผลิตไฟฟ้ากระแสสลับ

การผลิตไฟฟ้ากระแสสลับโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นเป็นการเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า ด้วยการทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กที่ตัดผ่านขดลวดมีการเปลี่ยนแปลง เพื่อทำให้เกิดไฟฟ้ากระแสสลับ สามารถทำได้ทั้งการหมุนขดลวดตัดผ่านฟลักซ์แม่เหล็ก และการหมุนแท่งแม่เหล็กเพื่อทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กตัดผ่านขดลวด เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับของรถจักรยานบางรุ่น ดังรูป 15.60 ก. โดยมีส่วนประกอบดังรูป 15.60 ข.

ก. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าของจักรยาน

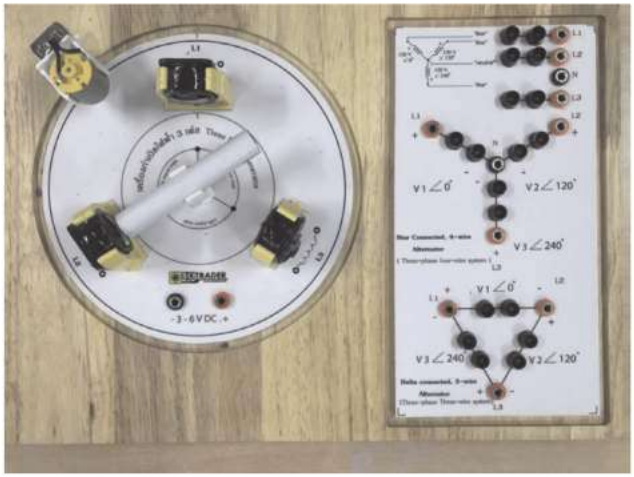


ข. ส่วนประกอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของจักรยาน

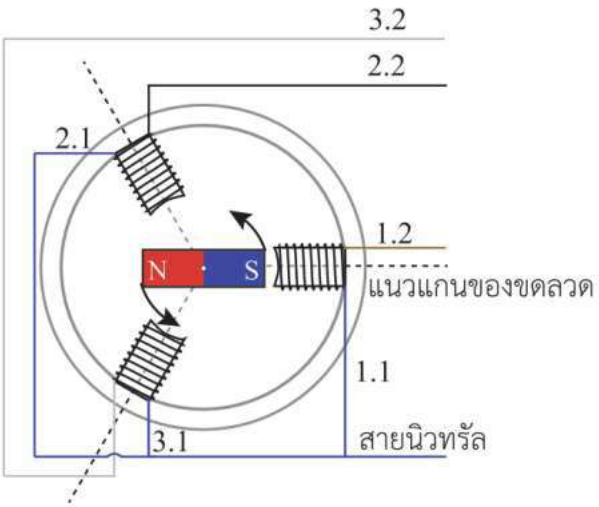
รูป 15.60 ตัวอย่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ

การผลิตไฟฟ้ากระแสสลับด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีขดลวด 1 ชุด ไฟฟ้ากระแสสลับที่ผลิตได้จะถูกส่งจากเครื่องกำเนิดด้วยสายส่ง 2 เส้น เรียกระบบไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส แต่โรงไฟฟ้าจะใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีขดลวด 3 ชุด ในการหมุนแม่เหล็กแต่ละรอบทำให้สามารถผลิตไฟฟ้ากระแสสลับออกมาทั้ง 3 ชุด เรียกว่าระบบไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้งานตามโรงไฟฟ้าจะเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟส มีขดลวดตัวนำอยู่ 3 ชุด โดยแนวแกนของขดลวดแต่ละชุดทำมุม 120 องศา ซึ่งกันและกันในลักษณะดังรูป 15.61 ก.



ก. ขดลวดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟส



ข. แผนภาพเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟส

รูป 15.61 แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟส

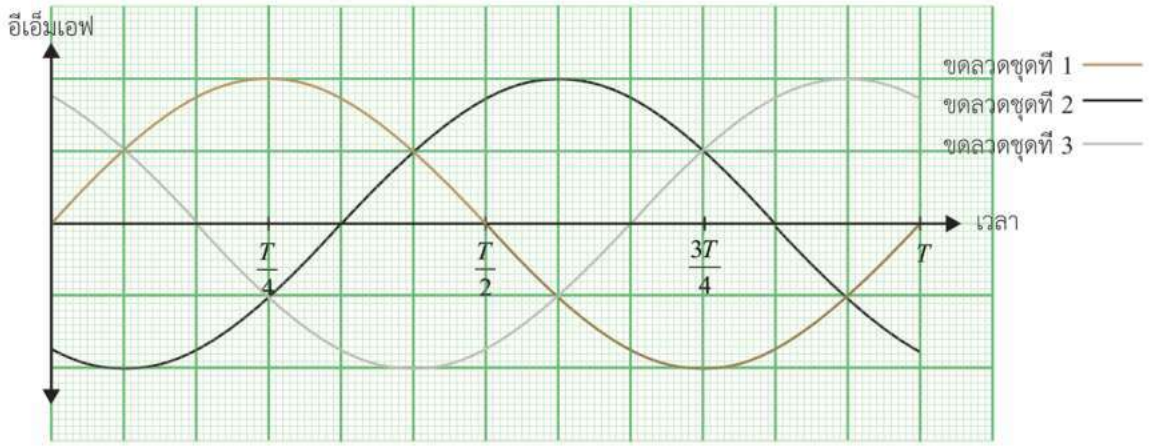
ความรู้เพิ่มเติม

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.) ได้กำหนดสีของสายไฟฟ้าที่มีตัวนำเป็นทองแดงและหุ้มฉนวน**พอลิไวนิลคลอไรด์** (polyvinylchloride : PVC) ในระบบไฟฟ้าแรงต่ำ (ไม่เกิน 1000 โวลต์) ของระบบไฟฟ้า 3 เฟส ดังนี้

สีฟ้า	สีเขียวแถบเหลือง	สีน้ำตาล	สีดำ	สีเทา
สายนิวทรัล	สายดิน	สายไฟฟ้าของขดลวดชุดที่ 1	สายไฟฟ้าของขดลวดชุดที่ 2	สายไฟฟ้าของขดลวดชุดที่ 3

จากรูป 15.61 ข. สายไฟฟ้าเส้นที่ 1.1 2.1 และ 3.1 ของแต่ละขด จะต่อรวมกัน เรียกว่า **สายนิวทรัล** (neutral line) และต่อลงดินที่โรงไฟฟ้า เรียกว่า สายดิน ส่วนสายไฟฟ้าเส้นที่ 1.2 2.2 และ 3.2 ของแต่ละขด จะมีอีเอ็มเอฟไฟฟ้ากระแสสลับเปลี่ยนแปลงตามการหมุนของแม่เหล็กเมื่อเทียบกับสายนิวทรัล จึงมีสายไฟฟ้าที่ต่อออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส จำนวน 4 เส้น

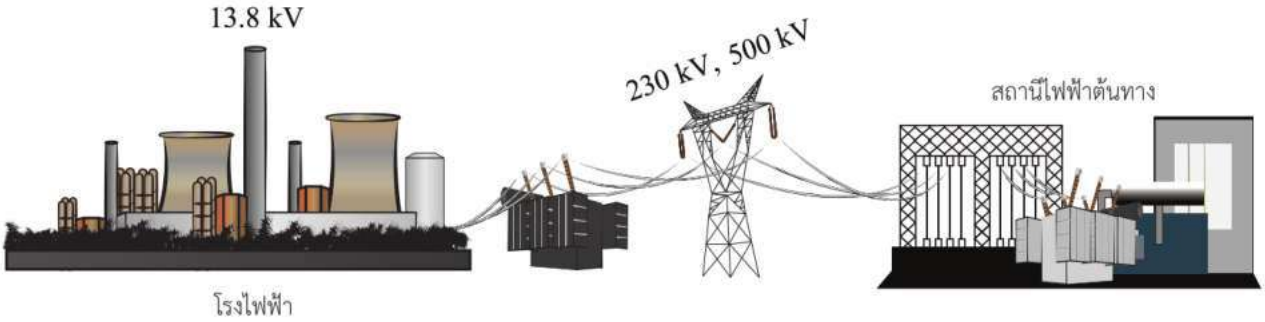
เมื่อพิจารณาการหมุนแท่งแม่เหล็กครบ 1 รอบ สนามแม่เหล็กจะเหนี่ยวนำให้เกิดไฟฟ้ากระแสสลับออกมาจากขดลวดทั้งสามชุด แต่เนื่องจากขดลวดทั้งสามมีแนวแกนของขดลวดทำมุมกัน 120 องศา ดังนั้นอีเอ็มเอฟไฟฟ้ากระแสสลับที่เกิดขึ้นในขดลวดแต่ละชุด จะมีค่าสูงสุดไม่พร้อมกัน สามารถเขียนกราฟระหว่างอีเอ็มเอฟกับเวลาของขดลวดแต่ละชุดได้ ดังรูป 15.62



รูป 15.62 กราฟอีเอ็มเอฟจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟสกับเวลา

จากกราฟ อธิบายได้ว่าไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟส จะมีเฟสของอีเอ็มเอฟไฟฟ้ากระแสสลับจากขดลวดแต่ละชุดต่างกัน 120 องศา

ในการผลิตไฟฟ้ากระแสสลับจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟส ประกอบด้วยสายไฟฟ้า 4 เส้น แต่ในการส่งไฟฟ้าจากโรงผลิตไปยังสถานีไฟฟ้าย่อย สายนิวทรัลจะถูกต่อลงดินที่โรงผลิต ทำให้เหลือสายไฟฟ้าที่ใช้ในการส่งไฟฟ้า 3 เฟส จำนวน 3 เส้น ดังรูป 15.63



รูป 15.63 โรงไฟฟ้าถึงสถานีไฟฟ้าต้นทาง

ข้อดีของการผลิตและการส่งไฟฟ้า 3 เฟส คือ การผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟส ให้พลังงานไฟฟ้ามากกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 เฟส เมื่อใช้พลังงานในการผลิตเท่ากัน และการส่งกำลังไฟฟ้าจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ทำให้ใช้จำนวนสายไฟฟ้าลดลงเมื่อเทียบกับการส่งไฟฟ้า 1 เฟส 3 ชุด และการส่งไฟฟ้า 3 เฟส ทำให้กระแสรวมน้อยกว่าการส่งไฟฟ้า 1 เฟส เมื่อส่งด้วยพลังงานที่เท่ากัน จึงลดขนาดสายไฟฟ้าและเสาที่ใช้ส่งได้ ซึ่งช่วยให้มีประสิทธิภาพในการผลิตและการส่งพลังงานไฟฟ้า นอกจากนี้หากเฟสใดเฟสหนึ่งเกิดปัญหาก็ยังสามารถใช้ไฟฟ้าเฟสอื่นได้ตามปกติ ซึ่งถ้าเป็นการส่งกำลังไฟฟ้าเพียงเฟสเดียวเมื่อไฟฟ้าขัดข้องจะไม่สามารถใช้ไฟฟ้าได้เลย

การสูญเสียกำลังไฟฟ้าในสายไฟฟ้า

เนื่องจากสายไฟฟ้ามีความต้านทาน R ดังนั้น กระแสไฟฟ้า I ที่ผ่านสายไฟฟ้าจะทำให้เกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้า P_{loss} ที่ความต้านทานในสายไฟฟ้าในรูปความร้อน ตามสมการ

$$P_{\text{loss}} = I^2R$$

จะเห็นได้ว่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้ากับความต้านทานในสายไฟฟ้าขึ้นกับกระแสไฟฟ้าที่ผ่านสายไฟฟ้า ดังนั้นถ้าต้องการให้สูญเสียกำลังไฟฟ้าในสายไฟฟ้าน้อย จะต้องให้กระแสไฟฟ้าที่ผ่านสายไฟฟ้ามีค่าน้อย ๆ

ขณะเดียวกันการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านสายไฟฟ้า ขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ส่ง ตามสมการ

$$P = IV$$

การส่งกำลังไฟฟ้าปริมาณมากจากโรงไฟฟ้าผ่านสายไฟฟ้าเป็นระยะทางไกลให้มีการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในสายไฟฟ้าน้อย จะต้องส่งกำลังไฟฟ้าด้วยกระแสไฟฟ้าน้อย จึงต้องใช้ความต่างศักย์สูง ซึ่งจะได้ศึกษาจากตัวอย่าง 15.12

ตัวอย่าง 15.12 การส่งกำลังไฟฟ้า 88 กิโลวัตต์ จากต้นทาง ถ้ากำหนดให้สายไฟฟ้าที่ใช้ส่งมีความต้านทาน 0.25 โอห์ม หากส่งกำลังไฟฟ้าจำนวนนี้เป็นเวลา 10 วินาที จงหาพลังงานที่สูญเสียไปในสายไฟฟ้า เมื่อส่งด้วยความต่างศักย์ต่อไปนี้

ก. 220 โวลต์

ข. 22 000 โวลต์

แนวคิด หากระแสไฟฟ้าจากความต่างศักย์ที่ใช้ส่ง ตามสมการ $P = IV$ และพลังงานไฟฟ้าที่สูญเสียในสายไฟฟ้าเนื่องจากความต้านทาน ตามสมการ $W = P_{\text{loss}}\Delta t$ และ $P_{\text{loss}} = I^2R$

วิธีทำ ก. หากระแสไฟฟ้าได้ ดังนี้

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

เมื่อส่งไฟฟ้าด้วยความต่างศักย์ 220 โวลต์

$$I = \frac{88\times10^3\ W}{220\ V}$$
$$= 400\ \text{A}$$

หาพลังงานไฟฟ้าที่สูญเสียในสายไฟฟ้า จากสมการ

$$W = P_{\text{loss}}\Delta t$$

และ $$P_{\text{loss}} = I^2R$$

จะได้ $$W = I^2R\Delta t$$
$$W = (400\ \text{A})^2(0.25\ \Omega)(10\ \text{s})$$
$$= 400\ 000\ \text{J}$$

ข. เมื่อส่งไฟฟ้าด้วยความต่างศักย์ 22 000 โวลต์ หากระแสไฟฟ้าได้ ดังนี้

$$I = \frac{88\times10^3\ W}{22\,000\ V}$$
$$= 4\ \text{A}$$

หาพลังงานไฟฟ้าที่สูญเสียในสายไฟฟ้า จากสมการ

$$W = I^2R\Delta t$$
$$= (4\ \text{A})^2(0.25\ \Omega)(10\ \text{s})$$
$$= 40\ \text{J}$$

ตอบ ก. เมื่อส่งด้วยความต่างศักย์ 220 โวลต์ สูญเสียพลังงานในสายไฟเท่ากับ 400 000 จูล

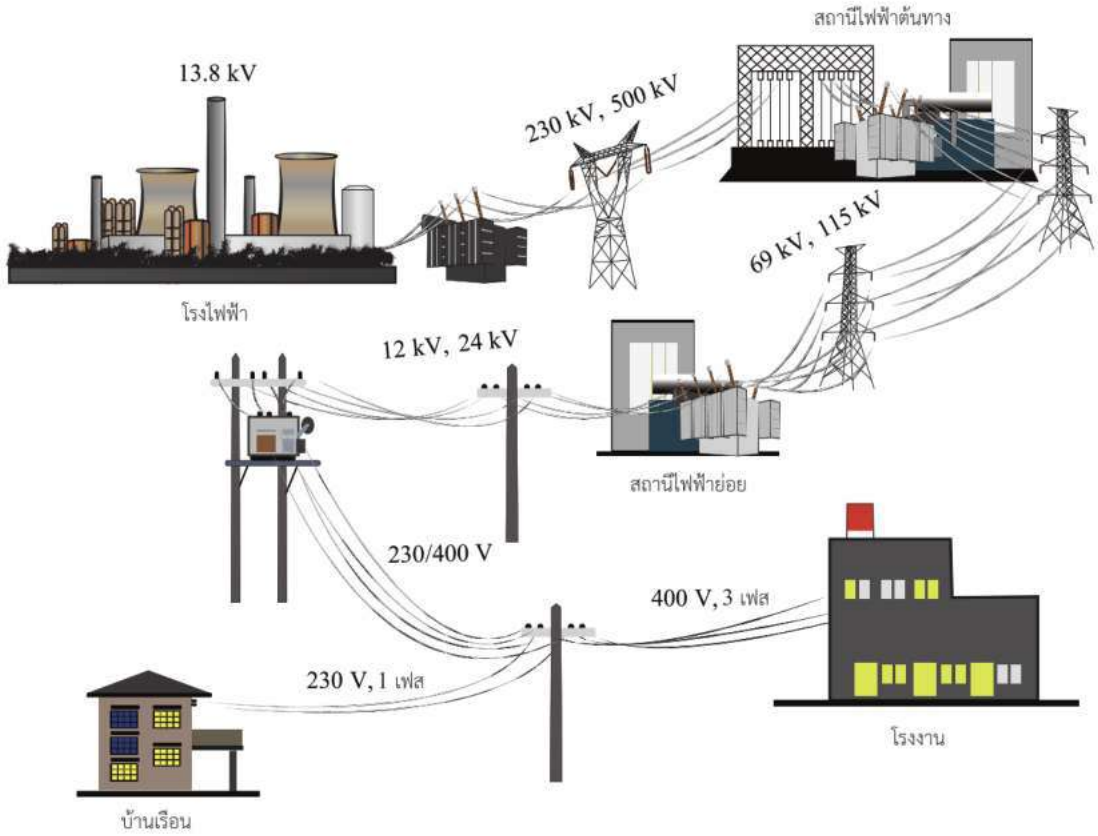
ข. เมื่อส่งด้วยความต่างศักย์ 22 000 โวลต์ สูญเสียพลังงานในสายไฟเท่ากับ 40 จูล

จากตัวอย่าง 15.12 แสดงให้เห็นว่า การส่งไฟฟ้ากระแสสลับที่มีกำลังไฟฟ้ามาก ไประยะทางไกล ๆ ต้องส่งไฟฟ้าด้วยความต่างศักย์สูงเพื่อให้กระแสไฟฟ้าต่ำ ทำให้มีการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าไปกับความต้านทานของสายไฟฟ้าน้อย และสามารถใช้สายส่งไฟฟ้าที่มีขนาดเล็กลง

อย่างไรก็ตาม ถ้าความต่างศักย์สูงมากเกินไป สนามไฟฟ้าระหว่างสายจะทำให้อากาศบริเวณระหว่างสายไฟฟ้าแตกตัวเป็นประจุไฟฟ้ามีสภาพเป็นตัวนำไฟฟ้า ส่งผลให้เกิดไฟฟ้าลัดวงจรระหว่างสายส่งไฟฟ้าได้ ซึ่งเป็นสาเหตุของการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าอีกแบบหนึ่ง นอกจากนี้เมื่อฝนตกก็อาจมีอันตรายเนื่องจากไฟฟ้ารั่วลงมาตามเสาไฟฟ้าที่เป็นโลหะได้ ดังนั้นความต่างศักย์ที่จะใช้ส่งกระแสไฟฟ้าจากโรงผลิตไฟฟ้าจึงต้องมีค่าเหมาะสม ซึ่งจะได้ศึกษาต่อไปนี้

การส่งกำลังไฟฟ้า

การส่งกำลังไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าจนถึงผู้ใช้ไฟฟ้าจะมีการปรับค่าความต่างศักย์ ทั้งการปรับค่าความต่างศักย์ให้สูงขึ้นเพื่อลดการสูญเสียในการส่งกำลังไฟฟ้าไปไกล ๆ และปรับค่าความต่างศักย์ให้น้อยลงให้เหมาะสมกับการใช้งาน มีลำดับขั้นตอนการปรับค่าความต่างศักย์ ดังรูป 15.64



รูป 15.64 แผนภาพแสดงการส่งไฟฟ้าจากโรงผลิตไฟฟ้าสู่บ้านเรือน

การส่งพลังงานไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ผลิตจากโรงไฟฟ้า เพื่อให้ส่งกำลังไฟฟ้าได้ไกลและลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในสายส่ง จะต้องเพิ่มความต่างศักย์ในสายส่งให้สูงขึ้น ในปัจจุบันระบบส่งพลังงานไฟฟ้าแรงสูงของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต (กฟผ.) จะแปลงความต่างศักย์จาก 13 800 โวลต์เป็น 500 000 โวลต์ หรือ 230 000 โวลต์ หรือ 115 000 โวลต์ หรือ 69 000 โวลต์ ก่อนส่งไปยังสถานีไฟฟ้าย่อยผ่านระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง โดยความต่างศักย์ที่แปลงขึ้นอยู่กับระยะทาง และกำลังไฟฟ้าที่ต้องการส่ง

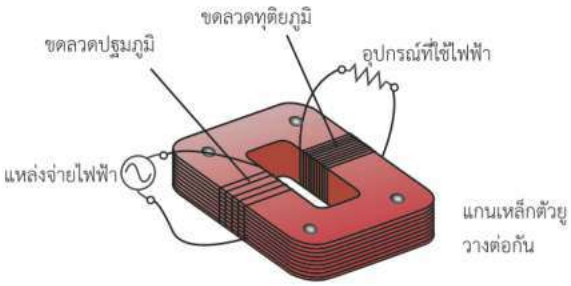
สถานีไฟฟ้าย่อยจะทำหน้าที่แปลงความต่างศักย์สูงให้มีความต่างศักย์ลดลงเหลือ 24 000 โวลต์ หรือ 12 000 โวลต์ และส่งผ่านระบบจำหน่ายไปตามพื้นที่ต่าง ๆ โดยจะแปลงค่าความต่างศักย์ ให้เหลือ 400 โวลต์ 3 เฟส ก่อนถูกนำไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม แต่สำหรับบ้านเรือน ความต่างศักย์จะถูกลดลงเหลือ 230 โวลต์ 1 เฟส

การเปลี่ยนความต่างศักย์ให้มีความเหมาะสมมีความสำคัญต่อการส่งพลังงานไฟฟ้าเป็นอย่างมาก การเปลี่ยนความต่างศักย์ไฟฟ้ามีวิธีการอย่างไรจะได้ศึกษาในหัวข้อต่อไป

หม้อแปลง

อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้เปลี่ยนความต่างศักย์หรืออีเอ็มเอฟของไฟฟ้ากระแสสลับ คือ **หม้อแปลง** (transformer) โดยมีทั้งแบบที่เปลี่ยนให้ความต่างศักย์สูงขึ้น และแบบที่เปลี่ยนความต่างศักย์ให้ต่ำลงเพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งานดังรูป 15.65 ก. หม้อแปลงประกอบด้วยขดลวดที่มีฉนวนหุ้มพันบนแกนเหล็ก 2 ขด ดังรูป 15.65 ข. และเขียนสัญลักษณ์แทนหม้อแปลงได้ดังรูป 15.65 ค.

ก. ตัวอย่างหม้อแปลง

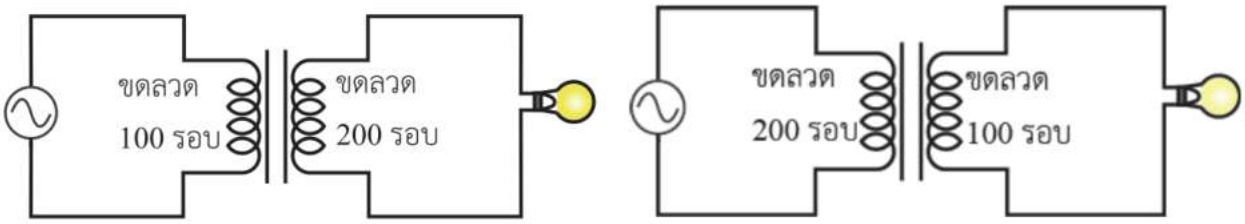


ข. แผนภาพส่วนประกอบหม้อแปลง

ค. สัญลักษณ์ของหม้อแปลงที่ใช้ในวงจรไฟฟ้า

รูป 15.65 หม้อแปลง

ขดลวดที่ต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้า เรียกว่า **ขดลวดปฐมภูมิ** (primary winding) ขดลวดที่ต่ออยู่กับอุปกรณ์ที่ใช้ไฟฟ้าเรียกว่า **ขดลวดทุติยภูมิ** (secondary winding) หากนำขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงต่อเข้ากับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ หลอดไฟฟ้าที่ต่ออยู่กับขดลวดทุติยภูมิจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร จะได้ศึกษาจากสถานการณ์ต่อไปนี้



ก. ขดลวด **200** รอบต่อกับหลอดไฟ ข. ขดลวด **100** รอบต่อกับหลอดไฟ

รูป 15.66 การจัดอุปกรณ์ทดสอบ

ต่อแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับเข้ากับขดลวด 100 รอบ และนำหลอดไฟต่อกับขดลวด 200 รอบ ดังรูป 15.66 ก. เปิดสวิตซ์ให้แหล่งกำเนิดไฟฟ้าทำงาน พบว่าหลอดไฟสว่าง แต่เมื่อสลับด้านโดยต่อแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับเข้ากับขดลวด 200 รอบ และนำหลอดไฟต่อกับขดลวด 100 รอบ ดังรูป 15.66 ข. เมื่อเปิดสวิตซ์ให้แหล่งกำเนิดไฟฟ้าทำงาน พบว่าหลอดไฟสว่าง แต่จะมีความสว่างน้อยกว่ากรณีก่อนหน้า

จากสถานการณ์ดังกล่าว พบว่าเมื่อต่อแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับเข้ากับขดลวดปฐมภูมิ จะเห็นว่าหลอดไฟที่ต่ออยู่กับขดลวดทุติยภูมิจะสว่างทั้งสองครั้ง แต่เมื่อหลอดไฟต่ออยู่กับขดลวด 200 รอบ จะมีความสว่างมากกว่า ตอนที่ต่ออยู่กับขดลวด 100 รอบ

ความสว่างของหลอดไฟขึ้นอยู่กับความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าจากขดลวดทุติยภูมิที่ผ่านหลอดไฟ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับจำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิอย่างไร ศึกษาได้ดังนี้

เนื่องจากขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิมีแกนเหล็กร่วมกัน ทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านขดลวดทั้งสอง มีอัตราการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็ก ($\Delta\phi$) เท่ากัน เมื่อกระแสไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลง จะทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กเปลี่ยนแปลงในขดลวดทั้งสอง เกิดอีเอ็มเอฟ $\mathcal{E}_1$ ที่ขดลวดปฐมภูมิ และอีเอ็มเอฟ $\mathcal{E}_2$ ที่ขดลวดทุติยภูมิ ซึ่งเกี่ยวข้องกับจำนวนรอบของขดลวดดังนี้

ถ้าขดลวดปฐมภูมิมีจำนวน N_1 รอบ และขดลวดทุติยภูมิมีจำนวน N_2 รอบ อีเอ็มเอฟที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กในขดลวดทั้งสองตามกฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ เป็นดังสมการ

ที่ขดลวดปฐมภูมิ $$\mathcal{E}_1 = N_1\left|\frac{\Delta\phi}{\Delta t}\right| \quad \text{(a)}$$

ที่ขดลวดทุติยภูมิ $$\mathcal{E}_2 = N_2\left|\frac{\Delta\phi}{\Delta t}\right| \quad \text{(b)}$$

จากสมการ (a) และ (b) จะได้ $$\frac{\mathcal{E}_2}{\mathcal{E}_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad (15.11)$$

ถ้าจำนวนรอบ $N_2 > N_1$ จะทำให้อีเอ็มเอฟหรือความต่างศักย์ทางด้านขดลวดทุติยภูมิมากกว่าทางด้านขดลวดปฐมภูมิ เรียกหม้อแปลงลักษณะนี้ว่า **หม้อแปลงขึ้น** (step-up transformer) ในลักษณะตรงข้ามกันนี้ ถ้า $N_2 < N_1$ จะได้อีเอ็มเอฟหรือความต่างศักย์ทางด้านขดลวดทุติยภูมิน้อยกว่าทางด้านขดลวดปฐมภูมิ เรียกหม้อแปลงนี้ว่า **หม้อแปลงลง** (step-down transformer)

ชวนคิด

หากเปลี่ยนแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งต่อเข้ากับขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลง เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงที่มีค่าคงตัว เมื่อเปิดสวิตช์ให้แหล่งกำเนิดไฟฟ้าทำงาน หลอดไฟที่ต่ออยู่กับขดลวดทุติยภูมิจะสว่างหรือไม่ เพราะเหตุใด

ตัวอย่าง 15.13 หม้อแปลงลูกหนึ่งมีขดลวด 2 ขด ที่มีจำนวนรอบ 600 รอบ และ 40 รอบ นำไปต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความต่างศักย์ 220 โวลต์ จงหาอีเอ็มเอฟที่เกิดขึ้นด้านขดลวดทุติยภูมิในกรณีที่ต่อแหล่งจ่ายไฟเข้ากับ

ก. ขดลวด 600 รอบ

ข. ขดลวด 40 รอบ

แนวคิด หาอีเอ็มเอฟ ด้านขดลวดทุติยภูมิจากความสัมพันธ์

$$\frac{\mathcal{E}_2}{\mathcal{E}_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

วิธีทำ ก. เมื่อต่อความต่างศักย์ 220 โวลต์ ที่ขดลวดด้าน 600 รอบ จากสมการ

$$\frac{\mathcal{E}_2}{\mathcal{E}_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

หรือ $$\mathcal{E}_2 = \frac{N_2}{N_1}\mathcal{E}_1$$

แทนค่า $$\mathcal{E}_2 = \frac{(40)(220\,\text{V})}{600}$$

$$= 14.67\,\text{V}$$

ข. ถ้าสลับด้าน โดยต่อด้านที่มี 40 รอบ เข้ากับอีเอ็มเอฟ 220 โวลต์ จากสมการ

$$\mathcal{E}_2 = \frac{N_2}{N_1}\mathcal{E}_1$$

แทนค่า $$\mathcal{E}_2 = \frac{(600)(220\,\text{V})}{40}$$

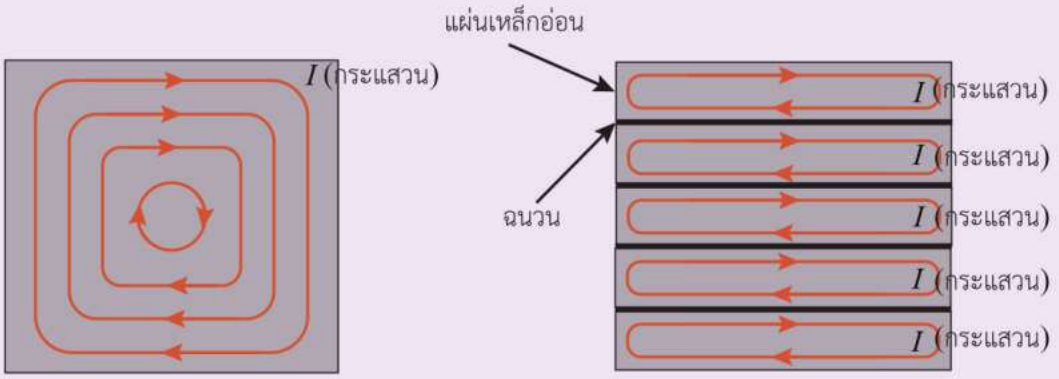
$$= 3300\,\text{V}$$

ตอบ ก. อีเอ็มเอฟด้านขดลวดทุติยภูมิ เท่ากับ 14.67 โวลต์

ข. อีเอ็มเอฟด้านขดลวดทุติยภูมิ เท่ากับ 3300 โวลต์

ความรู้เพิ่มเติม

เนื่องจากหม้อแปลงทั่วไปต้องมีแกนเหล็ก การเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กในขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิจะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้าในแกนเหล็กของหม้อแปลงเรียกว่า กระแสวน เป็นสาเหตุให้เกิดความร้อนขึ้นในแกนเหล็กซึ่งเป็นการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าในรูปความร้อน จึงทำให้กำลังไฟฟ้าที่ได้จากขดลวดทุติยภูมิน้อยกว่ากำลังไฟฟ้าที่ขดลวดปฐมภูมิเสมอ เพื่อลดการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าเป็นความร้อนในแกนเหล็กอันเนื่องจากกระแสวน จึงออกแบบแกนเหล็กให้มีกระแสวนน้อยที่สุด ซึ่งทำได้โดยใช้ **แผ่นเหล็กอ่อน** (soft iron) บางหลายๆ แผ่นซ้อนกัน โดยมีฉนวนบาง ๆ กั้นระหว่างแผ่นเหล็กอ่อนแต่ละแผ่นแทนการใช้แกนเหล็กทั้งแท่ง ทำให้เกิดกระแสวนน้อยกว่าแกนเหล็กทั้งแท่ง ดังรูป หม้อแปลงที่มีคุณภาพดีจะมีความร้อนดังกล่าวเกิดขึ้นน้อย



ก. แกนที่ทำจากเหล็กแท่ง

ข. แกนที่ทำจากแผ่นเหล็กซ้อนกันและมีฉนวนบางกั้นระหว่างแผ่น

รูป กระแสวนในแกนของหม้อแปลง

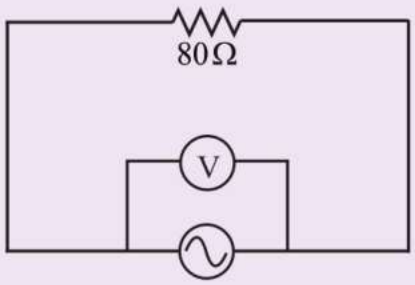
นอกจากกระแสวนเป็นสาเหตุให้แกนเหล็กร้อน ยังมีสาเหตุอื่นอีกเช่น **ฮีสเทอรีซีส** (hysteresis) ซึ่งจะได้ศึกษาในระดับที่สูงขึ้นไป

คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 15.5

1. เพราะเหตุใด ไฟฟ้ากระแสสลับที่เวลา $\frac{T}{4}$ กับ $\frac{3T}{4}$ จึงมีทิศทางตรงข้ามกัน
2. เหตุใดเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับจึงนิยมใช้หมุนแท่งแม่เหล็ก เพื่อให้ฟลักซ์แม่เหล็กตัดขดลวดตัวนำ
3. ในการสร้างหม้อแปลง เพราะเหตุใดการพันขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ จึงต้องพันบนแกนเหล็กร่วมกัน

แบบฝึกหัด 15.5

1. ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับที่มีกระแสไฟฟ้า i และเวลา t ตามสมการ $i = 2\sin 314t$ จงหา
   ก. กระแสไฟฟ้าสูงสุด
   ข. ความถี่
   ค. กระแสไฟฟ้ายังผล
2. ตัวต้านทานที่มีความต้านทาน 80 โอห์ม ต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับโดยมีโวลต์มิเตอร์อยู่ในวงจร ดังรูป



รูป ประกอบแบบฝึกหัด ข้อ 2

โวลต์มิเตอร์วัดความต่างศักย์ได้ 120 โวลต์ กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ผ่านตัวต้านทานนี้มีค่าเท่าใด

สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน

15.1 สนามแม่เหล็ก

- แม่เหล็ก เป็นวัตถุที่ดึงดูดกับสารแม่เหล็กได้ แท่งแม่เหล็กที่หมุนได้อย่างอิสระในแนวราบจะวางตัวในแนวเหนือ-ใต้เสมอ โดยปลายที่ชี้ไปทางทิศเหนือเรียกว่าขั้วเหนือ และปลายที่ชี้ไปทางทิศใต้เรียกว่าขั้วใต้ คุณสมบัติดังกล่าวนำมาประดิษฐ์เป็นเข็มทิศ เมื่อนำขั้วแม่เหล็กเข้าใกล้กัน ขั้วเหมือนกันจะผลักกัน ขั้วต่างกันจะดึงดูดกัน
- บริเวณที่มีสนามแม่เหล็กเป็นบริเวณที่มีแรงจากแม่เหล็กกระทำต่อสารแม่เหล็ก สามารถเขียนเส้นแทนสนามแม่เหล็ก เรียกว่า เส้นสนามแม่เหล็ก แสดงให้เห็นได้จากแนวการเรียงตัวของผงเหล็ก สนามแม่เหล็กจะมีทิศทางออกจากขั้วเหนือเข้าสู่ขั้วใต้ บริเวณที่มีเส้นสนามแม่เหล็กหนาแน่นแสดงว่าสนามแม่เหล็กบริเวณนั้นมีค่ามาก เช่นปลายขั้วแม่เหล็ก
- ฟลักซ์แม่เหล็ก คือ จำนวนเส้นสนามแม่เหล็กที่ผ่านพื้นที่ที่พิจารณา โดยอัตราส่วนระหว่างฟลักซ์แม่เหล็กต่อพื้นที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก เรียกว่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ซึ่งเท่ากับขนาดสนามแม่เหล็ก ตามสมการ $B = \frac{\phi}{A}$
- เมื่อมีกระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำจะเกิดสนามแม่เหล็กรอบลวดตัวนำในลักษณะดังนี้

  กระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำเส้นตรง จะเกิดสนามแม่เหล็กรอบลวดตัวนำ โดยทิศทางของสนามแม่เหล็กหาได้โดย ใช้นิ้วหัวแม่มือของมือขวาชี้ไปตามทิศทางของกระแสไฟฟ้า จากนั้นกำมือขวารอบลวดตัวนำตรง ทิศทางการวนของนิ้วทั้งสี่จะแสดงทิศทางของสนามแม่เหล็ก

  กระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำวงกลม สนามแม่เหล็กที่ผ่านระนาบขดลวดตัวนำมีทิศตั้งฉากกับระนาบขดลวดตัวนำ หาทิศทางของสนามแม่เหล็กได้โดย กำมือขวาบนระนาบขดลวดตัวนำ โดยให้นิ้วทั้งสี่วนตามทิศทางของกระแสไฟฟ้าในลวดตัวนำวงกลม นิ้วหัวแม่มือจะชี้ไปตามทิศทางของสนามแม่เหล็กที่ผ่านพื้นที่ขดลวด

  กระแสไฟฟ้าผ่านโซเลนอยด์ สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นคล้ายสนามแม่เหล็กจากแท่งแม่เหล็ก ทิศทางของสนามแม่เหล็กบริเวณแกนของโซเลนอยด์หาได้โดย ใช้มือขวาวนนิ้วทั้งสี่ไปตามทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่ผ่านโซเลนอยด์ นิ้วหัวแม่มือจะชี้ทิศทางของสนามแม่เหล็ก

15.2 แรงแม่เหล็ก

- อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า q เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v ในทิศตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก $\vec{B}$ จะมีแรงแม่เหล็ก $\vec{F}$ กระทำต่ออนุภาคมีขนาด $F = qvB$ แต่ถ้าเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v มีทิศทางทำมุม θ กับสนามแม่เหล็ก $\vec{B}$ จะมีแรงแม่เหล็ก $\vec{F}$ กระทำต่ออนุภาคมีขนาด $F = qvB\sin\theta$ หาทิศทางโดยใช้มือขวา ชี้นิ้วทั้งสี่ไปตามทิศทางของความเร็ว แล้ววนนิ้วทั้งสี่ไปหาทิศทางสนามแม่เหล็ก นิ้วหัวแม่มือจะชี้ทิศทางของแรงที่กระทำต่อประจุบวก สำหรับประจุลบแรงจะมีทิศทางตรงข้ามกับนิ้วหัวแม่มือ โดยแรงจะมีทิศทางตั้งฉากกับความเร็วของอนุภาคและสนามแม่เหล็ก
- อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าอยู่นิ่ง ในสนามแม่เหล็ก หรือเคลื่อนที่ในแนวขนานกับทิศทางของสนามแม่เหล็กจะไม่มีแรงแม่เหล็กกระทำกับอนุภาคนั้น
- อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า q มวล m เคลื่อนที่อยู่ในสนามแม่เหล็ก $\vec{B}$ ด้วยความเร็ว v มีทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก แรงแม่เหล็ก $\vec{F}$ ทำให้อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่แบบวงกลมที่มีรัศมีการเคลื่อนที่ ตามสมการ $r = \frac{mv}{qB}$ โดยทิศทางการเคลื่อนที่แบบวงกลมของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าลบจะมีทิศทางตรงข้ามกับอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าบวก
- ลวดตัวนำเส้นตรงมีกระแสไฟฟ้าผ่าน I วางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก $\vec{B}$ โดยมีความยาวของลวดตัวนำที่อยู่ในสนามแม่เหล็ก l จะมีขนาดแรงแม่เหล็ก $F = IlB$ กระทำต่อลวดนั้นแต่ถ้าลวดตัวนำเส้นตรงวางในทิศทางทำมุม θ กับสนามแม่เหล็ก จะมีขนาดของแรงแม่เหล็ก $F = ILB\sin\theta$ หาทิศทางของแรงโดยใช้มือขวา ชี้นิ้วทั้งสี่ไปตามทิศทางของกระแสไฟฟ้า แล้ววนนิ้วทั้งสี่ไปหาทิศทางสนามแม่เหล็ก นิ้วหัวแม่มือจะชี้ทิศทางของแรง โดยแรงแม่เหล็กจะมีทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กและกระแสไฟฟ้าที่ผ่านลวดตัวนำ
- ลวดตัวนำสองเส้นที่วางขนานกันและมีกระแสไฟฟ้าผ่าน จะเกิดแรงกระทำระหว่างลวดตัวนำทั้งสอง โดยจะเป็นแรงดึงดูด เมื่อกระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำทั้งสองในทิศทางเดียวกันและจะเป็นแรงผลัก เมื่อกระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำทั้งสองในทิศทางตรงข้ามกัน

15.3 โมเมนต์ของแรงคู่ควบกระทำต่อขดลวดที่มีกระแสไฟฟ้าผ่าน เมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก

- ขดลวดตัวนำ N รอบ พื้นที่ A ที่มีกระแสไฟฟ้าผ่าน I ขณะวางให้ระนาบขดลวดขนานกับสนามแม่เหล็ก B จะเกิดโมเมนต์ของแรงคู่ควบกระทำต่อขดลวดมีขนาดมากที่สุด ตามสมการ $M = NIAB$ ขณะที่ระนาบขดลวดทำมุม θ กับสนามแม่เหล็ก $\vec{B}$ โมเมนต์ของแรงคู่ควบกระทำต่อขดลวดจะมีขนาดเป็น $M = NIAB\cos\theta$
- แกลแวนอมิเตอร์เป็นเครื่องวัดไฟฟ้า ประกอบด้วยขดลวดที่ยึดติดกับแกนหมุนได้คล่อง ปลายแกนติดกับสปริงก้นหอย และเข็มชี้ติดกับขดลวดและแกน อยู่ในสนามแม่เหล็ก เมื่อมีกระแสไฟฟ้าผ่านขดลวด จะเกิดโมเมนต์ของแรงคู่ควบ ทำให้ขดลวดหมุนพร้อมกับเข็มชี้เบนไป จนกระทั่งโมเมนต์ของแรงคู่ควบที่กระทำกับขดลวดเท่ากับโมเมนต์ของแรงบิดกลับของสปริง ก้นหอย ขดลวดก็จะหยุดหมุนและเข็มชี้ก็จะหยุดนิ่ง มุมที่เข็มชี้เบนไปขึ้นกับกระแสไฟฟ้าที่ผ่านขดลวด
- มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล ประกอบด้วยขดลวดที่ยึดติดกับแกนซึ่งหมุนได้คล่องอยู่ในสนามแม่เหล็ก มีส่วนที่ทำหน้าที่เปลี่ยนทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่ผ่านขดลวด ได้แก่ คอมมิวเทเตอร์วงแหวนผ่าซีกและแปรงสัมผัส เมื่อมีกระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดจะเกิดโมเมนต์แรงคู่ควบหมุนขดลวดอย่างต่อเนื่องในทิศทางเดิม

15.4 กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำและอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำ

- เมื่อฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดขดลวดตัวนำเปลี่ยนแปลง จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าในขดลวด เรียกกระแสไฟฟ้านี้ว่า กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำและเรียกการทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าในตัวนำด้วยสนามแม่เหล็กว่า การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า
- ฟาราเดย์เสนอกฎการเหนี่ยวนำสรุปได้ว่า เมื่อมีฟลักซ์แม่เหล็กเปลี่ยนแปลงตัดขดลวดตัวนำ ทำให้เกิดอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำในขดลวดตัวนำนั้น ซึ่งมีค่าขึ้นกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กที่ตัดขดลวดตัวนำ ส่วนทิศทางของกระแสเหนี่ยวนำเป็นไปตามกฎของเลนซ์ ทำให้สมการอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำตามกฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์พร้อมกับกฎของเลนซ์เขียนแทนได้ด้วยสมการ $\varepsilon = -\frac{\Delta\phi_B}{\Delta t}$ เครื่องหมายลบเป็นไปตามกฎของเลนซ์หมายถึงกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งเกิดจากอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำ ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กในทิศทางต้านการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กที่มาเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

- เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าประกอบด้วย ขดลวดพันอยู่บนแกนที่หมุนได้คล่องอยู่ในสนามแม่เหล็ก ปลายขดลวดทั้งสองต่ออยู่กับวงแหวนซึ่งสัมผัสกับแปรงสัมผัส เมื่อหมุนขดลวด จะทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านขดลวดมีการเปลี่ยนแปลง เกิดอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำในขดลวด และเกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อต่อแปรงกับอุปกรณ์ภายนอก จะเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงเมื่อใช้วงแหวนผ่าซีกสัมผัสกับแปรงสัมผัส และเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับเมื่อใช้วงแหวนแยกสัมผัสกับแปรงสัมผัส
- ความรู้เกี่ยวกับอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำถูกนำไปใช้อธิบายอุปกรณ์ต่างๆ เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบลลัสต์แบบขดลวดของหลอดฟลูออเรสเซนต์ มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ กีตาร์ไฟฟ้า เตาแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

15.5 ไฟฟ้ากระแสสลับ

- เมื่อนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ ไปต่อกับตัวต้านทาน จะมีกระแสไฟฟ้า i ผ่านตัวต้านทานและความต่างศักย์ v ระหว่างปลายของตัวต้านทานเป็น

$$i = I_0 \sin(\omega t) \quad \text{และ} \quad v = V_0 \sin(\omega t)$$

เมื่อ I_0 และ V_0 เป็นกระแสไฟฟ้าสูงสุดและความต่างศักย์สูงสุด

- กระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของไฟฟ้ากระแสสลับ มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา จึงวัดหรือระบุเป็นค่าคงตัวโดย ใช้ค่ายังผลหรือค่ามิเตอร์ ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยแบบรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย คำนวณได้จากสมการ

$$I_{\text{rms}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$$

$$V_{\text{rms}} = \frac{V_0}{\sqrt{2}}$$

เมื่อ I_{rms} และ V_{rms} เป็นค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสไฟฟ้า และค่าอาร์เอ็มเอสของความต่างศักย์ตามลำดับ

- เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ประกอบด้วยขดลวดตัวนำ 3 ชุด โดยแต่ละชุดวางทำมุม 120 องศา ซึ่งกันและกัน เมื่อหมุนแท่งแม่เหล็ก ฟลักซ์แม่เหล็กจะตัดผ่านขดลวดแต่ละชุด จะได้ไฟฟ้ากระแสสลับจากขดลวดแต่ละชุดมีเฟสต่างกัน 120 องศา มีประสิทธิภาพในการผลิตและการส่งพลังงานไฟฟ้ามากกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 เฟส

- การส่งกำลังไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าไปยังสู่ผู้ใช้นั้น จะเกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในสายไฟฟ้า เพื่อลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าดังกล่าว จะต้องลดกระแสไฟฟ้าที่ส่ง โดยการเพิ่มความต่างศักย์หรืออีเอ็มเอฟให้สูงขึ้นก่อนทำการส่งกำลังไฟฟ้า แล้วจึงลดความต่างศักย์ให้ต่ำลงจนเหมาะกับการใช้งาน โดยใช้หม้อแปลง
- หม้อแปลงประกอบด้วยขดลวด 2 ชุด พันอยู่บนแกนเหล็กเดียวกัน โดยขดลวดที่ใช้ต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเรียกว่า ขดลวดปฐมภูมิและขดลวดที่ใช้ต่อกับเครื่องใช้ไฟฟ้า เรียกว่า ขดลวดทุติยภูมิ เมื่อต่อขดลวดปฐมภูมิกับไฟฟ้ากระแสสลับจะเกิดอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำในขดลวดทุติยภูมิ ซึ่งสัมพันธ์กับจำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ N_1 และทุติยภูมิ N_2 ตามสมการ

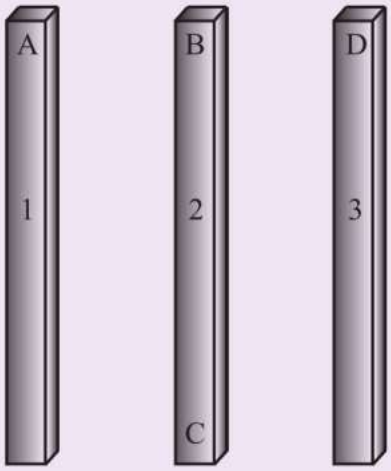
$$\frac{\mathcal{E}_2}{\mathcal{E}_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

เมื่อ $\mathcal{E}_1$ คือ อีเอ็มเอฟหรือความต่างศักย์ที่ขดลวดปฐมภูมิ
$\mathcal{E}_2$ คือ อีเอ็มเอฟหรือความต่างศักย์ที่ขดลวดทุติยภูมิ

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 15

คำถาม

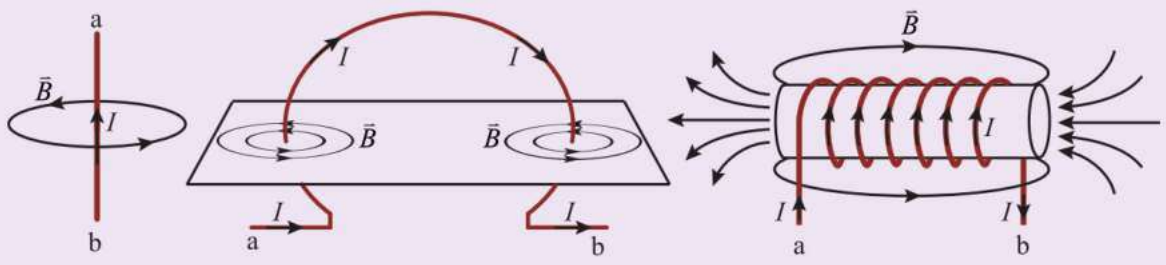
1. แท่งโลหะสามแท่งดังรูป



รูป ประกอบคำถามข้อ 1

เมื่อนำปลายเข้าใกล้กัน ผลคือปลาย A กับ B ดึงดูดกัน ปลาย A กับ C ดึงดูดกัน แต่ปลาย C กับ D ผลักกัน จากข้อมูลนี้ แท่งโลหะใดบ้างเป็นแท่งแม่เหล็ก

2. สนามแม่เหล็กของลวดตัวนำเส้นตรง ลวดตัวนำวงกลม และโซเลนอยด์ เมื่อมีกระแสไฟฟ้า I ผ่านมีลักษณะดังรูป

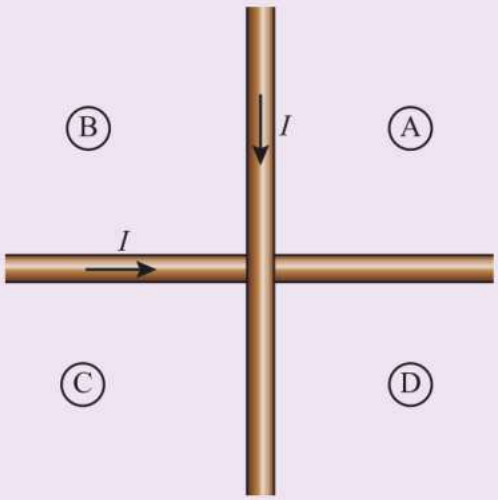


ก ข ค

รูป ประกอบคำถามข้อ 2

ทิศทางของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าในลวดตัวนำ รูปใดที่**ไม่**ถูกต้อง

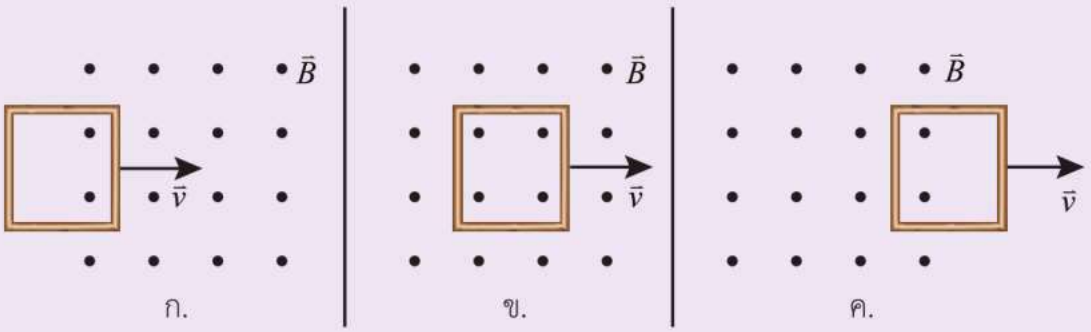
3. ลวด 2 เส้น วางตั้งฉากซึ่งกันและกัน โดยใกล้กันมากแต่ไม่สัมผัสกัน และมีกระแสไฟฟ้า I ผ่านเส้นลวดทั้งสองเท่ากันและมีทิศทาง ดังรูป



รูป ประกอบคำถามข้อ 3

ตำแหน่งที่สนามแม่เหล็กมีค่าเป็นศูนย์อยู่ในบริเวณใดบ้าง

4. ขดลวดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีระนาบตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอ $\vec{B}$ กำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v ดังรูป ก. ข. และ ค.

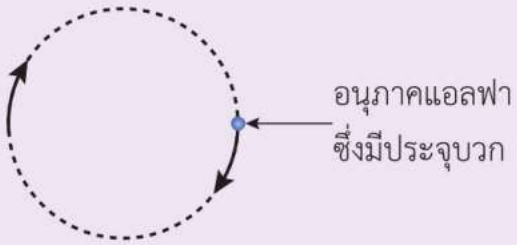


รูป ประกอบคำถามข้อ 4

จงบอกทิศของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ I_{ind} ที่เกิดขึ้นในแต่ละรูป

5. อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า q เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v ในสนามแม่เหล็ก $\vec{B}$ สม่ำเสมอเพียงสนามเดียว และมีแรง $\vec{F}_B$ เนื่องจากสนามแม่เหล็กกระทำไม่เท่ากับศูนย์ เพราะเหตุใดจึงมีอัตราเร็วคงตัว

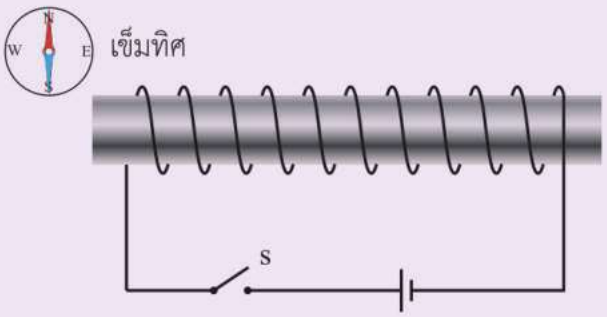
6. อนุภาคแอลฟาซึ่งมีประจุไฟฟ้าบวกเคลื่อนที่ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอ ถ้าแนวการเคลื่อนที่เป็นวงกลมในทิศตามเข็มนาฬิกา ดังรูป



รูป ประกอบคำถามข้อ 6

สนามแม่เหล็กมีทิศทางอย่างไร ให้เหตุผลประกอบ

7. การวางตัวของเข็มทิศก่อนเปิดสวิตช์ S เป็น ดังรูป



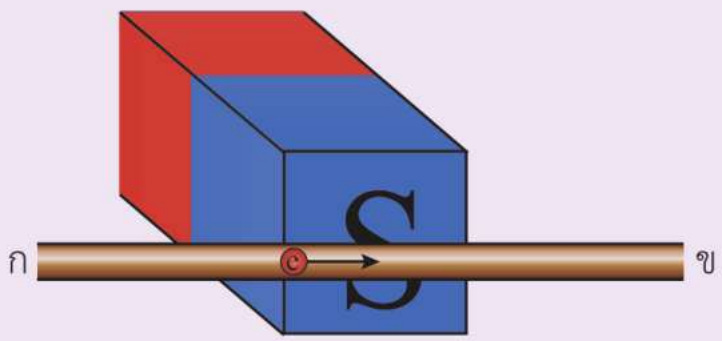
รูป ประกอบคำถามข้อ 7

เมื่อเปิดสวิตช์ S เข็มทิศจะวางตัวในลักษณะใด

8. "ลวดตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็กที่สม่ำเสมอ อาจไม่ถูกแรงแม่เหล็กกระทำ" คำกล่าวนี้ถูกหรือไม่ จงอธิบาย
9. เพราะเหตุใดลวดขนานสองเส้นที่มีกระแสไฟฟ้าในทิศทางตรงข้ามกัน จึงผลักกัน
10. ปล่อยแท่งตัวนำจากที่สูงลงบนพื้น โดยแท่งตัวนำวางตัวในแนวราบและตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กซึ่งขนานกับพื้น จะมีปรากฏการณ์ใดเกิดขึ้นที่ตัวนำนั้นบ้าง
11. เมื่อขดลวดตัวนำปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเริ่มหมุนจากตำแหน่งที่ระนาบของขดลวดตั้งฉากกับทิศทางของสนามแม่เหล็กมายังตำแหน่งที่ระนาบของขดลวดขนานกับทิศทางของสนามแม่เหล็กจะเกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดนี้หรือไม่ เพราะเหตุใด
12. เมื่อมอเตอร์หมุนช้ากว่าปกติ ถ้าปล่อยให้มอเตอร์ทำงานต่อไป มอเตอร์จะเสียหายหรือไม่ เพราะเหตุใด

ปัญหา

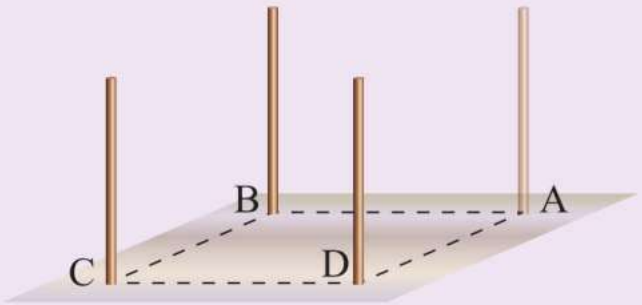
1. อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า $+3.2 \times 10^{-19}$ คูลอมบ์ เคลื่อนที่เข้าไปในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กขนาด 1.2 เทสลา ด้วยความเร็ว 2.5×10^{5} เมตรต่อวินาที ในทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก จงหาขนาดของแรงแม่เหล็กที่กระทำต่ออนุภาคนี้
2. อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 5.0×10^{5} เมตรต่อวินาที ในทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอ ถูกแรงแม่เหล็กกระทำ 4.0×10^{-6} นิวตัน จงหาขนาดของสนามแม่เหล็ก
3. อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 2.0×10^{6} เมตรต่อวินาที ในทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอขนาด 5.0×10^{-2} เทสลา และมีแรงขนาด 4.8×10^{-14} นิวตัน กระทำต่ออนุภาค จงหาขนาดของประจุไฟฟ้า
4. อิเล็กตรอนตัวหนึ่งถูกทำให้เคลื่อนที่จากหยุดนิ่งด้วยความต่างศักย์ 2.84×10^{-2} โวลต์ หลังจากนั้นเข้าไปในสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอขนาด 4.0 เทสลา โดยมีทิศทางการเคลื่อนที่ตั้งฉากกับทิศทางของสนามแม่เหล็ก จะมีขนาดของแรงกระทำต่ออิเล็กตรอนเท่าใด
5. อนุภาคแอลฟามีมวล 6.68×10^{-27} กิโลกรัม และมีประจุ $+3.20 \times 10^{-19}$ คูลอมบ์ เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 3.0×10^{6} เมตรต่อวินาที ในทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอขนาด 1.0 เทสลา เส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคแอลฟาเป็นวงกลมที่มีรัศมีเท่าใด
6. ดิวเทอรอนซึ่งเป็นนิวเคลียสของดิวเทอเรียมมีมวล 3.34×10^{-27} กิโลกรัม และประจุ $+1.60 \times 10^{-19}$ คูลอมบ์ เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 4.0×10^{6} เมตรต่อวินาที ในทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอ ทำให้เส้นทางการเคลื่อนที่ของดิวเทอรอนเป็นวงกลมรัศมี 10 เซนติเมตร จงหาขนาดของสนามแม่เหล็ก
7. ลวดทองแดงตรง กข มีมวลน้อยมาก วางอยู่ใกล้แท่งแม่เหล็ก ถ้ามีกระแสอิเล็กตรอนผ่านลวดทองแดงนี้ ดังรูป



รูป ประกอบปัญหาข้อ 7

แรงแม่เหล็กกระทำต่อลวดทองแดงนี้มีทิศทางใด

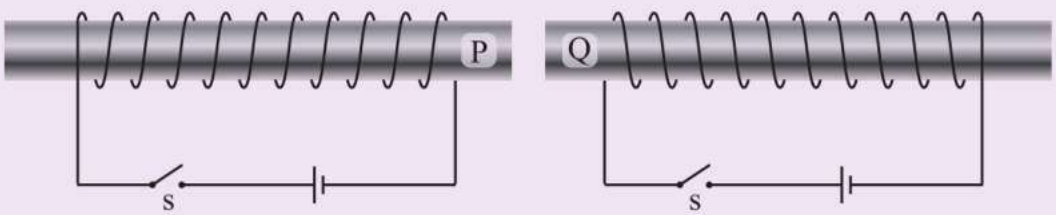
8. วางลวดตัวนำขนานกันและตั้งฉากกับพื้นราบที่จุด B C และ D และตรึงไว้แน่น ถ้านำลวดอีกเส้นหนึ่งมาวางไว้ที่จุด A ขนานกับลวดทั้งสาม โดย ABCD เป็นรูปสี่เหลียมจัตุรัส ดังรูป



รูป ประกอบปัญหาข้อ 8

ถ้ามีกระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำทั้ง 4 ขนาดเท่ากัน ในทิศทางเดียวกัน แรงลัพธ์ที่กระทำต่อลวดที่วางที่จุด A มีทิศทางใด โดยแรงระหว่างลวดตัวนำขนานที่มีกระแสไฟฟ้าแปรผันตรงกับกระแสไฟฟ้าแต่แปรผกผันกันระยะห่างระหว่างเส้นลวด

9. แท่งเหล็กอ่อน P และ Q วางอยู่ใกล้กัน มีลวดพันไว้โดยรอบและต่อกับวงจรไฟฟ้า ดังรูป ซ้ายและขวาตามลำดับ



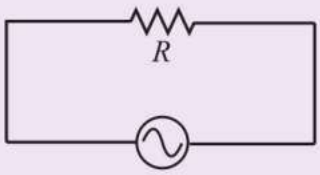
รูป ประกอบปัญหาข้อ 9

ก. เมื่อเปิดสวิตซ์ S ในรูปซ้าย เหล็กอ่อน P และ Q จะเกิดแรงดึงดูดหรือแรงผลักกัน ให้เหตุผลประกอบ

ข. เมื่อเปิดสวิตซ์ S ในทั้งสองรูปพร้อมกัน เหล็กอ่อน P และ Q จะเกิดแรงดึงดูดหรือแรงผลัก ให้เหตุผลประกอบ

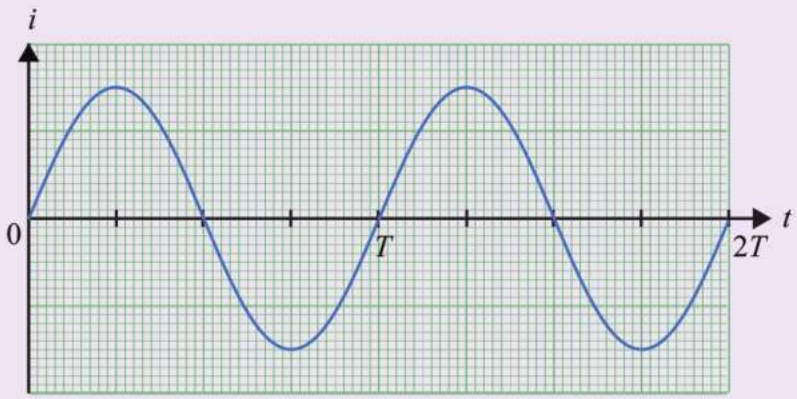
10. ขดลวดระนาบมีพื้นที่ 800 ตารางเซนติเมตร จำนวน 20 รอบ และระนาบของขดลวดขนานกับสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอมีขนาด 0.3 เทสลา ถ้ามีกระแสไฟฟ้าผ่าน 0.5 แอมแปร์ ขนาดของโมเมนต์ของแรงคู่ควบที่กระทำต่อขดลวดมีค่าเท่าใด

11. ขดลวดสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีพื้นที่ 120 ตารางเซนติเมตร จำนวน 40 รอบ มีกระแสไฟฟ้าผ่าน 2 แอมแปร์ และอยู่ในสนามแม่เหล็กขนาด 0.25 เทสลา โดยระนาบของขดลวดทำมุม 60 องศา กับสนามแม่เหล็ก จงหาขนาดของโมเมนต์ของแรงคู่ควบที่กระทำต่อขดลวด
12. ขดลวดตัวนำรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 3×5 ตารางเซนติเมตร จำนวน 20 รอบ อยู่ในสนามแม่เหล็กขนาดสม่ำเสมอ 0.5 เทสลา โดยระนาบของขดลวดอยู่ในแนวขนานกับสนามแม่เหล็กและด้านของขดลวดที่มีความยาว 5 เซนติเมตร ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก เมื่อให้กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ ผ่านขดลวดนี้ จงหาขนาดของแรงที่กระทำต่อขดลวดแต่ละด้านและขนาดของโมเมนต์ของแรงคู่ควบที่กระทำต่อขดลวด
13. ตัวต้านทาน R ต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ ดังรูป ก.

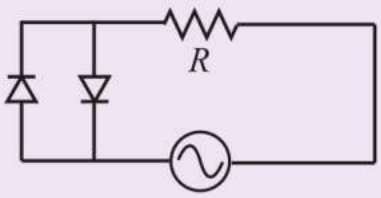


รูป ก.

กราฟระหว่างกระแสไฟฟ้า i ที่ผ่านตัวต้านทาน R ที่เวลา t ใด ๆ เป็นดังนี้

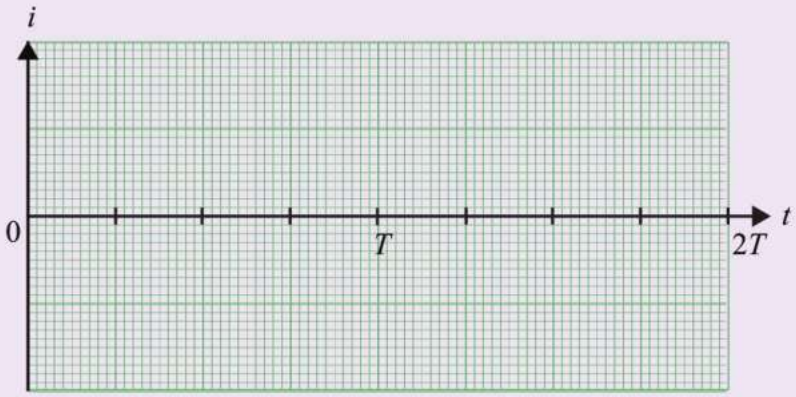


ถ้าใส่ไดโอดเข้าไปในวงจร ดังรูป ข. (ให้ถือว่าความต้านทานของไดโอดเป็นศูนย์ ในขณะนำไฟฟ้า)

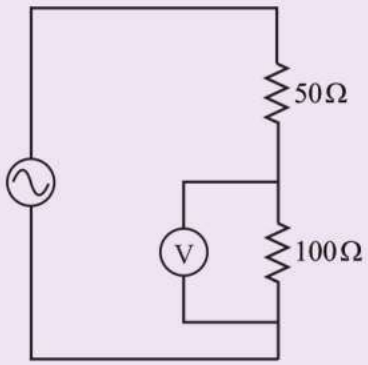


รูป ข.

จงเขียนกราฟระหว่างกระแสไฟฟ้า i ที่ผ่านตัวต้านทาน R ที่เวลา t ใด ๆ ลงในรูปที่กำหนดให้



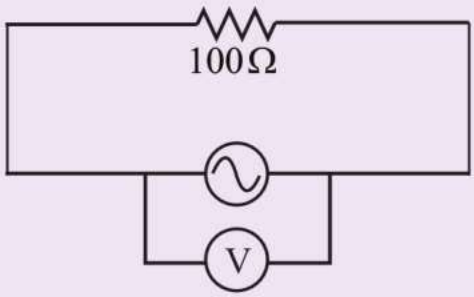
14. ตัวต้านทานที่มีความต้านทาน 50 และ 100 โอห์ม ต่ออนุกรมกัน แล้วต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ ดังรูป



รูป ประกอบปัญหาข้อ 14

ถ้ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ผ่านความต้านทาน 50 โอห์ม มีค่า 0.8 แอมแปร์ โวลต์มิเตอร์ V อ่านค่าได้เท่าใด

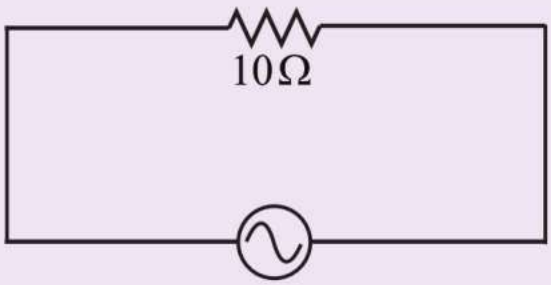
15. ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ ดังรูป



รูป ประกอบปัญหาข้อ 15

ถ้าโวลต์มิเตอร์ V อ่านความต่างศักย์อาร์เอ็มเอสได้ 200 โวลต์ กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ผ่านตัวต้านทานที่มีความต้านทาน 100 โอห์ม มีค่าเท่าใด

16. วงจรไฟฟ้ากระแสสลับที่มีตัวต้านทานที่มีความต้านทาน 10 โอห์ม ต่ออยู่ในวงจร ดังรูป



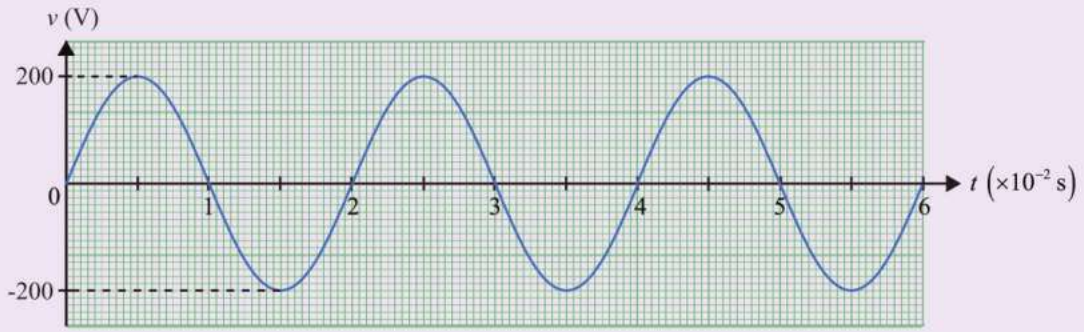
รูป ประกอบปัญหาข้อ 16

ถ้ากระแสไฟฟ้าในวงจรเป็นไปตามสมการ $i = 2\sin(100\pi t)$ จงหา

ก. ความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้จากแหล่งจ่ายไฟฟ้า

ข. สมการความต่างศักย์ที่เป็นฟังก์ชันกับเวลา

17. ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ v ที่เวลา t ใด ๆ ของไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นดังกราฟ

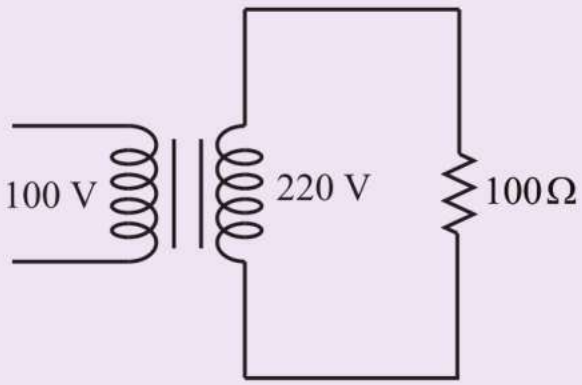


รูป ประกอบปัญหาข้อ 17

จงหาความต่างศักย์สูงสุด ความต่างศักย์อาร์เอ็มเอส คาบ และความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับ

18. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้กระแสไฟฟ้าตามสมการ $i = 20\sin\omega t$ เมื่อ i มีหน่วยเป็นแอมแปร์ และ t มีหน่วยเป็นวินาที จงหาค่า i เมื่อ $t = 0$ $\frac{\pi}{2\omega}$ $\frac{\pi}{\omega}$ $\frac{3\pi}{2\omega}$ และ $\frac{2\pi}{\omega}$ และเขียนกราฟระหว่าง i กับ t

19. วงจรหม้อแปลงอุดมคติ (ไม่คำนึงถึงการสูญเสียพลังงาน) ต่อกับตัวต้านทาน ดังรูป

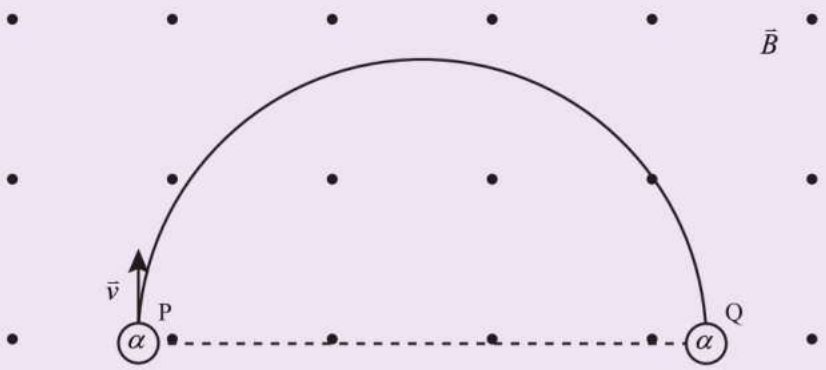


รูป ประกอบปัญหาข้อ 19

ถ้าต่อฟิวส์ที่ขดลวดปฐมภูมิจะต้องมีขนาดที่เหมาะสมกี่แอมแปร์

ปัญหาท้าทาย

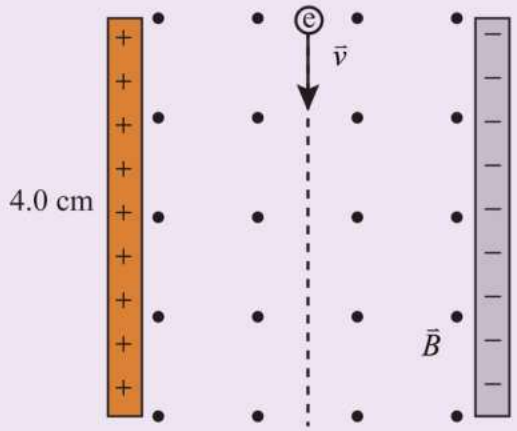
20. อนุภาคแอลฟามีประจุ $+2e$ เคลื่อนที่จากจุด P ด้วยความเร็ว v เข้าไปในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอ $\vec{B}$ โดย v มีทิศทางตั้งฉากกับ $\vec{B}$ แล้วออกจากสนามแม่เหล็กที่จุด Q ทำให้เส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคแอลฟาในสนามแม่เหล็กเป็นครึ่งวงกลม ดังรูป



รูป ประกอบปัญหาท้าทายข้อ 20

ถ้าประจุต่อมวลของอนุภาคแอลฟาเท่ากับ 4.79×10^{7} คูลอมบ์ต่อกิโลกรัม และสนามแม่เหล็กมีขนาด 4.0×10^{-6} เทสลา จงหาเวลาที่อนุภาคแอลฟาใช้ในการเคลื่อนที่จากจุด P ไปยังจุด Q

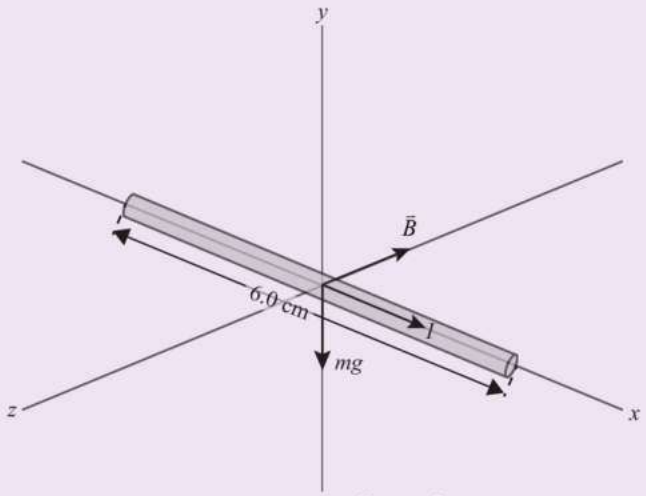
21. โปรตอนมีมวล 1.67×10^{-27} กิโลกรัม และประจุ 1.60×10^{-19} คูลอมบ์ เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v ในทิศ $+x$ เข้าไปในสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอขนาด 6.68×10^{-5} เทสลา ซึ่งมีทิศทางขนานกับแกน $+y$ ทำให้โปรตอนเคลื่อนที่เป็นวงกลมรัศมี 20 เซนติเมตร
    ก. การเคลื่อนที่เป็นวงกลมของโปรตอนอยู่ในระนาบใด
    ข. ขนาดของ v มีค่าเท่าใด
22. อิเล็กตรอนมีมวล 9.10×10^{-31} กิโลกรัม และประจุ -1.60×10^{-19} คูลอมบ์ เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v เข้าไปในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอขนาด 4.0×10^{5} นิวตันต่อคูลอมบ์ ระหว่างแผ่นคู่ขนานที่ยาว 4.0 เซนติเมตร สนามแม่เหล็กสม่ำเสมอขนาด 0.50 เทสลา และมีทิศทางดังรูป



รูป ประกอบปัญหาท้าทายข้อ 22

ถ้าอิเล็กตรอนไม่มีการเบี่ยงเบนจากแนวเดิม จงหา
    ก. ขนาดของความเร็วของอิเล็กตรอน
    ข. เวลาที่อิเล็กตรอนใช้ในการเคลื่อนที่ตลอดความยาวของแผ่นคู่ขนานในหน่วยนาโนวินาที
23. โปรตอนมีมวล 1.67×10^{-27} กิโลกรัม และประจุ $+1.60 \times 10^{-19}$ คูลอมบ์ ถูกเร่งจากหยุดนิ่งผ่านความต่างศักย์ 640 โวลต์ แล้วจึงเคลื่อนเข้าไปในบริเวณสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอในทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก ทำให้เส้นทางการเคลื่อนที่เป็นวงกลมรัศมี 4.0 เซนติเมตร จงหา
    ก. ขนาดของความเร็วของโปรตอน
    ข. ขนาดสนามแม่เหล็ก

24. เส้นลวดตัวนำมีมวล 10 กรัม และยาว 6.0 เซนติเมตร วางตัวในแนวแกน x อยู่ในสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอขนาด 0.4 เทสลา มีทิศ $-z$ ดังรูป



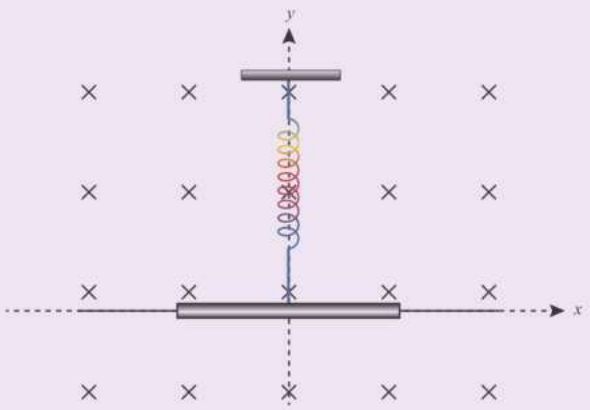
รูป ประกอบปัญหาท้าทายข้อ 24

ถ้ามีกระแสไฟฟ้า 5.0 แอมแปร์ ผ่านเส้นลวดตัวนำในทิศ $+x$ และค่าความเร่งโน้มถ่วงมีค่าเท่ากับ 9.8 เมตรต่อวินาทีกำลังสอง

ก. จงหาขนาดแรงแม่เหล็กที่กระทำต่อลวดตัวนำ

ข. เส้นลวดตัวนำกำลังเคลื่อนที่ทิศทางใด ด้วยความเร่งเท่าใด

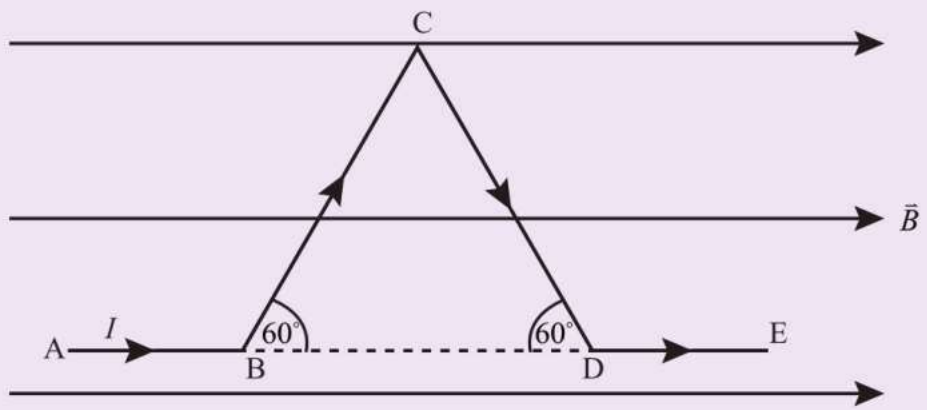
25. ลวดตัวนำเส้นหนึ่งมีมวล 25 กรัม และยาว 10 เซนติเมตร แขวนจุดกึ่งกลางของลวดไว้กับสปริงพลาสติกที่มีค่าคงตัวสปริง k ทำให้สปริงยืดออกเล็กน้อยและลวดตัวนำวางตัวในแนวแกน x อยู่ในสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอขนาด 0.4 เทสลา ที่มีทิศทางชี้เข้าตั้งฉากกับกระดาษ ดังรูป



รูป ประกอบปัญหาท้าทายข้อ 25

เมื่อให้กระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำ 8.0 แอมแปร์ ในทิศทาง $+x$ แรงแม่เหล็กจะทำให้สปริงหดกลับขึ้นไปเป็นระยะ 1.0 เซนติเมตร จงหาค่าคงตัวสปริง k (ไม่คำนึงถึงน้ำหนักของสายไฟ)

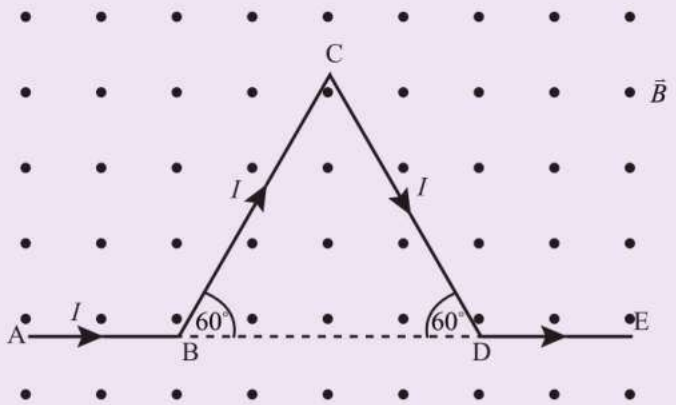
26. ลวดตัวนำยาว 15 เซนติเมตร วางตัวในแนวแกน x โดยจุดกึ่งกลางอยู่ที่จุดกำเนิด ถ้ามีสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอ $\vec{B}$ ในระนาบ xy โดย $\vec{B}$ มีองค์ประกอบแนวแกน x และ y เท่ากับ 0.40 และ 0.30 เทสลา ตามลำดับ เมื่อกระแสไฟฟ้า 6.0 แอมแปร์ผ่านขดลวดตัวนำในทิศ $+x$ จงหาขนาดและทิศทางของแรงแม่เหล็กที่กระทำต่อลวดตัวนำ
27. ลวดตัวนำยาว l เส้นหนึ่งวางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอขนาด 0.80 เทสลา เมื่อมีกระแสไฟฟ้า I ผ่านลวดตัวนำนี้ ทำให้เกิดแรงต่อหนึ่งหน่วยความยาวที่กระทำต่อลวดตัวนำมีค่า 20 นิวตันต่อเมตร จงหาค่าของ I
28. สนามแม่เหล็กสม่ำเสมอขนาด 0.40 เทสลา ผ่านลวดตัวนำ ABCDE ในแนวขนานกับระนาบของลวดตัวนำ ดังรูป



รูป ประกอบปัญหาท้าทายข้อ 28

ถ้า AB และ DE ยาว 10 เซนติเมตรเท่ากัน ส่วน BC และ CD ยาว 20 เซนติเมตรเท่ากัน เมื่อมีกระแสไฟฟ้า I เท่ากับ 3 แอมแปร์ ผ่านลวดตัวนำนี้ จงหาแรงลัพธ์ของแรงแม่เหล็กที่กระทำต่อลวดตัวนำ

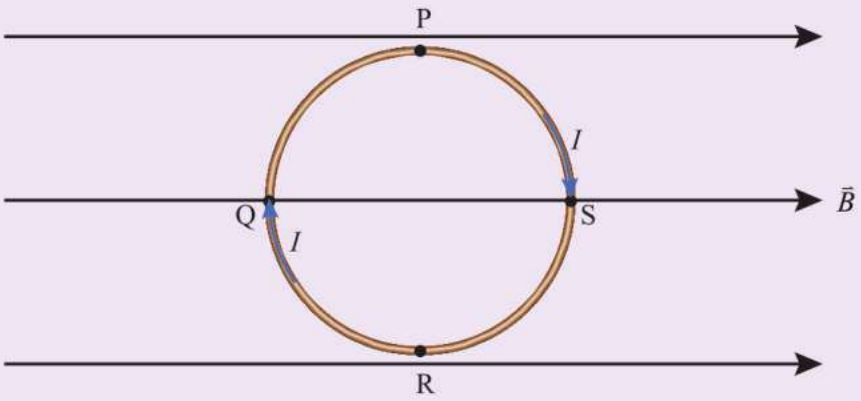
29. สนามแม่เหล็กสม่ำเสมอขนาด 0.40 เทสลา ผ่านลวดตัวนำ ABCDE มีทิศทางออกตั้งฉากกับกระดาษ ดังรูป



รูป ประกอบปัญหาท้าทายข้อ 29

ถ้า AB และ DE ยาว 10 เซนติเมตร ส่วน BC และ CD ยาว 20 เซนติเมตร เมื่อมีกระแสไฟฟ้า 3.0 แอมแปร์ ผ่านเส้นลวดนี้ จงหาขนาดและทิศทางแรงลัพธ์ของแรงแม่เหล็กที่กระทำต่อลวดตัวนำ ABCDE

30. ขดลวดวงกลมมีจำนวนรอบ 20 รอบ และรัศมี 8.0 เซนติเมตร วางขดลวดนี้ไว้ในสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอขนาด 2.0 เทสลา และมีทิศขนานกับระนาบของขดลวด ถ้ามีกระแสไฟฟ้า 10 แอมแปร์ ผ่านขดลวด ในทิศดังรูป



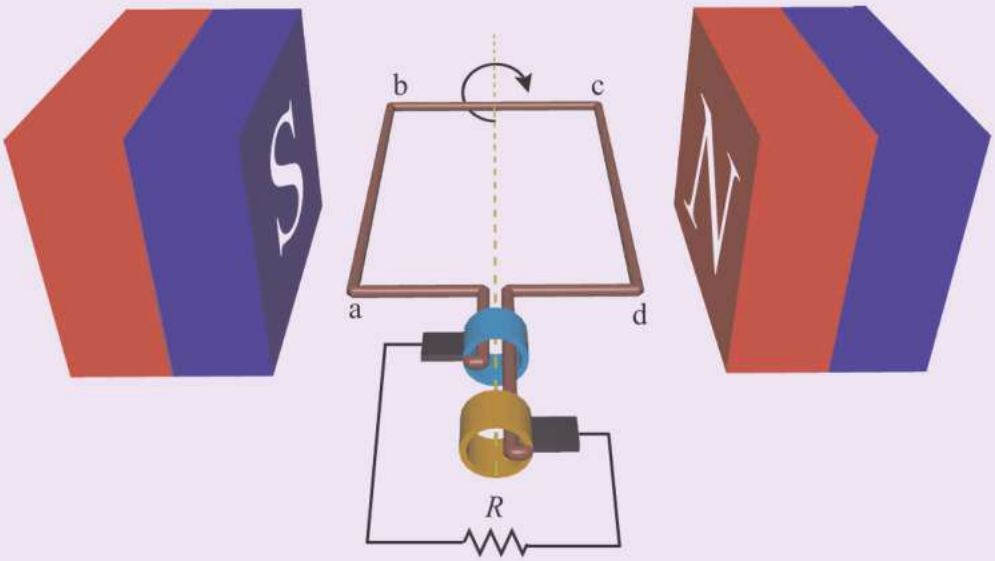
รูป ประกอบปัญหาท้าทายข้อ 30

จงหาโมเมนต์ของแรงคู่ควบรอบแกนหมุน

ก. ที่ผ่านจุด P กับ R

ข. ที่ผ่านจุด Q กับ S

31. เมื่อหมุนขดลวด abcd ในสนามแม่เหล็ก โดยมีทิศทางการหมุนดังรูป ทำให้เกิดอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำ มีกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในวงจร



รูป ประกอบปัญหาท้าทายข้อ 31

ก. ถ้าเริ่มต้น ขดลวดวางตัวในแนวราบตามรูป ให้เขียนทิศทางของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อขดลวดเริ่มหมุน

ข. กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะมีค่ามากที่สุด เมื่อระนาบขดลวดอยู่ในลักษณะใด เพราะเหตุใด

ค. เครื่องมือนี้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับหรือไฟฟ้ากระแสตรง พิจารณาจากอะไร

32. หม้อแปลงเครื่องหนึ่งมีขดลวดปฐมภูมิ 200 รอบ ขดลวดทุติยภูมิ 50 รอบ ต่อกับแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ ความต่างศักย์ 220 โวลต์ ถ้าเครื่องใช้ไฟฟ้าที่ต่อกับขดลวดทุติยภูมิมีกำลังไฟฟ้า 100 วัตต์ เครื่องใช้ไฟฟ้ามีความต้านทานเท่าใด ทั้งนี้ให้ถือว่าไม่มีการสูญเสียพลังงานในหม้อแปลง

33. หม้อแปลงอุดมคติตัวหนึ่งใช้กับไฟฟ้ากระแสสลับ 230 โวลต์ โดยมีกระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดปฐมภูมิ 0.5 แอมแปร์ กำลังไฟฟ้าที่ขดลวดทุติยภูมิมีค่าเท่าใด

34. หม้อตุ่นไฟฟ้าหม้อหนึ่งความต้านทาน 50 โอห์ม ไม่สามารถใช้กับไฟบ้าน 220 โวลต์ ได้โดยตรง ต้องใช้หม้อแปลงไฟฟ้าชนิดแปลงลง ถ้าหม้อแปลงที่ใช้มีความต้านทานของขดลวดปฐมภูมิน้อยมาก แต่ความต้านทานของขดลวดทุติยภูมิเป็น 5 โอห์ม จำนวนขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิเป็น 200 และ 100 รอบ ตามลำดับ กำลังไฟฟ้าของหม้อตุ่นจะมีค่าเท่าไร

บทที่ 16 ความร้อนและแก๊ส

ipst.me/11065

ตู้เย็นเป็นเครื่องใช้ไฟฟ้าในบ้านที่สามารถพบได้ในเกือบทุกครัวเรือนใช้สำหรับเก็บผัก ผลไม้ อาหาร และเครื่องดื่ม ให้คงความสดและยืดอายุให้เก็บได้นานขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิภายในตู้เย็นต่ำกว่าอุณหภูมิภายนอก ภายในช่องแช่แข็งสามารถปรับให้มีอุณหภูมิได้ต่ำกว่า -10 องศาเซลเซียส เมื่อนำน้ำไปวางไว้ในช่องแช่แข็งของตู้เย็น น้ำจะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง แสดงว่าตู้เย็นสามารถถ่ายโอนความร้อนจากน้ำออกสู่ภายนอกได้ ความร้อนถูกถ่ายโอนจากภายในตู้เย็นที่มีอุณหภูมิต่ำสู่ภายนอกที่มีอุณหภูมิสูงกว่าได้อย่างไร ความร้อนมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนอุณหภูมิและสถานะของสสารอย่างไร ความรู้เกี่ยวกับความร้อนและแก๊สสามารถนำไปออกแบบตู้เย็นและเครื่องยนต์ความร้อนต่าง ๆ ได้อย่างไร เราจะศึกษาได้จากบทนี้

คำถามสำคัญ

- ความร้อนมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนอุณหภูมิและสถานะของสสารอย่างไร
- ความร้อนมีผลต่อสมบัติทางกายภาพของแก๊ส เช่น ความดัน อัตราเร็วของโมเลกุล และพลังงานจลน์เฉลี่ยของโมเลกุลของแก๊สอย่างไร
- ความรู้เรื่องความร้อนและแก๊สสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวันได้อย่างไร

จุดประสงค์การเรียนรู้

16.1 ความร้อน

1. บอกระดับความร้อนของวัตถุด้วยอุณหภูมิในหน่วยองศาเซลเซียสและเคลวิน
2. อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนอุณหภูมิกับความจุความร้อน ความร้อนจำเพาะ และคำนวณปริมาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง
3. อธิบายการเปลี่ยนสถานะของสสารที่เกี่ยวข้องกับความร้อนแฝง และคำนวณปริมาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง
4. อธิบายการถ่ายโอนความร้อน สมดุลความร้อน และคำนวณปริมาตรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง

16.2 แก๊สอุดมคติ

5. อธิบายแบบจำลองของแก๊สอุดมคติ
6. อธิบายกฎของแก๊สอุดมคติและคำนวณปริมาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง

16.3 ทฤษฎีจลน์ของแก๊ส

7. อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับอัตราเร็วอาร์เอ็มเอสของโมเลกุลแก๊ส และคำนวณปริมาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง
8. อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สกับอุณหภูมิ และคำนวณปริมาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง
9. อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วอาร์เอ็มเอสของโมเลกุลของแก๊สกับอุณหภูมิ และคำนวณปริมาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง

16.4 กฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์

10. อธิบายและคำนวณพลังงานภายในระบบ
11. อธิบายและคำนวณงานที่ทำโดยแก๊ส
12. อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความร้อน พลังงานภายในระบบ กับงานที่ทำโดยแก๊ส และคำนวณปริมาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง
13. อธิบายการนำความรู้เรื่องพลังงานภายในระบบไปใช้ประโยชน์ในชีวิตประจำวัน

ความรู้ก่อนเรียน

แรงดล โมเมนตัม งาน พลังงาน กฎการอนุรักษ์พลังงาน

เมื่อกล่าวถึงความร้อน เรามักจะนึกถึงความร้อนที่พบในชีวิตประจำวัน ได้แก่ ความร้อนจากดวงอาทิตย์ และความร้อนจากการเผาไหม้ มนุษย์ได้ใช้ประโยชน์จากความร้อนดังกล่าวในการดำรงชีวิตมากมาย เช่น การหุงต้มอาหาร การให้ความอบอุ่นในวันที่อากาศหนาวเย็น การเผาไหม้เพื่อทำให้เครื่องยนต์และเครื่องจักรทำงาน

การศึกษากระบวนการเปลี่ยนแปลงระหว่างความร้อนและพลังงานกล เป็นสาขาหนึ่งในวิชาฟิสิกส์เรียกว่า **อุณหพลศาสตร์** (thermodynamics) ซึ่งในบทนี้ จะศึกษาอุณหพลศาสตร์ในขอบเขตที่ครอบคลุมระบบที่เป็นแก๊ส ของแข็ง และของเหลว โดยเน้นที่การอธิบายความร้อนจากพฤติกรรมของแก๊ส

16.1 ความร้อน

ในการศึกษาผลของความร้อนต่อสสาร อาจเริ่มจากการพิจารณาเกี่ยวกับการบอกระดับของความร้อนด้วยอุณหภูมิ ผลของความร้อนที่มีต่อสถานะของสสาร และการถ่ายโอนความร้อน ซึ่งศึกษาได้จากหัวข้อนี้

16.1.1 อุณหภูมิ

ธรรมชาติได้สร้างให้มนุษย์สามารถรับรู้ความร้อนของสิ่งต่าง ๆ รอบตัว เพื่อให้สามารถหลีกเลี่ยงและป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นกับร่างกายเมื่อสัมผัสสิ่งที่ร้อนหรือเย็น ตัวอย่างการรับรู้ความร้อนของร่างกายมนุษย์ เช่น หากนำภาชนะใส่น้ำมา 3 ใบ ภาชนะสีฟ้าใส่น้ำเย็น ภาชนะสีเขียวอ่อนใส่น้ำอุ่น และภาชนะสีชมพูใส่น้ำร้อนที่ไม่ร้อนจนเกินกว่าจะแช่มือไว้ได้ เมื่อจุ่มมือข้างหนึ่งลงไปในภาชนะสีฟ้าจะรับรู้ได้ว่าเป็นน้ำเย็น และจุ่มมืออีกข้างหนึ่งลงไปในภาชนะสีชมพูก็จะรับรู้ได้ว่าเป็นน้ำร้อน ดังรูป 16.1 ก. อย่างไรก็ตาม การรับรู้ความร้อนของร่างกายมนุษย์ก็มีข้อจำกัด เช่น หากแช่มือทั้งสองในน้ำเย็นและน้ำร้อนเป็นระยะเวลาประมาณ 2 นาที แล้วนำมือทั้งสองลงไปแช่ในภาชนะสีเขียวอ่อนพร้อมกัน ดังรูป 16.1 ข. มือทั้งสองข้างจะรู้สึกแตกต่างกัน ทำให้ไม่สามารถบอกได้ว่า น้ำในภาชนะนั้นร้อนหรือเย็น

ก. จุ่มมือที่น้ำเย็นและน้ำร้อน

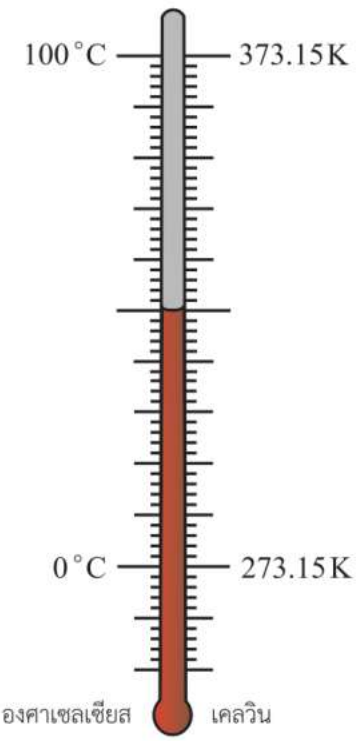
ข. จุ่มมือที่น้ำอุ่น

รูป 16.1 การรับรู้ความร้อนด้วยประสาทสัมผัส

การรับรู้ความร้อนของสิ่งต่าง ๆ จากประสาทสัมผัสทำให้ทราบว่า ความร้อนของวัตถุสามารถเปรียบเทียบได้โดยใช้ระดับความร้อน เช่น น้ำในภาชนะสีชมพูมีระดับความร้อนมากกว่าน้ำในภาชนะสีฟ้า อย่างไรก็ตาม เราไม่อาจใช้ประสาทสัมผัสจากความรู้สึกร้อนหรือเย็นของร่างกายเป็นเครื่องวัดระดับความร้อนได้เสมอไปเพราะการรับรู้ทางประสาทสัมผัสเป็นสิ่งที่ไม่แน่นอน และประสาทสัมผัสของมนุษย์ไม่สามารถบอกระดับความร้อนของสิ่งต่าง ๆ ได้อย่างแม่นยำ ดังเช่นในกรณีการจุ่มมือลงในน้ำอุ่น มือที่แช่น้ำเย็นมาก่อนจะรู้สึกว่าน้ำในภาชนะสีเขียวอ่อนเป็นน้ำร้อน แต่มือที่แช่น้ำร้อนมาก่อนจะรู้สึกว่าน้ำในภาชนะสีเขียวอ่อนเป็นน้ำเย็น ในการศึกษาเกี่ยวกับเรื่องความร้อน นักวิทยาศาสตร์จึงจำเป็นต้องค้นหาวิธีการวัดระดับความร้อนและหามาตรฐานในการบอกระดับความร้อนขึ้น จึงเป็นที่มาของการบอกระดับความร้อนด้วย **อุณหภูมิ** (temperature) ของวัตถุนั้น วัตถุที่มีอุณหภูมิสูงแสดงว่ามีระดับความร้อนมาก และวัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำแสดงว่ามีระดับความร้อนน้อย

อุปกรณ์ที่ใช้วัดอุณหภูมิ เรียกว่า **เทอร์มอมิเตอร์** (thermometer) เทอร์มอมิเตอร์มีหลายชนิดและเทอร์มอมิเตอร์ที่พบในชีวิตประจำวันส่วนใหญ่ทำงานโดยอาศัยสมบัติของสารที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ เช่น ปริมาตร ความต้านทานไฟฟ้า และสี เป็นต้น ในอดีตได้มีการกำหนดสเกลอุณหภูมิของเทอร์มอมิเตอร์ไว้หลายอย่าง แต่ในทางวิทยาศาสตร์มีสเกลที่นิยมใช้ คือ องศาเซลเซียส และ เคลวิน โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. **องศาเซลเซียส** (degree Celsius, $^{\circ}C$) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า **องศาเซนติเกรด** (degree centigrade) เป็นสเกลวัดที่เกิดจากการวัดอุณหภูมิของน้ำที่ความดัน 1 บรรยากาศ โดยกำหนดให้จุดเยือกแข็งของน้ำเป็น 0 องศาเซลเซียส และจุดเดือดของน้ำเป็น 100 องศาเซลเซียส เมื่อแบ่งช่วงอุณหภูมิระหว่างจุดเยือกแข็งและจุดเดือดของน้ำเป็น 100 ส่วนเท่า ๆ กัน จะได้สเกลของส่วนที่แบ่งเป็นส่วนละ 1 องศาเซลเซียส
2. **เคลวิน** (Kelvin, K) เป็นหนึ่งในหน่วนฐานของระบบเอสไอ ใช้สเกลวัดที่เกิดจากการวัดอุณหภูมิของน้ำที่ความดัน 1 บรรยากาศ โดยกำหนดให้จุดเยือกแข็งของน้ำเป็น 273.15 เคลวิน และจุดเดือดของน้ำเป็น 373.15 เคลวิน เมื่อแบ่งช่วงอุณหภูมิระหว่างจุดเยือกแข็งและจุดเดือดของน้ำเป็น 100 ส่วนเท่า ๆ กัน จะได้สเกลของส่วนที่แบ่งเป็นส่วนละ 1 เคลวิน ซึ่งจะสังเกตได้ว่าช่วงอุณหภูมิ 1 เคลวิน เท่ากับช่วงอุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียส ดังรูป 16.2



รูป 16.2 การเปรียบเทียบสเกลอุณหภูมิระหว่างองศาเซลเซียสและเคลวิน

อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน เรียกว่า **อุณหภูมิสัมบูรณ์** (absolute temperature) และที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน เรียกว่า **ศูนย์สัมบูรณ์** (absolute zero) อุณหภูมิดังกล่าว ถือเป็นอุณหภูมิต่ำที่สุดในทางทฤษฎีที่เป็นไปได้ของสสาร ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่อนุภาคหยุดการเคลื่อนไหวอย่างสิ้นเชิง อย่างไรก็ตาม สภาวะของสสารที่มีอุณหภูมิศูนย์สัมบูรณ์ยังไม่สามารถทำให้เกิดขึ้นได้ในห้องปฏิบัติการ

ความรู้เพิ่มเติม

นอกจากอุณหภูมิในหน่วยเคลวินมีชื่อเรียกว่า **อุณหภูมิสัมบูรณ์** แล้ว อุณหภูมิในหน่วยเคลวินยังมีชื่อเรียกว่า **อุณหภูมิอุณหพลวัต** (thermodynamic temperature) เนื่องจากการสร้างสเกลดังกล่าวมีความสัมพันธ์โดยตรงกับกฎทางอุณหพลศาสตร์

ถ้าให้ T เป็นอุณหภูมิในหน่วยเคลวิน (K) และ t เป็นอุณหภูมิในหน่วยองศาเซลเซียส ($^{\circ}\mathrm{C}$) อุณหภูมิทั้งสองมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$T = t + 273.15 \qquad (16.1)$$

ในการคำนวณโดยทั่วไป ที่ไม่ต้องการความละเอียดมากนัก สามารถใช้จุดเยือกแข็งของน้ำเป็น 273 เคลวิน และได้ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในหน่วยเคลวินและอุณหภูมิในหน่วยองศาเซลเซียสเป็น

$$T = t + 273$$

เนื่องจากช่วงสเกลอุณหภูมิในหน่วยเคลวินมีค่าเท่ากับช่วงสเกลอุณหภูมิในหน่วยองศาเซลเซียส ทำให้อุณหภูมิที่เปลี่ยนไปในหน่วยเคลวิน ΔT (K)มีค่าเท่ากับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปในหน่วยองศาเซลเซียส $\Delta t\,(^{\circ}\mathrm{C})$ เช่น วัตถุมีอุณหภูมิเปลี่ยนไปเท่ากับ 10 เคลวิน จะเท่ากับวัตถุมีอุณหภูมิเปลี่ยนไป 10 องศาเซลเซียส

การเปรียบเทียบอุณหภูมิระหว่างหน่วยต่าง ๆ นอกเหนือจากองศาเซลเซียสและเคลวิน เช่น **องศาฟาเรนไฮต์** (Fahrenheit scale, $^{\circ}\mathrm{F}$) สามารถทำได้โดยเปรียบเทียบกับจุดมาตรฐานคือจุดเยือกแข็งและจุดเดือดของน้ำเช่นกัน สามารถศึกษารายละเอียดเพิ่มเติมได้ในภาคผนวก ก

เทอร์มอมิเตอร์ที่ใช้วัดอุณหภูมิมีหลายรูปแบบตามลักษณะของการใช้งาน เช่น เทอร์มอมิเตอร์สำหรับใช้วัดอุณหภูมิห้อง เทอร์มอมิเตอร์วัดอุณหภูมิของคนไข้ เทอร์มอมิเตอร์วัดอุณหภูมิของเตาอบ เทอร์โมมิเตอร์ชนิดอินฟราเรด ตัวอย่างเทอร์มอมิเตอร์บางชนิดแสดงดังรูป 16.3

ก. เทอร์มอมิเตอร์แบบขีดสเกลสำหรับวัดอุณหภูมิทั่วไป
ข. เทอร์มอมิเตอร์แบบขีดสเกลสำหรับวัดอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุด
ค. เทอร์มอมิเตอร์แบบขีดสเกลสำหรับวัดไข้
ง. เทอร์มอมิเตอร์แบบดิจิทัลสำหรับวัดไข้
จ. เทอร์มอมิเตอร์แบบแถบสำหรับวัดไข้
ฉ. เทอร์มอมิเตอร์แบบขีดสเกลโดยใช้ขดลวดโลหะประกบสำหรับวัดอุณหภูมิทั่วไป
ช. เทอร์มอมิเตอร์แบบขีดสเกลสำหรับวัดอุณหภูมิภายในวัตถุ
ซ. เทอร์มอมิเตอร์แบบดิจิทัลสำหรับวัดอุณหภูมิภายในวัตถุ
ฌ. เทอร์มอมิเตอร์แบบดิจิทัลโดยใช้รังสีอินฟราเรดสำหรับวัดอุณหภูมิทั่วไป
ญ. เทอร์มอมิเตอร์แบบดิจิทัลสำหรับวัดอุณหภูมิทั่วไป
ฎ. เทอร์มอมิเตอร์แบบดิจิทัลโดยใช้คู่ควบความร้อนสำหรับวัดอุณหภูมิสูง

รูป 16.3 เทอร์มอมิเตอร์ชนิดต่าง ๆ

ความรู้เพิ่มเติม

คู่ควบความร้อนหรือเทอร์มอคัปเปิล (thermocouple) เป็นอุปกรณ์สำหรับวัดอุณหภูมิประกอบด้วยลวดโลหะต่างชนิดกันสองเส้นเชื่อมต่อกันที่ปลายข้างหนึ่ง เช่น เหล็ก (Fe) กับ คอปเปอร์นิกเกิล (CuNi) และ นิกเกิลโครเมียม (NiCr) กับ นิกเกิลอะลูมิเนียม (NiAl) เป็นต้น เมื่อนำปลายนี้ไปสัมผัสกับวัตถุที่ร้อนกว่าหรือเย็นกว่า ด้านปลายที่ไม่ได้เชื่อมต่อกันจะเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้น เมื่อใช้โวลต์มิเตอร์วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นแล้วเทียบกับตารางความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับอุณหภูมิจะทำให้สามารถทราบอุณหภูมิของวัตถุได้ นิยมใช้ในการวัดอุณหภูมิสูง ๆ เช่น ตู้อบ และเตาเผา

รูป เทอร์มอคัปเปิล

16.1.2 ความจุความร้อนและความร้อนจำเพาะ

เมื่อให้ความร้อนกับวัตถุแล้วทำให้วัตถุมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น อัตราส่วนระหว่างความร้อนที่ให้กับวัตถุต่ออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น เรียกว่า **ความจุความร้อน** (heat capacity) ของวัตถุนั้น ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$C = \frac{Q}{\Delta T} \tag{16.2}$$

โดย C คือ ความจุความร้อน มีหน่วย จูลต่อเคลวิน (J/K)
Q คือ ความร้อนที่ให้แก่วัตถุ มีหน่วย จูล (J)
ΔT คือ อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อได้รับความร้อน มีหน่วย เคลวิน (K)

ความจุความร้อนเป็นค่าที่แสดงถึงความร้อนที่ทำให้วัตถุมีอุณหภูมิเปลี่ยนไป 1 เคลวิน ซึ่งเป็นค่าที่ไม่พิจารณาว่ามวลของวัตถุมีขนาดเท่าใด ในทางปฏิบัติเราจะทราบค่าดังกล่าวได้จากการทดลอง อย่างไรก็ตามเราสามารถอนุมานได้ว่า ความจุความร้อนต้องแปรผันกับมวลของวัตถุ เช่น ถ้าให้ความร้อน 500 จูล กับน้ำ 1 แก้ว แล้วทำให้อุณหภูมิของน้ำเพิ่มขึ้น 1 เคลวิน ดังนั้น ถ้าต้องการให้น้ำ 2 แก้ว มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 เคลวิน ก็ย่อมต้องการความร้อนเท่ากับ 1000 จูล แต่ถ้าหารความจุความร้อนด้วยมวลของวัตถุ ค่าที่ได้จะไม่ขึ้นกับมวลของวัตถุ ความจุความร้อนต่อหนึ่งหน่วยมวลจะขึ้นกับสารแต่ละชนิด เรียกว่า **ความร้อนจำเพาะ** (specific heat) แทนด้วยสัญลักษณ์ c จะได้

$$c = \frac{C}{m} \tag{16.3}$$

โดย c คือ ความร้อนจำเพาะมีหน่วย จูลต่อกิโลกรัม เคลวิน (J/kg K)

m คือ มวลของวัตถุมีหน่วย กิโลกรัม (kg)

แทนค่า $C = \frac{Q}{\Delta T}$ จากสมการ (16.2) ในสมการ (16.3) จะได้

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

หรือ

$$Q = mc\Delta T \tag{16.4}$$

หากสารมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น (ΔT มีค่าเป็นบวก) จะทำให้ Q มีค่าเป็นบวก ซึ่งหมายถึงความร้อนถ่ายโอนเข้าสู่สาร ส่วนกรณีสารมีอุณหภูมิลดลง (ΔT มีค่าเป็นลบ) จะทำให้ Q มีค่าเป็นลบ ซึ่งหมายถึงความร้อนถ่ายโอนออกจากสาร

ความร้อนจำเพาะแสดงถึงความร้อนที่ทำให้สารมวล 1 กิโลกรัมมีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป 1 เคลวิน ความร้อนจำเพาะเป็นสมบัติเฉพาะของสาร โดยความร้อนจำเพาะของสารบางชนิดแสดงในตาราง 16.1

ตาราง 16.1 ความร้อนจำเพาะของสารต่าง ๆ (ที่ความดัน 1 บรรยากาศ และอุณหภูมิห้อง 20°C หรือระบุเป็นอย่างอื่น)

สาร	ความร้อนจำเพาะ (J/kg K)
น้ำแข็ง (–5°C)	2100
น้ำ (15°C)	4186
ไอน้ำ (110°C)	2010
เอทิลแอลกอฮอล์	2400
ไม้	1700
อะลูมิเนียม	900
แก้ว	840
ทราย	800
เหล็ก	450
ทองแดง	390
เงิน	230
ปรอท	140
ตะกั่ว	130

หมายเหตุ: ความร้อนจำเพาะสามารถแสดงในหน่วย J/kg K หรือ J/kg°C เนื่องจากมีค่าเท่ากัน

ความร้อนจำเพาะของสารมีค่าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดัน แต่โดยทั่วไป ความร้อนจำเพาะของสารเปลี่ยนแปลงน้อยมากจึงให้เป็นค่าคงตัว

ความรู้เพิ่มเติม

การที่น้ำมีความร้อนจำเพาะสูงนั้น ทำให้น้ำมีบทบาทสำคัญในการรักษาอุณหภูมิในธรรมชาติ ดังจะเห็นได้จากปรากฏการณ์ต่าง ๆ เช่น การเกิด**ลมบก** (land breeze) และ**ลมทะเล** (sea breeze) กล่าวคือ ในเวลากลางวัน แสงจากดวงอาทิตย์จะให้ความร้อนแก่น้ำทะเลและพื้นดินในปริมาณเท่า ๆ กัน แต่เนื่องจากน้ำทะเลมีความร้อนจำเพาะที่สูงกว่าพื้นดิน เมื่อได้รับความร้อนจากดวงอาทิตย์ อุณหภูมิของพื้นดินจึงเพิ่มสูงขึ้นเร็วกว่าอุณหภูมิของน้ำทะเล ส่งผลให้อากาศร้อนที่อยู่เหนือพื้นดินลอยตัวสูงขึ้นเนื่องจากมีความหนาแน่นต่ำ และอากาศที่เย็นกว่าบริเวณเหนือน้ำทะเลจะพัดเข้ามาแทนที่เกิดเป็นลมพัดจากทะเลมายังชายฝั่ง จึงเรียกว่า ลมทะเล ดังรูป ก. ปรากฏการณ์นี้จะสิ้นสุดเมื่ออุณหภูมิของน้ำทะเลและพื้นดินมีค่าใกล้เคียงกัน ในทางกลับกัน ในเวลากลางคืนอุณหภูมิบริเวณพื้นดินจะลดลงเร็วกว่าอุณหภูมิของน้ำทะเล ลมจะพัดออกจากชายฝั่งไปยังทะเล จึงเรียกว่า ลมบก ดังรูป ข.

ก. การเกิดลมทะเล ข. การเกิดลมบก

รูป การเกิดลมบกและลมทะเล

ตัวอย่าง 16.1 จงหาความร้อนที่ทำให้เหล็กมวล 200 กรัม ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส มีอุณหภูมิเป็น 60 องศาเซลเซียส กำหนดให้ความร้อนจำเพาะของเหล็กมีค่าเท่ากับ 450 จูลต่อกิโลกรัม เคลวิน

แนวคิด ความร้อนที่ทำให้เหล็กมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นหาได้จากสมการ $Q = mc\Delta T$ โดยหา $\Delta T\,(\mathrm{K})$ ได้จากอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปในหน่วยเคลวิน $\Delta T\,(\mathrm{K})$ มีค่าเท่ากับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปในหน่วยองศาเซลเซียส $\Delta t\,(^\circ\mathrm{C})$

วิธีทำ จากโจทย์ $m = 200\ \mathrm{g} = 0.2\ \mathrm{kg},\ c_{\text{เหล็ก}} = 450\ \mathrm{J/kg\ K}$

และ $\Delta t\,(^\circ\mathrm{C}) = 60^\circ\mathrm{C} - 20^\circ\mathrm{C} = 40^\circ\mathrm{C}$ หรือ $\Delta T\,(\mathrm{K}) = 40\ \mathrm{K}$

จาก $Q = mc\Delta T$

แทนค่า $Q = (0.2\ \mathrm{kg})(450\ \mathrm{J/kg\ K})(40\ \mathrm{K})$

ดังนั้น $Q = 3600\ \mathrm{J}$

ตอบ ความร้อนที่ใช้เท่ากับ 3600 จูล หรือ 3.6 กิโลจูล

ตัวอย่าง 16.2 ก้อนโลหะชนิดหนึ่งมีมวล 2 กิโลกรัม ได้รับความร้อน 10 กิโลจูล ปรากฏว่าอุณหภูมิของก้อนโลหะเพิ่มขึ้น 10 องศาเซลเซียส จงหาความร้อนจำเพาะของก้อนโลหะ

แนวคิด หาความร้อนจำเพาะ c ของก้อนโลหะจากสมการ $Q = mc\Delta T$ โดยหา $\Delta T\,(\mathrm{K})$ ได้จากอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปในหน่วยเคลวิน $\Delta T\,(\mathrm{K})$ มีค่าเท่ากับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปในหน่วยองศาเซลเซียส $\Delta t\,(^\circ\mathrm{C})$

วิธีทำ จากโจทย์ $Q = 10\ \mathrm{kJ} = 10\,000\ \mathrm{J},\ m = 2\ \mathrm{kg}$

และ $\Delta t\,(^\circ\mathrm{C}) = 10\ ^\circ\mathrm{C}$ หรือ $\Delta T\,(\mathrm{K}) = 10\ \mathrm{K}$

จาก $Q = mc\Delta T$

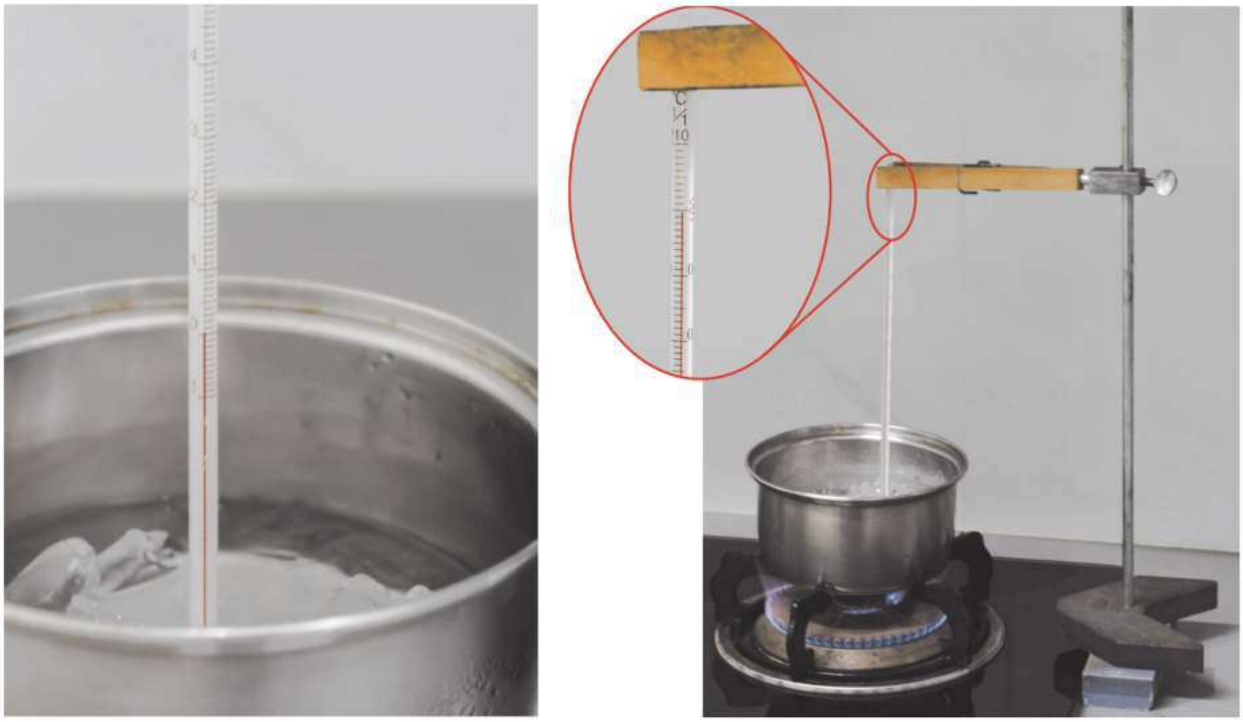
แทนค่า $10\,000\ \mathrm{J} = (2\ \mathrm{kg})\,(c)(10\ \mathrm{K})$

ดังนั้น $c = 500\ \mathrm{J/kg\ K}$

ตอบ ความร้อนจำเพาะของก้อนโลหะเท่ากับ 500 จูลต่อกิโลกรัม เคลวิน หรือ 0.5 กิโลจูลต่อกิโลกรัม เคลวิน

16.1.3 ความร้อนแฝง

เมื่อให้ความร้อนแก่สารจะทำให้อุณหภูมิของสารเพิ่มขึ้น เช่น การให้ความร้อนแก่น้ำที่อยู่ในสถานะของเหลวก็จะทำให้อุณหภูมิของน้ำที่อยู่ในสถานะของเหลวเพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดขึ้นในกรณีที่สารไม่เปลี่ยนสถานะเท่านั้น แต่การให้ความร้อนเพื่อเปลี่ยนสถานะของสาร เช่น การให้ความร้อนเพื่อให้น้ำแข็งหลอมเหลวกลายเป็นน้ำ หรือการให้ความร้อนเพื่อให้น้ำเดือดกลายเป็นไอน้ำ จะพบว่าน้ำมีอุณหภูมิคงตัว ดังรูป 16.4

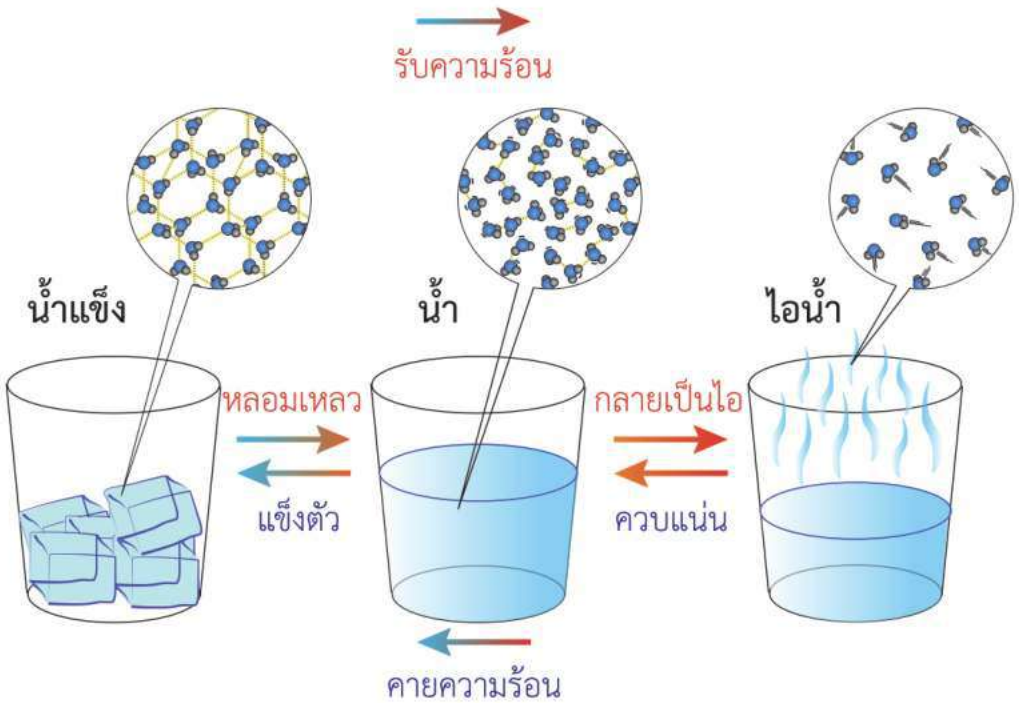


ก. อุณหภูมิขณะน้ำแข็งกำลังหลอมเหลวที่ 0 องศาเซลเซียส

ข. อุณหภูมิขณะน้ำกำลังเดือดที่ 100 องศาเซลเซียส

รูป 16.4 การวัดอุณหภูมิขณะที่น้ำแข็งกำลังหลอมเหลวและน้ำกำลังเดือด

จากรูป 16.4 แสดงให้เห็นว่าการให้ความร้อนแก่สารอาจไม่ได้ทำให้อุณหภูมิของสารเพิ่มขึ้นเสมอไป แต่อาจทำให้โมเลกุลของสารนั้น ๆ ซึ่งเดิมเกาะติดกันแน่นเคลื่อนที่แยกออกจากกันแล้วเกิดการเปลี่ยนสถานะ เช่น เมื่อน้ำแข็งได้รับความร้อนที่พอเหมาะ จะเกิดการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว เรียกว่า **การหลอมเหลว** (melting) และถ้ายังให้ความร้อนแก่น้ำที่อยู่ในสถานะของเหลวต่อไป น้ำจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นจนเดือด แล้วเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอน้ำที่อยู่ในสถานะแก๊ส เรียกว่า **การกลายเป็นไอ** (vaporisation) ในทางกลับกันเมื่อแก๊สคายความร้อนจะเปลี่ยนสถานะจากแก๊สเป็นของเหลวเรียกว่า **การควบแน่น** (condensation) และถ้าคายความร้อนต่อไป จะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็งเรียกว่า **การแข็งตัว** (solidification) ซึ่งสรุปได้ ดังรูป 16.5



รูป 16.5 การเปลี่ยนสถานะของน้ำ

ความร้อนที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะของสารมวล 1 หน่วย โดยอุณหภูมิไม่เปลี่ยน เรียกว่า **ความร้อนแฝง** (latent heat) ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับความร้อนที่ให้กับสาร ดังสมการ

$$L = \frac{Q}{m}$$

หรือ

$$Q = mL \tag{16.5}$$

โดย L คือ ความร้อนแฝง มีหน่วย จูลต่อกิโลกรัม (J/kg)

Q คือ ความร้อนที่ทำให้สารมวล m เปลี่ยนสถานะหมดพอดี มีหน่วย จูล (J)

ความร้อนแฝงมีค่าขึ้นกับชนิดของสารและการเปลี่ยนสถานะ โดยความร้อนแฝงของสารบางชนิดแสดงดังตาราง 16.2

ตาราง 16.2 ความร้อนแฝงของสารบางชนิดที่ความดัน 1 บรรยากาศ

สาร	จุดหลอมเหลว (°C)	ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (J/kg)	จุดเดือด (°C)	ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (J/kg)
น้ำ	0.0	3.33×10^5	100	22.56×10^5
ออกซิเจน	- 218.8	0.14×10^5	- 183	2.13×10^5
ไนโตรเจน	- 210.0	0.26×10^5	- 195.8	2.00×10^5
เอทิลแอลกอฮอล์	-114	1.04×10^5	78	8.50×10^5
ตะกั่ว	327	0.25×10^5	1750	8.70×10^5
เงิน	961	0.88×10^5	2193	23.00×10^5
เหล็ก	1808	2.89×10^5	3023	63.40×10^5

ความร้อนต่อหนึ่งหน่วยมวลที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวเรียกว่า **ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว** (latent heat of fusion: L_f) ส่วนความร้อนแฝงในการเปลี่ยนจากของเหลวเป็นแก๊สเรียกว่า **ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ** (latent heat of vaporisation: L_v) ตัวอย่างเช่น ความร้อนที่ทำให้น้ำแข็ง 1 กิโลกรัมที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส หลอมเหลวกลายเป็นน้ำที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส มีค่าประมาณ 333 กิโลจูล แสดงว่า ความร้อนแฝงของการหลอมเหลวของน้ำเท่ากับ 333 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ส่วนการทำให้น้ำมวลเดียวกันนี้เปลี่ยนจากน้ำเดือดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นไอทั้งหมด จะใช้ความร้อนประมาณ 2256 กิโลจูล แสดงว่า ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำเท่ากับ 2256 กิโลจูลต่อกิโลกรัม

ในทางกลับกัน กระบวนการที่ไอน้ำในสถานะแก๊สควบแน่นกลับมาเป็นของเหลวจะคายความร้อนออกมาเท่ากับที่ได้รับไป คือ 2256 กิโลจูล เหตุที่ความร้อนที่ใช้เป็นค่าเดียวกันในกระบวนการขาไปและกระบวนการย้อนกลับเป็นเพราะกระบวนการในระดับอะตอมแทบทั้งหมดมักจะไม่มีการสูญเสียพลังงานไปในรูปแบบอื่นใดได้อีก

อย่างไรก็ตาม สำหรับของแข็งบางชนิด เช่น น้ำแข็งแห้งหรือคาร์บอนไดออกไซด์แข็งตามปกติที่ความดัน 1 บรรยากาศ จะมีจุดเดือดที่อุณหภูมิ -78.5 องศาเซลเซียส ณ อุณหภูมิห้อง น้ำแข็งแห้งจะเปลี่ยนสถานะจากของแข็งกลายเป็นแก๊สโดยอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลง เรียกการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นแก๊สว่า **การระเหิด** (sublimation) ถ้าต้องการให้น้ำแข็งแห้งหลอมเหลวเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้องต้องให้ความร้อนแก่น้ำแข็งแห้งที่ความดันสูงมาก ๆ นอกจากน้ำแข็งแห้งแล้วยังมีสารหลายชนิดที่เกิดการระเหิดได้ เช่น การบูร

ตัวอย่าง 16.3 จงหาความร้อนที่ทำให้น้ำแข็งมวล 1 กิโลกรัม อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เปลี่ยนเป็นไอน้ำที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ถ้ากำหนดให้

ความร้อนจำเพาะของน้ำแข็ง (c_{ice}) เท่ากับ 2100 จูลต่อกิโลกรัม เคลวิน
ความร้อนจำเพาะของน้ำ (c_{water}) เท่ากับ 4186 จูลต่อกิโลกรัม เคลวิน
ความร้อนจำเพาะของไอน้ำ (c_{vapour}) เท่ากับ 2010 จูลต่อกิโลกรัม เคลวิน
ความร้อนแฝงของการหลอมเหลวของน้ำแข็ง (L_{f}) เท่ากับ 3.33×10^5 จูลต่อกิโลกรัม
ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ (L_{v}) เท่ากับ 22.56×10^5 จูลต่อกิโลกรัม

แนวคิด หาความร้อนที่ทำให้สารเปลี่ยนอุณหภูมิโดยไม่เปลี่ยนสถานะได้จากสมการ $Q = mc\Delta T$ โดยหา $\Delta T\,(\text{K})$ ได้จากอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปในหน่วยเคลวิน $\Delta T\,(\text{K})$ มีค่าเท่ากับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปในหน่วยองศาเซลเซียส $\Delta t\,(^{\circ}\text{C})$ และหาความร้อนที่ทำให้สารเปลี่ยนสถานะโดยไม่เปลี่ยนอุณหภูมิได้จากสมการ $Q = mL$

วิธีทำ การหาความร้อนจะแบ่งออกเป็น 5 ส่วน ดังนี้

1. หาความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำแข็งจาก -20 องศาเซลเซียส เป็น 0 องศาเซลเซียส

จาก $Q_1 = mc_{\text{ice}}\Delta T$

จะได้ $Q_1 = (1\text{ kg})(2100\text{ J/kg K})(0-(-20)\ ^{\circ}\text{C})$

$= 42\,000\text{ J}$

$= 42\text{ kJ}$

2. หาความร้อนในการเปลี่ยนสถานะจากน้ำแข็งเป็นน้ำที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส

จาก $Q_2 = mL_{\text{f}}$

จะได้ $Q_2 = (1\text{ kg})(3.33\times10^5\text{ J/kg})$

$= 333\,000\text{ J}$

$= 333\text{ kJ}$

3. หาความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำจาก 0 องศาเซลเซียส เป็น 100 องศาเซลเซียส

จาก $Q_3 = mc_{water}\Delta T$

จะได้ $Q_3 = (1\text{ kg})(4186\text{ J/kg K})(100\ ^{\circ}\text{C}-0)$

$= 418\,600\text{ J}$

$= 418.6\text{ kJ}$

4. หาความร้อนในการเปลี่ยนสถานะจากน้ำเดือดให้กลายเป็นไอ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

จาก $Q_4 = mL_v$

จะได้ $Q_4 = (1\text{ kg})(22.56\times10^5\text{ J/kg})$

$= 2\,256\,000\text{ J}$

$= 2256\text{ kJ}$

5. หาความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิไอน้ำจาก 100 องศาเซลเซียสจนถึง 110 องศาเซลเซียส

จาก $Q_5 = mc_{\text{vapour}}\Delta T$

จะได้ $Q_5 = (1\text{ kg})(2010\text{ J/kg K})(110\,^{\circ}\text{C} - 100\,^{\circ}\text{C})$

$= 20\,100\text{ J}$

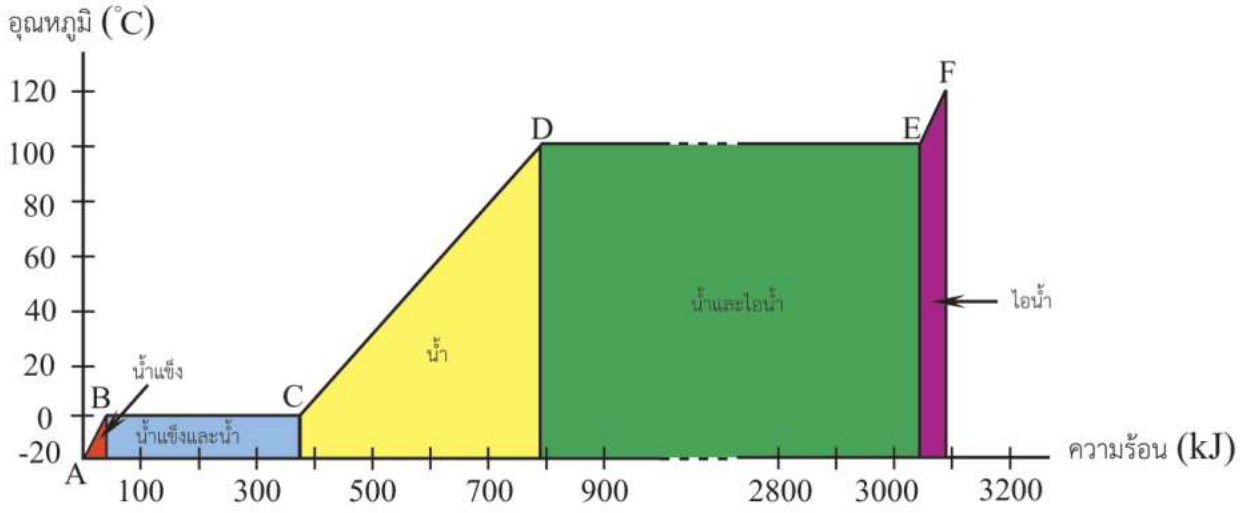
$= 20.10\text{ kJ}$

ดังนั้น ความร้อนที่ใช้ทั้งหมด

$$Q_{\text{total}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5$$
$$= 42\text{ kJ} + 333\text{ kJ} + 418.6\text{ kJ} + 2256\text{ kJ} + 20.1\text{ kJ}$$
$$= 3069.7\text{ kJ}$$

ตอบ ความร้อนที่ทำให้น้ำแข็งมวล 1 กิโลกรัม เปลี่ยนจากอุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส ให้เป็นไอน้ำที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เท่ากับ 3070 กิโลจูล

จากตัวอย่าง 16.3 สามารถเขียนกราฟแสดงการเปลี่ยนสถานะของน้ำแข็งมวล 1 กิโลกรัม จากอุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส ให้เป็นไอน้ำที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ดังรูป



รูป 16.6 การเปลี่ยนสถานะของน้ำมวล 1 กิโลกรัม เมื่อได้รับความร้อน

กราฟช่วง AB เป็นช่วงที่น้ำแข็งมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจนเกิดการหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส อุณหภูมินี้เรียกว่า **จุดหลอมเหลว** (melting point) ของน้ำแข็ง ถ้าให้ความร้อนต่อไป น้ำแข็งจะหลอมเหลวเป็นน้ำมากขึ้น จนกระทั่งน้ำแข็งหลอมเหลวหมดที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ดังกราฟช่วง BC จากนั้นน้ำจะเริ่มมีอุณหภูมิสูงขึ้น ดังกราฟช่วง CD จนเกิดการเดือดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส อุณหภูมินี้เรียกว่า **จุดเดือด** (boiling point) ของน้ำ แล้วจะเริ่มกลายเป็นไอน้ำจนกระทั่งน้ำเดือดหมดที่ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ดังกราฟช่วง DE ถ้าเก็บกักไอน้ำและให้ความร้อนต่อไปอีก ไอน้ำก็จะมีอุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส ดังกราฟช่วง EF ถ้าพิจารณาความร้อนในช่วงต่าง ๆ จะพบว่าความร้อนส่วนใหญ่ใช้ไปกับการเปลี่ยนสถานะจากน้ำเดือดให้กลายเป็นไอน้ำ ดังนั้น การต้มน้ำให้เดือดอาจจะใช้เวลาไม่นาน แต่จะใช้เวลานานในการทำให้น้ำเดือดกลายเป็นไอน้ำจนหมด

16.1.4 การถ่ายโอนความร้อนและสมดุลความร้อน

ความร้อนสามารถถ่ายโอนหรือส่งผ่านจากวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปสู่วัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าได้ เราสามารถอธิบายกระบวนการถ่ายโอนความร้อนได้ดังนี้

การนำความร้อน (heat conduction) เป็นการถ่ายโอนความร้อนผ่านตัวนำความร้อน โดยที่โมเลกุลแต่ละโมเลกุลของตัวนำไม่ได้เคลื่อนที่ตามไปด้วย เช่น ถ้าเราใช้มือจับช้อนโลหะ โดยให้ปลายข้างหนึ่งของช้อนอยู่ในเปลวไฟ สักครู่เราจะรู้สึกว่าช้อนโลหะบริเวณที่จับร้อน เนื่องจากความร้อนถูกส่งจากเปลวไฟผ่านช้อนโลหะซึ่งนำความร้อนมาสู่มือเรา

การพาความร้อน (heat convection) เป็นการถ่ายโอนความร้อนโดยอาศัยการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสสารพาความร้อนจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง เช่น การต้มน้ำที่บรรจุในภาชนะ เมื่อน้ำได้รับความร้อนที่ส่วนล่างของภาชนะ น้ำส่วนล่างจะขยายตัวทำให้มีความหนาแน่นน้อยลงและเคลื่อนที่ขึ้นไปอยู่ส่วนบน ส่วนน้ำที่อยู่ส่วนบนของภาชนะก็จะเคลื่อนที่ลงมาแทนที่ การหมุนวนของน้ำจึงทำให้เกิดการพาความร้อนขึ้น

การแผ่รังสีความร้อน (heat radiation) เป็นการถ่ายโอนความร้อนโดยไม่ต้องอาศัยตัวกลาง เช่น โลกได้รับความร้อนที่ถ่ายโอนจากดวงอาทิตย์ผ่านสุญญากาศในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นต้น

ในบางครั้ง การถ่ายโอนความร้อนสามารถเกิดขึ้นได้จากการทั้งนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน เช่น การจับช้อนที่จุ่มลงในภาชนะโลหะที่ตั้งอยู่บนเตาไฟ ภาชนะโลหะจะนำความร้อนจากเปลวไฟไปสู่น้ำ แล้วโมเลกุลของน้ำจะพาความร้อนจากด้านล่างไปยังปลายช้อนโลหะด้านที่จุ่มน้ำ จากนั้น โมเลกุลของช้อนโลหะจะนำความร้อนสู่มือ นอกจากนี้ มือที่จับช้อนยังได้รับความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อนของเปลวไฟและน้ำด้วย ดังรูป 16.7

รูป 16.7 การถ่ายโอนความร้อน

การถ่ายโอนความร้อนเกิดขึ้นเมื่อวัตถุสองอันที่สามารถถ่ายโอนความร้อนถึงกันและกันได้มีอุณหภูมิแตกต่างกัน วัตถุที่มีอุณหภูมิสูงกว่าจะถ่ายโอนความร้อนไปยังวัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า จนกระทั่งวัตถุทั้งสองมีอุณหภูมิเท่ากัน การถ่ายโอนความร้อนดังกล่าวเป็นไปตามกฎการอนุรักษ์พลังงาน ดังนั้น ถ้าไม่มีการถ่ายโอนความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อมภายนอก ความร้อนที่วัตถุหนึ่งให้ (ความร้อนที่ลดลง) จะเท่ากับความร้อนที่อีกวัตถุหนึ่งได้รับ (ความร้อนที่เพิ่มขึ้น) เขียนแทนได้ด้วยสมการ

$$Q_{\text{ลด}} = Q_{\text{เพิ่ม}} \qquad (16.6)$$

การที่วัตถุมีการถ่ายโอนความร้อนจนไม่มีการถ่ายโอนความร้อนเมื่อมีอุณหภูมิเท่ากัน เรียกว่า วัตถุทั้งสองอยู่ใน**สมดุลความร้อน** (thermal equilibrium)

ตัวอย่าง 16.4 เหล็กมวล 0.4 กิโลกรัม เผาให้ร้อนจนมีอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส หย่อนลงไปในภาชนะที่เป็นฉนวนความร้อน ภายในบรรจุน้ำมวล 20 กิโลกรัม อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส ตั้งทิ้งไว้สุดท้ายอุณหภูมิของเหล็กและน้ำมีค่าเป็นเท่าใด กำหนดให้ความร้อนจำเพาะของน้ำและเหล็กเท่ากับ 4.18 กิโลจูลต่อกิโลกรัม เคลวินและ 0.450 กิโลจูลต่อกิโลกรัม เคลวิน ตามลำดับ

แนวคิด เมื่อวัตถุอยู่ในสมดุลความร้อน ความร้อนที่เพิ่มขึ้นของน้ำจะเท่ากับความร้อนที่ลดลงของเหล็ก ดังสมการ $Q_{\text{ลด}} = Q_{\text{เพิ่ม}}$ โดยความร้อนที่ทำให้สารเปลี่ยนอุณหภูมิโดยไม่เปลี่ยนสถานะได้จากสมการ $Q = mc\Delta T$ และหา $\Delta T\,(\text{K})$ ได้จากอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปในหน่วยเคลวิน $\Delta T\,(\text{K})$ มีค่าเท่ากับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปในหน่วยองศาเซลเซียส $\Delta t\,(^\circ\text{C})$

วิธีทำ กำหนดให้อุณหภูมิสุดท้ายของน้ำและเหล็ก เท่ากับ $\Delta t\,(^\circ\text{C})$ และหาความร้อนจาก

$$Q = mc\Delta T$$

หาความร้อนที่ลดลงของเหล็ก

แทนค่า $Q_{\text{iron}} = (0.4\text{ kg})(450\text{ J/kg K})(500\,^\circ\text{C} - t\,^\circ\text{C})$

จะได้ $Q_{\text{iron}} = (180\text{ J/K})(500\,^\circ\text{C} - t\,^\circ\text{C})$

หาความร้อนที่เพิ่มขึ้นของน้ำ

แทนค่า $Q_{\text{water}} = (20\text{ kg})(4.18\times10^3\text{ J/kg K})(t\,^\circ\text{C} - 22\,^\circ\text{C})$

จะได้ $Q_{\text{water}} = (8.36\times10^4\text{ J/K})(t\,^\circ\text{C} - 22\,^\circ\text{C})$

จากกฎการอนุรักษ์พลังงาน จะได้

$$Q_{\text{ลด}} = Q_{\text{เพิ่ม}}$$

แทนค่า $(180\ \text{J/K})(500\ ^\circ\text{C} - t\ ^\circ\text{C}) = (8.36\times10^4\ \text{J/K})(t\ ^\circ\text{C} - 22\ ^\circ\text{C})$

$$t = 23.03\ ^\circ\text{C}$$

ตอบ อุณหภูมิสุดท้ายของน้ำและเหล็กเท่ากับ 23.03 องศาเซลเซียส

ตัวอย่าง 16.5 ในการทดลองเมื่อจุ่มแท่งอะลูมิเนียมมวล 50 กรัม ที่มีอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ลงไปในน้ำมวล 100 กรัม ที่มีอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เมื่อเกิดการถ่ายโอนความร้อนจนเกิดสมดุลความร้อน พบว่า น้ำมีอุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส ความร้อนจำเพาะของอะลูมิเนียม (c_{Al}) มีค่าเท่าใด

แนวคิด อุณหภูมิของน้ำหลังจากจุ่มแท่งอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้นเนื่องจากความร้อนถ่ายโอนออกจากอะลูมิเนียมเข้าสู่น้ำ ถ้าไม่มีการถ่ายโอนความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อมภายนอก ความร้อนที่อะลูมิเนียมให้กับน้ำ (ความร้อนที่ลดลง) จะเท่ากับความร้อนที่น้ำได้รับจากอะลูมิเนียม (ความร้อนที่เพิ่มขึ้น) และความร้อนหาได้จากสมการ $Q = mc\Delta T$

วิธีทำ จาก $Q_{\text{ลด}} = Q_{\text{เพิ่ม}}$

และ $Q = mc\Delta T$

จะได้ $m_{\text{Al}}c_{\text{Al}}(T_{\text{Al}} - T_{\text{mixed}}) = m_{\text{water}}c_{\text{water}}(T_{\text{mixed}} - T_{\text{water}})$

นั่นคือ $$c_{\text{Al}} = c_{\text{water}}\frac{m_{\text{water}}\left(T_{\text{mixed}} - T_{\text{water}}\right)}{m_{\text{Al}}\left(T_{\text{Al}} - T_{\text{mixed}}\right)}$$

ให้ m_{Al} แทนมวลของแท่งอะลูมิเนียมซึ่งมีค่าเท่ากับ 50 กรัม

T_{Al} แทนอุณหภูมิของแท่งอะลูมิเนียมก่อนการถ่ายโอนความร้อนซึ่งมีค่าเท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

m_{water} แทนมวลของน้ำซึ่งมีค่าเท่ากับ 100 กรัม

T_{water} แทนอุณหภูมิของน้ำก่อนการถ่ายโอนความร้อนซึ่งมีค่าเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส

T_{mixed} แทนอุณหภูมิของน้ำและอะลูมิเนียมหลังการถ่ายโอนความร้อนซึ่งมีค่าเท่ากับ 32 องศาเซลเซียส

แทนค่า $$c_{Al} = \left(4186 \frac{J}{kg \cdot K}\right) \frac{(0.100\ kg)(32\ ^\circ C - 25\ ^\circ C)}{(0.050\ kg)(100\ ^\circ C - 32\ ^\circ C)}$$

$$= 861.8\ J/kg\,K$$

ตอบ ความร้อนจำเพาะของอะลูมิเนียม เท่ากับ 862 จูลต่อกิโลกรัม เคลวิน

ตัวอย่าง 16.5 เป็นข้อมูลที่สามารถทดลองได้โดยเตรียมแท่งอะลูมิเนียมที่มีอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ได้จากการจุ่มลงน้ำที่กำลังต้มจนเดือด แล้วทิ้งไว้จนกระทั่งแท่งอะลูมิเนียมมีอุณหภูมิเท่ากับน้ำเดือด จากนั้นนำแท่งอะลูมิเนียมมาจุ่มลงในน้ำที่บรรจุอยู่ในภาชนะที่สามารถป้องกันการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมภายนอกได้ เช่น กล่องโฟม หรือ แคลอริมิเตอร์ ทั้งนี้ ความร้อนจำเพาะของอะลูมิเนียมดังกล่าวอาจมีค่าต่ำกว่าความร้อนจำเพาะในตาราง 16.1 ซึ่งเท่ากับ 900 จูลต่อกิโลกรัม เคลวิน เนื่องจากมีการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมภายนอกและความคลาดเคลื่อนจากการวัดระหว่างการทดลอง

ความรู้เพิ่มเติม

แคลอริมิเตอร์ (calorimeter) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดสมบัติของสารที่เกี่ยวข้องกับความร้อน เช่น ความจุความร้อน ความร้อนจำเพาะ และความร้อนแฝงของสาร รวมถึงความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมี ไฟฟ้า และกลศาสตร์ ตัวภาชนะทำจากวัสดุที่เป็นฉนวนความร้อนเพื่อป้องกันการถ่ายโอนความร้อนกับสิ่งแวดล้อมภายนอก ภายในบรรจุด้วยของเหลวที่ทราบความร้อนจำเพาะและความร้อนแฝง เช่น น้ำ ของเหลวดังกล่าวทำหน้าที่รับหรือคายความร้อนที่เกิดจากการถ่ายโอนความร้อนระหว่างของเหลวกับสิ่งที่ต้องการศึกษา และเมื่อวัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปของของเหลวจะสามารถนำใช้หาปริมาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับสิ่งที่ต้องการศึกษาได้

รูป แคลอริมิเตอร์

รูป ส่วนประกอบภายในแคลอริมิเตอร์

คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 16.1

1. เหตุใดอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปในหน่วยเคลวินจึงมีค่าเท่ากับอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปในหน่วยองศาเซลเซียส
2. ความจุความร้อนและความร้อนจำเพาะเหมือนกันหรือไม่ อย่างไร
3. ในขณะที่ประกอบอาหารภายในห้องครัวโดยใช้ความร้อนจากเปลวไฟ เพราะเหตุใด คนที่อยู่ภายในครัวจึงรู้สึกว่าได้รับความร้อนจากเปลวไฟนั้น
4. การถ่ายโอนความร้อนเป็นไปตามกฎการอนุรักษ์พลังงานหรือไม่ อย่างไร
5. ถ้าใส่ตะปูที่เผาจนร้อนลงในแก้วที่มีน้ำพอสมควร อุณหภูมิของน้ำและตะปูจะเปลี่ยนแปลงอย่างไร เมื่อปล่อยทิ้งไว้เป็นเวลานาน อุณหภูมิของน้ำและตะปูจะเป็นอย่างไร

แบบฝึกหัด 16.1

1. จงเปลี่ยนอุณหภูมิต่อไปนี้
   ก. 30 °C, -10 °C, 110 °C, และ 12.15 °Cเป็นอุณหภูมิในหน่วยเคลวิน
   ข. 30 K, 250 K, 330 K และ 373.15 K เป็นอุณหภูมิในหน่วยองศาเซลเซียส
2. โลหะชนิดหนึ่งมวล 2 กิโลกรัม ได้รับความร้อน 2500 จูล ทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนจาก 25 องศาเซลเซียส เป็น 45 องศาเซลเซียส จงหาความจุความร้อนและความร้อนจำเพาะของวัตถุนี้
3. จงหาความร้อนที่ทำให้น้ำแข็งมวล 2 กิโลกรัม อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส หลอมเหลวเป็นน้ำอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 1 บรรยากาศ กำหนดให้ ความร้อนแฝงของการหลอมเหลวของน้ำแข็ง (L_f) เท่ากับ 3.33×10^5 จูลต่อกิโลกรัม
4. การทำให้น้ำมวล 0.5 กิโลกรัม 0 องศาเซลเซียส เป็นไอน้ำ 100 องศาเซลเซียส ต้องใช้ความร้อนเท่าใดที่ความดัน 1 บรรยากาศ กำหนดให้ความร้อนจำเพาะของน้ำ (c_{water}) เท่ากับ 4186 จูลต่อกิโลกรัม เคลวิน และความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (L_v) เท่ากับ 22.56×10^5 จูลต่อกิโลกรัม
5. นำก้อนโลหะมวล 300 กรัม ที่มีอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ใส่ลงในน้ำแข็งที่มีมวล 300 กรัม อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ซึ่งอยู่ในภาชนะที่ถูกหุ้มรอบด้วยฉนวนความร้อน ในที่สุดน้ำแข็งหลอมเหลวหมดกลายเป็นน้ำที่มีอุณหภูมิ 5.0 องศาเซลเซียส จงหา
   ก. ความร้อนที่ออกจากก้อนโลหะ
   ข. ความร้อนจำเพาะของโลหะที่ได้จากการทดลองนี้

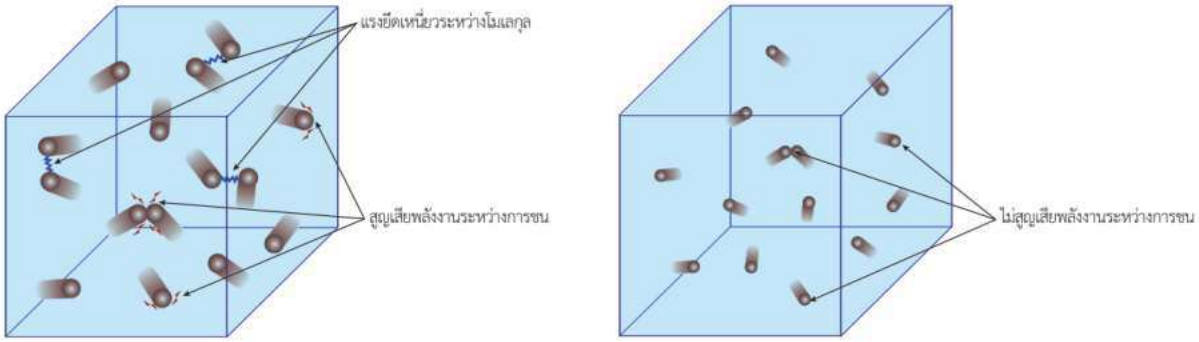
16.2 แก๊สอุดมคติ

สำหรับสารในสถานะแก๊ส โมเลกุลของแก๊สสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระและฟุ้งกระจายเต็มภาชนะที่บรรจุ ถ้าเปลี่ยนปริมาตรของภาชนะที่ใช้ในการบรรจุแก๊ส แก๊สก็จะมีปริมาตรเปลี่ยนไปตามปริมาตรของภาชนะที่บรรจุ เช่น ถ้าบรรจุแก๊สลงในลูกโป่งจำนวนสองลูกที่มีรูปร่างแตกต่างกัน แม้ลูกโป่งทั้งสองจะเชื่อมต่อกันให้แก๊สสามารถแลกเปลี่ยนไปมาได้ แก๊สจะยังคงมีปริมาตรตามรูปทรงของลูกโป่งนั้น ๆ ดังรูป 16.8 ปริมาตร ความดัน อุณหภูมิของแก๊สมีความสัมพันธ์กันหรือไม่ อย่างไร จะได้ศึกษาในรายละเอียดต่อไป

รูป 16.8 แก๊สเปลี่ยนปริมาตรตามรูปทรงของลูกโป่ง

16.2.1 แบบจำลองแก๊สอุดมคติ

เนื่องจากแก๊สจริงมีการสูญเสียพลังงานจลน์ระหว่างการชน มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล และมีโมเลกุลขนาดใหญ่จนปริมาตรของแก๊สอาจไม่เท่ากับปริมาตรของภาชนะที่บรรจุ ทำให้การอธิบายพฤติกรรมของแก๊สเป็นไปได้ยาก ดังรูป 16.9 ก. เพื่อให้การอธิบายพฤติกรรมของแก๊สง่ายขึ้น จึงมีการสร้างแบบจำลองแก๊สอุดมคติขึ้นมา ดังรูป 16.9 ข.



ก. แก๊สจริง ข. แบบจำลองแก๊สอุดมคติ

รูป 16.9 เปรียบเทียบแบบจำลองของแก๊สอุดมคติกับแก๊สจริง

แก๊สอุดมคติ (ideal gas) คือ แก๊สที่มีสมบัติดังต่อไปนี้

1. มีโมเลกุลขนาดเล็กมาก จนถือได้ว่าปริมาตรแต่ละโมเลกุลน้อยจนเกือบเป็นศูนย์เมื่อเทียบกับปริมาตรของภาชนะที่บรรจุ

2. ไม่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล แต่จะมีแรงกระทำต่อโมเลกุลของแก๊สเมื่อมีการชนกันเองหรือชนกับผนังภาชนะ

3. มีการเคลื่อนที่แบบสุ่ม กล่าวคือ การเคลื่อนที่ของโมเลกุลของแก๊สมีขนาดและทิศทางของความเร็วไม่แน่นอน โดยทุกโมเลกุลของแก๊สจะมีโอกาสในการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วขนาดใด ๆ และทิศทางใด ๆ ด้วยความน่าจะเป็นที่เท่ากันทุกโมเลกุล

4. โดยความน่าจะเป็นที่โมเลกุลของแก๊สจะมีความเร็วค่าใดค่าหนึ่งและทิศทางใดทิศทางหนึ่งมีค่าเท่ากัน

5. มีการชนแบบยืดหยุ่น กล่าวคือ โมเลกุลของแก๊สจะไม่มีการสูญเสียพลังงานจลน์ระหว่างการชน ไม่ว่าจะเป็นการชนกันระหว่างโมเลกุลของแก๊ส หรือการชนกับผนังภาชนะ

สมบัติของแก๊สอุดมคติดังกล่าว นำไปใช้อธิบายกฎของแก๊สอุดมคติและทฤษฎีจลน์ของแก๊สซึ่งกล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างความดัน ปริมาตร อุณหภูมิของแก๊สอุดมคติ ดังรายละเอียดที่จะได้ศึกษาต่อไป

16.2.2 กฎของแก๊สอุดมคติ

นักวิทยาศาสตร์พยายามที่จะทำความเข้าใจธรรมชาติของแก๊ส ได้มีการทดลองเพื่อศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างความดัน ปริมาตร และอุณหภูมิสัมบูรณ์ของแก๊สในภาชนะปิด จนสรุปเป็นกฎ 3 ข้อ ดังนี้

1. **กฎของบอยล์** (Boyle's law): รอเบิร์ต บอยล์ (Robert Boyle) นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรและความดันของแก๊สในสภาวะที่อุณหภูมิของแก๊สคงตัว และพบว่า สำหรับแก๊สในภาชนะปิด ถ้าอุณหภูมิของแก๊สคงตัว ความดัน (P) ของแก๊สจะแปรผกผันกับปริมาตร (V) ของแก๊ส หรืออาจ เขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้ คือ

$$P \propto \frac{1}{V} \qquad \text{เมื่อ อุณหภูมิคงตัว}$$

หรือ $$PV = K_1 \qquad \text{เมื่อ } K_1 \text{ คือ ค่าคงตัว} \qquad \text{(a)}$$

2. **กฎของชาร์ล** (Charles' law): ชาก-อาแลกซองดร์-เซซา ชาร์ล (Jacques-Alexandre-César Charles) นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศส ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรและอุณหภูมิสัมบูรณ์ของแก๊ส เมื่อความดันของแก๊สคงตัว และพบว่า สำหรับแก๊สในภาชนะปิด ถ้าความดัน (P) ของแก๊สคงตัว ปริมาตร (V) ของแก๊ส จะแปรผันตรงกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ (T) ของแก๊ส หรืออาจเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้ คือ

$$V \propto T \qquad \text{เมื่อ ความดันคงตัว}$$

หรือ $$\frac{V}{T} = K_2 \qquad \text{เมื่อ } K_2 \text{ คือ ค่าคงตัว} \qquad \text{(b)}$$

3. **กฎของเกย์-ลูสแซก** (Gay-Lussac's law): โชเซฟ-ลุย เก-ลูซัก (Joseph-Louis Gay-Lussac) นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศส ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิสัมบูรณ์ของแก๊ส เมื่อปริมาตรของแก๊สคงตัว และพบว่า สำหรับแก๊สในภาชนะปิด ถ้าปริมาตร (V) ของแก๊สคงตัว ความดัน (P) ของแก๊สจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ (T) ของแก๊ส หรืออาจเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้ คือ

$$P \propto T \qquad \text{เมื่อ ปริมาตรคงตัว}$$

หรือ $$\frac{P}{T} = K_3 \qquad \text{เมื่อ } K_3 \text{ คือ ค่าคงตัว} \qquad \text{(c)}$$

จากสมการ (a) (b) และ (c) ทำให้ได้ความสัมพันธ์

$$\frac{PV}{T} = K_4 \qquad \text{เมื่อ } K_4 \text{ คือ ค่าคงตัว} \qquad \text{(d)}$$

หรือสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแก๊สในสภาวะที่ 1 และสภาวะที่ 2 คือ

$$\frac{P_1V_1}{T_2} = \frac{P_2V_2}{T_2}$$

เราทราบว่า **ที่อุณหภูมิและความดันที่ภาวะมาตรฐานของแก๊ส** (Standard Temperature and Pressure: STP) ซึ่งคือ อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส (273.15K) และความดัน 1 บรรยากาศ (1.01325×10^5 N/m^2) แก๊สจำนวน 1 โมล จะมีปริมาตรเท่ากับ 22.4 ลิตร หรือ 22.4 ลูกบาศก์เดซิเมตร ดังนั้น สำหรับแก๊สที่มีจำนวน n โมล ที่ STP จะมีปริมาณต่างๆ ดังนี้

$$V = n\times22.4\ \text{dm}^3/\text{mol} = n\times22.4\times10^{-3}\ \text{m}^3/\text{mol}$$

$$T = 273\ \text{K}$$

$$P = 1.013\times10^5\ \text{N/m}^2$$

แทนค่า V T และ P ในสมการ (d) จะได้

$$K_4 = \frac{PV}{T} = \frac{(1.013\times10^5\ \text{N/m}^2)(n\times22.4\times10^{-3}\ \text{m}^3/\text{mol})}{273.15\ \text{K}}$$

$$= n\left(8.30723\ \frac{\text{Nm}}{\text{mol K}}\right)$$

หรือ
$$\frac{PV}{T} = n(8.31\ \text{J/mol K})$$

ค่า 8.31 J/mol K เป็นค่าคงตัวสำหรับแก๊สทุกชนิด เรียกว่า **ค่าคงตัวแก๊ส** (gas constant) ใช้สัญลักษณ์ R ดังนั้น จึงเขียนความสัมพันธ์ได้เป็น

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

หรือ
$$PV = nRT \qquad (16.7)$$

สมการ (16.7) เรียกว่า **กฎของแก๊สอุดมคติ** (ideal gas law) โดยแก๊สที่มีพฤติกรรมสอดคล้องกับสมการนี้จึงเรียกว่า แก๊สอุดมคติ โดยสำหรับในระดับนี้ จะอนุโลมให้แก๊สทุกชนิดที่กล่าวถึงมีพฤติกรรมสอดคล้องกับแก๊สอุดมคติ

ข้อสังเกต

ค่าคงตัวแก๊ส (gas constant) หรือใช้สัญลักษณ์ R ซึ่งมีค่าในหน่วยเอสไอ เท่ากับ 8.31 J/mol K หรือ 8.31 Nm/mol K นิยมใช้สำหรับการคำนวณที่เกี่ยวข้องกับแก๊สที่มีปริมาตรในหน่วยลูกบาศก์เมตร (m^3) และความดันในหน่วยพาสคาล (Pa) แต่สำหรับในการคำนวณที่เกี่ยวข้องกับแก๊สที่มีปริมาตรใน หน่วยลิตร (L) และความดันในหน่วยบรรยากาศ (atm) ในทางเคมี นิยมใช้ R เท่ากับ 0.0821 L atm/mol K

ถ้าแทน $n = \frac{N}{N_A}$ เมื่อ N คือ จำนวนโมเลกุลของแก๊ส และ N_A คือ **เลขอาโวกาโดร** (Avogadro's number) หรือ **ค่าคงตัวอาโวกาโดร** (Avogadro's constant) ซึ่งเท่ากับ 6.02×10^{23} mol^{-1} ลงในสมการ (16.7) จะได้

$$PV = N\frac{R}{N_A}T$$

ถ้าให้ k_B เป็นค่าคงตัว เรียกว่า **ค่าคงตัวโบลต์ซมันน์** (Boltzmann constant) ซึ่งเท่ากับ

$$k_B = \frac{R}{N_A} = \frac{8.31\ \text{J/mol K}}{6.02\times10^{23}\ \text{mol}^{-1}} = 1.38\times10^{-23}\ \text{J/K}$$

กฎของแก๊สอุดมคติตามสมการ (16.7) จึงสามารถเขียนได้อีกรูปแบบหนึ่ง คือ

$$PV = Nk_BT \qquad (16.8)$$

รู้หรือไม่

สมการ $PV = nRT$ และ $PV = Nk_BT$ เป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง P V n N และ T ของแก๊สอุดมคติ แต่สมการดังกล่าวก็ยังสามารถนำไปใช้อธิบายแก๊สจริงได้ในกรณีที่แก๊สอยู่ในภาชนะปิดที่มีความดันต่ำและอุณหภูมิสูง

ความรู้เพิ่มเติม

ในวันที่ 20 พฤษภาคม 2562 **ระบบหน่วยระหว่างชาติ** (The Internationnal System of Units) หรือระบบเอสไอ (SI) ได้เปลี่ยนนิยามหน่วยของอุณหภูมิอุณหพลวัตซึ่งคือ **เคลวิน** (kelvin) โดยอ้างอิงกับค่าคงตัวโบลต์ซมันน์แทนการอ้างอิงกับอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะของน้ำ ซึ่งจากนิยามใหม่นี้ กำหนดว่าการเพิ่มอุณหภูมิ 1 เคลวิน มีค่าเท่ากับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทางอุณหพลศาสตร์ที่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนพลังงานความร้อน k_BT เท่ากับ 1.380649×10^{-23} จูล

ความรู้เพิ่มเติม

อาเมเดโอ อาโวกาโดร (Amaedeo Avogadro ค.ศ. 1776 - 1856 หรือ พ.ศ. 2319-2399) นักวิทยาศาสตร์ชาวอิตาลี ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาจำนวนโมเลกุลของแก๊สที่สภาวะต่าง ๆ จนนำไปสู่การเสนอสมมติฐานในปี ค.ศ. 1811 หรือ พ.ศ. 2354 ซึ่งมีใจความว่า "ที่อุณหภูมิและความดันเดียวกัน แก๊สต่างชนิดกันที่มีปริมาตรเท่ากันจะมีจำนวนโมเลกุลเท่ากัน" สมมติฐานดังกล่าวไม่ได้รับการยอมรับมากนักในช่วงเวลาที่เขามีชีวิตอยู่ จนกระทั่งภายหลังได้มีนักวิทยาศาสตร์อีกหลายคนได้ทำการทดลองที่ให้ผลยืนยันความสัมพันธ์ดังกล่าว สมมติฐานของอาโวกาโดรจึงได้รับการยอมรับในที่สุด และเพื่อเป็นเกียรติแก่อาโวกาโดร เลขแสดงจำนวนโมเลกุลของแก๊สจำนวน 1 โมล ซึ่งเท่ากับ $6.02214076 \times 10^{23}\ \text{mol}^{-1}$ หรือที่นิยมใช้ คือ $6.02 \times 10^{23}\ \text{mol}^{-1}$ จึงเรียกว่า **เลขอาโวกาโดร** (Avogadro number: N_A)

รูป อาโวกาโดร

ตัวอย่าง 16.6 แก๊สชนิดหนึ่งมีปริมาตร 1.00 ลูกบาศก์เมตร อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียสและ ความดัน 1.00 บรรยากาศ จงหาปริมาตรของแก๊สจำนวนนี้ที่อุณหภูมิ 127 องศาเซลเซียส และความดัน 2.00 บรรยากาศ

แนวคิด เมื่อทำให้แก๊สมีอุณหภูมิและความดันเปลี่ยนไป ปริมาตรของแก๊สจะเปลี่ยนไปด้วย ซึ่งเป็นไปตามกฎของแก๊ส $PV = nRT$ กล่าวคือ แก๊สในสภาวะที่ 1 จะได้ $P_1V_1 = n_1RT_1$ และ แก๊สในสภาวะที่ 2 จะได้ $P_2V_2 = n_2RT_2$ หากแก๊สมีจำนวนโมเลกุลเท่าเดิม นั่นคือ $n_1 = n_2$ จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแก๊สในสภาวะที่ 1 และสภาวะที่ 2 คือ $\frac{P_1V_1}{T_1} = \frac{P_2V_2}{T_2}$

วิธีทำ จากโจทย์ ที่สภาวะเดิม $P_1 = 1.013 \times 10^5$ Pa $T_1 = 300$ K และ $V_1 = 1$ m^3

ที่สภาวะใหม่ $P_2 = 2 \times 1.013 \times 10^5$ Pa $= 2.026 \times 10^5$ Pa และ $T_2 = 400$ K

จาก $$\frac{P_1V_1}{T_1} = \frac{P_2V_2}{T_2}$$

จะได้ $$V_2 = \frac{P_1V_1}{T_1}\frac{T_2}{P_2}$$

แทนค่า $$V_2 = \frac{(1.013\times10^5\ \text{Pa})(1\text{m}^3)}{(300\,\text{K})}\ \frac{(400\ \text{K})}{(2.026\times10^5\ \text{Pa})}$$

$$= 0.67\ \text{m}^3$$

ตอบ แก๊สมีปริมาตรเท่ากับ 0.67 ลูกบาศก์เมตร

ตัวอย่าง 16.7 แก๊สออกซิเจนในถังที่มีปริมาตร 40 ลูกบาศก์เดซิเมตร เดิมมีความดัน 20 บรรยากาศ และมีอุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ต่อมาแก๊สรั่วไปบางส่วนจนมีความดัน 4 บรรยากาศ และมีอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส จงหาว่าแก๊สรั่วไปกี่กิโลกรัม กำหนดให้ ออกซิเจน 1 โมล มีมวลเท่ากับ 32 กรัม

แนวคิด เมื่อแก๊สในถังรั่วออกไป ปริมาณแก๊สหรือโมลของแก๊สในถังลดลง ซึ่งจำนวนโมลของแก๊สก่อนและหลังรั่ว หาได้จากความสัมพันธ์ $PV = nRT$

วิธีทำ จาก $PV = nRT$

จะได้ $n = \dfrac{PV}{RT}$

ที่สภาวะเดิม $P_1 = 20 \times 1.013 \times 10^5\ \text{Pa}$ $T_1 = 300\ \text{K}$ และ $V_1 = 40 \times 10^{-3}\ \text{m}^3$

แทนค่า $n_1 = \dfrac{P_1V_1}{RT_1}$

$$= \frac{(20\times1.013\times10^5\ \text{N/m}^2)(40\times10^{-3}\ \text{m}^3)}{(8.31\ \text{J/mol K})(300\ \text{K})}$$

$$= 32.51\ \text{mol}$$

ที่สภาวะใหม่ $P_2 = 4 \times 1.013 \times 10^5\ \text{Pa}$ $T_2 = 293\ \text{K}$ และ $V_1 = 40 \times 10^{-3}\ \text{m}^3$

แทนค่า $n_2 = \dfrac{P_2V_2}{RT_2}$

$$= \frac{(4.0\times1.013\times10^5\ \text{N/m}^2)(40\times10^{-3}\ \text{m}^3)}{(8.31\ \text{J/mol K})(293\ \text{K})}$$

$$= 6.66\ \text{mol}$$

ดังนั้นแก๊สรั่วไปหาได้จาก

$$n_1 - n_2 = 32.51\ \text{mol} - 6.66\ \text{mol}$$

$$= 25.85\ \text{mol}$$

จาก ออกซิเจน 1 โมล มีมวลเท่ากับ 32 กรัม

ดังนั้น มวลของแก๊สออกซิเจน $= (25.85\ \text{mol})\ (32\ \text{g/mol})$

$$= 827\ \text{g}$$

$$= 0.827\ \text{kg}$$

ตอบ แก๊สออกซิเจนรั่วออกจากถัง 0.827 กิโลกรัม

ตัวอย่าง 16.8 แก๊สปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร ที่ STP แก๊สดังกล่าวมีจำนวนโมเลกุลเท่าใด

แนวคิด หาจำนวนโมเลกุลของแก๊สจากกฎของแก๊สอุดมคติ จากสมการ $PV = Nk_BT$ โดยที่ STP หมายถึง อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ หรือ 1.013×10^5 Pa

วิธีทำ จาก $$PV = Nk_BT$$

จะได้ $$N = \frac{PV}{k_BT}$$

แทนค่า $$N = \frac{(1.01325\times10^5\ \mathrm{N/m^2})(1\ \mathrm{m^3})}{(1.38\times10^{-23}\ \mathrm{J/K})(273.15\ \mathrm{K})}$$

$$N = 2.69\times10^{25}\ \text{โมเลกุล}$$

ตอบ แก๊ส 1 ลูกบาศก์เมตร ที่ความดันและอุณหภูมิมาตรฐานมีจำนวนโมเลกุลเท่ากับ 2.69×10^{25} โมเลกุล

คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 16.2

1. แก๊สสามารถถูกบีบอัดให้มีปริมาตรลดลงจากเดิมได้มาก เพราะเหตุใด
2. แก๊สอุดมคติมีสมบัติอย่างไร
3. ความดัน ปริมาตร และอุณหภูมิสัมบูรณ์ของแก๊สอุดมคติในภาชนะปิดมีความสัมพันธ์กันหรือไม่อย่างไร
4. พิจารณากระบอกสูบ 2 กระบอก กระบอกสูบแรกมีปริมาตรเป็นสองเท่าของกระบอกสูบที่สอง กระบอกสูบทั้งสองมีอุณหภูมิเท่ากัน และบรรจุด้วยแก๊สชนิดเดียวกัน จะหาความดันของแก๊สภายในกระบอกสูบทั้งสองได้หรือไม่ เพราะเหตุใด

แบบฝึกหัด 16.2

1. ยางรถยนต์มีความดันอากาศภายในยางรถยนต์ 200 กิโลพาสคัล และมีอุณหภูมิ 283 เคลวิน หลังจากรถเคลื่อนที่ไปได้ 100 กิโลเมตร อุณหภูมิของอากาศในยางรถยนต์เพิ่มขึ้นเป็น 313 เคลวิน จงหาความดันของอากาศในยางรถยนต์ตอนหลังนี้ กำหนดให้ปริมาตรยางคงตัว
2. พิจารณาภาชนะที่มีปริมาตรคงตัว บรรจุแก๊สอาร์กอนมีความดัน 3.00×10^5 พาสคัล ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน เพิ่มอุณหภูมิของภาชนะเป็น 400 เคลวิน หลังจากนั้นแก๊สรั่วไหลออกจากภาชนะ คิดเป็นร้อยละ 20 ของปริมาณแก๊สเริ่มต้น จงหา
   ก. ความดันของแก๊สอาร์กอนภายในภาชนะก่อนแก๊สรั่ว ขณะที่มีอุณหภูมิ 400 เคลวิน
   ข. ความดันของแก๊สอาร์กอนภายในภาชนะหลังแก๊สรั่ว ขณะที่มีอุณหภูมิ 400 เคลวิน

16.3 ทฤษฎีจลน์ของแก๊ส

หากนำขวดแก้วไปจุ่มในน้ำสบู่หรือน้ำยาล้างจาน ดังรูป 16.10 ก. จะเกิดฟิล์มบางอยู่ในระดับเดียวกับขอบของปากขวดแก้ว เมื่อนำขวดแก้วพร้อมฟิล์มบางนี้ไปวางในภาชนะที่บรรจุน้ำร้อน จะพบว่าเมื่อแก๊สภายในขวดได้รับความร้อน จะมีความดันสูงขึ้นแล้วทำให้ฟิล์มบางนูนขึ้นจากปากขวด ดังรูป 16.10 ข.

ก. จุ่มขวดแก้วลงในน้ำสบู่หรือน้ำยาล้างจาน เพื่อสร้างฟิล์มบางที่ปากขวดแก้ว

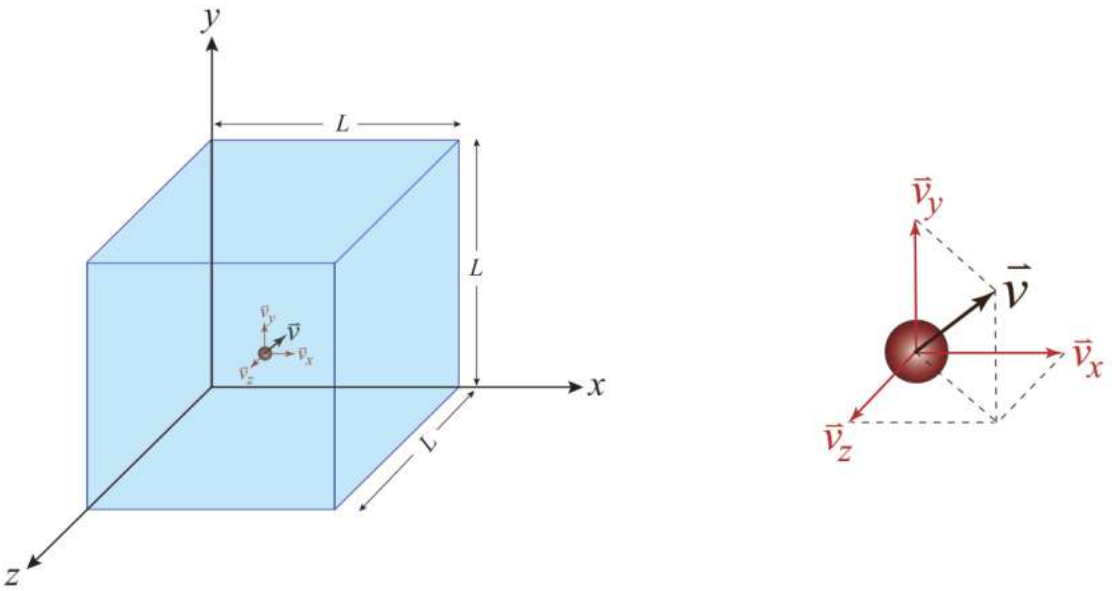
ข. แก๊สภายในขวดได้รับความร้อนทำให้ฟิล์มบางนูนขึ้นจากปากขวดแก้ว

รูป 16.10 การเปลี่ยนแปลงความดันของแก๊สเมื่อได้รับความร้อน

การเปลี่ยนแปลงความดันของแก๊สเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป ดังรูป 16.10 สามารถอธิบายได้โดยใช้ความรู้เกี่ยวกับ**ทฤษฎีจลน์ของแก๊ส** (kinetic theory of gases) ซึ่งเป็นการศึกษาพฤติกรรมของแก๊สอุดมคติในระดับโมเลกุล เช่น อัตราเร็วและพลังงานจลน์เฉลี่ยของโมเลกุล เพื่อใช้อธิบายสมบัติทางกายภาพบางประการของแก๊ส ได้แก่ ความดัน ปริมาตร และอุณหภูมิ ทฤษฎีจลน์ของแก๊สคืออะไร ศึกษาได้จากหัวข้อนี้

16.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอัตราเร็วอาร์เอ็มเอสของโมเลกุลของแก๊ส

ในการพิจารณาความดันและอัตราเร็วของโมเลกุลของแก๊ส จะเริ่มต้นจากแก๊สอุดมคติเพียงโมเลกุลเดียวที่บรรจุอยู่ในภาชนะทรงลูกบาศก์ขนาด $L\times L\times L$ โดยให้โมเลกุลของแก๊สดังกล่าวมีมวล m เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว $\vec{v}$ ที่มีองค์ประกอบของความเร็วในแนวแกน x แกน y และแกน z คือ $\vec{v}_x$ $\vec{v}_y$ และ $\vec{v}_z$ ตามลำดับ ดังรูป 16.11



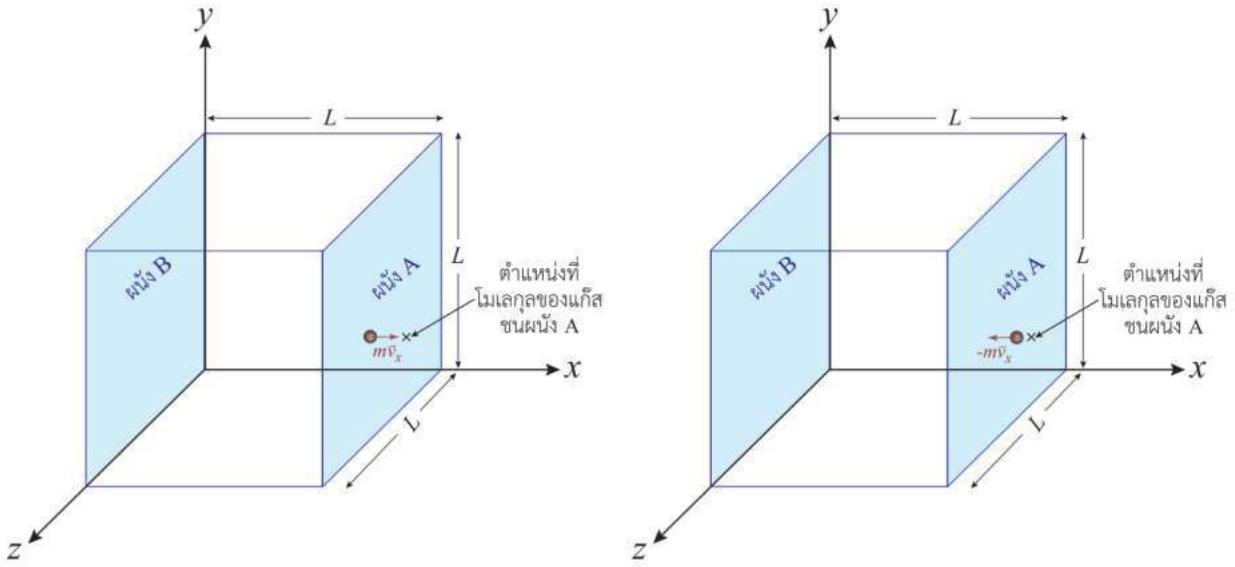
ก. โมเลกุลของแก๊สในภาชนะทรงลูกบาศก์ ข. องค์ประกอบความเร็วของโมเลกุลของแก๊ส

รูป 16.11 การเคลื่อนที่ของโมเลกุลของแก๊สในภาชนะทรงลูกบาศก์

ในการหาความดัน พิจารณาจากการที่โมเลกุลของแก๊สเคลื่อนที่ชนผนังแบบยืดหยุ่น ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม ($\Delta\vec{p}$) โดยมีแรงดล ($\vec{F}$) ที่ผนังกระทำกับโมเลกุลของแก๊สตามสมการ

$$\vec{F} = \frac{\Delta\vec{p}}{\Delta t} = \frac{\Delta m\vec{v}}{\Delta t}$$

สำหรับการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของแก๊สที่ชนผนัง A หากพิจารณาเฉพาะองค์ประกอบของการเคลื่อนที่ในแนวแกน x โมเลกุลของแก๊สมีโมเมนตัมก่อนชนในแนวแกน x เท่ากับ $m\vec{v}_x$ ดังรูป 16.12 ก. และมีโมเมนตัมหลังชนในแนวแกน x เท่ากับ $-m\vec{v}_x$ ดังรูป 16.12 ข.



ก. โมเมนตัมของแก๊สก่อนชนผนัง A ข. โมเมนตัมของแก๊สหลังชนผนัง A

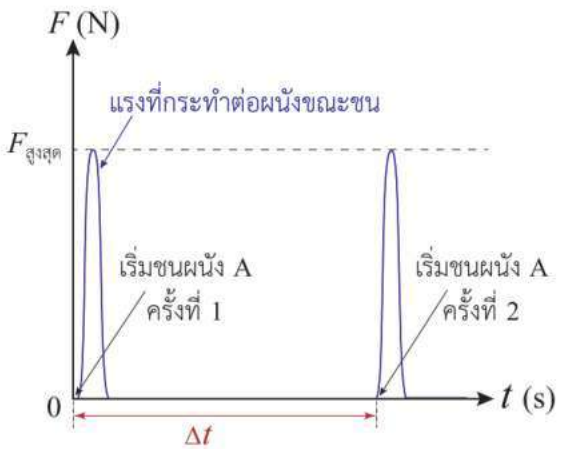
รูป 16.12 โมเมนตัมของโมเลกุลของแก๊สก่อนและหลังชนภาชนะในแนวแกน x

การเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของโมเลกุลของแก๊สจากการชนผนัง A ในแนวแกน x หาได้จาก

$$\Delta\vec{p}_x = \text{โมเมนตัมหลังชน} - \text{โมเมนตัมก่อนชน}$$

แทนค่าจะได้ $$\Delta p_x = \left(-mv_x\right) - \left(mv_x\right) = -2mv_x$$

การที่โมเลกุลของแก๊สชนผนัง A แต่ละครั้งจะทำให้เกิดแรงกระทำต่อผนังที่ชนมีขนาดเท่ากับแรงดลที่ผนังกระทำต่อโมเลกุลของแก๊ส ซึ่งเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับเวลาได้ดังรูป 16.13 โดย Δt เป็นช่วงเวลาตั้งแต่โมเลกุลของแก๊สเริ่มชนผนัง A ครั้งที่ 1 ไปจนถึงโมเลกุลของแก๊สเริ่มชนผนัง A ครั้งที่ 2

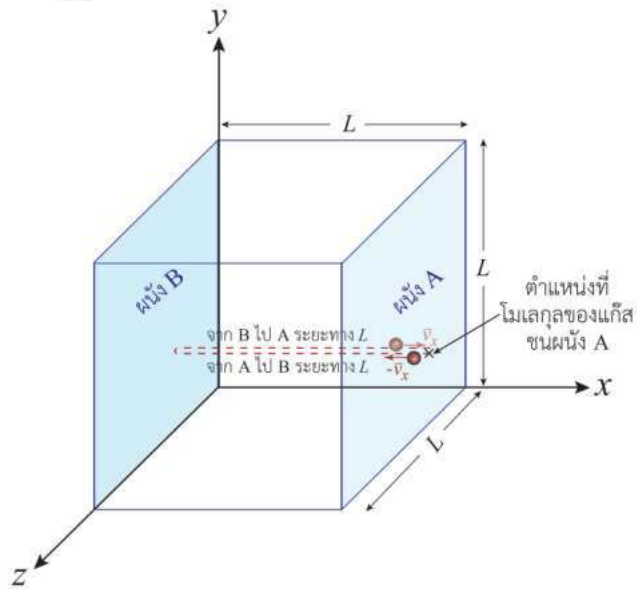


รูป 16.13 แรงที่โมเลกุลของแก๊สกระทำต่อผนังภาชนะขณะเวลาต่าง ๆ

การเปลี่ยนโมเมนตัมของโมเลกุลของแก๊สขนาด Δp_x เกิดขึ้นในช่วงที่โมเลกุลของแก๊สชนผนัง A ครั้งที่ 1 แล้วสะท้อนออกไปชนผนังด้านตรงข้าม จากนั้นสะท้อนกลับมาก่อนเริ่มชนผนัง A ครั้งที่ 2 ซึ่งใช้เวลา Δt ดังนั้น ขนาดของแรงเฉลี่ยในแนวแกน x ($\bar{F}_x$) ที่กระทำกับผนัง A หาได้จาก

$$\bar{F}_x = \frac{\Delta p_x}{\Delta t} = \frac{2mv_x}{\Delta t} \qquad \text{(e)}$$

หาช่วงเวลา Δt ในการชนได้จากการที่โมเลกุลของแก๊สเคลื่อนที่กลับไปกลับมาระหว่างผนังภาชนะ โดยระยะทางระหว่างผนัง A และผนัง B ของภาชนะในแนวแกน x มีค่าเท่ากับ L ดังนั้น ระยะทางในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของแก๊สจากการชนผนัง A แล้วกลับมาชนผนัง A อีกครั้งเท่ากับ $2L$ ดังรูป 16.14 ดังนั้น สามารถหาเวลา Δt ได้จาก



รูป 16.14 การเคลื่อนที่ของโมเลกุลของแก๊สจากการชนผนัง A แล้วกลับมาชนผนัง A อีกครั้ง

$$\Delta t = \frac{2L}{v_x} \qquad \text{(f)}$$

แทน Δt ในสมการ (e) จะได้ แรงเฉลี่ยในแนวแกน x ที่โมเลกุลของแก๊สกระทำกับผนัง A คือ

$$\bar{F}_x = \frac{2mv_x}{2L/v_x}$$

$$\bar{F}_x = \frac{mv_x^2}{L}$$

หากพิจารณาแก๊สจำนวน N โมเลกุล บรรจุอยู่ในกล่องทรงลูกบาศก์ขนาด $L \times L \times L$ ถ้าให้ $\vec{v}_1, \vec{v}_2, ..., \vec{v}_N$ เป็นความเร็วของโมเลกุลของแก๊สโมเลกุลที่ 1, 2, …, N ตามลำดับ และองค์ประกอบของความเร็วในแนวแกน x ของแต่ละโมเลกุล คือ $v_{x_1}, v_{x_2}, ..., v_{x_N}$ จะได้แรงเฉลี่ยที่แก๊สจำนวน N โมเลกุล กระทำกับผนังที่ชน มีค่าดังสมการ

$$F_x = F_{x_1} + F_{x_2} + \cdots F_{x_N}$$

$$= \frac{mv_{x_1}^2}{L} + \frac{mv_{x_2}^2}{L} + \cdots + \frac{mv_{x_N}^2}{L}$$

ดังนั้น

$$\bar{F}_x = \frac{m}{L}\left(v_{x_1}^2 + v_{x_2}^2 + \cdots + v_{x_N}^2\right)$$

ถ้าให้ $\overline{v_x^2}$ แทน ค่าเฉลี่ยของอัตราเร็วยกกำลังสองในแนวแกน x ของแก๊สจำนวน N โมเลกุล ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\overline{v_x^2} = \frac{v_{x_1}^2 + v_{x_2}^2 + ... + v_{x_N}^2}{N}$$

แทนค่า $$\bar{F}_x = \frac{Nm}{L}\overline{v_x^2}$$

ถ้าให้ P_x แทนความดันของแก๊สเนื่องจากแรงเฉลี่ยในแนวแกน x กระทำบนผนังที่มีพื้นที่ $A = L^2$ ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$P_x = \frac{\bar{F}_x}{A}$$

แทนค่า $$P_x = \left(\frac{Nm\overline{v_x^2}}{L}\right)\left(\frac{1}{L^2}\right)$$

$$P_x = \frac{Nm\overline{v_x^2}}{L^3}$$

แทนค่า ปริมาตรของกล่องที่บรรจุ $V = L^3$

จะได้ $$P_x = \frac{Nm\overline{v_x^2}}{V} \qquad (16.9)$$

เนื่องจากความดันของแก๊สในภาชนะเดียวกันจะมีค่าเท่ากันทุกตำแหน่ง ความดันที่ผนังทุกด้านจึงเท่ากัน นั่นคือ

$$P_x = P_y = P_z$$

หรือ $$\frac{Nm\overline{v_x^2}}{V} = \frac{Nm\overline{v_y^2}}{V} = \frac{Nm\overline{v_z^2}}{V}$$

ดังนั้น $$\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2} \qquad (g)$$

สมการ (g) แสดงให้เห็นว่า ค่าเฉลี่ยของอัตราเร็วยกกำลังสองในแนวแกน y และ z จะมีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ยของอัตราเร็วยกกำลังสองในแนวแกน x ด้วย

เราสามารถเปลี่ยนรูปสมการข้างต้นได้ด้วยเงื่อนไขการเคลื่อนที่แบบสุ่มของแก๊สอุดมคติ จากขนาดของความเร็วกำลังสองของแก๊สโมเลกุลที่ i ใด ๆ มีค่าเป็น $v_i^2 = v_{x_i}^2 + v_{y_i}^2 + v_{z_i}^2$ เมื่อนำไปหาค่าเฉลี่ยของปริมาณนี้สำหรับโมเลกุลของแก๊สทุกโมเลกุล จะได้

$$\overline{v^2} = \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2}$$

ซึ่งทำให้ $$\overline{v^2} = 3\overline{v_x^2}$$

นั่นคือ $$\overline{v_x^2} = \frac{1}{3}\overline{v^2}$$

เมื่อแทนในสมการที่ (16.9) จะได้ความดันของแก๊สในภาชนะ ดังสมการ

$$P_x = \frac{1}{3}\frac{Nm}{V}\overline{v^2}$$

ถ้าให้ P แทนความดันของแก๊สในภาชนะที่ตำแหน่งใด ๆ ซึ่งจะมีค่าเท่ากันทั่วทั้งภาชนะและเท่ากับความดันของแก๊สที่ผนัง นั่นคือ $P = P_x$ (และเท่ากับ P_y และ P_z ด้วย) ดังนั้น

$$P = \frac{1}{3}\frac{Nm}{V}\overline{v^2} \qquad (16.10)$$

จากสมการ (16.10) ถ้าทราบอัตราเร็วเฉลี่ยกำลังสองเฉลี่ยของแก๊สในถังก็จะทำให้สามารถประมาณความดันของแก๊สได้ และถ้าในทางกลับกัน ถ้าทราบความดันของแก๊สทำให้สามารถประมาณอัตราเร็วเฉลี่ยของแก๊สในถังได้ด้วยเช่นกัน

ถ้าให้ v_{rms} ซึ่งเท่ากับ $\sqrt{\overline{v^2}}$ เรียกว่า อัตราเร็วเฉลี่ยแบบรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย หรือ **อัตราเร็วอาร์เอ็มเอส** (root-mean-square speed) นั่นคือ

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{v_1^2 + v_2^2 + \ldots + v_N^2}{N}} \qquad (16.11)$$

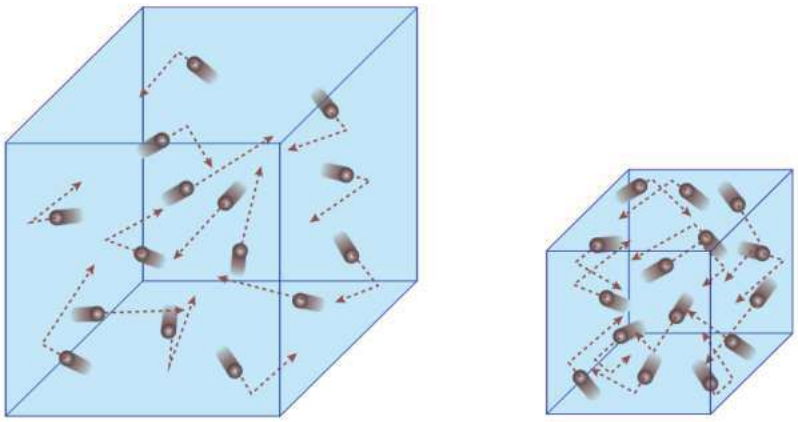
ข้อสังเกต

อัตราเร็วเฉลี่ย หาได้จาก $\overline{v} = \frac{v_1 + v_2 + \ldots + v_N}{N}$ ในขณะที่อัตราเร็วอาร์เอ็มเอสของแก๊สหาได้จาก $v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{v_1^2 + v_2^2 + \ldots + v_N^2}{N}}$

แทนค่า ในสมการ (16.10) จะได้

$$P = \frac{1}{3}\frac{Nm}{V}\overline{v_{\text{rms}}^2} \qquad (16.12)$$

จากสมการ (16.12) จะเห็นได้ว่า การพิจารณาความดันของแก๊สในมุมมองการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของแก๊สช่วยให้สามารถอธิบายพฤติกรรมของแก๊สตามกฎของบอยล์ได้ เช่น ในกรณีอุณหภูมิของแก๊สคงตัว การลดปริมาตรทำให้ความดันเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อปริมาตรของภาชนะลดลง ภาชนะจะมีพื้นที่ผิวลดลง จึงทำให้จำนวนโมเลกุลของแก๊สที่ชนต่อพื้นที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งเมื่อระยะระหว่างผนังลดลงทำให้ช่วงเวลาที่โมเลกุลของแก๊สชนผนังแต่ละครั้งที่ถัดกัน (Δt) ลดลงหรือมีความถี่ในการชนเพิ่มขึ้น ทั้งสองกรณีจึงทำให้ความดันของแก๊สมีค่าเพิ่มขึ้น ดังรูป 16.15



ก. ปริมาตรมาก ความดันน้อย ข. ปริมาตรน้อย ความดันมาก

รูป 16.15 การเปลี่ยนแปลงความดัน เมื่อปริมาตรเปลี่ยน ในขณะที่อุณหภูมิและจำนวนโมเลกุลของแก๊สคงตัว

16.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สกับอุณหภูมิ

จากการศึกษาแก๊สอุดมคติจะพบว่าโมเลกุลของแก๊สมีการเคลื่อนที่ตลอดเวลา แสดงว่าโมเลกุลของแก๊สมีพลังงานจลน์ ซึ่งพลังงานจลน์ดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิของแก๊สหรือไม่ สามารถพิจารณาได้ดังนี้

จากสมการ (16.12) $$P = \frac{1}{3}\frac{Nm}{V}v_{\text{rms}}^2$$

จัดรูปใหม่ได้เป็น $$PV = \frac{2}{3}N\left(\frac{1}{2}mv_{\text{rms}}^2\right)$$

ถ้าให้ $\bar{E}_k$ คือ พลังงานจลน์เฉลี่ยของแต่ละโมเลกุลในภาชนะ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{2}mv_{\text{rms}}^2$

จะได้ $$PV = \frac{2}{3}N\bar{E}_{\text{k}} \qquad (16.13)$$

เมื่อเทียบกับกฎของแก๊สอุดมคติตามสมการ (16.8) คือ $PV = Nk_{\text{B}}T$

จะได้ $$\frac{2}{3}N\bar{E}_{\text{k}} = Nk_{\text{B}}T$$

ดังนั้น $$\bar{E}_{\text{k}} = \frac{3}{2}k_{\text{B}}T \qquad (16.14)$$

สมการ (16.14) แสดงให้เห็นว่า พลังงานจลน์เฉลี่ยของโมเลกุลของแก๊สแปรผันตรงกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ของแก๊ส อาจกล่าวได้ว่า อุณหภูมิของแก๊สเป็นปริมาณที่แสดงระดับพลังงานจลน์เฉลี่ยของโมเลกุลนั่นเอง

ตัวอย่าง 16.9 จงหาพลังงานจลน์เฉลี่ยของโมเลกุลของแก๊สที่ 30 องศาเซลเซียส

แนวคิด หาอุณหภูมิสัมบูรณ์จาก $T = t + 273.15$ แล้วหาพลังงานจลน์เฉลี่ยของโมเลกุลของแก๊ส จากสมการ $\bar{E}_k = \frac{3}{2}k_B T$

วิธีทำ จาก $T = t + 273.15$

แทนค่า $T = (30 + 273.15)\,\mathrm{K}$

$= 303.15\,\mathrm{K}$

จาก $\bar{E}_k = \frac{3}{2}k_B T$

แทนค่า $\bar{E}_k = \frac{3}{2}(1.38 \times 10^{-23}\ \mathrm{J/K})(303.15\ \mathrm{K})$

ดังนั้น $= 6.275 \times 10^{-21}\ \mathrm{J}$

ตอบ พลังงานจลน์เฉลี่ยของโมเลกุลของแก๊สที่ 30 องศาเซลเซียส เท่ากับ 6.275×10^{-21} จูล

16.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วอาร์เอ็มเอสของโมเลกุลของแก๊สกับอุณหภูมิ

อัตราเร็วเฉลี่ยของโมเลกุลของแก๊สจะมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิของแก๊สหรือไม่ สามารถพิจารณาได้โดยเปรียบเทียบสมการ (16.14) คือ $\bar{E}_\mathrm{k} = \frac{3}{2}k_\mathrm{B}T$ กับสมการ $\bar{E}_\mathrm{k} = \frac{1}{2}mv_\mathrm{rms}^2$

จะได้ $\frac{1}{2}mv_\mathrm{rms}^2 = \frac{3}{2}k_\mathrm{B}T$

$$v_\mathrm{rms}^2 = \frac{3k_\mathrm{B}T}{m}$$

ดังนั้น $$v_{rms} = \sqrt{\frac{3k_\mathrm{B}T}{m}} \qquad (16.15)$$

จากสมการ (16.15) สามารถคำนวณอัตราเร็วอาร์เอ็มเอสของแก๊ส (v_rms) เมื่อทราบมวลของแก๊ส 1 โมเลกุล และอุณหภูมิสัมบูรณ์ของแก๊ส

ตัวอย่าง 16.10 ฮีเลียมเป็นแก๊สเฉื่อยที่เป็นกลางทางไฟฟ้า มีสมบัติที่ใกล้เคียงกับแก๊สในอุดมคติ มวลของฮีเลียม 1 โมเลกุล ซึ่งประกอบด้วยอะตอมของฮีเลียมเพียงอะตอมเดียว มีค่าประมาณ 6.65×10^{-27} กิโลกรัม จงคำนวณอัตราเร็วอาร์เอ็มเอสของแก๊สฮีเลียมที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

แนวคิด หาอุณหภูมิสัมบูรณ์จาก $T = t + 273.15$ แล้วหาอัตราเร็วอาร์เอ็มเอสจาก $v_{rms} = \sqrt{\frac{3k_B T}{m}}$

วิธีทำ จาก $T = t + 273.15$

แทนค่า $T = (25 + 273.15)\,\mathrm{K}$

$= 298.15\,\mathrm{K}$

จาก $v_{rms} = \sqrt{\frac{3k_B T}{m}}$

แทนค่า $v_{\mathrm{rms}} = \sqrt{\frac{3(1.38 \times 10^{-23}\,\mathrm{J/K})(298.15\,\mathrm{K})}{6.65 \times 10^{-27}\,\mathrm{kg}}}$

ดังนั้น $v_{\mathrm{rms}} = 1362\,\mathrm{m/s}$

ตอบ อัตราเร็วอาร์เอ็มเอสของโมเลกุลของแก๊สฮีเลียมที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เท่ากับ 1362 เมตรต่อวินาที

จากตัวอย่าง 16.10 จะเห็นได้ว่า แก๊สฮีเลียมเคลื่อนที่เร็วมากที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีมวลที่น้อย โดยค่า 1362 เมตรต่อวินาที หรือ 1.362 กิโลเมตรต่อวินาที ที่คำนวณได้นี้เป็นเพียงค่าเฉลี่ยของอัตราเร็ว นั่นหมายความว่ามีแก๊สฮีเลียมอีกเป็นจำนวนมากที่เคลื่อนที่ช้าและเร็วกว่านี้มาก ๆ และหากโมเลกุลของแก๊สฮีเลียมโมเลกุลใดที่มีอัตราเร็วมากกว่าอัตราเร็วหลุดพ้นจากโลกคือ 11.19 กิโลเมตรต่อวินาที ก็จะสามารถเคลื่อนที่ออกจากโลกได้ถ้าไม่ชนกับอนุภาคอื่นและสูญเสียพลังงานจลน์ จึงเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้แก๊สฮีเลียมในบรรยากาศของโลกมีปริมาณน้อยกว่าแก๊สอื่น ๆ

ข้อสังเกต

สมการ $\bar{E}_k = \frac{3}{2}k_B T$ และ $v_{rms} = \sqrt{\frac{3k_B T}{m}}$ ซึ่งเป็นสมการสำหรับแก๊สอุดมคติ สามารถใช้ได้กับโมเลกุลของแก๊สเฉื่อยซึ่งเป็นแก๊สอะตอมเดี่ยว เช่น ฮีเลียม (He) นีออน (Ne) และอาร์กอน (Ar) เนื่องจากสมการดังกล่าวมาจากการพิจารณาเฉพาะการเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่เพียงอย่างเดียว แต่สำหรับแก๊สที่มีโมเลกุลมากกว่า 1 อะตอม เช่น ไฮโดรเจน (H_2) ออกซิเจน (O_2) มีเทน (CH_4) และแอมโมเนีย (NH_3) จะมีการเคลื่อนที่แบบสั่นและแบบหมุนรอบตำแหน่งศูนย์กลางมวลของโมเลกุลนั้น ๆ ด้วย สมการข้างต้นจึงสามารถใช้ได้เฉพาะการหาพลังงานจลน์และอัตราเร็วแบบเลื่อนที่ของแก๊สเพียงอย่างเดียว

ทฤษฎีจลน์ของแก๊ส แสดงให้เห็นว่า ถ้าแก๊สมีอุณหภูมิสูง โมเลกุลของแก๊สจะมีพลังงานจลน์มาก และเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วสูง เมื่อชนกับผนังภาชนะจะเกิดแรงกระทำต่อผนังมาก นั่นคือ มีความดันสูงด้วย ในทางตรงกันข้าม ถ้าแก๊สมีอุณหภูมิต่ำ โมเลกุลของแก๊สจะมีพลังงานจลน์ต่ำ เคลื่อนที่ช้า เมื่อชนผนังจะเกิดแรงกระทำต่อผนังน้อย ทำให้มีความดันต่ำ ดังจะเห็นได้จากการนำขวดแก้วเปล่า 3 ใบที่มีปริมาตรเท่ากัน แล้วปิดปากขวดด้วยลูกโป่ง เมื่อนำไปแช่ลงในน้ำเย็น น้ำอุ่น และน้ำร้อน และให้เวลาผ่านไประยะหนึ่ง จะพบว่า ปริมาตรของแก๊สภายในลูกโป่งมีการเปลี่ยนแปลงแตกต่างกัน โดยที่ขวดแก้วที่แช่ในน้ำเย็น ลูกโป่งมีปริมาตรลดลง แสดงว่า แก๊สในขวดแก้วมีความดันลดลง ในขณะที่ขวดแก้วที่แช่ในน้ำร้อน ลูกโป่งมีปริมาตรเพิ่มขึ้น แสดงว่า แก๊สในขวดแก้วมีความดันเพิ่มขึ้น ดังรูป

รูป 16.16 การเพิ่มความดันของแก๊สเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 16.3

1. การเพิ่มและลดอุณหภูมิของแก๊สในภาชนะปิดปริมาตรคงตัว มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความดันของแก๊สหรือไม่ เพราะเหตุใด
2. เมื่ออุณหภูมิของแก๊สเฉื่อยมีค่าเป็น 0 เคลวิน โมเลกุลแก๊สเฉื่อยมีการเคลื่อนที่หรือไม่ เพราะเหตุใด
3. เมื่อนำกล่อง 2 ใบ ที่มีปริมาตร และความดันภายในกล่องเท่ากัน กล่องใบที่ 1 บรรจุแก๊สไนโตรเจนจำนวน 1.0 โมล กล่องใบที่ 2 บรรจุแก๊สออกซิเจนจำนวน 1.0 โมล เท่ากัน
   ก. อุณหภูมิของแก๊สในกล่องแต่ละใบมีค่าเท่ากันหรือไม่
   ข. อัตราเร็วอาร์เอ็มเอส (v_{rms}) ของโมเลกุลของแก๊สในกล่องแต่ละใบแตกต่างกันหรือไม่

แบบฝึกหัด 16.3

1. แก๊สฮีเลียมจำนวน 1.00 โมล บรรจุในลูกโป่ง ซึ่งมีอุณหภูมิ 400 เคลวิน จงหา
   ก. พลังงานจลน์เฉลี่ยของโมเลกุลของแก๊สฮีเลียม
   ข. พลังงานจลน์รวมของโมเลกุลทั้งหมดของแก๊สฮีเลียม
2. ภาชนะใบหนึ่ง มีอุณหภูมิคงตัว บรรจุแก๊สผสมระหว่างนีออนกับอาร์กอน ซึ่งมวลอะตอมของอาร์กอนมีค่าเป็นสองเท่าของนีออน ถ้าอัตราเร็วอาร์เอ็มเอส (v_{rms}) ของแก๊สนีออนมีค่า 300 เมตรต่อวินาที จงหาอัตราเร็วอาร์เอ็มเอสของอาร์กอน

16.4 กฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์

สสารในสถานะของแข็งหรือของเหลวเมื่อได้รับหรือคายความร้อนจะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรน้อยมาก แต่สสารในสถานะแก๊สเมื่อได้รับความร้อนหรือคายความร้อนจะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรอย่างชัดเจน การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของแก๊สเกี่ยวข้องกับพลังงานภายในระบบ งาน และความร้อนอย่างไร ศึกษาได้จากหัวข้อนี้

16.4.1 พลังงานภายในระบบ

พลังงานภายในระบบ (internal energy of a system) ในหัวข้อนี้จะหมายถึง**พลังงานภายใน** (internal energy) ของแก๊ส ซึ่งเท่ากับพลังงานทั้งหมดของโมเลกุลของแก๊สที่บรรจุอยู่ในระบบนั้น สำหรับแก๊สในธรรมชาติ สถานการณ์จะมีความซับซ้อนเพราะโมเลกุลของแก๊สมีแรงกระทำต่อกัน พลังงานของโมเลกุลของแก๊สจึงมีทั้งพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ แต่สำหรับแก๊สอุดมคติที่ถือว่าไม่มีแรงใด ๆ กระทำต่อโมเลกุล พลังงานทั้งหมดของแก๊สอุดมคติจึงมีเฉพาะพลังงานจลน์เพียงอย่างเดียว พลังงานภายในของแก๊สอุดมคติจึงเท่ากับผลรวมของพลังงานจลน์ของโมเลกุลทั้งหมด ดังสมการ

$$U = E_{k_1} + E_{k_2} + ... + E_{k_N}$$

เมื่อ U คือ พลังงานภายในของแก๊ส หรือ พลังงานภายในระบบ

ผลรวมของพลังงานจลน์ของโมเลกุลทั้งหมด เท่ากับพลังงานจลน์เฉลี่ยต่อโมเลกุลคูณด้วยจำนวนโมเลกุลทั้งหมด นั่นคือ

$$U = N\overline{E}_k \qquad (16.16)$$

แทนค่า $\overline{E}_k = \frac{3}{2}k_B T$

จะได้

$$U = \frac{3}{2}Nk_B T \qquad (16.17)$$

สำหรับแก๊สอุดมคติในภาชนะปิด จำนวนโมเลกุลจะมีค่าคงตัว พลังงานภายในจึงขึ้นกับอุณหภูมิเท่านั้น และจากความสัมพันธ์ $N = nN_A$ และ $k_B = \frac{R}{N_A}$ เมื่อแทนในสมการ (16.17)

จะได้

$$U = \frac{3}{2}(nN_A)\left(\frac{R}{N_A}\right)T$$

$$U = \frac{3}{2}nRT \qquad (16.18)$$

สมการ (16.17) และ (16.18) แสดงให้เห็นว่า พลังงานภายในของแก๊สหรือพลังงานภายในระบบแปรผันตรงกับจำนวนโมเลกุล (หรือจำนวนโมล) และอุณหภูมิสัมบูรณ์ของแก๊ส

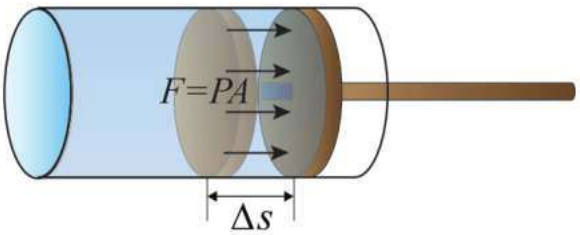
16.4.2 งานที่ทำโดยแก๊ส

แก๊สในกระบอกสูบเดิมมีปริมาตร V และความดัน P ถ้าแก๊สในกระบอกสูบเกิดการขยายตัวดันลูกสูบให้เคลื่อนที่ออกในขณะที่ความดันมีค่าคงตัวทำให้แก๊สมีปริมาตรเพิ่มขึ้น ΔV แสดงว่า แก๊สทำงาน หากพิจารณางานดังกล่าวที่เกิดขึ้นกับลูกสูบที่มีพื้นที่หน้าตัด A โดย แรงที่แก๊สดันลูกสูบมีค่าคงตัว $F = PA$ ถ้าแรงดังกล่าวทำให้ลูกสูบเคลื่อนที่เป็นระยะ Δs จะได้ปริมาตรเพิ่มขึ้น $\Delta V = A\,\Delta s$ ดังรูป 16.17

ดังนั้น งาน W ที่แก๊สทำต่อลูกสูบ คือ

$$W = F\Delta s$$
$$= PA\Delta s$$

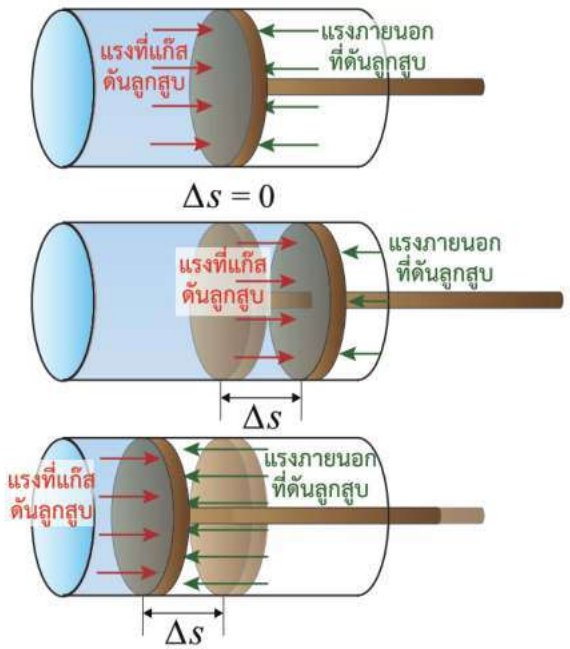
นั่นคือ $$W = P\Delta V \qquad (16.19)$$



รูป 16.17 การทำงานของแก๊สเมื่อขยายตัวจนมีปริมาตรเพิ่มขึ้น ΔV

พิจารณาลูกสูบ จะมีแรงที่แก๊สดันลูกสูบออกและแรงจากภายนอกดันลูกสูบเข้า งานที่เกิดจากแรงที่แก๊สดันลูกสูบ เรียกว่า **งานที่ทำโดยแก๊ส** (work done by gas) และงานที่เกิดจากแรงภายนอกกระทำต่อลูกสูบเรียกว่า **งานที่ทำต่อแก๊ส** (work done on gas)

กรณีลูกสูบอยู่นิ่ง แก๊สมีปริมาตรคงตัว แสดงว่า ไม่มีงานที่ทำโดยแก๊ส ไม่มีงานที่ทำต่อแก๊ส ดังรูป 16.18 ก. กรณีลูกสูบเคลื่อนที่ออก แก๊สมีปริมาตรเพิ่มขึ้น งานที่ทำโดยแก๊สเป็นบวก และงานที่ทำต่อแก๊สเป็นลบ ดังรูป 16.18 ข. ส่วนในกรณีลูกสูบเคลื่อนที่เข้า แก๊สมีปริมาตรลดลง งานที่ทำโดยแก๊สเป็นลบ และงานที่ทำต่อแก๊สเป็นบวก ดังรูป 16.18 ค.



ก. ลูกสูบอยู่นิ่ง (Δs เป็น ศูนย์)

งานที่ทำโดยแก๊ส เป็น ศูนย์

งานที่ทำต่อแก๊ส เป็น ศูนย์

ข. ลูกสูบเคลื่อนที่ออก (Δs เป็น บวก)

งานที่ทำโดยแก๊ส เป็น บวก

งานที่ทำต่อแก๊ส เป็น ลบ

ค. ลูกสูบเคลื่อนที่เข้า (Δs เป็น ลบ)

งานที่ทำโดยแก๊ส เป็น ลบ

งานที่ทำต่อแก๊ส เป็น บวก

รูป 16.18 งานที่ทำโดยแก๊สและงานที่ทำต่อแก๊ส

ตัวอย่าง 16.11 ทรงกระบอกที่มีลูกสูบเคลื่อนที่ได้คล่อง ภายในบรรจุแก๊สจำนวนหนึ่งมีปริมาตร 1.50×10^{-3} ลูกบาศก์เมตร ที่ความดันคงตัวเท่ากับ 1.00×10^{5} พาสคัล จงหางานที่ทำโดยแก๊สเมื่อลูกสูบเคลื่อนที่จนแก๊สในกระบอกสูบมีปริมาตร 1.65×10^{-3} ลูกบาศก์เมตร

แนวคิด หา ΔV จาก $V_2 - V_1$ แล้วหางานที่ทำโดยแก๊สหาจาก $W = P\Delta V$

วิธีทำ จาก $\Delta V = V_2 - V_1$

แทนค่า $\Delta V = \left(1.65 \times 10^{-3}\,\mathrm{m}^3\right) - \left(1.50 \times 10^{-3}\,\mathrm{m}^3\right)$

$W = 0.15 \times 10^{-3}\,\mathrm{m}^3$

จาก $W = P\Delta V$

แทนค่า $W = (1.00 \times 10^{5}\,\mathrm{Pa})(0.15 \times 10^{-3}\,\mathrm{m}^3)$

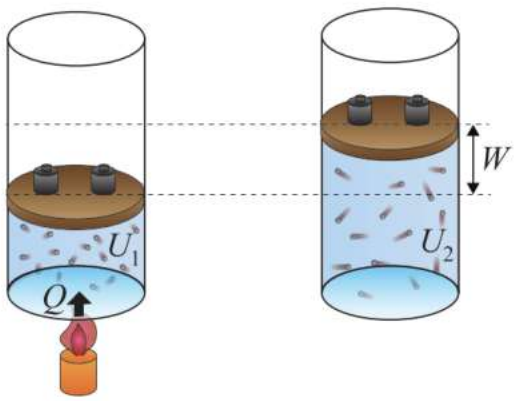
ดังนั้น $W = 15\ \mathrm{Pa\ m}^3$ หรือ $15\ \mathrm{J}$

ตอบ งานที่ทำโดยแก๊สเท่ากับ 15 จูล

16.4.3 กฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์

เราทราบมาแล้วว่า สสารที่อยู่ในสถานะของแข็งและของเหลว เมื่อได้รับหรือคายความร้อนโดยไม่มีการเปลี่ยนสถานะ จะส่งผลให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปตามความสัมพันธ์ $Q = C\Delta T$ หรือ $Q = mc\Delta T$ ความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของสสารโดยไม่พิจารณางานที่ทำโดยของแข็งและของเหลว เนื่องจากของแข็งและของเหลวมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรน้อยมากเมื่อได้รับหรือคายความร้อน

สำหรับแก๊สที่บรรจุในภาชนะที่ปริมาตรเปลี่ยนแปลงได้ เมื่อแก๊สได้รับหรือคายความร้อน Q อาจทำให้อุณหภูมิหรือปริมาตรเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของแก๊ส ($\Delta U = U_2 - U_1$) และการเปลี่ยนแปลงปริมาตรทำให้เกิดงานที่ทำโดยแก๊ส W ดังรูป



ก. ก่อนได้รับความร้อน ข. หลังได้รับความร้อน

รูป 16.19 การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในและงานที่ทำโดยแก๊สเมื่อได้รับความร้อน

จากรูป 16.19 เมื่อแก๊สได้รับหรือคายความร้อน Q อาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของแก๊ส ΔU หรือเกิดงานที่ทำโดยแก๊ส W ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเป็นไปตามกฎการอนุรักษ์พลังงาน เขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$Q = \Delta U + W \tag{16.20}$$

สมการ (16.20) แสดงว่า พลังงานภายในระบบมีความสัมพันธ์กับความร้อนและงาน เช่น เมื่อมีการถ่ายโอนความร้อนในระบบปิดที่ไม่มีการสูญเสียความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อม ผลของการถ่ายโอนความร้อนนี้จะเท่ากับผลรวมของพลังงานภายในระบบที่เปลี่ยนแปลงกับงานที่ทำโดยแก๊ส เป็นไปตามกฎการอนุรักษ์พลังงาน เรียกความสัมพันธ์นี้ว่า **กฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์** (first law of thermodynamics)

ข้อสังเกต

ระบบปิด (closed system) คือ ระบบที่ไม่มีการถ่ายโอนความร้อนและมวลระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อม เช่น ระบบของแก๊สในกระบอกสูบปิดที่เป็นฉนวน ระบบนี้เป็นระบบปิดเนื่องจากไม่มีการถ่ายโอนความร้อนและมวลของแก๊สในกระบอกสูบออกสู่ภายนอก

ตามกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ ทำให้ทราบว่า **ความร้อน** (heat, Q) เป็นเพียงพลังงานที่ถ่ายโอนในรูปงานและพลังงานภายในระบบเท่านั้น

งาน W ที่ระบบทำหรือรับจากสิ่งแวดล้อมจะเกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของแก๊ส ซึ่งมีแรงมาเกี่ยวข้อง ส่วนความร้อน Q สามารถถ่ายโอนเข้าสู่ระบบหรือออกจากระบบ ข้อสรุปเกี่ยวกับเครื่องหมายของ Q ΔU และ W เพื่อใช้สำหรับสมการ (16.25) แสดงในตาราง 16.3

ตาราง 16.3 สรุปเครื่องหมายของ Q ΔU และ W

ปริมาณ		เครื่องหมาย
Q	ความร้อนเข้าสู่ระบบ	+
	ความร้อนออกจากระบบ	−
ΔU	พลังงานภายในระบบที่เพิ่มขึ้น	+
	พลังงานภายในระบบที่ลดลง	−
W	งานที่ทำโดยแก๊สส่งผลให้ระบบมีปริมาตรเพิ่มขึ้น	+
	งานที่ทำโดยแก๊สส่งผลให้ระบบมีปริมาตรลดลง	−

จากตาราง 16.3 ถ้าในกรณีที่ไม่มีความร้อนเข้าสู่แก๊ส หรือ Q มีค่าเป็นศูนย์ แต่แก๊สภายในระบบขยายตัวดันลูกสูบให้เคลื่อนที่ งานที่ทำโดยแก๊ส W มีค่าเป็นบวก การที่แก๊สทำงานในกรณีนี้ จึงทำให้พลังงานภายในระบบลดลง หรือ ΔU มีค่าเป็นลบ จึงส่งผลให้อุณหภูมิของแก๊สลดลง แต่ในกรณีที่แก๊สภายในระบบถูกอัดให้ปริมาตรลดลงจากแรงดันภายนอก งานที่ทำโดยแก๊ส W มีค่าเป็นลบ ทำให้พลังงานภายในระบบเพิ่มขึ้น หรือ ΔU มีค่าเป็นบวก จึงส่งผลให้อุณหภูมิของแก๊สเพิ่มขึ้น

ตัวอย่าง 16.12 จงหาพลังงานภายในที่เปลี่ยนไปของแก๊สจำนวนหนึ่งที่บรรจุภายในกระบอกสูบ เมื่อแก๊สในกระบอกสูบได้รับความร้อน 2000 จูล ในขณะเดียวกัน แก๊สทำงาน 300 จูล

แนวคิด แก๊สในกระบอกสูบได้รับความร้อน แสดงว่าความร้อนเข้าสู่ระบบ จะได้ว่า Q เป็น + และแก๊สทำงาน จะได้ว่า W เป็น + หาพลังงานภายใน จากสมการ $Q = \Delta U + W$

วิธีทำ จากโจทย์ $Q = +2000\ \text{J}$ และ $W = +300\ \text{J}$

จาก $Q = \Delta U + W$

แทนค่า $(+2000\ \text{J}) = \Delta U + (+300\ \text{J})$

$\Delta U = 2000\ \text{J} - 300\ \text{J}$

ดังนั้น $\Delta U = +1700\ \text{J}$

ตอบ พลังงานภายในของแก๊สเพิ่มขึ้น 1700 จูล

ตัวอย่าง 16.13 แก๊สอุดมคติจำนวน 0.05 โมล ความดัน 100 กิโลพาสคัล อยู่ในกระบอกสูบที่มีลูกสูบที่เคลื่อนที่ได้คล่อง เมื่อให้ความร้อนจนแก๊สมีอุณหภูมิเพิ่มจาก 300 เคลวิน เป็น 350 เคลวิน โดยมีความดันคงตัว จงหา

ก. พลังงานภายในของแก๊สที่เพิ่มขึ้น

ข. งานที่ทำโดยแก๊ส

ค. ความร้อนที่ใช้

ง. ถ้าลูกสูบถูกตรึงไม่ให้เคลื่อนที่จะต้องใช้ความร้อนเท่าใด จึงจะทำให้แก๊สมีอุณหภูมิเพิ่มจาก 300 เคลวิน เป็น 350 เคลวิน

แนวคิด เมื่อให้ความร้อน (Q) กับแก๊สในระบบปิด จะทำให้พลังงานภายในระบบ (ΔU) เพิ่มขึ้นและแก๊สทำงาน (W) ซึ่งเป็นไปตามสมการ $Q = \Delta U + W$ โดยพลังงานภายในของแก๊สหาได้จาก $U = \frac{3}{2}nRT$ และงานที่ทำโดยแก๊สหาได้จาก $W = P\Delta V$

วิธีทำ ก. หาพลังงานภายในที่เพิ่มขึ้นของแก๊ส

จาก $U = \frac{3}{2}nRT$

จะได้พลังงานภายในที่เพิ่มขึ้นของแก๊ส ΔU ดังสมการ

$$\begin{aligned}\Delta U &= U_2 - U_1 \\ &= \frac{3}{2}nRT_2 - \frac{3}{2}nRT_1 \\ &= \frac{3}{2}nR\Delta T\end{aligned}$$

แทนค่า $\Delta U = \frac{3}{2}(0.05 \text{ mol})(8.31 \text{ J/mol K})(350 \text{ K} - 300 \text{ K})$

$= +31.16 \text{ J}$

ข. หางานที่ทำโดยแก๊ส

จาก $W = P\Delta V$

$W = P(V_2 - V_1)$

เนื่องจาก $V = \frac{nRT}{P}$ และ P คงตัว

จะได้ $W = P\left(\frac{nRT_2}{P}\right) - P\left(\frac{nRT_1}{P}\right)$

$W = nR(T_2 - T_1)$

แทนค่า $W = (0.050 \text{ mol})(8.31 \text{ J/mol K})(350 \text{ K} - 300 \text{ K})$

$= +20.78 \text{ J}$

ค. หาความร้อนที่ใช้

จาก $Q = \Delta U + W$

แทนค่า $Q = (+31.16 \text{ J}) + (+20.7 \text{ J})$

$= +51.86 \text{ J}$

ง. ถ้าลูกสูบถูกตรึงไม่ให้เคลื่อนที่ในกรณีนี้ปริมาตรของแก๊สมีค่าคงตัว ΔV จึงเป็นศูนย์ ดังนั้นงานที่แก๊สทำ W จึงเป็นศูนย์ด้วย

จาก $Q = \Delta U + W$

แทนค่า $Q = (+31.16 \text{ J}) + (0 \text{ J})$

$= +31.16 \text{ J}$

ตอบ ก. พลังงานภายในของแก๊สที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ 31.2 จูล

ข. งานที่แก๊สทำเท่ากับ 20.8 จูล

ค. ความร้อนที่ใช้เท่ากับ 51.9 จูล

ง. ความร้อนที่ใช้เท่ากับ 31.2 จูล

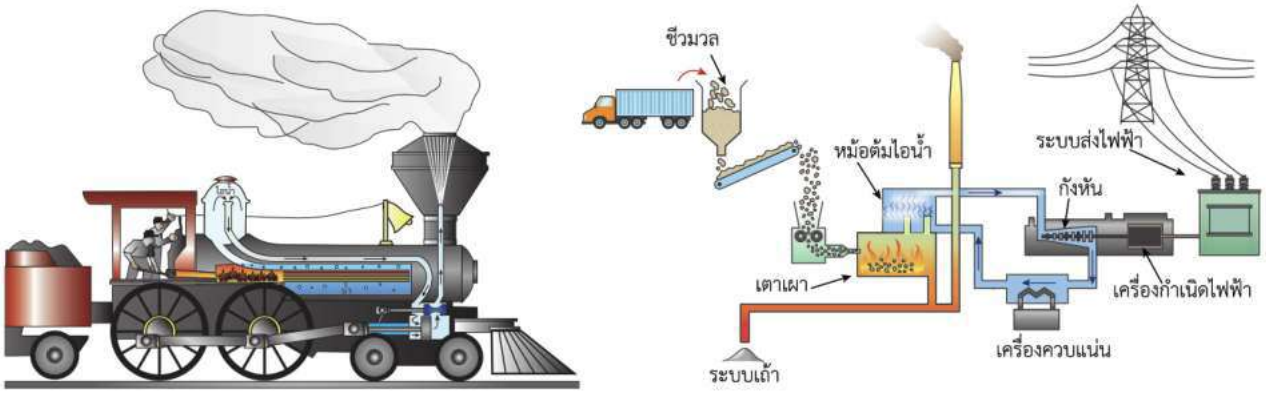
16.4.4 การประยุกต์ของอุณหพลศาสตร์

จากความรู้เกี่ยวกับกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์เกี่ยวกับงาน การขยายตัวและหดตัวของแก๊สเมื่อได้รับหรือคายความร้อน สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ เช่น เครื่องยนต์ความร้อน ตู้เย็น และเครื่องปรับอากาศ ซึ่งอธิบายได้ดังต่อไปนี้

เครื่องยนต์ความร้อน

เครื่องยนต์ความร้อน (heat engine) เป็นเครื่องยนต์ที่ทำงานโดยการเปลี่ยนความร้อนเป็นพลังงานกล แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ **เครื่องยนต์สันดาปภายนอก** (external combustion engine) และ**เครื่องยนต์สันดาปภายใน** (internal combustion engine)

เครื่องยนต์สันดาปภายนอก เป็นเครื่องยนต์ที่เชื้อเพลงเกิดการเผาไหม้ภายนอกตัวเครื่องยนต์หลักที่เป็นแหล่งทำให้เกิดพลังงานกล **เครื่องยนต์ไอน้ำ** (steam engine) เป็นประเภทหนึ่งของเครื่องยนต์ความร้อนสันดาปภายนอก อาศัยความร้อนจากการเผาไหม้ถ่าน น้ำมัน หรือเชื้อเพลิงอื่น ๆ ทำให้น้ำเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอ และใช้ประโยชน์จากความดันไอน้ำที่เกิดขึ้นไปทำให้ลูกสูบเคลื่อนที่หรือหมุนกังหัน ตัวอย่างของเครื่องยนต์ไอน้ำ เช่น รถจักรไอน้ำ โรงไฟฟ้าถ่านหิน ดังรูป 16.20 ก. และ โรงไฟฟ้าชีวมวล ดังรูป 16.20 ข.

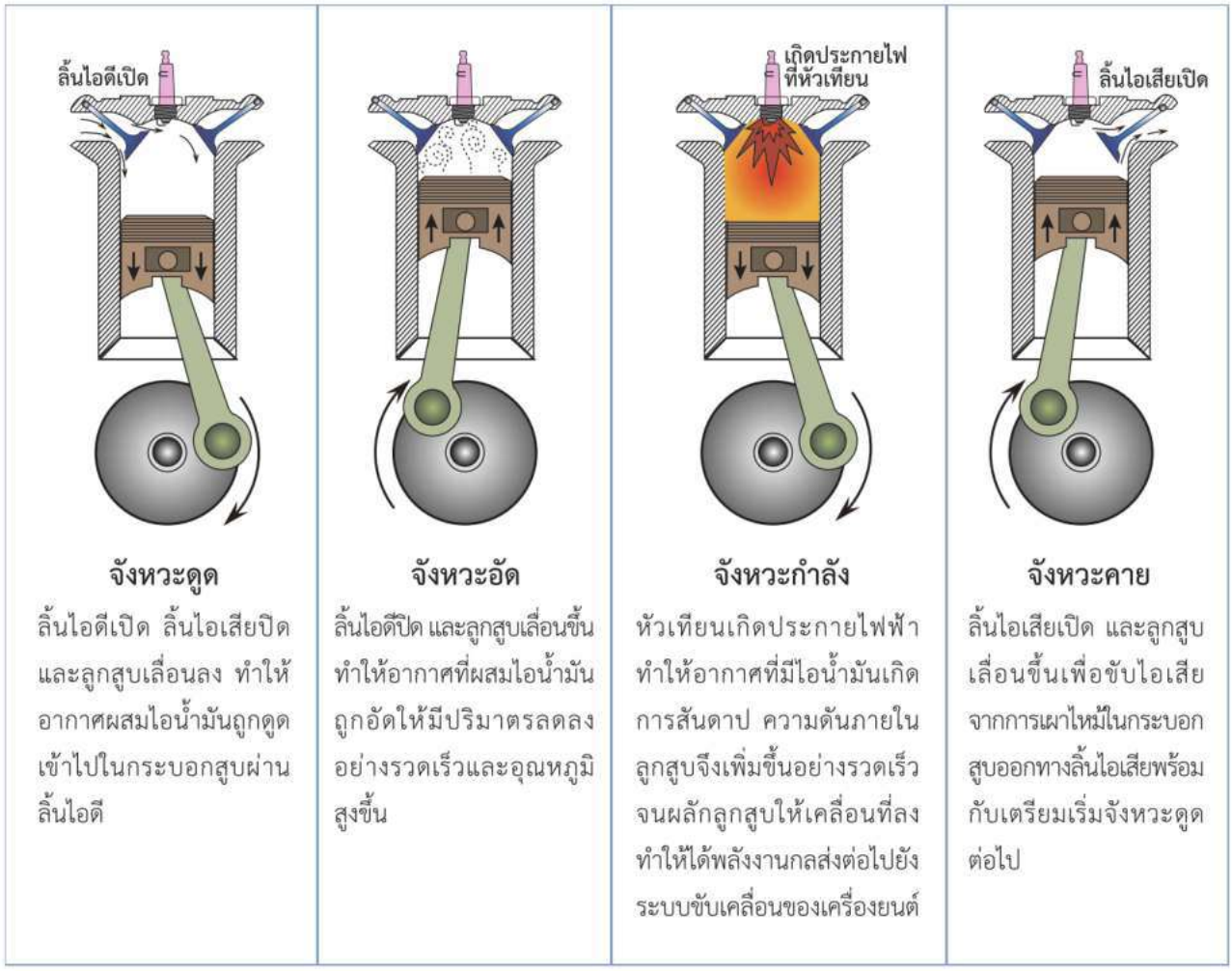


ก. รถจักรไอน้ำ ข. โรงไฟฟ้าชีวมวล

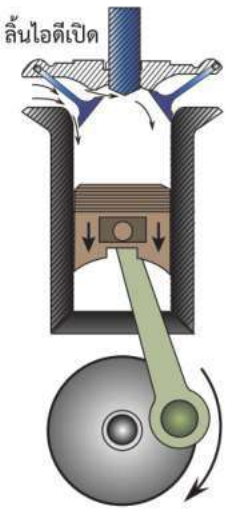
รูป 16.20 ตัวอย่างการทำงานของเครื่องยนต์สันดาปภายนอก

ข้อจำกัดของเครื่องยนต์ประเภทสันดาปภายนอกคือ การสูญเสียความร้อนระหว่างการถ่ายโอนความร้อนเข้าสู่ตัวเครื่องยนต์หลัก ต่อมาได้มีการพัฒนาเครื่องยนต์สันดาปภายในและเปลี่ยนเชื้อเพลิงเป็นไอน้ำมันแทนการใช้ไอน้ำ โดยการฉีดไอน้ำมันเข้าไปยังห้องเผาไหม้และจุดระเบิดจนเกิดเป็นอุณหภูมิและความดันที่สูง ผลักให้ลูกสูบเคลื่อนที่ได้

เครื่องยนต์สันดาปภายในเป็นเครื่องยนต์ที่เชื้อเพลงเกิดการเผาไหม้ภายในตัวเครื่องยนต์หลักที่เป็นแหล่งทำให้เกิดพลังงานกล ตัวอย่างเครื่องยนต์สันดาปภายใน ได่แก่ เครื่องยนต์เบนซินที่ใช้หัวเทียนในการจุดระเบิด และเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้ระบบฉีดเชื้อเพลิงในการจุดระเบิด ดังรูป 16.21 และ 16.22 ตามลำดับ

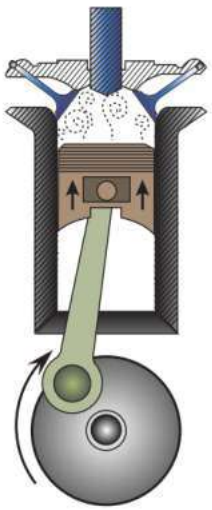


รูป 16.21 การทำงานของเครื่องยนต์เบนซินที่มีการสันดาปภายใน 4 จังหวะ



จังหวะดูด

ลิ้นไอดีเปิด ลิ้นไอเสียปิด และลูกสูบเลื่อนลง ทำให้อากาศถูกดูดเข้าไปในกระบอกสูบผ่านลิ้นไอดี

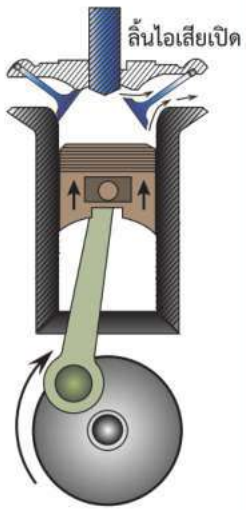


จังหวะอัด

ลิ้นไอดีปิด และลูกสูบเลื่อนขึ้น ทำให้อากาศถูกอัดให้มีปริมาตรลดลงอย่างรวดเร็วและอุณหภูมิสูงมาก

จังหวะกำลัง

น้ำมันดีเซลถูกพ่นออกจากหัวฉีดน้ำมันดีเซลเข้ากระบอกสูบ แล้วเกิดการจุดระเบิดเนื่องจากอุณหภูมิภายในกระบอกสูบที่สูงมากจากจังหวะอัด ความดันภายในลูกสูบจึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนผลักลูกสูบให้เคลื่อนที่ลง ทำให้ได้พลังงานกลส่งต่อไปยังระบบขับเคลื่อนของเครื่องยนต์



จังหวะคาย

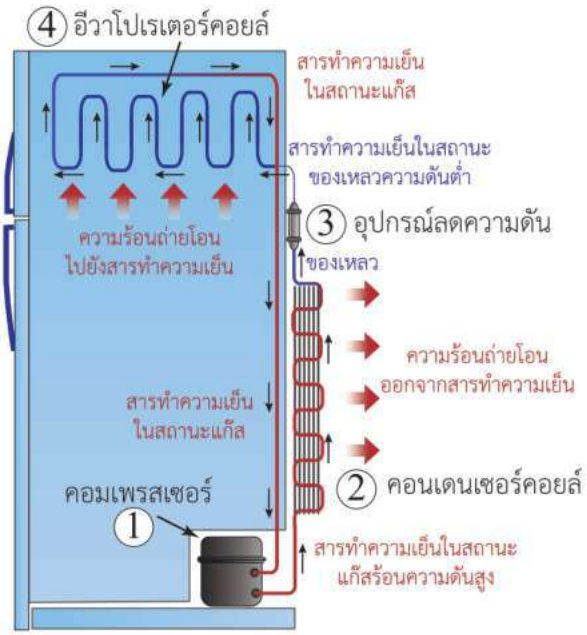
ลิ้นไอเสียเปิด และลูกสูบเลื่อนขึ้นเพื่อขับไอเสียจากการเผาไหม้ในกระบอกสูบออกทางลิ้นไอเสีย พร้อมกับเตรียมเริ่มจังหวะดูดต่อไป

รูป 16.22 การทำงานของเครื่องยนต์ดีเซลที่มีการสันดาปภายใน 4 จังหวะ

ตู้เย็นและเครื่องปรับอากาศ

ความเข้าใจหลักการเกี่ยวกับพลังงานภายในและอุณหพลศาสตร์ทำให้เราสามารถออกแบบเครื่องยนต์ความร้อนที่ทำให้สามารถถ่ายโอนความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่าได้ ด้วยการทำงานให้กับแก๊ส เครื่องยนต์ความร้อนที่ทำงานดังกล่าว คือเครื่องทำความเย็นชนิดต่าง ๆ โดยในที่นี้จะกล่าวถึงการทำงานของ**ตู้เย็น** (refrigerator) และ **เครื่องปรับอากาศ** (air conditioner)

ตู้เย็นทำให้อุณหภูมิภายในตู้เย็นลดต่ำลงได้ด้วยการถ่ายโอนความร้อนจากภายในตู้เย็นซึ่งมีอุณหภูมิต่ำออกสู่อากาศบริเวณนอกตู้เย็นซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าโดยใช้**สารทำความเย็น** (refrigerant) ทำหน้าที่ถ่ายโอนความร้อน การทำงานของตู้เย็นแสดงดังรูป 16.23 ซึ่งประกอบด้วยส่วนสำคัญดังนี้



รูป 16.23 แผนภาพการทำงานของตู้เย็น

1. **คอมเพรสเซอร์** (compressor) ทำหน้าที่เพิ่มความดันให้กับสารทำความเย็นให้เป็นแก๊สความดันสูงและมีพลังงานภายในเพิ่มสูงขึ้นมากจนมีอุณหภูมิสูงกว่าอากาศภายนอกตู้เย็นมาก
2. **คอนเดนเซอร์คอยล์** (condenser coil) หรือ **ขดควบแน่น** หรือที่นิยมเรียกว่า**แผงคอยล์ร้อน** เป็นท่อโลหะที่ขดกลับไปกลับมาอยู่บริเวณด้านหลังตู้เย็นที่บริเวณนี้ สารทำความเย็นจะถ่ายโอนความร้อนสู่อากาศภายนอกซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าและเกิดการควบแน่นกลายเป็นของเหลวทำให้มีอุณหภูมิลดลง
3. **อุปกรณ์ลดความดัน** (throttling devices) ซึ่งอาจจะเป็น **วาล์วขยายตัว** (expansion valve) หรือท่อโลหะขนาดเล็กที่เรียกว่า **หลอดรูเล็ก** (capillary tube) หรือที่นิยมเรียกว่า **แค๊ปทิ้ว** ที่บริเวณนี้สารทำความเย็นจะถูกต้านทานการไหลทำให้มีความดันลดลง
4. **อีวาโปเรเตอร์คอยล์** (evaporator coil) หรือ **ขดระเหย** หรือที่นิยมเรียกว่า**แผงคอยล์เย็น** ที่อยู่ในช่องแช่แข็งของตู้เย็น ที่บริเวณนี้ สารทำความเย็นในสถานะของเหลวความดันต่ำจะขยายตัวอย่างรวดเร็วกลายเป็นแก๊สที่มีอุณหภูมิต่ำมาก เมื่อสารทำความเย็นนี้เคลื่อนที่ไปตามแผงคอยล์เย็น ความร้อนจากช่องแช่แข็งจะถ่ายโอนสู่สารทำความเย็น ทำให้อุณหภูมิภายในช่องแช่แข็งลดลงและอุณหภูมิของสารทำความเย็นเพิ่มขึ้น จากนั้น สารทำความเย็นจะเคลื่อนที่กลับไปยังคอมเพรสเซอร์เพื่อเริ่มต้นการทำงานครั้งใหม่

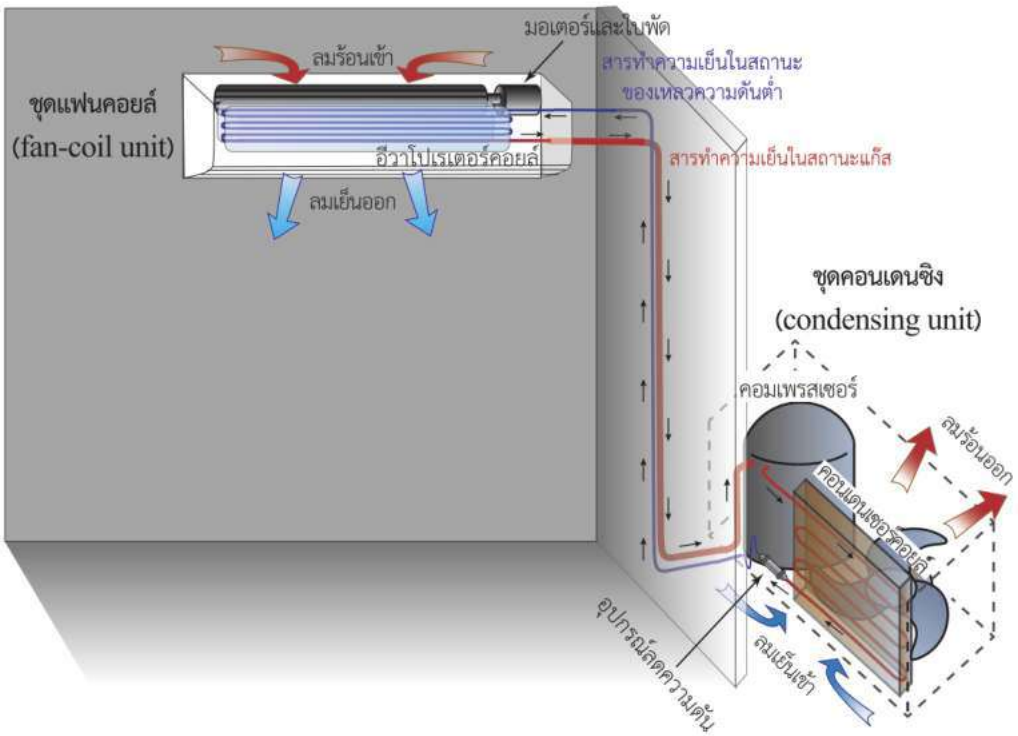
จะเห็นได้ว่า การถ่ายโอนความร้อนจากการทำงานของตู้เย็นเกิดขึ้น 2 บริเวณ คือ แผงคอยล์ร้อนและแผงคอยล์เย็น ซึ่งการถ่ายโอนดังกล่าวเป็นการถ่ายโอนความร้อนจากบริเวณที่มีอุณภูมิสูงไปสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ

ความรู้เพิ่มเติม

สารทำความเย็น (refrigerant) เป็นสารหรือสารประกอบที่มีจุดเดือดต่ำและถูกนำมาใช้สำหรับถ่ายโอนความร้อนในเครื่องทำความเย็น สารทำความเย็นที่นิยมใช้ในอดีต คือ คลอโรฟลูออโรคาร์บอน (chlorofluorocarbons) หรือที่รู้จักกันในชื่อ CFCs แต่เนื่องจากสารดังกล่าวเป็นสารที่สามารถทำลายโอโซนในชั้นบรรยากาศของโลกทำให้ได้รับความนิยมลดลง จึงมีการพัฒนาสารทำความเย็นชนิดใหม่ เช่น R22, R134, R32 และ R600A เนื่องจากเป็นสารที่ไม่เป็นอันตรายและไม่ติดไฟ มีจุดเดือดต่ำกว่า -20 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศ จึงเหมาะที่ใช้เป็นสารทำความเย็น

เครื่องปรับอากาศ มีหลายแบบและมีรายละเอียดในการทำงานแตกต่างกันตามวัตถุประสงค์การใช้งาน เช่น ใช้กับห้องขนาดเล็ก ใช้กับห้องหรืออาคารขนาดใหญ่ ใช้ในรถยนต์ เครื่องปรับอากาศส่วนใหญ่มีหลักการทำงานเช่นเดียวกับตู้เย็น แต่ออกแบบให้สามารถถ่ายโอนความร้อนได้ในปริมาณที่มากกว่าและรวดเร็วกว่าตู้เย็น โดยติดตั้งมอเตอร์พร้อมใบพัดที่บริเวณคอนเดนเซอร์ และที่บริเวณอีวาปอเรเตอร์ จึงถ่ายโอนความร้อนได้ปริมาณมากขึ้นและเร็วขึ้น

เครื่องปรับอากาศที่คุ้นเคยคือแบบที่ใช้กับห้องขนาดเล็ก ในปัจจุบันจะนิยมประกอบส่วนคอมเพรสเซอร์ คอนเดนเซอร์ และอุปกรณ์ลดความดัน อยู่ด้วยกัน โดยเรียกส่วนนี้ว่า **ชุดคอนเดนซิง** (condensing unit) หรือคอยล์ร้อน ซึ่งจะติดตั้งอยู่ภายนอกอาคาร ภายในส่วนนี้จะมีมอเตอร์และใบพัดเพื่อช่วยในการถ่ายโอนความร้อนจากสารทำความเย็นสู่ภายอากาศภายนอกอาคารด้วย ส่วนอีวาโปเรเตอร์คอยล์หรือขดระเหย จะออกแบบให้มีวงจรไฟฟ้าควบคุมพร้อมมอเตอร์และใบพัด เรียกส่วนนี้ว่า **ชุดแฟนคอยล์** (fan-coil unit) หรือ **คอยล์เย็น** จะติดตั้งภายในอาคาร ที่บริเวณนี้ความร้อนจากอากาศภายในอาคารจะถูกถ่ายโอนสู่สารทำความเย็น แผนภาพการทำงานของเครื่องปรับอากาศแสดงดังรูป 16.24



รูป 16.24 แผนภาพการทำงานของเครื่องปรับอากาศ

ความรู้เพิ่มเติม

การควบคุมอุณหภูมิภายในอาคารของเครื่องปรับอากาศ สามารถทำได้โดยการควบคุมการทำงานของชุดคอนเดนซิง สำหรับเครื่องปรับอากาศทั่วไปจะมีการสั่งทำงานด้วยการ**เปิด** (on) และ **ปิด** (off) การทำงานของชุดคอนเดนซิง คือ ในกรณีที่อุณหภูมิภายในอาคารสูงกว่าที่ตั้งค่า ชุดคอนเดนซิงจะเปิดการทำงาน แต่ถ้าอุณหภูมิภายในอาคารต่ำกว่าค่าที่ตั้งไว้ชุดคอนเดนซิงจะปิดการทำงาน ทั้งนี้ เพื่อไม่ให้การทำงานของชุดคอนเดนซิงเปิดและปิดกลับไปกลับมาด้วยความถี่สูงเกินไป จึงได้มีการกำหนดช่วงความแตกต่างของอุณหภูมิในการเปิดและปิดการทำงานไว้ด้วย เช่น หากตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 25 องศาเซลเซียส คอนเดนซิงอาจถูกตั้งให้เปิดเมื่ออุณหภูมิ 26 องศาเซลเซียส และปิดเมื่ออุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียส (ค่านี้ขึ้นอยู่กับการกำหนดโดยผู้ผลิต) นอกจากวิธีการดังกล่าวแล้ว ปัจจุบันได้มีการพัฒนาวิธีควบคุมการทำงานของเครื่องปรับอากาศให้ดียิ่งขึ้นด้วยเทคโนโลยีที่มีชื่อว่า **เทคโนโลยีอินเวอร์เตอร์** (inverter technology) ซึ่งควบคุมความเร็วในการหมุนของมอเตอร์และอัตราการไหลของของสารทำความเย็นภายในชุดคอนเดนซิงให้มีอัตราส่วนที่เหมาะสม จึงทำให้อุณหภูมิภายในอาคารมีค่าเกือบคงที่ตามที่ตั้งไว้ตลอดเวลา ไม่เกิดเสียงดังรบกวน และช่วยประหยัดพลังงานได้มากกว่า

คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 16.4

1. ในระหว่างแช่เย็นขวดแก้วที่บรรจุแก๊สฮีเลียมซึ่งปิดสนิท จงบอกการเปลี่ยนแปลงของความร้อน พลังงานภายในระบบ และงาน (ให้ประมาณว่าปริมาตรของขวดแก้วคงตัว)
2. การบีบอัดและการขยายตัวของแก๊สอย่างรวดเร็วโดยไม่มีการถ่ายโอนความร้อน พลังงานภายในระบบและอุณหภูมิสัมบูรณ์ของแก๊สจะเปลี่ยนแปลงไปหรือไม่ อย่างไร
3. การถ่ายโอนความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่าสามารถทำได้หรือไม่ อย่างไร

แบบฝึกหัด 16.4

1. แก๊สจำนวนหนึ่งในกระบอกสูบมีปริมาตร V_1 ทำให้มีปริมาตรเป็น V_2 โดยความดันคงที่ P จงหางานที่ทำโดยแก๊สและงานที่ทำต่อแก๊ส
2. จงหางานในการอัดแก๊สอาร์กอน 1 กิโลโมล จากปริมาตร 2.24×10^4 ลูกบาศก์เดซิเมตร ที่ 0 องศาเซลเซียส ความดัน 1.01×10^5 นิวตันต่อตารางเมตร ให้มีปริมาตรเป็น 1.40×10^4 ลูกบาศก์เดซิเมตร ที่ความดันเดียวกัน
3. จากข้อ 2 พลังงานภายในของแก๊สของแก๊สอาร์กอนที่เปลี่ยนไป และความร้อนที่แก๊สนี้คายออกมาเป็นเท่าใด

สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน

16.1 ความร้อน

- ระดับความร้อนของวัตถุสามารถระบุได้โดยใช้อุณหภูมิ อุปกรณ์ที่ใช้วัดอุณหภูมิ เรียกว่า **เทอร์มอมิเตอร์** หน่วยวัดอุณหภูมิที่ใช้ทั่วไปคือ องศาเซลเซียส ($^{\circ}\mathrm{C}$) แต่การศึกษาในวิชาอุณหพลศาสตร์ใช้อุณหภูมิในหน่วย **เคลวิน** (K) ซึ่งบางครั้งเรียกว่า **อุณหภูมิสัมบูรณ์**
- เมื่อสสารได้รับหรือคายความร้อน สสารอาจมีอุณหภูมิเปลี่ยนไป อัตราส่วนระหว่างพลังงานความร้อนที่ให้แก่สสารต่ออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นว่า **ความจุความร้อน** ส่วนความจุความร้อนต่อหนึ่งหน่วยมวลจะขึ้นกับสารแต่ละชนิด เรียกว่า **ความร้อนจำเพาะ** แทนด้วยสัญลักษณ์ c มีหน่วย จูลต่อกิโลกรัม เคลวิน (J/kg K) ความร้อนที่ทำให้สสารเปลี่ยนอุณหภูมิคำนวณได้จากสมการ $Q = mc\Delta T$
- เมื่อสสารได้รับหรือคายความร้อน สสารอาจเปลี่ยนสถานะโดยไม่เปลี่ยนอุณหภูมิ ความร้อนที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะของสารต่อหนึ่งหน่วยมวล เรียกว่า **ความร้อนแฝง** แทนด้วยสัญลักษณ์ L มีหน่วยจูลต่อกิโลกรัม (J/kg) ความร้อนที่ทำให้สสารเปลี่ยนสถานะคำนวณได้จากสมการ $Q = mL$
- ความร้อนสามารถถ่ายโอนหรือส่งผ่านจากวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปสู่อีกวัตถุหนึ่งที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าได้ การถ่ายโอนความร้อนมี 3 แบบ คือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน การถ่ายโอนความร้อนดังกล่าวจะเป็นไปตามกฎการอนุรักษ์พลังงาน เมื่อไม่มีการถ่ายโอนความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อมภายนอก ความร้อนที่วัตถุหนึ่งให้จะเท่ากับความร้อนที่อีกวัตถุหนึ่งได้รับ เขียนแทนได้ด้วยสมการ $Q_{\text{ลด}} = Q_{\text{เพิ่ม}}$
- การที่วัตถุมีการถ่ายโอนความร้อนจนมีอุณหภูมิเท่ากันและไม่มีการถ่ายโอนความร้อนอีกต่อไป เรียกว่า วัตถุทั้งสองอยู่ใน**สมดุลความร้อน**

16.2 แก๊สอุดมคติ

- **แก๊สอุดมคติ**เป็นแก๊สที่โมเลกุลมีขนาดเล็กมาก ไม่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกัน มีการเคลื่อนที่แบบสุ่มและมีการชนแบบยืดหยุ่น
- ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน ปริมาตร และอุณหภูมิของแก๊สเป็นไปตาม**กฎของแก๊สอุดมคติ** เขียนแทนได้ด้วยสมการ $PV = nRT = Nk_{\mathrm{B}}T$

16.3 ทฤษฎีจลน์ของแก๊ส

- **ทฤษฎีจลน์ของแก๊ส** เป็นการอธิบายพฤติกรรมแก๊สในระดับโมเลกุล เพื่อนำไปสู่การอธิบายธรรมชาติของแก๊สที่เกิดขึ้นจากโมเลกุลของแก๊สทั้งหมดที่อยู่ในระบบ เช่น อุณหภูมิของแก๊ส ปริมาตรของแก๊ส และความดันของแก๊ส
- ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอัตราเร็วอาร์เอ็มเอสของโมเลกุลของแก๊สเป็นไปตามสมการ $P = \frac{1}{3}\frac{Nm}{V}\overline{v_{\text{rms}}^2}$
- ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์เฉลี่ยของโมเลกุลของแก๊สและอุณหภูมิเป็นไปตามสมการ $\overline{E}_{\text{k}} = \frac{3}{2}k_{\text{B}}T$
- ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์เฉลี่ยของโมเลกุลของแก๊ส ความดันและปริมาตรของแก๊สเป็นไปตามสมการ $PV = \frac{2}{3}N\overline{E}_{\text{k}}$
- ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วอาร์เอ็มเอสและอุณหภูมิของโมเลกุลของแก๊สเป็นไปตามสมการ $v_{rms} = \sqrt{\frac{3k_{\text{B}}T}{m}}$

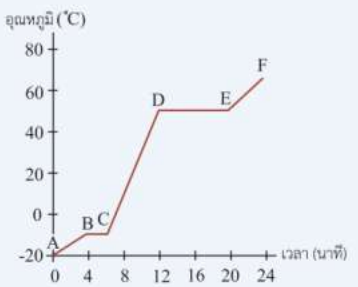
16.4 กฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์และการประยุกต์

- พลังงานของโมเลกุลของแก๊สในระบบ เรียกว่า **พลังงานภายในระบบ** แทนด้วยสัญลักษณ์ U สำหรับแก๊สอุดมคติสามารถหาพลังงานภายในระบบได้จากสมการ $U = \frac{3}{2}Nk_{\text{B}}T = \frac{3}{2}nRT$
- พลังงานภายในระบบมีความสัมพันธ์กับความร้อนและงานเป็นไปตามกฎการอนุรักษ์พลังงาน เรียกว่า**กฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์** เขียนแทนด้วยสมการ $Q = \Delta U + W$
- ความรู้เรื่องพลังงานภายในระบบสามารถนำไปประยุกต์ด้านต่าง ๆ เช่น การทำงานของเครื่องยนต์ความร้อน ตู้เย็น เครื่องปรับอากาศ

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 16

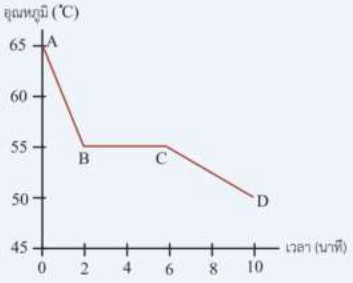
คำถาม

1. จงอธิบายความเหมือนและความแตกต่างระหว่างสเกลเซลเซียส และสเกลเคลวิน
2. สารชนิดหนึ่งมีความร้อนจำเพาะ 1000 จูลต่อกิโลกรัม เคลวิน มีความหมายอย่างไร
3. แท่งเหล็กมวล 1 กิโลกรัม และ 2 กิโลกรัม มีความจุความร้อนและความร้อนจำเพาะเท่ากันหรือต่างกัน อย่างไร
4. บริเวณชายหาดทั้งบริเวณที่เป็นทรายและน้ำทะเลได้รับปริมาณแสงอาทิตย์เท่ากัน แต่ทรายกลับร้อนมากกว่าน้ำทะเล เป็นเพราะเหตุใด
5. น้ำกับเอทิลแอลกอฮอล์มีความร้อนจำเพาะเท่ากับ 4186 และ 2400 จูลต่อกิโลกรัม เคลวิน ตามลำดับ ถ้าต้องการให้ความร้อนกับสารทั้งสองที่มีมวลเท่ากันให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเท่ากัน สารใดต้องการความร้อนมากกว่ากัน
6. น้ำมีความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอเท่ากับ 2.256×10^6 จูลต่อกิโลกรัม หมายความว่าอย่างไร
7. ถ้าต้องการทำให้น้ำแข็งมวล 1 กิโลกรัม ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส หลอมเหลวเป็นน้ำหมดที่อุณหภูมิเดิม ต้องใช้ความร้อนเท่าใด
8. ในการทำให้น้ำ 100 องศาเซลเซียส มวล 1 กิโลกรัม กลายเป็นไอหมดที่อุณหภูมิเดิม ต้องใช้ความร้อนเท่าใด
9. น้ำมีจุดควบแน่นอยู่ที่อุณหภูมิเท่าใด และมีความร้อนแฝงของการควบแน่นเป็นเท่าใด
10. ในปริมาณของน้ำที่เท่ากัน ระหว่างน้ำที่แข็งตัวเป็นน้ำแข็งกับไอน้ำที่ควบแน่นเป็นหยดน้ำ กระบวนการใดมีการคายความร้อนมากกว่ากัน
11. ก่อนฝนตก เหตุใด เราจึงรู้สึกว่าอากาศรอบตัวร้อนกว่าปกติ
12. ถ้านำน้ำแข็งใส่แก้วตั้งไว้ในห้อง น้ำแข็งจะเปลี่ยนแปลงอย่างไร และถ้าตั้งทิ้งไว้เป็นเวลาพอสมควร อุณหภูมิของน้ำแข็งในตอนแรกและหลังจากหลอมเหลวหมดแล้ว จะเปลี่ยนแปลงอย่างไร
13. กราฟแสดงการเปลี่ยนสถานะของสารชนิดหนึ่ง เป็นดังรูป
    ก. กราฟช่วง AB BC CD DE และ EF สารอยู่ในสถานะใด
    ข. จงอธิบายการเปลี่ยนแปลงในกราฟช่วง CD
    ค. จุดเดือดของสารมีค่าเท่าใด
    ง. จุดหลอมเหลวของสารมีค่าเท่าใด



รูป ประกอบคำถามข้อ 13

14. กราฟการเย็นตัวของสารชนิดหนึ่งที่กำลังเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็งเป็นดังรูป



รูป ประกอบคำถามข้อ 14

ก. กราฟช่วง AB BC และ CD สารมีสถานะใด

ข. จุดหลอมเหลวของสารมีค่าเท่าใด

ค. ความร้อนแฝงที่ใช้ในกราฟช่วง BC มีชื่อเรียกว่าอะไร

15. สาร x มีสมบัติดังตาราง

จุดหลอมเหลว (°C)	จุดเดือด (°C)	ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (J/kg)	ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (J/kg)
-114	79	1.04×10^5	8.54×10^5

ก. ที่อุณหภูมิห้อง (25°C) สาร x มีสถานะใด

ข. ที่จุดเดือดของน้ำ สาร x จะมีสถานะใด

ค. ถ้าสาร x มีมวล 1 กิโลกรัม ความร้อนที่ทำให้สาร x ที่อุณหภูมิ 79 องศาเซลเซียส เปลี่ยนสถานะหมด โดยที่อุณหภูมิไม่เปลี่ยนมีค่าเท่าใด

16. เหตุใดผ้าห่มหรือเสื้อผ้าที่ทำด้วยเส้นใยหนา ๆ ช่วยทำให้ร่างกายอบอุ่นในฤดูหนาว

17. เมื่ออัดแก๊สให้มีปริมาตรลดลง ความดันของแก๊สจะเพิ่มขึ้นเพราะเหตุใด

18. เมื่อแก๊สชนิดหนึ่งมีอุณหภูมิสูงขึ้น อัตราเร็วของโมเลกุลของแก๊สจะเปลี่ยนแปลงอย่างไร

19. แก๊สต่างชนิดกัน ถ้ามีอุณหภูมิเท่ากัน พลังงานจลน์เฉลี่ยของโมเลกุลเท่ากันหรือไม่

20. ถ้าความดันและปริมาตรของแก๊สเปลี่ยนไปโดยจำนวนโมเลกุลและอุณหภูมิคงตัว ความร้อนภายในของระบบจะเปลี่ยนแปลงหรือไม่ อย่างไร

21. เมื่ออัดแก๊สในภาชนะให้มีปริมาตรลดลง ถ้าไม่มีการถ่ายโอนความร้อนเข้าหรือออกจากระบบ พลังงานภายในระบบจะเปลี่ยนแปลงหรือไม่ อย่างไร

22. จงใช้สมการ $Q = \Delta U + W$ อธิบายการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในระบบในกรณีต่อไปนี้

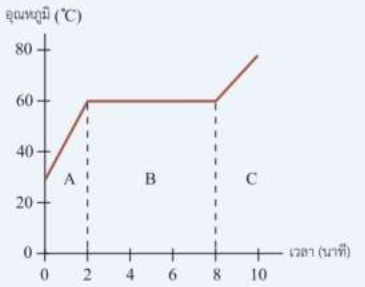
ก. แก๊สในกระป๋องสเปรย์ ขณะถูกเผาไฟ

ข. ไอน้ำในห้องอบไอน้ำความดันสูง ขณะที่ได้รับหรือคายความร้อน

ค. ไอน้ำในหม้อต้มน้ำของเครื่องจักรไอน้ำ ขณะเครื่องจักรกำลังทำงาน

ปัญหา

1. จงเปลี่ยนอุณหภูมิต่อไปนี้
   ก. 27 °C, –155 °C, 115 °C และ –78.50°C เป็นอุณหภูมิในหน่วยเคลวิน
   ข. 450 K, 89 K, 172 K และ 4.20 K เป็นอุณหภูมิในหน่วยองศาเซลเซียส
2. เมื่อให้ความร้อนกับตะกั่ว 1500 จูล พบว่า อุณหภูมิของตะกั่วสูงขึ้น 12 องศาเซลเซียส ความจุความร้อนของตะกั่วก้อนนี้เป็นเท่าใด
3. สระน้ำแห่งหนึ่งมีน้ำ 1.0×10^6 กิโลกรัม ในตอนกลางวันได้รับพลังงานจากดวงอาทิตย์ ทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำในสระสูงขึ้น 2 องศาเซลเซียส น้ำในสระได้รับความร้อนเท่าใด
4. จงหาความร้อนที่ทำให้น้ำ ทรายและทองแดง ซึ่งมีมวลอย่างละ 4 กิโลกรัม มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเท่ากัน คือ 10 องศาเซลเซียส
5. เมื่อให้ความร้อนจำนวน 10^4 จูล กับโลหะชนิดหนึ่งที่มีมวล 2 กิโลกรัม พบว่าอุณหภูมิของโลหะเพิ่มขึ้น 10 องศาเซลเซียส จงหาความร้อนจำเพาะของโลหะนี้
6. ความร้อนปริมาณหนึ่งทำให้อะลูมิเนียมมวล m มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 60 องศาเซลเซียส ความร้อนปริมาณนี้ จะทำให้ทองแดงมวล m มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเท่าใด
7. ในการทำให้น้ำแข็ง มวล 2.0 กิโลกรัม อุณหภูมิ –5 องศาเซลเซียส เป็นไอน้ำเดือดหมดที่ 100 องศาเซลเซียส ต้องใช้ความร้อนทั้งหมดเท่าใด
8. ให้ความร้อนกับสารที่เป็นของแข็งมวล 0.2 กิโลกรัม ในอัตรา 100 จูลต่อวินาที กราฟระหว่างอุณหภูมิและเวลาเป็นดังรูป
   ก. บริเวณ A B และ C สารมีสถานะใด
   ข. จุดหลอมเหลวของสารมีค่าเท่าใด
   ค. จงหาความร้อนจำเพาะของสาร ขณะที่เป็นของแข็ง
   ง. จงหาความร้อนแฝงของการหลอมเหลวของสาร

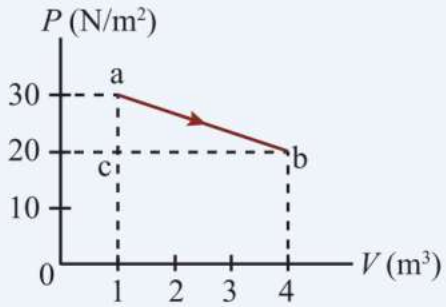


รูป ประกอบปัญหาข้อ 8

9. จงหาความร้อนที่ทำให้น้ำแข็งมวล 50 กรัม อุณหภูมิ –20 องศาเซลเซียส หลอมเหลวเป็นน้ำหมด และน้ำมีอุณหภูมิสูงจนเดือดเป็นไอหมดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 1 บรรยากาศ
10. บอลลูนมีปริมาตร 4 ลิตร ความดัน 300 กิโลพาสคัล ปล่อยให้บอลลูนลอยขึ้น จนความดันแก๊สลดลงเหลือ 200 กิโลพาสคัล โดยอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลง จงหาปริมาตรของแก๊สในบอลลูน
11. ภายใต้ความดันคงตัวที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส แก๊สชนิดหนึ่งมีปริมาตร 60 ลูกบาศก์เมตร ถ้าลดอุณหภูมิของแก๊สลงจนถึง –73 องศาเซลเซียส จงหาปริมาตรของแก๊ส

12. แก๊สจำนวนหนึ่งบรรจุอยู่ในภาชนะปิด วัดอุณหภูมิได้ 107 องศาเซลเซียส ความดัน 620 กิโลพาสคัล จงหาความดันของแก๊สเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 307 องศาเซลเซียส โดยการเปลี่ยนแปลงนี้มีปริมาตรคงตัว
13. แก๊สชนิดหนึ่งบรรจุในถังที่มีปริมาตรคงตัว จะมีความดันเป็นกี่เท่าของความดันเดิม เมื่อ
    ก. อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก –5 องศาเซลเซียส เป็น 35 องศาเซลเซียส
    ข. อุณหภูมิลดลงจาก 100 องศาเซลเซียส เป็น 25 องศาเซลเซียส
14. แก๊สจำนวนหนึ่มีปริมาตร 1.0 ลูกบาศก์เมตร ที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ความดัน 1.0 บรรยากาศ จงหาปริมาตรของแก๊สจำนวนนี้ ที่
    ก. อุณหภูมิ 127 องศาเซลเซียส และความดัน 0.5 บรรยากาศ
    ข. อุณหภูมิ –73 องศาเซลเซียส และความดัน 2.0 บรรยากาศ
15. บอลลูนที่บรรจุแก๊สไฮโดรเจน ขณะอยู่ที่พื้นมีอุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส มีปริมาตร 1.8×10^{-2} ลูกบาศก์เมตร และมีความดัน 1.0×10^{5} พาสคัล ถ้าบอลลูนนี้ลอยสูงขึ้นจนอุณหภูมิแก๊สภายในลดลงเหลือ 18 องศาเซลเซียส ความดันลดลงเหลือ 0.8×10^{5} พาสคัล ขณะนั้นบอลลูนมีปริมาตรเท่าใด
16. แก๊สจำนวนหนึ่งอยู่ในกระบอกสูบ เมื่อความดันของแก๊สเพิ่มขึ้นเป็น 3 เท่า ปริมาตรของแก๊สจะลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของเดิม อัตราส่วนระหว่างอุณหภูมิสัมบูรณ์ของแก๊สครั้งหลังกับครั้งแรกมีค่าเท่าใด
17. แก๊สชนิดหนึ่งมีปริมาตร 2×10^{-3} ลูกบาศก์เมตร อุณหภูมิ 17 องศาเซลเซียส ความดัน 2 บรรยากาศ แก๊สนี้มีกี่โมล
18. ถังบรรจุแก๊สใบหนึ่งมีปริมาตร 10 ลิตร ถ้าบรรจุแก๊สไฮโดรเจนซึ่งมีอุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ลงในถังจนมีความดัน 2.5×10^{5} นิวตันต่อตารางเมตร แก๊สไฮโดรเจนมีจำนวนกี่กรัม กำหนดให้มวลโมเลกุลของแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 2 กรัมต่อโมล
19. ภาชนะรูปลูกบาศก์ที่มีความยาวด้านละ 0.2 เมตร บรรจุแก๊ส 1.0×10^{24} โมเลกุล แต่ละโมเลกุลมีมวล 2.0×10^{-26} กิโลกรัม และเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว 600 เมตรต่อวินาที ถ้าผนังแต่ละด้านมีโมเลกุลพุ่งชนในทิศทางตั้งฉากกับผนังเป็นจำนวนหนึ่งในสามของโมเลกุลทั้งหมด จงหา
    ก. โมเมนตัมที่เปลี่ยนไปของแต่ละโมเลกุลที่เข้าชนผนัง
    ข. แรงเฉลี่ยเนื่องจากโมเลกุลในข้อ ก. ตัวเดียวที่เข้าชนผนังแต่ละด้าน
    ค. ความดันบนผนังแต่ละด้าน
20. ถ้าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สในภาชนะปิดเท่ากับ 6.3×10^{-21} จูล และจำนวนโมเลกุลต่อปริมาตรของแก๊สเท่ากับ 2.4×10^{25} โมเลกุลต่อลูกบาศก์เมตร จงหาความดันของแก๊สนี้

21. จงหาพลังงานจลน์เฉลี่ยของโมเลกุลออกซิเจนที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ
22. แก๊สชนิดหนึ่งบรรจุในภาชนะปิดที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส จะต้องทำให้แก๊สนี้มีอุณหภูมิเป็นเท่าใด จึงมีพลังงานจลน์เฉลี่ยต่อโมเลกุลเป็น 2 เท่าของค่าเดิม
23. จงหาอัตราเร็วอาร์เอ็มเอสและพลังงานจลน์เฉลี่ยของโมเลกุลไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 280 เคลวิน
24. จงหาอัตราเร็วอาร์เอ็มเอสและพลังงานจลน์เฉลี่ยของอะตอมนีออนที่อุณหภูมิ 450 เคลวิน
25. พลังงานภายในของแก๊สอาร์กอนจำนวน 1 โมล ที่ 27 องศาเซลเซียส มีค่าเท่าใด
26. แก๊สอุดมคติมวล 20 กรัม บรรจุในขวดปิดมิดชิดมีอุณหภูมิ 293 เคลวิน ถ้าอุณหภูมิของแก๊สในขวดเพิ่มขึ้น 20 เคลวิน พลังงานภายในจะเพิ่มขึ้นเท่าใดเมื่อกำหนดให้มวลโมลาร์ของแก๊สนี้เท่ากับ 20 กรัมต่อโมล
27. ระบบซึ่งประกอบด้วยแก๊สจำนวนหนึ่ง เมื่อแก๊สนี้เปลี่ยนสภาวะจาก a ไป b จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันของแก๊ส P กับปริมาตร V ดังรูป



รูป ประกอบปัญหาข้อ 27

พลังงานภายในของระบบเปลี่ยนแปลงไปเท่าใด

28. แก๊สในกระบอกสูบได้รับความร้อนจากภายนอก 142 จูล ทำให้แก๊สทำงาน 160 จูล พลังงานภายในของแก๊สเพิ่มขึ้นหรือลดลงเท่าใด และอุณหภูมิของแก๊สเพิ่มขึ้นหรือลดลง

29 แก๊สฮีเลียมจำนวน 1 โมล บรรจุในขวดแก้วที่ปิดผนึกไว้อย่างดีและถือว่าปริมาตรคงตัวตลอดเวลาต้องให้ความร้อนกับแก๊สฮีเลียมเท่าใดจึงจะทำให้แก๊สมีอุณหภูมิเปลี่ยนไป 30 องศาเซลเซียส

30. จงหาพลังงานภายในที่เปลี่ยนไปของแก๊สจำนวนหนึ่งที่บรรจุภายในกระบอกสูบ เมื่อแก๊สในกระบอกสูบ
    ก. ได้รับความร้อน 2100 จูล ในขณะเดียวกันแก๊สทำงาน 400 จูล
    ข. ได้รับความร้อน 1260 จูล ในขณะเดียวกันออกแรงทำงานต่อแก๊ส 420 จูล
    ค. ให้ความร้อนออกมา 5000 จูล ในขณะที่ปริมาตรของแก๊สคงตัว

ปัญหาท้าทาย

31. ให้ความร้อน 10 กิโลจูล กับเหล็กและทองแดงซึ่งมีมวล 500 กรัมเท่ากัน อุณหภูมิของโลหะทั้งสองจะเพิ่มขึ้นเท่ากันหรือไม่ อย่างไร
32. นำก้อนอะลูมิเนียมมวล 80 กรัม อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ใส่ลงไปในภาชนะที่เป็นฉนวนและมีน้ำมวล 200 กรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เมื่อถึงสมดุลความร้อน อุณหภูมิของสารทั้งสองจะเป็นเท่าใด และความร้อนที่ถูกถ่ายโอนจากก้อนอะลูมิเนียมเป็นเท่าใด
33. นำอัลลอยมวล 120 กรัม อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ใส่ลงในภาชนะที่เป็นฉนวนและบรรจุน้ำมวล 250 กรัม อุณหภูมิ 98 องศาเซลเซียส การผสมนี้จะทำให้น้ำกลายเป็นไอน้ำกี่กรัมกำหนดให้ความร้อนจำเพาะของอัลลอยเท่ากับ 500 จูลต่อกิโลกรัม เคลวิน
34. ก้อนอะลูมิเนียมมวล 200 กรัม อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส อยู่ในภาชนะที่เป็นฉนวนความร้อน เมื่อเทน้ำแข็งมวล 70 กรัม อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ลงในภาชนะ จากนั้นปิดภาชนะด้วยฝาฉนวน อุณหภูมิสุดท้ายภายในภาชนะเป็นเท่าใด
35. แก๊สจำนวนหนึ่งพบว่า ที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส และความดัน 1.0 บรรยากาศ จะมีปริมาตร 1.0 ลูกบาศก์เมตร ถ้าแก๊สดังกล่าวอยู่ในสภาวะต่อไปนี้

ที่	สภาวะ	อุณหภูมิ ($^\circ$C)	ความดัน (บรรยากาศ)
ก.	อุณหภูมิสูงและความดันต่ำ	127	0.5
ข.	อุณหภูมิและความดันสูง	127	2.0
ค.	อุณหภูมิและความดันต่ำ	-73	0.5
ง.	อุณหภูมิต่ำและความดันสูง	-73	2.0

แก๊สในสภาวะใดมีปริมาตรมากที่สุด

36. ในการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันและปริมาตรของแก๊สชนิดหนึ่ง ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ได้ข้อมูลดังตาราง

ความดัน $P(\times 10^5\ \text{Pa})$	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00
ปริมาตร $V(\times 10^{-6}\ \text{m}^3)$	815	545	405	320	272

จากข้อมูล จงหาจำนวนโมลของแก๊สที่ใช้ทดลองนี้

37. จงหามวลและจำนวนโมเลกุลของออกซิเจน 0.1 กิโลโมล และถ้าแก๊สนี้มีอุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ความดัน 1.0 บรรยากาศ จะมีปริมาตรเท่าใด กำหนดให้มวลโมเลกุลของออกซิเจนเท่ากับ 32
38. แก๊สไฮโดรเจนบรรจุในภาชนะปิดปริมาตร 207 ลูกบาศก์เดซิเมตร ที่อุณหภูมิ 303 เคลวิน ความดัน 1.01×10^5 พาสคัล จงหา
    ก. จำนวนโมเลกุลของไฮโดรเจนในภาชนะ
    ข. ความดันของไฮโดรเจนในภาชนะ เมื่อเติมไฮโดรเจนจำนวนโมเลกุลเท่ากับในข้อ ก. เข้าไปในภาชนะ โดยอุณหภูมิและปริมาตรของแก๊สในภาชนะยังคงเป็นเช่นเดิม
    ค. ความดันของไฮโดรเจนในภาชนะ เมื่อเติมแก๊สที่มีมวลโมเลกุลเป็นสองเท่าของไฮโดรเจนเพิ่มเข้าไปในภาชนะด้วยจำนวนโมเลกุลเท่ากับในข้อ ก. โดยอุณหภูมิและปริมาตรของแก๊สในภาชนะยังคงเป็นเช่นเดิม
39. ถังแก๊สใบหนึ่งมีปริมาตร 200 ลิตร บรรจุแก๊สชนิดหนึ่งจำนวน 20 โมล ถังแก๊สใบนี้ต่ออยู่กับถังแก๊สเปล่าอีกใบหนึ่งมีปริมาตร 20 ลิตร เมื่อเปิดวาวล์จะมีแก๊สไหลจากถังใบแรกไปสู่ถังเปล่าได้อย่างมากที่สุดกี่โมล ถ้าอุณหภูมิภายในถังขณะถ่ายแก๊สไม่เปลี่ยนแปลง
40. ถ้ากระบอกสูบที่บรรจุแก๊สมีการเปลี่ยนแปลงความดันเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า และเปลี่ยนแปลงปริมาตรเป็น 0.8 เท่า พลังงานจลน์ของแก๊สในกระบอกสูบจะเพิ่มขึ้นร้อยละเท่าใด
41 แก๊ส A และแก๊ส B เป็นแก๊สอะตอมเดี่ยวมีมวลและอุณหภูมิเท่ากัน แต่มวลโมเลกุลของแก๊ส A มากกว่าของแก๊ส B จงเปรียบเทียบ
    ก. พลังงานจลน์เฉลี่ยของโมเลกุลของแก๊ส A และ B
    ข. พลังงานจลน์ทั้งหมดของแก๊ส A และ B
42. แก๊สปริมาณหนึ่งอยู่ในกระบอกสูบถูกอัดจนมีความดันเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าของความดันเดิมโดยมีอุณหภูมิคงตัว จงหาอัตราส่วนระหว่างปริมาณต่อไปนี้ในสภาวะใหม่กับสภาวะเดิม
    ก. ปริมาตร
    ข. จำนวนโมเลกุลต่อปริมาตร
    ค. พลังงานจลน์เฉลี่ยของโมเลกุลของแก๊ส

43. กล่องขนาดกว้าง 0.1 เมตร ยาว 0.1 เมตร และสูง 0.2 เมตร ภายในมีอนุภาค 20 ตัว แต่ละอนุภาคมีมวล 1.0×10^{-3} กรัม เท่ากัน และมีอัตราเร็วดังนี้

3.0 m/s	5.0 m/s	6.0 m/s	1.0 m/s
3.0 m/s	4.0 m/s	4.0 m/s	2.0 m/s
7.0 m/s	4.0 m/s	5.0 m/s	6.0 m/s
2.0 m/s	4.0 m/s	5.0 m/s	3.0 m/s
8.0 m/s	4.0 m/s	5.0 m/s	5.0 m/s

จงหา

ก. อัตราเร็วเฉลี่ยของอนุภาคในกล่อง

ข. อัตราเร็วอาร์เอ็มเอส

ค. พลังงานจลน์เฉลี่ยของแต่ละอนุภาค

ง. ความดันเฉลี่ยที่ผนังกล่อง ถ้าการชนผนังของอนุภาคเป็นการชนแบบยืดหยุ่น

44. ถ้าผสมแก๊สฮีเลียม 1 โมล ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส กับแก๊สอาร์กอน 2 โมล ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จงหาว่าอุณหภูมิผสมเป็นเท่าใด

45. แก๊สในกระบอกสูบคายความร้อน 240 จูล ขณะที่พลังงานภายในเพิ่มขึ้น 50 จูล ปริมาตรของแก๊สจะเพิ่มขึ้นหรือลดลง

46. ในการอัดแก๊สอาร์กอน 1 กิโลโมล จากปริมาตร 22.4 ลูกบาศก์เมตร ที่ 0 องศาเซลเซียส ความดัน 1.01×10^{5} พาสคัล ให้มีปริมาตรเป็น 14.0 ลูกบาศก์เมตร ที่ความดันเดียวกัน

จงหา

ก. งานที่ใช้ในการอัดแก๊ส

ข. อุณหภูมิของแก๊สหลังการอัด

ค. พลังงานภายในของแก๊สที่เปลี่ยนไป

ง. ความร้อนที่แก๊สปลดปล่อยออกมา

บทที่ 17 ของแข็งและของไหล

ipst.me/11066

สะพานภูมิพลเป็นสะพานขึงข้ามแม่น้ำเจ้าพระยาในจังหวัดสมุทรปราการ เริ่มสร้างตั้งแต่ปี พ.ศ. 2542 และเปิดใช้งานในปี พ.ศ. 2549 ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับสมบัติของแข็งและของไหล นำมาใช้ในการออกแบบโครงสร้างสะพานโดยใช้สายเคเบิ้ลขึงรับน้ำหนักของตัวสะพานทำให้ใช้เสาสะพานน้อยลง การเลือกใช้วัสดุที่นำมาทำเป็นโครงสร้างสะพานต้องคำนึงถึงสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งาน และทนทานต่อแรงกระทำจากสิ่งแวดล้อม ซึ่งจะได้ศึกษาในบทนี้

คำถามสำคัญ

- เมื่อออกแรงกระทำต่อวัสดุที่เป็นของแข็งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างไร และสามารถนำความรู้เกี่ยวกับสภาพยืดหยุ่นไปประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวันได้อย่างไร
- ของไหลที่อยู่นิ่งและของไหลที่เคลื่อนที่มีสมบัติเป็นอย่างไร และสามารถนำความรู้เกี่ยวกับสมบัติของไหลไปประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวันได้อย่างไร

จุดประสงค์การเรียนรู้

17.1 ของแข็งและสภาพยืดหยุ่นของของแข็ง

1. อธิบายสภาพยืดหยุ่นและลักษณะการยืดและหดตัวของวัสดุที่เป็นแท่งเมื่อถูกกระทำด้วยแรงค่าต่าง ๆ
2. ทดลอง อธิบายและคำนวณ ความเค้นตามยาว ความเครียดตามยาว มอดุลัสของยัง และการนำความรู้เรื่องสภาพยืดหยุ่นไปใช้ในชีวิตประจำวัน

17.2 ความตึงผิวและความหนืดของของเหลว

3. ทดลอง อธิบายและคำนวณความตึงผิวของของเหลว
4. สังเกตและอธิบายแรงหนืดของของเหลว

17.3 ของไหลสถิต

5. อธิบายความดันในของเหลว ความสัมพันธ์ระหว่างความดันในของเหลวกับความหนาแน่นของของเหลว ความลึกของของเหลว และความเร่งโน้มถ่วงของโลก
6. อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความดันเกจ ความดันสัมบูรณ์ และความดันบรรยากาศ พร้อมทั้งคำนวณหาความดันต่าง ๆ
7. อธิบายหลักการทำงานของแมนอมิเตอร์ บารอมิเตอร์ และเครื่องอัดไฮดรอลิก
8. ทดลอง อธิบายและคำนวณขนาดแรงพยุงจากของไหล

17.4 พลศาสตร์ของของไหล

9. อธิบายสมบัติของของไหลอุดมคติ สายกระแส หลอดการไหล และอัตราการไหล
10. อธิบายสมการความต่อเนื่อง สมการแบร์นูลลี รวมทั้งคำนวณปริมาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง
11. อธิบายหลักการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ โดยใช้สมการความต่อเนื่องและ สมการแบร์นูลลี

ความรู้ก่อนเรียน

ความรู้ก่อนเรียน: การเคลื่อนที่ แรง สมดุลกล งาน พลังงานจลน์ พลังงานศักย์ และทฤษฎีบทงาน-พลังงานจลน์

สสารและสิ่งของต่าง ๆ ในสภาพปกติโดยทั่วไปมี 3 สถานะ ได้แก่ ของแข็ง ของเหลวและแก๊ส สสารที่มีสถานะเป็นของเหลวหรือแก๊สสามารถเรียกว่า ของไหล เนื่องจากของเหลวและแก๊สสามารถไหลได้ ในบทนี้จะได้ศึกษาสมบัติบางประการของของแข็งและของไหล เพื่ออธิบายสมบัติของสสารและปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้อง

17.1 ของแข็งและสภาพยืดหยุ่นของของแข็ง

จากการศึกษาในบทความร้อนที่ผ่านมาเรารู้ว่าของแข็งมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลมากพอที่จะทำให้โมเลกุลของของแข็งอยู่ใกล้กันและรูปทรงของของแข็งไม่เปลี่ยนแปลงมาก ซึ่งของแข็งจะมีรูปร่างและปริมาตรคงตัว จากสมบัติพื้นฐานของของแข็ง สามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในชีวิตประจำวัน เช่น โครงสร้างอาคาร สะพานแขวน ยานพาหนะ และเครื่องมือเครื่องใช้ต่าง ๆ การพิจารณาเลือกใช้วัสดุที่เป็นของแข็ง เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งาน ต้องคำนึงถึงสมบัติใดบ้าง

17.1.1 สภาพยืดหยุ่นของของแข็ง

นอกจากแรงจะส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของวัตถุ แรงยังส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัตถุ กล่าวคือเมื่อวัตถุถูกแรงกระทำ วัตถุอาจเปลี่ยนรูปร่างแล้วไม่คืนสภาพเดิมหรือคืนสภาพเดิมหลังหยุดออกแรงกระทำ เช่น ออกแรงบีบกระป๋องน้ำอัดลมเปล่า กระป๋องนั้นจะยุบหรือบุบอย่างเห็นได้ชัด จะทำให้กระป๋องเกิด **การผิดรูป** (deformation) ไปถาวรไม่คืนสภาพเดิมเมื่อหยุดออกแรง แต่หากออกแรงบีบฟองน้ำ ฟองน้ำจะยุบและกลับสู่สภาพเดิมเมื่อหยุดออกแรง ดังรูป 17.1

ก่อนออกแรง ขณะออกแรง เมื่อหยุดการออกแรง

ก. การเปลี่ยนรูปร่างของกระป๋องน้ำอัดลมเปล่า

ก่อนออกแรง ขณะออกแรง เมื่อหยุดการออกแรง

ข. การเปลี่ยนรูปร่างของฟองน้ำ

รูป 17.1 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของกระป๋องน้ำอัดลมและฟองน้ำเมื่อถูกแรงกระทำ

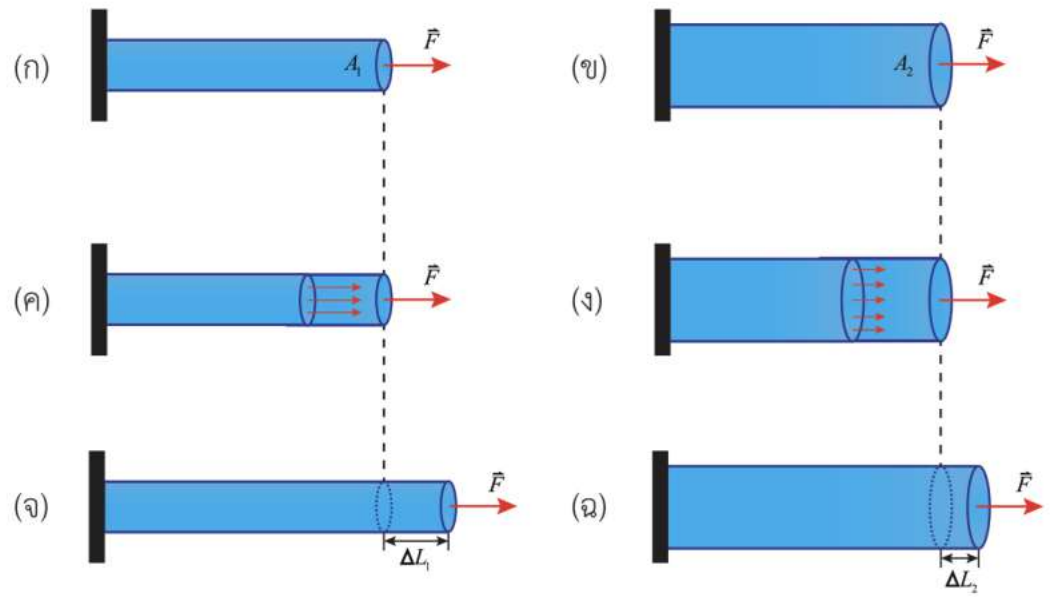
จากตัวอย่างข้างต้นกรณีกระป๋องน้ำอัดลมเปล่า เมื่อถูกแรงกระทำเปลี่ยนรูปร่างไปอย่างถาวร โดยไม่มีการฉีกขาดหรือแตกหัก เรียกสมบัติของวัสดุที่นำมาทำกระป๋องน้ำอัดลมนี้ว่า **สภาพพลาสติก** (plasticity) ส่วนกรณีฟองน้ำเมื่อถูกแรงกระทำเปลี่ยนรูปร่างและกลับสู่รูปร่างเดิมเมื่อหยุดออกแรงกระทำ เรียกสมบัตินี้ว่า **สภาพยืดหยุ่น** (elasticity) อย่างไรก็ตามวัตถุแต่ละชนิดจะอยู่ในสภาพยืดหยุ่นได้ที่แรงกระทำช่วงหนึ่งแต่จะเสียรูปอย่างถาวร (สภาพพลาสติก) เมื่อได้รับแรงกระทำมากเกินค่าหนึ่ง สภาพยืดหยุ่นของวัตถุเกี่ยวข้องกับแรงกระทำและการเปลี่ยนรูปร่างอย่างไร เราสามารถศึกษาสภาพยืดหยุ่นของวัตถุได้ดังต่อไปนี้

17.1.2 ความเค้นและความเครียดของของแข็ง

วัตถุที่มีรูปร่างเป็นแท่งหรือเป็นเส้นยาวเมื่อถูกแรงกระทำไปตามแนวความยาว วัตถุจะมีความยาวเปลี่ยนไป โดยความยาวที่เปลี่ยนไปขึ้นอยู่กับแรงกระทำและพื้นที่หน้าตัดของวัตถุ เช่น

เมื่อออกแรง $\vec{F}$ ที่มีขนาดเท่ากันกระทำในแนวตามความยาวซึ่งตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัด A_1 และ A_2ของวัตถุที่เป็นวัสดุชนิดเดียวกันและยาวเท่ากัน โดย $A_1 < A_2$ ดังรูป 17.2 (ก) และ (ข)

เมื่อพิจารณาแรงภายในวัตถุจะมีแรงกระจายตามพื้นที่หน้าตัดโดยมีผลรวมของแรงเท่ากับแรง $\vec{F}$ ดังรูป 17.2 (ค) และ (ง) การยืดของแท่งวัตถุที่ถูกแรงขนาดเท่ากันกระทำพบว่า ระยะยืด ΔL_1 ของวัตถุที่มีพื้นที่หน้าตัดน้อย จะยืดมากกว่าระยะยืด ΔL_2 ของวัตถุที่มีพื้นที่หน้าตัดมากกว่า หรือ $\Delta L_1 > \Delta L_2$ ดังรูป 17.2 (จ) และ 17.2 (ฉ)



รูป 17.2 แสดงแรงดึงขนาด $\vec{F}$ ที่ขนาดเท่ากันกระทำในแนวตามความยาวซึ่งตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัด A_1 และ A_2

เมื่อให้ $\vec{F}$ เป็นขนาดแรงดึง กระทำในแนวตามยาวและตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัด A ของเส้นลวด อัตราส่วนระหว่างแรงดึงกับพื้นที่หน้าตัด เรียกว่า **ความเค้นดึง** (tensile stress) ทำนองเดียวกันถ้าเป็นแรงอัดจะเรียก**ความเค้นอัด** (compressive stress) ซึ่งแรงอัดจะกระทำต่อวัตถุในลักษณะให้หดสั้นลง ความเค้นทั้งสองเป็น **ความเค้นตามยาว** (longitudinal stress) แทนด้วยสัญลักษณ์ σ และเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังสมการ 17.1

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{17.1}$$

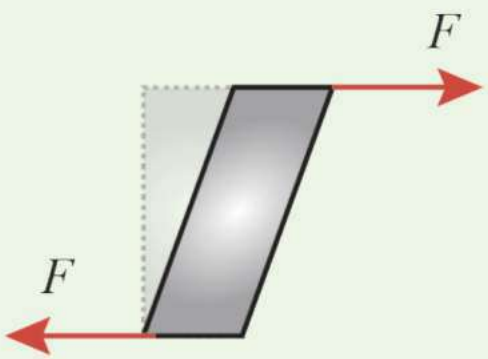
σ เป็นความเค้นตามยาว มีหน่วย นิวตันต่อตารางเมตร (N/m^2) หรือ พาสคัล (Pa) โดยความเค้นเป็นปริมาณสเกลาร์

ชวนคิด

จากรูป 17.2 (ก) และ 17.2 (ข) แท่งวัตถุในรูปใดมีความเค้นมากกว่า เพราะเหตุใด

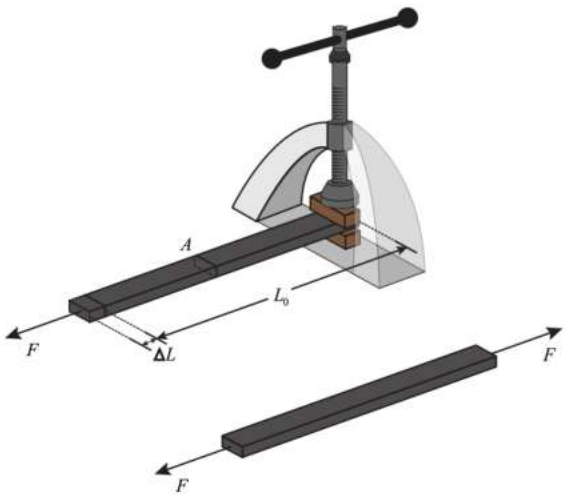
ความรู้เพิ่มเติม

โดยทั่วไปแบ่งความเค้นออกเป็น 2 ชนิด คือ ความเค้นตามยาว และความเค้นเฉือนเมื่อมีแรงมากระทำต่อวัตถุในทิศทางที่ต่างกันจะส่งผลต่อลักษณะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัตถุ ทำให้เราสามารถพิจารณาประเภทของความเค้นได้เป็น **ความเค้นตามยาว** (longitudinal stress) นอกจากนี้ยังมี **ความเค้นเฉือน** (shear stress) ที่เกิดจากแรง $\vec{F}$ กระทำต่อวัตถุในลักษณะขนานกับพื้นที่หน้าตัดจะทำให้วัตถุเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปจากเดิมในลักษณะ ดังรูป



รูป ความเค้นเฉือน

พิจารณาแท่งวัตถุซึ่งมีความยาวเดิม L_0 เมื่อมีแรงกระทำในแนวตามยาวทำให้วัตถุจะมีความยาวเปลี่ยนไป ΔL ดังรูป 17.3



รูป 17.3 ระยะยืดของวัตถุเมื่อถูกแรงดึง

อัตราส่วนระหว่างความยาวที่เปลี่ยนไปกับความยาวเดิม เรียกว่า **ความเครียดตามยาว** (longitudinal strain) แทนด้วยสัญลักษณ์ ε และเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังสมการ 17.2

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \qquad (17.2)$$

ชวนคิด

จากรูป 17.2 (จ) และ 17.2 (ฉ) แท่งวัตถุในรูปใดมีความเครียดมากกว่า และความเครียดมีหน่วยอย่างไร เพราะเหตุใด

เนื่องจากความเครียดเป็นอัตราส่วนระหว่างความยาวที่เปลี่ยนไปกับความยาวเดิม ซึ่งมีหน่วยเดียวกัน ความเครียดจึงไม่มีหน่วย

ตัวอย่าง 17.1 ลวดโลหะเส้นหนึ่งยาว 12.0 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.2 มิลลิเมตร ถูกดึงให้ยืดออกด้วยแรงขนาด 380 นิวตัน ทำให้ลวดโลหะมีความยาวเป็น 12.1 เมตร จงหาความเค้นและความเครียดในลวดโลหะ ให้แทนค่า π มีค่าประมาณเท่ากับ 3.14

แนวคิด หาพื้นที่หน้าตัดของลวดโลหะ แล้วหาค่าความเค้นจาก $\sigma = \frac{F}{A}$ ความเครียดจาก $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$

วิธีทำ พื้นที่หน้าตัดของลวดโลหะ $A = \frac{\pi d^2}{4}$

$$= \frac{(3.14)\left(2.2\times10^{-3}\,\text{m}\right)^2}{4}$$

$$= 3.80\times10^{-6}\ \text{m}^2$$

ความเค้น $\sigma = \frac{F}{A}$

$$= \frac{380\ \text{N}}{3.80\times10^{-6}\ \text{m}^2}$$

$$= 1.0\times10^{8}\ \text{N/m}^2$$

$$= 100\ \text{MPa}$$

ความเครียด $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$

$$= \frac{(12.1\,\text{m} - 12.0\,\text{m})}{(12.0\,\text{m})}$$

$$= 8.3\times10^{-3}$$

ตอบ ลวดโลหะมีความเค้นเท่ากับ 1.0×10^{8} นิวตันต่อตารางเมตร หรือ 100 เมกะพาสคัล และมีความเครียดเท่ากับ 8.3×10^{-3}

17.1.3 มอดุลัสของยัง

จากที่กล่าวมาแล้วจะเห็นว่า สำหรับวัสดุที่มีสมบัติยืดหยุ่น เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำตามแนวความยาวของวัตถุจะทำให้เกิดความเค้นตามยาวและความเครียดตามยาว ความเค้นตามยาวและความเครียดตามยาวมีความสัมพันธ์กันอย่างไร จะศึกษาได้จากกิจกรรม **17.1**

กิจกรรม 17.1 ความเค้นและความเครียดตามยาวของวัสดุ

จุดประสงค์

อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดตามยาวของวัสดุ

วัสดุและอุปกรณ์

1. ชุดรางไม้	1ชุด
2. สายกีตาร์ (E1)	1 เส้น
3. ถุงทราย	6 ถุง
4. ไม้บรรทัด	1 อัน
5. เส้นด้าย ยาวประมาณ 5 เซนติเมตร	1 เส้น

วิธีทำกิจกรรม

1. ติดรอกเข้ากับปลายรางไม้ ติดท่อนไม้สำหรับยึดปลายของสายกีตาร์บริเวณกลางรางไม้ ให้ห่างจากรอกอย่างน้อย 60 เซนติเมตร
2. ยึดปลายสายกีตาร์ด้านหนึ่งเข้ากับท่อนไม้ ปลายอีกด้านหนึ่งผูกติดกับห่วงเหล็กสำหรับคล้องถุงทรายพาดสายกีตาร์บนรอกให้ห่วงเหล็กสำหรับคล้องถุงทรายห้อยลงจากปลายรางไม้
3. ดึงสายกีตาร์ให้ตึง ผูกเส้นด้ายบนสายกีตาร์ตรงจุดที่ห่างจากท่อนไม้เป็นระยะ 50 เซนติเมตร ใช้ไม้บรรทัดวางตามแนวใต้สายกีตาร์ให้ขีดสเกลเป็นมิลลิเมตรอยู่บริเวณเส้นด้ายที่ผูกไว้

4. ชั่งน้ำหนักถุงทราย 1 ถุง แล้วแขวนเข้ากับห่วงเหล็ก บันทึกน้ำหนักถุงทรายและระยะยืดจากปมด้ายเย็บผ้าบนสายกีตาร์ที่เลื่อนไปจากตำแหน่งเดิม

5. ทำซ้ำข้อ 4 จนถุงทรายครบ 6 ถุง
6. คำนวณค่าความเค้นตามยาวจากแรงเนื่องจากน้ำหนักของถุงทราย และค่าความเครียดตามยาวแล้วนำมาเขียนกราฟให้แกนตั้งเป็นความเค้นตามยาว แกนนอนเป็นความเครียดตามยาว

คำถามท้ายกิจกรรม

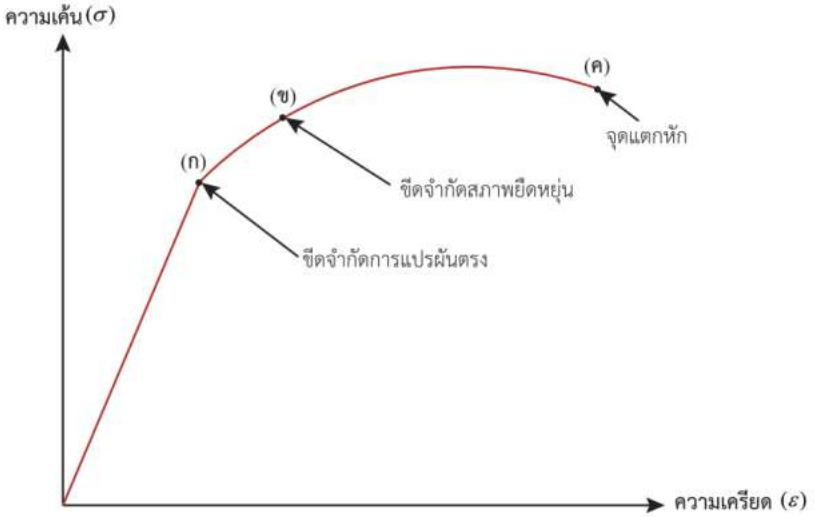
- ☐ กราฟความเค้นตามยาวกับความเครียดตามยาวที่ได้มีลักษณะเป็นอย่างไร
- ☐ ความเค้นตามยาวกับความเครียดตามยาวมีความสัมพันธ์กันอย่างไร

จากการทดลองจะพิจารณาได้ว่า กราฟระหว่างความเค้นตามยาวกับความเครียดตามยาวเป็นกราฟเส้นตรง แสดงว่าความเค้นดึง แปรผันตรงกับความเครียดดึง ซึ่งในช่วงของการแปรผันตรงอัตราส่วนระหว่างความเค้นตามยาวต่อความเครียดตามยาวจะมีค่าคงตัวและเท่ากับความชันของกราฟเส้นตรง ในกรณีการเปลี่ยนรูปร่างตามยาวหาค่าคงตัวดังกล่าวได้จากอัตราส่วนระหว่างความเค้นตามยาวต่อความเครียดตามยาว เรียกว่า **มอดุลัสของยัง** (Young's modulus) ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ ดังสมการ

$$Y = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \text{หรือ} \quad Y = \frac{F/A}{\Delta L / L_0} \tag{17.3}$$

Y คือค่ามอดุลัสของยัง มีหน่วยเป็น นิวตันต่อตารางเมตร

ถ้าเพิ่มแรงกระทำกับวัตถุจนกระทั่งวัตถุฉีกขาดหรือแตกหักจะได้กราฟความเค้นกับความเครียดดังรูปที่ 17.4



รูป 17.4 กราฟความเค้นกับความเครียด

จากกราฟแสดงให้เห็นว่า ความยืดหยุ่นของวัสดุที่นำมาทำวัตถุ ขณะถูกแรงขนาดต่าง ๆ กระทำสำหรับช่วงแปรผันตรง ความเค้นจะแปรผันตรงกับความเครียด ได้แก่ช่วงจากจุดกำเนิดถึงจุด ก ซึ่งเรียก จุด ก ว่า **ขีดจำกัดการแปรผันตรง** (proportional limit) ถัดจากจุด ก จนถึง จุด ข ความเค้นไม่แปรผันตรงกับความเครียดในช่วงนี้ เมื่อหยุดออกแรงกระทำวัตถุยังสามารถกลับคืนรูปร่างเดิมหรือกลับมามีความยาวเดิมได้อีก เรียกจุด ข ว่า**ขีดจำกัดสภาพยืดหยุ่น**

เมื่อออกแรงจนความเค้นสูงกว่าขีดจำกัดสภาพยืดหยุ่นหากหยุดออกแรงกระทำ วัตถุจะไม่กลับคืนรูปร่างเดิมหรือไม่กลับมามีความยาวเท่าเดิมอีก แสดงว่าวัตถุสูญเสียสภาพยืดหยุ่น เรียกว่า **สภาพพลาสติก** และหากยังคงเพิ่มขนาดของแรงให้เกิดความเครียดเพิ่มขึ้นอีกจนถึงจุด ค วัตถุจะมีการแตกหักจึงเรียกจุดนี้ว่า**จุดแตกหัก** (breaking point)

เนื่องจากมอดุลัสของยัง และขีดจำกัดสภาพยืดหยุ่นเป็นสมบัติเฉพาะตัวของวัสดุชนิดหนึ่ง ๆ ดังนั้นในการเลือกใช้วัสดุให้เหมาะสมกับงานต้องคำนึงถึงสภาพยืดหยุ่นซึ่ง ศึกษาได้ดังต่อไปนี้

17.1.4 การประยุกต์ใช้สภาพยืดหยุ่นในชีวิตประจำวัน

ความรู้เกี่ยวกับสภาพยืดหยุ่นของวัสดุมีประโยชน์ในด้านวิศวกรรมเป็นอย่างมาก เช่น การเลือกวัสดุเพื่อใช้เป็นโครงสร้างอาคาร สะพาน หรือชิ้นส่วนของเครื่องจักรกล จะต้องเลือกวัสดุที่มีสภาพยืดหยุ่นเหมาะสมกับงานและต้องไม่ใช้งานที่เกินขีดจำกัดสภาพยืดหยุ่น ค่ามอดุลัสของยังสำหรับวัสดุบางชนิด มีค่าดังตาราง 17.1

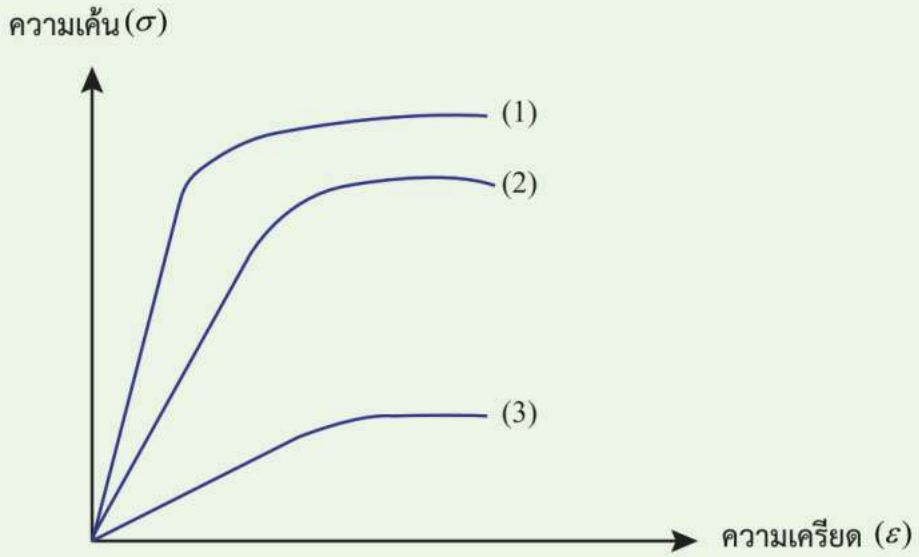
ตาราง 17.1 มอดุลัสของยังสำหรับวัสดุบางชนิด

วัสดุ	มอดุลัสของยัง (N/m^2)
ทังสเตน	35×10^{10}
เหล็กกล้า	20×10^{10}
เหล็ก	19×10^{10}
ทองแดง	11×10^{10}
ทองเหลือง	9.1×10^{10}
อะลูมิเนียม	7.0×10^{10}
แก้ว	$6.5\times10^{10}-7.8\times10^{10}$
คอนกรีต	2.8×10^{10}
ตะกั่ว	1.6×10^{10}
ไม้เนื้อแข็ง	1.5×10^{10}
ไม้เนื้ออ่อน	9×10^{9}

วัสดุที่มีค่ามอดุลัสของยังสูง เป็นวัสดุที่เปลี่ยนรูปร่างได้ยากหรือเปลี่ยนรูปร่างได้น้อย ส่วนความเค้นที่ขีดจำกัดสภาพยืดหยุ่นจะบอกให้ทราบว่า วัสดุนั้นสามารถทนต่อแรงภายนอกมากที่สุดเพียงใดที่ยังสามารถกลับสู่สภาพเดิมได้หรือยังไม่สูญเสียสภาพยืดหยุ่น ดังนั้นในการออกแบบชิ้นส่วนของเครื่องยนต์จำเป็นต้องเลือกใช้วัสดุที่สามารถทนต่อแรงที่มากระทำได้มาก ซึ่งหมายถึงว่า วัสดุนั้นจะต้องมีมอดุลัสของยังสูง และความเค้นที่ขีดจำกัดสภาพยืดหยุ่นสูงด้วย วัสดุที่ว่านี้ได้แก่ เหล็กกล้าและโลหะผสม เป็นต้น กล่าวโดยสรุปได้ว่า ในงานที่ต้องการให้วัสดุเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้น้อย วัสดุนั้นต้องมีค่ามอดุลัสของยังสูง แต่ในงานที่ต้องการใช้วัสดุที่เปลี่ยนรูปร่างได้ง่ายต้องมีค่ามอดุลัสของยังต่ำ ส่วนความสามารถในการรับแรงกระทำได้มากหรือน้อยแล้วจึงเสียสภาพยืดหยุ่นหรือชำรุด การเลือกใช้วัสดุต้องพิจารณาจากค่าความเค้นที่ขีดจำกัดสภาพหยืดหยุ่นสูงหรือต่ำเพื่อให้เหมาะสมกับงาน

ชวนคิด

แท่งเหล็ก อะลูมิเนียม และทังสะเตนมีขนาดเท่ากัน เมื่อนำมาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความเค้นตามยาวได้ข้อมูลตามกราฟดังรูปด้านล่าง



จงระบุชนิดโลหะให้ตรงกับหมายเลขที่กำหนดในกราฟ

ตัวอย่าง 17.2 ลวดทำมาจากอะลูมิเนียมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 มิลลิเมตร ยาว 2.00 เมตร ลวดถูกดึงด้วยแรง 200 นิวตัน หาความยาวของลวดที่เปลี่ยนไป กำหนดให้อะลูมิเนียมมีค่ามอดุลัสของยังเท่ากับ 7.0×10^{10} นิวตันต่อตารางเมตร ให้แทนค่า π มีค่าประมาณเท่ากับ 3.14

แนวคิด หาความยาวที่เปลี่ยนไปจากสมการ $\varepsilon = \dfrac{\Delta L}{L_0}$ และ $Y = \dfrac{\sigma}{\varepsilon}$

วิธีทำ ค่ามอดุลัสของยังเท่ากับ $Y = \dfrac{\sigma}{\varepsilon} = \dfrac{F/A}{\Delta L/L_0}$

จาก $F = 200\text{N}$ $A = \pi(1\times10^{-3}\text{m})^2$

$$\frac{F}{A} = \frac{200\,\text{N}}{3.14\times(1\times10^{-3}\,\text{m})^2}$$

$$= 63.39\,\text{N/m}^2$$

ความยาวที่เปลี่ยนไป

$$\frac{\Delta L}{L_o} = \frac{F/A}{Y}$$
$$= \frac{63.69\times10^{6}\ \text{N/m}^2}{7\times10^{10}\ \text{N/m}^2}$$
$$= 9.099\times10^{-4}$$
$$\Delta L = 9.099\times10^{-4}\times 2.00\,\text{n}$$
$$= 18.20\times10^{-4}\,\text{m}$$
$$= 1.82\times10^{-3}\,\text{m}$$

ตอบ ความยาวของลวดที่เปลี่ยนไปเท่ากับ 1.82×10^{-3} เมตร หรือ 1.82 มิลลิเมตร

คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 17.1

- ☐ เมื่อนำเหล็ก ทองแดง และแก้วมาทำให้เป็นแท่งหรือเป็นเส้นยาวที่มีขนาดเท่ากันทุกประการ แล้วยึดปลายข้างหนึ่งไว้ จากนั้นออกแรงดึงปลายอีกข้างหนึ่งไปตามแนวยาวด้วยแรงเท่ากัน วัสดุจะเปลี่ยนแปลงความยาวต่างกันอย่างไร
- ☐ วัสดุที่มีค่ามอดุลัสของยังต่างกัน สามารถทนต่อแรงภายนอกต่างกันหรือไม่ อย่างไร
- ☐ ลวดขนาดโตเท่ากันและยาวเท่ากัน แต่มีมอดุลัสของยังต่างกัน เมื่อนำไปใช้แขวนวัตถุมวลเท่ากัน ลวดแต่ละเส้นยืดแตกต่างกันหรือไม่อย่างไร

แบบฝึกหัด 17.1

1. ถ้าใช้ลวดเหล็กกล้าเส้นหนึ่งยาว 4 เมตร มีพื้นที่หน้าตัด 0.8 ตารางเซนติเมตร ผูกวัตถุมวล 7000 กิโลกรัม แขวนห้อยไว้ในแนวดิ่งลวดเหล็กกล้านี้จะยืดออกจากเดิมเท่าไหร่ เหล็กกล้ามีค่ามอดุลัสของยังเท่ากับ 20×10^{10} นิวตันต่อตารางเมตร ให้แทนค่า g มีค่าประมาณเท่ากับ 9.8 เมตรต่อวินาที^{2}

เราได้ศึกษาสมบัติบางประการของของแข็งและตัวอย่างการใช้ประโยชน์จากหัวข้อที่ผ่านมา สำหรับของเหลวมีสมบัติเป็นอย่างไร นำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างไร จะได้ศึกษาในหัวข้อต่อไปนี้

17.2 ความตึงผิวและความหนืดของของเหลว

ของเหลวนอกจากไหลได้และเปลี่ยนรูปร่างไปตามภาชนะที่บรรจุ ยังมีสมบัติอื่นๆอีก เช่น ความตึงผิวและความหนืดของของเหลว ซึ่งจะได้ศึกษาต่อไปนี้

17.2.1 ความตึงผิวของของเหลว

การที่มีหยดน้ำเล็กๆเกาะอยู่ข้างแก้วเมื่อเทน้ำออกจากแก้ว แมลงตัวเล็กๆสามารถอยู่นิ่งหรือเคลื่อนที่ไปบนผิวน้ำได้โดยไม่จม และหยดน้ำเป็นรูปทรงกลมกลิ้งอยู่บนใบไม้บางชนิด เหตุใดจึงเป็นเช่นนั้น เกี่ยวข้องกับสมบัติใดของของเหลว

กิจกรรมลองทำดู

ให้ลองนำเข็มเย็บผ้าหรือลวดเสียบกระดาษ หรือใบมีดโกนวางตามแนวราบบนผิวน้ำที่อยู่นิ่ง โดยวางอย่างแผ่วเบา จากนั้นสังเกตสิ่งที่เกิดขึ้น

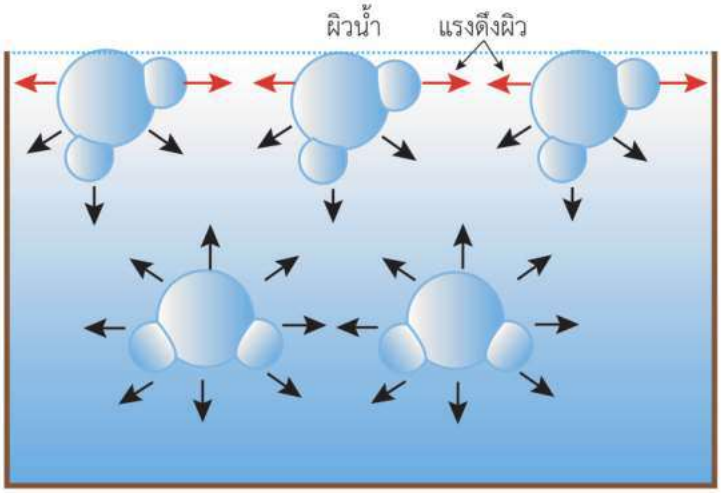
เมื่อวางเข็มเย็บผ้าหรือใบมีดโกนลงบนผิวน้ำตามแนวราบอย่างแผ่วเบา พบว่าเข็มเย็บผ้าหรือใบมีดโกนสามารถอยู่บนผิวน้ำได้ ดังรูป 17.5 แสดงว่าต้องมีแรงลัพธ์จากผิวน้ำดันเข็มเย็บผ้าหรือใบมีดโกนขึ้นในแนวดิ่ง ซึ่งแรงนี้เกิดจากโมเลกุลของน้ำที่บริเวณผิวหน้ายึดกันไว้มากพอจนรับน้ำหนักของเข็มหรือใบมีดโกนไว้ได้ เรียกว่า**แรงดึงผิวของน้ำ** รายละเอียดของแรงดึงผิวอธิบายได้ดังนี้

ก. ใบมีดโกนลอยบนผิวน้ำ

ข. เข็มลอยบนผิวน้ำ

รูป 17.5 วัตถุลอยบนผิวน้ำได้ด้วยความตึงผิวของน้ำ

ที่บริเวณผิวของของเหลวแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล (cohesive force) จะทำให้โมเลกุลที่ผิวของเหลวถูกโมเลกุลข้างเคียงดึงดูดมีทิศทางเข้าหาของเหลวและทิศทางในแนวสัมผัสผิวของของเหลว ดังรูป 17.6 แรงในแนวสัมผัสผิวของของเหลว คือแรงดึงผิว ทำให้ผิวของของเหลวมีลักษณะเสมือนแผ่นฟิล์มที่ขึงตึง จึงสามารถรับน้ำหนักของเข็มเย็บผ้าเล็กๆหรือใบมีดโกนได้ ทั้งที่วัตถุทั้งสองมีความหนาแน่นมากกว่าน้ำมาก ดังรูป 17.5 ก. และ ข. การที่ใบมีดโกนหรือเข็มเย็บผ้าสามารถลอยอยู่บนผิวน้ำได้เนื่องจากน้ำมี **ความตึงผิว** (surface tension)



รูป 17.6 แสดงแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ผิวของของเหลว

แรงดึงผิวของของเหลวกระทำต่อวัตถุที่สัมผัส มีลักษณะอย่างไร จะได้ศึกษาในกิจกรรมต่อไปนี้

กิจกรรม 17.2 แรงดึงผิวของของเหลว

จุดประสงค์

สังเกตลักษณะแรงดึงผิวของของเหลวที่กระทำกับวัตถุ

วัสดุและอุปกรณ์

1. เส้นลวดดัดเป็นห่วงรูปวงกลม	1 อัน
2. น้ำสบู่	1 แก้ว
3. เส้นด้ายยาวประมาณ 10 เซนติเมตร	1 เส้น

วิธีทำกิจกรรม

1. ผูกห่วงด้ายโดยให้เหลือปลายด้านหนึ่งไว้ประมาณ 3-4 เซนติเมตร
2. จุ่มโครงลวดโลหะในน้ำสบู่ ดึงโครงลวดขึ้นจากน้ำสบู่ให้ฟิล์มน้ำสบู่ติดขึ้นมากับโครงลวด
3. นำด้ายซึ่งผูกเป็นห่วงวางบนฟิล์มน้ำสบู่ โดยให้ปลายด้ายพาดกับโครงลวด ดังรูป

รูป การจัดอุปกรณ์เพื่อศึกษาแรงดึงผิวของของเหลว

4. ใช้เข็มหรือวัตถุปลายแหลมเจาะฟิล์มน้ำสบู่ในห่วงด้าย สังเกตรูปร่างของห่วงด้าย

คำถามท้ายกิจกรรม

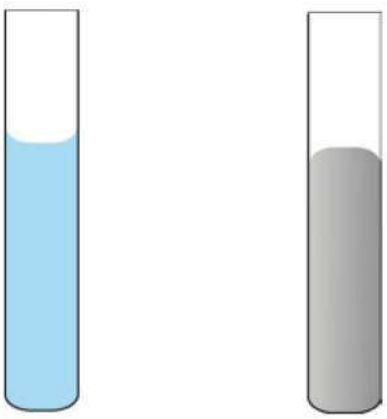
- ☐ รูปร่างของห่วงด้าย หลังเจาะฟิล์มน้ำสบู่ภายในห่วงแล้วมีรูปร่างอย่างไร
- ☐ จากผลที่เกิดขึ้น แรงที่ฟิล์มน้ำสบู่กระทำต่อห่วงด้ายมีทิศทางอย่างไร

จากกิจกรรมพบว่า หลังจากเจาะฟิล์มน้ำสบู่ภายในห่วงด้ายขาดออก ห่วงด้ายจะเป็นรูปวงกลม แสดงให้เห็นว่าแรงดึงผิวของฟิล์มน้ำสบู่ดึงห่วงด้ายในทิศตั้งฉากกับเส้นด้าย สรุปได้ว่า แรงดึงผิวมีทิศตั้งฉากกับขอบผิวของเหลวที่สัมผัสกับวัตถุ และอยู่ในแนวขนานกับผิวของเหลว

ความตึงผิวเป็นสมบัติของของเหลวที่ยึดผิวของเหลวไว้ด้วยแรงดึงผิว ปรากฏการณ์ที่เป็นผลจากความตึงผิว เช่น การเดินบนผิวน้ำของแมลงบางชนิด การซึมตามรูเล็ก การกลิ้งของน้ำบนใบบัว หรือการโค้งของผิวของเหลว ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้นได้อย่างไร ศึกษาได้ดังตัวอย่างต่อไปนี้

การโค้งของผิวของเหลว

เมื่อเทของเหลวลงในภาชนะและของเหลวนั้นอยู่นิ่ง สังเกตผิวของเหลวจะพบว่า ผิวของเหลวตรงบริเวณที่สัมผัสผิวภาชนะมีลักษณะโค้ง ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า **การโค้งของผิวของเหลว** (meniscus effect) เช่น เมื่อใส่น้ำและปรอทลงในหลอดทดลองอย่างละหลอด ขณะที่ของเหลวทั้งสองอยู่นิ่ง จะพบว่าผิวน้ำและผิวปรอทในหลอดทดลองมีลักษณะการโค้งที่แตกต่างกัน ดังรูป 17.7 เหตุใดจึงเป็นเช่นนั้น



ก. การโค้งของผิวน้ำ ข. การโค้งของผิวปรอท

รูป 17.7 ลักษณะการโค้งของผิวน้ำและผิวปรอทที่สัมผัสผิวแก้ว

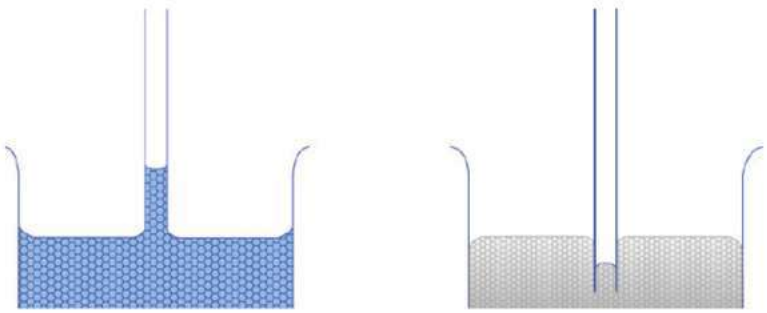
ปรากฏการณ์นี้เกิดจาก**แรงระหว่างโมเลกุล** (intermolecular force) ซึ่งมีสองแบบ คือ **แรงเชื่อมแน่น** (cohesive force) ซึ่งเป็นแรงระหว่างโมเลกุลชนิดเดียวกัน และ **แรงยึดติด** (adhesive force) ซึ่งเป็นแรงระหว่างโมเลกุลต่างชนิดกัน จากรูป 17.7 ก. ผิวน้ำมีลักษณะโค้งเว้าเนื่องจาก แรงยึดติดระหว่างโมเลกุลของน้ำกับโมเลกุลของแก้วมากกว่าแรงเชื่อมแน่นระหว่างโมเลกุลของน้ำ แต่ในรูป 17.7 ข. ผิวปรอทมีลักษณะโค้งนูนเนื่องจากแรงเชื่อมแน่นระหว่างโมเลกุลของปรอท มากกว่าแรงยึดติดระหว่างโมเลกุลของปรอทกับโมเลกุลของแก้ว

ชวนคิด

เมื่อเทน้ำและปรอทออกจากหลอดทดลอง ของเหลวใดจะมีโอกาสติดอยู่ข้างแก้วมากกว่ากัน

การซึมตามรูเล็ก

เมื่อจุ่มปลายข้างหนึ่งของ**หลอดรูเล็ก** (capillary tube) ซึ่งเป็นหลอดแก้วที่มีปลายเปิดทั้งสองข้างและมีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยมาก (เช่น ประมาณ 0.1 มิลลิเมตร) ลงในของเหลวจะพบว่าระดับของเหลวในหลอดสูงหรือต่ำกว่าระดับของเหลวภายนอกหลอด ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า **การซึมตามรูเล็ก** (capillary action) ซึ่งเกิดจากแรงเชื่อมแน่น และ แรงยึดติด เช่น จุ่มปลายข้างหนึ่งของหลอดรูเล็กลงในน้ำและปรอท จะพบว่าระดับน้ำในหลอดสูงกว่าระดับน้ำนอกหลอด ส่วนระดับปรอทในหลอดต่ำกว่าระดับปรอทภายนอกหลอด ดังรูป 17.8



ก. น้ำ ข. ปรอท

รูป 17.8 ระดับน้ำและระดับปรอทในหลอดแก้วรูเล็กปลายเปิดทั้งสองข้าง

ชวนคิด

อธิบายปรากฏการณ์การซึมตามรูเล็กในรูป 17.8 ได้อย่างไร

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

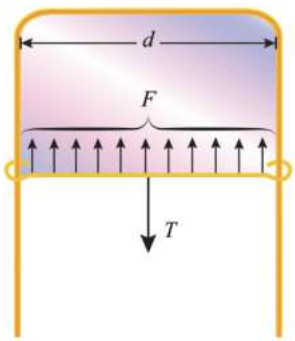
การหาความตึงผิว

ความตึงผิวของของเหลว γ หมายถึง อัตราส่วนของแรงดึงผิว F ต่อความยาว ℓ ที่ตั้งฉากกับแรงตลอดแนวที่แรงกระทำ ดังสมการ

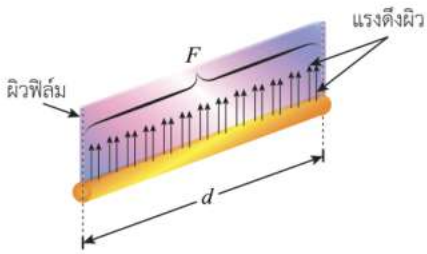
$$\gamma = \frac{F}{\ell} \qquad (17.4)$$

γ เป็นความตึงผิว มีหน่วย นิวตันต่อเมตร (N/m)

กรณีที่ผิวของเหลวเป็นฟิล์มบาง เช่น ผิวของเหลวในขดลวดรูปตัวยูและมีลวดเบา xy ยาว d เคลื่อนที่ได้คล่อง ดังรูป 17.9 ก. ผิวของเหลวจะดึงลวด xy ให้เคลื่อนที่ขึ้น เมื่อออกแรง T ดึงลวด xy ให้อยู่ในสมดุล แสดงว่าแรงดึง T เท่ากับแรงดึงผิว F เมื่อพิจารณาฟิล์มของเหลวที่สัมผัสลวด xy จะประกอบด้วยผิว 2 ด้าน ความยาวของผิวที่ทำให้เกิดแรงดึงผิวจึงเท่ากับ $2d$ ดังรูป 17.9 ข. ดังนั้น สามารถพิจารณาความตึงผิวของของเหลวในขดลวดได้ดังนี้



ก. แรงดึงผิวของของเหลวที่มีทิศขนานกับผิวของของเหลว



ข. แรงดึงผิวของของเหลวที่มีทิศตั้งฉากกับเส้นขอบที่ของเหลวสัมผัส

รูป 17.9 แรงดึงผิวของของเหลวที่มีทิศขนานกับผิวของของเหลวและตั้งฉากกับเส้นขอบที่ของเหลวสัมผัส

จากความตึงผิวตามสมการ (17.4) ฟิล์มของเหลวมีความยาวผิว ℓ ที่ตั้งฉากกับแรงดึงผิวตลอดแนวแรงที่กระทำกับลวด xy เท่ากับ $2d$ ความตึงผิวของฟิล์มของเหลวมีค่าเท่ากับ

$$\gamma = \frac{F}{2d}$$

จากกิจกรรม 17.2 แรงดึงผิวของของเหลว พบว่าของเหลวมีแรงดึงผิวกระทำต่อวัตถุในแนวตั้งฉากกับผิววัตถุที่ของเหลวนั้นสัมผัส และจากความหมายความตึงผิวข้างต้น จะหาความตึงผิวของของเหลวแต่ละชนิดได้อย่างไรและความตึงผิวของของเหลวที่นำมาศึกษามีค่าประมาณเท่าใด ศึกษาได้จากกิจกรรม 17.3 ความตึงผิวของของเหลว

กิจกรรม 17.3 ความตึงผิวของของเหลว

จุดประสงค์

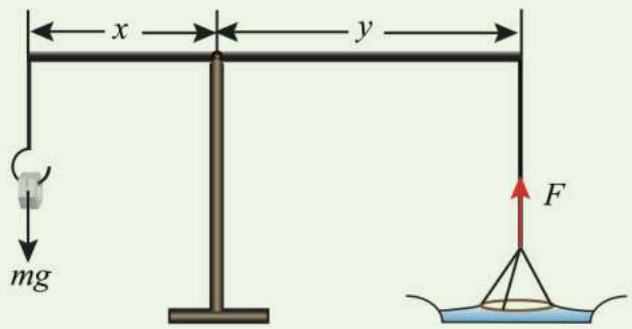
เพื่อหาความตึงผิวของของเหลวบางชนิด

วัสดุและอุปกรณ์

1. ชุดทดลองวัดความตึงผิวของของเหลว 1 ชุด
2. ของเหลวต่าง ๆ เช่น น้ำ น้ำเกลือ น้ำยาล้างจาน 1 แก้ว

วิธีทำกิจกรรม

1. จัดอุปกรณ์ทดลองให้คานอยู่ในสมดุลแล้ว ห่วงวงกลมแตะผิวน้ำพอดี ดังรูป



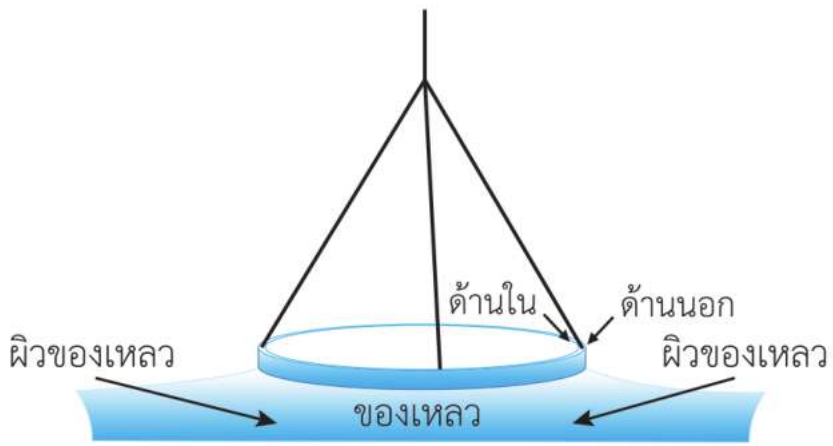
รูป จัดอุปกรณ์เพื่อศึกษาความตึงผิวของของเหลว

2. ใส่ชิ้นโลหะขนาดต่างๆ เพิ่มลงที่ห่วงสำหรับแขวนทีละอัน จนกระทั่งห่วงวงกลมเริ่มจะหลุดจากผิวน้ำ
3. ใช้หลักของโมเมนต์ หาแรงที่ทำให้วงกลมเกือบหลุดจากผิวน้ำ แรงนี้คือ แรงดึงผิว F ของน้ำ
4. คำนวณหาความตึงผิว γ ของน้ำจากอัตราส่วนระหว่างแรงดึงผิวกับความยาวทั้งหมดของเส้นผิวของน้ำที่ขาด หรือ $\frac{F}{\ell}$ (ℓ เป็นสองเท่าของความยาวเส้นรอบวงของห่วงวงกลม)
5. ทดลองข้อ 1-4 ซ้ำ แล้วหาความตึงผิวเฉลี่ย
6. เปลี่ยนของเหลวเป็นของเหลวอื่น เช่น น้ำเกลือ แล้วทดลองข้อ 1-5 ซ้ำ

คำถามท้ายกิจกรรม

- ☐ ขณะที่ห่วงวงกลมกำลังจะหลุดออกจากผิวของเหลว มีผิวของเหลวสัมผัสกับห่วงวงกลมกี่ด้านอย่างไร
- ☐ ความตึงผิวของของเหลวชนิดเดียวกัน มีค่าแตกต่างกันหรือไม่
- ☐ ความตึงผิวของของเหลวต่างชนิดกัน มีค่าแตกต่างกันหรือไม่

จากการทดลองพบว่าขณะที่ห่วงวงกลมกำลังจะหลุดออกจากผิวของเหลว ผิวของเหลวสัมผัสห่วงวงกลมขึ้นมาสองด้านคือด้านนอกวงกลมและด้านในวงกลม ดังรูป 17.10 ความตึงผิวของของเหลวชนิดเดียวกันมีค่าเท่ากัน และของเหลวต่างชนิดกันมีค่าต่างกัน



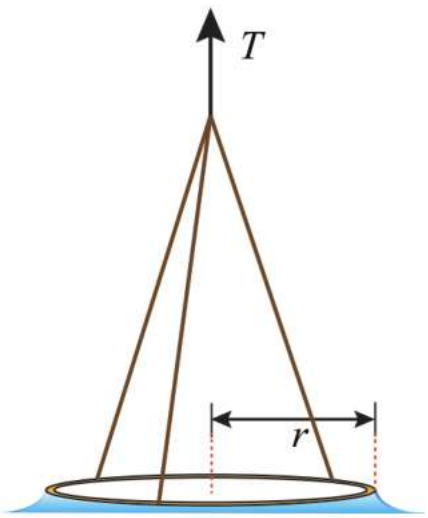
รูป 17.10 แสดงผิวของเหลวสัมผัสห่วงวงกลมขึ้นมาสองด้านคือด้านนอกวงกลมและด้านในวงกลม

ความตึงผิวของของเหลวแต่ละชนิดมีค่าไม่เท่ากันดังตาราง 17.2 แสดงความตึงผิวของของเหลวบางชนิด สำหรับของเหลวชนิดหนึ่งค่าความตึงผิวจะเปลี่ยนไปเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป เช่น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความตึงผิวของของเหลวจะลดลง เพราะที่อุณหภูมิสูงขึ้นโมเลกุลของของเหลวจะเคลื่อนที่เร็วขึ้น ทำให้แรงระหว่างโมเลกุลมีค่าน้อยลง

ตาราง 17.2 ความตึงผิวของของเหลวบางชนิด

ของเหลว	อุณหภูมิ (°C)	ความตึงผิว (N/m)
ปรอท	20	0.4650
น้ำ	0	0.0756
น้ำ	20	0.0728
น้ำ	100	0.0589
กลีเซอรีน	20	0.0631
เบนซิน	20	0.0289

ตัวอย่าง 17.3 วงแหวนบางมากผูกด้วยเชือกวางอยู่บนผิวของเหลวชนิดหนึ่ง วงแหวนนี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.0 เซนติเมตร และมีมวล 1.0 กรัม พบว่า ถ้าต้องการดึงวงแหวนให้หลุดออกจากผิวของเหลวพอดีดังรูป ต้องออกแรงดึงเชือก T เท่ากับ 3.3×10^{-2} นิวตัน หาความตึงผิวของของเหลวนี้ ให้แทนค่า π มีค่าประมาณเท่ากับ 3.14



รูป ประกอบตัวอย่าง 17.3

แนวคิด นอกจากแรง T แล้ววงแหวนบางยังมีแรงโน้มถ่วง mg และแรงดึงผิว F ที่ผิวของเหลวกระทำกับวงแหวนขณะหลุดออกจากผิวของเหลวพอดี โดยผิวของเหลวที่สัมผัสวงแหวนมีสองด้าน ขณะดึงวงแหวนให้หลุดออกจากผิวของเหลวพอดี แสดงว่าแรงลัพธ์เท่ากับศูนย์

วิธีทำ หาแรงดึงผิว F จาก

$$T = F + mg$$

$$F = T - mg$$

ความยาวผิวที่แรงดึงผิวกระทำกับวงแหวนมีสองด้าน มีค่าเท่ากับ $2 \times (2\pi r)$ จะหาความตึงผิวจาก

$$\gamma = \frac{F}{l}$$

จะได้

$$\gamma = \frac{F}{4\pi r}$$

$$\gamma = \frac{T - mg}{4\pi r}$$

แทนค่าในสมการเพื่อหาความตึงผิวจะได้

$$\gamma = \frac{T - mg}{4\pi r} = \frac{(3.3\times10^{-2}\,\text{N}) - (1.0\times10^{-3}\,\text{kg})(9.8\,\text{m/s}^2)}{4\times3.14\left(2.0\times10^{-2}\,\text{m}\right)} = 0.092\,\text{N/m}$$

ตอบ ความตึงผิวของของเหลว 0.092 นิวตันต่อเมตร

17.2.2 ความหนืดของของเหลว

เมื่อใช้ช้อนคนน้ำเปล่า น้ำเชื่อม นมข้นหวาน จะใช้แรงที่ต่างกัน การคนน้ำเปล่าจะออกแรงน้อยกว่าน้ำเชื่อมและนมข้นหวานตามลำดับ การออกแรงคนของเหลวรับรู้ว่ามีแรงต้านไม่เท่ากันเนื่องจากสาเหตุใด จะศึกษาได้จากกิจกรรมต่อไปนี้

กิจกรรม 17.4 ความหนืดของของเหลว

จุดประสงค์

สังเกตและอธิบายผลของความหนืดของของเหลว

วัสดุและอุปกรณ์

1. กระบอกใส ความสูงอย่างน้อย 50 เซนติเมตร	1 กระบอก
2. ลูกเหล็กกลม	1 ลูก
3. ของเหลวชนิดต่าง ๆ เช่นน้ำ น้ำมันพืช น้ำยาล้างจาน	1 แก้ว
4. นาฬิกาจับเวลา	1 เรือน

วิธีทำกิจกรรม

1. ใส่ของเหลวลงในกระบอกตวงให้ถึงขีดสูงสุดของขีดสเกลบอกปริมาตร
2. ปล่อยลูกเหล็กกลมจากผิวของเหลวลงในกระบอกตวง พร้อมทั้งสังเกตการเปลี่ยนแปลงอัตราเร็วของการจม และจับเวลาที่ลูกเหล็กเคลื่อนที่จากผิวของเหลวจนถึงก้นกระบอกตวง
3. เปลี่ยนเป็นของเหลวอื่น แล้วทำซ้ำข้อ 1 – 2

คำถามท้ายกิจกรรม

☐ อัตราเร็วการจมของลูกเหล็กกลมขณะที่จมในของเหลวชนิดหนึ่ง ๆ เปลี่ยนแปลงหรือไม่ อย่างไร

☐ เวลาที่ลูกเหล็กกลมเคลื่อนที่ในของเหลวต่างชนิดกัน ที่มีความลึกเท่ากัน แตกต่างกันหรือไม่

จากกิจกรรม 17.4 เมื่อปล่อยให้ลูกเหล็กกลมเคลื่อนที่ในของเหลวพบว่าอัตราเร็วเพิ่มขึ้นในช่วงแรกของการจม จนถึงระดับความลึกหนึ่ง ลูกเหล็กจะจมต่อไปด้วยอัตราเร็วสม่ำเสมอ และลูกเหล็กกลมจมในของเหลวต่างชนิดกันที่มีความลึกเท่ากันจะใช้เวลาต่างกัน

การที่ลูกเหล็กกลมเคลื่อนที่ในของเหลวต่างชนิดกันที่ระดับความลึกเท่ากันจะใช้เวลาต่างกัน เนื่องจากของเหลวมีสมบัติในการต้านการเคลื่อนที่ของวัตถุผ่านของเหลวนั้นต่างกันหรือต้านการไหลของของเหลวต่างกัน สมบัติการต้านดังกล่าว เรียกว่า **ความหนืด** (Viscosity) เมื่อวัตถุเคลื่อนที่ผ่านของเหลวที่มีความหนืดจะเกิดแรงต้านการเคลื่อนที่ เรียกว่า **แรงหนืด** (Viscous force) ของเหลวที่มีความหนืดมากกว่า จะมีแรงหนืดมากกว่า ทำให้วัตถุเคลื่อนที่ในของเหลวได้ช้ากว่าการเคลื่อนที่ผ่านของเหลวที่มีความหนืดน้อยกว่า

ของเหลวแต่ละชนิดมีความหนืดที่แตกต่างกัน ตัวอย่างดังตาราง 17.3

ตาราง 17.3 ความหนืดของของเหลวบางชนิด ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

ของเหลว	ความหนืด (10^{-3} Pa s)
กลีเซอรีน	1412
น้ำมันละหุ่ง	985
น้ำมันมะกอก	84
กรดซัลฟิวริก	22
เอทิลแอลกอฮอล์	1.192
น้ำ	1.005
เบนซิน	0.649

ความรู้เกี่ยวกับความหนืดนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่นการผลิตสารหล่อลื่น การวิเคราะห์การไหลของของเหลวในท่อ

ความรู้เพิ่มเติม ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น

ความรู้เกี่ยวกับความหนืดของของเหลวสามารถนำมาใช้ในการผลิตน้ำมันหล่อลื่นให้เหมาะสมกับเครื่องจักรกลชนิดต่าง ๆ ของเหลวที่มีความหนืดสูงซึ่งเคลื่อนตัวได้ช้าจะสามารถเกาะจับบนชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลได้ดี จึงเป็นตัวช่วยลดการกระแทกและการเสียดสีของชิ้นส่วนต่าง ๆ ได้ แต่จะมีแรงหนืดไปต้านการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนนั้นมากเช่นกันทำให้สูญเสียกำลังของเครื่องจักรกลไปบ้าง ดังนั้นการเลือกน้ำมันหล่อลื่นจึงต้องคำนึงถึงความหนืดที่เหมาะสมกับเครื่องจักรกลชนิดนั้น ๆ

คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 17.2

- ☐ แรงดึงผิวของของเหลวมีทิศทางใด
- ☐ ปล่อยลูกกลมเหล็กขนาดเท่ากันในของเหลวต่างชนิดกัน ที่มีความลึกเท่ากัน ปรากฏว่าใช้เวลาตกถึงก้นภาชนะต่างกัน สมบัติใดของของเหลวที่อธิบายปรากฏการณ์นี้ และอธิบายได้อย่างไร

แบบฝึกหัด 17.2

1. หลอดดูดน้ำเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.7 เซนติเมตร เมื่อจุ่มที่ผิวน้ำแล้วดึงขึ้นเป็นฟิล์มบางจนเกือบขาดความตึงผิวน้ำ เท่ากับ 0.0728 นิวตันต่อเมตร แรงดึงผิวมีค่าเป็นเท่าใด

17.3 ของไหลสถิต

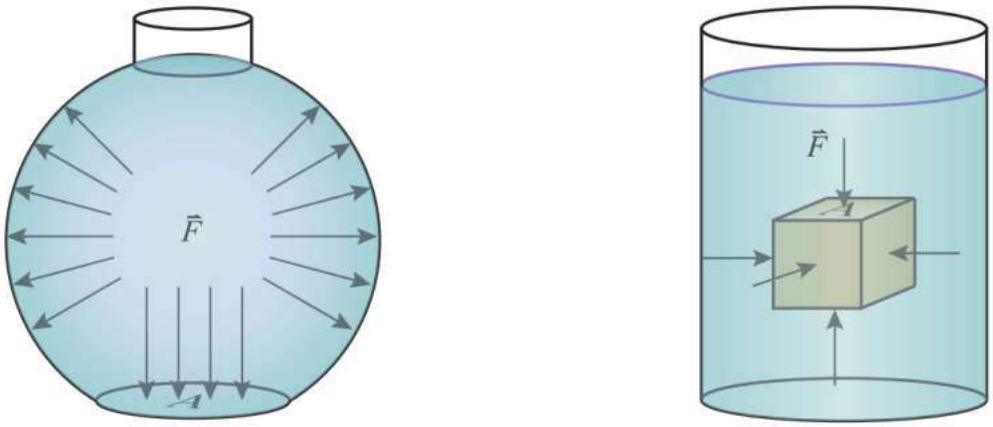
ของไหล (fluid) เป็นสสารที่สามารถไหลจากที่หนึ่งไปอีกที่หนึ่งได้ โดยสสารที่จัดเป็นของไหล ได้แก่ ของเหลวและแก๊ส ของไหลที่อยู่นิ่งหรือของไหลสถิต จะมีสมบัติต่าง ๆ สำหรับความดันในของไหลที่อยู่นิ่งจะได้ศึกษาต่อไปนี้

17.3.1 ความดันในของไหล

ถ้านำขวดน้ำพลาสติกมาเจาะรูให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 มิลลิเมตร หลาย ๆ รู ณ ตำแหน่งต่าง ๆ กัน รอบขวด แล้วใส่น้ำจนเต็มขวด สังเกตการพุ่งของน้ำจากรู ดังรูป 17.11

รูป 17.11 ลักษณะของน้ำที่พุ่งออกจากรูที่เจาะ ณ ตำแหน่งต่างๆบนขวดพลาสติก

การที่น้ำพุ่งออกจากรู แสดงว่า มีแรงกระทำต่อน้ำ แรงนี้ดันให้น้ำออกมาในทิศทางตั้งฉากกับผนังภาชนะผ่านรูที่เจาะ ไม่ว่าผนังจะอยู่ในแนวใด ถ้าปิดรูแรงกระทำนี้ก็ยังมีอยู่ และจะกระทำต่อผนังภาชนะและวัตถุทุกส่วนที่สัมผัสของเหลวและแรงมีทิศทางตั้งฉากกับผนังส่วนนั้น ๆ ดังรูป 17.12



ก. แรงที่ของเหลวกระทำต่อผนังภาชนะ ข. แรงที่ของเหลวกระทำต่อวัตถุที่จม

รูป 17.12 ทิศทางของแรงที่ของเหลวกระทำต่อผนังภาชนะและต่อวัตถุที่จมในของเหลว

พิจารณาแรงที่ของเหลวกระทำกับผิวภาชนะหรือผิววัตถุที่จมในทุกทิศทางดังรูปที่ 17.12 ซึ่งขนาดของแรงที่ของเหลวกระทำตั้งฉากต่อพื้นที่หนึ่งหน่วย เรียกว่า **ความดัน** (pressure) สำหรับความดันที่เกิดจากแรงคงตัวตลอดพื้นที่ที่พิจารณา เช่น แรงกระทำ F ที่ก้นภาชนะหรือผิวบนของวัตถุพื้นที่ A ดังรูป17.12ก และ 17.12ข ตามลำดับ ซึ่งหาความดัน P ได้จาก

$$P = \frac{F}{A} \quad \text{หรือ} \quad F = PA \tag{17.5}$$

ในกรณีที่แรงไม่คงตัว จะต้องพิจารณาในบริเวณที่เล็กพอจนถือได้ว่าเป็นแรงคงตัว

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

ความดันในของไหลขึ้นกับความลึก

คนที่เคยดำน้ำลงไปลึก ๆ จะพบว่ารู้สึกปวดแก้วหู ถ้าดำน้ำยิ่งลึกมากขึ้น ก็จะยิ่งปวดแก้วหูมากขึ้น แสดงว่าความดันของน้ำทำให้ปวดแก้วหู ซึ่งความดันของน้ำมีความสัมพันธ์กับความลึกของน้ำอย่างไร และขึ้นกับปริมาณใดบ้าง ศึกษาได้จากกิจกรรมต่อไปนี้

กิจกรรม 17.5 ความดันในของเหลว

จุดประสงค์

1) อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความดันและความลึกในของเหลว เมื่อความหนาแน่นของของเหลวมีค่าคงตัว
2) อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความดันและความหนาแน่นของของเหลวเมื่อความลึกมีค่าคงตัว

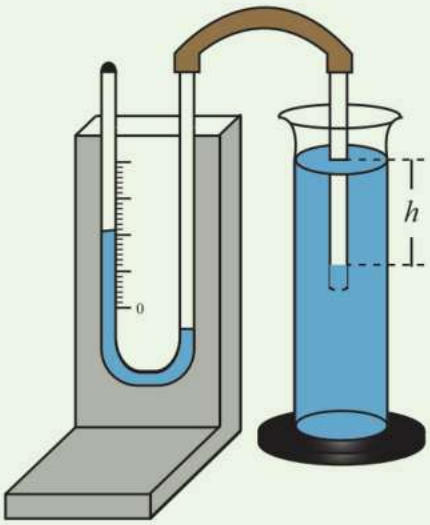
วัสดุและอุปกรณ์

1. แมนอมิเตอร์	1 เครื่อง
2. กระบอกตวง	3 อัน
3. ของเหลวที่มีค่าความหนาแน่นต่างกัน ได้แก่ น้ำ น้ำเกลือ กลีเซอรอล	1 แก้ว
4. ไม้บรรทัด	1 อัน

วิธีทำกิจกรรม

ตอนที่ 1

1. เติมน้ำลงในหลอดแก้วรูปตัวยูของแมนอมิเตอร์ให้พอดีกับสเกลศูนย์แล้วต่อสายยางกับหลอดแก้ววัดความดัน ดังรูป
2. เติมน้ำลงในกระบอกตวงให้มีระดับเท่ากับสเกลสูงสุดของกระบอกตวง และกำหนดให้ตำแหน่งผิวน้ำเป็นความลึก $h = 0$
3. จุ่มหลอดแก้ววัดความดันของแมนอมิเตอร์ลงในกระบอกตวงที่มีน้ำโดยให้ผิวของเหลวในหลอดแก้ววัดความดันอยู่ลึกจากผิวน้ำในกระบอกตวงเป็นระยะ h ต่าง ๆ (บันทึกความลึก h และความดัน P ที่อ่านได้จากแมนอมิเตอร์)
4. เขียนกราฟระหว่างความดัน P และความลึก h ในของเหลว โดยให้แกนตั้งเป็น P และแกนนอนเป็น h



รูป การวัดความดันในของเหลวโดยใช้แมนอมิเตอร์

ตอนที่ 2

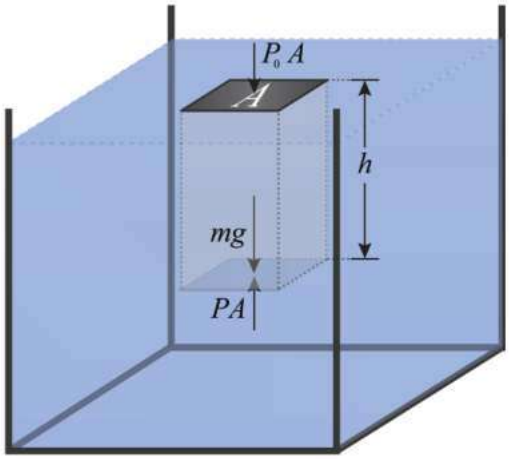
1. วัดความดันเมื่อของเหลวในกระบอกตวงเป็นน้ำ น้ำเกลือ และกลีเซอรอลที่ระดับความลึก h เท่ากัน บันทึกความดันที่อ่านได้จากของเหลวแต่ละชนิด
2. เขียนกราฟระหว่างความดัน P และความหนาแน่น ρ โดยให้ P เป็นแกนตั้ง ρ เป็นแกนนอน

คำถามท้ายกิจกรรม

- ☐ กราฟที่ได้จากตอนที่ 1 ความดัน P และความลึก h มีความสัมพันธ์หรือไม่ อย่างไร
- ☐ กราฟที่ได้จากตอนที่ 2 ความดัน P และความหนาแน่น ρ มีความสัมพันธ์หรือไม่ อย่างไร

จากกิจกรรม พบว่าความดันในของเหลว P แปรผันตรงกับความลึก h และความหนาแน่นของของเหลว ρ เราสามารถหาความสัมพันธ์ของปริมาณดังกล่าวได้ดังนี้

พิจารณาภาชนะที่ใส่ของเหลวความหนาแน่น ρ โดยให้ของเหลวมีความหนาแน่นคงที่ไม่ขึ้นกับความลึก ถ้าของเหลวนั้นอยู่นิ่งในภาชนะทุกส่วนของของเหลวจะต้องอยู่ในสมดุลสถิต เมื่อพิจารณาส่วนของของเหลวรูปแท่งขนาดสม่ำเสมอ พื้นที่หน้าตัด A ด้านล่างมีความลึกจากผิว h ดังรูป 17.13



รูป 17.13 แสดงแรงกระทำกับส่วนของของเหลวที่มีความสูง h และพื้นที่หน้าตัด A

โดยให้ที่ผิวของเหลวมีความดันเท่ากับความดันอากาศ P_0 และส่วนที่ลึกจากผิว h มีความดันในของเหลว P พิจารณาในแนวดิ่งพบว่าส่วนของของเหลวนี้ ถูกแรงภายนอก 3 แรงกระทำ ได้แก่ แรงจากความดันของอากาศด้านบน ($P_0 A$) น้ำหนักส่วนของของเหลวนี้ (mg) และแรงจากความดันของของเหลวด้านล่าง(PA) ส่วนของของเหลวนี้อยู่ในสมดุลสถิต จะได้ว่า

$$\sum F = 0$$

$$PA - P_0 A - mg = 0$$

แทนค่า $m = \rho V = \rho Ah$

$$PA - P_0 A - \rho Ahg = 0$$

$$P = P_0 + \rho gh \qquad (17.6)$$

จากสมการ 17.6 ความดันอากาศ P_0 เรียกว่า **ความดันบรรยากาศ** (Atmosphere pressure) และความดันในของเหลว P เรียกว่า **ความดันสัมบูรณ์** (Absolute pressure) โดยผลต่างของความดันสัมบูรณ์กับความดันบรรยากาศ ($P - P_0$) เรียกว่า **ความดันเกจ** (Gauge pressure : P_g) ซึ่งเป็นความดันที่เครื่องมือวัดได้ ดังนั้นความดันเกจของของเหลวหาได้จาก

$$P_g = \rho gh \qquad (17.7)$$

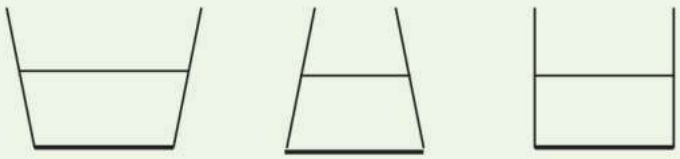
จากความสัมพันธ์ข้างต้นจะเขียนความดันสัมบูรณ์ได้เป็น

$$P = P_0 + P_g \qquad (17.8)$$

ชวนคิด

ถ้าเขียนกราฟระหว่างความดันสัมบูรณ์ของของเหลวกับความลึก จะมีลักษณะอย่างไร และกราฟตัดแกนตั้งหมายถึงอะไร

ภาชนะทั้งสามมีระดับน้ำสูงเท่ากันและพื้นที่ก้นภาชนะเท่ากัน ดังรูป จงตอบคำถามต่อไปนี้



ก. แรงที่น้ำกระทำต่อก้นภาชนะทั้งสาม เนื่องจากความดันของน้ำเท่ากันหรือไม่

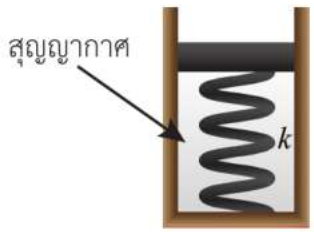
ข. น้ำในภาชนะทั้งสาม เมื่อนำไปชั่ง จะมีน้ำหนักเท่ากันหรือไม่

ค. เหตุใดคำตอบที่ได้ในข้อ ก.และ ข.จึงต่างกัน

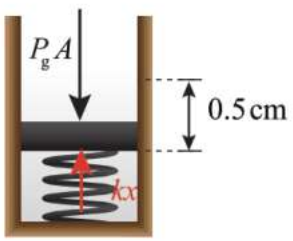
โดยทั่วไป P_0 และ g ในสมการ (17.6) เป็นค่าคงตัว ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า **ในของเหลวชนิดเดียวกันที่ระดับความลึกเดียวกันหรือเท่ากัน จะมีความดันสัมบูรณ์เท่ากัน และมีความดันเกจเท่ากัน โดยไม่ขึ้นกับรูปทรงของของเหลวในภาชนะที่บรรจุ**

โดยปกติร่างกายจะสร้างความดันภายในให้เท่ากับความดันบรรยากาศรอบ ๆ ทำให้เรามักจะไม่รู้สึกกับผลจากความดันของบรรยากาศ เนื่องจากเราคุ้นเคยกับแรงจากความดันนี้ ซึ่งกระทำต่อร่างกายทุกทิศทางมาตั้งแต่เกิด แต่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความดันรอบตัวเรา เช่น ขณะนั่งรถขึ้นหรือลงภูเขา ร่างกายจะรู้สึกต่อผลจากความดันที่แตกต่างไปในทำนองเดียวกัน คนที่ดำลงไปในน้ำลึกหรือขึ้นจากน้ำลึกอย่างรวดเร็วจะทำให้ ความดันที่กระทำต่อร่างกายเปลี่ยนแปลงเร็วมาก ซึ่งเป็นผลจากความดันเกจเพียงอย่างเดียวทำให้เจ็บปวดที่เยื่อแก้วหูหรือฉีกขาดได้

ตัวอย่าง 17.4 เครื่องวัดความดันในของเหลวทำมาจากกระบอกสูบที่มีลูกสูบเป็นสปริงที่มีค่าคงตัว 1250 นิวตันต่อเมตร ดังรูป ลูกสูบมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 เซนติเมตร เมื่อนำเครื่องวัดจมลงถึงก้นบ่อ พบว่าลูกสูบถูกดันเข้าไป 0.5 เซนติเมตร จงหาความลึกของบ่อ ให้แทนค่า π มีค่าประมาณเท่ากับ 3.14



แนวคิด แรงที่น้ำดันลูกสูบเครื่องวัดให้เคลื่อนเข้าไปจากเดิมเกิดจากความดันเกจของน้ำที่ก้นบ่อมีค่าเท่ากับ P_gA และความดันเกจของน้ำที่ก้นบ่อมีค่าเท่ากับ ρgh สปริงยุบตัวเท่ากับระยะลูกสูบถูกดันเข้าไป และแรงที่ดันลูกสูบเท่ากับแรงในสปริงเท่ากับ kx เขียนภาพแสดงแรงกระทำได้ ดังรูป



วิธีทำ แรงที่ดันลูกสูบเกิดจากความดันเกจของน้ำและเท่ากับแรงในสปริง ดังนั้น

$$P_gA = kx$$

จากความดันเกจของน้ำก้นบ่อเท่ากับ ρgh จะได้

แรงที่น้ำดันลูกสูบเท่ากับแรงของสปริง

$$\rho ghA = kx$$

ดังนั้นความลึกของบ่อ

$$h = \frac{kx}{\rho gA} = \frac{(1250\,\text{N/m})\,(5.0\times10^{-3}\,\text{m})}{(1000\,\text{kg/m}^3)\,(9.8\,\text{m/s}^2)\left[\pi\,(1.0\times10^{-2}\,\text{m})^2\right]}$$

$$= 2.0\,\text{m}$$

ตอบ ความลึกของบ่อเท่ากับ 2.0 เมตร

ชวนคิด

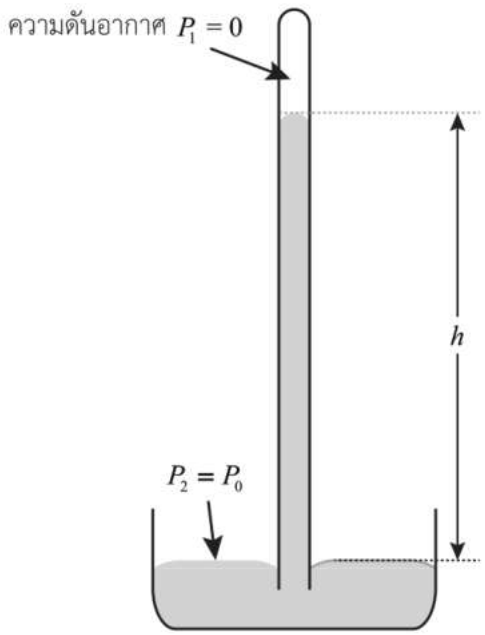
ทำไมเมื่อนำถุงขนมขึ้นไปบนยอดเขา ถุงขนมจึงพองขึ้น แล้วถ้านำถุงขนมติดตัวไปดำน้ำใต้ทะเลลึก ถุงขนมจะเป็นอย่างไร

17.3.2 อุปกรณ์ที่ใช้วัดความดัน

เครื่องวัดความดันมีหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้งาน เช่น เครื่องวัดความดันบรรยากาศ เรียกว่า บารอมิเตอร์ (Barometer) และเครื่องวัดความดันเกจอย่างง่าย เรียกว่า แมนอมิเตอร์ (Manometer) ซึ่งมีหลักการทำงานดังต่อไปนี้

บารอมิเตอร์

บารอมิเตอร์ประดิษฐ์ขึ้นครั้งแรกโดย เอวันเจลิสตา ตอร์รีเชลลี (Evangelista Torricelli) นักฟิสิกส์และคณิตศาสตร์ชาวอิตาลีในปี ค.ศ. 1644 ประกอบด้วยหลอดแก้วยาวขนาดเล็กปลายด้านหนึ่งปิดสนิท บรรจุปรอทเต็มแล้วนำไปคว่ำในอ่างปรอท โดยไม่ให้อากาศเข้าไปภายในหลอดได้ มีลักษณะดังรูปที่ 17.14



รูป 17.14 บารอมิเตอร์แบบปรอท

ความดันอากาศที่ผิวปรอทในอ่างเท่ากับความดันบรรยากาศ (P_0) ส่วนความดันในที่ว่างเหนือลำปรอทในหลอดแก้ว ถือว่ามีความดันน้อยมาก ประมาณได้ว่าความดัน P_1 เท่ากับศูนย์ เมื่อใช้บารอมิเตอร์นี้ที่ระดับน้ำทะเลพบว่าลำปรอทขึ้นไปในหลอดแก้วได้สูงจากผิวปรอทในอ่าง 76 เซนติเมตร ความดันที่ผิวปรอทในอ่างเท่ากับความดันของปรอทในหลอดแก้วที่ระดับเดียวกันซึ่งลึกจากผิวปรอทในหลอดแก้ว h จะได้

$$\begin{aligned} P_0 &= 0 + \rho gh \\ &= \rho gh \end{aligned}$$

ปรอทมีความหนาแน่น $\rho = 13.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ที่อุณหภูมิห้อง ดังนั้นหาความดันบรรยากาศที่ระดับน้ำทะเล ได้เท่ากับ

$$\begin{aligned} P_0 &= (13.6\times10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})(9.8\frac{\text{m}}{\text{s}^2})(76\times10^{-2}\text{m}) \\ &= 1.013\times10^5 \frac{\text{kgm}}{\text{m}^2\text{s}^2} \\ &= 1.013\times10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \\ &= 1.013\times10^5 \text{ Pa} \end{aligned}$$

ความรู้เพิ่มเติม

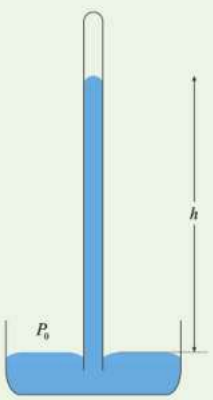
ความดันยังนิยมใช้หน่วยอื่นตามลักษณะของงาน เช่น บรรยากาศ (atm) มิลลิเมตรปรอท (mmHg) โดย

$$1.013\times10^{5}\ \text{Pa} = 1\ \text{atm} = 760\ \text{mmHg}$$

atm (atmospheric pressure) คือ หน่วยที่มีความดันเทียบกับความดันบรรยากาศ โดย 1 atm จะมีความดันเท่ากับ 1 บรรยากาศที่ระดับน้ำทะเล และความดันมีหน่วยเป็นมิลลิเมตรปรอท ได้จากการอ่านค่าความสูงของปรอทจากบารอมิเตอร์ปรอท

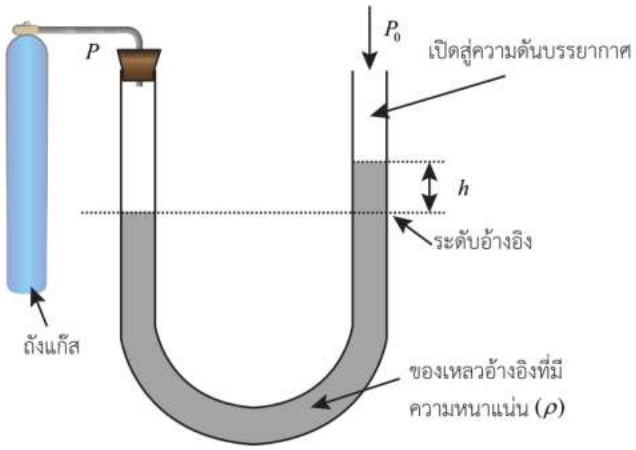
ชวนคิด

ถ้าต้องการสร้างบารอมิเตอร์โดยใช้น้ำแทนปรอท สำหรับวัดความดันบรรยากาศที่ระดับน้ำทะเล หลอดแก้วควรยาวอย่างน้อยเท่าใด และความสูงของน้ำในหลอดแก้วจะเป็นเท่าใด

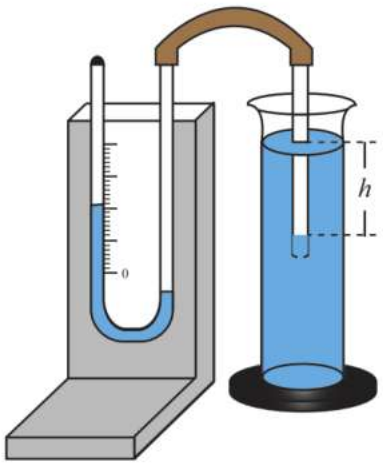


แมนอมิเตอร์

แมนอมิเตอร์เป็นเครื่องมือวัดความดันเกจอย่างง่ายมีลักษณะ ดังรูป 17.15 ก. ประกอบด้วยหลอดแก้วรูปตัวยูซึ่งบรรจุของเหลวที่ทราบความหนาแน่น ρ (ส่วนใหญ่ใช้ปรอท) ปลายด้านหนึ่งเปิดสู่อากาศและปลายอีกด้านต่อเข้ากับท่อสำหรับใช้วัดความดัน โดยนำปลายท่อที่ใช้วัดความดันต่อกับถังแก๊สหรือจุ่มลงในของเหลวตรงตำแหน่งที่ต้องการวัดความดันจะทำให้ของเหลวในหลอดแก้วรูปตัวยูด้านที่เปิดสู่บรรยากาศขยับสูงขึ้นกว่าอีกด้านหนึ่ง ดังรูป 17.15 ข. ค่าความดันเกจที่วัดได้ใช้ผลต่างความสูงของเหลวในหลอดแก้วรูปตัวยูในการคำนวณ



ก. แมนอมิเตอร์วัดความดันแก๊ส



ข. แมนอมิเตอร์วัดความดันของของเหลว

รูป 17.15 แมนอมิเตอร์

จากรูปที่ 17.15 ข. ระดับของเหลวในท่อด้านเปิดสู่อากาศสูงกว่าในท่อด้านที่ใช้วัดความดันเป็นระยะ h จะได้ความดันเกจที่วัดจากผลต่างความสูงของเหลวในหลอดแก้วรูปตัวยู ตามสมการ

$$P - P_0 = \rho g h$$

นั่นคือความดันเกจที่วัดได้ $$P_g = \rho g h$$

ตัวอย่าง 17.5 ในการวัดความดัน P ของแก๊ส ใช้หลอดรูปตัวยูบรรจุปรอทที่มีความหนาแน่น 13.6×10^3 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ปรอทในหลอดแก้วรูปตัวยูฝั่งขวาสูงกว่าฝั่งซ้าย 20.5 เซนติเมตร ความดันเกจและความดันสัมบูรณ์ของแก๊สเป็นเท่าใด

กำหนดให้ ความดันบรรยากาศ 1.013×10^5 นิวตันต่อตารางเมตร

แนวคิด ความดันเกจของแก๊สหาจากผลต่างความสูงของปรอทในหลอดรูปตัวยู ตามสมการ $P_g = \rho gh$ และความดันสัมบูรณ์ของแก๊สหาจากผลรวมของความดันบรรยากาศกับความดันเกจ

วิธีทำ ความดันเกจของแก๊สมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} P_g &= \rho gh \\ &= \left(13.6\times10^3\ \text{kg/m}^3\right)\left(9.8\,\text{m/s}^2\right)\left(20.5\times10^{-2}\,\text{m}\right) \\ &= 2.73\times10^4\ \text{N/m}^2 \end{aligned}$$

ดังนั้น ความดันสัมบูรณ์ของแก๊ส มีค่าดังนี้

$$\begin{aligned} P &= P_0 + P_g \\ &= \left(1.013\times10^5\ \text{N/m}^2\right) + \left(0.273\times10^5\ \text{N/m}^2\right) \\ &= 1.286\times10^5\ \text{Pa} \\ P &= 1.29\times10^5\ \text{Pa} \end{aligned}$$

ตอบ ความดันเกจของแก๊สเท่ากับ 0.273×10^5 พาสคัล และ

ความดันสัมบูรณ์ของแก๊สเท่ากับ 1.29×10^5 พาสคัล

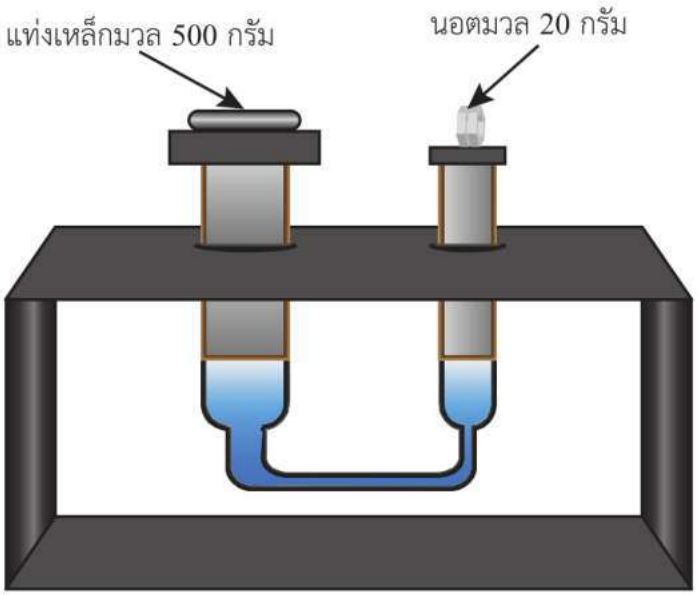
ชวนคิด

เพราะเหตุใดเมื่อเราใช้หลอดดูดของเหลว จึงทำให้ของเหลวไหลเข้าปากได้

กฎของพาสคัล

เราได้ศึกษาแล้วว่า ความดันในของเหลวที่อยู่นิ่งในภาชนะเปิด เกิดจากน้ำหนักของของเหลวและความดันบรรยากาศเหนือผิวของเหลว แต่ถ้ามีแรงภายนอกมากระทำต่อของเหลวที่อยู่นิ่งในภาชนะปิด ความดันในของเหลวจะเป็นอย่างไร ศึกษาได้ต่อไปนี้

จากชุดศึกษากฎของพาสคัล ดังรูป 17.16 เริ่มต้นลูกสูบเล็กและลูกสูบใหญ่อยู่ในสมดุลโดยมีระดับของเหลวทั้งสองลูกสูบเท่ากัน เมื่อวางแท่งเหล็กมวล 500 กรัม บนลูกสูบใหญ่ ทำให้ลูกสูบใหญ่เคลื่อนที่ลง ในขณะที่ลูกสูบเล็กเคลื่อนที่ขึ้น แต่ถ้าวางนอตมวล 20 กรัม ทีละตัวลงบนลูกสูบเล็ก ทำให้ลูกสูบเล็กเคลื่อนที่ลง ในขณะที่ลูกสูบใหญ่เคลื่อนที่ขึ้น จนกระทั่งทำให้ลูกสูบทั้งสองอยู่ในสมดุล และมีระดับของเหลวเท่ากันเหมือนเดิมได้ พบว่าน้ำหนักรวมของนอตบนลูกสูบเล็กมีค่าน้อยกว่าน้ำหนักรวมของแท่งเหล็กมาก



รูป 17.16 ชุดศึกษากฎของพาสคัล

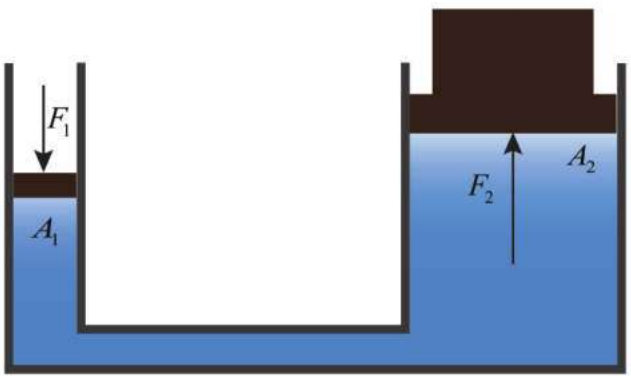
จากสถานการณ์ข้างต้น เมื่อหาอัตราส่วนระหว่างแรงกดกับพื้นที่หน้าตัดของลูกสูบแต่ละอัน จะพบว่าอัตราส่วนดังกล่าวมีค่าเท่ากัน กล่าวคือ การเพิ่มความดันที่ลูกสูบหนึ่งจะทำให้ความดันที่อีกลูกสูบหนึ่งเพิ่มขึ้นเท่ากัน ซึ่งเป็นหลักการที่ค้นพบโดย พาสคัล มีใจความว่า **เมื่อเพิ่มความดันให้ของเหลวที่อยู่นิ่งในภาชนะปิด ความดันที่เพิ่มขึ้นจะส่งผ่านไปทุก ๆ จุดในของเหลวนั้น หลักการนี้เรียกว่า กฎพาสคัล** (Pascal's law)

ความรู้เพิ่มเติม

แบลส์ ปาสกาล (**Blaise Pascal** ค.ศ. 1623 - 1662 หรือ พ.ศ. 2166 - 2205) นักคณิตศาสตร์และฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศส เขาได้เขียนบทความเรื่องการเกิดเสียงจากวัตถุที่สั่นสะเทือน เมื่ออายุได้ 11 ปี และ เขาได้ตั้งทฤษฎีทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับรูปหกเหลี่ยมในวงกลมเมื่ออายุได้ 16 ปี นอกจากนี้ผลงานการค้นพบทางฟิสิกส์ที่สำคัญ ได้แก่ กฎของพาสคัล การประดิษฐ์บารอมิเตอร์และเครื่องอัดไฮดรอลิก

รูป ปาสกาล

การทำงานของเครื่องอัดไฮดรอลิกอย่างง่ายซึ่งใช้เป็นเครื่องกลช่วยผ่อนแรงแบบหนึ่ง ประกอบด้วย ลูกสูบเล็กและลูกสูบใหญ่บรรจุของไหลที่อัดตัวไม่ได้ อย่างเช่น น้ำมันหรือน้ำ เพื่อเป็นตัวส่งผ่านแรงจากตำแหน่งหนึ่งไปยังตำแหน่งอื่นในของไหล ซึ่งทำงานภายใต้กฎของพาสคัล ดังรูป 17.17



รูป 17.17 การทำงานของเครื่องอัดไฮดรอลิกอธิบายได้ด้วยกฎของพาสคัล

ในรูปแสดงการออกแรง F_1 กระทำกับลูกสูบเล็กที่มีพื้นที่หน้าตัด A_1 ทำให้มีความดันเพิ่มขึ้น P_1 ส่งผลให้เกิดแรงส่งผ่านในของเหลวไปยังลูกสูบใหญ่ เกิดแรง F_2 ที่ลูกสูบใหญ่พื้นที่หน้าตัด A_2 และมีความดันเพิ่มขึ้น P_2 โดยลูกสูบใหญ่สามารถยกวัตถุหนัก W ที่มีขนาดเท่ากับ F_2 ขณะระบบลูกสูบสมดุล จากกฎของพาสคัล

ความดันที่เพิ่มขึ้นที่ลูกสูบทั้งสองด้านเท่ากัน $P_1 = P_2$

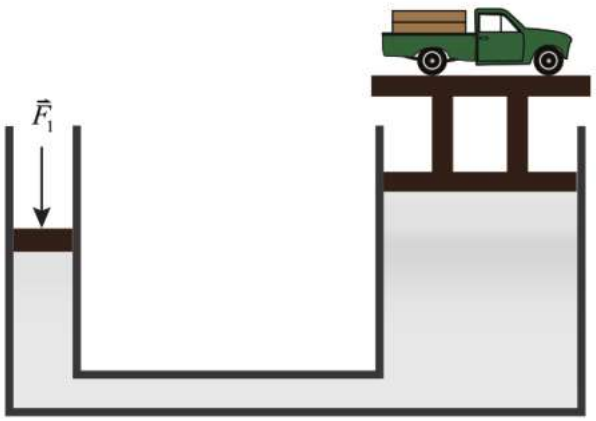
$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} \tag{17.9}$$

และ

$$F_2 = \frac{F_1}{A_1} A_2$$

จากรูปเห็นว่า $A_2 > A_1$ ดังนั้น แรง F_2 มีขนาดมากกว่า F_1 ทั้งนี้ไม่พิจารณาแรงเสียดทานหรือแรงต้านในระบบ เครื่องอัดไฮดรอลิกจึงเป็นเครื่องกลที่ช่วยผ่อนแรงที่นิยมนำมาใช้ในการยกของหนัก เช่น แม่แรงยกรถ เก้าอี้ทำฟัน รถเครน เป็นต้น

ตัวอย่าง 17.6 เครื่องยกไฮดรอลิกอย่างง่ายในศูนย์บริการรถยนต์แห่งหนึ่ง ลูกสูบใหญ่มีพื้นที่หน้าตัด 500 ตารางเซนติเมตร และลูกสูบเล็กมีพื้นที่หน้าตัด 2.00 ตารางเซนติเมตร ถ้าต้องการยกรถยนต์ที่มีน้ำหนัก 12 กิโลนิวตัน ต้องออกแรงที่ลูกสูบเล็กเท่าใดจึงสามารถยกรถได้



แนวคิด ใช้กฎพาสคัลหาแรงที่ลูกสูบเล็ก

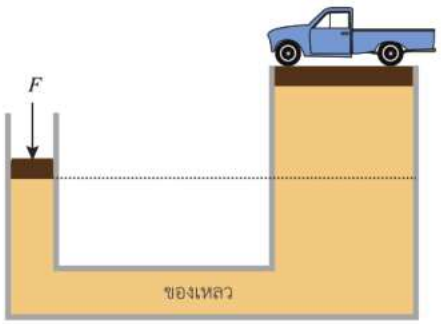
วิธีทำ จากกฎของพาสคัล ความดันเพิ่มขึ้นที่ลูกสูบทั้งสอง

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$$

$$F_1 = \frac{F_2}{A_2} A_1 = \frac{(12000\,\text{N})}{(500\,\text{cm}^2)}\left(2.00\,\text{cm}^2\right) = 48.0\,\text{N}$$

ตอบ ต้องออกแรงที่ลูกสูบเล็ก 48.0 นิวตัน

ตัวอย่าง 17.7 ลูกสูบบรรจุของเหลวเป็นระบบปิดที่ไม่มีแรงเสียดทาน ลูกสูบใหญ่มีพื้นที่หน้าตัด 1000 เท่าของลูกสูบเล็ก ด้านลูกสูบใหญ่มีรถกระบะจอดอยู่ ขณะสมดุลอยู่ได้ดังรูป หากวางวัตถุมวล 2000 กิโลกรัม ลงบนรถกระบะ ต้องออกแรงที่ลูกสูบเล็กเพิ่มอีกกี่นิวตัน ระบบลูกสูบนี้จึงจะสมดุลอยู่ที่ตำแหน่งเดิม ให้แทนค่า g มีค่าประมาณเท่ากับ 9.8 เมตรต่อวินาที^{2}



แนวคิด ให้ลูกสูบเล็กมีพื้นที่ a ลูกสูบใหญ่จะมีพื้นที่ 1000 a และหาความดันที่เพิ่มขึ้นที่ลูกสูบเท่ากับแรงที่เพิ่มขึ้นต่อพื้นที่ของลูกสูบ และหาแรงที่เพิ่มขึ้นที่ลูกสูบเล็กจากกฎของพาสคัล

วิธีทำ ให้ ΔF เป็นแรงที่ต้องเพิ่มขึ้นที่ลูกสูบเล็ก เมื่อเพิ่มน้ำหนักที่ลูกสูบใหญ่เท่ากับ mg ระบบจึงสมดุล จะได้

ความดันที่เพิ่มด้านลูกสูบเล็ก $\Delta P_{\text{ลูกสูบเล็ก}} = \dfrac{\Delta F}{a}$

ความดันที่เพิ่มด้านลูกสูบใหญ่ $\Delta P_{\text{ลูกสูบใหญ่}} = \dfrac{mg}{A}$

จากกฎพาสคัลจะได้ $\Delta P_1 = \Delta P_2$

$$\frac{\Delta F}{a} = \frac{2000\text{g}}{A} = \frac{2000\text{g}}{1000\text{a}}$$

$$\Delta F = 2\text{g} = 2 \times 9.8 \text{ N}$$

$$= 19.6 \text{ N}$$

ตอบ ต้องออกแรงที่ลูกสูบเล็กเพิ่มขึ้นอีก 19.6 นิวตัน

17.3.3 แรงพยุงจากของไหล

เมื่อปล่อยให้ลูกมะพร้าวตกลงในน้ำ ลูกมะพร้าวลอยน้ำได้ เรือลอยอยู่ในน้ำได้ทั้งที่ทำด้วยเหล็ก ปรากฏการณ์เหล่านี้เกิดจากแรงของน้ำกระทำวัตถุดังกล่าวให้ลอยอยู่ได้ แรงที่ของไหลกระทำต่อวัตถุที่อยู่ในของไหลนั้น เรียกว่า **แรงพยุง** (buoyant force) F_B แรงพยุงมีความสัมพันธ์กับสิ่งใด สามารถหาได้อย่างไร ศึกษาได้จากกิจกรรม 17.6

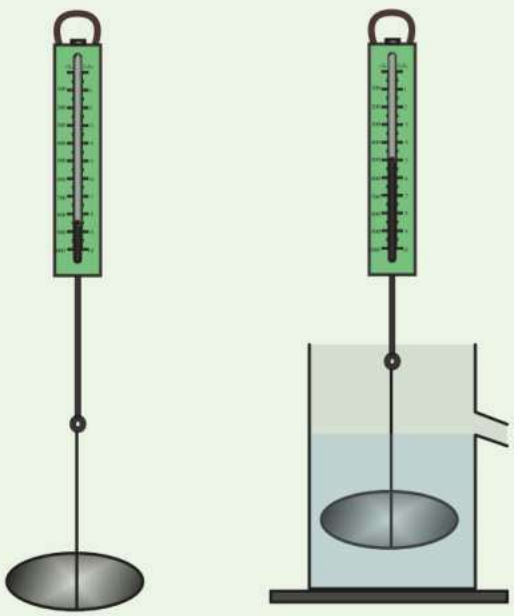
กิจกรรม 17.6 แรงพยุง

จุดประสงค์

เพื่อศึกษาแรงพยุงที่กระทำต่อวัตถุที่อยู่ในของเหลว

วัสดุและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่งสปริง	1 เครื่อง
2. วัตถุที่ไม่ละลายน้ำ	1 ชิ้น
3. ถ้วยยูเรกา	1 แก้ว
4. บีกเกอร์หรือกระบอกตวง	1 อัน
5. เครื่องชั่งน้ำหนัก	1 เครื่อง



รูป การชั่งน้ำหนักวัตถุในอากาศและในน้ำโดยใช้เครื่องชั่งสปริง

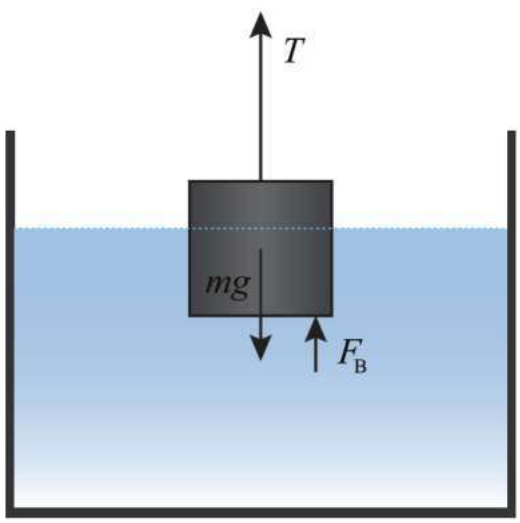
วิธีทำกิจกรรม

1. ชั่งน้ำหนักวัตถุในอากาศด้วยเครื่องชั่งสปริง บันทึกผล
2. ชั่งน้ำหนักขณะวัตถุจมอยู่ในน้ำที่บรรจุในถ้วยยูเรกาที่มีน้ำถึงขอบถ้วย บันทึกผล
3. นำน้ำที่ล้นออกมาไปหาปริมาตรด้วยกระบอกตวง และชั่งน้ำหนักของน้ำที่ล้นออกมา บันทึกผล
4. หาน้ำหนักของวัตถุที่หายไปเมื่อชั่งในน้ำ โดยนำน้ำหนักของวัตถุที่ชั่งในอากาศลบด้วยน้ำหนักของวัตถุที่ชั่งในน้ำ

คำถามท้ายกิจกรรม

- ☐ น้ำหนักวัตถุในอากาศและน้ำหนักวัตถุในน้ำเท่ากันหรือไม่ อย่างไร
- ☐ น้ำหนักของน้ำที่ล้นออกมาเท่ากับน้ำหนักวัตถุที่หายไปหรือไม่

จากการทดลองพบว่า น้ำหนักวัตถุที่ชั่งในอากาศไม่เท่ากับน้ำหนักวัตถุที่ชั่งในน้ำ โดยที่น้ำหนักวัตถุที่ชั่งในอากาศมากกว่าน้ำหนักวัตถุที่ชั่งในน้ำและน้ำหนักน้ำที่ล้นออกมาเท่ากับน้ำหนักวัตถุที่หายไปเมื่อชั่งในน้ำ แสดงว่าขณะวัตถุจมในน้ำมีแรงที่น้ำกระทำต่อวัตถุในทิศขึ้น แรงนี้คือ แรงพยุงของน้ำ นั่นคือ เมื่อชั่งน้ำหนักวัตถุที่จมในของเหลว มีแรงที่กระทำต่อวัตถุแสดงดังรูป 17.18



รูป 17.18 แรงที่กระทำต่อวัตถุที่จมในของเหลว

วัตถุที่มีน้ำหนัก mg ขณะจมในของเหลวชั่งน้ำหนักวัตถุได้ T เนื่องจากมีแรงพยุงของของเหลว F_B แรงดังกล่าวมีความสัมพันธ์ตามสมการ

$$T + F_B = mg$$

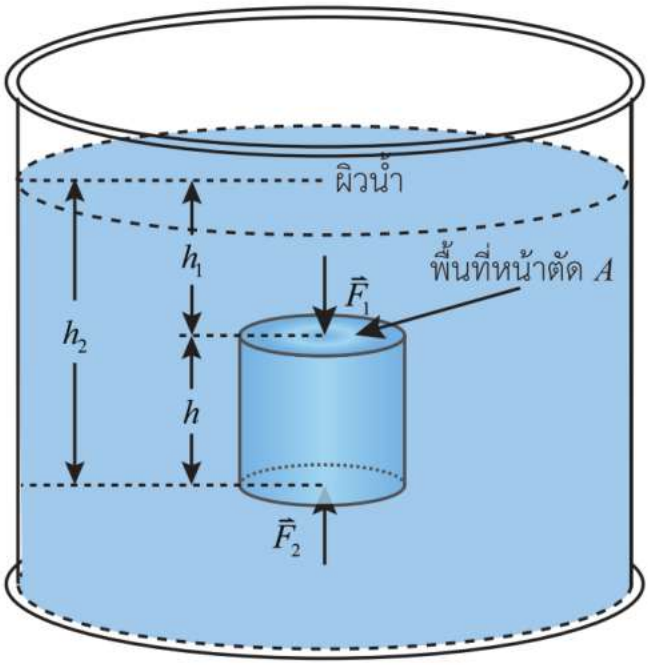
$$F_B = mg - T$$

จะเห็นว่า แรงพยุงเท่ากับ น้ำหนักวัตถุที่หายไปเมื่อชั่งในของเหลว

ถ้าวัตถุลอยในของเหลวแสดงว่า

$$F_B = mg$$

พิจารณาแรงในแนวดิ่งที่ของเหลวกระทำกับวัตถุทรงกระบอกสูง h พื้นที่หน้าตัด A จมในของเหลวที่มีความหนาแน่น ρ ดังรูป 17.19



รูป 17.19 การหาแรงพยุง

จากรูปแรงที่ของเหลวกระทำที่ผิวด้านบนเท่ากับ F_1

$$F_1 = P_1 A = (P_0 + \rho g h_1)A$$

เมื่อ P_1 คือ ความดันของของเหลวที่ผิวด้านบน

F_2 คือ แรงที่ของเหลวกระทำที่ผิวด้านล่าง

$$F_2 = P_2 A = (P_0 + \rho g h_2)A$$

เมื่อ P_2 คือ ความดันของของเหลวที่ผิวด้านล่าง

ผลต่างของแรงเนื่องจากความดันของของเหลวในแนวดิ่งที่กระทำกับวัตถุทรงกระบอก คือ แรงพยุง F_B มีทิศขึ้นและมีขนาดดังนี้

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

นั่นคือ

$$F_B = \rho g V \tag{17.10}$$

เมื่อ $V = Ah$ คือปริมาตรของวัตถุทรงกระบอกส่วนที่จม ปริมาณ ρV คือ มวลของของเหลวที่มีปริมาตรเท่ากับวัตถุทรงกระบอกส่วนที่จม ดังนั้น $(\rho V)g$ ก็คือ น้ำหนักของของเหลวที่มีปริมาตรเท่ากับปริมาตรของวัตถุทรงกระบอกส่วนที่จม

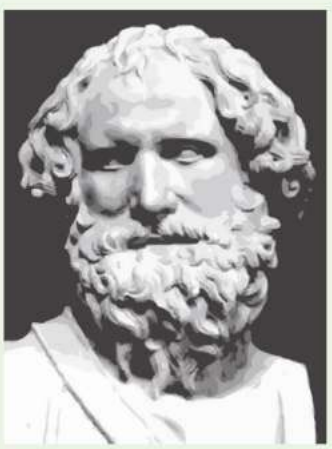
สรุปได้ว่า แรงพยุงที่กระทำต่อวัตถุทรงกระบอกเท่ากับน้ำหนักของของเหลวที่มีปริมาตรเท่าวัตถุทรงกระบอกส่วนที่จม และจะเห็นว่าความสัมพันธ์ตามสมการ $F_B = \rho V g$ ไม่ขึ้นกับรูปทรงกับวัตถุ

อาร์คิมีดิส (Archimedes) นักปราชญ์ชาวกรีกเป็นผู้ค้นพบหลักการของแรงพยุง และได้เสนอว่า “วัตถุที่อยู่ในของไหลทั้งหมดหรือเพียงบางส่วน จะถูกแรงพยุงจากของไหลกระทำ โดยขนาดแรงพยุงเท่ากับขนาดน้ำหนักของของไหลที่ถูกวัตถุแทนที่” ซึ่งหลักการนี้เรียกว่าหลักอาร์คิมีดิส (Archimedes’ principle) ซึ่งใช้อธิบายการลอยการจมของวัตถุต่าง ๆ ในของไหล

$$F_B = \rho V g \tag{17.11}$$

ความรู้เพิ่มเติม

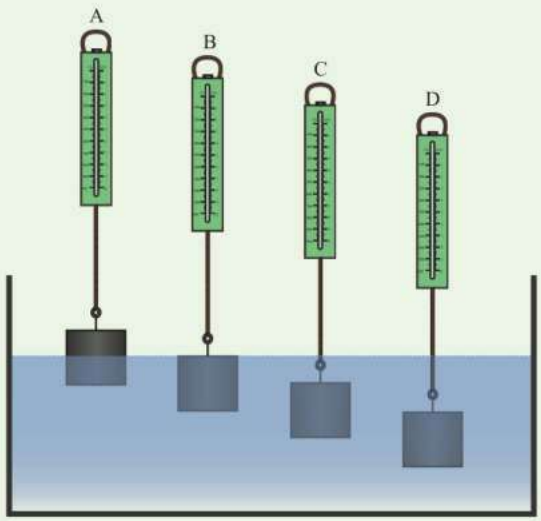
อาร์คิมีดีส (Archimedes 287-212 ก่อน ค.ศ.) นักปราชญ์ชาวกรีก ผลงานที่สำคัญทางด้านคณิตศาสตร์คือการค้นพบว่า π มีค่าระหว่าง $3\frac{10}{70}$ และ $3\frac{10}{71}$ ผลงานที่สำคัญทางด้านวิทยาศาสตร์มีมากมายเช่น การค้นพบหลักการเกี่ยวกับการลอยและจมของวัตถุ หลักเกี่ยวกับคานดีด คานงัด



รูป อาร์คิมีดิส

ชวนคิด

วัตถุมวลเท่ากันมีปริมาตรเท่ากันและมีความหนาแน่นมากกว่าของเหลวแขวนอยู่กับเครื่องชั่งสปริงที่มีค่าคงตัวเท่ากัน ให้เรียงลำดับแรงที่อ่านได้จากเครื่องชั่งสปริงจากมากไปหาน้อย เมื่อขยับเครื่องชั่งให้วัตถุจมอยู่ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ดังรูป



คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 17.3

- ☐ อธิบายการทำงานของหลอดฉีดยา ขณะดูดของเหลวเข้าไปในหลอด
- ☐ ในการใช้เครื่องชั่งสปริง ชั่งน้ำหนักวัตถุ เหตุใดเมื่อชั่งในขณะที่วัตถุอยู่ในของเหลว เครื่องชั่งจึงอ่านค่าได้น้อยกว่าเมื่อชั่งในขณะที่วัตถุอยู่ในอากาศ

แบบฝึกหัด 17.3

1. ถ้าน้ำทะเลมีความหนาแน่น 1.03×10^3 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และความดันบรรยากาศที่ระดับน้ำทะเลเท่ากับ 10^5 นิวตันต่อตารางเมตร จงหาความดันเกจและความดันสัมบูรณ์ที่ใต้ทะเลลึก 100 เมตร ให้แทนค่า g มีค่าประมาณเท่ากับ 9.8 เมตรต่อวินาที^{2}

17.4 พลศาสตร์ของของไหล

เราได้ศึกษาสมบัติบางประการของของไหลสถิต เช่น ความดัน แรงพยุง เป็นต้น เมื่อของไหลที่มีการเคลื่อนที่ เช่น ลมพัด การไหลของน้ำในท่อ หรือการไหลของเลือดในเส้นเลือด สมบัติของของของไหลเป็นอย่างไร เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจจะพิจารณากรณีเป็นของไหลอุดมคติ ศึกษาได้ดังต่อไปนี้

17.4.1 ของไหลอุดมคติ

ของไหลอุดมคติเป็นของไหลที่มีการไหลอย่างสม่ำเสมอ ไม่มีความหนืด บีบอัดไม่ได้ และไหลโดยไม่หมุน ในการพิจารณาการไหลของของไหลต้องระบุทั้งขนาดและทิศทางของความเร็วทุก ๆ ตำแหน่งในลำของไหลที่เคลื่อนที่ จึงใช้เส้นแทนแนวการเคลื่อนที่ของของไหล เรียกว่า สายกระแส (Stream line) โดยที่สายกระแสแต่ละสายจะไม่ตัดกัน ทิศทางความเร็วของการไหลที่จุดใด ๆ จะอยู่ในแนวสัมผัสกับสายกระแส ณ จุดนั้น ดังรูป 17.20

สำหรับการไหลแบบคงตัวที่ทุกๆ อนุภาคที่เคลื่อนที่ผ่านจุดใดจุดหนึ่งจะมีการเคลื่อนที่ไปตามแนวที่มีอนุภาคบางตัวได้เคลื่อนที่ไปก่อนหน้านั้นแล้ว เรียกว่า การไหลแบบเป็นชั้น (Laminar flow)

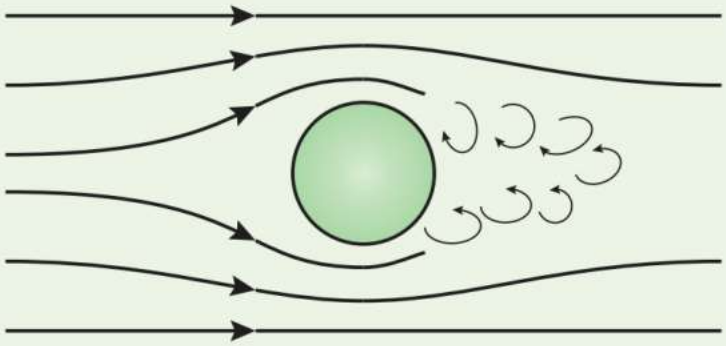
รูป 17.20 แสดงอากาศที่มีการไหลตามสายกระแสผ่านหลังคารถยนต์

ของไหลในอุดมคติต้องมีลักษณะดังนี้

1) ไม่มีความหนืดหรือแรงเสียดทานภายในระหว่างชั้นของของไหล
2) ไม่สามารถอัดตัวได้ ทำให้ความหนาแน่นของของไหลมีค่าคงตัว
3) ไหลสม่ำเสมอ (steady flow) คือ ที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งในของไหลความเร็วและความดันของของไหล มีค่าคงตัว
4) ไหลโดยไม่หมุน กล่าวคือของไหลไม่มีลักษณะการไหลเชี่ยวและไม่มีการไหลวนเกิดขึ้น

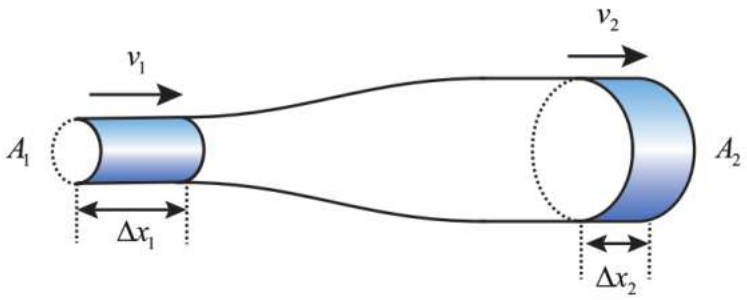
ความรู้เพิ่มเติม

การไหลที่ไหลเร็วมากหรือไม่สม่ำเสมออาจจะทำให้เกิดการไหลวน (Eddy currents) ซึ่งเป็นลักษณะหนึ่งของการไหลปั่นป่วน (Turbulent flow)



17.4.2 สมการความต่อเนื่อง

พิจารณาการไหลของของไหลที่ไม่มีการอัดตัว ความหนาแน่นจึงมีค่าคงตัวเท่ากับ ρ ของไหลในท่ออันหนึ่งลักษณะดังรูปที่ 17.21 ให้ของไหล ไหลผ่านท่อบริเวณที่มีพื้นที่หน้าตัด A_1 ด้วยความเร็ว v_1 แล้วไหลไปผ่านบริเวณซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด A_2 ด้วยความเร็ว v_2



รูป 17.21 แสดงการไหลของของไหลในท่ออันหนึ่งที่มีพื้นที่หน้าตัดไม่คงตัว

สำหรับช่วงเวลา Δt ที่เท่ากัน มวลของของไหลที่ไหลผ่านบริเวณพื้นที่หน้าตัด A_1 และ A_2 หาได้จาก

$$\Delta m = \rho \Delta V$$

ของไหลที่ผ่านพื้นที่ $\Delta V_1 = A_1 \Delta x_1$

$$\Delta x_1 = v_1 \Delta t$$

จะได้ $$\Delta m_1 = \rho A_1 v_1 \Delta t \quad \text{(a)}$$

และทำนองเดียวกันของไหลที่ผ่านพื้นที่หน้าตัด A_2 จะได้

$$\Delta m_2 = \rho A_2 v_2 \Delta t \quad \text{(b)}$$

เนื่องจากของไหลเป็นชนิดที่อัดไม่ได้ ความหนาแน่นจึงมีค่าคงตัว และไม่มีของไหลเข้าหรือออกจากท่อในช่วงจากตำแหน่ง A_1 ถึง A_2 ดังนั้นมวลของของไหลที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดใด ๆ ต่อเวลาจะมีค่าเท่ากัน

$$\frac{\Delta m_1}{\Delta t} = \frac{\Delta m_2}{\Delta t} \quad \text{(c)}$$

จากสมการ (a) และ (b) แทนค่าใน (c) จะได้

$$\rho A_1 v_1 = \rho A_2 v_2$$

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (17.12)$$

ผลคูณของพื้นที่หน้าตัดของท่อกับอัตราเร็วของของไหลมีค่าเท่ากับปริมาตรของไหลที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดในท่อในหนึ่งหน่วยเวลา เรียกว่า **อัตราการไหล** R (Flow rate) จากสมการ (17.12) แสดงว่าในท่ออันหนึ่ง อัตราการไหลมีค่าคงตัว แสดงถึงความต่อเนื่องของการไหล เรียกว่า **สมการความต่อเนื่อง** (Continuity equation) ซึ่งสามารถเขียนได้อีกรูปเป็น

$$Av = \text{ค่าคงตัว} \quad (17.13)$$

ตัวอย่าง 17.8 เติมน้ำลงในถังขนาด 20 ลิตร ด้วยสายยางที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 เซนติเมตร น้ำเต็มถังในเวลา 2 นาที ให้แทนค่า π มีค่าประมาณเท่ากับ 3.14

(ก) อัตราเร็วของน้ำที่ออกมาจากสายยาง

(ข) อัตราเร็วของน้ำที่ออกมาจากหัวฉีด เมื่อต่อสายยางกับหัวฉีดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 เซนติเมตร

แนวคิด ก. หาอัตราการไหลของน้ำ (R) จากปริมาตรต่อเวลา และหาอัตราเร็วของน้ำจาก $R = Av$

ข. สายยางและหัวฉีดเป็นท่อเดียวกันมีอัตราการไหลเท่ากัน และเท่ากับข้อ ก. หาอัตราเร็วของน้ำจากหัวฉีดได้จาก $R = Av$

วิธีทำ ก. อัตราการไหลของน้ำจากการเติมน้ำลงในถัง

$$R = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{\left(20\times10^{-3}\ \mathrm{m}^3\right)}{2\times60\,\mathrm{s}} = 1.67\times10^{-4}\ \mathrm{m}^3/\mathrm{s}$$

อัตราเร็วของน้ำหาจาก $R = Av$

$$v = \frac{R}{A} = \frac{1.67\times10^{-4}\ \mathrm{m}^3/\mathrm{s}}{\pi\left(1.0\times10^{-2}\right)^2\ \mathrm{m}^2} = 0.53\,\mathrm{m/s}$$

ข. หาอัตราเร็วของน้ำจากหัวฉีดได้

$$v = \frac{R}{A} = \frac{1.67\times10^{-4}\ \mathrm{m}^3/\mathrm{s}}{\pi\left(0.5\times10^{-2}\right)^2\ \mathrm{m}^2} = 2.13\,\mathrm{m/s}$$

ตอบ ก. อัตราเร็วของน้ำจากสายยางเท่ากับ 0.53 เมตรต่อวินาที

ข. อัตราเร็วของน้ำจากหัวฉีดเท่ากับ 2.13 เมตรต่อวินาที

ข้อสังเกต

อัตราเร็วของน้ำจากหัวฉีดมีค่าเป็น 4 เท่าของอัตราเร็วน้ำจากสายยาง เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดของหัวฉีดเป็น 1/4 เท่า ของพื้นที่หน้าตัดสายยาง

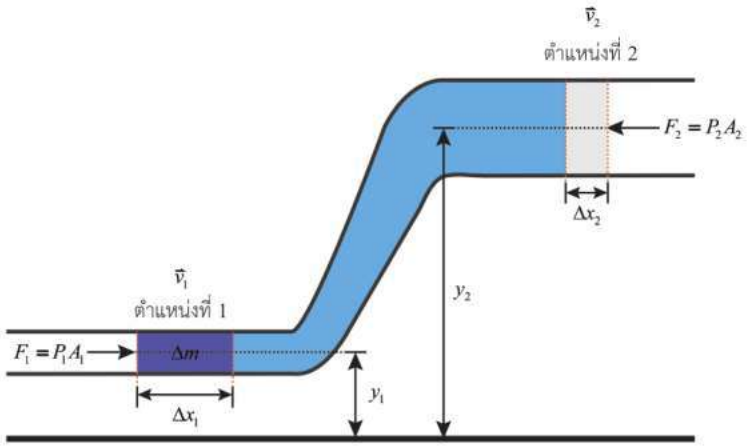
17.4.3 สมการแบร์นูลลี

พิจารณาของไหลอุดมคติที่ไหลผ่านสองตำแหน่งในท่ออันหนึ่งที่มีระดับความสูงต่างกันและมีขนาดของท่อต่างกัน ความสัมพันธ์ของปริมาณต่าง ๆ ของของไหลขณะผ่านท่อที่ตำแหน่งทั้งสองเป็นอย่างไร ศึกษาได้ดังต่อไปนี้

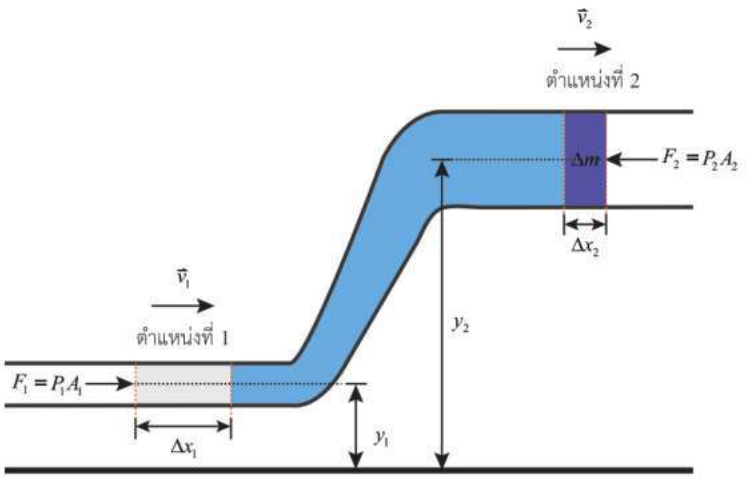
เริ่มจากพิจารณาของไหลเริ่มต้นไหลจากตำแหน่งสูง y_1 จากระดับอ้างอิงในช่วงเวลา Δt ผ่านพื้นที่หน้าตัด A_1 ด้วยความเร็ว v_1 ได้ระยะ Δx_1 และมีปริมาตร ΔV_1 ดังแสดงในรูป 17.22 ก.

ในช่วงเวลา Δt เดียวกัน จะมีของไหลที่ตำแหน่งสูง y_2 จากระดับอ้างอิง ผ่านพื้นที่หน้าตัด A_2 ด้วยความเร็ว v_2 ได้ระยะ Δx_2 และมีปริมาตร ΔV_2 ดังรูป 17.22 ข.

เนื่องจากของไหลในอุดมคติไม่สามารถอัดได้ ดังนั้นของไหลที่เคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งทั้งสองจะมีปริมาตร ΔV เท่ากัน และมวล Δm เท่ากันตามสมการ $\Delta m = \rho \Delta V$ พิจารณาการเปลี่ยนแปลงพลังงานได้ดังนี้



ก. ของไหลที่เริ่มต้นไหลจากตำแหน่งสูง y_1 ผ่านพื้นที่หน้าตัด A_1 ด้วยความเร็ว v_1 ได้ระยะ Δx_1



ข. ของไหลที่ตำแหน่งสูง y_2 ผ่านพื้นที่หน้าตัด A_2 ด้วยความเร็ว v_2 ได้ระยะ Δx_2

รูป 17.22 แสดงการไหลของของไหลในท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดไม่คงตัวและไหลจากความสูง y_1 ไปสู่ y_2 ความเร็วเปลี่ยนจาก v_1 เป็น v_2

ความสูงเปลี่ยนไปจะมีพลังงานศักย์โน้มถ่วงที่เปลี่ยนแปลงไปคือ

$$\Delta PE = \Delta mgy_2 - \Delta mgy_1 = \rho \Delta V g(y_2 - y_1) \qquad (17.14)$$

ความเร็วเปลี่ยนไปจะมีพลังงานจลน์ที่เปลี่ยนแปลงไปคือ

$$\Delta KE = \frac{1}{2}(\Delta m)v_2^2 - \frac{1}{2}(\Delta m)v_1^2 = \frac{1}{2}\rho \Delta V(v_2^2 - v_1^2) \qquad (17.15)$$

หากพิจารณาการไหลของของไหลเกิดจากแรงกระทำเนื่องจากความดันในของไหลตามสมการ $F = PA$ สามารถพิจารณางานที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของของไหล ตามสมการ

$$W = F\,\Delta x$$
$$= P\,A\,\Delta x$$
$$= P\Delta V$$

การเคลื่อนที่ของของไหลสามารถหางานที่เกิดจากแรงกระทำในระยะ Δx_1 และ Δx_2 ได้คือ

$$W_1 = P_1\Delta V \qquad (a)$$

$$W_2 = -P_2\Delta V \qquad (b)$$

W_2 เป็นลบเนื่องจาก แรง F_2 มีทิศตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของของไหล

จากความสัมพันธ์ระหว่างงานและพลังงานกล่าวว่า งานทั้งหมดที่กระทำต่อระบบเท่ากับพลังงานจลน์รวมของระบบที่เปลี่ยนไป ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$W = \Delta E_k$$

$$W_1 + W_2 + W_{mg} = E_{k2} - E_{k1}$$

โดยงานของแรงโน้มถ่วงของโลก จาก y_1 ไป y_2 คือ $W_{mg} = -mg(y_2 - y_1)$

จะได้ $P_1V + (-P_2V) + (-mg(y_2 - y_1)) = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2$

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

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g y_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g y_2$$

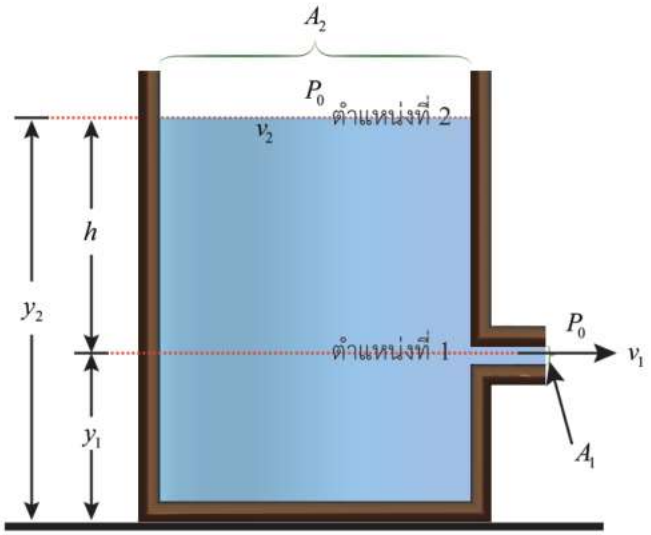
นั่นคือ $$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g h = \text{ค่าคงตัว} \qquad (17.16)$$

สมการนี้เรียกว่า **สมการแบร์นูลลี** ซึ่งกล่าวว่า ผลรวมของความดัน พลังงานจลน์ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร และพลังงานศักย์โน้มถ่วงต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ณ ตำแหน่งใด ๆ ภายในท่อที่ของไหลผ่าน มีค่าคงตัวเสมอ

ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับสมการต่อเนื่องและสมการแบร์นูลลีสามารถนำมาอธิบายปรากฏการณ์และนำไปประยุกต์ใช้ ศึกษาได้จากตัวอย่างต่อไปนี้

กฎของตอร์รีเชลลี

การประยุกต์ใช้สมการแบร์นูลลีเพื่อหาความเร็วของของเหลวที่ไหลพุ่งออกจากถังหรือภาชนะที่รั่ว เรียกว่า **กฎของตอร์รีเชลลี** (Torricelli's theorem) โดยพิจารณาถังขนาดใหญ่มีพื้นที่หน้าตัด A_2 ภายในบรรจุของเหลวความหนาแน่น ρ เมื่อเจาะรูข้างๆ ถังที่ความลึก h จากระดับผิวของของเหลว ให้รูอยู่ที่ตำแหน่ง 1 และรูมีพื้นที่หน้าตัด A_1 เปิดออกสู่บรรยากาศจึงมีของเหลว ณ ตำแหน่งนี้จึงมีความดันเป็น P_0 และของเหลวพุ่งออกมาด้วยความเร็ว v_1 ดังรูปที่ 17.23 ให้ของเหลวที่ผิวด้านบนอยู่ที่ตำแหน่ง 2 ความเร็วที่จุดนี้เท่ากับ v_2



รูป 17.23 แสดงถังที่มีรูรั่ว

จากสมการแบร์นูลลีที่ตำแหน่งที่ 1 และตำแหน่งที่ 2 เขียนได้ดังนี้

$$P_1 + \rho g y_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \rho g y_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 \qquad (17.17)$$

ถังขนาดใหญ่มีพื้นที่หน้าตัดมากกว่าของรูรั่วมากๆ หรือ $A_2 >> A_1$ และระดับน้ำที่ด้านบนของถังจะมีอัตราเร็วน้อยกว่าน้ำที่ไหลออกจากรู ทำให้ประมาณได้ว่า $v_2 << v_1$ สมการ (17.17) จึงลดรูปเหลือ

$$P_0 + \rho g y_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_0 + \rho g y_2 \qquad (17.18)$$

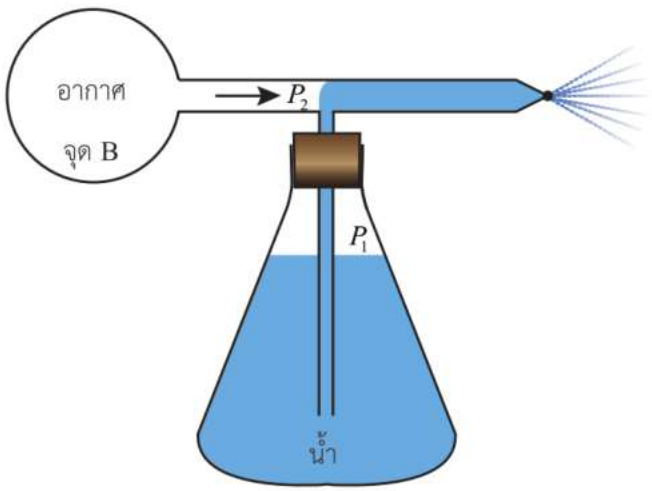
$$\frac{1}{2}\rho v_1^2 = \rho g(y_2 - y_1)$$

$$v_1 = \sqrt{2gh} \qquad (17.19)$$

เห็นได้ว่าอัตราเร็วของน้ำที่ไหลออกจากรูรั่วเมื่อ $v_2 << v_1$ มีค่าเท่ากับอัตราเร็วของวัตถุที่ตกอย่างอิสระจากความสูง h ตามสมการ (17.19) เรียกว่า กฎของตอร์รีเชลลี

เครื่องพ่นละอองน้ำ

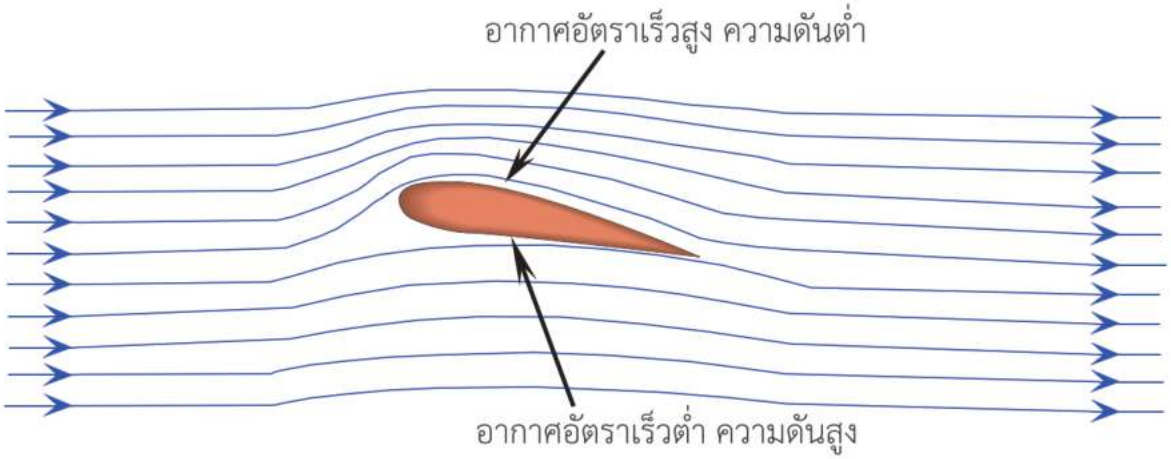
รูปที่ 17.24 แสดงลักษณะของเครื่องพ่นละอองน้ำ เครื่องทำงานโดยอาศัยหลักการแบร์นูลลี เมื่อบีบหรือกดยางที่ตำแหน่ง B ทำให้อากาศไหลไปในท่อด้วยอัตราเร็วสูงทำให้เกิดความดันต่ำ P_2 เหนือท่อแนวดิ่ง น้ำในขวดจึงถูกดันขึ้นมาตามท่อเพราะความดันของเหลวที่ผิวหน้าของขวดมีความดัน P_1 เท่ากับความดันบรรยากาศ ($P_1 > P_2$) น้ำที่ไหลมาในท่อแนวนอนถูกอากาศดันออกไปตามท่อ



รูป 17.24 แสดงลักษณะของเครื่องพ่นละอองน้ำ

ปีกเครื่องบิน

สมการของแบร์นูลลีใช้อธิบายการเกิดแรงยกของปีกเครื่องบินที่มีลักษณะดังรูป 17.25 ขณะเครื่องบินเคลื่อนที่ จะมีอากาศเคลื่อนผ่านปีกเครื่องบิน โดยอากาศบริเวณด้านบนของปีกเครื่องบินมีอัตราเร็วสูงกว่าอัตราเร็วของอากาศบริเวณผิวปีกด้านล่าง และความดันของอากาศที่ผิวปีกด้านบนน้อยกว่าที่ผิวปีกด้านล่าง จึงเป็นผลให้เกิดแรงยกขึ้นกระทำที่ปีกเครื่องบิน นอกจากแรงยกดังกล่าวแล้วยังมีแรงยกที่เกิดจากหลักฟิสิกส์อื่น ๆ ร่วมด้วย ซึ่งจะได้ศึกษาในระดับที่สูงขึ้นต่อไป



รูป 17.25 ปีกเครื่องบินแสดงการไหลของอากาศผ่านปีกเครื่องบินที่ได้รับการออกแบบให้เกิดแรงยกตัว

ชวนคิด

จากปรากฏการณ์พายุฤดูร้อนทำให้หลังคาบ้านที่มีพายุพัดผ่านปลิวหลุดออกจากตัวบ้านได้ สามารถอธิบายด้วยสมการแบร์นูลลีได้อย่างไร

คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 17.4

- ☐ ถ้าน้ำในท่อประปาที่ไหลผ่านมาตราวัด อัตราการไหล 40 ลิตรต่อนาที จงหาอัตราเร็วของน้ำในท่อประปา เมื่อส่งผ่านท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร
- ☐ ของไหลในอุดมคติต้องมีลักษณะใดบ้าง

แบบฝึกหัด 17.4

1. เม็ดเลือดไหลด้วยอัตราเร็ว 10 เซนติเมตรต่อวินาที ในเส้นเลือดใหญ่รัศมี 0.3 เซนติเมตร ไปสู่เส้นเลือดขนาดเล็กลง มีรัศมี 0.2 เซนติเมตร อัตราเร็วของเม็ดเลือดในเส้นเลือดเล็กเป็นเท่าใด

สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน

17.1 ของแข็งและสภาพยืดหยุ่นของของแข็ง

- สมบัติของวัตถุที่เปลี่ยนแปลงรูปร่างได้เมื่อมีแรงกระทำและกลับสู่รูปร่างเดิมได้เมื่อหยุดออกแรงกระทำ เรียกว่า สภาพยืดหยุ่น
- แต่ถ้าวัตถุนั้นถูกแรงกระทำแล้วเปลี่ยนรูปร่างไปอย่างถาวรโดยไม่มีการฉีกขาดหรือแตกหัก เรียกว่า สภาพพลาสติก
- ขณะวัตถุถูกแรงขนาดต่าง ๆ กระทำ สำหรับช่วงแปรผันตรงความเค้นจะแปรผันตรงกับความเครียด เรียกว่า ขีดจำกัดการแปรผันตรง
- เมื่อออกแรงมากขึ้นจนเกินขีดจำกัดการแปรผันตรง ความเค้นไม่แปรผันตรงกับความเครียด ในช่วงนี้ เมื่อหยุดออกแรงกระทำวัตถุยังสามารถกลับคืนสู่รูปร่างเดิมได้ เรียกว่า ขีดจำกัดสภาพยืดหยุ่น
- เมื่อออกแรงจนวัตถุไม่กลับคืนรูปร่างเดิม วัตถุสูญเสียสภาพยืดหยุ่น เรียกว่า สภาพพลาสติก หากยังคงเพิ่มขนาดแรงให้เกิดความเครียดเพิ่มขึ้น วัตถุจะมีการแตกหัก เรียกว่า จุดแตกหัก

17.2 ความตึงผิวและความหนืดของของเหลว

- วัตถุบางชนิดลอยน้ำได้ทั้งที่มีความหนาแน่นมากกว่าน้ำ เนื่องจากผิวน้ำมีแรงดึงผิว
- อัตราส่วนระหว่างแรงดึงผิวและความยาวทั้งหมดของเส้นขอบที่ผิวของเหลวสัมผัส เรียกว่า ความตึงผิว (surface tension)
- ปรากฏการณ์บางอย่างเกิดจากความตึงผิวของของเหลว เช่น การโค้งของผิวของเหลว การซึมตามรูเล็ก
- ความหนืด (viscosity) เป็นสมบัติของของไหลที่ต้านการเคลื่อนที่ของวัตถุในของไหลนั้น
- ของไหลที่มีความหนืดมากจะมีแรงต้านการเคลื่อนที่มาก แรงนี้เรียกว่า แรงหนืด (viscous force)

17.3 ของไหลสถิต

- ในภาชนะที่มีของเหลว จะมีแรงเนื่องจากของเหลวกระทำต่อภาชนะโดยมีทิศทางตั้งฉากกับผนังที่ของเหลวสัมผัส ขนาดของแรงที่ของเหลวกระทำตั้งฉากต่อพื้นที่หนึ่งหน่วย เรียกว่า ความดัน
- ความดันเกจ (gauge pressure) เป็นความดันเนื่องจากของเหลวเพียงอย่างเดียว
- ความดันสัมบูรณ์ (absolute pressure) เป็นผลรวมของความดันเกจกับความดันบรรยากาศ
- เมื่อเพิ่มความดัน ณ ตำแหน่งใด ๆ ในของเหลวที่อยู่นิ่งในภาชนะปิด ความดันที่เพิ่มขึ้นจะถูกส่งผ่านไปยังทุก ๆ จุดในของเหลวนั้น หลักการนี้ เรียกว่า กฎของพาสคัล (Pascal's law)
- กฎของพาสคัลใช้อธิบายการทำงานของเครื่องกลผ่อนแรง เช่น เครื่องอัดไฮดรอลิก
- วัตถุที่อยู่ในของไหลจะถูกแรงพยุง (buoyancy force) กระทำ โดยที่ขนาดของแรงพยุงจะเท่ากับขนาดของน้ำหนักของของไหลที่ถูกแทนที่ เรียกว่า หลักของอาร์คิมีดีส (Archimedes' principle) หลักนี้สามารถอธิบายการลอยและการจมของวัตถุในของเหลวได้

17.4 พลศาสตร์ของของไหล

- ศึกษาของไหลที่มีการเคลื่อนที่โดยให้ของไหลเป็นของไหลอุดมคติ พฤติกรรมของของไหลอุดมคติอธิบายได้ด้วยสมการความต่อเนื่อง (the equation of continuity) สมการของแบร์นูลลี (Bernoulli's equation) และหลักของแบร์นูลลี (Bernoulli's principle)

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 17

คำถาม

1. ลวดโลหะยาว 3 เมตร และมีพื้นที่หน้าตัด 0.25 ตารางเซนติเมตร เมื่อใช้แรงดึง 10 000 นิวตัน จะยืดออก 0.05 เซนติเมตร จงหาค่ามอดุลัสของยังของโลหะที่ทำเส้นลวดนี้
2. ลวดอะลูมิเนียมยาว 2 เมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 เซนติเมตร เมื่อนำลวดนี้ไปยกวัตถุมวล 1000 กิโลกรัม ลวดนี้จะยืดออกเท่าไร (ค่ามอดุลัสของยังของอะลูมิเนียมเท่ากับ 7.0×10^{10} N/m^2)
3. ลวดเส้นหนึ่งยาว 3 เมตร มีพื้นที่หน้าตัด 10^{-6} ตารางเมตร และค่ามอดุลัสของยังสำหรับลวดเส้นนี้เป็น 1.5×10^{11} นิวตันต่อตารางเมตร เมื่อมีแรงขนาด 100 นิวตัน ดึงเส้นลวด เส้นลวดจะยืดออกจากเดิมกี่เมตร
4. ขณะเกิดพายุ บางครั้งหลังคาบ้านถูกพายุพัดปลิวหลุดออกไป**ทั้งที่ปิดประตูหน้าต่างทั้งหมดแล้ว** เพราะเหตุใด
5. ตะกั่วมีความหนาแน่นมากกว่าเหล็ก ถ้านำโลหะทั้งสองที่มีปริมาตรเท่ากันหย่อนลงในน้ำ แรงพยุงของน้ำกระทำต่อโลหะใดมากกว่า
6. เรือลำหนึ่งมีมวล 4000 กิโลกรัม ลอยในน้ำซึ่งมีความหนาแน่น 1.0×10^3 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จงหา
   ก. แรงพยุงของน้ำที่กระทำต่อเรือ
   ข. ปริมาตรของเรือส่วนที่จมอยู่ใต้ผิวน้ำ

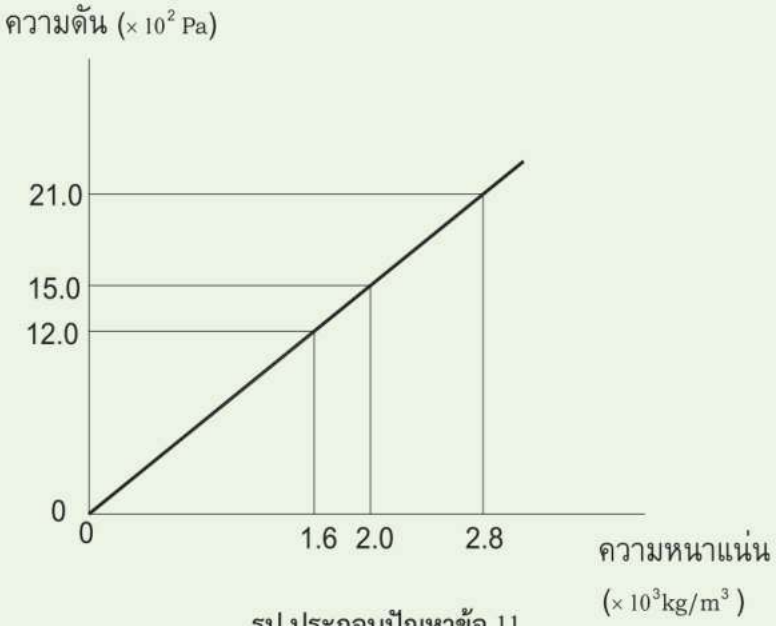
ปัญหา

7. ลวดทองแดงและลวดเหล็กกล้ามีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 0.5 ตารางมิลลิเมตร และมีความยาว 1 เมตรเท่ากัน ค่ามอดุลัสของยังสำหรับลวดทองแดงเป็น 1.2×10^{11} นิวตันต่อตารางเมตร และสำหรับเหล็กกล้าเป็น 2×10^{11} นิวตันต่อตารางเมตร ถ้าลวดทั้งสองมีน้ำหนัก 100 นิวตัน แขวนที่ปลายลวด ความเค้นของลวดทั้งสองต่างกันเท่าใด และลวดทั้งสองจะยืดออกจากเดิมต่างกันเท่าใด
8. ใช้ลวด x ยาว 1 เมตร แขวนวัตถุมวล 10 กิโลกรัม ลวด x ยืดออก 1 มิลลิเมตร และใช้ลวด y ยาว 1.5 เมตร แขวนวัตถุมวล 20 กิโลกรัม ลวด y ยืดออก 2 มิลลิเมตร รัศมีของพื้นที่หน้าตัดของลวด x เป็นสองเท่าของรัศมีของพื้นที่หน้าตัดของลวด y อัตราส่วนของค่ามอดุลัสยังของลวด x และลวด y มีค่าเท่าใด

9. ลวดเหล็กกล้าสำหรับดึงลิฟต์เครื่องหนึ่งมีขีดจำกัดสภาพยืดหยุ่น 2×10^8 นิวตันต่อตารางเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร เมื่อตัวลิฟต์และสัมภาระในลิฟต์มีมวล 2000 กิโลกรัม สามารถใช้ลวดนี้ดึงลิฟต์ให้เคลื่อนที่ขึ้นด้วยความเร่งสูงสุดเท่าไร จึงจะไม่ยืดเกินขีดจำกัดสภาพยืดหยุ่น

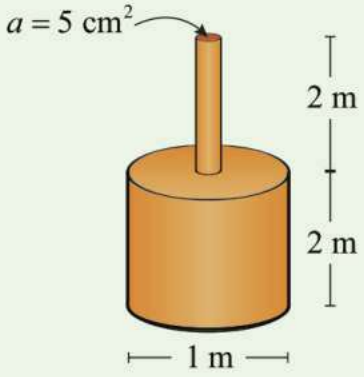
10. ลวดโลหะซึ่งมีความยาวเดิมเท่ากับ 1.5 เมตร และมีพื้นที่หน้าตัด 0.05 ตารางมิลลิเมตร มีค่ามอดุลัสของยังเท่ากับ 7.5×10^{10} นิวตันต่อตารางเมตร หากแขวนวัตถุมวล 5 กิโลกรัม จงหา
    ก. ความยาวของลวดโลหะหลังจากแขวนวัตถุแล้ว
    ข. ความเร่งสูงสุดเมื่อดึงลวดขึ้นในแนวดิ่ง โดยไม่ยืดเกินขีดจำกัดสภาพยืดหยุ่น ถ้าความเค้นที่ขีดจำกัดสภาพยืดหยุ่นของลวดโลหะนี้เท่ากับ 10^{10} นิวตันต่อตารางเมตร

11. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันเกจกับความหนาแน่นของของเหลวสามชนิดที่ความลึกเดียวกันดังรูป ความลึกนั้นมีค่าเท่าใด ตอบในหน่วยเซนติเมตร



รูป ประกอบปัญหาข้อ 11

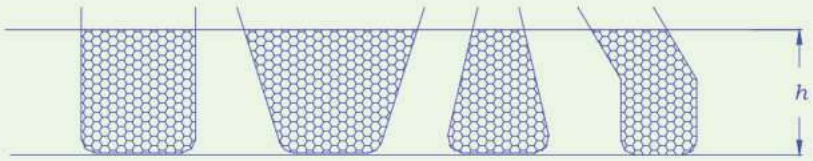
12. ภาชนะรูปทรงกระบอกรัศมี 1 เมตร สูง 2 เมตร ด้านบนมีท่อทรงกระบอกเล็ก ๆ สูง 2 เมตร พื้นที่หน้าตัด 5 ตารางเซนติเมตร ติดแน่นตอนบน ดังรูป ภาชนะนี้บรรจุน้ำเต็ม จงคำนวณหาแรงดันของน้ำเนื่องจากความดันเกจที่กระทำต่อก้นภาชนะ และน้ำหนักของน้ำที่บรรจุไว้ในภาชนะนี้ คำตอบทั้งสองนี้เท่ากันหรือไม่ เพราะเหตุใด



รูป ประกอบปัญหาข้อ 12

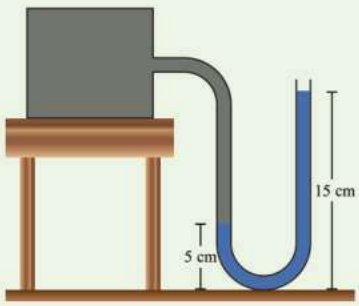
13. จากรูป ภาชนะทั้งสี่บรรจุของเหลวชนิดเดียวกัน ที่ระดับสูง h เท่ากัน ข้อความต่อไปนี้ข้อใดถูกต้อง

    1. ความดันเกจที่ก้นภาชนะทุกใบเท่ากัน
    2. ความดันสมบูรณ์ที่ก้นภาชนะทุกใบเท่ากัน
    3. ความดันสัมบูรณ์เฉลี่ยที่ด้านข้างภาชนะเป็นครึ่งหนึ่งของความดันสัมบูรณ์ที่ก้นภาชนะ



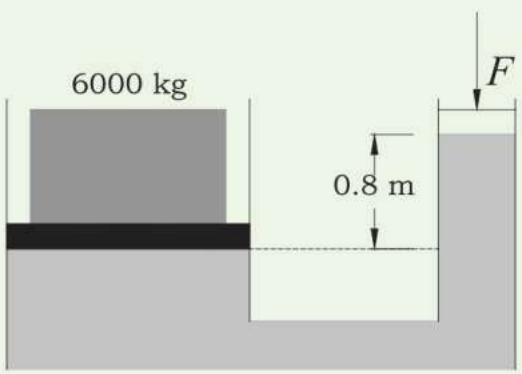
รูป ประกอบปัญหาข้อ 13

14. ขาข้างหนึ่งของแมนอมิเตอร์ที่มีปรอทบรรจุอยู่ ถูกต่อเข้ากับถังสี่เหลี่ยมบรรจุแก๊สชนิดหนึ่งปรากฏว่าระดับปรอทในขาทั้งสองข้างสูง 5 เซนติเมตร และ 15 เซนติเมตร ดังรูป ถ้าความดันของอากาศขณะนั้นเท่ากับ 10^5 พาสคัล แก๊สในถังมีความดันสัมบูรณ์เท่าใด



รูป ประกอบปัญหาข้อ 14

15. ลูกสูบเล็กของเครื่องอัดไฮดรอลิกมีพื้นที่หน้าตัด 25 ตารางเซนติเมตรและลูกสูบใหญ่มีพื้นที่หน้าตัด 800 ตารางเซนติเมตร ถ้ามีมวล 6000 กิโลกรัม วางกดอยู่ในเครื่องอัดไฮดรอลิก ซึ่งมีน้ำมันที่มีความหนาแน่น 780 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ถ้าเครื่องอัดไฮดรอลิกอยู่ในสมดุล โดยระดับน้ำมันในลูกสูบเล็กอยู่สูงกว่าระดับน้ำมันในลูกสูบใหญ่ 80 เซนติเมตร แรงที่กดบนลูกสูบเล็กมีค่าเท่าใด



รูป ประกอบปัญหาข้อ 15

16. นำเหล็กรูปลูกบาศก์ปริมาตร 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร ไปใส่ลงในน้ำและน้ำมันที่มีความหนาแน่น 1000 และ 800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ โดยจมทั้งก้อน แรงพยุงที่กระทำต่อเหล็กทั้งสองกรณีเป็นเท่าใด

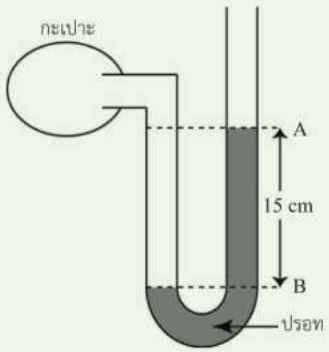
17. นำแท่งไม้รูปลูกบาศก์มีความยาวด้านละ 0.5 เมตร มีความหนาแน่น 800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ไปลอยน้ำที่มีความหนาแน่น 1000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

    ก. แท่งไม้จมน้ำลึกเท่าใด

    ข. จะต้องใช้แรงกดที่แท่งไม้เท่าใด เพื่อให้จมมิดน้ำพอดี

18. แมนอมิเตอร์เครื่องหนึ่งมีระดับปรอทในขาทั้งสองข้างอยู่ที่ขีด 0 ของสเกล ถ้าระยะระหว่างขีดของสเกลเท่ากับ 1 มิลลิเมตร เมื่อระดับปรอทเปลี่ยนไป 1 ช่องสเกลที่อยู่เหนือขีด 0 ขึ้นไป มีความดันเปลี่ยนไปเท่าใดในหน่วย mmHg

19. แมนอมิเตอร์ต่อกับกะเปาะที่บรรจุแก๊สตามรูป



รูป ประกอบปัญหาข้อ 19

แมนอมิเตอร์วัดความดันแก๊สในกะเปาะได้เท่าใด

20. ถังรูปลูกบาศก์มีความยาวด้านละ 1 เมตร บรรจุน้ำเกลือที่มีความหนาแน่น 1.03×10^3 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ไว้เต็มถัง จงหา

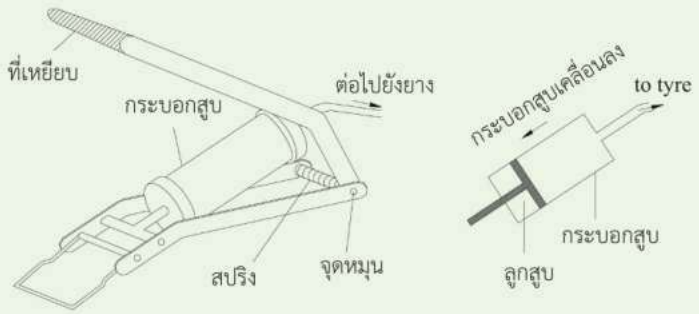
    ก. แรงเนื่องจากความดันสัมบูรณ์ที่น้ำเกลือกระทำที่ก้นถัง

    ข. แรงเฉลี่ยเนื่องจากความดันสัมบูรณ์ที่น้ำเกลือกระทำที่ด้านข้างของถังหนึ่งด้าน

21. น้ำในท่อตรงไหลผ่านบริเวณที่มีพื้นที่หน้าตัด 1×10^{-3} ตารางเมตร ด้วยอัตราเร็วค่าหนึ่ง เมื่อไหลถึงท่อบริเวณที่มีพื้นที่หน้าตัด 2×10^{-4} ตารางเมตร จะมีอัตราเร็วเป็นกี่เท่าของอัตราเร็วตอนแรก

22. เครื่องบินลำหนึ่งต้องมีแรงยก 900 นิวตันต่อตารางเมตร จึงจะสามารถบินขึ้นได้ ถ้าอัตราเร็วของอากาศที่ผ่านส่วนล่างของปีกเท่ากับ 100 เมตรต่อวินาที จงหาอัตราเร็วของอากาศที่ผ่านส่วนบนของปีก เพื่อให้เกิดแรงยก 900 นิวตันต่อตารางเมตร กำหนดให้ความหนาแน่นของอากาศขณะนั้นเท่ากับ 1.2 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

23. เครื่องสูบรถจักรยานแบบเท้ากด ประกอบด้วยกระบอกสูบ ลูกสูบ และที่เหยียบ เมื่อออกแรงกดที่เหยียบ กระบอกสูบจะเคลื่อนที่เข้าหาลูกสูบและดันอากาศในกระบอกสูบให้ผ่านสายยางที่ต่อกับยางรถ



รูป ประกอบปัญหาข้อ 23

ก. ถ้าลูกสูบมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 25 ตารางเซนติเมตร และแรงที่กระทำต่อลูกสูบเท่ากับ 800 นิวตัน จงหาความดันจากแรงที่กระทำกับลูกสูบ

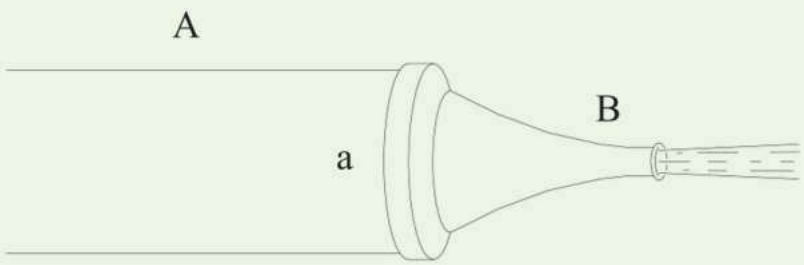
ข. ถ้านำเครื่องสูบนี้ไปสูบยางรถยนต์สี่ล้อที่มีมวล 600 กิโลกรัม จนยางแต่ละเส้นมีความดันเกจ 200 กิโลพาสคัล หากไม่คำนึงถึงความดันที่เกิดจากแรงยืดหยุ่นของเนื้อยาง พื้นที่ของยางแต่ละเส้นที่สัมผัสถนนเป็นเท่าใด

24. ท่อ M มีพื้นที่หน้าตัด 3.0×10^{-3} ตารางเมตร ต่อกับท่อ N ที่มีพื้นที่ตัดขวาง 1.0×10^{-3} ตารางเมตร ท่อทั้งสองวางตัวในแนวราบ ถ้าน้ำไหลเข้าท่อ M ด้วยอัตราเร็ว 0.3 เมตรต่อวินาที จงหา

ก. อัตราการไหลของน้ำในท่อทั้งสอง

ข. อัตราเร็วของน้ำในท่อ N

25. ถ้าน้ำพุ่งออกจากปลายท่อน้ำดับเพลิงด้วยอัตราเร็ว 20 เมตรต่อวินาที ดังรูป ความดันที่จุด a ซึ่งอยู่ห่างจากปลายท่อ A เล็กน้อยมีค่าเท่าใด กำหนดให้เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ A และ B เท่ากับ 8 เซนติเมตร และ 4 เซนติเมตร ตามลำดับ



รูป ประกอบปัญหาข้อ 25

ปัญหาท้าทาย

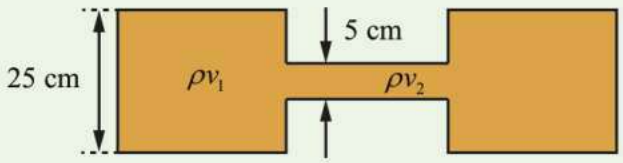
26. กำหนดให้เส้นลวดมีค่ามอดุลัสของยังเท่ากับ 2.0×10^{11} นิวตันต่อตารางเมตร เมื่อแขวนวัตถุมวล m ที่ปลายลวดเส้นนี้ ลวดยืดออก 0.1 เปอร์เซ็นต์ของความยาวเดิม ถ้าเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร มวล m มีค่าเท่าใดในหน่วยกิโลกรัม

27. ลวดอะลูมิเนียมความหนาแน่น 2.7×10^3 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จะขาดถ้าถูกแรงดึงทำให้เกิดความเค้นเกิน 7.5×10^7 นิวตันต่อตารางเมตร หากนำปลายข้างหนึ่งแขวนจากที่สูงมาก ลวดอะลูมิเนียมที่ห้อยลงมาจะมีความยาวได้มากที่สุดเท่าใด

28. ลวดเบาเส้นหนึ่งมีพื้นที่หน้าตัด 5 ตารางมิลลิเมตร วางบนพื้นราบลื่นได้รับแรงภายนอกขนาด $\vec{F}_1$ และ $\vec{F}_2$ ที่ปลายทั้งสองข้างหากลวดไม่เคลื่อนที่และความเค้นที่เกิดขึ้นไม่เกินขีดจำกัดสภาพยืดหยุ่น ปรากฏว่าเส้นลวดยืดออก 0.02 เปอร์เซนต์ จงหาค่า $\vec{F}_1$ และ $\vec{F}_2$ ในหน่วยนิวตัน กำหนดให้ลวดมีค่ามอดุลัสของยังเท่ากับ 10^{10} นิวตันต่อตารางเมตร

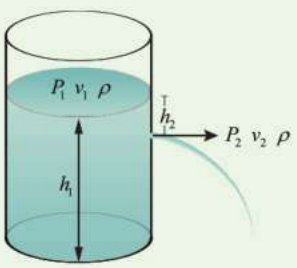
29. ในการทดลองวัดความตึงผิวของของเหลวชนิดหนึ่ง โดยใช้เครื่องมือเดียวกับที่ใช้ในการทดลอง 17.3 ถ้าห่วงวงกลมมีรัศมี 10 เซนติเมตร พบว่าจะต้องเพิ่มมวล 139.5 กรัม ที่ห่วงสำหรับแขวนน้ำหนัก จึงทำให้ห่วงวงกลมหลุดจากผิวของเหลวพอดี จงหาความตึงผิวของของเหลวนี้

30. ท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 เซนติเมตรสองท่อ ต่อเชื่อมด้วยท่อมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ดังรูป ถ้าอัตราการไหลของน้ำในท่อใหญ่เท่ากับ 0.1 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ความดันน้ำในท่อใหญ่กับท่อเล็กต่างกันเท่าใด



รูป ประกอบปัญหาท้าทายข้อ 30

31. น้ำมันความหนาแน่นเท่ากับ 600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร บรรจุในถังปิดสนิทขนาดใหญ่ ที่ว่างเหนือผิวน้ำมันมีความดันเป็น 3 เท่าของความดันบรรยากาศ จงหาอัตราเร็วของน้ำมันที่พุ่งออกจากรูรั่วที่ระยะ 10 เมตรจากผิวน้ำมัน ดังรูป



รูป ประกอบปัญหาท้าทายข้อ 31

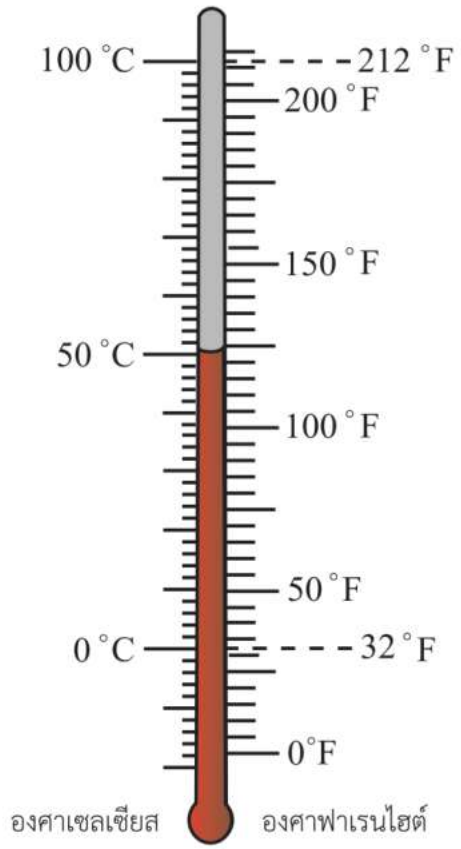
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก หน่วยของอุณหภูมิ

สเกลอุณหภูมิ

การกำหนด**สเกลอุณหภูมิ** (temperature scale) เพื่อบอกระดับความร้อนทำได้โดยการกำหนดอุณหภูมิสองค่า เรียกว่า **จุดมาตรฐาน** (standard points) นิยมกำหนดโดยใช้น้ำบริสุทธิ์ที่ความดัน 1 บรรยากาศ ได้แก่ จุดเยือกแข็งของน้ำบริสุทธิ์ เรียกว่า จุดมาตรฐานล่าง และจุดเดือดของน้ำบริสุทธิ์ เรียกว่า จุดมาตรฐานบน ซึ่งการแบ่งระยะระหว่างจุดมาตรฐานทั้งสองออกเป็นช่องเท่า ๆ กัน เรียกแต่ละช่องว่า **องศา** (degree)

สเกลอุณหภูมิที่นิยมใช้คือ **สเกลเซลเซียส** (Celsius scale) ตามสเกลนี้ กำหนดให้จุดมาตรฐานล่าง คือ 0 องศาเซลเซียส และจุดมาตรฐานบน คือ 100 องศาเซลเซียส โดยระหว่างจุดมาตรฐานล่างและจุดมาตรฐานบนถูกแบ่งออกเป็น 100 ช่องเท่า ๆ กัน แต่ละช่องของสเกลนี้ เรียกว่า **องศาเซลเซียส** (degree Celsius, °C) ส่วน**สเกลฟาเรนไฮต์** (Fahrenheit scale) กำหนดให้จุดมาตรฐานล่าง คือ 32 องศาฟาเรนไฮต์ และจุดมาตรฐานบน คือ 212 องศาฟาเรนไฮต์ โดยระหว่างจุดมาตรฐานล่างและจุดมาตรฐานบนถูกแบ่งออกเป็น 180 ช่องเท่า ๆ กัน แต่ละช่องของสเกลนี้ เรียกว่า **องศาฟาเรนไฮต์** (degree Fahrenheit, °F) ดังรูป ก.1



รูป ก.1 การเปรียบเทียบสเกลเซลเซียสและสเกลฟาเรนไฮต์

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสเกลเซลเซียสกับสเกลฟาเรนไฮต์จะได้

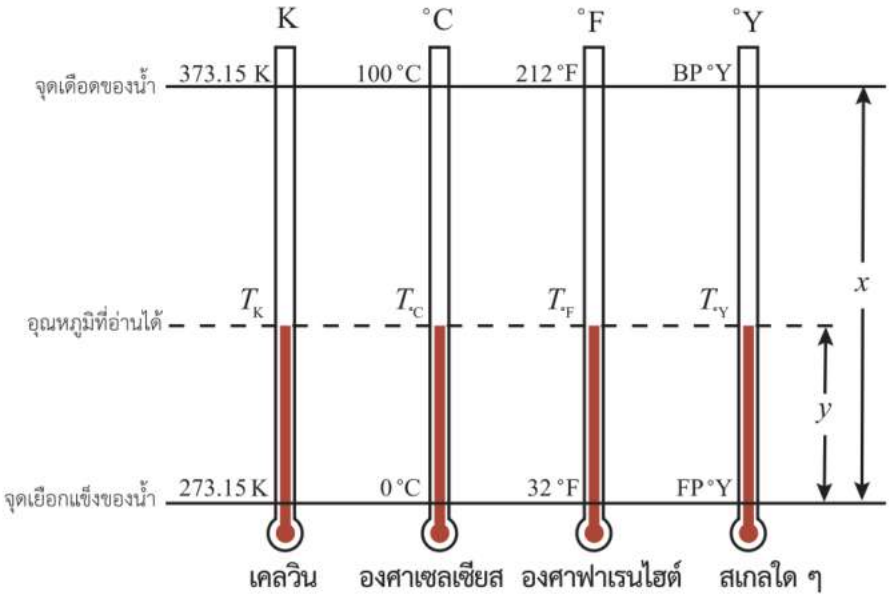
100 ช่องเซลเซียส = 180 ช่องฟาเรนไฮต์

หรือ 1 ช่องเซลเซียส $= \frac{9}{5}$ ช่องฟาเรนไฮต์

สำหรับงานด้านวิทยาศาสตร์ นิยมใช้**สเกลสัมบูรณ์** (absolute scale) หรือ **สเกลเคลวิน** (Kelvin scale) โดยแต่ละช่องสเกลเรียกว่า **เคลวิน** (Kelvin, K) แต่ละสเกลเคลวินมีช่องกว้างเท่ากับสเกลเซลเซียส แต่จุดมาตรฐานล่างและจุดมาตรฐานบนอยู่ที่ 273.15 เคลวิน และ 313.15 เคลวิน ตามลำดับ และเรียกอุณหภูมิที่ 0 เคลวิน ว่า **ศูนย์สัมบูรณ์** (absolute zero)

การเปรียบเทียบหน่วยของอุณหภูมิบนเทอร์มอมิเตอร์

เพื่อความสะดวกในการทำความเข้าใจหลักการเทียบอุณหภูมิ สมมติว่าเทอร์มอมิเตอร์ทุกแบบมีขนาดเท่ากันและใช้น้ำบริสุทธิ์เป็นตัวกำหนดจุดมาตรฐานบนและจุดมาตรฐานล่างเหมือนกัน จะทำให้ระยะระหว่างจุดทั้งสองเท่ากันทุกแบบ แตกต่างกันที่การแบ่งจำนวนช่องตามสเกลแต่ละชนิด ดังรูป ก.2



รูป ก.2 เปรียบเทียบหน่วยของอุณหภูมิบนเทอร์มอมิเตอร์

จากรูป ก.2 เมื่อนำเทอร์มอมิเตอร์ไปวัดอุณหภูมิของวัตถุก้อนเดียวกัน ของเหลวก็จะขึ้นสูงเท่ากันด้วย ถ้าให้ T_K เป็นอุณหภูมิที่อ่านได้ในหน่วยเคลวิน และ $t_{°C}$ เป็นอุณหภูมิที่อ่านได้ในหน่วยองศาเซลเซียส ซึ่งจะเห็นได้ว่า อัตราส่วนความยาวของลำของเหลวระหว่างจุดเยือกแข็งและอุณหภูมิที่อ่านได้ของเทอร์มอมิเตอร์ใด ๆ กับความยาวของลำของเหลวระหว่างจุดเยือกแข็งและจุดเดือดของน้ำจะเท่ากับ $\frac{y}{x}$ นั่นคือ

$$\frac{y}{x} = \frac{T_K - 273.15\ \text{K}}{373.15\ \text{K} - 273.15\ \text{K}} = \frac{t_{°C} - 0\ °\text{C}}{100\ °\text{C} - 0\ °\text{C}}$$

$$T_K - 273.15\ \text{K} = \frac{100\ \text{K}}{100\ °\text{C}} t_{°C}$$

$$T_K = \left(1\frac{\text{K}}{°\text{C}}\right) t_{°C} + 273.15\ \text{K}$$

หรือเขียนอย่างง่าย จะได้ $T_K = t_{°C} + 273.15$

การใช้สมการอย่างง่ายดังกล่าวจะไม่กำกับหน่วยของอุณหภูมิเดิมและผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นอุณหภูมิของหน่วยใหม่เสมอ เช่น อุณหภูมิ $t_{\circ C} = 20\ ^{\circ}\text{C}$ จะได้ $T_K = (20+273.15)\ \text{K} = 293.15\ \text{K}$ และสำหรับอุณหภูมิในสเกลอื่นๆ เช่น $t_{\circ F}$ เป็นอุณหภูมิที่อ่านได้ในหน่วยองศาฟาเรนไฮต์ และ $t_{\circ Y}$ เป็นอุณหภูมิที่อ่านได้ในสเกลใด ๆ ก็สามารถเปรียบเทียบหน่วยได้เช่นเดียวกัน คือ

$$\frac{T_K - 273.15}{373.15 - 273.15} = \frac{t_{\circ C} - 0}{100 - 0} = \frac{t_{\circ F} - 32}{180 - 0} = \frac{t_{\circ Y} - FP}{BP - FP}$$

$$\frac{T_K - 273.15}{100} = \frac{t_{\circ C} - 0}{100} = \frac{t_{\circ F} - 32}{180} = \frac{t_{\circ Y} - FP}{BP - FP}$$

ดังนั้น

$$\frac{T_K - 273.15}{5} = \frac{t_{\circ C} - 0}{5} = \frac{t_{\circ F} - 32}{9} = \frac{20(t_{\circ Y} - FP)}{BP - FP}$$

ตัวอย่าง จงเปลี่ยนอุณหภูมิต่อไปนี้ให้เป็นอุณหภูมิในหน่วยองศาฟาเรนไฮต์

ก. อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

ข. อุณหภูมิ 323.15 เคลวิน

วิธีทำ ก. จาก $\frac{t_{\circ F} - 32}{9} = \frac{t_{\circ C} - 0}{5}$

แทนค่า $\frac{t_{\circ F} - 32}{9} = \frac{30 - 0}{5}$

$$t_{\circ F} = (30\frac{9}{5} + 32)\ ^{\circ}\text{F}$$

ดังนั้น $t_{\circ F} = 86\ ^{\circ}\text{F}$

ข. จาก $\frac{t_{\circ F} - 32}{9} = \frac{T_K - 273.15}{5}$

แทนค่า $\frac{t_{\circ F} - 32}{9} = \frac{323.15 - 273.15}{5}$

$$\frac{t_{\circ F} - 32}{9} = \frac{50}{5}$$

$$t_{\circ F} = (50\frac{9}{5} + 32)\ ^{\circ}\text{F}$$

ดังนั้น $t_{\circ F} = 122\ ^{\circ}\text{F}$

ตอบ ก. อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เท่ากับ 86 องศาฟาเรนไฮต์

ข. อุณหภูมิ 323.15 เคลวิน เท่ากับ 122 องศาฟาเรนไฮต์

ภาคผนวก ข 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) โดยหารตัวเศษด้วยตัวส่วนหรือแสดงในรูปร้อยละหรือเปอร์เซ็นต์ (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)

บางครั้งปริมาณสองปริมาณอาจมีความสัมพันธ์ในลักษณะที่เมื่อปริมาณหนึ่งเพิ่ม 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

ขั้นตอนต่อไปคือ เปลี่ยนการแปรผัน (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 และ 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

$$a^0 = 1 \text{ , } a^1 = a \text{ , } \frac{1}{a^p} = a^{-p}$$

สำหรับ a และb เป็นจำนวนเต็มและไม่เท่ากับศูนย์ r , s และ t เป็นจำนวนเต็ม จะได้

$$a^r a^s = a^{r+s}, (a^r)^s = a^{rs}, \frac{a^r}{a^s} = a^{r-s} \text{ , } (ab)^r = a^r b^r \text{ , } (a^r b^s)^t = a^{rt} b^{st}$$

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 แทนปริมาณที่ไม่ทราบค่าหรือตัวไม่รู้ค่า (unknown) เราต้องแก้สมการเพื่อหาค่าของปริมาณหรือตัวไม่รู้ค่านั้น

การแก้สมการที่มีตัวไม่รู้ค่า 1 ตัว

ในการแก้สมการที่มีตัวไม่รู้ค่า 1 ตัว เช่น $2x + 5 = 8$ ให้จัดกระทำกับสมการโดยอาศัยหลักการได้แก่ (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]

$$x-2y = 4$$

$$x = 4+2y \qquad \text{[บวกทั้งสองข้างด้วย } 2y\text{]}$$

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 $x = 2(-1)+4 = 2$

ตอบ $x = 2$ 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 $x = \dfrac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$

$$x = \frac{-3 \pm \sqrt{3^2 - 4(1)(2)}}{2(1)} = \frac{-3 \pm \sqrt{1}}{2} = \frac{-3 \pm 1}{2}$$

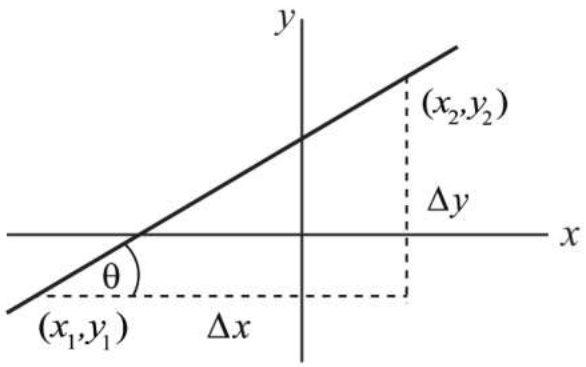
$$x = \frac{-3+1}{2} = -1 \text{ และ } x = \frac{-3-1}{2} = -2$$

$$x = -1, -2$$

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 ข.1



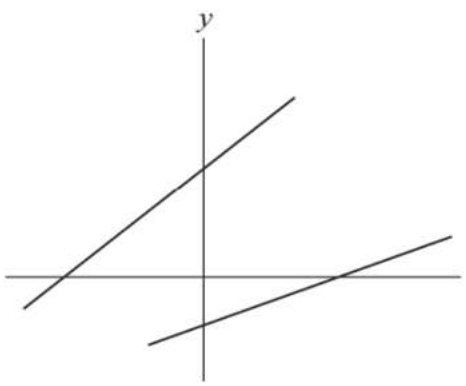
รูป ข.1

ตัวคงค่า b เรียกว่า ระยะตัดแกน y (y-intercept) เป็นค่าของ y ที่เส้นตรงตัดกับแกน y ตัวคงค่า m เท่ากับ ความชัน (slope, gradient) ของเส้นตรง และเท่ากับ tan ของมุมที่เส้นตรงทำกับแกน x (ในกรณีแกนทั้งสองใช้สเกลเดียวกัน)

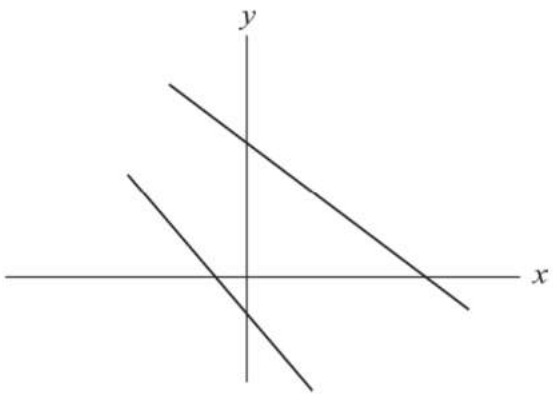
ถ้า (x_1, y_1) และ (x_2, y_2) เป็นจุดสองจุดบนเส้นตรง ดังรูป ข.1 ความชันของเส้นตรงมีค่าดังนี้

$$\text{ความชัน} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \tan\theta$$

ถ้า $m > 0$ เส้นตรงมีความชันเป็นบวก ดังรูป ข.2 ถ้า $m < 0$ เส้นตรงมีความชันเป็นลบ ดังรูป ข.3 สังเกตว่า m และ b มีค่าได้ทั้งบวกและลบ



รูป ข.2 $m > 0$

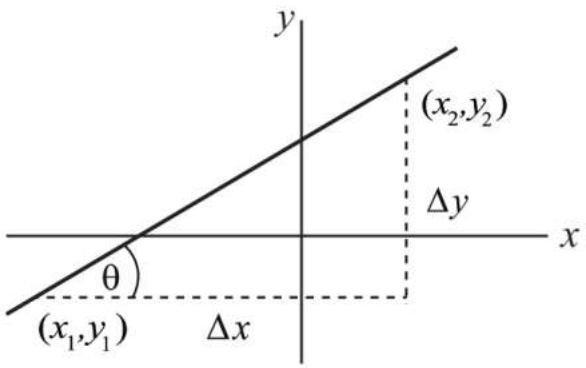


รูป ข.3 $m < 0$

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 ข.4

3.2 ข้อมูลรูปทรงทางเรขาคณิต

ข้อมูลเกี่ยวกับรูปทรงทางเรขาคณิต ได้แก่ เส้นรอบรูป พื้นที่ พื้นที่ผิวและปริมาตร แสดงในตาราง ข.1

ตาราง ข.1 ข้อมูลรูปทรงทางเรขาคณิต

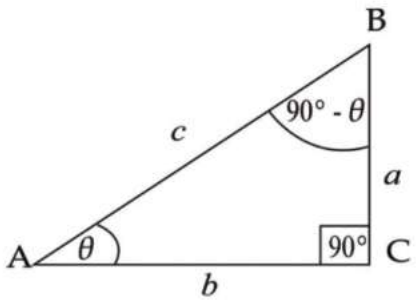
รูปทรง	เส้นรอบรูป	พื้นที่	พื้นที่ผิว	ปริมาตร
วงกลม รัศมี r	$2\pi r$	πr^2		
จัตุรัส ความยาวด้าน a	$4a$	a^2		
สี่เหลี่ยมผืนผ้า ยาว l กว้าง w	$2l + 2w$	lw		
สามเหลี่ยม ฐาน a สูง h		$\frac{1}{2}ah$		
ทรงกระบอก รัศมี r สูง h			$2\pi rh + 2\pi r^2$	$\pi r^2 h$
ทรงกลม รัศมี r			$4\pi r^2$	$\frac{4}{3}\pi r^3$
ลูกบาศก์ ความยาวด้าน a			$6a^2$	a^3

3.3 ทฤษฎีบทพีทาโกรัส

ทฤษฎีบทพีทาโกรัส (Pythagoras' theorem) เป็นทฤษฎีบทที่เกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างด้านทั้งสามของสามเหลี่ยมมุมฉาก กล่าวว่า ในสามเหลี่ยมมุมฉากใด ๆ ผลรวมของพื้นที่จัตุรัสบนด้านประกอบมุมฉากเท่ากับพื้นที่ของจัตุรัสบนด้านตรงข้ามมุมฉาก

ถ้า a และ b แทนความยาวของด้านประกอบมุมฉากและ c แทนความยาวของด้านตรงข้ามมุมฉาก ดังรูป ข.5 จะเขียนทฤษฎีบทพีทาโกรัส ในรูปสมการได้ดังนี้

$$c^2 = a^2 + b^2 \quad \text{หรือ} \quad c = \sqrt{a^2 + b^2}$$



รูป ข.5

ตัวอย่าง จงหาความยาว c ของด้าน AB ของสามเหลี่ยมมุมฉาก ABC ในรูป ข.5 เมื่อ a เท่ากับ 3 เซนติเมตร และ b เท่ากับ 4 เซนติเมตร

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

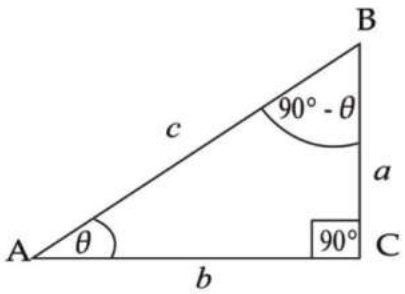
c เป็นความยาวของด้านตรงข้ามมุมฉาก

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 ข.6

จากสามเหลี่ยมมุมฉาก ในรูป ข.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

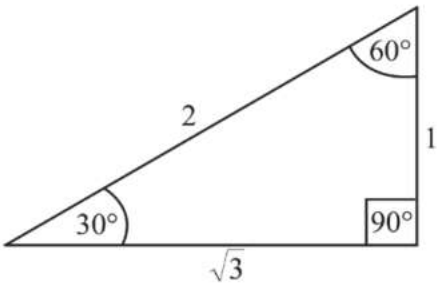
$\sin^2\theta + \cos^2\theta = 1$, $\sec^2\theta - \tan^2\theta = 1$, $\csc^2\theta - \cot^2\theta = 1$

ความสัมพันธ์อื่น ๆ ของฟังก์ชันตรีโกณมิติ

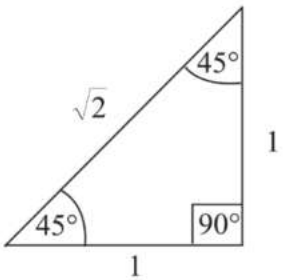
$\sin 2\theta = 2\sin\theta\cos\theta$	$\sin(A \pm B) = \sin A\cos B \pm \cos A\sin B$
$\cos 2\theta = \cos^2\theta - \sin^2\theta$	$\cos(A \pm B) = \cos A\cos B \mp \sin A\sin B$
$\tan 2\theta = \dfrac{2\tan\theta}{1 - \tan^2\theta}$	$\tan(A \pm B) = \dfrac{\tan A \pm \tan B}{1 \mp \tan A\tan B}$

ฟังก์ชันตรีโกณมิติของมุมที่พบบ่อย

สามเหลี่ยมมุมฉากที่พบบ่อยคือสามเหลี่ยมมุมฉากที่มีมุม $30^\circ - 60^\circ - 90^\circ$ และ $45^\circ - 45^\circ - 90^\circ$ สามเหลี่ยมทั้งสองมีความยาวของด้านทั้งสามดังรูป ข.7 และ ข.8 ฟังก์ชันตรีโกณมิติของมุมต่าง ๆ มีค่าดังตาราง ข.2 [ถ้าจำได้ จะช่วยแก้ปัญหาทางฟิสิกส์ได้เร็วขึ้น]

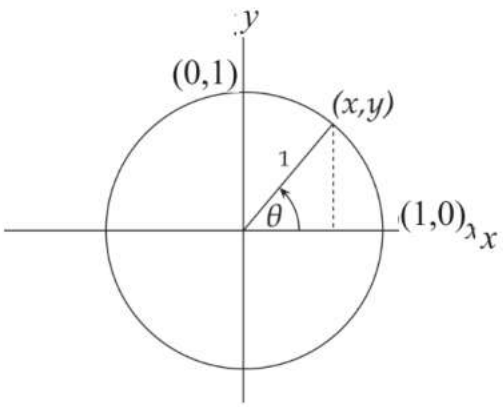


รูป ข.7 สามเหลี่ยมมุมฉาก 30°-60°-90°



รูป ข.8 สามเหลี่ยมมุมฉาก 45°-45°-90°

ส่วนฟังก์ชันตรีโกณมิติของมุมอื่น ๆ ที่พบบ่อย เช่น 90° 120° 180° หาได้จากค่าของ x และ y บนส่วนโค้งของวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วย ดังรูป ข. 9 โดย $\sin\theta = y$ $\cos\theta = x$ และ $\tan\theta = \frac{y}{x}$ เช่น ที่ $\theta = 90^\circ$ $x = 0$ $y = 1$ ได้ $\sin 90^\circ = 1$ $\cos 90^\circ = 0$ และ $\tan 90^\circ = \infty$



รูป ข.9 วงกลมรัศมีหนึ่งหน่วย

ตาราง ข.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 ข. 2 ซึ่งสามารถหาค่าของฟังก์ชันตรีโกณมิติของมุมต่าง ๆ ได้จาก ภาคผนวก ง 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 ข.10 ด้านและมุมภายในของสามเหลี่ยมมีความสัมพันธ์กันดังนี้

กฎของไซน์ (law of sines)

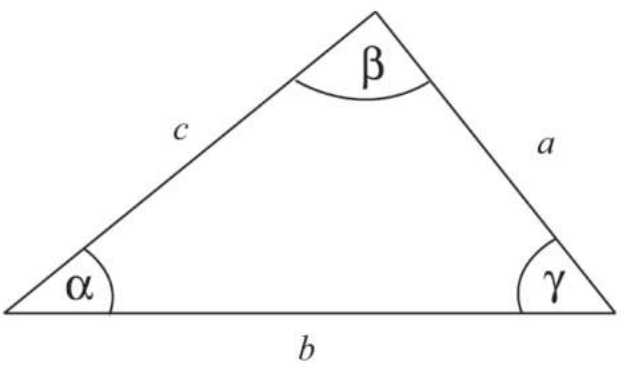
$$\frac{a}{\sin\alpha} = \frac{b}{\sin\beta} = \frac{c}{\sin\gamma}$$

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 ข.10

ภาคผนวก ค 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 ค.1

ตาราง ค.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 ค.2

ตาราง ค.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 ค.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 6 000 000 วัตต์ เขียนเป็น 6×10^6 วัตต์ ตัวคูณ 10^{-6} และ 10^6 ให้เขียนแทนด้วยคำนำหน้าหน่วย ไมโครและเมกะ กำกับไว้หน้าแอมแปร์และวัตต์ ตามลำดับ คำนำหน้าหน่วยที่ใช้แทนตัวคูณและสัญลักษณ์แสดงไว้ในตาราง ค.3

ตาราง ค.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 จะถือว่าได้สัญลักษณ์ใหม่เป็นสัญลักษณ์เดี่ยว เมื่อนำไปยกกำลังไม่ต้องใส่วงเล็บ เช่น mm^3, μs^{-1}, GHz^{-1}

ภาคผนวก ง 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 จ 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 ฉ 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

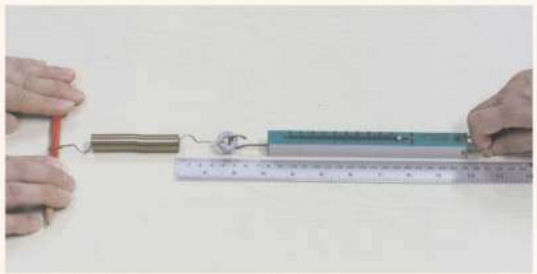
1. เขียนและวิเคราะห์กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้ดึงสปริงกับระยะที่สปริงยืดออกจากตำแหน่งสมดุล
2. อภิปรายเพื่อสรุปเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้ดึงสปริงกับระยะที่สปริงยืดออกจากตำแหน่งสมดุล
3. อภิปรายเพื่อสรุปเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างงานของแรงที่ใช้ดึงสปริงกับพลังงานศักย์ยืดหยุ่นของสปริง

วัสดุและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่งสปริง 1 เครื่อง
2. สปริง 1 อัน
3. ไม้บรรทัด 1 อัน
4. นอต 1 ตัว

วิธีทำกิจกรรม

1. ยึดนอตกับปลายสปริงด้านหนึ่งแล้วยึดปลายสปริงอีกด้านไว้กับดินสอ จากนั้นใช้ตะขอของเครื่องชั่งสปริงเกี่ยวนอตตัวเดียวกันไว้ แล้ววางสปริงและเครื่องชั่งสปริงให้อยู่ในแนวขนานกับไม้บรรทัด ให้ปลายสุดของสปริงด้านที่เกี่ยวกับเครื่องชั่งสปริงอยู่ตรงขีดศูนย์ของไม้บรรทัด ดังแสดงในรูปด้านล่าง



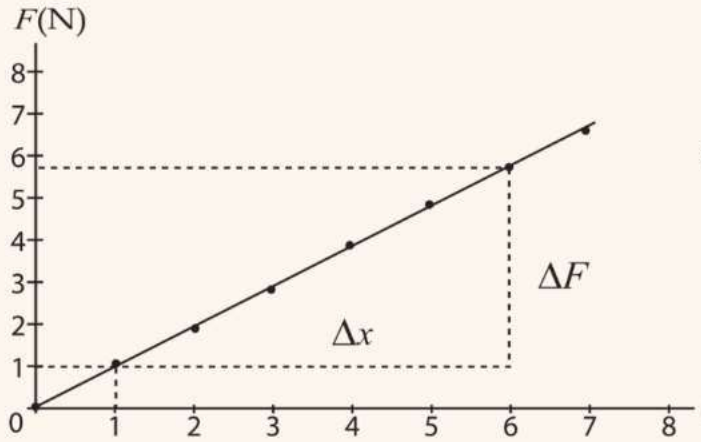
รูป การจัดอุปกรณ์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของแรงที่ใช้ดึงสปริงกับระยะที่สปริงยืดออก

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 เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของแรงที่ใช้ดึงสปริงกับระยะที่สปริงยืดออกจะได้เส้นตรงผ่านจุดกำเนิด 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 ช 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

$$\log N = 0.4343 \ln N \quad \text{หรือ} \quad (4)$$

$$\ln N = 2.3026 \log N \quad (5)$$

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 ช.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

$$\log N = 3 + 0.748$$

$$= \log(10^3) + \log(5.6) = \log(5.6\times10^3) = \log(5600)$$

$$N = 5600$$

ตอบ N เท่ากับ 5600

คำศัพท์

บทที่ 15

แม่เหล็ก (magnet)
แสงเหนือ (northern light หรือ aurora borealis)
แสงใต้ (southern light หรือ aurora australis)
แมกนีไทต์ (magnetite)
ขั้วเหนือ (North pole)
ขั้วใต้ (South pole)
ขั้วแม่เหล็กโลก (geomagnetic pole)
ขั้วเหนือทางภูมิศาสตร์ (geographical north pole)
ขั้วใต้ทางภูมิศาสตร์ (geographical south pole)
สารแม่เหล็ก (magnetic substance)
ขั้วแม่เหล็ก (magnetic pole)
สนามแม่เหล็ก (magnetic field)
เส้นสนามแม่เหล็ก (magnetic field lines)
จุดสะเทิน (neutral point)
ฟลักซ์แม่เหล็ก (magnetic flux)
ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (magnetic flux density)
โซเลนอยด์ (solenoid)
สารเรืองแสง (phosphor)
แรงแม่เหล็ก (magnetic force)
ลักษณะการเคลื่อนที่เป็นเกลียว (helical path)
ออโรรา (aurora)
ลมสุริยะ(solar wind)
แกลแวนอมิเตอร์ (galvanometer)
คอมมิวเทเตอร์วงแหวนผ่าซีก (split-ring commutator)
แปรงสัมผัส (contact brush)
กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (induced electric current)
การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic induction)
กฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ (Faraday's Law of induction)
อีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำ (induced electromotive force)
กฎของเลนซ์ (Lenz's law)
กระแสตรง (Direct Current : DC)
กระแสสลับ (Alternating Current : AC)
อีเอ็มเอฟกลับ (back emf)
มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (induction motors)
กระแสไฟฟ้าวน (eddy current)
ค่ายังผล (effective value)
ค่ามิเตอร์ (meter value)
ค่าเฉลี่ยแบบรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (root mean square)
ค่าอาร์เอ็มเอส (rms value)
หม้อแปลง (transformer)
ขดลวดปฐมภูมิ (primary winding)
ขดลวดทุติยภูมิ (secondary winding)
หม้อแปลงขึ้น (step-up transformer)
หม้อแปลงลง (step-down transformer)

บทที่ 16

อุณหพลศาสตร์ (thermodynamics)
อุณหภูมิ (temperature)
เทอร์มอมิเตอร์ (thermometer)
องศาเซลเซียส (degree Celsius)
เคลวิน (Kelvin)
อุณหภูมิสัมบูรณ์ (absolute temperature)
ความจุความร้อน (heat capacity)
ความร้อนจำเพาะ (specific heat)
ความร้อนแฝง (latent heat)
ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (latent heat of fusion)
ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (latent heat of vaporisation)
การนำความร้อน (heat conduction)
การพาความร้อน (heat convection)
การแผ่รังสีความร้อน (heat radiation)
สมดุลความร้อน (thermal equilibrium)
แก๊สอุดมคติ (ideal gas)
กฎของบอยล์ (Boyle's law)
กฎของชาร์ล (Charles' law)
กฎของเกย์-ลูแซก (Gay-Lussac's law)
กฎของแก๊สอุดมคติ (ideal gas law)
ทฤษฎีจลน์ของแก๊ส (kinetic theory of gases)
อัตราเร็วอาร์เอ็มเอส (root-mean-square speed)
พลังงานภายใน (internal energy)
งานที่ทำโดยแก๊ส (work done by gas)
งานที่ทำต่อแก๊ส (work done on gas)

บทที่ 16 (ต่อ)

กฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ (first law of thermodynamics)
ความร้อน (heat)
เครื่องยนต์ความร้อน (heat engine)
เครื่องยนต์สันดาปภายนอก (external combustion engine)
เครื่องยนต์สันดาปภายใน (internal combustion engine)

บทที่ 17

การผิดรูป (deformation)
สภาพพลาสติก (plasticity)
สภาพยืดหยุ่น (elasticity)
ความเค้นดึง (tensile stress)
ความเค้นอัด (compressive stress)
ความเค้นตามยาว (longitudinal stress)
ความเค้นเฉือน (shear stress)
มอดุลัสของยัง (Young's modulus)
ขีดจำกัดการแปรผันตรง (proportional limit)
ขีดจำกัดสภาพยืดหยุ่น (elastic limit)
สภาพพลาสติก (plasticity)
จุดแตกหัก (breaking point)
ความตึงผิว (Surface tension)
การโค้งของผิวของเหลว (meniscus effect)
แรงระหว่างโมเลกุล (intermolecular force)
แรงยึดติด (adhesive force)
หลอดรูเล็ก (capillary tube)
การซึมตามรูเล็ก (capillary action)
ความหนืด (Viscosity)
แรงหนืด (Viscous force)
ของไหล (fluid)
ความดัน (pressure)
ความดันบรรยากาศ (Atmosphere pressure)
ความดันสัมบูรณ์ (Absolute pressure)
ความดันเกจ (Gauge pressure)
บารอมิเตอร์ (Barometer)
แมนอมิเตอร์ (Manometer)
กฎพาสคัล (Pascal's law)
แรงพยุง (buoyant force)
สมการแบร์นูลลี (Bernoulli's equation)

บรรณานุกรม

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. (2556). **หนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติม ฟิสิกส์ เล่ม 2** (พิมพ์ครั้งที่ 3). กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์ สกสค. ลาดพร้าว.

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. (2556). **หนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติม ฟิสิกส์ เล่ม 4** (พิมพ์ครั้งที่ 3). กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์ สกสค. ลาดพร้าว.

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. (2556). **หนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติม ฟิสิกส์ เล่ม 5** (พิมพ์ครั้งที่ 11). กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์ สกสค. ลาดพร้าว.

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. (2556). **มาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้าสำหรับประเทศไทย พ.ศ. 2556** (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ : ม.ป.ท.

สำนักงานราชบัณฑิตยสภา. (2546). **ศัพท์วิทยาศาสตร์ อังกฤษ-ไทย ไทย-อังกฤษ ฉบับราชบัณฑิตยสถาน** (พิมพ์ครั้งที่ 5 แก้ไขเพิ่มเติม). กรุงเทพฯ : ห้างหุ้นส่วนจำกัด อรุณการพิมพ์.

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.** (10th 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
1	รูปนำบท ออโรรา	สถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน)
81	รูป 15.55 ปิ๊กอัพที่ใช้กับกีตาร์เพื่อรับสัญญาณไฟฟ้าจากการสั่นของสายกีตาร์	Pixabay_2925282
191	รูปนำบท สะพานภูมิพล	shutterstock_1378325669

คณะผู้จัดทำหนังสือเรียน รายวิชาเพิ่มเติมวิทยาสตร์และเทคโนโลยี ฟิสิกส์ ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 เล่ม 5 ตามผลการเรียนรู้ กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. 2560) ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช 2551

คณะที่ปรึกษา

1. ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์	ผู้อำนวยการสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
2. ดร.วนิดา ธนประโยชน์ศักดิ์	ผู้ช่วยผู้อำนวยการสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

คณะผู้จัดทำหนังสือเรียน รายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ฟิสิกส์ ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 เล่ม 5

1. ผศ. ดร.บุรินทร์ อัศวพิภพ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2. ผศ. ดร.นฤมล สุวรรณจันทร์ดี	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
3. รศ. ดร.พวงรัตน์ ไพเราะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
4. ผศ. ดร.พรรัตน์ วัฒนกสิวิชช์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
5. รศ. ดร.วิวัธน์ ยังดี	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
6. นายสุมิตร สวนสุข	โรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร
7. นายรังสรรค์ ศรีสาคร	ผู้เชี่ยวชาญ สาขาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์โลก สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
8. นายบุญชัย ตันไถง	ผู้ชำนาญ สาขาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์โลก สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
9. นายวัฒนะ มากชื่น	ผู้ชำนาญ สาขาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์โลก สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
10. นายโฆสิต สิงหสุต	ผู้ชำนาญ สาขาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์โลก สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

คณะผู้จัดทำหนังสือเรียน รายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ฟิสิกส์ ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 เล่ม 5 (ต่อ)

11. นายวินัย เลิศเกษมสันต์	ผู้ชำนาญ สาขาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์โลก สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
12. นายรักษพล ธนานุวงศ์	นักวิชาการอาวุโส สาขาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์โลก สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
13. ดร.กวิน เชื่อมกลาง	นักวิชาการอาวุโส สาขาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์โลก สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
14. ดร.ปรีดา พัชรมณีกรณ์	นักวิชาการ สาขาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์โลก สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
15. ดร.จำเริญตา ปริญญาธารมาศ	นักวิชาการ สาขาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์โลก สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
16. นายเทพนคร แสงหัวช้าง	นักวิชาการ สาขาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์โลก สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
17. นายจอมพรรค นวลดี	นักวิชาการ สาขาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์โลก สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
18. นายสรจิตต์ อารีรัตน์	นักวิชาการ สาขาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์โลก สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
19. นายธนะรัชต์ คัณทักษ์	นักวิชาการ สาขาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์โลก สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

คณะผู้ร่วมพิจารณาหนังสือเรียน รายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ฟิสิกส์ ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 เล่ม 5 (ฉบับร่าง)

1. นายประสิทธิ์ สลัดทุกข์	นักวิชาการอิสระ
2. นายพลพิพัฒน์ วัฒนเศรษฐานุกูล	สำนักงานเขตพื้นที่การศึกษามัธยมศึกษาเขต 2 กรุงเทพมหานคร
3. นายชรินทร์ วัฒนธีรางกูร	โรงเรียนพระปฐมวิทยาลัย จ.นครปฐม
4. นางสาวกวิสรา อุ่นไธสง	โรงเรียนปทุมคงคา กรุงเทพมหานคร
5. นางจารุณี จิตสุภานันท์	โรงเรียนย่านตาขาวรัฐชนูปถัมภ์ จ.ตรัง
6. นายเมธี มีแก้ว	โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาพัฒนาการ จ.ประจวบคีรีขันธ์
7. นายวีรภัทร์ โปณะทอง	โรงเรียนภูเก็ตวิทยาลัย จ.ภูเก็ต
8. นางสาวสายชล สุขโข	โรงเรียนจ่านกร้อง จ.พิษณุโลก
9. นายนิกรณ์ นิลพงษ์	โรงเรียนศรีคูณวิทยบัลลังก์ จ.อำนาจเจริญ
10. นางฤทัย เพลงวัฒนา	รักษาการผู้อำนวยการสาขาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์โลก สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
11. ดร.นันท์นภัส ลิ้มสันติธรรม	ผู้ชำนาญสาขาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์โลก สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

คณะบรรณาธิการ

1. รศ. ดร.ณสรรค์ ผลโภค	นักวิชาการอิสระ
2. ดร.ศักดิ์ สุวรรณฉาย	นักวิชาการอิสระ
3. ผศ. ดร.บุรินทร์ อัศวพิภพ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
4. ผศ. ดร.เดชา ศุภพิทยาภรณ์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
5. ผศ. ดร.ประสงค์ เกษราธิคุณ	มหาวิทยาลัยทักษิณ
6. นายบุญชัย ตันไถง	ผู้ชำนาญ สาขาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์โลก สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
7. นายวัฒนะ มากชื่น	ผู้ชำนาญ สาขาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์โลก สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
8. นายโฆสิต สิงหสุต	ผู้ชำนาญ สาขาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์โลก 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