



หนังสือเรียน

รายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ฟิสิกส์

ชั้น

มัธยมศึกษาปีที่ ๖ เล่ม ๕

ตามผลการเรียนรู้

กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐)

ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช ๒๕๕๑

จัดทำโดย

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กระทรวงศึกษาธิการ

พิมพ์ครั้งที่ ๕

ISBN 978-616-576-369-1

จำนวน ๑๐๐,๐๐๐ เล่ม พ.ศ. ๒๕๖๖

จัดจำหน่ายโดย

องค์การค้าของ สกสค. พิมพ์ที่โรงพิมพ์ สกสค. ลาดพร้าว

๒๒๔๙ ถนนลาดพร้าว วังทองหลาง กรุงเทพมหานคร

❖ มีลิขสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติ



ประกาศสำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน
เรื่อง อนุญาตให้ใช้สื่อการเรียนรู้ในสถานศึกษา

ด้วยสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) ได้จัดทำหนังสือเรียน รายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ฟิสิกส์ ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ ๖ เล่ม ๕ ตามผลการเรียนรู้ กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐) ตามหลักสูตรแกนกลาง การศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช ๒๕๕๑ สำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน ได้พิจารณาแล้ว อนุญาตให้ใช้ในสถานศึกษาได้

ประกาศ ณ วันที่ ๕ มกราคม พ.ศ. ๒๕๖๗

ว่าที่ร้อยตรี

(ธนู วงษ์จินดา)

เลขาธิการคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน

คำนำ

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) มีอำนาจหน้าที่ในการพัฒนาหลักสูตร วิธีการเรียนรู้ การประเมินผล การจัดทำหนังสือเรียน แบบฝึกหัด และสื่อการเรียนรู้ทุกประเภทที่ใช้ประกอบการเรียนรู้ในกลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของการจัดการศึกษาขั้นพื้นฐาน

หนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ฟิสิกส์ ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ ๖ เล่ม ๕ นี้ สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) จัดทำขึ้นตามผลการเรียนรู้กลุ่มสาระการเรียนรู้ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐) ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช ๒๕๕๑ เพื่อให้สถานศึกษาพิจารณาเทียบเคียงกับหลักสูตรสถานศึกษา และพิจารณาเลือกใช้ หนังสือนี้ประกอบการจัดการเรียนรู้ให้สอดคล้องกับหลักสูตรสถานศึกษาของตนได้ตามความเหมาะสม

กระทรวงศึกษาธิการหวังเป็นอย่างยิ่งว่า หนังสือเรียนเล่มนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการจัดการเรียนรู้ ในรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และเป็นส่วนสำคัญในการพัฒนาคุณภาพและมาตรฐาน การศึกษา กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ขอขอบคุณสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี ตลอดจนบุคคลและหน่วยงานอื่น ๆ ที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการจัดทำไว้ ณ โอกาสนี้

ว่าที่ร้อยตรี



(ธนุ วงษ์จินดา)

เลขาธิการคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน

คำชี้แจง

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) ได้จัดทำตัวชี้วัดและสาระการเรียนรู้แกนกลาง กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐) ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช ๒๕๕๑ โดยมีจุดเน้นเพื่อพัฒนาผู้เรียนให้มีความรู้ความสามารถที่ทัดเทียมกับนานาชาติ ได้เรียนรู้วิทยาศาสตร์ที่เชื่อมโยงความรู้อันซับซ้อน กระบวนการ ใช้กระบวนการสืบเสาะหาความรู้และแก้ปัญหาที่หลากหลาย มีการทำกิจกรรมด้วยการลงมือปฏิบัติ เพื่อให้ผู้เรียนได้ใช้ทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์และทักษะแห่งศตวรรษที่ 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 และในขณะเดียวกันก็สามารถต่อยอดเนื้อหาจากรายวิชาพื้นฐานไปสู่เนื้อหาวิชาเพิ่มเติมได้โดยไม่ต้องเสียเวลาเรียนซ้ำซ้อน ทั้งนี้ หนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ฟิสิกส์ เล่ม ๕ นี้ มีเนื้อหาที่จำเป็นที่ต้องเรียน ประกอบด้วยเรื่อง แม่เหล็ก โมเมนต์ของแรงคู่ควบกระทำต่อขดลวดที่มีกระแสไฟฟ้าผ่านเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ อีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำ ไฟฟ้ากระแสสลับ ความร้อน ทฤษฎีจลน์ของแก๊สของแข็งและของไหล ซึ่งเป็นพื้นฐานที่สำคัญสำหรับการศึกษาต่อในระดับอุดมศึกษาในด้านวิทยาศาสตร์ หรือประกอบอาชีพในสาขาที่วิทยาศาสตร์เป็นฐาน เช่น แพทย์ วิศวกร สถาปนิก นักอุตุนิยมวิทยา นักธรณีวิทยา ฯลฯ โดยเน้นกระบวนการคิดวิเคราะห์และการแก้ปัญหา เชื่อมโยงความรู้สู่การนำไปใช้ในชีวิตจริง ผู้เรียนจะได้ทำกิจกรรมที่เป็นพื้นฐานที่สำคัญ รวมทั้งกิจกรรมที่ผู้เรียนสามารถคิดค้นและออกแบบการทดลองด้วยตนเอง มีแบบตรวจสอบความรู้ความเข้าใจก่อนเรียน มีแบบฝึกหัดเพื่อให้ตรวจทานความรู้หลังจากที่เรียนไปแล้ว รวมทั้งสรุปความรู้ในแต่ละบทด้วย ในการจัดทำหนังสือเรียนเล่มนี้ได้รับความร่วมมือเป็นอย่างดีจากผู้ทรงคุณวุฒิ นักวิชาการอิสระ คณาจารย์ทั้งหลาย รวมทั้งครูผู้สอน นักวิชาการ จากสถาบันและสถานศึกษาทั้งภาครัฐและเอกชน จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

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

ดร. ธีร

(รองศาสตราจารย์ธีระเดช เกียรติสุกุล)

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 แรงพยาง 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 รวมทั้งคำนวณปริมาณต่างๆที่เกี่ยวข้อง
๔. สังเกตและอธิบายการเกิดอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำ กฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ และคำนวณปริมาณต่างๆที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งนำความรู้เรื่องอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำไปอธิบายการทำงานของเครื่องใช้ไฟฟ้า
๕. อธิบายและคำนวณความต่างศักย์อาร์เอ็มเอส และกระแสไฟฟ้าอาร์เอ็มเอส
๖. อธิบายหลักการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ 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 และมอดูลัสของยัง และนำความรู้เรื่องสภาพยืดหยุ่นไปใช้ในชีวิตประจำวัน
๑๒. อธิบายและคำนวณความดันเกจ ความดันสัมบูรณ์ และความดันบรรยากาศ รวมทั้งอธิบายหลักการทำงานของแมนอมิเตอร์ บารอมิเตอร์ และเครื่องอัดไฮดรอลิก
๑๓. ทดลอง อธิบายและคำนวณขนาดแรงพุงจากของไหล
๑๔. ทดลอง อธิบายและคำนวณความตึงผิวของของเหลว รวมทั้งสังเกตและอธิบายแรงหนืดของของเหลว
๑๕. อธิบายสมบัติของของไหลอุดมคติ สมการความต่อเนื่อง และสมการแบร์นูลลี รวมทั้งคำนวณปริมาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง และนำความรู้เกี่ยวกับสมการความต่อเนื่องและสมการแบร์นูลลีไปอธิบายหลักการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ

รวมทั้งหมด ๑๕ ผลการเรียนรู้

ข้อเสนอแนะทั่วไปในการใช้หนังสือเรียน

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

- คำถามสำคัญ
- จุดประสงค์การเรียนรู้
- ความรู้ก่อนเรียน
- ข้อสังเกต
- ขวนคิด
- 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 ซึ่งนักเรียนสามารถใช้ตรวจสอบความเข้าใจของเนื้อหา และฝึกฝนตนเองให้มีทักษะที่จำเป็นตามจุดประสงค์การเรียนรู้ได้

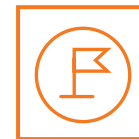
แบบฝึกหัดท้ายบท

ประกอบด้วย 3 ส่วน ดังนี้



คำถาม

คำถามที่เน้นให้นักเรียนตอบโดยการเขียนบรรยายแสดงความเข้าใจจนถึงการวิเคราะห์



ปัญหา

ปัญหาที่มีความซับซ้อนน้อยจนถึงปานกลาง เน้นให้นักเรียนได้ใช้ทักษะการคำนวณ และการแก้ปัญหา



ปัญหาท้าทาย

ปัญหาที่มีความซับซ้อนมาก เน้นให้นักเรียนได้ใช้ทักษะการคิดระดับสูงในการคำนวณ และการแก้ปัญหา

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 สนามแม่เหล็กจากกระแสไฟฟ้าผ่านเส้นลวด ตัวนำ	15
	15.2 แรงแม่เหล็ก	26
	15.2.1 แรงแม่เหล็กกระทำต่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า	26
	15.2.2 แรงแม่เหล็กกระทำต่อลวดตัวนำที่มีกระแส ไฟฟ้าผ่าน	38
	15.2.3 แรงระหว่างลวดตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้า	45
	15.3 โมเมนต์ของแรงคู่ควบกระทำต่อขดลวดที่มีกระแส ไฟฟ้าผ่าน เมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก	53
	15.3.1 โมเมนต์ของแรงคู่ควบ	53
	15.3.2 แกลแวนอมีเตอร์	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 ค่ายังผลของความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้า ของไฟฟ้ากระแสสลับ	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 มอดูลัสของยัง	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		

สารบัญ	ภาคผนวก	
บทที่	เนื้อหา	หน้า
ภาคผนวก	ภาคผนวก ก หน่วยของอุณหภูมิ	255
	ภาคผนวก ข คณิตศาสตร์สำหรับฟิสิกส์	258
	ภาคผนวก ค ระบบหน่วยระหว่างชาติ	269
	ภาคผนวก ง ตารางฟังก์ชันตรีโกณมิติ	272
	ภาคผนวก จ ตารางเลขกำลังสอง	273
	รากที่สองและส่วนกลับ	
	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

- แม่เหล็กเกิดขึ้นได้อย่างไร เกี่ยวข้องกับปริมาณใดบ้างและสัมพันธ์กันอย่างไร
- แม่เหล็กกับไฟฟ้าเกี่ยวข้องกันอย่างไร สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวันอย่างไร



จุดประสงค์การเรียนรู้

15.1 สนามแม่เหล็ก

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

15.2 แรงแม่เหล็ก

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

15.3 โมเมนต์ของแรงคู่ควบกระทำต่อขดลวดที่มีกระแสไฟฟ้าผ่าน เมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก

8. อธิบายและคำนวณโมเมนต์ของแรงคู่ควบกระทำต่อขดลวดตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าผ่านเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก รวมทั้งปริมาณที่เกี่ยวข้อง
9. อธิบายหลักการทำงานของแกลแวนอมิเตอร์ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และคำนวณปริมาณที่เกี่ยวข้อง

15.4 กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำและอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำ

10. สังเกตและอธิบายการเกิดอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำโดยใช้กฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์
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

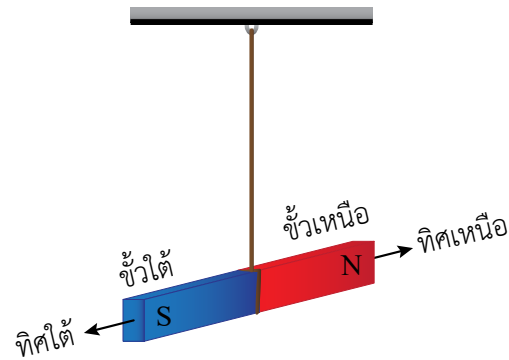
จากการเรียนในบทที่ผ่านมา นักเรียนได้รู้จักสนามไฟฟ้าและปริมาณต่างๆที่เกี่ยวข้องกับสนามไฟฟ้า ในบทนี้จะกล่าวถึงแม่เหล็กและไฟฟ้า โดยนักเรียนจะได้รู้จักกับสนามแม่เหล็ก ผลของสนามแม่เหล็กกับอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กกับตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าผ่าน ความสัมพันธ์ของสนามแม่เหล็กกับปริมาณทางไฟฟ้า รวมทั้งการนำผลของสนามแม่เหล็กไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ

15.1 สนามแม่เหล็ก

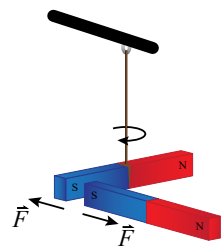
ชาวกรีกโบราณค้นพบแร่ชนิดหนึ่งที่สามารถดึงดูดเหล็กได้ เรียกแร่นั้นว่า **แมกนีไทต์** (magnetite) ปัจจุบันเรียกว่แร่ที่ดึงดูดเหล็กได้ว่า **แม่เหล็ก** (magnet) ด้วยสมบัติการวางตัวของแม่เหล็ก จึงมีการประยุกต์นำไปสร้างเป็นเข็มทิศเพื่อใช้ในการบอกทิศทาง

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

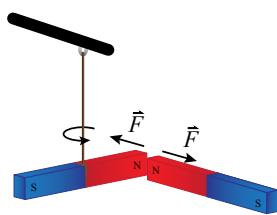
แท่งแม่เหล็กจะมีขั้วเหนือและขั้วใต้เสมอ โดยจะไม่มีแม่เหล็กที่มีเฉพาะขั้วเหนือหรือขั้วใต้เพียงอย่างเดียว เมื่อนำขั้วแม่เหล็กของแท่งแม่เหล็กสองแท่งมาไว้ใกล้กัน ขั้วชนิดเดียวกันจะผลักกัน ขั้วต่างชนิดกันจะดึงดูดกัน ดังรูป 15.2



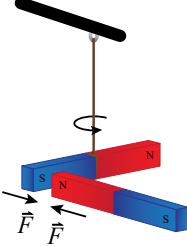
รูป 15.1 แท่งแม่เหล็กจะวางตัวในทิศเหนือ – ทิศใต้ เสมอ



ก. นำขั้วใต้ของแท่งแม่เหล็กมาไว้ใกล้กัน



ข. นำขั้วเหนือของแท่งแม่เหล็กมาไว้ใกล้กัน



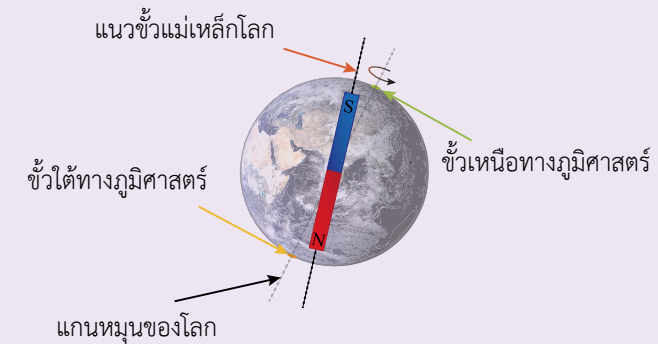
ค. นำขั้วใต้และขั้วเหนือของแท่งแม่เหล็กมาไว้ใกล้กัน

รูป 15.2 แรงระหว่างขั้วแม่เหล็ก



ความรู้เพิ่มเติม

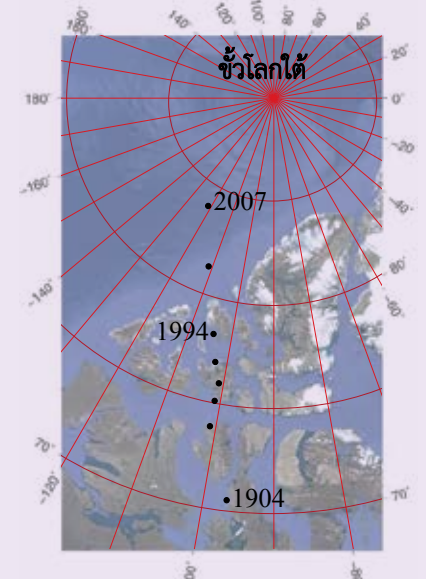
โลกมีสนามแม่เหล็ก **ขั้วแม่เหล็กโลก** (geomagnetic pole) จะอยู่ใกล้กับ **ขั้วเหนือทางภูมิศาสตร์** (geographical north pole) และ **ขั้วใต้ทางภูมิศาสตร์** (geographical south pole) ซึ่งเปรียบเสมือนแท่งแม่เหล็กวางตัวในแนวเหนือ-ใต้ ดังรูป



รูป ขั้วแม่เหล็กโลก

เมื่อวางเข็มทิศในบริเวณที่ไม่มีแม่เหล็กอื่นรบกวน เข็มชี้ทิศเหนือของเข็มทิศ จะชี้ไปยังขั้วใต้ของขั้วแม่เหล็กโลกซึ่งเป็นด้านขั้วโลกเหนือทางภูมิศาสตร์ และเข็มชี้ทิศใต้ของเข็มทิศจะชี้ไปยังขั้วเหนือของขั้วแม่เหล็กโลกซึ่งเป็นด้านขั้วโลกใต้ทางภูมิศาสตร์ จะเห็นว่าเข็มชี้ของเข็มทิศจะชี้ไปยังขั้วแม่เหล็กโลกซึ่งจะตรงข้ามกับขั้วทางภูมิศาสตร์

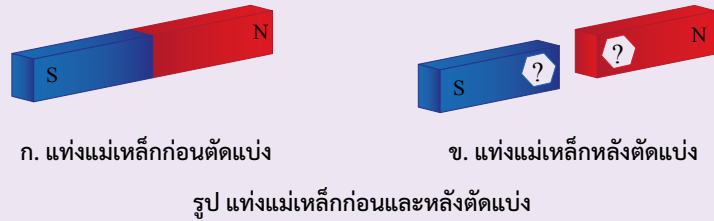
ขั้วแม่เหล็กของโลกนั้นไม่ได้อยู่นิ่งที่ตำแหน่งเดิมตลอด แต่มีการเปลี่ยนตำแหน่งไปในแต่ละปี ดังรูป



รูป การเปลี่ยนตำแหน่งของขั้วเหนือของขั้วแม่เหล็กโลก

ชวนคิด

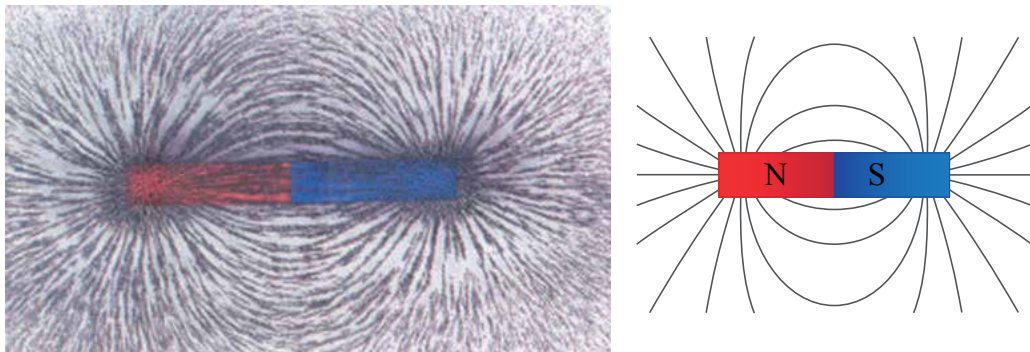
หากนำแท่งแม่เหล็กแท่งหนึ่งดังรูป ก. มาตัดแบ่งเป็นสองแท่ง ดังรูป ข. ตรงปลายที่ตัดแบ่งจะมีขั้วแม่เหล็กหรือไม่ อย่างไร



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

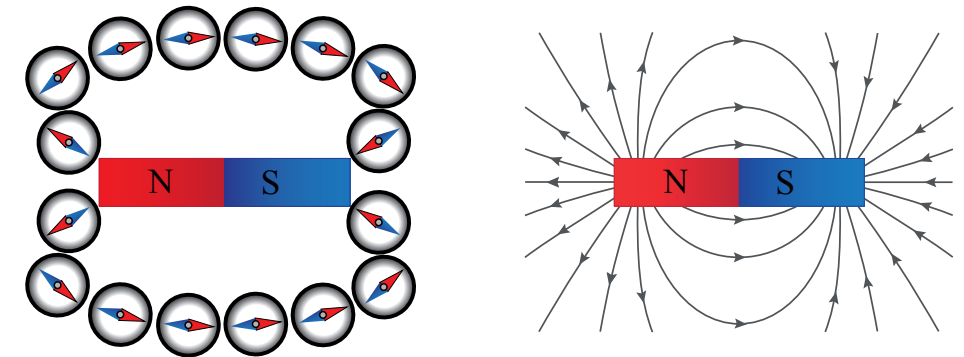
วางกระดาษขาวบนแท่งแม่เหล็ก แล้วยัดกระดาษขาวให้แน่น จากนั้นโรยผงเหล็กกระจายรอบแท่งแม่เหล็กพร้อมทั้งเคาะกระดาษเบา ๆ จนผงเหล็กขยับเรียงตัวเป็นแนว ดังรูป 15.3 ก. แสดงว่าบริเวณรอบแท่งแม่เหล็กมีแรงจากแม่เหล็กกระทำกับผงเหล็ก เรียกบริเวณนี้ว่า **บริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก (magnetic field)**



รูป 15.3 การเรียงตัวของผงเหล็กกรอบแท่งแม่เหล็ก

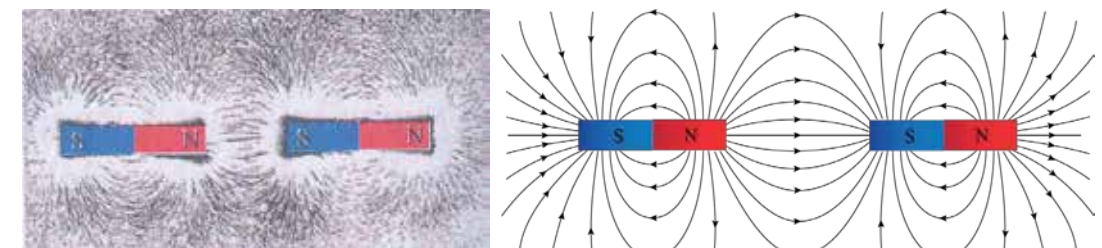
เมื่อพิจารณาแนวการเรียงตัวของผงเหล็กสามารถเขียนเส้นแสดงการเรียงตัวของผงเหล็กได้ ดังรูป 15.3 ข. เส้นเหล่านี้เป็นผลจากสนามแม่เหล็ก เรียกว่า **เส้นสนามแม่เหล็ก (magnetic field lines)** เส้นสนามแม่เหล็กมีทิศทางอย่างไร พิจารณาได้ดังนี้

หากนำเข็มทิศวางใกล้แท่งแม่เหล็กตามแนวเส้นสนามแม่เหล็ก จะมีแรงกระทำต่อเข็มทิศให้เบนไปวางตัวอยู่ในแนวเส้นสนามแม่เหล็ก ดังรูป 15.4 ก. แสดงให้เห็นว่าเส้นสนามแม่เหล็กมีทิศออกจากขั้วเหนือเข้าสู่ขั้วใต้ของแท่งแม่เหล็ก ดังนั้นเส้นสนามแม่เหล็กแสดงทิศทางได้ดังรูป 15.4 ข.



รูป 15.4 การหาทิศทางของเส้นสนามแม่เหล็ก

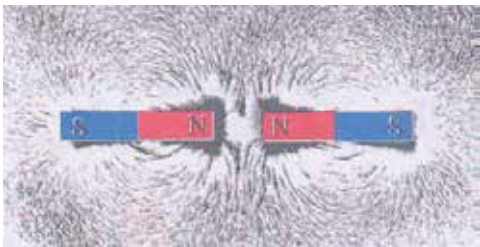
หากนำแท่งแม่เหล็กสองอันมาวางโดยหันขั้วต่างกันเข้าหากัน แล้วโรยผงเหล็กกรอบแท่งแม่เหล็กทั้งสอง ผงเหล็กจะเรียงตัว ดังรูป 15.5 ก. และเขียนเส้นสนามแม่เหล็กได้ ดังรูป 15.5 ข.



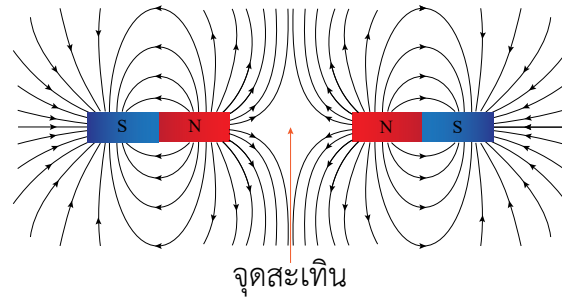
รูป 15.5 วางแท่งแม่เหล็กสองอันใกล้กัน โดยหันขั้วต่างกันเข้าหากัน

จากรูป 15.5 ข. บริเวณระหว่างแท่งแม่เหล็กทั้งสองที่หันขั้วต่างกันเข้าหากัน จะมีเส้นสนามแม่เหล็กอยู่หนาแน่นมากขึ้น แสดงว่าสนามแม่เหล็กบริเวณนี้มีค่ามากขึ้น

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



ก. แนวการเรียงตัวของผงเหล็ก



ข. เส้นสนามแม่เหล็กที่เกิดจากแท่งแม่เหล็ก
สองแท่งเมื่อวางขั้วเหมือนกันเข้าหากัน

รูป 15.6 วางแท่งแม่เหล็กสองอันใกล้กัน โดยหันขั้วเหมือนกันเข้าหากัน

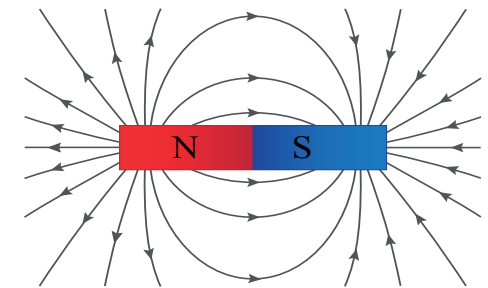
จากรูป 15.6 ข. เมื่อนำแท่งแม่เหล็กที่มีขั้วเหมือนกันมาวางไว้ใกล้กัน จะสังเกตเห็นว่ามีบริเวณที่อยู่ระหว่างขั้วแม่เหล็กนั้น มีเส้นสนามแม่เหล็กหนาแน่นน้อย แสดงว่าบริเวณนั้นสนามแม่เหล็กมีค่าน้อยและตำแหน่งที่สนามแม่เหล็กมีค่าเป็นศูนย์ เรียกตำแหน่งนี้ว่า **จุดสะเทิน (neutral point)**

15.1.2 ฟลักซ์แม่เหล็ก

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



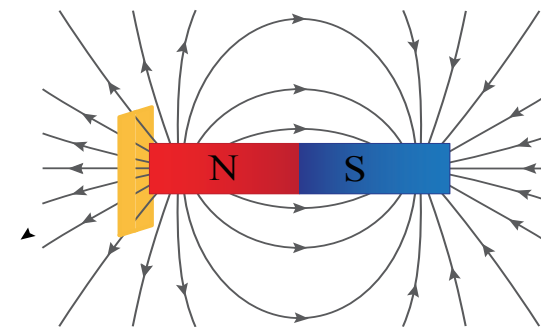
ก. ผงเหล็กบริเวณขั้วแม่เหล็กแบบ 3 มิติ



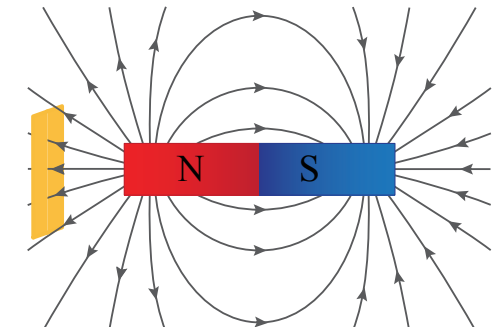
ข. เส้นสนามแม่เหล็กใน 2 มิติ

รูป 15.7 สนามแม่เหล็กรอบแท่งแม่เหล็ก

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



ก. จำนวนเส้นสนามแม่เหล็กที่ผ่านหนึ่งหน่วยพื้นที่
บริเวณใกล้ขั้วแม่เหล็ก



ข. จำนวนเส้นสนามแม่เหล็กที่ผ่านหนึ่งหน่วยพื้นที่
บริเวณห่างออกไปจากขั้วแม่เหล็ก

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

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

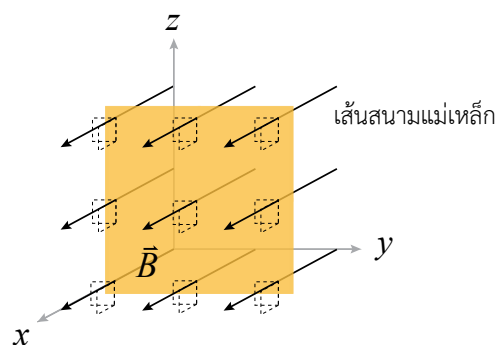
โดย B คือ ขนาดสนามแม่เหล็ก (หรือความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก)

มีหน่วยเป็น เวเบอร์ต่อตารางเมตร (Wb/m^2) หรือเทสลา (T)

ϕ คือ ฟลักซ์แม่เหล็ก มีหน่วยเป็น เวเบอร์ (Wb)

A คือ พื้นที่ที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น ตารางเมตร (m^2)

ทิศทางของสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งใดมีทิศทางเดียวกับทิศทางเส้นสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งนั้น



รูป 15.9 ฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดจากเส้นสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับพื้นที่

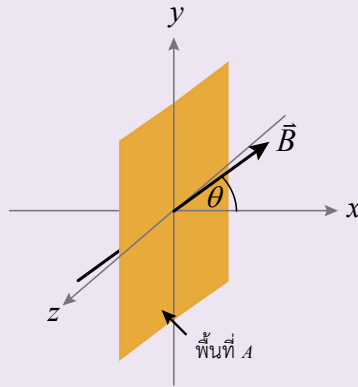
ตัวอย่างขนาดของสนามแม่เหล็กจากแหล่งต่าง ๆ แสดงดังตาราง

ตาราง 15.1 สนามแม่เหล็กจากแหล่งต่าง ๆ

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

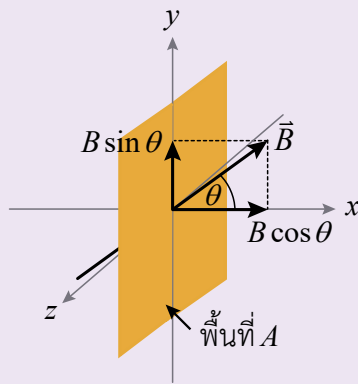
ข้อสังเกต

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 $B = \frac{\phi}{A}$

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

$$\phi = BA$$

แทนค่าลงในสมการจะได้

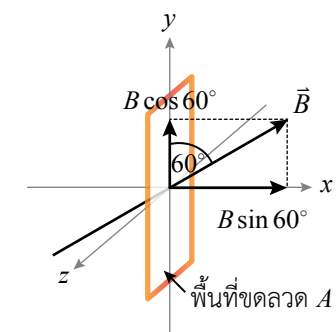
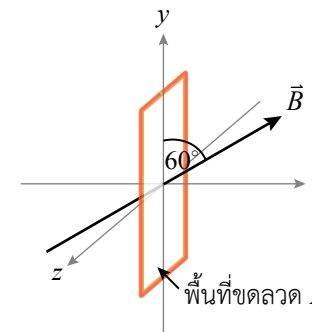
$$\begin{aligned}\phi &= (1.5 \text{ T})(0.4 \text{ m}^2) \\ &= 0.60 \text{ Wb}\end{aligned}$$

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 องศา กับระนาบของขดลวด ดังรูป



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

จากสมการ

$$\phi = BA$$

แทนค่า

$$\begin{aligned}\phi &= (B \sin 60^\circ) A \\ &= (0.20 \text{ T}) \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \right) (0.20 \text{ m})(0.10 \text{ m}) \\ &= 3.46 \times 10^{-3} \text{ Wb}\end{aligned}$$

ตอบ ฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านขดลวดเท่ากับ 3.5×10^{-3} เวเบอร์

15.1.3 สนามแม่เหล็กจากกระแสไฟฟ้าผ่านเส้นลวดตัวนำ

ในปี พ.ศ. 2363 ฮันส์ คริสเตียน เออร์สเตด (Hans C. Oersted) ชาวเดนมาร์กสังเกตเห็น เข็มทิศเบนไป เมื่อมีกระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำที่วางบนเข็มทิศ แสดงว่า กระแสไฟฟ้าทำให้เกิด สนามแม่เหล็กได้ สนามแม่เหล็กที่ได้จากกระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำที่เออร์สเตดพบ รวมทั้งกรณีอื่น ๆ เช่น กระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำที่มีฉนวนหุ้มมาขดเป็นวงกลมหลาย ๆ วง เรียงซ้อนกันเป็นรูปทรงกระบอกที่ เรียกว่า โซเลนอยด์ (solenoid) มีลักษณะอย่างไร นักเรียนจะได้ศึกษาจากกิจกรรม 15.1



ความรู้เพิ่มเติม

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



รูป เออร์สเตด



กิจกรรม 15.1 สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำ

จุดประสงค์

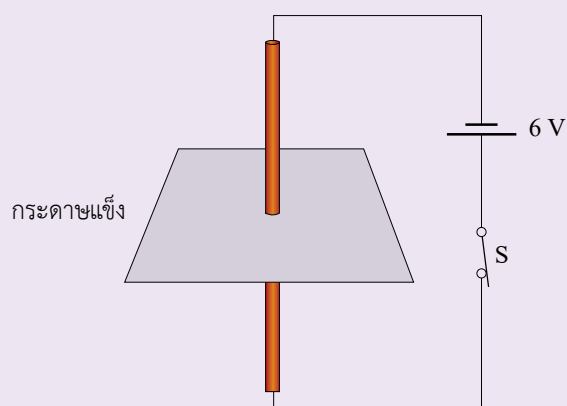
เพื่อสังเกตทิศทางของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำเส้นตรง ลวดตัวนำวงกลม และโซเลนอยด์

วัสดุและอุปกรณ์

- | | |
|--|---------|
| 1. ลวดตัวนำเส้นตรง | 1 เส้น |
| 2. ลวดตัวนำวงกลม | 1 ชุด |
| 3. โซเลนอยด์ | 1 ชุด |
| 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 |

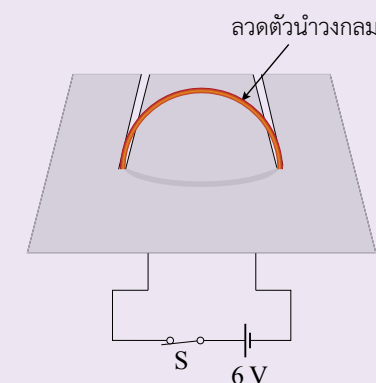
วิธีทำกิจกรรม

1. สอดลวดตัวนำเส้นตรงผ่านกระดาษแข็งตั้งฉากกับระนาบกระดาษ แล้วต่อปลายทั้งสองของลวดตัวนำกับไฟฟ้ากระแสตรง 6 โวลต์ จากแบตเตอรี่และสวิตช์ ดังรูป

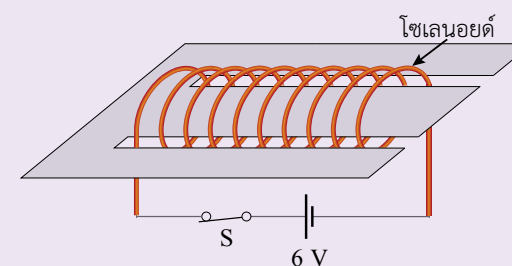


รูป ลวดตัวนำเส้นตรงวางตั้งฉากกับระนาบกระดาษ

2. เปิดสวิตช์แล้วโรยผงเหล็กกรอบ ๆ จากนั้นเคาะกระดาษแข็งจนกระทั่งผงเหล็กเรียงตัวเป็นแนว
3. ปิดสวิตช์ สังเกตและวาดเส้นแนวการเรียงตัวของผงเหล็ก
4. วางเข็มทิศบนกระดาษแข็งตามแนวการเรียงตัวของผงเหล็ก ณ ตำแหน่งต่าง ๆ เปิดสวิตช์ สังเกตการวางตัวของเข็มทิศ ปิดสวิตช์ เขียนทิศทางบนเส้นแนวการเรียงตัวของเข็มทิศ
5. ทำซ้ำ ข้อ 1-4 โดยเปลี่ยนลวดตัวนำเส้นตรงเป็นลวดตัวนำวงกลมและโซเลนอยด์ ดังรูป



รูป การวางลวดตัวนำวงกลมตั้งฉากกับระนาบกระดาษ



รูป การวางลวดตัวนำโซเลนอยด์กับระนาบกระดาษ



คำถามท้ายกิจกรรม

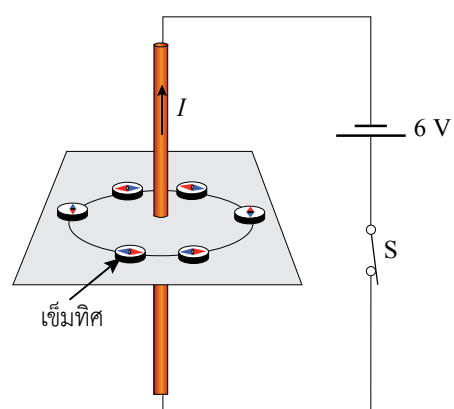
- ☐ แนวการเรียงตัวของผงเหล็กของสามกรณีเมื่อมีกระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำ เหมือนหรือต่างกันอย่างไร
- ☐ ขณะไม่มีกระแสไฟฟ้ากับขณะมีกระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำ การวางตัวของเข็มทิศต่างกันหรือไม่ อย่างไร

จากกิจกรรม 15.1 ในกรณีกระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำเส้นตรง แล้วโรยผงเหล็กกรอบ ๆ จะสังเกตเห็นผงเหล็กเรียงตัวเป็นวงกลมรอบลวดตัวนำ ดังรูป 15.10

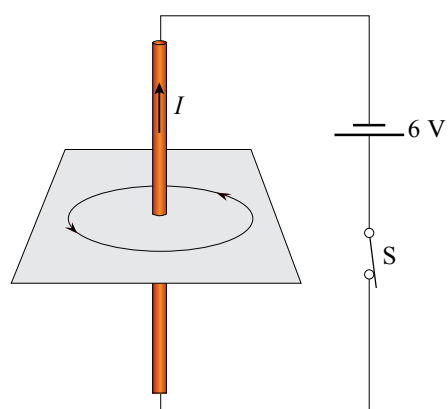
เมื่อนำเข็มทิศมาวางรอบลวดตัวนำเส้นตรงตามการเรียงตัวของผงเหล็ก จะทราบทิศทางของสนามแม่เหล็ก ดังรูป 15.11 ก. โดยทิศทางของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเมื่อมีกระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำเส้นตรงมีทิศทางดังรูป 15.11 ข.



รูป 15.10 แนวการเรียงตัวของผงเหล็กรอบลวดตัวนำเส้นตรงที่มีกระแสไฟฟ้าผ่าน

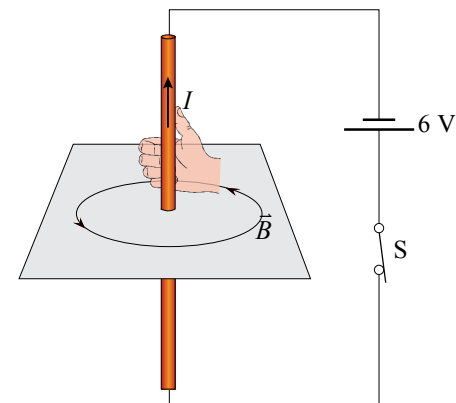


ก. การวางตัวของเข็มทิศรอบลวดตัวนำเส้นตรง



ข. ทิศทางสนามแม่เหล็กรอบลวดตัวนำเส้นตรง

รูป 15.11 สนามแม่เหล็กรอบลวดตัวนำเส้นตรงเมื่อมีกระแสไฟฟ้าผ่าน



รูป 15.12 การหาทิศทางสนามแม่เหล็กรอบเส้นลวดที่มีกระแสไฟฟ้าผ่านโดยใช้มือขวา

การหาทิศทางของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำเส้นตรงทำได้โดยใช้ นิ้วหัวแม่มือของมือขวาชี้ไปตามทิศทางของกระแสไฟฟ้า จากนั้นกำมือขวารอบลวดตัวนำเส้นตรง ทิศทางการวนของนิ้วทั้งสี่จะแสดงทิศทางของสนามแม่เหล็ก ดังรูป 15.12



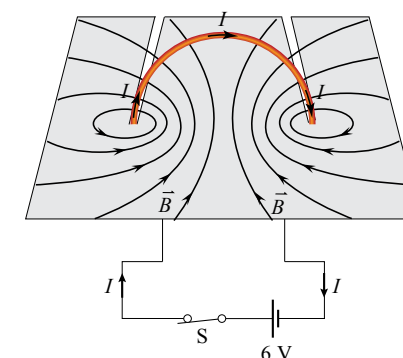
ชวนคิด

จากรูป 15.11 เมื่อกลับทิศทางของกระแสไฟฟ้า สนามแม่เหล็กจะมีทิศทางอย่างไร

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



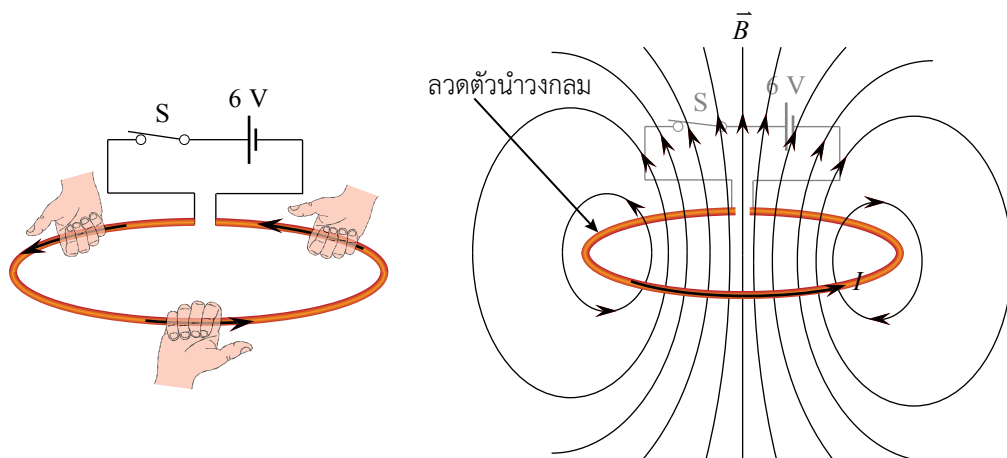
ก. การเรียงตัวของผงเหล็กรอบลวดตัวนำวงกลม



ข. ทิศทางสนามแม่เหล็กรอบลวดตัวนำวงกลม

รูป 15.13 สนามแม่เหล็กรอบลวดตัวนำวงกลมเมื่อมีกระแสไฟฟ้าผ่าน

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

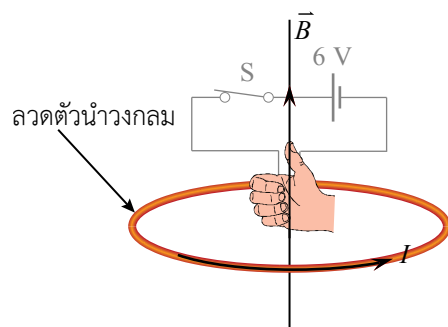


ก. การหาทิศทางสนามแม่เหล็กภายในลวดตัวนำวงกลมโดยใช้มือขวา

ข. ทิศทางสนามแม่เหล็กภายในลวดตัวนำวงกลม

รูป 15.14 สนามแม่เหล็กรอบลวดตัวนำวงกลมเมื่อระนาบขดลวดอยู่ในแนวขนานกับระนาบระดับและมีกระแสไฟฟ้าผ่าน

นอกจากวิธีการข้างต้นอาจหาทิศทางของสนามแม่เหล็กได้อีกวิธีหนึ่ง ดังนี้ กำมือขวาบนระนาบขดลวดตัวนำ โดยให้นิ้วทั้งสี่ตามทิศทางของกระแสไฟฟ้า นิ้วหัวแม่มือจะชี้ไปตามทิศทางของสนามแม่เหล็กที่ผ่านพื้นที่ขดลวดดังรูป 15.15



รูป 15.15 การหาทิศทางของสนามแม่เหล็กของลวดตัวนำวงกลมที่มีกระแสไฟฟ้าผ่านอีกวิธีหนึ่ง



ชวนคิด

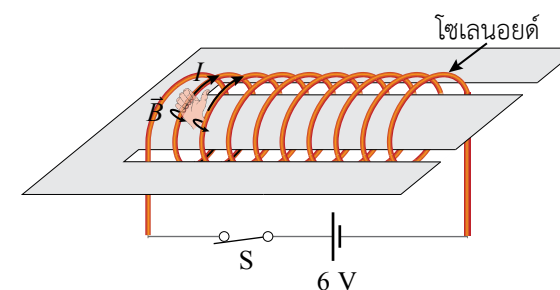
หากกลับทิศทางของกระแสไฟฟ้าในลวดตัวนำวงกลม ทิศทางของสนามแม่เหล็กที่ผ่านพื้นที่ขดลวดจะเป็นอย่างไร

กรณีเมื่อมีกระแสไฟฟ้าผ่านโซเลนอยด์ จะสังเกตเห็นการเรียงตัวของผงเหล็ก มีลักษณะดังรูป 15.16

เริ่มพิจารณาขดลวดวงกลมสองวงของโซเลนอยด์ สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นสามารถใช้มือขวาในการหาทิศทางได้ โดยใช้นิ้วหัวแม่มือชี้ไปตามทิศทางของกระแสไฟฟ้า ทิศทางการวนของนิ้วทั้งสี่จะแสดงทิศทางของสนามแม่เหล็ก แสดงได้ดังรูป 15.17

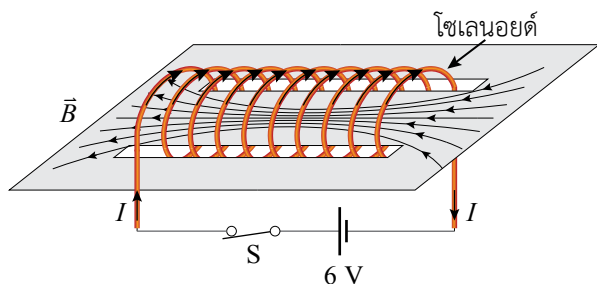


รูป 15.16 การเรียงตัวของผงเหล็กเมื่อมีกระแสไฟฟ้าผ่านโซเลนอยด์



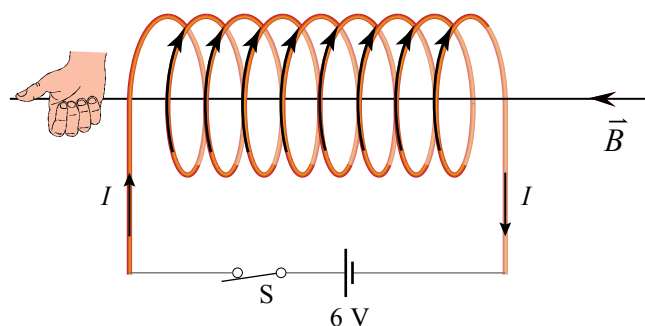
รูป 15.17 การหาทิศทางสนามแม่เหล็กเมื่อมีกระแสไฟฟ้าผ่านโซเลนอยด์

จะเห็นว่าบริเวณภายในของขดลวดวงกลมสองวงที่อยู่ติดกัน ทิศทางของสนามแม่เหล็กจะมีทิศทางเดียวกัน เมื่อพิจารณาขดลวดวงกลมซ้อนกันหลายวง สนามแม่เหล็กจึงรวมกันทำให้เกิดสนามแม่เหล็กบริเวณแกนของโซเลนอยด์มีขนาดมากกว่าบริเวณอื่น ทิศทางสนามแม่เหล็กด้านนอกโซเลนอยด์จะมีทิศทางออกจากปลายด้านหนึ่ง และเข้าสู่ปลายอีกด้านหนึ่งตามแกนโซเลนอยด์ มีลักษณะคล้ายกับสนามแม่เหล็กจากแท่งแม่เหล็ก จึงสรุปได้ว่าโซเลนอยด์ที่มีกระแสไฟฟ้าผ่าน สามารถเขียนเส้นสนามแม่เหล็กได้ ดังรูป 15.18



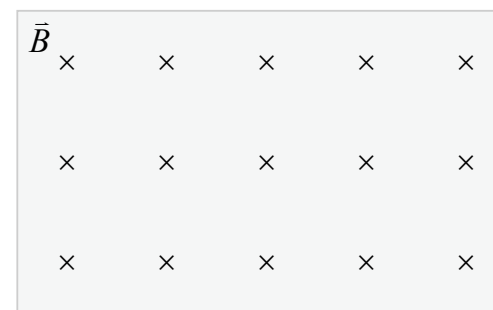
รูป 15.18 เส้นสนามแม่เหล็กของโซเลนอยด์เมื่อมีกระแสไฟฟ้าผ่าน

การหาทิศทางของสนามแม่เหล็กในแนวแกนของโซเลนอยด์ อีกวิธีหนึ่งคล้ายกับการหาทิศทางของสนามแม่เหล็กของลวดตัวนำวงกลม โดยใช้มือขวา วนนิ้วทั้งสี่ไปตามทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่ผ่านลวดตัวนำ นิ้วหัวแม่มือจะชี้ทิศทางของสนามแม่เหล็ก ดังรูป 15.19

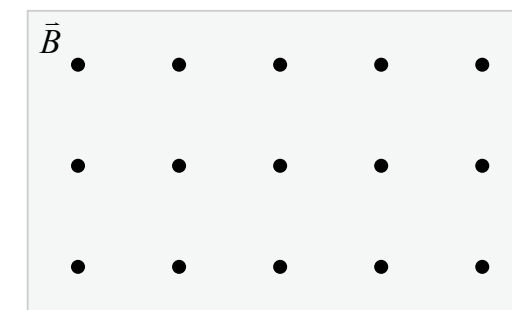


รูป 15.19 การหาทิศทางสนามแม่เหล็กของโซเลนอยด์โดยใช้มือขวา

การเขียนทิศทางของสนามแม่เหล็กนอกจากการเขียนเส้นลูกศรแสดงทิศทางแล้ว ยังใช้สัญลักษณ์ $\times$ แสดงสนามแม่เหล็กที่ชี้เข้าตั้งฉากกับกระดาษ ดังรูป 15.20 ก. และใช้สัญลักษณ์ $\bullet$ แสดงสนามแม่เหล็กที่ชี้ออกตั้งฉากกับกระดาษ ดังรูป 15.20 ข.



ก. สนามแม่เหล็กชี้เข้าตั้งฉากกับกระดาษ



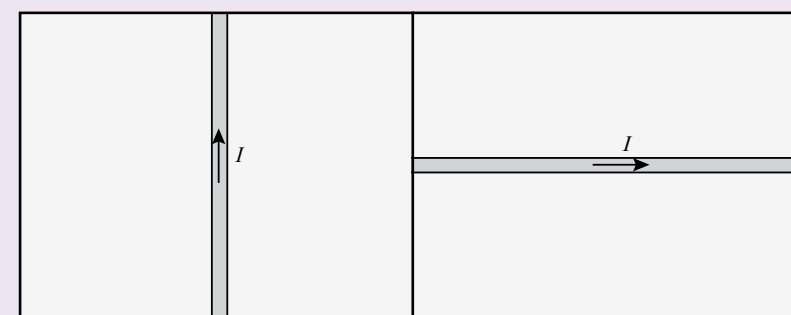
ข. สนามแม่เหล็กชี้ออกตั้งฉากกับกระดาษ

รูป 15.20 การใช้สัญลักษณ์ $\times$ และ $\bullet$ แสดงทิศทางของสนามแม่เหล็ก



ชวนคิด

จงเขียนสัญลักษณ์ $\times$ และ $\bullet$ แสดงทิศทางของสนามแม่เหล็กในระนาบกระดาษที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำเส้นตรง ทางด้านซ้ายและทางด้านขวาของลวดตัวนำของรูป ก. และทางด้านบนและด้านล่างของลวดตัวนำในรูป ข.



ก. ลวดตัวนำวางตัวในแนวตั้ง

ข. ลวดตัวนำวางตัวในแนวระดับ

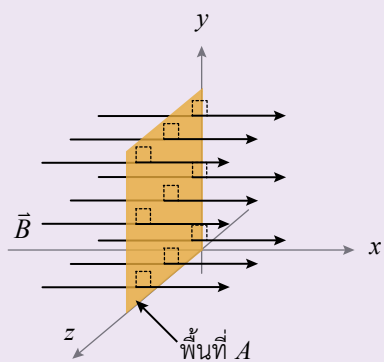
รูป ลวดตัวนำเส้นตรงที่มีกระแสไฟฟ้าผ่าน



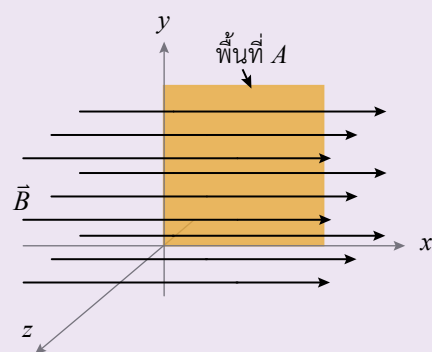
คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 15.1

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

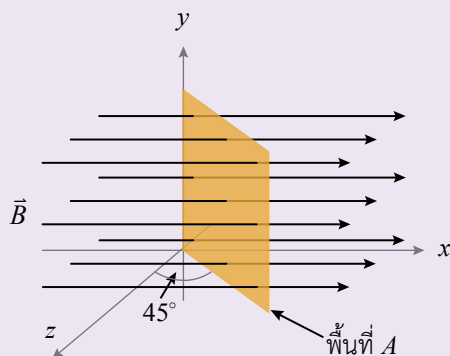
1.1 พื้นที่ A อยู่ในระนาบ yz



1.2 พื้นที่ A อยู่ในระนาบ xy

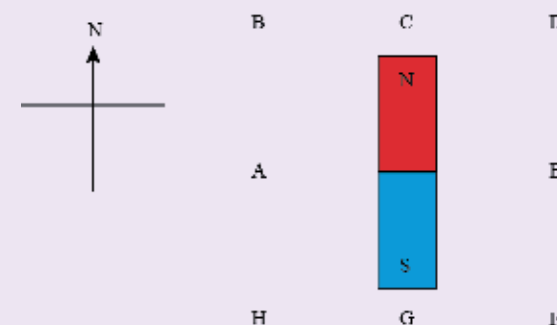


1.3 พื้นที่ A ระนาบทำมุม 45° กับแกน z



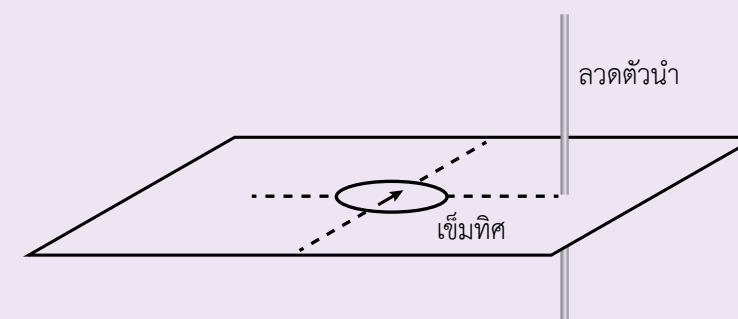
2. จงบอกทิศทางของเส้นสนามแม่เหล็กโลกบริเวณเส้นศูนย์สูตรของโลก บริเวณขั้วโลกเหนือ และบริเวณขั้วโลกใต้ทางภูมิศาสตร์

3. เมื่อวางแท่งแม่เหล็กแท่งหนึ่งไว้ที่บริเวณเส้นศูนย์สูตรโลกในลักษณะทิศทางการวางตัวดังรูป บริเวณใดบ้างที่อาจมีจุดสะเทิน



รูป ประกอบคำถามตรวจสอบความเข้าใจข้อ 3

4. วางลวดตัวนำเส้นตรงที่ไม่มีกระแสไฟฟ้าผ่าน ให้อยู่ในแนวตั้งและใกล้เข็มทิศ 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

ในหัวข้อที่ผ่านมาทราบแล้วว่าหากนำแม่เหล็กหรือสารแม่เหล็กเข้าใกล้บริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก จะมีแรงแม่เหล็กกระทำกับขั้วแม่เหล็กหรือกระทำกับสารแม่เหล็กนั้น นอกจากที่กล่าวมาข้างต้นมีกรณีอื่นหรือไม่ที่ทำให้เกิดแรงแม่เหล็ก จะได้ศึกษาในหัวข้อนี้

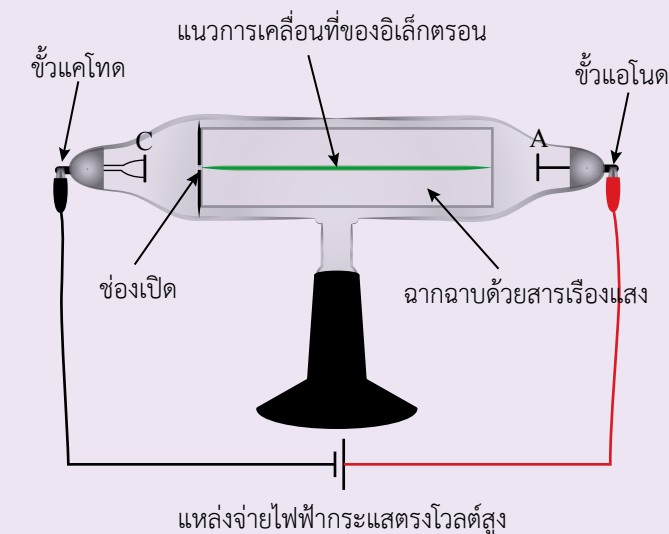
15.2.1 แรงแม่เหล็กกระทำต่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า

เมื่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าอยู่ในสนามไฟฟ้า จะเกิดแรงไฟฟ้ากระทำต่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้านั้น หากอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็ก จะเกิดแรงแม่เหล็กกระทำต่ออนุภาคนั้นหรือไม่ และลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคเป็นอย่างไร จะได้ศึกษาจากสถานการณ์ต่อไปนี้



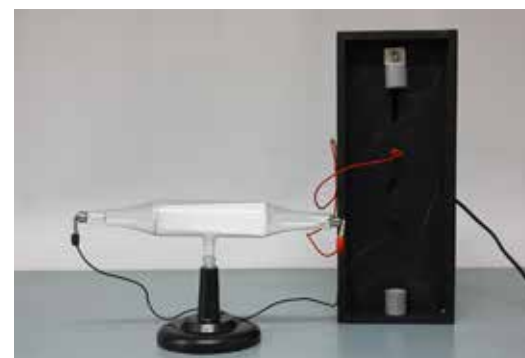
ความรู้เพิ่มเติม

หลอดรังสีแคโทดเป็นหลอดสุญญากาศชนิดหนึ่ง ประกอบด้วยขั้วแคโทดและขั้วแอโนด สำหรับต่อเข้ากับขั้วลบและขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงโวลต์สูง ตามลำดับ ดังรูป



รูป ตัวอย่างหลอดรังสีแคโทด

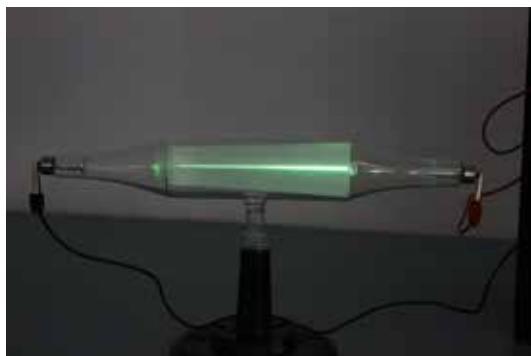
เมื่อต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงโวลต์สูงเข้ากับขั้วแคโทดและแอโนด ทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากแผ่นแคโทด C เคลื่อนที่ผ่านฉากที่ฉาบด้วยสารเรืองแสง (phosphor) ไปยังแผ่นแอโนด A ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าแผ่นแคโทด C ทำให้ปรากฏเป็นแนวสว่างขึ้น เรียกว่า แนวการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน



รูป 15.21 การจัดอุปกรณ์

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

เปิดสวิตช์ให้เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงโวลต์สูงทำงาน สังเกตผลที่เกิดขึ้น ในกรณีนำขั้วเหนือของแท่งแม่เหล็กเข้าใกล้หลอดรังสีแคโทด ในทิศทางตั้งฉากกับแนวการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน และในกรณีสลับขั้วแท่งแม่เหล็กเป็นขั้วใต้

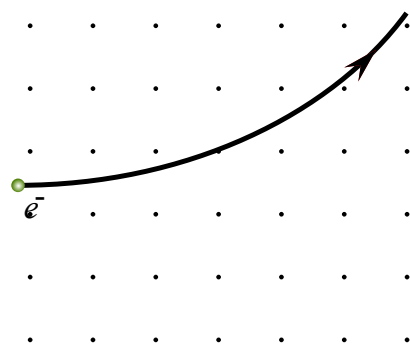


รูป 15.22 แนวการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนระหว่าง
ขั้วแคโทดและขั้วแอโนด

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



ก. การเบนของแนวการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน
เมื่อนำขั้วเหนือของแท่งแม่เหล็กเข้าใกล้



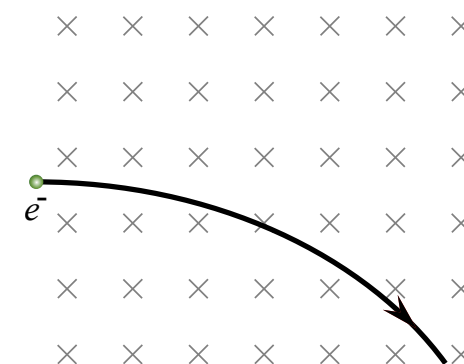
ข. อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เบนโค้งขึ้น
เมื่อสนามแม่เหล็กมีทิศทางออกจากฉาก

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

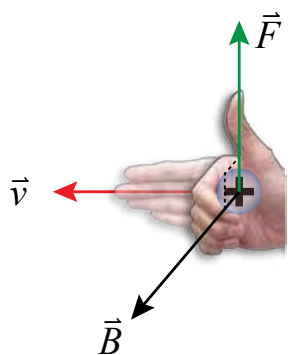


ชวนคิด

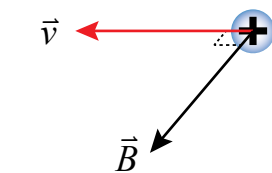
หากอนุภาคเคลื่อนที่เข้าสู่สนามแม่เหล็กตามสถานการณ์ข้างต้น แต่มีประจุไฟฟ้าบวกอนุภาคจะมีทิศทางการเคลื่อนที่เป็นอย่างไร

ทิศทางของแรงแม่เหล็ก

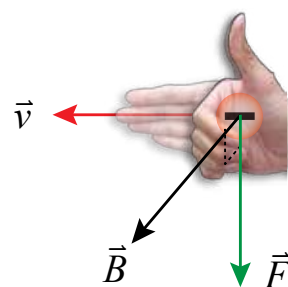
เมื่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ในทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก จะมีแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กกระทำต่ออนุภาคนั้น หรือเรียกว่า **แรงแม่เหล็ก (magnetic force)** พิจารณาทิศทางและขนาดของแรงได้ดังนี้



ข. ทิศทางของแรงแม่เหล็กที่กระทำต่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าบวก โดยใช้มือขวา



ก. อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าบวกเคลื่อนที่ทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก



ค. ทิศทางของแรงแม่เหล็กที่กระทำต่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าลบ โดยใช้มือขวา

รูป 15.25 การหาทิศทางของแรงกระทำต่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็ก

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

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

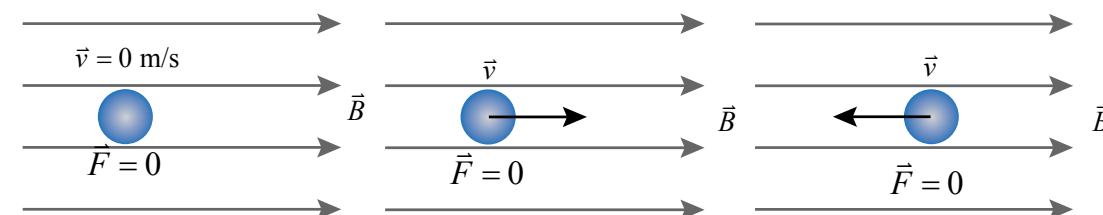


ข้อสังเกต

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

ขนาดของแรงแม่เหล็ก

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

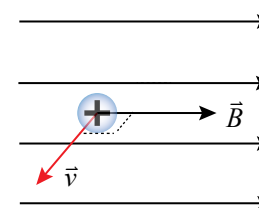


ก. อนุภาคอยู่นิ่งในสนามแม่เหล็ก

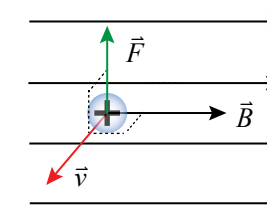
ข. อนุภาคเคลื่อนที่ในแนวขนานทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็ก

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

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

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)

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

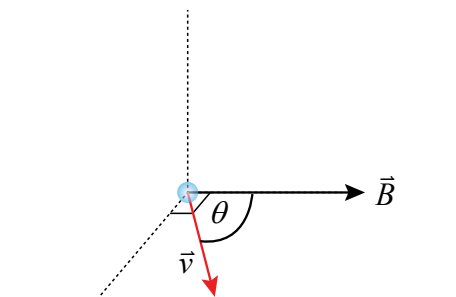
พิจารณาได้ว่าอนุภาคนี้มีองค์ประกอบความเร็วของการเคลื่อนที่ทั้งในแนวขนานกับสนามแม่เหล็ก และในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กพร้อมกันดังรูป 15.28 ข.

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

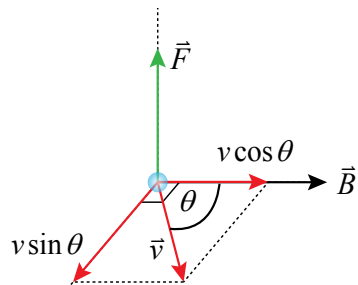
$$F = q(v \sin \theta)B$$

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

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



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



ข. ความเร็วของอนุภาคที่พิจารณาทั้งในแนวขนานและแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก

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



ข้อสังเกต

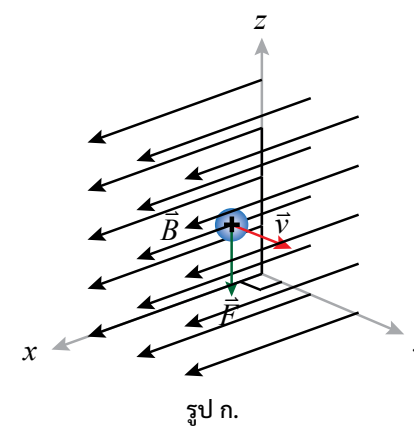
สำหรับอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยความเร็วค่าหนึ่ง แรงแม่เหล็กที่กระทำจะมีขนาดมากที่สุดเมื่อความเร็วตั้งฉากกับทิศทางของสนามแม่เหล็ก และจะมีค่าเป็นศูนย์เมื่อความเร็วมีทิศทางขนานกับทิศทางของสนามแม่เหล็ก

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)

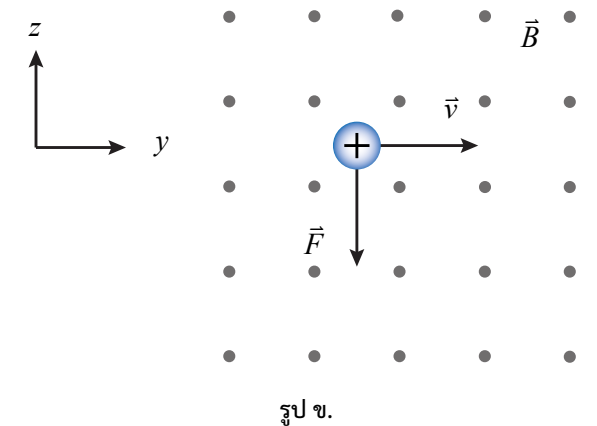
แนวคิด อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ในทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กด้วยความเร็ว $\vec{v}$ จะเกิดแรงแม่เหล็กกระทำต่ออนุภาค ใช้มือขวาในการหาทิศทางของแรงและหาขนาดของแรงที่กระทำต่ออนุภาคจากสมการ

$$F = qvB$$

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



รูป ก.



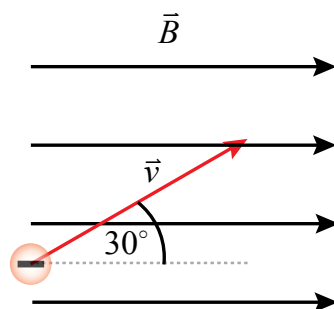
รูป ข.

และขนาดของแรงที่กระทำต่ออนุภาคหาได้จาก

$$\begin{aligned} F &= qvB \\ &= (1.6 \times 10^{-19} \text{ C})(3.0 \times 10^6 \text{ m/s})(0.2 \times 10^{-3} \text{ T}) \\ &= 9.6 \times 10^{-17} \text{ N} \end{aligned}$$

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

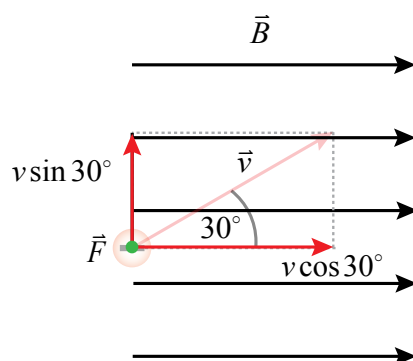
ตัวอย่าง 15.4 อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงตัวขนาด 2.0×10^6 เมตรต่อวินาที เข้าไปในสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอขนาด 5.0×10^{-3} เทสลา ในทิศทางทำมุม 30 องศา กับสนามแม่เหล็ก ดังรูป ทิศทางและขนาดของแรงแม่เหล็กที่กระทำต่ออิเล็กตรอนมีค่าเท่าใด (กำหนดให้อิเล็กตรอนมีประจุไฟฟ้า 1.6×10^{-19} คูลอมบ์)



รูป ประกอบตัวอย่าง 15.4

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

วิธีทำ ใช้มือขวาหาทิศทางของแรง จะได้ทิศทางของแรงแม่เหล็ก มีทิศทางออกจากกระดาษ ดังรูป



ขนาดของแรงที่กระทำต่ออิเล็กตรอน หาได้จากสมการ

$$\begin{aligned} F &= qvB \sin \theta \\ &= (1.6 \times 10^{-19} \text{ C})(2.0 \times 10^6 \text{ m/s})(5.0 \times 10^{-3} \text{ T})(0.5) \\ &= 8.0 \times 10^{-16} \text{ N} \end{aligned}$$

แทนค่า

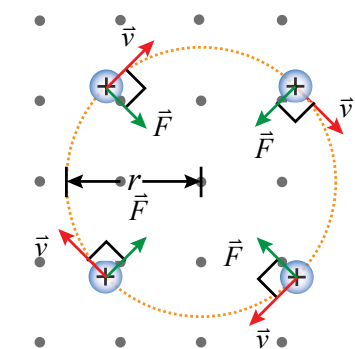
ตอบ ขนาดของแรงแม่เหล็กที่กระทำต่ออิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 8.0×10^{-16} นิวตัน มีทิศทางออกจากกระดาษ

การเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าในสนามแม่เหล็ก

เมื่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็กจะมีแรงแม่เหล็กกระทำต่ออนุภาคดังกล่าว หากความเร็วของอนุภาคนั้นมีทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กตลอดเวลา อนุภาคจะมีการเคลื่อนที่เป็นแบบใด พิจารณาได้ดังนี้

เมื่ออนุภาคมีประจุไฟฟ้าบวก q

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



รูป 15.29 อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าบวกเคลื่อนที่แบบวงกลมในสนามแม่เหล็ก



ชวนคิด

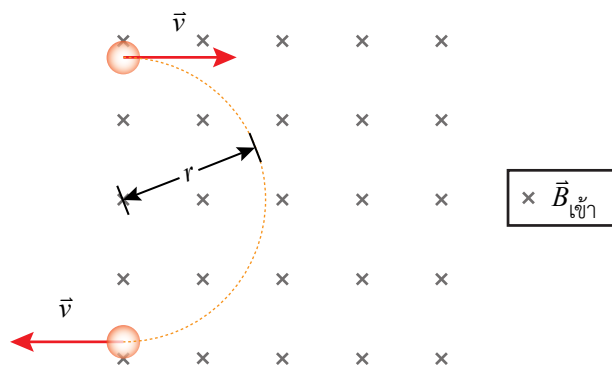
จากรูป 15.29 หากอนุภาคที่เคลื่อนที่มีประจุไฟฟ้าลบ อนุภาคจะมีการเคลื่อนที่เป็นแบบใด

พิจารณารัศมีการเคลื่อนที่แบบวงกลม (r) ของอนุภาคมีประจุไฟฟ้าได้ดังนี้
แรงแม่เหล็กตั้งฉากกับความเร็วตลอดเวลาและทำหน้าที่เป็นแรงสู่ศูนย์กลาง จะได้

$$\begin{aligned} F &= F_c \\ qvB &= \frac{mv^2}{r} \\ \text{หรือ} \quad r &= \frac{mv}{qB} \end{aligned} \quad (15.4)$$

เมื่อ r คือ รัศมีการเคลื่อนที่แบบวงกลมของอนุภาคมวล m ที่มีประจุไฟฟ้า q

ตัวอย่าง 15.5 ในการทดลองวัดอัตราเร็วของอิเล็กตรอนที่ถูกยิงเข้าไปในทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กดังรูป



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} คูโลมบ์)

แนวคิด อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v ในทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก $\vec{B}$ อิเล็กตรอนเคลื่อนที่

แบบวงกลมมีรัศมีการเคลื่อนที่ r หาอัตราเร็วของอิเล็กตรอนได้จากสมการ $r = \frac{mv}{qB}$

จากนั้นนำอัตราเร็วที่คำนวณได้ไปหาขนาดของแรงแม่เหล็กที่กระทำต่ออิเล็กตรอนโดยใช้สมการ

$$F = qvB$$

วิธีทำ ก. หาอัตราเร็วของอิเล็กตรอนที่ถูกยิงเข้าไป เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่เข้าไปในสนามแม่เหล็กจะเคลื่อนที่แบบวงกลม

จากสมการ $r = \frac{mv}{qB}$

จะได้ $v = \frac{rqB}{m}$

แทนค่า $v = \frac{(8.5 \times 10^{-2} \text{ m})(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})(0.2 \times 10^{-3} \text{ T})}{(9.1 \times 10^{-31} \text{ kg})}$
 $= 3.0 \times 10^6 \text{ m/s}$

ข. หาขนาดของแรงแม่เหล็กที่กระทำต่ออิเล็กตรอน

จากสมการ $F = qvB$
แทนค่า $= (1.6 \times 10^{-19} \text{ C})(3.0 \times 10^6 \text{ m/s})(0.2 \times 10^{-3} \text{ T})$
 $= 9.6 \times 10^{-17} \text{ N}$

ตอบ ก. อัตราเร็วของอิเล็กตรอนที่ถูกยิงเข้าไปเท่ากับ 3.0×10^6 เมตรต่อวินาที
ข. ขนาดของแรงแม่เหล็กที่กระทำต่ออิเล็กตรอนเท่ากับ 9.6×10^{-17} นิวตัน