



หนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ชั้นมัธยมศึกษาปีที่



# ฟิสิกส์

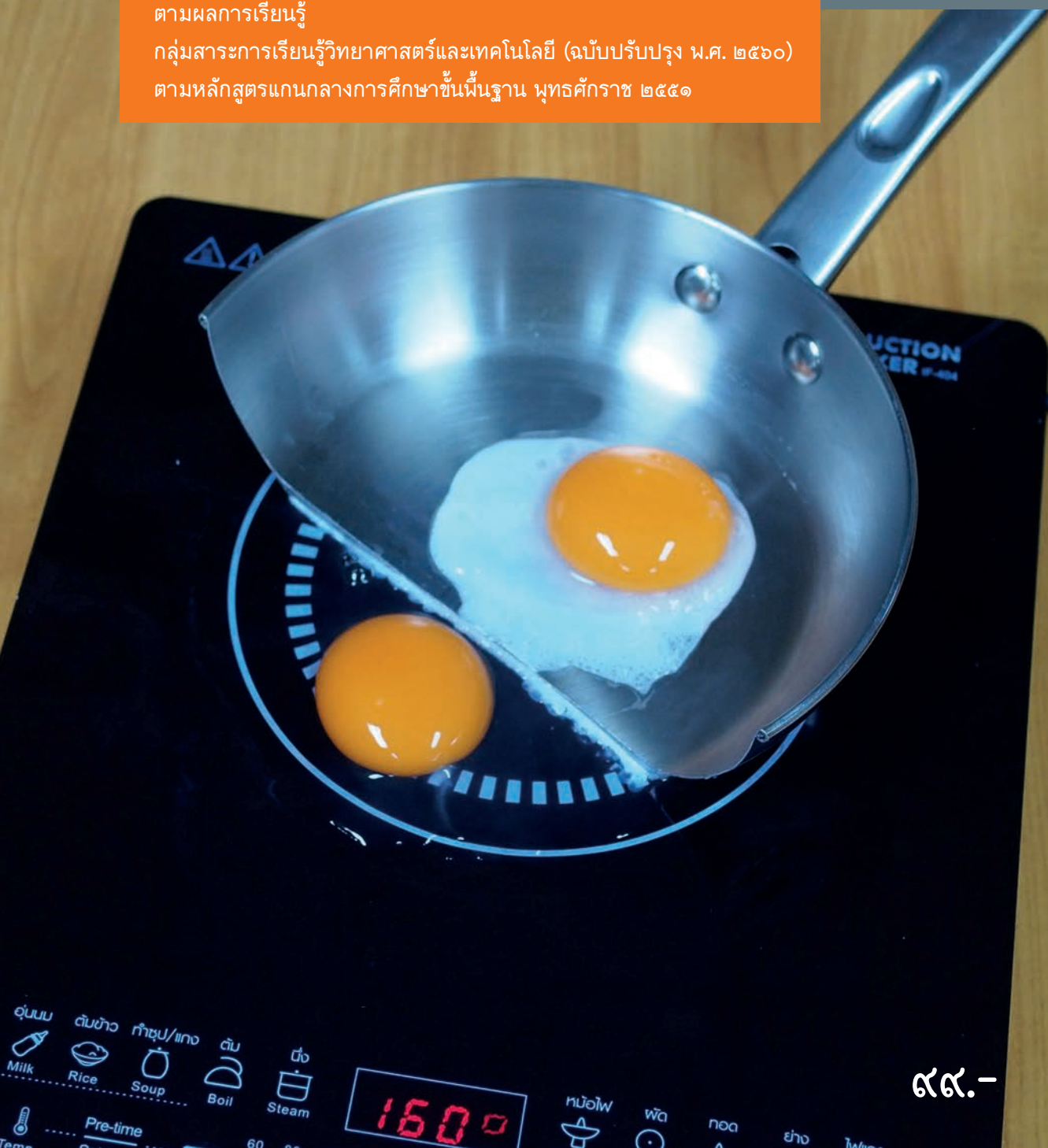
## เล่ม ๕

๖

ตามผลการเรียนรู้

กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐)

ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช ๒๕๕๑



๔๔.-

ตัวอักษรกรีก

| ตัวอักษรเล็ก     | ตัวอักษรใหญ่ | ชื่อ    |          | ตัวอักษรเล็ก | ตัวอักษรใหญ่ | ชื่อ    |          |
|------------------|--------------|---------|----------|--------------|--------------|---------|----------|
| $\alpha$         | A            | alpha   | แอลฟา    | $\nu$        | N            | nu      | นิว      |
| $\beta$          | B            | beta    | บีตา     | $\xi$        | $\Xi$        | xi      | ไซ       |
| $\gamma$         | $\Gamma$     | gamma   | แกมมา    | $\omicron$   | O            | omicron | โอไมครอน |
| $\delta, \delta$ | $\Delta$     | delta   | เดลตา    | $\pi$        | $\Pi$        | pi      | พาย      |
| $\epsilon$       | E            | epsilon | เอปไซลอน | $\rho$       | P            | rho     | โร       |
| $\zeta$          | Z            | zeta    | ซีตา     | $\sigma$     | $\Sigma$     | sigma   | ซิกมา    |
| $\eta$           | H            | eta     | อีตา     | $\tau$       | T            | tau     | เทา      |
| $\theta$         | $\Theta$     | theta   | ทีตา     | $\upsilon$   | Y            | upsilon | อูปไซลอน |
| $\iota$          | I            | iota    | ไอโอตา   | $\phi$       | $\Phi$       | phi     | ฟาย, ฟี  |
| $\kappa$         | K            | kappa   | แคปปา    | $\chi$       | X            | chi     | ไค       |
| $\lambda$        | $\Lambda$    | lambda  | แลมบ์ดา  | $\psi$       | $\Psi$       | psi     | ซาย      |
| $\mu$            | M            | mu      | มิว      | $\omega$     | $\Omega$     | omega   | โอเมกา   |

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



หนังสือเรียน

---

# รายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี

---

## ฟิสิกส์

ชั้น

---

## มัธยมศึกษาปีที่ ๖ เล่ม ๕

ตามผลการเรียนรู้

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

จัดทำโดย

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กระทรวงศึกษาธิการ

จัดทำเป็นฉบับ e-book ครั้งที่ ๒ พ.ศ. ๒๕๖๖

มีลิขสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติ

---

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) ได้จัดทำหนังสือเรียน ฉบับ e-book นี้ขึ้น โดยมีเนื้อหาเช่นเดียวกับหนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีฟิสิกส์ ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ ๖ เล่ม ๕ ฉบับสื่อสิ่งพิมพ์ ที่จัดทำตามมาตรฐานการเรียนรู้และตัวชี้วัด กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐) ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐานพุทธศักราช ๒๕๕๑ ทุกประการ เพื่อให้นักเรียน ครู ผู้ปกครอง นักวิชาการ และผู้สนใจทั่วไป เข้าถึงได้ง่ายและสะดวกรวดเร็ว รวมทั้งสามารถเลือกใช้ตามความเหมาะสมกับจุดประสงค์ต่าง ๆ ทั้งนี้ สสวท. ขอสงวนสิทธิ์ในหนังสือเรียน ฉบับ e-book นี้ ตามกฎหมายลิขสิทธิ์ ห้ามผู้ใดทำซ้ำ คัดลอก ดัดแปลง เลียนแบบ จำหน่าย หรือ เผยแพร่ โดยมีได้รับอนุญาต

---

สามารถเข้าถึงสื่อดิจิทัลต่าง ๆ ของ สสวท. ได้ที่ <http://www.ipst.ac.th/ebook-resource/>

# คำชี้แจง

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) ได้จัดทำตัวชี้วัดและสาระการเรียนรู้แกนกลาง กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐) ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐานพุทธศักราช ๒๕๕๑ โดยมีจุดเน้นเพื่อพัฒนาผู้เรียนให้มีความรู้ความสามารถที่ทัดเทียมกับนานาชาติ ได้เรียนรู้วิทยาศาสตร์ที่เชื่อมโยงความรู้อันซับซ้อนกับกระบวนการใช้กระบวนการสืบเสาะหาความรู้และแก้ปัญหาที่หลากหลาย 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 โมเมนต์ของแรงคู่ควบกระทำต่อขดลวดที่มีกระแสไฟฟ้าผ่านเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ อีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำ ไฟฟ้ากระแสสลับ ความร้อน ทฤษฎีจลน์ของแก๊สของแข็งและของไหล ซึ่งเป็นพื้นฐานที่สำคัญสำหรับการศึกษาต่อในระดับอุดมศึกษาในด้านวิทยาศาสตร์ หรือประกอบอาชีพในสาขาที่ใช้วิทยาศาสตร์เป็นฐาน เช่น แพทย์ วิศวกร สถาปนิก นักอุตุนิยมวิทยา นักธรณีวิทยา ฯลฯ โดยเน้นกระบวนการคิดวิเคราะห์และการแก้ปัญหา เชื่อมโยงความรู้สู่การนำไปใช้ในชีวิตจริง ผู้เรียนจะได้ทำกิจกรรมที่เป็นพื้นฐานที่สำคัญ รวมทั้งกิจกรรมที่ผู้เรียนสามารถคิดค้นและออกแบบการทดลองด้วยตนเอง มีแบบตรวจสอบความรู้ความเข้าใจก่อนเรียน มีแบบฝึกหัดเพื่อให้ตรวจสอบความรู้หลังจากที่เรียนไปแล้ว รวมทั้งสรุปความรู้ในแต่ละบทด้วย ในการจัดทำหนังสือเรียนเล่มนี้ได้รับความร่วมมือเป็นอย่างดีจากผู้ทรงคุณวุฒิ นักวิชาการอิสระ คณาจารย์ทั้งหลาย รวมทั้งครูผู้สอน นักวิชาการ จากสถาบันและสถานศึกษาทั้งภาครัฐและเอกชน จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

สสวท. หวังเป็นอย่างยิ่งว่าหนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ฟิสิกส์ เล่ม ๕ นี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้เรียน และผู้ที่เกี่ยวข้องทุกฝ่าย ที่จะช่วยให้การจัดการศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมีประสิทธิภาพและประสิทธิผล หากมีข้อเสนอแนะใดที่จะทำให้หนังสือเรียนเล่มนี้ มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้นโปรดแจ้ง 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 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

คำถามที่เน้นให้นักเรียนตอบโดยการเขียนบรรยายแสดงความเข้าใจ จนถึงการใช้วิเคราะห์



### ปัญหา

ปัญหาที่มีความซับซ้อนน้อยจนถึงปานกลาง เน้นให้นักเรียนได้ใช้ทักษะการคำนวณ และการแก้ปัญหา



### ปัญหาท้าทาย

ปัญหาที่มีความซับซ้อนมาก เน้นให้นักเรียนได้ใช้ทักษะการคิดระดับสูงในการคำนวณ และการแก้ปัญหา

# 15

## แม่เหล็กและไฟฟ้า

|                                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 15.1 สนามแม่เหล็ก                                                                    | 4   |
| 15.1.1 เส้นสนามแม่เหล็ก                                                              | 6   |
| 15.1.2 ฟลักซ์แม่เหล็ก                                                                | 9   |
| 15.1.3 สนามแม่เหล็กจากกระแสไฟฟ้าผ่านเส้นลวด<br>ตัวนำ                                 | 15  |
| 15.2 แรงแม่เหล็ก                                                                     | 26  |
| 15.2.1 แรงแม่เหล็กกระทำต่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า                                      | 26  |
| 15.2.2 แรงแม่เหล็กกระทำต่อลวดตัวนำที่มีกระแส<br>ไฟฟ้าผ่าน                            | 38  |
| 15.2.3 แรงระหว่างลวดตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้า                                             | 45  |
| 15.3 โมเมนต์ของแรงคู่ควบกระทำต่อขดลวดที่มีกระแส<br>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<br>ของไฟฟ้ากระแสสลับ                    | 86  |
| 15.5.2 การผลิตและการส่งไฟฟ้ากระแสสลับ                                                | 90  |
| สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน                                                              | 102 |
| แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 15                                                                | 107 |

# 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 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอัตราเร็ว<br>อาร์เอ็มเอสของโมเลกุลของแก๊ส  | 155 |
| 16.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์เฉลี่ยของ<br>แก๊สกับอุณหภูมิ              | 160 |
| 16.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วอาร์เอ็มเอส<br>ของโมเลกุลของแก๊สกับอุณหภูมิ | 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 |

# 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<br>รากที่สองและส่วนกลับ | 273 |
| ภาคผนวก ฉ ตัวอย่างการบันทึกการทดลอง                | 274 |
| ภาคผนวก ช ลอการิทึม                                | 277 |
| คำศัพท์                                            | 280 |
| บรรณานุกรม                                         | 282 |
| ที่มาของรูป                                        | 283 |
| คณะกรรมการจัดทำหนังสือเรียน                        | 284 |

บทที่



ipst.me/11064

## 15

แม่เหล็กและไฟฟ้า



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 แม่เหล็ก

4. อธิบายและคำนวณแม่เหล็กที่กระทำต่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็ก รวมทั้งปริมาณที่เกี่ยวข้อง
5. อธิบายและคำนวณรัศมีความโค้งของการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก รวมทั้งปริมาณที่เกี่ยวข้อง
6. อธิบายและคำนวณแม่เหล็กที่กระทำต่อเส้นลวดตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าผ่าน 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

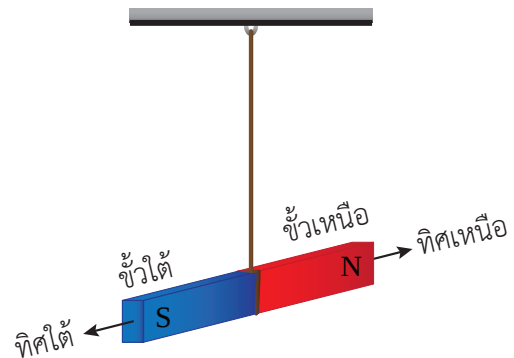
จากการเรียนในบทที่ผ่านมา นักเรียนได้รู้จักสนามไฟฟ้าและปริมาณต่างๆที่เกี่ยวข้องกับสนามไฟฟ้า ในบทนี้จะกล่าวถึงแม่เหล็กและไฟฟ้า โดยนักเรียนจะได้รู้จักกับสนามแม่เหล็ก ผลของสนามแม่เหล็กกับอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กกับตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าผ่าน ความสัมพันธ์ของสนามแม่เหล็กกับปริมาณทางไฟฟ้า รวมทั้งการนำผลของสนามแม่เหล็กไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ

### 15.1 สนามแม่เหล็ก

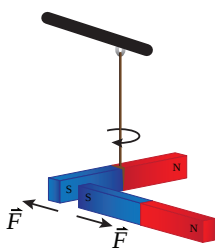
ชาวกรีกโบราณค้นพบแร่ชนิดหนึ่งที่สามารถดึงดูดเหล็กได้ เรียกแร่นั้นว่า **แมกนีไทต์ (magnetite)** ปัจจุบันเรียกวาสัตว์ที่ดึงดูดเหล็กได้ว่า **แม่เหล็ก (magnet)** ด้วยสมบัติการวางตัวของแม่เหล็ก จึงมีการประยุกต์นำไปสร้างเป็นเข็มทิศเพื่อใช้ในการบอกทิศทาง

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

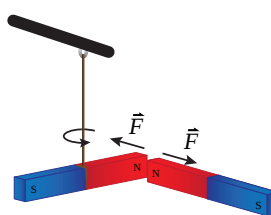
แท่งแม่เหล็กจะมีขั้วเหนือและขั้วใต้เสมอ โดยจะไม่มีแม่เหล็กที่มีเฉพาะขั้วเหนือหรือขั้วใต้เพียงอย่างเดียว เมื่อนำขั้วแม่เหล็กของแท่งแม่เหล็กสองแท่งมาไว้ใกล้กัน ขั้วชนิดเดียวกันจะผลักกัน ขั้วต่างชนิดกันจะดึงดูดกัน ดังรูป 15.2



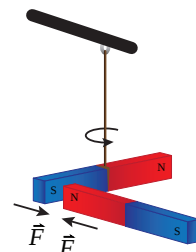
รูป 15.1 แท่งแม่เหล็กจะวางตัวในทิศเหนือ – ทิศใต้ เสมอ



ก. นำขั้วใต้ของแท่งแม่เหล็กมาไว้ใกล้กัน



ข. นำขั้วเหนือของแท่งแม่เหล็กมาไว้ใกล้กัน



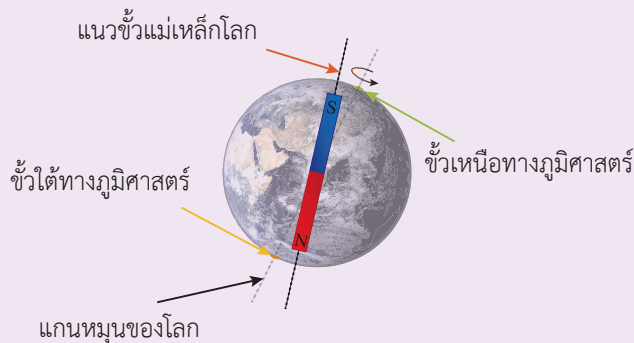
ค. นำขั้วใต้และขั้วเหนือของแท่งแม่เหล็กมาไว้ใกล้กัน

รูป 15.2 แรงระหว่างขั้วแม่เหล็ก



## ความรู้เพิ่มเติม

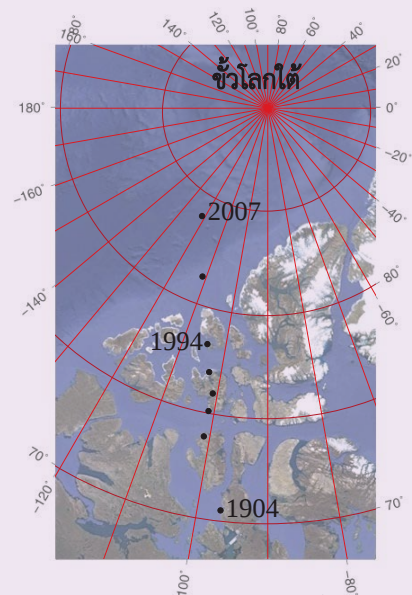
โลกมีสนามแม่เหล็ก **ขั้วแม่เหล็กโลก (geomagnetic pole)** จะอยู่ใกล้กับ **ขั้วเหนือทางภูมิศาสตร์ (geographical north pole)** และ **ขั้วใต้ทางภูมิศาสตร์ (geographical south pole)** ซึ่งเปรียบเสมือนแท่งแม่เหล็กวางตัวในแนวเหนือ-ใต้ ดังรูป



รูป ขั้วแม่เหล็กโลก

เมื่อวางเข็มทิศในบริเวณที่ไม่มีแม่เหล็กอื่นรบกวน เข็มชี้ทิศเหนือของเข็มทิศ จะชี้ไปยังขั้วใต้ของขั้วแม่เหล็กโลกซึ่งเป็นด้านขั้วโลกเหนือทางภูมิศาสตร์ และเข็มชี้ทิศใต้ของเข็มทิศจะชี้ไปยังขั้วเหนือของขั้วแม่เหล็กโลกซึ่งเป็นด้านขั้วโลกใต้ทางภูมิศาสตร์ จะเห็นว่าเข็มชี้ของเข็มทิศจะชี้ไปยังขั้วแม่เหล็กโลกซึ่งจะตรงข้ามกับขั้วทางภูมิศาสตร์

ขั้วแม่เหล็กของโลกนั้นไม่ได้อยู่นิ่งที่ตำแหน่งเดิมตลอด แต่มีการเปลี่ยนตำแหน่งไปในแต่ละปี ดังรูป



รูป การเปลี่ยนตำแหน่งของขั้วเหนือของขั้วแม่เหล็กโลก

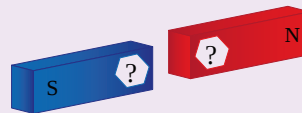


### ชวนคิด

หากนำแท่งแม่เหล็กแท่งหนึ่งดังรูป ก. มาตัดแบ่งเป็นสองแท่ง ดังรูป ข. ตรงปลายที่ตัดแบ่งจะมีขั้วแม่เหล็กหรือไม่ อย่างไร



ก. แท่งแม่เหล็กก่อนตัดแบ่ง



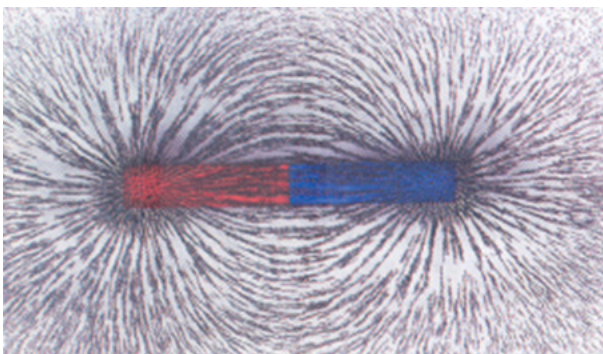
ข. แท่งแม่เหล็กหลังตัดแบ่ง

รูป แท่งแม่เหล็กก่อนและหลังตัดแบ่ง

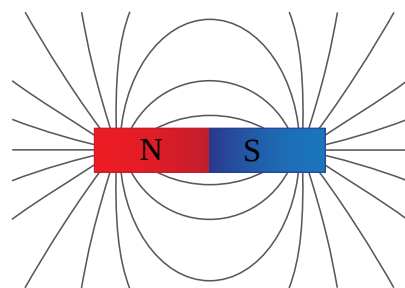
#### 15.1.1 เส้นสนามแม่เหล็ก

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

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



ก. การเรียงตัวของผงเหล็ก

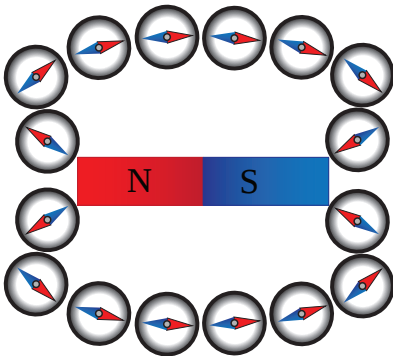


ข. เส้นสนามแม่เหล็กของแท่งแม่เหล็ก

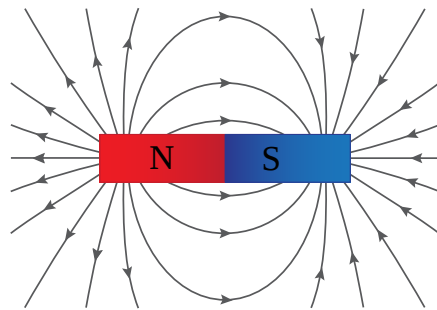
รูป 15.3 การเรียงตัวของผงเหล็กรอบแท่งแม่เหล็ก

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

หากนำเข็มทิศวางใกล้แท่งแม่เหล็กตามแนวเส้นสนามแม่เหล็ก จะมีแรงกระทำต่อเข็มทิศให้เบนไปวางตัวอยู่ในแนวเส้นสนามแม่เหล็ก ดังรูป 15.4 ก. แสดงให้เห็นว่าเส้นสนามแม่เหล็กมีทิศออกจากขั้วเหนือเข้าสู่ขั้วใต้ของแท่งแม่เหล็ก ดังนั้นเส้นสนามแม่เหล็กแสดงทิศทางได้ดังรูป 15.4 ข.



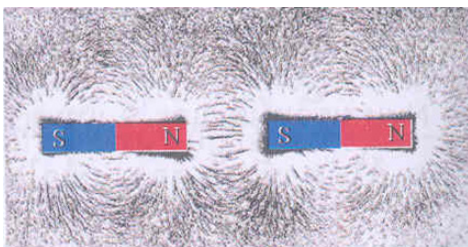
ก. การเรียงตัวของเข็มทิศตามแนวเส้นสนามแม่เหล็ก



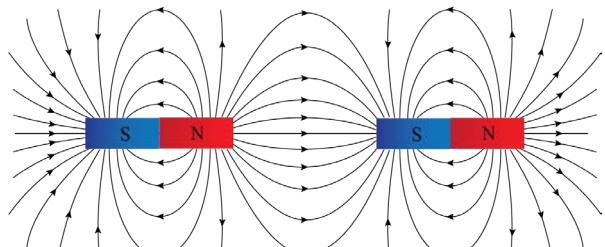
ข. เส้นสนามแม่เหล็กมีทิศทางออกจากขั้วเหนือเข้าสู่ขั้วใต้ของแท่งแม่เหล็ก

รูป 15.4 การหาทิศทางของเส้นสนามแม่เหล็ก

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



ก. แนวการเรียงตัวของผงเหล็ก

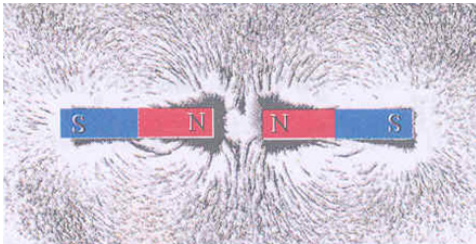


ข. เส้นสนามแม่เหล็กที่เกิดจากแท่งแม่เหล็กสองแท่งเมื่อวางขั้วต่างกันเข้าหากัน

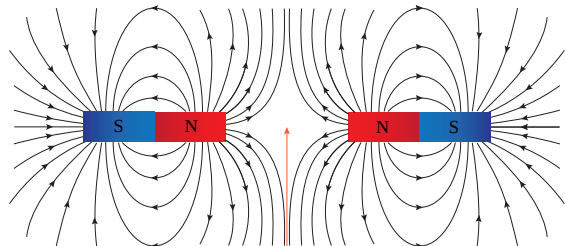
รูป 15.5 วางแท่งแม่เหล็กสองอันใกล้กัน โดยหันขั้วต่างกันเข้าหากัน

จากรูป 15.5 ข. บริเวณระหว่างแท่งแม่เหล็กทั้งสองที่หันขั้วต่างกันเข้าหากัน จะมีเส้นสนามแม่เหล็กอยู่หนาแน่นมากขึ้น แสดงว่าสนามแม่เหล็กบริเวณนี้มีค่ามากขึ้น

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



ก. แนวการเรียงตัวของผงเหล็ก



จุดสะเทิน

ข. เส้นสนามแม่เหล็กที่เกิดจากแท่งแม่เหล็ก  
สองแท่งเมื่อวางขั้วเหมือนกันเข้าหากัน

รูป 15.6 วางแท่งแม่เหล็กสองอันใกล้กัน โดยหันขั้วเหมือนกันเข้าหากัน

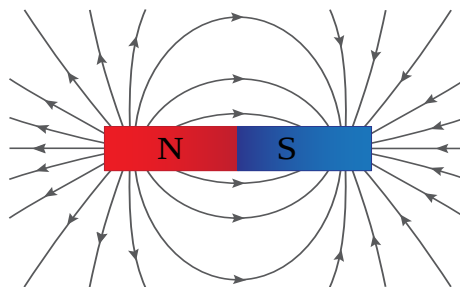
จากรูป 15.6 ข. เมื่อนำแท่งแม่เหล็กที่มีขั้วเหมือนกันมาวางไว้ใกล้กัน จะสังเกตเห็นว่ามีบริเวณที่อยู่ระหว่างขั้วแม่เหล็กนั้น มีเส้นสนามแม่เหล็กหนาแน่นน้อย แสดงว่าบริเวณนั้นสนามแม่เหล็กมีค่าน้อยและตำแหน่งที่สนามแม่เหล็กมีค่าเป็นศูนย์ เรียกตำแหน่งนี้ว่า **จุดสะเทิน (neutral point)**

### 15.1.2 พลักซ์แม่เหล็ก

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



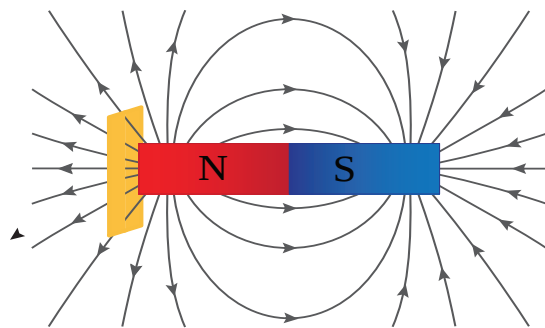
ก. ผงเหล็กบริเวณขั้วแม่เหล็กแบบ 3 มิติ



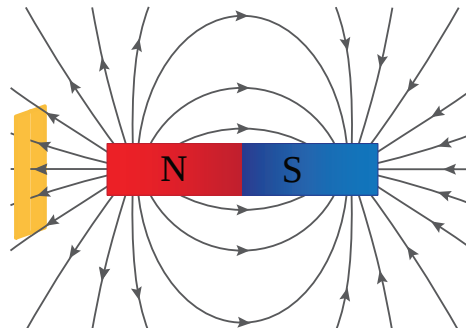
ข. เส้นสนามแม่เหล็กใน 2 มิติ

รูป 15.7 สนามแม่เหล็กรอบแท่งแม่เหล็ก

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



ก. จำนวนเส้นสนามแม่เหล็กที่ผ่านหนึ่งหน่วยพื้นที่บริเวณใกล้ขั้วแม่เหล็ก



ข. จำนวนเส้นสนามแม่เหล็กที่ผ่านหนึ่งหน่วยพื้นที่บริเวณห่างออกไปจากขั้วแม่เหล็ก

รูป 15.8 ความหนาแน่นของเส้นสนามแม่เหล็ก