



ข้อสอบและเฉลย ภาคปฏิบัติ

การแข่งขันฟิสิกส์โอลิมปิกระดับชาติ ครั้งที่ 21

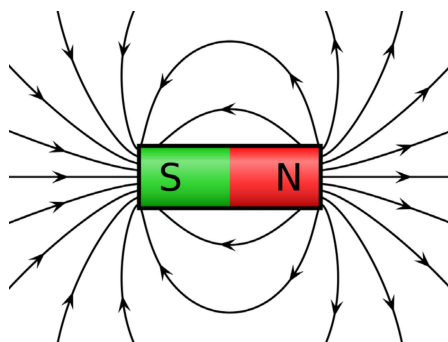
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

วันเสาร์ ที่ 27 สิงหาคม พ.ศ. 2565

แม่เหล็กถาวรและสนามแม่เหล็ก (Magnets & Magnetic Fields)

[20 คะแนน]

แท่งแม่เหล็ก (magnets) เป็นสารแม่เหล็กที่สามารถคงสภาพแม่เหล็กไว้ได้ถาวรหลังจากถูกเหนี่ยวนำแล้ว แม่เหล็กถาวรถูกนำไปใช้งานในหลากหลายอุปกรณ์ เช่น มอเตอร์ ลำโพง เป็นต้น แม่เหล็กที่พบเห็นได้ทั่วไปคือแม่เหล็กทรงกระบอก ที่ปลายแต่ละข้างคือขั้วเหนือ (N) และขั้วใต้ (S) เส้นแรงแม่เหล็กจะพุ่งออกจากบริเวณขั้วเหนือและเข้าหาขั้วใต้ บริเวณขั้วเหนือและขั้วใต้ของแท่งแม่เหล็กจะมีจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กต่อพื้นที่มากกว่าบริเวณอื่น ๆ ซึ่งแสดงว่าบริเวณปลายขั้วจะมีความเข้มของสนามแม่เหล็กมากกว่าบริเวณอื่น ในรูปด้านล่างนี้จะสังเกตเห็นว่ามีสนามแม่เหล็ก (หรือฟลักซ์แม่เหล็ก) ออกจากบริเวณด้านข้างด้วย



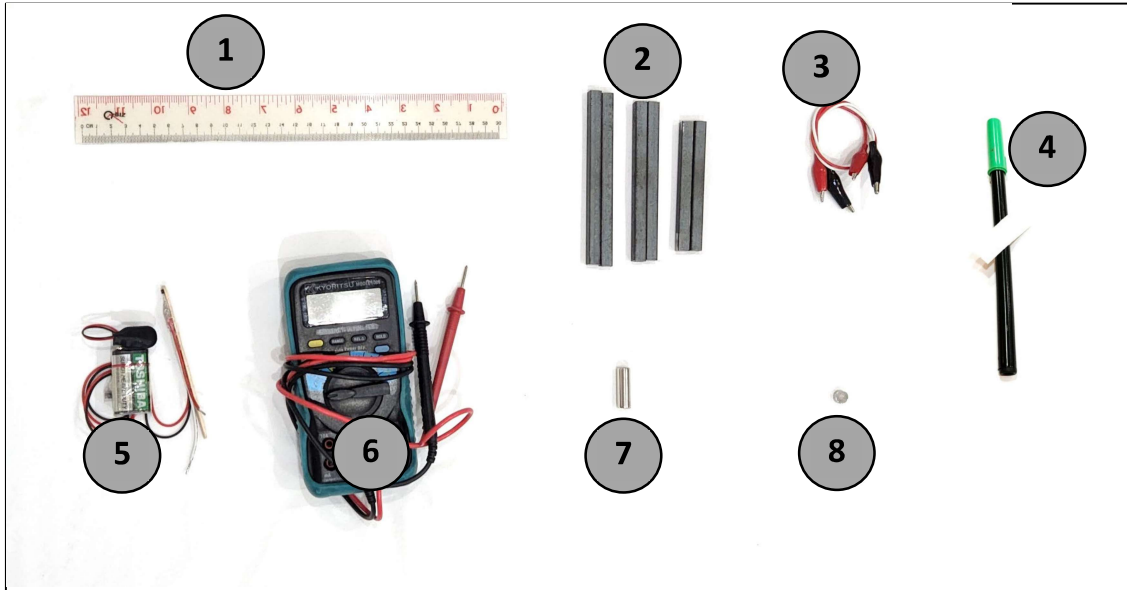
รูปที่ 1. เส้นแรงแม่เหล็กของแท่งแม่เหล็กทรงกระบอก (<https://en.wikipedia.org/wiki/Magnet>)

ในแท่งแม่เหล็กถาวรจะมีไดโพลโมเมนต์ (magnetic dipole moment, $\vec{m}$) แบบถาวรซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดของสนามแม่เหล็ก เรานิยาม แมกนีไทเซชัน (magnetization, $\vec{M}$) เท่ากับไดโพลโมเมนต์ต่อปริมาตร ในกรณีที่แท่งแม่เหล็กมี magnetization แบบสม่ำเสมอ เราจะได้ว่าไดโพลโมเมนต์ของแม่เหล็กทั้งแท่งเท่ากับ

$$\vec{m} = \vec{M}V \quad \text{Am}^2 \quad (1)$$

เมื่อ V เป็นปริมาตรของแม่เหล็กทั้งแท่ง

อุปกรณ์

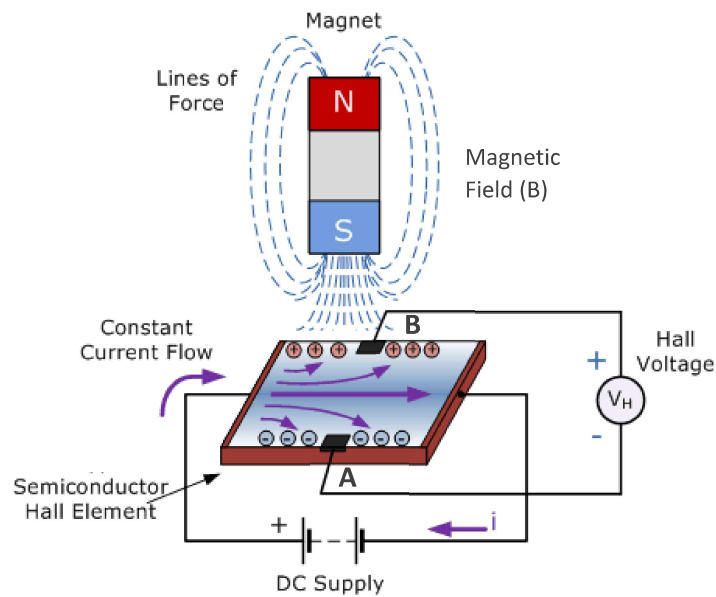


รูปที่ 2. อุปกรณ์ที่นำมาทั้งหมดสำหรับการทดลองทั้ง 3 ตอน

1. ไม้บรรทัด
2. ท่อนเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจำนวน 6 ท่อน
3. สายไฟจำนวน 2 เส้น สำหรับต่อ Hall sensor เข้ากับดิจิทัลดมิเตอร์
4. ปากกาสีเมจิกและเทปกาว 2 หน้า (กาว 2 หน้าใช้สำหรับยึดแม่เหล็กกับพื้นโต๊ะ)
5. Hall sensor ติดอยู่ที่ปลายไม้แบน พร้อมสายไฟ ติดอยู่กับแบตเตอรี่
6. ดิจิทัลดมิเตอร์
7. แท่งแม่เหล็กทรงกระบอก แบบยาวจำนวน 1 แท่ง
8. แท่งแม่เหล็กทรงกระบอก แบบสั้นจำนวน 1 แท่ง

หลักการ Hall sensor

เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลจากซ้ายไปขวาผ่านสารกึ่งตัวนำ ที่วางในสนามแม่เหล็ก จะทำให้พาหะในสารกึ่งตัวนำแยกออกไปบนและล่าง ยังผลให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นด้านข้าง (ระหว่าง A และ B) ในสารกึ่งตัวนำ ถ้ากระแสไหลผ่านคงที่ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะแปรผันโดยตรงกับความเข้มของสนามแม่เหล็ก ถ้าทราบความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นก็จะสามารถหาความเข้มสนามแม่เหล็กได้



รูปที่ 3. หลักการทำงานของ Hall sensor

(รูปจาก <https://www.symmetryelectronics.com/blog/finding-the-universal-linear-hall-effect-sensor-for-every-application/>)

การใช้งาน Hall sensor (โปรดอ่าน!)

1. ให้ประกบฝาแบตเตอรี่เข้ากับขั้วของแบตเตอรี่
2. ต่อสายไฟสีแดงจาก Hall sensor เข้าขั้วบวกของดิจิตอลมัลติมิเตอร์ และสายสีขาวเข้าขั้วลบของมัลติมิเตอร์ (หรือขั้ว COM)
3. เลือกโหมดวัดความต่างศักย์กระแสตรง (DC voltage)
4. ค่าที่อ่านได้ในขณะที่ไม่อยู่ใกล้แท่งแม่เหล็กควรมีค่าในช่วง $V_0 \approx 2.30 - 2.60$ volt
5. Hall sensor วัดสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากกับระนาบของมันเท่านั้น (ระนาบเดียวกับไม้แบน)
6. หากอ่านมิเตอร์ได้ความต่างศักย์ V ให้คำนวณสนามแม่เหล็กจากสมการ $B = 33.1 \times \Delta V$ mT เมื่อ ΔV คือขนาดความต่างศักย์(ในหน่วยโวลต์)ที่เปลี่ยนไป หรือ $\Delta V = |V - V_0|$
7. สมการ $B = 33.1 \times \Delta V$ mT ใช้ได้เฉพาะเมื่อสนามแม่เหล็กมีค่าน้อยกว่า 55 mT หากสนามมีค่ามากกว่านี้ผลที่วัดได้จะไม่ linear



รูปที่ 4. การต่อวงจร Hall sensor

ข้อควรระวัง !

1. โปรดระวังแท่งแม่เหล็กหนีบนิ้ว
2. ไม่ควรนำแท่งแม่เหล็กทั้งสองมาใกล้กัน หากดูดติดกันแล้วจะแยกออกยาก หรือแตกหักได้หากดูดเข้าหากัน
3. หากแม่เหล็กดูดติดกันจนแยกไม่ออก ให้ยกมือขอความช่วยเหลือ
4. ระวังไม่ให้แม่เหล็กแตกหัก แต่หากแม่เหล็กแตกหัก ให้ยกมือขอความช่วยเหลือ
5. ทำการทดลองบริเวณกลางแจ้ง (บริเวณที่แปะกระดานขาวไว้)

ตอนที่ 1 สนามแม่เหล็กที่ระยะไกล

[9.0 คะแนน]

สำหรับแท่งแม่เหล็กทรงกระบอกที่มี magnetization $\vec{M}$ สมำเสมอและขนานกับแกนทรงกระบอก เราพบว่าขนาดของสนามแม่เหล็ก B ในแนวเดียวกับแกนของแม่เหล็ก ที่ระยะ x ซึ่งไกลพอสมควรจากแท่งแม่เหล็ก มีค่าเท่ากับ

$$B(x) = \frac{\mu_0 m}{2\pi} x^n \quad (2)$$

เมื่อ n เป็นจำนวนจริง, m เป็น magnetic dipole moment ของแท่งแม่เหล็ก

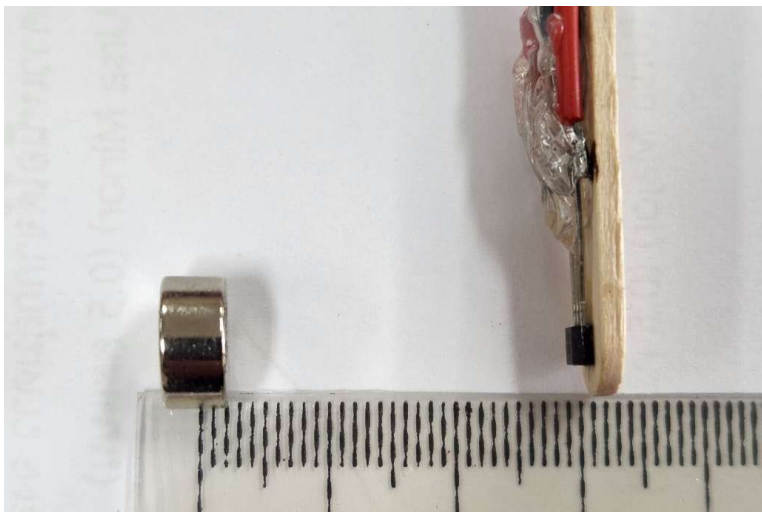
และ $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$

ในการทดลองนี้เราจะทดลองในบริเวณที่สนามจากแท่งแม่เหล็กมีค่าสูงกว่าสนามแม่เหล็กโลกมาก ทำให้ไม่ต้องคำนึงถึงสนามแม่เหล็กโลก และสนามไม่สูงเกินไปจนกระทั่ง Hall sensor เป็น non-linear ซึ่งช่วงที่เหมาะสมคือ $0.01 \leq \Delta V \leq 1.67 \text{ volt}$

คำสั่ง

- บันทึกความต่างศักย์ V_0 ของ Hall sensor เมื่ออยู่ห่างจากแท่งแม่เหล็กอย่างน้อย 30 cm
- ใช้เทปขาวสองหน้าแปะแท่งแม่เหล็กแท่งสั้นกับพื้นโต๊ะ ให้แกนแม่เหล็กขนานกับพื้นโต๊ะ
- วัดความต่างศักย์ที่เปลี่ยนไป ΔV ที่ระยะ x ต่าง ๆ โดยวัดระยะ x จากกึ่งกลางแม่เหล็กไปยังกึ่งกลาง Hall sensor ทั้งนี้ให้บันทึกเฉพาะจุดที่ $0.01 \leq \Delta V \leq 1.67$ โวลต์ ไม่ต้องหาค่าคลาดเคลื่อนของ x
- บันทึกผลลงในตารางของกระดาษสรุปคำตอบ
- คำนวณค่าต่าง ๆ แล้ว plot จุดจากการทดลองในกระดาษกราฟของกระดาษสรุปคำตอบ โดยเลือกแกนที่สามารถใช้กราฟเส้นตรงในการหาค่า n ได้
- วาดเส้นตรงที่เป็นตัวแทนของข้อมูล (trendline) เฉพาะส่วนของจุดข้อมูลที่นักเรียนคิดว่าเรียงกันเป็นเส้นตรง
- หาค่า n พร้อมระบุค่าคลาดเคลื่อน
- คำนวณขนาดของ magnetization (M) ของแม่เหล็กแท่งนี้ พร้อมระบุค่าคลาดเคลื่อน

รูปการทดลองตอนที่ 1



รูปที่ 5. การทดลองตอนที่ 1

ตอนที่ 2 การส่งผ่านสนามแม่เหล็ก

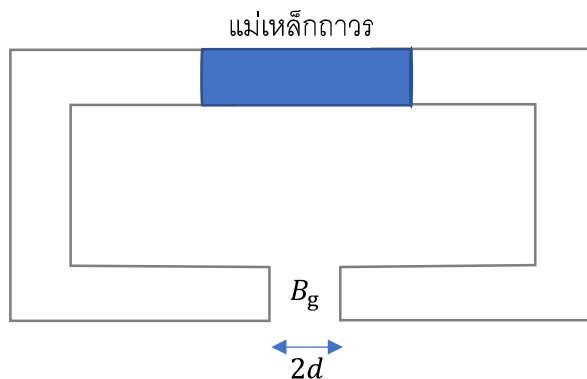
[6.7 คะแนน]

การทดลองบางชนิดต้องการสนามแม่เหล็กในบริเวณเล็ก ๆ ซึ่งไกลจากแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก จากการทดลองในตอนต้นที่ 1 เราจะเห็นว่าสนามแม่เหล็กลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อระยะทางมีค่ามากขึ้น วิธีการหนึ่งในการส่งสนามแม่เหล็กไประยะไกล ๆ คือการใช้วัสดุประเภท ferromagnetic (เช่น เหล็ก นิกเกิล) ซึ่งมีค่าสภาพซึมซาบสัมพัทธ์ (relative permeability) ที่สูงมาก เส้นสนามแม่เหล็กที่ออกจากแหล่งกำเนิดจะโดนขังอยู่ภายในวัสดุนี้ก่อนจะถูกปล่อยในบริเวณที่ทดลอง

สมมติแท่งแม่เหล็กมีสนามที่ปลายขั้วเท่ากับ B_{pole} เมื่อเราใช้ท่อนเหล็กวางต่อจากแท่งแม่เหล็ก สนามที่ปลายของท่อนเหล็กจะมีค่าน้อยกว่า B_{pole} เนื่องจากยังมีเส้นแรงแม่เหล็กหลุดออกไปไม่ได้โดนขังไว้ทั้งหมด อย่างไรก็ตามสนามที่ปลายท่อนเหล็กก็ยังมีค่าสูงกว่าสนามกรณีปล่อยผ่านมาทางอากาศอย่างเดียว

หากนำท่อนเหล็ก 2 ท่อนรัศมี R เท่ากันและยาวเท่ากันมาต่อกับแม่เหล็กถาวรแล้วโค้งให้เป็นรูปที่มีช่องอากาศ (air gap) $2d$ ดังรูปที่ 6 เราพบว่า สนามแม่เหล็ก B_g ที่กึ่งกลาง air gap มีค่าประมาณ

$$B_g \approx 2B_0 \left(1 - \frac{d}{\sqrt{d^2 + R^2}}\right) \quad (3)$$



รูปที่ 6. รูปของท่อนเหล็กแบบมี air gap

ข้อมูลที่กำหนดให้

1. สำหรับท่อนเหล็กสี่เหลี่ยมในการทดลองนี้ สามารถประมาณว่าเป็นทรงกระบอกที่มีรัศมี

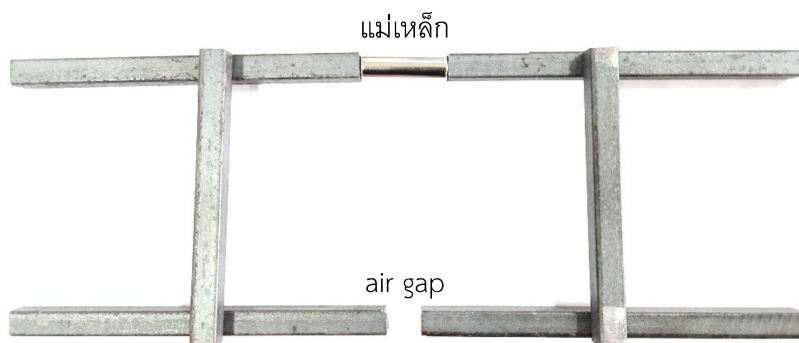
$$R = 5.0 \text{ mm}$$

2. สนามที่ปลายแม่เหล็กแท่งยาว $B_{\text{pole}} = 560 \text{ mT}$

คำสั่ง

1. ให้ต่อท่อนเหล็กเข้ากับแท่งแม่เหล็กยาว ให้ได้รูป 4 เหลี่ยมที่มีขนาดประมาณ $10 \text{ cm} \times 18 \text{ cm}$ (รวมความยาวของแท่งแม่เหล็กและ air gap แล้ว) โดยใช้ท่อนเหล็กคู่สั้นพาดบนท่อนเหล็กที่ต่อเป็นราง (ตามรูปในหน้าถัดไป)
2. ใช้ปากกาทำเครื่องหมายบนท่อนเหล็ก เพื่อนำกลับมาวางตำแหน่งเดิมหากมีการขยับเลื่อน
3. วัดสนามแม่เหล็ก B_g ที่กึ่งกลาง air gap ในช่วงระยะ $6.0 \leq 2d \leq 24 \text{ mm}$
4. ใช้กราฟเส้นตรงหาค่า B_0 แล้วคำนวณหาอัตราส่วน $\frac{B_0}{B_{\text{pole}}}$

รูปการทดลอง

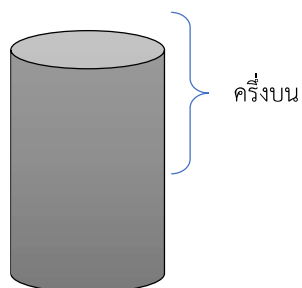


รูปที่ 7. (บน) รูปแม่เหล็กและท่อนเหล็ก (ล่าง) การวัดสนามใน air gap

ตอนที่ 3 Magnetic Flux & Magnetization

[4.3 คะแนน]

สำหรับแท่งแม่เหล็กถาวรทรงกระบอกยาว L รัศมี R มี magnetization สมำเสมอ $\vec{M}$ ตามแกนทรงกระบอก จะมีฟลักซ์แม่เหล็กที่ออกมาจากครึ่งบนทั้งทางด้านข้างของทรงกระบอกและด้านปลายของหัว (อ้างอิงรูปที่ 1)



โดยฟลักซ์ทั้งหมดที่ออกมาจากครึ่งบน เท่ากับ

$$\Phi_B \approx \mu_0 M \left(\frac{L/2}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2}} \right) \pi R^2 \quad (4)$$

คำสั่ง

- จงออกแบบการทดลองเพื่อวัดสนามแม่เหล็ก แล้วนำมาคำนวณฟลักซ์แม่เหล็กที่ออกมาจากครึ่งหนึ่งของแท่งแม่เหล็กอันยาว โดยไม่ต้องใช้แท่งเหล็กในการทดลองนี้
- จากฟลักซ์ที่ได้ ให้คำนวณค่า magnetization ของแท่งแม่เหล็กอันยาว

คำแนะนำ

- ควรวัดสนามแม่เหล็กเฉพาะในช่วง $0.01 \leq \Delta V \leq 1.67$ โวลต์