

Eddy Current and Magnetic Brake

วัตถุประสงค์

ศึกษาการเคลื่อนที่ของแม่เหล็กบนแผ่นอะลูมิเนียมเพื่อนำไปวิเคราะห์เกี่ยวกับปริมาณต่างๆ ต่อไปนี้

1. ค่าสนามแม่เหล็กของลวดแม่เหล็ก
2. แรงต้านการเคลื่อนที่อันเนื่องมาจากกระแสไหลวน (eddy current)
3. ค่าสภาพนำไฟฟ้า (conductivity) ของแผ่นฉนวนอะลูมิเนียม

ลวดแม่เหล็กเปราะมาก อย่าทำตกพื้น หรืออย่าให้กระแทกแรงๆ
จะทำให้แตกได้ และอาจไม่มีเปลี่ยนให้

**** ระวัง **** อย่าให้ลวดแม่เหล็กเข้าใกล้ตัวยึดฉากกั้นที่เป็นเหล็กซึ่งอยู่ที่ขอบโต๊ะ
ลวดแม่เหล็กอาจวิ่งเข้ากระแทกตัวยึดฉากจนแตกได้

หลักการ

เมื่อมีสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาผ่านตัวนำที่ไม่เป็นแม่เหล็ก เช่น ให้แท่งแม่เหล็กเคลื่อนที่ลงในแนวตั้งผ่านท่อตัวนำทองแดงหรืออะลูมิเนียม จะมีอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำและกระแสไฟฟ้าเรียกว่ากระแสไหลวน (eddy current) เกิดขึ้นในตัวนำนั้น กระแสนี้จะไหลวนในทิศที่เกิดการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กในลักษณะที่ทำให้มีการต่อต้านการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ (ตาม Faraday's law และ Lenz's law) และส่งผลให้เกิดแรงต้านการเคลื่อนที่ต่อแท่งแม่เหล็ก

อีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำ (induced emf)

ถ้ามีแท่งแม่เหล็กซึ่งอยู่ในรูปของลวดและเพลลา โดยแต่ละลวดลัดไปบนแถบอะลูมิเนียมสองแถบที่วางขนานกัน (ดังรูป 1.1) การเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กในแต่ละแถบจะทำให้เกิดอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำขึ้น ในกรณีที่วางลวดแม่เหล็กทั้งสองให้เกิดแรงผลักกัน เมื่อลวดเคลื่อนที่ลงตามพื้นเอียง ความต่างศักย์ไฟฟ้า V ระหว่างแถบอะลูมิเนียมทั้งสองจะขึ้นกับความเร็วของลวด ถ้ารัศมีลวดเป็น R และรัศมีเพลลาเป็น R_0 สนามแม่เหล็กของแต่ละลวดเป็น B ระยะทางของการกลิ้งเป็น s และลวดมีความเร่งคงที่ขนาด a จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$V^2 = 2asB^2 \frac{R^2 - R_0^2}{R^2} \dots\dots\dots (1)$$

ในกรณีกลับกัน ถ้าวางแถบตัวนำสองแถบให้อยู่บนพื้นราบ และวางลวดทั้งสองให้อยู่บนแถบที่ต่างกัน เมื่อต่อความต่างศักย์ให้กับแถบทั้งสอง จะพบว่าลวดทั้งสองลื่นไถลไปบนรางได้ และเมื่อกลับขั้วของความต่างศักย์ ทิศการวิ่งก็จะกลับกัน

แรงแม่เหล็กเนื่องจากกระแสไหลวน

ถ้าให้แท่งแม่เหล็กไถลลงพื้นเอียงที่มีผิวเป็นแผ่นตัวนำ เช่น อะลูมิเนียม (ดังรูป 2.1-2.3) จะพบว่ามีการเหนี่ยวนำเกิดขึ้นในแผ่นตัวนำ แรงแม่เหล็กอันเนื่องจากการเหนี่ยวนำนี้จะต้านการเคลื่อนที่ โดยประมาณแล้วแรงแม่เหล็ก F_m นี้มีขนาดแปรผันตรงกับขนาดของความเร็ว v ของแท่งแม่เหล็ก หรือเขียนได้ว่า $F_m = -bv$, เมื่อ b เป็น damping (dragging) coefficient ซึ่งมีค่าขึ้นกับรูปร่างแท่งแม่เหล็กและสมบัติของพื้นผิว

ถ้า m เป็นมวลของแท่งแม่เหล็ก สมการการเคลื่อนที่ลงตามพื้นเอียงที่ทำมุม θ กับแนวราบจะเป็น

$$m \frac{dv}{dt} = mg \sin \theta - bv - \mu mg \cos \theta \quad \dots \dots \dots (2)$$

เมื่อ μ เป็นสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ (kinetic friction coefficient) ระหว่างแท่งแม่เหล็กกับพื้นเอียง

จากสมการ (2) จะสามารถหาคำตอบสำหรับความเร็ว v ที่เวลา t ใดๆ ในกรณี $v(0) = 0$ ได้ว่า

$$v(t) = v_T \left[1 - e^{-t/\tau} \right] \quad \dots \dots \dots (3)$$

โดยที่ time constant $\tau = \frac{m}{b}$

และความเร็วปลาย (terminal velocity) v_T มีค่าดังสมการ

$$v_T = \frac{mg \sin \theta - \mu mg \cos \theta}{b} \quad \dots \dots \dots (4)$$

ความเร็วปลายตามสมการ (4) นี้อาจหาได้จากกรณีที่ความเร่งของการเคลื่อนที่เป็นศูนย์ ซึ่งจะได้ความเร็วคงที่เป็นความเร็วปลาย การเคลื่อนที่ของแม่เหล็กจะเริ่มด้วยการเคลื่อนที่ด้วยความเร่งจนเข้าสู่ช่วงที่ความเร็วคงที่ ก็จะเคลื่อนที่ต่อไปด้วยความเร็วนี้ ซึ่งระยะเวลาของการเข้าสู่ช่วงความเร็วคงที่จะขึ้นกับค่า time constant τ ยิ่ง τ มีค่าน้อยจะทำให้ระยะเวลาการเข้าสู่ช่วงความเร็วคงที่จะยิ่งสั้น

สภาพนำไฟฟ้า (conductivity)

แรงอันเนื่องมาจากการเหนี่ยวนำหรืออีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำดังกล่าวนอกจากมีค่าขึ้นกับความเร็วของแท่งแม่เหล็กแล้ว ยังขึ้นกับสภาพนำไฟฟ้า (conductivity) σ ของแผ่นตัวนำที่แท่งแม่เหล็กเคลื่อนที่ผ่านไปด้วย นอกจากนี้ยังมีแฟกเตอร์ Λ ของการกระจายค่าสนามแม่เหล็กจากแท่งด้วย ดังสมการ

$$F_m = -\sigma \Lambda v \dots\dots\dots (5)$$

ในกรณีที่แท่งแม่เหล็กรูปจานที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง D ไกลไปบนแผ่นโลหะ เช่น อะลูมิเนียม ซึ่งหนา d จะสามารถแสดงได้ว่า

$$\Lambda = kdD^2B^2 \dots\dots\dots (6)$$

เมื่อ B เป็นค่าสนามแม่เหล็กของแท่งดังกล่าว และ k เป็นค่าคงที่เฉพาะของวัสดุและการกระจายของสนามแม่เหล็ก

วัสดุ/อุปกรณ์

- แม่เหล็กรูปจาน (disked shape magnets) ชนิดที่มีรูตรงกลาง จำนวน 4 ก้อน ทำเป็นล้อย 2 ล้อ ประกอบอยู่บนเพลลาโดยจัดให้มีแรงผลักกัน (ในการทดลองนี้ได้ประกอบล้อและเพลลาไว้ให้เรียบร้อยแล้ว ขอให้ตรวจสอบว่าอยู่ในสภาพผลักกันจริง โดยดูจากรูปร่างของล้อที่เหมือนกันอยู่ใกล้กัน)
- แม่เหล็กแต่ละก้อน มีเส้นผ่านศูนย์กลางขอบนอกและขอบในเป็น 19.00 ± 0.01 mm และ 5.20 ± 0.01 mm หนา 5.00 ± 0.01 mm และมีมวล 8.7 ± 0.1 g
- นาฬิกาจับเวลา
- แผ่นไม้ยาวสำหรับทำพื้นเอียง ด้านหนึ่งมีแถบอะลูมิเนียมแปะอยู่ 2 แถบ ห่างกันเล็กน้อย และมีสติกเกอร์สเกลติดอยู่ตรงกลางทับช่องว่างระหว่างแถบอะลูมิเนียมทั้งสอง
- แผ่นฉากอะลูมิเนียม 1 แผ่น (หนา 1.0 mm)
- แผ่นไม้เล็กๆ สำหรับหนุนพื้นเอียง 8 แผ่น (ในบางกรณีอาจใช้กล่อง multimeter ช่วยในการหนุนด้วย)
- ไม้บรรทัด
- ตัวเก็บประจุ (ต่อกับสายไฟไว้ให้แล้ว)
- กล่องกระดาษ (สำหรับรองรับที่ปลายล่างพื้นเอียง กันไม่ให้ล้อแม่เหล็กกลิ้งหนีไปไกล)
- เทปขาว 1 ม้วน
- multimeter (ปรับไปที่ 200 mV DC)

คำแนะนำ

- ✓ แท่งแม่เหล็กเปราะมาก อย่าทำตกพื้น หรืออย่าให้กระแทกแรงๆ จะทำให้แตกได้ และอาจไม่มีเปลี่ยนให้
- ✓ ล้อตกรังไว้ด้วยนอต อาจเกิดการหลวมได้ระหว่างการทดลอง ทำให้เสียได้ขณะกลิ้งลงพื้นเอียง จึงควรตรวจสอบเป็นระยะ และขันนอตให้แน่นอยู่เสมอ

การทดลอง

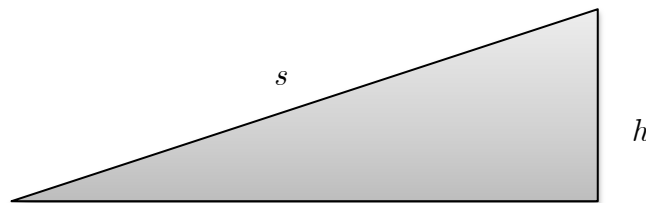
ในการทดลองต่อไปนี้ให้ใช้ค่าอัตราเร่งโน้มถ่วง $g = 9.8 \text{ m/s}^2$

ตอนที่ 1 หาค่าสนามแม่เหล็กของลวดแม่เหล็ก

[7.0 คะแนน]

(ให้บันทึกข้อมูลการทดลองลงในตารางที่ 1 ในกระดาษสรุปคำตอบ)

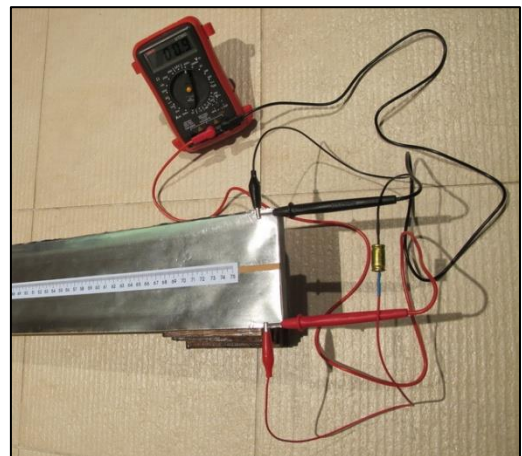
1.1 การหาค่าความเร่งของลวด



- ใช้แผ่นไม้เล็กๆ หนุนแผ่นไม้ยาวให้มีมุมเอียงน้อยๆ โดยให้แถบอะลูมิเนียมอยู่ด้านบน
 - ปล่อยลวดและเพลากลิ้งลงมาตามพื้นเอียง โดยให้แต่ละลวดอยู่บนแถบอะลูมิเนียมต่างกัน ดังรูป 1.1
- คำแนะนำ** - ใช้กล่องกระดาษรองรับลวดและเพลากลางของพื้นเอียง (ดูรูปเล็ก ในรูป 1.1)
- ในการกลิ้งต้องระวังไม่ให้ตก และไม่มีแรงเสียดทาน จึงต้องหาวิธีการปล่อยที่เหมาะสม
 - ทำการจับเวลาในการกลิ้งลงมาตามพื้นเอียงเป็นระยะทาง 70 cm เพื่อนำไปหาความเร่งของการเคลื่อนที่
 - ให้ระบุในกระดาษสรุปคำตอบด้วยว่าใช้ความสัมพันธ์ใดในการคำนวณหาความเร่ง



รูปข้อ 1.1



รูปข้อ 1.2

1.2 วัดค่าความต่างศักย์ระหว่างแถบอะลูมิเนียม

- ใช้มัลติมิเตอร์วัดค่าความต่างศักย์ระหว่างแถบอะลูมิเนียมทั้งสอง และต่อโวลต์มิเตอร์คร่อมตัวเก็บประจุ ดังรูป 1.2 หากไม่สามารถหนีบขั้วกับแถบอะลูมิเนียมได้สามารถใช้เทปกาวช่วยยึดได้

คำแนะนำ ควรตรวจสอบให้แน่ใจว่าขณะทำการทดลอง ขั้วของตัวเก็บประจุและขั้วของ multimeter แตะกันอยู่และแตะอยู่กับแถบอะลูมิเนียมตลอดเวลา วิธีสังเกตให้แน่ใจว่าขั้วยังแตะกันอยู่กับแถบอะลูมิเนียมคือ เมื่อวางลวดลงบนแถบอะลูมิเนียม ค่าบน multimeter ควรประมาณศูนย์โวลต์

- ปล่อยลวดและเพลากลิ้งลงมาตามพื้นเอียงเป็นระยะทาง 70 cm โดยให้แต่ละลวดอยู่บนแถบอะลูมิเนียมต่างกัน
- วัดค่าความต่างศักย์คร่อมตัวเก็บประจุ ขณะที่ลวดหลุดจากรางพอดี

คำแนะนำ ความต่างศักย์ที่ต้องการจะเกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆ ดังนั้นต้องทดสอบหลายๆ ครั้งเพื่อพิจารณาว่าควรอ่านค่าในจังหวะใด ในที่นี้ตัวเก็บประจุที่ให้อยู่กับแถบอะลูมิเนียมมีค่า **capacitive time constant** น้อยมาก เพื่อช่วยในการอ่านค่าได้ง่ายขึ้น (ค่าความจุประมาณ 10 ไมโครฟารัด และค่าความต้านทานของอะลูมิเนียมน้อยกว่า 1 โอห์ม)

1.3 ทำการทดลองซ้ำตอน 1.1 และ 1.2 โดยเปลี่ยนมุมเอียงค่าต่างๆ โดยแต่ละมุมให้ใช้ระยะทางการกลิ้ง 70 cm เท่ากัน (ในการทดลองตอนนี้ให้ปรับความสูง h ของพื้นเอียงมีค่าประมาณ 2-10 cm)

1.4 เขียนกราฟเพื่อหาค่าสนามแม่เหล็กของลวด พร้อมค่าความคลาดเคลื่อน

ตอนที่ 2 การศึกษาแรงแม่เหล็กจากกระแสไหลวน

[2.0 คะแนน]

ถอดล้อแม่เหล็กข้างหนึ่งออกมาเพื่อใช้ในการทดลองต่อไปนี้ (ล้อข้างหนึ่งหมายถึงแม่เหล็กทั้งสองก้อนที่ติดกันอยู่ ไม่ต้องแยกออกจากกัน) เมื่อถอดล้อแล้วให้เก็บส่วนที่เหลือให้ห่างเพื่อไม่ให้แม่เหล็กดูดกัน ซึ่งอาจมีความแรงมากและอาจทำให้บาดเจ็บได้

2.1 วางแม่เหล็ก (โดยหงายด้านที่มีส่วนเว้าขึ้นบน) ลงบนผิวส่วนที่เป็นแถบอะลูมิเนียมแถบหนึ่ง ปรับมุมเอียงประมาณ 30-35 องศา จับเวลาที่แม่เหล็กไถลลงเป็นระยะทาง 50 cm (t_{A1})

2.2 ทำพื้นเอียงใหม่ โดยพลิกให้ผิวด้านที่เป็นไม้อยู่ด้านบน วางแม่เหล็กลงบนผิวส่วนที่เป็นไม้ ปรับมุมเอียงเท่ากับกรณีแรก จับเวลาที่แม่เหล็กไถลลงเป็นระยะทาง 50 cm (t_w)

2.3 จากนั้นวางแผ่นฉากอะลูมิเนียมทาบไปบนแผ่นไม้ (หากไม่แนบสนิทให้ใช้เทปกาวช่วยยึดให้สนิทมากที่สุดเท่าที่จะทำได้) วางแม่เหล็กลงบนผิวของแผ่นฉากอะลูมิเนียม ปรับมุมเอียงเท่ากับสองกรณีที่ผ่านมา จับเวลาที่แม่เหล็กไถลลงเป็นระยะทาง 50 cm (t_{A2})

2.4 จงระบุเหตุผลที่ทำให้เกิดความแตกต่างของเวลาทั้งสามกรณี



รูปข้อ 2.1



รูปข้อ 2.2



รูปข้อ 2.3

ตอนที่ 3 การหา **damping coefficient**

[9.0 คะแนน]

(ให้ทำการบันทึกข้อมูลการทดลองตอนนี้อยู่ในตารางที่ 2 ในกระดาษสรุปคำตอบ)

3.1 ถ้าต้องการหาค่า **damping coefficient** b และสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ μ โดยการเขียนกราฟเส้นตรง จะต้องเขียนกราฟระหว่างปริมาณใด

คำแนะนำ ให้วิเคราะห์จากสมการที่ (4)

3.2 ที่มุมเอียงค่าหนึ่งให้ทดลองหาค่าความเร็วปลายของแท่งแม่เหล็ก โดยใช้ผิวด้านที่เป็นแผ่นฉากอะลูมิเนียมเป็นระนาบเอียง และปล่อยแท่งแม่เหล็กให้ไถลลงตามพื้นเอียงลักษณะเดียวกับตอนที่ 2 ให้ระบุด้วยว่าเริ่มจับเวลาเมื่อแม่เหล็กไถลไปได้ระยะทางเท่าใด (เขียนลงกระดาษสรุปคำตอบ)

ทดลองซ้ำโดยปรับมุมเป็นค่าต่างๆ (แนะนำให้ปรับความสูง h ของพื้นเอียงมีค่าประมาณ 22-32 cm โดยให้ใช้กล่องใส่โวลต์มิเตอร์ร่วมกับแผ่นไม้เล็กๆ ดังรูป 3.2)



รูปข้อ 3.2

3.3 เขียนกราฟเส้นตรง เพื่อหาค่า b และ μ พร้อมความคลาดเคลื่อน

3.4 หาค่า time constant τ พร้อมความคลาดเคลื่อน

ตอนที่ 4 หาค่าสภาพนำไฟฟ้าของแผ่นฉากอะลูมิเนียม

[2.0 คะแนน]

4.1 จากผลการทดลองตอนที่ 3 ให้หาค่าสภาพนำไฟฟ้า (conductivity, σ) ของอะลูมิเนียม (กำหนดให้

$\Lambda = 1.5 \times 10^{-8} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{S}^{-1}$ ซึ่ง S หมายถึงหน่วย siemens หรือ $\frac{1}{\text{ohm}}$) พร้อมค่าความคลาดเคลื่อน

4.2 จากนั้นให้หาค่า k (ในสมการที่ 6) ซึ่งเป็นแฟกเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการกระจายค่าสนามแม่เหล็กและชนิดของโลหะที่แม่เหล็กเคลื่อนที่ไป
