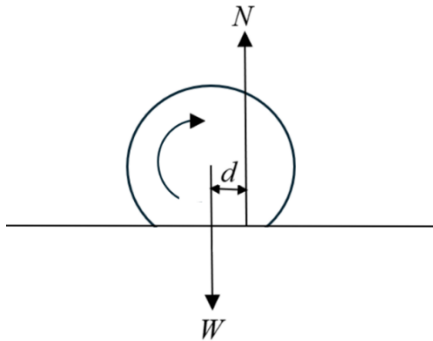
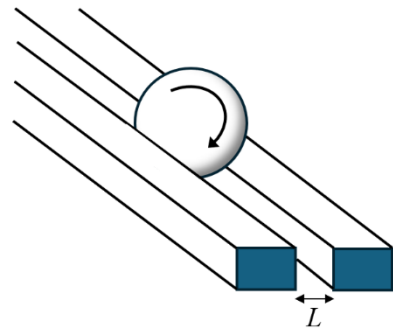


แรงเสียดทานจากการหมุน (Rolling Friction) [20 คะแนน]

หากนำวัตถุทรงกลมกลิ้งบนพื้นราบจะพบว่าอัตราเร็วของวัตถุจะลดลงจนกระทั่งหยุดนิ่ง ปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายด้วย แรงเสียดทานจากการหมุน (rolling friction) ซึ่งทำหน้าที่ต้านการหมุนของวัตถุและแรงเสียดทานนี้เกิดจากการที่วัตถุเสียรูปทรงไปจากเดิมหรือมีการยุบตัวเมื่อวางบนพื้นดังแสดงในรูปที่ 1 ในขณะที่วัตถุหนัก W กำลังกลิ้งนั้นการยุบตัวมีผลทำให้ตำแหน่งที่แรงปฏิกิริยา N กระทำกับวัตถุเลื่อนไปตามแนวที่วัตถุเคลื่อนที่เป็นระยะ d ซึ่งก่อให้เกิดทอร์กที่มีทิศตรงข้ามกับการหมุน



รูปที่ 1. แนวแรงปฏิกิริยา N ที่กระทำต่อวัตถุทรงกลมที่กำลังกลิ้งบนพื้นราบในทิศตามเข็มนาฬิกา และมีการยุบตัว



รูปที่ 2. วัตถุทรงกลมกลิ้งลงบนรางคู่ขนานเอียงที่ห่างกันเป็นระยะ L

ในกรณีที่วัตถุทรงกลมกลิ้งบนรางคู่ขนานเอียงทำมุม θ กับแนวระดับ โดยปราศจากการไถลดังแสดงในรูปที่ 2 ผลจากแรงโน้มถ่วงและแรงเสียดทานจากการหมุนจะทำให้อัตราเร่ง a ตามแนวรางคู่ขนาน เป็นไปตามสมการ (1)

$$a = \frac{g}{\epsilon + 1} \sin \theta - \frac{gk}{(\epsilon + 1)R} d \cos \theta \quad (1)$$

โดย g คือความโน้มถ่วงของโลกที่จังหวัดพิษณุโลก มีค่าเท่ากับ 9.78 m/s^2

ϵ คือค่าพารามิเตอร์ที่ขึ้นกับรูปทรงของวัตถุและระยะห่างระหว่างรางคู่ขนาน

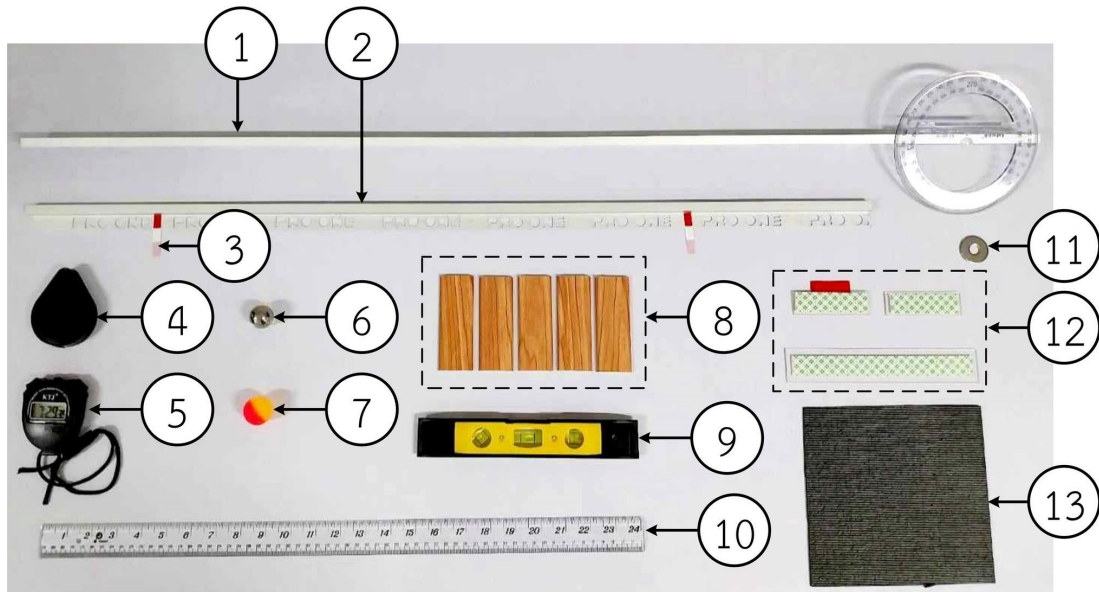
θ คือมุมระหว่างแนวระดับกับรางคู่ขนาน

d คือระยะที่แนวของแรงปฏิกิริยา N เลื่อนไปจากจุดศูนย์กลางมวล

R คือรัศมีของทรงกลม

$$k = R / \sqrt{R^2 - (L^2/4)}$$

อุปกรณ์



รูปที่ 3. อุปกรณ์ที่ให้มาทั้งหมดสำหรับการทดลองทั้ง 3 ตอน

1. รางอะลูมิเนียมยาวยึดกับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์แบบวงกลม (ห้ามแกะโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ออกจากรางนี้)
2. รางอะลูมิเนียมสั้น
3. สติ๊กเกอร์สีจำนวน 4 ชิ้น
4. แวนชยาย
5. นาฬิกาจับเวลา
6. ลูกเหล็กจำนวน 1 ลูก
7. ลูกยางจำนวน 1 ลูก
8. ฐานรองรางจำนวน 24 อัน
9. เครื่องวัดระดับน้ำ
10. ไม้บรรทัด
11. แหวนเหล็กผูกติดกับเส้นเอ็นที่ห้อยจากศูนย์กลางของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์
12. แผ่นอะคริลิกติดกาวสองหน้า แผ่นสั้นจำนวน 2 แผ่น แผ่นยาวจำนวน 1 แผ่น
13. แผ่นผ้าสีเหลี่ยม

ข้อห้ามสำหรับการทดลองทุกตอน

กรณีลูกเหล็กหรือลูกยางหล่นจากโต๊ะให้ยกป้ายขอความช่วยเหลือ ห้ามเดินไปเก็บเอง

การทดลองทั้งหมดมี 3 ตอน ซึ่งเป็นอิสระต่อกัน ทำตอนใดก่อนก็ได้

ตอนที่ 1 การกลิ้งลงรางเอียงแบบไม่มี Rolling Friction

[5.3 คะแนน]

ในการทดลองนี้เราจะใช้ลูกเหล็กในการกลิ้ง ซึ่งเป็นวัตถุแข็งเกร็งและถือว่าไม่มีการยุบตัว อัตราเร่งของลูกเหล็กอธิบายได้ด้วยสมการ (1) โดยที่ระยะ d สามารถละทิ้งได้ นั่นคือ

$$a = \frac{g}{\epsilon_1 + 1} \sin \theta \quad (2)$$

คำสั่ง

การทดลองนี้เพื่อหาค่าคงตัว ϵ_1 ด้วยกราฟเส้นตรง โดยไม่ต้องวิเคราะห์ค่าคลาดเคลื่อน

ให้บันทึกค่าต่างๆ จากการวัดและคำตอบจากการคำนวณในกระดานสรุปคำตอบ

- นำรางอะลูมิเนียมมาวางขนานกันโดยให้มีระยะห่าง $L = 2.0 \text{ cm}$ จากนั้นนำแผ่นอะคริลิคด้านที่มีกาวสองหน้ามาติดที่ปลายทั้งสองด้านของรางอะลูมิเนียมดังรูปที่ 4 (บน) เพื่อยึดให้ระยะห่าง L มีค่าคงที่ในระหว่างทำการทดลอง ให้แปะแผ่นอะคริลิคที่มีแถบกาวสีแดงบริเวณปลายด้านรางด้านตรงข้ามกับโพแทสเซียม (แผ่นกาวนี้ใช้ชะลอความเร็วลูกเหล็กก่อนกระทบพื้น)
- นำสติกเกอร์สีมาแปะที่รางให้ห่างกันเป็นระยะประมาณ 60 cm
- นำฐานรองรางจำนวนหนึ่งมารองรางอะลูมิเนียมบริเวณปลายที่ใกล้กับโพแทสเซียม ดังรูปที่ 4 เพื่อยกให้รางคู่ขนานทำมุม θ กับแนวระดับ วัดค่ามุม θ โดยสามารถใช้แว่นขยายช่วยในการอ่านสเกลของโพแทสเซียม
- ก่อนการทดลองจับเวลา ให้วางแผ่นผ้าสีเหลืองและเครื่องวัดระดับน้ำที่ปลายด้านดังกล่าว ดังรูปที่ 4 (บน) เพื่อป้องกันลูกเหล็กหล่นจากโต๊ะ
- จับเวลาที่ลูกเหล็กใช้ในการกลิ้งจากหยุดนิ่ง ลงมาเป็นระยะตามข้อ 2.
- ทำการทดลองซ้ำที่ θ ต่างๆ จำนวน 6 จุดการทดลอง ในช่วง $\theta \leq 6^\circ$
- อธิบายวิธีการเปลี่ยนมุม θ และการหาค่าอัตราเร่ง a ของลูกเหล็ก ในกระดานสรุปคำตอบ
- ใช้กราฟเส้นตรงเพื่อหาค่า ϵ_1

คำแนะนำ

- ในการเคลื่อนที่ระยะ s ด้วยอัตราเร่ง a คงตัวในเวลา t จากหยุดนิ่ง จะได้ความสัมพันธ์ $s = \frac{1}{2}at^2$

รูปการทดลองตอนที่ 1



รูปที่ 4. รูปการทดลองตอนที่ 1

ตอนที่ 2 การกลิ้งลงรางเอียงแบบมี Rolling Friction

[9.5 คะแนน]

ในการทดลองนี้เราจะใช้ลูกยางในการกลิ้ง ซึ่งการยุบตัวของลูกยางจะทำให้เกิดแรงเสียดทานจากการหมุน หากเราทำการทดลองในกรณีที่ θ มีขนาดเล็ก เราจะสามารถอาศัยการประมาณ $\sin \theta \approx \theta$ และ $\cos \theta \approx 1$ เพื่อเปลี่ยนสมการ (1) ให้อยู่ในรูปเชิงเส้นตามสมการ (3)

$$a \approx \frac{g}{\epsilon_2 + 1} \theta - \frac{gk}{\epsilon_2 + 1} \left(\frac{d}{R} \right) \quad (3)$$

คำสั่ง

การทดลองนี้เพื่อหาค่า ϵ_2 และ d/R ด้วยกราฟเส้นตรง พร้อมวิเคราะห์ค่าคลาดเคลื่อน โดยกำหนดให้รัศมีของลูกยางมีค่า $R = 1.47 \text{ cm}$ ให้บันทึกค่าต่างๆ จากการวัดและคำตอบจากการคำนวณในกระดาษสรุปคำตอบ

- นำรางอะลูมิเนียมมาวางขนานกันโดยให้มีระยะห่าง $L = 2.50 \text{ cm}$ จากนั้นนำแผ่นอะคริลิคด้านที่มีกาวสองหน้ามาติดที่ปลายทั้งสองด้านของรางอะลูมิเนียม นำแผ่นผ้าสีเหลืองและเครื่องวัดระดับน้ำมาวางที่ปลายด้านเพื่อกันลูกยางตกเช่นเดียวกับตอนที่ 1 (ดูรูปที่ 4)
- ปรับและวัดมุมแบบเดียวกับตอนที่ 1 เพื่อจับเวลาที่ลูกยางเคลื่อนที่จากหยุดนิ่งเป็นระยะ s ประมาณ 60 cm ในช่วง $2.0^\circ \leq \theta \leq 6.0^\circ$ จำนวน 6 จุดการทดลอง ให้บันทึกและคำนวณอัตราเร่งในกระดาษสรุปคำตอบ
- ในการวิเคราะห์ค่าคลาดเคลื่อน ให้คำนึงถึงความคลาดเคลื่อนจากการวัดมุม θ ระยะ s และการวัดเวลา t ไม่ต้องคำนึงถึงค่าคลาดเคลื่อนจากการวัดระยะ L ให้บรรยายวิธีการคำนวณค่าคลาดเคลื่อนของแต่ละแกนในกระดาษสรุปคำตอบ
- ใช้กราฟเส้นตรง พร้อม error bar ทั้งสองแกน เพื่อหาค่า $\epsilon_2 \pm \Delta\epsilon_2$ และ $\frac{d}{R} \pm \Delta\left(\frac{d}{R}\right)$

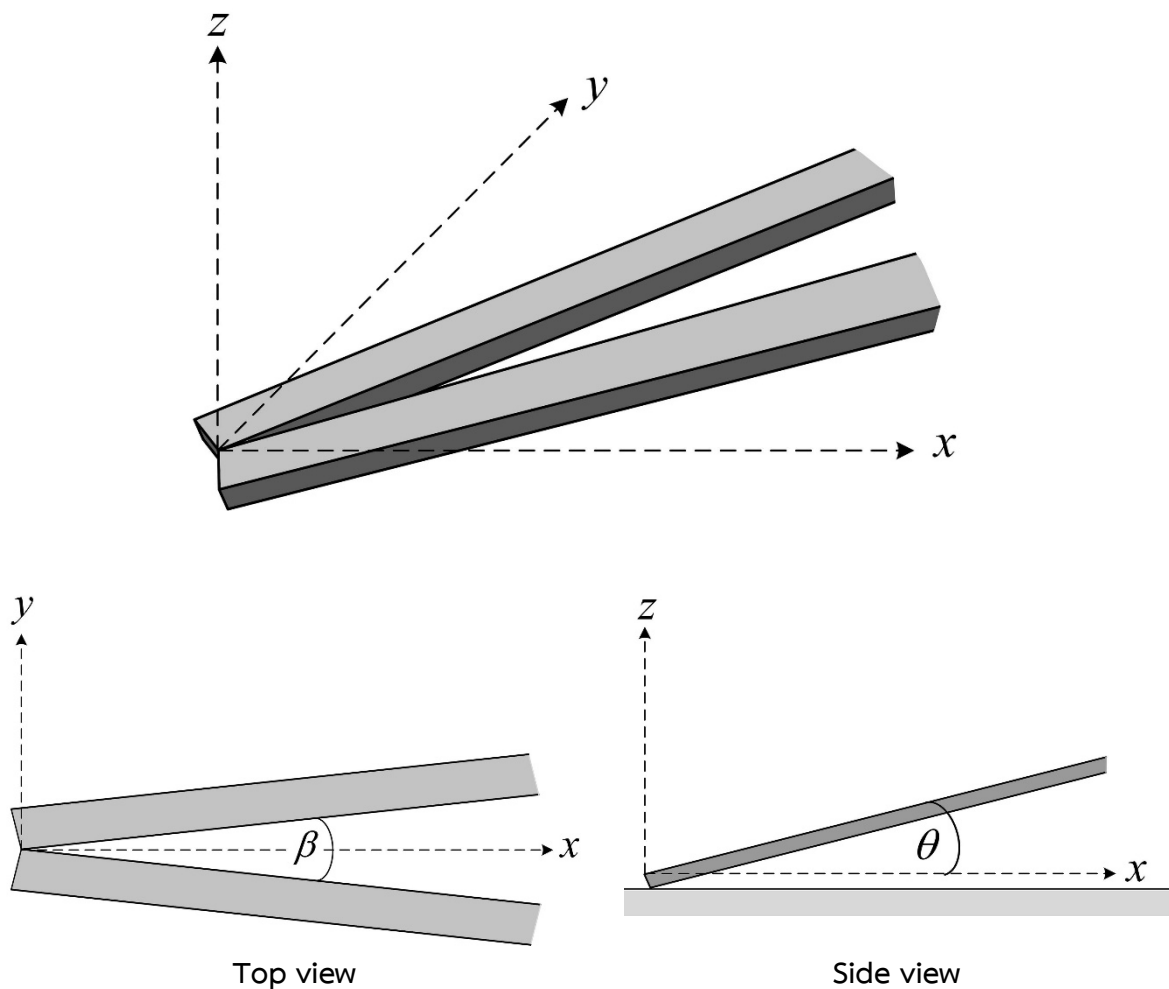
คำแนะนำ

- ϵ_1 อาจไม่เท่ากับ ϵ_2
- ควรให้รอยต่อระหว่างสีของลูกยางอยู่กึ่งกลางระหว่างรางในระหว่างที่ลูกยางกำลังกลิ้ง

ตอนที่ 3 รางเอียงที่วางไม่ขนานกัน (inclined non-parallel tracks)

[5.2 คะแนน]

สำหรับรางเอียงที่วางไม่ขนานกันดังแสดงในรูปที่ 5 (บน) จะมีจุดหนึ่งที่เป็นจุดสมดุลไม่เสถียร (unstable equilibrium) เมื่อวางลูกเหล็กที่จุดนี้พอดี ลูกเหล็กจะอยู่นิ่ง แต่หากมีการรบกวนเล็กน้อย ลูกเหล็กจะกลิ้งไปในทิศทางเดียวกับการรบกวน และไม่กลับมาที่จุดสมดุลอีก



รูปที่ 5. แผนภาพของการทดลองตอนที่ 3

สำหรับรางเอียงที่วางไม่ขนานกันตามรูปที่ 5 (บน) ซึ่งกำหนดให้ส่วนปลายของรางทั้งสองมาบรรจบกันที่จุดกำเนิด โดยที่ระนาบ xy คือระนาบราบที่อยู่ระดับเดียวกับจุดกำเนิดนั้น β คือมุมระหว่างรางทั้งสอง และ θ คือมุมระหว่างรางกับระนาบ xy ดังแสดงในรูปที่ 5 (ล่าง) ในกรณีที่มุม $\beta = 2\theta$ ตำแหน่งของจุดสมดุลไม่เสถียรสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ

$$\left(\frac{x_{cm}}{R}\right) \tan \theta = C \quad (5)$$

- x_{cm} คือตำแหน่งของจุดศูนย์กลางมวลของลูกเหล็กที่จุดสมดุล วัดจากส่วนปลายรางที่บรรจบกันไปตามแนวระดับ
- $R = 1.25 \text{ cm}$ คือรัศมีของลูกเหล็ก
- C คือค่าคงตัว

คำสั่ง

1. ออกแบบการทดลอง เพื่อหาค่าคงตัว C สำหรับมุม $1.0^\circ \leq \theta \leq 5.0^\circ$
2. ออกแบบตารางบันทึกผลการทดลอง พร้อมอธิบายหรือแสดงวิธีการวัดตัวแปรต่างๆ
3. ให้ใช้กราฟที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าเฉลี่ย C และค่าคลาดเคลื่อน ΔC โดยไม่ต้องคำนึงถึงค่าคลาดเคลื่อนของการวัดมุมสำหรับการทดลองในครั้งนี้

คำแนะนำ

1. ใช้แผ่นอะคริลิกยาวในการยึดรางอะลูมิเนียมบริเวณปลายด้านที่ห่างจากกัน
2. นักเรียนสามารถใช้การประมาณ $\cos \theta \approx 1$ และ $\sin \theta \approx \theta$ สำหรับมุมน้อยๆ ในการทดลองนี้
3. สามารถสร้างตัวแปรอื่นเพิ่มเติมเพื่อใช้ในการวาดกราฟได้