การศึกษาพฤติกรรมการถ่ายโอนพลังงานในเปลนิวตันชนิดแม่เหล็ก

A Study of Energy Transfer Behavior in a Magnetic Newton's Cradle

นันทกร ปาปะโน[1] กิตติกวิน สิงหเสนา[1] พีระบุญฉลาด[1] ชญาดา ตะวันหะ[2]

[1]โรงเรียนวิทยาศาสตร์จุฬาภรณราชวิทยาลัย บุรีรัมย์ อำเภอ.สตึก จังหวัดบุรีรัมย์

Email: 467nanthakornpapano@pcshsbr.ac.th

บทคัดย่อ

โครงงานนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการถ่ายโอนพลังงานแบบไม่สัมผัสของระบบเปลนิวตันชนิดแม่เหล็ก (Magnetic Newton's Cradle) และวิเคราะห์ผลของมุมปล่อยเริ่มต้นต่อพลวัตการเคลื่อนที่และเสถียรภาพของระบบ โดยประยุกต์ใช้หลักการอนุรักษ์พลังงาน กลศาสตร์แบบลากรางเจียน และแบบจำลองแรงไดโพลแม่เหล็กในการอธิบายพฤติกรรมของระบบ ทำการทดลองโดยใช้ลูกตุ้มแม่เหล็กจำนวน 3 ลูก ที่มุมปล่อยเริ่มต้น 10°, 20° และ 30° ภายใต้การควบคุมตัวแปรด้านมวล ความยาวเชือก ระยะห่างระหว่างแม่เหล็ก และสภาพแวดล้อมการทดลอง จากนั้นวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรมวิเคราะห์การเคลื่อนที่เพื่อคำนวณความเร็ว พลังงาน และประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงาน พร้อมรายงานค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ผลการศึกษาพบว่า มุมปล่อยเริ่มต้น 10° ให้ระบบมีเสถียรภาพในการถ่ายโอนพลังงานสูงที่สุด โดยมีประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงานเฉลี่ย (0.0599 ± 0.062)รองลงมาคือมุม 20° (0.00097 ± 0.0006) และ 30° (0.567 ± 0.1498)ตามลำดับ ขณะที่ความเร็วสูงสุดของลูกตุ้มปลายแถวมีค่าเฉลี่ย (0.0082 ± 0.00746) m/s, (0.0036 ± 0.00208) m/s และ (0.02928 ± 0.02928) m/s ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า เมื่อมุมปล่อยเพิ่มขึ้น ระบบมีแอมพลิจูดการสั่นและความไม่เสถียรของการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการสูญเสียพลังงานจากแรงต้านอากาศ แรงเสียดทานที่จุดแขวน และการหน่วงของระบบมากขึ้น

คำสำคัญ: เปลนิวตันชนิดแม่เหล็ก, การถ่ายโอนพลังงาน, ลูกตุ้มแม่เหล็ก, กลศาสตร์แบบลากรางเจียน, แรงไดโพลแม่เหล็ก, ระบบสั่น

1. บทนำ

การถ่ายโอนพลังงานและโมเมนตัมเป็นปรากฏการณ์พื้นฐานที่มีบทบาทสำคัญในฟิสิกส์และวิศวกรรมศาสตร์ แม้ว่าจะมีงานวิจัยจำนวนมากเกี่ยวกับลูกตุ้มแม่เหล็กและระบบสั่นหลายอนุภาค แต่การศึกษาที่ประยุกต์แนวคิดของ เปลนิวตันชนิดแม่เหล็ก (Magnetic Newton's Cradle) เพื่ออธิบายพฤติกรรมการถ่ายโอนพลังงานแบบไม่สัมผัสยังมีอยู่ค่อนข้างจำกัด โดยเฉพาะการวิเคราะห์ผลของมุมปล่อยเริ่มต้นที่มีต่อเสถียรภาพของระบบ ประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงาน และพลวัตของการสั่นด้วยกรอบแนวคิดของกลศาสตร์แบบลากรางเจียน (Lagrangian Mechanics) ร่วมกับแบบจำลองแรงไดโพลแม่เหล็ก ช่องว่างขององค์ความรู้นี้ทำให้ยังขาดข้อมูลเชิงลึกที่สามารถนำไปใช้อธิบายและออกแบบระบบถ่ายโอนพลังงานแบบไม่สัมผัสได้อย่างมีประสิทธิภาพ

โครงงานนี้จึงพัฒนาเปลนิวตันแบบดั้งเดิมโดยแทนที่การชนของลูกตุ้มด้วยแรงผลักระหว่างแม่เหล็กถาวร ซึ่งทำให้ลูกตุ้มสามารถแลกเปลี่ยนพลังงานผ่าน

สนามแม่เหล็กโดยไม่เกิดการสัมผัสโดยตรง วิธีการดังกล่าวช่วยลดการสูญเสียพลังงานจากการชน ลดการสึกหรอของวัสดุ และเปิดโอกาสให้ศึกษาพฤติกรรมการสั่นของระบบหลายอนุภาคที่มีความซับซ้อนมากขึ้น เช่น การสั่นแบบควบคู่ การสั่นแบบหน่วง และการกระจายพลังงานภายในระบบ

การศึกษานี้อาศัยหลักการอนุรักษ์พลังงานกลศาสตร์แบบลากรางเจียน และทฤษฎีแรงระหว่างไดโพลแม่เหล็ก เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบ โดยศึกษาผลของมุมปล่อยเริ่มต้นต่อรูปแบบการเคลื่อนที่ ความเร็ว การถ่ายโอนพลังงาน และเสถียรภาพของระบบ พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองทางทฤษฎี เพื่อประเมินความสอดคล้องระหว่างแบบจำลองและพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงองค์ความรู้ที่ได้ จากการศึกษาครั้งนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในหลายสาขา โดยเฉพาะงานด้านวิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมโครงสร้าง และเมคคาทรอนิกส์ เช่น การออกแบบระบบลดแรงสั่นสะเทือน (Vibration Isolation System) ระบบดูดซับแรงสั่นแบบพาสซีฟ (Passive Vibration Absorber) ระบบกันสะเทือนของเครื่องจักรและอาคาร ตลอดจนระบบถ่ายโอนพลังงานแบบไม่สัมผัสที่ใช้ในอุปกรณ์อัตโนมัติและเทคโนโลยีสมัยใหม่ นอกจากนี้ ผลการวิจัยยังช่วยเสริมสร้างความเข้าใจเกี่ยวกับพลวัตของระบบหลายอนุภาคและสามารถใช้เป็นต้นแบบในการศึกษาระบบสั่นที่มีปฏิสัมพันธ์ผ่านสนามแม่เหล็กในระดับที่ซับซ้อนยิ่งขึ้นในอนาคต

วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1. เพื่อศึกษาผลของมุมปล่อยเริ่มต้นต่อแอมพลิจูด ความเร็วสูงสุด และรูปแบบการส่งผ่านการสั่นของเปลนิวตันชนิดแม่เหล็ก

สมมติฐานการวิจัย

เมื่อเพิ่มมุมปล่อยเริ่มต้นแอมพลิจูดและความเร็วสูงสุดของลูกตุ้มจะเพิ่มขึ้นและรูปแบบการส่งผ่านการสั่นจะซับซ้อนขึ้น

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1. เปลนิวตัน (Newton's Cradle)

เปลนิวตัน (Newton's Cradle) เป็นอุปกรณ์ทดลองทางฟิสิกส์ที่ใช้สาธิตหลักการอนุรักษ์โมเมนตัม (Conservation of Momentum) และหลักการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of Energy) ผ่านการชนแบบยืดหยุ่น (Elastic Collision) ของลูกตุ้มที่มีมวลเท่ากันและแขวนด้วยเชือกที่มีความยาวเท่ากันเมื่อปล่อยลูกตุ้มด้านหนึ่งด้วยมุมเริ่มต้น ลูกตุ้มจะเปลี่ยนพลังงานศักย์โน้มถ่วงเป็นพลังงานจลน์ และเมื่อชนกับลูกตุ้มถัดไป โมเมนตัมและพลังงานจะถูกถ่ายโอนไปยังลูกตุ้มปลายอีกด้านหนึ่งภายใต้เงื่อนไขที่การชนเป็นแบบยืดหยุ่นสมบูรณ์อย่างไรก็ตาม ในระบบจริงยังเกิดการสูญเสียพลังงานจาก แรงเสียดทานที่จุดแขวน แรงต้านอากาศ การเสียรูปของวัสดุ และการสูญเสียเป็นเสียงและความร้อน ทำให้การถ่ายโอนพลังงานไม่สมบูรณ์

โครงงานนี้จึงประยุกต์ใช้ แรงผลักของแม่เหล็กถาวร แทนการชนโดยตรง เพื่อศึกษาพฤติกรรมการถ่ายโอนพลังงานแบบไม่สัมผัส (Non-contact Energy Transfer)

2. หลักการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of Energy)

ในระบบปิดที่ไม่มีแรงภายนอกกระทำ พลังงานรวมของระบบจะคงที่ พลังงานกลของลูกตุ้มสามารถเขียนได้เป็น

$$E = T + V$$

โดยที่

E คือพลังงานกลรวม

T คือพลังงานจลน์

V คือพลังงานศักย์รวมของระบบ (พลังงานศักย์โน้มถ่วง+พลังงานศักย์แม่เหล็ก)

โดย พลังงานจลน์ คือ

$$T = \Sigma \frac{1}{2} m_i l^2 \dot{\theta}^2$$

พลังงานศักย์โน้มถ่วง

$$V_g = \sum_{i=1}^{n} m_i g l_i \ (1 - \mathrm{Cos}\theta_i)$$

และ พลังงานศักย์แม่เหล็ก

$$V_m(r,\theta) = \frac{\mu_0}{4\pi r^3}(m_1 m_2)(1 - 3\mathrm{Cos}^2\theta_i)$$

สำหรับระบบลูกตุ้มหลายตัว พลังงานรวมคงที่เมื่อไม่มีการสูญเสียพลังงาน

3. หลักการอนุรักษ์โมเมนตัม

โมเมนตัม p=mv และในระบบปิด

$$\Sigma p_{\text{ก่อน}} = \Sigma p_{\text{หลัง}}$$

สำหรับเปลนิวตันแบบแม่เหล็ก แม้ว่าจะไม่มีการสัมผัสกันโดยตรง แต่แรงแม่เหล็กสามารถถ่ายโอนโมเมนตัมผ่านสนามแม่เหล็ก ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างลูกตุ้มได้

4. กลศาสตร์แบบลากรางเจียน (Lagrangian Mechanics)

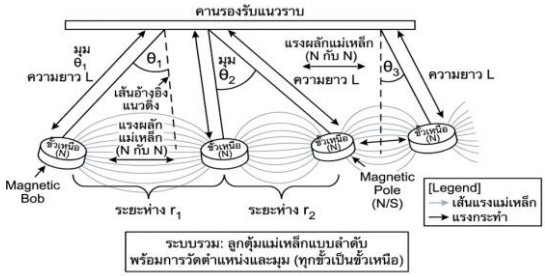
กลศาสตร์แบบลากรางเจียนเป็นวิธีวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของระบบที่มีความซับซ้อน โดยเฉพาะระบบที่มีหลายองศาอิสระ เนื่องจากเป็นการพิจารณาพฤติกรรมของระบบในรูปของพลังงานแทนการพิจารณาแรงในแต่ละแนวโดยตรง หลักการสำคัญของวิธีนี้คือการนิยามฟังก์ชันลากรางเจียน ซึ่งเท่ากับผลต่างระหว่างพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ของระบบ ดังสมการโดยนิยามฟังก์ชันลากรางเจียนเป็น

$$L = T - V$$

เมื่อ T คือพลังงานจลน์

V คือ พลังงานศักย์รวมของระบบ (พลังงานศักย์โน้มถ่วง+พลังงานศักย์แม่เหล็ก)

จากภาพตัวอย่าง



สำหรับระบบลูกตุ้มแม่เหล็ก พลังงานจลน์ของลูกตุ้มแต่ละลูกสามารถเขียนได้เป็น

$$T = \Sigma \frac{1}{2} m_i l^2 \dot{\theta}^2$$

และพลังงานศักย์โน้มถ่วงสามารถเขียนได้เป็น $V_g = \sum_{i=1}^{n} m_i g l_i \ (1 - \mathrm{Cos}\theta_i)$

โดยที่ m_i คือมวลของลูกตุ้มลำดับที่ i

l_i คือความยาวเชือกของลูกตุ้มลูกที่ i

θ_i คือมุมเบี่ยงเบนของลูกตุ้มแต่ละลูก

$\dot{\theta}_i$ คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของมุมการแกว่งของลูกตุ้มลูกที่ i

n คือจำนวนลูกตุ้มในระบบ

g คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง

และ พลังงานศักย์แม่เหล็ก

$$V_m(r,\theta) = \frac{\mu_0}{4\pi r^3}(m_1 m_2)(1 - 3\mathrm{Cos}^2\theta_i)$$

ระยะห่างละหว่างลูกตุ้มขณะใดๆ

จะได้ว่าจากสมการ

$$L = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{2} m l^2 \dot{\theta_i}^2 - \sum_{i=1}^{\dot{n}} m_i \, g l_i (1 - \cos\theta_i) - \sum_{i=1}^{n} V_{m,i,i+1}$$

ดังนั้น ในการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีสมมติให้ระบบเป็นระบบอนุรักษ์ (Conservative System) กล่าวคือ ไม่มีการสูญเสียพลังงานจากแรงต้านอากาศ แรงเสียดทาน และแรงหน่วงอื่น ๆ ดังนั้นแรงทั่วไปที่ไม่อนุรักษ์มีค่าเป็นศูนย์ (Q_i=0) ทำให้สมการ Euler–Lagrange เขียนได้เป็น

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_i} = 0$$

5. ทฤษฎีแรงระหว่างแม่เหล็ก (Magnetic Dipole Interaction)

เมื่อแม่เหล็กสองแท่งมีระยะห่างมากกว่าขนาดของตัวแม่เหล็ก สามารถประมาณให้แม่เหล็กแต่ละแท่งเป็นไดโพลแม่เหล็กได้ พลังงานศักย์ระหว่างไดโพลแม่เหล็กสองตัวเขียนได้เป็น

$$V_m(r,\theta) = \frac{\mu_0}{4\pi r^3}(m_1 m_2)(1 - 3\mathrm{Cos}^2\theta_i)$$

โดยที่

μ_0 คือ ค่าความสามารถในการยอมให้สนามแม่เหล็กผ่านในสุญญากาศ

r คือ ระยะห่างระหว่างแม่เหล็กทั้งสอง

m1,m2 คือ เวกเตอร์โมเมนต์ไดโพลแม่เหล็กของแม่เหล็กแต่ละแท่ง

$\hat{r}$ คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยตามแนวเชื่อมระหว่างไดโพลทั้งสองแรงแม่เหล็กสามารถหาได้จากความชันลบของพลังงานศักย์ ดังนี้

$$F_m = -\nabla V_m$$

สำหรับกรณีที่แม่เหล็กจัดเรียงอยู่ในแนวแกนเดียวกันและพิจารณาเฉพาะขนาดของแรง สามารถประมาณได้เป็น

$$F_m \approx \frac{3\mu_0 m_1 m_2}{2\pi r^4}$$

F_m คือ แรงแม่เหล็ก

วิธีดำเนินงานวิจัย

1. รูปแบบการวิจัย (Research Design)

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการถ่ายโอนพลังงานของเปลนิวตันชนิดแม่เหล็ก โดยศึกษาผลของมุมปล่อยเริ่มต้นที่มีต่อการถ่ายโอนพลังงาน ความเร็ว และลักษณะการสั่นของระบบ ภายใต้สภาวะที่ควบคุมตัวแปรต่าง ๆ ให้คงที่

2. วิธีดำเนินการ

เริ่มต้น

↓

ออกแบบและสร้างชุดทดลองเปลนิวตันชนิดแม่เหล็ก

↓

สอบเทียบ (Calibration) เครื่องมือวัด

↓

กำหนดมุมปล่อยเริ่มต้น (10°, 20° และ 30°)

↓

บันทึกการเคลื่อนที่ด้วยกล้องความเร็วสูง

↓

วิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม Tracker

↓

คำนวณความเร็ว พลังงาน และประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงาน

↓

วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

↓

สรุปผลและอภิปรายผลการวิจัย

3. ตัวแปรในการวิจัย (Variables)

ตัวแปรต้น (Independent Variable)

มุมปล่อยเริ่มต้นของลูกตุ้มแม่เหล็ก (10°, 20° และ 30°)

ตัวแปรตาม (Dependent Variable)

- ความเร็วของลูกตุ้ม
- พลังงานจลน์
- พลังงานศักย์
- ประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงาน
- แอมพลิจูดการสั่น

ตัวแปรควบคุม (Controlled Variables)

- มวลของลูกตุ้ม
- ความยาวเชือก
- ระยะห่างระหว่างแม่เหล็ก
- ความแรงของแม่เหล็ก
- อุณหภูมิและสภาพแวดล้อม

- ตำแหน่งการติดตั้งชุดทดลอง
- อัตราเฟรมของกล้อง

4. การสอบเทียบเครื่องมือ (Calibration)

ก่อนการทดลอง ได้ทำการสอบเทียบมาตราส่วนของโปรแกรม Tracker โดยใช้ไม้บรรทัดมาตรฐาน เพื่อกำหนดอัตราส่วนระหว่างระยะจริงกับจำนวนพิกเซล รวมทั้งตรวจสอบการตั้งฉากของกล้องกับระนาบการเคลื่อนที่ เพื่อลดความคลาดเคลื่อนจากการบันทึกภาพ

5. การทำซ้ำการทดลอง (Repeatability)

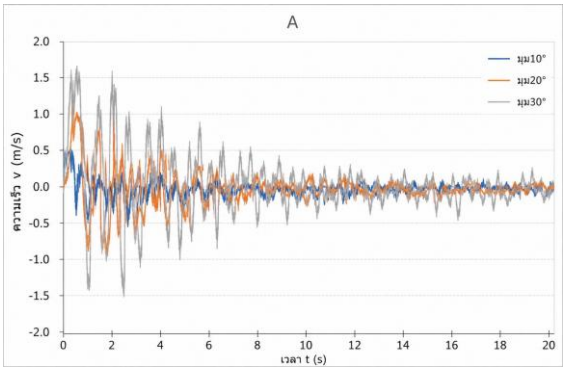
การทดลองในแต่ละมุมปล่อยดำเนินการซ้ำอย่างน้อย **3 ครั้ง** ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน และนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เพื่อประเมินความสามารถในการทำซ้ำและความน่าเชื่อถือของผลการทดลอง

6. การประเมินความไม่แน่นอนของการวัด (Measurement Uncertainty)

ประเมินความไม่แน่นอนของการวัดจากความละเอียดของเครื่องมือวัด ระยะเชิงพื้นที่ และเวลาในการบันทึกภาพ รวมถึงความคลาดเคลื่อนจากการติดตามตำแหน่งของวัตถุในโปรแกรม Tracker โดยรายงานผลในรูปของค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Mean ± SD) และนำค่าความไม่แน่นอนไปใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลและการอภิปรายผล

ผลการทดลองของการศึกษามุมปล่อยลูก A



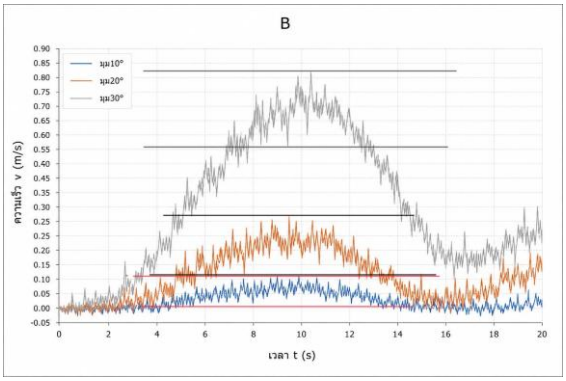
จากภาพผลการทดลองนี้แสดงถึงการลดลงของพลังงานของการปล่อยแต่ละองศาซึ่งทำให้เห็นถึงพฤติกรรมการลดลงของพลังงานในแต่ละมุมปล่อยซึ่งจะเห็นได้ว่าการลดลงนี้ทำให้เห็นถึงความแตกต่างจากการถ่ายโอนพลังงาน โดยมุม 10° จะมีความเสถียรมากกว่าสังเกตจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วต่อมาก็เป็นมุม 20° และ 30° ทำให้สรุปได้ว่าการปล่อยมุม 10° องศา มีความเสถียรมากที่สุด

ข้อมูลความเร็วที่ใช้ในการศึกษาที่ผู้วิจัยเก็บรวบรวมของลูกตุ้ม A สรุปได้ดังนี้

ตัวแปร	n	Mean	SD	Min	Max
10	485	0.18699	0.1580	0.0	0.5920
20	1218	0.2908	0.2454	0.0	1.1700
30	875	0.5009	0.4154	0.0	1.7500

n คือจำนวนข้อมูล

ผลการทดลองของการศึกษามุมปล่อยลูก B



จากผลการทดลองพบว่าการเปลี่ยนแปลงพลังงาน ของลูกตุ้ม B มุม 10° องศามีการเปลี่ยนแปลงพลังงานที่เสถียรกว่ามุมอื่นสังเกตจากการเปลี่ยนแปลงความเร็ว ลองลงมาก็เป็น 20° และ 30°

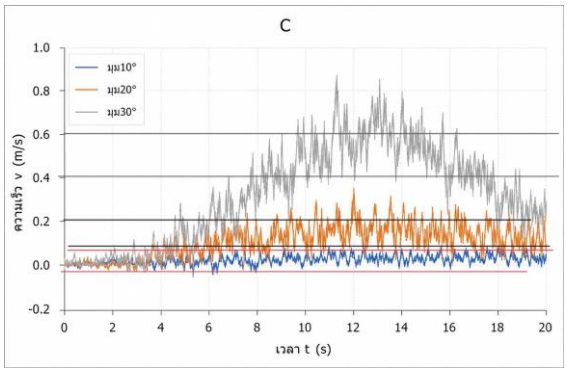
ข้อมูลความเร็วที่ใช้ในการศึกษาที่ผู้วิจัยเก็บรวบรวมของลูกตุ้ม B สรุปได้ดังนี้

ตัวแปร	n	Mean	SD	Min	Max

10	491	0.05998	0.06203	0.0	0.330
20	1218	0.00097	0.0006	0.0	0.0025
30	875	0.567	0.1498	0.0	0.794

n คือจำนวนข้อมูล

ผลการทดลองของการศึกษามุมปล่อยลูก C



จากผลการทดลองพบว่าการปล่อยด้วยมุมที่แตกต่างส่งผลให้พลังงานที่ส่งไปยังลูกสุดท้ายแตกต่างกันด้วยซึ่งผลแบบนี้ทำให้เราสามารถวิเคราะห์ถึงความสามารถในการเกิดการสั่นสะเทือนได้ซึ่งจะสังเกตุว่ามุมที่เราปล่อยน้อยๆพลังงานที่ส่งไปยังลูกสุดท้ายก็น้อยตามไปด้วย

ข้อมูลความเร็วที่ใช้ในการศึกษาที่ผู้วิจัยเก็บรวบรวมของลูกตุ้ม C สรุปได้ดังนี้

ตัวแปร	n	Mean	SD	Min	Max
10	491	0.00824	0.00746	0.0	0.04080
20	1218	0.00363	0.002087	0.0	0.15400
30	875	0.02928	0.02928	0.0	0.17200

n คือจำนวนข้อมูล

สรุปผลการวิจัย

โครงงานนี้ศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนที่และการถ่ายโอนพลังงานของเปลนิวตันชนิดแม่เหล็กโดยวิเคราะห์ผลของมุมปล่อยเริ่มต้นและจำนวนแม่เหล็กต่อรูปแบบการสั่นและประสิทธิภาพการส่งผ่านพลังงานผลการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มมุมปล่อยการส่งผ่านพลังงานจะมีค่าเสถียรมากที่สุดที่10° และเมื่อมีการเพิ่มลูกตุ้มในระบบมากขึ้นจะส่งผลให้การส่งผ่านพลังงานมาค่ากาารส่งผ่านที่มากขึ้นแต่ระยะเวลาในการสั่นก็สั่นลงทำให้สรุปได้ว่า ถ้าหากเราจะลดแรงสั่นสะเทือนมุมในการติดตั้งแม่เหล็กถ้าหากมีค่าน้อยก็ยังช่วยให้มันสั่นน้อยลงแต่ระยะเวลาการสั่นจะนานซึ่งการติดตั้งมุมของแม่เหล็กแต่ละก้อนจะมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับรูปทรงของอุปกรณ์ที่ใช้ เพื่อลดแรงสั่นสะเทือน

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความอนุเคราะห์จากคณะครูหมวดวิชาฟิสิกส์นางสาวชญาดา ตะวันหะ และคุณครูพีระ บุญฉลาด ครูที่ปรึกษาโครงงานที่ได้ให้คำแนะนำเชิงวิชาการสนับสนุนอุปกรณ์ในการทดลองและชี้แนะแนวทางในการศึกษาพฤติกรรมการถ่ายโอนพลังงานในเปลนิวตันชนิดแม่เหล็กอย่างใกล้ชิดเสมอมา คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาส

ข้อเสนอแนะ

1.ควรเพิ่มจำนวนช่วงมุมปล่อยในการศึกษาครั้งต่อไปอาจเพิ่มมุมปล่อยมากกว่า 10°, 20°, 30° เช่น 40° หรือ 50°

เพื่อศึกษาพฤติกรรมในช่วงที่เริ่มเบี่ยงเบนจากการประมาณมุมเล็ก (small angle approximation)
2.เพิ่มจำนวนแม่เหล็กมากกว่า 3 ลูก เพื่อศึกษาการเกิดรูปแบบคลื่น (normal modes) ที่ซับซ้อนขึ้นและเปรียบเทียบกับแบบจำลองเชิงทฤษฎีในระบบหลายอนุภาค
3.ควรใช้เครื่องมือวัดที่แม่นยำขึ้น เช่น โปรแกรมวิเคราะห์วิดีโหรือเซนเซอร์จับการเคลื่อนที่ เพื่อให้ได้ค่าความเร็วและแอมพลิจูดที่แม่นยำ ลดความคลาดเคลื่อนจากการวัดด้วยสายตา
4.ควรควบคุมตัวแปรรบกวนให้มากขึ้น เช่น แรงเสียดทานที่จุดแขวน การต้านอากาศ และการจัดแนวแม่เหล็กให้ตรงระนาบเดียวกัน
5.สามารถต่อยอดด้วยแบบจำลองเชิงทฤษฎีขั้นสูง เช่น การใช้วิธีลากรางเจียน (Lagrangian - mechanics) แบบเต็มรูป หรือจำลองด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อเปรียบเทียบผลเชิงตัวเลขกับผลการทดลอง

บรรณานุกรม

สมชาย กาญจนกิจ. (2559). การศึกษาสนามแม่เหล็กและแรงระหว่างขั้วแม่เหล็ก. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ณัฐพล ศรีสุวรรณ. (2562). การวิเคราะห์แรงระหว่างแม่เหล็กถาวรด้วยแบบจำลองไดโพล. วารสารฟิสิกส์ไทย

วิทยา สุขเจริญ. (2561). กลศาสตร์สำหรับระบบสั่นและลูกตุ้ม.สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

อภิชัย วัฒนชัย. (2558). พลังงานศักย์แม่เหล็กและปฏิสัมพันธ์ของไดโพลแม่เหล็ก. วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์

ธนกร อินทร์แก้ว. (2563). การศึกษาการถ่ายโอนพลังงานในระบบลูกตุ้มหลายตัว.วารสารครุศาสตร์อุตสาหกรรม