



คู่มือปฏิบัติการฟิสิกส์

สำหรับนักเรียนระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย
ที่มีความสามารถพิเศษด้านคณิตศาสตร์และวิทยาศาสตร์

วิชา กลศาสตร์

สาขาวิชาฟิสิกส์

โรงเรียนนวมินทราชินันท์สุพรรณ (องค์การมหาชน)



คำนำ

คู่มือปฏิบัติการฟิสิกส์ ฉบับนี้เหมาะสำหรับนักเรียนระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายที่มีความสามารถพิเศษด้านคณิตศาสตร์และวิทยาศาสตร์ ประกอบด้วย การทดลอง 6 เรื่อง ได้แก่ 1) การตกของวัตถุอย่างอิสระ 2) การเคลื่อนที่เป็นวงกลม 3) ผลของมวลและแรงที่มีต่อความเร่งของวัตถุ 4) งานและพลังงานจลน์ 5) การเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย และ 6) การกลิ้งบนพื้นเอียง โดยเน้นให้นักเรียนได้ฝึกทักษะปฏิบัติการ การวัด การเก็บข้อมูล การวิเคราะห์ข้อมูล และสรุปผลการทดลอง อีกทั้งยังเป็นการฝึกการทำงานเป็นกลุ่ม การวางแผนการทำงาน และการคิดอย่างเป็นระบบ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์อรุณีย์ อินทศร เป็นอย่างสูงที่ช่วยทำให้คู่มือปฏิบัติการฟิสิกส์ฉบับนี้ มีความสมบูรณ์และถูกต้อง และหวังเป็นอย่างยิ่งว่า เอกสารฉบับนี้จะประโยชน์กับนักเรียนและคุณครูทุกท่านได้นำไปใช้ในการจัดการเรียนการสอนในส่วนของเนื้อหาที่เกี่ยวข้อง หากมีข้อเสนอแนะหรือติชมประการใดเกี่ยวกับเอกสารดังกล่าว ทางสาขาวิชาฟิสิกส์ ขอน้อมรับและขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

สาขาวิชาฟิสิกส์
โรงเรียนมหิดลวิทยานุสรณ์
มีนาคม 2558



สารบัญ

	หน้า
คำนำ	ก
สารบัญ	ข
บทนำ	1
การทดลองที่ 1 การตกของวัตถุอย่างอิสระ	4
การทดลองที่ 2 การเคลื่อนที่เป็นวงกลม	10
การทดลองที่ 3 ผลของมวลและแรงที่มีต่อความเร่งของวัตถุ	19
การทดลองที่ 4 งานและพลังงานจลน์	29
การทดลองที่ 5 การเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย	38
การทดลองที่ 6 การกลิ้งบนพื้นเอียง	50
ข้อเสนอแนะ	57
เอกสารอ้างอิง	58

บทนำ

สถิติสำคัญที่นิยมใช้ศึกษากันโดยทั่วไปในการเรียนรู้จากการทำปฏิบัติการทางฟิสิกส์ คือ การแสดงค่าความแม่นยำและค่าความเที่ยงตรงของผลที่ได้จากการทดลอง เพื่อบ่งบอกถึงความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ทดลองได้เป็นอย่างไร สำหรับความแตกต่างของค่าความแม่นยำและค่าความเที่ยงตรงพิจารณาได้ดังต่อไปนี้

ความแม่นยำและความเที่ยงตรง (Accuracy and Precision)

การวัดปริมาณทางฟิสิกส์มีการคิดว่าต้องมีค่าจริง (True value) ของปริมาณฟิสิกส์ที่วัดนั้นอยู่ และกระบวนการของการวัดเป็นการพยายามหาค่าจริงนั้นออกมา โดยคาดว่าจะมีความแตกต่างระหว่างค่าจริงกับค่าที่วัดได้บ้าง ที่มีการนำคำว่า “ความแม่นยำ” และ “ความเที่ยงตรง” มาใช้อธิบายความแตกต่างระหว่างค่าจริงกับค่าที่วัดได้ โดยค่าจริงหรือค่าที่ยอมรับได้ (Accepted value) ที่เป็นค่าที่ทราบค่าเป็นอย่างดีโดยทั่วไปที่ปรากฏในคู่มือทางฟิสิกส์นั้นว่าเป็นค่าที่มีความแม่นยำที่สุดที่ได้จากการทดลองและการคำนวณที่ละเอียดและซับซ้อนมากๆ

ความแม่นยำของการวัด หาได้จากการพิจารณาความใกล้เคียงของผลการวัดกับค่าจริง เช่น การทดลองทั้งหลายในการหาค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ความแม่นยำของผลที่ได้ตัดสินจากค่าที่ใกล้เคียงกับค่าจริงที่เป็นค่าประมาณซึ่งใช้กันโดยทั่วไป คือ 9.80 m/s^2 เป็นต้น **สำหรับห้องทดลองส่วนมากที่ไม่ทราบค่าจริงของปริมาณการวัดก็จะไม่สามารถหาค่าความแม่นยำของการทดลองจากข้อมูลที่หามาได้**

ความเที่ยงตรงของการวัด มักจะอ้างถึงปริมาณตัวเลขสำคัญของผลที่ได้มา ซึ่งแสดงถึงการทำการทดลองซ้ำใหม่แล้วได้ผลซ้ำเดิมอย่างไร ค่าที่นำไปใช้อ้างว่าเป็นค่าที่ได้จากการวัดมักเป็นค่าที่มีความเที่ยงตรงมาก โดยพิจารณาจากหลักการเชิงสถิติแบบง่าย ๆ ดังนี้

ค่าเฉลี่ยและการเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Mean and Standard Deviation)

ในเบื้องต้นขอกล่าวถึงความคลาดเคลื่อนของการวัดก่อน โดยความคลาดเคลื่อนของการวัดทั้งหลายจัดแยกเป็น 3 แบบ คือ ความคลาดเคลื่อนเชิงบุคคล ความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ (Systematic errors) และความคลาดเคลื่อนสุ่ม (Random errors) ซึ่งบางครั้งเรียกว่า ความคลาดเคลื่อนเชิงสถิติ (Statistical errors) ความคลาดเคลื่อนเชิงบุคคลเป็นความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการกระทำของผู้ทดลองซึ่งสามารถหลีกเลี่ยงได้ด้วยการทำการทดลองที่ระมัดระวัง ความคลาดเคลื่อนอาจเกิดจากการกระบวนการเพื่อให้ได้ข้อมูลการทดลองหรือจากการคำนวณข้อมูลการทดลอง ซึ่งทั้งสองแบบนี้ว่าไม่ถูกต้องทั้งนั้นแต่ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการกระบวนการเพื่อให้ได้ข้อมูลการทดลองนั้นว่าไม่ถูกต้องมากกว่าเพราะว่ามันยากต่อการค้นหาจนอาจสายเกินแก้ไข

ความคลาดเคลื่อนเชิงระบบเป็นความคลาดเคลื่อนที่มีแนวโน้มอยู่ในทิศทางเดียวเมื่อมีการวัดซ้ำทำให้ผลที่ได้มีความมั่นคงอยู่เหนือค่าที่เป็นจริงและต่ำกว่าค่าที่เป็นจริง ในหลายๆ กรณีค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวนี้มาจากเครื่องมือการวัด ตัวอย่างเช่น โวลต์มิเตอร์ที่ปรับเทียบไม่ถูกต้องที่ทำให้อ่านได้เพียง 80% ของโวลต์จริงที่ให้เข้าไป และเป็นไปได้ที่โวลต์มิเตอร์ที่สเกลชี้ศูนย์อาจเป็น 0.50 โวลต์ กรณีแรกค่าความคลาดเคลื่อนเป็นสัดส่วนที่คงที่กับค่าจริง (20%) และกรณีที่สองค่าความคลาดเคลื่อนเป็นค่าโวลต์คงที่สัมบูรณ์ที่คงตัว นับว่าทั้งสองกรณีเป็นค่าความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ โดยคำตอบของคำถามข้อใดที่นับว่าไม่ดีก็ขึ้นอยู่กับขนาดของโวลต์ที่วัด ถ้าโวลต์ที่วัดเป็น 1.00 โวลต์ มิเตอร์ที่มีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ 0.50 โวลต์ ก็จะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน 50% ขณะที่มิเตอร์ที่มีค่าความ



คลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน 20% ในทางตรงกันข้ามถ้าโวลเตจที่วัดเป็น 100 โวลต์ มิเตอร์ที่มีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ 0.50 โวลต์ ก็จะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน 0.5% ขณะที่มิเตอร์ที่มีค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ 20% ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน 20 โวลต์ ถ้าการวัดโวลเตจนี้ไปคำนวณหาค่าปริมาณอื่นๆ มันก็จะแสดงผลที่มีความคลาดเคลื่อนเชิงระบบด้วย

รูปแบบของความคลาดเคลื่อนเชิงระบบแบบที่สองล้มเหลวในการพิจารณาตัวแปรทั้งหลายที่สำคัญต่อการทดลอง ในบางกรณีอาจต้องระมัดระวังในการพิจารณาแพกเตอร์อื่นๆ แต่ไม่สามารถที่จะหาปริมาณออกมา เช่น เมื่อใช้รางลมศึกษากฎของนิวตัน เพื่อละทิ้งการเสียดทานเพราะสมมติว่ามีค่าน้อยมาก แต่มักจะเป็นเพราะว่าไม่มีวิธีง่ายๆ ในการหาค่าที่เกี่ยวข้อง ดังนั้นจึงคาดหวังว่าการละทิ้งค่าความเสียดทานอาจเป็นการนำความคลาดเคลื่อนเชิงระบบเข้าไป

สำหรับความคลาดเคลื่อนสุ่มเกิดจากการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ทราบหรือคาดเดาไม่ได้ในกระบวนการทดลอง ถึงแม้ว่ามีการทดลองที่ระมัดระวังอย่างดีเท่าที่คนเราสามารถทำได้ การเปลี่ยนแปลงนี้เป็นสิ่งที่เกิดจากความไม่สามารถของผู้สังเกตในการประมาณค่าเลขจำนวนเต็มตัวสุดท้ายด้วยวิธีเดียวกันในแต่ละครั้งให้แน่นอนได้ การเปลี่ยนแปลงอื่นๆ สามารถเกิดจากการปั่นป่วน (Fluctuations) ของการเปลี่ยนแปลงเชิงฟิสิกส์ทั้งหลายที่มีอยู่ในเครื่องมือหรือในรูปอื่นๆ ของกระบวนการวัด ความคลาดเคลื่อนแบบนี้มีความแตกต่างจากความคลาดเคลื่อนเชิงระบบและความคลาดเคลื่อนเชิงบุคคล โดยหลักการความคลาดเคลื่อนเชิงระบบและความคลาดเคลื่อนเชิงบุคคลสามารถกำจัดได้ แต่ความคลาดเคลื่อนสุ่มจะยังคงมีอยู่ในการวัดเสมอไม่สามารถกำจัดทิ้งอย่างสมบูรณ์ได้

การทดลองทั้งหลายมักมีการตรวจสอบรูปแบบกระบวนการทั้งหมดและตรวจสอบซ้ำๆ อีก ดังนั้นต่อไปนี้จะขอเน้นเรื่องความคลาดเคลื่อนสุ่มหรือความคลาดเคลื่อนเชิงสถิติ โดยสมมติว่ามีอนุกรมของการวัดซ้ำๆ ที่ไม่มีความคลาดเคลื่อนเชิงระบบและความคลาดเคลื่อนเชิงบุคคล นั่นคือมีแต่ความคลาดเคลื่อนสุ่ม สมมติว่ามี การวัดปริมาณบางอย่าง x เป็นจำนวน n ครั้ง และค่าที่วัดได้ครั้งที่ i คือ x_i โดยที่ i มีค่าจาก 1 ถึง n ถ้าค่าจริงที่มีความคลาดเคลื่อนรวมอยู่ด้วยตามปกติ ตามหลักสถิติอาจกล่าวได้ว่า ค่าเฉลี่ย คือค่าการประมาณที่ดีที่สุดที่เป็นค่าจริง ค่าเฉลี่ยเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\bar{X} = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \right] \quad (1)$$

ตามหลักสถิติแสดงว่าความเที่ยงตรงของการวัดสามารถหาได้จากการคำนวณปริมาณที่เรียกว่า ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากค่าเฉลี่ยของการวัด สามารถเขียนสมการค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากค่าเฉลี่ย

$$\sigma_{n-1} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [x_i - \bar{x}]^2} \quad (2)$$

ปริมาณ σ_{n-1} มักเรียกกันว่า ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานตัวอย่าง (Sample standard deviation) ซึ่งใช้วัดความเที่ยงตรงของการวัดทางสถิติ มันแสดงโอกาสที่จะวัดได้ค่าอยู่ในพิสัย (Range) ที่แน่นอนของการวัดค่าเฉลี่ย

หลักทฤษฎีของโอกาสที่น่าจะเป็นแสดงว่า 68.3% ของการวัดซ้ำทั้งหมดจะอยู่ในพิสัยของบวกหรือลบ σ_{n-1} จากค่าเฉลี่ย ยิ่งกว่านั้น 95.5% ของการวัดซ้ำทั้งหมดจะอยู่ในพิสัยของบวกหรือลบ $2\sigma_{n-1}$ จากค่าเฉลี่ย และ 99.73% ของการวัดซ้ำทั้งหมดจะอยู่ในพิสัยของบวกหรือลบ $3\sigma_{n-1}$ จากค่าเฉลี่ย หมายความว่าถ้าการวัดที่เป็น $3\sigma_{n-1}$ หรือการวัดที่มีค่าไกลออกจากค่าเฉลี่ย $3\sigma_{n-1}$ ไม่น่าจะเป็นความคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม มันน่าจะเป็นผลที่ได้จากความคลาดเคลื่อนเชิงบุคคลมากกว่า



การทดลองซ้ำแสดงถึงความเที่ยงตรงของค่าเฉลี่ย โดยค่าเฉลี่ยเป็นการประมาณค่าจริงที่ดีที่สุด และค่าความเที่ยงตรงของค่าเฉลี่ยแสดงด้วยค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard error) ดังนี้

$$\alpha = \frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

ตัวอย่างเช่น $\sigma_{n-1} = 1.1$ และ $n=4$ จะได้ค่า $\alpha = 0.55$ ที่มีค่าเฉลี่ย 19.0 นัยสำคัญของ α คือ ถ้ามีหลายๆ กลุ่มของการวัด n ครั้ง โดยแต่ละกลุ่มมีค่าเฉลี่ยค่าหนึ่งและ 68.3% ของค่าเฉลี่ยจะอยู่ในพิสัย 19.0 ± 0.6 นั่นคือมีโอกาส 68.3% ที่ค่าจริงจะอยู่ในพิสัยนี้ โดยค่ากล่าวนี้ใช้ได้เฉพาะที่ไม่มีความคลาดเคลื่อนอื่นร่วมด้วย นอกจากความคลาดเคลื่อนสุ่ม

ในการทดลอง นักเรียนมักจะทำการทดลองวัดปริมาณใดๆ ซ้ำและหาค่าเฉลี่ย สมมติว่าได้ค่า α แทนค่าความไม่แน่นอนของค่าเฉลี่ย จำนวนเลขนัยสำคัญที่เหมาะสมควรมีอยู่ใน α เป็นอย่างไร โดยทั่วไปมักใช้เลขนัยสำคัญของ α เป็นหนึ่งและค่าเฉลี่ยมีเลขนัยสำคัญน้อยที่สุดที่มีจำนวนเลขทศนิยมเท่ากับ α ในการดำเนินการที่คำนวณหาค่าเฉลี่ยและ σ_{n-1} ที่มีเลขนัยสำคัญมากกว่าที่ต้องการ และให้ α เป็นสิ่งที่ใช้หาเลขนัยสำคัญของค่าเฉลี่ย ดังเช่นตัวอย่างข้างต้นที่ได้ผล 19.0 ± 0.6 ที่มีเลขนัยสำคัญของ α เป็นหนึ่งและค่าเฉลี่ยมีเลขจำนวนเต็มที่มีนัยสำคัญน้อยที่สุดและมีจำนวนเลขทศนิยมเท่ากับ α

เพื่อให้เห็นหลักการของค่าเฉลี่ยและค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานแสดงค่าความแม่นยำและความเที่ยงตรงได้อย่างไร อาจพิจารณาชุดของการวัดค่าความเร่งเนื่องจากความโน้มถ่วง ที่วัดโดย A B C และ D ผลที่ได้ของแต่ละการวัดมีค่าเฉลี่ย σ_{n-1} และ α ของแต่ละคน ดังนี้

A	B	C	D
9.43 ± 1.96	9.26 ± 0.35	8.74 ± 0.04	9.76 ± 0.09

ความแม่นยำของข้อมูลแต่ละคนหาได้จากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยกับค่าจริง 9.80 ดังนั้นถ้าค่าที่ D วัดได้ 9.76 จะมีค่าแม่นยำที่สุด ขณะที่ A ได้ค่า 9.43 B ได้ค่า 9.26 และ C ได้ค่า 8.74 มีค่าแม่นยำรองลงมาตามลำดับ และการใช้ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ยในการบอกค่าความเที่ยงตรง กลับพบว่าของ C จะให้ค่าความเที่ยงตรงที่สุด เนื่องจากมีค่า α น้อยที่สุด และ D, B และ A ให้ค่าความเที่ยงตรงรองลงมาตามลำดับ แต่ในความเป็นจริงอาจไม่ง่ายอย่างที่แสดง เช่น ถ้าการวัดปรากฏผลที่มีความแม่นยำสูงมากแต่ขาดความเที่ยงตรงมาก ก็จะไม่ทราบว่าเป็นผลที่ได้มีความหมายอย่างไร ถ้าพิจารณาค่าเฉลี่ยที่ A วัดได้ 9.43 ซึ่งต่างจากค่าจริง 0.37 นับว่าให้ค่าแม่นยำที่เดียว แต่การวัดของเขามีค่าเบี่ยงเบนจากค่าจริงมากและมีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานมาก ซึ่งดูเหมือนว่าค่าเฉลี่ยที่ A วัดได้มาจากความโชคดียิ่งกว่าการวัดที่ระมัดระวัง ในทางตรงกันข้ามดูเหมือนว่าค่าเฉลี่ยที่ D วัด 9.76 น่าจะมีความหมายมากกว่าเพราะมีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานต่ำ ผลที่วัดได้ของ C ที่มีค่าความเที่ยงตรงสูงมากแต่ค่าความแม่นยำไม่ดี โดยทั่วไปเมื่อไรที่มีการวัดที่มีความเที่ยงตรงสูงแต่มีความแม่นยำต่ำ มักเป็นสัญญาณของการมีความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ นั่นคือการทดลองของ C ดูเหมือนว่ามีความคลาดเคลื่อนเชิงระบบอยู่

เอกสารอ้างอิง :

- Loyd, D.H., PHYSICS LABORATORY MANUAL, 3rd edition, Angelo State University, Thomson Brooks/Cole, USA, 2008.
- Wilson, J. D. and Hernandez-Hall, C. A., PHYSICS LABORATORY EXPERIMENTS, 7th edition, Brooks/Cole, Cengage Learning, USA, 2010.



การทดลองที่ 1

เรื่อง การตกของวัตถุอย่างอิสระ (Free falling objects)

รายวิชา กลศาสตร์

สาขาวิชาฟิสิกส์

โรงเรียนมหิดลวิทยานุสรณ์

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาผลของมวลต่อความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก
2. เพื่อศึกษาผลของรูปทรงของวัตถุที่มีต่อการตกแบบอิสระ
3. เพื่อหาค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกจากการทดลอง
4. เพื่อให้เกิดทักษะในด้านการใช้เครื่องมือ การบันทึกผลการทดลองตามหลักเลขนัยสำคัญ การวิเคราะห์ผลการทดลองจากกราฟ การหาค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

อุปกรณ์

1. ชุดการตกอย่างอิสระของวัตถุ ซึ่งประกอบด้วย
 - 1.1) โฟโตเกต
 - 1.2) เครื่องบันทึกเวลา
2. วัตถุรูปทรงกระบอกตัน ทรงกลมตัน และรูปทรงลูกบาศก์

ทฤษฎี

วัตถุที่ถูกโยนขึ้นหรือปล่อยให้ตกลงตามแนวตั้ง ภายใต้แรงดึงดูดของโลกอย่างเดียว เรียกว่า การเคลื่อนที่ตามแนวตั้งอย่างอิสระ ที่เป็นการเคลื่อนที่แบบเส้นตรง โดยมีความเร่งสู่ศูนย์กลางของโลกหรือความเร่งเนื่องจากสนามโน้มถ่วงของโลก โดยในบริเวณที่ใกล้ผิวโลก ค่าความเร่งดังกล่าวมีค่าที่ใช้กันโดยทั่วไปประมาณ 9.80 เมตรต่อวินาที² ทิศพุ่งเข้าหาจุดศูนย์กลางของโลก ความเร่งดังกล่าวนี้ใช้สัญลักษณ์แทนด้วย g ดังนั้นแรงที่เกิดขึ้นจากความเร่งดังกล่าวคือ mg ซึ่งก็คือน้ำหนักของวัตถุตามกฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตัน ในทางทฤษฎีนั้น วัตถุที่ตกอย่างอิสระ จะใช้เวลาในการตกเท่ากันไม่ว่าวัตถุนั้นจะมีมวลเท่าใดและรูปทรงเป็นอย่างไร ซึ่งเป็นไปตามสมการ

$$s = \frac{1}{2}gt^2$$

เมื่อ s คือ ขนาดของการกระจัด

t คือ เวลา

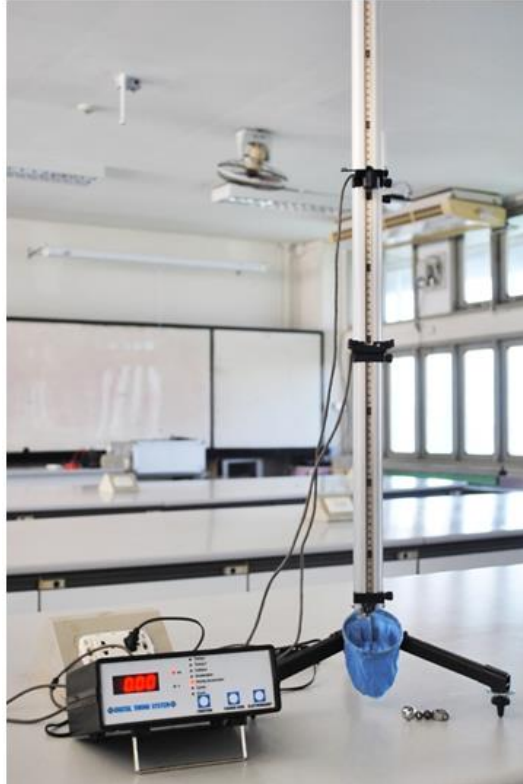
และ $v = gt$ โดยที่ v คือ อัตราเร็ว

แต่ในทางปฏิบัตินั้นจะมีแรงต้านอากาศเกิดขึ้นซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามรูปทรงและมวลของวัตถุที่ตกอย่างอิสระ

ตอนที่ 1 ศึกษาผลของมวลต่อความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

ขั้นตอนการทดลอง

1. ปล่อยวัตถุทรงกลมตันที่มีมวลต่างๆ กัน ให้ตกจากที่สูง s ค่าหนึ่งที่กำหนด อ่านค่าที่ได้จากเครื่องบันทึกเวลา t และบันทึกค่าที่ได้
2. ทำการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง สำหรับมวลค่าหนึ่งๆ แล้วหาค่าเฉลี่ยของเวลา t สำหรับมวลแต่ละค่า
3. คำนวณหาความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก จากสูตร $s = \frac{1}{2}gt^2$ พร้อมทั้งหาค่าความคลาดเคลื่อนของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก โดยเทียบกับค่ามาตรฐาน 9.8 เมตรต่อวินาที²



รูปแสดงการจัดวางอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ตอนที่ 2 ศึกษาผลของรูปทรงของวัตถุที่มีต่อการตกอย่างอิสระ

ขั้นตอนการทดลอง

1. ปล่อยวัตถุที่มีรูปทรงกระบอกตัน ทรงกลมตันและลูกบาศก์ ที่มีมวลใกล้เคียงกัน ให้ตกจากที่ความสูง s ค่าหนึ่งที่กำหนด อ่านค่าที่ได้จากเครื่องบันทึกเวลา t และค่าบันทึกค่าที่ได้
2. ทำการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง สำหรับวัตถุรูปทรงหนึ่งๆ หาค่าเฉลี่ยของเวลา t สำหรับวัตถุรูปทรงหนึ่งๆ
3. คำนวณหาความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก จากสูตร $s = \frac{1}{2}gt^2$ พร้อมทั้งหาค่าความคลาดเคลื่อนของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกโดยเทียบกับค่ามาตรฐาน 9.8 เมตรต่อวินาที²

ตอนที่ 3 หาความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกจากการเขียนกราฟ

ขั้นตอนการทดลอง

1. ปล่อยวัตถุทรงกลมให้ตกจากที่ความสูง s ค่าหนึ่ง อ่านค่าที่ได้จากเครื่องบันทึกเวลา t และค่าบันทึกค่าที่ได้
2. ทำการทดลองโดยเปลี่ยนระยะการตกของวัตถุ s ที่แตกต่างกัน 5 ค่า โดยแต่ละค่าทำการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง
3. หาค่าเฉลี่ยของเวลาบันทึกได้ในการทดลองแต่ละระยะความสูง s

กราฟ

เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{t^2}{2}$ กับ s วิเคราะห์กราฟที่ได้ โดยพิจารณาจากค่าความชันของกราฟเปรียบเทียบกับค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกโดยเทียบกับค่ามาตรฐาน 9.8 เมตรต่อวินาที² พร้อมทั้งระบุค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลองทั้งตอนที่ 1 ตอนที่ 2 และตอนที่ 3 พร้อมทั้งตอบคำถามท้ายการทดลอง



รายงานผลการทดลองที่ 1
เรื่อง การตกของวัตถุอย่างอิสระ

รายวิชา กลศาสตร์ สาขาวิชาฟิสิกส์ โรงเรียนมหิดลวิทยานุสรณ์
ชื่อผู้ทำการทดลอง 1. ชั้น เลขที่.....
2. ชั้น เลขที่.....
3. ชั้น เลขที่.....
วันที่ เดือน พ.ศ.

คะแนนที่ได้

ผลการทดลอง

ตอนที่ 1 ศึกษาผลของมวลต่อความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

ตารางข้อมูลของมวลที่ใช้ในการทดลอง

กำหนดให้ ระยะเวลาการตกของวัตถุ $s = \dots\dots\dots$ เมตร

มวล (kg)	เวลา t (s)					เฉลี่ย $\bar{t} \pm \Delta t$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	

สำหรับหาค่าความคลาดเคลื่อนของระบบเครื่องชั่ง = $\pm \dots\dots\dots$ กิโลกรัม

ตอนที่ 2 ตารางข้อมูลของเวลาที่วัดได้จากการทดลอง

กำหนดให้ ระยะเวลาการตกของวัตถุ $s = \dots\dots\dots$ เมตร

รูปทรงของวัตถุ	เวลา t (s)					เฉลี่ย $\bar{t} \pm \Delta t$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	



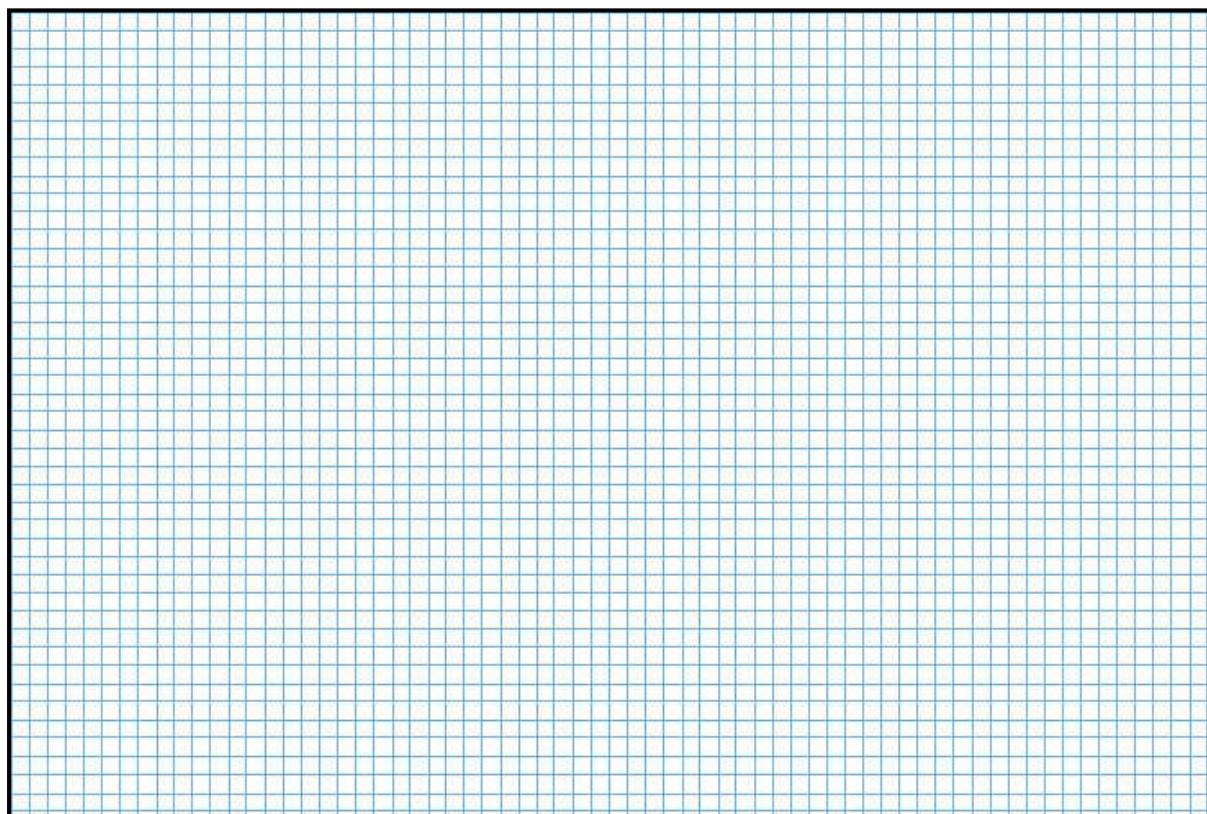
ตอนที่ 3 หาความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกจากการเขียนกราฟ

กำหนดให้ $m =$ _____ กิโลกรัม

ลักษณะของรูปทรงของวัตถุ _____

ระยะการตก ของวัตถุ (m)	เวลา t (s)					เวลาเฉลี่ย $\bar{t} \pm \Delta t$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	

กราฟ



ความชัน =.....	ความชัน สูงสุด=.....	ความชันต่ำสุด=.....	Δ ความชัน=
----------------	-------------------------	---------------------	----------------------------



วิจารณ์ผลการทดลอง

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

คำถามท้ายการทดลอง

1. จากผลการทดลอง ค่ามวลที่เปลี่ยนไปมีผลต่อค่าความเร่งของการตกอย่างอิสระหรือไม่ เพราะเหตุใด

.....

.....

.....

.....

.....

2. ถ้าพิจารณารูปทรงของวัตถุที่เปลี่ยนไปมีผลต่อการตกอย่างอิสระหรือไม่ เพราะเหตุใด

.....

.....

.....

.....

.....

3. ในการทดลองดังกล่าว ค่าความคลาดเคลื่อนของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกเทียบกับค่ามาตรฐานแตกต่างกันหรือไม่ เพราะเหตุใด

.....

.....

.....

.....

.....



การทดลองที่ 2
เรื่อง การเคลื่อนที่เป็นวงกลม (Circular motion)

รายวิชา กลศาสตร์

สาขาวิชาฟิสิกส์

โรงเรียนมหิดลวิทยานุสรณ์

วัตถุประสงค์

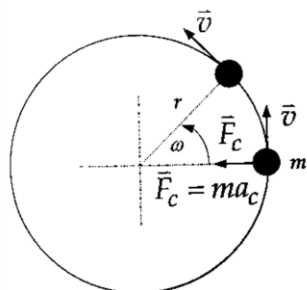
เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของแรงสู่ศูนย์กลาง และอัตราเร็วเชิงมุมของวัตถุที่เคลื่อนที่เป็นวงกลม

อุปกรณ์

1. ชุดแกนเหวี่ยง 1 ชุด
2. มวลเหวี่ยง 1 ก้อน
3. สปริง
4. นาฬิกาจับเวลา
5. น้ำหนักถ่วง
6. ไม้บรรทัด

ทฤษฎี

วัตถุที่เคลื่อนที่เป็นวงกลมด้วยอัตราเร็วคงที่ (v) ดังรูปที่ 2.1 จะมีแรงกระทำในทิศเข้าสู่ศูนย์กลางของวงกลมเรียกว่า “แรงสู่ศูนย์กลาง” (\vec{F}_c) และจากกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน แสดงว่า วัตถุจะมีความเร่งสู่ศูนย์กลาง (\vec{a}_c) ซึ่งมีขนาดขึ้นกับอัตราเร็ว (v) ของวัตถุ และรัศมี (r) ของวงกลม สามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ได้เป็น



ขนาดของ $F_c = \frac{mv^2}{r}$ (2.1)

เมื่อ m เป็นมวลของวัตถุ

และ $v = \omega r$ (2.2)

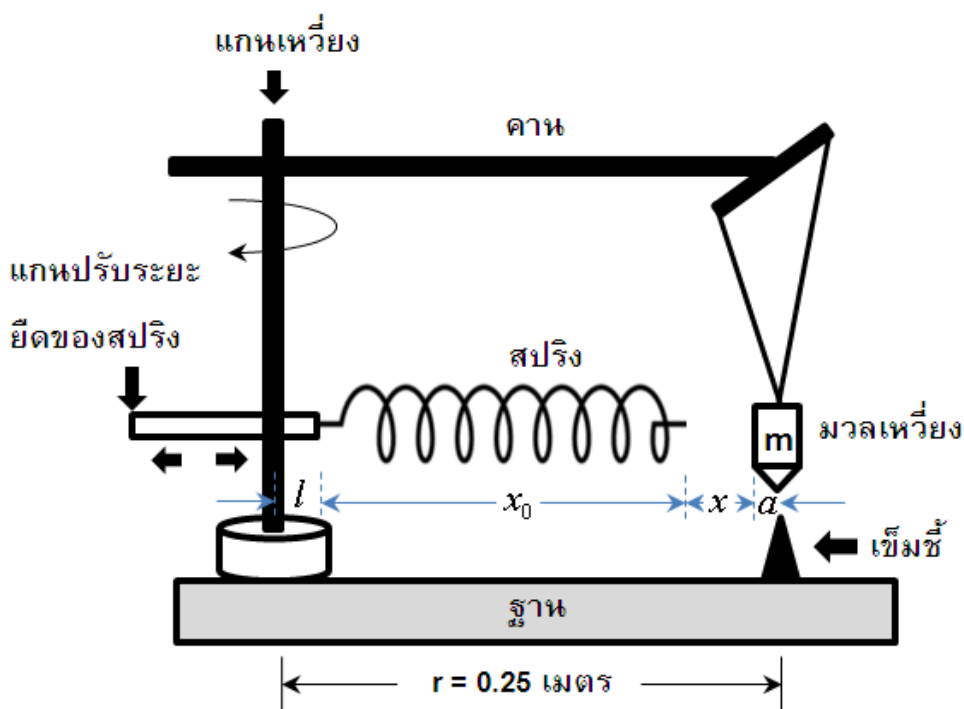
ดังนั้น $F_c = m\omega^2 r$ (2.3)

เมื่อ ω คือ อัตราเร็วเชิงมุมของการเคลื่อนที่

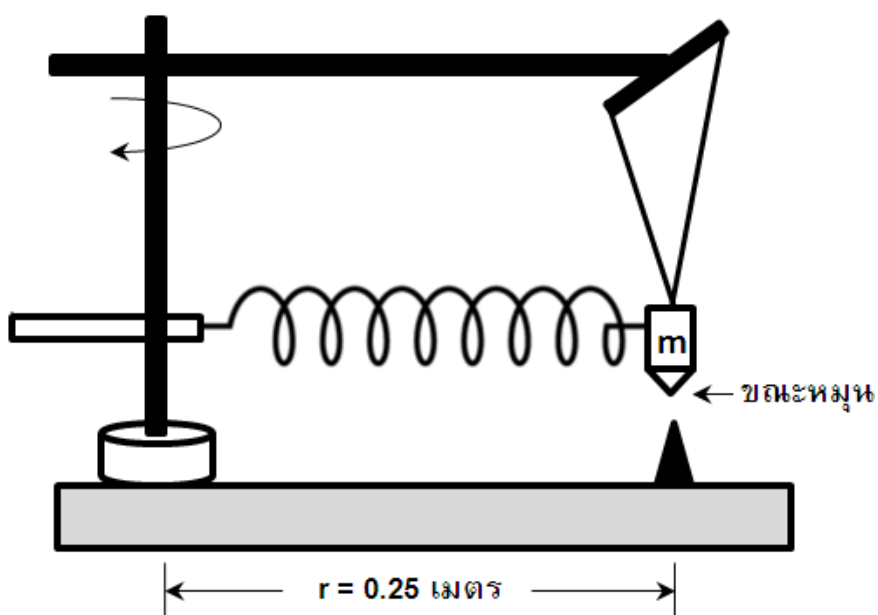
รูปที่ 2.1 แสดงทิศของแรงสู่ศูนย์กลางของวัตถุที่เคลื่อนที่เป็นวงกลมด้วยอัตราเร็วคงที่ (v)

ขั้นตอนการทดลอง

1. จัดอุปกรณ์ทดลอง ดังรูปที่ 2.2 (ก) โดยให้เข็มชี้อยู่ห่างแกนเหวี่ยง (r) 0.25 เมตร แขนมวลที่จะเหวี่ยงที่ปลายแขนของแกนเหวี่ยง แล้วปรับตำแหน่งที่แขวนให้ปลายแหลมของมวลเหวี่ยงอยู่ตรงเข็มชี้พอดี วัดค่า a ที่เป็นระยะจากแนวแกนของมวลเหวี่ยงถึงตำแหน่งสำหรับคล้องสปริง



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.2 แสดงการจัดอุปกรณ์การทดลอง

2. คล้องสปริงที่ตำแหน่งหนึ่งของห่วงปรับระยะ วัดความยาวของสปริงปกติ (x_0) และระยะห่างระหว่างจุดคล้องสปริงถึงแกนเหวี่ยง (l) แล้วคล้องปลายสปริงอีกด้านเข้ากับมวลเหวี่ยง ทำให้มวลเหวี่ยงไม่อยู่ ณ ตำแหน่งเดิม



3. ปรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงของหม้อแปลงไฟฟ้าจนกระทั่งมวลเหวี่ยงเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วเชิงมุมคงตัว โดยที่ปลายแหลมของมวลเหวี่ยงชี้ตรงตำแหน่งเข็มชี้ จับเวลาการหมุน 20 รอบ แล้วบันทึกค่าลงในตารางบันทึกข้อมูลที่ 1
4. ทำการทดลองซ้ำข้อ 3 อีก 2 ครั้ง หาค่าเฉลี่ยและบันทึกค่าในตารางบันทึกข้อมูล แล้วคำนวณคาบ (T) และอัตราเร็วเชิงมุม (ω) ของการหมุนแล้วบันทึกค่า
5. ทดลองหาขนาดของแรงสู่ศูนย์กลางของการหมุน (F_c) จากระยะยี่ดออกจากเดิมของสปริง ($x = 0.25 - x_0 - l - a$ เมตร) โดยวิธีแขวนสปริงกับแขนของแกนเหวี่ยง แล้วถ่วงก้อนน้ำหนักที่ปลายล่างของสปริงเพื่อหาแรงที่ทำให้สปริงยี่ดออกเป็นระยะเท่ากันกับ x บันทึกค่าในตารางข้อมูลที่ 1
6. เปลี่ยนระยะยี่ดของสปริง แล้วทำการทดลองซ้ำข้อ 2-5 เพื่อหาข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่าง (F_c) กับ (ω) อีก 5 ค่า
7. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง F_c และ ω บนกระดาษกราฟธรรมดา
8. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง F_c และ ω^2 บนกระดาษกราฟธรรมดา และหาค่าความชัน และ Δ ของความชันของเส้นกราฟ นำมาเปรียบเทียบกับค่า mr ที่ได้จากการวัด
9. หาความแม่นยำของการทดลอง
10. สรุปผลการทดลองและตอบคำถามท้ายการทดลอง

เอกสารอ้างอิง :

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. คู่มือปฏิบัติการฟิสิกส์พื้นฐาน.



รายงานผลการทดลองที่ 2
เรื่อง การเคลื่อนที่เป็นวงกลม

รายวิชา กลศาสตร์ สาขาวิชาฟิสิกส์ โรงเรียนมหิดลวิทยานุสรณ์
ชื่อผู้ทำการทดลอง 1. ชั้น เลขที่.....
2. ชั้น เลขที่.....
3. ชั้น เลขที่.....
วันที่เดือน พ.ศ.

คะแนนที่ได้

ผลการทดลอง

ตอนที่ 1 ทำการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของแรงสู่ศูนย์กลางกับค่าอัตราเร็วเชิงมุมของวัตถุที่เคลื่อนที่เป็นวงกลมของมวลเหวี่ยง

ตารางบันทึกข้อมูลที่ 1

ระยะความยาว $r =$ เมตร
 $x_0 =$ เมตร
 $a =$ เมตร

ครั้งที่	ความยาว l (เมตร)	เวลาของการหมุนครบ 20 รอบ (วินาที)				คำนวณค่า ω (เรเดียน/วินาที)		ระยะยัด ของสปริง x (เมตร)	ขนาดของแรง สู่ศูนย์กลาง $F_c (N)$
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	T (วินาที)	ω		
1									
2									
3									
4									
5									
6									

(หมายเหตุ ไม่ต้องบันทึกช่วงความคลาดเคลื่อนของข้อมูล)

(แสดงตัวอย่างการคำนวณค่าเฉลี่ยของเวลา , T , ω)

.....

.....

.....

.....

.....

.....

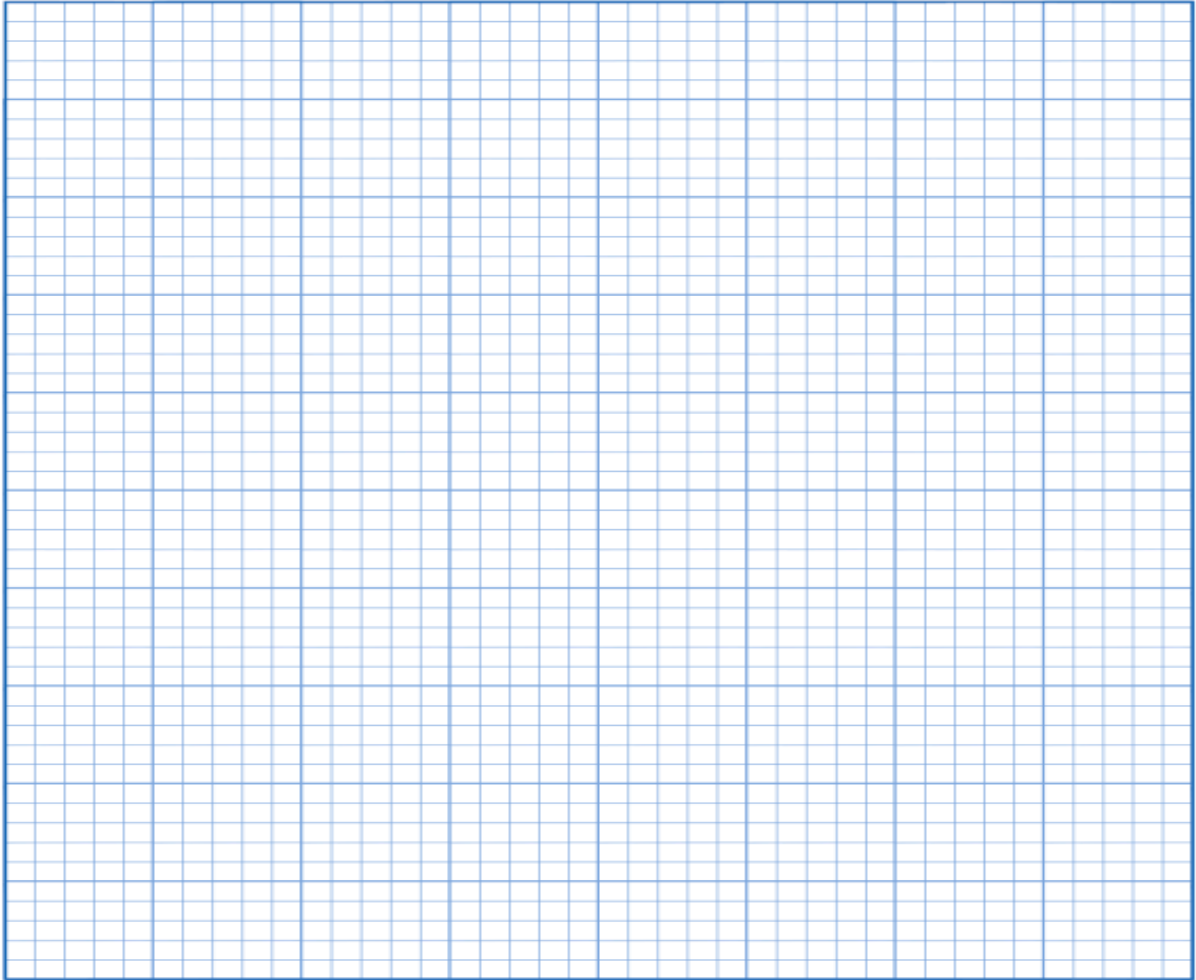
.....

.....

.....

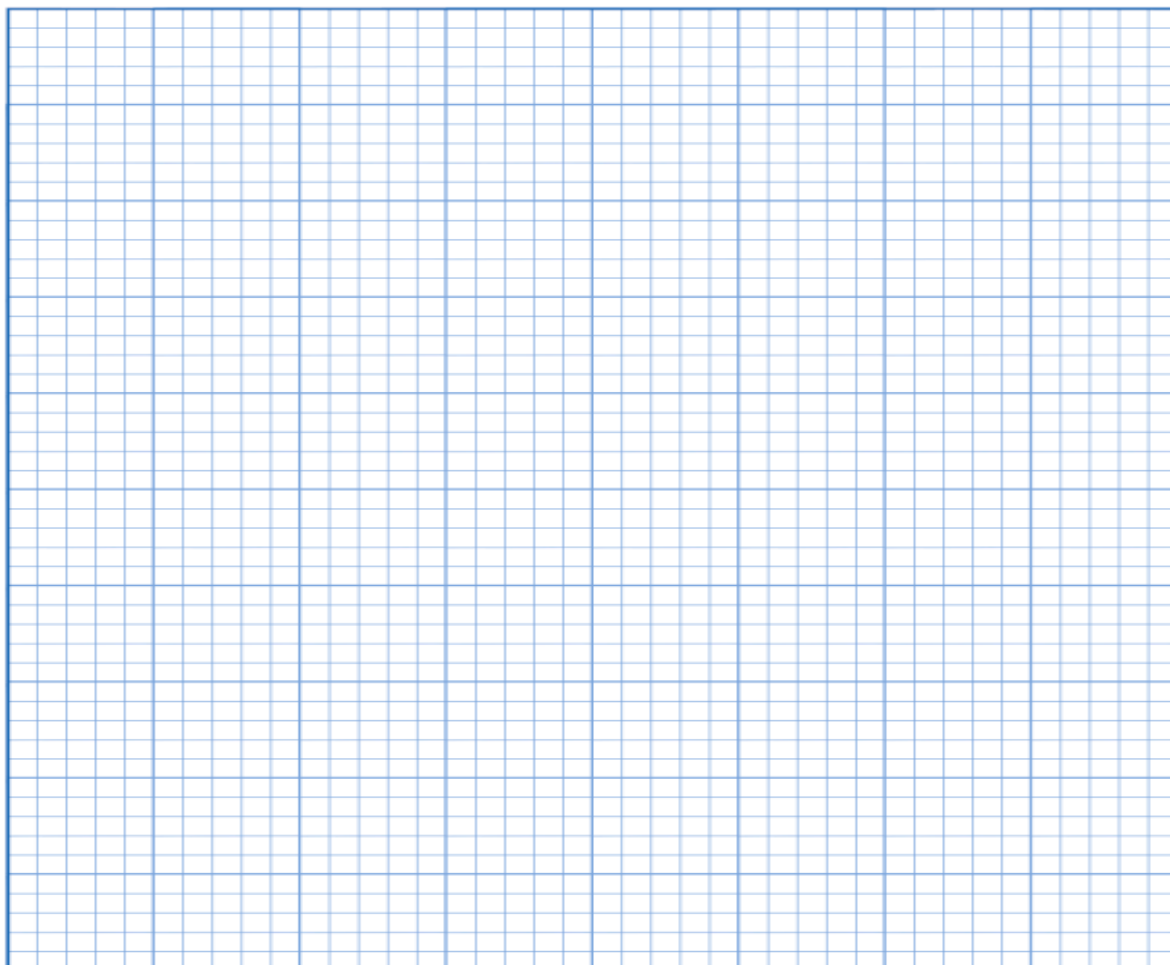


กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง





กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง



สรุปผลการทดลอง

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....



.....
.....
.....

วิจารณ์ผลการทดลอง

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

คำถามท้ายการทดลอง

1. ถ้าหมุนมวลเหวี่ยงด้วยอัตราไม่คงที่ การเคลื่อนที่จะเป็นอย่างไร

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

2. ถ้าจับเวลาการแกว่งครบ (n) 20 รอบ มีความคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม ($\pm\Delta t$) ถามว่าความเร็วเชิงมุม (ω) ที่คำนวณได้มีความคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม ($\pm\Delta\omega$) เท่าไร

.....
.....
.....
.....
.....
.....



3. ในระหว่างการจับเวลาของการแกว่งครบ 20 รอบ ถ้ามวลเหวี่ยงหมุนเป็นวงกลมรัศมีแคบกว่า 25 เซนติเมตรหลายครั้ง ถามว่า มีผลต่อการทดลองอย่างไร

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

4. จากสมการที่ 1 ถ้าค่า r และค่า ω มีความคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม $\pm\Delta r$ และ $\pm\Delta\omega$ ตามลำดับ ถามว่า ความคลาดเคลื่อนของ F_c แบบสุ่มจากการคำนวณมีค่าเท่าไร

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....



การทดลองที่ 3

เรื่อง ผลของมวลและแรงที่มีต่อความเร่งของวัตถุ

(The effect of mass and force on the acceleration of objects)

รายวิชา กลศาสตร์

สาขาวิชาฟิสิกส์

โรงเรียนมหิดลวิทยานุสรณ์

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาผลของมวล และแรงลัพธ์ที่กระทำต่อความเร่งของวัตถุ
2. เพื่อให้เกิดทักษะในด้านการใช้เครื่องมือ การบันทึกผลข้อมูลตามหลักของเลขนัยสำคัญ การวิเคราะห์ผลการทดลองจากกราฟ การหาค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

อุปกรณ์

1. ชุดรางลมพร้อมรถ 1 ชุด
2. เครื่องปั๊มลม 1 เครื่อง
3. โฟโตเกตพร้อมที่ยึดจับ 2 ชุด
4. เครื่องบันทึกเวลา 1 เครื่อง
5. รถทดลองคันใหญ่และคันเล็ก อย่างละ 1 คัน
6. จานรองมวล พร้อมแผ่นมวลสำหรับเพิ่มน้ำหนักถ่วงได้ 5 ค่า
7. Glider ชนิด 2 แถบ
8. แผ่นมวลสำหรับยึดติดกับรถทดลอง 2 อัน
9. เครื่องชั่ง 1 เครื่อง

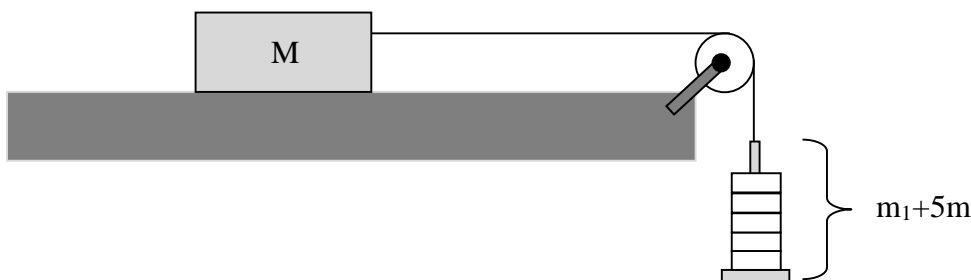
ทฤษฎี

เมื่อมีแรงลัพธ์เนื่องจากแรงภายนอก \vec{F} มากระทำกับวัตถุมวล m ผลของแรงดังกล่าวทำให้วัตถุมีความเร่ง \vec{a} โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นไปตามกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน คือ

$$\sum \vec{F} = m\vec{a}$$

จากสมการข้างต้น จะพบว่า แรงลัพธ์เนื่องจากแรงภายนอก แปรผันตรงกับ ความเร่ง ในขณะที่มวลของวัตถุ จะแปรผกผันกับค่าความเร่งของวัตถุ

ตัวอย่างของสถานการณ์ที่สามารถคำนวณโดยใช้กฎข้อที่สองของนิวตัน คือ ระบบที่ประกอบด้วยรถมวล M กิโลกรัม วางบนรางลม ผูกติดกับเชือก โดยปลายอีกด้านหนึ่งของเชือกผูกติดกับแผ่นจานรองมวล m_1 และมวลแต่ละชิ้นที่มีค่า m กิโลกรัม วางบนแผ่นจานรอง ดังรูป





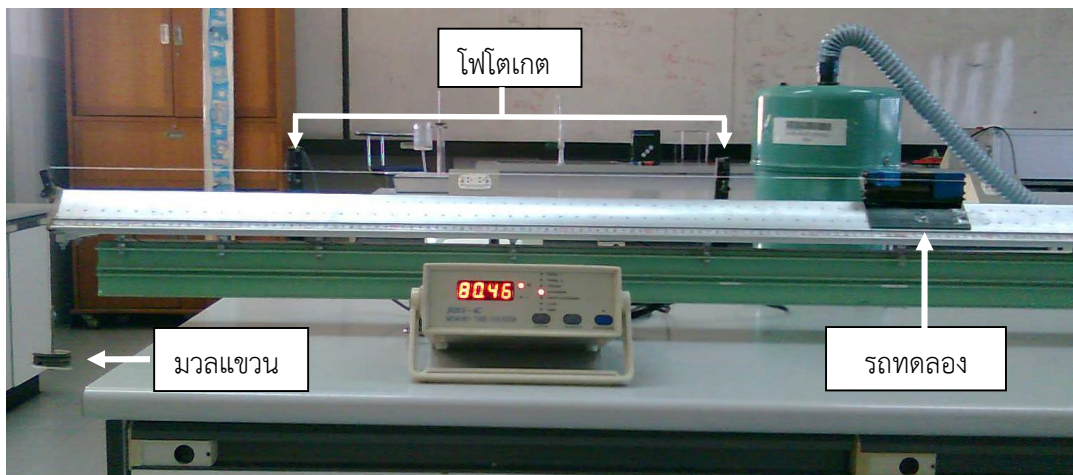
จากสถานการณ์ดังกล่าว ขนาดของความเร่งของระบบ (รถและแผ่นจานรองพร้อมมวล) จะมีค่าเป็น

$$a = \frac{(m_1 + 5m)g}{(M + m_1 + 5m)} \quad \text{m s}^{-2}$$

ตอนที่ 1 ศึกษาผลของมวลระบบที่มีต่อความเร่งของระบบ (แรงลัพธ์ที่กระทำต่อระบบมีค่าคงที่)

ขั้นตอนการทดลอง

1. วางแผนการทดลอง โดยการเลือกรถทดลองขนาดเล็ก รถทดลองขนาดใหญ่ Glider พร้อมที่ยึด และแผ่นมวลที่เพิ่มบนรถทดลอง จำนวน 2 ชั้น แผ่นจานรองและมวลที่ใช้วางบนแผ่นจานรองจำนวน 3 ชั้น ซึ่งมวลต่างๆเหล่านี้และบันทึกผลการทดลองที่ได้
2. เลือก Glider ชนิด 2 แถบ ที่มีขนาดของระยะห่างน้อยที่สุด วัดระยะห่างของแถบทั้งสองของ Glider บันทึกค่าที่วัดได้
3. จัดการทดลองให้เป็นไปตามรูปข้างต้น โดยใช้รถทดลองขนาดเล็ก ผูกติดกับเชือกคล้องผ่านรอก ปลายอีกด้านหนึ่งของเชือกผูกติดกับแผ่นจานรองมวลและมวล 3 ชั้น กำหนดตำแหน่งเริ่มต้นและตำแหน่งที่ต้องการวัดความเร็วของวัตถุจำนวน 2 ตำแหน่ง (ตำแหน่งที่ใช้ในการติดตั้งโฟโตเกต) และเลือก mode ของเครื่องบันทึกเวลาไว้ที่ acceleration



รูปแสดงการจัดวางอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

4. ปลอ่ยให้ระบบเคลื่อนที่ บันทึกค่าของเวลาที่อ่านได้จากโฟโตเกตตัวที่ 1 (t_1) โฟโตเกตตัวที่ 2 (t_3) และช่วงเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของวัตถุจากโฟโตเกตตัวที่ 1 ไปยังโฟโตเกตตัวที่ 2 (t_2) ทำซ้ำอีก 1 ครั้ง
5. เพิ่มมวลของรถทดลอง โดยการนำแผ่นมวลหนึ่งชั้นมายึดติดกับรถทดลอง ทำการทดลองเช่นเดียวกันกับการทดลองข้อที่ 4
6. เพิ่มมวลของรถทดลอง โดยการเพิ่มแผ่นมวลอีกหนึ่งชั้นยึดติดกับรถทดลอง ทำการทดลองเช่นเดียวกันกับการทดลองข้อที่ 4
7. เปลี่ยนขนาดของรถทดลองเป็นรถทดลองขนาดใหญ่ ทำการทดลองเช่นเดียวกันกับการทดลองข้อที่ 4 ถึงข้อที่ 6
8. หาค่าเฉลี่ยของเวลาที่ได้ในแต่ละเงื่อนไขของมวลของรถทดลองที่เปลี่ยนไป



การคำนวณ

1. คำนวณหาค่าขนาดความเร็วของระบบที่ผ่านโฟโตเกตตัวที่ 1 จากสูตร $v_1 = (\text{ระยะห่างของแถบ Glider} / t_1)$ และค่าขนาดความเร็วของระบบที่ผ่านโฟโตเกตตัวที่ 2 จากสูตร $v_2 = (\text{ระยะห่างของแถบ Glider} / t_3)$
2. คำนวณหาค่าขนาดความเร่งของระบบ โดยใช้สูตร $a = (v_2 - v_1)/(t_2)$

กราฟ

เขียนกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง (1 / มวลของระบบ) แนวแกน x กับค่าความเร่งของระบบในแนวแกน y วิเคราะห์กราฟที่ได้ โดยพิจารณาจากค่าความชันของกราฟ เปรียบเทียบกับค่าน้ำหนักของแผ่นจานรองมวลและมวล 3 ชั้น ที่ใช้แขวน พร้อมทั้งระบุค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น

ตอนที่ 2 ศึกษาผลของแรงลัพธ์ที่มีต่อความเร่งของระบบ (มวลของระบบมีค่าคงที่)

ขั้นตอนการทดลอง

1. วางแผนการทดลอง โดยการเลือกรถทดลองขนาดเล็ก Glider พร้อมทั้งยึด แผ่นจานรองและมวลที่ใช้วางบนแผ่นจานรองจำนวน 5 ชั้น ซึ่งมวลต่างๆเหล่านี้และบันทึกผลการทดลองที่ได้
2. เลือก Glider ชนิด 2 แถบ ที่ใช้ในการทดลอง โดยเลือก Glider ที่มีขนาดของระยะห่างน้อยที่สุด วัดระยะห่างของแถบทั้งสองของ Glider บันทึกค่าที่วัดได้
3. จัดการทดลองให้เป็นไปตามรูปข้างต้น โดยใช้รถทดลองขนาดเล็ก และมวลทั้ง 5 ชั้นวางบนแผ่นจานรอง กำหนดตำแหน่งเริ่มต้นและตำแหน่งที่ต้องการวัดความเร็วของวัตถุจำนวน 2 ตำแหน่ง (ตำแหน่งที่ใช้ในการติดตั้งโฟโตเกต) และเลือก mode ของเครื่องบันทึกเวลาไว้ที่ acceleration
4. ปล่อยให้ระบบเคลื่อนที่ บันทึกค่าของเวลาที่อ่านได้จากโฟโตเกตตัวที่ 1 (t_1) โฟโตเกตตัวที่ 2 (t_3) และช่วงเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของวัตถุจากโฟโตเกตตัวที่ 1 ไปยังโฟโตเกตตัวที่ 2 (t_2) ทำซ้ำอีก 1 ครั้ง
5. นำมวล 1 ชั้นที่วางบนแผ่นจานรองออกมายึดติดกับรถทดลอง ทำการทดลองข้อที่ 4
6. นำมวลอีก 1 ชั้นที่วางบนแผ่นจานรองออกมายึดติดกับรถทดลอง การทดลองข้อที่ 4 ทำซ้ำในทำนองเดียวกัน จนไม่มีมวลวางบนแผ่นจานรอง
7. หาค่าเฉลี่ยของเวลาที่ได้ในแต่ละเงื่อนไขของมวลบนแผ่นจานรองที่เปลี่ยนไป

การคำนวณ

1. คำนวณหาค่าขนาดของความเร็วของระบบที่ผ่านโฟโตเกตตัวที่ 1 จากสูตร $v_1 = (\text{ระยะห่างของแถบ Glider})/t_1$ และโฟโตเกตตัวที่ 2 จากสูตร $v_2 = (\text{ระยะห่างของแถบ Glider})/t_3$
2. คำนวณหาค่าขนาดของความเร่งของระบบ จากสูตร $a = (v_2 - v_1)/(t_2)$

กราฟ

เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงลัพธ์ที่กระทำกับระบบกับความเร่งของระบบ วิเคราะห์กราฟที่ได้ โดยพิจารณาจากค่าความชันของกราฟ เปรียบเทียบกับค่ามวลของระบบ พร้อมทั้งระบุค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น (กำหนดให้ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก บริเวณโรงเรียนมหิดลวิทยานุสรณ์ เท่ากับ 9.783 เมตรต่อวินาที²)

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลองทั้งตอนที่ 1 และตอนที่ 2 พร้อมทั้งตอบคำถามท้ายการทดลอง



รายงานผลการทดลองที่ 3

เรื่อง ผลของมวลและแรงที่มีต่อความเร่งของวัตถุ

รายวิชา กลศาสตร์ สาขาวิชาฟิสิกส์ โรงเรียนมหิดลวิทยานุสรณ์
ชื่อผู้ทำการทดลอง 1. ชั้น เลขที่.....
2. ชั้น เลขที่.....
3. ชั้น เลขที่.....
วันที่เดือน พ.ศ.

คะแนนที่ได้

ผลการทดลอง

ตอนที่ 1 ศึกษาผลของมวลระบบที่มีต่อความเร่งของระบบ

ตารางข้อมูลของมวลที่ได้จากการชั่ง

วัตถุที่ใช้ในการทดลอง	ค่ามวลที่ได้ (กิโลกรัม)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
รถทดลองขนาดเล็ก Glider พร้อมที่ยึด				
รถทดลองขนาดใหญ่ Glider พร้อมที่ยึด				
มวลติดรถอันที่ 1				
มวลติดรถอันที่ 2				
มวลทั้งหมดที่ใช้แขวน (แผ่นจาน+3 มวล)				

ระยะห่างของแถบ Glider = ± เซนติเมตร

ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของมวลทั้งหมดที่ใช้แขวน = กิโลกรัม

ตารางข้อมูลของเวลาที่วัดได้จากการทดลอง

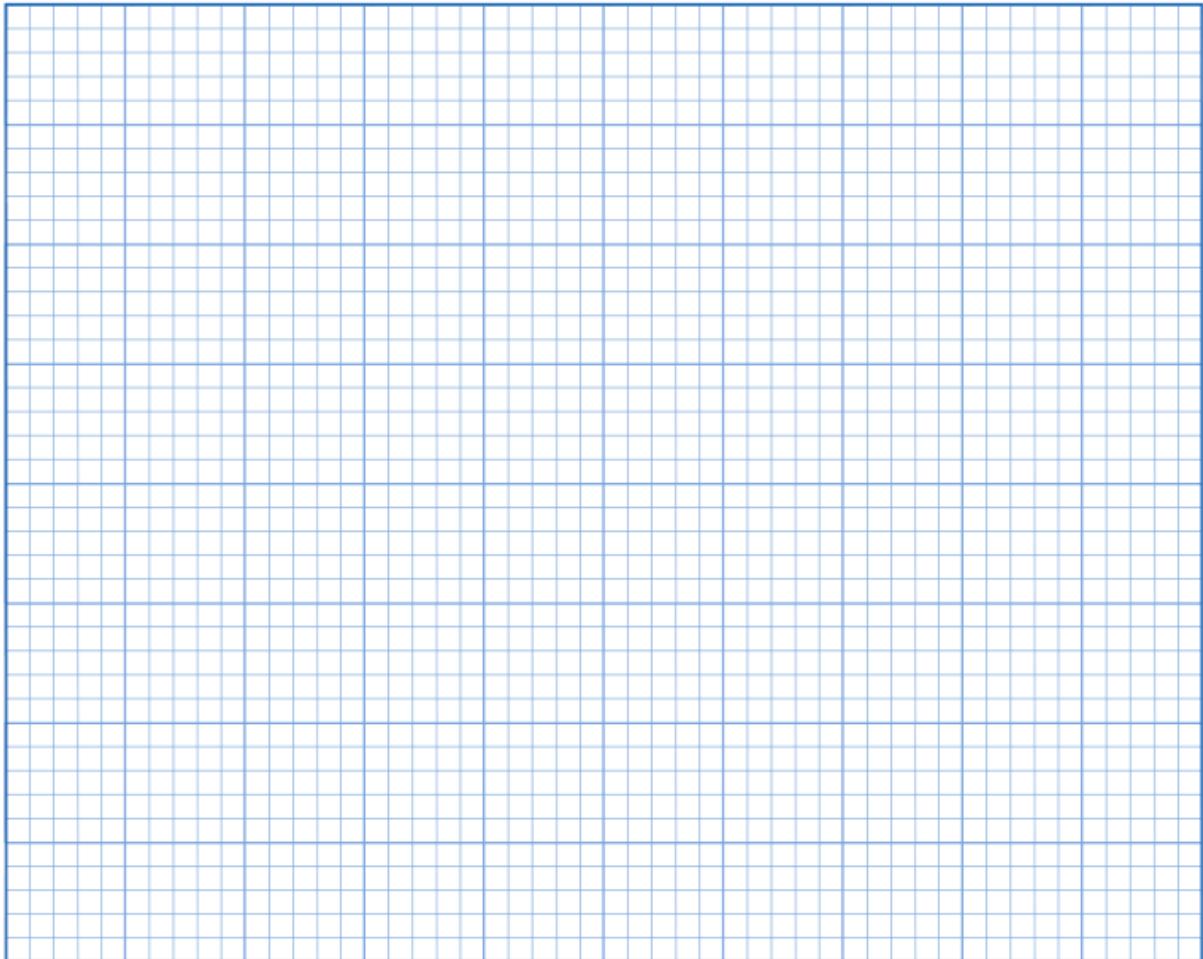
วัตถุที่ใช้ในการทดลอง	ค่าเวลาที่บันทึกได้ (มิลลิวินาที)								
	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ค่าเฉลี่ย		
	t1	t2	t3	t1	t2	t3	t1	t2	t3
รถเล็ก									
รถเล็ก + 1 มวล									
รถเล็ก + 2 มวล									
รถใหญ่									
รถใหญ่ + 1 มวล									
รถใหญ่ + 2 มวล									



ตารางข้อมูลของมวลระบบกับความเร่งของระบบ ที่ได้จากการทดลอง

ระบบ	1/มวลของระบบ (กิโลกรัม ⁻¹)	ความเร็วต้น v1 (เมตรต่อวินาที)	ความเร็วปลาย v2 (เมตรต่อวินาที)	ความเร่งของระบบ (เมตรต่อวินาที ²)
รถเล็ก				
รถเล็ก + 1 มวล				
รถเล็ก + 2 มวล				
รถใหญ่				
รถใหญ่ + 1 มวล				
รถใหญ่ + 2 มวล				

กราฟแสดงผลการทดลอง



ข้อมูลที่ได้จากกราฟ

ความชัน =	ความชันสูงสุด =	ความชันต่ำสุด =	Δ ความชัน =
-----------------	-----------------------	-----------------------	--------------------------



ปริมาณที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง

<p>น้ำหนักของมวลที่ใช้แขวน ที่วิเคราะห์ได้จากกราฟ</p> <p>$W = \dots \pm \dots$ นิวตัน</p> <p>เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของข้อมูล =</p>	<p>น้ำหนักของมวลที่ใช้แขวน ที่ได้จากการชั่งมวล</p> <p>$W = \dots \pm \dots$ นิวตัน</p> <p>เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากค่าที่ชั่งได้จริง =</p>
---	---

ตอนที่ 2 ศึกษาผลของแรงลัพธ์ที่มีต่อความเร่งของระบบ

ตารางข้อมูลของมวลที่ใช้ในการทดลอง

วัตถุที่ใช้ในการทดลอง	ค่ามวลที่ได้ (กิโลกรัม)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
รถทดลองขนาดเล็ก Glider พร้อมที่ยึด				
มวลของแผ่นจานรอง				
มวลชั้นที่ 1				
มวลชั้นที่ 2				
มวลชั้นที่ 3				
มวลชั้นที่ 4				
มวลชั้นที่ 5				
มวลทั้งหมดของระบบ				

ระยะห่างของแถบ Glider = $\dots \pm \dots$ เซนติเมตร

ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของมวลทั้งหมดของระบบ = \dots กิโลกรัม

ตารางข้อมูลของเวลาที่วัดได้จากการทดลอง

วัตถุที่ใช้แขวน	ค่าเวลาที่บันทึกได้ (มิลลิวินาที)								
	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ค่าเฉลี่ย		
	t1	t2	t3	t1	t2	t3	t1	t2	t3
จานรอง + 5 มวล									
จานรอง + 4 มวล									
จานรอง + 3 มวล									
จานรอง + 2 มวล									
จานรอง + 1 มวล									

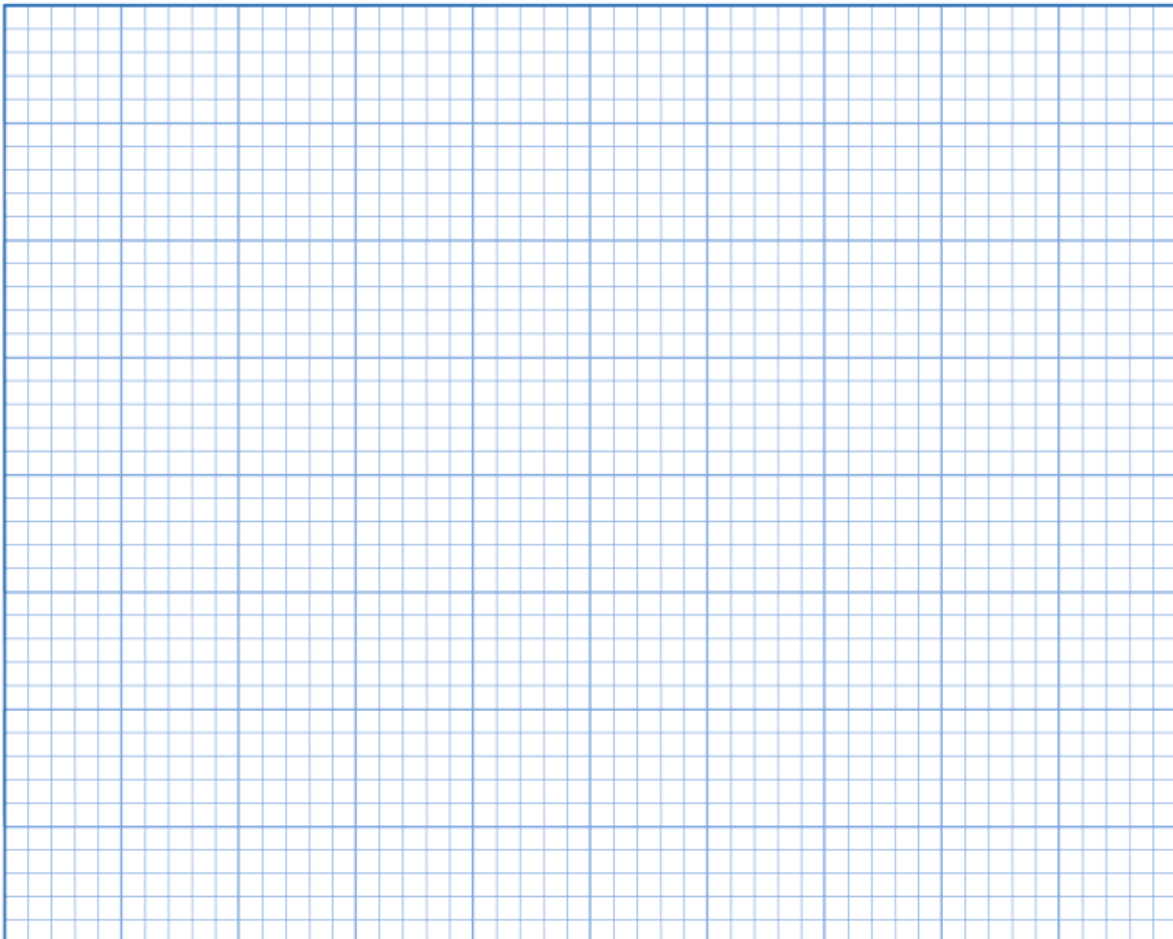


จากรอง									
--------	--	--	--	--	--	--	--	--	--

ตารางข้อมูล แรงลัพธ์กับความเร่งของระบบ ที่ได้จากการทดลอง

ระบบ	น้ำหนักที่ใช้แขวน (นิวตัน)	ความเร็วต้น v_1 (เมตรต่อวินาที)	ความเร็วปลาย v_2 (เมตรต่อวินาที)	ความเร่งของระบบ (เมตรต่อวินาที ²)
จากรอง + 5 มวล				
จากรอง + 4 มวล				
จากรอง + 3 มวล				
จากรอง + 2 มวล				
จากรอง + 1 มวล				
จากรอง				

กราฟแสดงผลการทดลอง



ข้อมูลที่ได้จากกราฟ



2. จากผลการทดลองที่ได้จากตอนที่ 1 สามารถสรุปได้หรือไม่ว่า กฎข้อที่สองของนิวตัน $\sum \vec{F} = m\vec{a}$

สามารถอธิบายสถานการณ์ในการทดลองนี้ เพราะเหตุใด

.....

.....

.....

.....

.....

3. จากผลการทดลองที่ได้จากตอนที่ 2 สามารถสรุปได้หรือไม่ว่า กฎข้อที่สองของนิวตัน $\sum \vec{F} = m\vec{a}$

สามารถอธิบายสถานการณ์ในการทดลองนี้ เพราะเหตุใด

.....

.....

.....

.....

.....

4. ถ้าพิจารณาการทดลองเป็นมวลของระบบ เงื่อนไขและสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองในตอนที่ 1 และตอนที่ 2 จะเหมือนหรือแตกต่างจากเดิมหรือไม่ อย่างไร

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....



การทดลองที่ 4

เรื่อง งานและพลังงานจลน์ (Work and kinetic energy)

รายวิชา กลศาสตร์

สาขาวิชาฟิสิกส์

โรงเรียนมหิตลวิทย์ยานุสรณ์

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างงานและพลังงานจลน์
2. เพื่อให้เกิดทักษะในด้านการใช้เครื่องมือ การบันทึกผลข้อมูลตามหลักของเลขนัยสำคัญ การวิเคราะห์ผลการทดลองจากกราฟ การหาค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

อุปกรณ์

- | | |
|---|-----------|
| 1. ชุดรางลมพร้อมรถ | 1 ชุด |
| 2. เครื่องปั๊มลม | 1 เครื่อง |
| 3. โฟโตเกตพร้อมที่ยึดจับ | 2 ชุด |
| 4. เครื่องบันทึกเวลา | 1 เครื่อง |
| 5. รถทดลองสำหรับรางลมคันใหญ่ | 1 คัน |
| 6. จานรองมวลพร้อมแผ่นมวลสำหรับเพิ่มน้ำหนักถ่วงได้ | 5 ค่า |
| 7. Glider ชนิด 2 แถบ | 1 ชิ้น |
| 8. สปริง | 1 อัน |
| 9. ขาดั่งสำหรับแขวนสปริง | 1 ชุด |
| 10. เครื่องชั่ง | 1 เครื่อง |

ทฤษฎี

พลังงานเป็นปริมาณที่บอกถึงความสามารถในการทำงานของวัตถุ หากมีแรงภายนอกมากระทำกับวัตถุ พลังงานของวัตถุจะมีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับงานของแรงที่ทำกระทำต่อวัตถุนั้น ในกรณีที่วัตถุทำงานวัตถุจะเสียพลังงานไปเท่ากับงานที่วัตถุทำ

พลังงานจลน์ เป็นพลังงานที่วัตถุมีเนื่องจากวัตถุนั้นมีการเคลื่อนที่ ถ้าวัตถุมีมวล m กำลังเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว v วัตถุนั้นจะมีพลังงานจลน์ในการเคลื่อนที่ตำแหน่ง (E_k) ซึ่งหาได้จาก

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2$$

ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์และงาน งานของแรงลัพธ์ที่กระทำต่อวัตถุจะเท่ากับพลังงานจลน์ของวัตถุที่เปลี่ยนแปลง ดังสมการ

$$W = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2$$

กรณีที่แรงทั้งหมดที่กระทำต่ออนุภาคเป็นแรงอนุรักษ์ จะได้ว่า พลังงานของอนุภาค (E) มีค่าคงตัว

$$E = E_k + E_p = \text{ค่าคงตัว}$$

เมื่อ E_p คือ พลังงานศักย์ ซึ่งอาจเป็นพลังงานศักย์โน้มถ่วง หรือพลังงานศักย์ยืดหยุ่นของสปริง

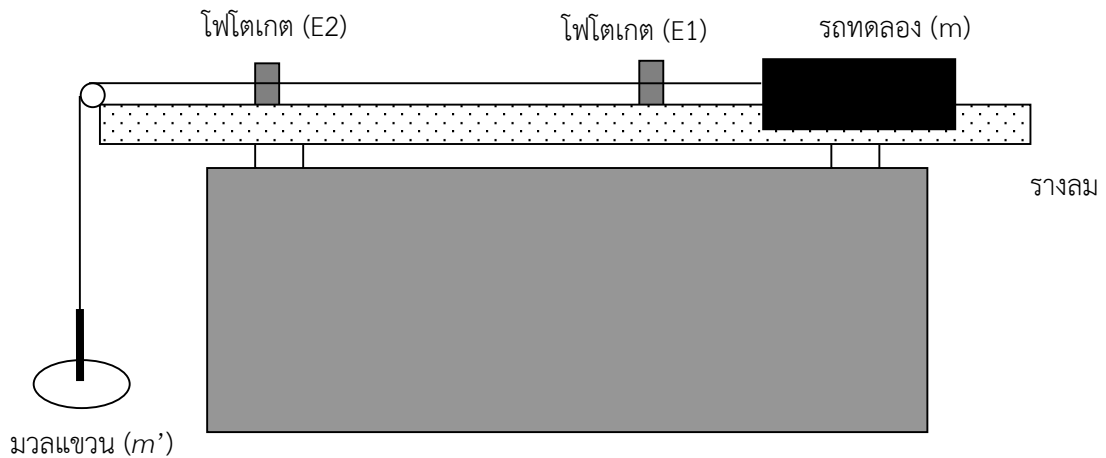
หรือกล่าวได้ว่า การเคลื่อนที่ของวัตถุภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลกหรือภายใต้แรงดึงกลับของสปริง พลังงานรวมของวัตถุจะมีค่าคงตัวเสมอ ซึ่งเป็นไปตาม กฎการอนุรักษ์พลังงาน (Law of Conservation of energy) ที่กล่าวว่า พลังงานจะไม่สูญหายไปไหน แต่อาจเปลี่ยนจากรูปหนึ่งไปเป็นอีกรูปหนึ่งได้



ตอนที่ 1 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างงานและพลังงานจลน์

ขั้นตอนการทดลอง

1. เลือก Glider ชนิด 2 แถบ ที่ใช้ในการทดลอง โดยเลือก Glider ที่มีขนาดของระยะห่างของแถบ Glider น้อยที่สุด วัดระยะห่างของแถบทั้งสองของ Glider บันทึกค่าที่วัดได้
2. ชั่งและบันทึกมวลของรถทดลองขนาดใหญ่ที่ติดตั้ง Glider แผ่นจานรองและแผ่นมวลที่ใช้วางบนแผ่นจานรองจำนวน 5 ชิ้น
3. ติดตั้งอุปกรณ์การทดลองให้เป็นไปตามรูปข้างล่าง โดยใช้รถทดลองขนาดใหญ่ผูกติดเชือกและคล้องผ่านรอก และผูกติดกับแผ่นจานรองมวล กำหนดตำแหน่งเริ่มต้นและตำแหน่งที่ต้องการวัดความเร็วของวัตถุจำนวน 2 ตำแหน่ง (ตำแหน่งที่ใช้ในการติดตั้งโฟโตเกต) โดยให้ตำแหน่งโฟโตเกตห่างกันเป็นระยะ $S = 50$ เซนติเมตร และเลือก mode ของเครื่องบันทึกเวลาไว้ที่ S2



รูปแสดงการจัดวางอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

4. ใส่แผ่นมวลบนจานรองมวล 1 แผ่น แล้วปล่อยให้รถทดลองเคลื่อนที่ผ่านโฟโตเกตทั้งสอง บันทึกค่าของเวลาที่อ่านได้จากโฟโตเกตตัวที่ 1 (t_1) โฟโตเกตตัวที่ 2 (t_2) ทำซ้ำอีก 2 ครั้ง
5. ทำการทดลองซ้ำข้อที่ 4 อีก 4 ครั้ง โดยแต่ละครั้งเพิ่มแผ่นมวลบนจานรองครั้งละ 1 แผ่น



การคำนวณ

- คำนวณหาค่าความเร็วของระบบที่ผ่านโฟโตเกตตัวที่ 1 จากสูตร $v_1 =$ ระยะห่างของแถบ Glider / t_1 และค่าความเร็วของระบบที่ผ่านโฟโตเกตตัวที่ 2 จากสูตร $v_2 =$ ระยะห่างของแถบ Glider / t_2
- คำนวณหาค่าขนาดแรง F ที่ทำให้รถทดลองเคลื่อนที่ จากสูตร

$$F = \frac{mm'}{m+m'}g$$

เมื่อ g เป็นค่าขนาดของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (บริเวณโรงเรียนมหิดลวิทยานุสรณ์) 9.783 เมตรต่อวินาที²

m เป็นมวลของรถทดลอง และ m' เป็นมวลรวมของวัตถุที่ใช้แขวนเพื่อดึงรถทดลองให้เคลื่อนที่

- คำนวณหาค่างาน W_F ที่ให้กับรถทดลองจากขนาดของแรง F โดย $W_F = Fs$
- คำนวณหาค่าพลังงานจลน์ที่เปลี่ยนไปของรถทดลอง $\Delta E_k = \frac{1}{2}m(v_2^2 - v_1^2)$

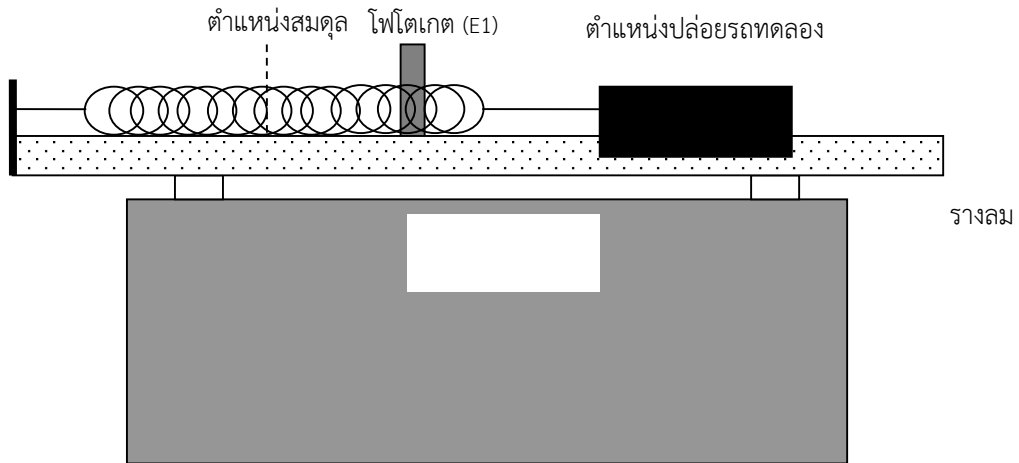
กราฟ

เขียนกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างงาน W_F กับค่า ΔE_k วิเคราะห์กราฟที่ได้ โดยพิจารณาจากค่าความชันของกราฟ

ตอนที่ 2 ศึกษาหลักการอนุรักษ์พลังงานกล

ขั้นตอนการทดลอง

1. เลือก Glider ชนิด 2 แถบ ที่ใช้ในการทดลอง โดยเลือก Glider ที่มีขนาดของระยะห่างของแถบ Glider น้อยที่สุด วัดระยะห่างของแถบทั้งสองของ Glider บันทึกค่าที่วัดได้
2. ชั่งและบันทึกมวลของรถทดลองขนาดใหญ่ที่ติดตั้ง Glider แผ่นจานรองและแผ่นมวลที่ใช้วางบนแผ่นจานรอง จำนวน 5 ชิ้น
3. หาค่าคงที่ของสปริง k
 - 3.1 โดยใช้ ขนาดของน้ำหนัก (F) ที่เกิดจากแผ่นจานรองและแผ่นมวลที่ใช้วางบนแผ่นจานรองแขวนที่สปริง แล้ววัดขนาดของการกระจัดที่สปริงยืดออก (S) บันทึกผลการวัด
 - 3.2 เปลี่ยนขนาดของน้ำหนักที่ใช้แขวนสปริงอีก 4 ค่าโดยแต่ละค่า เพิ่มแผ่นมวลที่ใช้วางบนแผ่นจานรองจำนวน 1 ชิ้น วัดการกระจัดที่สปริงยืดออก (S) บันทึกผลการวัด
4. ติดตั้งอุปกรณ์การทดลองให้เป็นไปตามรูปข้างล่าง โดยใช้รถทดลองขนาดใหญ่ผูกติดสปริงที่ยึดกับรางลม แล้วปล่อยให้รถทดลองอยู่ในตำแหน่งสมดุล ติดตั้งโฟโตเกตให้ห่างจากตำแหน่งสมดุลเป็นระยะ x พร้อมบันทึกระยะ x และเลือก mode ของเครื่องบันทึกเวลาไว้ที่ S2



รูปแสดงการจัดวางอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- กำหนดระยะปล่อยรถทดลอง โดยดึงรถทดลองให้สปริงยืดออกเข้าจากตำแหน่งสมดุล แล้วปล่อยให้รถทดลองเคลื่อนที่ผ่านโฟโตเกต บันทึกเวลาที่บันทึกจากเครื่องบันทึกเวลา (t_1) และนำไปหาความเร็วของรถทดลองขณะผ่านโฟโตเกต
- ทำการทดลองซ้ำข้อ 5 โดยเปลี่ยนระยะที่ติดตั้งโฟโตเกต อีก 5 ค่า โดยใช้ตำแหน่งปล่อยรถทดลองตำแหน่งเดิม
- เปรียบเทียบพลังงานกลรวมแต่ละตำแหน่งที่ติดตั้งโฟโตเกต สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง พร้อมทั้งตอบคำถามท้ายการทดลอง

การคำนวณ

- ขนาดของน้ำหนักที่แขวนสปริง (F) จากสมการ

$$F = mg$$

เมื่อ m เป็นมวลของวัตถุที่แขวนสปริง (แผ่นจานรองและแผ่นมวลที่ใช้วางบนแผ่นจานรอง)
 g เป็นค่าขนาดของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (บริเวณโรงเรียนมหิดลวิทยานุสรณ์)
 9.783 เมตรต่อวินาที²

- ค่าอัตราเร็วของระบบที่ผ่านโฟโตเกตตัวที่ 1 จากสูตร $v = (\text{ระยะห่างของแถบ Glider} / t_1)$

- คำนวณหาพลังงานจลน์ (E_k) จากสมการ $E_k = \frac{1}{2}mv^2$

- คำนวณหาพลังงานศักย์ยืดหยุ่น (E_p) จากสมการ $E_p = \frac{1}{2}kx^2$

กราฟ

หาค่าคงที่สปริง

- เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของน้ำหนัก (F) กับระยะที่สปริงยืดออก (S) โดยให้ F เป็นแกน y และ S เป็นแกน x แล้วหาค่าคงที่สปริง (k) จากความชันของกราฟ



รายงานผลการทดลองที่ 4
เรื่อง งานและพลังงาน

รายวิชา กลศาสตร์ สาขาวิชาฟิสิกส์ โรงเรียนมหิดลวิทยานุสรณ์
ชื่อผู้ทำการทดลอง 1. ชั้น เลขที่.....
2. ชั้น เลขที่.....
3. ชั้น เลขที่.....
วันที่ เดือน พ.ศ.

คะแนนที่ได้

ตอนที่ 1 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างงานและพลังงานจลน์

ตารางข้อมูลของมวลที่ใช้ในการทดลอง

วัตถุที่ใช้ในการทดลอง	มวล (กิโลกรัม)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
รถทดลองขนาดใหญ่				
จากรองมวลและมวล 1 ชั้น				
จากรองมวลและมวล 2 ชั้น				
จากรองมวลและมวล 3 ชั้น				
จากรองมวลและมวล 4 ชั้น				
จากรองมวลและมวล 5 ชั้น				

ระยะห่างของแถบ Glider = ± เมตร

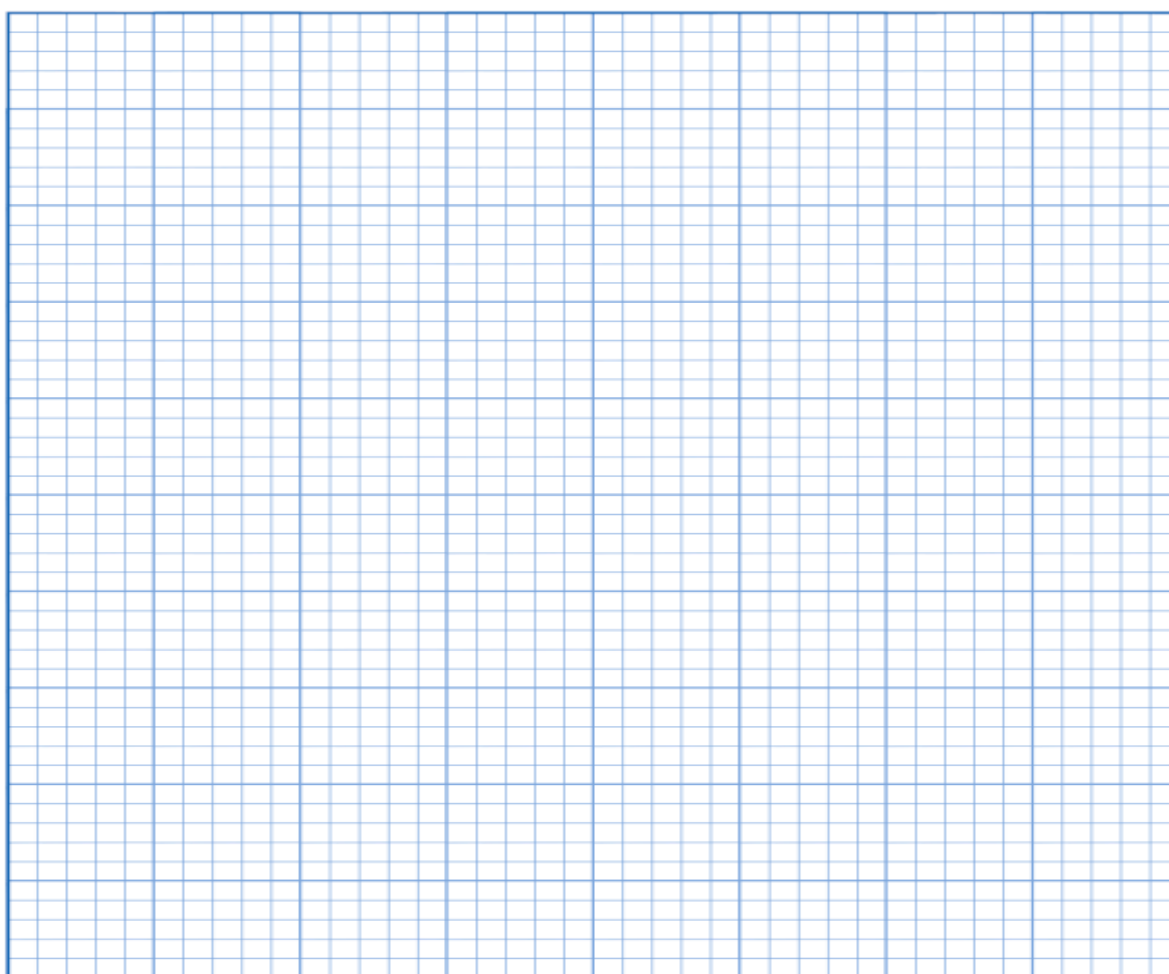
วัตถุที่ใช้ในการทดลอง	เวลาที่บันทึกได้ (วินาที)							
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ค่าเฉลี่ย	
	E1	E2	E1	E2	E1	E2	E1	E2
จากรองมวลและมวล 1 ชั้น								
จากรองมวลและมวล 2 ชั้น								
จากรองมวลและมวล 3 ชั้น								
จากรองมวลและมวล 4 ชั้น								
จากรองมวลและมวล 5 ชั้น								



ตารางข้อมูลแสดงงานที่กระทำกับรถทดลองกับ ΔE_k ของรถทดลอง

ระบบ	งานที่กระทำกับรถทดลอง (จูล)	พลังงานจลน์ที่เปลี่ยนไปของรถทดลอง (ΔE_k) (จูล)
งานรอมมวลและมวล 1 ชั้น		
งานรอมมวลและมวล 2 ชั้น		
งานรอมมวลและมวล 3 ชั้น		
งานรอมมวลและมวล 4 ชั้น		
งานรอมมวลและมวล 5 ชั้น		

กราฟแสดงผลการทดลอง



ข้อมูลที่ได้จากกราฟ

ความชัน = กิโลกรัม	ความชันสูงสุด = กิโลกรัม	ความชันต่ำสุด = กิโลกรัม	Δ ความชัน = กิโลกรัม
-----------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	---

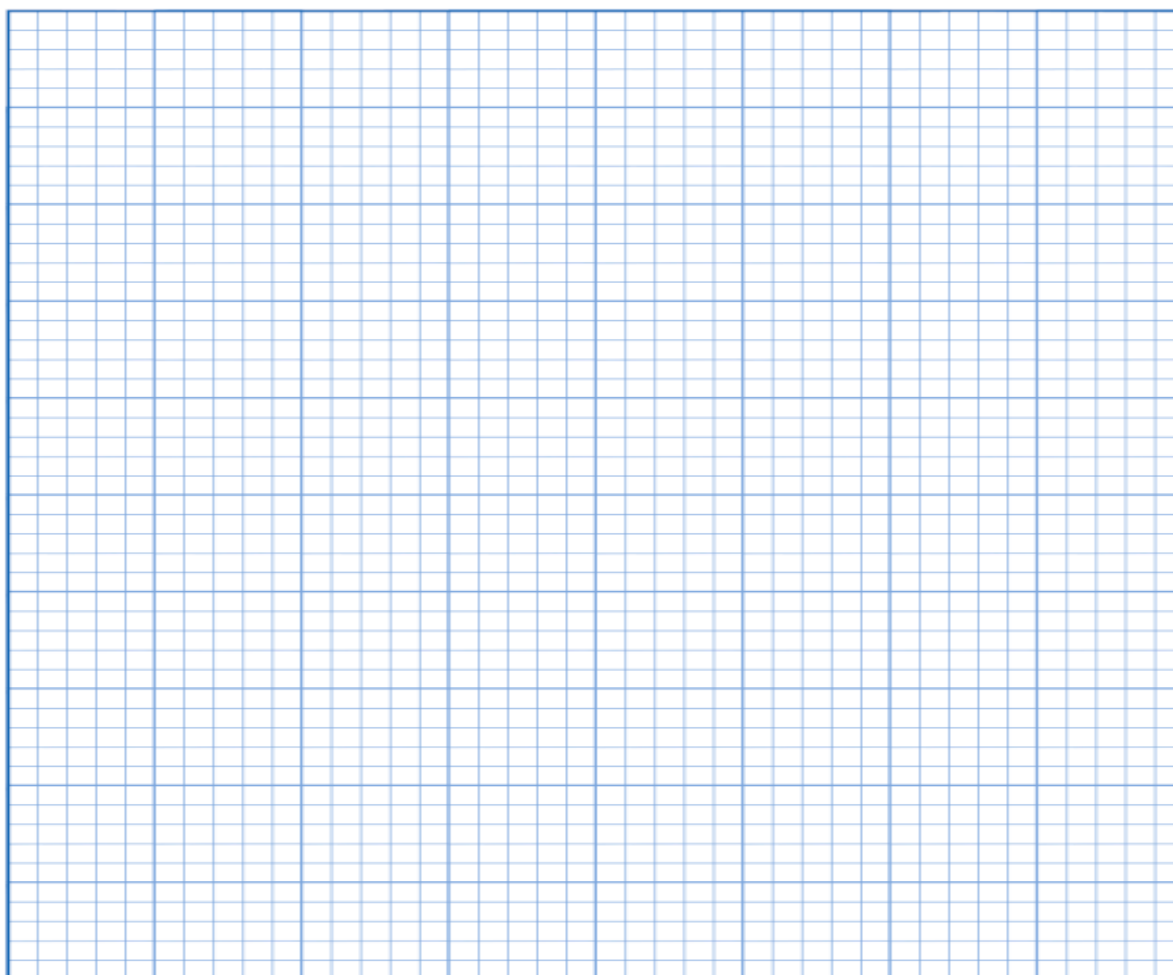


ตอนที่ 2 ศึกษาหลักการอนุรักษ์พลังงานกล

ตารางข้อมูลแสดงระยะยัดของสปริงที่วัดได้จากการทดลอง

วัตถุที่ใช้ในการทดลอง	น้ำหนักแขวนสปริง (นิวตัน)	ระยะยัดของสปริงจากตำแหน่งสมดุล (เมตร)			
		1	2	3	เฉลี่ย
จานรองมวลและมวล 1 ชั้น					
จานรองมวลและมวล 2 ชั้น					
จานรองมวลและมวล 3 ชั้น					
จานรองมวลและมวล 4 ชั้น					
จานรองมวลและมวล 5 ชั้น					

กราฟแสดงผลการทดลอง



ข้อมูลที่ได้จากกราฟ

ค่าคงที่สปริง k (ความชันของกราฟ) = นิวตัน/เมตร



.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

คำถามท้ายการทดลอง

1. ในการทดลองตอนที่ 1 งานที่กระทำกับรถทดลองมีความสัมพันธ์กับพลังงานจลน์ของรถทดลอง อย่างไร

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

2. ในการทดลองตอนที่ 2 พลังงานกลของระบบมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....



การทดลองที่ 5

เรื่อง การเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย (Simple Harmonic Motion)

รายวิชา กลศาสตร์

สาขาวิชาฟิสิกส์

โรงเรียนมหิดลวิทยานุสรณ์

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย
2. เพื่อหาความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกจากการเคลื่อนที่ของลูกตุ้มนาฬิกา
3. เพื่อหาค่าจีเอสปรিংจากการเคลื่อนที่ของมวลติดสปริง

อุปกรณ์

การเคลื่อนที่ของลูกตุ้มนาฬิกา

1. ลูกตุ้มพร้อมเชือก 1 ชุด
2. ขาตั้งพร้อมที่แขวนมวล 1 ชุด
3. นาฬิกาจับเวลา 1 เรือน
4. ไม้เมตร 1 อัน

การเคลื่อนที่ของมวลติดกับสปริง

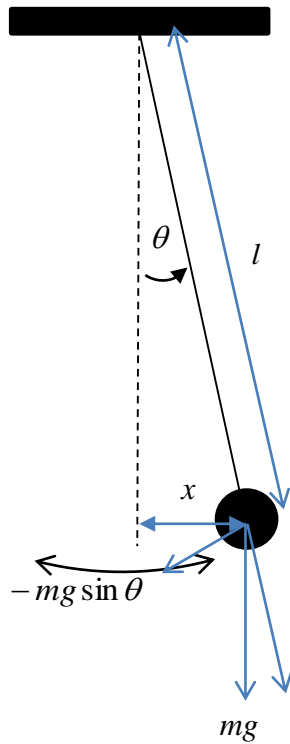
1. สปริงพร้อมขาตั้ง 1 ชุด
2. จานแขวนมวล 1 อัน
3. มวลขนาด 50 กรัม 7 อัน
4. นาฬิกาจับเวลา 1 เรือน
5. ไม้เมตร 1 อัน
6. เครื่องชั่ง

ทฤษฎี

การเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย (Simple Harmonic motion, SHM) เป็นการเคลื่อนที่แบบมีคาบเคลื่อนที่กลับไปมาซ้ำรอยเดิม โดยเคลื่อนที่ภายใต้แรงที่มีขนาดแปรโดยตรงกับขนาดการกระจัด (วัดจากตำแหน่งสมดุล) แต่มีทิศตรงกันข้ามเสมอ ตัวอย่างการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย ได้แก่



การเคลื่อนที่ของลูกตุ้มนาฬิกา



รูปที่ 5.1

จากรูปที่ 5.1 เมื่อลูกตุ้มเคลื่อนที่ออกจากสมดุลเป็นมุม θ (การกระจัด x) จะมีแรงดึงให้ลูกตุ้มกลับเข้าสู่สมดุล $-mg \sin \theta$ ดังนั้น ลูกตุ้มจะมีสมการการเคลื่อนที่

$$\begin{aligned}\sum F &= ma \\ -mg \sin \theta &= ma \\ -g \sin \theta &= a\end{aligned}$$

พิจารณาที่มุม θ เล็กมากๆ จะได้ $\sin \theta \approx \theta \approx \frac{x}{l}$ ดังนั้น

$$-g \frac{x}{l} = a \quad (5.1)$$

จากสมการที่ 5.1 จะเห็นได้ว่า $a \propto -x$ ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย

สมการที่ 5.1 สามารถเขียนในรูปสมการเชิงอนุพันธ์อันดับสอง (Second order differential equation) ได้ว่า

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{g}{l}x = 0 \quad (5.2)$$

ซึ่งมีคำตอบของสมการเป็น

$$x = A \cos \left[\left(\sqrt{\frac{g}{l}} \right) t + \phi \right]$$



โดยที่ A คือ แอมพลิจูด และ ϕ คือ มุมเฟสเริ่มต้น ค่า $\sqrt{\frac{g}{l}}$ เรียกว่า ความถี่เชิงมุมของการสั่น (ω) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับคาบการสั่น

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \quad (5.3)$$

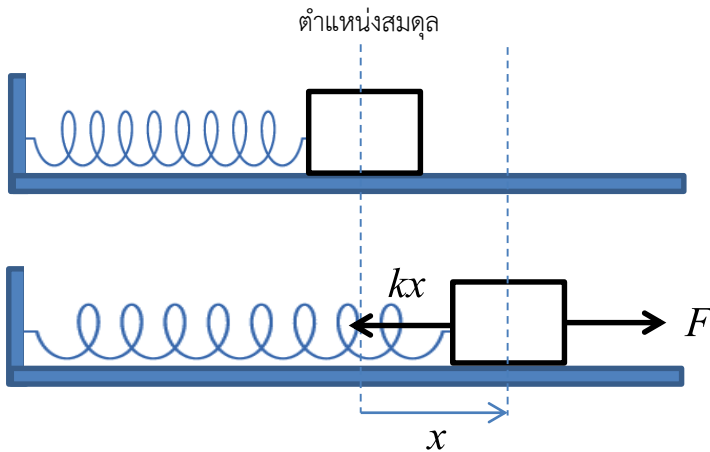
ดังนั้น

$$T^2 = \left(\frac{4\pi^2}{g}\right)l \quad (5.4)$$

ข้อสังเกต จะต้องระลึกเสมอว่า l คือ ความยาวที่วัดจากจุดแกว่งจนถึงจุดศูนย์กลางมวลของลูกตุ้ม

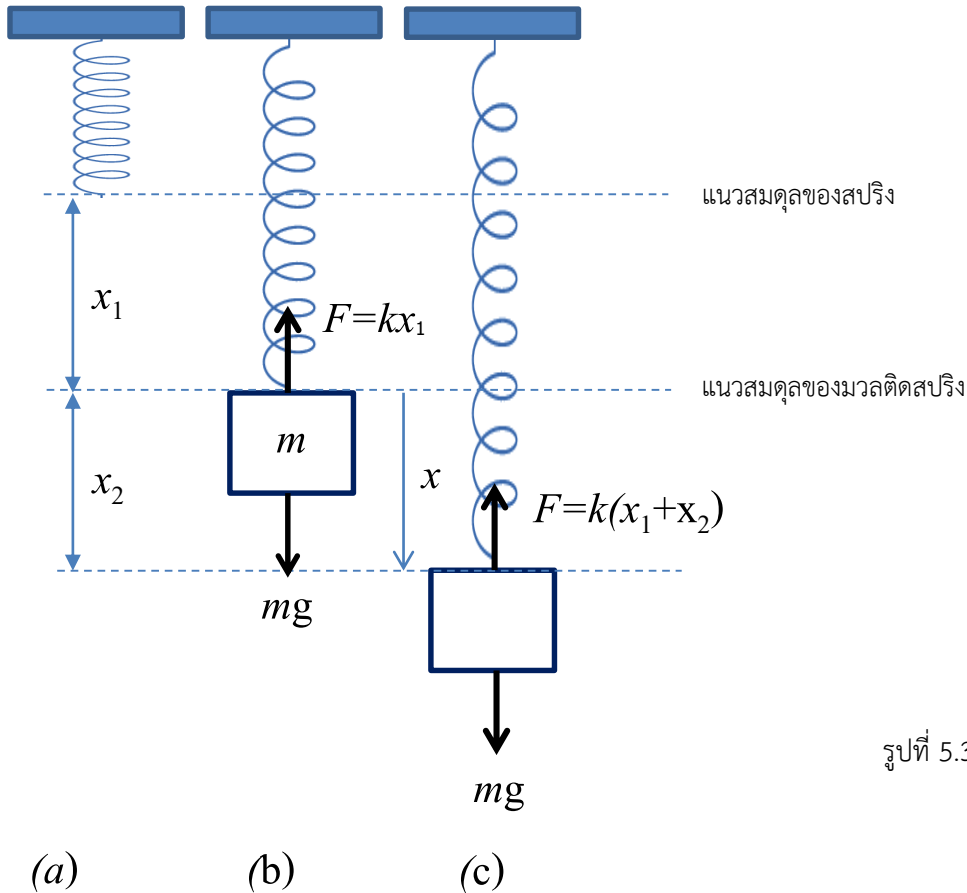
การเคลื่อนที่ของมวลติดกับสปริง

ในการดึงมวลที่ยึดติดกับสปริงออกไปเป็นระยะทาง x ดังรูปที่ 5.2 เราต้องออกแรงดึงที่มีขนาดเท่ากับขนาดของแรงที่สปริงดึงมวลให้กลับไปอยู่ที่ตำแหน่งสมดุล



รูปที่ 5.2

แรงที่สปริงกระทำต่อมวลจะมีขนาดแปรผันโดยตรงกับขนาดการกระจัดจากตำแหน่งสมดุล แต่จะมีทิศตรงข้ามเสมอ ซึ่งแรงนี้มีขนาดเท่ากับ kx เมื่อ k เป็นค่าคงที่ เรียกว่า ค่านิจสปริง (Spring constant)



พิจารณารูปที่ 5.3 (b) เมื่อมวล m อยู่ในสภาพสมดุล จะได้

$$kx_1 = mg \quad (5.5)$$

พิจารณารูปที่ 5.3 (c) จะได้

ขนาดของแรงดึงกลับ $F = -k(x_1 + x_2) + mg$ (แรงดึงกลับมีทิศตรงข้ามกับ x)

$$F = -kx_1 - kx_2 + mg$$

แทนค่า mg จากสมการที่ 1 จะได้

$$F = -kx_1 - kx_2 + kx_1$$

$$F = -kx_2 \quad (5.6)$$

นั่นคือ แรงดึงกลับ \vec{F} มีทิศกลับสู่แนวสมดุลและมีขนาดแปรผันตามการกระจัด x_2 แต่มีทิศทางตรงกันข้าม ดังนั้น การแกว่งของมวลติดสปริงจึงเป็นการเคลื่อนที่แบบ SHM หากกระยะกระจัดจากตำแหน่งสมดุลของมวลติดสปริงเป็น x จากสมการที่ 5.6 และกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน จะได้ว่าสมการของการเคลื่อนที่ของมวล m คือ

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + kx = 0 \quad (5.7)$$

ซึ่งเป็นสมการอนุพันธ์อันดับสอง (Second order differential equation) และมีผลเฉลยคือ

$$x = A \cos \left[t \left(\sqrt{\frac{k}{m}} \right) + \phi \right] \quad (5.8)$$

โดยที่ A คือ แอมพลิจูด และ ϕ คือ มุมเฟสเริ่มต้น ค่า $\sqrt{\frac{k}{m}}$ เรียกว่า ความถี่เชิงมุมของการสั่น (ω) จากค่าความถี่นี้จะได้อคาบการสั่น



$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \quad (5.9)$$

ดังนั้น

$$T^2 = \left(\frac{4\pi^2}{k}\right)m \quad (5.10)$$

สมการที่ 5.10 ต้องคิดว่า สปริงมีมวลน้อยมาก หากกรณีนี้คำนึงถึงมวลของสปริงด้วย สมการที่ 5.10 จะกลายเป็น

$$T^2 = \left(\frac{4\pi^2}{k}\right)\{m + M_{eff}\} \quad (5.11)$$

เมื่อ M_{eff} คือ มวลยังผล (effective mass) ของสปริง

วิธีการทดลอง

ตอนที่ 1 การเคลื่อนที่ของลูกตุ้มนาฬิกาอย่างง่าย

- 1.1 จัดอุปกรณ์การทดลอง ดังรูปที่ 5.1 แขนงลูกตุ้มกับที่แขวนมวลโดยกำหนดให้ระยะ l เป็น 50 เซนติเมตร ดึงลูกตุ้มออกไปด้านข้างให้เชือกทำมุมไม่เกิน 5 องศากับแนวตั้ง ปล่อยให้ลูกตุ้มแกว่งกลับไปมา จนกระทั่งการแกว่งเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ (ไม่มีการกระตุกของเชือก) จึงเริ่มจับเวลาของการแกว่ง 20 รอบ แล้วคำนวณหาคาบของการแกว่ง
- 1.2 ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง
- 1.3 ทำการทดลองซ้ำ ข้อ 1.1-1.2 โดยเปลี่ยนระยะ l เป็น 60, 70, 80, 90 และ 100 cm
- 1.4 เขียนกราฟระหว่าง T^2 (แกนตั้ง) กับระยะ l (แกนนอน) หาค่าความชัน แล้วคำนวณค่า g

ตอนที่ 2 การเคลื่อนที่ของมวลติดสปริง

2.1 หาค่านิจสปริงจากกฎของฮุก

- 2.1 แขนงสปริงกับที่แขวนสปริง ดังรูปที่ 5.3 (a) บันทึกตำแหน่งของปลายสปริงเริ่มต้น (x_0)
- 2.2 ชั่งหามวลของที่แขวนมวลพร้อมลูกตุ้มขนาด 50 กรัม สองก้อน แล้วนำไปติดที่ปลายสปริง ดังรูปที่ 5.3 (b) วัดปลายสปริงใหม่ บันทึกระยะสปริงที่ยืดออก
- 2.3 เพิ่มมวล 50 กรัม ในที่แขวนมวล บันทึกระยะที่สปริงยืดออกจากปลายสปริงเริ่มต้น
- 2.4 ทำการทดลองซ้ำข้อ 2.3 อีก 5 ครั้ง
- 2.5 เขียนกราฟระหว่างน้ำหนักที่ใช้ดึงสปริงให้ยืดออก (แกนตั้ง) กับระยะยืดของสปริง (แกนนอน) บนกระดาษกราฟ คำนวณค่านิจสปริง (ให้ใช้ค่า g ที่ได้จากการทดลองตอนที่ 1)

2.2 หาค่านิจสปริงจากการเคลื่อนที่ของมวลติดสปริง

- 2.6 แขนงสปริงพร้อมที่แขวนมวลเข้ากับสปริง แล้วใส่มวลขนาด 100 กรัม ในที่แขวนมวล จับเวลาที่สปริงสั่นขึ้น - ลง ด้วยแอมพลิจูดน้อยๆ จำนวน 20 รอบ แล้วคำนวณหาคาบของการสั่น
- 2.7 ทำการทดลองหาคาบการสั่นในข้อ 2.6 ซ้ำอีก 2 ครั้ง แล้วหาคาบการสั่นเฉลี่ย
- 2.8 ทำการทดลองเหมือนข้อ 2.6-2.7 โดยเพิ่มมวลครั้งละ 50 กรัม อีก 5 ครั้ง
- 2.9 เขียนกราฟระหว่าง T^2 กับมวลที่แขวน (มวลที่เพิ่ม + มวลของที่แขวนมวล) โดยให้ T^2 เป็นแกนตั้ง และให้มวลที่แขวนเป็นแกนนอน คำนวณค่านิจสปริงจากความชันของกราฟ
- 2.10 เปรียบเทียบค่านิจสปริงที่ได้กับการทดลอง ในข้อ 2.1-2.5



รายงานผลการทดลองที่ 5
เรื่อง การเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย

รายวิชา กลศาสตร์ สาขาวิชาฟิสิกส์ โรงเรียนมหิดลวิทยานุสรณ์
ชื่อผู้ทำการทดลอง 1. ชั้น เลขที่.....
2. ชั้น เลขที่.....
3. ชั้น เลขที่.....
วันที่ เดือน พ.ศ.

คะแนนที่ได้

ผลการทดลอง

ตอนที่ 1 การเคลื่อนที่ของลูกตุ้มนาฬิกาอย่างง่าย

ตารางบันทึกผลการทดลอง

ระยะ l (เมตร)	เวลาเคลื่อนที่ครบ 20 รอบ (วินาที)			เวลาเคลื่อนที่ครบ 1 รอบ (วินาที)			เวลาเคลื่อนที่ครบ 1 รอบเฉลี่ย (วินาที)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	



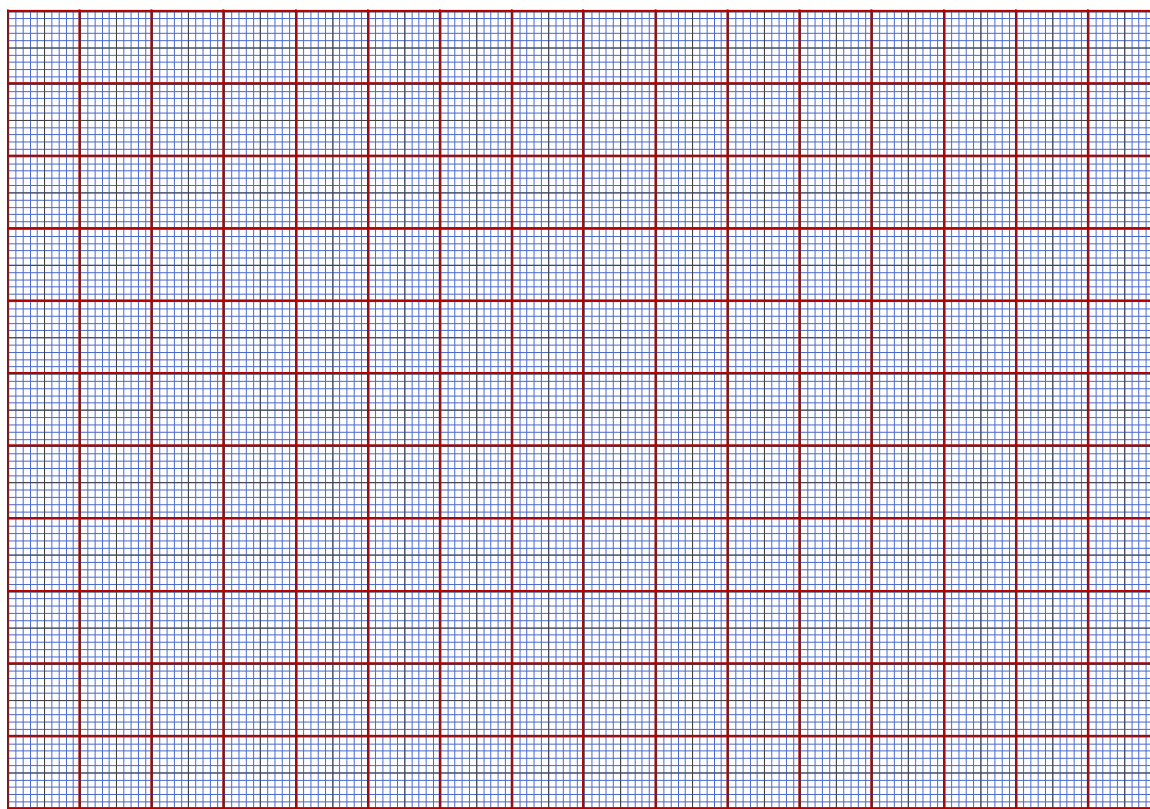
ตอนที่ 2 การเคลื่อนที่ของมวลติดสปริง

2.1 หาค่านิจสปริงจากกฎของฮุก

ตารางบันทึกผลการทดลอง

มวลของที่แขวนมวลพร้อมลูกตุ้ม (กิโลกรัม)	น้ำหนักของที่แขวนมวลพร้อมลูกตุ้ม (นิวตัน)	ระยะที่สปริงยืดออกจาก (เมตร)

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง.....



.....

ค่า นิจสปริง เท่ากับ..... ± นิวตันต่อเมตร

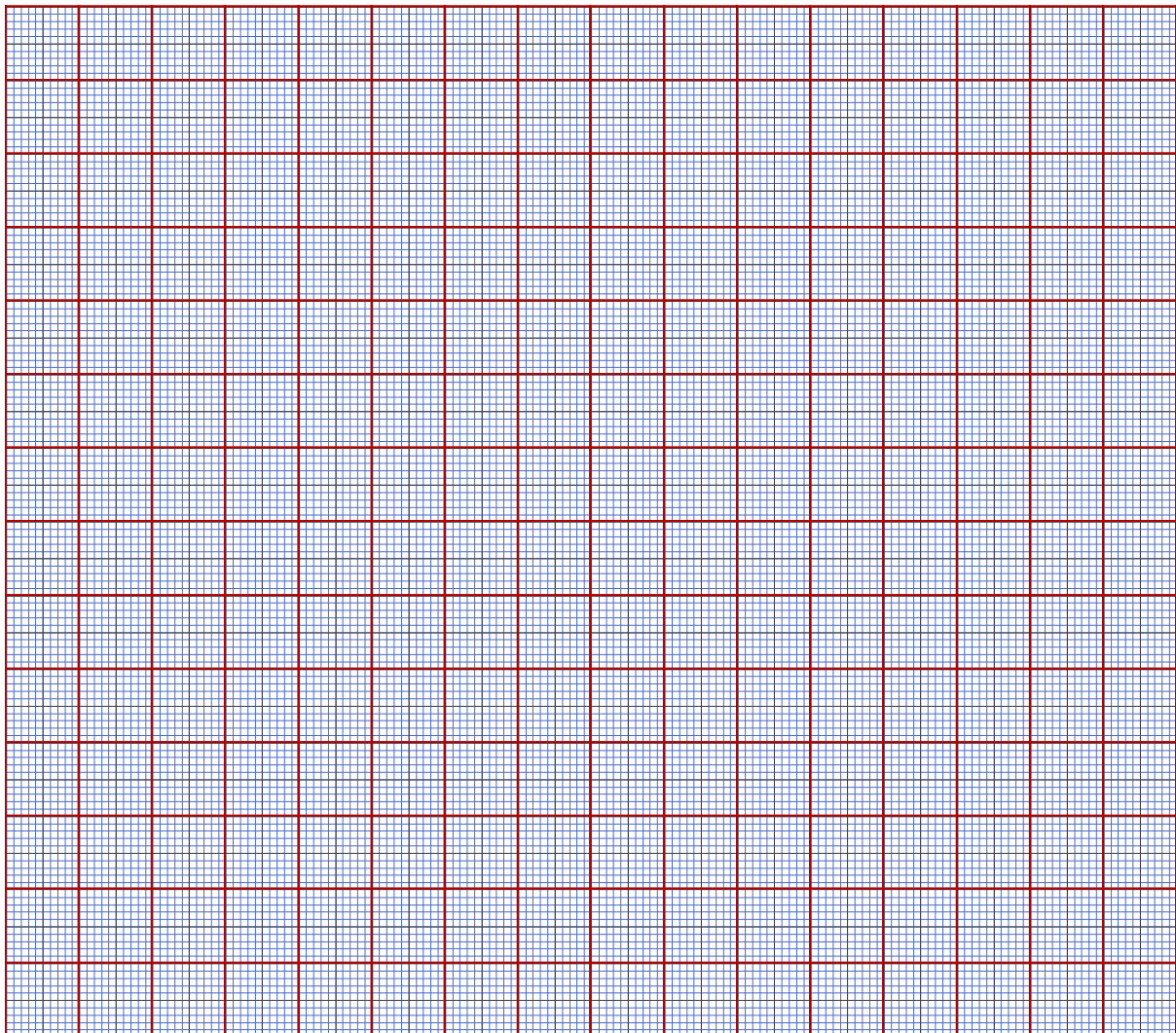


2.2 หาค่านิจสปริงจากการเคลื่อนที่ของมวลติดสปริง

ตารางบันทึกผลการทดลอง

มวล (กิโลกรัม)	เวลาเคลื่อนที่ครบ 20 รอบ (วินาที)			เวลาเคลื่อนที่ครบ 1 รอบ (วินาที)			เวลาเคลื่อนที่ครบ 1 รอบเฉลี่ย (วินาที)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง.....





คำถามท้ายการทดลอง

1. จากการทดลองการเคลื่อนที่ของลูกตุ้มนาฬิกา แอมพลิจูดของการแกว่งมีผลต่อการทดลองหรือไม่ อย่างไร

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

2. จากการทดลองการเคลื่อนที่ของมวลติดสปริง มวลที่ผูกติดกับสปริงมีผลต่อการสั่นและผลการทดลองหรือไม่ อย่างไร

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....



การทดลองที่ 6

เรื่อง การกลิ้งบนพื้นเอียง (Rolling on inclined plane)

รายวิชา กลศาสตร์

สาขาวิชาฟิสิกส์

โรงเรียนมหิดลวิทยานุสรณ์

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการกลิ้งของทรงกระบอกกลิ้งตามแนวพื้นเอียง
2. เพื่อหาความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

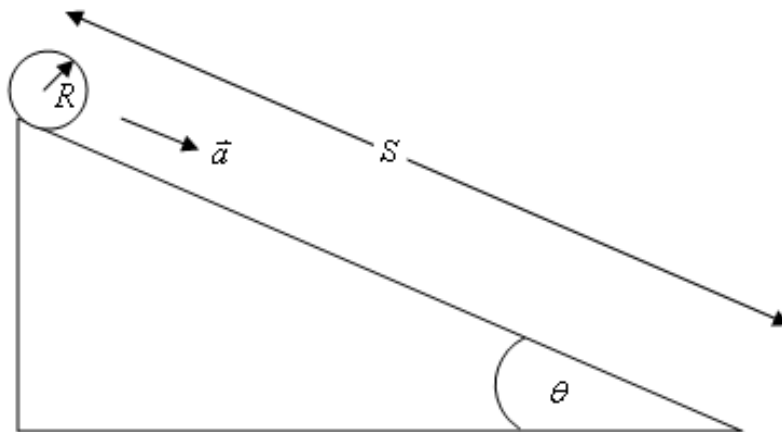
อุปกรณ์

- | | |
|--|---------|
| 1. พื้นเอียงที่ปรับมุมเอียง (θ) ได้ | 1 ชุด |
| 2. ทรงกระบอกตันขนาดใหญ่ | 1 อัน |
| 3. ทรงกระบอกตันขนาดเล็ก | 1 อัน |
| 4. ทรงกระบอกกลิ้งขนาดใหญ่ | 1 อัน |
| 5. ทรงกระบอกกลิ้งขนาดเล็ก | 1 อัน |
| 6. นาฬิกาจับเวลา | 1 เรือน |
| 7. เวอร์เนียคาลิปเปอร์ | 1 อัน |
| 8. ไม้เมตร | 1 อัน |

ทฤษฎี

ถ้าปล่อยให้วัตถุแข็งเกร็ง (rigid body) เช่น ทรงกระบอกกลิ้งลงตามแนวพื้นเอียงโดยไม่มีการลื่นไถล การเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นมีสองลักษณะ คือ การเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่ (translation motion) ของจุดศูนย์กลางมวล และการหมุน (rotation motion) ของทรงกระบอกรอบแกนที่ผ่านจุดศูนย์กลางมวล

พิจารณาวัตถุทรงกระบอก ซึ่งมีมวล M รัศมี R และโมเมนต์ความเฉื่อย I ที่กำลังเคลื่อนที่ลงตามแนวพื้นเอียงที่ทำมุม θ กับแนวระดับ ดังรูป



สมการการเคลื่อนที่ของวัตถุทรงกระบอก เขียนได้เป็น

$$Ma = Mg \sin \theta - f \quad (6.1)$$

และ

$$\tau = I\alpha = fR \quad (6.2)$$



- เมื่อ a คือ ขนาดของความเร่งของจุดศูนย์กลางมวล
 f คือ ขนาดของแรงเสียดทานระหว่างทรงกระบอกกับพื้นเอียง
 และ α คือ ขนาดของความเร่งเชิงมุมของทรงกระบอก

กรณีการลื่นลงตามแนวพื้นเอียงไม่มีการลื่นไถล จะได้ $\alpha = \frac{a}{R}$

จากสมการ (6.1) และ (6.2) จะได้

$$a = \frac{Mg}{\left(M + \frac{I}{R^2}\right)} \sin \theta \quad (6.3)$$

โมเมนต์ความเฉื่อย (I) เป็นค่าคงที่ ขึ้นอยู่กับรูปร่าง ขนาดของวัตถุ และแกนหมุน ในกรณีที่แกนหมุน คือ แกนของทรงกระบอก จะได้ว่า

$$\text{สำหรับทรงกระบอกตัน : } I = \frac{1}{2}MR^2$$

$$\text{สำหรับทรงกระบอกกลวง : } I = \frac{1}{2}M(R^2 + r^2); r \text{ คือ รัศมีภายใน}$$

ขนาดของความเร่ง (a) หาได้จากการทดลอง โดยให้ทรงกระบอกกลิ้งจากหยุดนิ่ง แล้วจับเวลาการเคลื่อนที่ (t) ลงตามแนวพื้นเอียงเป็นระยะทาง S จะได้

$$a = \frac{2S}{t^2} \quad (6.4)$$

การทดลอง

1. วัดรัศมีของทรงกระบอกตันขนาดใหญ่ และระยะทาง S บนพื้นเอียง บันทึกผล
2. ปรับพื้นเอียงให้มีความชันน้อยที่สุด วัดระยะทางบนพื้นเอียงและความสูงของพื้นเอียง แล้วคำนวณหาค่า $\sin \theta$
3. ปล่อยทรงกระบอกให้กลิ้งลงตามแนวพื้นเอียง จับเวลา 5 ครั้ง หาค่าเฉลี่ยของ t แล้วหาค่า a จากสมการ (4.4)
4. เปลี่ยนมุม θ ของพื้นเอียงอีก 4 ค่า แล้วทดลองซ้ำข้อ 3
5. เขียนกราฟระหว่าง a บนแกน y และ $\sin \theta$ บนแกน x
6. วิเคราะห์หาความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก พร้อมทั้งระบุค่าความคลาดเคลื่อน
7. เปลี่ยนเป็นทรงกระบอกตันขนาดเล็ก ทรงกระบอกกลวงขนาดใหญ่ ทรงกระบอกกลวงขนาดเล็ก แล้วทดลองซ้ำข้อ 1-6
8. วิเคราะห์และวิจารณ์ผลการทดลอง



รายงานผลการทดลองที่ 6
เรื่อง การกลิ้งบนพื้นเอียง

รายวิชา กลศาสตร์ สาขาวิชาฟิสิกส์ โรงเรียนมหิดลวิทยานุสรณ์
ชื่อผู้ทำการทดลอง ชั้น เลขที่.....
ชื่อผู้ร่วมทำการทดลอง 1. ชั้น เลขที่.....
2. ชั้น เลขที่.....
วันที่ เดือน พ.ศ.

คะแนนที่ได้

ผลการทดลอง

รูปร่างของมวลเป็นทรง.....
มวลมีขนาด..... กรัม
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง..... เซนติเมตร
โมเมนต์ความเฉื่อย..... กิโลกรัม เมตร²

ความสูงพื้นเอียง (h) (เมตร)	ความยาวพื้นเอียง (S) (เมตร)	sinθ	เวลา (t) (วินาที)					t _{avg} (วินาที)	a (เมตรต่อวินาที ²)
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5		

รูปร่างของมวลเป็นทรง.....
มวลมีขนาด..... กรัม
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง..... เซนติเมตร
โมเมนต์ความเฉื่อย..... กิโลกรัม เมตร²

ความสูงพื้นเอียง (h) (เมตร)	ความยาวพื้นเอียง (S) (เมตร)	sinθ	เวลา (t) (วินาที)					t _{avg} (วินาที)	a (เมตรต่อวินาที ²)
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5		



รูปร่างของมวลเป็นทรง.....
 มวลมีขนาด..... กรัม
 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง..... เซนติเมตร
 โมเมนต์ความเฉื่อย..... กิโลกรัม เมตร²

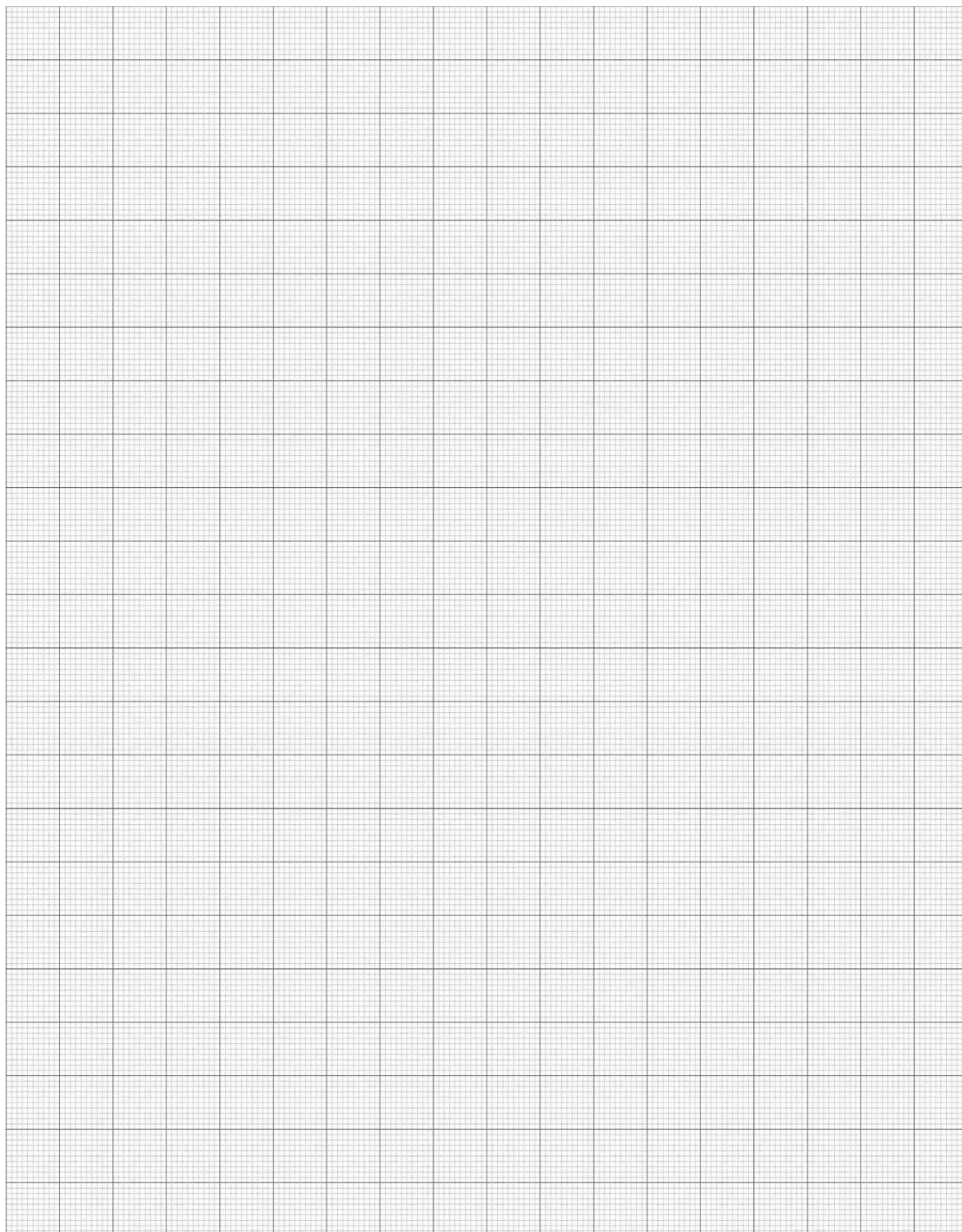
ความสูงพื้น เอียง (h) (เมตร)	ความยาวพื้นเอียง (S) (เมตร)	sin θ	เวลา (t) (วินาที)					t _{avg} (วินาที)	a (เมตรต่อวินาที ²)
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5		

รูปร่างของมวลเป็นทรง.....
 มวลมีขนาด..... กรัม
 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง..... เซนติเมตร
 โมเมนต์ความเฉื่อย..... กิโลกรัม เมตร²

ความสูงพื้น เอียง (h) (เมตร)	ความยาวพื้นเอียง (S) (เมตร)	sin θ	เวลา (t) (วินาที)					t _{avg} (วินาที)	a (เมตรต่อวินาที ²)
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5		



กราฟแสดงผลการทดลอง





วิเคราะห์ผลการทดลอง

1. จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง a กับ $\sin\theta$ ค่าความชันของกราฟคือปริมาณใด และมีค่าเท่าใด

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

2. ค่า g ที่ได้จากกราฟมีค่าเท่าใด

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

3. ค่า g ที่ได้มีความคลาดเคลื่อนคิดเป็นกี่เปอร์เซ็นต์

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....



ข้อเสนอแนะ

1. การฝึกทักษะในการวัดและการคำนวณ ควรแนะนำให้นักเรียนเข้าใจและรู้จักการใช้เครื่องมือในการวัดให้เหมาะสมกับสิ่งที่วัดและข้อควรระวังในระหว่างการทดลองซึ่งจะมีผลต่อผู้ทดลองและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง
2. ต้องระวัง เน้นเรื่อง การแสดงผลตัวเลขอย่างมีนัยสำคัญที่ถูกต้องให้ศึกษาเรื่อง การแสดงผลสุดท้ายของปริมาณที่เกิดจากการคำนวณที่มีการคูณ ทหาร บวก ลบ ว่าต้องแสดงผลอย่างมีนัยสำคัญอย่างไร
3. ต้องระวัง เน้นเรื่อง การใช้หน่วย และฝึกให้แสดงหน่วยของปริมาณต่างๆ ที่แทนค่าในสูตรระหว่างการคำนวณด้วย ไม่ใช่แทนหน่วยในคำตอบสุดท้ายสุด
4. ต้องระวัง เน้นเรื่อง ความแตกต่างของความแม่นยำ ความเที่ยงตรง และความแตกต่างของการหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) และการหาค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานซึ่งเป็นค่าความคลาดเคลื่อนน่าจะเป็นของการวัดเปรียบเทียบกับค่าความคลาดเคลื่อนของการทดลองที่เทียบกับค่ามาตรฐานที่ทราบค่า
5. การหาค่าความชัน (Δ ความชัน) ในกรณีนี้ จะใช้เมื่อไม่ได้มีการลากเส้นกราฟแบบใช้การ fit curve แต่ต้องการแสดงค่าความคลาดเคลื่อนของความชันที่ได้จากการลากเส้นกราฟ ซึ่งนับว่าเป็นค่าความคลาดเคลื่อนหนึ่งจากการทดลอง
6. พิจารณาเกณฑ์การให้คะแนนและสามารถศึกษาสาระสำคัญจากเฉลยแนวคำตอบ
7. ในการปฏิบัติการทดลองที่ดี เมื่อมีการทดลองซ้ำของปริมาณใดๆ ต้องทำการทดลองซ้ำ อย่างน้อย 5 ค่า แต่สำหรับการอบรมครั้งนี้ ที่มีเวลาค่อนข้างจำกัด จึงทำการทดลองซ้ำเพียง 3 ค่าเท่านั้น



เอกสารอ้างอิง

- [1] Loyd, D.H., PHYSICS LABORATORY MANUAL, 3rd edition, Angelo State University, Thomson Brooks/Cole, USA, 2008.
- [2] Serway, R.A. and Jewett, J.W., Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics. 6th ed. USA: Thomson Learning, 2004.
- [3] Wilson, J. D. and Hernandez-Hall, C. A., PHYSICS LABORATORY EXPERIMENTS, 7th edition, Brooks/Cole, Cengage Learning, USA, 2010.
- [4] ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล. คู่มือปฏิบัติการฟิสิกส์ทั่วไป
- [5] ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่. คู่มือปฏิบัติการฟิสิกส์พื้นฐาน 1 สำหรับนักศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ และคณะอุตสาหกรรมเกษตร.
- [6] ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร คู่มือปฏิบัติการฟิสิกส์ทั่วไป 1