

การศึกษาการแกว่งกวัดแบบหน่วงต่ำของเพนดูลัมทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ปริญญานิพนธ์
ของ
สิงหา ประสิทธิ์พงศ์

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

2547

สิงหา ประสิทธิ์พงศ์. (2547). การศึกษาการแกว่งกวัดแบบหน่วงต่ำของเพนดูลัมทรงสี่เหลี่ยม ผืนผ้า.ปริญญาโท กศ.ม. (ฟิสิกส์). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ . คณะกรรมการควบคุม : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นิรมล ปิตะนิตะผลิน, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ปรีดา เพชรมีศรี.

จากการศึกษาการแกว่งกวัดแบบหน่วงต่ำของฟิสิกัลเพนดูลัมรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า เมื่อพิจารณาแรงต้านการเคลื่อนที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วและความเร็วของการแกว่งกวัดของฟิสิกัลเพนดูลัมมีค่าไม่สูงมาก พบว่าค่าตัวประกอบการหน่วงแปรผกผันกับความหนาแน่นและความหนาของฟิสิกัลเพนดูลัม แต่ไม่แปรตามความกว้างและความยาวของฟิสิกัลเพนดูลัม เมื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่การหน่วงกับความหนาแน่น ความหนา ความกว้าง และความยาวของฟิสิกัลเพนดูลัม ได้ว่า ค่าคงที่การหน่วงมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนตามความหนาแน่นและความหนาของ ฟิสิกัลเพนดูลัม แต่มีแนวโน้มเปลี่ยนตามความกว้าง และความยาวของฟิสิกัลเพนดูลัม

Singha Prasitpong. (2004) *Study of the Underdamped Harmonic Oscillation of Rectangular Pendulum* . Master thesis , M.Ed. (Physics). Bangkok : Graduate School , Srinakharinwirot University. Advisor Committee : Assist. Prof. Niramol Pitanilaphalin , Assist. Prof. Prida Pecharamisri .

The research was aimed to study the damping oscillation of a rectangular pendulum. We focus on small oscillation where resistance is considered as a linear function of velocity. It is found that the damping factor is inversely proportional to the density and thickness but not the width and length of the physical pendulum. Considering the relationship between the damping constant and the density, thickness, width and length of the physical pendulum indicated that damping constant should not depend on the density and thickness but might depend on the width and length of the physical pendulum.

ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณา ช่วยเหลือ และด้วยความอนุเคราะห์อย่างดีจากคณาจารย์หลายท่าน ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ นิรมล ปิตะนีละผลิน ประธานควบคุมปริญญานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ปรีดา เพชรมีศรี กรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ตลอดระยะเวลาในการทำวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์บัญชา ศิลปสกุลสุข และอาจารย์สมศักดิ์ มณีรัตน์กุล ในการเป็นกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์ ตลอดจนให้คำแนะนำและแก้ไขปริญญานิพนธ์ ทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร. สุทัศน์ ยกส้าน ที่อนุเคราะห์คำปรึกษาแก้ไขบทคัดย่อ ทำให้งานวิจัยเล่มนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ตลอดระยะเวลาการศึกษา จนผู้วิจัยสามารถนำความรู้มาใช้ในการดำเนินการทำปริญญานิพนธ์จนสำเร็จ

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ นิสิตปริญญโท วิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒทุกท่านที่คอยให้ทั้งกำลังใจและกำลังใจที่ดีเยี่ยมตลอดระยะเวลาที่ศึกษาและทำงานวิจัย

สุดท้ายนี้ ขอโน้มรำลึกถึงพระคุณของบิดา มารดา และทุกๆ คนในครอบครัว ที่ให้กำลังใจและสนับสนุนในการศึกษาแก่ข้าพเจ้า จนสามารถทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี

สิงหา ประสิทธิ์พงศ์

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ภูมิหลัง.....	1
จุดมุ่งหมายของการวิจัย.....	2
ขอบเขตของการวิจัย.....	2
ความสำคัญของงานวิจัย.....	2
2 ทฤษฎีเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
การแกว่งกวัด.....	3
เพนดูลัมอย่างง่าย.....	3
ฟิสิกส์เพนดูลัม.....	7
การแกว่งกวัดแบบหน่วง.....	9
โมเมนต์ความเฉื่อย.....	12
อุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนที่.....	17
ชุดอุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนที่.....	17
การใช้คอมพิวเตอร์เก็บและวิเคราะห์ข้อมูล.....	21
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	26
การออกแบบชุดทดลองการแกว่งกวัดของเพนดูลัมทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	26
การสร้างชุดทดลองฟิสิกส์เพนดูลัม.....	27
ขั้นตอนการทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูล.....	31
การติดตั้งชุดอุปกรณ์เครื่องตรวจวัดการเคลื่อนที่.....	31
จัดอุปกรณ์การทดลอง.....	31
วิธีการทดลอง.....	33
ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูล.....	34
4 ผลการวิจัย.....	35
การทดลองหาความสัมพันธ์ของตัวประกอบการหน่วงของวัตถุแข็งเกร็ง	
รูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่มีขนาด ความกว้างความยาว ความหนาเท่ากัน	
แต่เป็นวัสดุชนิดเดียวกัน.....	36

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
4(ต่อ)	
การทดลองหาความสัมพันธ์ของตัวประกอบการหน่วงของวัตถุแข็งเกร็ง รูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่มีขนาด ความกว้าง ความยาวเท่ากัน ความหนา ไม่เท่ากันเป็นวัสดุชนิดเดียวกัน.....	39
การทดลองหาความสัมพันธ์ของตัวประกอบการหน่วงของวัตถุแข็งเกร็ง รูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่มีขนาด ความหนาความยาวเท่ากัน ความกว้าง ไม่เท่ากันเป็นวัสดุชนิดเดียวกัน.....	42
การทดลองหาความสัมพันธ์ของตัวประกอบการหน่วงของวัตถุแข็งเกร็ง รูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่มีขนาด ความกว้างความหนาเท่ากัน ความยาว ไม่เท่ากันเป็นวัสดุชนิดเดียวกัน.....	45
5 สรุปผล อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ.....	47
สรุปผลการวิจัย.....	47
อภิปรายผลการวิจัย.....	48
ข้อเสนอแนะ.....	49
บรรณานุกรม.....	50
ภาคผนวก.....	52
ประวัติผู้วิจัย.....	69

บัญชีตาราง

ตาราง		หน้า
1	แสดงค่าตัวประกอบการหน่วง ของการแกว่งกวัดของวัตถุแข็งเกร็งรูปทรง- สี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่มีขนาด ความกว้าง ความยาว และความหนาเท่ากัน แต่ วัสดุต่างชนิดกัน.....	36
2	แสดงค่าตัวประกอบการหน่วงเฉลี่ย ที่แอมพลิจูดเริ่มต้น 2,4,6,8 และ 10 องศา ของการแกว่งกวัดของวัตถุแข็งเกร็งรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่มีขนาด ความกว้าง ความยาว และความหนาเท่ากัน แต่วัสดุต่างชนิดกัน.....	37
3	แสดงค่าความหนาแน่น ความหนาแน่นสัมพัทธ์ และตัวประกอบการหน่วงของวัตถุ แข็งเกร็งรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	37
4	แสดงค่าตัวประกอบการหน่วง ของการแกว่งกวัดของวัตถุแข็งเกร็งรูปทรง- สี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่มีขนาด ความกว้าง ความยาวเท่ากัน แต่ความหนาไม่เท่ากัน และเป็นวัสดุชนิดเดียวกัน.....	39
5	แสดงค่าตัวประกอบการหน่วงเฉลี่ย ที่แอมพลิจูดเริ่มต้น 2,4,6,8 และ 10 องศา ของการแกว่งกวัดของวัตถุแข็งเกร็งรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่มีขนาด ความกว้าง ความยาวเท่ากัน แต่ความหนาไม่เท่ากัน เป็นวัสดุชนิดเดียวกัน.....	40
6	แสดงค่าความหนา ความหนาสัมพัทธ์ และตัวประกอบการหน่วงของวัตถุแข็งเกร็ง รูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	40
7	แสดงค่าตัวประกอบการหน่วง ของการแกว่งกวัดของวัตถุแข็งเกร็งรูปทรง- สี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่มีขนาด ความหนา ความยาวเท่ากัน แต่ความกว้างไม่เท่ากัน และเป็นวัสดุชนิดเดียวกัน.....	42
8	แสดงค่าตัวประกอบการหน่วงเฉลี่ย ที่แอมพลิจูดเริ่มต้น 2,4,6,8 และ 10 องศา ของการแกว่งกวัดของวัตถุแข็งเกร็งรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่มีขนาด ความหนา ความยาวเท่ากัน แต่ความกว้างไม่เท่ากัน เป็นวัสดุชนิดเดียวกัน.....	43
9	แสดงค่าความกว้าง อัตราส่วนของความกว้างแต่ละอันต่อความกว้างน้อยที่สุด และตัวประกอบการหน่วงของวัตถุแข็งเกร็งรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	43
10	แสดงค่าความยาว ความยาวสัมพัทธ์ และตัวประกอบการหน่วงของวัตถุแข็งเกร็ง รูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	45
11	แสดงตำแหน่งระหว่างเครื่องตรวจวัดการเคลื่อนที่กับวัตถุแข็งเกร็ง ณ ตำแหน่ง 0,2,4,6 และ 10 องศา.....	54

บัญชีตาราง(ต่อ)

ตาราง

หน้า

12	แสดงคู่อันความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับค่าเฉลี่ยของการวัดระยะทางเชิงเส้นจาก เครื่องตรวจวัดการเคลื่อนที่ ณ ตำแหน่ง 0,2,4,6 และ 10 องศา.....	54
13	แสดงค่าแอมพลิจูดที่ลดลง ในกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระตุ้น- เชิงมุมกับเวลา.....	58
14	แสดงค่าตัวประกอบการหน่วง และความหนาแน่นของฟิลิ์กัลเพนดูลัม.....	61
15	แสดงค่าตัวประกอบการหน่วง และความหนาของฟิลิ์กัลเพนดูลัม.....	63
16	แสดงค่าตัวประกอบการหน่วง และความกว้างของฟิลิ์กัลเพนดูลัม.....	65
17	แสดงค่าตัวประกอบการหน่วง และความยาวของฟิลิ์กัลเพนดูลัม.....	67

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 แสดงการแกว่งกวัดของเพนดูลัมอย่างง่าย.....	4
2 แสดงระบบของฟิสิกัลเพนดูลัมทั่วไป.....	7
3 แสดงการแกว่งกวัดแบบหน่วง.....	11
4 แสดงอนุภาคและระบบอนุภาคที่มีการเคลื่อนที่แบบหมุนรอบแกน.....	12
5 แสดงการหมุนรอบแกนของวัตถุแข็งเกร็ง.....	13
6 แสดงลักษณะแกนอ้างอิงเทียบกับรูปร่างของวัตถุแข็งเกร็งรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า กว้าง a ยาว b หนา c	14
7 แสดงชุดอุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่.....	17
8 แสดงเครื่องตรวจวัดการเคลื่อนที่.....	18
9 แสดงการส่งสัญญาณอัลตราโซนิกของเครื่องตรวจวัดการเคลื่อนที่.....	18
10 แสดงอุปกรณ์ต่อเชื่อม.....	19
11 แสดงรายละเอียดอุปกรณ์ต่อเชื่อม.....	19
12 แสดงหน้าต่างการทดลองของโปรแกรมไซน์เวิร์คชอป.....	21
13 แสดงหน้าต่างการตั้งค่าของเครื่องตรวจวัดการเคลื่อนที่.....	22
14 แสดงการเลือกค่าความถี่ของอัตราการปล่อยสัญญาณคลื่น.....	22
15 แสดงตารางบันทึกผลการทดลอง.....	23
16 แสดงกราฟบันทึกผลการทดลอง.....	23
17 แสดงตัวอย่างการบันทึกผลการทดลองด้วยตารางและกราฟ.....	24
18 แสดงแผนภาพตัวประกอบต่างๆ ของระบบฟิสิกัลเพนดูลัม.....	26
19 แสดงลักษณะวัตถุแข็งเกร็งรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	27
20 แสดงส่วนประกอบของแกนหมุน.....	28
21 แสดงลักษณะแกนหมุนของระบบ.....	28
22 แสดงแกนหมุนที่ยึดติดกับสเกลวัดมุม.....	29
23 แสดงลักษณะแกนหมุนที่ยึดติดกับฐาน.....	29
24 แสดงลักษณะของตัวแขวนฟิสิกัลเพนดูลัม.....	30
25 แสดงการเชื่อมตัวแขวนติดกับวัตถุแข็งเกร็ง.....	30
26 แสดงการจัดอุปกรณ์การทดลองการแกว่งกวัดของฟิสิกัลเพนดูลัมโดยใช้ เครื่องตรวจวัดการเคลื่อนที่.....	31
27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าตัวประกอบการหน่วงกับความหนา แน่นสัมพัทธ์.....	38

บัญชีภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าตัวประกอบการหน่วงกับ ความหนาสัมพัทธ์.....	41
29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าตัวประกอบการหน่วงกับ ความกว้างสัมพัทธ์	44
30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบการหน่วงกับ ความยาวสัมพัทธ์.....	46
31 แสดงความสัมพันธ์ค่าเฉลี่ยการกระจัดเชิงเส้นกับมุม.....	55
32 แสดงลักษณะการแกว่งกวัดของวัตถุแข็งเกร็งมีการแกว่งกวัดแบบฮาร์มอนิก ที่แอมพลิจูดค่อย ๆ ลดลงตามเวลา.....	57
33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดกับเวลา.....	59
34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบการหน่วงกับหนึ่งต่อ ความหนาแน่นของฟิสิกัลเพนดูลัม.....	61
35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบการหน่วงกับหนึ่งต่อ ความหนาของฟิสิกัลเพนดูลัม.....	63
36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบการหน่วงกับหนึ่งต่อ ความกว้างของฟิสิกัลเพนดูลัม.....	65
37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบการหน่วงกับหนึ่งต่อ ความยาวกำลังสามของฟิสิกัลเพนดูลัม.....	67

บทที่ 1

บทนำ

ที่มาและความสำคัญ

การเคลื่อนที่ของวัตถุสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายแบบ การเคลื่อนที่แบบหนึ่งคือ การเคลื่อนที่เป็นคาบ (Periodic Motion) ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ในลักษณะซ้ำเส้นทางเดิมในช่วงเวลาหนึ่ง เราเรียกการเคลื่อนที่เป็นคาบของวัตถุที่ซ้ำเส้นทางเดิมว่า การเคลื่อนที่แบบแกว่งกวัด (Oscillation) ตัวอย่างของการเคลื่อนที่ดังกล่าวนี้ ได้แก่ การแกว่งกวัดของลูกตุ้มนาฬิกา การสั่นของมวลที่ผูกติดกับสปริง และการสั่นของอะตอมในโมเลกุล เป็นต้น

การเคลื่อนที่แบบแกว่งกวัดในรูปแบบที่ง่ายที่สุด คือการแกว่งกวัดด้วยแอมพลิจูดคงที่ตลอดเวลา เรียกการแกว่งกวัดลักษณะนี้ว่า การแกว่งกวัดแบบซิมเปิลฮาร์โมนิก (Simple Harmonic Oscillation) ตัวอย่างเช่น การแกว่งกวัดของเพนดูลัมอย่างง่าย (Simple Pendulum) การแกว่งกวัดของฟิสิกัลเพนดูลัม (Physical Pendulum) เป็นต้น แต่ในความเป็นจริงการเคลื่อนที่แบบแกว่งกวัดของวัตถุจะไม่เป็นการแกว่งกวัดแบบซิมเปิลฮาร์โมนิก เนื่องจากจะมีแรงต้านการเคลื่อนที่มากกระทำกับวัตถุทำให้แอมพลิจูดการแกว่งกวัดของวัตถุลดลงอย่างช้าๆ จนกระทั่งวัตถุหยุดนิ่งหรือวัตถุกลับสู่สภาวะสมดุลเสถียร เรียกการแกว่งกวัดที่มีแรงต้านการเคลื่อนที่มากกระทำต่อวัตถุว่า การแกว่งกวัดแบบหน่วง (Damped Oscillation)

ด้วยเหตุผลที่ว่า การเคลื่อนที่ของวัตถุจะมีแรงต้านการเคลื่อนที่มากกระทำต่อวัตถุ ผู้วิจัยเล็งเห็นความสำคัญของแรงต้านการเคลื่อนที่ ที่มีผลต่อการแกว่งกวัดของวัตถุ ดังนั้นจึงทำการออกแบบและสร้างชุดอุปกรณ์การทดลองเพื่อศึกษาเกี่ยวกับการแกว่งกวัดแบบหน่วง โดยระบบที่ผู้วิจัยเลือกนำมาเป็นกรณีศึกษา คือ ระบบฟิสิกัลเพนดูลัม ที่เป็นวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid Body) รูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ในงานวิจัยได้ทำการตรวจวัดตำแหน่งของวัตถุ โดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนที่ (Motion Sensor) ที่สามารถวัดการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของวัตถุในช่วงเวลาต่างๆ และสามารถส่งข้อมูลดังกล่าวไปประมวลผลและแสดงผลการวัดในรูปแบบของกราฟด้วยคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรมไซเนเวิร์ค-ชอว์ (Science Workshop Program)

ความมุ่งหมายของการวิจัย

เพื่อศึกษาการแกว่งกวัดแบบหน่วงของฟิสิกัลเพนดูลัมทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยใช้อุปกรณ์ทดลองที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์

ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาการแกว่งกวัดแบบหน่วงของฟิสิกัลเพนดูลัม
2. ออกแบบชุดการทดลองการแกว่งกวัดของฟิสิกัลเพนดูลัม โดยใช้เครื่องตรวจวัดการเคลื่อนที่และอุปกรณ์ต่อเชื่อมกับคอมพิวเตอร์ซึ่งสามารถบันทึกข้อมูลการเคลื่อนที่พร้อมที่จะนำมาวิเคราะห์ต่อไป
3. หาความสัมพันธ์ของค่าคงที่ความหน่วงกับ ความหนาแน่น ความกว้าง ความยาว ความหนา ของฟิสิกัลเพนดูลัม

ความสำคัญของงานวิจัย

1. ได้ชุดทดลองที่ใช้อุปกรณ์เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาการแกว่งกวัดแบบหน่วงของฟิสิกัลเพนดูลัมทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า
2. ได้แนวทางในการออกแบบและสร้างชุดทดลองสำหรับศึกษาการแกว่งกวัดของวัตถุในระบบต่าง ๆ ต่อไปในอนาคต
3. ได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่การหน่วงกับความหนาแน่น และรูปทรงของวัตถุแข็งเกร็งของฟิสิกัลเพนดูลัม

บทที่ 2

ทฤษฎีและเอกสารที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้แบ่งเป็นหัวข้อสำคัญดังนี้

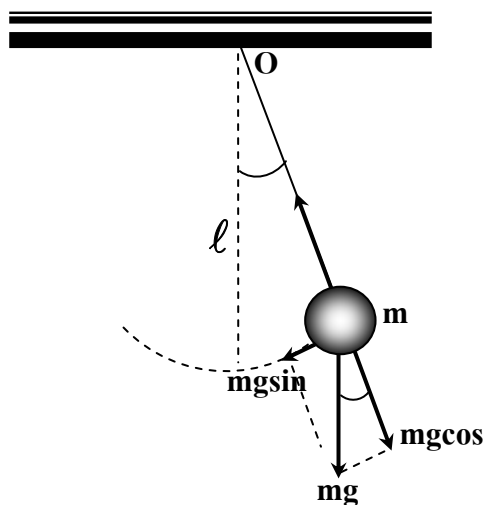
1. การเคลื่อนที่แบบแกว่งกวัด
2. โมเมนต์ความเฉื่อย
3. ชุดอุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่

1. การแกว่งกวัด (Oscillation)

การแกว่งกวัดเป็นการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของวัตถุรอบจุดสมดุล การเคลื่อนที่ของวัตถุจะมีลักษณะเป็นคาบ (Period) ตัวอย่างของการแกว่งกวัด ได้แก่ การเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย (Simple Harmonic Motion “SHM”) การแกว่งกวัดแบบหน่วง (Damped Oscillation) และการแกว่งกวัดฮาร์มอนิกขับเคลื่อน (Driven Harmonic Oscillation) เป็นต้น

1.1 เพนดูลัมอย่างง่าย (Simple Pendulum)

เพนดูลัมอย่างง่าย เป็นระบบที่ประกอบด้วยอนุภาคมวล m ห้อยแขวนด้วยเชือกเบายาว l โดยปลายเชือกด้านหนึ่งตรึงที่จุด O ในสภาวะสมดุลเสถียรของอนุภาคมวล m เส้นเชือกจะวางตัวในแนวตั้ง โดยมีแรงโน้มถ่วง (mg) และแรงตึงเชือก (T) กระทำต่ออนุภาคมวล m ด้วยขนาดเท่ากันแต่ทิศทางตรงข้ามกันทำให้แรงลัพธ์เป็นศูนย์ ถ้าดึงอนุภาคมวล m ออกจากตำแหน่งสมดุลเสถียรจากนั้นปล่อยให้อนุภาคมวล m เคลื่อนที่อย่างอิสระอนุภาคมวล m จะแกว่งกลับไปกลับมารอบจุดสมดุลเสถียร ดังภาพประกอบ 1



ภาพประกอบ 1 แสดงการแกว่งกวัดของเพนดูลัมอย่างง่าย

จากภาพประกอบ 1 แสดงให้เห็นว่า ณ เวลาหนึ่ง ขณะที่อนุภาคมวล m แกว่งออกจากตำแหน่งสมดุล โดยแนวเส้นเชือกเบนจากแนวตั้งเป็นมุม จะมีแรงลัพธ์กระทำต่ออนุภาคมวล m ซึ่งมีค่าคือ

$$\vec{F} = mg \sin \theta \hat{u}_\theta \dots\dots\dots(1)$$

- เมื่อ $\vec{F}$ คือ แรงลัพธ์ที่กระทำต่ออนุภาคมวล m
 คือ การกระจัดเชิงมุมขณะใดๆของอนุภาคมวล m
 g คือ ความโน้มถ่วงที่ผิวโลก
 m คือ มวลของอนุภาค
 u คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยตามทิศการเพิ่มขึ้นของการกระจัดเชิงมุม

จากสมการ (1) เครื่องหมายลบแสดงทิศของแรงลัพธ์ซึ่งตรงข้ามกับทิศของการกระจัดเชิงมุมของอนุภาคมวล m หากพิจารณาทอร์กรอบแกนหมุนที่ผ่านจุด O และตั้งฉากกับระนาบของการแกว่ง จะเขียนได้เป็น

$$\vec{\tau} = \vec{\ell} \times \vec{F} \dots\dots\dots(2)$$

- เมื่อ $\vec{\tau}$ คือ ทอร์กรอบแกนหมุน
 $\vec{\ell}$ คือ เวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาคมวล m เมื่อเทียบกับจุด O
 $\vec{F}$ คือ แรงดึงกลับสู่ตำแหน่งสมดุล

จากนิยามของทอร์กสมการที่ (2) เขียนใหม่ในรูปสเกลาร์ได้ดังนี้

$$\tau = mg\ell \sin \theta \dots\dots\dots(3)$$

ผลจากทอร์ก () ที่กระทำต่ออนุภาคมวล m ทำให้อนุภาคมวล m มีลักษณะการเคลื่อนที่แบบหมุนรอบแกนตั้งที่ผ่านจุด O ด้วยความเร่งเชิงมุม $\ddot{\theta}$ ที่หาได้จากสมการ

$$\tau = I\ddot{\theta} \quad \dots\dots\dots(4)$$

เมื่อ I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของอนุภาคมวล m รอบแกนหมุน มีค่าเท่ากับ ml^2
 $\ddot{\theta}$ คือ ความเร่งเชิงมุม

แทนค่าทอร์กจากสมการ (3) ลงในสมการ (4) สามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ของอนุภาคมวล m ได้ดังนี้

$$\ddot{\theta} + \frac{g}{\ell} \sin \theta = 0 \quad \dots\dots\dots(5)$$

จากสมการ (5) พิจารณาได้ 2 กรณี คือ

กรณี 1 ถ้าการกระจัดเชิงมุมของอนุภาคมวล m มีค่าน้อย ๆ สามารถประมาณค่า $\sin \theta \approx \theta$ ซึ่งสามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ได้ใหม่คือ

$$\ddot{\theta} + \frac{g}{\ell} \theta = 0 \quad \dots\dots\dots(6)$$

ซึ่งเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ของการเคลื่อนที่แบบซิมเปิลฮาร์โมนิก

การหาผลเฉลยของสมการ (6) สามารถหาโดยวิธีการแก้สมการเชิงอนุพันธ์มีค่าดังสมการ (7)

$$\theta(t) = A \cos \omega t + \varphi \quad \dots\dots\dots(7)$$

เมื่อ A คือ แอมพลิจูดของการแกว่งกวัด

ω คือ ความถี่เชิงมุม (Angular Frequency) ของการแกว่งกวัด มีค่าเท่ากับ $\sqrt{\frac{g}{\ell}}$

φ คือ มุมเฟสเริ่มต้น (Phase Constant) ของการแกว่งกวัด

และคาบการแกว่งกวัดจะได้ดังสมการ (8)

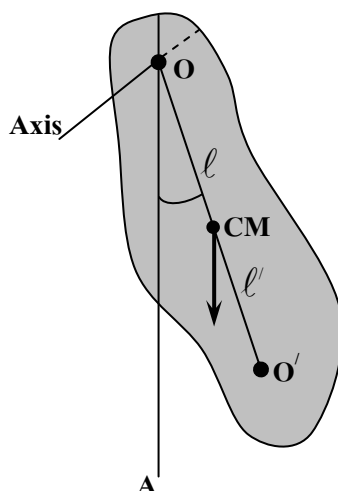
$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}} \quad \dots\dots\dots(8)$$

กรณี 2 ถ้ามุมการแกว่งกวัดของอนุภาคมวล m มีค่ามาก ๆ คาบการแกว่งกวัดสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}} \left(1 + \frac{1}{4}\sin^2 \frac{\theta_0}{2} + \dots\right) \quad \dots\dots\dots(9)$$

1.2 ฟิสิกัลเพนดูลัม (Physical Pendulum)

ฟิสิกัลเพนดูลัม หมายถึงวัตถุแข็งเกร็งที่นำมาแขวนให้มีอิสระที่จะแกว่งได้รอบแกนตรึงซึ่งไม่ผ่านตำแหน่งศูนย์กลางมวลของวัตถุ พิจารณาระบบของฟิสิกัลเพนดูลัมทั่วไป ที่มีวัตถุแข็งเกร็งมวล m ถูกตรึงที่จุด O และระบุตำแหน่งของวัตถุแข็งเกร็งด้วยมุม ที่อยู่ระหว่างเส้นแนวตั้ง OA กับเส้นที่ลากจากจุด O ตั้งฉากกับแกนหมุนผ่านศูนย์กลางมวล (CM) ดังภาพประกอบ 2



ภาพประกอบ 2 แสดงระบบของฟิสิกัลเพนดูลัมทั่วไป

พิจารณาแรงภายนอกที่กระทำต่อวัตถุ คือแรงโน้มถ่วงของโลกกระทำต่อวัตถุผ่านศูนย์กลางมวลของวัตถุขณะที่วัตถุแข็งเกร็งเบนจากแนวตั้ง OA เป็นมุม สามารถหาทอร์กรอบแกนหมุนตั้งสมการ (10)

$$\tau = mgl \sin \theta \quad \dots\dots\dots(10)$$

เมื่อ $\square\square$ คือ ระยะทางจากแกนหมุน ถึง ตำแหน่งศูนย์กลางมวล (CM)
คือ มุมที่วัตถุแข็งเกร็งเบนออกจากตำแหน่งสมดุล

ผลของทอร์กทำให้วัตถุแข็งเกร็งมีการเคลื่อนที่แบบหมุนรอบแกนด้วยความเร่งเชิงมุม $\ddot{\theta}$ ตามสมการ

$$\tau = I\ddot{\theta} \quad \dots\dots\dots(11)$$

เมื่อ $\ddot{\theta}$ คือ โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกนหมุนที่ผ่านจุด O ของวัตถุ
 $\ddot{\theta}$ คือ ความเร่งเชิงมุม

จากสมการ (10) และ สมการ (11) สามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ได้ คือ

$$I\ddot{\theta} + mgl \sin \theta = 0 \quad \dots\dots\dots(12)$$

จากสมการ (12) สามารถหาผลเฉลยได้ 2 กรณี คือ

กรณี 1 ถ้าการกระจัดเชิงมุมของวัตถุแข็งเกร็งมีค่าน้อยๆ สามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ได้ตั้งสมการ

$$\ddot{\theta} + \frac{mgl}{I}\theta = 0 \quad \dots\dots\dots(13)$$

ซึ่งจะได้ผลเฉลยตั้งสมการ

$$\theta(t) = A \cos \sqrt{\frac{mgl}{I}}t + \varphi \quad \dots\dots\dots(14)$$

ให้

$$\omega = \sqrt{\frac{mg\ell}{I}}$$

และคาบการแกว่งกวัดของวัตถุแข็งเกร็งสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mg\ell}} \quad \dots\dots\dots(15)$$

กรณี 2 การกระจัดเชิงมุมของวัตถุแข็งเกร็งมีค่ามากๆ คาบการแกว่งกวัดสามารถเขียนได้ดังสมการ¹

$$T = T_0 \left(1 + \frac{1}{4} \sin^2 \frac{\theta_0}{2} \dots\dots\dots(16) \right)$$

เมื่อ T_0 คือ คาบการแกว่งกวัดเชิงเส้น มีค่าเท่ากับ $2\pi \sqrt{\frac{I}{mg\ell}}$

1.3 การแกว่งกวัดแบบหน่วง (Damped Oscillation)

จากกรณีการแกว่งกวัดของเพนดูลัมอย่างง่ายที่กล่าวมาข้างต้นเป็นกรณีที่ไม่คำนึงถึงแรงต้านและแรงเสียดทานภายนอกกระทำต่อวัตถุ ในที่นี้ได้แก่ แรงต้านอากาศและแรงเสียดทานเนื่องจากจุดหมุน แต่การแกว่งกวัดของฟิสิกัลเพนดูลัม จะมีแรงต้านการเคลื่อนที่ ที่มีค่าขึ้นกับความเร็วเข้ามาเกี่ยวข้องเสมอ และเรียกแรงนี้ว่า แรงหน่วง (Drag Force) ซึ่งจะทำให้แอมพลิจูดของการแกว่งกวัดลดลงเรื่อย ๆ เรียกการแกว่งกวัดแบบนี้ว่าการแกว่งกวัดแบบหน่วง

¹ถ้าพิจารณาการเคลื่อนที่ซึ่งความเร็วของวัตถุไม่สูงมาก ความเร็วน้อยกว่า 24 เมตรต่อวินาที อาจคิดว่าแรงหน่วงมีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วกำลังหนึ่ง จะได้สมการการเคลื่อนที่ของฟิสิกัลเพนดูลัมคือ

$$I\ddot{\theta} + \beta\dot{\theta} + mg\ell \sin\theta = 0 \quad \dots\dots\dots(17)$$

β คือ ค่าคงที่การหน่วง

พิจารณาการแกว่งกวัดเป็นมุมน้อย ๆ $\sin \theta \approx \theta$ จะสามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่แบบ
หน่วงได้คือ

$$\ddot{\theta} + \frac{\beta}{I} \dot{\theta} + \frac{mg\ell}{I} \theta = 0 \quad \dots\dots\dots(18)$$

¹พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ. (2540). “กลศาสตร์เชิงวิเคราะห์.” หน้า 16

กำหนดให้

$$\left. \begin{aligned} \gamma &= \frac{\beta}{2I} \\ \omega &= \sqrt{\frac{mg\ell}{I}} \\ \omega' &= \sqrt{\omega^2 - \gamma^2} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(19)$$

คือ การกระจัดเชิงมุม
 γ เรียกว่า ตัวประกอบการหน่วง (Damping Factor)
 เรียกว่า ความถี่เชิงมุมเมื่อมีการหน่วง
 เรียกว่า ความถี่ธรรมชาติ

พิจารณาผลเฉลยของสมการที่ (18) มีอยู่ด้วยกัน 3 กรณี คือ

กรณีที่ 1 การแกว่งกวัดแบบหน่วงต่ำ (Under Damped Motion, $\gamma^2 < \omega^2$)

$$\theta(t) = Ae^{-\gamma t} \sin(\omega' t + \phi) \quad \dots\dots\dots(20)$$

เมื่อ A, เป็น แอมพลิจูดเริ่มต้น และ มุมเฟสเริ่มต้น ที่เวลา $t = 0$

กรณีที่ 2 การแกว่งกวัดแบบหน่วงสูง (Over Damped Motion, $\gamma^2 > \omega^2$)

$$\theta(t) = C_1 e^{-\gamma_1 t} + C_2 e^{-\gamma_2 t} \quad \dots\dots\dots(21)$$

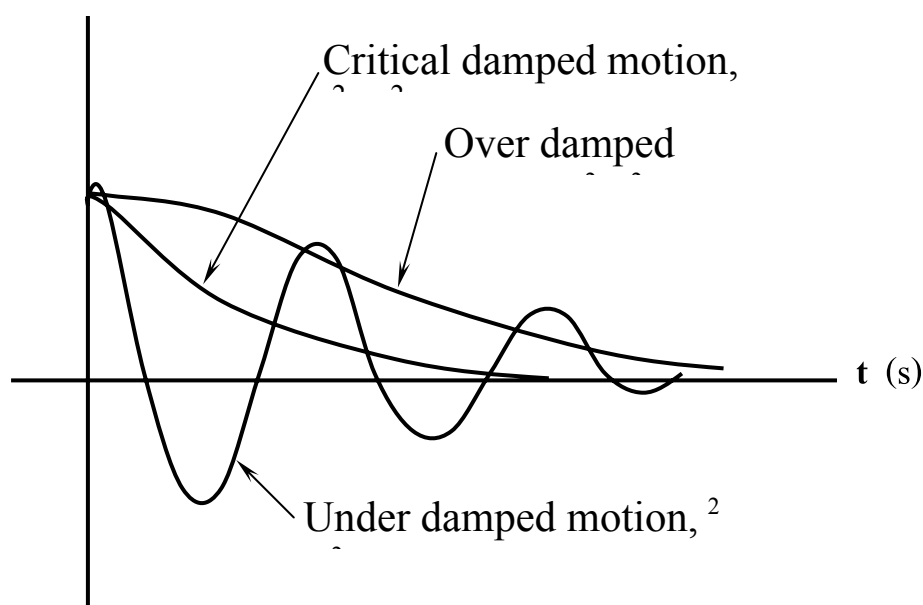
เมื่อ C_1, C_2 เป็นค่าคงที่ใดๆ

กรณีที่ 3 การแกว่งกวัดแบบหน่วงวิกฤติ (Critical Damped Motion, $\gamma^2 = \omega^2$)

$$\theta(t) = C_3 + C_4 t e^{-\gamma t} \quad \dots\dots\dots(22)$$

เมื่อ C_3, C_4 เป็นค่าคงที่ใดๆ

จากผลเฉลย ของทั้ง 3 กรณีสามารถแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง θ กับ t ได้ดัง ภาพประกอบ 3

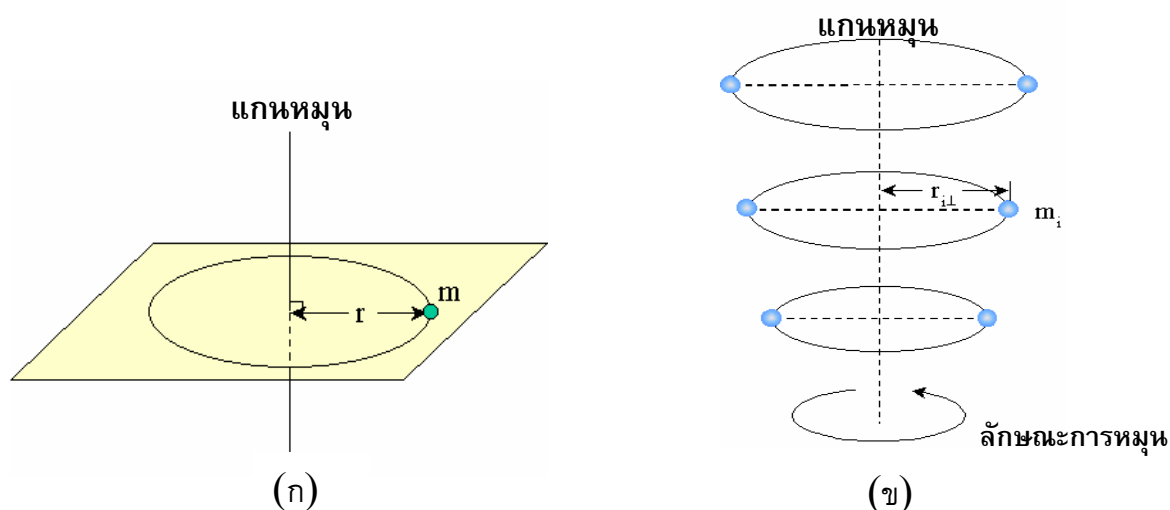


ภาพประกอบ 3 แสดงการแกว่งกวัดแบบหน่วง

สำหรับงานวิจัยนี้ ศึกษาการแกว่งกวัด ในกรณีของการแกว่งกวัดแบบหน่วงต่ำ (Under damped motion) จากสมการ (20) แอมพลิจูดของการแกว่งกวัดจะลดลงเร็วหรือช้า ขึ้นกับค่าตัวประกอบการหน่วง () หากตัวประกอบการหน่วงมีค่ามากแอมพลิจูดของการแกว่งกวัดจะลดลงเร็ว และค่าตัวประกอบการหน่วงในสมการ (19) จะแปรผกผันกับโมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุ

2. โมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of Inertia)

เป็นปริมาณทางฟิสิกส์ที่แสดงถึงสมบัติเฉพาะของวัตถุแข็งแกร่งในการต้านการเคลื่อนที่แบบหมุน มีค่าขึ้นอยู่กับการกระจายของมวลและแกนหมุนของวัตถุ ดังภาพประกอบ 4



ภาพประกอบ 4 แสดงอนุภาคและระบบอนุภาคที่มีการเคลื่อนที่แบบหมุนรอบแกน

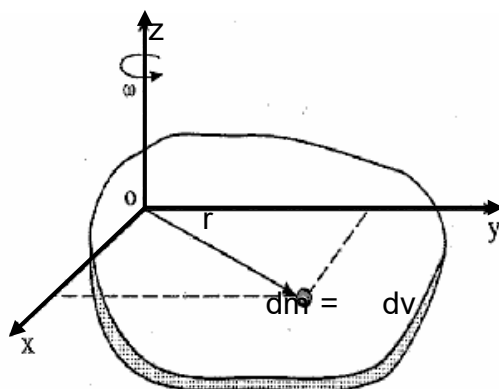
สำหรับโมเมนต์ความเฉื่อยของอนุภาคมวล m รอบแกน ดังภาพประกอบ 4(ก) มีนิยามว่า "ผลคูณของมวลอนุภาคกับกำลังสองของระยะทาง r ที่อนุภาคอยู่ห่างจากแกนหมุน" กล่าวคือ

$$I = mr^2 \quad \text{.....(23)}$$

และโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบอนุภาคใน ภาพประกอบ 4(ข) รอบแกนหมุน

$$I = \sum_i m_i r_i^2 \quad \text{.....(24)}$$

สำหรับวัตถุแข็งแกร่งที่ประกอบด้วยอนุภาคจำนวนมากจัดเรียงกันอย่างหนาแน่นจนถือได้ว่าเป็นเนื้อเดียวกัน แสดงดังภาพประกอบ 5



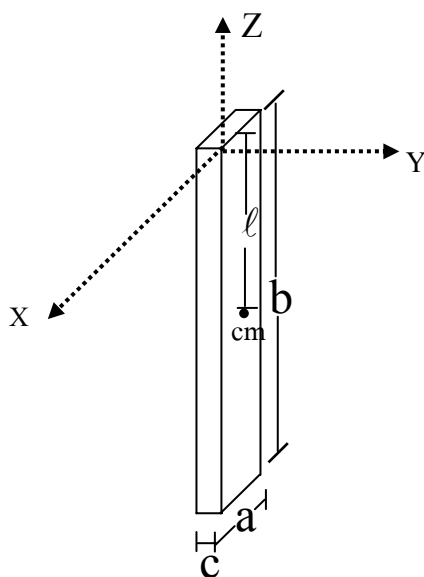
ภาพประกอบ 5 แสดงการหมุนรอบแกนของวัตถุแข็งเกร็ง

ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุแข็งเกร็ง ที่แสดงดังภาพประกอบ 5 สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$I = \iiint \rho r^2 dv \quad \dots\dots\dots(25)$$

เมื่อ dv คือ ปริมาตรเล็กๆในวัตถุแข็งเกร็ง ที่มีความหนาแน่น อยู่ห่างจากแกนหมุนเป็นระยะทาง r

ในการวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษาฟิลิกส์เพนดูลัมรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า หมุนรอบแกน X ที่ขนานกับด้านกว้าง ดังภาพประกอบ 6



ภาพประกอบ 6 แสดงลักษณะแกนอ้างอิงเทียบกับรูปร่างของวัตถุแข็งเกร็งรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า กว้าง a ยาว b หนา c

จากภาพประกอบ 6 แสดงวัตถุแข็งเกร็ง

เมื่อ ℓ คือ ระยะทางระหว่างแกนหมุนถึงจุดศูนย์กลางมวล
 cm คือ ตำแหน่งศูนย์กลางมวลของวัตถุแข็งเกร็งรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า

¹ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกนที่ผ่านศูนย์กลางมวลและขนานกับแกน X สำหรับวัตถุแข็งเกร็งรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีค่าเท่ากับ

$$I_{cm} = M \frac{b^2 + c^2}{12} \quad \dots\dots\dots(26)$$

เมื่อ I_{cm} คือ โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกนที่ผ่านศูนย์กลางมวลและขนานกับแกน X

¹Halliday, D.; Resnick, R.; and Walker, J.; (2001). “*Fundamentals of Physics : Extended*”. pp. 224 - 226

ในกรณีที่แกนหมุนของวัตถุแข็งเกร็งไม่ผ่านตำแหน่งศูนย์กลางมวล โมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุรอบแกนหมุน สามารถหาได้โดยใช้ทฤษฎีแกนขนาน (Parallel axis Theorem) นั่นคือ โมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุรอบแกนใดๆ มีค่าเท่ากับโมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุรอบแกนซึ่งผ่านศูนย์กลางมวลและขนานกับแกนรวมกับโมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกน ถ้าคิดมวลทั้งหมดของวัตถุรวมอยู่ที่ตำแหน่งศูนย์กลางมวล จะได้ว่า

$$I_x = I_{cm} + M\ell^2 \quad \dots\dots\dots(27)$$

เมื่อ I_x คือ โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกน X
 M คือ มวลรวมของวัตถุ
 ℓ คือ ระยะทางระหว่างแกนหมุนถึงจุดศูนย์กลางมวล

ดังนั้น ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกน X สำหรับวัตถุแข็งเกร็งรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ดังภาพประกอบ 6 เมื่อ $I_{cm} = \frac{M}{12} b^2 + c^2$ และ $\ell = \frac{b}{2}$ สามารถคำนวณหาได้จากสมการ (27) เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$I_x = \frac{M}{12} b^2 + c^2 + M \frac{b}{2}^2 \quad \dots\dots\dots(28)$$

สำหรับวัตถุแข็งเกร็งที่มีการกระจายของมวลอย่างสม่ำเสมอ สามารถเขียนมวลในรูปของ

$$M = \rho V \quad \dots\dots\dots(29)$$

เมื่อ V คือ ปริมาตรของวัตถุแข็งเกร็งรูปทรงสี่เหลี่ยม มีค่าเท่ากับ กว้าง x ยาว x หนา ในที่นี้คือ $a \times b \times c$

จากสมการ (28) สามารถเขียนโมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุแข็งเกร็งรูปทรงสี่เหลี่ยมรอบแกน X ได้ดังนี้

$$I_x = \frac{\rho ab^3 c}{12} + \frac{c^2}{b^2} + \frac{\rho ab^3 c}{4} \quad \dots\dots\dots(30)$$

ในกรณีที่ c มีค่าน้อยกว่า b มากๆ สมการ (30) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$I_x = \frac{\rho ab^3 c}{3} \quad \dots\dots\dots(31)$$

จาก $\gamma = \frac{\beta}{2I_x}$ และ $\omega = \sqrt{\frac{mg\ell}{I_x}}$ เมื่อนำค่าโมเมนต์ความเฉื่อย

รอบแกน X ในสมการ (31) แทนลงไป จะเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\left. \begin{aligned} \gamma &= \frac{3\beta}{2\rho ab^3c} \\ \omega &= \sqrt{\frac{3g}{2b}} \end{aligned} \right\}$$

3. ชุดอุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่

สำหรับการเก็บรวบรวมข้อมูลในงานวิจัยครั้งนี้ได้นำเครื่องวัดการเคลื่อนที่ของวัตถุแข็งเกร็งช่วยในการเก็บข้อมูล ซึ่งประกอบด้วย

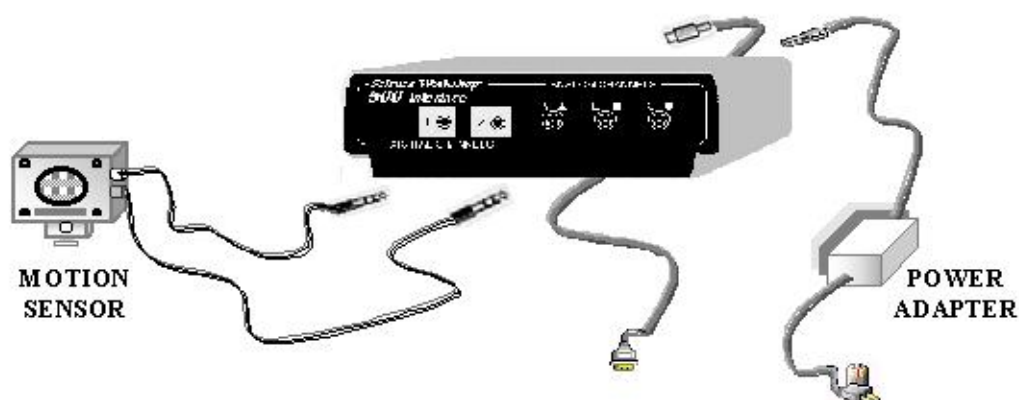
3.1 ชุดอุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนที่

3.2 โปรแกรมสำหรับเก็บและวิเคราะห์ข้อมูล

ซึ่งมีรายละเอียดคุณสมบัติดังนี้

3.1 ชุดอุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนที่

ชุดอุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนที่ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย เครื่องตรวจวัดการเคลื่อนที่ (Motion Sensor) อุปกรณ์เชื่อมต่อ (Interface) และสายเคเบิล ดังภาพประกอบ 7



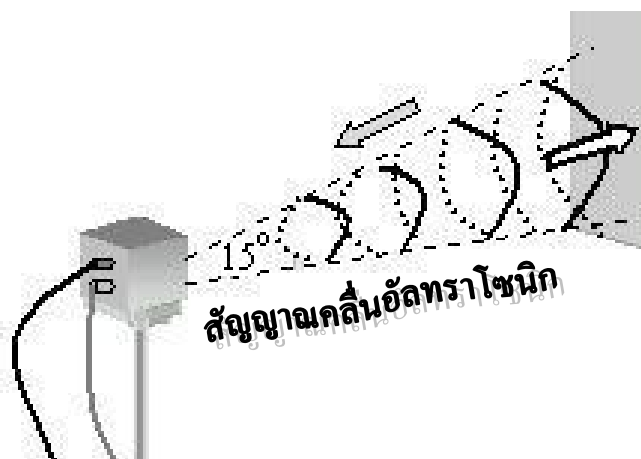
ภาพประกอบ 7 แสดงชุดอุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่

3.1.1 เครื่องตรวจวัดการเคลื่อนที่ มีลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยมขนาดความกว้าง 6 เซนติเมตร ความยาว 7.5 เซนติเมตรและความหนา 3.5 เซนติเมตร ดังภาพประกอบ 8



ภาพประกอบ 8 แสดงเครื่องตรวจวัดการเคลื่อนที่

เครื่องตรวจวัดการเคลื่อนที่ ประกอบด้วยอุปกรณ์ 2 ส่วน คือ ตัวส่งสัญญาณอัลตราโซนิก (Ultrasonic) และตัวรับสัญญาณอัลตราโซนิก โดยลักษณะของการส่งสัญญาณอัลตราโซนิกจะส่งออกไปเป็นพัลส์ (Pulses) ลักษณะเป็นลำกรวย ทำมุม 15 องศา ดังภาพประกอบ 9



ภาพประกอบ 9 แสดงการส่งสัญญาณอัลตราโซนิกของเครื่องตรวจวัดการเคลื่อนที่

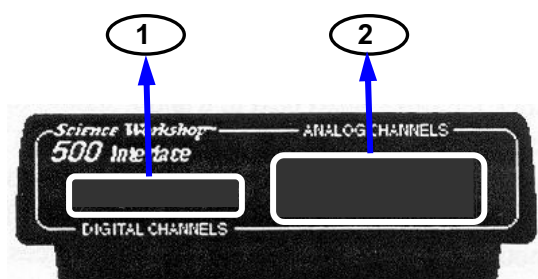
คลื่นอัลตราโซนิก หมายถึง คลื่นเสียงที่มีความถี่สูงกว่า 20 กิโลเฮิรตซ์ซึ่งมนุษย์ไม่สามารถได้ยิน การส่งสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิกจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งนั้นจะต้องอาศัยตัวกลางในการส่งผ่าน สำหรับตัวกลางในการส่งสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิก ได้แก่ ตัวกลางที่เป็นอากาศ ตัวกลางที่เป็นของเหลว และตัวกลางที่เป็นของแข็ง ความเร็วของสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิกในการส่งผ่านของตัวกลางแต่ละตัวมีค่าดังนี้ ตัวกลางที่เป็นอากาศมีค่าประมาณ 340 เมตรต่อวินาที ตัวกลางที่เป็นของเหลวมีค่าประมาณ 1500 เมตรต่อวินาที และตัวกลางที่เป็นของแข็งมีค่าประมาณ 5900 เมตรต่อวินาที

3.1.2 อุปกรณ์ต่อเชื่อม ทำหน้าที่วัดเวลาไปและกลับของคลื่นสัญญาณอัลตราโซนิกของเครื่องตรวจวัดการเคลื่อนที่ อุปกรณ์ต่อเชื่อมมีลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยมขนาด ความกว้าง 10.5 เซนติเมตร ความยาว 15 เซนติเมตร และความหนา 6 เซนติเมตร ดังภาพประกอบ 10

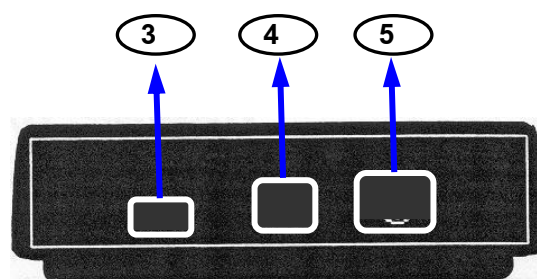


ภาพประกอบ 10 แสดงอุปกรณ์ต่อเชื่อม

อุปกรณ์ต่อเชื่อมในภาพประกอบ 10 สามารถจำแนกส่วนประกอบได้ดังภาพประกอบ 11



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 11 แสดงรายละเอียดของอุปกรณ์ต่อเชื่อม

(ก) ส่วนประกอบด้านหน้าของอุปกรณ์ต่อเชื่อม

หมายเลข 1 แสดงช่องสัญญาณดิจิทัล (Digital Channels)

หมายเลข 2 แสดงช่องสัญญาณแอนะล็อก (Analog Channels)

(ข) ส่วนประกอบด้านหลังของอุปกรณ์ต่อเชื่อม

หมายเลข 3 แสดงสวิตช์เปิดปิด (On/Off Switch)

หมายเลข 4 แสดงช่องสัญญาณไฟเข้า (Power Post)

หมายเลข 5 แสดงช่องสัญญาณมินิไดน์ (Mini DIN Post)

อุปกรณ์ต่อเชื่อมจะทำงานร่วมกับเครื่องตรวจวัดการเคลื่อนที่และคอมพิวเตอร์ โดยการนำสายสัญญาณของเครื่องตรวจวัดการเคลื่อนที่ต่อผ่านทางช่องสัญญาณดิจิทัล(หมายเลข 1)ของอุปกรณ์ต่อเชื่อม และนำสายสัญญาณของคอมพิวเตอร์ต่อผ่านทางช่องสัญญาณมินิไดน์(หมายเลข 5)ของอุปกรณ์ต่อเชื่อม

การทำงานของชุดอุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่ คือ เมื่อเครื่องตรวจวัดการเคลื่อนที่ปล่อยสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิกไปกระทบกับฟิล์มเพนดูลัมแล้วคลื่นสัญญาณอัลตราโซนิกจะสะท้อนกลับมายังเครื่องตรวจวัดการเคลื่อนที่ อุปกรณ์ต่อเชื่อมจะจับเวลาไปและกลับของสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิก แล้วส่งข้อมูลของเวลาไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อเก็บและวิเคราะห์หาตำแหน่งของฟิล์มเพนดูลัม โดยคำนวณระยะห่างระหว่างเครื่องตรวจวัดการเคลื่อนที่กับฟิล์มเพนดูลัม จากสมการ

$$\text{ระยะทาง} = \frac{\text{ความเร็วเสียง} \times \text{ช่วงเวลาไปและกลับ}}{2}$$

ความเร็วเสียงในอากาศสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$V_{\text{sound}} = 331 + 0.6T \quad \dots\dots\dots(33)$$

เมื่อ V_{sound} คือ ความเร็วเสียง

T คือ อุณหภูมิอากาศบริเวณที่ทดลองในหน่วยองศาเซลเซียส

เนื่องจากความเร็วเสียงมีค่าขึ้นอยู่กับสภาพบรรยากาศ ณ ตำแหน่งที่ทดลอง เช่น อุณหภูมิ ความดันบรรยากาศ และความหนาแน่นของอากาศเป็นต้น ดังนั้นในการทดลองแต่ละครั้งต้องควบคุม อุณหภูมิ และความดันบรรยากาศของห้องทดลองให้เท่ากันทุกครั้ง

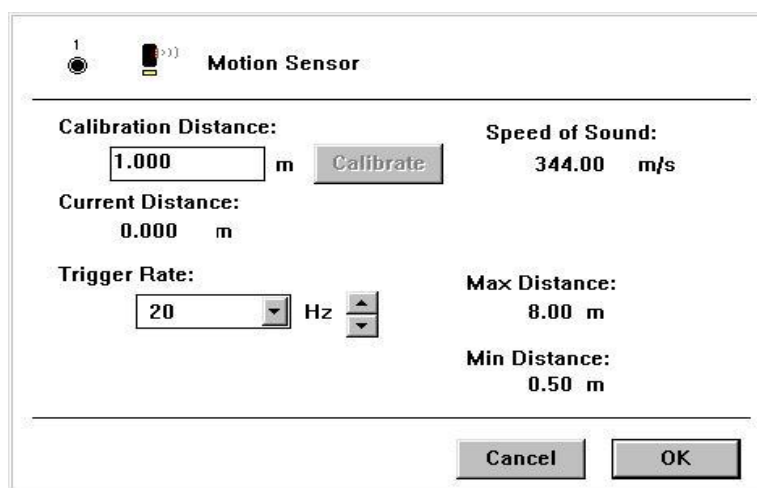
3.2 การใช้คอมพิวเตอร์เก็บและวิเคราะห์ข้อมูล

สำหรับในงานวิจัยนี้โปรแกรมที่ใช้ในการเก็บและวิเคราะห์ข้อมูลคือ โปรแกรมไซน์เวิร์คชอป (Science Workshop Program) ซึ่งโปรแกรมจะทำงานสัมพันธ์กับชุดอุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนที่ โดยการทำงานต่างๆ ของชุดอุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนที่ เช่น การสั่งการปฏิบัติงาน การเก็บข้อมูล และการแสดงผล จะสั่งการโดยผ่านโปรแกรมไซน์เวิร์คชอป หน้าต่างการทดลองของโปรแกรมไซน์เวิร์คชอปสามารถแสดงได้ดังภาพประกอบ 12



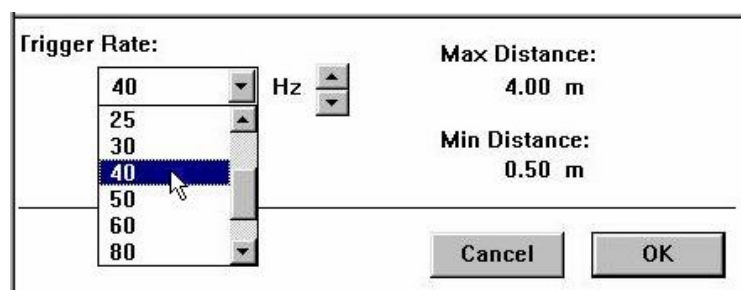
ภาพประกอบ 12 แสดงหน้าต่างการทดลองของโปรแกรมไซน์เวิร์คชอป

การตั้งค่าการวัดหรือการตั้งค่าการบันทึกจำนวนข้อมูลต่อวินาทีของเครื่องตรวจวัดการเคลื่อนที่ เรียกว่า อัตราการปล่อยสัญญาณ (Trigger Rate) ตั้งค่าอัตราการปล่อยสัญญาณของเครื่องตรวจวัดการเคลื่อนที่ แสดงได้ดังภาพประกอบ 13



ภาพประกอบ 13 แสดงหน้าต่างการตั้งค่าของเครื่องตรวจวัดการเคลื่อนที่

สำหรับงานวิจัยครั้งนี้ได้จัดวางให้เครื่องตรวจวัดการเคลื่อนที่อยู่ห่างจากวัตถุประมาณ 0.70 เมตร ในการเลือกความถี่ที่เหมาะสมจะพิจารณาจากกราฟข้อมูลผลการทดลองที่มีเส้นกราฟเรียบที่สุด และระยะห่างระหว่างจุดของกราฟไม่กว้างมาก และได้เลือกค่าความถี่ของการปล่อยสัญญาณคลื่นที่ 40 เฮิรตซ์ ดังภาพประกอบ 14



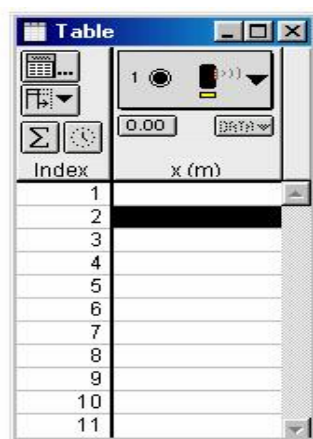
ภาพประกอบ 14 แสดงการเลือกค่าความถี่ของอัตราการปล่อยสัญญาณคลื่น

การแสดงผลจากการทดลอง

การแสดงผลสามารถแสดงออกมาได้ในหลายรูปแบบ แต่สำหรับงานวิจัยครั้งนี้ได้เลือกรูปแบบการแสดงผลออกมาในรูปแบบของตาราง (Table Display) และกราฟ(Graph Display)

3.2.1 การแสดงผลเป็นตาราง

ตัวอย่างของการแสดงผลในรูปแบบตารางแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 15

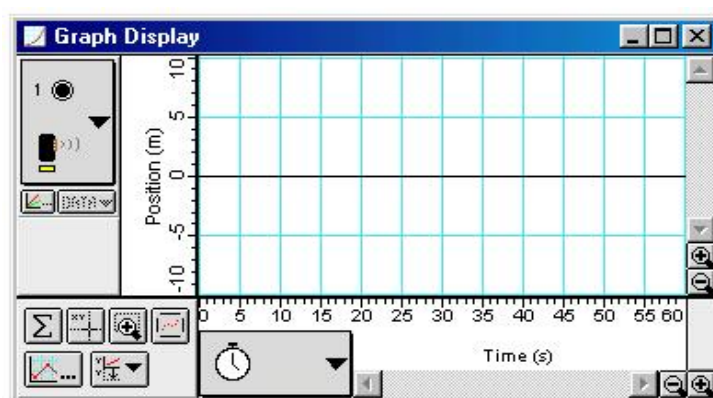


Index	x (m)
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	

ภาพประกอบ 15 ตารางบันทึกผลการทดลอง

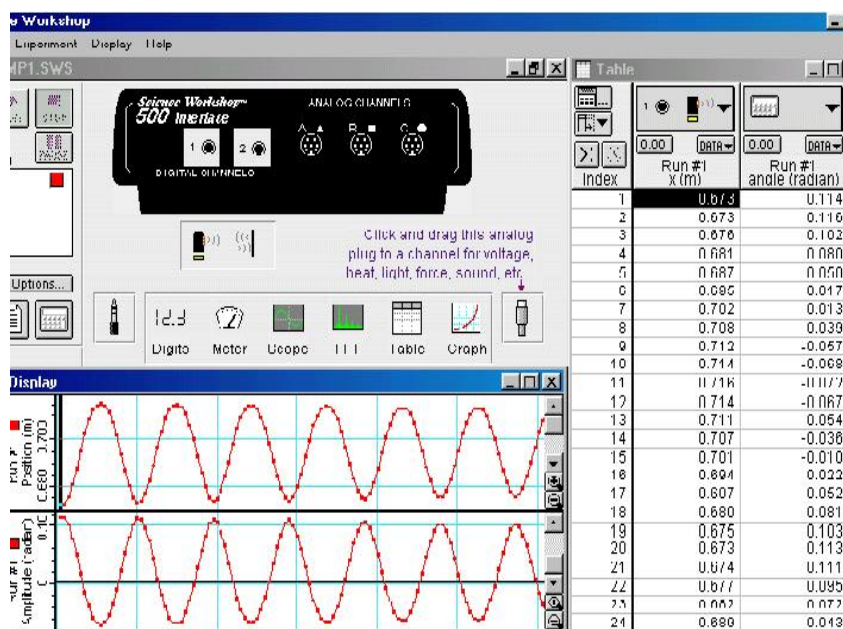
3.2.1 การแสดงผลเป็นกราฟ

ตัวอย่างของการแสดงผลในรูปแบบกราฟแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 16



ภาพประกอบ 16 แสดงกราฟบันทึกผลการทดลอง

ในการศึกษา การแกว่งกวัดของฟิสิกส์เพนดูลัมโดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนที่สามารถแสดงตัวอย่างของการบันทึกผลการทดลอง แบบตารางบันทึกผลและกราฟบันทึกผลได้ดังภาพประกอบที่ 17



ภาพประกอบ 17 ตัวอย่างการบันทึกผลการทดลองด้วยตารางและกราฟ

4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปี ค.ศ. 1997 Ochoa,O.R. และ Koip,N.F. ได้ศึกษาการเคลื่อนที่แบบฮาร์โมนิกของตัวแกว่งกวัด (Oscillation) โดยได้แยกพิจารณาเป็น 3 กรณี คือ ตัวแกว่งกวัดที่มีการแกว่งกวัดแบบฮาร์โมนิกที่มีการหน่วง เพนดูลัมอย่างง่ายและฟิสิกส์เพนดูลัมที่มีการหน่วง โดยในการวิจัยใช้เมาส์วัดตำแหน่งของเพนดูลัมแล้วคำนวณหาแอมพลิจูด โดยใช้โปรแกรมในการตรวจสอบเวลาแสดงผลออกมาในรูปกราฟ แล้วนำผลไปเปรียบเทียบกับทฤษฎี

ปี ค.ศ. 1997 Pagonis,V. Guerra,D. Chauduri,S. Hornbecker,B. และ Smith,N. ได้ศึกษาผลของแรงต้านอากาศ โดยใช้เครื่องเล่นวิดิตซ์บนที่กการเคลื่อนที่ของวัตถุ แล้วแสดงผลการทดลองการตกของวัตถุเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมวลและรูปร่าง ในการเคลื่อนที่หนึ่งและสองมิติภายใต้แรงต้านอากาศ โดยใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งกับเวลา และ ความเร็วกับเวลา แล้วนำผลไปวิเคราะห์หาค่าคงที่การหน่วงของวัตถุ พบว่าค่าคงที่การหน่วงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับตัวประกอบการหน่วงและพื้นที่หน้าตัดของวัตถุ

บทที่ 3

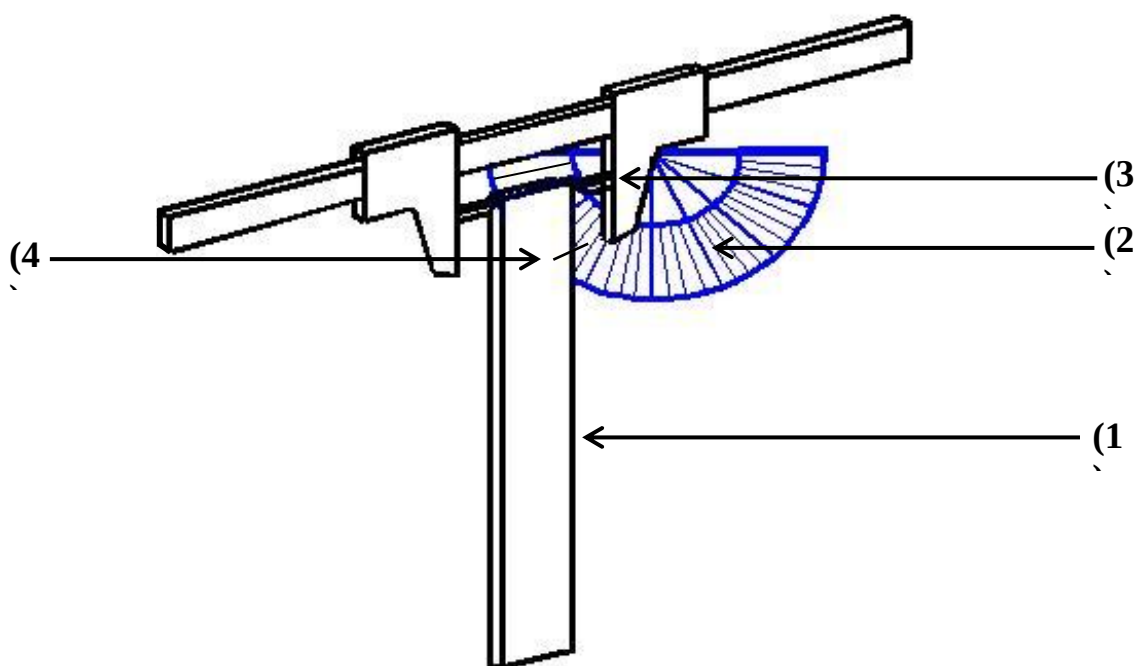
วิธีดำเนินการวิจัย

ในการวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ดำเนินการตามขั้นตอนต่อไปนี้

1. การออกแบบชุดทดลองการแกว่งกวัดของเพนดูลัมทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า
2. การสร้างชุดทดลองฟิสิกส์เพนดูลัม
3. การทดลองและเก็บข้อมูล
4. การวิเคราะห์ข้อมูล

1.การออกแบบชุดทดลองการแกว่งกวัดของเพนดูลัมรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า

การสร้างอุปกรณ์การทดลองเพนดูลัมรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ใช้ในการวิจัยนี้ ส่วนประกอบต่าง ๆ ในระบบ ฟิสิกส์เพนดูลัม แสดงได้ดังภาพประกอบ 18



- (1) วัตถุแข็งเกร็งทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า
- (2) แผ่นเครื่องกลมบอกค่ามุม
- (3) แกนหมุนของวัตถุแข็งเกร็ง
- (4) เข็มชี้

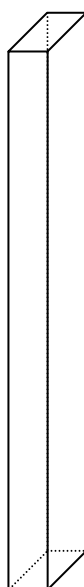
ภาพประกอบ 18 แสดงแผนภาพส่วนประกอบต่าง ๆ ของระบบฟิสิกส์เพนดูลัม

ชุดอุปกรณ์การทดลองฟิสิกส์เพนดูลัม ดังภาพประกอบ 18 เป็นระบบที่ประกอบด้วยวัตถุ แข็งเกร็งรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าแขวนบนคมมีดซึ่งทำหน้าที่เป็นแกนหมุน

การแกว่งกวัดของฟิสิกส์เพนดูลัมสามารถวัดตำแหน่งเริ่มต้นของฟิสิกส์เพนดูลัมได้จาก แผ่นสเกลครึ่งวงกลมบอกค่ามุม (หมายเลข 2) ในการทดลองขณะที่ฟิสิกส์เพนดูลัมอยู่ในสภาวะ สมดุล ขอบด้านข้างของฟิสิกส์เพนดูลัมซึ่งมีเข็ม (หมายเลข 4) ติดอยู่ที่ศูนย์กลางของแผ่นสเกล ครึ่งวงกลม และเมื่อกระทำทำให้ฟิสิกส์เพนดูลัมเคลื่อนออกจากตำแหน่งสมดุลให้ขอบด้านข้างของวัตถุ ชี้อยู่ที่สเกลค่าใดค่าหนึ่ง ค่าดังกล่าวจะเป็นตำแหน่งเริ่มต้นของการแกว่งกวัด ตัวอย่างเช่น ในสภาวะสมดุลฟิสิกส์เพนดูลัมชี้ที่สเกลหมายเลข 0 เมื่อกระทำทำให้ฟิสิกส์เพนดูลัมเคลื่อนออกจาก ตำแหน่งสมดุลโดยเข็มชี้ที่สเกลหมายเลข 5 ของแผ่นครึ่งวงกลม แสดงว่าฟิสิกส์เพนดูลัมเริ่มต้น แกว่งที่มุม 5 องศา

2. การสร้างชุดทดลองฟิสิกส์เพนดูลัม

2.1 การออกแบบวัตถุ ในงานวิจัยครั้งนี้เลือกใช้วัตถุแข็งเกร็งรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดัง ภาพประกอบ 19



ภาพประกอบ 19 แสดงลักษณะวัตถุแข็งเกร็งรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า

2.2 สร้างวัตถุแข็งเกร็งรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าทั้งหมด 20 ชิ้น คือ

2.2.1 วัตถุแข็งเกร็งรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ชั้นที่ 1,2,3,4,5 มีขนาด ความกว้าง 2.6 เซนติเมตร ความยาว 20 เซนติเมตร ความหนา 0.22 เซนติเมตร เท่ากัน 5 ชิ้น ทำจากวัสดุต่างชนิดกัน คือ กระดาษแข็ง พลาสติก แก้ว อลูมิเนียม และสแตนเลส

2.2.2 วัตถุแข็งเกร็งรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ชั้นที่ 6,7,8,9,10 มีขนาด ความกว้าง 2.6 เซนติเมตร ความยาว 30 เซนติเมตร เท่ากัน 5 ชิ้น แต่มีความหนาต่างกัน เป็น 0.22 เซนติเมตร 0.44 เซนติเมตร 0.66 เซนติเมตร 0.88 เซนติเมตร 1.1 เซนติเมตร และแต่ละชิ้นทำจากวัสดุชนิดเดียวกัน คือ พลาสติก

2.2.3 วัตถุแข็งเกร็งรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ชั้นที่ 11,12,13,14,15 มีขนาด ความยาว 30 เซนติเมตร ความหนา 0.22 เซนติเมตร เท่ากัน 5 ชิ้น แต่มีความกว้างต่างกัน คือ 2.6 เซนติเมตร 3.8 เซนติเมตร 5.0 เซนติเมตร 6.4 เซนติเมตร 7.8 เซนติเมตร และแต่ละชิ้นทำจากวัสดุชนิดเดียวกัน คือ พลาสติก

2.2.4 วัตถุแข็งเกร็งรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ชั้นที่ 16,17,18,19,20 มีขนาด ความกว้าง 2.6 เซนติเมตร ความหนา 0.22 เซนติเมตร เท่ากัน 5 ชิ้น แต่มีความยาวต่างกัน คือ 10 เซนติเมตร 20 เซนติเมตร 30 เซนติเมตร 40 เซนติเมตร 50 เซนติเมตร และแต่ละชิ้นทำจากวัสดุชนิดเดียวกัน คือ พลาสติก

2.3 การออกแบบแกนหมุน สำหรับงานวิจัยนี้ ได้เลือกและดัดแปลงเวอร์เนียคาลิเปอร์เป็นระบบแกนหมุนเพราะเวอร์เนียคาลิเปอร์สามารถเลื่อนเข้าเลื่อนออกทางด้านกว้างได้ตั้งภาพประกอบที่ 20(ก) โดยออกแบบให้แกนหมุนมีลักษณะเป็นไบมิตซึ่งทำมาจากแท่งเหล็กขนาด ความกว้าง 0.7 เซนติเมตร ความยาว 2 เซนติเมตร และความหนา 0.3 เซนติเมตร กลึงให้ขอบด้านบนของแท่งเหล็กมีลักษณะเป็นไบมิต จำนวน 2 ชิ้น ดังภาพประกอบที่ 20(ข)



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 20 แสดงส่วนประกอบของแกนหมุน

นำแท่งเหล็กทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดความกว้าง 1.6 เซนติเมตร ความยาว 20 เซนติเมตร และหนา 0.4 เซนติเมตร มาเชื่อมติดกับปลายของเวอร์เนียทำหน้าที่เป็นแกนของระบบ แกนหมุน และนำไปมีดในข้อ 2.2(ข) มาเชื่อมติดกับเวอร์เนียคาลิเปอร์ทำหน้าที่เป็นแกนหมุน ดังภาพประกอบ 21



ภาพประกอบ 21 แสดงลักษณะแกนหมุนของระบบ

นำแผ่นสเกลวัดมุมครึ่งวงกลมติดเข้ากับชุดแกนหมุนในข้อ 2.3 โดยให้ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแผ่นสเกลวัดมุม อยู่แนวเดียวกับใบมีดของแกนหมุน ดังภาพประกอบ 22



ภาพประกอบ 22 แสดงแกนหมุนที่ยึดติดกับสเกลวัดมุม

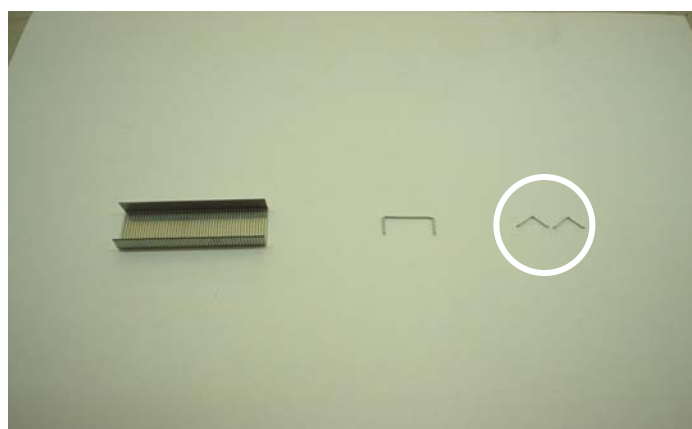
นำชุดแกนหมุนในข้อ 2.4 ไปยึดติดกับฐานกว้าง ดังภาพประกอบ 23



ภาพประกอบ 23 แสดงลักษณะแกนหมุนที่ยึดติดกับฐาน

2.4 การสร้างตัวแขวนวัตถุแข็งเกร็ง มีรายละเอียดดังนี้

2.4.1 การสร้างตัวแขวนวัตถุแข็งเกร็งในงานวิจัยนี้ ใช้ลวดเย็บกระดาษโดยการตัดแบ่ง
เครื่องลวดเย็บกระดาษออกเป็น 2 ชั้น ดังภาพประกอบ 24 ซึ่งแต่ละชั้นจะมีน้ำหนักประมาณ 0.063
กรัม



ภาพประกอบ 24 แสดงลักษณะของตัวแขวนฟิลิกัลเพนดูลัม

2.4.2 นำตัวแขวนจากข้อ1 เชื่อมติดที่ปลายด้านบนของวัตถุแข็งเกร็งโดยใช้กาวเชื่อม
โลหะดังภาพประกอบ 25



ภาพประกอบ 25 แสดงการเชื่อมตัวแขวนติดกับวัตถุแข็งเกร็ง

3 ขั้นตอนการทดลองและเก็บข้อมูล

3.1 ติดตั้งชุดอุปกรณ์เครื่องตรวจวัดการเคลื่อนที่

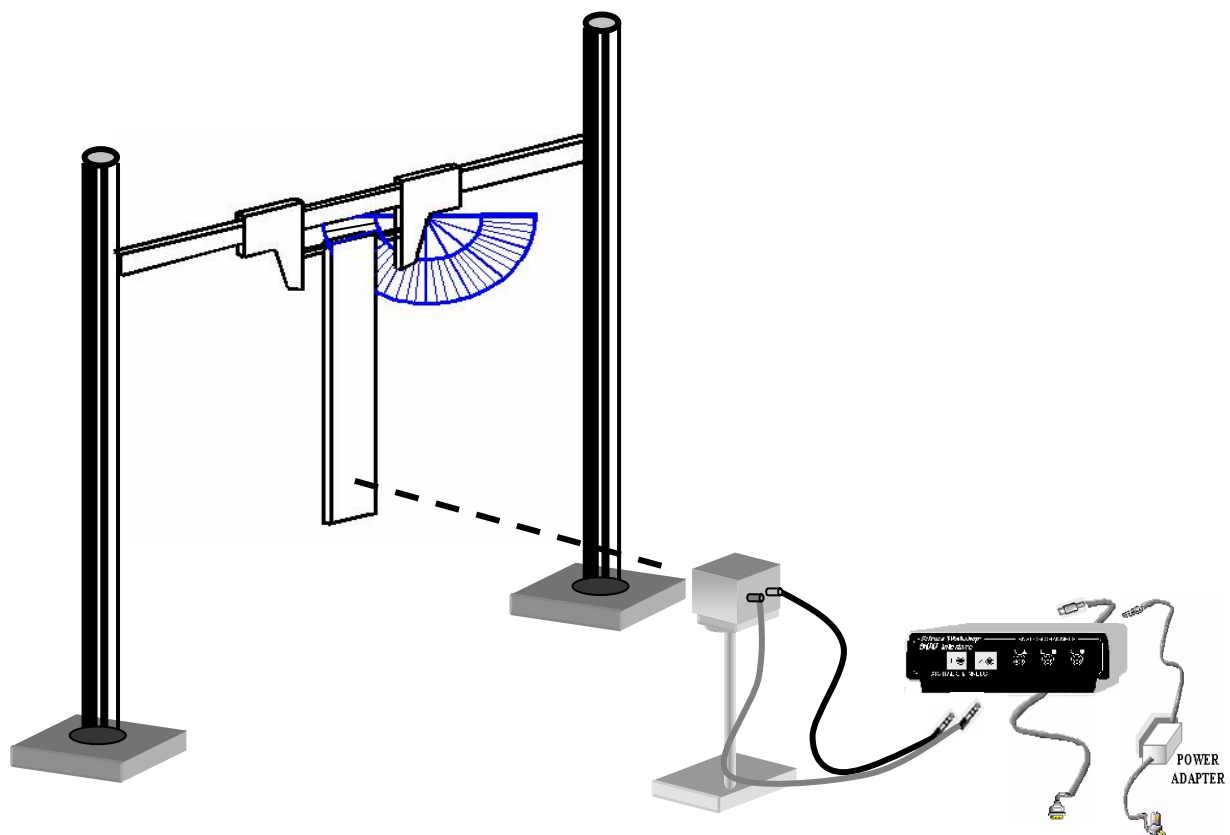
เครื่องตรวจวัดการเคลื่อนที่จะต่อกับสายเคเบิล 2 สาย แต่ละสายมีเส้นผ่านศูนย์กลาง $\frac{1}{4}$ นิ้ว

สายเคเบิลเส้นที่ 1 (สีเหลือง) จะเชื่อมต่อกับช่องสัญญาณดิจิทัล 1 (Digital Channel 1) ของอุปกรณ์เชื่อมต่อ ทำหน้าที่นำสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิกจากอุปกรณ์เชื่อมต่อไปยังเครื่องตรวจวัดการเคลื่อนที่

สายเคเบิลเส้นที่ 2 (สีดำ) จะเชื่อมต่อกับช่องสัญญาณดิจิทัล 2 (Digital Channel 2) ของอุปกรณ์เชื่อมต่อ ทำหน้าที่นำสัญญาณสะท้อนกลับจากเครื่องตรวจวัดมายังอุปกรณ์เชื่อมต่อ

ในการตั้งค่าความถี่ของอัตราการปล่อยสัญญาณจะต้องสัมพันธ์กับระยะทางระหว่างเครื่องตรวจวัดกับวัตถุ

3.2 จัดอุปกรณ์การทดลองที่ออกแบบและสร้างขึ้นในข้อ 3.3 ดังภาพประกอบ 26 โดยเครื่องตรวจวัดการเคลื่อนที่อยู่ห่างจากระบบฟิสิกส์เพนดูลัม เป็นระยะทาง 0.70 เมตร



ภาพประกอบ 26 แสดงการจัดชุดอุปกรณ์การทดลองการแกว่งกวัดของฟิสิกส์เพนดูลัมโดยใช้เครื่องตรวจวัดการเคลื่อนที่

สำหรับการทดลองหาระยะห่างระหว่างเพนดูลัมรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้ากับเครื่องตรวจวัดการเคลื่อนที่ และการหาอัตราการปล่อยสัญญาณ มีรายละเอียดดังนี้

เนื่องจากประสิทธิภาพของเครื่องตรวจวัดการเคลื่อนที่มีระยะการส่งสัญญาณในช่วง 0.50 – 10.00 เมตร และเครื่องตรวจวัดการเคลื่อนที่ปล่อยสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิกออกไปเป็นลำกรวยทำมุม 15 องศา กับเครื่องตรวจวัด ดังนั้นการเลือกระยะห่างระหว่างฟิสกัลเพนดูลัมกับเครื่องตรวจวัดการเคลื่อนที่จะเลือกระยะทางที่ใกล้ที่สุด แต่สำหรับฟิสกัลเพนดูลัมในการวิจัยครั้งนี้ มีลักษณะการเคลื่อนที่แบบแกว่งกวัด กลับไป – กลับมา ระยะที่ฟิสกัลเพนดูลัมแกว่งกวัดเข้าใกล้เครื่องตรวจวัดการเคลื่อนที่มากที่สุดต้องไม่เกิน 0.50 เมตร ดังนั้นในการทดลองวางฟิสกัลเพนดูลัมห่างจากเครื่องตรวจวัดการเคลื่อนที่ระยะห่างไม่น้อยกว่า 0.50 เมตร คือระยะประมาณ 0.70 เมตร

สำหรับการเลือกอัตราการปล่อยสัญญาณในการวิจัยนี้ ได้ทดลองปล่อยสัญญาณที่ความถี่ 20,25,30,40 และ 50 เฮิร์ตซ์ โดยเกณฑ์วิเคราะห์ในการเลือกสัญญาณ จะพิจารณาจากกราฟการทดลอง เลือกสัญญาณที่กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงเส้นกับเวลาการทดลองราบเรียบที่สุดและระยะห่างจุดของกราฟไม่กว้างและไม่ซ้ำกันมาก และจากการทดลองสรุปว่าความถี่ของการปล่อยสัญญาณที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยครั้งนี้คือ 40 เฮิร์ตซ์

3.3 ขั้นตอนการทำการทดลอง

การทดลองการแกว่งกวัดวัตถุแข็งเกร็งแต่ละชิ้น จะปรับเปลี่ยนมุมเริ่มต้นของการแกว่งกวัดที่ 2,4,6,8 และ 10 องศาตามลำดับ ที่มุมเริ่มต้นของแต่ละองศาจะทำการทดลองจำนวน 10 ครั้ง สำหรับวัตถุแข็งเกร็ง 1 ชิ้น โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

จัดชุดอุปกรณ์การทดลองดังภาพประกอบที่ 25 แล้วปฏิบัติตามขั้นตอนดังนี้

1. ทดลองการแกว่งกวัดสำหรับวัตถุแข็งเกร็งชิ้นที่ 1

1.1 ดึงวัตถุแข็งเกร็งให้เบนออกจากตำแหน่งสมดุล เป็นมุม 2 องศา กับแนวตั้ง โดยอ่านค่ามุมจากสเกลวัดมุม แล้วปล่อยให้วัตถุแข็งเกร็งเคลื่อนที่อย่างอิสระ พร้อมกับเปิดสวิทซ์การทำงานของเครื่องตรวจวัดการเคลื่อนที่ และบันทึกผลการทดลอง

1.2 ทำการทดลองตามข้อ 1.1 ซ้ำอีก 9 ครั้ง และบันทึกผลการทดลอง

1.3 ปรับเปลี่ยนข้อมูลของระยะทางเชิงเส้นกับเวลาจากข้อ 1.2 เป็นการกระจัดเชิงมุมกับเวลา โดยใส่สูตรคำนวณในโปรแกรมไซน์เวิร์คชอป แล้วบันทึกข้อมูลเป็นแฟ้มข้อมูลการทดลองที่ 1

1.4 ทำการทดลองซ้ำข้อ 1.1 – 1.3 โดยเปลี่ยนแอมพลิจูดเริ่มต้นเป็น 4,6,8 และ 10 องศาตามลำดับ บันทึกข้อมูลในรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลาเป็นแฟ้มข้อมูลการทดลองที่ 2 – 5

2. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1 โดยเปลี่ยนวัตถุแข็งเกร็งเป็น ชิ้นที่ 2 – 20 บันทึกข้อมูลในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา เป็นแฟ้มข้อมูล การทดลองที่ 6 – 100

4. ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูล

การทดลองการแกว่งกวัดของวัตถุแข็งเกร็ง ผลการทดลองแสดงในรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง แอมพลิจูดที่ลดลงกับเวลา แล้วทำการปรับเส้นโค้งหาค่าตัวประกอบการหน่วงดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.1 จากแฟ้มการทดลองที่ 1 เลือกแอมพลิจูดที่ลดลง ณ เวลาต่างๆ ในกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา ประมาณ 25 – 30 คู่อันดับและบันทึกผลเป็นคู่อันดับระหว่างเวลากับขนาดของแอมพลิจูด

4.2 ดำเนินการเช่นเดียวกับข้อ 4.1 ของแฟ้มการทดลองที่ 2 – 100 และบันทึกผล

4.3 นำข้อมูลในข้อ 4.2 ไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดกับเวลา โดยให้แกน X เป็นเวลา และแกน Y เป็นแอมพลิจูด

4.4 ใช้วิธีปรับเส้นโค้ง (Curve Fitting) เพื่อหาค่าตัวประกอบการหน่วงโดยเทียบกับฟังก์ชันเอกซ์โปเนนเชียล ($Y = Ae^{-t}$)

4.5 นำค่าตัวประกอบการหน่วง เขียนกราฟความสัมพันธ์ ดังต่อไปนี้

- เขียนกราฟความสัมพันธ์ ระหว่างตัวประกอบการหน่วงกับความหนาแน่นสัมพัทธ์
- เขียนกราฟความสัมพันธ์ ระหว่างตัวประกอบการหน่วงกับความหนาสัมพัทธ์
- เขียนกราฟความสัมพันธ์ ระหว่างตัวประกอบการหน่วงกับความกว้างสัมพัทธ์
- เขียนกราฟความสัมพันธ์ ระหว่างตัวประกอบการหน่วงกับความยาวสัมพัทธ์

4.6 นำข้อมูลที่ได้ในข้อ 4.5 สรุปความสัมพันธ์ ระหว่างค่าคงที่การหน่วง กับคุณสมบัติของฟิลิ์กัลเพนดูลัม ดังต่อไปนี้

- ความสัมพันธ์ของค่าคงที่การหน่วงกับความหนาแน่นของฟิลิ์กัลเพนดูลัม
- ความสัมพันธ์ของค่าคงที่การหน่วงกับความหนาของฟิลิ์กัลเพนดูลัม
- ความสัมพันธ์ของค่าคงที่การหน่วงกับความกว้างของฟิลิ์กัลเพนดูลัม
- ความสัมพันธ์ของค่าคงที่การหน่วงกับความยาวของฟิลิ์กัลเพนดูลัม

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

การทดลองการแกว่งกวัดวัตถุแข็งเกร็งรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า สำหรับงานวิจัยนี้ใช้วัตถุแข็งเกร็งรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าทั้งหมด 20 ระบบ โดยแบ่งออกเป็น 4 กรณี ผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา มีลักษณะการแกว่งกวัดแบบฮาร์มอนิก ที่แอมพลิจูดค่อยๆ ลดลงตามเวลา เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง แอมพลิจูดที่ลดลงกับเวลาแล้วทำการปรับเส้นโค้งหาค่าตัวประกอบการหน่วงของแต่ละกรณีได้ดังนี้

กรณีที่ 1. วัตถุแข็งเกร็งรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่มีขนาด ความกว้าง 2.6 เซนติเมตร ความยาว 20 เซนติเมตร ความหนา 0.22 เซนติเมตร เท่ากัน 5 ระบบ แต่ละระบบเป็นวัสดุต่างชนิดกัน ได้แก่ กระดาษแข็ง พลาสติก แก้ว อลูมิเนียม และสแตนเลส ค่าตัวประกอบการหน่วง() สามารถแสดงได้ ดังตาราง 1

ตาราง1 ตารางแสดงค่าตัวประกอบการหน่วงของการแกว่งกวัดของวัตถุรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่มีขนาดความกว้าง ความยาวและความหนาเท่ากัน แต่วัสดุต่างชนิดกัน

ครั้งที่	กระดาษอัด					พลาสติก					แก้ว					อะลูมิเนียม					สแตนเลส				
	2	4	6	8	10	2	4	6	8	10	2	4	6	8	10	2	4	6	8	10	2	4	6	8	10
	(องศา)	(องศา)	(องศา)	(องศา)	(องศา)	(องศา)	(องศา)	(องศา)	(องศา)	(องศา)	(องศา)	(องศา)	(องศา)	(องศา)	(องศา)	(องศา)	(องศา)	(องศา)	(องศา)	(องศา)	(องศา)	(องศา)	(องศา)	(องศา)	(องศา)
1	0.05	0.06	0.10	0.12	0.12	0.03	0.05	0.04	0.05	0.04	0.02	0.03	0.03	0.04	0.03	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
2	0.08	0.05	0.13	0.11	0.12	0.05	0.05	0.06	0.04	0.06	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
3	0.06	0.06	0.11	0.11	0.10	0.03	0.04	0.05	0.04	0.05	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
4	0.06	0.05	0.14	0.10	0.10	0.05	0.05	0.04	0.04	0.05	0.02	0.03	0.03	0.04	0.03	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
5	0.07	0.05	0.14	0.14	0.11	0.06	0.05	0.05	0.04	0.06	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.01	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
6	0.07	0.05	0.11	0.08	0.11	0.03	0.03	0.04	0.05	0.05	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
7	0.05	0.06	0.09	0.10	0.11	0.05	0.05	0.06	0.05	0.05	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
8	0.07	0.08	0.10	0.11	0.11	0.03	0.04	0.06	0.05	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
9	0.06	0.09	0.14	0.12	0.11	0.04	0.05	0.06	0.06	0.04	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
10	0.04	0.09	0.09	0.10	0.11	0.03	0.05	0.05	0.05	0.04	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
เฉลี่ย	0.06	0.06	0.12	0.11	0.11	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
S.D.	0.011	0.016	0.020	0.016	0.008	0.010	0.006	0.007	0.007	0.007	0.002	0.001	0.001	0.003	0.003	0.003	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.001	0.002	0.001	0.000

จากตาราง 1 แสดงค่าตัวประกอบการหน่วงของการแกว่งกวัดของวัตถุแข็งเกร็งรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีขนาดความกว้างความยาวและความหนาเท่ากัน วัสดุต่างชนิดกันโดยทำการทดลองที่แอมพลิจูดเริ่มต้นต่างกัน คือที่ 2,4,6,8 และ 10 องศาตามลำดับซึ่งแต่ละค่าทำการทดลอง 10 ครั้ง สามารถหาค่าเฉลี่ยดังตาราง 2

ตาราง 2 ตารางแสดงค่าตัวประกอบการหน่วง (γ)เฉลี่ย ที่แอมพลิจูดเริ่มต้น 2,4,6,8 และ 10 องศาของการแกว่งกวัดของวัตถุแข็งเกร็งรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีขนาดความกว้างความยาวและความหนาเท่ากัน วัสดุต่างชนิดกัน

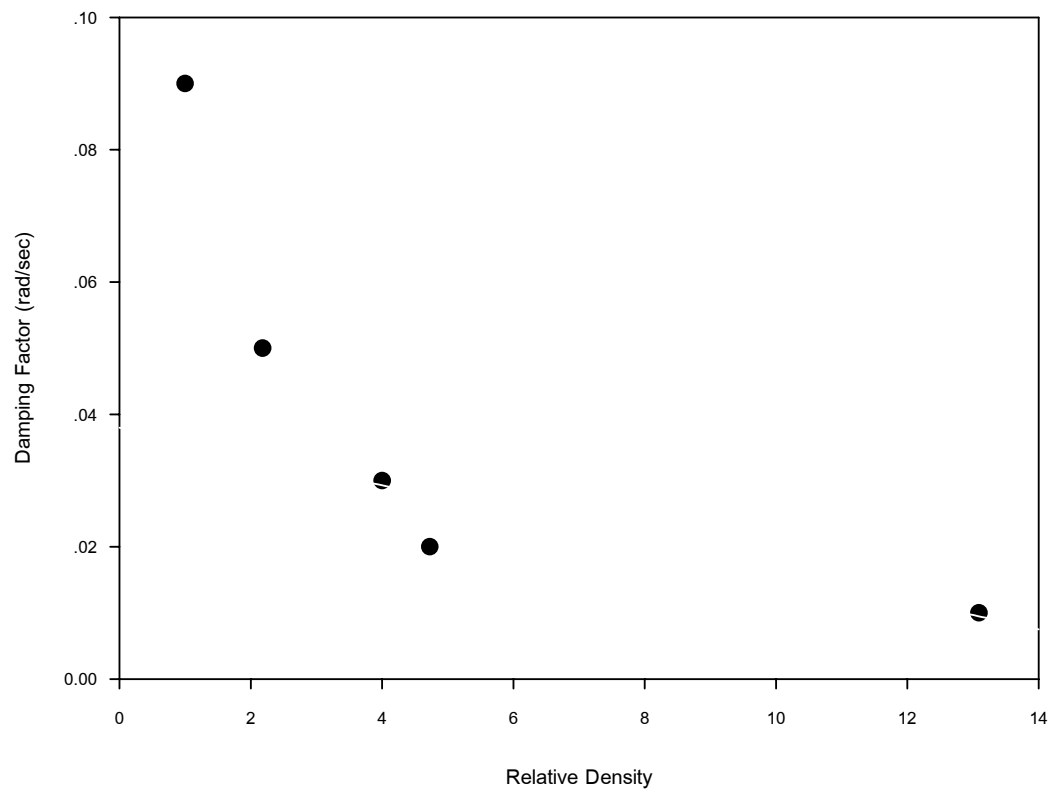
ชนิดของวัสดุ	ค่าตัวประกอบการหน่วง (เรเดียน/วินาที)					ค่าเฉลี่ย (เรเดียน/วินาที)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	2 (องศา)	4 (องศา)	6 (องศา)	8 (องศา)	10 (องศา)		
กระดาษ	0.06	0.06	0.12	0.11	0.11	0.09	0.027
พลาสติก	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.005
แก้ว	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03	0.004
อะลูมิเนียม	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.004
สแตนเลส	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.001

ตาราง 3 ตารางแสดงค่าความหนาแน่น *ความหนาแน่นสัมพัทธ์ และตัวประกอบการหน่วงของวัตถุแข็งเกร็งรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ชนิดของวัสดุ	ความหนาแน่น (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)	ความหนาแน่นของวัสดุ	ตัวประกอบการหน่วง (เรเดียน/วินาที)
		ความหนาแน่นกระดาษ	
กระดาษ	550	1.00	0.09
พลาสติก	1200	2.18	0.05
แก้ว	2200	4.00	0.03
อะลูมิเนียม	2600	4.73	0.02
สแตนเลส	7200	13.09	0.01

* ความหนาแน่นสัมพัทธ์ คือ ความหนาแน่นของวัสดุเทียบกับความหนาแน่นของกระดาษ

นำข้อมูลการวิจัยในตาราง 3 เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบการหน่วงกับความหนาแน่นสัมพัทธ์ ผลการวิจัยแสดงได้ดังภาพประกอบ 27



ภาพประกอบ 27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าตัวประกอบการหน่วงกับความหนาแน่นสัมพัทธ์

กรณีที่ 2. วัตถุแข็งเกร็งรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่มีขนาด ความกว้าง 2.6 เซนติเมตร ความยาว 30 เซนติเมตร เท่ากัน 5 ระบบ แต่ละระบบมีความหนาต่างกัน ได้แก่ 0.22 เซนติเมตร 0.44 เซนติเมตร 0.66 เซนติเมตร 0.88 เซนติเมตร 1.1 เซนติเมตร และแต่ละระบบทำจากวัสดุชนิดเดียวกัน คือ พลาสติก ค่าตัวประกอบการหน่วง() สามารถแสดงได้ดังตาราง 4

ตาราง 4 ตารางแสดงค่าตัวประกอบการหน่วงของการแกว่งกวัดของวัตถุรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่มีขนาดความกว้าง ความยาวเท่ากันแต่ความหนาไม่เท่ากัน และเป็นวัสดุชนิดเดียวกัน

ครั้งที่	1เท้า					2เท้า					3เท้า					4เท้า					5เท้า				
	2	4	6	8	10	2	4	6	8	10	2	4	6	8	10	2	4	6	8	10	2	4	6	8	10
	(องศา)	(องศา)	(องศา)	(องศา)	(องศา)	(องศา)	(องศา)	(องศา)	(องศา)	(องศา)	(องศา)	(องศา)	(องศา)	(องศา)	(องศา)	(องศา)	(องศา)	(องศา)	(องศา)	(องศา)	(องศา)	(องศา)	(องศา)	(องศา)	(องศา)
1	0.04	0.05	0.04	0.04	0.05	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
2	0.04	0.06	0.06	0.04	0.05	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
3	0.03	0.04	0.05	0.04	0.05	0.04	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
4	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
5	0.03	0.04	0.05	0.05	0.05	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
6	0.04	0.05	0.04	0.04	0.06	0.04	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
7	0.04	0.03	0.06	0.05	0.05	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
8	0.04	0.05	0.06	0.05	0.04	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
9	0.05	0.04	0.06	0.04	0.05	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
10	0.05	0.04	0.05	0.06	0.04	0.04	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
เฉลี่ย	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
S.D.	0.005	0.007	0.007	0.004	0.005	0.005	0.003	0.002	0.003	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.003	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000

จากตาราง 4 แสดงค่าตัวประกอบการหน่วงของการแกว่งกวัดของวัตถุแข็งเกร็งรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีขนาดความกว้างความยาวเท่ากัน ความหนาไม่เท่ากัน เป็นวัสดุต่างชนิดกันโดยทำการทดลองที่แอมพลิจูดเริ่มต้นต่างกัน คือที่ 2,4,6,8 และ 10 องศาตามลำดับซึ่งแต่ละค่าทำการทดลอง 10 ครั้ง สามารถหาค่าเฉลี่ยได้ดังตาราง 5

ตาราง 5 ตารางแสดงค่าตัวประกอบการหน่วง ()เฉลี่ย ที่แอมพลิจูดเริ่มต้น 2,4,6,8 และ 10 องศาของการแกว่งกวัดของวัตถุแข็งเกร็งรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีขนาดความกว้างความยาวเท่ากัน ความหนาไม่เท่ากัน เป็นวัสดุชนิดกัน คือ พลาสติก

ความหนา	ค่าตัวประกอบการหน่วง (เรเดียน/วินาที)					ค่าเฉลี่ย (เรเดียน/วินาที)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	2 (องศา)	4 (องศา)	6 (องศา)	8 (องศา)	10 (องศา)		
1เท่า	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.005
2เท่า	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.003
3เท่า	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.002
4เท่า	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.002
5เท่า	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.001

*

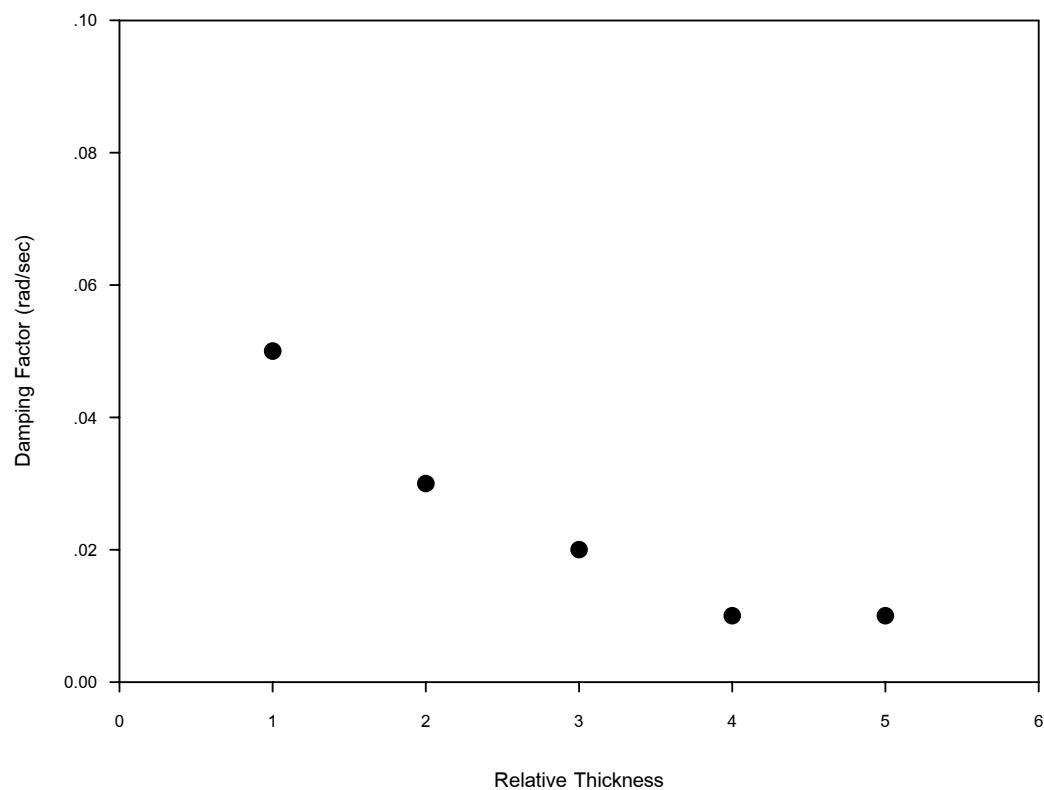
ตาราง 6 ตารางแสดงค่าความหนา ความหนาสัมพัทธ์ และตัวประกอบการหน่วงของวัตถุแข็งเกร็งรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ความหนา	ความหนา (เมตร)	ความหนาของวัสดุ	ตัวประกอบการหน่วง (เรเดียน/วินาที)
		ความหนาน้อยที่สุด	
1เท่า	0.0022	1.00	0.05
2เท่า	0.0044	2.00	0.03
3เท่า	0.0066	3.00	0.02
4เท่า	0.0088	4.00	0.01
5เท่า	0.011	5.00	0.01

*

ความหนาสัมพัทธ์ คือ ความหนาของฟิล์มเทียบกับความหนาน้อยที่สุด

นำข้อมูลการวิจัยในตาราง 6 เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบการหน่วงกับความหนาสัมพัทธ์ ผลการวิจัยแสดงได้ดังภาพประกอบ 28



ภาพประกอบ 28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าตัวประกอบการหน่วงกับความหนาสัมพัทธ์

จากตาราง 7 แสดงค่าตัวประกอบการหน่วงของการแกว่งกวัดของวัตถุแข็งเกร็งรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่มีขนาดความหนาความยาวเท่ากัน ความกว้างไม่เท่ากัน เป็นวัสดุต่างชนิดกันโดยทำการทดลองที่แอมพลิจูดเริ่มต้นต่างกัน คือที่ 2,4,6,8 และ 10 องศาตามลำดับซึ่งแต่ละค่าทำการทดลอง 10 ครั้ง สามารถหาค่าเฉลี่ยได้ดังตาราง 8

ตาราง 8 ตารางแสดงค่าตัวประกอบการหน่วง ()เฉลี่ย ที่แอมพลิจูดเริ่มต้น 2,4,6,8 และ 10 องศาของการแกว่งกวัดของวัตถุแข็งเกร็งรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่มีขนาดความหนาความยาวเท่ากัน ความกว้างไม่เท่ากัน เป็นวัสดุชนิดเดียวกัน คือ พลาสติก

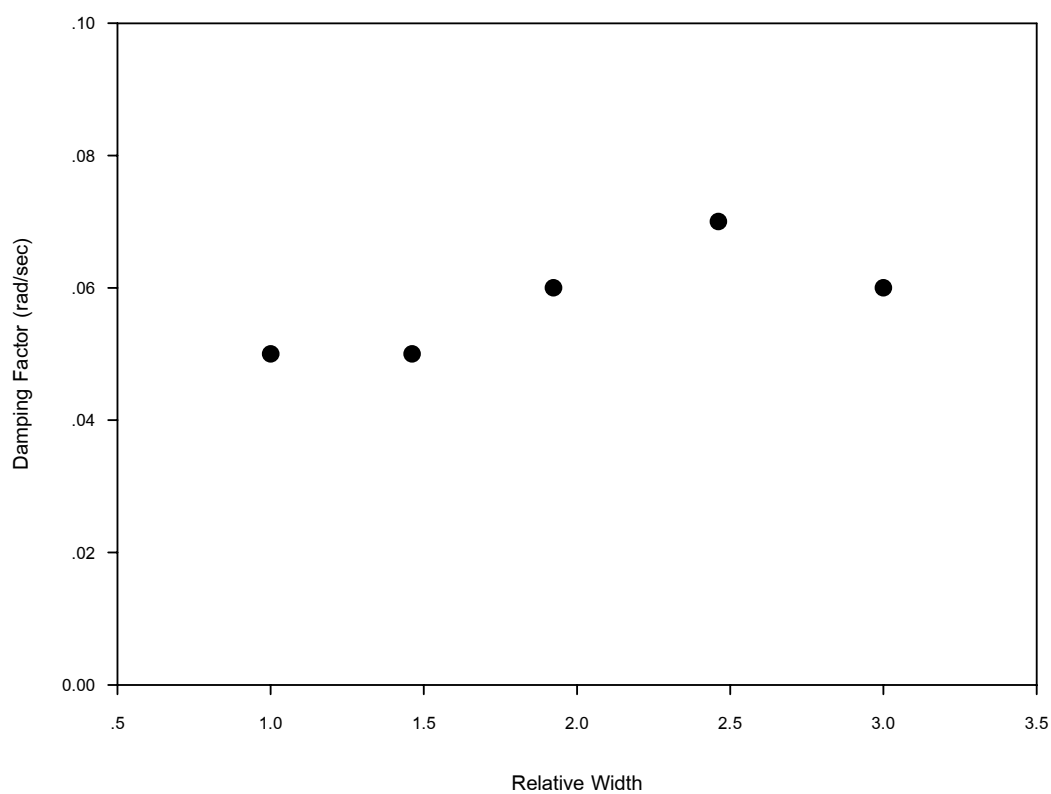
ความกว้าง	ค่าตัวประกอบการหน่วง (เรเดียน/วินาที)					ค่าเฉลี่ย (เรเดียน/วินาที)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	2 (องศา)	4 (องศา)	6 (องศา)	8 (องศา)	10 (องศา)		
1เท่า	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.005
1.5เท่า	0.04	0.06	0.06	0.05	0.06	0.05	0.008
2เท่า	0.07	0.06	0.05	0.06	0.07	0.06	0.011
2.5เท่า	0.07	0.06	0.06	0.07	0.08	0.07	0.009
3เท่า	0.07	0.05	0.04	0.07	0.08	0.06	0.015

ตาราง 9 ตารางแสดงค่าความกว้าง^{*} ความกว้างสัมพัทธ์ และตัวประกอบการหน่วงของวัตถุแข็งเกร็งรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ความกว้าง	ความกว้าง (เมตร)	ความกว้างของวัสดุ	ตัวประกอบการหน่วง (เรเดียน/วินาที)
		ความกว้างน้อยที่สุด	
1เท่า	0.026	1.0	0.05
1.5เท่า	0.038	1.5	0.05
2เท่า	0.050	1.9	0.06
2.5เท่า	0.064	2.5	0.07
3เท่า	0.078	3.0	0.06

^{*} ความกว้างสัมพัทธ์ คือ ความกว้างของฟิลิกัลเพนดูลัมเทียบกับความกว้างน้อยที่สุด

นำข้อมูลการวิจัยในตาราง 9 เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบการหน่วงกับความกว้างสัมพัทธ์ ผลการวิจัยแสดงได้ดังภาพประกอบ 29



ภาพประกอบ 29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบการหน่วงกับความกว้างสัมพัทธ์

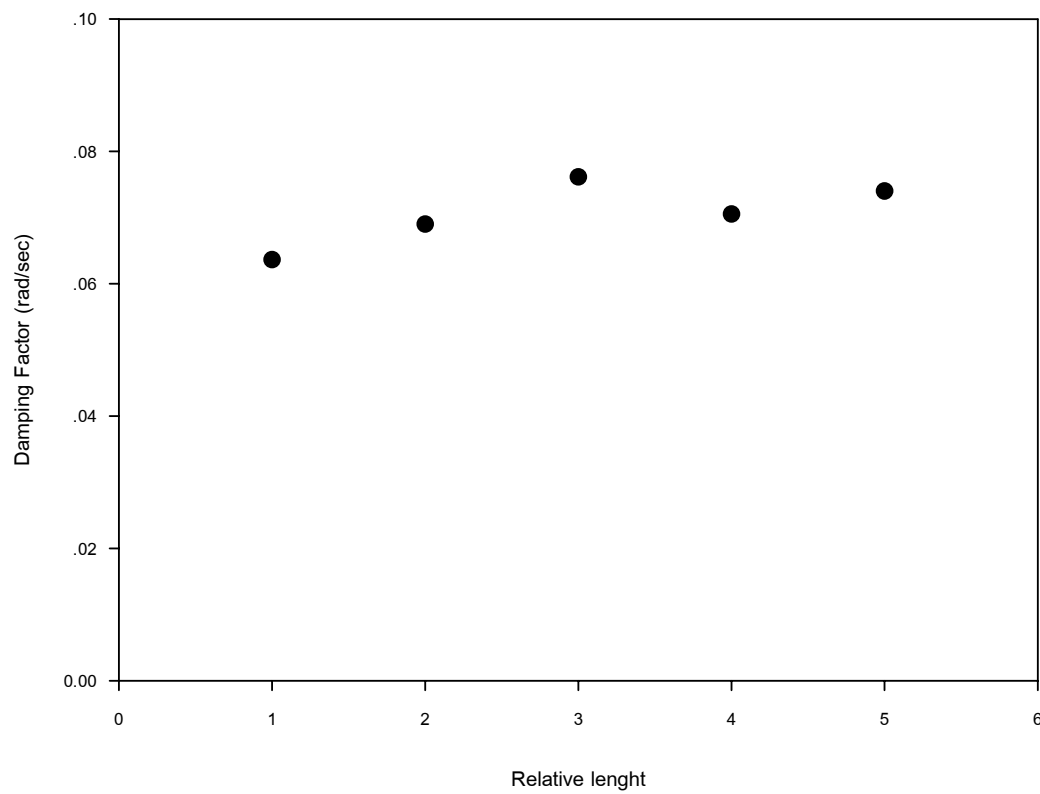
กรณีที่ 4 วัตถุแข็งเกร็งรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่มีขนาด ความกว้าง 2.6 เซนติเมตร ความหนา 0.22 เซนติเมตร เท่ากัน 5 ระบบ แต่ละระบบมีความยาวไม่เท่ากัน ได้แก่ 10 เซนติเมตร 20 เซนติเมตร 30 เซนติเมตร 40 เซนติเมตร 50 เซนติเมตร และแต่ละระบบทำจากวัสดุชนิดเดียวกัน คือ พลาสติก โดยทำการทดลองที่แอมพลิจูดเริ่มต้นที่ 6 แสดงผลการวิจัยได้ดัง ตาราง 10

ตาราง 10 ตารางแสดงค่าความยาว^{*} ความยาวสัมพันธ์ และตัวประกอบการหน่วงของวัตถุแข็งเกร็งรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ความยาว	ความยาว (เมตร)	ความยาวของวัสดุ	ตัวประกอบการหน่วง (เรเดียโนวินาที)
		ความยาวน้อยที่สุด	
1เท่า	0.01	1.0	0.06
2เท่า	0.02	2.0	0.07
3เท่า	0.03	3.0	0.08
4เท่า	0.04	4.0	0.07
5เท่า	0.05	5.0	0.07

นำข้อมูลการวิจัยในตาราง 10 เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบการหน่วงกับความยาวสัมพันธ์ ผลการวิจัยแสดงได้ดังภาพประกอบ 30

* ความยาวสัมพันธ์ คือ ความยาวของฟิลิกัลเพนดูลัมเทียบกับความยาวน้อยที่สุด



บทที่ 5

สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

สรุปการวิจัย

การทดลองและวิเคราะห์การแกว่งกวัดของฟิลิ์กัลเพนดูลัม หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่การหน่วงกับตัวแปรต่างๆ ของฟิลิ์กัลเพนดูลัมรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยแบ่งออกเป็น 4 กรณีดังนี้

1. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่การหน่วงกับความหนาแน่น()ของฟิลิ์กัลเพนดูลัม โดยเลือกใช้วัตถุแข็งเกร็งรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีรูปร่างและขนาดเท่ากัน 5 ชิ้น แต่ใช้วัสดุต่างชนิดกัน จากการทดลองพบว่า เมื่อความหนาแน่นของฟิลิ์กัลเพนดูลัมมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าตัวประกอบการหน่วง() มีค่าลดลง และตัวประกอบการหน่วง()แปรผกผันกับความหนาแน่น(ภาคผนวกค) ดังนั้นจากสมการ (32) คือ $\gamma = \frac{3\beta}{2 \rho a b^3 c}$ แสดงให้เห็นว่าค่าคงที่การหน่วง() มีแนวโน้มไม่เปลี่ยนตามการเพิ่มของความหนาแน่นของฟิลิ์กัลเพนดูลัม

2. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่การหน่วงกับความหนา(c)ของฟิลิ์กัลเพนดูลัม โดยเลือกใช้พลาสติกรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่มีความกว้างและความยาวเท่ากัน 5 ชิ้น แต่ละชิ้นมีความหนาแตกต่างกัน ผลทดลองพบว่าเมื่อความหนาของฟิลิ์กัลเพนดูลัมมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าตัวประกอบการหน่วง()มีค่าลดลง และตัวประกอบการหน่วง()แปรผกผันกับความหนาของฟิลิ์กัลเพนดูลัม (ภาคผนวกค) ดังนั้นจากสมการ (32) คือ $\gamma = \frac{3\beta}{2 \rho a b^3 c}$ แสดงให้เห็นว่าค่าคงที่การหน่วง() มีแนวโน้มไม่เปลี่ยนตามการเพิ่มของความหนาของฟิลิ์กัลเพนดูลัม

3. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่การหน่วงกับความกว้าง(a)ของฟิลิ์กัลเพนดูลัม โดยเลือกใช้พลาสติกรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่มีความยาวและความหนาเท่ากัน 5 ชิ้น แต่ละชิ้นมีความกว้างแตกต่างกัน ผลการทดลองพบว่า เมื่อความกว้างของฟิลิ์กัลเพนดูลัม มีค่าเพิ่มขึ้นค่าตัวประกอบการหน่วง() ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงที่เด่นชัดอาจถือได้ว่าค่าตัวประกอบการหน่วง() มีแนวโน้มคงที่ ดังนั้นจากสมการ (32) คือ $\gamma = \frac{3\beta}{2 \rho a b^3 c}$ แสดงให้เห็นว่า ค่าคงที่การหน่วง() น่าจะเปลี่ยนตามการเพิ่มความกว้างของฟิลิ์กัลเพนดูลัม

4. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่การหน่วงกับความยาว(b)ของฟิลิ์กัลเพนดูลัม โดยเลือกใช้พลาสติกรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่มีความกว้างและความหนาเท่ากัน 5 ชิ้น แต่ละชิ้นมีความยาวแตกต่างกัน ผลการทดลองพบว่า เมื่อความยาวของฟิลิ์กัลเพนดูลัมมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าตัว

ประกอบการณ์ () ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงที่เด่นชัดอาจถือได้ว่าค่าตัวประกอบการณ์ () มีแนวโน้มคงที่ ดังนั้นจากสมการ (32) คือ
$$\gamma = \frac{3\beta}{2\rho ab^3c}$$
 แสดงให้เห็นว่า ค่าคงที่การการณ์ () น่าจะเปลี่ยนตามการเพิ่มของความยาวฟิลิ์กัลเพนดูลัม

ดังนั้นการวิจัยนี้สรุปว่า ค่าคงที่การการณ์ของฟิลิ์กัลเพนดูลัมน่าจะขึ้นกับความกว้างและความยาวของฟิลิ์กัลเพนดูลัม ไม่น่าจะขึ้นกับความหนาแน่นและความหนาของฟิลิ์กัลเพนดูลัม

อภิปรายผลการทดลอง

ในการศึกษาการแกว่งกวัดแบบการณ์ของฟิลิ์กัลเพนดูลัมรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า พบว่า ค่าคงที่การการณ์ไม่ขึ้นกับความหนาแน่นและความหนาของฟิลิ์กัลเพนดูลัม ดังนั้นสำหรับฟิลิ์กัลเพนดูลัมที่มีความกว้าง ความยาวเท่ากันและเป็นวัสดุชนิดเดียวกัน ค่าคงที่การการณ์น่าจะเท่ากัน ในการวิจัยพบว่าค่าคงที่การการณ์ในกรณีของฟิลิ์กัลเพนดูลัม ที่มีความกว้าง 0.026 เมตร ความยาว 0.300 เมตร ความหนา 0.0022 เมตร เท่ากัน 5 ระบบ แต่ความหนาแน่นต่างกัน มีค่าคงที่การการณ์ประมาณ 5.3×10^{-5} นิวตัน*เมตร*วินาที (แสดงในภาคผนวก ค) และค่าคงที่การการณ์ของฟิลิ์กัลเพนดูลัมในกรณีที่ฟิลิ์กัลเพนดูลัม มีความกว้าง 0.026 เมตร ความยาว 0.300 เมตร เท่ากัน 5 ระบบ และเป็นวัสดุชนิดเดียวกัน คือพลาสติก ซึ่งมีความหนาแน่น 1200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร แต่ความหนาต่างกัน มีค่าคงที่การการณ์ประมาณ 6.2×10^{-5} นิวตัน*เมตร*วินาที จะเห็นได้ว่าค่าคงที่ของทั้ง 2 กรณี มีค่าไม่เท่ากัน สาเหตุคือ ค่าคงที่การการณ์ไม่ใช่ค่าคงที่เนื่องจากแรงต้านของอากาศเพียงอย่างเดียวแต่มาจากแรงเสียดทานเนื่องจากแกนหมุนด้วย ถึงแม้ว่าในการทดลองจะระมัดระวังแรงเสียดทานเนื่องจากแกนหมุนแล้ว โดยการออกแบบและสร้างแกนหมุนของฟิลิ์กัลเพนดูลัมเป็นใบมีด แต่แรงเสียดทานเนื่องจากแกนหมุนนี้ก็ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้

นอกจากนี้การแกว่งกวัดแบบการณ์ของฟิลิ์กัลเพนดูลัม โดยใช้เครื่องตรวจวัดการเคลื่อนที่วัดตำแหน่งของฟิลิ์กัลเพนดูลัม ณ เวลาใดๆ และแสดงผลการวัดในรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง แอมพลิจูดที่ลดลงกับเวลา แล้วทำการปรับเส้นโค้งหาค่าตัวประกอบการณ์ ในการทดลองพบว่า ค่าตัวประกอบการณ์ ในกรณีที่ฟิลิ์กัลเพนดูลัมเป็นวัสดุต่างชนิดกัน คือ กระดาษ พลาสติก แก้ว อะลูมิเนียม สแตนเลส พบว่าฟิลิ์กัลเพนดูลัมที่ใช้วัสดุเป็นกระดาษ ค่าตัวประกอบการณ์มีความคลาดเคลื่อนสูง สาเหตุน่าจะมาจากกระดาษมีน้ำหนักเบา ในขณะที่ทำการทดลองอาจจะมีแรงลมเนื่องจากเครื่องปรับอากาศมากระทำ และการกระจายของเนื้อสารไม่สม่ำเสมอ

ข้อเสนอแนะ

1.การออกแบบและสร้างชุดการทดลองการแกว่งกวัดของเพนดูลัมทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า หากต้องการให้ผลการทดลองมีความเที่ยงตรงมากขึ้น สามารถทำได้โดยจัดให้ใบมีด (ภาพประกอบ 21) อยู่ในแนวเดียวกันมากที่สุด เพราะจะทำให้ฟิสิกัลเพนดูลัมวางตัวในแนวดิ่งและตั้งฉากกับแนวระนาบ น้ำหนักของฟิสิกัลเพนดูลัมจะตกที่ใบมีดทั้งสองใบเท่ากัน และปรับแกนหมุนให้มีความฝืดน้อยที่สุด

2.งานวิจัยที่น่าจะทำต่อไป คือ หาตัวคงที่ของค่าคงที่การหน่วงสำหรับการแกว่งกวัดแบบหน่วงต่ำของฟิสิกัลเพนดูลัม

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- นิรมล ปิตะนีละผิน. (2535). *กลศาสตร์*. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ. (2540). *กลศาสตร์เชิงวิเคราะห์*. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สุรสิงห์ ไซยคุณ. (2531). *กลศาสตร์เบื้องต้น*. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- Fowles, G.R., Cassiday, G.L. (1999). *Analytical Mechanics*. 6th ed. Harcourt Brace College.
- Goldstein, H. (1980). *Classical Mechanics*. 2nd ed. United. Addison-Wesley.
- Grant, R. & Fowles, G.L. (1998). *Analytical Mechanics*. Casseday Saunders College Publishing Harcourt Brace College Publishers. P.316
- Halliday, D., Resnick, R., and Walker, J., (2001). *Fundamentals of Physics : Extended*. 6th ed. John Wiley & Sons.
- Iain, G.M. (1993). *Vibrations and Waves in Physics*. 3rd ed. Cambridge University Press.
- Matveev, A.N, (1989). *Mechanics and Theory of Relativity*. Mir Publishers. P.232-235
- Ochoa, O.R, Kolp, N.F. (1997). *The Computer Mouse as a Data Acquisition Interface : Application to Harmonic Oscillators*. American Association of Physics Teachers. (65). : 1115 -1118.
- Pagonis, V., et.al. (1997). *Effects of Air Resistance*. The Physics Teacher. (35). : 364-368
- Raymond, A.S., Robert, J.B. (2000). *Physics of Scientists and Engineers with Modern Physics*. 5th.ed. Sanders College Publishing : USA.
- Reese, R.L, (1998). *University Physics*. Brooks/Cole Publishing Company. P.440
- Serway,R.A. & Faughn,J.S. (2000). *College Physics*.5.ed.Saunders College Publishing.P.419
- Young,H.D. & Freedman,R.A. (1999). *University Physics*. p.412. 9th ed. Addison – Wesley Publishing Company,INC.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การเปรียบเทียบการจัดเชิงเส้นเป็นการจัดเชิงมุม

การเปรียบเทียบการกระจัดเชิงเส้นเป็นการกระจัดเชิงมุม

ในการทดลองการแกว่งกวัดของวัตถุแข็งเกร็งรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าใช้เครื่องตรวจวัดการเคลื่อนที่วัดและเก็บบันทึกข้อมูล โดยที่เครื่องตรวจวัดการเคลื่อนที่จะวัดตำแหน่งการแกว่งกวัด ณ เวลาใดๆ ซึ่งเป็นการวัดตำแหน่งของเครื่องตรวจวัดการเคลื่อนที่จะวัดในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงเส้นกับเวลา และในการทดลองผู้วิจัยได้เปรียบเทียบการกระจัดเชิงเส้นเป็นการกระจัดเชิงมุม โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. เก็บบันทึกตำแหน่งระหว่างเครื่องตรวจวัดการเคลื่อนที่กับวัตถุแข็งเกร็งที่มุมต่างๆ แสดงได้ดังตาราง 11

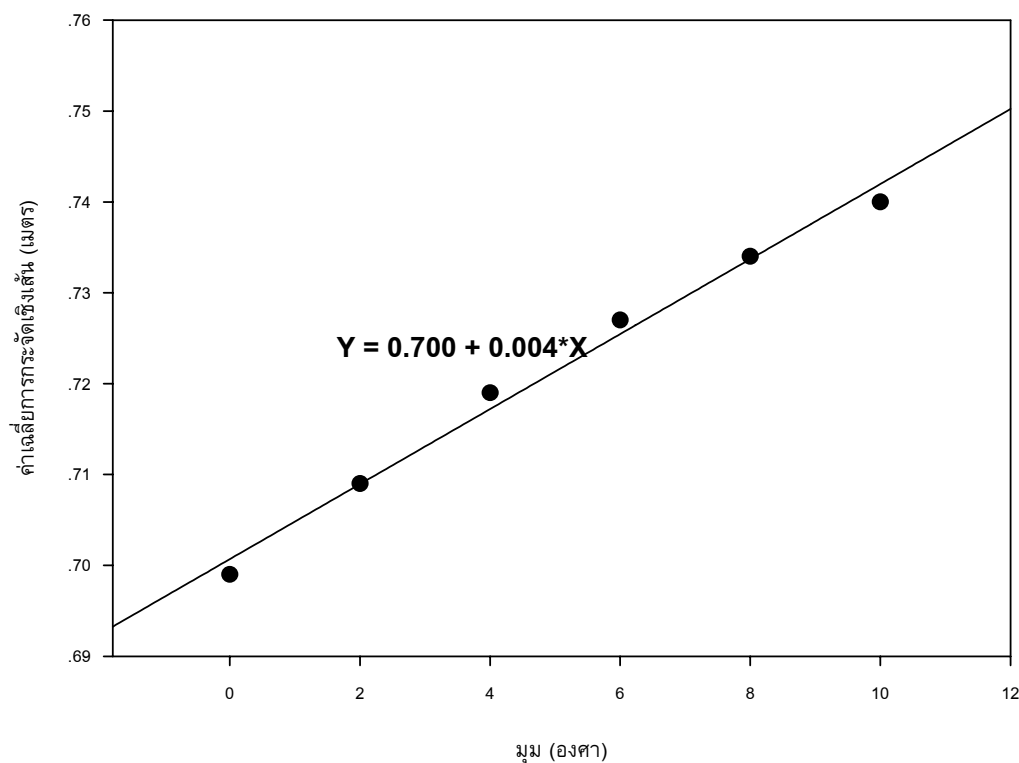
ตาราง 11 ตารางแสดงตำแหน่งระหว่างเครื่องตรวจวัดการเคลื่อนที่กับวัตถุแข็งเกร็ง ณ ตำแหน่ง 0,2,4,6,8 และ 10 องศาตามลำดับ

มุม (องศา)	ระยะทางระหว่างเครื่องตรวจวัดการเคลื่อนที่กับวัตถุแข็งเกร็ง (เมตร)										ค่าเฉลี่ย (เมตร)
	ครั้งที่										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0	0.699	0.699	0.699	0.699	0.699	0.699	0.699	0.699	0.699	0.699	0.699
2	0.709	0.709	0.709	0.709	0.709	0.709	0.710	0.710	0.709	0.709	0.709
4	0.719	0.719	0.719	0.719	0.719	0.719	0.719	0.719	0.719	0.719	0.719
6	0.727	0.727	0.727	0.727	0.727	0.727	0.727	0.727	0.727	0.727	0.727
8	0.734	0.734	0.734	0.734	0.734	0.734	0.734	0.734	0.734	0.734	0.734
10	0.740	0.740	0.740	0.740	0.740	0.740	0.740	0.740	0.740	0.740	0.740

ตาราง 12 ตารางแสดงคู่อันดับความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับค่าเฉลี่ยของการวัดการกระจัดเชิงเส้นจากเครื่องตรวจวัดการเคลื่อนที่ ณ ตำแหน่ง 0,2,4,6,8 และ 10 องศาตามลำดับ

มุม (องศา)	0	2	4	6	8	10
ค่าเฉลี่ยการวัดระยะทางเชิงเส้น (เมตร)	0.699	0.709	0.719	0.727	0.734	0.74

2. นำคู่อันดับระหว่างมุมกับค่าเฉลี่ยการกระจัดเชิงเส้น เขียนกราฟโดยกำหนดให้ แกน X แสดงความสัมพันธ์ของมุม และ แกน Y แสดงความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ยการกระจัดเชิงเส้น ผลการนำข้อมูลจาก ตาราง 12 ไปเขียนกราฟ แสดงดังภาพประกอบ 31



ภาพประกอบ 31 แสดงความสัมพันธ์ค่าเฉลี่ยการกระจัดเชิงเส้นกับมุม

ดังนั้น จากกราฟสมการเชิงเส้น จะได้ค่าคงที่ของกราฟ (Slope) เป็นการกระจัดเชิงเส้นเมื่อวัตถุแกว่งแกว่งกวัดไป 1 องศา และสามารถเขียนสมการการเปรียบเทียบของการกระจัดเชิงเส้นเป็นการกระจัดเชิงมุมได้ดังนี้

$$[@.1x \ 0.7] \times \frac{\pi}{180 \times 0.004} \quad \text{เรเดียน}$$

เมื่อ @.1x คือ ระยะระหว่างตำแหน่งของวัตถุแกว่งแกว่งกับเครื่องตรวจจับการเคลื่อนที่

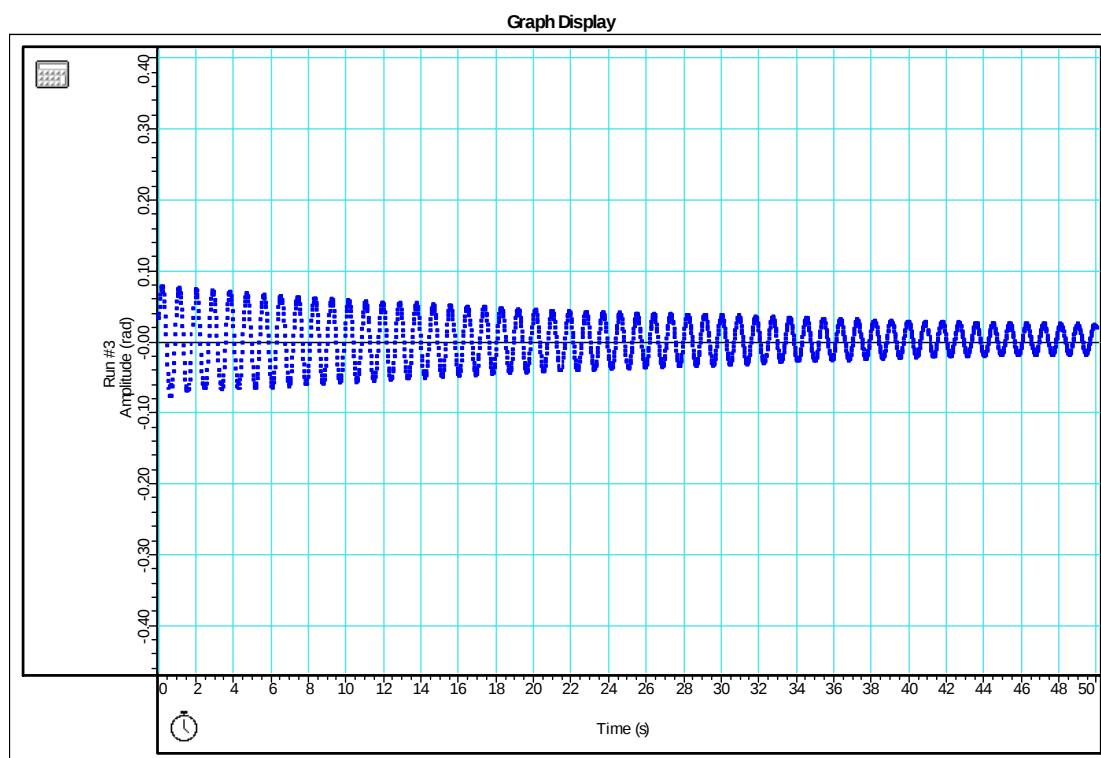
ภาคผนวก ข

ขั้นตอน การหาค่าตัวประกอบการหนึ่ง ()

การหาค่าตัวประกอบการหน่วง () จากการทดลอง

ในการทดลองการแกว่งกวัดวัตถุแข็งเกร็งรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ผลการทดลองแสดงออกมาในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา ซึ่งลักษณะการแกว่งกวัดของวัตถุแข็งเกร็งจะมีการแกว่งกวัดแบบฮาร์มอนิก ที่แอมพลิจูดค่อยๆ ลดลงตามเวลา ดังภาพประกอบ

32



ภาพประกอบ 32 แสดงลักษณะการแกว่งกวัดของวัตถุแข็งเกร็งมีการแกว่งกวัดแบบฮาร์มอนิก ที่แอมพลิจูดค่อยๆ ลดลงตามเวลา

การหาค่าตัวประกอบการหน่วง มีขั้นตอนดังนี้

1. เลือกคู่อันดับระหว่างเวลากับขนาดของแอมพลิจูด จากกราฟการทดลองประมาณ 30 – 40 คู่อันดับ
2. นำข้อมูลที่ได้จากข้อ 1 ไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดกับเวลา
3. ใช้วิธีปรับเส้นโค้งเพื่อหาค่าตัวประกอบการหน่วง โดยเทียบกับฟังก์ชันเอกซ์โปเนนเชียล ($Y = Ae^{-t}$)

การหาค่าตัวประกอบการหน่วงโดยวิธีการปรับเส้นโค้งมีรายละเอียดดังนี้

ผลการอ่านค่าแอมพลิจูดที่ลดลง ณ เวลาต่างๆ ของระบบที่มีการแกว่งกวัดแบบซิมเปิลฮาร์โมนิกส์ แสดงดังตาราง 13

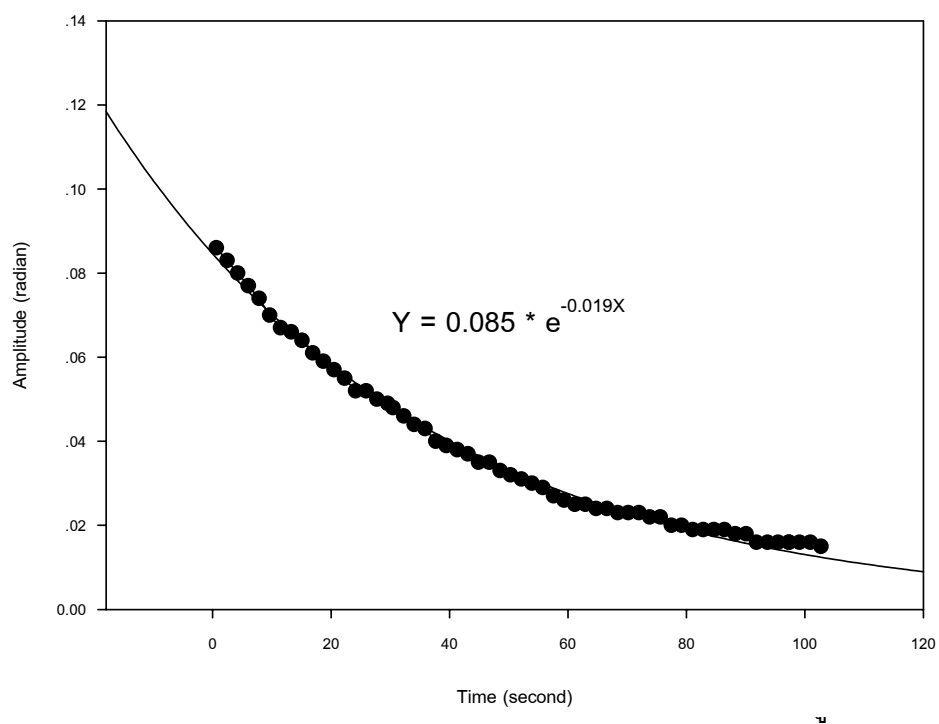
ตาราง 13 ค่าแอมพลิจูดที่ลดลง ในกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา

เวลา (วินาที)	แอมพลิจูด (เรเดียน)
0.630	0.086
2.437	0.083
4.219	0.080
6.026	0.077
7.833	0.074
9.640	0.070
11.473	0.067
13.280	0.066
15.087	0.064
16.894	0.061
18.702	0.059
20.484	0.057
22.291	0.055
24.123	0.052
25.930	0.052
27.738	0.050
29.545	0.049
30.448	0.048
32.256	0.046
34.038	0.044
35.870	0.043
37.677	0.040
39.459	0.039
41.292	0.038

ตาราง 13 (ต่อ)

เวลา (วินาที)	แอมพลิจูด (เรเดียน)
43.099	0.037
44.881	0.035
46.713	0.035
48.520	0.033
50.302	0.032
52.135	0.031
53.917	0.030
55.749	0.029
57.556	0.027
59.338	0.026

ผลการนำข้อมูลในตาราง 13 ไปเขียนกราฟ แสดงดังภาพประกอบ 33



ภาคผนวก ค

การหาค่าคงที่การหน่วงของฟิล์มฟิล์ม

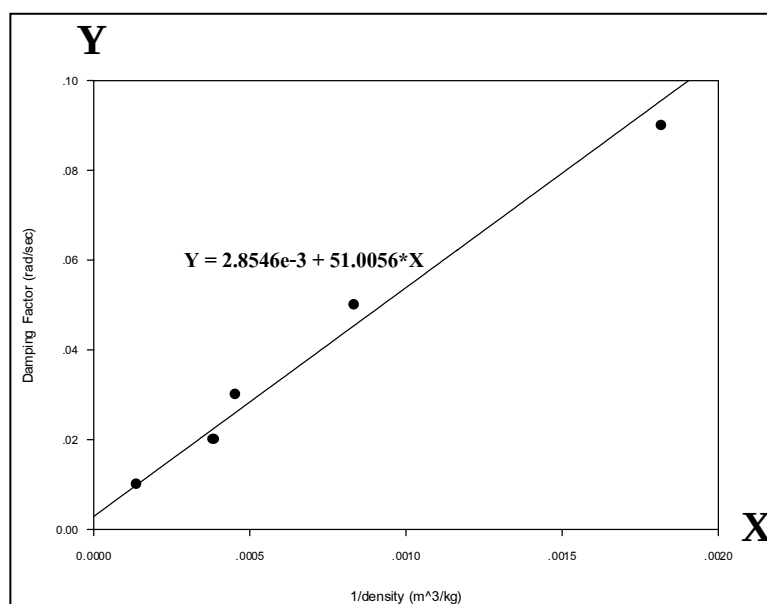
ค่าคงที่การหน่วงของฟิสิกัลเพนดูลัม ในกรณีที่ฟิสิกัลเพนดูลัม มีความกว้าง ความยาว ความหนาเท่ากัน แต่วัสดุต่างชนิดกัน รายละเอียดแสดงได้ดังตาราง 14

ตาราง 14 ตารางแสดงค่าตัวประกอบการหน่วง และความหนาแน่นของฟิสิกัลเพนดูลัมชนิดต่างๆ

ชนิดวัสดุ	ความหนาแน่น (kg/m ³)	1/ความหนาแน่น (m ³ /kg)	ตัวประกอบการหน่วง (เรเดียน/วินาที)
กระดาษอัด	550.00	0.0018	0.09
พลาสติก	1200.00	0.0008	0.05
แก้ว	2200.00	0.0005	0.03
อะลูมิเนียม	2600.00	0.0004	0.02
สแตนเลส	7200.00	0.0001	0.01

นำข้อมูลในตาราง 14 เขียนกราฟเส้นตรงตามสมการ $\gamma = \frac{3\beta}{2\rho ab^3 c}$ โดยกำหนดให้

แกน Y เป็น ค่าตัวประกอบการหน่วง และ แกน X เป็น เป็นอัตราส่วนหนึ่งต่อความหนาแน่น แสดงได้ดังภาพประกอบ 34



ภาพประกอบ 34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบการหน่วงกับหนึ่งต่อความหนาแน่นของฟิสิกัลเพนดูลัม

จากภาพประกอบ..ค่าความชันของกราฟเขียนได้

$$\text{ค่าความชัน} = \frac{3\beta}{2ab^3c} \dots\dots\dots(34)$$

แทนค่าความชัน คือ 51 ลงในสมการ (34) เขียนใหม่ได้คือ

$$51 = \frac{3\beta}{2ab^3c} \dots\dots\dots(35)$$

แทนค่า $a = 0.026$ เมตร , $b = 0.300$ เมตร, $c = 0.0022$ เมตร ลงในสมการ (35) จะได้ค่าคงที่การหน่วงคือ

$$= 5.3 \times 10^{-5} \text{ นิวตัน เมตร วินาที}$$

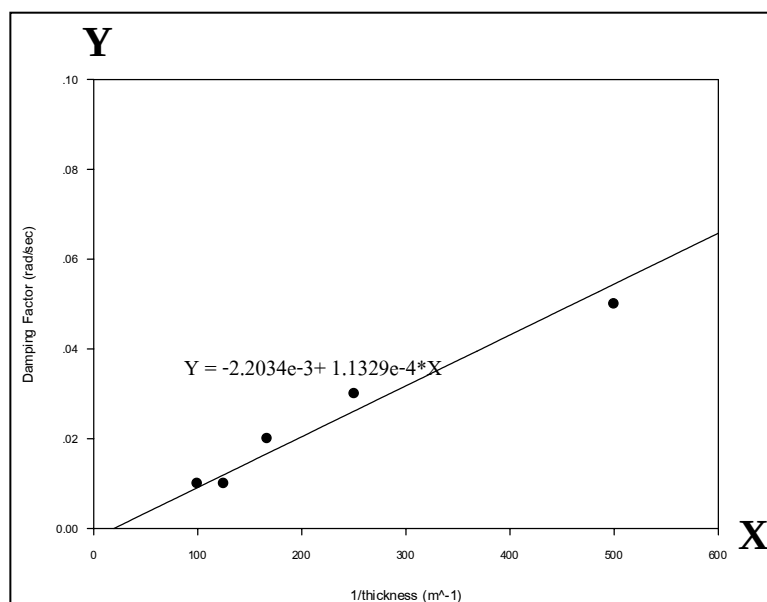
ค่าคงที่การหน่วงของฟิลิกส์เพนดูลัม ในกรณีที่ฟิลิกส์เพนดูลัม มีความกว้าง ความยาว เท่ากัน แต่ความหนาต่างกัน และเป็นวัสดุชนิดเดียวกันคือพลาสติก รายละเอียดแสดงได้ ดัง ตาราง 15

ตาราง 15 ตารางแสดงค่าตัวประกอบการหน่วง และความหนาของฟิลิกส์เพนดูลัม

ความหนา	ค่าความหนา (m)	1/ความหนา (m ⁻¹)	ตัวประกอบการหน่วง (เรเดียน / วินาที)
1 เท่า	0.0022	455	0.05
2 เท่า	0.0044	227	0.03
3 เท่า	0.0066	152	0.02
4 เท่า	0.0088	114	0.01
5 เท่า	0.0110	100	0.01

นำข้อมูลในตาราง 15 เขียนกราฟเส้นตรงตามสมการ $\gamma = \frac{3\beta}{2\rho ab^3c}$ โดยกำหนดให้

แกน Y เป็น ค่าตัวประกอบการหน่วง และ แกน X เป็น เป็นอัตราส่วนหนึ่งต่อความหนาแสดงได้ดัง ภาพประกอบ 35



ภาพประกอบ 35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบการหน่วงกับหนึ่งต่อความหนาของ เพนดูลัม

จากภาพประกอบ 35 ค่าความชันของกราฟเขียนได้

$$\text{ค่าความชัน} = \frac{3\beta}{2ab^3\rho} \dots\dots\dots(36)$$

แทนค่าความชัน คือ 1.1 ลงในสมการ (36) เขียนใหม่ได้คือ

$$1.1 \times 10^{-4} = \frac{3\beta}{2ab^3\rho} \dots\dots\dots(37)$$

แทนค่า $a = 0.026$ เมตร , $b = 0.300$ เมตร, $\rho = 1200$ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ลงในสมการ (37) จะได้ค่าคงที่การหน่วงคือ

$$= 6.2 \times 10^{-5} \text{ นิวตัน*เมตร*วินาที}$$

ฟิลิ์กัลเพนดูลัมในกรณีทีฟิลิ์กัลเพนดูลัม มีความหนา ความยาวเท่ากัน แต่ความกว้างต่างกัน และเป็นวัสดุชนิดเดียวกันคือพลาสติก รายละเอียดแสดงได้ดังตาราง 16

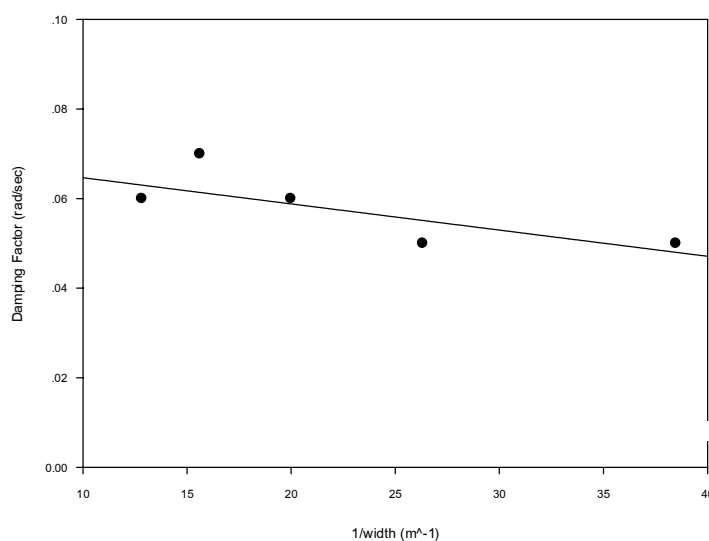
ตาราง 16 ตารางแสดงค่าตัวประกอบการหน่วง และความกว้างของฟิลิ์กัลเพนดูลัม

ความกว้าง	ค่าความกว้าง (m)	1/ความกว้าง (m-1)	ตัวประกอบการหน่วง (เรเดียน / วินาที)
1 เท้า	0.026	38	0.05
1.5 เท้า	0.038	26	0.05
2 เท้า	0.050	20	0.06
2.5เท้า	0.064	16	0.07
3 เท้า	0.078	13	0.06

นำข้อมูลในตาราง 16 เขียนกราฟเส้นตรงตามสมการ $\gamma = \frac{3\beta}{\omega \rho h^3 C}$ โดยกำหนดให้

แกน Y เป็น (

ได้ดังภาพปร



ามกว้างแน่น แสดง

ภาพประกอบ 36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบการหน่วงกับหนึ่งต่อความกว้างของฟิลิ์กัลเพนดูลัม

จากภาพประกอบ 36 ค่าตัวประกอบภาระหน่วงอยู่ในช่วงที่ถือว่าคงที่ มีค่า คือ 0.06 ± 0.008 เรเดียนต่อวินาที ดังนั้นค่าคงที่การหน่วง () จึงเปลี่ยนตามความกว้างของฟิลิกส์ เพนดูลัม

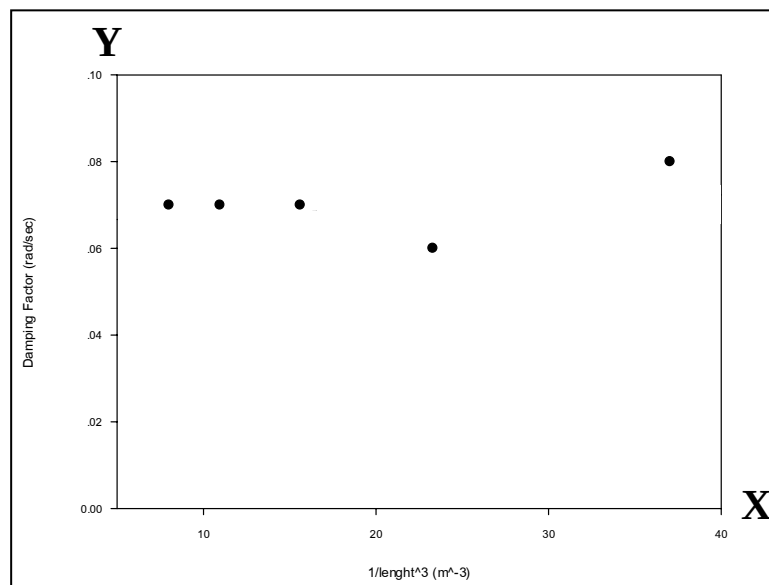
ฟิลิกส์เพนดูลัม ในกรณีที่ฟิลิกส์เพนดูลัม มีความกว้าง ความหนาเท่ากัน แต่ความยาว ต่างกัน และเป็นวัสดุชนิดเดียวกันคือพลาสติก รายละเอียดแสดงได้ดังตาราง 17

ตาราง 17 ตารางแสดงค่าตัวประกอบภาระหน่วง และความยาวของฟิลิกส์เพนดูลัม

ความยาว	ค่าความยาว	$1/(\text{ความยาว})^3$	ตัวประกอบภาระหน่วง
	(m)	(m ⁻³)	(เรเดียน / วินาที)
อันที่ 1	0.30	37.0	0.08
อันที่ 2	0.35	23.3	0.06
อันที่ 3	0.40	15.6	0.07
อันที่ 4	0.45	11.0	0.07
อันที่ 5	0.50	8.0	0.07

นำข้อมูลในตาราง 17 เขียนกราฟเส้นตรงตามสมการ $\gamma = \frac{3\beta}{2\rho ab^3c}$ โดยกำหนดให้

แกน Y เป็น ค่าตัวประกอบภาระหน่วง และ แกน X เป็น เป็นอัตราส่วนหนึ่งต่อความยาว แสดงได้ดัง ภาพประกอบ 37



ภาพประกอบ 37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบการหน่วงกับหนึ่งต่อความยาวของฟิสิกัลเพนดูลัม

จากภาพประกอบ 37 ค่าตัวประกอบการหน่วงอยู่ในช่วงที่ถือว่าคงที่ มีค่า คือ 0.07 ± 0.007 เรเดียนต่อวินาที ดังนั้นค่าคงที่การหน่วง()จึงเปลี่ยนตามความยาวของฟิสิกัลเพนดูลัม

ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ	นายสิงหา ประสิทธิ์พงศ์
เกิดวันที่	23 เมษายน 2520
สถานที่เกิด	อำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช
ที่อยู่ปัจจุบัน	1/2 หมู่ 1 ต.คลองสระ อ.กาญจนดิษฐ์ จ.สุราษฎร์ธานี 84160
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2546	กศ.ม. (ฟิสิกส์) จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
พ.ศ. 2543	กศ.บ. (ฟิสิกส์) จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
พ.ศ. 2539	มัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนนาครประสิทธิ์ จ.นครปฐม