

การสร้างและศึกษาชุดทดลองสำหรับใช้ในการเรียนการสอน
วิชาฟิสิกส์ เรื่องคลื่นและเสียง

ปริญญานิพนธ์

ของ

สังวาลย์ เฟื่องพัก

THE LIBRARY
COLLEGE OF EDUCATION
BANGKOK, THAILAND

เสนอต่อวิทยาลัยวิชาการศึกษา
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต
20 สิงหาคม 2514

การสร้างและศึกษาชุดทดลองสำหรับใช้ในการเรียนการสอนวิชาฟิสิกส์
เรื่องคลื่นและเสียง

บทคัดย่อปริิณญานินพนธ์

ของ

สังวาลย์ เฟื่องพัก

เสนอต่อวิทยาลัยวิชาการศึกษา
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต

20 สิงหาคม 2514

การสร้างและศึกษาชุดทดลองสำหรับใช้ในการเรียนการสอนวิชาฟิสิกส์เรื่องคลื่นและเสียง

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้มีความมุ่งหมายที่จะศึกษาค้นคว้าวิธีสร้างเครื่องมือ "ชุดทดลอง" เพื่อนำไปใช้ในการสาธิตและทดลองในเรื่องคลื่นและเสียง และยังมุ่งที่จะเสนอหลักเกณฑ์, วิธีสร้างและกลวิธีทำการทดลองที่ได้ผลดี เครื่องมือในชุดทดลอง ประกอบด้วยหลายชิ้นส่วนด้วยกัน ได้แก่ เครื่องกลเขียนรูปคลื่น กล้องสำหรับดูรูปคลื่นเสียง และเครื่องมือประกอบอื่น ๆ เครื่องมือเหล่านี้ได้ออกแบบและสร้างขึ้นจากวัสดุราคาถูกและหาได้ง่าย หลักเกณฑ์ทางฟิสิกส์ที่ใช้ในการออกแบบและสร้างนั้นไม่ยุ่งยากซับซ้อนจนเกินไป

เครื่องมือต่าง ๆ เหล่านี้จะอำนวยความสะดวกในการใช้ทำการสาธิตและทดลองในเรื่องต่าง ๆ เกี่ยวกับคลื่นและเสียงหลายหัวข้อด้วยกัน การทดลองนั้นมีทั้งที่ออกแบบขึ้นมาให้สอดคล้องกับชุดทดลองและมีทั้งการทดลองที่ทำกันอยู่ตามปกติ แต่ใช้เครื่องมือในชุดทดลองทำการทดลองแทน

คณะกรรมการที่ปรึกษาประจำตัวนิสิตได้พิจารณาปัญหานี้นี้แล้ว
เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาการศึกษาบัณฑิต
ของวิทยาลัยวิชาการศึกษาได้

.....สุวัฒน์ วัฒนศิริ.....ประธาน

.....สมชาย งามวิจิตร.....กรรมการ

20 สิงหาคม 2514

ประกาศคุณประการ

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ ได้รับความกรุณาให้คำแนะนำและความช่วยเหลือ
อย่างดียิ่งจาก อาจารย์ ประชาน พัฒนชีรยานนท์ ประธานกรรมการที่ปรึกษา อาจารย์
สมบูรณ์ รมแก้ว กรรมการที่ปรึกษา และผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมทรง วิสกุล ผู้เขียน
ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

สังวาลย์ เพ็งพัก

สารบัญ

บทที่		หน้า
1	บทนำ	1
	คำนำ	1
	ความมุ่งหมายของการศึกษาคนควา	3
	ความสำคัญของการศึกษาคนควา	3
	ขอบเขตของการศึกษาคนควา	4
	กำนินยามศัพท์เฉพาะ	4
	เอกสารที่เกี่ยวข้องกับการคนควา	4
2	หลักเกณฑ์และวิธีออกแบบสร้างชุดทดลอง	10
	1. เครื่องกลเขียนรูปคลื่น	10
	2. Oscilloscope	21
	3. เครื่องมืออื่น ๆ ที่ใช้ประกอบการทดลอง	28
	3.1 เครื่องขยายเสียง	28
	3.2 หัวเก็บสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าและแทนสำหรับ ซึ่งเสถียร	29
	3.3 Electronic Audio Oscillator	31
	3.4 Resonance tube	32
3	การสาธิต ทดลอง และ อภิปราย	34
	1. Simple Harmonic Motion	34
	2. Sine Wave, Harmonics and Combination of Harmonics	37
	3. Lissajous' Figures	47
	4. Pitch, Overtone and Quality of Sound	51

	5. Beat of Two Waves	56
	6. Resonance and Determination the Speed of Sound	59
4	บทสรุป และเสนอแนะ	62
	บรรณานุกรม	66

บัญชีตาราง

ตารางที่		หน้า
1	แสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วน $f_1 : f_2 : f_3$ กับรัศมีของดอ	16
2	ตารางสำหรับอธิบายประกอบรูปที่ 14	46

บัญชีภาพประกอบ

รูปที่		หน้า
1	Diagram ของระบบคาน	12
2	Diagram ของระบบแท่นหมุน	15
3	ส่วนประกอบของเครื่องกลเขียนรูปคลื่น	19
4	ส่วนประกอบของแท่นหมุน และการจัดเครื่องกลสำหรับเขียน Lissajous' figures	20
5	ส่วนประกอบบางส่วนของ Oscillobox	24
6	รายละเอียดภายในของ Oscillobox	26
7	ส่วนหนึ่งของ Oscillobox	27
8	Block diagram ของเครื่องขยาย และ Schematic diagram ของ Power supply	29
9	หัวเก็บสัญญาณและแท่นชิงดวก	30
10	D.C. Transformer (ก) และ Audio Oscillator (ข) ...	31
11	Resonance tube	33
12	อนุภาค p เคลื่อนที่เป็นวงกลมรัศมี R ด้วยความเร็วสม่ำเสมอ v ตามแนวเส้นรอบวง	35
13	Sine waves	42
14	Sine waves and combination of sine waves	45
15	Lissajous' figures เขียนโดยเครื่องกลเขียนรูปคลื่น	48
16	Lissajous' figures (ก) และรูปคลื่นแบบต่าง ๆ (ข) ที่ถ่ายจาก Oscillobox	49
17	Beat ของ Sine wave 2 คลื่นที่มีความถี่ใกล้เคียงกัน เขียนโดยเครื่องกลเขียนรูปคลื่น	57

บทนำ

คำนำ

✓ การเรียนการสอนวิทยาศาสตร์มีอิทธิพลต่อความเจริญก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และความเจริญก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนี้เอง ที่คนโดยทั่วไปมักจะใช้เป็นเครื่องชี้ความแตกต่างระหว่างประเทศด้อยพัฒนากับประเทศพัฒนา

✓ นักวิทยาศาสตร์และช่างเทคนิคที่มีฝีมือ นับเป็นปัจจัยสำคัญของความเจริญก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี การผลิตและฝึกฝนนักวิทยาศาสตร์และช่างเทคนิคนี้ มีปัญหาและอุปสรรคนานาประการ โดยเฉพาะในประเทศด้อยพัฒนาโดยทั่วไปแล้ว มักจะประสบปัญหาคล้ายคลึงกันที่สำคัญคือ ปัญหาขาดแคลนครูวิทยาศาสตร์ที่สามารถ และปัญหาขาดแคลนวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ อันนับว่าเป็นหัวใจสำคัญของการเรียนการสอนวิทยาศาสตร์ (Bergvall and Joel, 1965:1) นอกจากนี้ยังมีปัญหาอื่นที่เกี่ยวข้องอีกมากมาย ปัญหาการผลิตครูวิทยาศาสตร์ที่สามารถนั้น เป็นปัญหาที่ซึ่งต้องลงทุนมาก ต้องอาศัยเวลาและความร่วมมือจากบุคคลหลายฝ่าย จึงจะสามารถแก้ไขได้ แต่สำหรับปัญหาขาดแคลนวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์นั้น อยู่ในขีดความสามารถของครูสอนวิทยาศาสตร์ที่จะแก้ไขได้ ✓

เมื่อก่อนนั้น การทดลองวิทยาศาสตร์เป็นเรื่องของครูที่จะทำการทดลองหรือสาธิต ส่วนนักเรียนนั้นเป็นเพียงผู้สังเกต (Knecht, 1968:212) แต่ในปัจจุบันมีแนวโน้มที่จะให้นักเรียนแต่ละคนได้มีโอกาสที่จะทำการทดลองด้วยตนเอง (Knecht, 1968:114, 212, Bergvall and Joel, 1965:2) ส่วนครูจะเป็นผู้คอยดูแลให้ความช่วยเหลือเมื่อนักเรียนเกิดปัญหาหรือข้อผิดพลาด (Knecht, 1968:114) การให้นักเรียนได้ทำการทดลองด้วยตนเองนั้น เป็นการเรียนรู้จากประสบการณ์ตรง ซึ่งจะสร้างความเข้าใจและทราบซึ่งให้แก่ นักเรียนได้ดีเยี่ยมกว่าวิธีอื่นใด (Gage, 1963:1144) ฉะนั้น การจัดหาอุปกรณ์ที่จะใช้ในห้องปฏิบัติการให้เพียงพอแก่จำนวนนักเรียนจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง

✓ การเรียนการสอนวิทยาศาสตร์นั้น ถ้าเน้นหนักทางวิธีการทางวิทยาศาสตร์มากกว่าเนื้อหาวิชาแล้ว อุปกรณ์ที่สร้างจากวัสดุราคาถูก และการทดลองอย่างง่าย ๆ จะเข้ามามีบทบาทในการเรียนการสอนวิทยาศาสตร์ (Knecht, 1968:212) เพราะการสาธิตทดลองทางวิทยาศาสตร์ที่ถื่นนั้น ไม่จำเป็นว่าจะต้องใช้อุปกรณ์หรือเครื่องมือราคาแพงเสมอไป (UNESCO, 1966:177)

ปัจจุบันมีโครงการเกี่ยวกับการปรับปรุงการเรียนการสอนวิทยาศาสตร์ในประเทศต่าง ๆ หลายโครงการด้วยกัน ที่สำคัญได้แก่ Harvard Project ของสหรัฐอเมริกา Nuffield Project ของสหราชอาณาจักร โดยส่วนรวมไ้มุ่งที่จะศึกษาค้นคว้าหาวิธีการที่จะสอนวิทยาศาสตร์โดยใช้เทคนิคและอุปกรณ์ใหม่ ๆ โครงการเหล่านี้มักจะเน้นหนักในการจัดสร้างชุดเครื่องมือทดลองเพื่อใช้ประกอบกับการสอนในเนื้อหาแต่ละตอน ซึ่งได้รับการแก้ไขปรับปรุงและจัดวางลำดับอย่างเหมาะสม โดยผู้เชี่ยวชาญทั้งทางวิทยาศาสตร์และทางการศึกษา วัสดุอุปกรณ์ในชุดเครื่องมือ นั้น อาจได้มาจากการปรับปรุงจากของเดิมหรือเกิดจากความคิดริเริ่มใหม่ ๆ ของบุคคลต่าง ๆ ที่มีส่วนรวมในโครงการ (Bergvall and Joel, 1965:2)

สภาพการเรียนการสอนวิทยาศาสตร์ในประเทศไทยโดยทั่วไปแล้ว ยังนับว่าล้าหลังอยู่ ปัญหาการขาดแคลนครูวิทยาศาสตร์ที่สามารถ และปัญหาขาดแคลนอุปกรณ์สำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ ยังคงเป็นปัญหาที่มีความสำคัญเป็นอันดับแรก วัสดุอุปกรณ์ส่วนใหญ่ต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศ ซึ่งย่อมจะมีผลกระทบกระเทือนถึงฐานะเศรษฐกิจของประเทศ อุปกรณ์บางอย่างก็ได้รับจากองค์การช่วยเหลือระหว่างประเทศบางองค์การ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะไม่เหมาะสมกับเนื้อหาในหลักสูตร ผู้สอนจึงมักจะประสบปัญหาที่ว่า มีอุปกรณ์อยู่มากก็จริง แต่หาได้ใช้ให้เป็นประโยชน์เท่าที่ควรไม่ (UNESCO, 1969:24)

✓ วิชาฟิสิกส์เป็นสาขาวิชาวิทยาศาสตร์ที่ผู้เขียนมีความสนใจเป็นอย่างยิ่ง และเห็นว่า การเรียนการสอนวิชาฟิสิกส์ยังมีปัญหาอยู่มาก โดยเฉพาะเกี่ยวกับการทดลองในห้องปฏิบัติการ ยังประสบปัญหาขาดแคลนอุปกรณ์ เครื่องมือเครื่องใช้ในการทดลอง เครื่องมือส่วนใหญ่ต้องซื้อมาด้วยราคาแพง ผู้เขียนมีความเห็นว่า เราน่าจะใช้เครื่องมือราคาถูกหรืออาจจะสร้างขึ้นเองโดยใช้วัสดุราคาถูกหรือหาได้ง่ายมาทดแทนได้ โดยที่จะสามารถทำให้

ผู้เรียนมีความเข้าใจและทราบซึ่งในทฤษฎีหรือกฎเกณฑ์ทางฟิสิกส์ได้ก็เท่า ๆ กับการใช้เครื่องมือรากาแพงทำการทดลอง

เรื่องคลื่นและเสียงเป็นหัวข้อสำคัญอันหนึ่งในวิชาฟิสิกส์ที่ผู้เขียนเห็นว่า มีการทดลองในห้องปฏิบัติการน้อยกว่าหัวข้ออื่น ๆ ทั้งนี้เนื่องจากว่าเป็นเรื่องที่เข้าใจค่อนข้างยาก และวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองนั้นส่วนใหญ่แล้วจะมีราคาแพง ผู้เขียนจึงได้ศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับเรื่องคลื่นและเสียง เพื่อหาทางออกแบบสร้างเครื่องมือสำหรับใช้ทดลองในการเรียนการสอนเรื่องคลื่นและเสียง โดยวางแนวทางการศึกษาค้นคว้าไว้ดังต่อไปนี้

ความมุ่งหมายของการศึกษาค้นคว้า

1. เพื่อศึกษาหาวิธีออกแบบและสร้างชุดทดลองสำหรับใช้ในการสาธิตและทดลองเกี่ยวกับเรื่องคลื่นและเสียง
2. เพื่อศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับแบบของการทดลอง ในเรื่องคลื่นและเสียงสำหรับใช้กับชุดทดลองที่สร้างขึ้น
3. เพื่อเสนอหลักเกณฑ์และวิธีสร้างชุดทดลอง
4. เพื่อเสนอขอบวิธีและเทคนิคในการสาธิตและทดลองที่ได้ผลดี

ความสำคัญของการศึกษาค้นคว้า

1. ผลของการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ จะช่วยชี้แนวทางให้ผู้สอนวิชาฟิสิกส์สามารถจัดสร้างชุดทดลองสำหรับเรื่องคลื่นและเสียงได้
2. เป็นการเสนอแบบการทดลองเกี่ยวกับเรื่องคลื่นและเสียง
3. ชุดทดลองที่สร้างขึ้นจะอำนวยความสะดวกในการทดลองและประหยัด

ขอบเขตของการศึกษากันกว่า

1. เกณฑ์การสร้างชุดทดลอง

1.1 สร้างจากหลักเกณฑ์ทางฟิสิกส์ที่ไม่ซับซ้อนจนเกินไป

1.2 ใช้วัสดุราคาถูกหรือหาได้ง่าย

1.3 อำนวยความสะดวกในการใช้ประหยัดเวลาในการทดลอง

2. การทดลองจะครอบคลุมในเรื่องต่อไปนี้

2.1 WAVE - Simple harmonic motion - Sine wave - Wavelength
- Frequency - Velocity - Amplitude - Phase -
Harmonics frequency - Combination of sine
waves - Lissajous figures - etc.

2.2 SOUND - Pitch - Quality - Beat - Tone and overtones -
Resonance - Speed of sound, etc.

กำนิยามศัพท์เฉพาะ

"ชุดทดลอง" หมายถึงชุดเครื่องมือที่ใช้ในการทำการทดลองเกี่ยวกับเรื่องคลื่นและเสียง ที่ผู้เขียนได้ออกแบบและสร้างขึ้น ซึ่งประกอบด้วยเครื่องมือหลายชิ้น เมื่อต้องการทำการทดลองเรื่องใด ก็เลือกเครื่องมือมาประกอบเข้าด้วยกันตามความเหมาะสม เครื่องมือชิ้นหนึ่ง ๆ สามารถนำไปใช้ทดลองได้หลายการทดลอง

เอกสารที่เกี่ยวข้องกับการศึกษากันกว่า

ในขณะนี้ มีโครงการเกี่ยวกับการพัฒนาการเรียนการสอนวิชาฟิสิกส์ในระดับต่าง ๆ อยู่หลายโครงการ ที่สำคัญได้แก่ Harvard Project Physics ของสหรัฐอเมริกา และ Nuffield Science Teaching Project ของสหราชอาณาจักร ซึ่งได้พิมพ์เอกสารออกมาเผยแพร่หลายฉบับ มีทั้งที่เป็นตำรา คู่มือครู คู่มือนักเรียน คู่มือการทดลองวารสาร และอื่น ๆ

สำหรับ Harvard Project Physics นั้น มีศาสตราจารย์ทางฟิสิกส์และทาง
การศึกษาของมหาวิทยาลัย Harvard เป็นผู้นำ และได้รวบรวมเอาบรรดาผู้สอนวิชา
ฟิสิกส์จากโรงเรียนต่าง ๆ นักฟิสิกส์ นักเคมี นักประวัติศาสตร์ทางฟิสิกส์ วิศวกร นัก-
การศึกษาฝ่ายวิทยาศาสตร์ และบุคคลอื่น ๆ จากสถาบันต่าง ๆ ทั่วสหรัฐอเมริกา เข้ามา
เป็นสมาชิกของโครงการ บุคคลเหล่านี้มีส่วนร่วมในการจัดปรับปรุงแก้ไขและลำดับเนื้อหา
วิชาฟิสิกส์ให้เหมาะสม ตลอดจนการออกแบบสร้างอุปกรณ์และออกแบบการทดลองให้เหมาะ
สกับเนื้อหาในแต่ละตอน โครงการนี้ได้รับการสนับสนุนจาก Carnegie Corporation,
The National Science Foundation, The United States Office of Educa-
tion และอื่น ๆ (Detenbeck and Dilavore, 1969:233) โครงการนี้ได้พิมพ์
เอกสารออกมาชุดหนึ่ง ซึ่งมีตำราสำหรับครูและนักเรียน คู่มือแนะนำการทดลองและวารสาร

หนังสือของ Harvard Project Physics ในชุด An Introduction to
Physics เล่ม 3 ในหัวข้อเรื่อง The Triumph of Mechanics มีอยู่บทหนึ่งที่ว่า
ด้วยเรื่องคลื่นและเสียง ซึ่งได้แบ่งเนื้อหาไว้เป็นตอน ๆ ดังต่อไปนี้ - Introduction-
Properties of Waves - Wave propagation - Periodic wave - When waves
meet : The superposition principle - A two sources interference
pattern - Standing waves - Waves fronts and diffraction - Reflec-
tion - Refraction - Sound waves ซึ่งในเนื้อหาแต่ละตอนดังกล่าว เขาได้เสนอ
วิธีการสาธิต และทดลองแทรกไว้อย่างเหมาะสม อุปกรณ์ที่ใช้ในการสาธิตและทดลองได้
แก่ ขดลวดสปริง (Slinky) เครื่องกลของเบลล์ (Bell wave machine) อ่างน้ำ
สำหรับสาธิตเกี่ยวกับคลื่น (Ripple tank) Turntable oscillator และอุปกรณ์
อื่น ๆ ที่ทางโครงการได้ออกแบบและจัดสร้างขึ้น อุปกรณ์เหล่านี้ก็นำเอาไปใช้ในการ
สาธิตและทดลองเกี่ยวกับเรื่องคลื่นและเสียงได้หลายการทดลอง ดังต่อไปนี้ - Introduc-
tion to waves - Sound - Wave propagation: a) pulse amplitude and
length b) pulse velocity - Energy transport: a) Travelling pulse
as energy transport b) absorption at a barrier (receiver, damping)
- Superposition - Reflection: a) reflection from a free end

b) reflection from the fixed end c) partial reflection at an interface where $V_1 \neq V_2$ d) dimensional reflection from barrier e) transmission (impedance, or index match) - Waves trains - Refraction: a) refraction as a function of angle b) refraction as a function of velocity c) refraction through wave shaping element (lens) - Interference pattern - Diffraction: a) diffraction around obstacles (frequency dependence) b) Single, double and multiple slit diffraction patterns - Standing waves - Two turn table oscillators [Harvard Project Physics, 1968:112 - 141 (text) 73-80, 137 - 139 (teacher's guide)]

สำหรับ Nuffield Project Physics นั้น เริ่มในปี ค.ศ. 1962 โดยได้รับการสนับสนุนจาก Nuffield Foundation ประเทศอังกฤษ ปัญหาแรกที่ทางโครงการได้แก้ไขก็คือ ปัญหาการสอนวิชาฟิสิกส์ใน 0 - level ได้พิมพ์หนังสือออกมาชุดหนึ่ง ซึ่งมีแนวความรู้ แนวทางการทดลองและหนังสืออ่านสำหรับนักเรียน เป็นต้น เล่มหนึ่งในชุดแนวทางการทดลอง ได้กล่าวถึงการทดลองเกี่ยวกับคลื่นและเสียง ซึ่งมีรายการดังต่อไปนี้

- Transverse waves along a rope - Example of wave motion: pulses and continuous waves - Wave model - Waves along a line of pupils
- Water wave seen in section - First acquaintance with a ripple tank
- Simple circular pulses in ripple tank - Simple straight pulses - Reflection of pulses by a straight barrier - Reflection at a curved barrier - Vibrator to generate continuous waves - Introduction to a stroboscope - Using a stroboscope to freeze continuous ripples - Using a stroboscope to estimate wavelengths of ripples - Reflection of a pulse by a barrier - Reflection of a straight waves by barrier
- Reflection of ripples at a circular barrier - Elliptical reflector - Watching what happens when one ripple crosses another - interference with two sources using two fingers - Interference with two sources

using vibrators - Interference using two slits - Diffraction at narrow openings in barrier and diffraction of obstacles - Refraction of ripples entering shallow water - Estimation wavelength, frequency and velocity of ripples การทดลองและเรื่องกังกลาวข้างต้น ส่วนใหญ่จะใช้อุปกรณ์ง่าย ๆ เช่นไข่ม้วนเชือกสำหรับการสาธิตเกี่ยวกับ Pulse และ transverse waves ใช้อ่างแก้วสี่รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าสาธิตให้เห็นคลื่นน้ำในภาควัด และที่ใช้มากที่สุดก็คือ อ่างน้ำสำหรับสาธิตเกี่ยวกับคุณสมบัติต่าง ๆ ของคลื่น (Ripple tank) ซึ่งเป็นอ่างแก้วสี่รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า นอกจากนี้ยังมี Stroboscope อย่างง่าย ๆ สำหรับช่วยในการมองคลื่นที่เคลื่อนที่ได้เห็นหยุดนิ่ง (The Nuffield Foundation, 1967:1-53)

การศึกษาเรื่องคลื่นมีส่วนเกี่ยวพันอยู่กับการเคลื่อนที่แบบ Simple harmonic เป็นอย่างมาก ความเข้าใจในคุณสมบัติของการเคลื่อนที่แบบ Simple harmonic เป็นพื้นฐานในการที่จะเข้าใจเรื่องคลื่นและเสียง Morris B. Abramson และ Solomon Schrier (Abramson and Schrier, 1963: 22 - 25) ได้ออกแบบและสร้างชุดเครื่องมือสาธิตเกี่ยวกับการเคลื่อนที่แบบ Simple harmonic ใช้ชื่อว่า "Simple harmonic motion and sine wave generator" ซึ่งแยกออกเป็น 3 ส่วนด้วยกัน ส่วนแรกเรียกว่า Central unit ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่เป็นวงกลมด้วยความเร็วสม่ำเสมอกับการเคลื่อนที่แบบ Simple harmonic ในแนวเส้นตรง นอกจากนี้ยังสามารถเปลี่ยนแปลงคาบเวลาของการหมุนหรือความถี่ของ Oscillation ความเร็วเชิงมุม และ Amplitude ได้ด้วย ส่วนที่ 2 เป็นส่วนสำหรับบันทึกผลการเคลื่อนที่จากส่วนแรก ก็คือส่วนแรกนั้นจะทำให้ปากกา (maker) เคลื่อนที่แบบ Simple harmonic ตามแนวคี่ง ส่วนที่ 2 เป็นส่วนที่ทำให้มวลกระดาศเคลื่อนที่ในแนวระดัับด้วยความเร็วสม่ำเสมอ ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงความเร็วของการเคลื่อนที่ได้ตามต้องการ เมื่อประกอบส่วนทั้งสองเข้าด้วยกัน ก็จะบันทึกผลการเคลื่อนที่จากส่วนแรกลงในมวลกระดาศในส่วนที่ 2 ได้ ซึ่งจะออกมาในรูปเส้นตรงในแนวคี่ง ถ้ามวลกระดาศไม่เคลื่อนที่หรือออกมาเป็นรูป Sine curves เมื่อทั้งสองส่วนเคลื่อนที่พร้อมกัน หรืออาจเป็นเส้นตรงในแนวระดัับ ถ้าส่วนแรกไม่เคลื่อนที่ ซึ่งใช้สาธิตให้เห็นการเคลื่อนที่ของคลื่น velocity,

amplitude, wavelength, frequency การเปลี่ยนแปลงความเร็วของการเคลื่อนที่ของส่วนทั้งสอง จะแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่าง ๆ ของคลื่นดังกล่าว สำหรับในส่วนที่ 3 นั้น เป็นขลวดสปริงมีน้ำหนักดวงแขวนไว้ แสดงถึงการเคลื่อนที่แบบ Simple harmonic ในแนวตั้ง ถ้านำมาประกอบกับส่วนแรกจะแสดงให้เห็นการเกิด Resonance ได้ด้วย

จะเห็นได้ว่า จากเครื่องมือที่สร้างขึ้นอย่างง่าย ๆ นี้ สามารถใช้สาธิตเกี่ยวกับคุณสมบัติต่าง ๆ ของการเคลื่อนที่แบบ Simple harmonic ได้อย่างกว้างขวางพอสมควร

ชุดเครื่องมือสาธิตและทดลองเกี่ยวกับเรื่องคลื่น ที่นิยมใช้กันมากก็คือ อ่างน้ำ สำหรับสาธิตเกี่ยวกับคลื่น (Ripple tank) จากรายงานของ UNESCO Pilot Project (Bergvall and Joel, 1965:51) ซึ่งได้ศึกษาในหัวข้อ "Physics of Light" ก็ได้จัดเอา Ripple tank รวมไว้ในชุดเครื่องมือสำหรับศึกษาคุณสมบัติและปรากฏการณ์ต่าง ๆ ของคลื่น เช่น Reflection, Refraction, Diffraction, Interference เป็นต้น โดยทำเป็นอ่างแก้วตันรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 25×20 ตารางเซนติเมตร ติดหลอดไฟไว้บนอ่างน้ำ โดยมีเสาที่ปรับระดับสูงต่ำได้ เพื่อฉายแสงให้เกิดภาพของคลื่นบนพื้นโต๊ะ แหล่งกำเนิดคลื่นใช้มอเตอร์ขนาดเล็กใช้กับถ่านไฟฉาย 1.5 โวลต์ ซึ่งสามารถปรับความเร็วของการหมุนได้ นอกจากนี้ในหนังสือคู่มือครูของ PSSC Physics (PSSC Physics, 1961:No page) ในภาคแนะนำครูเกี่ยวกับการทดลองก็ได้บรรจุ Ripple tank เข้าไว้ใน การทดลองหลายการทดลองด้วยกัน ได้แก่ Pulse in a ripple tank - Periodic waves - Refraction of waves - Waves and obstacles - Waves from two point Sources - Interference and phase - etc.

เกี่ยวกับเรื่องเสียงนั้น มีการทำการทดลองกันน้อย โดยเฉพาะในระดับต่ำกว่าอุดมศึกษา จากรายงานของประเทศญี่ปุ่น ในเอกสารของ UNESCO (Knecht, 1968:214) ได้กล่าวถึงการนำเอาเครื่องบีบอัดอากาศมาใช้ในการทดลองเกี่ยวกับเรื่องเสียง คือนำเอา Audio oscillator มาใช้แทนส้อมเสียงในการทดลองต่าง ๆ ที่ต้องใช้ส้อมเสียง ตัวอย่างการทดลองอื่น ๆ ก็ได้แก่การทดลองของ Kundt อุปกรณ์ที่ใช้ใน

การทดลองก็มีหลอดแก้วหนา เส้นผ่าศูนย์กลาง 6 ซม. ความยาว 100 ซม. ปลายข้างหนึ่งติดลำโพงเสียงขนาดเล็ก ซึ่งต่อกับ Audio Oscillator ที่มีช่วงความถี่ประมาณ 200 - 300 c/s กำลัง output ประมาณ 1 watt ปลายอีกข้างหนึ่งเป็นลูกสูบเคลื่อนไปมาได้ ถ้าปรับระยะของลูกสูบให้เหมาะสมกับความถี่ของ Oscillator แล้ว ก็จะเกิด Resonance ขึ้น ผงคอร์คที่โรยไว้ในหลอดแก้วก็จะรวมกันเป็นกระจุก ๆ ทำให้วัดความยาวคลื่นได้ ถ้าทราบความถี่ของ Oscillation ก็สามารถคำนวณหาความเร็วของเสียงในอากาศที่บรรจุในหลอดแก้วได้ อุปกรณ์ที่ได้ในการทดลองนี้ยังสามารถนำไปใช้ในการทดลองเรื่องอื่น ๆ ได้อีกหลายการทดลอง การทดลองในทำนองเดียวกันนี้ Marvin Ohriner ได้เสนอไว้ในวารสาร The Physics Teacher (Gettlieb, 1967: 242) ซึ่งเป็นการทดลองเกี่ยวกับ Kundt's tube เช่นเดียวกัน โดยใช้ Audio Oscillator ประกอบกับเครื่องขยายเสียง (output 25 watts) ที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไป หลอดแก้วใช้หลอด fluorescence ที่เสียแล้ว นำเอามาตัดปลายทั้งสองออก แล้วล้างให้สะอาด จะใช้ในการทดลองได้เป็นอย่างดี

จากการทดลองเกี่ยวกับเรื่องคลื่นและเสียงที่กล่าวถึงในเอกสารที่กล่าวถึงทั้งหมดนี้ จะเห็นได้ว่าโดยส่วนใหญ่แล้ว จะใช้เครื่องมือง่าย ๆ ราคาถูกหรือสามารถจัดสร้างขึ้นได้เองโดยไม่ยากนัก ซึ่งนับว่าเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการที่จะพัฒนาการเรียนการสอนวิชาฟิสิกส์ โดยเฉพาะในประเทศก๊อปปี้พัฒนา

หลักเกณฑ์และวิธีออกแบบสร้างชุดทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักเกณฑ์ทางฟิสิกส์ที่ได้นำมาใช้ประกอบการออกแบบและสร้างเครื่องมือต่าง ๆ ในชุดทดลอง และพร้อมกันนี้จะได้เสนอวิธีการสร้างเครื่องมือในชุดทดลองให้สอดคล้องกับหลักเกณฑ์ดังกล่าว ซึ่งจะได้อธิบายเป็นลำดับไป ดังนี้

1. เครื่องกลเขียนรูปคลื่น

ภาพที่ได้จากเครื่องกลเขียนรูปคลื่นนี้เป็นผลมาจากการเคลื่อนที่สัมพันธ์ของกระดากับปากกา ถ้าให้ปากกาเคลื่อนที่แบบ Simple harmonic ในแนวใดแนวหนึ่ง และให้กระดากเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงด้วยความเร็วสม่ำเสมอในแนวทแยงฉากกัน หรือโดยนัยตรงกันข้าม ภาพที่ปรากฏออกมาบนแผ่นกระดาษก็จะเป็น Sine curve ซึ่งใช้แทนคลื่นใน 2 มิติได้ ในกรณีที่คล้ายคลึงกันนี้ ถ้าการเคลื่อนที่ของปากกาเป็นผลรวมของการเคลื่อนที่แบบ Simple harmonic มากกว่าหนึ่งขึ้นไปตามหลักของ Superposition (Shortley and Williams, 1967 : 408) แล้ว ภาพที่ปรากฏบนแผ่นกระดาษก็จะเป็นผลลัพธ์ของรูปคลื่นที่รวมกันตามหลัก Superposition หรือโดยนัยตรงกันข้ามถ้าให้แผ่นกระดาษเคลื่อนที่แบบ Simple harmonic บาง ก็จะปรากฏผลออกมาเช่นเดียวกัน อีกอย่างหนึ่งถ้าให้ทั้งปากกาและแผ่นกระดาษเคลื่อนที่แบบ Simple harmonic พร้อม ๆ กันในทิศทางที่ต่างจากกัน ภาพที่ปรากฏบนแผ่นกระดาษก็จะเป็น Lissajous' figure

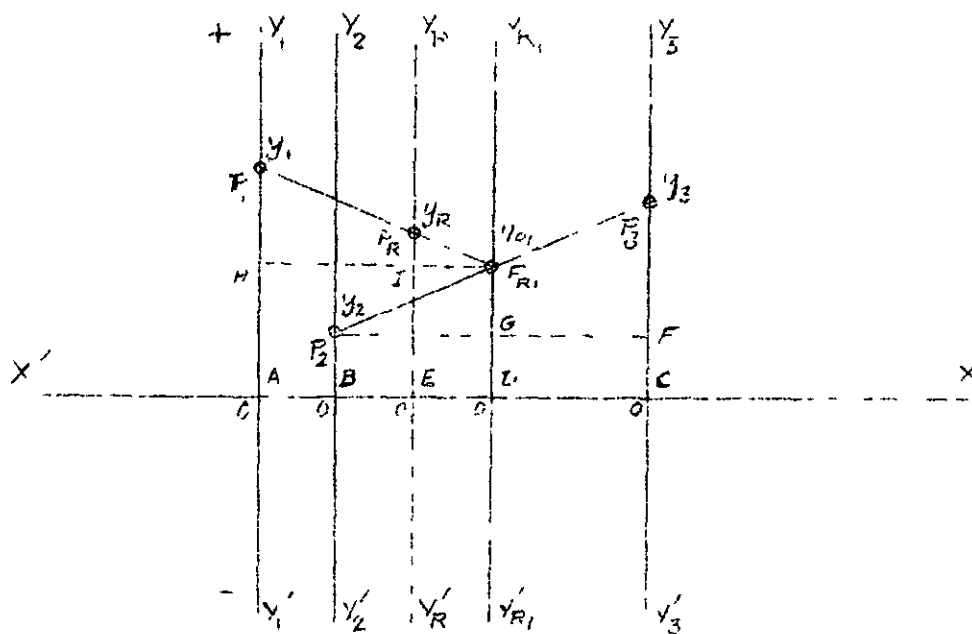
ปัญหาการออกแบบเครื่องมืออยู่ที่การออกแบบให้แผ่นกระดาษหรือปากกาเคลื่อนที่เป็นแบบ Simple harmonic โดยอาศัยตัวอย่างการเคลื่อนที่แบบ Simple harmonic ที่สมบูรณ์ที่สุดอันหนึ่งคือ การเคลื่อนที่ของ Projection ของอนุภาคที่เคลื่อนที่เป็นวงกลม

ควยความเร็วสม่ำเสมอบน X-axis หรือ Y-axis ของระบบแกนตั้งฉากที่มีจุด Origin อยู่ทุกศูนย์กลางของวงกลมที่เป็นเส้นทางของการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Shortley and Williams, 1967 : 227) แบบของเครื่องกลจึงออกมาในลักษณะของการถ่ายทอดการหมุนของจานกลมมาเป็นการเคลื่อนที่แบบ Simple harmonic

เครื่องกลที่ผู้เขียนได้ออกแบบและสร้างขึ้นมานั้น ประกอบด้วยส่วนที่จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบ Simple harmonic 3 ส่วนด้วยกัน ทุกส่วนมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เหมือนกัน คือประกอบด้วยแท่นหมุนซึ่งจะมีสายพานกลองเชื่อมกับมอเตอร์ หรือกับแท่นหมุนอื่นอัน บนแท่นหมุนจะมีสลักกลมปักตรึงไว้ แกนของแท่นหมุนจะตรึงแน่นกับแท่นหมุนควยขอ และแกนนี้จะใส่ไว้ในรูซึ่งมีขนาดพอดีที่จะทำให้แท่นหมุนหมุนไคลงตัว เหนือแท่นหมุนจะมีแท่นอีกแท่นหนึ่ง ซึ่งเคลื่อนที่ไคอย่างกลองตัวบนรางตรง แท่นนี้จะเจาะเป็นร่องตรงในทิศทางที่ตั้งฉากกับราง ร่องนี้จะใส่ไคพอดีกับสลักที่ปักไว้บนแท่นหมุน เมื่อแท่นหมุนหมุนไปรอบ ๆ ควยความเร็วสม่ำเสมอ แท่นข้างบนก็จะเคลื่อนที่ไปตามตามรางในลักษณะของ Simple harmonic motion การเปลี่ยนระยะทางระหว่างศูนย์กลางของแท่นหมุนกับสลัก ก็จะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง Amplitude ของการเคลื่อนที่ ฉะนั้น การออกแบบแท่นหมุนจึงต้องออกแบบให้สามารถปรับ Amplitude ไคอย่างต่อเนื่องกัน นับแต่ 0 เป็นต้นไปจนถึงระยะที่พอเหมาะ การเปลี่ยนแปลงความเร็วของการหมุนก็มีผลทำให้ความถี่ของ Oscillation เปลี่ยนแปลงไปควย

ปัญหาของการออกแบบเครื่องมือในอันดับต่อไปก็คือ ปัญหาการรวมการเคลื่อนที่ Simple harmonic แต่ละส่วนเข้าด้วยกัน ซึ่งอาจจะทำได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับความเหมาะสม วิธีที่ผู้เขียนเห็นว่ามีความเหมาะสม ง่าย และประหยัดก็คือใช้ระบบของคาน โดยพิจารณา

รูปที่ 1



รูปที่ 1 Diagram ของระบบก้าน

สมมุติว่า Y_1, Y_2, Y_3, Y_{R1} และ Y_R เป็นแกนที่ขนานกัน ตัดแกน xx' ที่จุด A, B, C, D และ E ตามลำดับ โดยมีเงื่อนไขว่า $BD = CD$ และ $DE = \frac{1}{3} AD$ P_1, P_2 และ P_3 เป็นอนุภาคที่เคลื่อนที่ได้อย่างอิสระตามแนวแกน Y_1, Y_2 และ Y_3 ตามลำดับ โดยมี Displacement เมื่อเทียบกับแกน xx' เป็น y_1, y_2 และ y_3 ตามลำดับ P_{R1} และ P_R เป็นอนุภาคที่เคลื่อนที่ตามแนวแกน Y_{R1} และ Y_R ตามลำดับ โดยอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่ว่า P_{R1} และ P_R จะต้องอยู่ในแนวเส้นตรง P_2P_3 และ P_1P_{R1} ตามลำดับ Displacement ของ P_{R1} และ P_R เมื่อเทียบกับแกน xx' มีค่าเป็น y_{R1} และ y_R ตามลำดับ

พิจารณารูปสามเหลี่ยม P_3P_2F กับ $P_{R_1}P_2G$ เป็นสามเหลี่ยมคล้ายจะได้ว่า

$$\frac{y_{R_1} - y_2}{y_3 - y_2} = \frac{BD}{BC} = \frac{1}{2}$$

$$\therefore y_{R_1} = \frac{1}{2}(y_3 + y_2) \dots\dots\dots(1)$$

พิจารณารูปสามเหลี่ยม $P_1P_{R_1}H$ กับ $P_RP_{R_1}I$ เป็นสามเหลี่ยมคล้ายจะได้ว่า

$$\frac{y_R - y_{R_1}}{y_1 - y_{R_1}} = \frac{DE}{AD} = \frac{1}{3}$$

$$\therefore y_R = \frac{1}{3}(y_1 + 2y_{R_1}) \dots\dots\dots(2)$$

จาก (1) + (2) จะได้

$$y_R = \frac{1}{3}(y_1 + y_2 + y_3) \dots\dots\dots(3)$$

ถ้าอนุภาค P_1, P_2 และ P_3 เคลื่อนที่แบบ Simple harmonic

ตามสมการ

$$y_1 = A_1 \sin(2\pi f_1 t + \theta_1)$$

$$y_2 = A_2 \sin(2\pi f_2 t + \theta_2)$$

$$y_3 = A_3 \sin(2\pi f_3 t + \theta_3)$$

A_1, A_2, A_3 = amplitude

f_1, f_2, f_3 = frequency

$\theta_1, \theta_2, \theta_3$ = initial phase angle

$$\therefore y_R = \frac{1}{3}A_1 \sin(2\pi f_1 t + \theta_1) + \frac{1}{3}A_2 \sin(2\pi f_2 t + \theta_2) + \frac{1}{3}A_3 \sin(2\pi f_3 t + \theta_3)$$

$$\text{ถ้าให้ } y'_1 = \frac{1}{3}y_1 = A'_1 \sin(2\pi f_1 t + \theta_1)$$

$$y'_2 = \frac{1}{3}y_2 = A'_2 \sin(2\pi f_2 t + \theta_2)$$

$$y'_3 = \frac{1}{3}y_3 = A'_3 \sin(2\pi f_3 t + \theta_3)$$

$$\therefore y_R = y'_1 + y'_2 + y'_3 \dots\dots\dots(4)$$

นั่นคือ y_R เป็นปริมาณการจัดผลิตของ y_1, y_2 และ y_3 ซึ่งนับเป็น 1 ใน 3 ของ y_1, y_2 และ y_3 ตามลำดับ

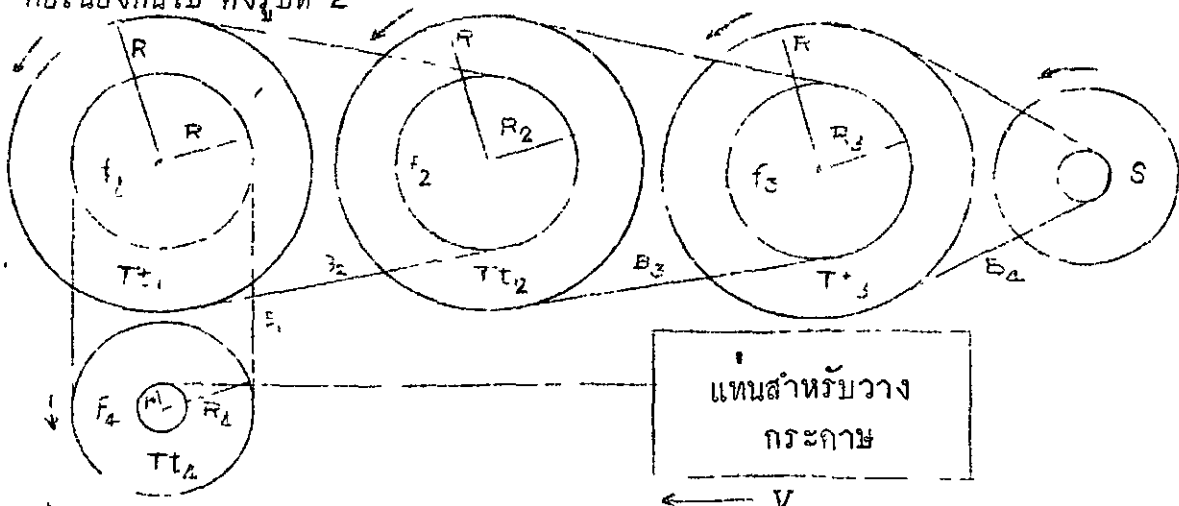
โดยอาศัยหลักเกณฑ์ที่พิจารณาแล้วข้างต้น อนุภาค P_1, P_2, P_3, P_{R1} และ P_R จะแทนด้วยสลักที่ติดอยู่บนแท่นซึ่งเคลื่อนที่ไปมาได้อย่างกลองตัวตามรางตรงที่วางไว้อย่างขนานกัน ให้ถือว่าสลัก P_1, P_2, P_3, P_{R1} และ P_R ตามลำดับ ระยะระหว่างสลักจะเป็นไปตามเงื่อนไขที่วางไว้ข้างต้น เพื่อให้ P_{R1} และ P_R อยู่ในแนวเส้นตรง P_2, P_3 และ $P_{R1}P_1$ ตามลำดับตามเงื่อนไขข้างต้นนั้น ให้ออกแบบคัน 2 อัน ความยาวมากกว่าระยะ P_2P_3 และ $P_{R1}P_1$ เล็กน้อย ทั้งนี้ วัดเมื่อจุดปลายทั้งสองเคลื่อนที่ไปไกลสุดในทิศทางตรงกันข้าม ปลายทั้งสองของคันแต่ละอันจะมาเป็นร่องยาวพอประมาณ ความกว้างของร่องพอที่จะให้สลักเคลื่อนไปมาในร่องได้พอดี ระหว่างกลางคันจะเจาะรูให้ใส่สลัก P_{R1} และ P_R ได้พอดี โดยคันอันแรกเจาะที่จุดกึ่งกลางของคัน ส่วนอันที่ 2 เจาะที่จุดห่างจากปลายข้างหนึ่งเป็นระยะ 1 ใน 3 ของความยาวคัน

เมื่อประกอบแท่นหมุน ราง แท่นและคัน เข้าด้วยกันแล้วทำให้แท่นหมุนหมุนไปด้วยความเร็วสม่ำเสมอทาง ๆ กัน แท่นที่วางอยู่บนรางก็จะเคลื่อนที่ไปมา ทั้งนี้ สลักที่ติดอยู่บนแท่นก็จะเคลื่อนตามแท่นไปด้วย สลัก P_1, P_2 และ P_3 จะเคลื่อนที่แบบซิมเปิลฮาร์โมนิก โดยมีแอมพลิจูดเท่ากับระยะทางจากจุดศูนย์กลางของแท่นหมุนไปยังสลักที่ติดอยู่บนแท่นหมุน สลัก P_{R1} จะเคลื่อนที่แบบฮาร์โมนิก ที่เป็นผลบวกของการเคลื่อนที่แบบซิมเปิลฮาร์โมนิกที่มีปริมาณการจัด ในขณะหนึ่ง ๆ เป็น 1 ใน 2 ของปริมาณการจัดของ P_2 และ P_3 ตามลำดับ ส่วนสลัก P_R นั้นจะเคลื่อนที่แบบฮาร์โมนิกที่เป็นผลบวกของการเคลื่อนที่แบบซิมเปิลฮาร์โมนิกที่มีปริมาณการจัด เป็น 1 ใน 3 ของปริมาณการจัดของ P_1, P_2 และ P_3 ตามลำดับ (ดูสมการ (1) และ (3))

ถ้าลดแอมพลิจูดของ P_1, P_2, P_3 ให้อยู่หนึ่งให้เป็น 0 สลัก P_R ก็จะเคลื่อนที่แบบซิมเปิลฮาร์โมนิก ที่มีปริมาณการจัดเท่ากับ 1 ใน 3 ของปริมาณการจัดของ P_1, P_2 หรือ P_3 ตัวใดตัวหนึ่ง ถ้าต้องการสังเกตผลบวกของการเคลื่อนที่แบบซิมเปิลฮาร์โมนิก 2 อัน ให้ลดแอมพลิจูดของ P_1, P_2 หรือ P_3 ตัวใดตัวหนึ่งให้เป็น 0 ก็จะได้ผลตามต้องการ

แทนที่คิกกับสลัก P_R นั้น จะออกแบบให้สามารถประกอบเข้าได้กับแขนสำหรับจับปากกา แขนนี้ออกแบบให้เบนไปมาได้เฉพาะในแนวตั้งได้อย่างคล่องตัว และให้สามารถปรับความยาวของแขนได้ควย แขนนี้ต้องออกแบบให้สามารถถอดออกจากแทนได้สะดวก ขึ้นต่อไปเป็นการออกแบบแทนสำหรับวางแผ่นกระดาษให้เคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของปากกา โดยออกแบบเป็นรางยาวและให้แทนนี้เคลื่อนที่อยู่บนรางอีกทีหนึ่ง เพื่อความเหมาะสมขนาดของแทนจะให้ความกว้างยาวเท่ากับครึ่งหนึ่งของกระดาษโรเนียวหน้าสั้น เมื่อพับตามขวาง และเพื่อความสะดวกในการเปลี่ยนกระดาษจะใช้แถบยางเล็ก ๆ รัศมีให้กระดาษติดอยู่กับแทน แทนนี้ต้องให้สามารถยกออกจากรางได้สะดวก เพื่อให้แทนนี้เคลื่อนไปตามรางด้วยความเร็วสม่ำเสมอ จึงได้ออกแบบแทนหมุนขึ้นมาอีกแทนหนึ่ง เพลาของแทนหมุนจะเจาะเป็นรูเล็ก ๆ สำหรับร้อยเชือก เชือกเส้นนี้จะผูกโยงอยู่กับแทน เพื่อแทนหมุนหมุนไปด้วยความเร็วสม่ำเสมอ เชือกก็จะพันรอบเพลลาของแทนหมุน ดึงเอาแทนให้เคลื่อนที่ไปตามรางด้วยความเร็วสม่ำเสมอ ซึ่งความเร็วของการเคลื่อนที่ของแทนจะขึ้นอยู่กับความเร็วของการหมุนของแทน และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเพลลาของแทนหมุน

เครื่องกลชุดนี้ผู้เขียนได้ออกแบบให้สามารถแสดงการรวมคลื่นฮาร์โมนิกต่าง ๆ (Shortley and Williams, 1967 : 422) ตั้งแต่ฮาร์โมนิกที่ 1 ถึงฮาร์โมนิกที่ 5 โดยรวมกันได้อย่างมากครั้งจะ 3 ฮาร์โมนิก เครื่องกลชุดนี้ออกแบบให้ขึ้นแหล่งจ่ายกำลังการหมุนเพียงแหล่งเดียว ซึ่งจะถ่ายทอดการหมุนไปสู่แทนหมุนควยสายพานและล้อยางต่อเนื่องกันไป ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 Diagram ของระบบแทนหมุน

Tt_1, Tt_2, Tt_3 และ Tt_4 เป็นแท่นหมุน S เป็นแหล่งจ่ายกำลังให้แก่แท่นหมุนทั้ง 4 ซึ่งต่อเชื่อมกันอยู่ด้วยสายพาน B_1, B_2, B_3 และ B_4 Tt_1, Tt_2 และ Tt_3 เป็นแท่นหมุนที่จะถ่ายทอดการหมุนไปเป็นการเคลื่อนที่แบบขีมิเปิดฮาร์โมนิก สมมุติให้ความถี่ของ Tt_1, Tt_2, Tt_3 และ Tt_4 มีค่าเป็น f_1, f_2, f_3 และ f_4 ตามลำดับ ล้อใหญ่ของแท่นหมุน Tt_1, Tt_2 และ Tt_3 มีรัศมีเท่ากันคือ R ส่วนล้อเล็กมีรัศมี R_1, R_2 และ R_3 ตามลำดับ ส่วน Tt_4 นั้นมีรัศมีของล้อ R_4 และรัศมีของเพลาเป็น r เพลาจะมีเชือกพันอยู่ปลายอีกข้างหนึ่งผูกอยู่กับแท่นสำหรับวางกระดาน เมื่อ Tt_4 หมุนจะทำให้แท่นเคลื่อนที่ตามรางเป็นเส้นตรงด้วยความเร็ว $v (=2\pi f_4 r)$ อัตราส่วน $f_1:f_2:f_3$ ขึ้นอยู่กับ R, R_2 และ R_3 ดังแสดงในตารางที่ 1

ตาราง 1 แสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วน $f_1 : f_2 : f_3$ กับรัศมีของล้อ

$f_1 : f_2 : f_3$	$R = 6 \text{ cm.}$	
	$R_2 \text{ (cm)}$	$R_3 \text{ (cm)}$
1 : 2 : 3	3	4
1 : 2 : 4	3	3
1 : 2 : 5	3	2.4
1 : 3 : 4	2	4.5
1 : 3 : 5	2	3.6
1 : 4 : 5	1.5	4.8
2 : 3 : 4	4	4.5
2 : 3 : 5	4	3.6
2 : 4 : 5	3	4.8
3 : 4 : 5	4.5	4.8

เนื่องจากมีความจำเป็นต้องเปลี่ยนขนาดต่าง ๆ กัน จึงต้องออกแบบแทน
หมุนให้เปลี่ยนได้ โดยทำแกนของแทนหมุนให้เป็นเกลียว เมื่อสวมลดลงไปแล้วก็ขัน
นอตให้แน่น เพื่อป้องกันไม่ให้สายพานหลุดจากล้อ จึงต้องมีแผ่นกลมประกบทั้งสองข้าง
ของล้ออีกทีหนึ่ง แผ่นที่ใช้ประกบแผ่นบนสุดจะติดอยู่กับแกนซึ่งมีไว้สำหรับติดสลัก แขนนี้
จะมาเป็นร่องยาวตลอด ร่องนี้มีไว้สำหรับใส่สลักซึ่งสลักนี้ตอนปลายจะทำเป็นเกลียวซึ่ง
ใส่เข้าไปในร่องไดพอดี้ สลักนี้จะขันติดแน่นกับแขนควายนอต ซึ่งสามารถจะเปลี่ยนตำแหน่ง
ของสลักได้ตามต้องการ การติดแขนตอกติดในร่องกลางผืนศูนย์กลางของแทนหมุน เพื่อให้
ให้ลอคแอมปลิจูดได้ถึง 0

รูที่มีไว้สำหรับสวมเพลลาของแทนหมุนนั้น จะติดอยู่กับฐานของเครื่อง โดยมีระยะ
ห่างระหว่างกันคงที่ ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับความยาวของคานที่กล่าวถึงข้างต้น ฉะนั้น
เมื่อมีการเปลี่ยนขนาดของล้อ จึงต้องเปลี่ยนสายพานด้วย เพื่อเป็นการประหยักระยะสายพาน
จึงใช้รอกเป็นตัวช่วยให้สายพานตึงอยู่เสมอ

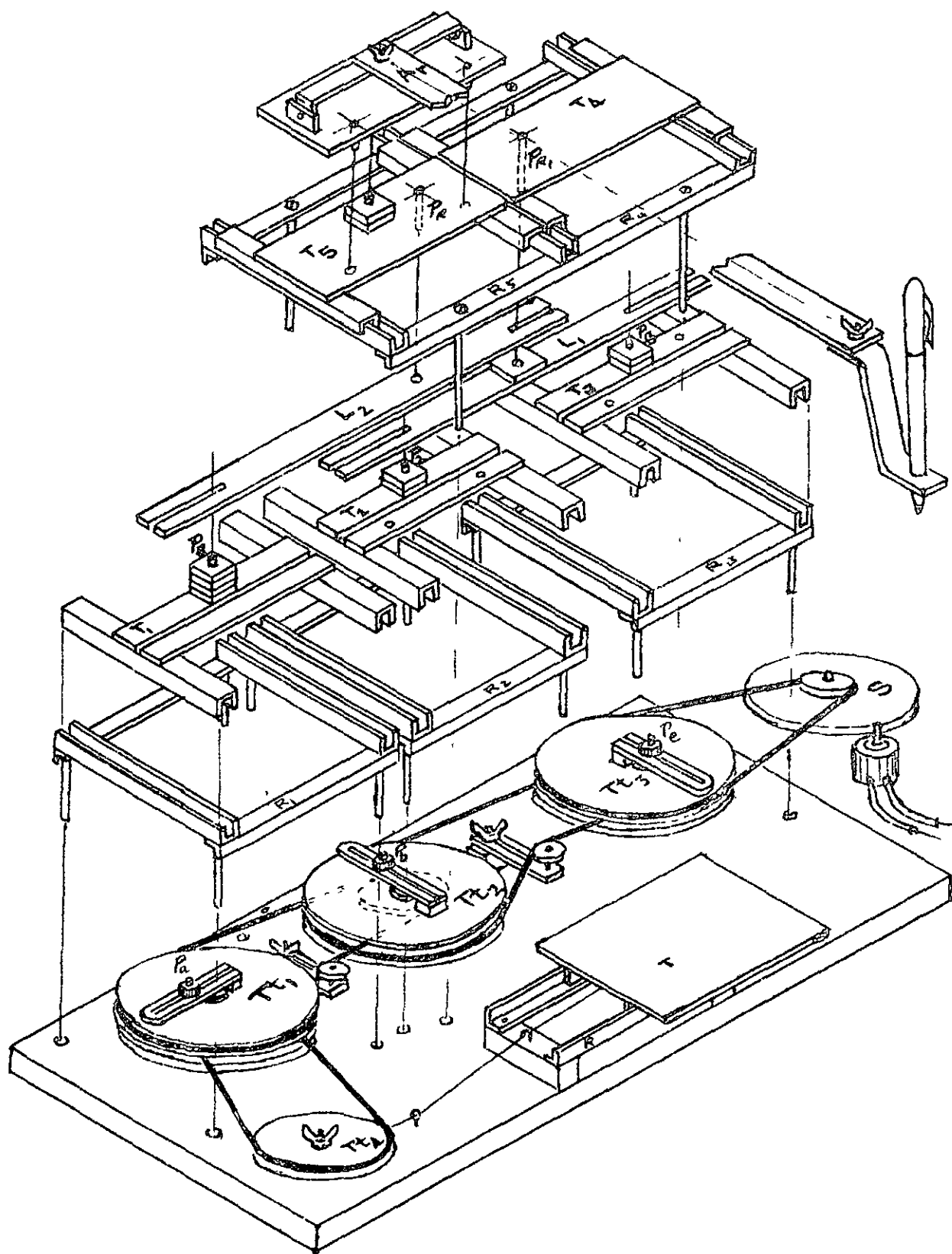
เพื่อความสะดวกในการเปลี่ยนล้อและกลองสายพาน ร่างและแทนที่วางไว้
เหนือแทนหมุนจึงต้องออกแบบให้สามารถถอดหรือประกอบเข้าที่ได้อย่างสะดวก ร่างแต่ละชุด
ประกอบด้วยรางอลูมิเนียม รูปตัว U 2 ท่อน วางขนานกันและยึดเข้าด้วยกันด้วยอลูมิเนียม
ฉาก เชื่อมให้ติดกันด้วยกาวสำหรับติดโลหะ ร่างแต่ละชุดจะมีนอกขนาดยาวทำเป็นขา
4 ขา ซึ่งจะสวมพอดีกับรูซึ่งเจาะไว้ที่แทนของเครื่องอีกทีหนึ่ง

แทนสำหรับติดสลัก P_1, P_2, P_3, P_{R1} และ P_R นั้น สมมุติให้เป็น T_1, T_2, T_3, T_4
และ T_5 ตามลำดับ แทน T_1, T_2 และ T_3 จะวางอยู่ในระดับเดียวกันเหนือแทนหมุน
 Tt_1, Tt_2 และ Tt_3 ส่วนแทน T_4 และ T_5 จะวางอยู่ในระดับเดียวกันเหนือแทน
 T_1, T_2 และ T_3 อีกทีหนึ่ง คานจะอยู่ระหว่างกลาง

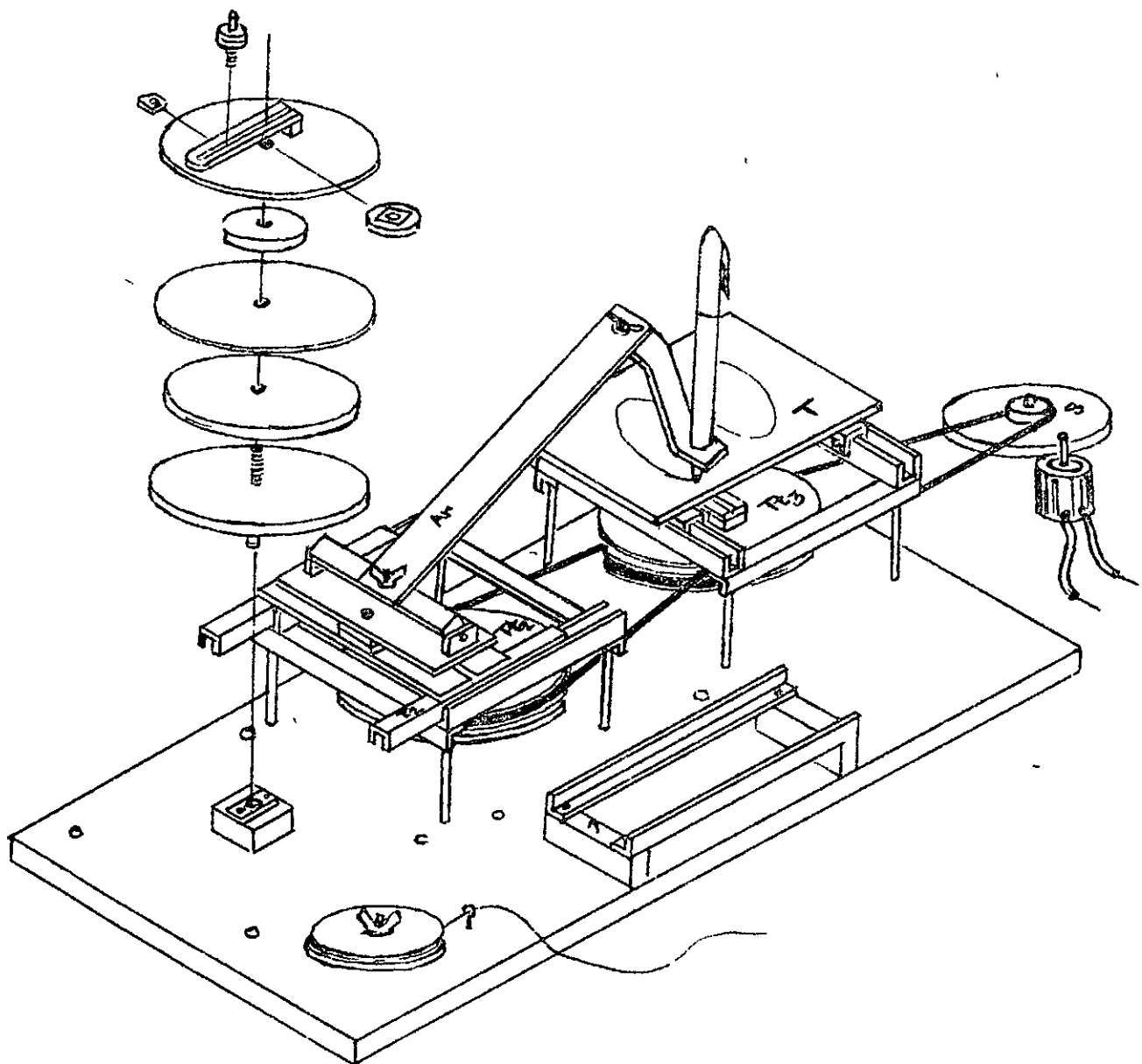
เพื่อให้มองเห็นการทำงานของเครื่องกลได้ชัดเจน แทนทั้งหมดจึงทำด้วยแผ่น
พลาสติกใส เพื่อให้เคลื่อนที่ได้พอดีบนราง จึงใช้รางอลูมิเนียม 2 ท่อนขนาดเดียวกับราง
ติดไว้ขอบริมสุดของแทนควายกาว เมื่อวางแทนบนราง รางทั้งข้างบนและข้างล่างจะสวม
กันอยู่พอดี เคลื่อนที่ไปมาทางข้างซ้ายขวาไม่ได้ เคลื่อนได้แต่ในทิศทางของรางเท่านั้น

เพื่อให้เครื่องกลเขียน *Lissajous figures* ได้ รางและแท่น T_2 ต้อง
 ออกแบบให้วางในทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทางเดิมได้ แท่น T_2 ต้องออกแบบให้ประกอบด้วย
 แขนสำหรับจับปากกาได้ ส่วนแท่น T_1 ต้องออกแบบให้ประกอบด้วยแท่นสำหรับวางกระดาษ
 ได้

รายละเอียดของการออกแบบและสร้างเครื่องมือใหญ่จากรูป 3 - 4



รูปที่ 3 ส่วนประกอบของเครื่องกลเขียนรูปคลื่น



รูปที่ 4 ส่วนประกอบของแท่นหมุน และการจัดเครื่องกลสำหรับเขียน

lissajous figures

2. Oscillobox

เครื่องมือชุดนี้สามารถจะทำงานได้คล้าย ๆ กับ Cathode ray oscilloscope คือสามารถสร้างภาพ Lissajous figures และภาพของคลื่นความถี่ต่าง ๆ ได้ แต่เครื่องมือชุดนี้มีขอบข่ายของการใช้งานแคบกว่า คือจะทำงานได้ในย่านความถี่เสียงย่านต่ำ ๆ เท่านั้น

เครื่องมือชุดนี้สร้างจากหลักการเคลื่อนที่ของขดลวดในสนามแม่เหล็ก ประกอบกับหลักการสะท้อนของแสง โดยอาศัยหลักที่ว่าเมื่อแสงตกกระทบแผ่นกระจกราบที่เบนไปมา ลำแสงสะท้อนจะเบนไปมาด้วยมุม 2 เท่าของมุมที่กระจกเบนไป ถ้าให้ลำแสงที่ตกกระทบเป็นลำแสงขนานขนาดเล็กสะท้อนผ่านกระจกไปกระทบฉาก ถ้ากระจกเบนไปจุดบนฉากก็จะเคลื่อนที่ไป ถ้ากระจกเบนไปมาอย่างรวดเร็ว เนื่องจากความเฉื่อยของตา จะทำให้มองเห็นจุดแสงที่เคลื่อนไปมาอย่างรวดเร็วนั้นเป็นเส้น ถ้าให้ลำแสงสะท้อนจากกระจกแผ่นแรกตกกระทบกระจกแผ่นที่ 2 ก่อน แล้วจึงสะท้อนไปยังฉาก โดยแผ่นแรกเบนไปมาในทิศทางที่ทำให้มองเห็นแสงเป็นเส้นตรงในแนวระดับ และแผ่นที่ 2 ทำให้เห็นเป็นเส้นตรงในแนวตั้ง เมื่อกระจกทั้งสองแผ่นเบนไปมาพร้อม ๆ กัน ก็จะทำให้เกิดภาพลักษณะต่าง ๆ ปรากฏ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะการเบนไปมาของแผ่นกระจกทั้งสอง โดยนับที่กลับกัน ถ้ามองภาพของแหล่งกำเนิดแสงจุดเล็ก ๆ (Point source) ผ่านกระจกทั้งสองแผ่นดังกล่าว จะมองเห็นภาพในกระจกเป็นเช่นเดียวกับที่เห็นในฉาก

ถ้าจะใช้หลักเกณฑ์ในกรณีแรกเป็นหลักในการสร้างเครื่องมือจะต้องมี (Point source) ที่มีความเข้มสูง และเลนส์อีกชุดหนึ่งที่จะรวมแสงผ่านกระจกแล้วให้โฟกัสบนฉากพอดี ผู้เขียนเห็นว่าไม่เป็นการประหยัด และไม่ปฏิบัติตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้ จึงได้เลือกเอาหลักเกณฑ์จากกรณีหลังมาเป็นหลักในการสร้างเครื่องมือ

กรณีที่มองภาพของ Point source ในกระจกนี้ตาของเรามีความไวพอต่อ Point source ที่มีความเข้มน้อย ๆ Point source นี้ผู้เขียนเลือกใช้หลอดไฟฉายขนาดเล็กที่ไขกันอยู่โดยทั่วไป ไขกับถ่านไฟฉาย 2 ก้อน ซึ่งสามารถปรับความเข้มได้ด้วย โดยต่อ Variable resistor อันคัมเข้าไปในวงจร

ขนาดของภาพที่มองเห็นในกระจกนั้น จะขึ้นอยู่กับระยะระหว่าง Point source กับกระจก ถ้า Point source อยู่ห่างจากกระจกมากภาพก็จะมีขนาดใหญ่ ถ้าระยะห่างน้อยภาพก็จะมีขนาดเล็ก นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับมุมที่กระจกเบนไปด้วย ถ้ากระจกเบนไปมากภาพก็จะมีขนาดใหญ่ ถ้ากระจกเบนไปน้อยภาพก็จะมีขนาดเล็ก

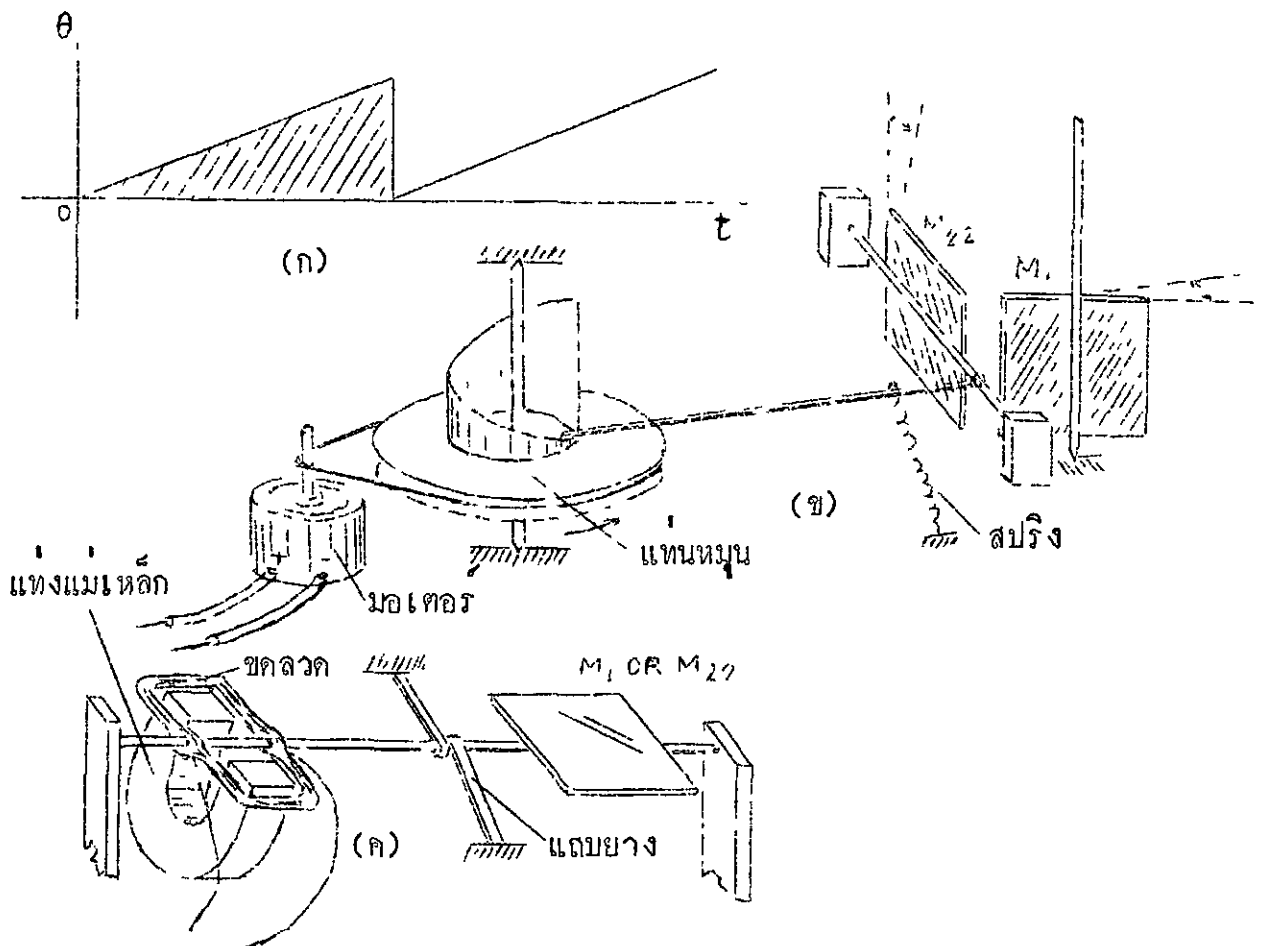
จากการทดลองพบว่า ระยะจาก Point source ถึงกระจกประมาณ 2 เมตร ก็ได้ขนาดภาพเพียงพอแล้ว ทั้งนี้ ถือว่ามุมที่กระจกเบนไปมีขนาดจำกัดซึ่งจะได้กล่าวถึงภายหลัง เพื่อให้เครื่องมือมีขนาดกระทัดรัด แทนที่จะวาง Point source ไว้ห่างถึง 2 เมตร ก็สามารถจะจัดวางไว้ในระยะใกล้ ๆ ได้ โดยขยายระยะการเดินทางของแสงให้ยาวออกไป ด้วยการให้แสงสะท้อนผ่านกระจกหลาย ๆ แผ่นที่จัดวางไว้ในเนื้อหอนจำกัด ภาพที่มองเห็นจากกระจกแผ่นสุดท้ายก็จะอยู่ใกล้พอที่จะทำให้มองเห็นภาพโคขนาดโตพอ

การเบนไปมาของแผ่นกระจกจะถูกบังคับให้เป็นไปตามจังหวะของความถี่เสียง โดยใช้หลักอันเดียวกันกับลำโพงเสียงประเภท Dynamic loud speaker คือถ้าปล่อยให้กระแสสลับในย่านความถี่ต่ำ ๆ ไหลผ่านขดลวดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่วางอยู่ในสนามแม่เหล็กซึ่งมีทิศทางขนานกับระนาบของขดลวด และตั้งฉากกับแกนการหมุนของขดลวดแล้ว จะเป็นผลให้ขดลวดเบนไปมา มีความถี่อันเดียวกันกับความถี่ของกระแสไฟที่ไหลในขดลวด ขนาดของมุมที่ขดลวดเบนไปจะขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสความเข้มของสนามแม่เหล็ก มวลของขดลวด ความถี่ของกระแสไฟ และความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) ของขดลวด ถ้าความถี่ของกระแสไฟพ้องค่าเท่ากับหรือเป็นอัตราส่วนลงตัวกับความถี่ธรรมชาติของขดลวด ก็จะเป็นผลให้เกิด Resonance ขึ้น ทำให้ขดลวดเบนไปมาเป็นมุมที่กว้างกว่าปกติ แกนการหมุนของขดลวดนี้จะติดอยู่กับแผ่นกระจกรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็ก ฉะนั้น เมื่อขดลวดเบนไปก็จะทำให้กระจกเบนไปด้วย ถ้าวางให้แกนของขดลวดตั้งฉากกันแล้วมองภาพของ Point source ที่สะท้อนผ่านกระจกทั้งสองแผ่น โดยที่มีกระแสสลับไหลในขดลวดทั้งสองในขณะเดียวกันแล้ว ภาพที่มองเห็นจะเป็น Lissajous figures ถ้าใส่สัญญาณรูปฟันเลื่อย (Sawtooth signal)

เข้าในแนวระดับภาพที่เห็นก็จะเป็นรูปคลื่นของสัญญาณกระแสลับที่ใส่เข้าไปในแนวตั้ง

กระแสสัญญาณที่จะให้ไหลในหลอดลึงกล่าว จะนำมาจาก Output ของเครื่องขยายเสียง (Amplifiers) ที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไป สัญญาณที่นำมาจากต้นกำเนิด เช่นจาก Signal generator จะตองนำมาขยายในเครื่องขยายดังกล่าวก่อน เพื่อให้มีกำลังมากพอที่จะขับให้หลอดเบนไปมาได้ด้วยมุมที่กว้างพอที่จะมองเห็นภาพได้ชัดเจน

สัญญาณพื้นเลื้อย ที่จะใส่เข้าไปทางแนวระดับนั้น มีความยุ่งยากในการที่จะออกแบบวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ ถึงแม้ว่าจะผลิตสัญญาณไฟฟ้ารูปพื้นเลื้อยออกมาได้ ก็ยังมีปัญหาว่าแอมพลิจูดของการสั่นของกระจกไม่มากพอที่จะเขียนภาพเส้นตรงในแนวระดับให้มีความยาวพอสมควรได้ ทั้งนี้ ก็เนื่องมาจากการตอบสนองต่อความถี่ของหลอดไม่สม่ำเสมอ จะให้การตอบสนองได้ก็เฉพาะความถี่ที่ Resonance เท่านั้น ฉะนั้น สัญญาณไฟฟ้ารูปพื้นเลื้อยจึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในการเขียนเส้นในแนวระดับสำหรับกรณีนี้ ผู้เขียนจึงได้ออกแบบใช้สัญญาณในเชิงกลไปควบคุมการเบนของกระจกแทนการควบคุมด้วยอิเล็กทรอนิกส์ มุมที่กระจกเบนไปนั้นประมาณ 15° ก็เพียงพอแล้วสำหรับการดูภาพของ Point source ที่อยู่ห่างออกไปประมาณ 150 ซม. เพื่อที่จะให้แผ่นกระจกเบนไปมา จึงได้ออกแบบแทนหมุนชิ้นมาชุดหนึ่งซึ่งหมุนด้วยมอเตอร์ คือ ซี. ขนาดเล็ก ใช้กับถ่านไฟฉาย 2 ก้อน และสามารถปรับความเร็วของการหมุนได้ด้วยการต่อ Variable resistor อันดัดเข้าไปในวงจร บนแผ่นหมุนจะติดลูกเบี้ยวซึ่งรูปร่างของลูกเบี้ยวนี้จะขึ้นอยู่กับรูปของคลื่นที่ต้องการ แผ่นหมุนนี้จะติดตั้งไว้ห่างจากแกนของแผ่นกระจกพอประมาณ โดยแกนของแผ่นกระจกจะติดแกนเล็ก ๆ ยื่นมาสัมผัสกับลูกเบี้ยว เมื่อแผ่นหมุนหมุนไปด้วยความเร็วสม่ำเสมอหนึ่ง ๆ ลูกเบี้ยวจะทำให้แกนเบนไปมา ซึ่งจะทำให้แผ่นกระจกเบนไปมาด้วย ซึ่งมุมที่กระจกเบนไปจะขึ้นอยู่กับความยาวของแกนและลักษณะของลูกเบี้ยว การสร้างลูกเบี้ยวให้ไครูปคลื่นตามที่ต้องการนั้นทำได้ลำบาก จึงแก้ปัญหานี้ด้วยการเขียนรูปคลื่นที่ต้องการลงบนแผ่นโลหะ แล้วตัดเอามาส่วหนึ่งให้ไครยะยะ 1 ช่วงความยาวคลื่นพอดี (ส่วนที่แสงเงาในรูปที่ 5 ก.)



รูปที่ 5 ส่วนประกอบบางส่วนของ Oscillobox

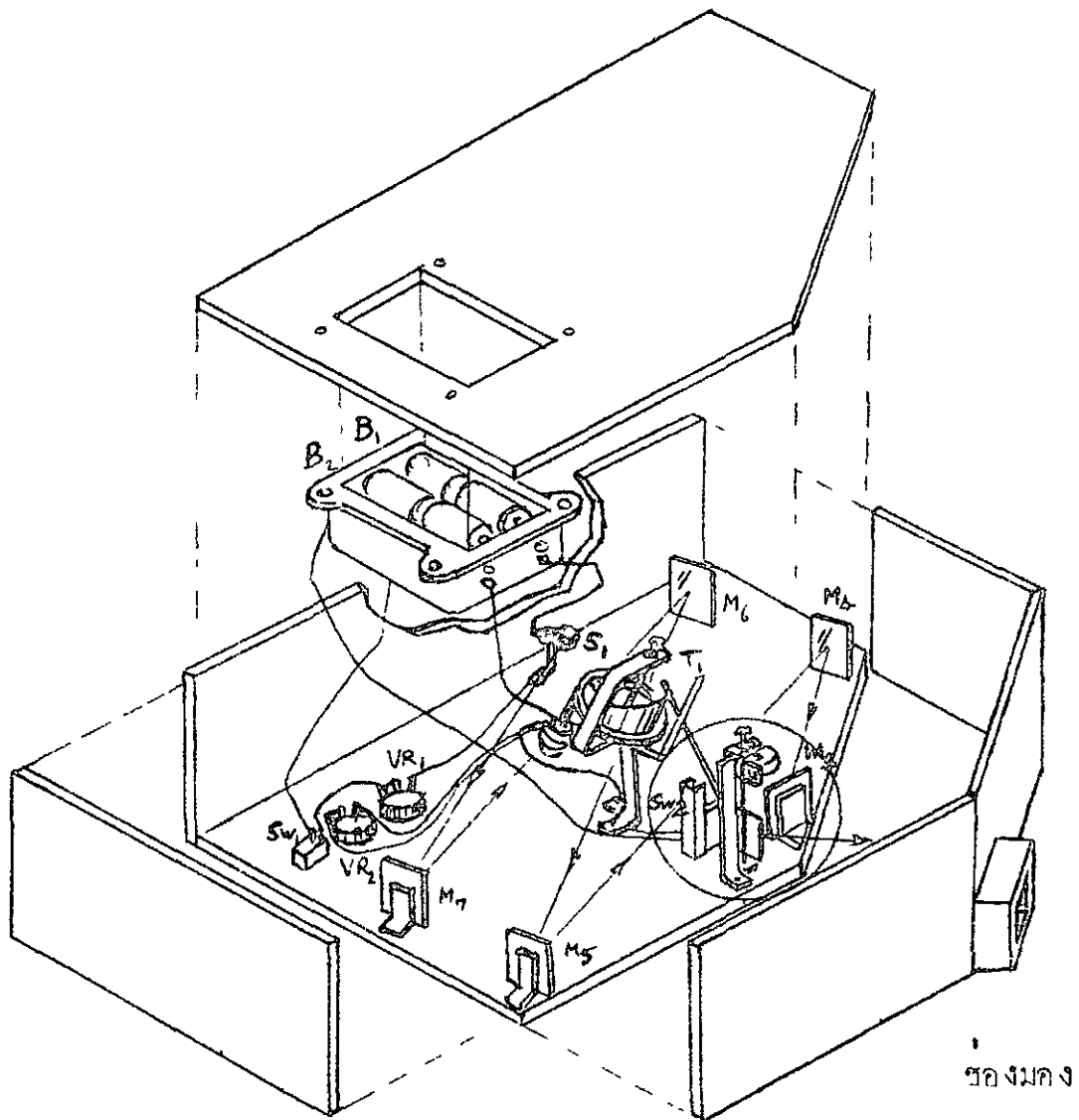
แล้วโค้งให้เป็นรูปทรงกระบอกติดไว้บนแท่นหมุน (ดูรูปที่ 5 ข.) เมื่อติดตั้งชุดของแท่นหมุนและชุดของกระจกเงา ดังรูปที่ 5 ข. แล้วให้มอเตอร์หมุนไปด้วยความเร็วสม่ำเสมอ จะเป็นผลให้แผ่นกระจกเบนไปมา โดยมุมที่กระจกเบนไปสัมพันธ์กับเวลาดังแสดงในกราฟรูปที่ 5 ก.

ชิ้นส่วนที่จะป้อนด้วยกระแสไฟฟ้าสลับย่านความถี่เสียง ที่จะทำให้หน้าที่ยื่นรูปในแนวกิ่ง หรือในแนวระดับสำหรับการสังเกต Lissajous figures จากความถี่เสียง 2 ความถี่นั้น มีส่วนประกอบทั้งแสดงในรูปที่ 5 ค. ซึ่งประกอบด้วยแท่งแม่เหล็กรูปเกือกม้า ขดลวดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งติดตั้งอยู่กับแกนที่ติดอยู่กับแผ่นกระจกเงา ที่แกนจะมีแถบยางเล็กๆ

พันรอบและครึ่งไว้กับแท่น แถบยางนั้นนับว่ามีความสำคัญ เพราะเป็นกาวที่จะสร้างแรงคืน (Restoring force) และความถี่ธรรมชาติของขดลวดจะขึ้นอยู่กับความถี่ของแถบยางนั้นด้วย ถ้าหย่อนความถี่เสียงที่จะทำให้เกิด Resonance จะต่ำ ถ้าแถบยางตึงความถี่ Resonance จะสูง

เพื่อความสะดวกและประหยัดอุปกรณ์บางส่วน แผ่นกระจกในรูปที่ 5 ข. กับชิ้นส่วนในรูปที่ 5 ค. ที่จะทำหน้าที่เขียนเส้นในแนวระดับนั้น ควรออกแบบให้สามารถสับเปลี่ยนตำแหน่งกันไคสะควก จึงได้ออกแบบให้ชิ้นส่วนทั้งสองยังคงวางยึดอยู่บนแท่นเดียวกัน และแท่นนี้จะวางอยู่ในราง ซึ่งทำให้สามารถเลื่อนไปมาไคสะควกเมื่อต้องการสับเปลี่ยน (ดูรูปที่ 7)

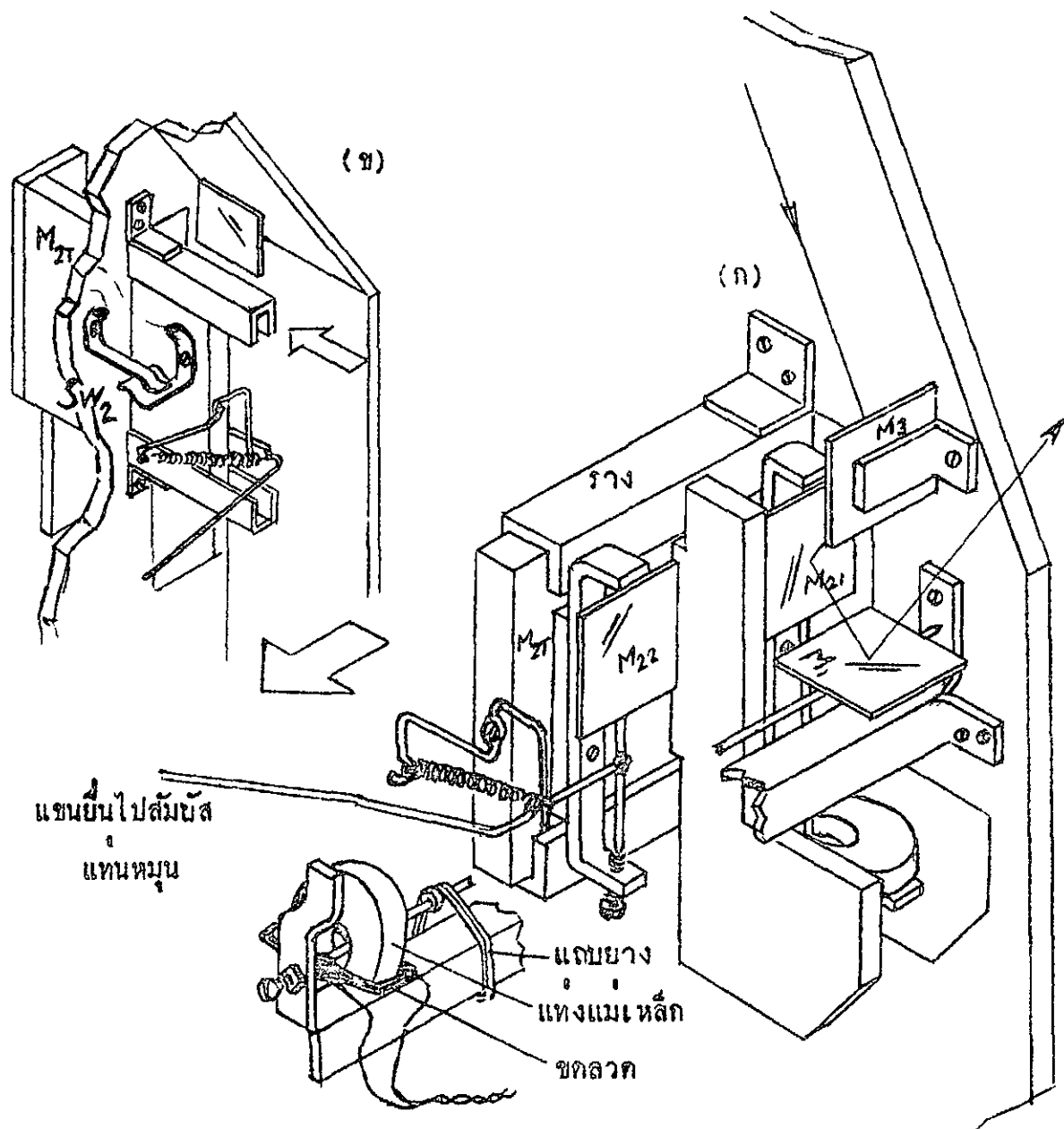
รายละเอียดและรูปร่างของ Oscillobox แสดงไว้ในรูปที่ 6 และ 7



รูปที่ 6 รายละเอียดภายในของ Oscillobox

M_3, M_4, M_5, M_6 และ M_7 เป็นแผ่นกระจกเงาที่วางไว้เพื่อให้แสงจากหลอดไฟ S_1 สะท้อนไปมา หลอดไฟ S_1 ทำด้วยสีกาโดยรอบเหลือช่องให้แสงออกเพียงด้านเดียว เพื่อให้ภายในกล่องมืดสนิท ภายในกล่องจึงควรทำสีกาด้วย หลอดไฟ S_1 ต่ออยู่กับ Battery B_1 ซึ่งมีสวิตช์ Sw_1 และความต้านทานแปรค่า VR_1 ต่ออนุกรมอยู่เพื่อควบคุมความเข้มของแสงสว่าง T_1 เป็นแท่นหมุนสำหรับผลิตคลื่นรูปฟันเลื่อยให้แกภาค Horizontal 1 ขับด้วยมอเตอร์ซึ่งต่ออยู่กับ Battery B_2 มีสวิตช์ Sw_2 และความต้านทานแปรค่า VR_2 ต่ออนุกรมอยู่ในวงจร เพื่อควบคุมความเร็วมอเตอร์ สวิตช์ Sw_2 จะปิดเมื่อเลื่อนแท่น M_{2T} ออกนอกกล่อง (ดูรูปที่ 7 ข.)

รายละเอียดภายในวงกลม รูปที่ 7



รูปที่ 7 ส่วนหนึ่งของ Oscilloscope

M_1 กระบอกเงาในภาค Vertical

M_{21} กระบอกเงาในภาค Horizontal ที่อยู่บนแกนเดียวกับขดลวด
ที่ติดอยู่กับ Output ของ H-Amp.

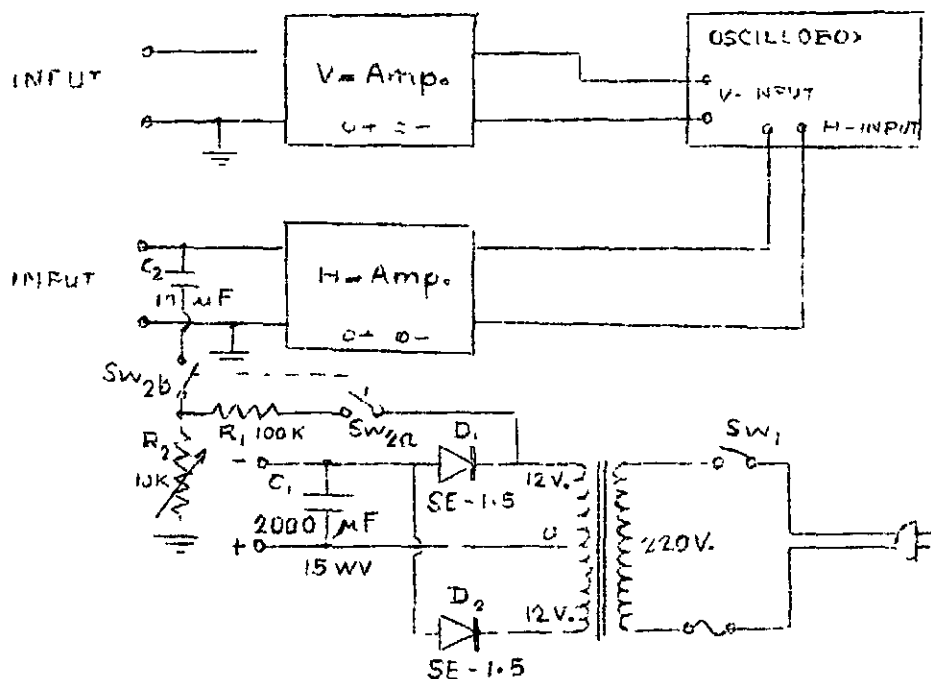
M_{22} กระบอกในภาค Horizontal ซึ่งจะเบนไปมาโดยการบังคับของ
แทนหมุน

M_{21} และ M_{22} จะติดอยู่บนแทน M_{2T} และแทนนี้จะเลื่อนไปมาได้ตามราง

3. เครื่องมืออื่น ๆ ที่ใช้ประกอบการทดลอง

โดยปกติแล้ว Oscilloscope ที่กล่าวถึงข้างต้นเกือบจะไม่สามารถใช้แสดงการสาธิตหรือทดลองอะไรได้ นอกจากแสดงการเขียนเส้นในแนวระนาบอันเกิดจากเครื่องกำเนิดสัญญาณรูปฟันเลื่อยที่ติดตั้งอยู่ในตัวกล่องเท่านั้น ฉะนั้น จึงมีความจำเป็นต้องออกแบบสร้างเครื่องมือประกอบอื่น ๆ จึงจะสามารถใช้ Oscilloscope ให้เกิดประโยชน์ในการสาธิตและทดลองได้ผลดีเท่าที่ควร ซึ่งจะได้อธิบายถึงเป็นลำดับต่อไปนี้

3.1 เครื่องขยายเสียง (AF Amplifiers) เครื่องขยายเสียงที่จะใช้ประกอบกับ Oscilloscope นี้ มี 2 เครื่อง เครื่องหนึ่งทำงานในภาค Horizontal อีกเครื่องหนึ่งทำงานในภาค Vertical กำลัง Output ควรใช้ประมาณ 10 วัตต์ เครื่องขยายเสียงระบบ Stereophonic ที่ใช้กันโดยทั่วไปก็สามารถจะนำมาใช้ได้ สำหรับเครื่องขยายในชุดทดลองที่สร้างขึ้นนี้ ใช้ชุดเครื่องขยายเสียงของบริษัทไทยวิทย์ แบบ OTL-410 จำนวน 2 เครื่อง ใช้ Power supply ร่วมกัน ซึ่งประกอบด้วย Power transformer ซึ่งมีขดปฐมภูมิใช้กับไฟ 220 โวลต์ ขดทุติยภูมิเป็น 12-0-12 โวลต์ อัตรากระแส 2 แอมแปร์ ใช้ Silicon diodes 2 ตัว เป็น Rectifier ซึ่งต่อวงจรแบบ full wave rectifier ผ่านวงจร Filter ซึ่งใช้ Capacitor ที่มีค่า Capacitance $2000\ \mu\text{F}$ ค่า Working volt 15 โวลต์ เบียงตัวเดียว ขดทุติยภูมิครึ่งหนึ่งจะต่ออยู่กับวงจร Voltage divider ซึ่งจะแบ่งสัญญาณ 50 C/S ไปเข้า Input ของเครื่องขยายเสียงโดยผ่านสวิตช์คั่นต่อทั้งแสดงเป็น diagram ในรูปที่ 8

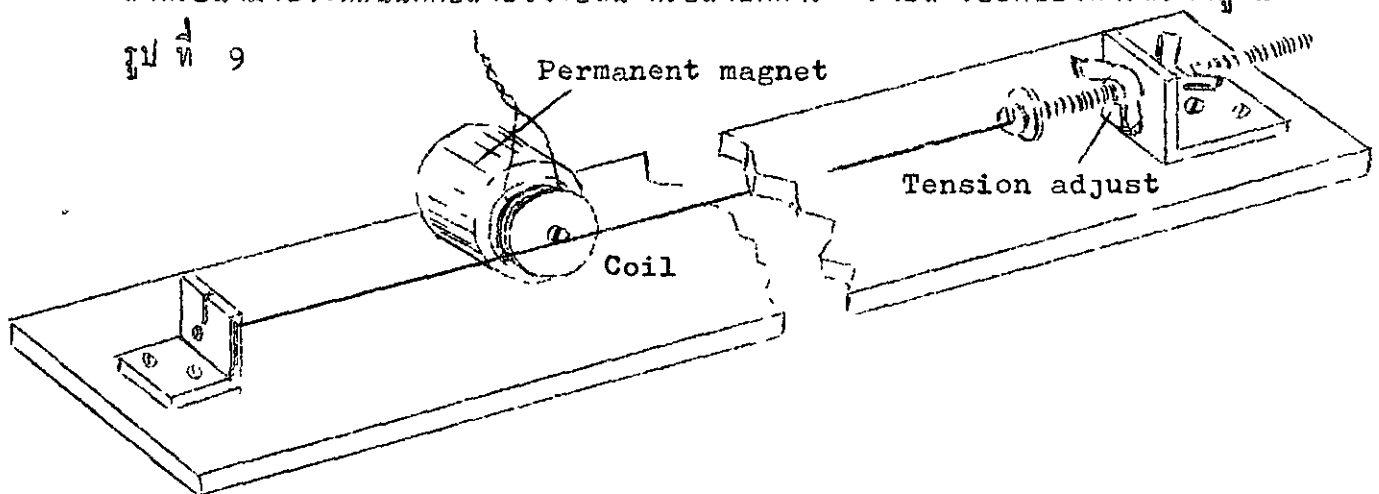


รูปที่ 8 Block diagram ของเครื่องขยาย และ Schematic diagram

ของ Power supply

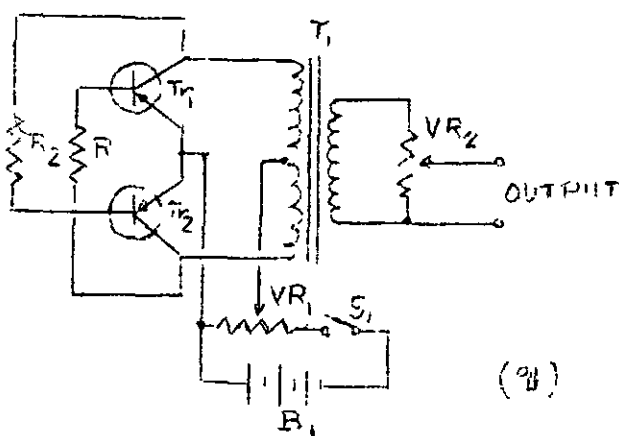
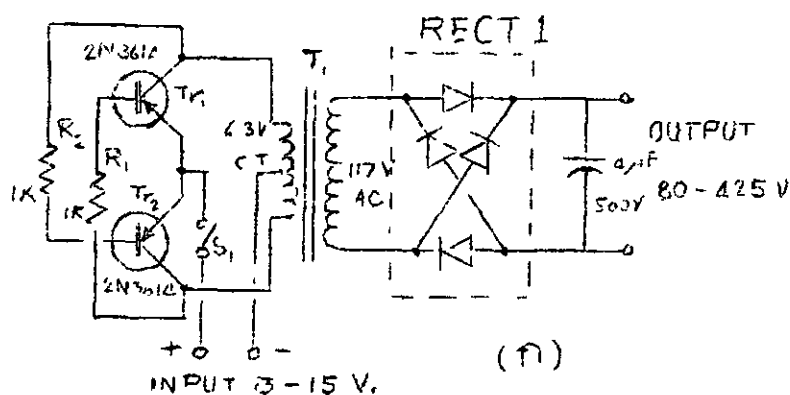
3.2 หัวเก็บสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าและแทนสำหรับขึงเส้นลวด (Magnetic pick up and vibrated-string set) เป็นแหล่งผลิตสัญญาณไฟฟ้าจากความถี่เสียง ที่มีความถี่เท่ากับความถี่ของการสั่นสะเทือนของเส้นลวด ถ้ามีขดลวดวางอยู่ในสนามแม่เหล็กที่ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงไปกับเวลา จะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นในขดลวด เรียกว่า แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induced electromotive force) ถ้าขดลวดปิด ก็จะมีกระแสไหลในขดลวด ขนาดของกระแสจะมีค่าแปรผันกับอัตราการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กที่คล่องผ่านขดลวดนั้น ทิศทางของกระแสเหนี่ยวนำจะอยู่ในทิศทางที่จะพยายามรักษาให้เส้นแรงที่คล่องผ่านขดลวดให้คงที่อยู่เสมอ คือถ้าเส้นแรงกำลังเพิ่มขึ้น กระแสเหนี่ยวนำจะไหลในทิศทางที่จะสร้างเส้นแรงในทิศทางที่สวนกับทิศทางเดิม เพื่อหักล้างกับเส้นแรงที่เพิ่มขึ้นในทางตรงกันข้าม ถ้าเส้นแรงที่คล่องผ่านขดลวดกำลังลดลง กระแสเหนี่ยวนำจะอยู่ในทิศทางที่จะสร้างเส้นแรงเสริมเส้นแรงเดิม ทั้งนี้

เป็นไปตามกฎของ Lenz (Shortley and Williams, 1959 : 782) โดยอาศัยหลักข้างต้น จึงได้ออกแบบหัวเก็บสัญญาณ โดยใช้เส้นลวดทองแดงอาบนํ้ายาขนาดเล็ก พันรอบแกนเหล็กอ่อน ซึ่งใช้ตะปูขนาดเล็กโดยให้ความยาวของขดลวดคนละ ๗ จำนวน รอบมาก แกนเหล็กอ่อนนี้จะติดอยู่กับขั้วของแท่งแม่เหล็ก ปลายทั้งสองของขดลวดต่อเข้ากับ Input ของเครื่องขยายเสียงที่กล่าวถึงในข้อ 3.1 เพื่อนำเอาปลายอีกข้างหนึ่งของแกนของขดลวดไปวางไว้ใกล้ ๆ เส้นลวดที่กำลังสั่นสะเทือนก็จะมีกระแสเหนี่ยวนำไหลในขดลวด ทั้งนี้ เส้นลวดที่ขึงให้สั่นสะเทือนนั้นต้องเป็นสารแม่เหล็ก เช่น เหล็ก โคบอลต์ นิเกิล เป็นต้น ถ้าวางสารพวกนี้ไว้ในสนามแม่เหล็กจะทำให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลง เพราะเส้นแรงแม่เหล็กจะเบนเข้าหาสารพวกนี้ เพราะนั้น ความเข้มของสนามแม่เหล็กบริเวณใกล้ ๆ กับสารพวกนี้จึงมีมากกว่าปกติ เมื่อนำเอาเส้นลวดซึ่งทำขดลวดแม่เหล็กไปสั่นสะเทือนใกล้ ๆ ปลายของขดลวดซึ่งวางอยู่ในสนามแม่เหล็ก จำนวนเส้นแรงที่ผ่านขดลวดก็จะเปลี่ยนแปลงไปตามจังหวะการสั่นของเส้นลวด ทำให้เกิดสัญญาณไฟฟ้าในขดลวดมีความถี่เท่ากับความถี่การสั่นของเส้นลวด เส้นลวดที่เหมาะสมสำหรับนำมาขึงให้สั่นนี้ก็คือสายไวโอลิน หรือสายกีตาร์ รายละเอียดของการสร้างดูในรูปที่ 9



รูปที่ 9 หัวเก็บสัญญาณและแท่นขึงลวด

3.3 Electronic Audio Oscillator เป็นเครื่องมือสำหรับผลิตสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับในย่านความถี่เสียง เป็นวงจร Multivibrator ที่ใช้ Transistor ซึ่งคิดแปลงมาจากวงจร D.C. Transformer ซึ่งออกแบบโดย Jon Colt (Colt, 1970 : 35-43) ดังแสดงในรูปที่ 10 ก. เป็นวงจรที่ใช้เปลี่ยน D.C. Voltage ค่าต่ำให้เป็น D.C. Voltage ค่าสูง



รูปที่ 10 D.C. Transformer (ก) และ Audio Oscillator (ข)

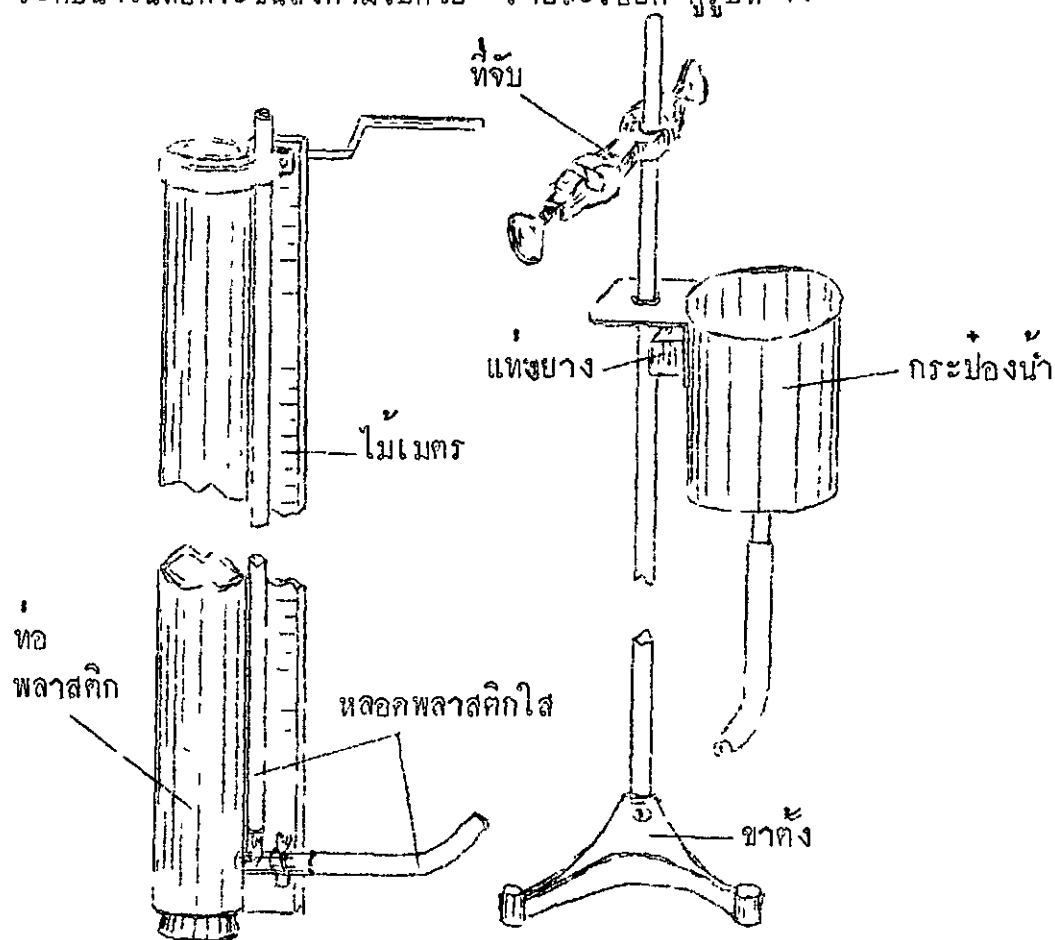
Transistor Tr_1 และ Tr_2 จะทำหน้าที่เปลี่ยนกระแสตรงให้เป็นกระแสสลับ โดยผลัดกันนำกระแสผ่านครึ่งหนึ่งของขดปฐมภูมิ ซึ่งจะเหนี่ยวนำให้เกิด A.C. Voltage ขึ้นในขดทุติยภูมิ ซึ่งจะมีค่าขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของจำนวนรอบของขดจลจลปฐมภูมิกับทุติยภูมิ และขึ้นอยู่กับค่า Input voltage ด้วย และจากการทดลองพบว่า เมื่อเปลี่ยนค่า Input voltage จะทำให้ค่าความถี่ของ Oscillation เปลี่ยนไปด้วย

โดยอาศัยหลักดังกล่าว จึงได้ออกแบบ Audio Oscillator ดังแสดงในรูปที่ 10 ข. Transistor Tr_1 และ Tr_2 ใช้ Power Transistor หมายเลข 2 SB 364 (TOSHIBA) T_1 เป็น Output Transformer ที่ใช้อยู่ในวงจรขยาย Transistors แบบ Push-pull กำลังต่ำโดยทั่วไป ซึ่งขดปฐมภูมิจะมี Center tap ส่วนขดทุติยภูมิจะต่อกับ Potentiometer VR_2 ค่า 5,000 โอห์ม ทำหน้าที่ควบคุมระดับของ Output signal R_1 และ R_2 เป็น Base Resistor มีค่าเท่ากัน คือ 500 โอห์ม ค่าของ R_1 และ R_2 นี้จะมีผลต่อความถี่ของ Oscillation ด้วย สำหรับค่า Input Voltage ค่าหนึ่ง ความถี่จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มค่าของ R_1 และ R_2 แต่สำหรับค่า R_1 และ R_2 ค่าหนึ่ง ๆ ความถี่จะลดลงเมื่อเพิ่มค่า Input Voltage ขึ้น เพื่อความสะดวกจึงเลือกให้ R_1 และ R_2 คงที่ โดยเลือกค่าที่ต่ำสุดพอที่จะไม่ทำให้ Transistors เป็นอันตราย เมื่อค่า Input Voltage มีค่าสูงสุด เพื่อให้สามารถเปลี่ยนค่าความถี่ของ Oscillation ได้ตั้งแต่ต่ำสุดจนถึงสูงสุด จึงใช้ Potentiometer VR_1 ค่า 5,000 โอห์ม ทำหน้าที่ Voltage divider B_1 เป็นแบตเตอรี่แรงเคลื่อนไฟฟ้า 9 โวลต์ ทำหน้าที่ Power supply โดยมีสวิตช์ S_1 ทำหน้าที่เปิดปิดวงจร ซึ่ง S_1 นี้จะติดอยู่กับ VR_2

Audio Oscillator ดังกล่าวได้สร้างขึ้น 2 ชุดด้วยกัน โดยติดตั้งไวบนแท่นอันเดียวกัน แต่ใช้ Power supply แยกกัน

3.4 Resonance Tube โดยปกติจะเป็นหลอดแก้วใช้ทดลองเกี่ยวกับ Resonance ของคลื่นเสียง ที่ต้องใช้หลอดแก้ว ก็เพราะต้องวัดระดับน้ำในหลอดแก้ว เพื่อนำไปคำนวณหาความยาวคลื่นของเสียงในอากาศ แต่หลอดแก้วมีข้อเสียคือแตกง่าย และราคาแพง ผู้เขียนจึงได้เลือกใช้ท่อน้ำพลาสติก ซึ่งเป็นท่อแข็งทึบ จึงไม่สามารถจะมองระดับน้ำในหลอดได้โดยตรง ปัญหานี้แก้ไขได้ด้วยการติดหลอดพลาสติกใสขนาดเล็ก

ไวซางท่อพลาสติกก็ดังกล่าว โดยเชื่อมปลายล่างของหลอดพลาสติกเข้ากับปลายล่างของท่อ ก็สามารถจะสังเกตระดับน้ำในท่อได้โดยสังเกตจากระดับน้ำในหลอดพลาสติก ระดับน้ำในท่อสามารถปรับให้สูงต่ำได้ โดยถอดหลอดพลาสติกหรือหลอดออกจากปลายล่างของท่อไปเชื่อมกับกระป๋องน้ำ ซึ่งติดตั้งอยู่บนขาตั้ง ถ้าเลื่อนกระป๋องน้ำขึ้นลง ระดับน้ำในท่อก็จะขึ้นลงตามไปด้วย รายละเอียดดูรูปที่ 11



รูปที่ 11 Resonance tube

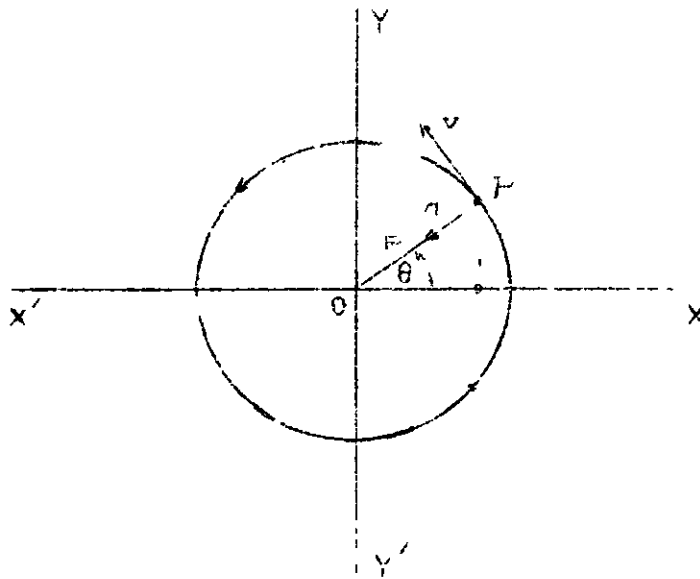
บทที่ 3

การสัทธิทคลองและอภิปราย

ในบทนี้จะได้อธิบายถึงวิธีที่จะนำเอาชุดทคลองไปใช้ในการสัทธิทหรือทคลองในเรื่องต่าง ๆ เกี่ยวกับคลื่นและเสียง และจะได้แสดงผลของการทคลองจากการทคลองดังกล่าว ซึ่งจะได้อธิบายเป็นลำดับไป ดังนี้

1. Simple Harmonic Motion

พิจารณาการเคลื่อนที่ของอนุภาคด้วยความเร็วสม่ำเสมอ v ตามแนวเส้นรอบวงของวงกลม ซึ่งมีรัศมี R รูปที่ 12



รูปที่ 12 อนุภาค P เคลื่อนที่เป็นวงกลมรัศมี R ด้วยความเร็วสม่ำเสมอ v ตามแนวเส้นรอบวง

ตำแหน่งของอนุภาคบอกด้วยค่าของมุม θ ถ้าสมมุติให้ ω เป็นความเร็วเชิงมุม (rad/s) t เป็นเวลา ขณะใดขณะหนึ่ง (s) ค่าของมุม θ จะเท่ากับ ωt เมื่อเริ่มนับเวลา ($t = 0$) ที่ $\theta = 0$ ถ้าให้ f เป็นจำนวนรอบของการหมุนในหนึ่ง

หน่วยเวลา (ความถี่ = rev/s). $\therefore w = 2\pi f$ ฉะนั้น จึงบอกตำแหน่งของอนุภาคใน
เทอมของความถี่และเวลาได้ว่า $\theta = 2\pi ft$ จากนั้นสามารถจะเขียน Rectangular
coordinater ของอนุภาคในเทอมของความถี่และเวลาได้ดังนี้

$$x = R \cos (2\pi ft)$$

$$y = R \sin (2\pi ft) \dots\dots\dots(1.1)$$

ความเร็ว v ของอนุภาคจะมีทิศทางในแนวเส้นสัมผัสวงกลม ซึ่งมีความเร็ว
องค์ประกอบในแนวแกน x และแกน y ดังนี้

$$v_x = \frac{dx}{dt} = -2\pi fR \sin (2\pi ft)$$

$$v_y = \frac{dy}{dt} = 2\pi fR \cos (2\pi ft) \dots\dots\dots(1.2)$$

ความเร่งองค์ประกอบในแนวแกน x และแกน y เขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} a_x &= \frac{d^2x}{dt^2} = -4\pi^2 f^2 R \cos (2\pi ft) \\ &= -(4\pi^2 f^2)x \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_y &= \frac{d^2y}{dt^2} = -4\pi^2 f^2 R \sin (2\pi ft) \\ &= -(4\pi^2 f^2)y \dots\dots\dots(1.3) \end{aligned}$$

พิจารณาการเคลื่อนที่ของ Projection ของอนุภาคบนแกน x ตำแหน่ง
ความเร็ว และความเร่งของ Projection ดังกล่าวจะแสดงได้โดยสมการ (1.1),
(1.2) และ (1.3) ตามลำดับ คือ

$$x = R \cos (2\pi ft)$$

$$v_x = -2\pi fR \sin (2\pi ft)$$

$$a_x = -(4\pi^2 f^2)x \dots\dots\dots(1.4)$$

จะเห็นว่า $4\pi^2 f^2$ เป็นค่าคงที่ ฉะนั้น ขนาดของความเร่ง a_x จะเป็นสัดส่วน
โดยตรงกับขนาดของ x ส่วนทิศทางของ a_x จะตรงกันข้ามกับทิศทางของ x

ถ้ามีอนุภาคนั้นเคลื่อนที่ภายใต้เงื่อนไขในสมการ (1.4) แล้ว กล่าวได้ว่า อนุภาคนั้นเคลื่อนที่เป็น "Simple harmonic motion" จากนั้นก็จะให้คำจำกัดความไว้ว่า

Simple harmonic motion คือ "การเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงที่มีขนาดของความเร่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาดของปริมาณกระจัด (Displacement) ของอนุภาคจากจุด Origin และทิศทางของความเร่งจะตรงข้ามกับทิศทางของปริมาณกระจัดเสมอ" (Shortley and William, 1967 : 224-227)

การเคลื่อนที่แบบซิมเปิลฮาร์โมนิกนี้สามารถแสดงการสาธิตให้เห็นได้ชัดเจนว่า การเคลื่อนที่เป็นวงกลมด้วยความเร็วสม่ำเสมอ นั้น สัมพันธ์กับการเคลื่อนที่แบบซิมเปิลฮาร์โมนิก อย่างไร โดยใช้เครื่องกลเขียนรูปคลื่น ถอดชิ้นส่วนต่าง ๆ ออกให้หมด เหลือไว้แต่แท่นหมุน Tt_3 รางและแท่น T_3 การวางแท่น T_3 ต้องวางให้ร่องสวมอยู่กับสลักซึ่งติดอยู่บนแท่นหมุน Tt_3 เอาสายพานกลองแท่นหมุน Tt_3 เขากับแท่นหมุน S กดสวิทช์ให้มอเตอร์หมุน แท่นหมุนทั้งสองก็จะหมุนไปพร้อม ๆ กับมอเตอร์ด้วยความเร็วเท่ากัน ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับรัศมีของล้อของแท่นหมุน แท่นหมุน Tt_3 จะพาเอาแท่น T_3 ให้เคลื่อนที่ตามไปด้วย แต่แท่น T_3 จะเคลื่อนกลับไปกลับมาตามรางเป็นการเคลื่อนที่แบบซิมเปิลฮาร์โมนิก มีความถี่เท่ากับความถี่ของการหมุนของ Tt_3 ถ้าเปลี่ยนล้อของแท่นหมุน Tt_3 ขนาดต่าง ๆ ก็จะสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของความถี่ของการเคลื่อนที่ ถ้าเปลี่ยนระยะจากศูนย์กลางของแท่นหมุนไปยังสลักที่ติดอยู่บนแท่น (R) เป็นค่าต่าง ๆ ก็จะสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดของการเคลื่อนที่ของ T_3

พิจารณาค่าแทนของสลัก P_3 ที่ติดอยู่บนแท่น T_3 ย่อมจะเคลื่อนที่เป็นการเคลื่อนที่แบบซิมเปิลฮาร์โมนิกด้วย เมื่อ T_3 เคลื่อนที่เป็นการเคลื่อนที่แบบซิมเปิลฮาร์โมนิก ถ้าให้ θ เป็นมุมที่แนวของแขนบนแท่น Tt_3 กระทบกับแนวของร่องบน T_3 θ จะเป็น Phase angle (Sears and Zemansky, 1967 : 260) ของอนุภาค P_3 เพราะมุม θ จะกำหนดตำแหน่งของ P_3 เมื่อ รัศมี R มีค่าคงที่ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของ P_3 Phase angle θ และ Amplitude R

ให้ทำการทดลองดังต่อไปนี้ แก่ปลดสายพานออกจากแท่น T_3 แล้วจัดให้แขนบนแท่นหมุน อยู่ในแนวเดียวกันกับร่องบนแท่น T_3 ใช้คินส์ทำเครื่องหมายบนแท่น T_3 ให้ตรงกับจุดกึ่งกลางของราง สมมุติให้เครื่องหมายบนแท่นเป็น x เครื่องหมายบนรางเป็น o ระยะ OY ให้มีค่าเป็นบวก เมื่อวัดไปทางปลายหนึ่งของราง และเป็นลบ เมื่อวัดไปทางอีกปลายหนึ่งหมุนแท่นหมุนไปในทิศทางที่ OY เป็นบวก โดยเปลี่ยนค่า θ ไปทีละ 10° พร้อมกับวัดระยะ OY ทุก ๆ ค่าของ θ เปลี่ยน θ ไปจนครบ 360° ทดลองซ้ำอีกโดยเปลี่ยนค่า R ไปอีก 2 ค่า คำนวณค่า OY จากสมการ

$$OY = R \sin \theta \dots\dots\dots(1.5)$$

แล้วนำค่าที่ได้จากการคำนวณมาเปรียบเทียบกับค่า OY ที่วัดได้ ก็จะได้เห็นว่าค่าที่วัดได้จะใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณ ข้อผิดพลาดอาจจะเนื่องมาจากการวัดและขอบกร่องของเครื่องมือ เช่น สลักไม่พอดีกับร่องอาจหลวมเกินไป แกนของแท่นหมุนหลวมเกินไป เป็นต้น

2. Sine Wave, Harmonics and Combination of Harmonics

ปรากฏการณ์เกี่ยวกับคลื่นในธรรมชาตินั้น มีทั้งที่มองเห็นได้และมองไม่เห็น ที่มองเห็นได้อย่างชัดเจนก็ได้อีกคลื่นบนผิวน้ำ คลื่นตามขวางในเส้นเชือก คลื่นอัดขยายในขดลวดสปริง เป็นต้น ส่วนประเภทหลังก็เป็นคลื่นที่ไม่สามารถจะมองเห็นได้ ซึ่งก็ได้แก่คลื่นเสียง คลื่นแผ่นดินไหว คลื่นไต้ฝุ่น เป็นต้น ซึ่งจัดไว้ในประเภทคลื่นเชิงกล (Mechanical Wave) ต้องอาศัยตัวกลาง (ที่เป็นสสาร) ในการเคลื่อนที่ อีกประเภทหนึ่งก็มองไม่เห็นเช่นกันก็คือ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เดินทางโดยไม่อาศัยตัวกลาง (ที่เป็นสสาร) สามารถจะเดินทางผ่านอวกาศได้ ไก่แก่คลื่นแสง คลื่นความร้อน คลื่นวิทยุ เป็นต้น การศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ เช่น ความเข้ม ความถี่ ความยาวคลื่น และความเร็วของคลื่นประเภทหลัง จึงจำเป็นต้องกระทำโดยทางอ้อม แต่ที่จะกล่าวถึงเป็นส่วนใหญ่นั้นอันคืบต่อไปนี้ ก็คือคลื่นเสียง

เสียงเกิดจากการสั่นสะเทือนของวัตถุอันเป็นต้นกำเนิดเสียง และการสั่นสะเทือนนี้จะถูกถ่ายทอดผ่านตัวกลาง สู่หูของคน (รวมถึงสัตว์ที่มีประสาทสัมผัสเสียง) ระบบประสาทเกี่ยวกับการได้ยินก็จะเปลี่ยนการสั่นสะเทือนของตัวกลางให้เป็นความรู้สึกว่า "เสียง" การศึกษาคูสมบัติของคลื่นเสียงจึงอาจจะศึกษาได้จากคุณสมบัติของการสั่นสะเทือนของต้นกำเนิดเสียงโดยตรง หรืออาจจะศึกษาจากการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติบางประการของตัวกลางอันเนื่องมาจากคลื่นเสียงก็ได้ เช่น Kundt's experiment ก็สามารถหาความยาวคลื่นของเสียงได้ โดยอาศัยการเคลื่อนที่ของตัวกลางซึ่งเป็นอากาศภายในหลอดแก้ว ทำให้ผงคอร์รวมกันเป็นกระจุก ณ ตำแหน่งที่อากาศเคลื่อนที่น้อยที่สุด นอกจากนี้ยังสามารถใช้เครื่องมือทางแม่เหล็กไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ในการศึกษาคูสมบัติต่าง ๆ เกี่ยวกับเสียงได้อีกด้วย เครื่องมือดังกล่าวจะทำให้เราสามารถเปลี่ยนคลื่นเสียงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า และสัญญาณไฟฟ้านี้สามารถจะเปลี่ยนไปเป็นรูปที่สามารถจะสังเกตหรือวัดไค่ได้ง่ายที่ไซกันมากก็คือ นำเอาสัญญาณไฟฟ้าไปควบคุมการเบนของลำอิเล็กตรอนใน Cathode-ray tube ของ Oscilloscope ถ้าใส่สัญญาณเสียงเข้าทาง Vertical สัญญาณ Sawtooth เข้าทาง Horizontal ภาพที่ปรากฏบนจอก็จะเป็นรูปคลื่นเสียง ซึ่งรูปคลื่นที่เห็นบนจอนี้ก็คือกราฟที่แสดงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติบางอย่างของตัวกลาง หรือต้นกำเนิดเสียงเมื่อเทียบกับเวลา ถ้าเป็นเสียงที่มีความถี่เดียว เช่น การสั่นของส้อมเสียงเป็นต้น ภาพที่ปรากฏบนจอจะมีลักษณะเป็น Sine curve หรืออาจจะเรียกว่า Sine wave ถ้าเก็บเอาสัญญาณเสียงหลาย ๆ ความถี่เข้ามาพร้อมกัน ภาพที่ปรากฏก็จะเป็นผลรวมของ Sine waves หลาย ๆ คลื่นตามหลัก Superposition คลื่นเสียงที่มีความถี่ต่ำสุดอันเกิดจากสั่นสะเทือนของวัตถุอันหนึ่ง ๆ นั้น เรียกว่า Fundamental frequency ในขณะที่เดียวกันนั้นวัตถุนั้นอาจจะสั่นสะเทือนด้วยความถี่เป็น 2, 3, 4, ... เท่าของ Fundamental frequency ถ้าให้ Fundamental frequency เท่ากับ f_1 และ $f_n = n f_1$ เมื่อ $n = 1, 2, 3, \dots$ แล้ว คลื่นที่มีความถี่สอดคล้องกับความสัมพันธ์ดังกล่าวเรียกว่า "Harmonics" เมื่อ $n=1$ f_n ก็มีความถี่เท่ากับ

Fundamental frequency f_1 ซึ่งเรียกว่า Harmonic ที่ 1 ความถี่เมื่อ $n = 2$ เรียกว่า Harmonic ที่ 2 และในทำนองเดียวกัน เมื่อ $n = 3, 4, 5 \dots$ ก็เรียกว่า Harmonic ที่ 3, 4, 5 ... ตามลำดับ (Shortley and Williams, 1967 : 422)

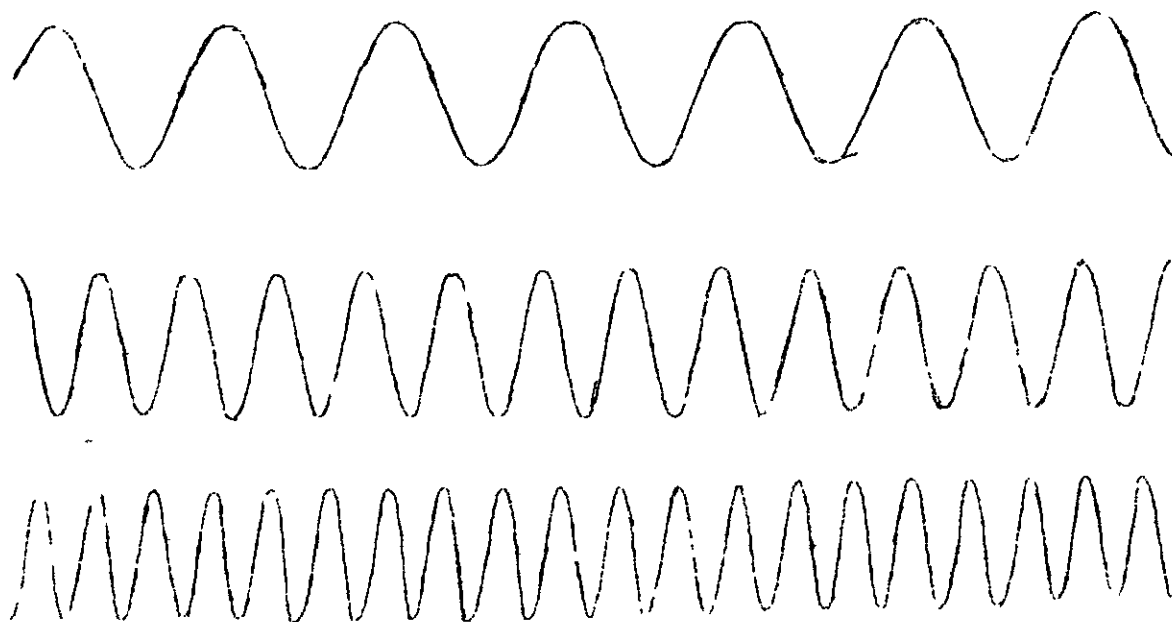
ในเรื่องดังกล่าวข้างต้น เราสามารถทำการสาธิตหรือทดลองโดยใช้เครื่องกลเขียนรูปคลื่น แต่ก่อนที่จะกล่าวถึงการสาธิตหรือทดลอง เพื่อความสะดวกในการจัดเครื่องมือและประหยัดเวลาในการทดลอง จึงได้กำหนดชื่อเรียกสำหรับชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเครื่องกลให้ชัดเจนอีกครั้งหนึ่ง

เครื่องกลประกอบด้วยชิ้นส่วนต่าง ๆ หลายชิ้นส่วน ซึ่งสามารถถอดหรือประกอบได้สะดวก (ดูรูปที่ 3 และ 4) เครื่องกลประกอบด้วยแท่นหมุนซึ่งติดอยู่บนฐานเดียวกัน 4 แท่น คือ Tt_1, Tt_2, Tt_3 และ Tt_4 อีกแท่นหนึ่งเป็นแหล่งจ่ายกำลังการหมุนให้แก่แท่นทั้ง 4 ซึ่งแยกไวทางหากให้ชื่อว่า S แท่น Tt_1, Tt_2 และ Tt_3 เป็นแท่นที่มีลักษณะเหมือนกันทุกประการ มีรัศมี 6.5 ซม. แต่ละแท่นจะติดแน่นกับแกนเหล็ก ซึ่งส่วนหนึ่งของแกนจะอยู่เหนือแท่น ส่วนนี้จะมีเกลียวสำหรับใส่สกรูยาวประมาณ 1.5 ซม. มีไว้สำหรับใส่สกรูกลมทำด้วยแผ่นไม้อัดขนาดรัศมีต่าง ๆ กัน ซึ่งจะเรียกชื่อด้วยอักษร W และมีเลขย่อย (Subscript) บอกขนาด ตัวเลขที่ห้อยจะเป็นค่าของรัศมีของล้อมีหน่วยเป็นเซนติเมตร สำหรับล้อขนาดเดียวกัน กำหนดเรียกชื่อให้ต่างกันด้วยอักษรภาษาอังกฤษตัวเล็ก a, b, c, ... ต่อท้ายเลขย่อย ตัวอย่างเช่น ล้อขนาดรัศมี 6 ซม. มีอยู่ 3 ล้อ ก็ให้ชื่อเป็น w_{6a}, w_{6b} และ w_{6c} หรือล้อขนาดรัศมี 3.6 ซม. มีอยู่ล้อเดียวก็ให้ชื่อเป็น $w_{3.6}$ เป็นต้น แท่นหมุนแต่ละแท่นจะมีล้อ 2 ล้อ หนึ่งมีขนาดใหญ่ที่สุดคือ w_{6a}, w_{6b} และ w_{6c} ซึ่งเป็นล้อของแท่น Tt_1, Tt_2 และ Tt_3 ตามลำดับ ส่วนอีกล้อนึงเป็นล้อที่มีขนาดเล็กกว่า ระหว่างล้อทั้งสองจะมีแผ่นพลาสติกกลมขนาดรัศมี 6.5 ซม. คั่นอยู่ และจะมีแผ่นพลาสติกกลมอีกแผ่นหนึ่งประกบไว้บนสุด แผ่นบนสุดแต่ละแผ่นจะติดแกนให้ชื่อว่า Ar_1, Ar_2 และ Ar_3 แขนนี้มีไว้สำหรับยึดสลักซึ่งจะให้ชื่อว่า P_a, P_b และ P_c ตามลำดับ ส่วน Tt_4 เป็นแท่นหมุนขนาดรัศมี 3.5 ซม. มีแกนส่วนหนึ่งอยู่เหนือแท่นสำหรับใส่สกรู - เช่นเดียวกัน แกนของ Tt_4 จะจะเป็นรูเล็ก ๆ สำหรับร้อยเชือกซึ่งผูกโยงอยู่กับแท่น

สำหรับวางกระดาษเหนือแท่นหมุน Tt_1 , Tt_2 และ Tt_3 จะมีรางให้ชื่อเป็น R_1 , R_2 และ R_3 ตามลำดับ และเหนือรางทั้ง 3 จะมีราง R_4 และ R_5 ซึ่งยึดไว้ด้วยกัน รางทั้ง 5 ดังกล่าวสามารถจะถอดหรือประกอบเข้าที่เดิมได้สะดวก อีกรางหนึ่งจะติดอยู่กับฐานของเครื่องกลให้ชื่อเป็น R มีไว้วางแท่นสำหรับวางกระดาษ ซึ่งให้ชื่อว่าแท่น T ส่วนแท่นที่จะวางบนรางทั้ง 5 ดังกล่าวให้ชื่อเป็น T_1 , T_2 , T_3 , T_4 และ T_5 ตามลำดับ แท่น T_1 , T_2 และ T_3 จะเป็นร่องยาวตรงไปทิศทางที่ตั้งฉากกับราง ด้านบนแท่นจะติดสลักให้ชื่อเป็น P_1 , P_2 และ P_3 ตามลำดับ ด้านล่างของแท่น T_4 และ T_5 จะติดสลักให้ชื่อเป็น P_{R1} และ P_R ตามลำดับ สลัก P_2 , P_{R1} และ P_3 จะถูกบังคับให้อยู่ในแนวเส้นตรงอันเดียวกันด้วยคัน L_1 ส่วนสลัก P_1 , P_R และ P_{R1} จะถูกบังคับให้อยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกันด้วยคัน L_2 นอกจากนี้ยังมีแขนสำหรับจับปากกาให้ชื่อเป็น Ax ซึ่งเบนไปมาได้คล่องเฉพาะในแนวตั้ง และสามารถปรับตำแหน่งของปลายปากกาได้ด้วย แขน Ax นี้ได้รับการออกแบบให้ติดทั้งเข้ากับแท่น T_5 และ T_2 ได้สะดวก ส่วนแท่น T ก็ออกแบบให้สามารถยกออกจากราง R และประกอบเข้ากับแท่น T_1 ได้สะดวก รอกสำหรับดึงสายพานมีอยู่ 2 ตัวให้ชื่อ Pl_1 และ Pl_2 สายพานที่คล้องระหว่าง Tt_3 กับ S ให้ชื่อ B_S ระหว่าง Tt_2 กับ Tt_3 มี 2 ขนาดให้ชื่อ B_{23a} กับ B_{23b} ระหว่าง Tt_1 กับ Tt_2 มี 2 ขนาดให้ชื่อ B_{12a} และ B_{12b} ระหว่าง Tt_1 กับ Tt_4 มี 2 ขนาดให้ชื่อ B_{14a} และ B_{14b}

วิธีการสาธิตการเขียน Sine wave ทำดังต่อไปนี้ ใส่ล้อเข้ากับแท่นหมุน โดยแท่น Tt_1 ใส่ล้อ w_{6a} ไวนั้น w_{3a} แท่น Tt_2 ใส่ล้อ w_{6b} ไวล่าง w_{3b} แท่น Tt_3 ใส่ล้อ w_{6c} ไวนั้น w_4 ทั้งนี้แต่ละแท่นทองใส่แผ่นพลาสติกกันระหว่างล้อและแผ่นประกอบข้างบนแล้วขันนอตให้แน่น ใส่ล้อ w_{3a} เข้ากับแท่นหมุน Tt_4 แล้วใส่แท่นหมุนทั้งหมดเข้าที่ คล้องสายพาน B_{14a} เชื่อมระหว่าง w_{3a} กับ w_{3a} คล้อง B_{23a} เชื่อม w_4 กับ w_{6b} และปรับรอก Pl_2 ให้สายพานตึง คล้อง B_{12a} เชื่อม w_{3b} กับ w_{6a} ปรับรอก Pl_1 ให้สายพานตึง คล้อง B_S เชื่อม w_{6c} กับล้อของแท่นหมุน S

ร้อยเชือกผ่านรูเล็ก ๆ ของแกนของ Tt_4 โดยผูกปลายข้างหนึ่งให้เป็นปม โยงเชือกผ่านห่วงไปผูกไว้กับแท่น T ซึ่งวางอยู่บนราง R ในตำแหน่งไกลสุด เลื่อนสลัก P_b และ P_c มาอยู่ที่ศูนย์กลางของแท่นหมุน ส่วนสลัก P_a ให้อยู่ห่างจากศูนย์กลาง 3 ซม. วางราง R_1, R_2, R_3 เข้าที่เหนือแท่น Tt_1, Tt_2, Tt_3 ตามลำดับ วางแท่น T_1, T_2, T_3 ลงบนรางตามลำดับ โดยให้รองรับกับสลัก P_a, P_b, P_c ตามลำดับ ใส่คาน L_1 เข้ากับสลัก P_2 และ P_3 วางราง R_4, R_5 เข้าที่เหนือรางทั้ง 3 แล้ววางแท่น T_4 บน R_4 โดยใส่สลัก P_{R1} เข้าไปในรูของคาน L_1 ใส่คาน L_2 เข้ากับสลัก P_1 และ P_{R1} แล้ววางแท่น T_5 บนราง R_5 โดยใส่สลัก P_R เข้าไปในรูของคาน L_2 ประกอบแขน A_5 เข้ากับแท่น T_5 ติดแผนกระดาษเข้ากับแท่น T วางปลายปากกาบนแผนกระดาษโดยปรับตำแหน่งให้เหมาะสม เมื่อแท่นหมุน S หมุนไปจะเป็นผลให้แท่นหมุนทั้งหมดหมุนไปด้วยความเร็วต่าง ๆ กัน สมมุติให้ความถี่ของการหมุนเป็น f_1, f_2, f_3 ตามลำดับ จะเป็นผลให้แท่น T_5 เคลื่อนที่เป็น Simple harmonic motion ความถี่เท่ากับ f_1 แอมพลิจูด เท่ากับ 1 ซม. และขณะเดียวกันแท่น T จะเคลื่อนไปตามราง R ด้วยความเร็วสม่ำเสมอ ปากกาก็จะขีดเส้นบนแผนกระดาษเป็นรูป Sine wave เมื่อปากกาเคลื่อนไปจนเกือบสุดแผนกระดาษแล้วก็ปลดสายพานจาก Tt_4 ให้แท่น S หยุดหมุน แล้วเลื่อนแท่น T กลับที่เดิม เลื่อนสลัก P_a มาไว้ที่ศูนย์กลาง เลื่อนสลัก P_b ให้ห่างจากศูนย์กลาง 3 ซม. เลื่อนตำแหน่งปลายปากกา คลองสายพานเข้ากับ Tt_4 ให้แท่น S หมุน จะเป็นผลให้แท่น T_5 เคลื่อนที่เป็น Simple harmonic motion มีความถี่ f_2 แอมพลิจูด 1 ซม. เมื่อเขียนรูป Sine wave ไปจนเกือบจะสุดแผนกระดาษแล้ว ก็ปฏิบัติเช่นเดียวกับคราวแรก แต่เลื่อน P_b มาไว้ที่ศูนย์กลาง และเลื่อน P_c ไปเป็นระยะ 3 ซม. ห่างจากศูนย์กลาง คราวนี้ T_5 จะเคลื่อนที่เป็น Simple harmonic motion มีความถี่ f_3 แอมพลิจูด 1 ซม. ภาพของ Sine wave ที่เขียนได้จากเครื่องกลแสดงไว้ในรูปที่ 13



รูปที่ 13 Sine waves

เพื่อความสะดวกจะกำหนดชื่อลงในตำแหน่งต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ คือ ลอดของ Tt_1 , Tt_2 และ Tt_3 จะมีแทนละ 2 ลอด คือ ลอดบนเรียก w_{aa}, w_{ba} และ w_{ca} มีรัศมี r_{aa}, r_{ba} และ r_{ca} ตามลำดับ ลอดล่างเรียก w_{ab}, w_{bb} และ w_{cb} มีรัศมี r_{ab}, r_{bb} และ r_{cb} ตามลำดับ ส่วน Tt_4 มีลอดเดี่ยวเรียก w_d มีรัศมี r_d จะเห็นได้ว่าความถี่ของแทนหมุนทั้งหมดจะขึ้นแก่กัน ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของรัศมีของลอด จากการสาธิตข้างต้นจะเห็นว่า

$$f_2 = (r_{aa}/r_{ba})f_1 = (6/3)f_1 = 2f_1$$

$$f_3 = (r_{bb}/r_{cb})f_2 = (4/4)f_2 = (6/4)2f_1 = 3f_1$$

ถ้าถือว่า f_1 เป็น Fundamental frequency หรือ ฮาร์โมนิค ที่ 1

ความถี่ f_2 และ f_3 ก็จะเป็น ฮาร์โมนิค ที่ 2 และที่ 3 ตามลำดับ ถ้าต้องการเขียนรูปคลื่น ฮาร์โมนิคที่สูงขึ้นไป (ลอดที่มีอยู่เขียนได้ถึงฮาร์โมนิคที่ 5 เท่านั้น) ก็สับเปลี่ยนลอดในตำแหน่ง w_{ba} และ w_{cb} ให้เหมาะสมโดยดูจากตารางที่ 1

เนื่องจากการหมุนของแท่น Tt_4 ไม่เป็นไปโดยอิสระ แต่จะขึ้นอยู่กับ การหมุน
ของ Tt_1 ตามสมการ

$$f_1 = (r_d/r_{ab})f_4 \dots\dots\dots(2.1)$$

จากความสัมพันธ์ $\lambda = v/f \dots\dots\dots(2.2)$

เมื่อ $\lambda =$ ความยาวคลื่น, $v =$ ความเร็ว, $f =$ ความถี่

จะได้ว่า $\lambda_1 = v/f_1 \dots\dots\dots(2.3)$

แต่ $v = 2\pi r f_4 \dots\dots\dots(2.4)$

เมื่อ r เป็นรัศมีของแกนของ Tt_4

จาก (2.1), (2.3) และ (2.4) จะได้

$$\lambda_1 = 2\pi r(r_{ab}/r_d) \dots\dots\dots(2.5)$$

สำหรับความถี่ f_2 จะได้

$$\lambda_2 = v/f_2 \dots\dots\dots(2.6)$$

อัตราส่วน f_2/f_1 จะเท่ากับ r_{aa}/r_{ba}

นั่นคือ $f_2 = (r_{aa}/r_{ba})f_1$

จาก (2.1) จะได้ $f_2 = (r_{aa}/r_{ba})(r_d/r_{ab})f_4 \dots\dots\dots(2.7)$

จาก (2.4), (2.6) และ (2.7) จะได้

$$\lambda_2 = 2\pi r(r_{ba}/r_{aa})(r_{ab}/r_d) \dots\dots\dots(2.8)$$

ในทำนองเดียวกัน เมื่อ $f_3/f_2 = r_{bb}/r_{cb}$

จะได้ $\lambda_3 = 2\pi r(r_{cb}/r_{bb})(r_{ba}/r_{aa})(r_{ab}/r_d) \dots\dots\dots(2.9)$

จาก (2.5), (2.8) และ (2.9) จะเห็นได้ว่า ค่าความยาวคลื่นไม่ได้ขึ้นอยู่กับ
กับความถี่ของการหมุน แต่จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างความถี่ของการหมุน ซึ่งก็คืออัตรา
ส่วนระหว่างรัศมีของล้อต่าง ๆ นั้นเอง เมื่อเป็นเช่นนี้จะไม่มีความเกี่ยวกับความเร็ว
ของมอเตอร์ที่ไม่สม่ำเสมอ ถึงแม้จะใช้มอเตอร์แบบมอเตอร์ รูปกลิ้งที่โลกยังคงเป็นรูป
คลื่นที่สม่ำเสมอ ทั้งนี้ ก็เป็นเพราะว่าความเร็วของคลื่นขึ้นอยู่กับความถี่ ตามสมการ

(2.4)

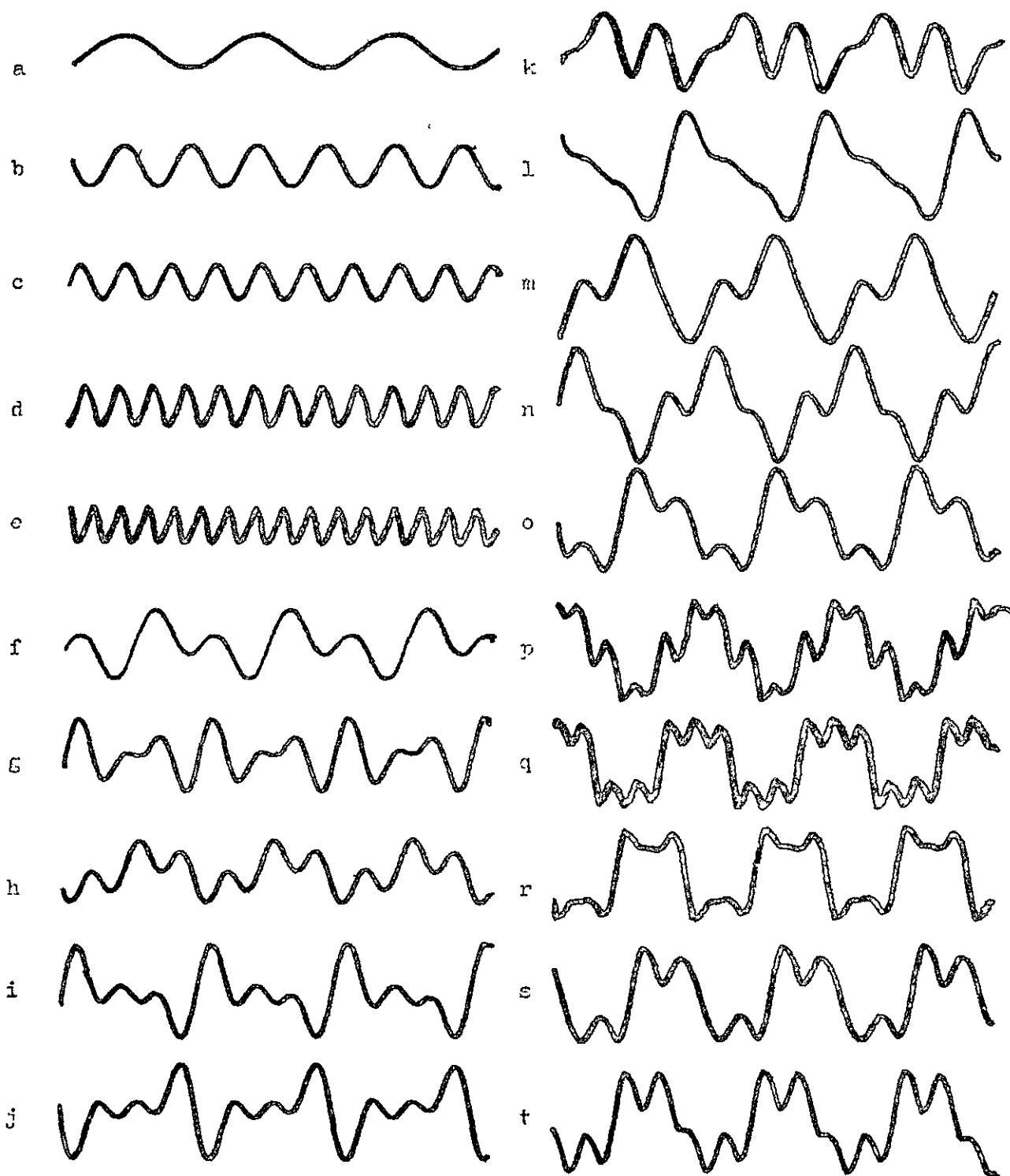
ถ้าวัดความยาวคลื่นจากคลื่นที่เขียนได้ในรูปที่ 13 แล้วนำมาเปรียบเทียบกับ ผลที่ได้จากการคำนวณจากสมการ (2.5), (2.8) และ (2.9) ก็จะเห็นได้ว่ามีค่าใกล้เคียงกันมาก ข้อผิดพลาดที่อาจจะเกิดขึ้นได้ อาจจะเนื่องมาจากการวัด และการถ่ายทอดการหมุนจากแท่นหมุนหนึ่งไปยังอีกแท่นหมุนหนึ่ง มีประสิทธิภาพไม่ถึง 100% ทั้งนี้ก็อาจจะเนื่องมาจากสายพานหย่อนหรือลื่น หรือเนื่องมาจากแรงเสียดทานระหว่างแท่นกับราง เป็นต้น

เพื่อแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของความเร็วกับความยาวคลื่นเมื่อความถี่คงที่ ให้เปลี่ยนอัตราส่วน r_d/r_{ab} (พิจารณา 2.1 และ 2.4) เช่นถ้าเปลี่ยนลอ w_{3d} ของ Tt_4 เป็น $w_{1.5}$ ความยาวคลื่นก็จะเป็น 2 เท่าของความยาวคลื่นในรูปที่ 13 ถ้าใส่ w_{3d} เข้ากับ Tt_4 อย่างเดิมและเปลี่ยน w_{3a} ของ Tt_1 ให้เป็น $w_{1.5}$ ความยาวคลื่นก็จะลดลงเป็นครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นในรูปที่ 13 เป็นต้น

เพื่อแสดงการเขียนคลื่นฮาร์โมนิกที่ 4 และที่ 5 ให้แทนลอของ Tt_2 ในตำแหน่ง w_{ba} ด้วย $w_{1.5}$ และแทนลอของ Tt_3 ในตำแหน่ง w_c ด้วย $w_{4.8}$ โดยใช้สายพาน B_{12b} กับ B_{23a} นอกนั้นจัดไว้อย่างเดิม ในกรณีนี้ $f_2 = 4f_1$ และ $f_3 = 5f_1$

สำหรับการแสดงการรวมกันของคลื่นตามหลัก Superposition การสังเกตการรวมกันของคลื่น 2 คลื่น คู่ใดคู่หนึ่งใน 3 ฮาร์โมนิก ก็ให้ลดแอมพลิจูดของฮาร์โมนิกที่ไม่ต้องการให้เป็น 0 และจัดแอมพลิจูดของฮาร์โมนิก ทั้งสองตามต้องการ ภาพที่ปรากฏเขียนบนกระดาษก็จะเป็นผลลัพธ์ของฮาร์โมนิก ทั้งสองตามหลัก Superposition การสังเกตการรวมกันของ 3 ฮาร์โมนิก ก็จัดแอมพลิจูดของฮาร์โมนิก ต่าง ๆ ให้มีค่าตามต้องการ ภาพที่ได้บนแผ่นกระดาษก็จะเป็นผลลัพธ์ของทั้ง 3 ฮาร์โมนิก

แบบรูปของคลื่นผลลัพธ์นั้นจะมีต่าง ๆ กัน เพราะมีค่าที่จะแปรผันได้หลายค่า เช่นจำนวนฮาร์โมนิกซึ่งมีตั้งแต่ฮาร์โมนิกที่ 1 ถึง 5 สามารถจะเลือกมารวมกันได้อย่างมาก ที่สุดครั้งละ 3 ฮาร์โมนิก ค่าแอมพลิจูดของแต่ละฮาร์โมนิกก็แปรได้ตั้งแต่ 0 ถึง 3 ซ.ม. Initial phase ก็แปรได้ตั้งแต่ 0° ถึง 360° คลื่นผลลัพธ์ที่แสดงไว้ในรูปที่ 14 เป็นเฉพาะบางกรณีที่น่าสนใจเท่านั้น



รูปที่ 14 Sine waves and combination of sine waves
(ดูรายละเอียดจากตารางที่ 2)

ตาราง 2 ตารางสำหรับอธิบายประกอบรูปที่ 14

harmonic $\frac{f}{f_1}$	Relative Amplitudes					Initial Phase Angles				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
a	$\frac{1}{2}$									
b		$\frac{1}{2}$								
c			$\frac{1}{2}$							
d				$\frac{1}{2}$						
e					$\frac{1}{2}$					
f	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$				0	0			
g		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$				0	0		
h	$\frac{1}{2}$		$\frac{1}{2}$			0		0		
i	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$			0	0	0		
j	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$			0	π	0		
k	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$			0	0	π		
l	1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}$			0	0	0		
m	1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}$			0	π	π		
n	1	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{2}$			0				
o	1	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$			0	0	0		
p	1		$\frac{1}{4}$		$\frac{1}{2}$	0		π		π
q	1		$\frac{1}{4}$		$\frac{1}{2}$	0		0		0
r	1		$\frac{1}{2}$		$\frac{1}{4}$	0		0		0
s	1		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}$		0		0	0	
t	1		$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{2}$		0		0	0	

3. Lissajous' Figures

เส้นโค้งที่เรียกว่า Lissajous' figures นั้น หมายถึงเส้นทางเกินของอนุภาคที่สั่นสะเทือน (Oscillate) ใน 2 ทิศทางที่ตั้งฉากกันในเวลาเดียวกัน โดยทั่ว ๆ ไปแอมพลิจูดและ Frequency อาจจะแตกต่างกันก็ได้ และความแตกต่างของ Initial phase ก็มีค่าได้ต่าง ๆ กัน (Sears and Zemansky, 1967 : 268)

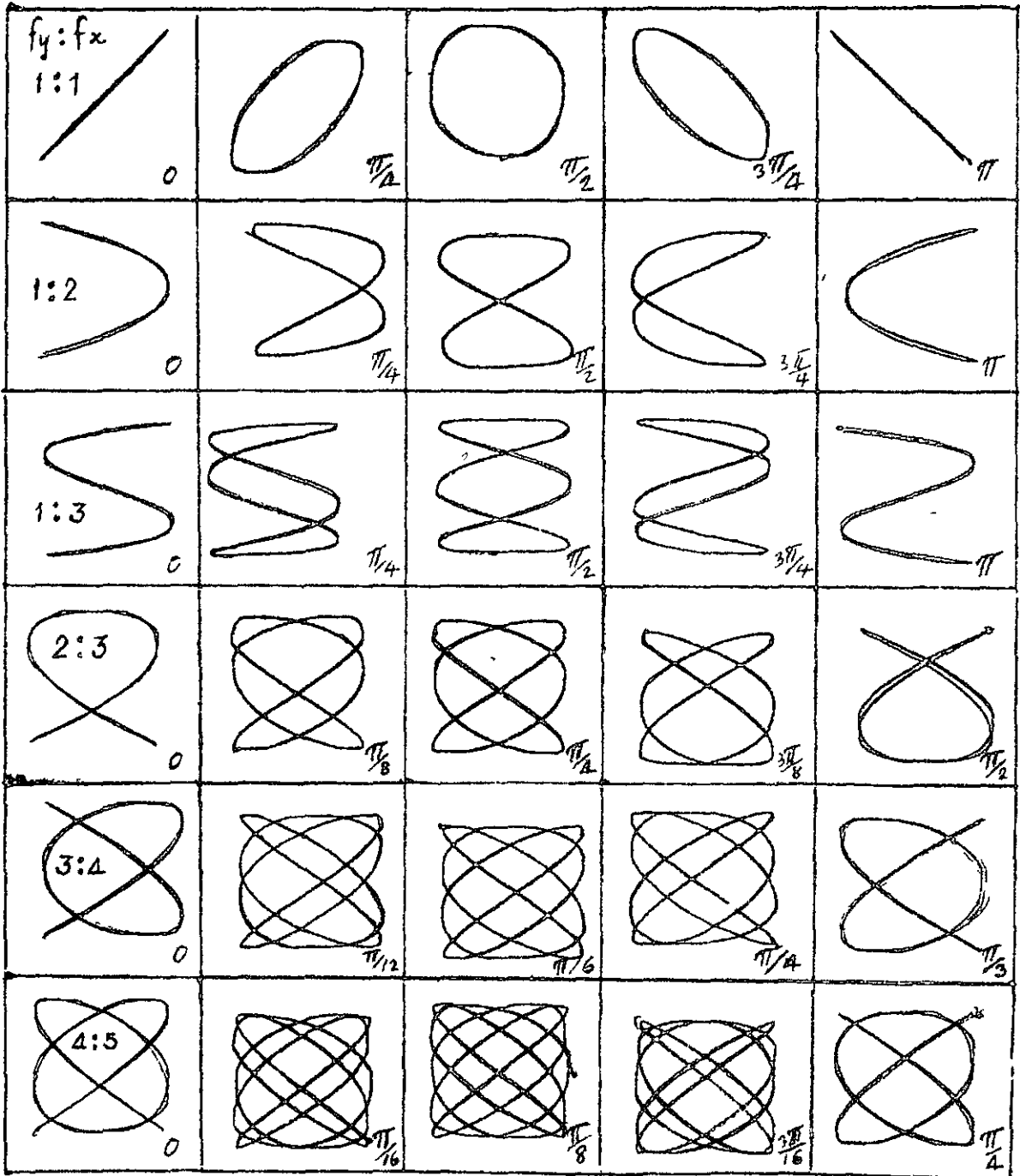
พิจารณาทางเกินของจุด (x,y) ซึ่งเป็นจุด Coordinate ของระบบแกนตั้งฉาก x,y เมื่อค่า x และ y เปลี่ยนแปลงไปตามสมการ

$$x = A_x \cos(2\pi f_x t + \theta_1)$$

$$y = A_y \cos(2\pi f_y t + \theta_2)$$

กำหนดให้ $A_x, A_y, f_x, f_y, \theta_1, \theta_2$ เป็นค่าคงที่ใด ๆ และเปลี่ยนค่า t ไปทีละน้อย แล้ว Plot จุด (x,y) เมื่อทอดแนวของจุดต่าง ๆ ก็จะได้ภาพ Lissajous' figure ซึ่งรูปร่างและขนาดของ Lissajous' figures จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วน $f_x:f_y$ แอมพลิจูด A_x, A_y และ Initial phase difference $(\theta_1 - \theta_2)$

การสาธิตการเขียน Lissajous' figures โดยใช้เครื่องกลเขียนรูปคลื่น ทำตามลำดับต่อไปนี้ คือ ถอดชิ้นส่วนต่าง ๆ ออกจากฐาน ใส่ล้อ Tt_2 โดยให้ w_{6b} อยู่ในตำแหน่ง w_{bb} ส่วนตำแหน่ง w_{ba} นั้นใส่ล้ออะไรก็ได้ ใส่แผ่นประกบชั้นนอกให้แน่น และใส่เข้าที่ สำหรับแทน Tt_3 ในตำแหน่ง w_{qb} เลือกล้อขนาดต่าง ๆ มาใส่โดยพิจารณาจากอัตราส่วน $f_2:f_3$ ที่ต้องการ ตัวอย่าง เช่น ถาดต้องการให้ $f_2:f_3=1:1$ ก็แทน w_{cb} ด้วย w_{6c} ถาดต้องการ $f_2:f_3=1:2$ ก็แทน w_{cb} ด้วย w_{3a} ถาดต้องการ $f_2:f_3=2:3$ ก็แทน w_{cb} ด้วย w_4 เป็นต้น แต่สำหรับตำแหน่ง w_{ca} นั้น แทนด้วย w_{6d} ใส่แผ่นประกบและชั้นนอกให้แน่นแล้วใส่แทนหมุนเข้าที่ คลองสายพานเชื่อมล้อ w_{bb} และ w_{eb} โดยเลือกสายพาน B_{23a} หรือ B_{23b} ตามแต่เหมาะสม ปรับรอกถึงสายพานให้สายพานมีความตึงพอเหมาะ แล้วคล้องสายพานเชื่อม w_{ca} เข้ากับแทนหมุน s วางราง R_3 ในตำแหน่งปกติ และวางราง R_2 ในตำแหน่งที่แนวของรางตั้งฉากกับ R_3 เลื่อนตำแหน่งของสลัก P_b และ P_c ตามต้องการ ประกอบแทน T เข้ากับ T_3 แล้ววางลงบนราง R_3 โดยให้รอกของ T_3



รูปที่ 15 Lissajous' figures เขียนโดยเครื่องกลเขียนรูปคลื่น

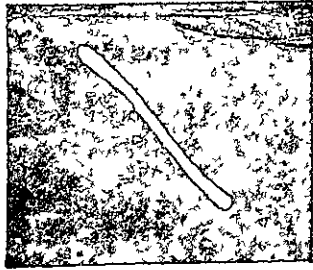
หมายเหตุ ภาพในแต่ละแถวมีอัตราส่วนของความถี่อันเดียวกัน ค่าที่เขียนไว้มุมขวาล่าง
เป็นค่า Initial phase difference

ตรงกับสลัก P_c ประกอบแขนจับปากกา A_r เข้ากับแท่น T_2 แล้ววางลงบนราง R_2 โดยในร่องของ T_2 ตรงกับสลัก P_b ใส่แผ่นกระดาษเข้ากับแท่น T ใส่ปากกาเข้ากับแขน A_r แล้ววางปลายปากกาลงบนแผ่นกระดาษ โดยปรับตำแหน่งของปลายปากกาให้เหมาะสม เมื่อให้แท่น S หมุน ก็จะพาให้แท่น Tt_2 และ Tt_3 หมุนไปด้วย แท่น T_2 และ T_3 ก็จะเคลื่อนที่เป็นซิมเปิลฮาร์โมนิก ในทิศทางที่ตั้งฉากกันด้วยความถี่ต่าง ๆ กัน ซึ่งกำหนดความขนาดลอของแท่นหมุนปากกาจะเขียน Lissajous' figures ลงบนแผ่นกระดาษ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 15

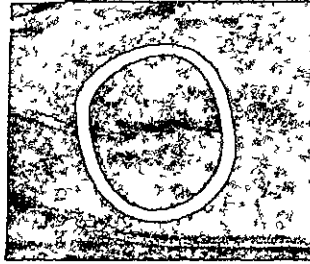
จากรูปที่ 15 จะเห็นได้ว่าเมื่อความถี่ของการสั่นสะเทือนทั้งสองแนวเป็นอัตราส่วนที่ลงตัวต่อกันน้อย ๆ จะได้ Lissajous' figures ที่มีแบบรูป (Pattern) ที่แน่นอน แบบรูปดังกล่าวนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการเปรียบเทียบความถี่สูง ๆ 2 ความถี่โดยใช้ Oscilloscope หรือ Oscillobox ที่ผู้เขียนสร้าง เพราะแบบรูปไม่ได้ขึ้นกับความถี่ แต่จะขึ้นกับอัตราส่วนระหว่างความถี่แอมพลิจูดและ Initial phase difference แต่การรูปคลื่น (Wave form) ของคลื่นความถี่ทั้งสองที่นำมาเปรียบเทียบกัน ไม่เป็น Sine wave แบบรูปของ Lissajous' figures ย่อมจะแตกต่างไปจากแบบรูปที่แสดงไว้ในรูปที่ 15 แต่การรูปคลื่นมีลักษณะใกล้เคียงกับ Sine wave ก็พอที่จะใช้แบบรูปในรูปที่ 15 ไปเปรียบเทียบได้

Lissajous' figures ที่เกิดจากคลื่นเสียง 2 ความถี่นั้น สามารถจะศึกษาได้โดยใช้เครื่องมือในชุดทดลอง ซึ่งประกอบด้วย Oscillobox เครื่องขยายเสียง 2 เครื่อง ให้ขอเป็น H-Amp. และ V-Amp. และ Electronic Audio Oscillator ให้ขอเป็น Osc.1 การทดลองปฏิบัติดังต่อไปนี้คือ ต่อ Output ของ H-Amp. และ V-Amp. เข้ากับ H-Input และ V-Input ของ Oscillobox ตามลำดับ ใส่สัญญาณ 50 c/s เข้าทาง Input ของ H-Amp. โดยต่อสาย Input ออกมาแล้วใช้มือแตะ หรือทำโดยวิธีอื่นก็ได้ สำหรับเครื่องขยายเสียงที่ผู้เขียนได้ออกแบบและสร้างขึ้นนั้น ได้แบ่งสัญญาณ 50 c/s มาจาก Power Transformer โดยใช้หลักของ Voltage divider ซึ่งจะมีส่วนสำหรับเชื่อมสัญญาณดังกล่าวเข้ากับ Input ของ H-Amp. ถ้าไม่ต้องการใช้สัญญาณ

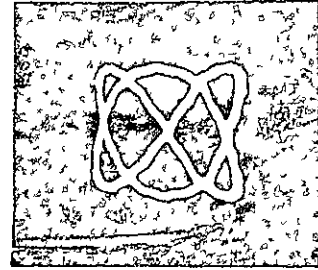
(ก)



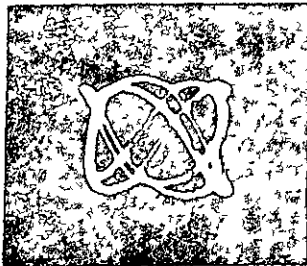
1 : 1



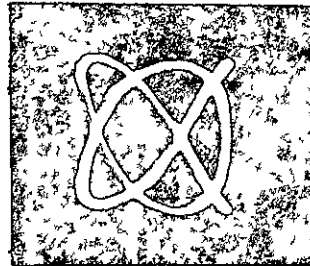
1 : 1



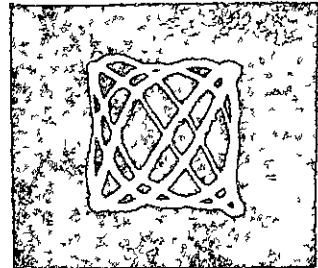
3 : 2



5 : 3

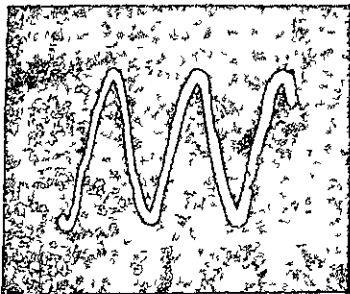


5 : 4

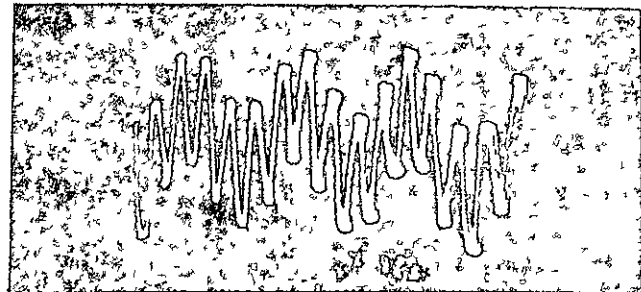


5 : 4

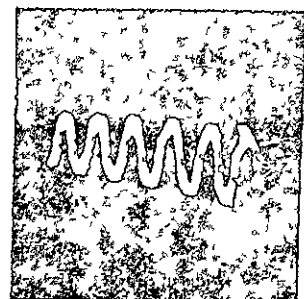
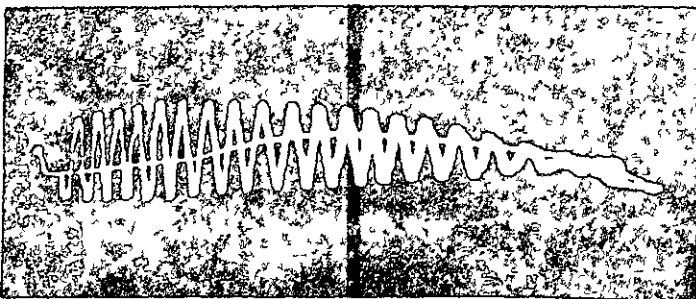
(ข)



Simple waveform



Complex waveform



Beat waveform

รูปที่ 16 1. Isosagous figures (ก) และรูปคลื่นแบบต่าง ๆ
(ข) ที่ได้จาก Oscilloscope

50 c/s ก็เปิดสวิตช์เมื่อใส่สัญญาณ 50 c/s เข้าไปแล้วก็กดสวิตช์ของ Oscillobox ไปในตำแหน่ง ON มองเข้าไปในช่องมองและปรับความเข้มของหลอดไฟให้พอเหมาะ กดสวิตช์ให้เครื่องขยายเสียงทำงานปรับ Volume ของ H-Amp. จนเห็นเส้นในช่องมองของ Oscillobox ในแนวระดับยาวพอสมควร ต่อ Output ของ Osc.1 เข้ากับ Input ของ V-Amp. ปรับ Volume ของ V-Amp. ให้พอเหมาะ จะมองเห็น Lissajous' figures ในช่องมองของ Oscillobox คอย ๆ เปลี่ยนความถี่ของ Osc.1 ไปทีละน้อย เมื่อความถี่ของ Osc.1 เป็นอัตราส่วนลงตัวกับ 50 ภาพที่เห็นในช่องมองก็จะหยุดนิ่ง แต่ถ้าความถี่ของ Osc.1 เปลี่ยนไปเล็กน้อย Lissajous' figures ก็จะไม่ค่อย ๆ หมุนไปอย่างช้า ๆ และจะเปลี่ยนไปเป็นรูปอื่นเมื่อความถี่เปลี่ยนไปมาก ๆ ภาพที่แสดงไว้ในรูปที่ 16 ก. เป็นภาพถ่ายจาก Oscillobox จะเห็นได้ว่าแบบรูปแตกต่างไปจากแบบรูปที่เขียน โดยเครื่องกลเขียนรูปคลื่นบ้าง ทั้งนี้ ก็เนื่องมาจากรูปคลื่นจาก Osc.1 ไม่เป็น Sine wave นั้นเอง

รูปคลื่นความถี่ที่เราใส่เข้าไปทาง Input ของ V-Amp. นั้นสามารถจะสังเกตได้โดยใส่สัญญาณ Saw tooth เข้าทาง Horizontal ของ Oscillobox คือเลื่อนแท่น M_{2T} ซึ่งเป็นแท่นสำหรับติดกระบอก M_{21} และ M_{22} (ดูรูปที่ 7 ก.) โดย M_{22} จะมาแทนที่ M_{21} ส่วน M_{21} จะออกมาอยู่ภายนอกกล่อง ในขณะที่เดียวกันนี้สวิตช์ SW_2 จะปิดทำให้แท่นหมุน T_1 หมุน กระบอก M_{22} ก็จะเบนไปมา โดยจะกวาดไปทางซ้ายมือด้วยความเร็วสม่ำเสมอ และจะเบนกลับอย่างรวดเร็ว และเริ่มกวาดไปทางขวามืออีก เป็นต้นนี้ต่อไปเรื่อย ๆ ซึ่งเป็นที่รู้จักกันในลักษณะของ Sawtooth wave form เมื่อมองเข้าไปในช่องมอง ก็จะเห็นรูปคลื่นที่เราใส่เข้าทาง V-Input ของ Oscillobox ดังแสดงในรูป 16 ข.

4. Pitch, Overtone and Quality of Sound

Pitch เป็นระดับความสูงต่ำของเสียง ซึ่งกำหนดด้วยความถี่ของคนเรา ไม่สามารถจะใช้เครื่องมือวัดได้ แต่มีความสัมพันธ์กับปริมาณที่วัดได้ปริมาณหนึ่งคือ ความถี่

ของเสียง ถ้าพิจารณาเสียง Tone เดียวที่มีความเข้มคงที่ Pitch จะเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น แต่ถาพิจารณาเสียง Tone เดียวที่มีความถี่คงที่ Pitch จะต่ำลงเมื่อความเข้มของเสียงเพิ่มขึ้น (Sears and Zemansky, 1967 : 514) สามารถจะใช้เครื่องมือในชุดทดลองสาธิตได้ โดยใช้หัวแม่เหล็กเก็บสัญญาณจากเส้นลวดเหล็กที่ขึงตึงบนแท่น (ดูรูปที่ 8.) ท่อสายสัญญาณเข้ากับ Input ของเครื่องขยาย ต่อลำโพงเข้ากับ Output วางหัวแม่เหล็กไว้ที่จุดกึ่งกลางของเส้นลวด ไขน็อตที่ใกล้ ๆ จุดกึ่งกลางฟังเสียงและจําระดับเสียงไว้ ชันนอกลวดเส้นลวดตึงกว่าเดิม แล้วก็ฟังเสียงอีกครั้งหนึ่งจะสังเกตได้ว่าระดับเสียงสูงกว่าเดิม ทั้งนี้ ก็เนื่องมาจากความถี่ของการสั่นสะเทือนของเส้นลวดขึ้นอยู่กับความตึง ถ้าความตึงมากขึ้นความถี่จะสูงขึ้น ถ้าให้ความตึงของเส้นลวดคงที่แล้วปรับ Volume ของเครื่องขยายเสียงให้ต่าง ๆ กัน ความเข้มของเสียงที่ดังจากลำโพงก็จะเปลี่ยนไปตามไปด้วย ถ้าฟังอย่างตั้งใจจะสังเกตได้ว่าระดับเสียงจะเปลี่ยนไปเล็กน้อย ซึ่งบางทีก็อาจจะสังเกตไม่ได้

สำหรับคลื่นเสียงที่เป็นฮาร์โมนิก ความถี่เสียงต่ำสุดเรียกว่า Fundamental tone หรือเรียกสั้น ๆ ว่า Fundamental ส่วนฮาร์โมนิกที่สูงกว่า Fundamental เรียกว่า Overtone นั่นคือ Overtone ที่ 1 คือฮาร์โมนิกที่ 2 Overtone ที่ 2 คือ ฮาร์โมนิกที่ 3 ต่อไปดังนี้เรื่อย ๆ (Shortley and Williams, 1967 : 422) การสั่นสะเทือนของเส้นลวดที่ขึงตึงจะสั่นพร้อมกันหลายความถี่ที่เป็นฮาร์โมนิก ความถี่ต่ำสุด หรือ Fundamental จะมีความยาวคลื่นเท่ากับสองเท่าของความยาวของเส้นลวด สมมุติให้เท่ากับ L ความยาวคลื่นของฮาร์โมนิกที่ 2 จะเท่ากับ L และฮาร์โมนิกที่ 3 เท่ากับ $(2/3)L$ เป็นต้น อาจแสดงให้เห็นได้ว่าเส้นลวดที่ขึงตึงจะสั่นสะเทือนด้วย ความถี่ฮาร์โมนิกต่าง ๆ ในขณะเดียวกัน โดยใช้ลวดเส้นเดียวกับการทดลองข้างต้นปรับความตึงให้พอเหมาะ ต่อปลายลวดทั้งสองเข้ากับขด Secondary ของ Output Transformer ที่ใช้ในวงจร Transistor โดยทั่วไป ขด Primary เข้ากับ Input ของเครื่องขยาย ต่อลำโพงเข้ากับ Output ของเครื่องขยาย วางแม่เหล็กเก็อกมา m_1

คร่อมที่จุดกึ่งกลางของเส้นลวด ใช้นิ้วคีบลวดโก่ง ๆ กับตำแหน่งของ m_1 ให้ลวดสั่นหัก
 สนามแม่เหล็กไปมา จะทำให้เกิดกระแสเหนี่ยวนำไหลกลับไปกลับมาในเส้นลวดและผ่าน
 ขดลวดของ Transformer สัญญาณไฟฟ้านี้จะถูกนำไปขยาย และออกมาเป็นคลื่นเสียง
 ทางลำโพง เสียงที่ได้ยินจะเป็น Fundamental ผสมกับฮาร์โมนิก จำนวนคู่หรือ Overtone
 จำนวนคู่ แต่ Fundamental จะมีแอมพลิจูดสูงสุด เราจึงได้ยินเป็นเสียงต่ำ ถ้า
 เลื่อน m_1 ไปไว้ที่ตำแหน่ง $(1/4)L$ ห่างจากปลายข้างหนึ่ง และวางแท่งแม่เหล็ก
 เกือบมา m_2 ไว้ที่ตำแหน่ง $(3/4)L$ โดยให้หัวของ m_2 ตรงข้ามกับ m_1 ใช้นิ้วคีบลวด
 ตำแหน่ง $(1/4)L$ เสียงที่ได้ยินจะเป็น Overtone ที่ 1 ส่วนเสียง Fundamental
 จะหายไป ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากกระแสเหนี่ยวนำของ Fundamental ที่เกิดจากเส้นลวด
 เคลื่อนที่หักสนามแม่เหล็กทั้งสองมีทิศทางสวนกัน (Phase difference = 180° แต่กระแส
 เนื่องจาก Overtone ที่ 1 มีทิศทางตามกัน (in phase) เราจึงได้ยินเสียงของ Overtone
 ที่ 1 ดังออกมาทางลำโพง ในขณะที่ลวดกำลังสั่นสะเทือนอยู่นั้น ถ้ารีบกลับหัวของแท่ง
 แม่เหล็กแท่งใดแท่งหนึ่ง เสียง Fundamental ก็จะดังขึ้นอีกครั้ง แสดงให้เห็นว่า
 ทั้งฮาร์โมนิกที่ 1 และที่ 2 จะสั่นสะเทือนในเวลาเดียวกัน

ถ้าเลื่อน m_1 และ m_2 ไปไว้ที่ตำแหน่งห่างจากปลายข้างใดข้างหนึ่งเป็นระยะ
 ทาง $(1/6)L$ และ $(1/2)L$ ตามลำดับ โดยให้หัวกลับกัน และวางแท่งแม่เหล็ก
 เกือบมาอีกอันหนึ่ง คือ m_3 ที่จุด $(5/6)L$ โดยให้หัวของ m_3 ไปทางเดียวกับ m_1 คีด
 เส้นลวดโก่ง ๆ กับตำแหน่ง $(1/6)L$ เสียงดังจากลำโพงจะเป็น Overtone ที่ 2 หรือ
 ฮาร์โมนิกที่ 3 Fundamental จะไม่ได้ยินเพราะ Phase ของกระแสเนื่องจาก m_1
 และ m_3 จะตรงข้ามกับกระแสเนื่องจาก m_2 ส่วนฮาร์โมนิกที่ 2 นั้น Phase ของ
 กระแสเนื่องจาก m_1 จะตรงข้ามกับ m_3 ส่วนกระแสเนื่องจาก m_2 นั้นมีค่าน้อยมาก
 เพราะอยู่ในตำแหน่ง Node ของฮาร์โมนิกที่ 2 พอดี ในขณะที่ลวดกำลังสั่นอยู่นั้น ถ้า
 รีบกลับหัวของ m_2 ความถี่ Fundamental ก็จะดังขึ้นอีกครั้ง แสดงให้เห็นว่าเส้นลวดจะ
 สั่นสะเทือนหลายฮาร์โมนิกในเวลาเดียวกัน

ถ้าพิจารณาเสียงของเครื่องดนตรีหลายเครื่อง เป็นต้นว่าไวโอลิน, ซอ (Flute) ออร์แกน (Organ) โดยปรับเสียง Fundamental ให้เท่ากัน แล้วใช้เครื่องดนตรีดังกล่าว บรรเลงเพลงตามโน้ตชุดเดียวกัน ผู้ฟังซึ่งได้ยินแต่เสียงโดยไม่เห็นผู้เล่นดนตรีเลย จะสามารถบอกได้โดยง่ายว่าเสียงใดเป็นเสียงของเครื่องดนตรีอะไร ความแตกต่างที่สังเกตได้นั้น เรียกว่าคุณภาพ (Quality) ของเสียงดนตรี ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความเข้มของ Overtones ต่าง ๆ สัมพันธ์กับความเข้มของ Fundamental ถ้าพิจารณาตามหลักของ Superposition แล้ว จะเห็นได้ว่าคุณภาพของเสียงมีความสัมพันธ์กับ Waveform ของคลื่นเสียง (Shortley and Williams, 1967 : 435)

ความสัมพันธ์ระหว่าง Quality กับ Waveform นั้น สามารถแสดงให้เห็นได้โดยใช้เครื่องมือในชุดทดลอง ได้แก่ Oscillobox หัวเก็บสัญญาณและเส้นลวด 2 ขนาดซึ่งตั้ง Audio Oscillators 2 เครื่องคือ Osc. 1 กับ Osc. 2 เครื่องขยาย 2 เครื่องคือ V-Amp. และ H-Amp. และลำโพง ทำการทดลองตามลำดับดังนี้คือ ท่อสายสัญญาณของ หัวเก็บสัญญาณเข้ากับ Input ของ V-Amp. ต่อ Output ของ V-Amp. และ H-Amp. เข้ากับ V-Input และ H-Input ของ Oscillobox ตามลำดับ เลื่อนสวิตช์ต่อสัญญาณ 50 c/s เข้ากับ Input ของ H-Amp. กดสวิตช์ของ Oscillobox ไปในตำแหน่ง ON ปรับความเข้มให้พอเหมาะ กดสวิตช์ของเครื่องขยายให้ทำงานปรับ Volume ของ H-Amp. ให้ได้เส้นยาวพอสมควร วางหัวเก็บสัญญาณไว้ตรงกึ่งกลางของเส้นลวด ใช้นิ้วกดเส้นลวดแล้วปรับ Volume ของ V-Amp. ให้ได้แอมพลิจูดพอเหมาะปรับความถี่ของเส้นลวดให้ได้ความถี่ 100 c/s โดยดูจาก Lissajous' figures เลื่อนหัวแม่เหล็กเก็บสัญญาณไปไว้ที่กึ่งกลางของลวดอีกเส้นหนึ่ง และปรับความถี่ของเส้นลวดให้ได้ความถี่ 100 c/s เช่นเดียวกัน เลื่อนแผ่น M_{2T} ของ Oscillobox ออกมองดูรูปคลื่นของสัญญาณที่ได้จากลวดแต่ละเส้น จะสังเกตเห็นความแตกต่างของ Waveform ที่ได้จากการสั่นของเส้นลวดทั้งสอง ถ้าต่อลำโพงเข้ากับ Output ของ V-Amp. ก็จะได้ยินเสียงที่มีระดับเดียวกัน (แทนโน้ตตัวใดตัวหนึ่ง ในเสียงดนตรี) แต่จะมีคุณภาพเสียงต่างกัน เพื่อศึกษา Waveform ที่สังเคราะห์จาก

Osc.1 และ Osc.2 ก็เลื่อนแทน M_{2T} เข้าที่เดิม ต่อสายสัญญาณของ Osc.1 และ Osc.2 เข้ากับ Input ของ V-Amp. ร่วมกัน กดสวิทช์ให้ Osc.1 ทำงาน ปรับความถี่ของ Osc.1 ให้ได้ 100 c/s เมื่อเปรียบเทียบกับความถี่ 50 c/s จาก H-Amp. โดยดูจาก Lissajous' figure ให้ Osc.1 หยุดทำงาน แล้วกดสวิทช์ให้ Osc.2 ทำงาน ปรับความถี่ของ Osc.2 จนได้ 200 c/s เลื่อนแทน M_{2T} รูปคลื่นจาก Oscillator ที่ละเครื่อง โดยปรับ Volume ของ Osc. 2 ให้ได้แอมพลิจูดประมาณครึ่งหนึ่งของ Osc.1 ให้ Oscillators ทั้งสองทำงานพร้อม ๆ กัน สังเกตรูปคลื่นและต่อลำโพงฟังเสียง เปลี่ยนค่าแอมพลิจูดของ Osc. 2 ไปเรื่อย ๆ แล้วสังเกตรูปคลื่นและเสียงที่ออกมา จะเห็นได้ว่าเสียงที่ไคยีนเปลี่ยนแปลงไปตามรูปคลื่นที่เปลี่ยนไป การสาธิตข้างต้นเป็นการแสดงการรวมคลื่น Fundamental (100 c/s) กับฮาร์โมนิกที่ 2 (200 c/s) ถ้าต้องการดูหลาย ๆ ฮาร์โมนิก ก็ต้องเพิ่ม Oscillators อีกและปรับไว้ที่ความถี่ฮาร์โมนิกต่าง ๆ ที่ต้องการ ก็จะมองเห็นรูปคลื่นที่ซับซ้อนยิ่งขึ้น แต่อย่างไรก็ตามจะไม่สามารถสังเกตรูปคลื่นของฮาร์โมนิกสูง ๆ ได้ เพราะขอบเขตของการตอบสนองต่อความถี่ของ Oscilloscope มีจำกัด คือ จะตอบสนองได้ดีเฉพาะความถี่ต่ำ ๆ เท่านั้น จากการทดลองจะพบว่าความถี่ประมาณ 400 c/s ก็สังเกตได้ยากแล้ว แม้ว่าจะปรับ Volume ของเครื่องขยายไว้สูงสุดแล้วก็ตาม แต่สำหรับความถี่ที่เป็น Resonance frequency หรือฮาร์โมนิกของมันแล้ว แอมพลิจูดจะสูงกว่าปกติ ที่ความถี่สูง ๆ (300 - 400 c/s) ก็ยังก่งสังเกตได้ แต่เมื่อเทียบกับความถี่ต่ำ ๆ แล้วก็ยังนับว่าแอมพลิจูดน้อยมาก

5. Beat of Two Waves

เมื่อมีคลื่นเสียง 2 กลิ่น มีแอมพลิจูดเท่ากัน และมีความถี่ใกล้เคียงกัน ผ่านไปในตัวกลางอันเดียวกัน ความเข้มของเสียง ณ ตำแหน่งหนึ่งในตัวกลาง จะมากบ้างน้อยบ้างสลับกันไปเป็นจังหวะสม่ำเสมอ ขึ้นอยู่กับเวลา การเปลี่ยนแปลงความเข้มของเสียงเนื่องจากเวลานี้ เรียกว่า "Beat"

พิจารณาสมการของคลื่นเสียงที่ถือว่า มีแอมพลิจูดเท่ากัน

$$y_1 = Y \cos 2\pi f_1 t, \quad y_2 = Y \cos 2\pi f_2 t$$

ตามหลัก superposition ถ้า displacement ผลลัพธ์จะมีค่าเป็น

$$y = y_1 + y_2 = Y(\cos 2\pi f_1 t + \cos 2\pi f_2 t)$$

อาศัยความสัมพันธ์

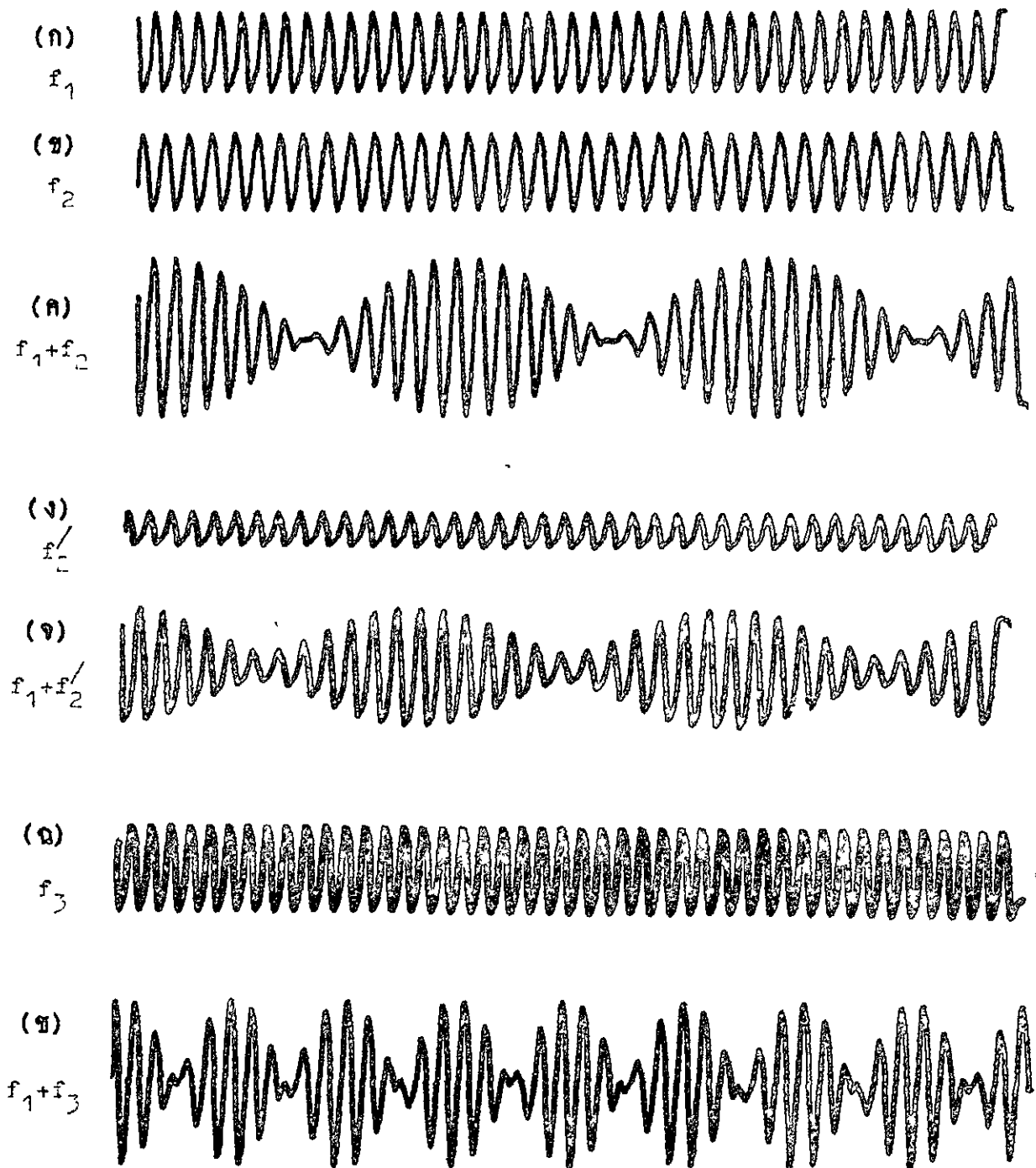
$$\cos a + \cos b = 2 \cos \frac{a-b}{2} \cos \frac{a+b}{2} \quad \text{จะได้}$$

$$y = \left(2 Y \cos 2\pi \frac{(f_1 - f_2)t}{2} \right) \cos 2\pi \frac{(f_1 + f_2)t}{2}$$

จะเห็นได้ว่าการสั่นสะเทือนผลลัพธ์จะมีค่าความถี่ เป็นค่าเฉลี่ยของความถี่ทั้งสอง คือ $(f_1 + f_2)/2$ พิจารณาส่วนที่อยู่ในวงเล็บใหญ่ จะถือว่าเป็นแอมพลิจูดของคลื่นที่มีความถี่ $(f_1 + f_2)/2$ ดังกล่าว ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปกับเวลาเป็น ฮาร์โมนิก beat อันหนึ่ง หรือ แอมพลิจูดสูงสุด จะเกิดขึ้นได้เมื่อ $\cos 2\pi(f_1 - f_2)t/2$ มีค่าเท่ากับ 1 และ -1 ซึ่งจะเกิดขึ้นได้อย่างละครึ่งในแต่ละ cycle เพราะฉะนั้น ความถี่ของ beat ก็จะมีค่าเป็น 2 เท่าของความถี่ $(f_1 - f_2)/2$ หรือความถี่ของ beat มีค่าเท่ากับผลต่างของความถี่ทั้งสอง (Sears and Zemansky, 1967:520-521)

การเกิด beat ของคลื่น สามารถแสดงให้เห็นได้โดยใช้เครื่องกลเขียนรูปคลื่น โดยจัดเครื่องกลเช่นเกี่ยวกับการจัดสำหรับเขียน sine wave ต่างกันแต่ขนาดล้อของแท่นหมุนตำแหน่งต่าง ๆ โดยใส่ล้อต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ แท่นหมุน Tt_4 ใส่ล้อ w_{3a} แท่นหมุน Tt_1 ใส่ล้อ $w_{1.5}$ และ w_{6a} ในตำแหน่ง w_{ab} และ w_{aa} ตามลำดับ แท่นหมุน Tt_2 ใส่ล้อ $w_{4.8}$ และ w_2 ในตำแหน่ง w_{bb} และ w_{ba} ตามลำดับ แท่นหมุน Tt_3

รูปที่ 17 Beat ของ Sine wave 2 คลื่นที่มีความถี่ใกล้เคียงกัน
เขียนโดยเครื่องกลเขียนรูปคลื่น



ใส่ลอ $w_{4.5}$ และ w_{6c} ในตำแหน่ง w_{cb} และ w_{cq} ตามลำดับ คล้องสายพาน B_{14b} , B_{23b} , B_{12b} และ B_8 ตามลำดับ วางวางแทน กาน และแซนกับปากกาเข้าที่ ตามปรกติ ปรับ แอมป์ลิจูดของแทน Tt_1 และ Tt_3 ให้เป็น 0 ของแทน Tt_2 มี ถ้าตามต้องการ จะได้รูปคลื่นดังในรูปที่ 17 ก. ลดแอมป์ลิจูดของ Tt_2 ให้เป็น 0 เพิ่มแอมป์ลิจูดของ Tt_3 เท่าที่ต้องการ จะได้รูปคลื่นดังรูปที่ 17 ข. เพิ่มแอมป์ลิจูดของ Tt_2 ให้เท่ากับของ Tt_3 จะได้รูปคลื่นของ beat ดังรูปที่ 17 ก. ถ้าลดแอมป์ลิจูดของแทน Tt_3 ลงครึ่งหนึ่ง ดังในรูปที่ 17 ง. เมื่อรวมกับรูปที่ 17 ก. จะได้รูปคลื่นของ beat รูปที่ 17 จ. จะเห็นว่า แอมป์ลิจูดต่ำสุดของ beat จะไม่เป็น 0 ถ้าเป็นของคลื่นเสียง ขณะที่แอมป์ลิจูดต่ำสุดเสียงก็จะถึงเบาที่สุด ถ้าเพิ่มความถี่ของ Tt_3 ขึ้นอีก โดยใส่ลอ w_4 แทนที่ $w_{4.5}$ จัดให้แอมป์ลิจูดเท่า Tt_2 จะได้รูปคลื่นดังรูปที่ 17 ฉ. เมื่อรวมกับคลื่นรูปที่ 17 ก. ก็จะได้คลื่นของ beat ดังรูปที่ 17 ข. จะเห็นว่าความถี่ของ beat จะมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับที่พิจารณามาข้างต้น

การสาธิตเกี่ยวกับ beat อันเนื่องมาจากคลื่นเสียง 2 คลื่นนั้น สามารถแสดงให้เห็นได้โดยใช้เครื่องมือในชุดทดลอง ซึ่งปฏิบัติการทดลองดังต่อไปนี้ ต่อ output ของ V-Amp. และ H-Amp. เข้ากับ V-input และ H-input ของ oscilloscope ตามลำดับ เลื่อนสวิตช์ต่อสัญญาณ 50c/s เข้ากับ input ของ H-Amp. ต่อสัญญาณจาก Osc.1 เข้ากับ input ของ V-Amp. ปรับความถี่ของ Osc.1 ให้ได้ 100 c/s โดยพิจารณาจาก Lissajous' figure ทักสัญญาณ 50c/s ออกจาก input ของ H-Amp. แล้วต่อสัญญาณจาก Osc.2 เข้าแทน ปรับความถี่ของ Osc. 2 จนมองเห็น Lissajous' figure เป็นวงกลม (โดยประมาณ) ปรับให้ Lissajous' figure หมุนไปช้า ๆ พอที่จะนับรอบการหมุนได้ทัน ปลดสาย output ของเครื่องขยายทั้งสองออก แล้วต่อลำโพงเข้าแทนที่ ปรับ Volume ของเครื่องขยายเสียงดังเท่า ๆ กัน จะได้ยินเสียง beat ถ้าจับเวลาหาความถี่ของ beat แล้วบวกกับ 100 c/s ก็จะได้ค่าความถี่ของคลื่นเสียงที่เกิดจาก Osc. 2

ถ้าต่อ output ของ Osc.1 และ Osc.2 อย่างขนานเข้ากับ input ของ V - Amp. เสียงที่ได้ยินจากลำโพง จะเป็นเสียง beat เช่นเดียวกับที่ได้ยินจากการ

ทดลองข้างต้น ลองนับหาความถี่ของ beat ก็จะได้เท่ากับข้างต้น ถ้าปลอกสายลำโพง ออกแล้วต่อ output ของ V-Amp. เข้ากับ V-input ของ Oscilloscope เลื่อน M_{2T} ออก จะมองเห็นรูปคลื่นของ beat ดังแสดงในรูปที่ 16 ข.

6. Resonance and Determination the Speed of Sound

โดยทั่ว ๆ ไปแล้ว วัตถุอันหนึ่ง ๆ จะมีความสามารถที่จะสั่นสะเทือนได้ก็เฉพาะ ในบางความถี่เท่านั้น ซึ่งเรียกว่าความถี่ธรรมชาติของวัตถุนั้น (Natural frequency) เมื่อมีแรงกระตุ้นกาน้อย ๆ แต่มีความถี่ของการกระทำของแรง เท่ากับความถี่ธรรมชาติ ของวัตถุแล้ว จะทำให้วัตถุนั้นสั่นสะเทือนอย่างรุนแรงเป็นพิเศษ เมื่อเทียบกับผลการกระตุ้นจากแรงที่มีความถี่อื่น ๆ ปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่า "resonance"

สำหรับเส้นลวดที่ขึงตึงนั้น จะมีความถี่ธรรมชาติ เป็น harmonics ซึ่งสามารถ ทำการสาธิตการเกิด resonance ในเส้นลวดที่ขึงตึงได้ โดยต่อ output ของ Osc.1 เข้ากับ input ของเครื่องขยาย ต่อหัวแม่เหล็กเก็บสัญญาณเข้ากับ output ของเครื่อง ขยาย วางหัวเก็บสัญญาณไว้ตรงจุดกึ่งกลางของเส้นลวด เมื่อเครื่องขยายและ Osc.1 ทำงาน กระแสที่ไหลในขลลวดของหัวเก็บสัญญาณ ซึ่งมีความถี่ เท่ากับความถี่ของ Osc.1 จะทำให้แรงดึงดูดของแท่นแม่เหล็กที่กระทำต่อ เส้นลวดมีค่ามากขึ้นตามความถี่ของกระแส ไฟ ค่อย ๆ เปลี่ยนความถี่ของ Osc.1 ตั้งแต่ต่ำสุดและเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อถึงความถี่หนึ่งซึ่งมีค่าเท่ากับ fundamental ของความถี่ธรรมชาติของเส้นลวด จะทำให้เส้นลวด สั่นอย่างเห็นได้ชัด การสั่นของเส้นลวดจะมี loop เดียว โดยที่ตำแหน่งของหัวเก็บ สัญญาณเป็น antinode ถ้าเพิ่มความถี่ของ Osc.1 ขึ้นไปเรื่อย ๆ อย่างช้า ๆ เมื่อ ความถี่ของ Osc.1 มีค่าเท่ากับฮาร์โมนิก ที่ 3 ของเส้นลวด จะเห็นเส้นลวดสั่น สะเทือนเป็น 3 loops ซึ่งตำแหน่งของหัวแม่เหล็กจะอยู่ที่ antinode ของ loop กลาง ถ้าเลื่อนตำแหน่งหัวเก็บสัญญาณไปไว้ที่ $1/4$ ของความยาวลวด ห่างจากปลาย ข้างหนึ่ง แล้วค่อย ๆ ลดความถี่ของ Osc.1 ลงทีละน้อย เมื่อความถี่ของ Osc.1 เท่า กับฮาร์โมนิก ที่ 2 ของเส้นลวด จะเห็นเส้นลวดสั่นเป็น 2 loops ซึ่งตำแหน่งของ

หัวแม่เหล็กจะเป็น antinode เช่นเดียวกัน ถ้าจัดตำแหน่งของหัวแม่เหล็กและควาบถึของ Osc.1 ให้เหมาะสม ก็ จะเห็นการสั่นสะเทือนของเส้นลวดในฮาร์โมนิคที่สูง ๆ ขึ้นไป แต่จะสังเกตเห็นว่า แอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนจะน้อยลงเรื่อย ๆ จากการทดลองข้างต้นนี้ แสดงให้เห็นว่าความถี่ธรรมชาติของเส้นลวดที่ขึงตึงนั้น เป็นความถี่ฮาร์โมนิค

นอกจากการทดลองกังกลาวข้างต้น เราสามารถจะแสดงการเกิด resonance ได้อีกโดยใช้ resonance tube ประกอบกับเครื่องมืออื่น ๆ ในชุดทดลอง โดยจัดเครื่องมือดังต่อไปนี้ คือ ต่อ output ของ Osc.1 เข้ากับ input ของ V-Amp. ต่อ output ของ V-Amp. เข้ากับ V-Input ของ Oscillobox ต่อ output ของ H-Amp. เข้ากับ H-input ของ Oscillo box เลื่อนสวิตช์ต่อสัญญาณ 500 c/s เข้ากับ input ของ H-Amp. ปรับความถี่ของ Osc.1 ให้ได้ 100 c/s โดยดูจาก Lissajous' figures ปลดสาย output ของ V-Amp. ออกแล้วต่อลำโพงเข้าแทน ลด Volume ของ V-Amp. ให้เสียงดังพอได้ยิน วางลำโพงคว่ำลงใกล้ปากหลอด resonance ซึ่งมีน้ำเต็มแล้วค่อย ๆ ลดระดับน้ำลงทีละน้อย พอได้ระยะหนึ่งจะสังเกตได้ว่าเสียงจะดังขึ้น และถ้าลดระดับน้ำลงไปอีกเสียงก็จะเบาลง พยายามปรับระดับน้ำให้ได้จุดที่เสียงดังที่สุด ซึ่งก็คือการเกิด resonance อันเนื่องมาจากความถี่ธรรมชาติของลำอากาศในหลอด เท่ากับความถี่ของการสั่นของกรวยกระดามของลำโพงพอดี วัดความยาวของหลอด resonance เหนือระดับน้ำ และบันทึกไว้ สมมุติเป็น l_1 ค่อย ๆ เลื่อนระดับน้ำลงไปอีกจนเกิด resonance อีกครั้งหนึ่ง วัดความยาวของหลอดเหนือระดับน้ำบันทึกไว้เป็น l_2 ที่ตำแหน่ง l_1 และ l_2 ห่างจากปลายบนของหลอดจะเป็น node ของ standing wave ในหลอด ส่วน antinode จุดหนึ่งจะอยู่ที่จุดกึ่งกลางระหว่างระยะ l_1 กับ l_2 อีกจุดหนึ่งจะอยู่ใกล้ ๆ ปากหลอด จากการวัดและการคำนวณจะพบว่า antinode อีกจุดหนึ่งจะอยู่เหนือปากหลอดขึ้นไป นั่นคือ $(l_2 - l_1)/2 > l_1$ ระยะที่ antinode สูงจากปากหลอดขึ้นไป เรียกว่า end correction ซึ่งมีค่าเท่ากับ $(l_2 - l_1)/2 - l_1$ จากนั้นจะได้ว่า ความยาวคลื่นของเสียงในอากาศภายในหลอด มีค่าเท่ากับ $2(l_2 - l_1)$ เมื่อทราบค่าความถี่ของเสียง คือ 100 c/s

โดยอาศัยความสัมพันธ์ $v = f\lambda$ (เมื่อ v = ความเร็วของเสียงในอากาศที่อุณหภูมิห้อง
 f = ความถี่ของเสียง λ = ความยาวคลื่น) จะสามารถหาความเร็วของเสียงใน
 อากาศ ณ อุณหภูมิห้องได้ เปลี่ยนความถี่ของ Osc. 1 ไปเป็น 1500/s โดยดูจาก
 lissajous figure ใน Oscillo box เช่นเดียวกัน และทำการทดลองทำนองเดียวกัน
 กับครั้งแรก จะสามารถคำนวณความยาวคลื่นออกมาได้เช่นเดียวกัน เมื่อนำเอาความ
 ยาวคลื่นไปคำนวณหาความเร็ว จะเห็นว่าได้ใกล้เคียงกับครั้งแรก ข้อผิดพลาดอาจ
 จะเนื่องมาจากการวัดและความคลาดเคลื่อนของความถี่

บทที่ 4

บทสรุป และเสนอแนะ

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้มีความมุ่งหมายที่จะศึกษาค้นคว้าหาหลักเกณฑ์และวิธีการที่จะสร้างเครื่องมือใน "ชุดทดลอง" เพื่อนำมาใช้ในการเรียนการสอนวิชาฟิสิกส์ในเรื่องคลื่นและเสียงในบางหัวข้อ นอกจากนี้ยังมีความมุ่งหมายที่จะออกแบบการทดลองเพื่อใช้กับชุดทดลองดังกล่าว ตลอดจนการเสนอหลักเกณฑ์ วิธีสร้าง และเทคนิคในการทดลองที่ได้ผลดี

ผลการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้จะเป็นแนวทางให้ผู้สอนวิชาฟิสิกส์สามารถจัดสร้างเครื่องมือขึ้นมาใช้ในการสาธิตและทดลองเกี่ยวกับเรื่องคลื่นและเสียง และเห็นแนวทางที่จะออกแบบการทดลองที่จะนำมาใช้กับเครื่องมือที่สร้างขึ้น ซึ่งเป็นทางหนึ่งที่จะช่วยในการแก้ปัญหาการขาดแคลนอุปกรณ์สำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการฟิสิกส์

การสร้างเครื่องมือในชุดทดลอง ได้อาศัยหลักเกณฑ์ว่า เครื่องมือที่สร้างขึ้นจะต้องมาจากหลักเกณฑ์ทางฟิสิกส์ที่ไม่ซับซ้อนจนเกินไป ใช้วัสดุราคาถูกหรือหาได้ง่าย และต้องออกแบบให้มีความสะดวกต่อการใช้

เครื่องมือในชุดทดลองที่ได้ออกแบบสร้างขึ้นมีดังต่อไปนี้

1. เครื่องกลเขียนรูปคลื่น ใช้สาธิตการเคลื่อนที่แบบ simple harmonic สามารถเขียนรูปคลื่น Sine wave, Combination of sine waves และ Lissajous' figures

2. Oscillobox เป็นเครื่องมือที่ทำงานคล้าย ๆ กับ Oscilloscope มีช่องมองแทนที่จะเป็นจออย่าง oscilloscope ใช้ประโยชน์ในการมองภาพ - Lissajous' figures ซึ่งเกิดจากคลื่นเสียงย่านความถี่ต่ำ และใช้ในการมองรูปคลื่นของคลื่นเสียง โดยใช้หลักการสะท้อนของแสงผ่านกระจกที่กำลัງสั่นสะเทือนตามความถี่ของคลื่นเสียง

3. เครื่องขยายเสียง ขนาดกำลัง output ประมาณ 10 พ. 2 เครื่อง เป็นเครื่องขยายที่ใช้วงจร Transistor ใช้ AC - power supply มีวงจร Voltage divider สำหรับแบ่งสัญญาณจาก power supply ไปเข้า input ของเครื่องขยายเครื่องหนึ่งโดยผ่านสวิทช์ตัดต่อ

4. Electronic audio oscillators เป็นวงจร Multivibrator อย่างง่าย ๆ ใช้ Transistor ใช้ Battery 9 V. เป็น Power supply สามารถเปลี่ยนความถี่ได้อย่างต่อเนื่อง มี 2 เครื่อง

5. หัวแม่เหล็กสำหรับเก็บสัญญาณจากการสั่นของเส้นลวดและแทนสำหรับซึ่งเส้นลวด มีสกรูสำหรับปรับความตึงของเส้นลวด

6. หลอด Resonance สำหรับทดลองเกี่ยวกับ Resonance ของคลื่นเสียง ทำด้วยท่อพลาสติก มีหลอดพลาสติกใสขนาดเล็กติดอยู่ด้านนอกสำหรับบอกระบบน้ำภายในท่อ

7. อุปกรณ์เบ็ดเตล็ด ได้แก่ แท่งแม่เหล็กเก็บบำกำลังสูง 3 แท่ง ลำโพง ขนาด 4 นิ้ว 2 ตัว สายนำสัญญาณ เป็นต้น

การเสนอกฎเกณฑ์และวิธีสร้างเครื่องมือในชุดทดลองนั้น ใ้เน้นที่กฎเกณฑ์เป็นสำคัญ เพื่อเป็นแนวทางแก่ผู้สอนวิชาฟิสิกส์ในการที่จะจัดสร้างเครื่องมือสำหรับทดลอง วิทยาศาสตร์ขึ้นใจเอง แบบและรายละเอียดของเครื่องมือ นั้น ส่วนหนึ่งจะขึ้นอยู่กับวัสดุ อุปกรณ์ที่จะนำมาใช้สร้างเครื่องมือ และส่วนหนึ่งจะขึ้นอยู่กับความสะดวกในการใช้และความเหมาะสมบางประการ เครื่องมือที่ใช้ในการสร้างก็นับว่าเป็นปัจจัยสำคัญประการหนึ่ง เพราะการออกแบบจะต้องคำนึงถึงเครื่องมือด้วย แบบของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในชุดทดลอง ตลอดจนวัสดุที่เลือกมาสร้างชุดทดลองดังกล่าว สามารถจะใช้เครื่องมืออย่างใด ๆ สร้างได้โดยไม่ต้องอาศัย Workshop

แบบการทดลองนั้นได้ออกแบบให้สอดคล้องกับเครื่องมือในชุดทดลองที่สร้างขึ้น การสาธิตหรือทดลองในบางเรื่องก็เกิดขึ้นมาใหม่เพื่อให้สอดคล้องกับชุดเครื่องมือที่สร้างขึ้น ส่วนการทดลองในบางเรื่องก็ใช้แบบการทดลองที่ใช้กันอยู่โดยปกติ เพียงแต่ประยุกต์เอาเครื่องมือในชุดทดลองเข้าไปใช้ในการทดลอง แทนเครื่องมือบางอย่างที่ใช้ทดลองกันตามปกติ

หัวข้อเรื่องที่สามารถใช้เครื่องมือในชุดทดลองทำการสาธิตและทดลองได้นั้น
ได้เลือกเอามายางหัวข้อในเรื่องคลื่นและเสียง ซึ่งมีดังต่อไปนี้

- Simple harmonic motion - Sine wave, harmonics and
combination of harmonics - Lissajous' figures - pitch, overtones
and quality of sound - beat of two waves - resonance and deter-
mination the speed of sound.

การสาธิตหรือทดลองในแต่ละหัวข้อดังกล่าว อาจจะมีมากกว่าหนึ่งการทดลอง
ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับว่าเครื่องมือในชุดทดลองจะสอดคล้องกับเนื้อหาอย่างน้อยเพียงใด

ผลการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้พบว่าได้ผลดีมาก ก็สามารถสร้างชุดทดลองขึ้นได้
สำเร็จ และสามารถนำเอาเครื่องมือในชุดทดลองไปทำการสาธิตหรือทดลองในบางหัวข้อ
เกี่ยวกับเรื่องคลื่นและเสียงได้หลายหัวข้อด้วยกัน

ข้อเสนอแนะ

1. เครื่องกลเขียนรูปคลื่นอาจจะปรับปรุงให้สามารถเขียนรูปคลื่น ซึ่งเป็นผลบวก
ของ 4 หรือ 5 harmonics ได้ โดยเพิ่มแท่นหมุนราง คาน และแท่นเข้าไปอีก
2. Oscillobox อาจจะแก้ไขปรับปรุงให้สามารถฉายภาพของรูปคลื่นและ
Lissajous' figures ให้ปรากฏบนจอได้ โดยเพิ่มแหล่งกำเนิดแสงความเข้มสูง
และเลนส์สำหรับรวมแสงอีกชุดหนึ่ง จะช่วยให้การสาธิตได้ผลดีขึ้น เพราะนักเรียนทุกคน
สามารถจะมองเห็นภาพได้พร้อม ๆ กัน
3. เครื่องมือสาธิตที่ควรสร้างขึ้นนี้ ประกอบการสอนในเรื่องคลื่นก็คือ อ่างน้ำ
สำหรับสาธิตเกี่ยวกับคลื่น (ripple tank) ใช้สาธิตปรากฏการณ์ต่าง ๆ เกี่ยวกับคลื่น
โดยเฉพาะคลื่นแสงได้เป็นอย่างดี เช่น การสาธิตเกี่ยวกับ interference,
diffraction, refraction, reflection เป็นต้น
4. เครื่องมือเครื่องใช้ในห้องปฏิบัติการฟิสิกส์ในเรื่องความร้อน แสง เสียง
และกลศาสตร์ ยังมีอีกมากที่สามารถจะแก้ไขปรับปรุงให้ดีขึ้น หรือสร้างขึ้นเองได้

เป็นต้นว่า นำเอาวงจร electronic มาช่วยในการจับเวลา สร้างห้องมืด และ วงจรไฟกระพริบ (multiflat) สำหรับสังเกตการเคลื่อนที่ของวัตถุ ใช้หลอดไฟฉาย ขนาดเล็กแทนวัตถุในการทดลองเกี่ยวกับเลนส์ ฯลฯ

5. ห้องปฏิบัติการฟิสิกส์ควรจะมี Workshop เล็ก ๆ ไว้สำหรับสร้างเครื่องมือ อย่างง่าย ๆ และซ่อมบำรุงเครื่องมือที่ชำรุด

ผลของการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้จะช่วยให้ผู้สอนวิชาฟิสิกส์หรือผู้ที่ จะทำการศึกษาค้นคว้าในด้านการปรับปรุงการเรียนการสอนวิชาฟิสิกส์ ได้มองเห็นแนวทางของการศึกษาค้นคว้าแนวทางหนึ่ง ซึ่งจะมีประโยชน์ต่อการพัฒนาการเรียนการสอนวิชาฟิสิกส์เป็นอย่างดี ถ้าหากจะได้มีการศึกษาค้นคว้าในแนวนี้นั้นอย่างกว้างขวาง แต่ถึงอย่างไรก็ตาม เพียงแต่ความรู้ความสามารถ ความเสียสละ และความตั้งใจจริงของผู้สอนหรือผู้วิจัย ยังไม่สามารถจะดำเนินงานในค่านนี้ให้ลุล่วงไปด้วยก็ได้ ถ้าหากขาดความสนับสนุนจากผู้บริหาร จึงขอฝากปัญหานี้ไว้ให้พิจารณาด้วย

บรรณานุกรม

REFERENCE

Abramson, Morris B. and Schrier, Solomon, "Simple Harmonic Motion and Sine Wave Generator" Science Teachers, 30 : 22-25, October, 1963.

Bergvall, Par and Joel, Nahum, UNESCO Pilot Project on New Methods and Techniques in Physics Teaching, LPM - livraria, Sao Paulo, Brasil, 1965, pp. 1, 2, 31.

Colt, Jon, "Build A D.C. Transformer" Popular Electronics, 3 : 35-43, March, 1970.

Detenbeck, R.W. and Dilavore, P., "Harvard Project Physics," The Physics Teachers, 5 : 233, May, 1967.

Gage, N.L., ed., Hand Book of Research on Teaching, Rand McNally and Company, Chicago, 1963, p. 1144.

Gettlieb, Herbert H., Section ed., "Apparatus for Teaching Physics," The Physics Teachers, 5 : 242, May, 1967.

Harvard Project Physics, An Introduction to Physics 3 : The Triumph of Mechanics, Holt Rinehart and Winston Inc., New York, 1968, pp. 112-141. (text), 73-80, 137-139 (teacher's guide).

Knecht, W., New Trends in Physics Teaching, Vol. 1, (1965-1966), UNESCO, 1968, pp. 114, 212, 214.

The Nuffield Foundation, Guide to Experiment 3 : Physics,

Longmans Penguin Books, London, 1967, pp. 1-53.

Sears, Francis Weston and Zemansky, Mark W., University Physics,

Addison - Wesley Publishing Company, London, 1967, 548 p.

Shortley, George and Williams, Dudley, Principles of College

Physics, Prentice - Hall, Inc., Englewood Cliffs,

New Jersey, 1967, 863 p.

UNESCO, A Servey of tne Teaching of Physics at Universities,

United Nations Educational Scientific and Cultural

Organization, Paris, 1966, p. 177.

UNESCO, Regional Office of Education in Asia, Planning for

Science Teaching Improvement in Asia School, UNESCO

Report of A Regional 'orkshop, Bangkok, 1969, p. 24.

ประวัติย่อของผู้เขียน

ผู้เขียนเกิดวันที่ 23 กุมภาพันธ์ 2489 ที่ตำบลฝายนาแซง อ.หล่มสัก จ.เพชรบูรณ์ สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมปีที่ 6 จาก ร.ร.หล่มสัก "ศักดิ์วิทยาคาร" เมื่อ พ.ศ. 2505 เข้าศึกษาในชั้น ป.กศ. และ ป.กศ.ชั้นสูง ที่วิทยาลัยครูพิษณุโลก สงครามพิษณุโลก และสำเร็จเมื่อ พ.ศ. 2509 ศึกษาต่อที่วิทยาลัยวิชาการศึกษาประสานมิตร พระนคร สำเร็จปริญญาการศึกษาบัณฑิต (กศ.บ.ฟิสิกส์ - คณิตศาสตร์) เมื่อ พ.ศ. 2511 จากนั้นได้ทำการสอนอยู่ที่วิทยาลัยครูอุตรดิตถ์ เป็นเวลา 1 ปี และได้เข้ามาศึกษาต่อในระดับปริญญาโททางการศึกษา สาขาคอมพิวเตอร์และการฝึกหัดครู (วิชาสามัญฟิสิกส์) ณ วิทยาลัยวิชาการศึกษา ประสานมิตร เมื่อวันที่ 3 มิถุนายน 2512.