

THE LIBRARY
COLLEGE OF EDUCATION
BANGKOK, THAILAND

การศึกษาแนวการสอนและการสร้างอุปกรณ์การสอนเรื่องคลื่นเบื้องต้น

ปริญญานิพนธ์
ของ
ประสิทธิ์ สกนธวุฒิ

เสนอต่อวิทยาลัยวิชาการศึกษา
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาค้นคว้าหลักสูตร
ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต
สิงหาคม 2516

คณะกรรมการที่ปรึกษาประจำตัวนิติได้พิจารณาปริมาณพันธบัตร
เห็นสมควร รับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาค้นหลักฐานหลักฐานการศึกษาค้นหา
ของวิทยาลัยวิชาการศึกษาได้

.....พ.อ.อ. วิเศษ วิชา.....ประธาน
.....๒๕/๕๕.....กรรมการ

ประกาศคุณประการ

ในการจัดทำปฏิญาณพนธฉบับนี้ ผู้เขียนได้รับความกรุณาให้คำแนะนำอย่างดียิ่งจาก ศาสตราจารย์ ดร.พิทักษ์ วัชรพลเดช และอาจารย์ไช สาลีฉัน ขอกราบขอบพระคุณ ทั้งสองท่านเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ คุณณิ สกนธฤติ คุณนพพล แก้วโชติ และคุณสนั่น รัตนวงศ์ ซึ่งมี ส่วนช่วยให้ปฏิญาณพนธฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ประสิทธิ์ สกนธฤติ

สารบัญ

บทที่		หน้า
1	บทนำ.....	1
	คำนำ	1
	✓ ความมุ่งหมายของการศึกษาครั้งนี้	3
	ความสำคัญของการศึกษาครั้งนี้	3
	ขอบเขตของการศึกษาครั้งนี้	4
	คำจำกัดความเฉพาะ	4
2	เอกสารที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาครั้งนี้	5
3	หลักเกณฑ์และการออกแบบสร้างอุปกรณ์	26
	1. Wave machine	26
	2. เครื่องวัดความเร็วเสียงในอากาศที่อุณหภูมิต่าง ๆ	44
4	การศึกษาอุปกรณ์และการใช้อุปกรณ์ประกอบการสอน	57
	1. วิธีใช้อุปกรณ์	57
	1.1 วิธีใช้ wave machine	57
	1.2 วิธีใช้เครื่องวัดความเร็วเสียงในอากาศที่อุณหภูมิต่าง ๆ	59
	2. ผลการทดลองใช้อุปกรณ์และอภิปรายผล	62
	2.1 ผลการทดลองใช้ wave machine	62
	2.2 ผลการทดลองใช้เครื่องวัดความเร็วเสียงในอากาศที่ อุณหภูมิต่าง ๆ	65
	3. แนวการสอนเรื่องคลื่นเบื้องต้นโดยใช้อุปกรณ์ประกอบการสอน	69
	3.1 แนวการสอนเรื่องคลื่นเบื้องต้นโดยใช้ wave machine ประกอบการสอน	69

3.2 แนวการสอนวิธีวัดความเร็วเสียงที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยใช้

เครื่องวัดความเร็วเสียงที่ได้ออกแบบสร้างขึ้น 74

5 สรุปและเสนอแนะ 79

บรรณานุกรม 82

บัญชีการวาง

การวาง	หน้า
1 ตารางสำหรับอธิบายประกอบข้อ 6	53
2 ตารางแสดงผลการทดลอง เปรียบเทียบกับผลการคำนวณจากทฤษฎีเมื่อทดลอง ให้เกิดเงาไม้คนมาครั้งแรก ใจรู้สำหรับให้แสงผ่านหนึ่งรูและได้ยินเสียงดัง ที่สุดครั้งที่ 2	66

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ

๐
หน้า

1	' ร่องบนผิวทรงกระบอกชั้นใน	31
2	' ร่องบนผิวทรงกระบอกชั้นนอก	33
3	ไคอะแกรมของระบบแยกทรงกระบอกที่มีผิวสองชั้นออกจากกัน	35
4	ไคอะแกรมแสดงการติดตั้งระบบแยกผิวทรงกระบอก	36
5	การเคลื่อนที่ของอนุภาคเนื่องจากการเคลื่อนที่ของร่อง sine curve	37
6	การเคลื่อนที่ของแกนอนุภาคเนื่องจากการเคลื่อนที่ของร่อง sine curve	38
7	หลักการเปลี่ยนแนวการเคลื่อนที่แบบ S.H.M. ในแนวราบเป็นการเคลื่อนที่แบบ S.H.M. ในแนวตั้ง	39
8	' ส่วนประกอบภายในของแผง A	41
9	Wave machine	42
10	' ระบบเคลื่อนที่แผง A	43
11	' ระบบจัดตำแหน่งอนุภาค	44
12	การทำให้ไคยีนเสียงดังเป็นห่วง ๆ เมื่อมีหลอดนำเสียงสองหลอด	45
13	การทำให้ไคยีนเสียงดังเป็นห่วง ๆ เมื่อมีหลอดนำเสียงสามหลอด	45
14	การวัดจำนวนรอบของจานหมุนโดยอาศัยการสั่นของแท่งโลหะ	46
15	วิธีเปรียบเทียบความเร็วในการหมุนของจานกลมกับความถี่ในการสั่นของแท่งโลหะ	47
16	' ส่วนประกอบของเครื่องวัดความเร็วเสียงที่อุณหภูมิต่าง ๆ	49
17	' หลอดนำเสียงในหม้อต้มน้ำ	50
18	' การติดตั้งส่วนประกอบต่าง ๆ บนฝาคววมหม้อต้มน้ำ	52
19	' หูฟัง	52
20	' ส่วนประกอบของเครื่องสั่นเส้นลวด	54

21	ฉากรับแสงในกล่องมืด	55
22	Standing transverse waves ที่ถ่ายจาก wave machine	63
23	Standing longitudinal waves (ภาพ ก), Traveling longitudinal waves (ภาพ ข) และ Traveling transverse waves (ภาพ ค) ที่ถ่ายจาก wave machine	64
24	โต๊ะแกว่งอธิบายการได้ยินเสียงดังที่สุดในแต่ละครั้ง	74

คำนำ

ในขณะที่วิทยาการทางด้านวิทยาศาสตร์กำลังเจริญรุดหน้าไปอย่างไม่หยุดยั้งนั้น เป็นที่น่ายินดี
ว่า วิทยาการทางการสอนวิทยาศาสตร์ก็ได้รับการปรับปรุงส่งเสริมให้ก้าวหน้าไปเช่นเดียวกัน ดัง
จะเห็นได้จากการเปิดสอนวิชาการศึกษาระดับหนึ่ง คือ การศึกษาฝ่ายวิทยาศาสตร์ (Science
education) โดยการเปิดสอนสูงถึงชั้นปริญญาโทและปริญญาเอกขึ้นในสหรัฐอเมริกา

(พิทักษ์ รัชพลเดช, 2513 : 4)

การปรับปรุงส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์ที่กำลังดำเนินการกันอยู่ในปัจจุบัน ไม่เพียงแต่เปิด
สอนการศึกษาฝ่ายวิทยาศาสตร์ดังกล่าวแล้วเท่านั้น ยังมีการจัดตั้งโครงการปรับปรุงการสอนวิทยาศาสตร์
ขึ้นในประเทศต่าง ๆ อีกหลายโครงการด้วยกัน เช่น Nuffield Science Teaching Project
ของสหราชอาณาจักร (The Nuffield Foundation, 1967 : 1-53) Harvard Project
ของสหรัฐอเมริกา (Detenbeck and Dilavore, 1969 : 233) Electronics Teaching
Project ของเดนมาร์ก Physics equipment Project ของฟิลิปปินส์ (Lockard,
1970 : 640) และ Unesco Project on the Teaching of Physics ของ Unesco
(Bergvall and Joel, 1965 : 2) เป็นต้น โครงการเหล่านี้ล้วนมุ่งส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์
โดยใช้เทคนิคและอุปกรณ์ใหม่ ๆ ทั้งสิ้น

ในประเทศไทยงานปรับปรุงส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์ ได้รับการสนับสนุนจากฝ่ายบริหาร
เป็นอย่างดี ซึ่งโดยมติของคณะรัฐมนตรี เมื่อวันที่ 4 สิงหาคม 2512 และประกาศกระทรวง
ศึกษาธิการ ลงวันที่ 27 สิงหาคม 2513 ให้ก่อตั้งสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
ขึ้นตั้งแต่วันที่ 5 สิงหาคม 2513 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงหลักสูตร วิธีสอน วัสดุครู
คู่มือนักเรียนและเครื่องมือเครื่องใช้ในการทดลองวิทยาศาสตร์ รวมทั้งยกระดับการสอนวิทยาศาสตร์
และเทคโนโลยีในระดับประถม มัธยม และฝึกหัดครู ให้มีมาตรฐานและคุณภาพสูงขึ้น โดยพัฒนา
ปรับปรุงและผลิตแบบอย่างของอุปกรณ์ เผยแพร่หลักสูตรที่ปรับปรุงแล้ว และให้การฝึกอบรมครูและบุ

ที่เกี่ยวข้องในการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีตามหลักสูตรและวิธีการใหม่ด้วย (สนั่น สุนิทร, 2515 : 62)

การที่ประเทศต่าง ๆ ให้ความสำคัญส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์ในประเทศของตนมากขึ้นนั้นก็เพราะมองเห็นความสำคัญของวิทยาศาสตร์ และความสำคัญของการสอนวิทยาศาสตร์มากขึ้นนั่นเอง

เกี่ยวกับการมองเห็นความสำคัญของวิทยาศาสตร์นั้น ปัจจุบันทั่วโลกได้ยอมรับความสำคัญของวิทยาศาสตร์ และเห็นพ้องกันว่าความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับวิชาวิทยาศาสตร์เป็นสิ่งจำเป็นในการศึกษาทั่วไป และการจัดวิชาวิทยาศาสตร์ไว้ในหลักสูตรก็มีใช้เพราะอิทธิพลอันใหญ่หลวงของวิทยาศาสตร์ต่ออารยธรรมในปัจจุบันเท่านั้น แต่ธรรมชาติของวิชาอื่นเองก็มีค่าสมกับที่จะอยู่ในหลักสูตร เมื่อห้าสิบปีก่อนนี้ ยังต้องมีการต่อสู้เพื่อให้วิชาวิทยาศาสตร์เข้ามาอยู่ในหลักสูตรด้วย แต่ในปัจจุบันกลับกลายเป็นว่า วิชาวิทยาศาสตร์จะไปไล่ที่วิชาอื่น ๆ ในหลักสูตรออกไปทั้ง ๆ ที่วิชาเหล่านั้นก็มีคุณค่าต่อการศึกษาไม่ด้อยไปกว่าวิชาวิทยาศาสตร์เลย (ยูเนสโก, 2507 : 12) ในประเทศไทย กระทรวงศึกษาธิการเริ่มมองเห็นความสำคัญของวิทยาศาสตร์ และได้จัดวิชาวิทยาศาสตร์เข้าไว้ในหลักสูตรชั้นมัธยมปีที่ 1 - 6 เมื่อปี พ.ศ. 2481 ทั้ง ๆ ที่มีครูวิทยาศาสตร์ไม่พอ ได้ให้มีการสร้างเครื่องมือทดลองและเครื่องมือที่จะใช้โคหลาย ๆ ชิ้นแล้วให้ครูมาอบรมระยะยาว เพื่อให้รู้จักใช้เครื่องมือเหล่านั้น ทั้งยังให้มีการแข่งตำราวิทยาศาสตร์ขึ้นอีกด้วย (กรมวิชาการ, 2509 : รว. 1-1)

เกี่ยวกับความสำคัญของการสอนวิทยาศาสตร์ ดร.พิทักษ์ (พิทักษ์ วัชรพลเดช, 2513 : 3) ได้กล่าวไว้ว่า การสอนวิทยาศาสตร์ช่วยให้เด็กมีความสามารถทางเศรษฐกิจ เศรษฐกิจเป็นกุญแจทองที่จะไขไปสู่การพัฒนาประเทศ เมื่อรวมความเข้าใจทั้งสองอย่างนี้แล้วก็จะเห็นว่าการพัฒนาประเทศมีส่วนเกี่ยวข้องกับการสอนการ เรียนวิทยาศาสตร์ในโรงเรียนเป็นอย่างมาก ดังนั้นการสอนวิทยาศาสตร์จึงเปรียบเป็นเสมือนรากฐานของการพัฒนาประเทศนั่นเอง

แม้ว่าเนื้อหาวิทยาศาสตร์ที่บรรจุไว้ในหลักสูตรจะมีประมวลการสอนแนะนำแนวการสอนไว้ด้วยก็ตาม แต่การสอนวิทยาศาสตร์มิใช่เป็นงานที่จะทำสำเร็จได้โดยง่าย เนื่องจากการสอนวิทยาศาสตร์จะต้องมีการพิจารณาเป็นพิเศษเหนือวิธีการสอนวิชาอื่น ๆ ทั้งนี้เพราะวิทยาศาสตร์เป็นวิชาที่ต้องใช้วัสดุและอุปกรณ์การสอนโดยเฉพาะกับทั้งต้องมีวิธีเข้าใจถึงเป็นพิเศษ (ยูเนสโก, 2508 : 1) ดังนั้นจึงปรากฏว่าได้มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการสอนวิทยาศาสตร์ในแง่ต่าง ๆ มากมาย เช่นในสหรัฐอเมริกา ประมาณครึ่งหนึ่งของหนังสือรายงานการวิจัยการศึกษาวิทยาศาสตร์ซึ่งได้ทำในระยะ 2 ปี คือระหว่าง ค.ศ. 1959-61

เป็นเรื่องเกี่ยวกับการสอนระดับมัธยมศึกษา โดยมากได้จัดทำไปในฐานะที่เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา เพื่อรับปริญญาชั้นสูง ส่วนในระดับประถมศึกษาการวิจัยในช่วงสองปีนี้ปรากฏว่ามีจำนวนมากว่าการวิจัย ในช่วง 2 ปีที่ผ่านมาคือใน คศ. 1957 - 59 การเพิ่มจำนวนเรื่องที่ทำการศึกษาวิจัยนี้อาจจะแสดงให้เห็น ได้ว่าได้มีความสนใจในการสอนวิชาวิทยาศาสตร์ในโรงเรียนประถมศึกษามากขึ้น เรื่องที่ทำการศึกษาวิจัยกัน ในสองระดับดังกล่าวนี้ ได้แก่ การเปรียบเทียบการสอนวิชาฟิสิกส์แบบปาลูกตา - ปฏิบัติการ กับ การสอนโดยใช้ภาพยนตร์ การสอนวิชาฟิสิกส์โดยใช้โทรทัศน์ การประเมินผลระเบียบวิธีสอนวิชาวิทยาศาสตร์ แบบต่าง ๆ และการสำรวจสภาพครูวิทยาศาสตร์ และอุปกรณ์การสอนวิทยาศาสตร์ในโรงเรียนต่าง ๆ เป็นต้น (กรมวิชาการ, 2510 : 6-24)

ในประเทศไทยการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการสอนวิทยาศาสตร์ซึ่งจัดทำไปเพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาเพื่อรับปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต ณ วิทยาลัยวิชาการศึกษาประสานมิตร ก็มีเป็นจำนวนไม่น้อย ที่เดียว ผู้เขียนเองก็มองเห็นความจำเป็นและความสำคัญของการศึกษาวิจัยด้านนี้ จึงได้กำหนดเรื่อง และวางแนวทางการศึกษากันไว้ดังต่อไปนี้

ความมุ่งหมายในการศึกษาค้นคว้า

1. เพื่อศึกษาแนวการสอนเรื่องคลื่นเบื้องต้น
2. เพื่อออกแบบ สร้าง และศึกษาอุปกรณ์ที่จะนำไปใช้ในการสอนเรื่องคลื่นเบื้องต้น
3. เพื่อเสนอแนะแนวการสอนเรื่องคลื่นเบื้องต้นโดยใช้อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นประกอบการสอน

ความสำคัญในการศึกษาค้นคว้า

1. เรื่องคลื่นเป็นเรื่องที่มีความสำคัญในการศึกษาวิชาฟิสิกส์แขนงต่าง ๆ เช่น ฟิสิกส์เกี่ยวกับ เสียง แสง และอิเล็กทรอนิกส์ ความเข้าใจในเรื่องคลื่นอย่างดียิ่งจะช่วยให้นักเรียนสามารถเรียนวิชา ฟิสิกส์ในแขนงดังกล่าวนี้ได้ดียิ่งขึ้น จึงควรได้มีการศึกษาค้นคว้าว่าจะสอนเรื่องคลื่นอย่างไร ใช้อะไร เป็นอุปกรณ์การสอนเพื่อให้นักเรียนรู้เรื่องคลื่นได้ดีที่สุด

2. เรื่องคลื่นเป็นเรื่องที่ทำให้ความเข้าใจได้ค่อนข้างยาก ในการสอนนักเรียนจึงควรมีอุปกรณ์ ที่เหมาะสมมาสาธิตและทดลองประกอบ แต่อุปกรณ์สำเร็จรูปก็มีราคาแพง โรงเรียนส่วนใหญ่ไม่อาจหา

ข้อนี้ได้ จำเป็นที่ครูวิทยาศาสตร์ต้องพยายามสร้างขึ้นมามีทั้งนั้นควรจะได้มีการศึกษาหาวิธีออกแบบสร้างอุปกรณ์สำหรับใช้ในการสอนเรื่องคลื่นเบื้องต้น เพื่อเสนอวิธีการสร้างนั้นให้แก่ครูผู้สอนเรื่องนี้โดยทั่วไป

ขอบเขตของการศึกษาครั้งนี้

1. การออกแบบและสร้างอุปกรณ์ที่ใช้ในการสอนเรื่องคลื่นเบื้องต้นคือเกณฑ์ดังนี้
 - 1.1 สร้างจากวัสดุราคาถูกและหาได้ง่าย
 - 1.2 สร้างจากหลักเกณฑ์ทางฟิสิกส์ง่าย ๆ
 - 1.3 สร้างให้ใช้สาธิตทดลองได้สะดวกและประหยัดเวลา
 - 1.4 ต้องให้สิ่งที่ปฏิบัติถูกต้องชัดเจนแก่ผู้เรียนได้อย่างรวดเร็วในเรื่องต่อไปนี้ คือ

Transverse waves, Longitudinal waves, Standing transverse waves in a string, Standing longitudinal waves, Velocity, frequency, wave length, Phase angle, และ Simple harmonic motion

2. การเสนอแนวการสอนเรื่องคลื่นเบื้องต้นจะเสนอในแนวที่มีการใช้อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นประกอบการสอน ในเนื้อหาตามที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 1.4 เท่านั้น

คำจำกัดความเฉพาะ

"อุปกรณ์" หมายถึงอุปกรณ์สำหรับใช้ในการสอนเรื่องคลื่นเบื้องต้นที่ผู้เขียนได้ออกแบบและสร้างขึ้น คือ wave machine และเครื่องวัดความเร็วของเสียงในอากาศที่อุณหภูมิต่าง ๆ

บทที่ 2

เอกสารที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาคนควา

เนื่องจากเรื่องคลื่นเป็นเรื่องที่ทำความเข้าใจได้ค่อนข้างยาก แต่ก็มีความสำคัญมากในวิชาฟิสิกส์แขนงต่าง ๆ ทั้งกลศาสตร์ นิวตันเขียนตำราฟิสิกส์ที่ว่าด้วยเรื่องคลื่นและเสียงเบื้องต้น จึงมักจะแนะนำเรื่องน้ำหรืออุปกรณ์ง่าย ๆ ที่ผู้อ่านอาจนำมาทดลองด้วยตนเองไว้ด้วย เพื่อให้เกิดความเข้าใจในเนื้อหาได้รวดเร็วยิ่งขึ้น เช่น Elmer E. Burns, Frankel Verwebe และ Herbert C. Hazel (Burns and others, 1943 : 310) ได้แนะนำ The Screen - Door Spring สำหรับแสดงการสั่นและการเคลื่อนที่ในลักษณะคลื่น อุปกรณ์ชิ้นนี้ประกอบด้วยสปริงที่ขึงตึงระหว่างจุดสองจุด มีไม้จิ้มฟันสอดติดไว้ที่จุดกึ่งกลางของสปริง เมื่อดึงที่จุดกึ่งกลางของสปริงลงมาแล้วปล่อยสปริงจะสั่นแบบตามขวาง ไม้จิ้มฟันที่ติดไว้ก็จะสั่นอย่างรวดเร็วจนมองเห็นเป็นแถบสีเหลี่ยมเกิดอยู่ในแนวตั้ง ความสูงของสีเหลี่ยมนี้จะลดลง เมื่อแอมพลิจูดของการสั่นลดลง เขาแนะนำให้ลองสอดไม้จิ้มฟันติดไว้ที่ส่วนต่าง ๆ ของสปริงบ้างเพื่อเปรียบเทียบการสั่นของไม้จิ้มฟันแต่ละอัน อีกวิธีหนึ่งเพื่อแสดงการสั่นแบบตามยาว ให้ดึงจุดกึ่งกลางของสปริงไปหาปลายข้างใดข้างหนึ่งประมาณสองนิ้วแล้วปล่อย การสั่นของไม้จิ้มฟันจะปรากฏเป็นรูปสีเหลี่ยมวางในแนวราบ ถ้าลองสอดไม้จิ้มฟันไว้ที่สปริงสองอันห่างกันประมาณครึ่งนิ้ว เมื่อสปริงสั่นจะปรากฏมีสีเหลี่ยมสองรูปซ้อนกันแล้วค่อย ๆ แยกออกจากกันเมื่อการสั่นมีแอมพลิจูดน้อยลง ถ้าต้องการทำให้เกิดการเคลื่อนที่เชิงซ้อน (complex motion) ก็ทำได้โดยให้สปริงสั่นทั้งสองแบบพร้อม ๆ กัน E.N. da C. Andrade (Andrade, 1962 : 58) แนะนำให้เอาสปริงยาว ๆ มาแขวนให้ลอยอยู่ในอากาศ ในแนวนอนสปริงที่วางในลักษณะนี้จะมีอิสระในการเคลื่อนที่ไถ้มาก ดังนั้นถ้าเกาะปลายข้างหนึ่งของมันเบา ๆ จะทำให้เกิดคลื่นตามยาวเคลื่อนไปในสปริงได้ Alexander Efron (Efron, 1958 : 140) แนะนำการทดลองเพื่อแสดงการเคลื่อนที่ของส่วนอัดและส่วนขยายของคลื่นตามยาวโดยนำตุ้มน้ำหนักหลาย ๆ ก้อนมาแขวนให้เรียงกันอยู่ในแนวระดับ ระหว่างตุ้มน้ำหนักสองก้อนที่อยู่ใกล้กันยึดกันไว้ด้วยสปริงอ่อน ๆ เมื่อผลักตุ้มน้ำหนักก้อนแรกไปทางขวาจะทำให้ตุ้มน้ำหนักก้อนที่อยู่ถัด ๆ ไป เคลื่อนที่ด้วย ทำให้มีส่วนอัดของคลื่นเคลื่อนผ่านอนุภาคต่าง ๆ ไปทางขวา ถ้าลองดึงอนุภาคแรกไปทางซ้ายบ้าง อนุภาคที่อยู่ถัด ๆ ไปก็จะถูกดึงไปทางซ้ายด้วยตามลำดับ ทำให้ปรากฏเป็น

ส่วนขยายของคลื่นเคลื่อนผ่านอนุภาคต่าง ๆ ไปทางขวาเช่นเดิม

อุปกรณ์ที่ใช้สาธิตทดลองประกอบการเรียนการสอนเรื่องคลื่นเบื้องต้นที่หลายท่านได้เสนอแนะไว้ดังกล่าวมาแล้วนั้น ผู้เรียนอาจจะสังเกตความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาคไม่ทัน เพราะมันเคลื่อนที่เร็วเกินไป จึงมีผู้เขียนตำราอีกหลายท่านได้เสนอแนะอุปกรณ์ที่ใช้ทดลองเรื่องคลื่นเบื้องต้นทำให้ผู้เรียนสามารถสังเกตความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาคได้ชัดเจนขึ้น เช่น Harry Sootin (Sootin, 1964 : 27) ได้แนะนำให้สร้าง Crova's Disk เพื่อสังเกตการเคลื่อนที่ของคลื่นตามยาว อุปกรณ์ประกอบด้วยจานกลมทำด้วยกระดาษแข็งขนาดรัศมีประมาณ 8 ซม. เขียนวงกลมขนาดต่าง ๆ ให้มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนผิวหน้าของจานดังนี้ ที่จุดศูนย์กลางของแผ่นเขียนวงกลมรัศมี 4 มม. แล้วแบ่งเส้นรอบวงของวงกลมนี้ออกเป็น 8 ส่วนเท่า ๆ กัน ให้ออกเป็นแต่ละจุดเป็นจุดศูนย์กลางของวงกลมรัศมี 20, 24, 28 ... มม. วนไปตามลำดับจนทำให้ได้วงกลมขนาดต่าง ๆ บนผิวหน้าของจานกลมทั้งหมด 16 วง เมื่อนำจานนี้มาทำให้หมุนรอบจุดศูนย์กลางแล้วมองส่วนของวงกลมต่าง ๆ บนแผ่นจานทางร่องแคบ ๆ ที่ก้นหน้าจานจะปรากฏส่วนอัดและส่วนขยายของคลื่นตามยาวเคลื่อนที่ที่ติดต่อกันไป ความเร็วของการเคลื่อนที่ของส่วนอัดและส่วนขยายจะขึ้นอยู่กับความเร็วของการหมุนของจาน ดังนั้นถ้าทำให้จานหมุนช้า ๆ ก็จะสังเกตความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ของส่วนอัดและส่วนขยายได้อย่างชัดเจน ยังมีเครื่องมือที่ทำให้สามารถสังเกตความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาคตัวกลางได้อย่างชัดเจนอีกแบบหนึ่ง ซึ่งพระครูพนุหรัญญ์ (ครูพนุหรัญญ์, 2494 : 6) ได้แนะนำไว้คือ wave machine ชนิดหนึ่ง ลักษณะประกอบด้วยจานกลมขนาดเท่า ๆ กันหลายอันวางเรียงให้ชิดกันไปตามแนวระดับมีแกนหมุนร่วมกัน แต่จัดให้จุดที่แกนหมุนผ่านของจานกลมแต่ละอันนั้นเหลื่อมล้ำกันเพื่อให้แกนอนุภาคที่วางอยู่ในแนวตั้งบนขอบของจานกลมแต่ละอันนั้นเคลื่อนขึ้นลงในแนวตั้งได้เมื่อทำการหมุนแกนรวมของจานกลมเหล่านั้นไป

ในปัจจุบันเราจะพบว่าอุปกรณ์หรือเครื่องมือที่จะนำมาใช้สาธิตทดลองในการเรียนการสอนเรื่องคลื่นนั้น มีผู้พยายามคิดสร้างขึ้นมาหลายแบบ ทั้งนี้เพราะตระหนักดีว่าการเรียนการสอนเรื่องคลื่นเบื้องต้นนั้นจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีอุปกรณ์ประกอบเสมอ เช่น สังวาล เฟืองพัด (สังวาล เฟืองพัด, 2514 : 68) ได้ออกแบบและสร้างเครื่องกลเขียนรูปคลื่น และ Oscillobox ขึ้นมา เครื่องกลเขียนรูปคลื่นของเขาใช้หลักการเคลื่อนที่แบบ simple harmonic สามารถเขียนรูปคลื่น Sine wave, Combination of sine waves และ Lissajous' figures ได้ ส่วน Oscillobox

เป็นเครื่องมือที่ทำงานคล้ายกับ Oscilloscope แต่มีช่องมอง แทนที่จะเป็นจออย่าง Oscilloscope ใชมองภาพ Lissajous' figures ซึ่งเกิดจากคลื่นเสียงย่านความถี่ต่ำ และใช้ในการมองรูปคลื่นเสียง โดยให้หลักการสะท้อนของแสงผ่านกระจกที่กำลังสั่นตามความถี่ของคลื่นเสียง แม่แบบบริษัท Welch เพียงบริษัทเดียวก็ได้ออกแบบสร้างอุปกรณ์ที่ใช้สาธิตทดลองเรื่องคลื่นเบื้องต้นไว้หลายแบบ ให้เลือกใช้ตามต้องการซึ่งได้แก่ Ripple tank, Self-activating vibrograph, Drum-type vibrograph และ Steel-band wave demonstrator

อุปกรณ์ต่าง ๆ ที่กล่าวมาแล้วในตอนต้นนั้น ส่วนใหญ่ก็เป็นอุปกรณ์ที่มุ่งส่งเสริมความเข้าใจเรื่องคลื่นเบื้องต้นในแง่ใดแง่หนึ่งเท่านั้น ทั้งนี้เพื่อที่จะให้ผู้เรียนมีความเข้าใจเรื่องคลื่นเบื้องต้น โดยส่วนรวมที่เป็นเรื่องราวที่ครอบคลุมสัมพัทธ์กันจึงต้องใช้อุปกรณ์หลาย ๆ อย่างประกอบกัน แล้วนำอุปกรณ์เหล่านั้นมาจัดเป็นกิจกรรมที่ต่อเนื่องสัมพันธ์กันไปจนทำให้ผู้เรียนสามารถเข้าใจเรื่องราวโดยตลอดได้ ดังเช่น Loust. Cox, Jr. (Cox, Jr., 1964 : 8-22) ได้เสนอแนะอุปกรณ์และกิจกรรมที่ต่อเนื่องกันสำหรับสอนเรื่องคลื่นในชั้นประถมศึกษาดังนี้

กิจกรรมที่ 1 การสังเกตคลื่นที่เคลื่อนที่ไปในเส้นเชือก มีจุดมุ่งหมายเพื่อแสดงให้เห็นว่าเราสามารถทำให้เกิดคลื่นขึ้นในเส้นเชือกได้ และคลื่นที่เกิดขึ้นนั้นนำพลังงานไปด้วยสังกับ (Concept) ที่ต้องการให้นักเรียนได้รับคือ "รูปคลื่น" (wave form) คือแนวทางที่พลังงานถูกส่งผ่านไป

แนวการสอน ครูให้นักเรียนบรรยายลักษณะของคลื่นในน้ำตามที่เขาเคยเห็นมา คำบรรยายของนักเรียนจะต้องมีคำว่า ใหญ่ เล็ก เร็ว เล็กน้อยหรือมากอยู่ด้วย ซึ่งครูต้องชี้แจงให้เข้าใจว่าคำเหล่านี้ไม่อาจใช้อธิบายลักษณะของคลื่นได้ชัดเจน เพราะในขณะที่คลื่นอาจมีลักษณะเป็นระลอกกว้างแต่ไม่สูง หรือมีคลื่นน้อยลูกในช่วงเวลาหนึ่ง แต่ถาส่งเกตไปนานก็จะเห็นว่าคลื่นนั้นมีจำนวนมาก นักเรียนอาจได้รับคำชี้แจงดีกว่าถ้าใครต้องการศึกษาเรื่องคลื่นในแง่วิทยาศาสตร์แล้ว จำเป็นต้องมีการสังเกตและตั้งคำถามที่ชัดเจนขึ้น เพื่อบรรยายคลื่นที่สังเกตนั้นให้ชัดเจนที่สุด แล้วครูจึงจะเริ่มต้นแสดงให้เห็นนักเรียนควรจะทำการสังเกตอย่างไร การแสดงดังกล่าวนี้อาจจะเริ่มต้นโดยครูนำเชือกยาวประมาณ 20 ฟุตมาให้นักเรียนดู ถามนักเรียนว่าจะทำให้เกิดคลื่นขึ้นในเชือกเส้นนี้ได้อย่างไร ถ้ามีนักเรียนบางคนเสนอแนะวิธีมาครูก็ให้เขาได้ลองทำดูตามความคิดเห็นของเขา นักเรียนคนอื่นอาจเกิดแนวความคิดบ้างก็ลองให้นักเรียนเหล่านั้นได้ลองทำดูทุกคน หลังจากนั้นครูอาจให้นักเรียนคนหนึ่งนำปลายเชือกข้างหนึ่ง ไปผูกกับขอบประตูให้เชือกอยู่สูงจากพื้นพอควร แล้วให้นักเรียนอีกคนหนึ่งกระตุก

ปลายเชือกอีกข้างหนึ่งเป็นจิ้งหรีด อาจกระตุกขึ้นลง หรือกระตุกไปทางซ้ายขวาก็ได้ ครูอาจให้นักเรียนบางคนถือไม้ก้อยที่ลงไปบนคลื่นที่กำลังวิ่งอยู่ก็ได้ คำถามที่ครูควรถามนักเรียนในขณะที่ทำการทดลองครั้งนี้คือถามว่า นักเรียนมองเห็นคลื่นในเส้นเชือกไหม ถ้าครูเอาเศษผ้าชิ้นเล็ก ๆ ที่มีสีต่าง ๆ ผูกติดกับเส้นเชือกเป็นช่วง ๆ ห่างเท่า ๆ กัน ก็จะทำให้นักเรียนสังเกตเห็นการเคลื่อนที่ของเชือกได้ง่ายขึ้น

เมื่อนักเรียนได้เห็นคลื่นในเส้นเชือกแล้ว ครูควรถามคำถามต่อไปว่า "คลื่นเหล่านี้มาจากไหน" ทั้งนี้เพื่อให้นักเรียนเกิดสังกัป (concept) ที่ว่า ต้องใช้พลังงานจึงจะทำให้เกิดคลื่นขึ้นมาได้ แต่นักเรียนควรได้รับคำชี้แจงให้เข้าใจคำว่า "งาน" และ "พลังงาน" อย่างชัดเจนเสียก่อน ส่วนการที่จะให้นักเรียนเกิดสังกัป (concept) ที่ว่า พลังงานถูกส่งผ่านโดยคลื่นเชือก (rope waves) นั้น ครูอาจใช้คำถามว่า "ในการทำให้เกิดคลื่นเชือกนั้นเธอต้องทำงานไหม" "เธอจะทำให้คลื่นมีพลังงานมากหรือน้อยได้อย่างไร" คำตอบที่ถูกต้องของคำถามเหล่านี้ครูควรให้นักเรียนได้ทดสอบด้วยการทดลองอีกครั้งหนึ่ง โดยใช้แผนกระดาษพับเป็นรูปตัว V วางบนเส้นเชือกแล้วทำให้เกิดคลื่นเชือกขึ้น กระดาษนั้นจะกระเด็นขึ้นข้างบน ครูให้นักเรียนลองเพิ่มงานที่ทำกับเส้นเชือกให้มากขึ้นอีกโดยกระตุกปลายเชือกแรงและเร็วขึ้น หรือกระตุกให้ปลายเชือกสั่นเป็นช่วงกว้างมากขึ้น กระดาษที่วางอยู่บนเส้นเชือกจะเป็นสิ่งที่ชี้ให้นักเรียนทราบปริมาณพลังงานในคลื่นเชือกว่ามีมากหรือน้อย ในตอนท้ายของกิจกรรมนี้ ครูควรบอกนักเรียนไว้ว่ายังมีกิจกรรมที่ต้องทำกันอีกเพื่อให้นักเรียนได้เรียนรู้รายละเอียดของคลื่นมากขึ้นจนรู้จักสังเกตคลื่นและรู้จักนิยามทางวิทยาศาสตร์ ที่เกี่ยวกับเรื่องคลื่นได้

กิจกรรมที่ 2 การนับความถี่ของคลื่นในเส้นเชือก มีจุดมุ่งหมายเพื่อให้นักเรียนเข้าใจคำว่า "ความถี่" ของคลื่น สังกัปที่ต้องการให้นักเรียนได้รับคือ "ความถี่คือจำนวนคลื่นที่เกิดขึ้นในหนึ่งหน่วยเวลา อาจเป็น 1 นาที หรือถ้าความถี่สูง ๆ ก็คิดใน 1 วินาที" สำหรับเด็กบางคน "ความถี่เท่ากับจำนวนคลื่นที่นับได้หารด้วยเวลาที่ใช้ในการนับ เขียนเป็นสูตรได้ว่า $f = n \div t$ หรือ $f = \frac{n}{t}$ "

แนวการสอน ครูให้นักเรียน 6 คน ออกมายืนแถวหน้าชั้น ให้นักเรียนสองคนแรกถ่มลงเอามือแตะพื้นทุก ๆ ห้าวินาที สองคนถัดมาก้มลงเอามือแตะพื้นทุก ๆ สิบวินาที อีกสองคนที่เหลือก้มลงเอามือแตะพื้นทุก ๆ สิบห้าวินาที เมื่อนักเรียนเหล่านี้เริ่มคนท่าพร้อมกัน นักเรียนคนอื่น ๆ จะเป็นผู้คอยสังเกตเพื่อตอบคำถามของครูที่จะถามว่า "แต่ละกลุ่มแตะพื้นกี่ครั้งในหนึ่งนาที ? ในสองนาที ? ซึ่งจะ

นำไปสู่ความเข้าใจที่ว่าความถี่ในเทอมของจำนวนครั้งที่แตะพื้นในหนึ่งช่วงเวลา ท่อไปครูก็สรุปว่า การนับในลักษณะที่ทำมาแล้วนั้นนักเรียนสามารถจะนำไปใช้หาความถี่ของคลื่นได้ด้วย

แนวทางที่จะทำให้ให้นักเรียนเข้าใจเกี่ยวกับความถี่ของคลื่นในเส้นเชือก ครูอาจทำได้โดยให้นักเรียนคนหนึ่งทำหน้าที่จับเวลาครึ่งละหนึ่งนาที นักเรียนอีกคนหนึ่งกระตุกปลายเชือกเพื่อทำให้เกิดคลื่นพร้อมกับนับจำนวนครั้งที่มือกระตุกลงด้วย เมื่อหมดเวลาหนึ่งนาทีแล้วครูก็ถามนักเรียนว่า "ความถี่ของคลื่นเป็นเท่าไร ?" ลองให้นักเรียนทำคลื่นในเส้นเชือกอีกครั้งหนึ่ง คราวนี้ให้กระตุกมือที่จับปลายเชือกเร็วขึ้นกว่าครั้งแรกอีก พร้อมกับนับเช่นเดียวกับครั้งแรก ถามนักเรียนควยคำตอบเดิมอีกครั้งหนึ่ง **หลัง** จากนั้นก็ให้นักเรียนทดลองทำให้เกิดคลื่นที่มีความถี่ต่าง ๆ ได้ตามใจชอบต่อไป

ครูควรให้นักเรียนได้ตรวจสอบดูว่า เมื่อมีคลื่นถูกส่งจากปลายเชือกข้างหนึ่งไปยังปลายเชือกอีกข้างหนึ่งนั้น ความถี่ของคลื่นที่จุดต่าง ๆ เทากับความถี่ที่ปลายเชือกที่จับอยู่หรือไม่ โดยให้นักเรียนคนหนึ่งจับเวลา อีกคนหนึ่งกระตุกปลายเชือกทำให้เกิดคลื่นพร้อมกับนับความถี่ไปด้วย นักเรียนคนอื่น ๆ ยืนที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามแนวเส้นเชือกโดยยื่นมือออกไปเหนือเส้นเชือกด้วย นักเรียนทุกคนต้องคอยนับจำนวนครั้งที่เส้นเชือกขยับขึ้นมาและมือในช่วงเวลาที่กำหนด ครูจะถามนักเรียนทุกคนที่ทดลองนี้ว่า นับความถี่ได้เท่าไร คำตอบของพวกเขาจะทำให้เขาเข้าใจได้ว่าความถี่ของคลื่นในเส้นเชือกเท่ากันทุกจุด ครูตั้งคำถามอีกคำถามหนึ่งว่า "ความถี่ของคลื่นในเชือกเส้นยาวกับในเชือกเส้นสั้นเท่ากันหรือไม่ ?" แล้วให้นักเรียนได้ทดลอง เพื่อพิสูจน์คำตอบของคำถามนี้ด้วย

กิจกรรมที่ 3 การทำให้เกิดคลื่นที่มีแอมพลิจูด (amplitude) ต่าง ๆ กัน มีจุดมุ่งหมายเพื่อให้นักเรียนเข้าใจคำว่า "แอมพลิจูด" ของคลื่น สัมกับสิ่งที่ต้องการให้นักเรียนได้รับคือ "แอมพลิจูดคือ ปริมาณชั่วขณะที่มีค่าสูงสุดของอนุภาคที่เคลื่อนที่"

แนวการสอน ครูควรเริ่มต้นโดยการเขียนรูปคลื่นบนกระดานคำสองคลื่นที่มีแอมพลิจูดต่างกัน เปรียบเทียบให้นักเรียนฟังว่าคลื่นที่มีแอมพลิจูดน้อยกว่านั้นคล้ายกับคลื่นในทะเลยามสงบ ส่วนคลื่นที่มีแอมพลิจูดมากกว่านั้นคล้ายกับคลื่นในทะเลยามเกิดพายุ ให้นักเรียนอภิปรายว่าอะไรเป็นต้นเหตุให้คลื่นในทะเลในโอกาสดังกล่าวนี้มีความสูงแตกต่างกัน เพื่อจะนำไปสู่การสรุปโดยครูกล่าวว่า ความสูงของคลื่นที่แตกต่างกันนั้นเนื่องมาจากพลังงานนั้น เรียกว่า แอมพลิจูดของมันแตกต่างกัน แล้วถามนักเรียนต่อไปว่า "เราจะวัดแอมพลิจูดของคลื่นในเส้นเชือกได้อย่างไร ?"

ในการทดลองเพื่อวัดแอมพลิจูดของคลื่นในเส้นเชือกนั้น ครูให้นักเรียนทำให้เกิดคลื่นในเส้นเชือก โดยวิธีเดียวกันที่ทำมาแล้ว แล้วให้นักเรียนอีกคนหนึ่งใช้ไม้ทาบ (Yardstick) วัดความสูงของเชือก ณ จุดที่มีวับอยู่ ตามนักเรียนว่า "แอมพลิจูดของคลื่นเป็นเท่าไร ?" ลองให้นักเรียนคนที่ทำให้เกิดคลื่นเคลื่อนมือขึ้นลงด้วยความสูงค่าอื่น ๆ บ้าง แล้วให้มีการลองวัดแอมพลิจูดอีก ครูอาจให้นักเรียนกระตุกเชือกโดยเคลื่อนมือไปในแนวซ้ายขวาก็ได้ และให้มีการวัดแอมพลิจูดอีกเช่นเดียวกัน

เพื่อจะเปรียบเทียบพลังงานและแอมพลิจูดของคนอื่น ครูต้องให้นักเรียนได้ฝึกการทำคลื่นเชือกที่มีความถี่คงที่ค่าหนึ่งขณะที่เปลี่ยนแอมพลิจูดไปให้ใกล้เคียงก่อน โดยให้นักเรียนคนหนึ่งกระตุกปลายเชือกให้แกว่งแอมพลิจูดของคลื่นประมาณหกนิ้ว นักเรียนอีกคนหนึ่งเป็นคนนับเวลาโดยนับดังนี้ "one thousand one, one thousand two, one thousand three, ..." นักเรียนคนที่กระตุกเชือกก็จะสามารถปรับความถี่ของคลื่นเชือกให้ใกล้เคียงที่เท่ากับสองคลื่นต่อวินาทีได้ไม่ว่าจะเพิ่มหรือลดแอมพลิจูดของคลื่นไปเป็นเท่าไรก็ตาม เมื่อนักเรียนทำได้เช่นนี้แล้วครูก็ให้นักเรียนเริ่มการทดลอง โดยให้นักเรียนคนที่กระตุกเชือกนั้นส่งคลื่นเชือกไปด้วยความถี่คงที่สองคลื่นต่อวินาที ลองให้เขาเพิ่มแอมพลิจูดขึ้นเป็นสิบสองนิ้ว (หรือสิบแปดนิ้ว) โดยความถี่เท่าเดิม แล้วตั้งคำถามว่า "ในการทำให้เกิดคลื่นเชือกทั้งสองครั้งนั้น ครั้งใดต้องทำงานมากกว่ากัน ?" "ที่ว่าทำงานมากกว่านั้นคือทำอย่างไร ?" "คลื่นที่เกิดขึ้นครั้งใดมีพลังงานมากกว่า ?" และการทดลองที่ใช้กระดุมรูปตัว V วางบนเส้นเชือกนั้นควรจะได้นำมาสาธิตให้นักเรียนดูในตอนนี้อีกครั้งหนึ่ง

กิจกรรมที่ 4 การวัดความเร็วของคลื่นในเส้นเชือก มีจุดมุ่งหมายเพื่อให้นักเรียนเข้าใจ "ความเร็ว" ของคลื่น สิ่งจำเป็นที่ต้องการให้นักเรียนได้รับคือ "ความเร็ว หรืออัตราเร็วของคลื่นในเส้นเชือก คือระยะทางที่คลื่นลูกหนึ่งเคลื่อนไปได้ในหนึ่งหน่วยเวลา"

แนวการสอน ให้ครูเป็นผู้เลือกนักเรียนสองคนออกมาวิ่งแข่งขันกันในระยะทางสั้น ๆ นักเรียนสองคนนี้ครูสมมุติชื่อให้เป็น Jimmy-wave กับ Johnny-wave เมื่อเสร็จการแข่งขันแล้วครูก็ถามนักเรียนว่า "ทำไม Jimmy-wave (หรือ Johnny-wave) จึงชนะ ?" เพื่อเปิดช่องทางให้นักเรียนได้ตอบว่าเพราะคนที่ชนะนั้นวิ่งเร็วกว่าคนที่แพ้ และคนที่ชนะใช้เวลาวิ่งน้อยกว่าคนที่แพ้ และครูเป็นผู้ชี้แจงให้นักเรียนเข้าใจว่า ระยะทางที่แต่ละคนวิ่งได้ในเวลาเท่ากัน เรียกว่าความเร็วของคลื่นนั้น คือไปครูบอกนักเรียนให้กลับมาพิจารณาความเร็วของคลื่นในเส้นเชือก ตามเขาว่า "จะวัดความเร็วของคลื่นในเส้นเชือกได้อย่างไร ?"

การทดลองวัดความเร็วของคลื่นในเส้นเชือก ให้ครูจัดเด็กคนหนึ่งเป็นผู้จับเวลาที่คลื่นลูกหนึ่งเคลื่อนจากปลายที่ถูกกระตุกมาถึงปลายตรงข้าม ให้นักเรียนทดลองหลาย ๆ ครั้ง ทุกครั้งบันทึกเวลาไว้ด้วย หลังจากนั้นถามนักเรียนว่า "เวลาที่บันทึกได้เท่ากันทุกครั้งหรือไม่ ?" "ความเร็วของคลื่นเป็นเท่าไร ?" สำหรับเด็กบางคนครูอาจต้องใช้คำพูดว่า "ความเร็วคลื่นเท่ากับระยะทางที่คลื่นเคลื่อนที่ได้ หารด้วยเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ เขียนสูตรแทนได้ว่า $v = d \div t$ หรือ $v = \frac{d}{t}$ " ครูควรใช้ผลที่บันทึกได้เป็นตัวอย่างการคำนวณให้ดูดังนี้ "เชือกยาว 100 ฟุต ทดลองครั้งที่ 1 เวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ 3.0 วินาที, ครั้งที่ 2 3.2 วินาที, ครั้งที่ 3 3.1 วินาที, ครั้งที่ 4 3.2 วินาที, ครั้งที่ 5 3.0 วินาที ดังนั้นเวลาโดยเฉลี่ยเท่ากับ 3.1 วินาที ความเร็วของคลื่นก็คือ $d \div t = 100 \div 3.1 = 32.1$ ฟุตต่อวินาที" หน่วยอื่น ๆ ของความเร็วหรืออัตราเร็ว ควรได้มีการอภิปรายกันด้วย เช่น ครูยกตัวอย่างว่า "จอห์น เกลน (John Glenn) เดินทางด้วยอัตราเร็วเกือบเท่ากับ 18,000 ไมล์ต่อชั่วโมง" "ธารน้ำแข็ง (glacier) เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว 5 ฟุตต่อปี" หรือ "จรวดเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว 10 ไมล์ต่อนาที" สำหรับเด็กบางคน ครูควรพัฒนาสลับไปเกี่ยวกับการเปลี่ยนหน่วยด้วยโดยเขียนสิ่งต่อไปนี้ลงในกระดานดำ " 1 ปี = 365 วัน, 1 วัน = 24 ชั่วโมง, 1 ชั่วโมง = 60 นาที, 1 นาที = 60 วินาที, 1 ไมล์ = 5280 ฟุต, 1 ฟุต = 12 นิ้ว" และแสดงการเปลี่ยนหน่วยให้นักเรียนดูด้วยโดยเขียนโจทย์ดังนี้ "สมมุติจรวดเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว 10 ไมล์ต่อนาที จงหาอัตราเร็วของมันเป็นไมล์ต่อชั่วโมง หรือนักบินอวกาศเดินทางด้วยอัตราเร็ว 18,000 ไมล์ต่อชั่วโมง จงหาอัตราเร็วของเขาเป็นฟุตต่อวินาที"

กิจกรรมที่ 5 การเปรียบเทียบอัตราเร็วของคลื่นที่มีแอมพลิจูดสูงกับคลื่นที่มีแอมพลิจูดต่ำ มีจุดประสงค์เพื่อแสดงว่าความเร็วคลื่นไม่ขึ้นกับแอมพลิจูดของคลื่น สลับไปกับการให้นักเรียนได้รับคือความเร็วคลื่นในวัตถุหนึ่งมีค่าคงที่และไม่ขึ้นกับแอมพลิจูดของคลื่น

แนวการสอน ให้ครูเริ่มต้นโดยการตั้งคำถามถามนักเรียนว่า "คลื่นที่มีแอมพลิจูดมากเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วเท่ากับคลื่นที่มีแอมพลิจูดน้อยหรือไม่ ?" มีวิธีทดสอบอย่างไร ?" ซึ่งก็ควรมีการอภิปรายกัน แล้วจึงสรุปวิธีทดลองโดยให้นักเรียนกระตุกเชือกที่ยาวประมาณ 100 ฟุต ทำให้เกิดคลื่นที่มีแอมพลิจูดมาก เคลื่อนที่ไปในเส้นเชือกและจับเวลาไว้ และทำให้เกิดคลื่นที่มีแอมพลิจูดน้อยอีกครั้งหนึ่ง จับเวลาไว้เช่นเดียวกัน นำเวลาที่บันทึกได้มาเปรียบเทียบกันก็จะได้ข้อเท็จจริงที่ต้องการ

อาจจะให้นักเรียนบางคนเสนอให้มีการแข่งขันเคลื่อนไหวของคลื่น ครูก็ควรจัดการแข่งขันครั้งนี้ นำส่วนกลางของ เชือกไปพันกับหลักหรือต้นไม้ ให้นักเรียนสองคนจับปลายเชือกคนละข้าง เพื่อทำให้เกิดคลื่นในเชือกทั้งสองส่วน นักเรียนอีกคนหนึ่งทำหน้าที่เป็นผู้ชักคลื่นโดยไปยืนที่ต้นไม้เอามือจับเชือกทั้งสองส่วนไว้ เมื่อคลื่นสองขบวนมาถึงก็จะทราบได้ว่าคลื่นขบวนใดมีความเร็วมากกว่ากัน นักเรียนสองคนที่จับปลายเชือกนั้นอาจทำให้เกิดคลื่นที่มีแอมพลิจูดหรือความถี่เท่ากันได้ เมื่อเสร็จการแข่งขัน นักเรียนก็จะเกิดความเข้าใจว่า สำหรับเชือกเส้นหนึ่ง ๆ ความเร็วของคลื่นจะคงที่เสมอ ผลการทดลองที่บันทึกไว้ได้อาจไม่เสมอไปทุกครั้ง ครูควรใส่ใจแจ่มแจ้งว่าผลที่แตกต่างกันบ้างเล็กน้อยนั้นเกิดขึ้นได้เพราะเหตุใด แต่มันอาจจะ เป็นเพราะประสิทธิภาพของผู้ชักคลื่นก็ได้ ดังนั้นนักเรียนจึงควรทำการทดลองหลาย ๆ ครั้ง เสมอ

โดยวิธีการทดลองเดียวกัน ครูอาจให้นักเรียนทดสอบอัตราเร็วของคลื่นในเชือกที่มีขนาดต่างกัน หรือทำควยวัดความถี่กันได้อีกด้วย

กิจกรรมที่ 6 การวัดความยาวคลื่น มีจุดประสงค์เพื่อให้นักเรียนเข้าใจคำว่า "ความยาวคลื่น" สังกกับขั้นตอนการให้เด็กได้รู้คือ "ความยาวคลื่นคือระยะทางระหว่างสองจุดที่เหมือนกันบนท้องคลื่นหรือหลังคลื่นที่อยู่ติดกัน"

แนวการสอน ให้นักเรียนนึกภาพพจน์ว่าถ้าคลื่นในมหาสมุทรหยุดเคลื่อนที่ เมื่อเรามองดูท่ามกลางของมันจะเห็นเป็นรูปอย่างไร ให้นักเรียนคนหนึ่งเขียนภาพที่เขาเห็นว่ามันควรจะเป็นอย่างไรลงในกระดานดำ ครูอาศัยภาพที่นักเรียนเขียนดูทองแล้วนั้น แนะนำให้นักเรียนได้รู้จักท้องคลื่นและหลังคลื่น อธิบายว่าหนึ่งความยาวคลื่นนั้นประกอบด้วยหนึ่งท้องคลื่น และหนึ่งหลังคลื่น การจะวัดความยาวคลื่นนั้นให้พิจารณาคลื่นหนึ่งลูกเท่านั้นไม่ว่าวัดคลื่นทั้งหมด ครูถามนักเรียนว่าจะวัดความยาวคลื่นในเส้นเชือกได้อย่างไร ให้เขาลองทำตามความคิดของเขาด้วย ในที่สุดนักเรียนก็จะพบว่าการใช้ไม้หลายหรือเทปวัดระยะทางมาวัดโดยตรงนั้นทำได้ไม่สะดวก เพราะคลื่นเคลื่อนที่เร็วมาก ครูควรแนะนำให้นักเรียนทำให้เกิดคลื่นโดยคัดแปลงวิธีการเสียใหม่ เพื่อให้สามารถวัดความยาวคลื่นได้โดยสะดวก คือปล่อยเชือกลงบนพื้นผิวที่เรียบอย่างหนึ่งไว้กับหลัก กระตุกปลายอีกข้างหนึ่งไปมาในแนวซ้ายขวา เมื่อมีคลื่นวิ่งออกจากจุดเริ่มต้นไปได้เล็กน้อยก็หยุดการส่งคลื่นเสีย ภาพที่ปรากฏบนพื้นก็ก่อเส้นเชือกโค้งงอเป็นรูปคลื่นวางอยู่ให้วัดความยาวคลื่นและแอมพลิจูดได้อย่างง่ายดาย ในตอนนี้ครูควรอธิบายเพิ่มเติมอีกเล็กน้อยว่า การวัดความยาวคลื่นโดยวิธีนี้ไม่ถูกต้องนัก เพราะพลังงานที่คลื่นนำไปมีบางส่วนสูญเสียไปเนื่องจากการเสียดทาน

ระหว่างเชือกกับเส้น ผลการสูญเสียพลังงานของคลื่นนั้นครูชี้ให้เห็นได้จากการที่ค่าของแอมพลิจูดและความยาวคลื่นที่ได้วัดได้นั้นยิ่งลดลง เมื่อยิ่งวัดไกลจากจุดเริ่มต้นมากขึ้น

กิจกรรม 7 การถ่ายภาพคลื่นเพื่อวัดความยาวคลื่น มีจุดมุ่งหมายเพื่อใช้วิธีการที่ชัดเจนวัดความยาวคลื่น สังกัปที่ต้องการให้เด็กได้รับคือ "วัตถุที่กำลังเคลื่อนที่สามารถทำให้ "หยุด" ในภาพถ่ายได้ซึ่งอาจนำไปตรวจวัดสิ่งที่ต้องการได้สะดวกกว่าการตรวจวัดจากของจริงโดยตรง"

แนวการสอน ครูควรเริ่มต้นบทเรียนโดยการนำภาพถ่ายของม้วนกำลังวิ่ง รถยนต์กำลังแล่นหรือเครื่องบินกำลังบินมาให้นักเรียนดู ถามนักเรียนว่า "การมองภาพถ่ายนี้เห็นรายละเอียดของการเคลื่อนที่ง่ายกว่าการมองเหตุการณ์จริงหรือไม่? ทำไมจึงง่ายกว่า?" ครูควรทำให้นักเรียนมีแนวความคิดว่า "การหยุด" ในภาพถ่ายของสิ่งที่กำลังเคลื่อนที่ทำให้มองเห็นรายละเอียดของการเคลื่อนที่ของวัตถุนั้นได้มากขึ้น เพื่อให้สัมพันธ์กับกิจกรรมที่ได้ทำมาแล้ว ครูควรกล่าวสรุปอีกครั้งหนึ่งว่า การวัดความยาวคลื่นโดยวิธีตรงที่ลองทำกันมาแล้วนั้น ทำได้ยากเพราะคลื่นเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง จึงจำเป็นต้องใช้วิธีอ้อม คือ วิธีการถ่ายภาพคลื่นที่กำลังเคลื่อนที่ จะทำให้ได้ภาพคลื่นที่ "หยุดนิ่ง" ซึ่งสะดวกที่จะวัดความยาวคลื่นมาก การปฏิบัติให้ครูนำเชือกมาสองเส้น เส้นหนึ่งยาว 20 ฟุต อีกเส้นหนึ่งยาว 50 ฟุต เชือกเส้นสั้นมีเศษผ้าชิ้นเล็ก ๆ สีต่าง ๆ ผูกไว้เป็นช่วง ๆ ห่างช่วงละ 1 ฟุต ให้นักเรียนสองคนดึงเชือกเส้นสั้นนี้ให้ตึง นักเรียนอีกสองคนถือปลายเชือกเส้นยาวคนละปลายออกไปยืนข้าง ๆ นักเรียนสองคนแรก นักเรียนหนึ่งในสองคนนี้จะกระตุกปลายเชือกทำให้เกิดคลื่นขึ้น ครูเป็นผู้ถ่ายภาพคลื่นนั้นทันที ในภาพถ่ายเชือกที่ถูกควยเศษผ้าจะทำหน้าที่เป็นสเกลสำหรับให้นักเรียนวัดความยาวคลื่นได้ ถ้าใช้ชดชสีขาวทาเชือกจะทำให้ภาพของเส้นเชือกมอง เห็นชัดเจนยิ่งขึ้น

กิจกรรมที่ 8 การคำนวณความยาวคลื่นโดยอาศัยความถี่และความเร็วคลื่น มีจุดมุ่งหมายเพื่อแสดงความสัมพันธ์ของความถี่กับความยาวคลื่น สังกัปที่ต้องการให้นักเรียนได้รับคือ "ถาคลื่นเคลื่อนไปด้วยอัตราเร็วคงเดิม คลื่นที่มีความถี่สูงจะมีความยาวคลื่นสั้นกว่าคลื่นที่มีความถี่ต่ำ"

แนวการสอน ครูนำภาพถ่ายคลื่นในเส้นเชือกที่ถ่ายไว้มาให้นักเรียนดู เพื่อเปิดการอภิปรายโดยครูตั้งปัญหาว่า "ถาคลื่นในภาพนี้เป็นคลื่นในมหาสมุทร สมมุติว่ามีพายุเกิดขึ้นทำให้ความถี่ของคลื่นเพิ่มขึ้นกว่าเดิม ระยะทางระหว่างคลื่นสองลูกจะยังคงเท่าเดิมหรือไม่?" หลังจากการอภิปรายสิ้นสุดลงแล้ว ครูควรให้มีการคำนวณหาค่าความยาวคลื่นโดยสมมุติดังนี้ ในเชือกซึ่งคลื่นสามารถเคลื่อนผ่านได้

โดยความยาว 30 ฟุตต่อวินาที ถ้าเด็กคนหนึ่งกระตุกปลายเชือกเพื่อให้เกิดคลื่น 3 ครั้ง ในหนึ่งวินาที เมื่อคลื่นวินาทีที่ 1 กลืนลูกแรกจะเคลื่อนที่ไปได้ไกล 30 ฟุต ในระยะทาง 30 ฟุตนี้จะมีคลื่นอยู่ 3 คลื่น ครูเขียนภาพประกอบข้อความนี้ด้วย จากภาพที่มองเห็นก็ตั้งปัญหาถามนักเรียนได้ว่า "ความยาวคลื่นเป็นเท่าไร ?" ครูเปลี่ยนตัวเลขบางจำนวนในโจทย์ข้างต้นนั้นให้เกิดกระตุกปลายเชือกทำให้เกิดคลื่น 6 ลูกใน 1 วินาที และเขียนภาพประกอบเช่นเดียวกัน แล้วถามนักเรียนว่า "ความยาวคลื่นเป็นเท่าไร ?" จากภาพคลื่นสองภาพในกระดานดำเมื่อครูชี้แจงเพิ่มเติมอีกเล็กน้อยนักเรียนก็จะมองเห็นความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความยาวคลื่นได้

สำหรับนักเรียนบางคนครูอาจใช้คำอธิบายว่า "ความยาวคลื่นเท่ากับความเร็วคลื่นหารด้วยความถี่" เขียนเป็นสูตรได้ว่า $\lambda = v \div f$ หรือ $\lambda = \frac{v}{f}$

ครูลองให้นักเรียนวัดความเร็วคลื่นในเชือกอีกครั้งหนึ่ง โดยทำเช่นเดียวกับที่เคยทำในกิจกรรมที่ 4 ตอนนี้นักเรียนก็จะสามารถหาค่าความยาวคลื่นในเส้นเชือกที่มีความถี่ต่าง ๆ ได้ โดยใช้ค่าความเร็วคลื่นหารด้วยความถี่

กิจกรรมที่ 9 การเปรียบเทียบคลื่นตามขวางในวัตถุแข็งชนิดต่าง ๆ มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษา ลักษณะของคลื่นตามขวางที่เกิดขึ้นในของแข็งชนิดต่าง ๆ สังกัณฑ์ที่ต้องการให้เด็กได้รับคือ "คลื่นตามขวางอาจจะเคลื่อนผ่านวัตถุชนิดต่าง ๆ ได้"

แนวการสอน ให้ครูนำยาสูบที่ปลูกลงบนพื้นแล้วถามนักเรียนว่า "เธอจะทำให้เกิดคลื่นที่คล้ายคลื่นในเส้นเชือกโดยใช้ยาสูบนี้ได้อย่างไร ?" ลองให้นักเรียนทำดู เมื่อได้ระลอกคลื่นเกิดขึ้นแล้วครูบอกให้นักเรียนเปลี่ยนความถี่ ความยาวคลื่น หรือแอมพลิจูดของคลื่นโดยใช้ประสบการณ์เดิมมาพิจารณาว่าจะทำได้อย่างไร นำวัสดุอื่นเช่น โซ่ พรหม มาให้นักเรียนทดลองแทนยาสูบที่ปลูกลง หลังจากนั้นครูก็อธิบายความหมายของคลื่นตามขวาง (transverse wave) ให้นักเรียนได้เข้าใจ

ทักษะต่าง ๆ ที่นักเรียนควรได้รับการฝึกฝนคือทักษะในการบันทึก ในการคิดอย่างมีเหตุผล และในการคิดวิจารณ์ (thinking logically and critically) วิธีการฝึกฝนทักษะดังกล่าวครูอาจใช้วิธีดังนี้คือ ให้นักเรียนอภิปรายและวางแนวทางการสรุปสิ่งที่ค้นพบจากการทดลองที่ทำมาแล้วให้คำแนะนำช่วยเหลือนักเรียนในการถ่ายภาพ การวาดภาพ การเขียนแผนภูมิและการบันทึกลงในสมุดเรื่องที่ครูควรให้นักเรียนจัดทำคือ

1. เปรียบเทียบขนาดพลังงานที่ต้องใช้ในการทำให้เกิดคลื่นที่เหมือนกันขึ้นในวัตถุต่างชนิดกัน

2. เปรียบเทียบขนาดที่มากที่สุดและที่น้อยที่สุดของความถี่แอมพลิจูดและความยาวคลื่น ที่นักเรียนสามารถทำให้เกิดขึ้นได้ในวัตถุต่างชนิดกัน

3. เปรียบเทียบความเร็วของคลื่นในวัตถุต่างชนิดกัน

กิจกรรมที่ 10 การสร้างและการใช้ ripple tank มีจุดมุ่งหมายเพื่อสังเกตคลื่นตามขวางบนผิวน้ำ สังกัณฑ์ของการให้นักเรียนได้รับคือ "ระลอกคลื่นที่เคลื่อนที่ไปบนผิวน้ำหรือบนผิวของเหลวใดเป็นคลื่นตามขวาง"

แนวการสอน ครูตักน้ำใส่อ่างใบหนึ่งให้ลึกประมาณ 3 นิ้ว ยกไปวางบนโต๊ะเรียกนักเรียนออกมาคอยสังเกตเมื่อปล่อยให้ก้อนหินเล็ก ๆ ตกลงไปในน้ำนั้น ครูอธิบายลักษณะของคลื่นที่เกิดขึ้นเพื่อให้นักเรียนเข้าใจว่าคลื่นที่เกิดขึ้นนั้นเกิดเนื่องมาจากการรบกวนของพลังงาน เช่นเดียวกับคลื่นที่เกิดในเส้นเชือก หลังจากนั้นควรให้นักเรียนช่วยกันสร้างอ่างน้ำขนาดใหญ่ขึ้นมาเพื่อศึกษาเรื่องคลื่นได้ชัดเจนยิ่งขึ้น โดยใช้ไม้กระดานประกอบกันเข้าเป็นโครงสี่เหลี่ยมขนาดกว้าง 2 ฟุต ยาว 4 ฟุต ใช้แผ่นพลาสติกคลุมทับโครงไม้นั้นเมื่อตักน้ำใส่ลงไปในแผ่นพลาสติกก็จะทำหน้าที่เป็นก้นอ่าง จัดระดับน้ำให้ลึกประมาณ 3 นิ้ว มีไม้กระดานอีกแผ่นหนึ่งยาวเกือบ 2 ฟุต ลอยอยู่ในน้ำที่ขอบด้านกว้างด้านหนึ่งทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดคลื่น ให้นักเรียนตบแผ่นกระดานที่ลอยอยู่เบา ๆ จะมีระลอกคลื่นวิ่งไปยังขอบตรงข้ามทันที เพื่อให้นักเรียนมองเห็นระลอกคลื่นที่เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจนก็ให้ฉายไฟไปบนผิวน้ำในแนวเฉียง ๆ การฉายไฟลงไปอาจทำให้ได้ภาพคลื่นน้ำที่เกิดจากการสะท้อนของแสง ปกติฐานผาผนังของห้องใดซึ่งถ้าให้นักเรียนสังเกตภาพนี้ก็จะมองเห็นคลื่นได้ง่าย เช่นเดียวกัน ครูอาจให้นักเรียนถ่ายภาพคลื่นน้ำที่เกิดขึ้นก็ได้ ท่อไปให้ครูตั้งคำถามว่า "เราจะทำให้เกิดคลื่นที่มีแอมพลิจูดสูง ๆ ได้อย่างไร ?" "คลื่นที่มีแอมพลิจูดสูงมีพลังงานมากกว่าคลื่นที่มีแอมพลิจูดต่ำใช่หรือไม่ ?" "เราจะทำให้เกิดคลื่นที่มีความถี่สูงได้อย่างไร ?" "คลื่นที่มีความถี่สูงจะมีความยาวคลื่นน้อยกว่าคลื่นที่มีความถี่ต่ำใช่หรือไม่ ?" นักเรียนควรได้ทำการทดลองโดยใช้อ่างน้ำที่สร้างขึ้นเพื่อทดสอบคำตอบของคำถามเหล่านี้

ครูยังควรที่จะช่วยให้นักเรียนได้พัฒนาในด้านการสังเกตในการแก้ปัญหาอีกด้วย โดยการให้เขาได้อภิปรายและวางแผนว่าจะใช้อ่างน้ำที่สร้างขึ้นทดลองอะไรอีกต่อไป เช่นอาจจะเป็นการวัดหรือการสังเกตเพื่อทดสอบว่าคลื่นที่มีแอมพลิจูดสูง เคลื่อนที่เร็ว เท่ากับคลื่นที่มีแอมพลิจูดต่ำหรือไม่ การ

ทดสอบนี้อาจจัดเป็นการแข่งขันความเร็วคลื่นก็ได้ โดยกำหนดบริเวณกึ่งกลางอ่าง เป็นเส้นชัยแล้วทำให้เกิดคลื่นที่มีแอมพลิจูดต่างกันวิ่งมาจากขอบอ่างทั้งสอง เข้าหากัน คำถามที่ควรจะต้องติดตามมาเมื่อเสร็จการแข่งขันก็คือ "คลื่นที่มีความถี่ต่างกันสองขบวนเกิดขึ้นพร้อมกันได้หรือไม่ ?" "เมื่อคลื่นสองขบวนเคลื่อนที่สวนทางกันมีอะไรเกิดขึ้นบ้าง ?"

ถ้ามีสระน้ำอยู่ใกล้ ๆ ครูควรนำนักเรียนไปที่สระนั้นเพื่อทดสอบความคิดบางอย่างของนักเรียน หลังจากได้รับประสบการณ์จากอ่างน้ำที่สร้างขึ้นแล้ว

กิจกรรมที่ 11 การเปรียบเทียบคลื่นผิวของเหลวชนิดต่าง ๆ มีจุดมุ่งหมายเพื่อเปรียบเทียบลักษณะ (characteristics) ของคลื่นตามขวางที่เคลื่อนไปบนผิวของของเหลวชนิดต่าง ๆ สิ่งที่ต้องให้นักเรียนได้รับคือ "ลักษณะของคลื่นตามขวางที่เกิดขึ้นที่ผิวของเหลวต่างชนิดกันย่อมไม่เหมือนกัน"

แนวการสอน ให้ครูเริ่มต้นบทเรียนโดยกล่าวว่านักเรียนเคยปล่อยก้อนหินให้ตกลงไปในน้ำ เพื่อทำให้เกิดคลื่นน้ำขึ้นมา ถ้าคิดอย่างมีเหตุผลแล้วคลื่นชนิดเดียวกันนั้นก็ควรทำให้เกิดขึ้นได้บนผิวของเหลวทุกชนิด ถามนักเรียนถึงแนวคิดของเขาที่จะตรวจสอบความคิดข้างต้น

ในการทดลองเพื่อตรวจสอบความคิดดังกล่าวแล้ว ให้ครูนำของเหลวชนิดต่าง ๆ ที่เตรียมไว้ เกล็ดในอ่างเล็ก ๆ ขนาดเท่ากันชนิดละอ่าง ของเหลวนั้นคือ น้ำ น้ำเกลือ น้ำมันแร่ น้ำออย น้ำมันลอยบนผิวน้ำและ maple syrup แล้วให้นักเรียนปล่อยก้อนหินเล็ก ๆ ให้ตกลงในของเหลวแต่ละชนิดเพื่อสังเกตคลื่นที่เกิดขึ้น

การเราให้นักเรียนคิดวิจารณ์ (critical thinking) ครูทำได้โดยตั้งคำถามนักเรียนว่า "พลังงานจากก้อนหินทำให้เกิดคลื่นที่เหมือนกันขึ้นในของเหลวทุกชนิดหรือไม่ ?" "คลื่นที่เกิดบนผิวของเหลวทุกชนิดมีอัตราเร็วเท่ากันหมดหรือไม่ ?" "คลื่นที่เกิดบนผิวของเหลวแต่ละชนิดนี้ทำให้มีความถี่เท่ากันได้ไหม ? ทำได้ง่ายสำหรับของเหลวทุกชนิดหรือไม่ ?"

และเพื่อให้หลักฐานจากการทดลองไม่ใช่ทัศนคติความเห็นของนักเรียนที่เสนอไว้ในตอนที่เปิดอภิปรายกันครั้งแรก ก็ให้มีการถ่ายภาพคลื่นของของเหลวแต่ละชนิดไว้ ภาพถ่ายนั้นควรได้นำมาสังเกตพิจารณาอย่างรอบคอบมันอาจจะให้คำตอบที่น่าพอใจ หรือมีอะไรรวบรวมของทางที่จะต้องทดสอบต่อไป

กิจกรรมที่ 12 การทดลอง เพื่อแสดงว่าคลื่นผิวน้ำมีได้เคลื่อนลึกลงไปใต้น้ำ มีจุดมุ่งหมายเพื่อหาความสัมพันธ์ที่คลื่นตามขวางจะพุ่งลึกลงไปใต้น้ำเมื่อมันเคลื่อนผ่านผิวของของเหลว สิ่งที่ต้องให้นักเรียนได้รับคือ "คลื่นตามขวางเคลื่อนที่ไปตามผิวของของเหลวเท่านั้น"

แนวการสอน ให้ครูใส่น้ำลงในอ่างเลี้ยงปลาที่วางอยู่บนโต๊ะหน้าชั้นเรียน ครูเอานิ้วจุ่มลงไป
ในน้ำทำให้เกิดคลื่นต่อเนื่องขึ้นที่ผิวน้ำแล้วถามนักเรียนว่า "คลื่นเคลื่อนลึกลงไปในน้ำเท่าไร ?"
"เธอสังเกตเห็นคลื่นใตผิวน้ำหรือไม่ ?" "เธอก็คือปลาที่อยู่ใต้น้ำจะรู้สึกว่ามีคลื่นเกิดขึ้นหรือไม่ ?"
ครูบอกให้นักเรียนทราบว่าวิธีหาว่าคลื่นที่ผิวน้ำเคลื่อนลงไปในน้ำได้ลึกเพียงใด แล้วครูก็สั่งให้นักเรียน
คนหนึ่งผูกกอนหินกับไม้คอร์ก เขาควยกันควยเชือกโดยทำให้กอนหินกับไม้คอร์กห่างกันประมาณ 2 นิ้ว เมื่อ
ดึงให้เชือกตึง นำกอนหินกับไม้คอร์กนี้วางลงในน้ำกอนหินจะวางให้ไม้คอร์กจมลงไปอยู่ห่างจากกอนอ่าง
ประมาณ 2 นิ้ว เมื่อทำให้เกิดคลื่นขึ้นที่ผิวน้ำแล้วถามนักเรียนว่า "มีอะไรเกิดขึ้นกับไม้คอร์กบ้าง ?"

อาจจะให้นักเรียนบางคนถามว่าทำไมคลื่นจึงไม่เคลื่อนลงไปถึงกอนหิน น้ำควรจะตอบว่าเป็น
เพราะคลื่นตามขวางนั้นเคลื่อนไปในทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทางที่อนุภาคของน้ำถูกรบกวนเท่านั้น

กิจกรรมที่ 13 การทำให้เกิดคลื่นตามยาวในสปริง มีจุดมุ่งหมายเพื่อสังเกตรูปร่าง (form)
ของคลื่นตามยาว สังกัณฑ์ที่ต้องการให้นักเรียนได้รับคือ "คลื่นตามยาวเคลื่อนผ่านวัตถุไปในทิศทาง
เดียวกับทิศทางของอนุภาคที่ถูกรบกวน"

แนวการสอน ให้ครูเริ่มต้นบทเรียนโดยกล่าวกับนักเรียนว่า คลื่นตามยาวนั้นต่างกับคลื่นตาม
ขวางที่นักเรียนเคยทำให้เกิดขึ้นบนเส้นเชือกหรือบนผิวน้ำมาแล้ว คลื่นตามยาวทำให้เกิดขึ้นได้โดยผลัก
อนุภาคของ วัตถุไปในทิศทางหนึ่ง คลื่นก็จะวิ่งไปในทิศทางนั้น เพื่อแสดงให้เห็นความจริงตาม
คำอธิบายข้างต้นนี้ ให้ครูนำสปริงยาว ๆ อันหนึ่งมายืดออกให้ยาวหลาย ๆ ฟุต ที่ปลายข้างหนึ่งบีบเอา
ขลวดในขั้วความยาวประมาณ 6 นิ้ว เขย่าหนักแล้วปล่อยทันที ก็จะมีคลื่นตามยาวเคลื่อนไปยังอีกปลาย
หนึ่ง ถ้าให้นักเรียนสังเกตคลื่นนี้ที่ปลายสุดของสปริงจะทำให้มองเห็นได้ง่ายขึ้น หรือถ้าติดกระดาษขึ้น
เล็ก ๆ เขากับขลวดด้วย เมื่อมีคลื่นผ่านมาก็จะสังเกตเห็นได้ง่ายเช่นเดียวกัน

กิจกรรมที่ 14 การสังเกตคลื่นตามยาวขณะที่มันเคลื่อนผ่านแถวของ domino และแถวของ
ลูกแก้ว มีจุดประสงค์เพื่อสังเกตการเคลื่อนที่ของคลื่นตามยาวในวัตถุอื่นนอกจากสปริง สังกัณฑ์ที่ต้องการ
ให้เด็กได้รับคือ "คลื่นตามยาวคือการรบกวน (disturbance) ที่เคลื่อนจากอนุภาคหนึ่งไปยัง
อนุภาคหนึ่งไปในทิศทางเดียวกับทิศทางของการรบกวนที่เกิดขึ้นครั้งแรก"

แนวการสอน ครูควรเริ่มต้นโดยการให้นักเรียนเรียง domino ในแนวยาวเป็นแถวยาว
แล้วตั้งคำถามว่า "ถ้า domino อันแรกล้มจะมีอะไรเกิดขึ้น ?" แล้วให้นักเรียนทดลองดูให้เห็นจริง
ครูลองเปลี่ยนแบบการเรียงตัวของ domino เสียใหม่ โดยครั้งนี้จัดให้เป็นรูปกากบาท แต่มีที่ว่าง

ทรงกลางมีขนาดพอดีกับขนาดของลูกบอลเล็ก ๆ ลูกหนึ่ง ถามนักเรียนว่า "ถ้าปล่อยลูกบอลให้ตกลงไป ทรงกลางอากาศนี้จะมียะไรเกิดขึ้น ? เพราะเหตุใด ?" แล้วให้นักเรียนได้ทำการทดลองด้วย

ให้นักเรียนใส่น้ำหลายสองอันประกอบกันเข้าเป็นรางรูปตัว V มุม 45 องศา แล้วนำลูกแก้วเล็ก ๆ มาวางเรียงให้ชิดกันในรางนั้น ถามนักเรียนว่า "ถากลิ้งลูกแก้วลูกหนึ่งมาชนปลายข้างหนึ่งของแถวลูกแก้วในรางนี้ จะมียะไรเกิดขึ้น ?" แล้วให้นักเรียนได้ทำการทดลองด้วย และโดยวิธีเดียวกันนี้ ครูอาจให้นักเรียนหาวัตถุอื่นมาทดลองบ้าง เพื่อให้เกิดความเข้าใจว่าคลื่นตามยาวสามารถเคลื่อนผ่านไป ในวัตถุอื่น ๆ ได้ด้วย ไม่เพียงแต่ในสปริงเท่านั้น

กิจกรรมที่ 15 การทำให้เกิดคลื่นตามยาวในเส้นเชือก มีจุดมุ่งหมายเพื่อแสดงให้นักเรียนเห็นว่าวัตถุที่เคลื่อนตามขวางเคลื่อนผ่านได้นั้น เราจะสามารถส่งคลื่นตามยาวให้ผ่านไปได้เช่นเดียวกัน คลื่นตามยาวสามารถเคลื่อนผ่านวัตถุโดยที่เราไม่สามารถมองเห็นอนุภาคที่ถูกรบกวนนั้นได้

แนวการสอน ควรเริ่มต้นบทเรียนโดยตั้งคำถามว่า "นักเรียนคิดว่าคลื่นตามยาวจะเคลื่อนผ่านวัตถุที่ไม่ใช่ลูกแก้วและ domino ได้ไหม ?" "เราจะทดสอบได้อย่างไรว่าคลื่นตามยาวเคลื่อนผ่านเส้นเชือกได้หรือไม่ ?"

"การทดลองที่ควรจัดขึ้นคือ ผูกเชือกเข้ากับค้ำไม้กวาดอันหนึ่ง ถึงอีกปลายหนึ่งของเชือกไปให้ถึง ให้เด็กคนหนึ่งเอาคอนเคาะค้ำไม้กวาด แล้วถามนักเรียนคนที่ตั้งปลายเชือกว่า "เธอรู้สึกอย่างไร" ทั่วไปครูควรพูดถึงเรื่องแอมพลิจูดและความถี่อีกครั้งหนึ่งและกระตุ้นให้นักเรียนออกความเห็นว่าจะทำให้คลื่นตามยาวในเส้นเชือกมีแอมพลิจูดสูง ๆ และมีความถี่สูง ๆ ได้อย่างไร ให้เขาได้ทดลองทำตามแนวทางที่เสนอมา นักเรียนบางคนอาจจะถามว่า "เราจะทำให้คลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางในเส้นเชือกเคลื่อนที่แข่งขันกันได้อย่างไร ?" ครูต้องเปิดโอกาสให้มีการอภิปรายกันก่อนว่าจะทำได้หรือไม่และจะทำอย่างไร เมื่อตกลงกันได้แล้วจึงจะเริ่มการแข่งขัน"

ในระดับมัธยม อุปกรณ์และกิจกรรมที่ต่อเนื่องสำหรับการสอนเรื่องคลื่นที่แนะนำไว้ในหนังสือแนะแนวครูและหนังสือแนะแนวการทดลองเพื่อการสอนวิชาฟิสิกส์ของ Nuffield Science Teaching Project มีเป็นลำดับดังนี้

1. การทดลองเรื่องคลื่นในเส้นเชือก ครูสาธิตวิธีทำให้เกิด pulse ขึ้นในเส้นเชือก ให้นักเรียนดูเสียก่อน โดยใช้เชือกยาวอย่างน้อย 3 เมตร ตรึงปลายข้างหนึ่งไว้ จับอีกปลายหนึ่งยกขึ้นแล้วกระตุกลงอย่างรวดเร็ว หลังจากครูสาธิตแล้วก็ให้นักเรียนออกมาทำการทดลองบ้าง โดยให้

นักเรียนสองคนจับปลายเชือกคนละข้าง ผลักกันทำให้เกิด pulse ขึ้นในเส้นเชือก ในขั้นนี้ครูยังไม่ต้องการให้นักเรียนดูการสะท้อนที่เกิดขึ้น แต่อาจมีนักเรียนบางคนสังเกตเห็นผลการสะท้อนที่เกิดขึ้นคือ standing wave และหันเหความสนใจไปยังสิ่งนั้นแทน ครูควรบอกนักเรียนแต่เพียงว่ามันเป็นรูปแบบ (pattern) อย่างหนึ่งของเส้นเชือกที่สั่น และมันไม่ได้มีการเคลื่อนที่เหมือน pulse

2. การสาธิตเรื่องคลื่นในแถวของนักเรียน ให้นักเรียนหลาย ๆ คนยืนเข้าแถวหน้ากระดานเรียงหนึ่ง ทุกคนเอามือเท้าสะเอวทั้งสองข้างโดยให้คลออยู่กับแขน ของคนข้างเคียงด้วย เมื่อครูผลักดันนักเรียนคนหัวแถวให้เคลื่อนไปมาในแนวตั้งฉากกับแนวของแถว ก็จะปรากฏคลื่นตามขวางถูกส่งไปตามแถวของนักเรียน ถ้าครูต้องการสาธิตการส่งคลื่นตามยาวไปตามแถวนักเรียนก็ทำได้โดยให้นักเรียนเหล่านั้นเข้าแถวตอนเรียงหนึ่งและทุกคนยกมือทั้งสองข้างขึ้นมาจับไหล่ของคนที่ยืนหน้าในลักษณะข้อศอกงอเล็กน้อย แล้วจึงทำให้นักเรียนคนที่ยืนหางแถวเคลื่อนไปมาในแนวของแถว ก็จะมีคลื่นตามยาวเคลื่อนผ่านแถวไปได้ การสาธิตทั้งสองวิธีนี้การอธิบายควรใช้คำพูดว่า "พลังงาน" ถูกส่งผ่านไปตามแถวของนักเรียน

3. การสาธิตลักษณะคานข้างของคลื่นที่ผิวน้ำ ให้ครูตักน้ำใส่อ่างสี่เหลี่ยมที่ทำด้วยวัสดุโปร่งใสซึ่งมีขนาดกว้าง 3 นิ้ว ยาว 3 ฟุต สูง 6 นิ้ว นักเรียนเป็นผู้คอยสังเกตที่ผิวน้ำคานข้างของอ่าง เมื่อครูจุ่มนิ้วลงในน้ำจะมีคลื่นเกิดขึ้นและนักเรียนก็สังเกตเห็นได้ แต่เพื่อให้สังเกตได้ง่ายยิ่งขึ้นครูอาจไปรษย์ซึ่งเลื่อยลงบนผิวน้ำก็ได้ อย่างไรก็ตามคลื่นที่เกิดขึ้นมีความเร็วมากจนมองแทบไม่ทัน เพื่อให้ได้คลื่นที่เคลื่อนที่ช้าลงพอที่จะสังเกตเห็นได้ง่าย ให้ครูใส่น้ำในอ่างอีกเพียง $\frac{1}{3}$ ของความสูงของอ่าง เติมหาหรือน้ำมันโอลีฟลงไปอีก $\frac{1}{3}$ ของความสูงของอ่าง เมื่อใส่น้ำให้มึลักษณะเหมือนลูกสูบจุ่มลงไปบนของเหลวให้ลึกกว่าผิวรอยต่อของของเหลวทั้งสอง จึงไม่ขึ้นลงก็จะมีคลื่นตามขวางเกิดขึ้นที่ผิวรอยต่อของของเหลว มันเคลื่อนที่ได้ไม่เร็วนักจึงทำให้ง่ายต่อการสังเกตสำหรับนักเรียน

4. การทดลองโดยใช้ ripple tank เป็นชุดการทดลองของนักเรียน เพื่อให้เขาค้นพบด้วยตนเองในเรื่องปรากฏการณ์ธรรมชาติและพฤติกรรม (behavior) ของคลื่น ชุดการทดลองดังกล่าวประกอบด้วยการทดลองในเรื่องต่อไปนี้

4.1 สร้างความคุ้นเคยกับ ripple tank ในขั้นแรกนี้ยังไม่ต้องประกอบส่วนที่สร้างคลื่นต่อเนื่อง (continuous waves) เข้าไป ให้นักเรียนใส่น้ำลงในอ่างประมาณครึ่งเซนติเมตร แล้วปล่อยให้เขาทดลองทำให้เกิดระลอกคลื่นแบบต่าง ๆ ได้ตามความพอใจ

4.2 การทดลองเรื่องคลื่นรูปวงกลมบนผิวน้ำ ครูให้นักเรียนหยดน้ำลงในอ่างแล้วถามนักเรียนว่า "คลื่นที่เกิดขึ้นมีลักษณะอย่างไร ?" "มีความเร็วเท่ากันทุกทิศทางหรือไม่ ?" "ความเร็วคงที่หรือไม่ ?" "น้ำเคลื่อนที่ตามคลื่นไปค่ายหรือไม่ ?" "จะหาอย่างไรจึงจะทราบว่าน้ำเคลื่อนที่ตามคลื่นไปค่ายหรือไม่ ?" คำถามสุดท้ายนี้ควรปล่อยให้เด็กนึกถึงวัสดุที่ต้องใช้ประกอบด้วยตนเอง แต่ครูก็มีเตรียมไว้ให้สำหรับเมื่อนักเรียนต้องการ หลังจากนั้นให้เด็กทดลองทำให้เกิดระลอกคลื่นที่วิ่งต่อเนื่องกันอีกครั้งหนึ่ง แล้วจึงปล่อยให้เขาทดลองเล่นกับอ่างน้ำนั้นไปตามความสนใจของแต่ละคน

4.3 การทดลองเรื่องคลื่นรูปเส้นตรงบนผิวน้ำ ให้นักเรียนใช้วัตถุเป็นแท่งของกระบอกกลิ้งในอ่าง โดยครูให้คำแนะนำว่า "กลิ้งทรงกระบอกที่อยู่ในอ่างไปเล็กน้อย โดยให้มีอวางรามลงบนส่วนบนสุดของมัน" นักเรียนก็ลองทดลองกลิ้งหลาย ๆ ครั้งเพื่อจะใคร่รู้ว่าจะทำให้ทรงกระบอกกลิ้งอย่างไรจึงจะทำให้เกิดระลอกคลื่นที่ชัดเจนที่สุด

4.4 การทดลองเรื่องการสะท้อนของคลื่นที่ปะทะกับสิ่งกีดขวางที่เป็นแนวตรง ให้นักเรียนเป็นผู้ทดลองและตั้งคำถามอะไร เกิดขึ้นเมื่อคลื่นวิ่งไปปะทะกับสิ่งกีดขวางที่วางไว้กลางอ่าง คลื่นที่จะให้นักเรียนทำให้เกิดขึ้นคือคลื่นรูปวงกลมกับคลื่นรูปเส้นตรง สำหรับคลื่นรูปเส้นตรง ครูควรแนะนำนักเรียนมิให้ทำมุมตกกระทบ 45 องศา เพราะจะเป็นการยากสำหรับผู้เริ่มหัดสังเกตที่จะมองเห็นความสัมพันธ์ระหว่างมุมตกกระทบและมุมสะท้อน ควรแนะนำให้นักเรียนเลือกมุมตกกระทบที่มีค่ามาก ๆ หรือน้อย ๆ ทดลองในขั้นนี้

4.5 การทดลองเรื่องการสะท้อนของคลื่นที่ปะทะกับสิ่งกีดขวางที่เป็นแนวโค้ง ให้นักเรียนใช้หลอดแดงสอดเข้าไปในหลอดยางแล้วอให้โค้งตามใจชอบ วางลงในอ่างทำหน้าที่เป็นสิ่งกีดขวาง แล้วจึงทำให้เกิดคลื่นรูปวงกลมและคลื่นรูปเส้นตรงวิ่งไปปะทะกับสิ่งกีดขวางนั้น ในขั้นนี้ต้องการให้นักเรียนสังเกตว่าเมื่อไร เกิดขึ้นเท่านั้น ครูยังไม่ต้องการจูงมุ่นหมายที่จะให้ผลการทดลองของนักเรียนได้ลเป็นขึ้นเป็นอันออกมา เว้น ใดจุดโฟกัสของสิ่งกีดขวาง เป็นต้น

4.6 การทดลองเรื่องการประมาณค่าของความยาวคลื่นโดยใช้ stroboscope เมื่อครูแนะนำ stroboscope และให้นักเรียนลองโ้มนั้้นจับภาพของคลื่นจนมีความชำนาญพอแล้ว ครูก็ถามนักเรียนว่า "จะวัดความยาวคลื่นได้อย่างไร ?" ถ้านักเรียนตอบไม่ได้ครูก็แนะนำวิธีการให้แกเขา นักเรียนควรจะได้อลองประมาณค่าของความยาวคลื่นของคลื่นที่เป็นวงกลมและคลื่นที่เป็นเส้นตรง แล้วให้เขาเปลี่ยนความถี่ของคลื่นเพื่อศึกษาว่าความยาวคลื่นเปลี่ยนแปลงหรือไม่ ถ้านักเรียนบางคน

ทำการทดลองไว้รวดเร็วและเสร็จก่อนคนอื่น ๆ การทดลองที่ครูควรให้เขาทำเพิ่มเติมในเรื่องนี้คือ การเปลี่ยนแปลงของคลื่นที่วิ่งมาถึงบริเวณน้ำตื้น โดยให้นักเรียนเอาแผ่นกระจกใสวางลงไปใต้อ่าง ทำให้เกิดบริเวณน้ำตื้นแล้วส่งคลื่นมาจากบริเวณน้ำลึก นักเรียนอาจจะพบว่าเมื่อคลื่นวิ่งมาเข้าสู่บริเวณน้ำตื้น ความยาวคลื่นและความเร็วคลื่นจะเปลี่ยนไปโดยที่ความถี่ยังคงเท่าเดิม

4.7 การทดลองเรื่องการสะท้อนของคลื่นเดี่ยวจากสิ่งกีดขวาง ครูถามปัญหานักเรียนว่า "เมื่อคลื่นเดี่ยวรูปกลมวิ่งไปกระทบสิ่งกีดขวางที่เป็นแนวตรงแล้วสะท้อนกลับออกมา คลื่นที่สะท้อนนั้นดูเหมือนว่าถูกส่งออกมาจากที่ใด ?" นักเรียนควรได้ทดลองเพื่อหาคำตอบ คำแนะนำของครูในตอนนั้นก็ควรบอกให้นักเรียนวางสิ่งกีดขวางลงกลางอ่างแล้วส่งคลื่นเดี่ยวรูปกลมไปปะทะแล้วคอยสังเกตดูให้ละเอียด ในที่สุดนักเรียนก็จะสังเกตพบว่า คลื่นที่สะท้อนนั้นดูเหมือนว่าถูกส่งออกมาจากจุดใด เมื่อให้นักเรียนสังเกตดูเขื่อนแล้วครูก็แนะนำให้ทำการทดลองต่อไป คือ ให้นิ้วมือขวาจุ่มลงไปตรงจุดที่ดูเหมือนว่าคลื่นสะท้อนถูกส่งออกมา ส่วนมือซ้ายจุ่มอยู่ในอ่างที่ตำแหน่งเดิม นิ้วมือทั้งสองนี้ทำให้เกิดคลื่นเดี่ยวขึ้นมาพร้อมกัน แต่ให้คลื่นที่เกิดจากนิ้วมือขวามีขนาดเล็กใกล้เคียงกับคลื่นสะท้อนที่เคยเห็นมากที่สุด ถามนักเรียนว่าเขาสังเกตเห็นอะไรเกิดขึ้นบ้าง สิ่งที่เกิดขึ้นนี้เป็นปรากฏการณ์ที่น่าทึ่งมาก ครูไม่ควรทำให้นักเรียนดูแต่ต้องให้นักเรียนลองทำจนกว่าจะสำเร็จ นอกจากมีนักเรียนบางคนที่ไม่ได้เลย ครูอาจช่วยทำให้ดูบ้างแต่ขณะที่กำลังทำให้ดูก็ไม่ควรอธิบายอะไรทั้งสิ้น เมื่อครูทำให้ดูได้อย่างง่ายดายก็เท่ากับเป็นการเร้าใจให้นักเรียนมีความพยายามที่จะทำให้สำเร็จมากยิ่งขึ้น

4.8 การทดลองเรื่องการสะท้อนของคลื่นเดี่ยวจากสิ่งกีดขวางรูปพาราโบลา ก่อนให้นักเรียนลงมือทดลองครูตั้งคำถามถามว่า "ถ้ามีคลื่นเดี่ยวรูปเส้นตรงวิ่งไปปะทะสิ่งกีดขวางรูปพาราโบลาจะมีปรากฏการณ์อะไรเกิดขึ้น ?" "นักเรียนจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่ย้อนกลับกับปรากฏการณ์นั้นได้หรือไม่ คือทำให้มีคลื่นเดี่ยวรูปเส้นตรงวิ่งออกมาจากสิ่งกีดขวางนั้น ?" แล้วให้นักเรียนเริ่มต้นทดลองเพื่อหาคำตอบ ในการทดลองนี้นักเรียนควรจะต้องสังเกตพบว่าคลื่นสะท้อนที่ได้เปลี่ยนรูปร่าง เป็นคลื่นรูปวงกลมที่มีขนาดเล็กลง ๆ แล้วกลับขยายโคขึ้นมามากขึ้น เมื่อให้นักเรียนสังเกตดูเขื่อนนี้เขาคงจะรู้สึกที่จะทำให้อันตรูปเส้นตรงสะท้อนออกมาจากสิ่งกีดขวางบ้างคือ เอานิ้วจุ่มลงตรงจุดที่คลื่นรูปวงกลมวิ่งเข้าหาเพื่อส่งคลื่นรูปวงกลมออกจากจุดนี้ไปปะทะสิ่งกีดขวางก็จะได้อันตรูปเส้นตรงสะท้อนออกมาทันที

4.9 การทดลองเรื่องการสะท้อนของคลื่นจากสิ่งกีดขวางที่โค้ง เป็นส่วนของวงกลม หลังจากให้นักเรียนได้ทดลองการสะท้อนของคลื่นเดี่ยวจากสิ่งกีดขวางตรงและสิ่งกีดขวางรูปพาราโบลาแล้ว

ครูควรให้สิ่งกีดขวางที่โค้ง เป็นส่วนของวงกลมแก่นักเรียนอีกอันหนึ่ง และบอกให้เขาใช้มันทดลองอย่างไรก็ได้ตามใจชอบ ทั้งนี้เพื่อให้นักเรียนสามารถทดลองให้เกิดอะไรบางอย่างได้โดยครูไม่ต้องแนะนำเลย

4.10 การสาธิตเรื่องการสะท้อนของคลื่นจากสิ่งกีดขวางรูปวงรี (ellipse) การสาธิตเรื่องนี้ครูจะจัดให้มีขึ้นหรือไม่ก็ได้ เพราะเป็นการสาธิตให้นักเรียนดูเพื่อความเพลิดเพลินเท่านั้น วิธีการสาธิตคือครูนำแผ่นทองเหลืองมาโค้งเข้าให้เป็นรูปวงรีแล้ววางลงไปในอ่าง ทำให้เกิดคลื่นเดี่ยวรูปวงกลมขึ้นที่จุดโฟกัสจุดใดจุดหนึ่ง จะมีการสะท้อนกลับไปกลับมาของคลื่นเกิดขึ้น ครูอาจให้นักเรียนบางคนลองทำดูบ้าง

4.11 การทดลองเรื่องการสังเกตสิ่งที่เกิดขึ้นเมื่อคลื่นเดี่ยววิ่งผ่านกัน คำถามที่ครูควรใช้ถามนักเรียนในเรื่องนี้คือ "มีอะไรเกิดขึ้นเมื่อคลื่นเดี่ยวสองคลื่นวิ่งผ่านกัน ?" "คลื่นเดี่ยวแต่ละคลื่นถูกทำให้เปลี่ยนแปลงไปหรือไม่ ?" ในการทดลองของนักเรียนเพื่อหาคำตอบนั้นครูอาจแนะนำให้นักเรียนใช้นิ้วมือสองนิ้วจุ่มลงไปในอ่างให้ทางกันพอควรแล้วส่งคลื่นออกมาจากจุดนั้นก็ได้อีก

4.12 การทดลองเรื่องการใช้นิ้วมือทำให้เกิด interference ครูควรแนะนำวิธีทดลองโดยให้นิ้วทั้งสองนิ้วของมือข้างเดียวกันทำหน้าที่เป็นต้นกำเนิดคลื่นสองชุดที่ in phase กัน เมื่อนักเรียนทำให้เกิดระลอกคลื่นต่อเนื่อง (continuous ripple) ขึ้นที่นิ้วทั้งสอง ก็ให้เขาส่งเกตสิ่งที่เกิดขึ้นบนผิวน้ำนั้น

4.13 การทดลองเรื่องการใช้เครื่องสั่น (vibrator) ทำให้เกิด interference ครูให้นักเรียนใช้เครื่องสั่นสองอันแทนนิ้วมือเพื่อทำให้เกิดคลื่นต่อเนื่องที่มีความถี่มากขึ้น แนะนำให้นักเรียนใส่น้ำในอ่างให้ลึกประมาณ 1 เซนติเมตร เพื่อให้มองเห็นสิ่งที่เกิดขึ้นจากการทดลองได้ไกล จากเครื่องสั่นมากขึ้น การทดลองในตอนนี้เป็นเพียงการแนะนำให้นักเรียนได้รู้จัก interference pattern เท่านั้น ยังไม่ควรมีการอธิบายรายละเอียดมากนัก สำหรับกลุ่มงานการทดลองนี้อาจจัดออกก็ได้

ถ้าครูแนะนำแล้วนักเรียนยังปฏิบัติไม่ได้ผล ครูควรกระตุ้นเขาให้มีความพยายามมากขึ้น โดยครูทำให้ดูเล็กน้อยแต่ไม่ใช่สาธิตให้ดูเสียทั้งหมด เพราะการทำเช่นนั้นจะเป็นการทำให้เสียคุณค่าของ ripple tank ในการที่จะทำให้นักเรียนมีความรู้สึกว่าคุณรู้ทั้งหลายนั้นเขาได้มาจากการทดลองด้วยตนเองทั้งสิ้น

4.14 การทดลองเรื่องการแทรกสอด (slit) สองร่องทำให้เกิด interference ในเรื่องนี้ควรใช้คำถามว่า "ถ้านักเรียนมีคนที่กำเนิดคลื่นตรงเพียงอันเดียว แต่ต้องการคลื่นสองชุด นักเรียนจะอย่างไร?" คำแนะนำที่เป็นประโยชน์แก่นักเรียนคือ ให้นักเรียนจัดสิ่งกีดขวางคลื่น (barrier) ในอ่างให้มีร่องสองร่องห่างกันเล็กน้อย แต่ละร่องกว้าง 1 เซนติเมตร แล้วทำให้เกิดคลื่นตรงวิ่งผ่านร่องทั้งสองก็จะโคคลื่นสองชุดตามต้องการ ให้นักเรียนสังเกตสิ่งที่เกิดขึ้นเมื่อคลื่นสองชุดจากสองร่องนั้นพบกันด้วย

ในการใช้คำพูดอธิบายเรื่อง interference ให้นักเรียนฟังนั้นครูยังไม่ควรใช้คำศัพท์เฉพาะ เช่นคำว่า destructive interference แต่อาจใช้คำอธิบายง่าย ๆ เพื่อให้นักเรียนเข้าใจว่า เมื่อคลื่นสองพวกวิ่งไปพบกัน บริเวณบางแห่งจะดูเหมือนว่าคลื่นใดรวมกัน แต่บางแห่งก็ดูเหมือนว่าคลื่นได้ทำลายกัน โดยอธิบายดังนี้

"ที่ตำแหน่งนี้เมื่อคลื่นพวกหนึ่งวิ่งมาถึงก็จะทำให้น้ำกระเพื่อมขึ้นลง สมมติว่าแทนด้วยสัญญาณ flip-flap คลื่นอีกพวกหนึ่ง เมื่อวิ่งมาถึงที่นั้นก็ทำให้น้ำกระเพื่อมขึ้นลงซึ่งแทนด้วยสัญญาณ flap-flap เช่นเดียวกัน ดังนั้นสัญญาณที่แทนคลื่นทั้งสองพวกรวมกันคือ FLIP-FLAP ... แต่ที่ตำแหน่งนี้คลื่นจากต้นกำเนิดคลื่นอันนี้เอง เดินทางมาไกลกว่าคลื่นจากต้นกำเนิดอันนั้นเล็กน้อย มันจึงมาถึงที่นี้โดยมีจังหวะขึ้นลงไม่พร้อมกัน คลื่นอันหนึ่งทำให้น้ำกระเพื่อมขึ้นลง flip-flap แต่คลื่นอีกอันหนึ่งทำให้น้ำกระเพื่อม.....?" ครูพูดค้างไว้เพื่อให้นักเรียนตอบคำว่า flap-flap แล้วถามนักเรียนต่อไปว่า เมื่อการกระเพื่อมของน้ำเนื่องจากคลื่นทั้งสองเกิดขึ้นพร้อมกัน ผลควรจะเป็นอย่างไร

คำสรุปที่ครูควรกล่าวในการสอนเรื่อง interference ก็คือ "นี่คือสิ่งที่คลื่นสามารถทำให้เกิดขึ้นมาได้ คลื่นสามารถรวมกันแล้วทำให้เกิดผลที่รุนแรงขึ้นหรือไม่ทำให้เกิดผลอะไรขึ้นมาเลยก็ได้ ถ้าเทียบคลื่นกับวัตถุอื่น ๆ ที่กำลังเคลื่อนที่ เช่น สายฝน หรือกระสุนปืนแล้ว ยากนักที่สิ่งเหล่านี้จะทำให้เกิดรูปแบบ (pattern) แบบนี้ขึ้นมาได้เช่น เมื่อยิงปืนสองกระบอกไปยังเป้าอันหนึ่งแล้ว รู้สึกว่าเป็นการยากอย่างยิ่งที่จะพบบริเวณที่ กระสุน $\neq$ กระสุน แล้วทำให้ได้กระสุนมากขึ้น หรือพบบริเวณที่กระสุน $\neq$ กระสุน แล้วไม่มีกระสุนเหลืออยู่เลย"

4.15 การทดลองเรื่อง diffraction ที่ของแคบ ๆ ของสิ่งกีดขวาง ในขั้นนี้ครูยังไม่ควรอธิบายถึง diffraction ของแสง ให้บอกนักเรียนแต่เพียงว่าคลื่นต่าง ๆ มักทำให้เกิดปรากฏการณ์เช่นนี้เสมอ การทดลองให้ครูแนะนำให้นักเรียนจัดช่องสิ่งกีดขวางกว้างประมาณ 2 เซนติเมตร

วางสิ่งกีดขวางห่างจากต้นกำเนิดคลื่นประมาณ 5 เซนติเมตร เมื่อมีคลื่นผ่านช่องของสิ่งกีดขวางนี้ก็จะเกิด diffraction เกิดขึ้น นอกจากนี้นักเรียนควรทดลองเปลี่ยนความกว้างของช่องที่คลื่นผ่านและลองเปลี่ยนต้นกำเนิดคลื่นตรงเป็นต้นกำเนิดคลื่นรูปวงกลมบ้าง เพื่อดู diffraction ที่เกิดขึ้นว่าเป็นอย่างไร

4.16 การทดลองเรื่องการหักเหของคลื่นเมื่อเข้าสู่บริเวณที่น้ำตื้น การหักเหของคลื่นเป็นปรากฏการณ์ที่สังเกตได้ยากจึงได้นำมาจัดให้มีการทดลองในตอนท้ายนี้ ในการสังเกตควรแนะนำวิธีสังเกตเสียก่อนโดยอธิบายว่า "นักเรียนลองทำให้เกิดคลื่นวิ่งจากบริเวณที่น้ำลึกไปยังบริเวณที่น้ำตื้นกว่า บริเวณที่น้ำตื้นนั้นนักเรียนทำได้โดยวางแผ่นกระจกลงในอ่าง แล้วใช้ stroboscope สังเกตคลื่น มีบางอย่างที่น่าสนใจอยู่ นักเรียนลองสังเกตให้พบ การสังเกตเห็นสิ่งที่น่าสนใจนี้จะง่ายขึ้นถ้านักเรียนไม่จับภาพคลื่นด้วย stroboscope ให้อย่างเดียว แต่ปล่อยให้มันเคลื่อนที่ไปมาอย่างช้า ๆ"

การทดลองนี้จะโดดเด่นเมื่อบริเวณน้ำตื้นนั้น น้ำตื้นมาก ๆ และคลื่นที่ส่งมาที่มีความถี่ต่ำ ในขณะที่ทำการทดลองนักเรียนบางคนอาจสังเกตเห็นว่า ความยาวคลื่นของคลื่นที่วิ่งอยู่ในบริเวณน้ำตื้นสั้นกว่าของคลื่นในบริเวณน้ำลึก และบางคนอาจสังเกตเห็นว่าความเร็วของคลื่นเปลี่ยนไปด้วย เมื่อคลื่นวิ่งเข้าสู่บริเวณน้ำตื้นนั้น อย่างไรก็ตามสิ่งเหล่านี้สังเกตเห็นได้ยากครูจึงควรเดินไปที่อ่างของนักเรียนเพื่อซักถามและให้คำแนะนำในการที่จะสังเกตให้เห็นการเปลี่ยนแปลงเหล่านั้น แต่สิ่งสำคัญที่สุดครูต้องไม่ทดลองให้เด็กดูเสียเอง

ครูไม่จำเป็นต้องเน้นเรื่องการหักเหของคลื่นโดยอาศัยการทดลองนี้มากนัก เพราะนักเรียนยังมีโอกาสได้ทำการทดลองในทำนองนี้อีกครั้งหนึ่ง เมื่อเขาต้องการศึกษาเกี่ยวกับคลื่นที่ปะทะกับขอบ (boundary) ซึ่งอยู่ระหว่างบริเวณที่คลื่นมีความเร็วแตกต่างกัน

4.17 การทดลองเรื่องการประมาณค่าความยาวคลื่น ความถี่ และความเร็วคลื่น ครูให้นักเรียนใช้ stroboscope ช่วยในการวัดค่าความยาวคลื่น แต่อย่างไรก็ตามการวัดความยาวคลื่นแบบนี้ไม่ใช่วิธีที่จะได้ค่าที่ถูกต้องที่สุด ดังนั้นครูจึงไม่ควรเน้นในเรื่องความแม่นยำของค่าที่นักเรียนวัดได้สำหรับการวัดความถี่ของคลื่น ครูให้นักเรียนนับความถี่จากเสียงที่ได้ยินเมื่อเอากระดาษฉีกเล็ก ๆ ไปแตะเข้ากับส่วนที่หมุนได้ของเครื่องสั่นที่เป็นต้นกำเนิดคลื่น แม้การนับนี้จะไม่ได้ค่าถูกต้องนัก แต่ก็ได้ค่าที่ใกล้เคียงความจริงพอสมควร ถ้าความถี่ค่อนข้างสูงก็แนะนำให้ให้นักเรียนใช้ stroboscope ช่วยช่วยส่วนการวัดความเร็วคลื่นนั้นแนะนำให้ให้นักเรียนเคลื่อนปลายคินสอตามคลื่นอันหนึ่งทีปรากฏเป็นเงาบนแผ่น

. กระดาษ จัมเวลาที่ปลายดินสอเคลื่อนจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง ก็จะหาความเร็วคลื่นได้

นักเรียนในระดับนี้ควรจะได้ทราบความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็ว ความถี่ และความยาวคลื่น คือ $v = \lambda f$ ด้วย แนวการสอนเรื่องนี้ให้อธิบายโดยยกตัวอย่างดังนี้ "สมมุติชายคนหนึ่งเดินได้ 70 ก้าวใน 1 นาที แต่ละก้าวยาว 2 ฟุตใน 1 นาที เขาเดินไปได้ไกลเท่าไร ? ... ไช้แล้ว 140 ฟุต ดังนั้นอัตราเร็วของเขาเท่ากับ 70 (ก้าวต่อนาที) $\times$ 2 (ฟุตต่อก้าว) = 140 ฟุตต่อนาที ถ้าชายคนนั้นเดินได้ n ก้าวใน 1 นาที แต่ละก้าวยาว λ ฟุต ดังนั้นใน 1 นาทีจะเดินได้ไกล $n\lambda$ ฟุต ความเร็วของเขา = (จำนวนก้าวต่อนาที) $\times$ (ความยาวก้าว) หรือ $v = \lambda f$ ลองพิจารณาค้นบ้าง เมื่อมีคลื่นขบวนหนึ่งเคลื่อนไปได้หนึ่งความยาวคลื่น หนึ่งความยาวคลื่นก็คือ 1 กวานั้นเอง ถ้าเครื่องสั่นทำให้เกิดความยาวคลื่น n ความยาวคลื่นใน 1 วินาที (ความถี่ n รอบต่อวินาที) จะได้อัตราเร็วของคลื่น = (จำนวนความยาวคลื่นต่อวินาที) $\times$ (ความยาวคลื่น) หรือ $v = \lambda f$ ".

อาจมีนักเรียนบางคนถามปัญหาต่าง ๆ เช่นถามว่า "ความยาวคลื่นที่สถานีวิทยุ BBC กลาวถึงนั้นเป็นสิ่งที่เกี่ยวกับความยาวคลื่นที่เรากำลังกลาวถึงอยู่หรือไม่ ?" สถานีวิทยุ BBC บอกความถี่ของคลื่นให้แก่เราด้วยหรือไม่ ? "ก็โลโซเกิด เมกกะโซเกิด คืออะไร ะ" จากปัญหาลำนี้ครูอาจใช้ข้อมูลเกี่ยวกับความถี่และความยาวคลื่นที่สถานีวิทยุแห่งนี้ประกาศมาคำนวณหาความเร็วของคลื่นวิทยุให้นักเรียนดูได้

บทที่ 3

เรื่อง

หลักเกณฑ์และการออกแบบสร้างอุปกรณ์

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักเกณฑ์และการออกแบบสร้าง wave machine และเครื่องวัดความเร็วเสียงในอากาศที่อุณหภูมิต่าง ๆ เพื่อให้อุปกรณ์เหล่านี้สามารถแสดงผลได้ตรงตามทฤษฎีของเรื่องนั้น ๆ ดังนี้

1. Wave machine

เครื่องกลเครื่องนี้มุ่งให้สามารถแสดงผลได้ถูกต้องตามสมการของ Traveling waves และ Standing waves คือ $y = y_0 \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$ และ $y = Y \sin \frac{2\pi x}{\lambda} \sin 2\pi ft$ (Robertson, 1965 : 416) สมการทั้งสองนี้ได้จากทฤษฎีดังต่อไปนี้

ทฤษฎีที่เกี่ยวกับ Traveling waves ถ้ามีต้นกำเนิดคลื่นอันหนึ่งกำลังสั่นแบบ S.H.M. อยู่ในตัวกลาง อนุภาคตัวกลางที่อยู่ติดกับต้นกำเนิดคลื่นนั้นก็จะสั่นแบบ S.H.M. ด้วย และจะเกิดการถ่ายทอดการสั่นนั้นให้แก่อนุภาคที่อยู่ถัดออกไปเรื่อย ๆ ทำให้เกิดขบวนคลื่นวิ่งติดต่อกันออกไปจากต้นกำเนิดคลื่น สมมติคลื่นขบวนนั้นวิ่งออกไปด้วยความเร็ว v และให้ต้นกำเนิดคลื่นสั่นแบบ S.H.M. แทนได้ด้วยความสมการ

$$y = a \sin \frac{2\pi t}{T}$$

ดังนั้นอนุภาค P ใด ๆ ที่อยู่ห่างจากต้นกำเนิดคลื่นออกไปเป็นระยะทาง x จะเริ่มสั่นช้ากว่าต้นกำเนิดคลื่นอยู่เป็นเวลา x/v เพราะฉะนั้นการสั่นของอนุภาค P จะแทนได้ด้วยความสมการ

$$y = a \sin \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{x}{v} \right)$$

$$\text{หรือ} \quad y = a \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$$

สมการที่ได้นี้จะ เป็นสมการของ Traveling waves แสดงให้เห็นว่าถ้าพิจารณาอนุภาคใดอนุภาคหนึ่งของตัวกลางที่มีขบวนคลื่นวิ่งผ่าน displacement ของอนุภาคนั้นจะขึ้นอยู่กับเวลา t แต่ถ้าพิจารณาอนุภาคต่าง ๆ เหล่านั้นพร้อม ๆ กันในขณะใดขณะหนึ่งแล้ว displacement ของแต่ละอนุภาคจะขึ้นอยู่กับค่าของ x แต่ละค่านั่นเอง

ทฤษฎีเกี่ยวกับ Standing waves เมื่อมีคลื่นขบวนหนึ่งเคลื่อนไปในตัวกลางชนิดหนึ่ง ถ้าทำให้คลื่นนี้สะท้อนกลับตามแนวเดิม คลื่นทั้งสองขบวนจะรวมกันตาม Principle of superposition สมมติ Traveling waves ขบวนหนึ่งวิ่งไปตามแนวแกน X ในทิศทาง +x ให้คลื่นขบวนนี้แทนโดยสมการ

$$y_1 = a \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$$

เมื่อมีคลื่นสะท้อนวิ่งสวนกลับมาในแนวแกน X ของตัวกลางเดิม คลื่นสะท้อนนี้จะแทนโดยสมการ

$$y_2 = a \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda} \right)$$

ตาม Principle of superposition จะได้

$$\begin{aligned} y &= y_1 + y_2 \\ &= a \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) + a \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda} \right) \\ &= Y \sin \frac{2\pi t}{T} \cos \frac{2\pi x}{\lambda} \quad \text{เมื่อ } Y = 2a \end{aligned}$$

สมการที่ได้คือสมการของ Standing waves แสดงให้เห็นว่า ถ้า $x = \frac{\lambda}{4}, \frac{3\lambda}{4}, \frac{5\lambda}{4} \dots$ แล้วจะได้

$$y = Y \sin \frac{2\pi t}{T} \cos \frac{n\pi}{2} \quad \text{เมื่อ } n = 1, 3, 5 \dots$$

นั่นคือ $y = 0$ สำหรับทุกค่าของ t แสดงว่าตรงจุดที่อยู่ห่างจากต้นกำเนิดคลื่นออกไปเป็นระยะ $\frac{\lambda}{4}, \frac{3\lambda}{4}, \frac{5\lambda}{4} \dots$ อนุภาคตัวกลางจะหยุดนิ่งตลอดเวลา คือเป็นตำแหน่งของ Node ของ Standing waves นั่นเอง ถ้า $x = \frac{\lambda}{2}, 2\frac{\lambda}{2}, 3\frac{\lambda}{2} \dots$ แล้วจะได้

$$\begin{aligned} y &= Y \sin \frac{2\pi t}{T} \cos m\pi \quad \text{เมื่อ } m = 1, 2, 3 \dots \\ &= \pm Y \sin \frac{2\pi t}{T} \end{aligned}$$

นั่นคือตรงจุดที่ห่างจากต้นกำเนิดคลื่นเป็นระยะ $\frac{\lambda}{2}, 2\frac{\lambda}{2}, 3\frac{\lambda}{2} \dots$ อนุภาคจะสั่นโดยมีแอมพลิจูดเท่ากับ Y หรือ $2a$ คือเป็นตำแหน่งของ Antinode ของ Standing waves นั่นเอง

ในการออกแบบสร้าง wave machine นั้นนอกจากจะมุ่งให้สามารถแสดงผลได้ตรงตามสมการที่ต้องการอันเป็นเป้าหมายที่สำคัญยิ่งแล้ว ยังต้องคำนึงถึงสิ่งต่อไปนี้ด้วยเพื่อที่จะทำให้มันเป็นอุปกรณ์ที่มีคุณค่าในตัวเองพอควร คือ ขนาดต้องกระทัดรัด ไม่ใหญ่โตจนยากแก่การเคลื่อนย้าย สามารถแสดงความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ของอนุภาคตัวกลางขณะมีคลื่นเกิดขึ้นในตัวกลางนั้นได้อย่างชัดเจน นั่นคือต้องทำให้แต่ละอนุภาคเคลื่อนที่ไปอย่างช้า ๆ ตามต้องการได้ และสามารถแสดงการเคลื่อนที่ของแต่ละ

อนุภาคตัวกลางที่เกิดจาก Traveling transverse waves, Traveling longitudinal waves, Standing waves in a string และ Standing longitudinal waves ได้โดยชิ้นส่วนของอุปกรณ์ทำงานเป็นระบบเดียวกันเพื่อลดจำนวนชิ้นส่วนของอุปกรณ์ให้น้อยลงกว่าชนิดที่ออกแบบโดยมีระบบย่อย ๆ ที่ระบบที่ทำให้เกิดคลื่นแต่ละชนิด แล้วนำเอาระบบย่อยทั้งสี่รวมกันกลายเป็นเครื่องมือชิ้นหนึ่งขึ้นมา

เมื่อได้ทั้งเกณฑ์ขึ้นไว้เช่นนี้แล้ว ก็มาพิจารณาแบบของอุปกรณ์ว่าควรเป็นอย่างไรจึงจะสนองเกณฑ์ข้อสุดท้ายได้ ในที่นี้ผู้เขียนได้ออกแบบโดยมีหลักการให้อนุภาคตัวกลางเคลื่อนที่อยู่กับปลายหนึ่งของแกนตรงแต่ละอัน แล้วนำเอาปลายอีกข้างหนึ่งของแกนอนุภาคนั้นไปวางลงในร่องที่ทำไว้บนผิวทรงกระบอก โดยร่องที่ทำไว้แต่ละร่องเป็นแบบ sine curve เมื่อหมุนทรงกระบอกไปรอบแกนที่อยู่ในแนวราบไปช้า ๆ จะทำให้มองเห็นอนุภาคที่ติดอยู่ที่ปลายของแกนอนุภาคเคลื่อนที่เป็นแบบ S.H.M. อย่างช้า ๆ ควบคู่กัน ทำให้สามารถสังเกต displacement และ phase angle ของอนุภาคนั้นได้อย่างชัดเจน และถ้าทำร่องสำหรับแต่ละอนุภาคบนผิวทรงกระบอกให้สัมพันธ์กันอย่างถูกต้องแล้ว ก็จะทำให้การเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาคที่ติดอยู่ที่ปลายแกนอนุภาคนั้นเป็นไปตามสมการของ Traveling longitudinal waves และ Standing longitudinal waves ได้

สำหรับการทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ตามสมการของ Traveling transverse waves นั้น เราต้องอาศัยการเคลื่อนที่ในแนวราบของแกนอนุภาครุกเดิม ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ในแนวตั้งขึ้นมาให้ได้ เพราะคลื่นตามขวางนั้นทำให้อนุภาคของตัวกลางเคลื่อนที่ในแนวที่ตั้งฉากกับแนวทางการเคลื่อนที่เคลื่อนไป ถ้าทำได้เช่นนี้ก็จะมีผลทำให้ร่องที่ทำไว้แต่เดิมสำหรับการทำให้เกิด Standing longitudinal waves นั้นสามารถนำมาใช้ทำให้เกิด Standing waves in a string ได้อีกด้วยเพราะขนาดของแอมพลิจูดของการเคลื่อนที่ในแนวตั้งย่อมเป็นสัดส่วนตรงกับขนาดของแอมพลิจูดของการเคลื่อนที่ในแนวราบเสมอ

นั่นคือต้องสร้างร่องบนผิวทรงกระบอกสองชุด ชุดหนึ่งเพื่อทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ตามสมการของ Traveling longitudinal waves และ Traveling Transverse waves อีกชุดหนึ่งเพื่อทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ตามสมการของ Standing longitudinal waves และ Standing waves in a string กับต้องสร้างระบบที่ใดเปลี่ยนการเคลื่อนที่ในแนวราบมาเป็นการเคลื่อนที่ในแนวตั้งอีกด้วย

สำหรับความจำเป็นของอุปกรณ์ที่ต้องมีทรงกระบอกสองชุดนั้น ถ้ามাত্রทรงกระบอกทั้งสองมาวางติดกันก็จะทำให้อุปกรณ์มีขนาดใหญ่โตมากเกินไป วิธีที่จะลดขนาดของอุปกรณ์ลงได้มากที่สุดคือต้องทำเป็น

ทรงกระบอกที่มีสองผิวสวมกันไว้ให้หมุนรวมแกนอันเดียวกัน ถ้าต้องการให้ร่องบนผิวนอกทำให้ผิวนอก
หมุนผิวในให้สนิท ถ้าต้องการให้ร่องบนผิวในก็เพียงผิวนอกออกอย่าให้แตะกับผิวใน แกนอนุภาคก็สามารถ
ปักลงในร่องบนผิวทรงกระบอกชั้นในได้ นั่นคืออุปกรณ์ของเราต้องมีระบบอีกอันหนึ่งที่ทำหน้าที่แยกและ
แยกให้ผิวทรงกระบอกทั้งสองห่างออกจากกันหรือทำให้หุบเข้ามารถักกันแน่นได้

1.1 หลักเกณฑ์และการออกแบบร่องบนผิวทรงกระบอก

1.1.1 การทำร่องเพื่อให้อนุภาคเคลื่อนที่ตามสมการของ Traveling longitudinal
waves และ Traveling transverse waves เมื่อพิจารณาสมการ $y = y_0 \sin 2\pi(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda})$
จะเห็นว่าถ้าให้ x คงที่ นั่นก็ถือว่าพิจารณาการเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาค แต่ละอนุภาคทั้งกลาวนั้น
จะเคลื่อนที่เป็นแบบ sine curve โดย displacement ขึ้นกับเวลา t แต่มีแอมพลิจูดเท่ากัน
หมดทุกอนุภาค แสดงว่าร่องของแต่ละอนุภาคจะคงเป็นแบบ sine curve วนไปโดยรอบผิวทรง
กระบอก ร่องแต่ละร่องจะจัดให้เหลื่อมล้ำกันอย่างไรนั้น ก็พิจารณาได้จากอนุภาคที่อยู่คนละตำแหน่งกัน
คือ x มีค่าเป็น x_1 และ x_2 แล้วอนุภาคนั้นจะมี phase ต่างกันเท่ากับ $2\pi(x_2 - x_1)/\lambda$ ดังนั้น
อนุภาคที่อยู่ใกล้กันมากก็มี phase ต่างกันน้อย อนุภาคที่อยู่ห่างกันก็จะมี phase ต่างกันมาก ถ้า
เราเลือกให้อนุภาคที่อยู่ติดกันมี phase ต่างกัน 30° แล้วร่องที่อยู่ติดกันต้องวางให้เหลื่อมล้ำกันดัง
ภาพที่ 1

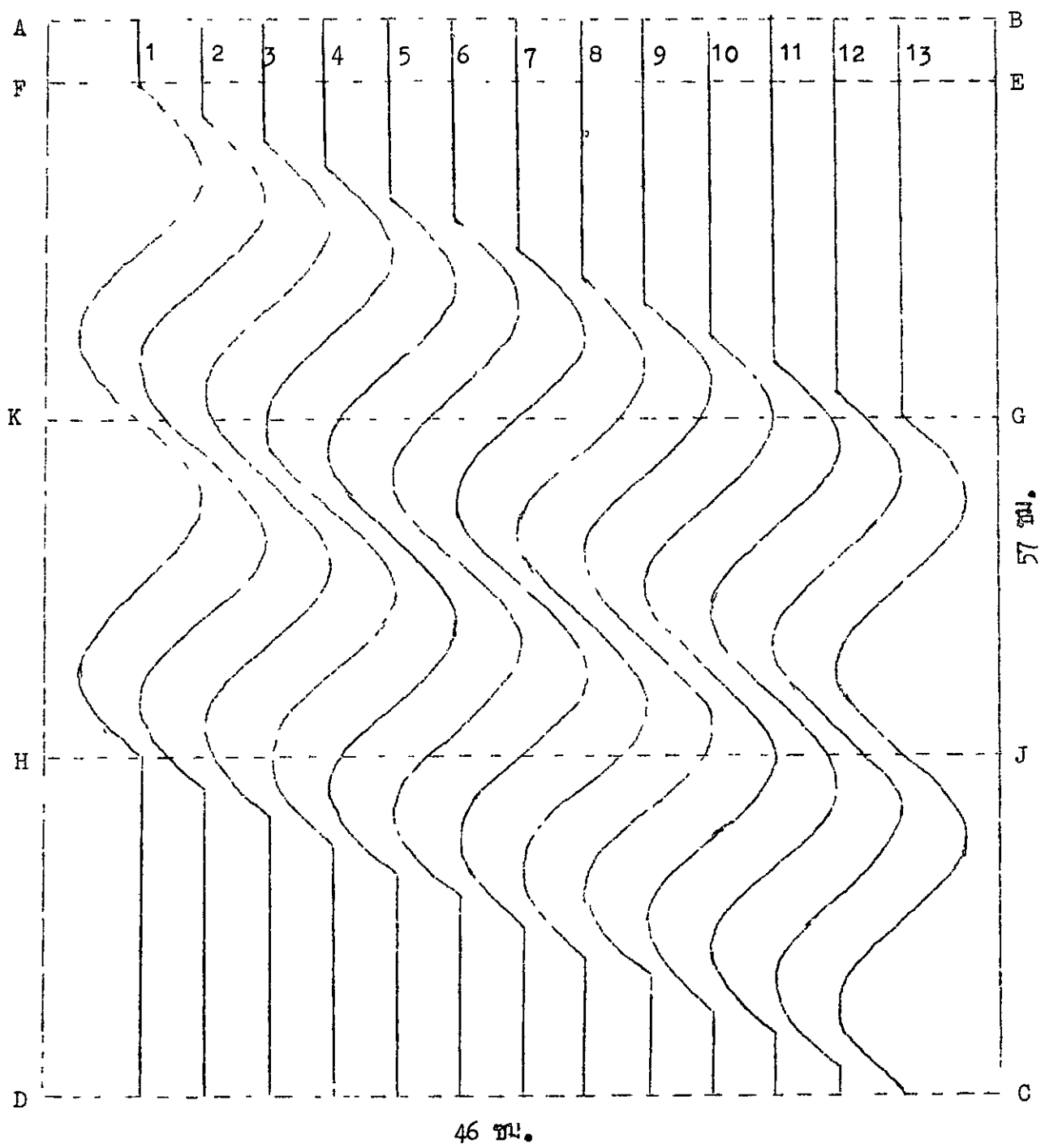
สำหรับแอมพลิจูดของแต่ละร่องจะมีข้อจำกัดอยู่สองประการคือ ขนาดของทรงกระบอกและ
ความคล่องตัวในการเคลื่อนที่ของแกนอนุภาคไปตามร่อง ถ้าจะทำให้แต่ละร่องมีแอมพลิจูดมากเพื่อให้
เห็นแบบคลื่น (wave form) ได้ชัดเจน ทรงกระบอกต้องมีความยาวมากและบางตอนของร่องจะมี
slope น้อยเกินไปทำให้แกนอนุภาคเคลื่อนที่ไปตามร่องได้ยาก ถ้าจะเพิ่ม slope ให้มากขึ้นโดย
ยืดยาวความยาวคลื่นของแต่ละร่องออกก็มีของทรงกระบอกก็ต้องเพิ่มขึ้นอีก ดังนั้นจึงต้องเลือกสั่งกะสีมาทำ
เป็นผิวทรงกระบอก และใช้ลวดทองเป็นรูป sine curve วางเคียงกันทำให้เกิดร่องขึ้นมา แล้ว
ทดลองดูว่าร่องนั้นต้องมีความยาวคลื่นเท่าใด แอมพลิจูดมากที่สุดเท่าไรจึงจะทำให้แกนอนุภาคเคลื่อนที่
ในร่องได้โดยไม่ติดขัด ขนาดของร่องที่ได้ออกแบบไว้คือมีแอมพลิจูด 3 มม. และมีความยาวคลื่น 18
มม. เมื่อแต่ละร่องมีแอมพลิจูด 3 มม. จากสมการของการเคลื่อนที่แบบ S.H.M. $y = 3 \sin \omega t$
จะได้ว่า ถ้า $\omega t = 30^\circ$ $y = 1.5$ มม. นั่นคือถ้าให้ร่องถัดไปอยู่ห่างจากร่องแรก 3 มม. แล้ว
เมื่ออนุภาคในร่องแรกเคลื่อนที่ไปได้ phase angle 30° มี displacement 1.5 มม. นั้น

อนุภาคที่อยู่ในร่องถัดไปกำลังจะเริ่มเคลื่อนเท่านั้น ดังนั้นอนุภาคจะเข้าใกล้กันได้มากที่สุดโดยห่างกัน 1.5 ซม. ซึ่งสะดวกแก่การทำร่องและการติดตั้งชิ้นส่วนอื่น ๆ ของอุปกรณ์อีกด้วย

เมื่อให้แต่ละอนุภาคอยู่ห่างกัน 3 ซม. และให้อุปกรณ์แสดงคลื่นใดหนึ่งความยาวคลื่นโดยอนุภาคในคลื่นที่อยู่ติดกันมี phase ต่างกัน 30° แล้วจะทองทำร่องบนผิวทรงกระบอก 13 ร่อง และทรงกระบอกจะต้องมีความยาวอย่างน้อยที่สุดเท่ากับ 42 ซม.

สำหรับความยาวรัศมีทรงกระบอกชั้นในพิจารณาดังนี้ การออกแบบอุปกรณ์นี้ต้องการให้เห็นความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาคอย่างชัดเจนที่ละชั้นที่ละตอน จึงต้องการให้มันแสดงให้เห็นการถ่ายทอดการเคลื่อนที่จากอนุภาคหนึ่งไปยังอนุภาคถัดไปตามลำดับด้วย คือเมื่ออนุภาคที่ 1 เคลื่อนที่ได้ phase angle 30° อนุภาคที่ 2 จึงจะเริ่มเคลื่อนที่ ส่วนอนุภาคอื่น ๆ ยังคงหยุดนิ่งอยู่ ครั้นเมื่ออนุภาคที่ 1 เคลื่อนไปได้ phase angle 60° อนุภาคที่ 2 จะเคลื่อนที่ได้ phase angle 30° และอนุภาคที่ 3 กำลังจะเริ่มเคลื่อนออก ส่วนอนุภาคอื่น ๆ ยังคงหยุดนิ่งอยู่ จนกระทั่งเมื่อหมุนทรงกระบอกไปทำให้อนุภาคที่ 1 มี phase angle 360° อนุภาคที่ 13 จึงจะเริ่มเคลื่อนออก แสดงว่าคลื่นใดเคลื่อนจากอนุภาคที่ 1 มาถึงอนุภาคที่ 13 แล้ว ถ้ามีร่อง sine curve ให้อนุภาคที่ 2 เคลื่อนที่ได้อีกหนึ่งความยาวคลื่น ร่อง sine curve สำหรับอนุภาคที่ 13 ก็ต้องตั้งต้นจากจุดที่กำลังจะเริ่มเคลื่อนออกนั้นไปอีกสองความยาวคลื่น เพื่อแสดงให้เห็นว่าเมื่อคลื่นมาถึงอนุภาคที่ 13 แล้วหากอนุภาคที่ 1 ยังคงเคลื่อนที่ อนุภาคที่ 13 ก็จะต้องเคลื่อนที่เช่นเดียวกัน และเมื่ออนุภาคที่ 1 หยุดเคลื่อนที่แล้ว อนุภาคที่ 13 จะหยุดเคลื่อนที่ที่หลังอนุภาคที่ 1 โดยการหยุดเคลื่อนที่นั้นจะมีการหยุดของอนุภาคถัดมาเป็นลำดับ จากอนุภาคที่ 1, 2 ... จนถึงอนุภาคที่ 13 แสดงว่าเส้นรอบวงของทรงกระบอกชั้นในต้องมีความยาวอย่างน้อยที่สุดสามความยาวคลื่น ดังนั้นถ้าให้ทรงกระบอกชั้นในมีรัศมี 9 ซม. จะได้เส้นรอบวงประมาณ 57 ซม. จึงเหลือส่วนของแต่ละร่องประมาณ 3 ซม. ที่ไม่ทำให้อนุภาคใด ๆ เคลื่อนที่ได้เลยแม้จะหมุนทรงกระบอกชั้นในไปกี่ตาม ส่วนนี้ของร่องมีประโยชน์ในตอนที่มีการเปลี่ยนจากการใช้ร่องบนผิวทรงกระบอกชั้นนอกมาเป็นร่องบนผิวทรงกระบอกชั้นในคือ ต้องแยกแยะผิวทรงกระบอกชั้นนอกออกให้ปลายของแกนอนุภาคปักลงในร่องบนผิวทรงกระบอกชั้นในตรงบริเวณที่ยาว 3 ซม. พอดี

รายละเอียดของการทำร่องบนผิวทรงกระบอกชั้นในเป็นดังภาพที่ 1 สี่เหลี่ยม ABCD- เป็นพื้นที่ผิวทรงกระบอกชั้นในที่แผ่ออก เส้นหลักในรูปแสดงร่องบนผิวเพื่อวางปลายของแกนอนุภาคลงไป ส่วน

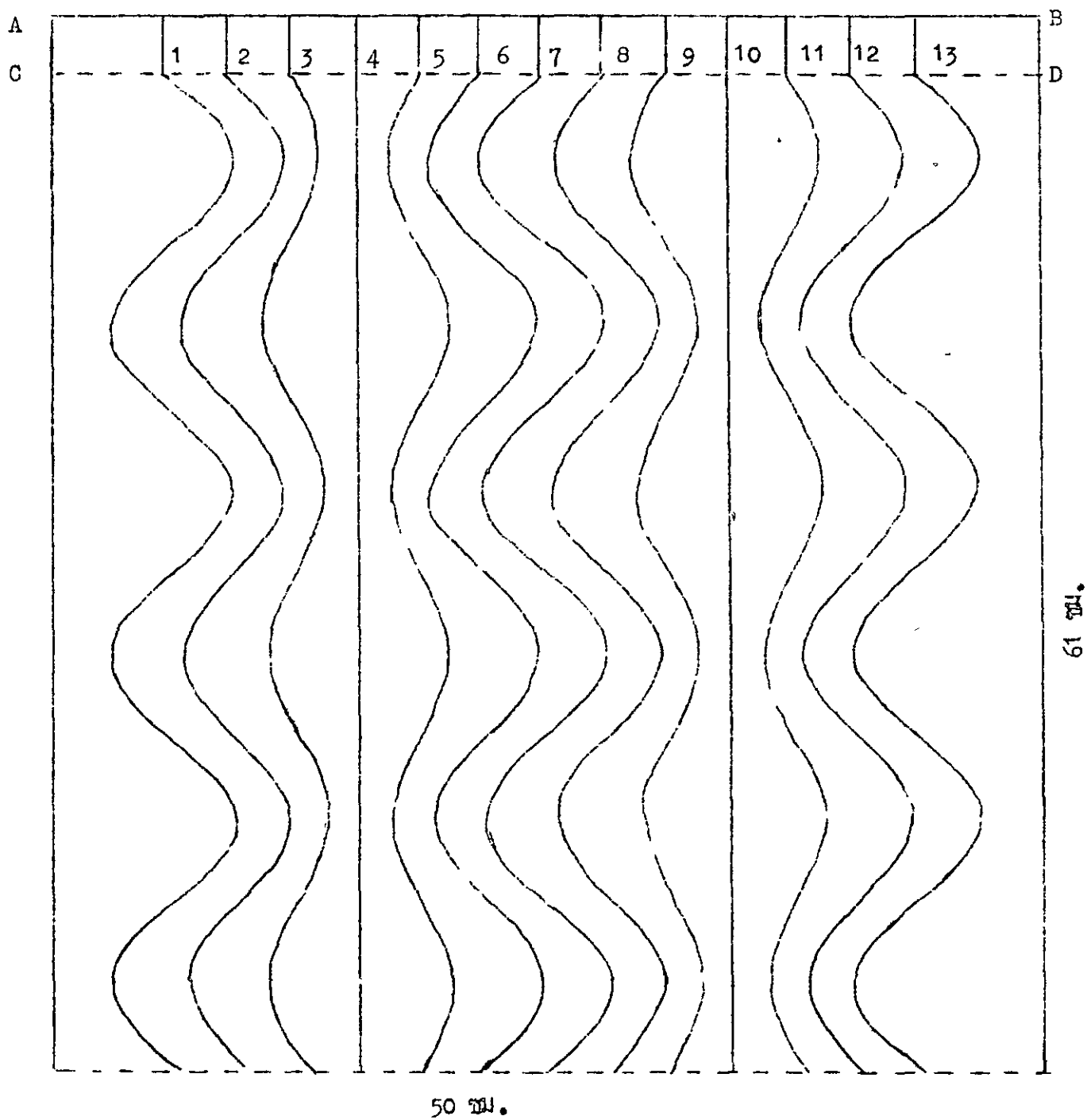


ภาพประกอบ 1 ร่องบนผิวทรงกระบอกชั้นใน

หนึ่งที่เป็นแนวตรงของแต่ละร่องที่อยู่ระหว่างเส้นตรง AB และ EF ซึ่งมีความยาว 3 ซม. เป็นส่วนที่จะให้ปลายของแกนอนุภาคตกลงไปเมื่อมีการเปลี่ยนการไกวรอบบนผิววนออกมาเป็นการไกวรอบบนผิวในนี้ ส่วนนี้ของแต่ละร่องแสดงให้เห็นตำแหน่งของอนุภาคต่าง ๆ เมื่อยังไม่มีคลื่นเกิดขึ้นเลยนั่นเอง สำหรับร่องที่อยู่ระหว่างเส้นตรง EF กับ KG เป็นส่วนที่จะแสดงว่ามีคลื่นถูกส่งผ่านจากอนุภาคที่ 1 ถึงอนุภาคที่ 13 ตามลำดับโดยมี phase ต่างกัน ร่องส่วนที่อยู่ระหว่างเส้นตรง KG กับ HJ เป็นส่วนที่จะแสดงว่า เมื่อคลื่นได้เคลื่อนมาถึงอนุภาคที่ 13 แล้ว ถ้าตนกำเน็คคลื่นยังส่งคลื่นออกไปในทิศทางอีก อนุภาคที่ 1 - 13 ก็จะยังคงเคลื่อนที่แบบ S.H.M. ต่อไปโดยมีความสัมพันธ์ระหว่าง phase ของอนุภาคที่อยู่ติดกันซึ่งก็คือ phase ต่างกัน 30° ร่องส่วนที่อยู่ระหว่างเส้นตรง HJ กับ DC เป็นส่วนที่จะแสดงว่าถ้าตนกำเน็คคลื่นหยุดส่งคลื่นออกไปในทิศทางแล้ว อนุภาคที่ 1 - 13 จะหยุดเคลื่อนที่แบบ S.H.M. ภายโดยเริ่มหยุดตั้งแต่อนุภาคที่อยู่ไกลตนกำเน็คคลื่นออกไปตามลำดับคือตั้งแต่อนุภาคที่ 1 ถึงอนุภาคที่ 13

เมื่อมันสี่เหลี่ยม ABCD นี้เป็นรูปทรงกระบอกแล้ววางปลายของแกนอนุภาคลงในร่องทั้งหมดในบริเวณที่อยู่ระหว่างเส้นตรง AB กับ EF โดยให้เรียงเป็นเส้นตรงขนานกับเส้นตรง AB เมื่อหมุนทรงกระบอกไปซ้ำ ๆ จะทำให้เกิดส่วนอีก และส่วนขยายของคลื่นตามยาวเคลื่อนจากซ้ายไปขวาอย่างช้า ๆ

1.1.2 การทำร่องเพื่อให้อนุภาคเคลื่อนที่ตามสมการของ Standing longitudinal waves และ Standing waves in a string เมื่อพิจารณาสมการ $y = Y \sin \frac{2\pi t}{T} \cos \frac{2\pi x}{\lambda}$ จะเห็นว่าถ้ามองที่อนุภาคหนึ่งอนุภาคใด ก็ให้ $x = x_1$ แล้ว displacement ของอนุภาคนั้นจะเป็นรูป sine curve ที่มี amplitude เท่ากับ $Y \cos \frac{2\pi x_1}{\lambda}$ ถ้ามองที่อีกอนุภาคหนึ่ง ก็ให้ $x = x_2$ แล้ว displacement ของอนุภาคนั้นจะเป็นรูป sine curve ที่มี amplitude เท่ากับ $Y \cos \frac{2\pi x_2}{\lambda}$ แสดงว่าร่อง sine curve ที่เราจะทำขึ้นบนผิวทรงกระบอกนั้นนอกทั้ง 13 ร่องนั้น แอมพลิจูดของแต่ละร่องต้องเป็นไปตามค่า $Y \cos \frac{2\pi x}{\lambda}$ แล้วถ้า x จะมีค่าเท่าใด ค่าของ cosine ที่มากที่สุดคือ 1 ดังนั้นถ้าเลือกให้ $Y = 3$ ซม. และให้แต่ละร่องอยู่ห่างกัน 3 ซม. การเลือกกำหนดค่าเช่นนี้ก็เพื่อให้สอดคล้องกับขนาดของทรงกระบอกในและขนาดของร่องบนผิวทรงกระบอกนั่นเอง



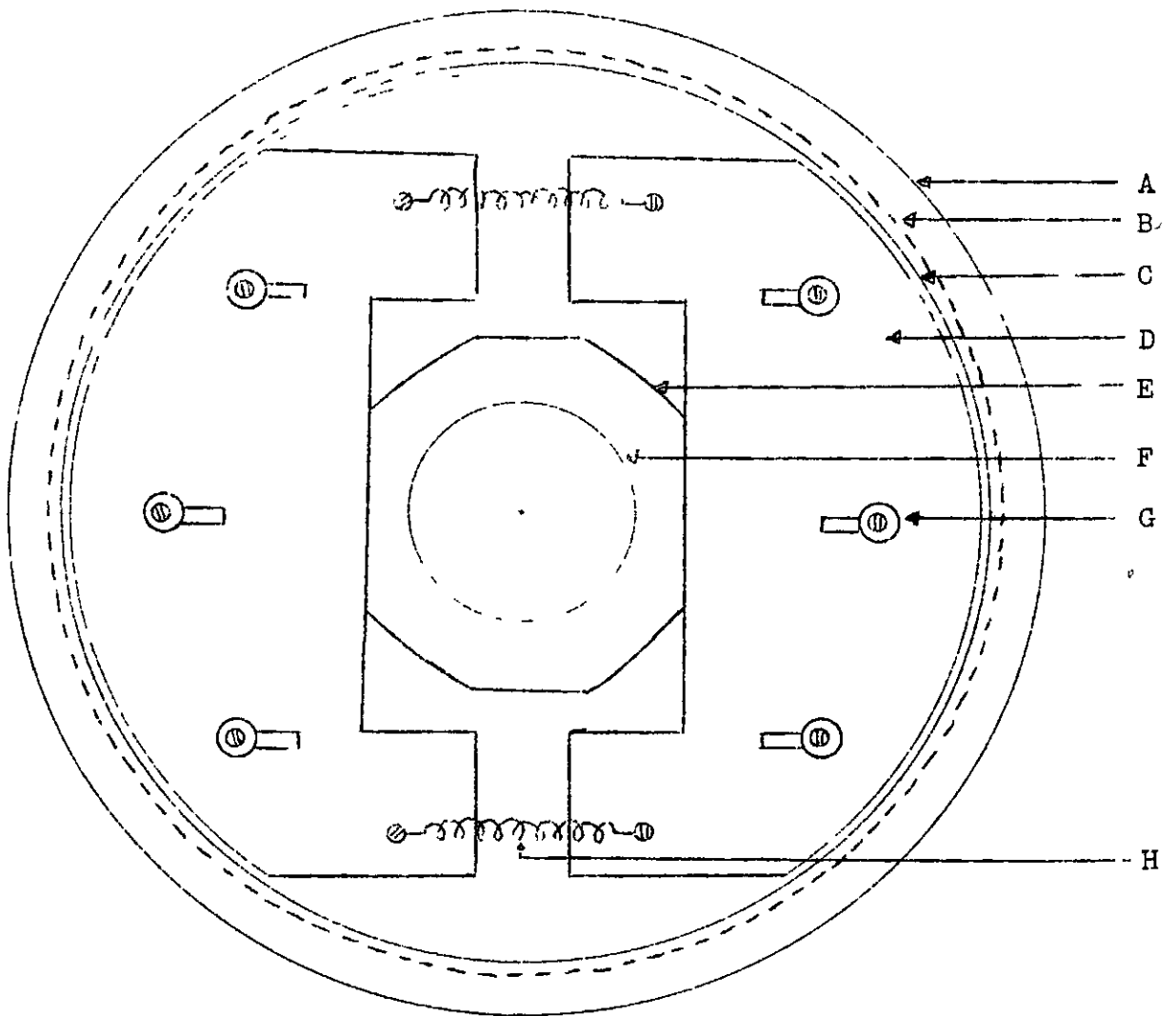
ภาพประกอบ 2 ร่องบนผิวทรงกระบอกชั้นนอก

เมื่อกำหนดให้ผิวทรงกระบอกชั้นนอกมี 13 ร่อง สำหรับแสดงคลื่นหนึ่งความยาวคลื่นโดยยึดหลักให้สอดคล้องกับขนาดและจำนวนร่องบนผิวของทรงกระบอกชั้นในแล้ว แอมพลิจูดของแต่ละร่องก็จะหาได้จาก $3 \cos \frac{2\pi x}{\lambda}$ ถ้าให้อนุภาคที่ 1 มีค่า $x = 0$ อนุภาคที่ 2 - 13 ก็จะมีค่า $x = \frac{\lambda}{2}, \frac{2\lambda}{2}, \frac{3\lambda}{2} \dots$ ดังนั้นแอมพลิจูดของร่องที่ 1 - 13 ก็จะเป็น 3, 2.6, 1.5, 0, -1.5, -2.6, -3, -2.6, -1.5, 0, 1.5, 2.6 และ 3 มม. ตามลำดับ

สำหรับความยาวคลื่นของแต่ละร่องนั้นก็ต้องคำนึงถึงข้อที่จะทำให้แกนอนุภาคที่อยู่ในร่องนั้น ๆ เคลื่อนที่ไต่คลองแควขณะทรงกระบอกหมุน เมื่อทำการทดลองหาความยาวคลื่นที่พอเหมาะนั้นได้แล้วก็นำค่านั้นไปหารความยาวเส้นรอบวงของทรงกระบอกชั้นนอก จะได้จำนวนคลื่นของแต่ละร่อง สำหรับอุปกรณ์ที่โครงสร้างขึ้นนี้มีขอบของทรงกระบอกชั้นในสูง 8 มม. เพื่อรองรับทรงกระบอกชั้นนอกมิให้แตะกับร่องบนผิวของมัน ดังนั้นทรงกระบอกชั้นนอกจะหมุนบนขอบของทรงกระบอกชั้นในทำให้มีรัศมี 9.8 ซม. เมื่อให้ความยาวคลื่นของแต่ละร่องเท่ากับ 20 ซม. จะได้จำนวนคลื่นโดยรอบผิวทรงกระบอกชั้นนอกเท่ากับ 3 คลื่น และมีส่วนเกินอยู่ประมาณ 1.6 ซม. ซึ่งใช้เป็นส่วนที่จะแสดงตำแหน่งของอนุภาคต่าง ๆ ในขณะที่ยังไม่เกิด Standing waves ขึ้น รายละเอียดของการทำร่องบนผิวทรงกระบอกชั้นนอกแสดงด้วยภาพที่ 2

1.2 หลักเกณฑ์และการออกแบบ ระบบแยกทรงกระบอกที่มีผิวสองชั้นออกจากกัน เพื่อให้ทรงกระบอกชั้นนอกสามารถแยกออกจากทรงกระบอกชั้นใน โดยไม่มีส่วนใดแตะกันเลย หรือหุบลงหุ้มทรงกระบอกชั้นในได้อย่างแนบสนิทพอดีตามโอกาสที่เราจะไ้ร่องบนผิวทรงกระบอกนั้น ๆ แสดงคลื่นชนิดใดชนิดหนึ่งที่ต้องการนั้น ผู้เขียนได้ออกแบบระบบหลักคั่นทรงกระบอกชั้นนอกไว้ ดังภาพที่ 3

A เป็นแผ่นกลมที่ปิดหน้าตัดของทรงกระบอกทั้งสองชั้น บนแผ่นกลมนี้ติดตั้งส่วนประกอบต่าง ๆ คือ แผ่นกลม F ใช้สำหรับหมุนลูกเบี้ยว E แผ่น D สองแผ่นถูกยึดไว้ด้วยนอต G หกตัวอย่างหลวม ๆ สปริง H สองอันทำหน้าที่ดึงแผ่น D ทั้งสองให้สัมผัสกับด้านข้างของลูกเบี้ยว E ตลอดเวลา C เป็นผิวทรงกระบอกชั้นนอกซึ่งในภาพนี้ขอบของแผ่น D อยู่เลยแนววงกลม C เข้าไปเล็กน้อย เมื่อบิดแผ่นกลม F ไป 90 องศา ลูกเบี้ยวก็จะหมุนไป 90 องศาด้วย ซึ่งมันจะดันให้แผ่น D แยกห่างออกจากกันในทิศทางตรงข้ามกันเพราะถูกบังคับด้วยร่องสี่เหลี่ยมที่นอต G สอดอยู่ ขอบของแผ่น D จึงคั่นผิวทรงกระบอกชั้นนอกซึ่งมีรอยตัดตลอดให้ทางออกและลดยออกมาอยู่ในแนววงกลม B ทรงกระบอกทั้งสองชั้นจึงไม่แตะกันเลย และมีรอยแยกเป็นแนวตรงบนทรงกระบอกชั้นนอกสำหรับให้แกนอนุภาคมีลงไปในร่องบน

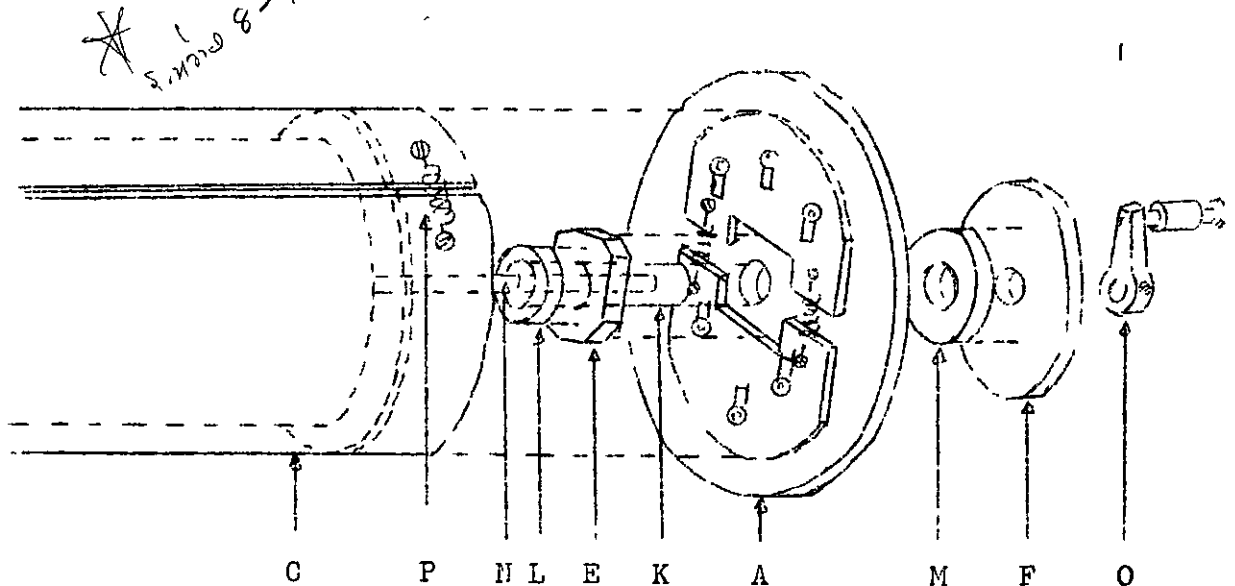


ภาพประกอบ 3 ไคอะแกรมของระบบแยกทรงกระบอกที่มีผิวสองชั้นออกจากกัน

ผิวทรงกระบอกชั้นในได้ ถ้าหมุนลูกเบี้ยว E ต่อไปอีก 90° หรือหมุนกลับที่เดิมแผ่น D ทั้งสองจะถูกสปริง H ดึงให้ถอยหลังกลับ ทรงกระบอก C ก็ควรจะรัศตัวเข้ามาอยู่ที่ตำแหน่งเดิม เพราะมีความยืดหยุ่นอยู่ในเนื้อของสังกะสีที่โค้งเป็นทางทรงกระบอกนั้นแล้ว แต่เพื่อให้มันรัศตัวทรงกระบอกชั้นในได้แนบสนิทยิ่งขึ้น จึงต้องกดสปริงไว้ให้ ดึงรอยขาดนั้นเข้าหากันด้วย

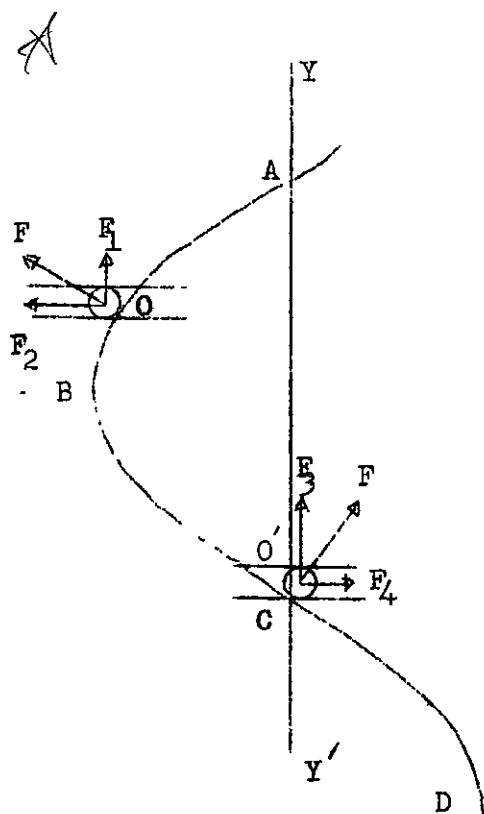
ระบบแยกทรงกระบอกออกจากกันนี้ต้องทำสองชุดเพื่อเปิดที่หน้าตัดทั้งสองข้างของทรงกระบอก การติดตั้งทรงกระบอกให้หมุนรอบแกนร่วมกันและมีระบบแยกทรงกระบอกอยู่ที่ปลายทั้งสองข้าง มีรายละเอียดดังภาพที่ 4 A เป็นแผ่นไม้ไผ่รูปวงกลมมีระบบแยกทรงกระบอกส่วนหนึ่งติดตั้งไว้บนแผ่นส่วนลูกเบี้ยว E กับแผ่นกลม F ติดแน่นไว้ที่ปลายทั้งสองของหลอด K โดยใช้แหวน L และ M เป็นตัวยึด แผ่นกลม A อยู่ระหว่างลูกเบี้ยว E กับแหวน M และหมุนได้คล่องโดยมีหลอด K เป็นแกน N เป็นแกนร่วมของทรงกระบอกสองชั้นสอดผ่านหลอดหลอด K อีกทีหนึ่ง ที่ปลายแกน N ติดไว้ด้วยมือหมุน O สำหรับหมุนทรงกระบอกเมื่อจะแสดงคลื่นชนิดต่าง ๆ

ทรงกระบอกชั้นนอก C ที่รัศตัวโดยรอบขอบของทรงกระบอกชั้นในนั้น ให้ส่วนปลายของมันอยู่เลยหน้าตัดของทรงกระบอกชั้นในออกมาปลายละ 2 มม. เพื่อให้เป็นส่วนของระบบแยกทรงกระบอกคันให้แยกออก สปริง P ทำหน้าที่ดึงให้ทรงกระบอกชั้นนอกนั้นรัศตัวบนขอบทรงกระบอกชั้นในได้อย่างแนบสนิทยิ่งขึ้น เมื่อต้องการใช้ร่องบนผิวของมัน



ภาพประกอบ 4 ไคอะแกรมแสดงการติดตั้งระบบแยกผิวทรงกระบอก

1.3 หลักเกณฑ์และการออกแบบทำให้แกนอนุภาคเคลื่อนที่แบบ S.H.M. ในแนวราบ ให้



ภาพประกอบ 5 การเคลื่อนที่
ของอนุภาคเนื่องจากการ
เคลื่อนที่ของร่อง sine curve

ABCD เป็นส่วนหนึ่งของ sine curve
ที่ถูกทำให้เคลื่อนที่ขึ้นไปตามแนวเส้นตรง YY'
 O และ O' เป็นอนุภาคที่วางให้เคลื่อนที่อย่าง
อิสระในร่องตามแนวนอน ถ้าถือว่าไม่มีแรง

เสียดทานเลยอนุภาค O และ O' จะถูกแรง F
กระทำไปในแนวที่ตั้งฉากกับเส้นสัมผัสส่วนโค้ง
ณ จุดสัมผัส เมื่อแยกแรง F ออกเป็นแรง F_1

F_2 , F_3 และ F_4 ดังรูปที่ 5 แรง F_1 และ
 F_3 จะถูกหักล้างด้วยแรงปฏิกิริยาจากขอบร่อง
เหลือแรง F_2 และ F_4 ทำให้อนุภาคทั้งสอง

เคลื่อนไปตามรางได้ และจะเห็นว่าอนุภาคจะ
เคลื่อนไปตามรางได้ก็เมื่อถูกกันด้วยส่วนที่คอน
ไปทางยอด curve นั้นเอง ถ้าพิจารณา

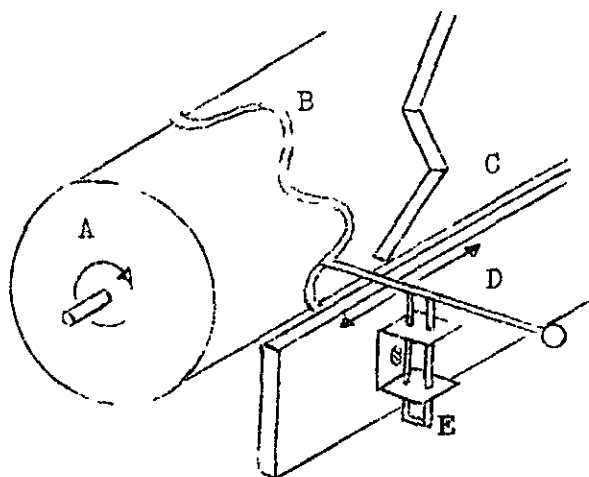
เกี่ยวกับแรงเสียดทานด้วย แรงเสียดทานที่เกิด
ขึ้น ณ จุดสัมผัสส่วนหนึ่งจะไปเสริมกับแรงในแนว
ตั้ง คือเสริมแรง F_1 และ F_3 อีกส่วนหนึ่งจะไป
หักล้างกับแรงในแนวราบคือหักล้างกับแรง F_2

และ F_4 ผลก็คือขอบร่องต้องออกแรงปฏิกิริยา
มากขึ้น และแรงในแนวราบมีค่าน้อยลง อย่างไร

ก็ตามถ้า F_2 และ F_4 ยังมีค่ามากกว่า component ในแนวราบของแรงเสียดทานแล้ว อนุภาค O และ
 O' ก็ยัง คงเคลื่อนที่ไปตามรางได้

สำหรับชิ้นส่วนของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นที่เกี่ยวข้องกับหลักเกณฑ์อันนี้คือร่องรูป sine curve บน
ผิวของทรงกระบอกทั้งสองชั้นซึ่งมีปลายข้างหนึ่งของแกนอนุภาคก็อยู่ในร่องทำหน้าที่แทนอนุภาค O หรือ O'
ของภาพที่ 5 มีร่องทรงอีกอันหนึ่งวางอยู่ในแนวราบ ทำหน้าที่บังคับแกนอนุภาคให้เคลื่อนอยู่ในแนวนั้นเท่า
นั้น การหมุนทรงกระบอกไปรอบแกนก็ถือว่าการทำให้ร่อง sine curve เคลื่อนที่ ขอบของร่อง

sine curve จะออกแรงกระทำต่อแกนอนุภาคให้เคลื่อนที่ไปตามร่องทรงแบบ S.H.M. ได้ รายละเอียดแสดงไว้ดังภาพที่ 6 โดยมี A เป็นทรงกระบอก B เป็นร่อง sine curve บนทรง



ภาพประกอบ 6 การเคลื่อนที่ของแกนอนุภาค
เนื่องจากการเคลื่อนที่ของร่อง sine curve

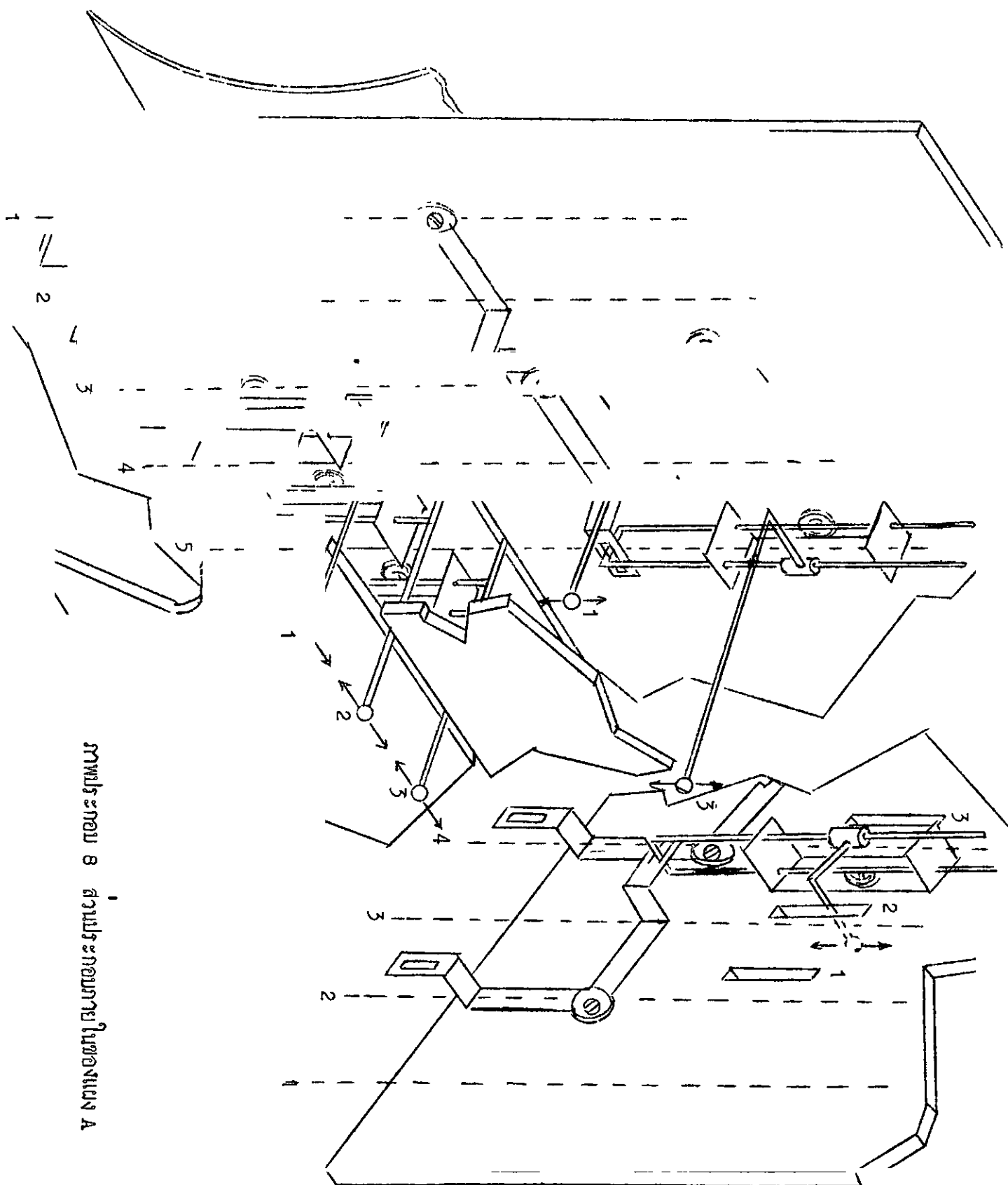
กระบอก C เป็นร่องทรงมั่งคั้นแนวการเคลื่อนที่ของแกนอนุภาค D E เป็นที่ยึดแกนอนุภาค ทำด้วยแถบอลูมิเนียมบาง ๆ งอเป็นรูป U ตรึงไว้อย่างหลวม ๆ ด้วยตะปูเกลียวเพื่อให้หมุนไต่คลอง แกนโลหะรูป U ซึ่งยึดกับแกนอนุภาคนั้นสอดอยู่ในรูของขาทั้งสองข้างของแถบอลูมิเนียมรูป U อย่างหลวม ๆ เช่นเดียวกัน เมื่อร่อง B ทำให้แกนอนุภาค D เคลื่อนกลับไปกลับมาตามแนวลูกศร แถบสังกะสีรูป U จะส่ายไปมาพร้อม ๆ กับที่แกนโลหะ U ก็เคลื่อนลงอยู่ในรูบนขาของแถบสังกะสีรูป U ด้วย

1.4 หลักเกณฑ์และการออกแบบระบบเปลี่ยนแนวการเคลื่อนที่จากแนวราบเป็นแนวตั้ง พิจารณากัน AOB ซึ่งถือเป็นมุมฉากที่จุด O ในภาพที่ 7 O เป็นจุดหมุน P เป็นอนุภาคที่มีการเคลื่อนที่แบบ S.H.M. ในแนวขนานกับเส้นตรง XY และห่างจากเส้นตรง XY คงที่เสมอ ให้ P ออกแรงกระทำต่อคาน OA โดยเมื่อ P มี phase angle 90° นั้นคาน OA ถูกดึงให้เบนไปทำมุมกับแนวเดิม θ แสดงว่าเมื่อ P มี phase angle 0° P ออกแรงดึงคาน OA ณ จุด C นั้นเอง นั่นคือตลอดการเคลื่อนที่ $\frac{1}{4}$ รอบของจุด P ไปทางขวาของจุด Z นั้น ตำแหน่งบนคาน OA ที่ถูก P ออกแรงกระทำจะเปลี่ยนไปในช่วงจุด C ถึงจุด A ถ้าพิจารณาถึงการเคลื่อนที่ของ P ไปทางซ้ายของจุด Z บางทีจะได้ผลเช่นเดิม คือตำแหน่งบนคาน OA ที่ถูก P ออกแรงกระทำจะยังคงเปลี่ยนอยู่ในช่วงจุด C ถึงจุด A

พิจารณาส่วน OB เมื่อคันส่วน OA ถูกอนุภาค P กระทำให้แกว่งไปมารอบจุด Z มันก็จะถูกทำให้แกว่งขึ้นลงมีความเท่ากับคาบของการเคลื่อนที่ของ P ด้วย ถ้ามีแกน RS วางอยู่ในแนวตั้งและห่างจากแนว OZ คงที่เสมอ ให้ปลาย R ของแกนนี้แตะอยู่กับคัน OB ตลอดเวลา เมื่อคัน OB แกว่งขึ้นลงจะทำให้แกน RS เคลื่อนที่ขึ้นลงในแนวตั้งโดยมีความของการเคลื่อนที่เท่ากับคาบของอนุภาค P และเนื่องจากจุดที่ปลาย R แตะกับคัน OB นั้นเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงจุด R' กับจุด B โดยสมนัยกับการเปลี่ยนจุดกระทำต่อคัน OA ของอนุภาค P ซึ่งเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงจุด C กับจุด A ดังนั้น displacement ของอนุภาค P จะเท่ากับ displacement ที่สมนัยกันของปลาย R แสดงว่าแกน RS เคลื่อนที่ขึ้นลงในแนวตั้งแบบ S.H.M. รอบจุด R นั้นเอง

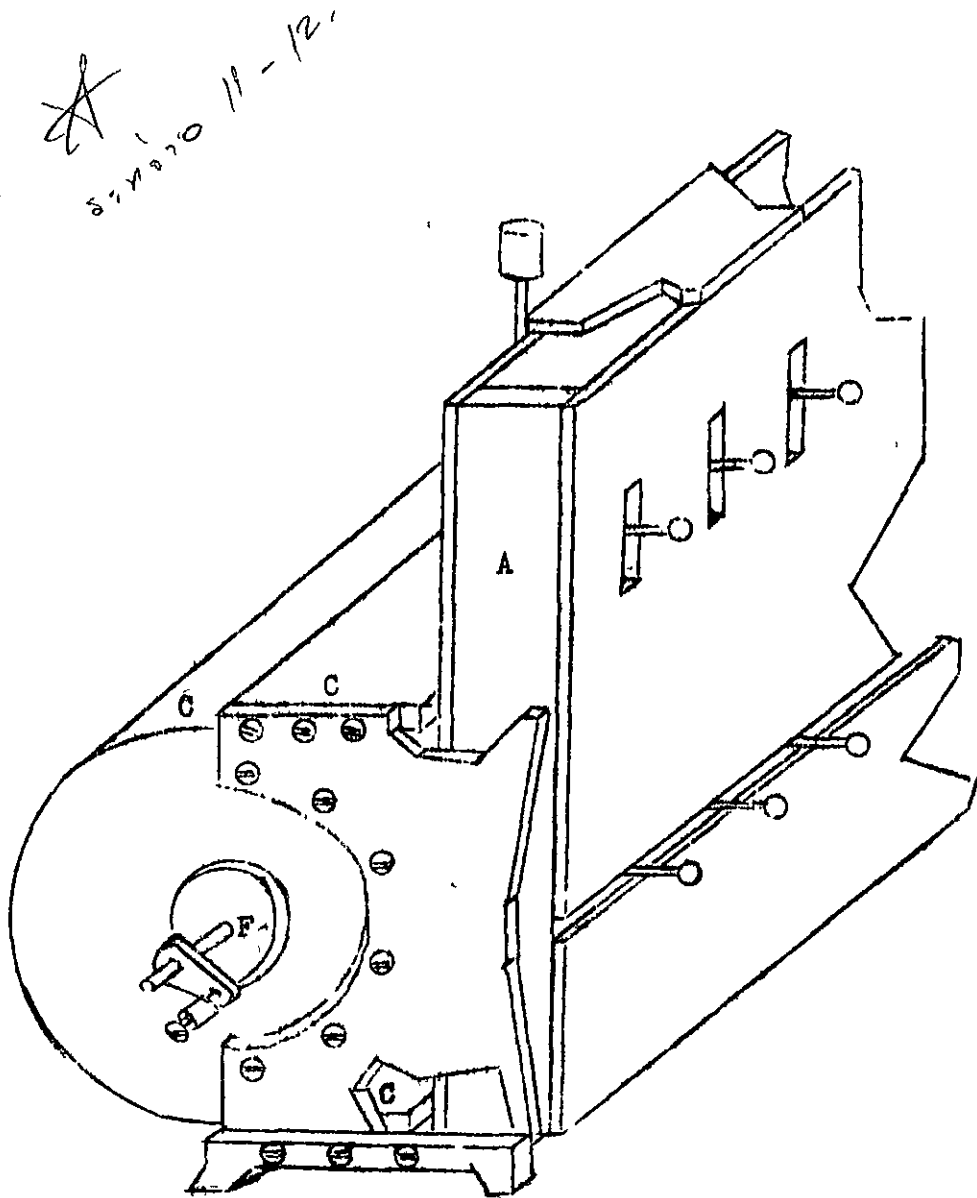
สำหรับอุปกรณ์ที่ออกแบบสร้างขึ้นนี้แกนอนุภาคที่มีปลายหนึ่งปักลงในร่องบนผิวทรงกระบอก จะทำหน้าที่แทนอนุภาค P ของภาพที่ 7 เพราะแกนนี้จะถูกทำให้เคลื่อนที่ไปในแนวราบแบบ S.H.M. แอมพลิจูดของร่องต่าง ๆ ที่กล่าวมาแล้วนั้นมีขนาดสูงสุด 3 ซม. ดังนั้นความยาวของ ZF จะเท่ากับ 3 ซม. เพื่อจะหาว่า OA ควรจะยาวอย่างน้อยที่สุดเท่าไร ที่ยังคงทำให้การเคลื่อนที่ของระบบนี้ไม่ติดขัดทำได้โดยลากแนว OZ จากจุด F ลากเส้นตรงให้ขนานกับ OZ กำหนดจุดจุดหนึ่งบนเส้นตรงนี้เป็นจุด P จากจุด P ลากเส้นตรงไปตัดเส้น OZ ที่จุด O โดยให้มุม ZOP ประมาณ 36° เพื่อให้แรงส่วนใหญ่ของ P ถูกใช้ไปในการยกคัน OA ให้สูงขึ้น วัดความยาว OP ได้ 5 ซม. ความยาวนี้จะเป็นความยาวของคัน OA และ OB นั้นเอง คัน OA และ OB ในอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นทำด้วยแถบอลูมิเนียม ที่ปลาย A และปลาย B ตัดให้เป็นช่องสี่เหลี่ยมเล็ก ๆ ยาวเท่ากับ CA หรือ RB กว้างพอที่จะให้แกนอนุภาคสอดเข้าไปได้ รายละเอียดของระบบที่ออกแบบสร้างขึ้นแสดงด้วยภาพที่ 8

เนื่องจากได้จัดให้แต่ละร่องบนผิวทรงกระบอกห่างกัน 3 ซม. แต่คัน OB ยาว 5 ซม. ดังนั้นปลายคันจะไปทับตำแหน่งของอนุภาคถัดไปจึงต้องมีวิธีติดตั้งระบบเหล่านี้ของแต่ละอนุภาคให้ทำงานได้ทั้งหมด วิธีการคือติดตั้งระบบเปลี่ยนแนวการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ 1, 3, 5, 7, 9, 11 และ 13 ไว้ชุดหนึ่ง และของอนุภาคที่ 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 ไว้ชุดหนึ่ง นำชุดทั้งสองมาหันหน้าเข้าหากัน ให้มีระยะห่างจากกันพอที่จะไม่เกิดการติดขัดของการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนเหล่านั้น ดังแสดงรายละเอียดไว้ในภาพที่ 8



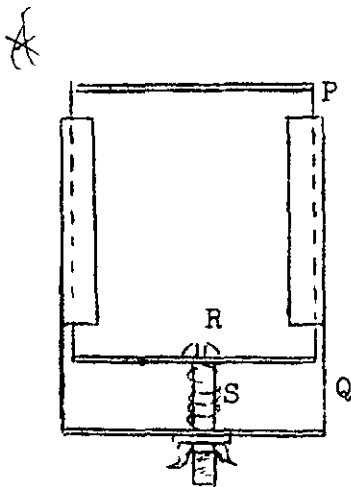
מאמך 8 עשרת פורמאט A

1.5 การประกอบโครงสร้างของ wave machine เมื่อได้สร้างชิ้นส่วนต่าง ๆ ของ wave machine ขึ้นตามหลักเกณฑ์วิธีสร้างดังกล่าวนั้นแล้ว ก็นำชิ้นส่วนเหล่านั้นประกอบขึ้นเป็นรูปร่างดังแสดงในภาพที่ 9



ภาพประกอบ 9 wave machine

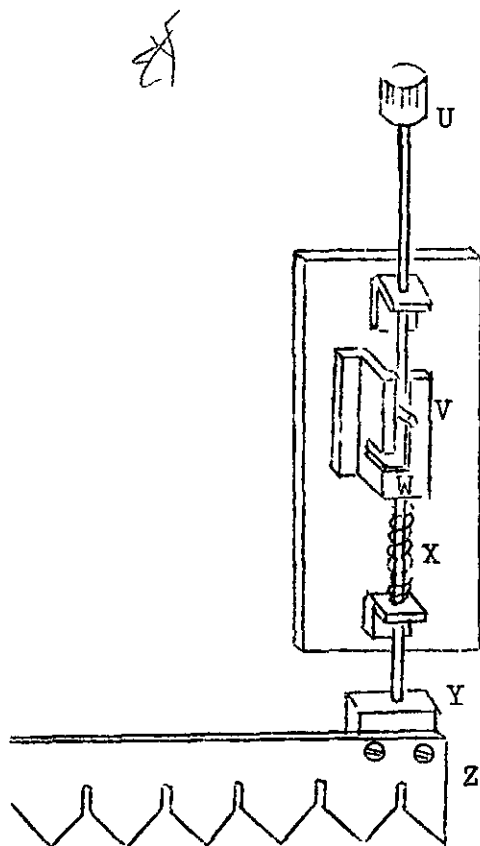
ในรูปที่ 10 เป็นแผนที่บรรจุชิ้นส่วนของภาพที่ 8 ทั้งหมด C เป็นเปลือกหุ้มทรงกระบอก แฉก A ต้องให้เคลื่อนเข้าออกจาก C ได้ การเคลื่อนแฉก A ออกก็คือการถอยปลายของแกนอนุภาคให้ออกจากร่องบนผิวทรงกระบอก และการเคลื่อนแฉก A เข้าก็คือการปักปลายแกนอนุภาคลงในร่องบนผิวทรงกระบอกนั่นเอง การทำเช่นนี้เป็นการทำเมื่อต้องการเปลี่ยนร่องบนผิวทรงกระบอกจากร่องชุดหนึ่งเป็นอีกชุดหนึ่ง ชิ้นส่วนที่ทำให้แฉก A เคลื่อนเข้าออกจากเปลือกหุ้ม C นั้น มีรายละเอียดในภาพที่ 10 ในภาพที่ Q เป็นแผ่นอลูมิเนียมที่ส่วนหนึ่งของขอบขึ้นทำให้เกิดช่องแคบ ๆ สำหรับให้แผ่นอลูมิเนียม P



ภาพประกอบ 10 ระบบเคลื่อนแฉก A

อีกแผ่นหนึ่งสอดเข้าไปได้อย่างหลวม ๆ ปลายข้างหนึ่งของ P และ Q งอตั้งขึ้นเจาะรูและสอดนอต กับสปริง S ไว้ นำ Q ไปตรึงติดกับส่วนบนของเปลือกหุ้ม C ตรงจุดกึ่งกลางของความยาว และนำ P ไปตรึงติดกับด้านหลังของแฉก A ตรงจุดกึ่งกลางของความยาว แฉก A ก็จะถูกยึดให้ติดกับ C และเคลื่อนเข้าออกจาก C ได้เมื่อหมุนหางปลาของนอต R แต่เมื่อเคลื่อนแฉก A ออกจนกระทั่งปลายของแกนอนุภาคถูกถอนขึ้นจากร่องบนผิวทรงกระบอกนั้น น้ำหนักของชิ้นส่วนของระบบเปลี่ยนแนวการเคลื่อนที่จะทำให้แกนอนุภาคที่ถูกถอนขึ้นมาไม่อยู่ตรงกึ่งกลางของทางเคลื่อนที่ของแต่ละแกนทำให้ไม่สามารถปักลงในร่องชุดใหม่ได้ตรงพอดีทุก

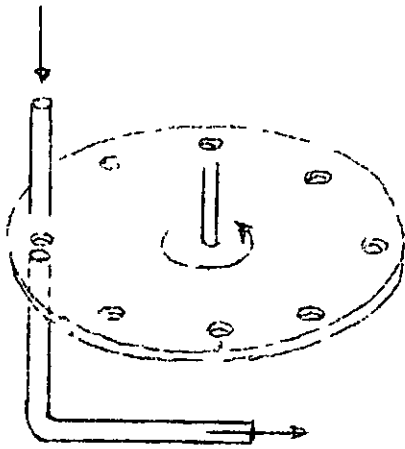
ร่อง จึงจำเป็นต้องมีแผ่นจัดตำแหน่งแกนอนุภาคติดไว้ที่ด้านหลังของแฉก A ด้วย ดังรายละเอียดในภาพที่ 11 Z เป็นแผ่นจัดตำแหน่งแกนอนุภาคทำด้วยสังกะสีบาง ๆ มีรอยบากที่ขอบด้านหนึ่งเป็นระยะ ๆ ห่างกัน 3 มม. แกนทองเหลือง U สอดอยู่ในรูของแผ่นไม้ Y อย่างหลวม ๆ V เป็นเคียวที่โผล่ขึ้นมาจากแกน U X เป็นสปริงซึ่งปลายข้างหนึ่งของมันดันอยู่ที่โคนของเคียว V เมื่ออกที่ปลายของ U จนกระทั่งเคียว V เคลื่อนลงมาสูดช่องในแนวค้ำของ W แล้วจึงปักปลายของ U ไปตามเข็มนาฬิกา เคียว V ก็จะเคลื่อนไปตามช่องในแนวนอนของ W และถูกสปริง X ดันให้ติดกับขอบบนของช่องนี้หลังจากปล่อยมือแล้ว ผลก็คือแผ่น Z ถูกดันลงไปจัดตำแหน่งของแกนอนุภาคนั่นเอง ถ้าต้องการให้แกนอนุภาคเป็นอิสระก็หมุนปลายแกน U กลับ เคียว V จะหลุดออกของในแนวนอนของ W และถูกสปริง X ดันขึ้นไปอยู่ในตำแหน่งเดิม ผลก็คือแผ่น Z ถูกยกขึ้นเลยจากตำแหน่งของแกนอนุภาคทั้งหมดนั่นเอง



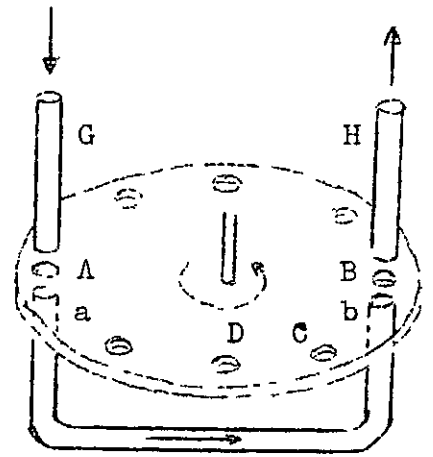
ภาพประกอบ 11 ระบบจัดตำแหน่งอนุภาค

2. เครื่องวัดความเร็วเสียงในอากาศที่อุณหภูมิต่าง ๆ

2.1 ทฤษฎีของเครื่องวัดความเร็วเสียงในอากาศที่อุณหภูมิต่าง ๆ ขณะที่เสียงวิ่งผ่านปลายที่จ่อกันใกล้ ๆ ของหลอดเล็ก ๆ สองอัน ถ้าปลายที่จ่อกันนั้นตรงกันพอดี เสียงจะวิ่งผ่านหลอดหนึ่งเข้าสู่อีกหลอดหนึ่งได้มากที่สุด แต่ถ้าปลายที่จ่อกันนั้นไม่ตรงกันพอดี เสียงก็จะผ่านไปสู่อีกหลอดหนึ่งได้น้อยลง ถ้านำจานกลมที่เจาะรูตรงขอบมาวางคั่นระหว่างปลายหลอดที่จ่อกันอยู่ ดังภาพที่ 12 ให้เสียงเข้าทางหลอดบนและเราหูไปรับฟังเสียงที่ปลายหลอดอันล่างทำให้จานหมุนไปช้า ๆ จะได้ยินเสียงเป็นห่วง ๆ เสียงจะดังมากที่สุดเมื่อรูของจานตรงกับปากหลอดทั้งสองพอดี และจะดังเบาที่สุดเมื่อรูของจานไม่อยู่ตรงกับแนวของปากหลอดเลย ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้อาจกล่าวได้ว่าเสียงผ่านหลอดลงมาเข้าหูเป็น



ภาพประกอบ 12 การทำให้ไคยีนเสียง
เป็นห่วง ๆ เมื่อมีหลอดนำเสียง
สองหลอด



ภาพประกอบ 13 การทำให้ไคยีนเสียง
ดังเป็นห่วง ๆ เมื่อมีหลอดนำเสียง
สามหลอด

ห่วง ๆ ที่ละห่วง ๆ ตลอดเวลาที่งานกำลังหมุน ถ้าเราทราบระยะทางและเวลาที่พลังงานเสียงแต่ละห่วง
ถูกส่งผ่านมาเข้าหูแล้ว เราจะสามารถคำนวณหาความเร็วของเสียงในขณะนั้นได้

เพื่อที่จะวัดเวลาที่พลังงานเสียงแต่ละห่วงถูกส่งผ่านมาถึงหู จัดให้รูปบนขอบจานอยู่ห่างกันเป็น
ระยะเท่า ๆ กัน จำนวนรูปเป็นเลขคู่ นำจานนี้ไปหมุนอยู่บนแผ่นปลาย a และปลาย b ของหลอดนำ
เสียง ab ดังแสดงในภาพที่ 13 หลอด G วางให้ปลายหลอดตรงกับปลาย a หลอดนี้ทำหน้าที่นำ
เสียงจากต้นกำเนิดเสียงให้ผ่านเข้าหลอด ab หลอด H วางให้ปลายหลอดตรงกับปลาย b ทำ
หน้าที่นำเสียงเข้าหูฟัง ถ้าจานยังไม่หมุนให้รูป A และรูป B ซึ่งอยู่ตรงข้ามกันอยู่ตรงปลายที่จอกันของ
หลอดนำเสียงพอดี เสียงจากหลอด G จะผ่านเข้าหูฟังมากที่สุดทำให้ไคยีนเสียงดังที่สุดแต่ถ้าทำให้จาน
หมุนพลังงานเสียงจำนวนหนึ่ง จะเข้าสู่ปลาย a เคลื่อนไปยังปลาย b ภายในเวลา t และผ่านเข้า
หูฟังได้เพียงบางส่วนเท่านั้น เพราะรูป B ได้เคลื่อนออกจากตำแหน่งที่ตรงพอดีกับรูป b เสียแล้ว เสียง
ที่ไคยีนจะเบาลงกว่าเดิม ถ้าทำให้จานมีความเร็วสูงถึงค่าหนึ่งที่ทำให้รูป C เคลื่อนไปตรงปลาย b

พอดีทันทีที่พลังงานเสียง จำนวนหนึ่งเคลื่อนมาถึงปลาย b แล้วจะทำให้ได้ยินเสียงดังมากที่สุดทันที ในเงื่อนไขเช่นนี้จะได้ว่าเวลาที่เสียงวิ่งจากปลาย a ถึงปลาย b เท่ากับเวลาที่จานหมุนไปโคตหนึ่งรอบ หรือแสดงโดยสมการ

$$\frac{1}{v} = \frac{1}{mn} \quad (1)$$

เมื่อ l คือความยาวของหลอด a b v คือความเร็วเสียง m คือจำนวนรอบจาน n คือจำนวนรอบของวินาทีของจานหมุน ถ้าเพิ่มความเร็วในการหมุนของจานให้มากขึ้นอีกจนถึงค่าหนึ่งที่ทำให้ D เคลื่อนไปตรงปลาย b พอดีทันทีที่พลังงานเสียง จำนวนหนึ่งเคลื่อนมาถึงปลาย b แล้วก็จะทำให้ได้ยินเสียงดังที่สุดอีกครั้งหนึ่ง เป็นครั้งที่ 2 ในตอนนี้เสมือนกับว่าจานของเรามี $\frac{m}{2}$ รอบเท่านั้น ดังนั้นเวลาที่เสียงวิ่งจากปลาย a ถึงปลาย b คือ

$$\frac{1}{v} = \frac{2}{mn} \quad (2)$$

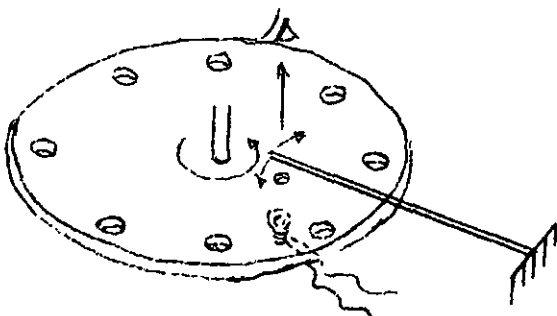
ในทำนองเดียวกันถ้าเพิ่มความเร็วของจานให้มากขึ้นจนได้ยินเสียงดังมากที่สุดเป็นครั้งที่ k แล้วจะได้ว่า

$$\frac{1}{v} = \frac{k}{mn} \quad (3)$$

$$\text{หรือ } v = \frac{lmn}{k} \quad (4)$$

จากสมการ (4) ค่าของ l , m และ k สามารถวัดได้โดยง่าย ถ้ารู้ค่าของ n หรือจำนวนรอบของจานในหนึ่งวินาทีแล้ว ก็จะหาค่าความเร็วเสียง v ได้

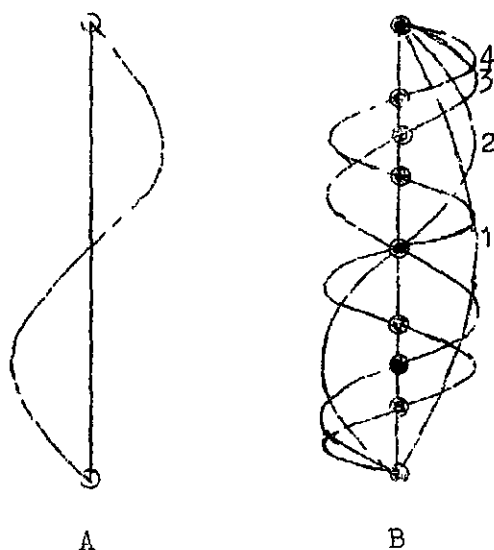
การหาค่าของ n ทำได้หลายวิธี วิธีหนึ่งที่ทำได้ง่ายและแม่นยำก็คืออาศัยหลักของ stroboscope ดังนี้ เราจะหมุนจานอีกหนึ่งรอบ แล้วนำหลอดไฟฟ้าไปวางไว้จานตรงกับแนวทวนเคลื่อน



ภาพประกอบ 14 การวัดจำนวนรอบ
ของจานโดยอาศัยการสั่น
ของแท่งโลหะ

ที่ของรูนั้น เมื่อจุดหลอดไฟขึ้นแล้ว มองหลอดไฟนั้นในแนวตั้งเหนือจานที่กำลังหมุน แสงที่เข้าตาจะกระพริบตามความถี่ของจานหมุน คือถ้าจานหมุน n รอบ/วินาทีแล้ว จะเห็นแสงกระพริบ n ครั้ง/วินาที ด้วย นำแท่งโลหะเล็ก ๆ อันหนึ่งมาทำให้สั่นอยู่เหนือจาน ดังภาพที่ 14 การสั่นของแท่งโลหะนี้หนึ่งรอบมันจะอยู่เหนือหลอดไฟพอดีสองครั้ง ดังนั้นถ้าหมุนจานไปพร้อม ๆ กับทำให้แท่งโลหะสั่น แสงจะไม่มีโอกาสเข้าตาเลยถ้าทุกครั้งที่อยู่เหนือหลอดไฟถูกแท่งโลหะเคลื่อนมาปิดพอดี

ปรากฏการณ์เช่นนี้ จะเกิดขึ้นได้เมื่อความถี่ของแท่งโลหะเป็น $\frac{1}{2}, 1, 2, 3 \dots$ เท่า ของความถี่ของจานหมุนโดยพิจารณาได้จากภาพที่ 15 ดังนี้



ภาพประกอบ 15 วิธีเปรียบเทียบความ
เร็วในการหมุนของจานกลมกับความถี่
ในการสั่นของแท่งโลหะ

ทำนองเดียวกับภาพที่ 15 จะได้ว่า ไม่มีแสงเข้าตาเลยตลอดเวลาเมื่อความถี่ของแท่งโลหะเป็น 1, 2, 3 ... เท่าของความถี่ในการหมุนของจาน ดังนั้นถ้าเราปรับความถี่ของแท่งโลหะจากน้อยไปหามากจนไม่มีแสงเข้าตาเลย ตลอดเวลาที่จานกำลังหมุนและแท่งโลหะกำลังสั่น เราก็จะรู้ค่า n ของจานได้ ถ้ารู้ความถี่ f ของแท่งโลหะ แลความถี่ f เป็นสัดส่วนกลับกับกำลังสองของความยาว d ของแท่งโลหะ (Morse, 1948 : 158) หรือเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$f = \frac{K}{d^2} \quad (5)$$

เมื่อ K คือค่าคงที่ หรือเขียนในอีกรูปหนึ่งคือ

$$f = \left(\frac{d_0}{d}\right)^2 f_0 \quad (6)$$

Λ เป็น curve ที่แทนการหมุนหนึ่งรอบของจาน วงกลมใน curve แสดงให้ทราบว่าเมื่อจานหมุนไปไ้หนึ่งรอบจะทำให้เห็นแสงไฟหนึ่งครั้ง

B เป็น curve ที่แทนการสั่นของแท่งโลหะ จุดดำใน curve แสดงว่าแท่งโลหะเคลื่อนมาอยู่เหนือหลอดไฟพอดีซึ่ง เกิดขึ้นสองครั้งในหนึ่งรอบ ดังนั้นถ้าแท่งโลหะสั่นด้วยความถี่เป็นครึ่งหนึ่งของ Λ ตาม curve เส้นที่ 1 หรือสั่นด้วยความถี่หนึ่งเท่า สองเท่า และสามเท่าตาม curve เส้นที่ 2, 3 และ 4 ตามลำดับแล้ว เราจะมองไม่เห็นแสงไฟเลย เพราะทุกครั้งที่อยู่เคลื่อนมาอยู่เหนือหลอดไฟแท่งโลหะก็เคลื่อนมาบังพอดี (จุดดำตรงกึ่งวงกลมขาว) ถ้าเจาะรูสองรูให้อยู่ตรงข้ามกันบนจาน เมื่อจานหมุนไ้หนึ่งรอบจะทำให้แสงเข้าตาสองครั้ง ดังนั้นโดยอาศัยการพิจารณา

เมื่อ f_0 คือความถี่ของแหล่งโลหะที่มีความยาว d_0 และทราบค่าแล้วทั้งสองตัว เพราะฉะนั้น n อาจจะมีค่าเท่ากับ $2f$, f , $f/2$ หรือ $f/3$... สำหรับงานที่มีรูให้แสงผ่านหนึ่งรู และ n อาจจะมีค่าเท่ากับ f , $f/2$, หรือ $f/3$... สำหรับงานที่มีรูให้แสงผ่านสองรู เมื่อแทนค่าของ n ลงในสมการ (4) จะได้สมการที่หาความเร็วเสียงในรูปต่าง ๆ บางรูปดังนี้คือ

$$v = \left(\frac{1}{k}\right) \left(\frac{d_0}{d}\right)^2 2f_0 \quad (7)$$

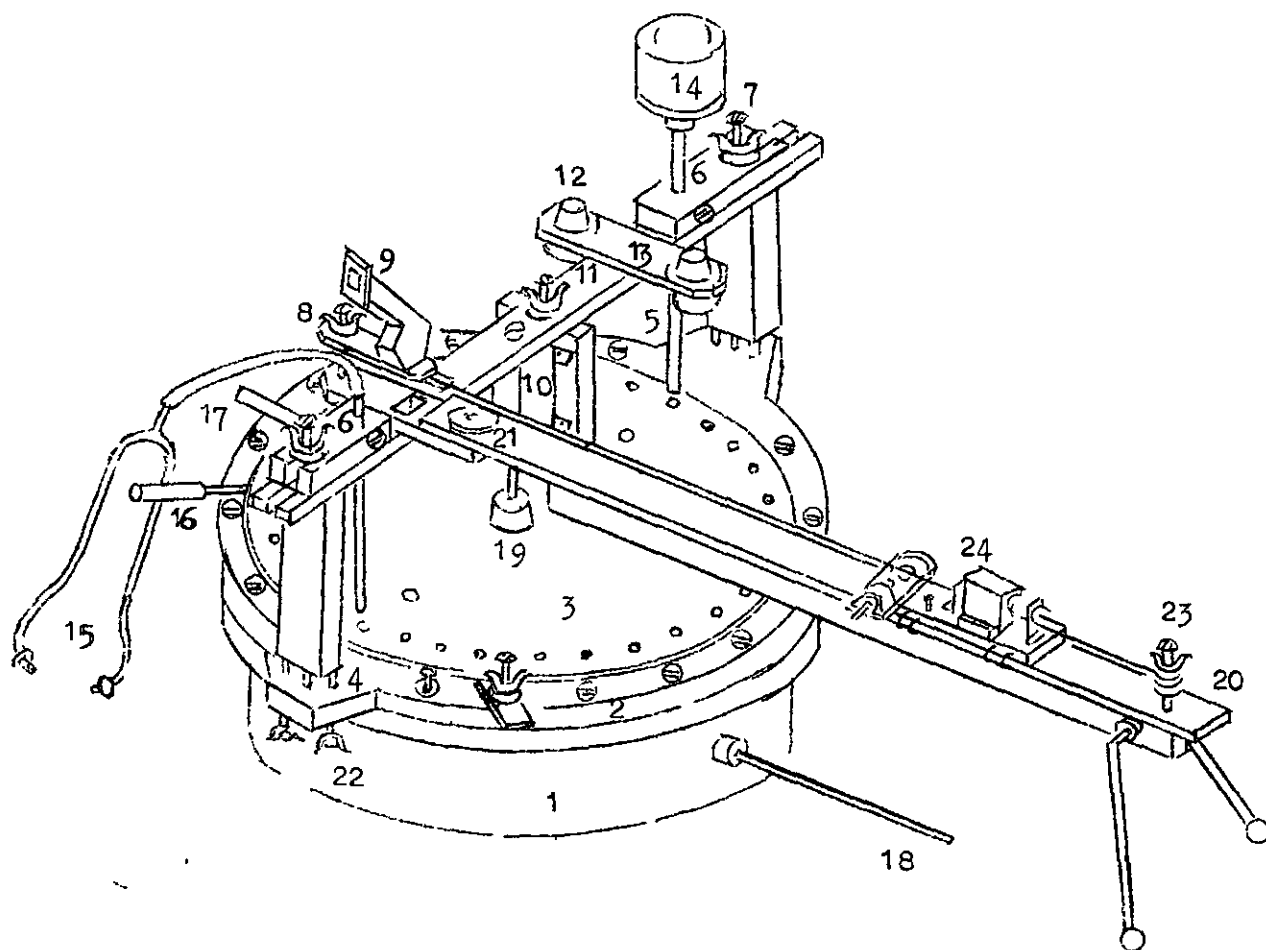
$$v = \left(\frac{1}{k}\right) \left(\frac{d_0}{d}\right)^2 f_0 \quad (8)$$

$$v = \left(\frac{1}{k}\right) \left(\frac{d_0}{d}\right)^2 f_0 \quad (9)$$

$$v = \left(\frac{1}{k}\right) \left(\frac{d_0}{d}\right)^2 f_0 \quad (10)$$

โดยสมการ (7) และ (8) ใช้กับงานที่มีรูให้แสงผ่านหนึ่งรู และปรับความถี่แหล่งโลหะจากน้อยไปหามากจนเกิดเงามืดบังหลอดไฟครั้งที่หนึ่ง และครั้งที่สองตามลำดับ ส่วนสมการ (9) และ (10) ใช้กับงานที่มีรูให้แสงผ่านสองรู และปรับความถี่ของแหล่งโลหะจากน้อยไปหามากจนเกิดเงามืดบังหลอดไฟครั้งที่หนึ่งและครั้งที่สองตามลำดับ

2.2 หลักเกณฑ์และการออกแบบสร้างเครื่องวัดความเร็วเสียง จากทฤษฎีที่กล่าวมาแล้วข้างต้นทำให้กำหนดได้ว่าเครื่องมือที่จะออกแบบสร้างขึ้นมาจะต้องมีส่วนประกอบดังนี้ คือ ต้นกำเนิดเสียง หลอดนำเสียง ทูตงู จานหมุนควมอเตอร์ที่ปรับความเร็วได้ หม้อต้มน้ำให้ความร้อนหลอดนำเสียง แหล่งโลหะที่ส่งควมวงจรไฟฟ้าพร้อมด้วยที่ปรับความถี่ หลอดไฟฟ้า เทอร์โมมิเตอร์ และแหล่งจ่ายกำลัง ดังแสดงในภาพที่ 16



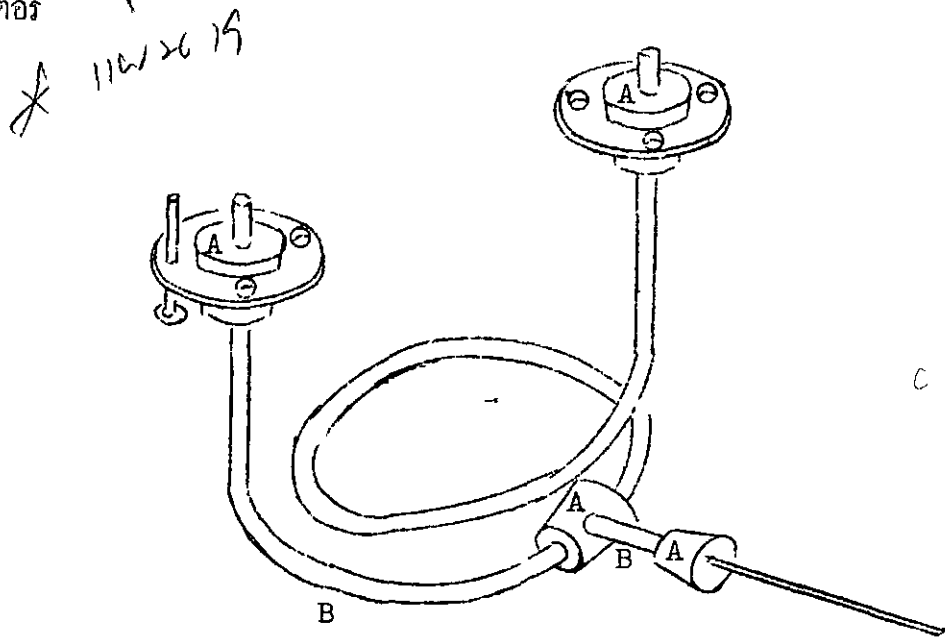
ภาพประกอบ 16 ส่วนประกอบของเครื่องวัดความเร็วเสียงที่อุณหภูมิต่าง ๆ

- | | | |
|----------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1. หม้อต้มน้ำ | 7. นอตปรับตำแหน่งจานกลม | 13. ปุ่มปรับความถี่ของเสียง |
| 2. ฟาครอบ | 8. แทนยึดกลองมิด | 14. ฟาครอบทนกำเนิดเสียง |
| 3. จานกลม | 9. กลองมิด | 15. หูฟัง |
| 4. ปุ่มต่อไฟจุดหลอด | 10. มอเตอร์หมุนจานกลม | 16. เครื่องกวนน้ำในหม้อ |
| 5. หลอดนำเสียง | 11. นอตปรับตำแหน่งมอเตอร์ | 17. ท่อไอน้ำเดือดออก |
| 6. แทนยึดหลอดนำเสียง | 12. ปุ่มปรับความเร็วมอเตอร์ | 18. เทอร์โมมิเตอร์ |

19. จุกยางยึดจานกับแกนมอเตอร์ 21. ปุ่มยึดแทนวางเส้นลวด 23. นอตครึ่งปลายเส้นลวด
20. แทนวางเส้นลวด 22. นอตปรับความสูงจานกลม 24. เครื่องสั้นเส้นลวด

รายละเอียดของส่วนประกอบของเครื่องวัดความเร็วเสียงมีดังต่อไปนี้

2.2.1 หลอดนำเสียง เป็นหลอดทองแดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง $2\frac{1}{2}$ นิ้ว มีสามหลอดคือ หลอดที่หนึ่งนำเสียงจากต้นกำเนิดเสียงเข้าสู่หลอดที่สองซึ่งถูกทมน้ำในหม้อทมน้ำ หลอดที่สามนำเสียงจากหลอดที่สองเข้าสู่หูฟัง หลอดทั้งสามนี้หลอดที่สองความยาว 1 ของมันเกี่ยวข้องกับ การคำนวณความเร็วเสียงตามสมการ (4) ค่าของ 1 จึงต้องพิจารณาให้สอดคล้องกับค่าของตัวอื่น ๆ ด้วย และต้องมีค่าไม่มากเกินไปเพราะจะทำให้ฟังเสียงไม่ชัด การนำหลอดนำเสียงใส่ไว้ในหม้อทมน้ำ ก็เพื่อจะทำให้อากาศในหลอดนำเสียงมีอุณหภูมิต่าง ๆ จาก $0 - 100^{\circ}\text{C}$ โดยใส่น้ำแข็งลงในหม้อและทมน้ำในหม้อให้ร้อนขึ้น เพื่อจะได้หาความเร็วเสียงที่อุณหภูมิต่าง ๆ จากการทดลองก่อนออกแบบหลอดนำเสียงนี้พบว่าอุณหภูมิของอากาศในหลอดนำเสียงเพิ่มขึ้นและลดลงช้ากว่าการเพิ่มและการลดของอุณหภูมิของน้ำที่หลอดนำเสียงแช่อยู่ประมาณ 5°C ดังนั้นการจะอ่านอุณหภูมิของอากาศในหลอดนำเสียงจากอุณหภูมิของน้ำโดยตรงไม่ได้ จึงต้องเจาะรูหลอดนำเสียงแล้วสอดเทอร์โมมิเตอร์เข้าไปวัดอุณหภูมิอากาศในหลอดโดยตรงดังแสดงในภาพที่ 17 ซึ่งมี A เป็นจุกยาง B เป็นหลอดทองแดง และ T เป็นเทอร์โมมิเตอร์

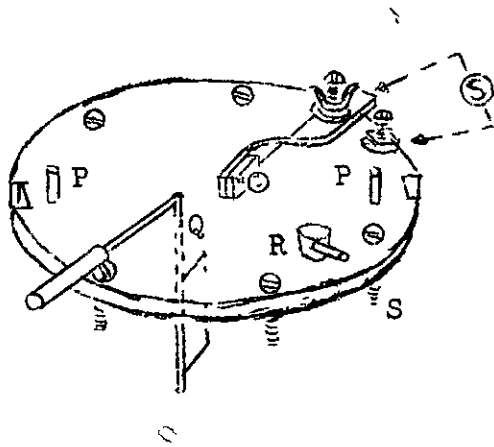


ภาพประกอบ 17 หลอดนำเสียงในหม้อทมน้ำ

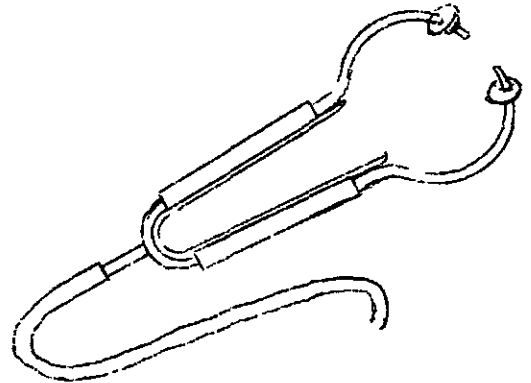
2.2.2 จานหมุนด้วยมอเตอร์ จานหมุนทำด้วยแผ่นอลูมิเนียมบาง ๆ รัศมี 10.5 ซม. เจาะรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง เท่าของหลอดนำเสียงขนานกับขอบให้มีระยะห่างเท่า ๆ กัน จำนวนรูหาได้จากการศึกษาสมการ (4) คือ $v = \frac{1}{k}$ ความเร็ว v ที่ 100°C ประมาณ 390 เมตร/วินาที ให้เครื่องมือสามารถได้ยินเสียงดังที่สุดสองครั้งคือ k มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 2 ให้ 1 มีค่าประมาณ 1 เมตร เพื่อให้ได้ยินเสียงชัดเจนนี และจากการทดลอง n มีค่ามากที่สุดที่ยังคงฟังเสียงได้ประมาณ 20 รอบ/วินาที เพราะถ้ามีค่ามากกว่านี้เสียงหวีดแหลมที่เกิดจากจานเสียง สึกกับอากาศจะทำให้ฟังไม่ได้ จากค่าเหล่านี้ทำให้ได้ค่า $n = 39$ แต่ค่า n ต้องเป็นเลขคู่ ดังนั้นจึงเลือกให้จำนวนรูบนจานมี 40 รู มอเตอร์ที่ใช้หมุนจานเป็นมอเตอร์ขนาดเล็กใช้กับถ่านไฟฉายสองก้อน มีความต้านทานขนาด 20 โอห์ม 1.5 วัตต์ ต่ออนุกรมในวงจรเพื่อใช้เปลี่ยนความเร็วของมอเตอร์ให้ได้ตามต้องการ

2.2.3 ทนกำเนิดเสียงที่จะวัดความเร็ว ใช้ไฟฟ้าของเครื่องคิกซ์โมยติดตั้งบนฝาขวดพลาสติกวงในหนึ่ง เมื่อปิดฝาขวดเข้ากับตัวขวดและสอดปลายหลอดนำเสียงเข้าไปในขวดโดยใช้จุกยางช่วยให้แน่นไม่มีเสียงแทรกออกมาได้ เสียงจากออกจะถูกส่งออกทางหลอดนำเสียงเท่านั้น ออกไฟฟ้าคิกซ์ลาวใช้กับถ่านไฟฉายขนาด 2 ก้อน หรือใช้กับไฟ A.C. ขนาด 3 โวลต์ มีความต้านทานขนาด 20 โอห์ม 1.5 วัตต์ต่ออนุกรมในวงจรด้วยเพื่อปรับให้เสียงออกดังมากน้อยและเรียบสม่ำเสมอได้ตามต้องการ เพื่อความสะดวกในการฟังเสียงจากหูฟัง

2.2.4 หม้อคนน้ำ ใช้หม้ออลูมิเนียมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 ซม. เป็นหม้อคนน้ำ มีฝาครอบทำด้วยไม้นหนาประมาณ 1.5 ซม. พื้นด้านในของฝาครอบมีร่อง เป็นรูปวงกลมให้ขอบหม้อสวมลงไปพอดี ที่ก้นร่องรองไว้ด้วยแผ่นยางเพื่อให้ขอบหม้อแนบสนิทกับฝาครอบป้องกันมิให้น้ำเดือดคั้นออกมาได้ การยึดฝาครอบให้ติดแน่นกับหม้อทำโดยใช้สกรู 8 ยึดขอบฝาครอบให้ติดกับวงแหวนที่รัดอยู่ต่ำกว่าขอบของปากหม้อลงไปเล็กน้อย บนฝาครอบจะมีรู P ให้หลอดนำเสียงโผล่จากภายในหม้อขึ้นมาสองรู มีรู Q สำหรับให้ปลายเครื่องกวนน้ำโผล่จากภายในหม้อขึ้นมาอีกหนึ่งรู มีรู R สำหรับให้น้ำเดือดออก และมีหลอดไฟฟ้า 12 โวลต์ยัดติดกับแผ่นอลูมิเนียมติดตั้งอยู่ด้วยดังภาพที่ 18



ภาพประกอบ 18 การติดตั้งส่วนประกอบ
ต่าง ๆ บนฝาครอบ



ภาพประกอบ 19 หูฟัง

2.2.5 หูฟัง การทำหูฟังต้องคำนึงถึงว่าให้เสียงที่ได้ยินเป็นเสียงจากหลอดนำเสียงเท่านั้น ถ้ามีเสียงจากภายนอกหลอดนำเสียงแทรกเข้าไปด้วยจะทำให้ได้ยินเสียงที่กัง เป็นหว่ง ๆ จากเครื่องมือไม้ชัด จึงออกแบบหูฟังให้ปลายทั้งสองข้างของหูฟังสอดเข้าไปในรูหูอย่างแนบสนิทดังภาพที่ 19

2.2.6 แผงโลหะที่สั้นควมวงจรไฟฟ้า ใช้ลวดเหล็กเส้นเล็ก ๆ มาตรึงปลายข้างหนึ่งไว้ให้แน่นปลายอีกข้างหนึ่งปล่อยให้สั้นอยู่เหนือจานตรงกับแนวของหลอดไฟฟ้า ความยาวของลวดจะเป็นเท่าไร ต้องให้สอดคล้องกับค่าของ L, m, n และขนาดของลวดด้วย สำหรับเครื่องมือที่สร้างขึ้นนี้ใช้ลวดที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 มม. จากการทดลองพบว่าลวดนี้ยาว 70 ซม. สั้นกว่าความถี่ 1.95 รอบ/วินาที ผู้เขียนต้องการให้มันสั้นกว่าความถี่ที่สามารถวัดจำนวนรอบของจานหมุนที่หมุนเร็วจนกระทั่งได้ยินเสียงดังที่สุดครั้งที่ 2 โดยเจาะรูบนจานให้แสงผ่านมาเข้าตา 2 รู ดังนั้นถ้าพิจารณาจากสมการ (4) ดังกล่าวมาแล้วจะได้ว่าเมื่อได้ยินเสียงดังที่สุดครั้งที่ 1 จานจะมีความเร็วประมาณ 9 รอบ/วินาที ลวดต้องสั้นกว่าความถี่ 9 รอบ/วินาทีด้วย จึงจะเห็นเงามืดบังหลอดไฟครั้งที่ 1 และต้องสั้นกว่าความถี่ 18 รอบ/วินาที จึงจะเห็นเงามืดบังหลอดไฟครั้งที่ 2 แต่ลวดที่ยาวความถี่ยิ่งน้อยจึงต้องนำเอาค่าความถี่ 9 รอบ/วินาที ของลวดมาพิจารณาว่าลวดมีความยาวมากที่สุดเท่าไร เมื่อแทนค่า $f = 1.95$ รอบ/วินาที $d = 70$ ซม. และ $f = 9$ รอบ/วินาที ลง

ลงในสมการ (6) จะได้ว่า $a \approx 33$ มม. ดังนั้นเครื่องมือที่ออกแบบสร้างขึ้นจึงใช้ลวดยาวประมาณ 35 มม. ความยาวของลวดขนาดนี้สามารถหาคะลอกวัฏจํานวนรอบของงานที่หมุนเร็วจนกระทั่งไค้ยินเสียงกึ่งที่สุดสองครั้งแรกถัดกัน และเกิดเงามืดบังหลอดไฟหลายครั้งถัดกัน ทั้งแสดงค่าโดยประมาณในตารางที่ 1

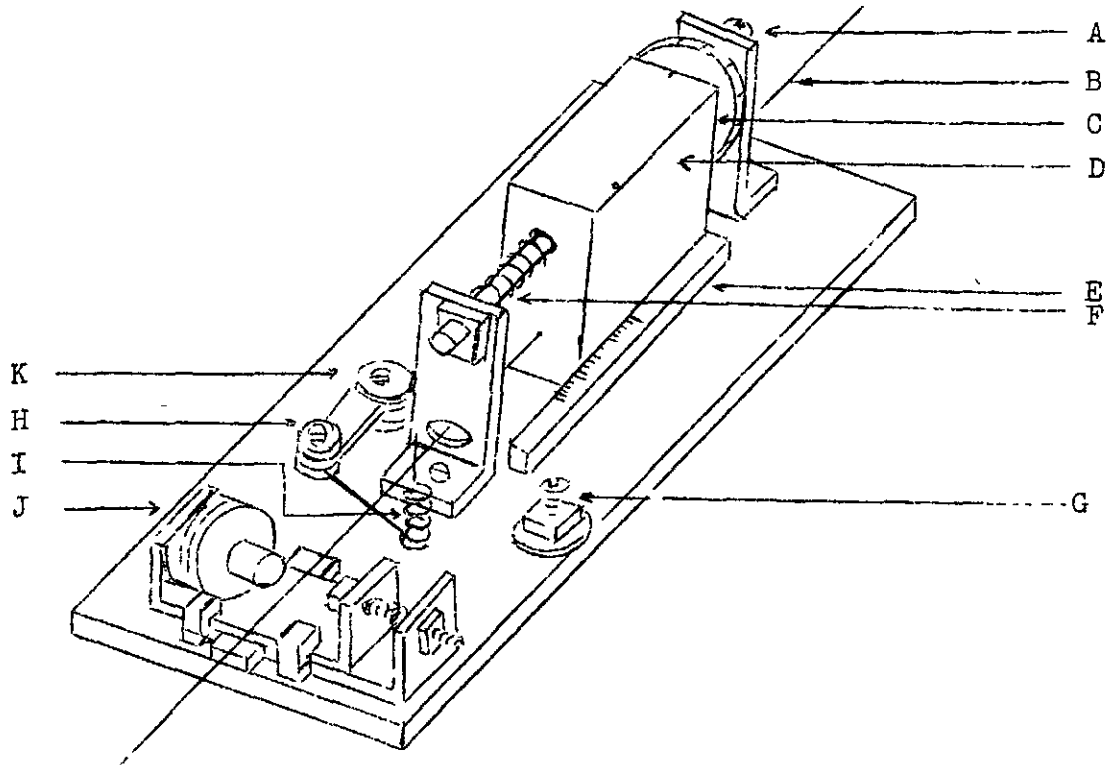
ตาราง 1 ตารางสำหรับอธิบายประกอบข้อ 6

เสียงกึ่งที่สุด (ครั้งที่)	ความเร็วของงาน (รอบ/วินาที)	เกิดเงามืดบังหลอดไฟ เมื่อลวดมีความถี่ (รอบ/วินาที)	ความยาวลวด (มม.)
1	9	9, 18, 27 ...	ไม่น้อยกว่า 33 มม.
2	18	18, 36, 54 ...	
1	9	4.5 , 9, 18, 27 ...	ไม่น้อยกว่า 33 มม.
2	18	1, 18, 36, 54 ...	

จากตารางที่ 1 เลข 4.5 ที่มีกากบาทตลอดแสดงให้ทราบว่า ลวดต้องสั้นด้วยควมถี่ประมาณค่านี้ จึงจะเกิดเงามืดบังหลอดไฟครั้งที่ 1 ซึ่งถ้าคิดเป็นความยาวลวดจะได้ประมาณ 47 มม. การเพิ่มความยาวลวดอีก 12 มม. จาก 35 มม. เพื่อแสดงผลตอนนี้เพียงคนเดียวไม่คอยจำเป็นนักเพราะความยาวลวด 35 มม. ก็แสดงให้เห็นไค้ในทำนองเดียวกันอยู่แล้ว อีกทั้งการเพิ่มความยาวลวดให้มากขึ้นนั้นเป็นการทำให้เครื่องมือมีขนาดโตขึ้นเกินความจำเป็นไป ดังนั้นเครื่องมือที่สร้างขึ้นจึงมีไค้ออกแบบให้ลวดสั้นด้วยควมถี่ค่า 4.5 รอบ/วินาทีนี้

สำหรับวงจรไฟฟ้าที่ทำให้ลวดสั้นเป็นวงจรแบบเดียวกับวงจรของกระดิ่งไฟฟ้า แต่ใช้กับไฟ A.C. 10 โวลต์ และยังมีเครื่องปรับควมถี่ของลวดรวมอยู่ด้วยดังรายละเอียดในภาพที่ 20

* 21-22

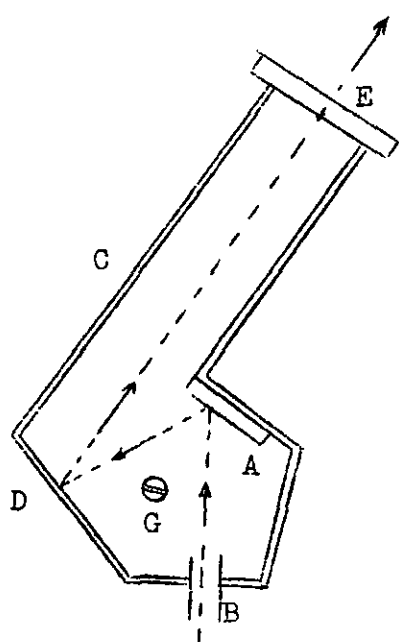


ภาพประกอบ 20 ส่วนประกอบของเครื่องเส้นลวด

ในภาพที่ 20 นั้นเส้นลวดที่สั้นคือ B สอดผ่านรูซึ่งมีขนาดเท่ากับลวดของแท่ง D แท่ง D ถูกยึดให้ตั้งอยู่โดยคานนอต A การเคลื่อนไปมาของแท่ง D ตามแกนคานนอต A นั้นเป็นการเปลี่ยนความยาวของลวดส่วนที่กำลังสั้นนั่นเอง และเพื่อจะให้การเปลี่ยนความยาวของลวดส่วนที่กำลังสั้นละเอียดมากยิ่งขึ้นกว่าการผลักดันด้วยมือโดยตรงจึงใส่แผ่นกลม C เข้าไปให้หมุนไปตามเกลียวของนอต A และสอดสปริง F ที่ถูกยึดให้ทันท่วงทีแล้วเข้าไปดันแท่ง D ด้วย เมื่อหมุนแผ่นกลม C ไปตามเข็มนาฬิกาหนึ่งรอบแท่ง D จะถูกดันมาทางซ้ายเท่ากับระยะหนึ่งช่วงเกลียวคือ 1.27 มม. (เกลียวของนอต A มี 20 เกลียวต่อหนึ่งนิ้ว) ถ้าหมุนแผ่นกลม C ทวนเข็มนาฬิกาหนึ่งรอบแท่ง D จะถูกสปริง F ดันให้เคลื่อนไปทางขวา 1.27 มม. เช่นเดียวกัน ถ้าแบ่งแผ่นกลม C ออกเป็น

20 ส่วนเท่า ๆ กัน แต่ละส่วนจะทำให้แท่ง D เคลื่อนไปได้ .0635 มม. จำนวนรอบของแผ่นกลม C อ่านได้จากสเกลบนแท่งสี่เหลี่ยม E เกษของรอบอ่านได้จากตัวเลขบนขอบของแผ่นกลม C ที่ตรงกับขีดค่านบนแท่ง D การเปลี่ยนความยาวลูกโดยวิธีนี้ทำให้สามารถปรับความถี่ของลูกที่สั้นได้ อย่างละเอียด ช่วยให้การวัดรอบของจานหมุนของเครื่องมือทำได้ละเอียดยิ่งขึ้น ชิ้นส่วนอื่น ๆ ในภาพที่ 20 เป็นชิ้นส่วนที่ประกอบกันขึ้นตามวงจรกระตุ้นไฟฟ้านั้นเอง มี J เป็นแม่เหล็กไฟฟ้า H เป็นที่ยึดสปริง I สามารถเคลื่อนเข้าออกโดยหมุนรอบแกน K เพื่อให้สปริง I แตะแรงหรือเบา ๆ กับลูก B กระแสไฟฟ้าจะไหลเข้าสู่ลูก B ผ่านสปริง I เข้าสู่ลูกที่พันรอบแท่งเหล็ก J แล้วออกไปยังปุ่ม G วนเข้าสู่ลูก B อีกครั้งหนึ่งจึงครบวงจร การใช้สปริง I อ่อน ๆ ทำหน้าที่ตัดต่อวงจรนั้นเพื่อป้องกันมิให้ความถี่ของลูกที่กำลังสั่นคลาดเคลื่อนไปจากค่าที่แท้จริงมากเกินไป

2.2.7 ฉากรับแสง ฉากรับแสงมีไว้เพื่อสังเกตเงาเล็กของเส้นลูก เราอาจใช้กระจกเงาเป็นฉากรับแสงซึ่งมีข้อดีที่สามารถมองเห็นเงาของเส้นลูกได้ชัดเจนแม้จะทดลองในขณะที่มีแสงจากภายนอก แต่มีข้อเสียอย่างหนึ่งคือแสงสะท้อนเข้ามากเกินไป ทำให้เคื่องตาเมื่อทดลองไปนาน ๆ ผู้เขียนจึงใช้แผ่นอลูมิเนียมทำหน้าที่เป็นฉาก ทำให้แสงจากฉากสะท้อนเข้าตาน้อยลง ถ้าแสงจากภายนอกมากเกินไปจะทำให้สังเกตไม่ชัด ปัญหาข้อนี้จึงแก้ไขโดยสร้างเป็นกล่องมืดขึ้นหุ้มฉากและมีช่องมองแคบ ๆ รายละเอียดของฉากและกล่องมืดแสดงไว้ในภาพที่ 21 มี C เป็นแผ่นอลูมิเนียม



บาง ๆ กว้าง 2 ซม. ยาว 28 ซม. องค์ภาพ B เป็นหลอดทองเหลือง A เป็นกระจกเงาทำหน้าที่สะท้อนแสงที่เข้ามาทางหลอด B ให้ตกลงเป็นพื้นที่สว่างรูปกลมบนฉาก D แสงจากฉาก D จะเข้าตาที่มองทางช่อง E ด้านข้างทั้งสองข้างของแถบอลูมิเนียมนี้ปิดไว้ด้วยไม้ค้ำบาง ๆ โดยเจาะไม้ให้เป็นร่องคั่น ๆ เล็กน้อย ขอบช่องมอง F และช่อง G ทำหน้าที่ยึดแผ่นไม้ค้ำทั้งสองแผ่นให้รัดขอบของแถบอลูมิเนียมอย่างแน่นหนา ภายในทาสีดำทั้งหมด ยกเว้นบนฉาก D

ภาพประกอบ 21 ฉากรับแสงในกล่องมืด

2.2.8 แหล่งจ่ายกำลัง เครื่องมือที่สร้างขึ้นจะทำงานได้ต้องอาศัยพลังงานไฟฟ้า คือออกไฟฟ้าใช้กับไฟ D.C. หรือ A.C. 3 โวลต์ มอเตอร์ใช้กับไฟ D.C. 3 โวลต์ หลอดไฟฟ้าใช้กับไฟ A.C. 12 โวลต์ และแม่เหล็กไฟฟ้าใช้กับไฟ A.C. 10 โวลต์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้ถ่านไฟฉาย 4 ก้อน หม้อแปลงไฟฟ้าจาก 220 โวลต์เป็น 12, 10, 9, 8 และ 6 โวลต์ จำนวน 2 อัน อันหนึ่งใช้กับออกไฟฟ้า (แต่ให้เสียงต่ำฟังเสียงจากหูฟัง ไม่คอยชักควรรใช้กระแสไฟฟ้าจากถ่านไฟฉายดีกว่า เพราะให้เสียงสูงฟังได้ชัดเจน) และหลอดไฟฟ้าอีกอันหนึ่งใช้ในวงจรสั้นลวด ความจำเป็นที่ต้องแยกหม้อแปลงเป็นสองอันก็เพราะ ในวงจรสั้นลวดนั้นวงจรเปิดปิดตลอดเวลาทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นแก่ขดลวดทุกขดของหม้อแปลง กระแสจะไหลกระเพื่อมตามความถี่ของลวดที่สั้น โดยเฉพาะเมื่อลวดสั้นความถี่ต่ำ ๆ เช่น 9 รอบ/วินาที ผลที่เกิดขึ้นจะเห็นได้ชัดคือถ้าเอากระแสที่ได้ไปใช้กับหลอดไฟจะทำให้หลอดไฟจาง และหรี่แสงอยู่ตลอดเวลา ถ้าเอาไปใช้กับออกไฟฟ้าจะได้ยินเสียงออกเป็นหว่ง ๆ อย่างชัดเจน

บทที่ 4

การศึกษาอุปกรณ์และการใช้อุปกรณ์ประกอบการสอน

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีใช้อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นเพื่อให้ได้ผลตามทฤษฎีของอุปกรณ์นั้น ๆ กล่าวถึงผลการทดลองใช้อุปกรณ์โดยแสดงควาภาพภายใต้ตารางบอกค่าต่าง ๆ และกล่าวถึงแนวการสอนเรื่องคลื่นเบื้องต้นในหัวข้อตามที่กำหนดไว้ ในขอบเขตของการศึกษาค้นคว้าโดยใช้อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นประกอบการสอน

1. วิธีใช้อุปกรณ์

1.1 วิธีใช้ wave machine wave machine ที่ได้ออกแบบสร้างขึ้นแสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคตัวกลางที่ถูกกระทบด้วย Traveling longitudinal waves, Traveling transverse waves, Standing longitudinal waves และ Standing wave in a string การเคลื่อนที่ของอนุภาคเนื่องจากคลื่นสองชนิดแรกคือของโซ่ของบนผิวทรงกระบอกชั้นในและการเคลื่อนที่ของอนุภาคเนื่องจากคลื่นสองชนิดหลังคือของโซ่ของบนผิวทรงกระบอกชั้นนอก ถ้าการใช้อุปกรณ์ชิ้นนี้เริ่มต้นโดยแฉ λ ในภาพที่ 9 อยู่ห่างจาก C จนทำให้ปลายของแกนอนุภาคอยู่นอกร่องบนผิวทรงกระบอกชั้นนอก โดยทรงกระบอกชั้นนอกนี้รัดทรงกระบอกชั้นในอยู่อย่างแนบสนิท และขณะนี้แกนอนุภาคทั้ง 13 แกน จะอยู่ในรอยบากของแผ่นจิกตำแหน่งแกนอนุภาค เมื่อจะแสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคเนื่องจากเกิด Traveling waves ก็ให้หมุนมือหมุน 0 ไปจนทำให้ร่องส่วนที่เป็นแนวตรงที่อยู่ในช่วงเส้นตรง AB กับ EF ของภาพที่ 1 มาอยู่ตรงปลายของแกนอนุภาคพอดี แล้วบิดแผ่นกลม F ไป 90° ในทิศทางใดก็ได้ทำให้ระบบแยกทรงกระบอกทำงานคันทรงกระบอกชั้นนอกออกจากการรัดรอบทรงกระบอกชั้นในและเกิดช่องยาวสำหรับให้แกนอนุภาคทั้ง 13 แกนลอดเข้าไปได้ เสร็จแล้วจึงเลื่อนแฉ λ เข้าชิด C โดยการหมุนหางปลาของน๊อคขยับแฉ λ ปลายของแกนอนุภาคทั้ง 13 แกนจะปักลงในร่องทั้ง 13 ร่องบนผิวทรงกระบอกชั้นในได้พอดี แล้วจึงยกแผ่น Z ของภาพที่ 11 ขึ้น จากนั้นจึงหมุนมือหมุน 0 ไปซ้ำ ๆ อนุภาคที่อยู่แถวกลางจะแสดงผลของการถูกกระทบด้วย Traveling longitudinal waves เริ่มต้นจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ 1 ถูกถ่ายทอดไปยังอนุภาคที่ 2, 3

และเรื่อยไปตามลำดับ ปรากฏเป็นลูกคลื่นและลูกขยายของคลื่นตามยาวเคลื่อนไปทางขวามืออย่างช้า ๆ และในที่สุดอนุภาคที่ 1 จะเริ่มหยุดการเคลื่อนที่แบบ S.H.M. ของมัน การหยุดเคลื่อนที่นี้จะหยุดติดต่อกันไปตามลำดับจนถึงอนุภาคที่ 13 หลังจากนั้นการหมุนเมื่อหมุน 0 จะเริ่มเข้ารอบที่ 2 และแสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคตัวอย่างเดิมอีกต่อไป สำหรับอนุภาคที่อยู่แถวบนจะแสดงผลของการถูกรบกวนด้วย Traveling transverse waves ซึ่งเคลื่อนที่ในขณะที่เดียวกับอนุภาคแถวล่าง เริ่มตนจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ 1 ถูกถ่ายทอดไปยังอนุภาคที่ 2, 3 และเรื่อยไปตามลำดับปรากฏเป็นหลังคลื่น (crest) และท้องคลื่น (trough) ของคลื่นตามขวางเคลื่อนไปทางขวามืออย่างช้า ๆ และในที่สุดอนุภาคที่ 1 จะเริ่มหยุดการเคลื่อนที่แบบ S.H.M. ของมัน การหยุดการเคลื่อนที่นี้จะหยุดติดต่อกันไปตามลำดับจนถึงอนุภาคที่ 13 หลังจากนั้นจะเป็นการขึ้นรอบใหม่ซึ่งจะแสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคตัวอย่างเดิมอีกต่อไป

เมื่อได้แสดง Traveling waves เสร็จสิ้นลงแล้วถ้าต้องการจะแสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคเนื่องจากเกิด Standing waves บ้าง ก็ให้หมุนเมื่อหมุน 0 จัดให้ร่องส่วนที่อยู่ระหว่างเส้นตรง AB กับ EF ของภาพที่ 1 มาอยู่ตรงกับแกนอนุภาคแถวกลางปลายแกน B ของแผ่นจิกตำแหน่งแกนอนุภาคลง เพื่อให้แกนอนุภาคเข้าไปในรอยบากพอดี เสร็จแล้วจึงหมุนหางปลาของนอตขยับแบ่ง A ออกห่างจาก C ไปอยู่ในตำแหน่งเหมือนตอนเริ่มต้นครั้งแรก หมุนแกนกลม F กลับตำแหน่งเดิม (หรือหมุนต่อไปอีก 90°) ทรงกระบอกชั้นนอกจะหุบลงมารัดทรงกระบอกชั้นในอย่างแน่นแนบ หมุนหางปลาของนอตอีกครั้งหนึ่งเพื่อขยับแบ่ง A เข้าหา C จนทำให้ปลายของแกนอนุภาคทั้ง 13 แกนมีกลิ้งในร่องบนผิวทรงกระบอกชั้นนอก เมื่อยกแผ่นจิกตำแหน่งแกนอนุภาคขึ้นแล้วแกนอนุภาคก็พร้อมที่จะเคลื่อนที่ไปตามร่อง ครั้นหมุนเมื่อหมุน 0 ไปช้า ๆ อนุภาคแถวล่างก็จะแสดงผลของการถูกรบกวนด้วย Standing longitudinal waves คือปรากฏเป็น node สองตำแหน่ง และ antinode 3 ตำแหน่ง ในรอบต่อ ๆ ไปของการหมุนเมื่อหมุน 0 จะเป็นการแสดงซ้ำเหมือนเดิมทุกรอบ ส่วนอนุภาคแถวบนซึ่งเคลื่อนที่ในขณะที่เดียวกับอนุภาคแถวล่างจะแสดงผลของการถูกรบกวนด้วย Standing transverse waves คือปรากฏเป็น node สองตำแหน่ง และ antinode 3 ตำแหน่ง และในรอบต่อ ๆ ไปของการหมุนเมื่อหมุน 0 ก็จะเป็นการแสดงซ้ำเหมือนเดิมอีกเช่นเดียวกัน

เมื่อเสร็จสิ้นการแสดง Standing waves แล้วควรจะได้เก็บอุปกรณ์ไว้ในลักษณะที่เหมือนตอนเริ่มต้นวิธีที่กล่าวมาเพื่อความสะดวกในการที่จะใช้ในคราวต่อไป คือให้หมุนเมื่อหมุน 0 ไปจนกระทั่ง

ร่องส่วนที่อยู่ระหว่างเส้นตรง AB กับ CD เลื่อนมาอยู่ตรงปลายแกนอนุภาคแล้วกดแผ่นจิกตำแหน่งแกนอนุภาคลงมาให้แกนอนุภาคอยู่ในรอยบากทุกแกน หมุนหางปลาของนอตขยับแนว A ออกห่างจาก C ไข้อยู่ในตำแหน่งเริ่มต้น อุปกรณ์พร้อมที่จะถูกนำมาใช้อีกในคราวต่อไป

1.2 วิธีใช้เครื่องวัดความเร็วเสียงในอากาศที่อุณหภูมิต่าง ๆ วิธีใช้เครื่องวัดความเร็วเสียงแบ่งได้ 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนเครื่องมือให้พร้อมที่จะทำการทดลอง และขั้นตอนทดลอง ในขั้นตอนเครื่องมือให้ปฏิบัติเป็นลำดับดังนี้

1.2.1 เปิดฝาครอบหมอน้ำออก ใส่น้ำแข็งก้อนเล็ก ๆ ลงไปประมาณ $\frac{1}{2}$ หมอน้ำอีกประมาณ $\frac{1}{4}$ หมอน้ำ แล้วปิดฝาครอบให้สนิทโดยบิดนอตทุกตัวบนขอบฝาครอบให้แน่น ทั้งนี้เพื่อป้องกันมิให้อากาศเข้าเกิดแทรกออกมาเวลาคนนำในลำดับต่อไป เอาเทอร์โมมิเตอร์เสียบเข้าไปในจุกยางตรงกลางหมอน้ำเพื่อวัดอุณหภูมิของอากาศในหลอดนำเสียง ยกหมอน้ำขึ้นวางบนเตาไฟฟ้าแล้วปล่อยให้ไวก่อนสักครู่หนึ่ง เพื่อให้หมอน้ำมีอุณหภูมิเท่ากันน้ำแข็ง และเทอร์โมมิเตอร์ปรอทไม่ล้น คำอีกต่อไป ทั้งนี้ต้องคอยควานน้ำด้วยเครื่องควานไว้มาน

1.2.2 ระหว่างที่กำลังรอน้ำลดอุณหภูมินั้น จักตำแหน่งของจานให้หมุนอยู่ในแนวราบให้เร็วที่สุดเพื่อป้องกันมิให้เกิดเสียงรบกวนจากการพัวพันของจานเมื่อมันหมุนอย่างรวดเร็ว แล้วปรับตำแหน่งมอเตอร์ให้แกนของมันอยู่ตรงกลางของรูที่เจาะไว้ให้สังเกต เพื่อให้รูที่ขอบจานที่อยู่ตรงข้ามกันทุกคู่ตรงกับรูของหลอดนำเสียงที่โผล่จากภายในหมอน้ำขึ้นมา

1.2.3 จักระดับความสูงของจานให้อยู่เหนือปากหลอดนำเสียงอันล่างประมาณ 2 มม. และจักตำแหน่งหลอดนำเสียงอันบนให้ปลายของมันตรงกับปลายของหลอดนำเสียงอันล่าง โดยการปรับนอตหมายเลข 7 ในภาพที่ 16 แล้วจึงจักให้ปลายล่างของหลอดนำเสียงอันบนทั้งสองอันอยู่เหนือจานขึ้นมาประมาณ 2 มม. โดยการปรับนอตด้านข้างของแท่นยึดหลอดนำเสียง การจักให้ปลายหลอดนำเสียงทั้งสองอันอยู่ใกล้กันมากจะทำให้ได้ยินเสียงในหูฟังได้ชัดเจนมาก ถ้าจักให้ห่างเกินไปเสียงที่ต้องการฟังจะถูกเสียงอื่น ๆ กลบจนได้ยินไม่ชัด เช่นเสียงจานเสียดสีกับอากาศและเสียงจากคันกำเบ็ดเสียงที่ไม่ได้ผ่านหลอดนำเสียงอันล่าง เป็นต้น

1.2.4 จ่ายไฟ A.C. 12 โวลต์ จุกหลอดไฟฟ้าใต้จาน หมุนจานไปให้รูสำหรับแสงผ่านอยู่เหนือหลอดไฟพอดีแล้วสังเกตฉากรับแสงในกล่องมืด จักตำแหน่งของกล่องมืดโดยปรับนอตของแท่นยึดกล่องมืดจนปรากฏพื้นที่สว่าง เป็นรูปวงกลมบนฉาก

1.2.5 นำเครื่องนับรอบของจาน (ชิ้นส่วนหมายเลข 20, 23 และ 24 ของภาพที่ 16) มาประกอบจัดให้ปลายลวดอยู่ที่ใดก็ได้ของมิต ปรับตำแหน่งของแผ่นวางเส้นลวดให้ปรากฏเงาของเส้นลวดพาดตามแนวเส้นผ่าศูนย์กลางของพื้นที่สว่างบนฉากร แล้วจึงบิดนอตหมายเลข 21 ให้แน่นเพื่อให้เขียนขณะปรับความถี่ของเส้นลวด ที่ปลายเส้นลวดอาจติดแถบกระดาษรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเล็ก ๆ เพื่อให้สังเกตเงามืดขณะลวดสั้นได้ชัดเจนนยิ่งขึ้น เพราะเงาของลวดโดยตรงนั้นค่อนข้างเล็กสังเกตยาก ทำให้ไม่สะดวกในการปรับความถี่เส้นลวด สำหรับเครื่องสั้นลวดนั้นไม่ควรให้สปริง I ของภาพที่ 20 และเส้นลวดแรงเกินไปจะทำให้ความถี่ของลวดที่สั้นคลาดเคลื่อนมาก การทำให้เส้นลวดสั้นโดยมีแอมป์ลิจูดมากหรือน้อยทำได้โดยการปรับตำแหน่งของแม่เหล็กไฟฟ้าให้เข้าใกล้หรือถอยห่างจากเส้นลวด ถ้าให้ลวดสั้นแรงเกินไปมันจะกระทบกับปลายแท่งแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้ความถี่คลาดเคลื่อนเท่าที่สั้นคอยเกินไปเงามืดจะสั้นไม่พบบริเวณพื้นที่สว่างบนฉากร ทำให้ปรากฏมีเงามืดหยุดนิ่ง เป็นการสร้างความเข้าใจผิดให้แก่ผู้ทดลองใควาความถี่ของเส้นลวดสอดคล้องกับความถี่ของจานแล้ว ส่วนการจัดตำแหน่งแท่ง D (ดูภาพที่ 20) เพื่อให้สามารถใช้สเกลบนแท่ง C ได้โดยไม่ต้องเลื่อนเครื่องสั้นเส้นลวดเป็นครั้งที่สองตลอดการทดลองครั้งหนึ่ง ๆ ให้หมุนแผ่นกลม C จนกระทั่งปลายซ้ายของแท่ง D ชี้ขีด 3 ของสเกล เพราะเมื่ออุณหภูมิอากาศในห้องค่อนข้างเย็นยิ่งสูงขึ้น เสียงจะเดินทางได้เร็วขึ้น ความเร็วจานก็ต้องเพิ่มให้มากขึ้น ลวดก็ต้องสั้นเร็วขึ้นคือลวดส่วนที่สั้นต้องยิ่งสั้นลงนั่นเอง ดังนั้นเราก็เพียงแต่หมุนแผ่นกลม C ด้านแท่ง D ไปข้างหน้าเท่านั้น การทำเช่นนี้เป็นผลดีแก่การทดลองคือจำนวนรอบของแผ่นกลม C ที่เพิ่มขึ้นหรือความยาวลวดที่ลดลงในช่วงอุณหภูมิที่เท่ากันนั้นจะทำให้เราสังเกตได้ว่าผลการทดลอง เข้าใกล้ความจริงเพียงไร อีกประการหนึ่งที่ควรให้ปลายซ้ายของแท่ง D ชี้ขีด 3 ของสเกลคือเพื่อให้มีสเกลเหลือสำหรับปรับความยาวเส้นลวดในตอนเริ่มต้นวัดความเร็วเสียงที่อุณหภูมิค่าสุดท้ายนั่นเอง

เมื่อจัดเครื่องมือดังกล่าวเรียบร้อยแล้วจึงเริ่มทำการทดลองวัดความเร็วเสียงที่อุณหภูมิน้ำแข็ง โดยสอดปลายหูฟังเข้าไปในรูหูทั้งสองข้างแล้วปิดวงจรให้คนกำเน็คเสียงส่งคลื่นเสียงออกมาทางหลอดนำเสียง ลองใช้มือหมุนจานเบา ๆ เพื่อสังเกตความแตกต่างของเสียงที่ได้ยินขณะรูของจานไม่ตรงกับรูของหลอดนำเสียงเลย กับขณะที่รูของจานตรงกับรูของหลอดนำเสียงพอดี เราอาจปรับปุ่มบังคับความดังของเสียงให้ได้เสียงเรียบและดังชัดเจน ท่อไปเริ่มปิดวงจรให้มอเตอร์หมุนจานไปช้า ๆ โดยปรับปุ่มบังคับความเร็วมอเตอร์ คอย ๆ เพิ่มความเร็วขึ้นทีละน้อยจนเริ่มได้ยินเสียงดังเป็นท่วง ๆ ติด ๆ กัน ให้เพิ่มความเร็วจานขึ้นอีกเสียงที่ได้ยินแต่ละท่วงจะห่างกันมากขึ้น ๆ จนในที่สุดจะได้ยินแต่เสียงดังเรียบ

เหมือนกับที่สังเกตไว้ในตอนต้นเมื่อให้รู้งานตรงกับรูปของหลอดนำเสียงพอดี แสดงว่าขณะนี้ช่วงเวลาที่งานหมุนไต่หนึ่งรอบ เท่ากับช่วงเวลาที่พลังงานเสียงหน่วยหนึ่ง เคลื่อนจากปลายหนึ่งถึงปลายตรงข้ามของหลอดนำเสียง ถ้าความเร็วของงานเพิ่มขึ้นจากความเร็วในขณะนี้เล็กน้อยจะปรากฏเสียงเป็นหว่ง ๆ ให้ได้ยินอีกแต่ละหว่งจะยิ่งถี่ ๆ ก็มากขึ้นเมื่อความเร็วยิ่งเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นการปรับความเร็วงานจึงต้องทำอย่างระมัดระวัง ในขณะที่กำลังได้ยินเสียงเป็นหว่ง ๆ อยู่นั้นก็เริ่มปิดวงจรของเครื่องสั่นเส้นลวด เลื่อนเครื่องสั่นเส้นลวดไปทางขวาสุดแล้วคอยสังเกตุพื้นที่สว่างที่กำลังกระทบถึงบนฉาก ค่อย ๆ เลื่อนเครื่องสั่นเส้นลวดไปทางซ้ายช้า ๆ จนปรากฏมีเงามืดเคลื่อนไปมาในวงกลมสว่างนั้นอย่างช้า ๆ เมื่อถึงขั้นนี้ต้องเพิ่มความระมัดระวังให้มากขึ้นเพื่อปรับความเร็วงานให้ได้ยินเสียงดังสม่ำเสมอ ๆ กับปรับแผนกลม C ของภาพที่ 20 ให้เงามืดปรากฏนิ่งอยู่บนฉาก เสร็จแล้วรีบอ่านอุณหภูมิ และ ปิดวงจร เครื่องสั่นเส้นลวด วงจรของต้นกำเนิดเสียง และวงจรของมอเตอร์เพื่อประหยัดกำลังไฟฟ้าและป้องกันมิให้บางส่วนของอุปกรณ์ร้อนมากเกินไป ต่อไปจึงทำการวัดความยาวของหลอดที่สั่นและบันทึกไว้ ดังแสดงในหัวข้อผลการทดลองซึ่งจะได้อธิบายต่อไป

เมื่อบันทึกข้อมูลข้างต้นไว้แล้ว เริ่มทำการทดลองต่อไปโดยทำการต้มน้ำแข็งที่เหลืออยู่ในหม้อให้ละลายกลายเป็นน้ำที่มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกลายเป็นน้ำเดือด ทุก ๆ 10°C ของอุณหภูมิอากาศในหลอดนำเสียงที่เพิ่มขึ้น ทำการทดลองหนึ่งครั้ง อย่างไรก็ตามเนื่องจากการปรับไม่ต่าง ๆ เพื่อให้ได้เงื่อนไขที่ต้องการนั้นทำได้ไม่รวดเร็วนักจึงควร เริ่มทำการปรับก่อนที่อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้น 10°C เล็กน้อย นำผลการทดลองทั้งหมดไปแทนในสมการ (9) เพราะงานหมุนมีรูปให้แสงผ่าน 2 รูป และเกิดเงามืดบนฉากครั้งที่หนึ่ง และแทนค่า $k = 1$ เพราะการทดลองนี้ได้ยินเสียงดังที่สุดเป็นครั้งแรก

เราอาจเริ่มค้นหาค่าการทดลองใหม่โดยจัดทุกอย่างให้เหมือนเดิมแต่ปรับตำแหน่งของเครื่องสั่นเส้นลวดให้อยู่ในตำแหน่งที่ทำให้เกิดเงามืดบนฉากครั้งที่สอง แล้วแทนค่าผลการทดลองที่ได้ในสมการ (10) โดยแทนค่า $k = 1$ หรือเพิ่มความเร็วของงานให้มากยิ่งขึ้นอีกจนกระทั่งได้ยินเสียงดังที่สุดครั้งที่ 2 แล้วปรับตำแหน่งเครื่องสั่นเส้นลวดจนเกิดเงามืดบนฉากครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 นำผลการทดลองแทนค่าในสมการ (9) และ (10) ตามลำดับโดยแทน $k = 2$ สำหรับการใส่สมการ (7) และ (8) นั้นอาจทำได้โดยใช้กระดาษปิกเจอร์ที่แสงผ่านเสียงหนึ่งรูป แล้วทำการทดลองโดยวิธีการเดียวกัน

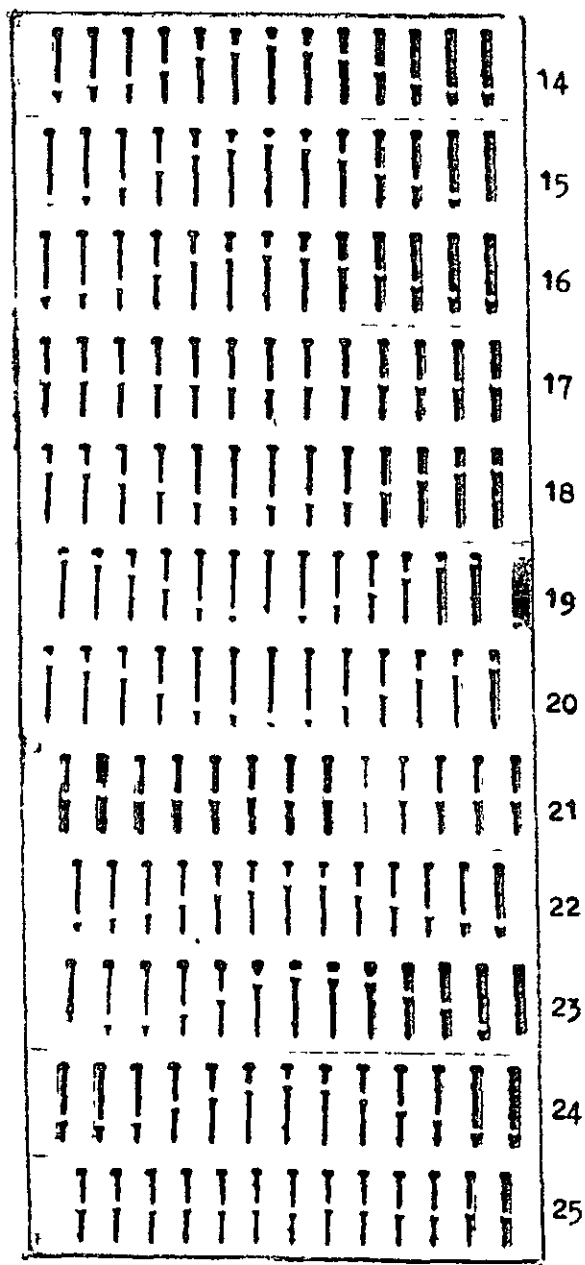
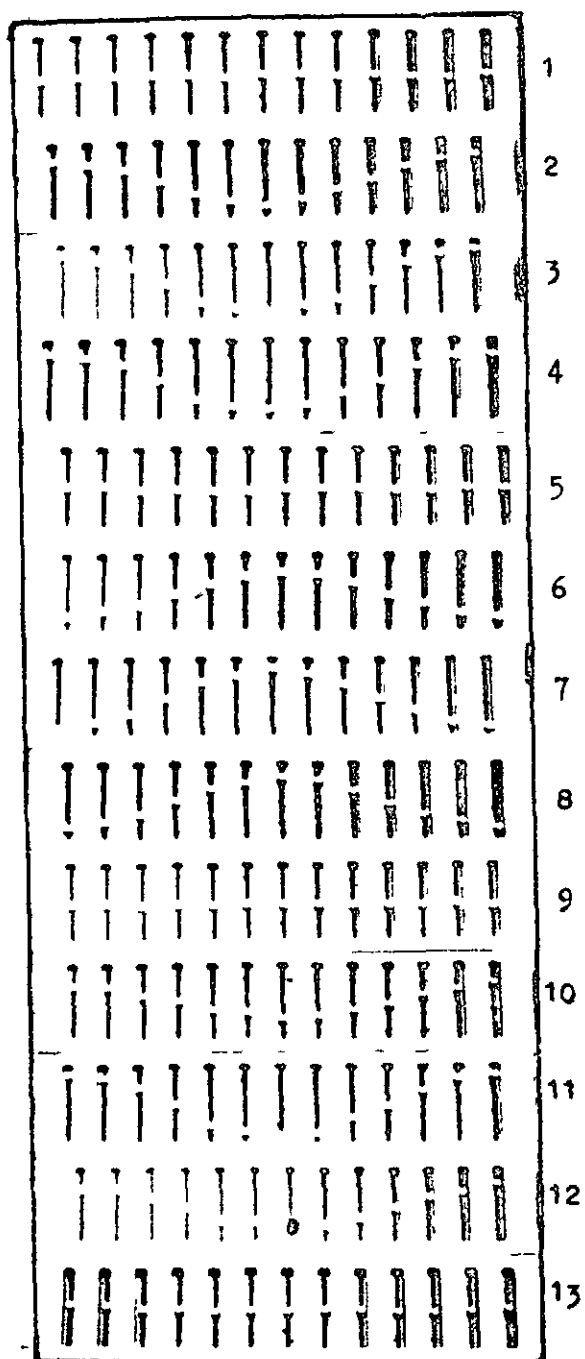
เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาคำนวณหาความเร็วเสียงที่อุณหภูมิต่าง ๆ ตามสมการ (7), (8), (9) หรือ (10) แล้วนำผลที่คำนวณได้มาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณจากทฤษฎีโดยตรงคือสมการ

$v = v_0 \sqrt{T/T_0}$ เมื่อ v คือความเร็วเสียงในอากาศมีหน่วยเป็น m/sec T คืออุณหภูมิเป็น $^{\circ}\text{K}$
 v_0 คือความเร็วเสียงในอากาศที่ 0°C เท่ากับ 331.36 m/sec T_0 คืออุณหภูมิ 273°K
 (Hodgman, 1951 : 2098, 2571)

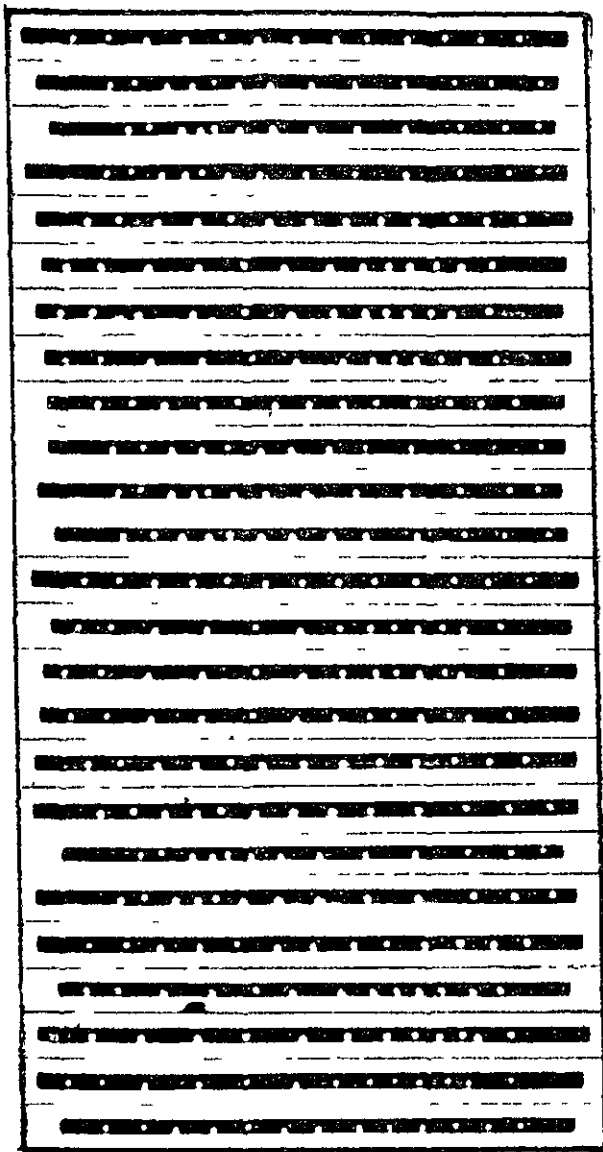
2. ผลการทดลองใช้อุปกรณ์และอภิปรายผล

2.1 ผลการทดลองใช้ wave machine ภาพที่ 22 และ 23 เป็นภาพถ่ายจาก wave machine แสดงตำแหน่งของอนุภาคต่าง ๆ เมื่อถูกรบกวนด้วย Traveling waves และ Standing waves ภาพที่ 22 แสดงตำแหน่งของอนุภาคต่าง ๆ เมื่อเกิด Standing transverse waves ได้จากการหมุนทรงกระบอกของ wave machine หนึ่งรอบโดยให้ phase ของแต่ละอนุภาคเปลี่ยนไปครั้งละ 45 องศา ภาพที่ 23 (ก) แสดงตำแหน่งของอนุภาคต่าง ๆ เมื่อเกิด Standing longitudinal waves ได้จากการหมุนทรงกระบอกของ wave machine หนึ่งรอบโดยให้ phase ของแต่ละอนุภาคเปลี่ยนไปครั้งละ 45 องศา ส่วนภาพที่ 23 (ข) และ (ค) แสดงตำแหน่งของอนุภาคต่าง ๆ เมื่อเกิด Traveling longitudinal waves และ Traveling transverse wave ตามลำดับ ภาพนี้ได้จากการหมุนทรงกระบอกของ wave machine หนึ่งรอบเช่นเดียวกันแต่ให้ phase ของอนุภาคที่ 1 เพิ่มขึ้นครั้งละ 90 องศา

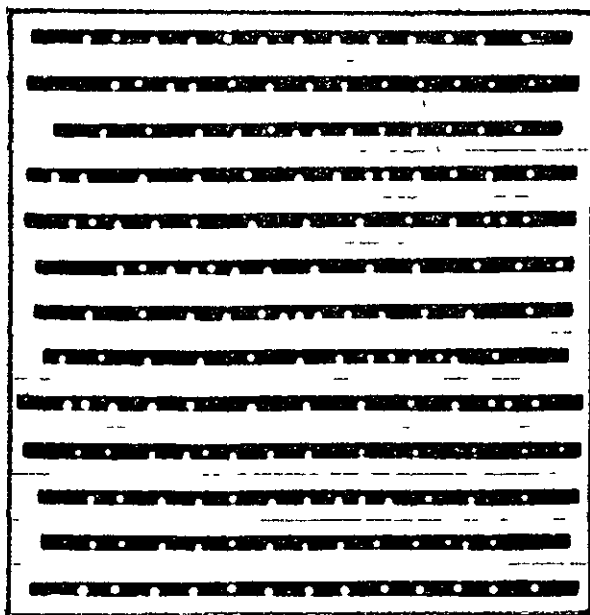
จากภาพที่ 22 และ 23 แสดงให้เห็นว่า wave machine ที่สร้างขึ้นสามารถแสดงตำแหน่งของอนุภาคเมื่อเกิดคลื่นชนิดต่าง ๆ ได้ถูกต้องตามทฤษฎีของคลื่นนั้น ๆ displacement ของบางอนุภาคที่คลาดเคลื่อนไปบ้างนั้นเกิดจากการหลวมของกลไกในเครื่องมือซึ่งจำเป็นเพื่อให้เครื่องกลนี้ทำงานได้ราบรื่น



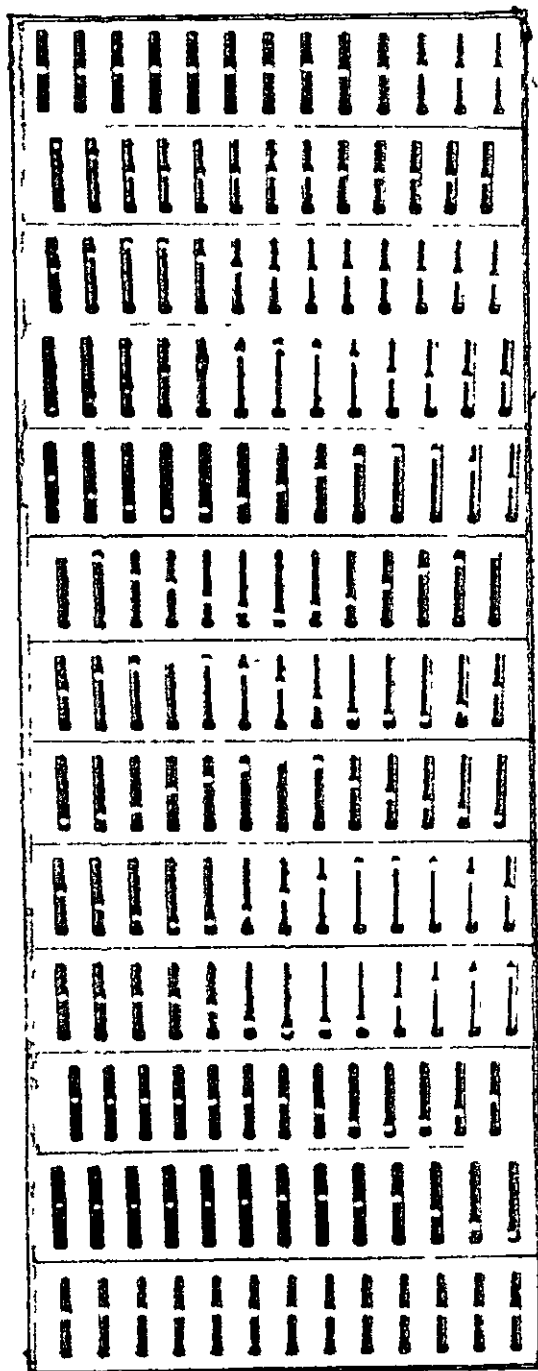
ภาพประกอบ 22 Standing transverse waves ^a _a ปรากฏจาก wave machine



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพประกอบ 23 Standing Longitudinal
waves (ภาพ ก), Traveling
longitudinal waves (ภาพ ข) และ
Traveling transverse waves (ภาพ ค)
โดยนายวิชา wave machine

2.2 ผลการทดลองใช้เครื่องวัดความเร็วเสียงในอากาศที่อุณหภูมิต่าง ๆ ผลการทดลองซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 2 นั้น เป็นผลการทดลองเมื่อทำให้ไคยีนเสียงดังที่สุดครั้งที่ 2 เกิดเงามืดบนฉากครั้งที่หนึ่งและให้แสงผ่านรูบนจานหมุนเพียงหนึ่งรู การที่เลือกปฏิบัติเช่นนี้ทั้ง ๆ ที่ในทางทฤษฎีนั้นสามารถทำได้หลายวิธีดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 1 เพราะเหตุผลต่อไปนี้

2.2.1 การทำให้จานกลมหมุนเร็วจนกระทั่งไคยีนเสียงดังที่สุดครั้งที่ 2 นั้น จะมีเสียงที่เกิดจากจานเสียดสีกับอากาศซึ่งมีความดังมากกว่าเสียงจากหลอดไฟฟ้าที่ผ่านเข้าหูฟัง โดยไม่ได้ผ่านหลอดนำเสียงในหม้อต้มน้ำ มันจึงกลายเป็นเสียง back ground ที่มีระดับเสียงต่ำกว่าเสียงออกช่วยให้การฟังเสียงที่ดังที่สุดที่ผ่านหลอดนำเสียงในหม้อต้มน้ำมาไคยีนชัดเจนขึ้นกว่าในกรณีที่จานกลมหมุนด้วยความเร็วที่ทำให้ไคยีนเสียงดังที่สุดครั้งแรก ซึ่งจะไคยีนเสียงออกที่ไม่ผ่านหลอดนำเสียงในหม้อต้มน้ำเป็น back ground เพราะเสียงที่เกิดจากจานเสียดสีกับอากาศนั้นก็ยังยังไม่กลบเสียงออก

2.2.2 เนื่องจากการกำหนดความเร็วในการหมุนของจานนั้นต้องอาศัยความยาวของหลอดที่สั้น แต่การวัดหลอดเส้นยาวจะมีเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าการวัดหลอดสั้น ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากตารางที่ 1 จะเห็นว่าของทำให้เกิดเงามืดบังหลอดไฟครั้งที่ 1 และใช้รูสำหรับแสงผ่านบนจานกลมหนึ่งรูจึงจะวัดหลอดเส้นยาวมาวัดทดลองตามต้องการ

ตัวเลขในตารางที่ 2 ได้จากการทดลองและการคำนวณเมื่อ $f = 1.95$ cps, $d = 70$ cm, $l = 91$ cm, $m = 40$ และ $k = 2$

จากผลการทดลองในตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าเครื่องวัดความเร็วเสียงที่สร้างขึ้นวัดได้ใกล้เคียงกับผลการคำนวณตามทฤษฎีประมาณ 95 % ข้อที่น่าสังเกตจากผลการทดลองคือ ที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิใกล้เคียง เปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนจะมีค่าน้อย และมีค่ามากขึ้นที่อุณหภูมิสูงขึ้นและต่ำลง ที่อุณหภูมิต่ำกว่าแถบอุณหภูมิห้อง เปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนมีค่าเป็นบวก คือผลการทดลองวัดค่าไคยีนมากกว่าผลการคำนวณตามทฤษฎี ส่วนที่อุณหภูมิสูงกว่าแถบอุณหภูมิห้อง เปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนมีค่าเป็นลบ คือผลการทดลองวัดค่าไคยีนน้อยกว่าผลการคำนวณตามทฤษฎี สาเหตุที่ทำให้ได้ผลการทดลองออกมาเช่นนี้ก็เพราะว่าอุณหภูมิของอากาศในหลอดนำเสียงที่แสดงค่าในตารางที่ 2 นั้น เป็นค่าที่วัดได้จากอากาศในหลอดนำเสียงส่วนที่อยู่ในหม้อต้มน้ำ ซึ่งมีค่าแตกต่างจากอุณหภูมิใกล้ปากหลอด จากการทดลองพบว่าเมื่อทำให้อากาศในหลอดนำเสียงร้อนอุณหภูมิอากาศในหลอดนำเสียงส่วนที่อยู่ในหม้อต้มน้ำจะสูงกว่าอุณหภูมิของอากาศในหลอดนำเสียงส่วนที่อยู่ใกล้ปากหลอด เช่นขณะที่อุณหภูมิอากาศใน

ตาราง 2 ตารางแสดงผลการทดลองเปรียบเทียบเสียงที่เกิดจากท่อปลายเปิดทั้งสองข้างแรก ในตู้สำหรับแสงผ่าน
 หนึ่งรูและได้ยินเสียงดังที่สุดครึ่งที่สอง

อุณหภูมิ (°C)	ความยาวหลอด (cm)	ความถี่ $f = f_0 d_0^2 / d_1^2$ (cps)	ความถี่งาน $n = 2f$ (cps)	ความเร็วเสียง $v = \lambda n / k$ (m/sec)	ความเร็วเสียงตามทฤษฎี $v = v_0 \sqrt{T/T_0}$ (m/sec)	เปอร์เซ็นต์ ของความคลาดเคลื่อน
4	31.4833	9.64	19.28	350.90	333.76	+5.14
10	31.4440	9.66	19.32	351.62	337.39	+4.22
20	31.3784	9.70	19.40	353.08	343.26	+2.86
30	31.3255	9.74	19.48	354.54	349.08	+1.57
40	31.2612	9.78	19.56	355.99	354.81	+0.33
50	31.1808	9.83	19.66	357.81	360.43	-0.73
60	31.0940	9.89	19.78	360.00	365.94	-1.62
70	31.0093	9.94	19.88	361.82	371.38	-2.57
80	30.9246	9.98	19.96	363.27	376.81	-3.59
90	30.8357	10.05	20.10	365.82	382.05	-4.25
98	30.7511	10.11	20.22	368.00	386.26	-4.73

หลอดนำเสียงในหม้อต้มน้ำมีค่า 98°C นั้นอากาศที่อยู่ลึกลงไปจากปากหลอดประมาณ 2 ซม. จะมีอุณหภูมิ 85°C และเมื่อทำให้อากาศในหลอดนำเสียงเย็น อุณหภูมิอากาศในหลอดนำเสียงส่วนที่อยู่ในหม้อต้มน้ำจะต่ำกว่าอุณหภูมิของอากาศในหลอดส่วนที่อยู่ไกลปากหลอด เช่นขณะที่อุณหภูมิอากาศในหลอดนำเสียงในหม้อต้มน้ำมีค่า 4°C นั้น อากาศที่อยู่ลึกลงไปจากปากหลอดประมาณ 2 ซม. จะมีอุณหภูมิ 11°C นั่นคือ ณ อุณหภูมิค่าหนึ่ง ๆ ที่สูงกว่าและต่ำกว่าแถบอุณหภูมิห้องที่แสดงในการวางที่ 2 นั้น อากาศมีไคมีอุณหภูมิเท่ากับค่านั้น ๆ ตลอดทั้งหลอด ที่อุณหภูมิสูงกว่าแถบอุณหภูมิห้องค่าความเร็วเสียงที่คำนวณจากทฤษฎีจึงมีค่ามากกว่าค่าที่ไคจากการทดลอง เปอร์เซนต์ของความคลาดเคลื่อนจึงมีค่าเป็นลบ และที่อุณหภูมิต่ำกว่าแถบอุณหภูมิห้องค่าความเร็วเสียงที่คำนวณจากทฤษฎีจึงมีค่าน้อยกว่าที่ไคจากการทดลอง เปอร์เซนต์ของความคลาดเคลื่อนจึงมีค่าเป็นบวก สำหรับที่อุณหภูมิแถบอุณหภูมิห้อง การที่เปอร์เซนต์ของความคลาดเคลื่อนมีค่าน้อยมากก็เพราะอากาศในหลอดนำเสียงมีอุณหภูมิเกือบจะเท่ากันโดยตลอด ผลการคำนวณกับการทดลองจึงมีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด

อีกประการหนึ่ง การที่เปอร์เซนต์ของความคลาดเคลื่อนมีค่ามากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและต่ำลงนั้น ก็เนื่องมาจากเหตุอย่างน้อยสองประการคือ ประการแรกอุณหภูมิอากาศในหลอดตอนที่อยู่ในหม้อต้มน้ำกับตอนที่อยู่ไกลปากหลอดยังมีค่าแตกต่างกันมากขึ้น เมื่อทำให้หลอดนำเสียงยิ่งมีอุณหภูมิต่างไปจากอุณหภูมิห้องมากขึ้น ประการที่สองเกี่ยวกับการขยายตัวและหดตัวของหลอดนำเสียง ความยาว 91 ซม. ของหลอดนำเสียงที่ในนั้นวัดที่อุณหภูมิห้อง ถ้าทำให้หลอดนำเสียงแช่อยู่ในน้ำเดือดความยาวของมันจะเพิ่มขึ้นประมาณ $L_a \Delta t = 91 \times 10^{-2} \times 14 \times 10^{-6} \times 70$ เมตร หรือเท่ากับ 8.92×10^{-4} เมตร ความยาวที่เพิ่มขึ้นนี้มีไคนำไปพิจารณาด้วยเมื่อกำหนดหาความเร็วเสียงจากสมการ (4) จึงทำให้คำนวณค่าจากการทดลองน้อยกว่าค่าที่ควรจะเป็นอยู่ 0.098 % ที่อุณหภูมิต่ำ ๆ ความยาวที่เปลี่ยนไปนี้จะทำให้คำนวณค่าจากการทดลองต่างจากค่าที่ควรจะเป็นน้อยกว่า 0.098 % เพราะที่อุณหภูมิต่ำ ๆ นั้น Δt มีค่าน้อยกว่า 70°C ดังนั้นเกี่ยวกับการขยายตัวและหดตัวของหลอดนำเสียงที่ใช้จึงมีส่วนช่วยให้เปอร์เซนต์ของความคลาดเคลื่อนมีค่ามากขึ้นเมื่ออุณหภูมิยิ่งสูงขึ้นหรือยิ่งต่ำลงจากแถบอุณหภูมิห้อง

ความคลาดเคลื่อนของผลการทดลองนอกจากจะมีสาเหตุมาจากระบบของเครื่องมือวัดแล้ว ยังเกิดจากผู้ทดลองเองอีกด้วยคือ เกี่ยวกับการฟังเสียงที่ดังที่สุดจากหูฟัง จากการทดลองฟังเสียงจากหูฟัง เมื่อให้รู้หลอดนำเสียงตรงกันพอดีกับเมื่อรู้หลอดตรงกันครึ่งหนึ่งผู้ฟังจะบอกความแตกต่างของความดังไคยาก ดังนั้นขณะที่ทำการทดลองจริง ๆ ผู้ทดลองอาจวัดจำนวนรอบของจานหมุนในขณะที่

ไคยีนเสียงดังในหูฟังทั้ง ๆ ที่เสียงที่ไคยีนนั้นมีไซ้เสียงที่ดังที่สุด แต่เป็นเสียงดังใกล้เคียงกันและเกิดในขณะที่รูปบนขอบจานเสียงเคลื่อนผ่านรูตลอดนำเสียงไปอย่างช้า ๆ จำนวนรอบของจานจึงไม่ถูกต้อง คือจานจะเร็วหรือช้าไปเล็กน้อย วิธีแก้ปัญหานี้นี้อาจทำได้สองวิธีคือใช้ oscilloscope สังเกตแอมพลิจูดของคลื่นเสียงที่ป้อนจากหูฟัง ให้ปรากฏวงที่มีความมากที่สุด อีกวิธีหนึ่งใช้วิธีฟัง เสียงที่ดังจากหูฟังนั้นให้ไคยีนอยู่นานที่สุดมันอาจเป็นเสียงที่ดังที่สุดหรือไม่ก็ตามแต่ถ้าไคยีนอยู่ไคยีนานที่สุดแสดงว่าจานกำลังหมุนด้วยความเร็วคงที่ และความเร็วนี้เป็นความเร็วที่จะนำไปใช้ในการคำนวณจากสมการ (4) นั้นเอง

3. แนวการสอนเรื่องคลื่นเบื้องต้นโดยใช้อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นประกอบการสอน

3.1 แนวการสอนเรื่องคลื่นเบื้องต้นโดยใช้ wave machine ประกอบการสอน

3.1.1/ แนวการสอนเรื่องการเคลื่อนที่แบบ S.H.M. โดยมี wave machine เป็นอุปกรณ์การสอน ควรเริ่มต้นจากการให้ความหมายของการเคลื่อนที่แบบ S.H.M. โดยใช้ไคอะแกรมของ reference circle ของมันตามปกติ และให้ความหมายของศัพท์เฉพาะที่จำเป็นในเรื่องนี้ไว้ในขณะนั้นด้วย เช่น displacement แอมพลิจูด phase angle ความถี่ และ period เป็นต้นต่อไปก็แสดงวิธาสมการของการเคลื่อนที่แบบ S.H.M. คือ $y = a \sin \omega t$ เสร็จแล้วจึงนำ wave machine มาสาธิตให้เห็นจริงอีกครั้งหนึ่ง การสาธิตนี้ให้เริ่มต้นด้วยการหมุนทรงกระบอกที่ทำให้เกิด Standing wave ก่อนเพราะอนุภาคเหล่านั้นมีแอมพลิจูดหลายขนาดและเคลื่อนที่ไม่สับสนเช่นการเคลื่อนที่ใน Traveling wave จะทำให้นักเรียนสังเกตได้ง่ายกว่า ทำให้นักเรียนสังเกต displacement และแอมพลิจูดของอนุภาคที่ 1 และของอนุภาคอื่น ๆ อาจให้นักเรียนบางคนลองวัด displacement ของอนุภาคใดอนุภาคหนึ่งที่เวลาต่าง ๆ กันบ้าง หลังจากนั้นครูก็ตั้งปัญหาถามว่านักเรียนมั่นใจหรือว่าอนุภาคที่เคลื่อนไปกลับมาอยู่ตรงที่เคลื่อนที่แบบ S.H.M. มีวิธีแสดงให้เห็นได้อย่างไร ถ้านักเรียนแก้ปัญหาไม่ได้ครูต้องพยายามให้ข้อสังเกตหลาย ๆ อย่างเกี่ยวกับสมการข้างต้น เช่น ถ้ามายังถึงความหมายของสมการหรือให้เขียนกราฟของสมการเป็นต้น จนทำให้นักเรียนคิดสำเร็วจึงว่าต้องวัด displacement ขณะที่ phase ค่าต่าง ๆ ของอนุภาคที่กำลังสังเกตเพื่อดูว่าเป็นไปตามสมการข้างต้นหรือไม่ ในการจัด wave machine เพื่อให้นักเรียนได้ทดลองวัด displacement ดังกล่าวนั้นให้ครูหมุนทรงกระบอกไปจนสังเกตเห็นอนุภาคใดอนุภาคหนึ่งเคลื่อนที่ครบหนึ่งรอบพอดีก็ให้ทำเครื่องหมายจุดตั้งต้นและจุดสุดท้ายของช่วงที่หมุนนั้นไว้ แบ่งช่วงระหว่างเครื่องหมายออกเป็น 12 ส่วน แสดงว่าแต่ละส่วนนั้นทำให้อนุภาคมี phase เพิ่มขึ้น 30° นักเรียนควรได้รับการชี้แจงให้เข้าใจเหตุผลของการทำเช่นนี้ด้วย เสร็จแล้วจึงให้นักเรียนโคลงมือหมุนทรงกระบอกไปที่ละช่วงและวัด displacement ของอนุภาคใดอนุภาคหนึ่งไปด้วยทุกครั้ง นำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟระหว่าง y กับ t ในกระดาษค่าและนำค่าที่คำนวณได้จากสมการ $y = a \sin \omega t$ ไปเขียนกราฟลงในแกนอันเดียวกันนั้นด้วย จะทำให้นักเรียนเข้าใจความหมายของสมการและความหมายของกราฟนั้นได้ดียิ่งขึ้น สิ่งที่ครูควรเน้นอีกอย่างหนึ่งในตอนนี้อาจการหา phase angle ของอนุภาคที่กำลังเคลื่อนที่เพราะเมื่อนักเรียนเข้าใจความหมายของสมการ

$y = a \sin \omega t$ นี้เดี๋ยวยอมคิดได้โดยไม่ยากนักว่าสามารถหาได้จากการวัด displacement และ แอมพลิจูดของอนุภาคนั้นนั่นเอง

สำหรับการสาธิตเพื่อให้เข้าใจความหมายของความถี่และ period นั้นให้นักเรียนคนหนึ่ง เป็นผู้จับเวลา ครูเป็นผู้หมุนทรงกระบอกไปช้า ๆ จนครบรอบซึ่งทำให้อนุภาคสั่นได้สามรอบ แล้วคิดหาความถี่และ period ออกมา ลองเริ่มต้นหมุนใหม่อีกสองสามครั้งโดยหมุนให้เร็วขึ้น และคิดหาความถี่และ period ออกมาอย่างเดิม

เมื่อนักเรียนได้ทดลองพิสูจน์แล้วว่อนุภาคใน wave machine ที่เคลื่อนที่กลับไปกลับมาขึ้น เคลื่อนที่แบบ S.H.M. ครูจึงแนะนำให้ให้นักเรียนพยายามสังเกตอนุภาคเหล่านั้นอย่างระมัดระวังอีกครั้ง หนึ่ง เพื่อเป็นแนวทางในการสังเกตครั้งนี้ของนักเรียนครูควรตั้งคำถามเหล่านั้นขึ้นคือ อนุภาคเคลื่อน ที่กลับไปกลับมาด้วยความเร็วคงที่หรือไม่ ? ตำแหน่งใดที่อนุภาคมีความเร็วสูงสุดและต่ำสุด ? กราฟ ของความเร็วของอนุภาคขณะมี displacement ต่าง ๆ ควรจะมีรูปร่างอย่างไร ? สิ่งนี้นักเรียนคน พบบจากการสังเกตในตอนนี้จะทำให้เข้าใจเรื่องการเคลื่อนที่แบบ S.H.M. ได้มากยิ่งขึ้น และเป็น แนวทางที่จะทำให้เข้าใจความหมายของสมการ $\ddot{x} = -\omega^2 x$ ซึ่งเป็นสมการอธิบายการเคลื่อนที่แบบ S.H.M. อีกรูปหนึ่งได้โดยไม่ยากนักในโอกาสต่อไป

3.1.2 แนวการสอนเรื่อง Traveling waves แนวการสอนเรื่องนี้โดยใช้ wave machine เป็นอุปกรณ์การสอนนั้นควรให้มีกิจกรรมต่อไปนี้คือ การบรรยายของครู การสาธิต โดยใช้อุปกรณ์และการให้นักเรียนค้นคว้ารายละเอียดเพิ่มเติมจากการใช้อุปกรณ์ด้วยตนเอง

สิ่งที่ครูควรบรรยายเบื้องต้นก็คือความหมายของ Traveling transverse waves ในเส้นเชือกโดยสาธิตการทำให้เกิดคลื่นในเส้นเชือกขึ้นมา ซึ่งให้เข้าใจความหมายของคำว่าหลังคลื่น (crest) ท้องคลื่น (trough) ความเร็ว ความถี่และความยาวคลื่นจากคลื่นที่ปรากฏนั้น แต่ สำหรับความเร็ว ความถี่ และความยาวคลื่นไม่อาจมองเห็นได้ชัดเจนได้เพราะคลื่นเคลื่อนที่ไปเร็ว มากจึงควรใช้ wave machine เข้าช่วยในตอนี้ เมื่อครูหมุนทรงกระบอกไปช้า ๆ จะปรากฏหลัง คลื่นและท้องคลื่นเคลื่อนไปข้างหน้าอย่างช้า ๆ เช่นเดียวกับที่ปรากฏบนเชือก ครูอาจหยุดหมุนทรงกระ บอกเพื่อให้นักเรียนได้พิจารณาหลังคลื่นและท้องคลื่นอย่างละเอียดถี่ถ้วนก็ได้ ต่อไปจึงบอกความหมาย ของความเร็วคลื่นและให้นักเรียนหาความเร็วคลื่นจาก wave machine โดยครูทำให้เกิดคลื่นเคลื่อน จากอนุภาคที่ 1 - 13 ด้วยความเร็วต่าง ๆ กันหลาย ๆ ครั้ง ทุกครั้งให้นักเรียนจับเวลาและคำนวณ

ความเร็วคลื่นออกมา สำหรับความถี่คลื่นสำคัญให้เห็นได้โดยให้นักเรียนเลือกกำหนดจุดคงที่ในช่วงของอนุภาคที่ 1 - 13 ขึ้นจุดหนึ่งสำหรับแต่ละคนแล้วให้ก้อยลง เกตว่ามีคลื่นที่ลูกเคลื่อนผ่านจุดคงที่นั้น ๆ ไปในเวลาที่ได้ คุญเป็นผู้ทำให้เกิดคลื่น ทดลองหาความถี่คลื่นหลาย ๆ ครั้ง โดยแต่ละครั้งครูเปลี่ยนความเร็วในการหมุนทรงกระบอกของ wave machine ด้วย สำหรับความยาวคลื่นเมื่อครูบอกความหมายให้ทราบแล้วก็หมุนทรงกระบอก wave machine ไปให้ปรากฏรูปแบบคลื่นลักษณะใดก็ได้แล้วให้นักเรียนสังเกตว่าอนุภาคใด in phase กันบ้าง เมื่อนักเรียนสังเกตพบแล้วจึงวัดระยะระหว่างอนุภาคที่ in phase กันนั้นเป็นความยาวคลื่น ครูเปลี่ยนรูปแบบคลื่นไปเป็นแบบอื่นต่อไปอีกและให้นักเรียนคิดและทำเช่นเดิมเพื่อย้ำให้เข้าใจยิ่งขึ้น

ต่อไปครูแนะนำให้นักเรียนใคร่จุกกับคลื่นอีกชนิดหนึ่งคือ Traveling longitudinal waves การสาธิตประกอบการบรรยายลักษณะของคลื่นชนิดนี้ในตอนแรกคือการทำให้เกิด Traveling longitudinal waves ขึ้นในสปริง และเปลี่ยนมาใช้ wave machine แทนเพื่อให้มองเห็นส่วนอัด (compression) และส่วนขยาย (rarefaction) ในคลื่นได้อย่างชัดเจน การสาธิตให้เข้าใจความหมายของความเร็ว ความถี่ และความยาวคลื่นก็ใช้วิธีการทำนองเดียวกันกับในตอนแรก

เมื่อนักเรียนใคร่จุกคลื่นสองชนิดนี้อย่างกว้าง ๆ แล้ว จึงเริ่มให้นักเรียนได้เรียนรู้สมการที่ใช้แทนคลื่นทั้งสองชนิดคือ $y = y_0 \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$ จากการบรรยายต่อนั้นจึงนำเอา wave machine มาสาธิตให้นักเรียนดูอีกครั้งหนึ่งเพื่อให้เข้าใจความหมายของสมการนี้ดีขึ้น การสาธิตเพื่อการนี้ทำโดยครูหมุน wave machine จากตำแหน่งเริ่มต้นไปจนกระทั่งทำให้คลื่นวิ่งจากอนุภาคที่ 1 ถึงอนุภาคที่ 13 พอดีจึงหยุดหมุน แสดงว่าคลื่นถูกส่งออกมาในเวลา $t = T$ พอดี ครูให้นักเรียนสังเกต displacement ของอนุภาคต่าง ๆ ทั้ง 26 อนุภาค (อนุภาคทั้งสองแถว) ในแต่ละแถวจะพบว่ามีขนาดเท่ากันบางตรงกันบาง วัดขนาด displacement (y) ของอนุภาคเหล่านั้นและระยะจากจุดสมมูลของอนุภาคที่ 1 ถึงจุดสมมูลของอนุภาคทั้งหลาย (x) แล้วนำมาเขียนกราฟ (เขียนกราฟสำหรับ Traveling longitudinal wave และ Traveling transverse wave แยกกัน) ต่อไปนำค่า ที่คำนวณได้จากสมการของคลื่นโดยตรงมาเขียนกราฟกับค่า x ของแต่ละอนุภาคที่ได้ โดยให้แกนร่วมกันกับกราฟที่เขียนไว้แล้ว เส้นกราฟที่ได้จากการทดลองและที่ได้จากการคำนวณตามสมการของคลื่นนั้นจะให้นักเรียนเข้าใจความหมายประการหนึ่งของสมการคลื่นได้ คือ แสดงให้รู้ว่าอนุภาคต่าง ๆ มี displacement เท่าไรในขณะใดขณะหนึ่ง ส่วนความหมายอีก

ประการหนึ่งคือ แสดงให้รู้ว่าในขณะต่าง ๆ อนุภาคหนึ่งมี displacement เท่าไรนั้นวิธีสาธิตเพื่อให้ นักเรียนเข้าใจความหมายอันนี้ได้โดยทำให้ wave machine ส่งคลื่นออกจากอนุภาคที่ 1 จนถึงอนุภาคที่ 13 แสดงว่าส่งคลื่นมาแล้วในเวลา T ให้นักเรียนคอยสังเกตว่าเมื่อเวลา $\frac{5T}{4}, \frac{3T}{4}, \frac{7T}{4}$ และ $2T$ อนุภาคที่ 13 ($x=\lambda$) จะมี displacement เท่าไร แล้วกรุณาคอย ๆ หมุนทรงกระบอก wave machine ไปสังเกตอนุภาคที่ 1 ให้มันเคลื่อนต่อไปอีกหนึ่งรอบโดยทุก ๆ $\frac{1}{4}$ รอบที่เพิ่มขึ้นใหม่นี้ ให้วัด displacement ของอนุภาคที่ 13 ไว้ เพราะทุก ๆ $\frac{1}{4}$ รอบที่เพิ่มขึ้นนั้นคือเวลา $\frac{T}{4}$ ที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง นำค่าที่ได้มานี้มาเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณหาจากสมการคลื่นโดยตรง ผลการเปรียบเทียบจะทำให้ นักเรียนเข้าใจความหมายประการที่สองของสมการคลื่นได้ตามต้องการ

3.1.3 แนวการสอนเรื่อง Standing waves แนวการสอนเรื่องนี้โดยใช้ wave machine เป็นอุปกรณ์ประกอบการสอนนั้นควรใช้การบรรยาย การสาธิตและการให้นักเรียนค้นคว้าทดลองเอง เช่นเดียวกับที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.12

การบรรยายควรเริ่มต้นด้วยการบอกความหมายของ Standing wave in a string และ Standing longitudinal waves แล้วสาธิตคลื่นทั้งสองชนิดนี้ให้นักเรียนดูโดยใช้ Melde's experiment และ Kundt's tube แนะนำให้นักเรียนรู้จักกับ displacement node และ displacement antinode จากการทดลองนั้น แต่เนื่องจากการทดลองทั้งสองไม่สามารถทำให้นักเรียนมองเห็นความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาคได้จึงควรนำ wave machine มาสาธิตต่อไปโดยหมุนทรงกระบอกของ wave machine ไปช้า ๆ อาจมีนักเรียนบางคนกล่าวว่าคลื่นที่ปรากฏนี้มีทั้งคลื่นหลังคลื่นหรือมีลูกคลื่นคล้ายเหมือน Traveling wave ที่ได้ดูมาแล้ว ครูไม่ควรบอกข้อแตกต่างที่มีอยู่โดยตรงแต่ควรให้นักเรียนสังเกตพบด้วยตนเองโดยครูเปลี่ยนคลื่นบน wave machine ให้ปรากฏ Traveling waves ให้ดูอีกครั้งหนึ่ง แต่ก็อาจจะยังมีนักเรียนที่สังเกตความแตกต่างของ Traveling waves กับ Standing waves ไม่พบครูก็ยังไม่ควรบอกให้ทราบในตอนนี้อยู่ เพราะยังมีกิจกรรมให้นักเรียนทำเกี่ยวกับเรื่องนี้อีกในตอนท้าย ต่อไปครูแนะนำให้นักเรียนรู้จักกับ pressure node และ pressure antinode ใน Standing longitudinal waves และแสดงสาเหตุของการเกิดให้ทราบด้วย wave machine ต่อจากนั้นจึงบรรยายถึงสมการของ Standing waves คือ $y = Y \sin \frac{2\pi t}{T} \cos \frac{2\pi x}{\lambda}$ แล้วจึงใช้ wave machine สาธิตประกอบการอธิบายความหมายของสมการนี้ว่าหมายถึงเกี่ยวกับที่ใช้สาธิตเพื่ออธิบายความหมายของสมการ $y = y_0 \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$

ที่กล่าวมาแล้วคือให้เวลาคงที่แล้วสังเกต displacement ของอนุภาคต่าง ๆ ครั้งหนึ่ง กับให้ x คงที่ คือพิจารณาที่อนุภาคใดอนุภาคหนึ่งแล้วสังเกต displacement ของอนุภาคนั้นเมื่อเวลาต่าง ๆ อีก ครั้งหนึ่ง ในกรณีของ Standing waves นี้ครูควรให้นักเรียนลองใช้สมการคลื่นทำนายการเคลื่อนที่ของ wave machine ที่มี displacement เป็นศูนย์ตลอดเวลา และอนุภาคใดบ้างมีแอมพลิจูดมากที่สุด แล้วใช้ wave machine พิสูจน์คำตอบที่คำนวณได้อีกทีหนึ่ง จะทำให้นักเรียนเข้าใจความหมาย และรู้จักใช้สมการของ Standing waves ได้ดีขึ้น

แนวการสอนเรื่องคลื่นเบื้องต้นที่กล่าวมาแล้วนั้นเป็นการบรรยายประกอบการสาธิตด้วย wave machine แต่นักเรียนควรได้มีโอกาสหาคำตอบด้วยตัวเองเพิ่มเติมและสรุปความรู้ให้เป็นหมวดหมู่ ด้วยการทดลองใช้ wave machine ด้วยตนเองอีกด้วย กิจกรรมอันนี้ครูควรตั้งปัญหาไว้เป็นข้อ ๆ ให้นักเรียนไปทดลองเพื่อหาคำตอบด้วยตนเอง ตัวอย่างของปัญหาค้างกล่าวคือ "เมื่อตัวกลางชนิดหนึ่ง ถูกรบกวนด้วยคลื่นแต่ละชนิดดังแสดงใน wave machine นั้น จงตอบปัญหาเกี่ยวกับอนุภาคของตัวกลาง นั้นดังต่อไปนี้"

อนุภาคใดมีความเร็วมากที่สุดและน้อยที่สุด

อนุภาคใดมีแอมพลิจูดมากที่สุดและน้อยที่สุด

อนุภาคใดบ้างที่ in phase กัน

อนุภาคใดบ้างที่มี phase ต่างกัน 30° , 90° และ 180°

ถ้า wave machine นี้มีอนุภาคแสดงคลื่นใดอีกหนึ่ง ความยาวคลื่นอนุภาค

ทั้งหมดนั้นมีอนุภาคใดบ้าง in phase กัน และ phase ต่างกัน

30° , 90° , 180°

อนุภาคต่อไปนี้ phase ต่างกันเท่าไร อนุภาคที่ 1 กับอนุภาคที่ 7

อนุภาคที่ 1 กับอนุภาคที่ 13 อนุภาคที่ 4 กับอนุภาคที่ 10 และอนุภาคที่ 3 กับอนุภาคที่ 9

เมื่อเกิด Traveling longitudinal waves ขึ้นที่ตำแหน่งของอนุภาคใด

จะมีความดันสูงสุด และที่ตำแหน่งของอนุภาคใดจะมีความดันต่ำที่สุด

เมื่อเกิด Standing longitudinal waves ขึ้นที่ตำแหน่งของอนุภาคใด

จะมีความดันสูงสุด และที่ตำแหน่งของอนุภาคใดจะมีความดันต่ำที่สุด

ให้อนุภาคที่ 1 เป็นต้นกำเนิดคลื่นส่งคลื่นออกไปในเวลา $3\frac{T}{2}$ จงเปรียบเทียบ displacement ของอนุภาคต่าง ๆ ที่วัดได้ กับที่คำนวณได้จากสมการ

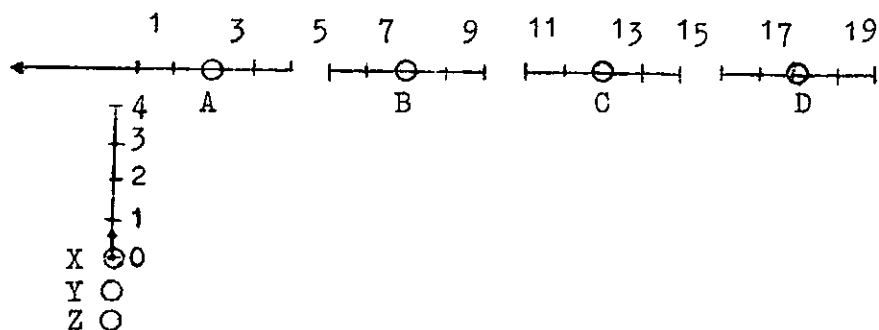
$$y = 3 \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$$

เมื่อเกิด Standing waves ขณะให้อนุภาคที่ 1 เคลื่อนที่ไปได้เวลา $\frac{T}{4}$, $\frac{T}{2}$ และ $2\frac{T}{3}$ จงวัด displacement ของอนุภาคที่ 7 เปรียบเทียบ

กับค่าที่คำนวณได้จากสมการ $y = 3 \sin \frac{2\pi t}{T} \cos \frac{2\pi x}{\lambda}$

3.2 แนวการสอนวิธีวัดความเร็วเสียงที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยใช้เครื่องวัดความเร็วเสียงที่ได้ ออกแบบสร้างขึ้น ในการสอนวิธีวัดความเร็วเสียงที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยใช้เครื่องวัดความเร็วเสียงที่ได้ ออกแบบสร้างขึ้นนั้นผู้สอนควรปฏิบัติตามขั้นทั้ง 3 ดังนี้

ขั้นที่ 1 แนะนำเครื่องมือ ในขั้นนี้ควรให้นักเรียนเข้าใจทฤษฎีการทำงานของเครื่องมือ เสียก่อนเป็นอันดับแรก ซึ่งได้แก่ทฤษฎีที่อธิบายเกี่ยวกับการได้ยินเสียงดังที่สุด ครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ไป กับทฤษฎีที่อธิบายเกี่ยวกับการปรากฏเงาไม้ของวัตถุที่กำลังสั่น ilyukningyounnagrabssang seerjalew jingnannawhaizhagkibsuwanpragobxong krongmoolehnanthaxosuanpragobhelehanan geiyeukbithayyutheobayyapraguakanonraeknan ajajakijakornkoonpansinphoenhannayeehaizhagkibsuwanpragobhelehanan geiyeukbithayyutheobayyapraguakanonraeknan ajajakijakornkoonpansinphoenhannayeehaizhagkibsuwanpragobhelehanan geiyeukbithayyutheobayyapraguakanonraeknan ajajakijakornkoonpansinphoenhannayeehaizhagkibsuwanpragobhelehanan geiyeukbithayyutheobayyapraguakanonraeknan



ภาพประกอบ 24 โคอะแกรมอธิบายการได้ยินเสียงดังที่สุดในแต่ละครั้ง

X, Y และ Z เป็นนักเรียนอีก 3 คน ยืนเป็นแถวตอนหันหน้าเข้าหาแถวแรก X ยืนห่างจากแถวแรกเป็นระยะทาง 4 ก้าว (ให้ก้าวไปก้าวละประมาณ 1 ศอก) เตรียมตัวที่จะก้าวเข้าไปหาแถวข้างหน้า ส่วน Y นั้นยืนอยู่หลัง X เมื่อ X ออกเดินไปแล้ว Y จะต้องเข้าไปยืนแทนที่ X และจะเริ่มออกเดินเมื่อ X เดินไปถึงแถวข้างหน้าแล้ว ส่วน Z ก็ปฏิบัติทำนองเดียวกับ Y คือเมื่อ Y ก้าวเดินไปถึงแถวข้างหน้าแล้ว Z ก็จะเริ่มออกเดินจากจุดที่ X เคยยืนครั้งแรก ให้นักเรียนอีกคนหนึ่งทำหน้าที่นับ 1 - 20 อย่างช้า ๆ เป็นจังหวะสม่ำเสมอและให้ A, B, C, D ก้าวไปทางข้างที่ละก้าวตามจังหวะนับ X เดินเข้าหาแถวข้างหน้าทีละก้าวตามจังหวะนับเช่นเดียวกัน เมื่อกิจกรรมนี้ดำเนินไป นักเรียนจะมองเห็นว่า X, Y และ Z สามารถลอดผ่านช่องว่างระหว่างปลายนิ้วของนักเรียนในแถวข้างหน้าไปได้โดย X ลอดผ่านช่องที่ 5 Y ลอดผ่านช่องที่ 10 และ Z ลอดผ่านช่องที่ 15 ซึ่งแสดงว่าช่วงเวลา X หรือ Y หรือ Z เดินไปถึงช่อง 5 หรือ 10 หรือ 15 ตามลำดับนั้นเท่ากับช่วงเวลาที่เขาเดินไปได้เป็นระยะหนึ่งช่องว่างในแถวนั้นเอง แล้วครูให้นักเรียนเริ่มต้นใหม่ โดยกำหนดให้ A, B, C และ D ก้าวเดินสองก้าวต่อหนึ่งจังหวะ X และ Y ยังคงก้าวเดินตามจังหวะนับทุกครั้ง โดยวิธีนี้นักเรียนจะเห็นว่า X สามารถลอดผ่านช่อง 10 และ Y สามารถลอดผ่านช่อง 20 ไม่ได้ซึ่งแสดงว่าช่วงเวลา X หรือ Y เดินไปถึงช่อง 10 หรือ 20 ตามลำดับนั้นเท่ากับช่วงเวลาที่เขาเดินไปได้เป็นระยะสองช่องว่างในแถวนั้นเอง ถ้าให้ A, B, C และ D ก้าวเดินสามก้าวต่อหนึ่งจังหวะ และให้ X ก้าวเดินตามปกติเหมือนครั้งก่อน ๆ นักเรียนก็จะมองเห็นว่า X จะลอดผ่านช่อง 15 ของแถวไปได้ คำถามที่ควรถามนักเรียนในขณะนี้คือ ถ้ามีนักเรียนอีกหลายคนยืนต่อจาก D ไปอีกโดยยืนกางแขนเช่นเดียวกับช่องที่ Y และ Z จะลอดผ่านคือช่องที่เท่าไร ? ความสัมพันธ์ที่เกี่ยวกับเวลาของการเดินของนักเรียนในแถวเป็นอย่างไร ? คำถามเหล่านี้นักเรียนควรตอบได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ของปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นครั้งก่อน ๆ กับที่เกิดขึ้นในครั้งนี้ เมื่อครูได้เปรียบเทียบให้นักเรียนเห็นว่า X, Y และ Z นั้นทำหน้าที่เป็นพลังงานเสียงแต่ละหน่วยที่เคลื่อนไปตามท่อนำเสียงและช่องว่างในแถวของ A, B, C, D ทำหน้าที่เป็นรูที่ขอบของจานหมุน นักเรียนก็จะเข้าใจได้ว่าเสียงดังที่สุดแต่ละครั้งขณะที่จานกำลังหมุนอยู่นั้นเกิดขึ้นได้อย่างไร และยังเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเดินทางของเสียงกับเวลาในการหมุนของจานได้อีกด้วย

สำหรับการอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดเงาไม้ของลวดที่กำลังสั่นหยุดนิ่งอยู่บนฉากรับแสงนั้น อาจใช้กิจกรรมต่อไปนี้ประกอบการอธิบายได้ คือ ให้นักเรียนสามคนออกมายืนเป็นแถวตอนห่างกันคนละประมาณ

สอง เมตร คนที่หนึ่งมีแผ่นกระดาษกลมสีขาวเล็ก ๆ ติดที่หน้าอกและที่หลังคานละแผ่น ให้เขายืนหมุนตัวไปทีละ 45° ด้วยจังหวะนับ 1 - 2 - 3 ... ซ้ำ ๆ โดยนับเองเบา ๆ ไม่ให้คนอื่นได้ยิน คนที่สองยืนหันหน้าเข้าหาคนที่ 1 ให้นักเรียนคนนี้ก้าวไปทางข้างกลับไปกลับมารอบตำแหน่งที่ยืนเดิมโดยก้าวไปข้างละสองก้าวด้วยจังหวะที่สม่ำเสมอ คนที่สามยืนหันหน้าเข้าหาคนที่หนึ่ง เช่นเดียวกับคนที่สอง แต่เป็นผู้คอยสังเกตแผ่นกระดาษสีขาวอันใดอันหนึ่งที่ติดอยู่กับคนที่หนึ่ง ถ้ามองเห็นแผ่นกลมทั้งแผ่นครึ่งใดก็ให้ยกมือขึ้นเพื่อบอกให้นักเรียนคนอื่น ๆ ในชั้นรู้ด้วย เมื่อทุกอย่างพร้อมแล้วครูก็สั่งให้นักเรียนคนที่ 1 เริ่มหมุนตัวด้วยจังหวะที่เขาับเอง และให้คนที่สอง เริ่มก้าวไปทางข้างตามจังหวะที่ครูยกมือขึ้นลง จังหวะที่ครูให้ในตอนแรกนั้นจะช้ากว่าจังหวะการหมุนตัวของคนที่หนึ่ง ดังนั้นผู้สังเกตวงกลมขาวจะสังเกตเห็นได้และยกมือบอกให้เพื่อนนักเรียนคนอื่น ๆ หราบทุกครั้ง ครูคอย ๆ เพิ่มจังหวะให้เร็วขึ้น ๆ จนกระทั่งคนที่สุดท้ายที่เป็นผู้สังเกตนั้นไม่ยกมือขึ้นเลย นักเรียนก็จะสังเกตเห็นได้ว่าจังหวะที่ครูยกมือขึ้นลงนั้นเท่ากับจังหวะการหมุนตัวของนักเรียนคนแรกพอดี และครูแนะนำให้นักเรียนสังเกตว่าขณะการหมุนตัวและการเคลื่อนกลับไปกลับมานั้นครบรอบพร้อม ๆ กัน ขอสรุปที่ควรจะได้จากนักเรียนในตอนนี้นักคือ "จะมองไม่เห็นวงกลมขาวเลยตลอดเวลาเมื่อความเร็วของการหมุนเท่ากับความเร็วของการเคลื่อนกลับไปกลับมา" ต่อไปครูเริ่มให้จังหวะใหม่โดยเริ่มจากช้ากว่าจังหวะการหมุนตัวของนักเรียนคนแรกแล้วค่อยเร็วขึ้น ๆ จนกระทั่งผู้สังเกตไม่ยกมือขึ้นเลย จังหวะก็ยังถูกทำให้เร็วยิ่งขึ้นไปอีกจนกระทั่งผู้สังเกตไม่ยกมือขึ้นอีกเลยเป็นครั้งที่สอง ครูก็แนะนำให้นักเรียนสังเกตจังหวะและการเคลื่อนที่ของคนทั้งสอง เพื่อนำไปสู่ผลสรุปอีกข้อหนึ่งคือ "จะมองไม่เห็นวงกลมขาวเลยตลอดเวลาเมื่อความเร็วของการหมุนเป็นครึ่งหนึ่งของความเร็วของการเคลื่อนที่กลับไปกลับมา" กิจกรรมนี้ครูอาจจัดแปลงเล็กน้อยเพื่อให้นักเรียนได้ลองทำดูใหม่อีกครั้งหนึ่ง โดยดึงแผ่นกลมสีขาวออกเสียหนึ่งแผ่น เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อสรุปอันใหม่ และเพื่อให้ใกล้เคียงที่สุดกับสิ่งที่เขาต้องปฏิบัติจริง เมื่อใช้เครื่องมือทดลอง ครูควรให้ผู้สังเกตคือนักเรียนคนที่สามเป็นผู้ให้จังหวะของนักเรียนคนที่สองซึ่งหันหน้ากลับมาทางคานคนที่สามแล้ว เมื่อครูสั่งให้คนที่หนึ่งหมุนตัวไปแล้วก็เริ่มสั่งให้คนที่สามให้จังหวะแก่คนที่สองและปรับจังหวะให้พอเหมาะจนกระทั่งตนเองมองไม่เห็นวงกลมขาวเลยตลอดเวลาเป็นครั้งที่หนึ่งและครั้งที่สอง กิจกรรมที่กล่าวมานี้ควรให้นักเรียนคนอื่นได้ลองทำดูด้วยตนเองบ้าง และโดยการเปรียบเทียบกิจกรรมนี้กับหลักเกณฑ์ของเครื่องมือคือให้วงกลมขาวแทนรูสำหรับให้แสงผ่านบนจานหมุน นักเรียนคนที่สองแทนปลายของแท่งโลหะที่กำลังสั่น และนักเรียนคนที่สามแทนผู้ทำการทดลอง ก็จะสามารถทำให้นักเรียนเข้าใจ

ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นมีคัมภีร์อยู่ตลอดเวลาบนฉากรับแสง และเข้าใจหลักเกณฑ์การวัดรอบของจานหมุน โดยอาศัยการสั่นของแท่งโลหะได้

ขั้นที่ 2 รู้จักเครื่องมือ ขั้นนี้เป็นขั้นให้นักเรียนได้สร้างความคุ้นเคยกับเครื่องมือก่อนที่จะลงมือทำการทดลองจริง ๆ กิจกรรมสำหรับให้นักเรียนปฏิบัติในขั้นนี้คือ

ก. การปรับความเร็วมอเตอร์ให้หมุนด้วยความเร็วคงที่ ให้เปิดไฟในห้องทดลองให้แสงไฟฟ้าส่องลงบนจานหมุนที่ติดกับมอเตอร์ ปีกวงจรของมอเตอร์ทำให้จานหมุนไปอย่างช้า ๆ ก่อนแล้วค่อย ๆ เพิ่มให้เร็วขึ้นจนสังเกตเห็นรูบนขอบของจานเคลื่อนที่ช้าลง ๆ จนหยุดนิ่ง ถ้าความเร็วของจานเปลี่ยนไปจากขณะนั้นเพียงเล็กน้อยผู้ที่ปรากฏให้เห็นจะเริ่มเคลื่อนที่อีก ให้นักเรียนพยายามปรับมุมบังคับความเร็วมอเตอร์เพื่อให้ปรากฏเหล่านี้หยุดนิ่งได้นานที่สุด

ข. การฟังเสียงที่ดังที่สุดจากหูฟัง ให้ปีกวงจรของคันกำเนิดเสียงแล้วฟังเสียงจากหูฟัง เปรียบเทียบเสียงที่ได้ยินขณะรูบนขอบจานตรงกับรูของหลอดนำเสียงพอดี กับขณะเมื่อรูบนขอบจานไม่ตรงกับรูของหลอดนำเสียงเลย เมื่อสังเกตพบความแตกต่างแล้วก็ให้ปีกวงจรมอเตอร์หมุนจานเพิ่มความเร็วจานขึ้นทีละน้อย ๆ จนปรากฏเสียงดังเป็นห่วง ๆ เกิดขึ้น ปรับความเร็วจานต่อไปทำให้ห่วงเสียงดังกล่าวนั้นห่างมากขึ้น ๆ จนในที่สุดได้ยินแค่เสียงดังที่สุดเหมือนที่สังเกตพบในตอนแรก พยายามปรับความเร็วจานให้คงที่ไว้เพื่อให้ได้ยินเสียงเช่นนั้นได้นานที่สุด ลองเพิ่มความเร็วจานให้มากขึ้นอีกจนกระทั่งได้ยินเสียงดังที่สุดอีกเป็นครั้งที่สอง และพยายามปรับความเร็วจานให้คงที่ไว้เพื่อให้ได้ยินเสียงเช่นนั้นได้นานที่สุดเช่นเดียวกัน

ค. การปรับความถี่ของ เส้นลวดเพื่อให้เกิดเงามืดหยุดนิ่งบนฉากรับแสง ให้ปีกวงจรหลอดไฟจะปรากฏเห็นที่สว่างรูปกลมบนฉากในกล่องมืด ตั้งความเร็วจานหมุนไว้ขนาดหนึ่ง ปีกวงจรเครื่องสั่นลวด และเลื่อนเครื่องสั่นลวดจากขวาสุดเข้ามาเพื่อหาตำแหน่งที่จะทำให้เกิดเงามืดหยุดนิ่งบนฉาก เมื่อได้ตำแหน่งที่ต้องการแล้วลองเลื่อนเครื่องสั่นลวดต่อไปอีกเพื่อหาตำแหน่งที่จะทำให้เกิดเงาอื่นอีกหลาย ๆ ครั้ง ลองเปลี่ยนความเร็วจานไปที่ค่าอื่น ๆ บ้างและเลื่อนเครื่องสั่นเส้นลวดหาตำแหน่งที่ต้องการอีกหลาย ๆ ครั้งเช่นเดียวกัน

ง. การทดลองหาความเร็วเสียงในอากาศที่อุณหภูมิห้อง กิจกรรมข้อนี้เป็น การนำเอาทักษะที่ได้จากกิจกรรมข้อ ก ข และ ค มาใช้ให้สัมพันธ์กัน คือให้ปีกวงจรคันกำเนิดเสียง ฟังเสียงจากหูฟังแล้วทำให้จานหมุนด้วยความเร็วที่ค่อย ๆ เพิ่มขึ้น ๆ จนเริ่มได้ยินเสียงดังเป็น

ห้วง ๆ จึงปิดวงจร เครื่องสั่นลวดและปรับท่าแหน่งที่จะทำให้ปรากฏเงามืดหยุคหนึ่งบนฉากในทันทีที่ไคยีนเสียงดังที่สุดอย่างสม่ำเสมอ ลองเปลี่ยนท่าแหน่งเครื่องสั่นลวดเพื่อให้เกิดเงามืดหยุคหนึ่งครั้งที่สองบ้าง และลองเพิ่มความเร็วจนต่อไปจนกระทั่งไคยีนเสียงดังที่สุดเป็นครั้งที่สอง เลื่อนเครื่องสั่นลวดไปอยู่ในท่าแหน่งที่จะเกิดเงามืดหยุคหนึ่งครั้งที่หนึ่งและครั้งที่สองอีกครั้งหนึ่ง นำข้อมูลต่าง ๆ ที่บันทึกได้ไปคำนวณหาความเร็วเสียงจากสมการ (9) และ (10)

ขั้นที่ 3 ปฏิบัติการทดลอง ขั้นนี้ให้ทำการทดลองหาความเร็วเสียงในอากาศที่อุณหภูมิต่าง ๆ ตั้งแต่ $0 - 100^{\circ}\text{C}$ โดยใช้น้ำแข็งในหม้อต้มน้ำของ เครื่องมือประมาณ $1/2$ หม้อ เติมน้ำอีกประมาณ $1/4$ หม้อ แล้วยกขึ้นวางบนเตาต้มน้ำไฟฟ้าเพื่อต้มให้ร้อนต่อไป เมื่ออุณหภูมิอากาศในหม้อมีค่าตามต้องการแล้วให้ปฏิบัติการทดลองตามวิธีที่กล่าวไว้แล้วในขั้นที่ 2 ง. ต่อไป

บทที่ 5

สรุปและเสนอแนะ

เนื่องจากแนวการสอนและการใช้อุปกรณ์การสอนที่เหมาะสมเป็นสิ่งจำเป็นอย่างหนึ่งสำหรับการเรียนการสอนวิทยาศาสตร์ให้ได้ดี เรื่องคลื่นซึ่งเป็นเรื่องสำคัญเรื่องหนึ่งในวิชาฟิสิกส์แขนงต่าง ๆ ก็ควรจะมีแนวการสอนและอุปกรณ์การสอนที่เหมาะสมเช่นเดียวกัน ผู้เขียนจึงได้ทำการศึกษาค้นคว้าเรื่องนี้โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาแนวการสอนเรื่องคลื่นเบื้องต้น ออกแบบสร้างและศึกษาอุปกรณ์ที่จะนำไปใช้ประกอบการสอนเรื่องคลื่นเบื้องต้น และเสนอหลักเกณฑ์, วิธีสร้าง เทคนิคการทดลอง รวมทั้งแนวการสอนเรื่องคลื่นเบื้องต้นที่ใช้อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นประกอบการสอน การศึกษาค้นคว้าเรื่องนี้จะทำให้มองเห็นแนวการสอนและการใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ ประกอบการสอนเรื่องคลื่นเบื้องต้นที่ใชกันโดยทั่วไปซึ่งเป็นแนวทางใหญ่สอนเรื่องนี้สามารถวางแนวทางการสอน และออกแบบสร้างอุปกรณ์การสอนของตนเองให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

สำหรับอุปกรณ์ที่จะออกแบบสร้างขึ้นในครั้งนี้จะสร้างจากหลักเกณฑ์ทางฟิสิกส์ง่าย ๆ คำนี้ถึงความประหยัดในเรื่องการใช้วัสดุ และให้สามารถนำไปใช้เป็นอุปกรณ์การสอนในเรื่องต่อไปนี้ได้คือ Simple harmonic motion, Transverse waves in a string, Standing waves in a string Longitudinal waves, Standing longitudinal waves, Velocity, Frequency, Wavelength and Determination of velocity of sound in an air column.

อุปกรณ์ที่ออกแบบสร้างขึ้นได้แก่ wave machine และเครื่องวัดความเร็วเสียงในอากาศที่อุณหภูมิต่าง ๆ

wave machine เป็นเครื่องกลที่สร้างขึ้นโดยอาศัยการเคลื่อนที่ของรูป sine curve บนผิวของทรงกระบอกที่กำลังหมุนรอบแกนไปมา จึงทำให้แกนอนุภาคเคลื่อนที่กลับไปกลับมาในแนวราบ และอาศัยการแกว่งของคานงอรูปมุมฉากรอบจุดหมุนที่มุมฉาก เปลี่ยนแนวการเคลื่อนที่ในแนวราบของแกนอนุภาคนั้น มาเป็นการเคลื่อนที่ของแกนอนุภาคอีกอันหนึ่งในแนวตั้ง เครื่องกลนี้จึงมีอนุภาคจุดหนึ่งเคลื่อนที่แบบ S.H.M. ในแนวราบและอีกจุดหนึ่งเคลื่อนที่แบบ S.H.M. ในแนวตั้งสามารถแสดงความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ของอนุภาคตัวกลางเมื่อเกิด Transvers waves, Longitudinal

waves และ Standing waves ขึ้นในตัวกลางนั้นได้ เครื่องกลนี้จึงอาจนำมาใช้เป็นอุปกรณ์การสอนเรื่องคลื่นเบื้องต้นในหัวข้อเหล่านี้ได้คือ Simple harmonic motion, Transverse waves in a string, Standing wave in a string, Longitudinal waves, Standing longitudinal waves, Velocity, Frequency and Wavelength

เครื่องวัดความเร็วเสียงในอากาศที่อุณหภูมิต่าง ๆ อุปกรณ์นี้สร้างขึ้นโดยใช้หลักการทำให้เสียงถูกส่งออกไปเป็นห่วง ๆ แล้ววัดระยะทางระหว่างเสียงแต่ละห่วง กับเวลาของการส่งเสียงออกไปแต่ละห่วง อุปกรณ์นี้จึงประกอบด้วยจานกลมมีรูหลายรูอยู่ตรงขอบแต่ละรูห่างเท่ากันและมีหลอดนำเสียงสามหลอดสำหรับนำเสียงจากต้นกำเนิดเสียง ไปเข้าหูฟัง หลอดนำเสียงอันหนึ่งถูกทำให้ร้อนในหม้อต้มน้ำเพื่อเปลี่ยนอุณหภูมิของอากาศในหลอดนั้น ปลายที่จอกันของหลอดนำเสียงทั้งสามถูกกั้นไว้ด้วยจานกลมโดยให้รูที่อยู่ตรงขางกันบนจานกลมตรงกับปลายที่จอกันของหลอดนำเสียงทั้งสองแห่งพอดี เมื่อทำให้จานหมุนไปด้วยความเร็วที่ทำให้ได้ยินเสียงจากหลอดนำเสียงอันหนึ่งถึงขีดที่สุด ก็จะสามารถหาความเร็วเสียงที่อุณหภูมินั้นได้ ทั้งนี้ต้องรู้ความเร็วของจานที่หมุนด้วย

การวัดความเร็วของจานที่กำลังหมุนโดยใช้หลักการทำให้เกิดไฟกระพริบที่มีความถี่เท่ากับความเร็วในการหมุนของจาน แล้วอาศัยการสั่นของหลอดที่ตรงปลายข้างหนึ่งมาปรับความถี่ให้เท่ากับความถี่ของไฟกระพริบอีกทีหนึ่ง เมื่อรู้ความถี่ของเส้นหลอดก็จะทำให้รู้ความเร็วในการหมุนของจานได้ เครื่องมือนี้สามารถนำไปใช้วัดความเร็วเสียงในอากาศในช่วงอุณหภูมิ $0 - 100^{\circ}\text{C}$

ผลการทดสอบอุปกรณ์นี้ว่าใช้ได้ คือ wave machine แสดงลำดับการเคลื่อนที่ของอนุภาคโคจรตามสมการของคลื่นนั้น ๆ ในขอบเขตที่สามารถนำไปใช้เป็นอุปกรณ์การสอนได้ ส่วนเครื่องวัดความเร็วเสียงวัดได้ถูกต้องตามทฤษฎีประมาณ 95 เปอร์เซ็นต์ สามารถนำไปให้นักเรียนใช้ทดลองในห้องปฏิบัติการได้

สำหรับแนวการสอนเรื่องคลื่นเบื้องต้นโดยนำเอา wave machine เป็นอุปกรณ์การสอนนั้น ไควางแนวการสอนให้ประกอบด้วยกิจกรรมสามอย่างคือ การบรรยายความหมายของคำนิยามต่าง ๆ การใช้ wave machine สาธิตประกอบการบรรยายและการให้นักเรียนได้ทบทวน สรุปความรู้เป็นหมวดหมู่หรือค้นคว้าเพิ่มเติมจากการทดลองใช้ wave machine ด้วยตนเองอีกครั้งหนึ่งโดยครูมีคำถามให้ เป็นข้อ ๆ ส่วนแนวการสอนวิธีวัดความเร็วเสียงในอากาศที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยใช้เครื่องมือที่สร้างขึ้นนั้นให้ครูแนะนำเครื่องมือเกี่ยวกับทฤษฎีและส่วนประกอบของเครื่องมือ แล้วให้นักเรียนได้

ทดลองด้วยตนเองในแต่ละระบบของ เครื่องมือเสียก่อน เมื่อนักเรียนคุ้นเคยกับเครื่องมือแล้วจึงให้ลงมือทำการทดลองอย่างจริงจังได้

ผลการศึกษารั้วนี้ทำให้ทราบว่าแนวการสอนเรื่องคลื่นเบื้องต้นนั้นใช้วิธีการสาธิตและให้นักเรียนได้ทำการทดลองด้วยตนเองเป็นส่วนใหญ่ อุปกรณ์ที่ใช้กันมากคือ เชือก สปริง และ ripple tank

สำหรับ wave machine และเครื่องวัดความเร็วเสียงในอากาศที่อุณหภูมิต่าง ๆ ที่ออกแบบสร้างขึ้นมานั้นก็เป็ผลอีกประการหนึ่งของการศึกษารั้วนี้ด้วย

ข้อเสนอแนะ

1. wave machine ควรปรับปรุงให้สามารถหมุนทรงกระบอกได้เร็วจนกระทั่งมองเห็นอนุภาคที่เคลื่อนที่อยู่เป็นปรากฏเป็นพิศดติดต่อกัน จะทำให้มองเห็นคลื่นคล้ายของจริงมากขึ้น เช่นทำให้มองเห็นคล้าย Standing waves ในเส้นเชือกมากที่สุด
2. ระบบวัดรอบของจานหมุนในเครื่องวัดความเร็วเสียง อาจใช้สปริงแทนเส้นลวดคือ นำปลายหนึ่งของสปริงผูกติดกับแกนมอเตอร์ อีกปลายหนึ่งผูกติดกับตุ้มน้ำหนักเล็ก ๆ เมื่อนมอเตอร์หมุนแรงหนีศูนย์กลางจะทำให้ตุ้มน้ำหนักถึงสปริงให้ยืด น้ำหนักของตุ้มมาไว้รวมกวางจะสามารถหาความเร็วในการหมุนของจานได้
3. เครื่องวัดความเร็วเสียงสามารถใช้วัดความเร็วเสียงที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 100°C ได้ถ้าใช้หลอดแก้ว เป็นหลอดนำเสียงและมีฉนวนความต้านทานซึ่งพันไว้โดยรอบหลอดแก้วเป็นตัวให้ความร้อน
4. ควรมีการศึกษานวการสอนและการสร้างอุปกรณ์การสอนวิชาวิทยาศาสตร์ ในหัวข้อเรื่องอื่น ๆ ด้วย
5. โรงเรียนใดที่มี Workshop อยู่แล้วควรให้มีเจ้าหน้าที่จัดทำอุปกรณ์อยู่ด้วยเพื่อรับทำอุปกรณ์ต่าง ๆ ตามที่ครูวิทยาศาสตร์ออกแบบให้ วิธีการเช่นนี้จะทำให้ครูวิทยาศาสตร์สนใจคิดออกแบบอุปกรณ์ต่าง ๆ มากขึ้น เพราะไม่ต้องลงมือทำเอง ปัญหาการขาดอุปกรณ์การสอนในเรื่องต่าง ๆ ก็ จะหมดไป

นรรณนุกรน

บรรณานุกรม

- ครุฑพุ่มหวั่น, พระ วิชาฟิสิกส์เบื้องต้น เล่ม 4 โรงพิมพ์พาณิชย์เจริญ 2494, หน้า 6.
- พิทักษ์ รัชพลเดช นโยบายการศึกษาฝ่ายวิทยาศาสตร์ โรงเรียนสตรีในศึกษา 2513, หน้า 4.
- ยูเนสโก การสอนวิทยาศาสตร์ทั่วไปสำหรับโรงเรียนมัธยมศึกษาในประเทศไทย ประณีตโกมารกุล
ณ นคร และคนอื่น ๆ แปล สำนักงานเลขาธิการคณะกรรมการแห่งชาติว่าด้วยการศึกษา
วิทยาศาสตร์และวัฒนธรรมแห่งสหประชาชาติ 2507, หน้า 12.
- ยูเนสโก คู่มือการสอนวิทยาศาสตร์ พิมพ์ กลกิจ แปล สำนักงานเลขาธิการคณะกรรมการ
แห่งชาติว่าด้วยการศึกษาวิทยาศาสตร์และวัฒนธรรมแห่งสหประชาชาติ 2508, หน้า 1.
- ศึกษาธิการ, กระทรวง กรมวิชาการ รายงานการวิจัยเกี่ยวกับการสอนวิทยาศาสตร์ใน
สหรัฐอเมริกา โรงพิมพ์การศาสนา 2510, หน้า 6-24.
- ศึกษาธิการ, กระทรวง กรมวิชาการ รายงานการสัมมนาศึกษานิเทศก์และครูวิทยาศาสตร์
ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย กรมวิชาการ 2509, หน้า วม. 1-1 หน้า 33-39.
- สนั่น สุมิตร "สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี" วารสารคณะกรรมการ
แห่งชาติว่าด้วยการศึกษา ฯ สหประชาชาติ 1: 62 มกราคม 2515.
- สังวาล เพ็งพัก การสร้างและศึกษาชุดทดลองสำหรับใช้ในการเรียนการสอนวิชาฟิสิกส์เรื่อง
คลื่นและเสียง ปริญญาโท กศ.ม. วิทยาลัยวิชาการศึกษาประสานมิตร 2514, ๐
68 หน้า.

Andrade, E.N. da C., Physics for the Modern World, Great Britain, 1962, p. 58.

Bergvall, Par, and Joel, Nahum, Unesco Pilot Project on New Methods and Techniques in Physics Teaching, LPM-livraria, Sao Paulo, Brasil, 1965, 89 pp.

Burns, Elmer E., Verwiebe, Frankel L., and Harzel, Herbert C., Physics A Basic Science, D. Van Nostranx Company, INC., New York, 1943, p. 310.

Cox, Jr., Louist. Energy in Waves, Darien, Teachers Publishing Corp., Connecticut, 1964, pp. 8-22.

- Detenbeck, R.W. and Dilavore, P., "Harvard Project Physics," The Physics Teachers, 5: 233, May, 1967.
- Efron, Alexander, Basic Physics, John F. Rider Publisher, INC., New York, 1953, p. 140.
- Hodgman, Charles D., Handbook of Chemistry and Physics, Chemical Rubber Publishing Co., Cleveland, Ohio, 1951, pp. 2098, 2571.
- Lockard, J.D., Seventh Report of the International Clearing House on Science and Mathematics Curricula Developments 1970, University of Maryland, 1970, p. 640.
- Morse, Philip M., Vibration and Sound, McGraw-Hill Book Company, INC., 1948, p. 158.
- Robertson, John K., Introduction to Optics, Geometrical and Physical, D. Van Nostrand, New Jersey, 1965, 416 pp.
- Sears, Francis Weston, Mechanics, Heat, and Sound, Addison Wesley Publishing, Massachusetts, 1964, pp. 367-369.
- Sootin, Harry, Science Experiments with Sound, W.W. Norton & Company, INC., New York, 1964, p. 27.
- The Nuffield Foundation, Guide to Experiment 3 : Physics, Longmans Pensum Books, London, 1967, pp. 1-53.
- The Nuffield Foundation, Teachers' Guide 3 : Physics, Longmans Pensum Books, London, 1967, pp. 122-139.