



ชื่อหนังสือ เครื่องเสียง ภาคทฤษฎี
บาร์โค้ด 9789743892097
ISBN 974-389-209-5

ศูนย์หนังสือ

พระจอมเกล้าพระนครเหนือ (สจพ.)

โทร. 0-2913-2285-7 โทรสาร. 0-2913-2287



ตรงตามหลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) พุทธศักราช 2545 ประเภทวิชาช่างอุตสาหกรรม กรมอาชีวศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ

เครื่องเสียง ภาคทฤษฎี

หลักสูตรใหม่

วิชาชีพเฉพาะ

สาขาวิชาไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

รหัส 2104-2208

โดย.. ธนภัทร ฤทธิ์พิทักษ์

ฝ่ายวิชาการ บริษัท สกายบุ๊กส์ จำกัด

เดรื่องเสีงง

ภาคทฤษฎี

วิชาชีพนเฉพาะ:
สาขาวิชาไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

ตัวอย่าง

โดย... ธนภัทร ภูริพิทักษ์
ฝ่ายวิชาการ บริษัท สกายบุ๊กส์ จำกัด



บริษัท สกายบุ๊กส์ จำกัด
SKYBOOK COMPANY LIMITED
515/276-8 ถ.รัชดา-ปทุมธานี ต.ปทุมธานี อ.เมืองปทุมธานี 12130
โทร. 0-2958-1125-7, 0-2567-5119 โทรสาร. 0-2567-5105
e-mail: sales@skybook.co.th

www.skybook.co.th

“เครื่องเสียง (ภาคทฤษฎี)”

พิมพ์ครั้งที่ 1 พฤษภาคม 2545

พิมพ์ครั้งที่ 2 พฤษภาคม 2548

สงวนลิขสิทธิ์ตามกฎหมาย

ห้ามคัดลอกถ่ายเอกสารหรือพิมพ์

หรือวิธีหนึ่งวิธีใดของหนังสือเล่มนี้ก่อนได้รับอนุญาต

จากบริษัท สกายบุ๊กส์ จำกัด

ราคา 80 บาท

ข้อมูลทางบรรณานุกรมของสำนักหอสมุดแห่งชาติ

เครื่องเสียง (ภาคทฤษฎี) -- พิมพ์ครั้งที่ 2 -- ปทุมธานี : สกายบุ๊กส์, 2548.

292 หน้า

1. เครื่องขยายเสียง I. ชื่อเรื่อง.

621.381535

ISBN: 974-389-209-5

S7902-30-05-05



ผลิตโดย ศูนย์หนังสือพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ

1518 ถนนพหลุลงคราม เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

โทร. 0-2913-2285-7 โทรสาร. 0-2913-2287

จัดพิมพ์และจำหน่ายโดย



บริษัท สกายบุ๊กส์ จำกัด

SKYBOOK COMPANY LIMITED

515/276-8 ถ.รัชดา-ปทุมธานี ต.ปทุมธานี อ.ปทุมธานี จ.ปทุมธานี 12130

โทร. 0-2958-1125-7, 0-2567-5119 โทรสาร. 0-2567-5105

e-mail: sales@skybook.co.th

www.skybook.co.th

พิมพ์ที่ บริษัท รามการพิมพ์ จำกัด

โทรศัพท์ : 0-2332-4060

คำนิยม

วิทยาการด้านเสียง ปัจจุบันก้าวล้ำไปไกลและสร้างความพึงพอใจในอรรถรสของเสียง ด้วยวิวัฒนาการใหม่ ๆ ทางด้านเทคโนโลยีที่สามารถสัมผัสได้จากการผลิต คิดค้นและการออกแบบ ด้านวิศวกรรมเสียง ซึ่งอาจารย์ธนภัทร ฐิริพิทักษ์ ได้พยายามเรียบเรียงเขียนหนังสือ “เครื่องเสียง (ภาคทฤษฎี)” ยุคเทคโนโลยีและข้อมูลข่าวสารขึ้นมา โดยใช้ข้อมูลและเนื้อหาจากตำราต่างประเทศ และพยายามให้สอดคล้องกับหลักสูตรการเรียนการสอน พร้อมทั้งอาศัยประสบการณ์จากการสอน ในวิชานี้มาเป็นเวลานาน ได้พบว่าความรู้ด้านเครื่องเสียงถูกพัฒนาและเปลี่ยนแปลงไปไกลมาก จึงควรมีตำราเรียนเรื่อง “เครื่องเสียง (ภาคทฤษฎี)” ที่ก้าวหน้าวิวัฒนาการใหม่ ให้นักศึกษา ได้ศึกษาและพัฒนาด้านเครื่องเสียงประกอบการเรียนต่อไป

อาจารย์ธนภัทร ฐิริพิทักษ์ ปัจจุบันทำหน้าที่เป็นอาจารย์สอนประจำแผนก ช่างอิเล็กทรอนิกส์ของวิทยาลัยเทคนิคเชียงราย ได้พยายามเรียบเรียงเขียนหนังสือ “เครื่องเสียง (ภาคทฤษฎี)” ขึ้นมา เหมาะสมเป็นเอกสารตำราเรียน และควรมีไว้ประจำห้องสมุดของสถาบัน ต่างๆ หวังว่าคงจะช่วยให้การเรียนการสอนวิชาที่เกี่ยวข้องมีประสิทธิภาพมากขึ้น และก่อให้เกิด ประโยชน์ต่อผู้สนใจทั่วไป จึงขอให้กำลังใจอาจารย์ธนภัทร ฐิริพิทักษ์ ไว้ ณ ที่นี้ จะได้เป็นกำลัง ในการผลิตตำราเรียนออกเผยแพร่ในโอกาสอื่น ๆ อีกต่อไป



(นายชาญชัย พาหมวด)

ผู้อำนวยการวิทยาลัยเทคนิคเชียงราย

คำนิยม

ปัจจุบันอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ได้เจริญรุดหน้าไปอย่างรวดเร็วด้วยเทคโนโลยีที่ก้าวล้ำทันสมัย จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการปรับและพัฒนาการเรียนการสอนให้ทันกับความเจริญด้านดังกล่าวด้วย วิชาชีพช่างอุตสาหกรรมด้านนี้จึงมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ผู้ที่สนใจและกำลังศึกษาจะต้องตื่นตัวตลอดเวลาเช่นเดียวกัน โดยการศึกษาหาความรู้ใหม่ ๆ มาเสริมเพิ่มเติมนั่นเอง

อาจารย์ธนภัทร ภูมิพิทักษ์ เป็นผู้หนึ่งที่ได้สังเกตเห็นในเรื่องเหล่านี้ โดยได้พยายามศึกษาค้นคว้าหาความรู้จากแหล่งต่าง ๆ และไม่ได้เก็บไว้ลำพังแต่ผู้เดียว แต่ได้นำมาถ่ายทอดเผยแพร่เป็นเอกสารทางวิชาการ เรื่อง “เครื่องเสียง (ภาคทฤษฎี)” สำหรับนักศึกษาช่างอิเล็กทรอนิกส์และผู้สนใจได้ศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับเครื่องเสียงที่ใช้เทคโนโลยีสมัยใหม่อันทันสมัยเหมาะสมกับสภาพปัจจุบันและอนาคตเป็นอย่างดี

นับได้ว่าอาจารย์ธนภัทร ภูมิพิทักษ์ เป็นผู้มีความรู้ความสามารถ วิริยะ อุตสาหะ ที่ได้นำความรู้เผยแพร่ออกสู่สาธารณชน อันเป็นเอกสารที่ได้มาตรฐาน เหมาะสำหรับเป็นคู่มือและมีไว้ประจำห้องสมุดเพื่อค้นคว้าและอ้างอิงได้เป็นอย่างดี



(นายจำเนียร ศิลพานิช)
ผู้อำนวยการสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล
วิทยาเขตนนทบุรี

คำนิยม

ความเจริญก้าวหน้าด้านเทคโนโลยีในปัจจุบันได้ถูกพัฒนาไปอย่างไม่หยุดยั้ง การเรียนการสอนวิชาชีพสาขาช่างอุตสาหกรรมจำเป็นต้องพัฒนาควบคู่กันไป หากหยุดนิ่งเมื่อใดความล้าหลังก้าวไปไม่ทันจะเข้ามาเยือนวงการศึกษาทันที อาจารย์ธนภัทร ภูริพิทักษ์ คงจะเป็นผู้หนึ่งที่ไม่ต้องการเห็นการศึกษาด้านช่างอุตสาหกรรมล้าหลัง จึงได้นำเอาหนังสือ “เครื่องเสียง (ภาคทฤษฎี)” ที่ตนเองได้เรียบเรียงไว้แล้วมาปรับปรุงแก้ไขอีกครั้ง ด้วยการเพิ่มเติมเนื้อหา ซึ่งเป็นความรู้ทางทฤษฎีใหม่ ๆ และทันสมัยในวงการเครื่องเสียง ให้สอดคล้องกับหลักสูตรที่ปรับเปลี่ยนไป นับว่าเป็นประโยชน์ต่อการเรียนการสอนอย่างยิ่ง ตลอดจนผู้สนใจก็ได้ประโยชน์จากการอ่าน และได้ศึกษาในหนังสือเล่มนี้เช่นกัน

ขอชมเชยในความตั้งใจ ความวิริยะ อุตสาหะ พยายามที่จะสร้างมรดกทางวิชาการขึ้นมา เพื่อพัฒนาวิชาการทางช่างอุตสาหกรรมสาขาไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ของอาจารย์ธนภัทร ภูริพิทักษ์ สมควรที่จะเผยแพร่ตำราดังกล่าวไปยังสถานศึกษา ห้องสมุดประชาชน และสถาบันวิชาช่างต่าง ๆ ได้ศึกษาต่อไป



(นายณรงค์ ดียิ่ง)

ผู้อำนวยการวิทยาลัยเทคนิคนครราชสีมา

คำนิยม

การพัฒนาอุตสาหกรรมในประเทศไทยจะเจริญก้าวหน้าเพียงใด ต้องอาศัยปัจจัยหลายประการ และปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งคือ บุคลากรทางด้านช่างอุตสาหกรรม ซึ่งต้องมีทั้งคุณภาพและปริมาณที่เหมาะสมกับความเจริญเติบโตของสถานประกอบการ บุคลากรที่กล่าวนี้ส่วนใหญ่จะมาจากสถาบันการศึกษาต่าง ๆ โดย “ครูช่าง” จะเป็นผู้ให้ความรู้และหลักการเบื้องต้น แก่ศิษย์ อาจารย์ธนภัทร ภูริพิทักษ์ คือครูผู้หนึ่งซึ่งใช้ความวิริยะ อุตสาหะ ทุ่มเทกำลังกาย กำลังใจ จัดทำและปรับปรุงหนังสือเรื่อง “เครื่องเสียง (ภาคทฤษฎี)” ตามความก้าวหน้าและล้ำยุคของเทคโนโลยีในปัจจุบันที่ตนเองมีความรู้และเข้าใจเป็นอย่างดีอีกเล่มหนึ่ง

บัดนี้หนังสือดังกล่าวได้มีการปรับปรุงและเพิ่มเติมเนื้อหาทฤษฎีความรู้ใหม่ ๆ เรียบร้อยแล้ว เหมาะสำหรับผู้ที่ต้องการศึกษาค้นคว้าทุกระดับ

นับได้ว่าผู้เรียบเรียงมีความตั้งใจ และอดทน เพื่อรวบรวมค้นคว้าขยายความรู้ให้แก่ผู้ที่สนใจ ซึ่งเป็นแบบอย่างที่ดีในการพัฒนาวิชาการ ก่อให้เกิดการพัฒนาทรัพยากรบุคคลทางด้านช่างอุตสาหกรรมของประเทศชาติให้มีคุณภาพมากยิ่งขึ้นอีกทางหนึ่งที่ควรสนับสนุนเป็นอย่างยิ่ง



(นายถาวร เจาะจิตร)

ผู้อำนวยการวิทยาลัยเทคนิคชุมพร

คำนำ

สืบเนื่องจากการเรียนการสอนของนักศึกษาช่างทุกระดับยังคงมีปัญหาในเรื่องตำราเรียนไม่เพียงพอ และไม่สอดคล้องกับเนื้อหาในหลักสูตรมากนัก บางวิชาก็ไม่มีตำราหรือมีแต่น้อยเล่มมาก ซึ่งยากแก่การค้นคว้าหาแหล่งอ้างอิง โดยเฉพาะตำราต่างประเทศที่มีเนื้อหาเกี่ยวข้องกับเรื่องเครื่องเสียงที่แทบจะหาไม่ได้เลย และเป็นที่เข้าใจยากแก่นักศึกษา อีกทั้งหลักสูตรได้มีการพัฒนาและปรับเปลี่ยนตลอดเวลา เพื่อให้ทันกับความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีเครื่องเสียงในปัจจุบัน

จากปัญหาที่สะท้อนให้เห็น จุดนี้เองผู้เรียบเรียงจึงได้คำนึงถึงประโยชน์อันพึงมีต่อการศึกษาเป็นประการสำคัญ จึงได้พยายามแปลและเรียบเรียงเขียนหนังสือ “เครื่องเสียง (ภาคทฤษฎี)” ขึ้นจากประสบการณ์ในการสอนและตำราต่าง ๆ มุ่งหวังให้ตรงตามหลักสูตรระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) ของกรมอาชีวศึกษา โดยจะเน้นเนื้อหาที่ทันสมัยตรงตามเทคโนโลยีเครื่องเสียงที่ก้าวไกลในปัจจุบัน

ผู้เรียบเรียงจึงหวังเป็นอย่างยิ่งว่าหนังสือเล่มนี้คงเป็นประโยชน์แก่นักศึกษา ครูอาจารย์ผู้สอน ตลอดจนผู้ที่สนใจโดยทั่วไปตามเจตนารมณ์ที่ได้กล่าวไว้ในตอนต้น

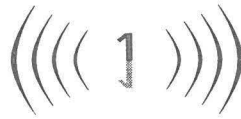
ธนภัทร ภูมิพิทักษ์
ผู้เรียบเรียง

สารบัญ

บทที่ 1	เสียง	11
1.1	แหล่งกำเนิดของการสั่นสะเทือน	11
1.2	ลักษณะสมบัติของคลื่นเสียง	12
1.3	เสียงเดินทางในอากาศได้อย่างไร	13
1.4	เสียงอย่างง่ายและเสียงเชิงซ้อน	14
1.5	ความถี่สเปกตรัมของเสียงซ้ำ	15
1.6	ความถี่สเปกตรัมของเสียงไม่ซ้ำ	17
1.7	เฟส	17
1.8	เสียงในรูปลักษณะทางไฟฟ้า	21
1.9	การแสดงผลคุณลักษณะของคลื่นเสียง	22
1.10	เดซิเบล	22
	แบบฝึกหัดบทที่ 1	25
บทที่ 2	เสียงกับการได้ยิน	28
2.1	กลไกของการรับฟังเสียง	28
2.2	ความถี่กับการได้ยิน	29
2.3	ปรากฏการณ์ดอปเพลอร์	30
2.4	ความดังของเสียงกับการได้ยิน	31
2.5	แบนด์วิดท์เสียง	33
	แบบฝึกหัดบทที่ 2	34
บทที่ 3	ทรานซิสเตอร์กับการขยาย	37
3.1	หลักการขยาย	37
3.2	การขยายของทรานซิสเตอร์	39
3.3	ไบแอสในการขยาย	44
3.4	สมการเส้นโหลด	48
3.5	คลาสส์การขยาย	53
3.6	รูปลักษณะของวงจรทรานซิสเตอร์	56
	แบบฝึกหัดบทที่ 3	60
บทที่ 4	ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้ากับการขยาย	63
4.1	ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดรอยต่อ	63
4.2	เส้นโค้งลักษณะสมบัติของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดรอยต่อ	66
4.3	ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดโลหะออกไซด์สารกึ่งตัวนำ	67

4.4	ข้อควรระมัดระวังในการใช้มอสเฟต	72
4.5	เฟตกับการขยาย	73
4.6	หลักการงานเบื้องต้นของเฟตที่ใช้ขยาย	73
4.7	การจัดวงจรไบแอสให้กับเฟต	78
4.8	การจัดวงจรร่วมของเฟต	80
4.9	มอสเฟตชนิดกำลัง	82
	แบบฝึกหัดบทที่ 4	85
บทที่ 5	ไมโครโฟน	89
5.1	ไมโครโฟนแบบไดนามิก	89
5.2	ไมโครโฟนแบบรีบบอน	91
5.3	ไมโครโฟนแบบตัวเก็บประจุ	92
5.4	คุณลักษณะของไมโครโฟน	93
5.5	ไมโครโฟนชนิดพิเศษเฉพาะ	99
5.6	ลักษณะการใช้ไมโครโฟนให้เกิดประสิทธิภาพ	101
5.7	สายไมโครโฟน	102
	แบบฝึกหัดบทที่ 5	103
บทที่ 6	ลำโพง	107
6.1	ลำโพงชนิดขดลวดเคลื่อนที่	107
6.2	ลำโพงชนิดอื่น ๆ	108
6.3	ลำโพงกับความถี่	110
6.4	ลำโพงฮอร์น	113
6.5	ระบบลำโพงแบบให้เสียงครบย่านความถี่	114
6.6	รายละเอียดของลำโพง	116
6.7	ตู้ลำโพง	119
	แบบฝึกหัดบทที่ 6	129
บทที่ 7	ระบบของเครื่องขยายเสียง	133
7.1	ส่วนประกอบของเครื่องขยายเสียง	133
7.2	กราฟฟีกอิลลอสเฮอร์	145
7.3	มิกเซอร์	149
7.4	ภาคไดรเวอร์	151
7.5	อินพุตของเครื่องขยายเสียงจากแหล่งต่าง ๆ	152
7.6	ระบบเสียงโมโนและสเตอริโอ	160
	แบบฝึกหัดบทที่ 7	163
บทที่ 8	ภาคขยายกำลังของเครื่องขยายเสียง	168
8.1	วงจรขยายแบบพุช-พูล	168
8.2	วงจรขยายเสียงแบบคอมพลีเมนตารี	171
8.3	วงจรขยายเสียงแบบโอทีแอล	173
8.4	วงจรขยายเสียงแบบโอซีแอล	177

8.5	วงจรขยายเสียงแบบควอซี-คอมพลีเมนตารี	179
8.6	การกำหนดรายละเอียดของภาคขยายกำลัง	182
	แบบฝึกหัดบทที่ 8	190
บทที่ 9	ออปแอมป์	195
9.1	คุณลักษณะเด่นของออปแอมป์	195
9.2	ลักษณะโครงสร้างภายในตัวไอซีออปแอมป์	196
9.3	ลักษณะของตัวถัง	198
9.4	แหล่งจ่ายไฟ	199
9.5	ค่าพารามิเตอร์ของออปแอมป์	199
9.6	เปรียบเทียบออปแอมป์กับทรานซิสเตอร์	204
9.7	ชนิดของออปแอมป์	206
9.8	การอ่านรหัสและการเลือกใช้ออปแอมป์ให้เหมาะกับการใช้งาน	208
9.9	ทฤษฎีและการทำงานของออปแอมป์	209
9.10	การนำออปแอมป์ไปใช้งาน	224
	แบบฝึกหัดบทที่ 9	229
บทที่ 10	สัญญาณรบกวน	234
10.1	สัญญาณรบกวนที่เกิดจากอุปกรณ์ภายในวงจร	234
10.2	สัญญาณรบกวนจากแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรง	239
10.3	สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากการวางตำแหน่งและติดตั้งหม้อแปลงผิด	240
10.4	สัญญาณรบกวนจากกราวด์	240
10.5	ระบบดอลบี	243
	แบบฝึกหัดบทที่ 10	245
บทที่ 11	อุปกรณ์ประกอบเครื่องเสียง	248
11.1	สายสัญญาณ	248
11.2	สายลำโพง	250
11.3	สายสัญญาณระหว่างเครื่องเสียง	251
11.4	การกำหนดรายละเอียดของสายสัญญาณ	252
11.5	อุปกรณ์ประเภทปลั๊กและแจ๊ค	253
11.6	อุปกรณ์ประเภทข้อต่อ	253
	แบบฝึกหัดบทที่ 11	255
บทที่ 12	การทดสอบคุณสมบัติเครื่องเสียง	258
12.1	การวัดค่าความต้านทานอินพุต	258
12.2	การวัดหาค่ากำลังเอาต์พุต	259
12.3	การวัดค่าผลตอบสนองความถี่	261
12.4	การทดสอบระบบลำโพง	263
ภาคผนวก		266
เฉลยแบบฝึกหัด		289
บรรณานุกรม		292

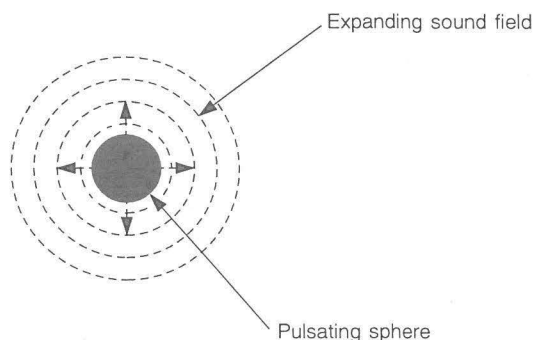


เสียง

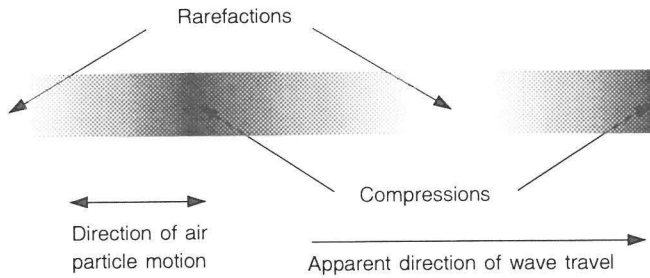
1.1 แหล่งกำเนิดของการสั่นสะเทือน

คลื่นเป็นลักษณะอย่างหนึ่งของการถ่ายทอดพลังงานจากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่ง พลังงานอาจอยู่ในรูปของพลังงานกล พลังงานความร้อน พลังงานแสง พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า หรือพลังงานเสียง เป็นต้น

เสียงจะเกิดขึ้นเมื่อวัตถุ (แหล่งกำเนิด) สั่นสะเทือน เป็นเหตุทำให้อากาศโดยรอบวัตถุเคลื่อนที่ พิจารณารูปทรงกลมดังรูปที่ 1.1 จะเห็นการเคลื่อนที่เข้าออกรอบ ๆ ทรงกลม ซึ่งมองดูแล้วจะเหมือนกับการตีลูกสควอช (Squash คือกีฬาที่ตีลูกบอลกับฝ่าผนัง) ลูกบอลจะกระดอนกลับไปกลับมาเป็นระยะ จนกระทั่งขนาดของทรงกลมเกิดการแกว่ง หรือออสซิลเลตในลักษณะที่ใหญ่กว่าระดับปกติเล็กน้อย และเล็กกว่าระดับปกติเล็กน้อยสลับกันไปเรื่อย ๆ ในขณะที่เกิดการเปลี่ยนแปลงนั้นจะเกิดการอัดและขยายของอากาศรอบ ๆ ทำให้ลักษณะของการอัดและขยายเป็นไปอย่างต่อเนื่องเรื่อย ๆ จากทรงกลม มีลักษณะเช่นเดียวกับการเกิดความพลิ้ว (Ripple) ทำให้เกิดคลื่นขึ้นนั่นเอง ถ้าหากโยนก้อนหินลงในน้ำนิ่งกลางสระน้ำ คลื่นน้ำก็จะเกิดขึ้น โดยอาศัยน้ำเป็นตัวกลาง ทำให้คลื่นเคลื่อนที่ไปข้าง ๆ และแผ่กระจายออกไป โดยที่น้ำกลางสระไม่ได้เคลื่อนที่ตามคลื่นไปด้วย เพียงแต่กระเพื่อมขึ้นลงเท่านั้น เช่นเดียวกับคลื่นในรูปที่ 1.2 เป็นคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นเชือกที่มีการสั่นสะเทือนในลักษณะที่ทุก ๆ อนุภาคของตัวกลางไม่วิ่งตามคลื่น แต่เคลื่อนที่ขึ้นลงในทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น เรียกคลื่นชนิดนี้ว่า คลื่นตามขวาง (Transverse wave) ส่วนคลื่นที่สลับกับคลื่นตามขวางคือคลื่นตามยาว ได้แก่ คลื่นที่เกิดขึ้นในลักษณะที่อนุภาคของตัวกลางเคลื่อนที่ไป-มาในทิศทางที่ขนานกับทิศทางของคลื่น เช่น คลื่นในหลอดสปริง เมื่อปลายถูกตรึงเอาไว้ทั้งสองข้าง และบางส่วนของสปริงถูกดึงตามยาวแล้วปล่อยทันที

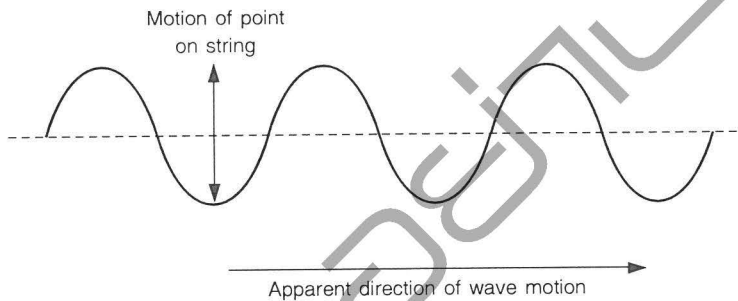


รูปที่ 1.1 (ก) แหล่งกำเนิดเสียงที่เหมือนทรงกลมมีการสั่นสะเทือนแผ่กระจายคลื่นออกเป็นลักษณะทรงกลม



(ข) คลื่นตามยาวที่เกิดขึ้นจากผลการอัดและขยายของอากาศ

รูปที่ 1.1 (ต่อ)

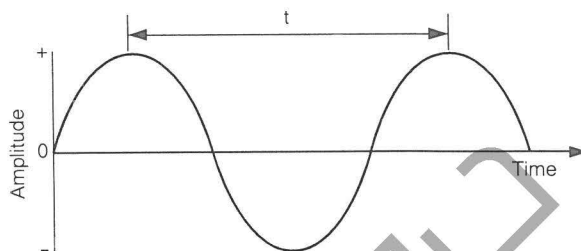


รูปที่ 1.2 ลักษณะคลื่นตามขวาง การเคลื่อนที่ทุก ๆ จุดของตัวกลางจะเคลื่อนที่ขึ้นลงในทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น

1.2 ลักษณะสมบัติของคลื่นเสียง

ลักษณะการแกว่งของแหล่งกำเนิดทำให้เกิดเป็นความถี่ของคลื่นเสียง มีหน่วยเป็นเฮิร์ตซ์ (Hz) หรือรอบต่อวินาที (cps) จำนวนของการอัดและขยายของอากาศที่มีผลมาจากการเคลื่อนที่ของทรงกลมคือ ส่วนสูง หรือแอมพลิจูดของคลื่นเสียงที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับความดัง (Loudness) ของเสียงที่บ่งบอกถึงความเข้มเสียงที่มาถึงหูมนุษย์ ส่วนระยะทางระหว่างยอดคลื่นที่อยู่ใกล้ชิดกัน หรือระยะทางของหนึ่งลูกคลื่นเรียกว่า ความยาวคลื่น (Wavelength) ของคลื่นเสียง เรียกเป็นภาษากรีกว่า แลมด้า (λ) อย่างไรก็ตาม ความยาวคลื่นจะขึ้นอยู่กับความเร็วของคลื่นเสียง เมื่อคลื่นเดินทางด้วยความเร็ว ระยะทางระหว่างยอดคลื่นจะมีค่ามากกว่าคลื่นที่เดินทางช้า โดยให้เวลาคงที่ระหว่างช่วงอัดของยอดคลื่น (นั่นคือความถี่ของการออสซิลเลตแหล่งกำเนิดจะคงที่) ดังรูปที่ 1.3 ลักษณะสมบัติของคลื่นเสียงสามารถแทนได้ด้วยกราฟ แกนทางแนวนตั้งเป็นค่าแอมพลิจูด แกนทางแนวนอนเป็นเวลา โดยการแทนช่วงอัดของอากาศเป็นบวก (+) และช่วงขยายเป็นลบ (-) สำหรับการเคลื่อนที่เมื่อคลื่นผ่านไปในตัวกลาง อนุภาคของตัวกลางจะสั่นสะเทือนด้วยอัตราเดียวกันกับการสั่นสะเทือนของวัตถุที่เป็นต้นกำเนิด การสั่นสะเทือนนั้นเป็นไปอย่างมีจังหวะ คือเป็นไปในรูปแบบซิมเปิลฮาร์โมนิก

(Simple Harmonic Motion : S.H.M.) ซึ่งได้รูปคลื่นเสียงที่รู้จักโดยทั่วไปคือ รูปคลื่นไซน์ที่ปราศจากฮาร์โมนิกใด ๆ ใดๆ ปะปน ตัวอย่างของการสั่นสะเทือนในลักษณะนี้ เช่น การสั่นสะเทือนของวัตถุที่ผูกติดกับสปริงที่มีปลายอีกข้างหนึ่งถูกแขวนเอาไว้ หรือการแกว่งของลูกตุ้มนาฬิกาชนิดธรรมดา รอบตำแหน่งสมดุล เมื่อแขวนลูกตุ้มทำมุมกับแนวตั้งน้อยกว่า 5 องศา จากคลื่นไซน์ของเสียง ความถี่จะมีค่าเป็นส่วนกลับกับเวลา หากความถี่ของการสั่นสะเทือนอยู่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ ถึง 20 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยประมาณ ซึ่งเป็นเสียงที่มนุษย์ฟังได้ยิน และหากเกินค่าความถี่นี้มนุษย์ก็จะฟังไม่ได้ยิน



รูปที่ 1.3 แสดงรูปคลื่นเสียงมีลักษณะเป็นคลื่นไซน์ โดยคาบของคลื่นแทนด้วย t และความถี่แทนด้วย $1/t$

1.3 เสียงเดินทางในอากาศได้อย่างไร

คลื่นเสียงในอากาศ เป็นชนิดของคลื่นตามยาวที่โมเลกุลของอากาศเคลื่อนที่รอบตำแหน่งสมดุลกับจุดกึ่งกลางในแนวที่ขนานกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียง ดังนั้น เมื่อมีเสียงเดินทางไปในตัวกลางที่เป็นอากาศ จะเกิดการอัดตัวและขยายตัวสลับกันไปดังที่กล่าวมาแล้ว ลักษณะคลื่นที่มีการสั่นสะเทือนของตัวกลางนี้จะเป็นการสั่นสะเทือนที่มีความยืดหยุ่น ซึ่งเป็นคุณสมบัติของตัวกลางที่เรียกว่า Elastic property ทั้งนี้ถ้าหากตัวกลางไม่มีความยืดหยุ่นแล้ว การสั่นสะเทือนของส่วนใดส่วนหนึ่งของตัวกลางย่อมไม่สามารถทำให้ส่วนที่อยู่ติดไปของตัวกลางสั่นสะเทือนได้

ในกรณีของคลื่นเสียงในอากาศ ถ้าหากอากาศมีความหนาแน่นสม่ำเสมอ คลื่นเสียงจะมีอัตราความเร็วคงที่ประมาณ 340 เมตรต่อวินาที แต่ความเร็วของเสียงในอากาศที่จุดน้ำเป็นน้ำแข็ง ความเร็วจะลดลงเหลือประมาณ 330 เมตรต่อวินาที ในเหล็กซึ่งเป็นตัวกลางที่เป็นของแข็ง ความเร็วของเสียงจะมีค่าประมาณ 5100 เมตรต่อวินาที

ค่าความถี่และค่าความยาวคลื่นของคลื่นเสียง จะเกี่ยวข้องกันโดยตรงกับค่าความเร็วของเสียง (c) จะได้ว่า

$$c = f\lambda \quad \text{หรือ} \quad \lambda = c/f$$

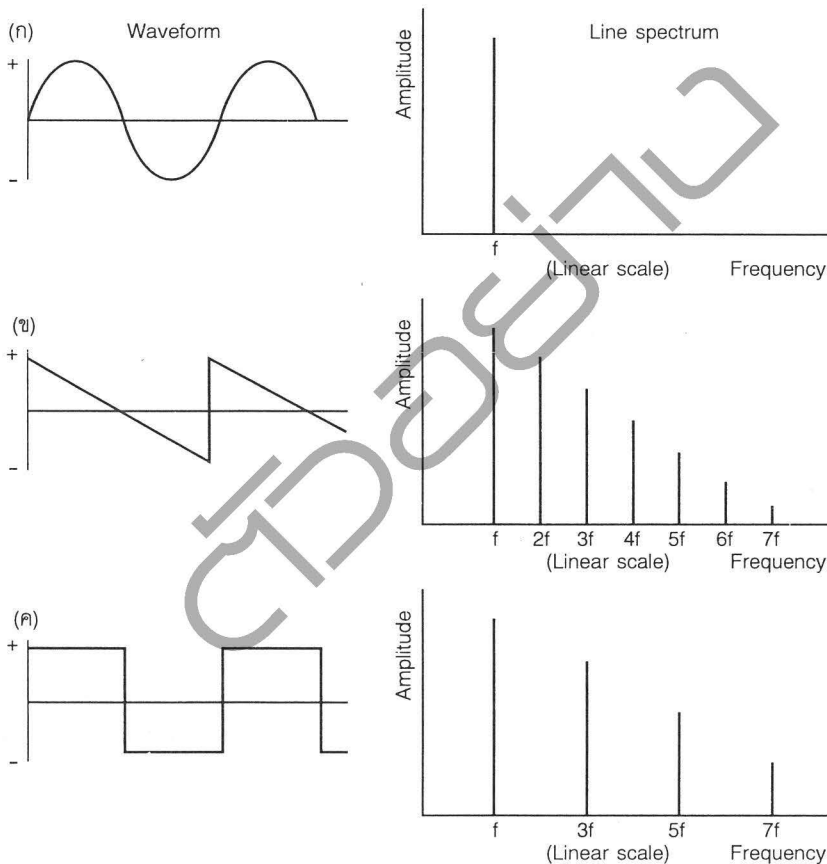
ตัวอย่างเช่น ความยาวคลื่นของเสียงในอากาศที่ 20 เฮิร์ตซ์ (ความถี่ต่ำ) อุณหภูมิห้องปกติควรจะมีค่าเท่าใด

$$\lambda = 340/20 = 17 \text{ เมตร}$$

สำหรับความยาวคลื่นของเสียงในอากาศที่ 20 kHz จะมีค่า 1.7 cm

1.4 เสียงอย่างง่ายและเสียงเชิงซ้อน

จากตัวอย่างที่กล่าวมาแล้ว เสียงจะมีรูปคลื่นอย่างง่ายเป็นคลื่นรูปไซน์ ซึ่งเป็นผลมาจากระบบการสั่นสะเทือนอย่างง่ายของน้ำหนักที่ผูกติดไว้ที่ปลายสปริง คลื่นรูปไซน์ที่มีเสียงบริสุทธิ์มากที่สุด จะเป็นคลื่นที่ประกอบด้วยพลังงานที่มีความถี่เดียว (Fundamental) ปราศจากฮาร์โมนิกหรือเสียงทุ้มแหลมใด ๆ ปะปน จึงมักจะเรียกคลื่นรูปไซน์ชนิดนี้ว่า คลื่นที่มีเสียงทุ้มแหลมที่บริสุทธิ์ (Pure tone) แต่ถ้าหากแหล่งกำเนิดเสียงถูกผสมกับความถี่แปลกปลอม จะทำให้เกิดเป็นรูปคลื่นเชิงซ้อนเสียงรบกวน (Noise) ก็เกิดขึ้น เช่น เสียงรบกวนที่เกิดขึ้นในเครื่องบันทึกเสียงดนตรีต่าง ๆ หรือเสียงฮัม เป็นต้น



รูปที่ 1.4 แสดงเงาเส้นสมมูลสำหรับการเลือกรูปคลื่นอย่างง่าย

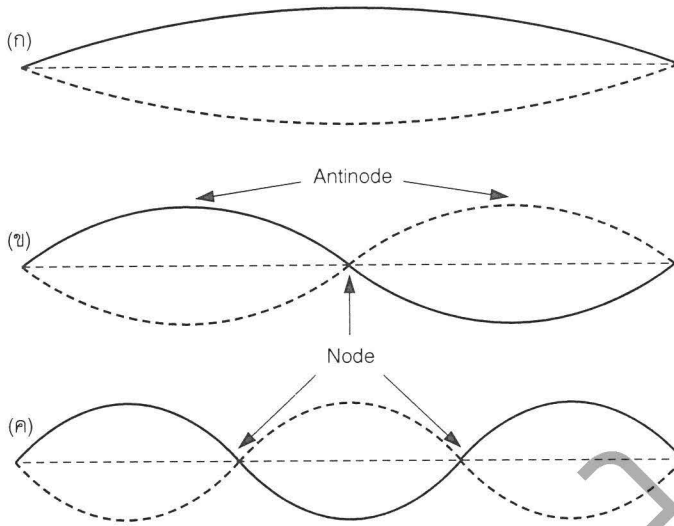
- (ก) คลื่นรูปไซน์ ประกอบด้วยส่วนประกอบเดียวที่ความถี่เดียว หรือความถี่มูลฐาน
- (ข) รูปคลื่นฟันเลื่อย ประกอบด้วยความถี่มูลฐานและผลคูณเลขจำนวนเต็มกับค่าความถี่มูลฐาน โดยมีค่าของแอมพลิจูดที่ลดลงอย่างสม่ำเสมอ
- (ค) รูปคลื่นสี่เหลี่ยม ประกอบด้วยส่วนประกอบที่ผลคูณเลขคี่ของความถี่มูลฐาน

ลักษณะสำคัญของเสียงที่มีความทึบแหลมของเสียง (Pitch) ที่แน่นอนจะไม่ใช่รูปคลื่นเชิงซ้อน ซึ่งความทึบแหลมของเสียงนี้ก็คือความถี่นั่นเอง ความถี่ในการรับฟังที่ตอบสนองได้ไวที่สุดคือประมาณ 3000 เฮิร์ตซ์ สำหรับรูปที่ 1.4 แสดงสเปกตรัมของแถบความถี่ตามแนวนอน และแกนค่าแอมพลิจูดในแนวดิ่ง ซึ่งบ่งบอกความสัมพันธ์ต่อกันของค่าความถี่ที่แตกต่างกันกับความแตกต่างของค่าแอมพลิจูด ดังรูปที่ 1.4 (ข) จะเห็นว่าค่าความถี่ $2f$, $3f$ ต่างเป็นค่าความถี่เชิงซ้อนทั้งสิ้น โดยเรียกความถี่ $2f$ ว่าฮาร์โมนิกที่ 2 หรือ First overtones และความถี่ $3f$ เป็นฮาร์โมนิกที่ 3 หรือ Second overtones หากวงจรขยายมีการขยายสัญญาณผิดรูปคลื่นไปจากเดิม จะทำให้เกิดฮาร์โมนิกขึ้น และเป็นผลทำให้เสียงที่ได้ผิดไปจากเดิม ซึ่งความถี่ฮาร์โมนิกจะเกิดขึ้นมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยน

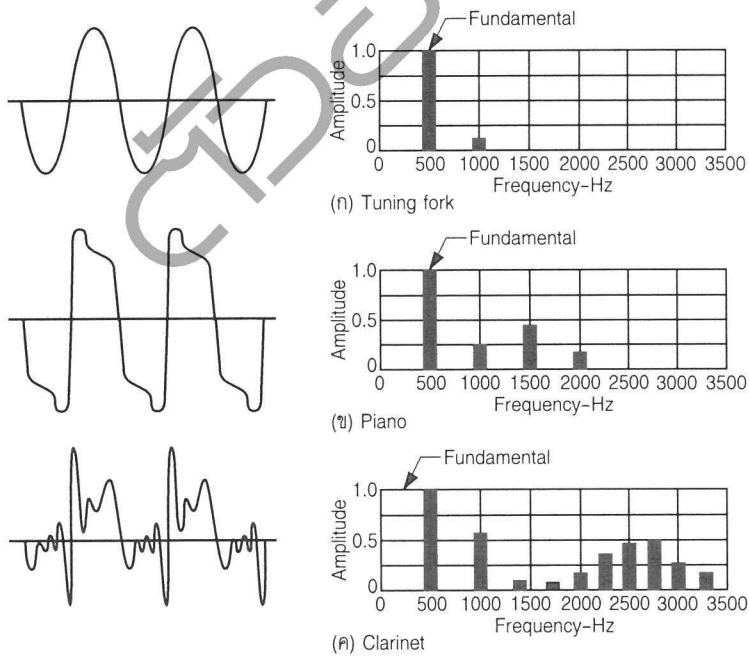
1.5 ความถี่สเปกตรัมของเสียงซ้ำ

จากรูปที่ 1.4 ลักษณะคลื่นอย่างง่าย เส้นสเปกตรัมมีส่วนประกอบเดียวที่ความถี่ของรูปคลื่นไซน์เป็นความถี่มูลฐานในการออสซิลเลต ส่วนรูปคลื่นที่เกิดขึ้นซ้ำ เช่น รูปคลื่นสี่เหลี่ยมจะมีความถี่มูลฐานเช่นเดียวกัน และประกอบด้วยความถี่ที่สูงกว่าความถี่มูลฐานค่าต่าง ๆ กัน โดยเรียกความถี่ที่สูงกว่านี้ว่า ความถี่ฮาร์โมนิก

ฮาร์โมนิกประกอบด้วยเสียงที่มีความถี่เป็นทวีคูณของความถี่เดิมเป็นสองเท่า สามเวลา และสี่เวลา เป็นต้น เช่น เสียงที่มีความถี่เดิมเท่ากับ 100 เฮิร์ตซ์ ประกอบด้วยฮาร์โมนิก 200 เฮิร์ตซ์ 400 เฮิร์ตซ์ และ 600 เฮิร์ตซ์ จากรูปที่ 1.5 ความถี่ฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้น เป็นการสั่นสะเทือนตามจำนวนของโมดที่สอดคล้องกับผลคูณเลขจำนวนเต็มของความถี่เดิมของการสั่นสะเทือนของเส้นเชือก ความถี่จะสอดคล้องกับโมดของเส้นเชือกที่เคลื่อนที่ขึ้นและลงทั้งหมด ด้วยเหตุที่ฮาร์โมนิกสอดคล้องกับโมดตามรูปแบบของการสั่นสะเทือน คือแบ่งความถี่ฮาร์โมนิกตามค่าสูงสุดและต่ำสุดของการเคลื่อนที่ตามเส้นเชือก (ซึ่งมีชื่อเรียกว่า แอนติโนด และโนด) สามารถมองเห็นโมดที่ 2 ทำให้เกิดเป็นค่ายอดสองค่าของการสั่นสะเทือน และโมดที่ 3 เกิดเป็นค่ายอดสามค่าตามลำดับ จากรูปที่ 1.4 ความถี่มูลฐานจะมีค่าแอมพลิจูดสูงสุด แต่แอมพลิจูดของความถี่ฮาร์โมนิกจะลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้น แต่ไม่เสมอไป เช่น เสียงจากเครื่องดนตรีชนิดต่าง ๆ คือเปียโน ฉิ่ง และกลอง เป็นลักษณะของเสียงทั่วไปที่มีจะเกิดจากคลื่นความถี่ต่าง ๆ ผสมกันอย่างซับซ้อน แต่สามารถแยกได้เป็นคลื่นมูลฐาน หรือคลื่นฮาร์โมนิกต่าง ๆ แล้วประกอบเข้าด้วยกัน ทำให้เกิดเป็นเสียงดนตรีที่มีความถี่แตกต่างกัน โดยเส้นสเปกตรัมมีความถี่มูลฐานเดียวกัน ทั้งนี้ความถี่ที่สูงขึ้นระหว่างเครื่องดนตรีบางชิ้น อาจมีค่าแอมพลิจูดลดลงหรือสูงขึ้นดังรูปที่ 1.6 สำหรับการได้ยินเสียงความถี่มูลฐานหรือความถี่เดิมจะได้ยินชัดเจนที่สุด ดังนั้น เสียงที่เกิดจากคลื่นความถี่ต่าง ๆ จะผสมกันอย่างซับซ้อน แต่ยังสามารถแยกได้ว่าเป็นเสียงของเครื่องดนตรีชนิดใด เสียงแตกต่างกันอย่างไร มีชื่อเรียกว่าอะไร และมีคุณภาพของเสียงเป็นอย่างไร (Quality หรือ Timbre)



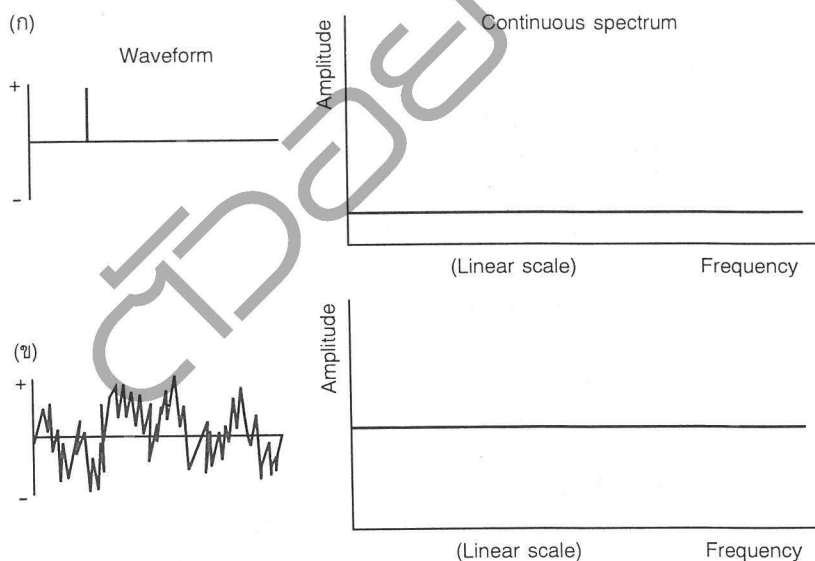
รูปที่ 1.5 แสดงโหมดการสั่นสะเทือนของเส้นเชือก
 (ก) ความถี่มูลฐาน
 (ข) ฮาร์โมนิกที่ 2 แอนติโนดมีแอมพลิจูดสูงสุด
 (ค) ฮาร์โมนิกที่ 3 โหนดแอมพลิจูดจะเป็นศูนย์



รูปที่ 1.6 แสดงรูปคลื่นและความถี่สเปกตรัมของเสียงดนตรี

1.6 ความถี่สเปกตรัมของเสียงไม่ซ้ำ

ลักษณะของรูปคลื่นที่ไม่เกิดซ้ำ ๆ หรือคลื่นเดิม จะไม่มีความซ้ำแหลมของเสียงเกิดขึ้น เป็นเหตุให้สัญญาณรบกวนของเสียงมักปะปนมากับความถี่เดิม ทำให้คุณภาพของเสียงตก ความผิดเพี้ยนเกิดขึ้นเพราะเสียงรบกวนจากแหล่งกำเนิดต่าง ๆ ที่ป้อนเข้าวงจรขยายเสียง รวมทั้งอุปกรณ์ประกอบภายในวงจร สัญญาณรบกวนทางอุณหภูมิที่เป็นคุณสมบัติประจำตัวของอุปกรณ์นั้น ๆ ตลอดทั้งการเดินสายวงจร นอกจากนี้ยังมีความถี่ออสซิลเลตที่มีผลต่อวงจรขยาย หากเกิดออสซิลเลตนาน ๆ โดยไม่ปิดสวิทช์เครื่อง ลำโพงและอุปกรณ์ภายในเครื่องอาจเสียหายได้ จากรูปที่ 1.7 รูปคลื่นที่ปรากฏจะมีเสียงแปลกปลอมเป็นสัญญาณรบกวนที่ประกอบด้วยความถี่หลายความถี่ มีพลังงานคงที่ตลอดย่านความถี่สเปกตรัม เมื่อคิดค่าเฉลี่ยแถบของความถี่จะเป็นเส้นตรง จึงเรียกว่าสัญญาณรบกวนขาว (White noise) และหากความถี่หลายความถี่ที่กล่าวมาแล้วมีความแรงของสัญญาณที่ปรากฏเท่า ๆ กัน ความถี่สเปกตรัมจะเป็นเส้นตรงตลอดย่านความถี่ แต่ถ้าค่าของความถี่สูงขึ้น สัญญาณของพลังงานจะลดลง เรียกว่าสัญญาณรบกวนชมพู (Pink noise) มีค่าเท่ากับพลังงานต่อออกเตฟ (Octave)



รูปที่ 1.7 แสดงค่าความถี่สเปกตรัมของรูปคลื่นที่ไม่ซ้ำ

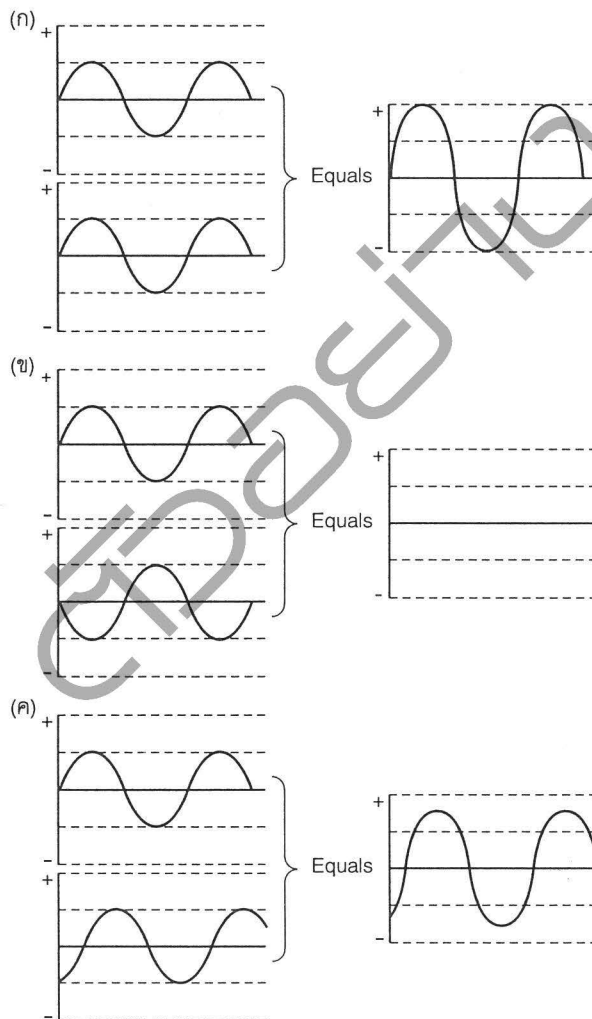
(ก) รูปพัลส์

(ข) สัญญาณรบกวน

1.7 เฟส

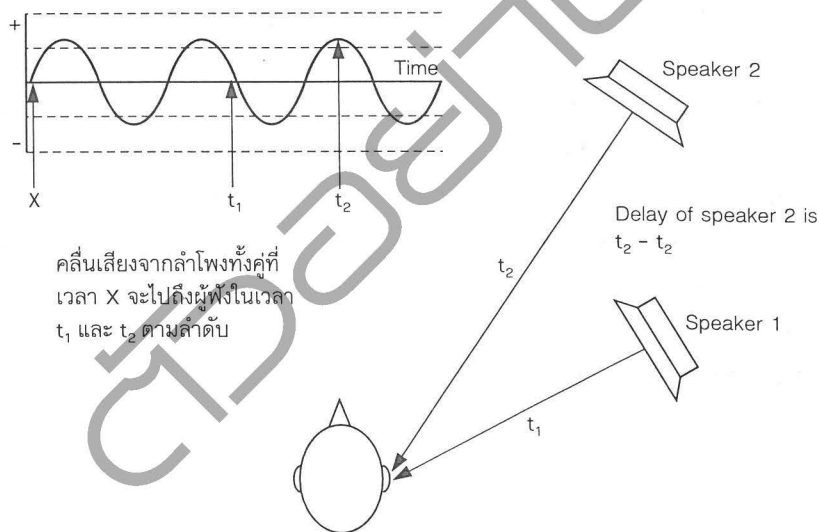
หากคลื่นสองคลื่นมีความถี่และแอมพลิจูดเดียวกัน หรือเกิดขึ้นพร้อมกัน กล่าวคือ เริ่มต้นจุดเดียวกันและจบลงที่จุดเดียวกัน เรียกว่า คลื่นที่มีเฟสเดียวกัน (Inphase) ดังรูปที่ 1.8 ถ้าสัญญาณสองสัญญาณมีเฟสเดียวกัน ค่าแอมพลิจูดจะเป็นผลบวก หมายถึงความสูงของแอมพลิจูด

จะมีค่าเป็นสองเท่า สำหรับคลื่นที่มีเฟสต่างกัน (Out of phase) เกิดจากคลื่นสองคลื่นที่มีความถี่และแอมพลิจูดเดียวกัน แต่เกิดขึ้นไม่พร้อมกัน กล่าวคือ คลื่นแรกจะเริ่มต้นทางครึ่งรอบบวก (Positive half-cycle) คลื่นหลังจะเริ่มต้นทางครึ่งรอบลบ (Negative half-cycle) ในลักษณะที่ตรงข้ามกัน ผลรวมที่ได้จะเป็นศูนย์ คือไม่มีสัญญาณนั่นเอง และอีกกรณีหนึ่งหากสัญญาณสองสัญญาณมีขนาดเท่ากัน แต่เฟสไม่ตรงกันแล้วนำมารวมกัน ผลที่ได้คือคลื่นบางส่วนจะเป็นผลบวก บางส่วนจะหักล้างกัน โดยผลรวมของคลื่นแสดงให้เห็นในรูปที่ 1.8 (ค)



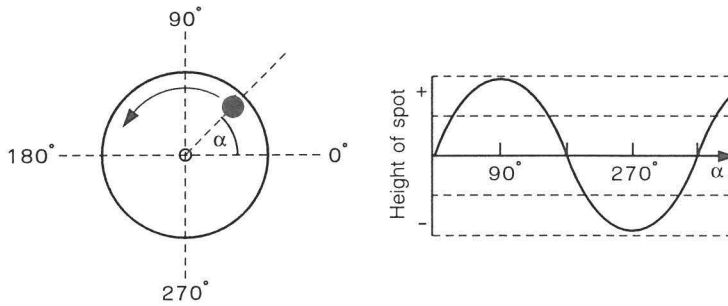
รูปที่ 1.8 (ก) รูปคลื่นที่เหมือนกันสองคลื่นและมีเฟสเดียวกันบวกกัน ผลของคลื่นที่มีความถี่และเฟสเดียวกันจะทำให้ค่าของแอมพลิจูดเป็นสองเท่า
(ข) คลื่นสองคลื่นที่เหมือนกันแต่มีเฟสต่างกันมารวมกัน ผลที่ได้จะเป็นศูนย์
(ค) คลื่นสองคลื่นที่เหมือนกันเพียงบางส่วนและมีเฟสต่างกันมารวมกัน ผลที่ได้จะเป็นการรวมจุดต่อจุดของคลื่นสองคลื่น

ความแตกต่างระหว่างสัญญาณ ซึ่งเป็นผลจากการประวิงเวลาระหว่างคลื่นสองคลื่น เมื่อมีสองสัญญาณออกจากแหล่งกำเนิดที่มีระยะห่างจากผู้ฟังเท่ากัน ใช้เวลาและเฟสเดียวกัน จากเวลาที่กำหนด สัญญาณเสียงที่กล่าวมานี้ก็จะไปถึงผู้ฟัง แต่ถ้าแหล่งกำเนิดเสียงหนึ่งมีระยะทางมากกว่าแหล่งกำเนิดอื่น การประวิงก็จะเกิดขึ้น ความสัมพันธ์ของเฟสจะขึ้นอยู่กับการประวิงเวลา ดังรูปที่ 1.9 ใช้กฎนิ้วหัวแม่มือเสียงจะเดินทางประมาณ 30 เซนติเมตร (1 ฟุต) ต่อหนึ่งในพันวินาที ดังนั้น ถ้าแหล่งกำเนิดเสียงที่สองอยู่สูงกว่าแหล่งกำเนิดที่หนึ่ง 1 เมตร (3 ฟุตกว่า) เป็นผลทำให้ระยะทางยาวกว่าแหล่งกำเนิดที่หนึ่งด้วย เวลาการประวิงก็จะมีมากกว่า 3 ms ความสัมพันธ์ทางเฟสระหว่างสองสัญญาณควรจะขึ้นอยู่กับความถี่ของเสียงที่ 330 เฮิรตซ์ เวลาประวิง 3 ms สอดคล้องกับหนึ่งความยาวคลื่น ทำให้การประวิงของสัญญาณเป็นไปตามลักษณะที่มีเฟสเดียวกัน และไม่มีการประวิงสัญญาณถ้าใช้เวลาในการประวิงเพียงครั้งเดียว (1.5 ms) แล้วสัญญาณทั้งสองควรมีเฟสที่ต่างกันที่ 330 เฮิรตซ์



รูปที่ 1.9 แสดงการวางตำแหน่งลำโพง 2 ตัวให้คลื่นเสียงเดียวกันในเวลาเดียวกัน ความแตกต่างทางเฟสระหว่างคลื่นเสียงที่ผู้รับฟังจะเกี่ยวข้องโดยตรงกับการประวิงเวลา $t_2 - t_1$

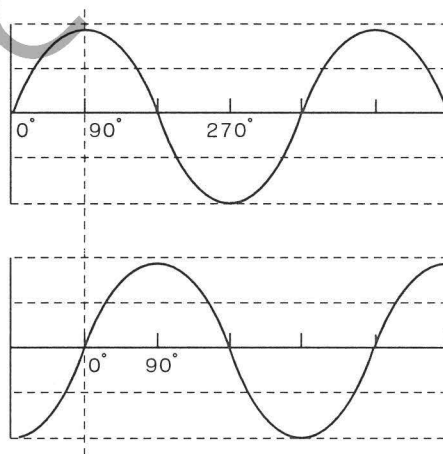
เมื่อกล่าวถึงเรื่องเฟสมักจะเกี่ยวข้องกับค่าองศาเสมอ โดยพิจารณาได้จากรูปที่ 1.10 แสดงคลื่นรูปไซน์ที่ได้จากการเคลื่อนที่ของจุดบนขอบนอกของแผ่นกลม เริ่มต้นจาก 0-360 องศาต่อ 1 รอบ ซึ่งแต่ละองศาของมุมการเคลื่อนที่บนจุด จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าไซน์ในตรีโกณมิติ เมื่อการเคลื่อนที่ของจุดมีมุม 90 องศา กราฟที่ได้จะมีค่าสูงสุดทางบวก ($\sin 90^\circ = 1$) และที่มุม 180 องศา กราฟจะมีค่าเป็นศูนย์ ($\sin 180^\circ = 0$) ที่ 270 องศาจะมีค่าสูงสุดทางลบ ($\sin 270^\circ = -1$) และที่ 360 องศา จะมีค่าเป็นศูนย์ต่อไป



รูปที่ 1.10 แสดงความสูงของจุดที่เปลี่ยนตามค่ามุมไซน์ ส่วนมุมของเฟสคือจำนวนองศาของการหมุนรอบ

ถ้าคลื่นสองคลื่นมีขนาดเท่ากันแต่เฟสไม่ตรงกัน ดังรูปที่ 1.11 คลื่นที่ 1 ต่างเฟสกับ 90 องศากับคลื่นที่ 2 นั่นก็คือเฟสทั้งสองจะต้องสัมพันธ์ต่อกันอย่างแท้จริง โดยเฉพาะรูปคลื่นที่เกิดขึ้นซ้ำ ๆ กันอย่างต่อเนื่อง เช่น ผลบางประการที่เกิดขึ้นต่อสัญญาณเสียงในภาวะชั่วคราวในช่วงเวลาสั้น ๆ คือ การเปิด-ปิดเครื่องขยายจะมีเสียงดังออกจากลำโพงทันทีทันใด ถึงแม้ว่าจะไม่เปิดเสียงก็ตาม และส่งผลให้ลำโพงเสียหายได้หากไม่แก้ไข ทั้งนี้เพราะสัญญาณกระแสไฟสลับกระชกเข้าวงจรอย่างรวดเร็วนั่นเอง จึงเรียกปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ว่า เสียงในภาวะชั่วคราว (Transient sounds)

เพราะฉะนั้นเรื่องของเฟสจึงมีส่วนเกี่ยวข้องกับวงจรขยายเสียง กล่าวคือ เมื่อมีสัญญาณผ่านเข้าวงจร จะมีการเปลี่ยนแปลงทางแอมพลิจูดและเฟสเกิดขึ้น ซึ่งลักษณะการเปลี่ยนแปลงจะเปลี่ยนไปตามค่าความถี่ต่าง ๆ โดยการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดต่อความถี่เรียกว่า การตอบสนองของความถี่ (Frequency response) ส่วนเฟสของสัญญาณที่เลื่อนไปตามค่าความถี่ต่าง ๆ เรียกว่า การตอบสนองของเฟส (Phase response)

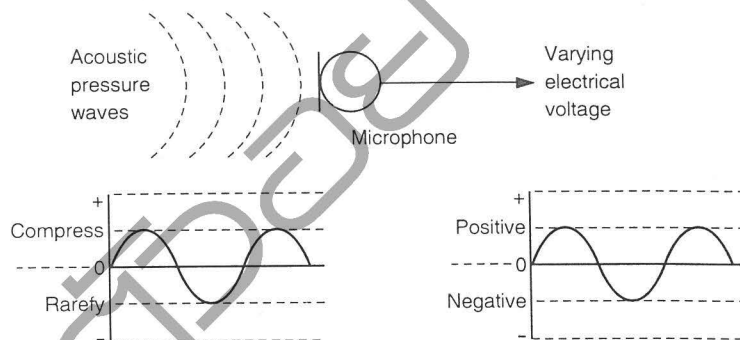


รูปที่ 1.11 รูปคลื่นมีค่าต่ำกว่า 90 องศา ต่างเฟสกับรูปคลื่นที่มีจำนวนองศาสูงกว่า

สรุป การหักล้างทางเฟส หรือเฟสต่างกันมากกว่า 90 องศา ค่าแอมพลิจูดจะถูกลดทอนลงตามเฟสที่เลื่อนไป แต่ถ้าเฟสต่างกันคาบเวลาของคลื่นทั้งสองจะแตกต่างกันอีก ผลรวมจะมีทั้งเพิ่มและลดค่าแอมพลิจูด ตรงกันข้ามหากคลื่นสองคลื่นมีเฟสเดียวกัน ผลรวมค่าที่ได้จะเพิ่มมากขึ้น

1.8 เสียงในรูปลักษณะทางไฟฟ้า

เสียงที่ได้ยินเกิดจากการสั่นสะเทือนของวัตถุ ขณะที่เสียงเดินทางไปในตัวกลาง อนุภาคของอากาศจะเกิดการอัดตัวและขยายตัว แรงกดอัดดังกล่าวเมื่อกระทบกับไมโครโฟน ส่งผลให้ไมโครโฟนทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานเสียงให้เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยนำเสียงที่ได้ไปขยายบันทึกและผสมกับสัญญาณอื่น ๆ เป็นต้น สำหรับแอมพลิจูดของสัญญาณที่เกี่ยวข้องเสียงในทางไฟฟ้า หมายถึงค่าแรงดันไฟฟ้านั่นเอง จากรูปที่ 1.12 คลื่นรูปไซน์ที่ได้เกิดจากการอัดตัวและขยายตัวของอากาศ สัญญาณครึ่งบวกเกิดจากจังหวะอัด และในช่วงจังหวะขยายตัวของอากาศ จะได้สัญญาณครึ่งทางลบสลับกันไปเรื่อย ๆ จึงเป็นเหตุให้เกิดค่าของกระแสไฟสลับ หรือ AC ขึ้น ลักษณะของการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้า ที่เกิดขึ้นจากสัญญาณเสียงจะนำไปใช้งานต่อไป



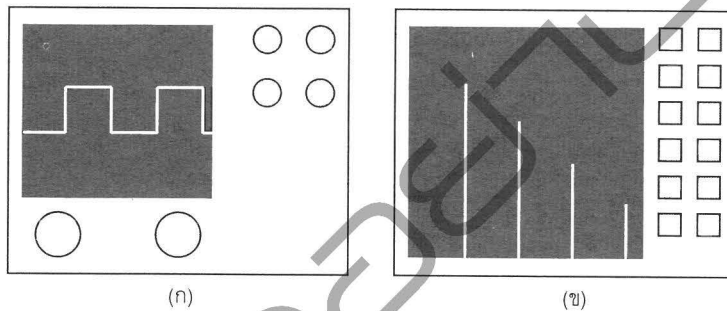
รูปที่ 1.12 ไมโครโฟนทำหน้าที่เปลี่ยนความกดดันของอากาศที่เกิดขึ้นจากเสียงต่าง ๆ ให้เป็นการเปลี่ยนแปลงในรูปของแรงดันไฟฟ้า ซึ่งการอัดตัวของอากาศจะได้ค่าแรงดันไฟฟ้าบวก และการขยายตัวของอากาศจะได้ค่าแรงดันไฟฟ้าลบ

ในระบบเอซี ค่าความต้านทานจะถูกแทนด้วยค่าอิมพีแดนซ์ที่ประกอบด้วยค่าความต้านทาน และค่ารีแอ็กแตนซ์ โดยรีแอ็กแตนซ์จะเปลี่ยนแปลงตามค่าความถี่ของสัญญาณ ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ทางไฟฟ้าก็จะเปลี่ยนแปลงตามค่าความถี่ของสัญญาณด้วย ตัวเก็บประจุเป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้าที่มีค่าอิมพีแดนซ์สูงที่สัญญาณความถี่ต่ำ และค่าอิมพีแดนซ์ต่ำที่สัญญาณความถี่สูง ทั้งนี้จะไม่ให้กระแสไหลผ่าน สำหรับตัวเหนี่ยวนำก็เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่อิมพีแดนซ์มีค่าสูงกับสัญญาณความถี่สูง และอิมพีแดนซ์มีค่าต่ำกับสัญญาณความถี่ต่ำ ดังนั้นตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำจะมีผลต่อค่าความถี่หรือเอชี่นนั้นเอง

1.9 การแสดงผลคุณลักษณะของคลื่นเสียง

ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำนอกจากจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของสัญญาณเสียงแล้ว ยังสามารถใช้ประโยชน์ได้อีกคือ แสดงผลลักษณะรูปคลื่นของเสียง และแสดงผลความถี่สเปกตรัมของเสียง โดยจอสซิลิโคสโคปจะแสดงผลรูปคลื่นเสียง สำหรับเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมจะใช้แสดงค่าของสัญญาณที่ประกอบด้วยความถี่หลายความถี่ หรือค่าของแอมพลิจูดต่าง ๆ ดังรูปที่ 1.13 เครื่องมืออุปกรณ์ทั้งสองจะมีลักษณะเป็นไปตามสัญญาณเสียงที่รับเข้ามา โดยผลที่ได้จะปรากฏบนจอ กล่าวคือ ออสซิลิโคสโคปจะแสดงผลการเคลื่อนที่ของจุด เป็นลักษณะรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ผ่านวงจรขยาย แล้วจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าเวลา และสามารถเปรียบเทียบความสัมพันธ์ทางเฟสของสองสัญญาณอินพุตได้ โดยการใช้ออสซิลิโคสโคปที่มีสองสัญญาณอินพุต

เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมจะมีความทำงานที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวิธีการวิเคราะห์สเปกตรัม กล่าวคือ จะเห็นเป็นเส้นตรงตลอดย่านความถี่ หรือเห็นเป็นเส้นลาดชัน



รูปที่ 1.13 (ก) ออสซิลิโคสโคปแสดงรูปคลื่นสัญญาณทางไฟฟ้า

(ข) เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม แสดงผลความถี่สเปกตรัมของรูปคลื่นสัญญาณทางไฟฟ้าในรูปแบบเส้น ใช้แทนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณความถี่ที่แตกต่างกัน

1.10 เดซิเบล

เดซิเบล (Decibel) หรือ dB เป็นหน่วยพื้นฐานที่ใช้แพร่หลายในวิศวกรรมระบบเสียง จะพบเห็นอยู่บ่อย ๆ เช่นเดียวกับหน่วยของโวลต์ หรือวัตต์ และใช้ในการวัดระดับสัญญาณเสียง โดยมีความสัมพันธ์กับลอการิทึม (Logarithm) ซึ่งวิศวกรโทรศัพท์ได้เรียกชื่อนี้ว่า ลอการิทึมของอัตราส่วนระหว่างกำลังเสียงสองสัญญาณ และตั้งหน่วยพื้นฐานของระบบเป็นเบล (Bel) เพื่อให้เกียรติแก่อเล็กซานเดอร์ เกรแฮมเบลล์ ผู้คิดประดิษฐ์โทรศัพท์ขึ้นเป็นคนแรก

จะได้ค่า Bel ดังนี้

$$\text{Bel} = \log (P_1/P_2)$$

$$\text{dB} = 10 \log (P_1/P_2)$$

ตัวอย่างเช่น ค่าความแตกต่างของเดซิเบลระหว่างสัญญาณของกำลังเสียง 1 และ 2 วัตต์ คือ $10 \log (2/1)$ เท่ากับ 3 dB

ถ้าเดซิเบลเป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังเสียงสองสัญญาณ การเปรียบเทียบกับค่าอื่น ๆ ที่นอกเหนือกำลังสัญญาณเสียง หมายถึงกำลังสัญญาณเสียงที่อยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้า จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \text{dB} &= 10 \log (V_1^2/V_2^2) \quad \text{เมื่อ } P = V^2/R \\ &= 10 \log (V_1/V_2)^2 \\ &= 20 \log (V_1/V_2) \end{aligned}$$

ตัวอย่างเช่น ค่าความแตกต่างของเดซิเบลระหว่างสัญญาณของแรงดันไฟฟ้า 1 โวลต์ และ 2 โวลต์ คือ $20 \log (2/1)$ เท่ากับ 6 dB

จากหน่วยวัด dB จะกำหนดเสียงที่มนุษย์ฟังได้ยินสูงสุดโดยไม่เป็นอันตรายต่อหู คือ อยู่ในช่วง 120 dB ลงมา ส่วนเสียงที่มนุษย์ฟังได้ยินเบาที่สุดคือ 0 dB ถ้าหากต่ำกว่า 0 dB จะฟังไม่ได้ยิน นอกจากนี้ระดับความดังของเสียง SPL (Sound Pressure Levels) ใช้วัดค่าเป็น dB อ้างอิงกับความดันที่ $2 \times 10^{-5} \text{ Nm}^{-2}$ (0.0002 ไมโครบาร์ หรือ 0.0002 dyne/cm^2) ที่ความถี่มาตรฐาน 1000 เฮิรตซ์

$$\begin{aligned} \text{SPL} &= 20 \log (P_2/P_1) \\ \text{เมื่อ } \text{SPL} &= \text{ระดับความดังของเสียง (dB)} \\ P_2 &= \text{ความดันของเสียงใด ๆ (Nm}^{-2}\text{)} \\ P_1 &= \text{ความดันของเสียงที่ระดับเปรียบเทียบ (Nm}^{-2}\text{)} \end{aligned}$$

การทดลองเพื่อหาค่าที่ดีที่สุดในการรับฟัง เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดอันตรายขึ้นกับหูของมนุษย์ กล่าวคือ หูของมนุษย์เริ่มได้ยินเสียงเมื่อหูได้รับความดัน $2 \times 10^{-5} \text{ Nm}^{-2}$ จนกระทั่งความดันสูงสุดที่ 200 Nm^{-2} เนื่องจากเรื่องเดซิเบลถ้าศึกษาโดยละเอียดจะมีเนื้อหาอีกมากมาย ซึ่งผู้เขียนจะกล่าวละเอียดในหนังสือระบบเสียงต่อไป ดังเช่นอักษรที่นำมาต่อท้ายค่า dB โดยจะอ้างอิงที่ระดับแตกต่างกันไป ดังตัวอย่างต่อไปนี้

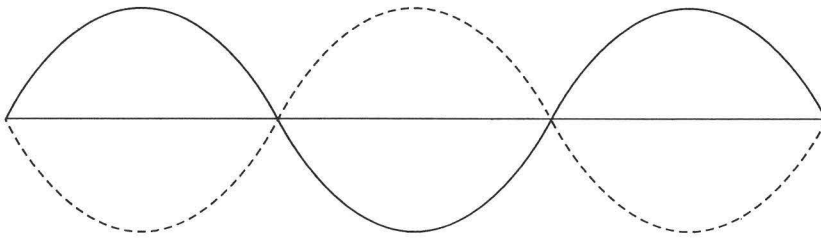
คำย่อ	ระดับอ้างอิงมาตรฐาน
dBV	1 Volt
dBu	0.775 Volt (Europe)
dBv	0.775 Volt (USA)
dBm	1 Milliwatt
dBA	dB SPL, A-Weighted response

หมายเหตุ Weighted response หมายถึงการวัดสัญญาณทดสอบโดยการจัดให้ผ่านวงจรฟิลเตอร์ เพื่อให้สัญญาณทางเอาต์พุตมีการลดทอนในแต่ละความถี่ คล้าย ๆ กับธรรมชาติของการได้ยินเสียง ถ้าหากเป็นการ Weight แบบ A จะลดทอนสัญญาณความถี่ที่ต่ำกว่า 1 กิโลเฮิรตซ์ และที่สูงกว่า 6 กิโลเฮิรตซ์

ตารางที่ 1.1 แสดงระดับความดังของเสียงจากแหล่งกำเนิดเสียง

แหล่งกำเนิดเสียง	ระดับความดัง (dB)
เสียงเบาที่สุดที่มนุษย์เริ่มได้ยิน	0
เสียงลมหายใจ	10
เสียงใบไม้กระทบกันเมื่อลมพัด	20
เสียงในสำนักงานเงียบ ๆ	30
เสียงนกร้องระยะทางไกล ๆ	40
เสียงในสำนักงานที่เปิดประตูทิ้งไว้	50
เสียงสนทนาห่างกัน 3 ฟุต	60
เสียงสนทนาห่างกัน 1 ฟุต	70
เสียงวงดนตรีออร์เคสตราในระดับเฉลี่ย	80
เสียงพัดลมระบายอากาศขนาดใหญ่	90
เสียงเลื่อยยนต์	100
เสียงวงดนตรีคอนเสิร์ตแนวร็อก	110
เสียงเครื่องบินไอพ่นบินขึ้นในระยะ 1500 ฟุต	120
มนุษย์เริ่มได้รับอันตรายจากการได้ยิน	130-140
จุดที่ทำให้หูหนวกเฉียบพลัน	150-160

1. ขณะที่โยนก้อนหินลงไปในสระน้ำ คลื่นน้ำจะเกิดขึ้น โดยน้ำกลางสระจะอยู่ในลักษณะใด
 - ก. น้ำไม่ได้เคลื่อนที่ตามคลื่น
 - ข. น้ำกลางสระจะเคลื่อนที่ตัดกับคลื่น
 - ค. น้ำจะเคลื่อนที่ขนานกับคลื่น
 - ง. น้ำเคลื่อนที่ย้อนกลับกับคลื่น
2. ความยาวคลื่นเสียง หมายถึงระยะใดของรูปคลื่น
 - ก. ระยะทางของครึ่งคลื่น
 - ข. ระยะทางของหนึ่งลูกคลื่น
 - ค. ระยะทางของสองลูกคลื่น
 - ง. ระยะทางของสามลูกคลื่น
3. ถ้าหากความเร็วในการเคลื่อนที่ของเสียงคงที่ แต่ความถี่เสียงมีค่าเพิ่มมากขึ้น ความยาวคลื่นเสียงจะมีค่าอย่างไร
 - ก. น้อยลง
 - ข. ปานกลาง
 - ค. มาก
 - ง. มากขึ้น
4. ลักษณะของรูปคลื่นเสียงโดยทั่วไป จะมีรูปคลื่นเป็นลักษณะใด
 - ก. รูปคลื่นสามเหลี่ยม
 - ข. รูปคลื่นสี่เหลี่ยม
 - ค. รูปคลื่นพัลส์
 - ง. รูปคลื่นไซน์
5. ถ้าหากอากาศมีความหนาแน่นสม่ำเสมอ คลื่นเสียงจะมีอัตราความเร็วคงที่ประมาณเท่าไร
 - ก. 330 เมตรต่อวินาที
 - ข. 450 เมตรต่อวินาที
 - ค. 550 เมตรต่อวินาที
 - ง. 620 เมตรต่อวินาที
6. ในตัวกลางที่เป็นของแข็ง เช่น เหล็ก ความเร็วของเสียงจะมีค่าโดยประมาณเท่าไร
 - ก. 620 เมตรต่อวินาที
 - ข. 1100 เมตรต่อวินาที
 - ค. 3100 เมตรต่อวินาที
 - ง. 5100 เมตรต่อวินาที
7. First overtones หมายถึงความถี่ใด
 - ก. $1f$
 - ข. $2f$
 - ค. $3f$
 - ง. $4f$
8. ถ้าหากความถี่มูลฐานเป็น 500 เฮิรตซ์ คลื่นฮาร์โมนิกที่ 3 จะมีความถี่เท่าไร
 - ก. 1000 เฮิรตซ์
 - ข. 1500 เฮิรตซ์
 - ค. 2000 เฮิรตซ์
 - ง. 2500 เฮิรตซ์



9. จากรูป ลักษณะของคลื่นที่เดินทางไปและสะท้อนกลับที่เกิดขึ้นจากการสั่นสะท้อนของเส้นเชือก จะก่อให้เกิดโนด (Node) จำนวนเท่าไร

ก. 1 โหนด	ข. 2 โหนด
ค. 3 โหนด	ง. 4 โหนด
10. Pink noise หมายถึงสัญญาณประเภทใด

ก. สัญญาณสี่เหลี่ยม
ข. สัญญาณที่ทำให้เสียงดัง
ค. สัญญาณรบกวนมีค่าเท่ากับพลังงานต่อฮิรตซ์
ง. สัญญาณเสียงในแผ่น CD
11. คลื่นที่มีเฟสต่างกันแต่ลักษณะตรงข้ามกัน ผลรวมที่ได้เป็นศูนย์ จำนวนองศาจะมีค่าต่างกันอย่างไร

ก. 90 องศา	ข. 180 องศา
ค. 270 องศา	ง. 360 องศา
12. ลักษณะของคลื่นเสียงทางไฟฟ้าจะมีลักษณะอย่างไร

ก. DC	ข. AC
ค. AC/DC	ง. DC/AC
13. ความแตกต่างของเดซิเบลระหว่างสัญญาณของกำลังเสียง 1 วัตต์ และ 2 วัตต์ จะเป็นค่าใด

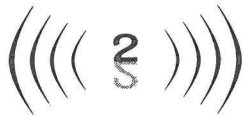
ก. 1 dB	ข. 2 dB
ค. 3 dB	ง. 4 dB
14. เสียงที่หูมนุษย์ฟังได้ยินเบาที่สุด จะมีความดังอยู่ที่ค่าเท่าไร

ก. 0 dB	ข. 1 dB
ค. 3 dB	ง. 10 dB
15. ค่าของ dBm ระดับอ้างอิงมาตรฐานจะอยู่ที่ค่าใด

ก. 0.05 mW	ข. 0.775 mW
ค. 1 mW	ง. 1.063 mW

กระดานคำตอบ

ข้อ	ก	ข	ค	ง	จ	ข้อ	ก	ข	ค	ง	จ
1						16					
2						17					
3						18					
4						19					
5						20					
6						21					
7						22					
8						23					
9						24					
10						25					
11						26					
12						27					
13						28					
14						29					
15						30					

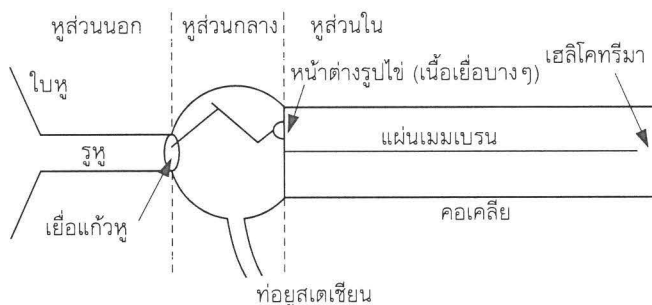


เสียงกับการได้ยิน

ในบทนี้จะกล่าวถึงกลไกการได้ยินของเสียงคือหูของมนุษย์นั่นเอง หูจะทำหน้าที่รับความถี่ของคลื่นเสียงในระดับต่าง ๆ โดยระบบประสาทหูจะเปลี่ยนคลื่นเสียงเหล่านั้นให้เป็นสัญญาณผ่านเซลล์ประสาทไปยังสมอง ซึ่งสมองจะทำหน้าที่แปลสัญญาณให้เป็นการรับรู้ต่อไป ส่วนการรับรู้เกี่ยวกับเสียงหรือการได้ยินจะชัดเจนสมบูรณ์อย่างไรนั้นขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดเสียง และการทำงานของมนุษย์

2.1 กลไกของการรับฟังเสียง

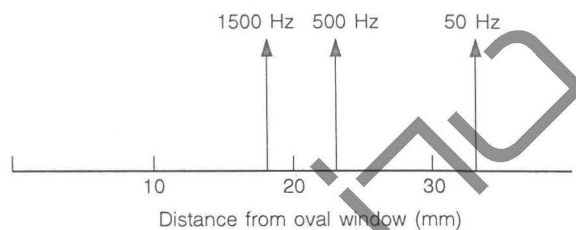
แม้ว่าจะไม่ใช่การศึกษาด้านสรีรศาสตร์โดยตรง แต่ก็มีมีความจำเป็นต้องเรียนรู้ลักษณะและส่วนประกอบของหู ดังรูปที่ 2.1 เป็นแผนผังโครงสร้างภายในหูที่ประกอบด้วยกลไกที่สำคัญ 3 ส่วนคือ หูส่วนนอก ประกอบด้วยใบหู รูหู และเยื่อแก้วหู ซึ่งเป็นเยื่อบาง ๆ ต่อจากเยื่อแก้วหู คือหูส่วนกลาง ประกอบด้วยกระดูกรูปค้อน กระดูกรูปทั่ง และกระดูกรูปโกลน ซึ่งทำหน้าที่สำคัญคือรับพลังงานสั่นสะเทือนที่ส่งมาจากเยื่อแก้วหู แล้วขยายสัญญาณเสียงที่สั่นสะเทือนผ่านเข้าไปยังหูส่วนใน ซึ่งเริ่มจากเนื้อเยื่อบาง ๆ เรียกว่า โอวอลวินโดว์ (Oval window) หรือช่องรูปไข่ซึ่งติดกับกระดูกรูปโกลน ด้านในติดกับท่อรูปคล้ายหอยโข่งมีของไหลอยู่ภายในเรียกว่า คอเคลีย (Cochlea) และแผ่นบาซิลาร์เมมเบรน (Basilar membrane) ที่กั้นภายในคอเคลีย ช่วงปลายสุดของเยื่อบางบาซิลาร์เมมเบรนห่างจากหูส่วนกลาง โดยมีช่องว่างเล็ก ๆ เรียกว่า เฮลิโคทรีมา (Helicotrema) ที่ปล่อยให้ของเหลวไหลผ่านจากช่องที่สูงกว่าไปยังช่องที่ต่ำกว่า ทั้งนี้ภายในคอเคลียมีเนื้อเยื่อที่ประกอบด้วยประสาทรับเสียง และนำสัญญาณคลื่นเสียงที่ได้ส่งต่อไปยังสมอง โดยสมองจะทำหน้าที่แปลงสัญญาณให้เป็นการรับรู้เกี่ยวกับ การได้ยินของเสียงต่อไป



รูปที่ 2.1 แสดงแผนภาพกลไกอย่างง่ายของหู

2.2 ความถี่กับการได้ยิน

การเคลื่อนที่ของเยื่อบางบาซิลาร์เมมเบรน ขึ้นอยู่กับความถี่ของคลื่นเสียง นั่นคือ ส่วนยอดของคลื่นเสียงจะเคลื่อนเข้าใกล้ช่องรูปไข่ ความดันของคลื่นเสียงจะถูกส่งผ่านต่อเข้าไปในของไหล Cochlea fluid ได้ความดันเท่าเทียมกันทุกจุด แต่ถ้ากระดูกรูปโกลนสั้นและส่งผ่านความดันให้ช่องรูปไข่ ซึ่งความดันนี้จะเป็นผลให้หน้าต่างกลม (Round window) ที่อยู่หลังช่องรูปไข่โป่งออก โดยที่ปริมาตรของไหลยังคงเท่าเดิม ทำให้ของไหลในคอเคลียเกิดสั่นปลายประสาทหรือเซลล์ขน (Hair cells) จากนั้นเซลล์ขนก็จะทำหน้าที่เปลี่ยนคลื่นเสียงให้เป็นอิมพัลส์ไฟฟ้า ส่งไปตามโสตประสาทถึงสมอง สมองก็จะแปลสัญญาณออกมา ทำให้เกิดการได้ยินเสียงเป็นคำพูด หรืออื่น ๆ เป็นต้น



รูปที่ 2.2 แสดงตำแหน่งสันสะท้อนสูงสุดของเยื่อบางบาซิลาร์เมมเบรนเคลื่อนที่ไปทางช่องรูปไข่โอวอลส่วินได้ขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความถี่

จากรูปที่ 2.2 เยื่อบางบาซิลาร์เมมเบรน โดยเฉลี่ยมีความยาวประมาณ 3.5 เซนติเมตร ส่วนเซลล์ขนมีประมาณ 30,000 เส้น เมื่อพิจารณาความถี่เสียงกับการได้ยินของมนุษย์แล้วพบว่ามนุษย์จะได้ยินคลื่นเสียงได้ทุกชนิด เพราะความถี่ต่ำมาก ๆ ประมาณ 30 เฮิรตซ์ลงไป มนุษย์จะไม่ได้ยิน แต่รับรู้ได้จากการที่คลื่นเสียงมากระทบประสาทหู จึงจำเป็นต้องใช้วงจรขยายเสียงเข้าช่วย สำหรับความถี่กลางจะมีแถบความถี่คาบเกี่ยวกันประมาณ 200 เฮิรตซ์ขึ้นไปจนถึง 4000 เฮิรตซ์ ส่วนความถี่ที่สูงกว่ามากจะฟังไม่ได้ยิน โดยพิจารณาได้จากเสียงเครื่องดนตรีชนิดต่าง ๆ

การเลือกความถี่ของหูอาจกล่าวได้ว่า มนุษย์จัดเป็นวงจรกรองความถี่ชนิดหนึ่งที่สามารถเลือกความถี่เสียงได้ ถ้าเสียง 2 เสียงมีความถี่ต่างกันเล็กน้อย เช่น สัญญาณความถี่ 200 เฮิรตซ์ และ 201 เฮิรตซ์ ดังขึ้นพร้อมกัน ความดังรวมที่ได้จะไม่สม่ำเสมอ กล่าวคือ จะมีจังหวะที่เสียงดังและไม่ดังสลับกันไป ปรากฏการณ์เช่นนั้นเป็นการสอดแทรกของคลื่นอย่างหนึ่ง ซึ่งทำให้เกิดการปิด (Beat) ขึ้น เนื่องจากเสียง 2 เสียงที่มาถึงเยื่อแก้วหู ซึ่งเป็นเยื่อบาง ๆ จะเกิดการสั่นสะเทือน และส่งสัญญาณการสั่นสะเทือนเข้าไปยังหูส่วนกลางและหูส่วนใน ผลที่ได้จะเป็นการรวมของคลื่น จุดใดที่คลื่นมีเฟสเดียวกันเสียงก็จะดัง ตรงกันข้าม จุดใดที่คลื่นมีเฟสต่างกันเสียงก็จะค่อย ความถี่ของการปิด เรียกว่า Beat frequency มีความถี่เท่ากับผลต่างคือ 201-200 เฮิรตซ์ เท่ากับ 1 เฮิรตซ์ หูจะได้ยินการปิด 1 ครั้งต่อวินาที แต่ถ้าหากมีค่าความแตกต่างมาก มนุษย์จะรับฟังไม่ทันและไม่รู้เรื่อง เช่น ความถี่ของการปิดเกิน 10 เฮิรตซ์ เป็นต้น

รายชื่อหนังสือตามหลักสูตรใหม่ ปวช. 2545

วิชาสามัญ	รหัสวิชา	ราคา/เล่ม
วิทยาศาสตร์พื้นฐาน	2000-1401	65 .-
วิทยาศาสตร์อุตสาหกรรม	2000-1402	65 .-
คณิตศาสตร์ประยุกต์ 1	2000-1501	65 .-

วิชาชีพพื้นฐาน	รหัสวิชา	ราคา/เล่ม
คอมพิวเตอร์เพื่องานอาชีพ	2001-0001	50 .-
การจัดการธุรกิจเบื้องต้น	2001-0002	65 .-
วัสดุช่างอุตสาหกรรม	2100-1002	60 .-
งานฝึกฝีมือ	2100-1004	60 .-

วิชาชีพเฉพาะ	รหัสวิชา	ราคา/เล่ม
สาขาวิชาช่างยนต์		
งานเครื่องยนต์	2101-1001	80 .-
คณิตศาสตร์ช่างยนต์	2101-2113	80 .-
สาขาวิชาเครื่องกล		
การวัดละเอียด	2102-2103	75 .-
คณิตศาสตร์เครื่องกล	2102-2105	80 .-
สาขาวิชาโลหะการ		
งานเชื่อมโลหะ 1	2103-2104	80 .-
คณิตศาสตร์ช่างเชื่อม	2103-2112	80 .-
สาขาวิชาไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์		
เครื่องวัดไฟฟ้า (ภาคปฏิบัติ)	2104-2104	80 .-
ลิตอลเบื้องต้น (ภาคทฤษฎี)	2104-2116	100 .-
ลิตอลเบื้องต้น (ภาคปฏิบัติ)	2104-2116	98 .-
วงจรไฟฟ้ากระแสตรง (ภาคทฤษฎี)	2104-2202	95 .-
วงจรไฟฟ้ากระแสตรง (ภาคปฏิบัติ)	2104-2202	80 .-
วงจรไฟฟ้ากระแสสลับ (ภาคทฤษฎี)	2104-2203	120 .-
เครื่องมือวัดไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (ภาคทฤษฎี)	2104-2204	85 .-
เครื่องเลี้ยว (ภาคทฤษฎี)	2104-2208	80 .-
เครื่องรับโทรทัศน์	2104-2211	80 .-
คณิตศาสตร์อิเล็กทรอนิกส์	2104-6208	80 .-
สาขาวิชาการก่อสร้าง		
เขียนแบบเบื้องต้น	2100-1301	85 .-
ฝึกฝีมืองานไม้	2100-1303	55 .-



ผลิตโดย ศูนย์หนังสือพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าพระนครเหนือ
1518 ถนนพิบูลสงคราม เขตบางเขน กรุงเทพฯ 10800
โทร. 0-2913-2285-7 โทรสาร. 0-2913-2287

จัดพิมพ์และจำหน่ายโดย



บริษัท สกายบุ๊คส์ จำกัด
สำนักงานใหญ่
SKYBOOK COMPANY LIMITED
515/278-8 ซ.รัชดา-ปทุมธานี ซ.ประชาวิทย์ อ.ปทุมธานี จ.ปทุมธานี 12130
โทร. 0-2926-1125-7, 0-2567-5119 โทรสาร. 0-2567-5105
E-mail: skybook1992@hotmail.com

เครื่องเสียง ภาคทฤษฎี
ISBN 974-389-209-5



9 789743 892097

ราคา 80 บาท