

การวัดทิศทางการกระจายเสียงของเครื่องดนตรีไทย(ซอด้วง)

Polarity measurement of Thai instrument (Sx d'wng)



ปริญญานิพนธ์เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวัดทิศทางการกระจายของเครื่องดนตรีไทย(ซอด้วง)

Thesis Title Polarity measurement of Thai instrument (Sx d'wng

นักศึกษา นาย พุฒิพัฒน์ โชติวัฒนศิลป์ , นาย ภาวัต วีระเศรษฐกุล

รหัสประจำตัว 58010920 , 58010937

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมดนตรี และสื่อประสม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ นาย พลสิทธิ์ ทินกร ณ อยุธยา

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
นาย พลสิทธิ์ ทินกร ณ อยุธยา	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวัดทิศทางการกระจายเสียงของเครื่องดนตรีไทย(ซอด้วง)

นักศึกษา นาย พุฒิพัฒน์ โชติวัฒนศิลป์ , นาย ภาวัต วีระเศรษฐกุล

รหัสประจำตัว 58010920, 58010937

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมดนตรี และสื่อประสม

พ.ศ. 2562

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ นาย พลสิทธิ์ ทินกร ณ อยุธยา

## บทคัดย่อ

ในช่วงเวลาหลายสิบปีที่ผ่านมา มีงานวิจัยในเรื่องของการวัดทิศทางการกระจายเสียงของเครื่องดนตรี ออเคสตรา (Orchestra) มากมายแต่ในหัวข้อดังกล่าวยังได้มีการศึกษาในเครื่องดนตรีของไทย โดยในการทดลองครั้งนี้เริ่มต้นจากความต้องการในการที่จะทราบทิศทางการกระจายเสียงของซอด้วง เพื่อทราบตำแหน่งที่ดีที่สุดในการตั้งไมโครโฟนเพื่อบันทึกเสียงซอด้วง โดยในการทำวิจัยครั้งนี้ได้ทำการทดลองซอด้วงทั้งหมด 3 กระจบอกเนื่องจากซอด้วงแต่ละกระจบอกนั้นจะมีลักษณะที่เฉพาะตัว จากการที่ซอแต่ละตัวนั้นจะทำขึ้นมาจะมาจากการทำงานที่ไม่มีขนาดและอัตราส่วนที่แน่นอนทางผู้จัดทำจึงได้ใช้จำนวนของกระจบอกซอที่มากกว่า 1 กระจบอกเพื่อที่จะได้ข้อมูลที่เป็นค่าที่ใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด ในแต่ละการทดลองจะทำการทดลองจะใช้คลื่นความถี่ไซน์เวฟ (Sine wave) (ในการทดลอง โดยความถี่นั้นทั้งหมด 9 ความถี่จะอ้างอิงจากความถี่ของค่าโน้ตตามแนวทางของวิทยาลัยนาฏศิลป์ สถาบันบัณฑิตพัฒนศิลป์ กระทรวงวัฒนธรรม) โดยในการทดลองครั้งนี้ทำการวัด 8 องศารอบกระจบอกซอ โดยที่แต่ละองศาห่างกัน 45 องศา การทดลองทำซ้ำ 3 ครั้งในแต่ละการทดลอง จากนั้นนำข้อมูลที่ได้อ้างอิงลงในโปรแกรมเพื่อหารูปร่างของ รูปแบบการกระจายเสียง ของซอด้วงแต่ละกระจบอกที่ตอบสนองในช่วงความถี่ที่แตกต่างกัน จากนั้นทำการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายเสียงของแต่ละกระจบอกที่ตอบสนอง

**Thesis** Polarity measurement of Thai instrument (Sx ด้วง)  
**Student** Mr. Phuttiapat Chodwatanasin, Mr.Pawat Weerasethakul  
**Student ID.** 58010920, 58010937  
**Degree** Bachelor of Engineering  
**Program** Music engineering and Multimedia  
**Year** 2019  
**Thesis Advisor** Phonlasit Thinnakorn na ayuthaya

### ABSTRACT

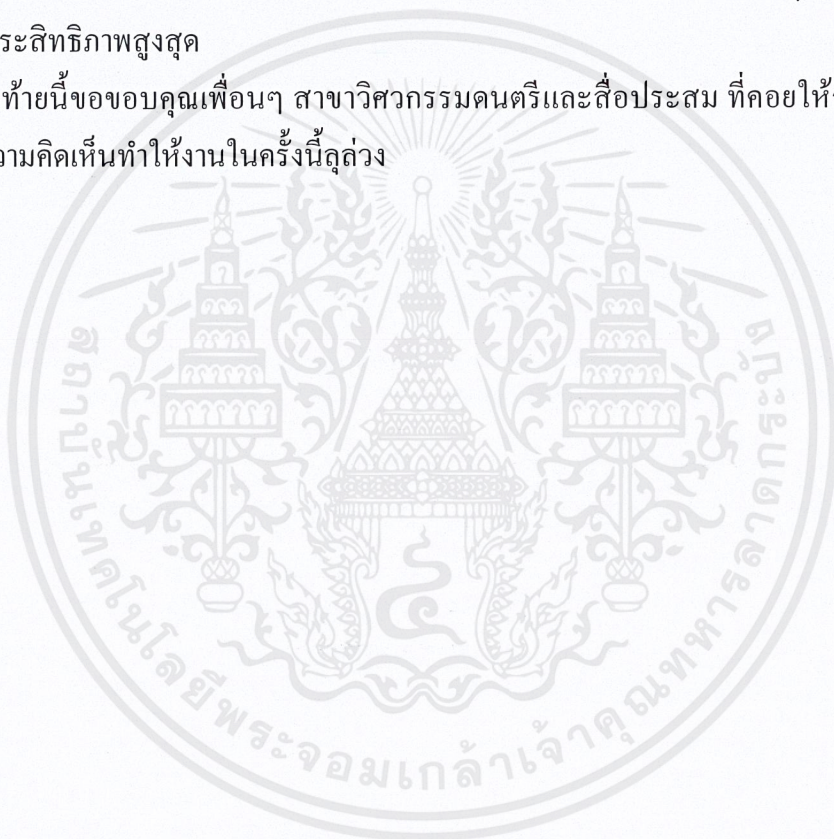
This research is study of directivity of Thai instrument 's sound. In several decades has never been done on Thai music instrument that we interested is Sx ด้วง. This project was started from the curiosity regarding the best position to capture the sound of Sx ด้วง. Researchers used three Sx ด้วง resonator, due to the uniquely of the characteristic of each resonator. Each resonator will be attached by the transducer that drive it to sound. The sine wave is test signal to be the test tone that use in this experiment. nine frequency were used to be the test tone (according to the frequency from The College of Dramatic Arts). In this experiment, we measure every 45 degrees start from an origin that is open tube side of Sx ด้วง for the directivity. Each measurement is done triple then we plot the data for the graph of polar pattern to compare the characteristic of each frequency on every angle.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาปริญญาตรี สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาจาก นาย พลสิทธิ์ ทินกร ณ อยุธยาซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้คำปรึกษา เสนอแนวคิด และให้คำแนะนำ พร้อมทั้งให้กำลังใจทำให้วิทยานิพนธ์ครั้งนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ และบุคลากรทางการศึกษา สาขาวิศวกรรมดนตรี และสื่อประสม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่คอยให้การสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้พร้อมทั้งให้คำปรึกษาในการแก้ไขปรับปรุงให้การทำงานในครั้งนี้มีประสิทธิภาพสูงสุด

และสุดท้ายนี้ขอขอบคุณเพื่อนๆ สาขาวิศวกรรมดนตรีและสื่อประสม ที่คอยให้กำลังใจและช่วยเสนอความคิดเห็นทำให้งานในครั้งนี้ลุล่วง



คณะผู้จัดทำ

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	VIII
<b>บทที่ 1</b>	<b>1</b>
<b>บทนำ</b>	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์	1
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา	1
1.4 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.5 ขั้นตอนการศึกษา	2
1.6 ข้อจำกัดของการศึกษา	2
<b>บทที่ 2</b>	<b>3</b>
<b>ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 คลื่นเสียง	3
2.2 ทรานสดิวเซอร์(transducer)	5
2.3 ทิศทางการรับเสียง (sound directivity)	5
2.4 ซอด้วง	5
<b>บทที่ 3</b>	<b>7</b>
<b>วิธีดำเนินงาน</b>	
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงาน	7
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	9
<b>บทที่ 4</b>	<b>12</b>
<b>ผลการทดลอง</b>	
4.1 ข้อมูลค่าความดังโดยเฉลี่ย	12
4.2 ข้อมูลความดังเฉลี่ยในรูปแบบของรูปแบบการกระจายเสียง (sound directivity)	13
<b>บทที่ 5</b>	<b>18</b>
<b>สรุปผล</b>	
5.1 สรุปผล	18

## สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บรรณานุกรม

19



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1	ความถี่มูลฐาน (Fundamental frequency) 3
รูปที่ 2.2	ความถี่ที่ 3 (Third harmonic frequency) 4
รูปที่ 2.3	ทรานสดิวเซอร์ (transducer) 5
รูปที่ 2.4	ส่วนประกอบต่าง ๆ ของซอด้วง 6
รูปที่ 3.1	DAYTONAUDIO transducer DAEX25 7
รูปที่ 3.2	Behringer Audio Interface U-PHORIA UMC202HD 7
รูปที่ 3.3	RTA Microphone 8
รูปที่ 3.4	ไดอะแกรมการทดลอง(block diagram) 8
รูปที่ 3.5	การตั้งไมโครโฟนเพื่อบันทึกเสียงที่จับจากกระบอกซอ 9
รูปที่ 3.6	การวัดระยะห่างของปากกระบอกซอถึงไมโครโฟน 10
รูปที่ 3.7	การบันทึกเสียงของกระบอกที่ 3 10
รูปที่ 3.8	โปรแกรมที่ใช้สำหรับทิศทางการกระจายเสียง (sound directivity) 11
รูปที่ 4.1	การเปรียบเทียบการตอบสนองต่อความถี่ของกระบอกซอทั้ง 3 กระบอกที่ตอบสนองต่อความถี่ที่ 377.8 Hertz โน้ต G 13
รูปที่ 4.2	การเปรียบเทียบการตอบสนองต่อความถี่ของกระบอกซอทั้ง 3 กระบอกที่ตอบสนองต่อความถี่ที่ 417.2 Hertz โน้ต A 13
รูปที่ 4.3	การเปรียบเทียบการตอบสนองต่อความถี่ของกระบอกซอทั้ง 3 กระบอกที่ตอบสนองต่อความถี่ที่ 460.6 Hertz โน้ต B 14
รูปที่ 4.4	การเปรียบเทียบการตอบสนองต่อความถี่ของกระบอกซอทั้ง 3 กระบอกที่ตอบสนองต่อความถี่ที่ 508.5 Hertz โน้ต C 14
รูปที่ 4.5	การเปรียบเทียบการตอบสนองต่อความถี่ของกระบอกซอทั้ง 3 กระบอกที่ตอบสนองต่อความถี่ที่ 561.6 Hertz โน้ต D 15
รูปที่ 4.6	การเปรียบเทียบการตอบสนองต่อความถี่ของกระบอกซอทั้ง 3 กระบอกที่ตอบสนองต่อความถี่ที่ 619.9 Hertz โน้ต E 15
รูปที่ 4.7	การเปรียบเทียบการตอบสนองต่อความถี่ของกระบอกซอทั้ง 3 กระบอกที่ตอบสนองต่อความถี่ที่ 684.4 Hertz โน้ต F 16
รูปที่ 4.8	การเปรียบเทียบการตอบสนองต่อความถี่ของกระบอกซอทั้ง 3 กระบอกที่ตอบสนองต่อความถี่ที่ 755.7 Hertz โน้ต G 16

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ 4.9

การเปรียบเทียบการตอบสนองต่อความถี่ของกระบอกชอทั้ง 3  
กระบอกที่ตอบสนองต่อความถี่ที่ 834.4 Hertz โน้ต A

หน้า

17



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงค่าความดังสูงสุดเฉลี่ยของแต่ละตำแหน่ง

หน้า

11



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

ซอด้วงเป็นเครื่องดนตรีไทยที่มีหน้าที่เล่นทำนองหลักในออกเทพ(Octave)สูงของวงดนตรีไทย น้อยวงเป็นส่วนประกอบหลักของวงดนตรีไทยมีลักษณะคล้ายฮู-ฉิน(Houchin) เครื่องดนตรีของจีน มีจำนวน 2 สายซึ่งใช้สำหรับในการเล่นเสียงที่ต่างกันโดยจะมีกระบอกอยู่ด้านล่างทำหน้าที่ขยายเสียงที่เกิดจากการสั่นสะเทือนจากหนังงูออกไป<sup>[1]</sup>

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ดนตรีไทยนับเป็นหนึ่งในภูมิปัญญาวัฒนธรรมอันทรงคุณค่าของประเทศไทยและเป็นองค์ประกอบสำคัญของการประกอบพิธีกรรมต่าง ๆ รวมทั้งเป็นสื่อกลางของขนบธรรมเนียม ประเพณี ศาสนา และศิลปะการแสดงดั้งเดิมของประเทศไทย ถ้าหากขาดดนตรีไทยในการดำเนินไปซึ่งประเพณีต่าง ๆ จะเสมือนว่าขาดตัวกลางสำคัญทางด้านของการปรุงแต่งอารมณ์ ความรู้สึก การประกอบกิจกรรมตามความเชื่อและจะส่งผลให้ขาดความสมบูรณ์แบบในพิธีกรรมตามประเพณีดั้งเดิมต่าง ๆ ของไทย ไม่ว่าจะเป็นในรูปแบบของการขับร้อง การบรรเลงวงดนตรีประสม หรือการบรรเลงเดี่ยวก็ตาม

ในปัจจุบันมีการศึกษาทิศทางการกระจายเสียงของเครื่องดนตรีทางตะวันตกอย่างแพร่หลาย ซึ่งต่างจากประเทศไทยที่ยังไม่มีการทำวิจัยในหัวข้อดังกล่าวในดนตรีไทยซึ่งเป็นสิ่งที่เป็นภูมิปัญญาวัฒนธรรมอันทรงคุณค่าของประเทศไทยดังนั้นในการทำวิจัยครั้งนี้จึงเห็นสมควรเป็นอย่างยิ่งว่า จำเป็นต้องสร้างมาตรฐานให้แก่ดนตรีไทยเพื่อต่อยอดและพัฒนาให้สามารถดำรงอยู่อย่างสอดคล้องกับวัฒนธรรมในปัจจุบันสืบต่อไปได้

### 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อสร้างมาตรฐานให้แก่ดนตรีไทยเพื่อทัดเทียมมาตรฐานของดนตรีสากล
- 1.2.2 เพื่อทราบตำแหน่งที่ดีที่สุดในการบันทึกเสียงซอด้วง

### 1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

สมมุติฐานที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 1.3.1 สามารถทราบตำแหน่งที่ดีที่สุดของการตั้งไมโครโฟนเพื่อบันทึกเสียงซอด้วงได้
- 1.3.2 สามารถใช้แผนภาพทิศทางการกระจายเสียง (sound directivity) เพื่ออ้างอิงในการหาตำแหน่งในการวางไมโครโฟนเพื่อบันทึกเสียงซอด้วงได้

## 1.4 ขอบเขตของการศึกษา

1.4.1 ศึกษารายละเอียดของซอด้วง

1.4.2 ประดิษฐ์อุปกรณ์มาตรฐานในการวัดเสียงซอด้วง

1.4.3 สร้างอุปกรณ์ในงบประมาณที่กำหนด

1.4.4 ใช้โปรแกรม Sci-Lab ในการพล็อตหารูปแบบของการรับเสียง (sound directivity)

## 1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1.5.1 ค้นคว้าหาข้อมูลของซอด้วง

1.5.2 ออกแบบวิธีการในการบันทึกเสียงซอด้วง

1.5.3 การจัดเก็บผลการทดลอง

1.5.4 นำผลการทดลองมาพล็อตในรูปแบบ รูปแบบการรับเสียง

## 1.6 ข้อจำกัดของการศึกษา

1.6.1 ระยะเวลาในการศึกษางานวิจัยมีระยะเวลาที่จำกัดทำให้ผลงานวิจัยอาจมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นได้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 คลื่นเสียง (Sound wave)

คือ การรบกวนภายในตัวกลางหนึ่งๆ โดยความเร็วของการเคลื่อนที่นั้นขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกลางและอุณหภูมิ

##### 2.1.1 ความถี่ (frequency)

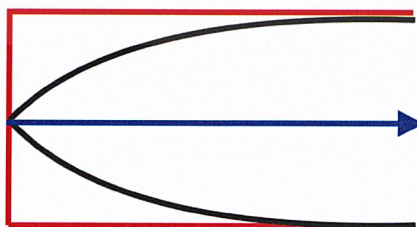
คือ ปริมาณที่บ่งบอกจำนวนครั้งที่เหตุการณ์เกิดขึ้นในเวลาหนึ่ง การวัดความถี่สามารถทำได้โดย กำหนดช่วงเวลาคงที่ค่าหนึ่ง นับจำนวนครั้งที่เหตุการณ์เกิดขึ้น นำจำนวนครั้งหารด้วยระยะเวลา

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.1)$$

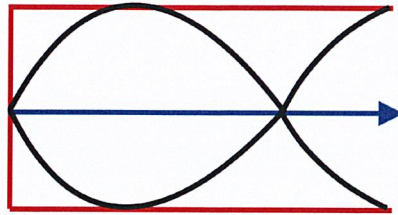
##### 2.1.1.1 ความถี่ภายในท่อที่มีปลายปิดและปลายเปิด

ความถี่มูลฐาน (fundamental frequency) คือความถี่ที่มีความยาวคลื่น ( $\lambda$ ) ยาวที่สุดภายในท่อปลายเปิดด้านเดียว โดยที่ด้านปลายปิดจะเป็นจุดที่เกิดบัพ (node) ขึ้น ส่วนในจุดของปลายท่อจะเป็นจุดที่เกิดจุด ปฏิบัพ (anti-node) ขึ้น ความถี่นี้จะเรียกว่าความถี่มูลฐาน โดยความถี่ถัดไปที่มีความยาวคลื่นมากที่สุดคือความถี่ที่สาม (third harmonic) ความถี่ถัดไปที่มีความยาวคลื่นมากเป็นลำดับต่อไปจะเป็นจำนวนเท่าเลขคี่ของหนึ่งส่วนสี่ของความยาวคลื่นเสมอ

$$L = \frac{n\lambda}{4} ; n = \text{odd number} \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.1 ความถี่มูลฐาน (fundamental frequency)



รูปที่ 2.2 ความถี่ที่ 3 (Third harmonic frequency)

### 2.1.2 คาบ (period)

คือ ปริมาณที่บ่งบอกเวลาหนึ่งนาที่จะมีคลื่นจำนวนเท่าใดเคลื่อนที่ผ่านจุดที่กำหนดไว้โดยคิดเป็นส่วนกลับของค่าความถี่

### 2.1.3 เดซิเบล (decibel)

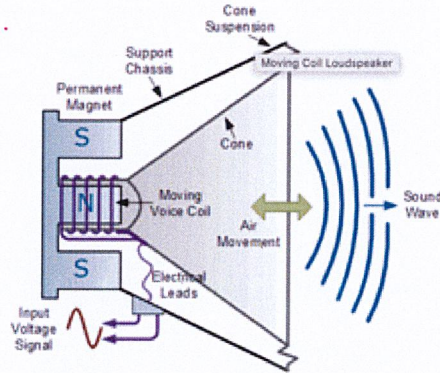
เป็นค่าใช้สำหรับวัดระดับเสียง แต่ยังใช้กันอย่างแพร่หลายในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ สัญญาณและการสื่อสาร

2.1.3.1 dBFS หรือ Decibel relative to Full Scale คือค่าที่ใช้อธิบายระดับของสัญญาณเสียงเปรียบเทียบกับค่าสัญญาณที่มากที่สุดที่ระบบ

2.1.3.2 dBVU Decibel relative to volume unit เป็นค่าวัดทางอนาล็อกที่เครื่องใช้ไฟฟ้าอ่านค่าโดย 1.228 volts มีค่า VU meter จะสามารถอ่านค่าได้ 0 dBu

## 2.2 ทรานสดิวเซอร์ (transducer)

สามารถแบ่งได้สองแบบได้แก่หนึ่งจะทำหน้าที่เป็นนำเข้าสัญญาณ(input) โดยจะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานเป็นสัญญาณไฟฟ้าและเป็นส่วนที่นำสัญญาณออก(output)จะทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นพลังงาน ในส่วนของส่วนที่นำสัญญาณออกจะเป็นอุปกรณ์ที่มีหลักการทำงานตรงข้ามกับไมโครโฟน (Microphone) โดยจะทำการแปลง สัญญาณไฟฟ้าเป็นคลื่นเสียงโดยสามารถแบ่งได้เป็นสองประเภทได้แก่ลำโพงแบบใช้การเคลื่อนไหวนวของขดลวด (moving coil speaker) และ (electromagnetic speaker) โดยในการทดลองครั้งนี้เราได้ใช้ทรานสดิวเซอร์ประเภทใช้การเคลื่อนไหวนวของขดลวด



รูปที่ 2.3 ทรานสดิวเซอร์(Transducer)

### 2.3 รูปแบบการรับเสียง (polar pattern)

ในแต่ละไมโครโฟนจะมีรูปแบบของการรับเสียงที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับการออกแบบของวิศวกร โดยแต่ละรูปแบบจะมีการใช้งานในงานที่ต่างกันไป

### 2.4 ขอดัง

ขอดัง เป็นขอสองสาย เป็นขที่มีเสียงแหลมเล็กที่สุดในเวลาเข้าประสมวง จะทำหน้าที่เป็นผู้นำวง โดยบรรเลงทำนองหลักด้วยทำนองหวานบ้าง เก็บบ้าง หรือเร็วบ้าง ตามความเหมาะสมที่มีอยู่ในเพลงคันทวนขอดังยาวประมาณ 72 เซนติเมตร คันชักยาวประมาณ 68 เซนติเมตร ใช้ขนหางม้าประมาณ 120 – 150 เส้น กะโหลกของ ขอดังนั้น แต่เดิมใช้กระบอกไม้ไผ่มาทำ ปากกระบอกของขอดังกว้างประมาณ 7 เซนติเมตร ตัวกระบอกยาวประมาณ 13 เซนติเมตร กะโหลกของขอดังนี้ ในปัจจุบันใช้ไม้จริง หรือ งาช้างทำก็ได้แต่ที่นิยมว่าเสียงดีนั้น กะโหลกขอดังต้องทำด้วยไม้ลำเจียก ส่วนหน้าขอนิยมใช้หนังงูเหลือมจึง เพราะทำให้เกิดเสียงแก้วเกิดความไพเราะอย่างยิ่ง ลักษณะของขอดัง มีรูปร่างเหมือนกับขของจีนที่เรียกว่า ฮู-ฉิน (Houchin) ทุกอย่าง เหตุที่เรียกว่าขอดัง ก็เพราะมีรูปร่างคล้ายเครื่องดักสัตว์ เพราะตัวขดักสัตว์ ทำด้วยกระบอกไม้ไผ่เหมือนกัน จึงได้เรียกชื่อไปตามลักษณะนั้นนั่นเองสายขอดังนั้น มีเพียงสองสายและมีเสียงอยู่ สองเสียง คือสายเอกจะเป็นเสียง "เร" ส่วนสายทุ้มจะเป็นเสียง "ซอล" โดยใช้สายไหมพันหรือว่าสายเอ็นก็ได้ที่เรียกว่า ดั่ง กระบอก เป็นส่วนที่อุ้มเสียงให้เกิดกังวาน รูปร่างเหมือนกระบอกไม้ไผ่ ทำด้วยไม้เนื้อแข็งบางที่ทำด้วยงาช้าง ไม้ที่ใช้ทำต่างชนิดกันจะให้คุณภาพเสียงต่างกัน เช่น เสียงนุ่ม เสียงกลม เสียงแหลม เป็นต้น ด้านหน้าของกระบอกมีวัสดุบาง ๆ จึงปิด นิยมใช้หนังงูเหลือม นอกนั้นอาจเป็นหนังลูกวัว หนังแพะ หรือใช้กระดาษว่าวปิดซ้อนกันหลาย ๆ ชั้นก็ได้<sup>[1]</sup>

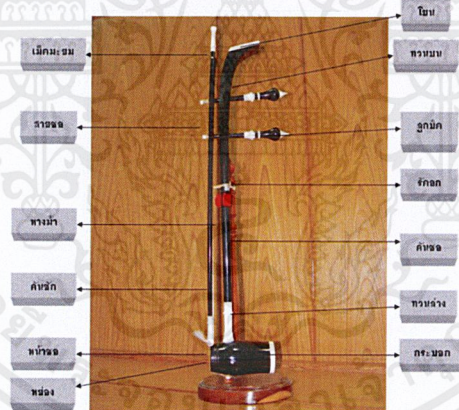
2.6.1 คันช้อ ทำด้วยไม้หรืองาช้าง ลักษณะกลมยาว สอดปีกที่กระบอกตั้งตรงขึ้นไป แบ่งออกเป็น 2 ช่วง ช่วงบนตั้งแต่ได้ลูกบิดขึ้นไปจนถึงปลายคัน รูปร่างคล้ายโขนเรือ เรียกว่า "โขน" ปลายโขนโค้งงอไปทางด้านเปิดของกระบอก ช่วงล่างนับตั้งแต่ลูกบิดลงไปเรียกว่า "ทวนล่าง"[1]

2.6.2 ลูกบิด(knob) มีอยู่สองลูก เสียบบนที่ช่วงล่างของโขน ปลายลูกบิดเจาะรูไว้สำหรับร้อยสายซอ เพื่อจึงให้ตั้งตามที่ต้องการ ลูกบิดลูกบน สำหรับสายเสียงต่ำ เรียกว่า ลูกบิดสายทุ้ม ลูกบิดลูกล่าง สำหรับสายที่มีเสียงสูง เรียกว่า ลูกบิดสายเอก<sup>[1]</sup>

2.6.3 รัศดอ เป็นบ่วงเชือกสำหรับรั้งสายซอ นิยมใช้ขนาดเดียวกันกับสายเอก ใช้ผูกรั้งสายซอทั้งสองเข้ากับทวนล่าง<sup>[1]</sup>

2.6.4 ห้อยง (bridge) เป็นไม้ชิ้นเล็กใช้หมุนสายซอให้พ้นขอบกระบอก และเป็นตัวรับความสั่นสะเทือนจากสายซอไปสู่หน้าซอ<sup>[1]</sup>

2.6.5 คันชัก (Bow) ทำด้วยไม้เนื้อแข็งหรืองาช้าง รูปโค้ง ด้ามมือจับมีหมุดสำหรับให้เส้นหางม้าคล้อง อีกด้านหนึ่งเจาะรูไว้ร้อยเส้นหางม้า ซึ่งมีประมาณ 250 เส้น สอดเส้นหางม้าให้อยู่ภายในระหว่างสายเอกกับสายทุ้ม สำหรับสี การเทียบเสียง เทียบเสียงให้ตรงกับเสียงขลุ่ยเพียงออ ทั้งสายเอกและสายทุ้ม โดยใช้สายเอกเป็นหลัก<sup>[1]</sup>



รูปที่ 2.5 ส่วนประกอบต่างๆของซอด้วง

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

##### 3.1.1 DAYTONAUDIO transducer DAEX25



รูปที่ 3.1 DAYTONAUDIO transducer DAEX25

##### 3.1.2 Behringer Audio Interface U-PHORIA UMC202HD



รูปที่ 3.2 Behringer Audio Interface U-PHORIA UMC202HD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.3 dBX RTA Microphone



รูปที่ 3.3 dBX RTA Microphone

### 3.1.4 Power amp 20W

### 3.1.5 กระบอกขอร์ดวง และ ฐานยึดกระบอกขอ

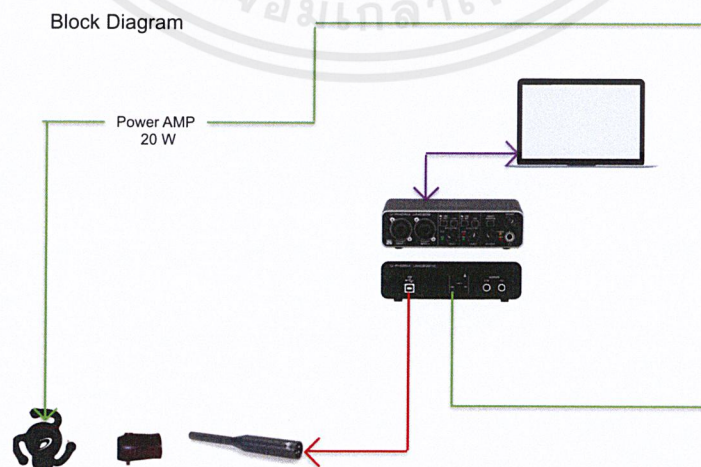
### 3.1.6 Long Mic Boom

### 3.1.7 Program: Logic Pro X

### 3.1.8 The XLR cable 5m

### 3.1.9 TS to RCA 2 cable

### 3.1.10 เครื่องวัดระนาบ



รูปที่ 3.4 ไดอะแกรมของการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

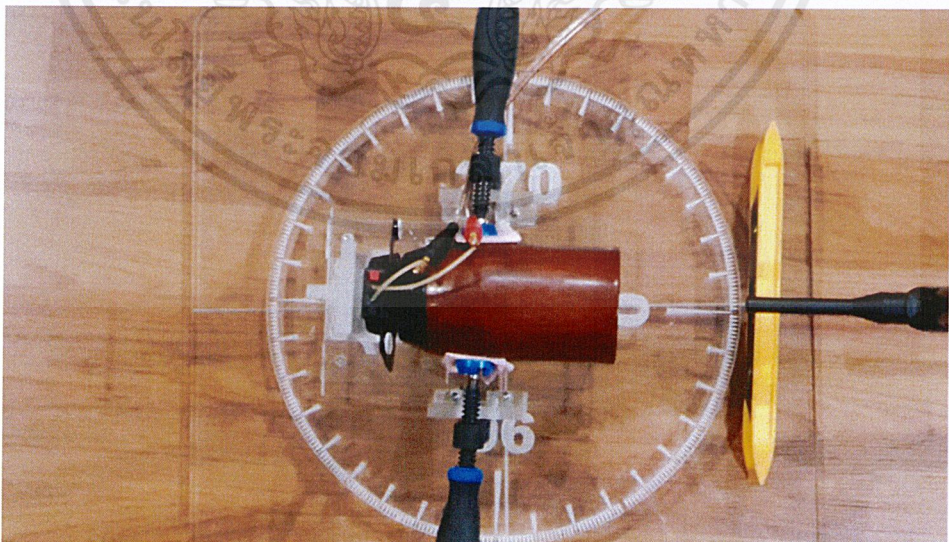
### 3.2 ขั้นตอนการวิจัย

ในการวัดทิศทางการกระจายเสียง ของกระบอกชอทางผู้วิจัยได้ทำการวัดทั้งหมด 8 องศา คือ 0, 45, 90, 135, 180, 225, 270 และ 315 องศา โดยใช้ตัวฐานยึดกระบอกชอซึ่งสามารถหมุนได้รอบทิศทาง และ ดิจิต DAYTONAUDIO transducer ไว้ที่หน้าซึ่งยึดอยู่กับกระบอกชอ โดยให้ด้านปลายเปิดของกระบอกชอเป็น 0 องศา

3.2.1 ทำการจำลองสัญญาณไซน์ (Sine Wave) ทั้งหมด 9 ค่า 377.8 Hz, 417.2 Hz, 460.6 Hz, 508.5 Hz, 561.5 Hz, 619.9 Hz, 684.4 Hz, 755.7 Hz และ 834.4 Hz ซึ่งแทนตัวโน้ต 9 ตัวของชอ แล้วจึงขับเสียงความถี่ต่างออกทาง ทรานสดิวเซอร์ซึ่งติดอยู่ที่กระบอกชอ

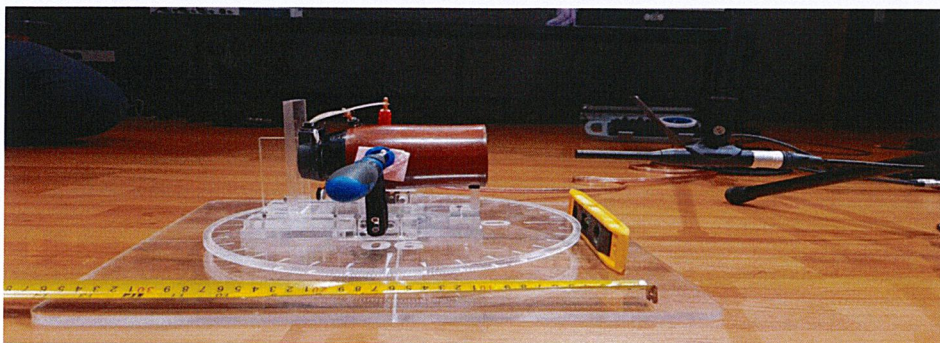
3.2.2 ในการบันทึกเสียงนั้นได้ใช้ความถี่ 561.5 Hz ซึ่งเป็นโน้ตกลางของทั้ง 9 ความถี่ที่เลือกในการตั้งค่าการขยายสัญญาณ (gain) ของ ไมโครโฟน RTA (RTA microphone) ให้อยู่ที่ -15dBfs ซึ่งใช้เป็นค่ากลางในการวัดทุกค่าความถี่ แล้วจึงวัดค่าความถี่อื่น ๆ โดยที่ไม่ปรับ ค่าการขยายสัญญาณ และ ค่าความดังของลำโพงอีก

3.2.3 ทำการบันทึกค่าของแต่ละมุมที่ส่งผลต่อเสียง โดยใน 1 มุมนั้นจะใช้ทั้ง 9 ความถี่ความถี่ละ 3 ครั้ง จากนั้นจึงฐานไปที่ 45 องศาแล้วทำขั้นตอนเดิมซ้ำไปจนครบทั้ง 8 มุม



รูปที่ 3.5 การตั้งไมโครโฟนเพื่อบันทึกเสียงที่ขับจากกระบอกชอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



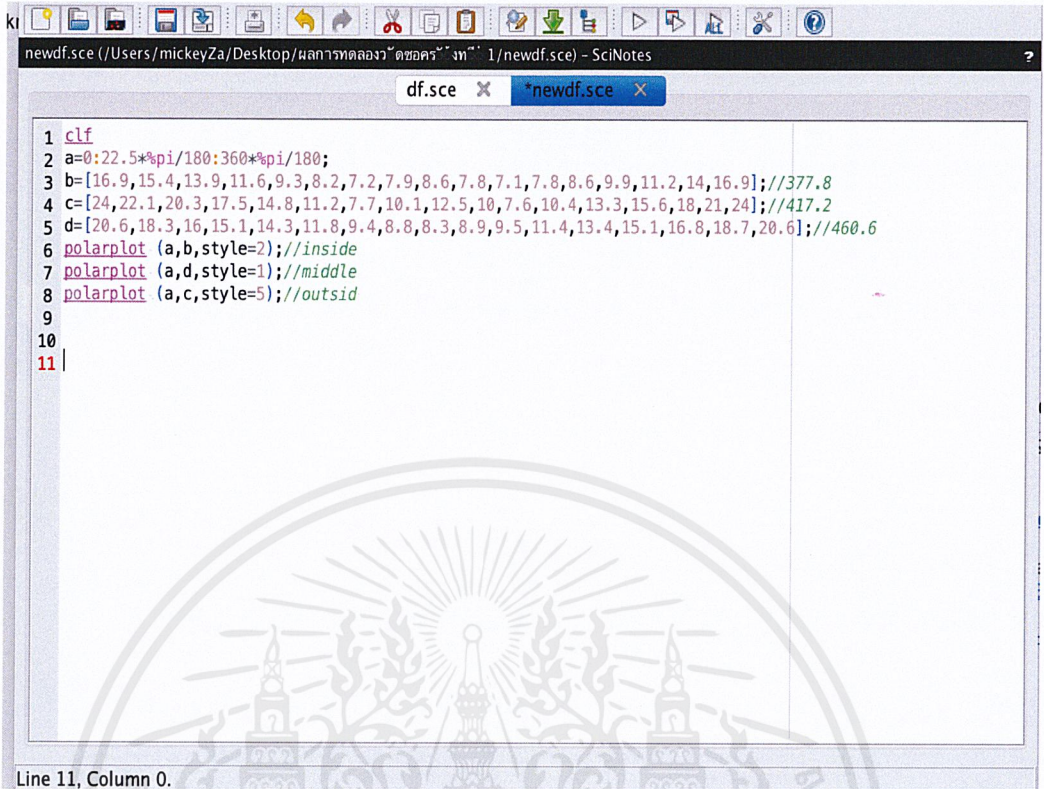
รูปที่ 3.6 การวัดระยะห่างของปากกระบอกชอถึงไมโครโฟน



รูปที่ 3.7 การบันทึกเสียงของกระบอกที่ 3

3.2.4 เมื่อบันทึกค่าทั้งหมดครบแล้วจึง หาค่าที่มากที่สุด (Peak) ในแต่ละความถี่ต่อมุมนั้น ๆ แล้วจึงนำมาเข้าโปรแกรม Sci-Lab เพื่อพล็อตรูปแบบการกระจายเสียง (sound directivity) ของกระบอกชอในแต่ละความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



```

1 clf
2 a=0:22.5*pi/180:360*pi/180;
3 b=[16.9,15.4,13.9,11.6,9.3,8.2,7.2,7.9,8.6,7.8,7.1,7.8,8.6,9.9,11.2,14,16.9];//377.8
4 c=[24,22.1,20.3,17.5,14.8,11.2,7.7,10.1,12.5,10,7.6,10.4,13.3,15.6,18,21,24];//417.2
5 d=[20.6,18.3,16,15.1,14.3,11.8,9.4,8.8,8.3,8.9,9.5,11.4,13.4,15.1,16.8,18.7,20.6];//460.6
6 polarplot (a,b,style=2);//inside
7 polarplot (a,d,style=1);//middle
8 polarplot (a,c,style=5);//outsid
9
10
11 |

```

Line 11, Column 0.

รูปที่ 3.8 โปรแกรมที่ใช้สำหรับ plot sound directivity

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

จากผลการทดลองโดยการเปรียบเทียบระหว่างกระบอกข้อทั้ง 3 กระบอกโดยทำการพล็อต (plot) กราฟจากความถี่เชิงเดียวจากการทดลองทั้งหมด 3 ครั้งต่อ 1 องศาโดยกำหนดให้ด้านบนหรือที่ 0 องศา เป็นบริเวณปากกระบอกข้อจากนั้นทำการสังเกตผลที่ได้จากการทดลอง

#### 4.1 ข้อมูลค่าความถี่เชิงเดียว

	No.5							
	0	45	90	135	180	225	270	315
377.8 Hz	-29.6	-28.5	-39.8	-40.4	-39.4	-39.2	-35.1	-32.5
417.2 Hz	-23.0	-24.0	-34.8	-39.6	-37.9	-30.0	-27.1	-32.1
460.6 Hz	-24.0	-26.7	-31.7	-35.3	-34.1	-31.4	-23.1	-28.1
508.5 Hz	-26.2	-26.8	-29.7	-32.7	-30.2	-38.6	-24.2	-25.8
561.5 Hz	-27.6	-28.9	-32.5	-32.7	-30.9	-40.5	-25.9	-23.7
619.9 Hz	-26.3	-28.9	-35.5	-31.5	-30.0	-37.7	-27.0	-23.4
684.4 Hz	-24.5	-25.6	-32.0	-32.0	-30.0	-39.5	-27.3	-21.4
755.7 Hz	-23.5	-24.5	-29.3	-30.6	-29.7	-36.4	-27.7	-20.3
834.4 Hz	-17.2	-18.5	-26.6	-30.0	-30.8	-32.5	-23.4	-15.5
	No.1							
	0	45	90	135	180	225	270	315
377.8 Hz	-19.9	-28.5	-27.6	-34.5	-36.2	-31.9	-29.6	-27.4
417.2 Hz	-15.1	-21.9	-21.4	-32.0	-33.0	-27.8	-23.4	-20.1
460.6 Hz	-16.1	-25.7	-23.0	-32.3	-32.0	-26.9	-22.8	-25.1
508.5 Hz	-17.1	-25.6	-22.5	-32.0	-33.2	-25.6	-18.4	-24.3
561.5 Hz	-15.0	-23.5	-23.8	-31.2	-29.5	-28.6	-22.5	-22.9
619.9 Hz	-15.2	-23.2	-24.8	-31.1	-32.4	-29.8	-25.0	-22.4
684.4 Hz	-11.6	-21.9	-24.8	-31.8	-31.2	-29.6	-25.0	-20.0
755.7 Hz	-9.7	-19.3	-21.2	-28.4	-30.6	-27.1	-21.3	-19.9
834.4 Hz	-4.1	-13.2	-16.9	-25.7	-28.2	-24.4	-20.3	-12.8
	No.2							
	0	45	90	135	180	225	270	315
377.8 Hz	-7.2	-6.1	-11.3	-16.6	-11.8	-15.8	-10.0	-6.4
417.2 Hz	-15.3	-14.6	-26.6	-27.7	-16.6	-25.0	-26.0	-13.2
460.6 Hz	-21.5	-24.5	-32.5	-34.3	-21.0	-32.1	-31.4	-24.0
508.5 Hz	-25.2	-27.3	-32.5	-33.8	-23.6	-33.1	-33.1	-26.7
561.5 Hz	-24.6	-26.7	-30.8	-33.7	-31.7	-31.0	-30.7	-25.1
619.9 Hz	-21.1	-23.6	-31.0	-30.8	-30.7	-29.0	-28.0	-23.3
684.4 Hz	-18.4	-19.5	-26.8	-27.2	-27.4	-28.5	25.7	-18.0
755.7 Hz	-12.8	-14.9	-21.2	-22.9	-17.3	-24.0	-20.1	-13.9
834.4 Hz	-12.3	-14.1	-18.9	-27.9	-25.8	-25.2	-17.0	-14.5

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงค่าค่าตั้ง โดยเฉลี่ย (peak) เฉลี่ยของแต่ละตำแหน่ง

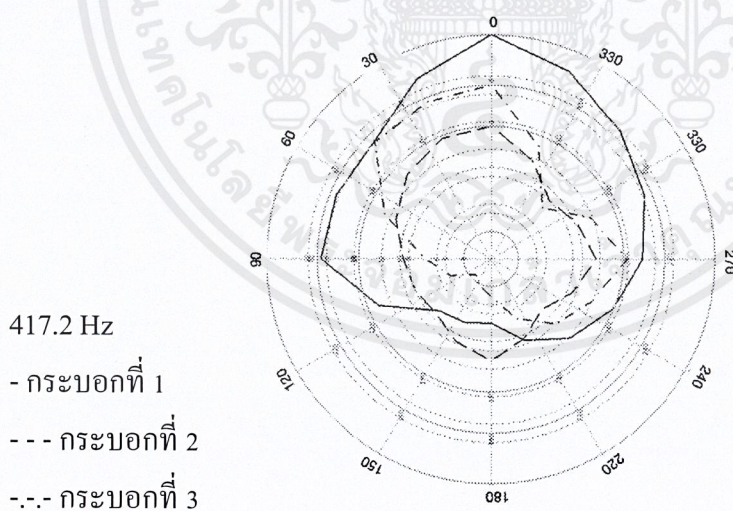
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2 ค่าของความดังเฉลี่ยในรูปแบบของ รูปแบบการกระจายเสียง (sound directivity)

หลังจากที่ได้ข้อมูลในรูปแบบหน่วย เดซิเบล (decibel) จะทำการใส่ค่าลงใน โปรแกรม Sci-Lab เพื่อทำการพล็อต(plot)ค่าอยู่ในรูปทิศทางการกระจายเสียงแล้วทำการเปรียบเทียบ



รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบการตอบสนองต่อความถี่ของกระบอกซอทั้ง 3 กระบอกที่ตอบสนองต่อความถี่ที่ 377.8 Hertz โน้ต G



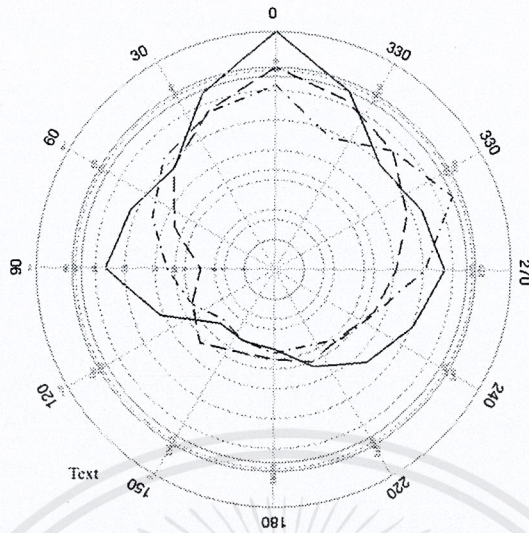
รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบการตอบสนองต่อความถี่ของกระบอกซอทั้ง 3 กระบอกที่ตอบสนองต่อความถี่ที่ 417.2 Hertz โน้ต A

460.6 Hz

- กระจกที่ 1

- - - กระจกที่ 2

- . - . กระจกที่ 3



รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบการตอบสนองต่อความถี่ของกระจกซอทั้ง 3 กระจกที่ตอบสนองต่อความถี่ที่ 460.6 Hertz โน้ต B

508.5 Hz

- กระจกที่ 1

- - - กระจกที่ 2

- . - . กระจกที่ 3



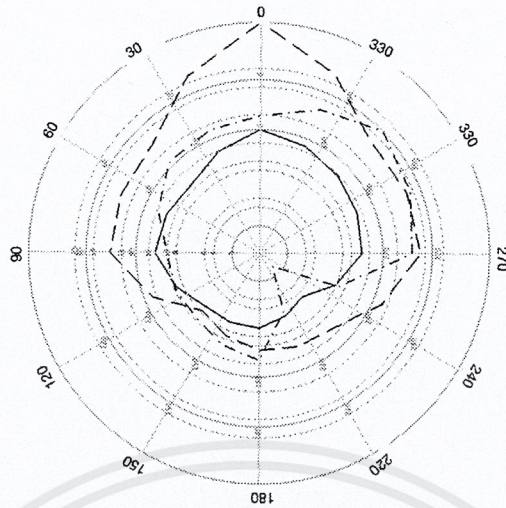
รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบการตอบสนองต่อความถี่ของกระจกซอทั้ง 3 กระจกที่ตอบสนองต่อความถี่ที่ 508.8 Hertz โน้ต C

561.6 Hz

- กระบอกที่ 1

- - - กระบอกที่ 2

-.-.- กระบอกที่ 3



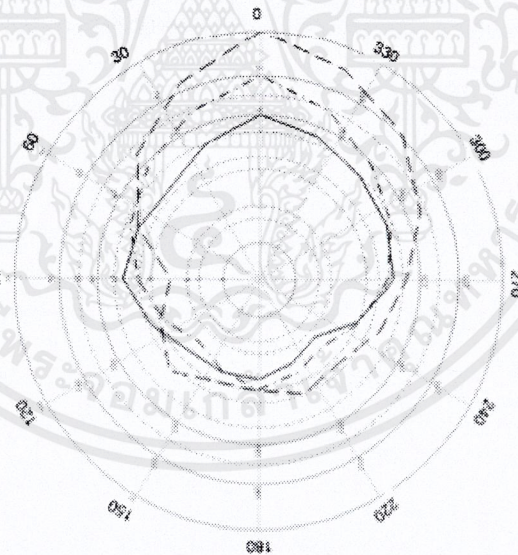
รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบการตอบสนองต่อความถี่ของกระบอกซอทั้ง 3 กระบอกที่ตอบสนองต่อความถี่ที่ 561.6 Hertz โน้ต D

619.9 Hz

- กระบอกที่ 1

- - - กระบอกที่ 2

-.-.- กระบอกที่ 3

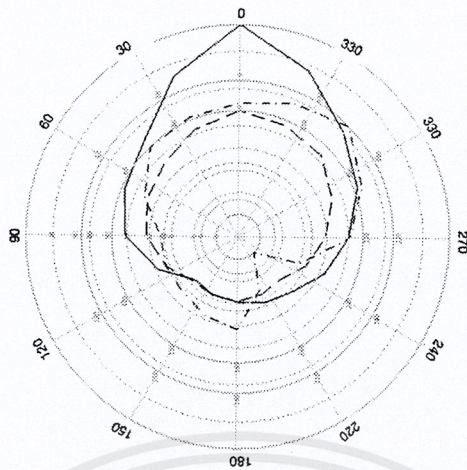


รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบการตอบสนองต่อความถี่ของกระบอกซอทั้ง 3 กระบอกที่ตอบสนองต่อความถี่ที่ 619.9 Hertz โน้ต E

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

684.4 Hz

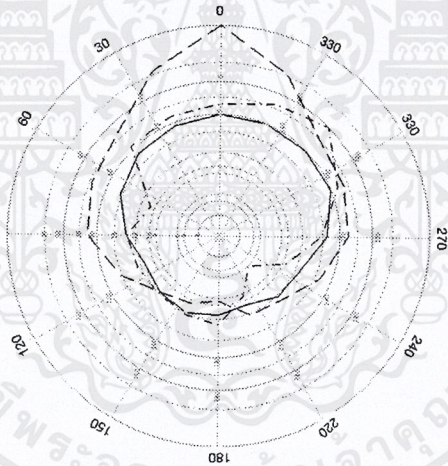
- กระบอกที่ 1
- - - กระบอกที่ 2
- .-.- กระบอกที่ 3



รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบการตอบสนองต่อความถี่ของกระบอกซอทั้ง 3 กระบอกที่ตอบสนองต่อความถี่ที่ 684.4 Hertz โน้ต F

755.7 Hz

- กระบอกที่ 1
- - - กระบอกที่ 2
- .-.- กระบอกที่ 3



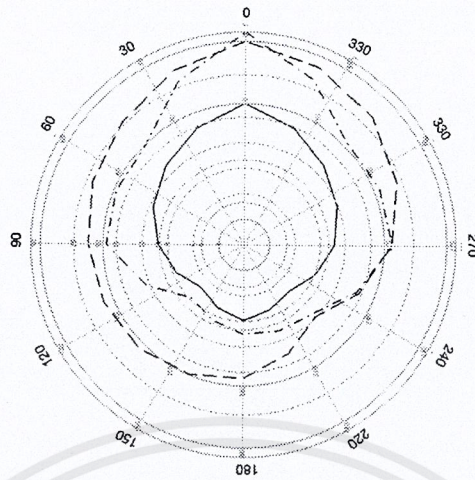
รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบการตอบสนองต่อความถี่ของกระบอกซอทั้ง 3 กระบอกที่ตอบสนองต่อความถี่ที่ 755.7 Hertz โน้ต G

834.4 Hz

- กระทบที่ 1

--- กระทบที่ 2

-.-.- กระทบที่ 3



รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบการตอบสนองต่อความถี่ของกระบอกชอทั้ง 3 กระบอกที่ตอบสนองต่อความถี่ที่ 834.4 Hertz โน้ต A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผล

#### 5.1 สรุปผล

จากการทดลองพบว่าตำแหน่ง 0 องศาเป็นตำแหน่งที่ดีที่สุดในการตั้งไมโครโฟนเพื่อทำการบันทึกเสียงเครื่องดนตรีซอด้วงจากที่สังเกตได้จากผลจากกราฟ รูปแบบการกระจายเสียง (sound directivity) และค่าความดังโดยเฉลี่ยของผลการทดลองโดยในตำแหน่งที่ 0 องศาจะมีค่าความดังเฉลี่ยสูงสุดเมื่อเทียบกับตำแหน่งอื่น ๆ ในส่วนขององศาที่มีค่าความดังโดยเฉลี่ยเป็นอันดับที่ 2 นั้นคือตำแหน่งที่ 270 องศาหรือทางขวาของกระบอกลซึ่งสามารถใช้เป็นตำแหน่งในการตั้งไมโครโฟนได้ถ้าหากเกิดข้อขัดข้องในการตั้งไมโครโฟนที่ตำแหน่ง 0 องศาส่วนในตำแหน่งอื่น ๆ เนื่องจากความแตกต่างของความยาวของกระบอกลและวัสดุของแต่ละกระบอกลที่มีผลต่อค่าความถี่มูลฐานทำให้มีการตอบสนองต่อความถี่ต่างกันทำให้ข้อมูลที่สามารถบันทึกได้มีค่าที่หลากหลายเกินกว่าที่จะสามารถสรุปได้

## บรรณานุกรม

- [1] ปัญญา รุ่งเรือง. 2517. “ประวัติการดนตรีไทย”. (23 มีนาคม 2562)
- [2] “เครื่องดนตรีไทยประเภทสี” <https://sites.google.com/a/samakki.ac.th/kheruxng-dntri-thiy-3-2/kheruxng-dntri-thiy-prapheth-kheruxng-si/1-sx-dwng>. (23 มีนาคม 2562)
- [3] Daniel Fernandez Comesaña .2552. “Measuring musical instruments directivity pattern with scanning techniques” [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <https://eprints.soton.ac.uk/346037/> . (13 มีนาคม 2562)
- [4] E. McClain Jr., OmegaLab Studio, Nashville TN .2561. “Visualizing Sound Directivity via Smartphone Sensors Scott H. Hawley, [ระบบออนไลน์] . แหล่งที่มา <https://arxiv.org/pdf/1702.06072.pdf> . (13 มีนาคม 2562)
- [5] Jukka P. tynen, Tapio Lokki . 2553. “Directivities of Symphony Orchestra Instruments”. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา [https://research.aalto.fi/en/publications/directivities-of-symphony-orchestra-instruments\(438d430e-2746-4a6f-884f-d70164ac9c78\)/export.html](https://research.aalto.fi/en/publications/directivities-of-symphony-orchestra-instruments(438d430e-2746-4a6f-884f-d70164ac9c78)/export.html) . (14 มีนาคม 2562)
- [6] Joe Wolfe. 2552. “What is decibel?” [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.animations.physics.unsw.edu.au/jw/dB.html>. (24 มีนาคม 2562)
- [7] Malte Kob, Harald Jers. 2553. “Directivity measurement of a singer” [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <https://www.ingentaconnect.com/content/incep/incep/2017/00000255/00000007> . (14 มีนาคม 2562)
- [8] Wayne Storr. 2562. “Sound transducer” [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา [https://www.electronicstutorials.ws/io/io\\_8.html](https://www.electronicstutorials.ws/io/io_8.html)
- [9] Zhoa Yuezhe ,Zhou Ting .2553. “The sound directivity measurement of Chinese musical instrument Gaohu” [ระบบออนไลน์] . แหล่งที่มา [https://users.aalto.fi/~ktlokki/Publs/patynen\\_aaau\\_2010.pdf](https://users.aalto.fi/~ktlokki/Publs/patynen_aaau_2010.pdf) . (14 มีนาคม 2562)
- [10] “<http://labman.phys.utk.edu/phys221core/modules/m12/Standing%20sound%20waves.html>” [ระบบออนไลน์] (23 มีนาคม 2562) Wayne Storr