

การศึกษาคุณสมบัติของสายที่มีผลต่อเสียงเครื่องดนตรีจะเข้
STUDY OF EFFECT OF STRING PROPERTIES ON SOUND OF JAKHE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

การศึกษาคุณสมบัติของสายที่มีผลต่อเสียงเครื่องดนตรีจะเข้

STUDY OF EFFECT OF STRING PROPERTIES ON SOUND OF JAKHE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY OF EFFECT OF STRING PROPERTIES ON SOUND OF JAKHE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2560

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

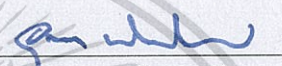
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาคุณสมบัติของสายที่มีผลต่อเสียงเครื่องดนตรีจะเข้

STUDY OF EFFECT OF STRING PROPERTIES ON SOUND OF JAKHE

ผู้จัดทำ

- | | | | |
|----------------|--------------|--------------|----------|
| 1. นายทรงพล | แก้วไชโย | รหัสประจำตัว | 57010504 |
| 2. นายทรงพล | บำเพ็ญพันธุ์ | รหัสประจำตัว | 57010505 |
| 3. นายธีรวัฒน์ | หวังวิวัฒนา | รหัสประจำตัว | 57010637 |


(ผศ.ดร. อุนนัต พิณโสภณ)

อาจารย์ที่ปรึกษา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาคุณสมบัติของสายที่มีผลต่อเสียงเครื่องดนตรีจะเข้

นายทรงพล	แก้วไชโย	57010504
นายทรงพล	บำเพ็ญพันธุ์	57010505
นายธีรวัฒน์	หวังวิวัฒนา	57010637
ผศ. ดร. อุนนัต	พิณโสภณ	อาจารย์ที่ปรึกษา ปีการศึกษา 2560

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกลกับคุณภาพเสียง โดยเลือกสายที่นำมาทดสอบจากผลแบบสอบถามความนิยมของสายจะเข้และสายชนิดอื่นที่คาดว่าสามารถนำมาเป็นสายจะเข้ได้ รวม 8 ชนิด ได้แก่ เอ็นเทนนิส เอ็นตกลปลา เอ็นก่อสร้างเบอร์ 100 เบอร์ 120 เบอร์ 150 เส้นไหม เชือกขาวเบอร์ 60 และเชือกถัก P.P. เบอร์ 5 โดยทำการวัดคุณสมบัติเชิงกลได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลาง ความหนาแน่นเชิงเส้น แรงตึงในสาย และค่ามอดุลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ ขณะที่สายถูกขึงอยู่บนจะเข้ และสั่นด้วยความถี่มูลฐาน 262 เฮิรตซ์ และทำการบันทึกเสียงจากนั้นวิเคราะห์สัญญาณเสียงด้วยวิธี Fast Fourier Transform (FFT) เพื่อหาค่า ความดันเสียงสูงสุด อัตราส่วนความหน่วง (Damping Ratio) และค่าเฉลี่ยความถี่เสียง (Spectrum Centroid) และทำการวิเคราะห์คู่ข้อมูลระหว่าง แรงตึงในสายกับความหนาแน่นเชิงเส้น ความดันเสียงสูงสุดกับแรงตึงในสาย อัตราส่วนความหน่วงกับเส้นผ่านศูนย์กลาง รายงานนี้ยังได้แสดงความเหมาะสมของการใช้สาย และส่วนประกอบพลังงานเสียงของฮาร์โมนิกของสายแต่ละชนิด จากผลการทดลองพบว่า เส้นไหมมีค่าเฉลี่ยความถี่เสียง และผลรวมของส่วนประกอบพลังงานเสียงของฮาร์โมนิกที่ 2 ถึง 6 สูงที่สุด ที่ 996.9 เฮิรตซ์ และร้อยละ 13 ซึ่งอาจสรุปได้ว่าจากสายนำมาทดสอบทั้งหมด เสียงจากเส้นไหมมีความไพเราะที่สุด และจากการวิเคราะห์พบว่าสายที่มีความหนาแน่นเชิงเส้นสูงกว่าจะสร้างเสียงที่ดังกว่าเมื่อตีด้วยแรงที่เท่ากัน แต่จำเป็นต้องใช้แรงตึงในสายสูงขึ้นด้วย และสายที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าจะสร้างเสียงที่มีหางเสียงยาวกว่า

STUDY OF EFFECT OF STRING PROPERTIES ON SOUND OF JAKHE

Songpol	Gaewchaiyo	57010504
Songpon	Bumpangpun	57010505
Teerawat	Wangwiwattana	57010637
Advisor	Asst.Prof.DR. Unnut	Pinsopol
Academic Year 2017		

Abstract

This project is a study of strings properties that effect on sound quality of Jakhe (Thai traditional music instrument). The studied string types were selected according to a result of popular Jakhe string types survey and other similar strings, total 8 types included tennis string, fishing string, construction string No.100, No.120, No.150, silk string, white rope No.60, and Nylon P.P. No.5. The physical properties included Young's modulus, diameter, linear density and string tension were measured while the string was stretched on the Jakhe with 262 hertz fundamental frequency. The plucked strings using excitation device vibrate with fundamental frequency 262 hertz (C4). Sound of each string type was measured on the same Jakhe. The results were analyzed by the Fast Fourier Transform (FFT) method to get the sound pressure level, damping ratio and spectrum centroid. The test results were matched and compared between string tension and linear density, maximum sound pressure and string tension, and damping ratio and diameter. Appropriate rhythm and sound power component of harmonics of each string were also presented. According to the experimental results, the silk string has the highest spectral centroid and sound power component of 2nd to 6th harmonics with 996.9 hertz and 13 percent. Therefore, it may be concluded that the silk string produce the richest sound. According to the analysis results, higher linear density string produce louder sound when it was excited with same force but higher tension is necessary and smaller diameter string produce more sustain sound.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดีด้วยคำแนะนำ และการให้คำปรึกษาเกี่ยวกับแนวทางการวิเคราะห์เสียง เทคนิคการเขียนบทความทางวิชาการ และแนวทางในการทำงานวิจัย รวมทั้งชี้แนะแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในการทดลอง จาก ผศ. ดร. อุนนัต พิณโสภณ อาจารย์ที่ปรึกษา รวมทั้งอาจารย์ภาควิศวกรรมเครื่องกล ภาควิศวกรรมดนตรีและสื่อประสมทุกท่าน ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่าน และขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณ ดร. บำรุง พ่วงเกิด และ อ. สยาม สงวนรัมย์ อาจารย์ประจำภาควิศวกรรมเครื่องกล และ อ. ขจรศักดิ์ กิตติเมธาวิวัฒน์ และ ดร. ณิชนนท์ ชิตานนท์ อาจารย์ประจำภาควิศวกรรมดนตรีและสื่อประสม ที่ให้คำแนะนำการปรับปรุง และแก้ไขเนื้อหาวิทยานิพนธ์ให้มีความถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้นไป

ขอขอบพระคุณ อ. สหรัฐ จันท์เฉลิม ผู้เชี่ยวชาญในด้านการเล่นจะเข้ และ นายศุภภาพ ไทโรวิมาน (ช่างโจ) ผู้เชี่ยวชาญในด้านการทำจะเข้ ที่ให้ข้อมูลและคำปรึกษาต่าง ๆ ที่เอื้อต่อการทำงาน จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณภาควิศวกรรมเครื่องกลและภาควิศวกรรมดนตรีที่เอื้อเพื่อสถานที่เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยฉบับนี้

อนึ่ง ผู้เขียนหวังว่างานวิจัยฉบับนี้จะมีประโยชน์อยู่ไม่น้อย จึงขอมอบส่วนดีทั้งหมดนี้ให้แก่เหล่าคณาจารย์ ที่ได้ประสิทธิประสาทวิชาจนทำให้ผลงานวิจัยเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่เกี่ยวข้อง และขอมอบความกตัญญูตเวทิตาคุณ แต่บิดา มารดาและผู้มีพระคุณทุกท่าน สำหรับข้อบกพร่องต่าง ๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นนั้น ผู้วิจัยขอน้อมรับผิดเพียงผู้เดียว และยินดีที่จะรับฟังคำแนะนำจากทุกท่านที่ได้เข้ามาศึกษา เพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนางานวิจัยต่อไป

นายทรงพล

แก้วไชโย

นายทรงพล

บำเพ็ญพันธุ์

นายธีรวัฒน์

หวังวิวัฒนา

สารบัญ

หน้าที่

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนของการศึกษา.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 เสียง.....	3
2.1.1 การกำเนิดเสียง.....	3
2.1.2 ลักษณะทางกายภาพของคลื่นเสียง.....	4
2.2 หน่วยของเบล.....	4
2.2.1 ระดับความเข้มเสียง.....	5
2.3 สมบัติเชิงกลของวัสดุ.....	8
2.4 ทฤษฎีการสั่นของสาย.....	8
2.4.1 ทฤษฎีของ Vincenzo Galilei.....	9
2.4.2 กฎของ Mersenne.....	11
2.5 การสั่นภายใต้ตัวหน่วงการสั่นสะเทือน.....	12
2.6 ตัวบ่งชี้แต่ละเครื่องดนตรี.....	14
2.8.1 ค่าเฉลี่ยความถี่เสียง (Spectral Centroid).....	14
2.8.2 Attack Time.....	16
2.8.3 ส่วนประกอบกำลังเสียง.....	16
2.8.4 ไดนามิกของเพลง.....	16
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	18
3.1 อุปกรณ์ในการทดลอง.....	18
3.1.1 ไมโครโฟน.....	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้าที่
3.1.2 เครื่อง Data Acquisition.....	19
3.1.3 โปรแกรมวิเคราะห์สัญญาณ.....	20
3.1.4 เครื่องทดสอบแรงดึง.....	20
3.1.5 เครื่องดนตรีจะเข้.....	21
3.1.6 อุปกรณ์จำลองการตีของผู้เล่น.....	21
3.2 การติดตั้งอุปกรณ์ทดลอง.....	22
3.3 วิธีการทดลอง.....	23
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	24
4.1 ผลการสำรวจชนิดของสายเครื่องดนตรีจะเข้ที่ผู้เล่นนิยมใช้.....	24
4.2 ผลการวัดคุณสมบัติเชิงกลของสายชนิดต่าง ๆ.....	28
4.2.1 ลักษณะทางกายภาพของสายแต่ละชนิด.....	28
4.2.2 ผลการทดลองด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง.....	29
4.3 ลักษณะกายภาพที่มีผลต่อการเล่นเครื่องดนตรีจะเข้.....	34
4.4 ผลการวัดเสียง.....	36
4.4.1 ค่าเฉลี่ยความถี่เสียง (Spectral Centroid).....	36
4.4.2 ความถี่ในแต่ละช่วงและการลดลงของสัญญาณ.....	36
4.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	53
4.5.1 แรงดึงในสายกับความหนาแน่นเชิงเส้น.....	53
4.5.2 ความถี่เสียงสูงสุดกับแรงดึงในสาย.....	54
4.5.3 อัตราส่วนความหน่วง (Damping Ratio) กับเส้นผ่านศูนย์กลางของสาย.....	55
4.5.4 ร้อยละพลังงานของฮาร์โมนิกแต่ละความถี่.....	56
4.5.5 เสียงจากสายที่เหมาะสมกับจังหวะเพลงไทยต่าง ๆ.....	57
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	59
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	59
5.2 ปัญหาที่พบในการทดลอง.....	60
5.3 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต.....	61
บรรณานุกรม.....	62
ภาคผนวก ก.....	63
ภาคผนวก ข.....	78
ภาคผนวก ค.....	85

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้าที่
2.1 ความสัมพันธ์เดซิเบล (dB) ในพจน์ของค่าตัวแปรต่าง ๆ.....	5
2.2 ระดับความเข้มเสียงโดยประมาณจากแหล่งกำเนิดเสียงต่าง ๆ.....	7
2.3 ความหนาแน่นที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	7
2.4 ระดับเสียงของแต่ละไดนามิคของดนตรี.....	17
4.1 แสดงจำนวนร้อยละของระยะเวลาที่เริ่มเล่นเครื่องดนตรีจะเข้าของผู้ตอบแบบสอบถาม.....	24
4.2 แสดงจำนวนร้อยละของชนิดของสายเครื่องดนตรีจะเข้าของผู้ตอบแบบสอบถามเลือกใช้.....	24
4.3 แสดงจำนวนร้อยละของเหตุผลในการเลือกใช้สายชนิดต่าง ๆ.....	25
4.4 แสดงจำนวนร้อยละของสถานที่ที่ซื้อสาย.....	25
4.5 ลักษณะทางกายภาพของสายชนิดต่าง ๆ ในสภาวะปกติ (ไม่ได้รับแรง).....	28
4.6 ลักษณะทางกายภาพของสายชนิดต่าง ๆ ขณะรับแรงดึงเพื่อให้เกิดเสียงที่ 262 เฮิรตซ์.....	29
4.7 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Young's Modulus) ของสายแต่ละชนิด.....	34
4.8 ลักษณะทางกายภาพและแรงที่ใช้ในการดึงสาย.....	35
4.9 ค่าที่ได้จากการทดลอง.....	53
4.10 แรงดึงในสายกับความหนาแน่นเชิงเส้น.....	53
4.11 ความดันเสียงสูงสุดกับแรงดึงในสาย.....	54
4.12 อัตราส่วนความหน่วง (Damping Ratio) กับเส้นผ่านศูนย์กลางของสาย.....	55
4.13 ร้อยละพลังงานของฮาร์โมนิก.....	57
4.14 ระยะเวลาที่ระดับเสียงมีการเปลี่ยนไดนามิค (ลดลง 10 เดซิเบล).....	58
ค.1 ตัวอย่างเพลงไทยที่มีจังหวะต่าง ๆ.....	85
ค.2 ระยะเวลาระหว่างตัวโน้ตของดนตรีไทย ในแต่ละจังหวะ.....	86

สารบัญรูป

รูปที่	หน้าที่
2.1 การกำเนิดเสียง.....	3
2.2 ลักษณะทางกายภาพของคลื่นเสียง.....	4
2.3 ค่าตัวประกอบทิศทางที่แหล่งกำเนิดเสียงต่าง ๆ.....	6
2.4 กราฟความสัมพันธ์ Stress-Strain ของวัสดุ.....	8
2.5 แผนภาพอิสระของสายขณะสั่น.....	9
2.6 จำนวนลูปและความถี่ของการสั่นที่ฮาร์มอนิกต่าง ๆ.....	11
2.7 ผลกระทบของความยาว แรงตึงและความหนาแน่นเชิงเส้น ต่อการสั่นของสาย.....	12
2.8 Logarithmic decrement.....	13
2.9 Spectral Centroid.....	15
2.10 Spectral Centroid ของคลื่นชนิดต่าง ๆ.....	15
3.1 ชุดอุปกรณ์วิเคราะห์เสียง.....	18
3.2 ไมโครโฟน.....	19
3.3 เครื่อง Data Acquisition.....	19
3.4 โปรแกรมวิเคราะห์สัญญาณ.....	20
3.5 เครื่องทดสอบแรงตึง.....	20
3.6 เครื่องดนตรีจะเข้ที่นำมาใช้ในการทดลอง.....	21
3.7 อุปกรณ์จำลองการติดของผู้เล่น.....	21
3.8 ตำแหน่งการติดตั้งไม้มัดและไมโครโฟน.....	22
4.1 เอ็นเทนนิส ยี่ห้อ ZONS เบอร์ 17.....	26
4.2 เอ็นตกลา ยี่ห้อ Relix ขนาด 120 ปอนด์.....	26
4.3 เอ็นก้อสร้าง ยี่ห้อ THE BELL เบอร์ 100.....	26
4.4 เอ็นก้อสร้าง ยี่ห้อ THE BELL เบอร์ 120.....	26
4.5 เอ็นก้อสร้าง ยี่ห้อ RAKA เบอร์ 150.....	26
4.6 สายซออุ้ท้ม (สายไหม).....	26
4.7 สายซออุ้เอก (สายไหม).....	27
4.8 เชือกขาวเบอร์ 60.....	27
4.9 เชือกถัก P.P. เบอร์ 5.....	27
4.10 สายกีฟซ้อป.....	27
4.11 เชือกขาวแดง.....	27
4.12 เชือกไนล่อน (Nylon) ขนาด 2 มม.....	27
4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเอ็นเทนนิส.....	30
4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเอ็นตกลา.....	30

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้าที่
4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเอ็นก่อก่อสร้างเบอร์ 100.....	31
4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเอ็นก่อก่อสร้างเบอร์ 120.....	31
4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเอ็นก่อก่อสร้างเบอร์ 150.....	32
4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของซออุ้ทู้ม (ใหม่).....	32
4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเชือกขาวเบอร์ 60.....	33
4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเชือกถัก P.P. เบอร์ 5.....	33
4.21 (ก) Spectral Centroid (Sound Pressure) ของเอ็นก่อก่อสร้างเบอร์ 100.....	37
4.21 (ข) Spectral Centroid (Amplitude) ของเอ็นก่อก่อสร้างเบอร์ 100.....	37
4.21 (ค) พลังงานของฮาร์มอนิกแต่ละความถี่ของเอ็นก่อก่อสร้างเบอร์ 100.....	37
4.21 (ง) การลดลงของสัญญาณของเอ็นก่อก่อสร้างเบอร์ 100.....	38
4.21 (จ) Spectrum Diagram ของเอ็นก่อก่อสร้างเบอร์ 100.....	38
4.22 (ก) Spectral Centroid (Sound Pressure) ของเอ็นก่อก่อสร้างเบอร์ 120.....	39
4.22 (ข) Spectral Centroid (Amplitude) ของเอ็นก่อก่อสร้างเบอร์ 120.....	39
4.22 (ค) พลังงานของฮาร์มอนิกแต่ละความถี่ของเอ็นก่อก่อสร้างเบอร์ 120.....	39
4.22 (ง) การลดลงของสัญญาณของเอ็นก่อก่อสร้างเบอร์ 120.....	40
4.22 (จ) Spectrum Diagram ของเอ็นก่อก่อสร้างเบอร์ 120.....	40
4.23 (ก) Spectral Centroid (Sound Pressure) ของเอ็นก่อก่อสร้างเบอร์ 150.....	41
4.23 (ข) Spectral Centroid (Amplitude) ของเอ็นก่อก่อสร้างเบอร์ 150.....	41
4.23 (ค) พลังงานของฮาร์มอนิกแต่ละความถี่ของเอ็นก่อก่อสร้างเบอร์ 150.....	41
4.23 (ง) การลดลงของสัญญาณของเอ็นก่อก่อสร้างเบอร์ 150.....	42
4.23 (จ) Spectrum Diagram ของเอ็นก่อก่อสร้างเบอร์ 150.....	42
4.24 (ก) Spectral Centroid (Sound Pressure) ของเอ็นตกปลา.....	43
4.24 (ข) Spectral Centroid (Amplitude) ของเอ็นตกปลา.....	43
4.24 (ค) พลังงานของฮาร์มอนิกแต่ละความถี่ของเอ็นตกปลา.....	43
4.24 (ง) การลดลงของสัญญาณของเอ็นตกปลา.....	44
4.24 (จ) Spectrum Diagram ของเอ็นตกปลา.....	44
4.25 (ก) Spectral Centroid (Sound Pressure) ของเอ็นเทนนิส (Tennis).....	45
4.25 (ข) Spectral Centroid (Amplitude) ของเอ็นเทนนิส (Tennis).....	45
4.25 (ค) พลังงานของฮาร์มอนิกแต่ละความถี่ของเอ็นเทนนิส (Tennis).....	45
4.25 (ง) การลดลงของสัญญาณของเอ็นเทนนิส (Tennis).....	46
4.25 (จ) Spectrum Diagram ของเอ็นเทนนิส (Tennis).....	46
4.26 (ก) Spectral Centroid (Sound Pressure) ของสายซออุ้ทู้ม (เส้นใหม่).....	47

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้าที่
4.26 (ข) Spectral Centroid (Amplitude) ของสายซออุ้ทึม (เส้นไหม).....	47
4.26 (ค) พลังงานของฮาร์มอนิกแต่ละความถี่ของสายซออุ้ทึม (เส้นไหม).....	47
4.26 (ง) การลดลงของสัญญาณของสายซออุ้ทึม (เส้นไหม).....	48
4.26 (จ) Spectrum Diagram ของสายซออุ้ทึม (เส้นไหม).....	48
4.27 (ก) Spectral Centroid (Sound Pressure) ของเชือกขาวเบอร์ 60.....	49
4.27 (ข) Spectral Centroid (Amplitude) ของเชือกขาวเบอร์ 60.....	49
4.27 (ค) พลังงานของฮาร์มอนิกแต่ละความถี่ของเชือกขาวเบอร์ 60.....	49
4.27 (ง) การลดลงของสัญญาณของเชือกขาวเบอร์ 60.....	50
4.27 (จ) Spectrum Diagram ของเชือกขาวเบอร์ 60.....	50
4.28 (ก) Spectral Centroid (Sound Pressure) ของเชือกถัก P.P.เบอร์ 5.....	51
4.28 (ข) Spectral Centroid (Amplitude) ของเชือกถัก P.P.เบอร์ 5.....	51
4.28 (ค) พลังงานของฮาร์มอนิกแต่ละความถี่ของเชือกถัก P.P.เบอร์ 5.....	51
4.28 (ง) การลดลงของสัญญาณของเชือกถัก P.P.เบอร์ 5.....	52
4.28 (จ) Spectrum Diagram ของเชือกถัก P.P.เบอร์ 5.....	52
4.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงตึงในสายและความหนาแน่นเชิงเส้นที่ความถี่ 262 เฮิรตซ์.....	54
4.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันเสียงสูงสุดกับแรงตึงในสาย.....	55
4.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความหน่วงและเส้นผ่านศูนย์กลางของสาย.....	56
4.32 ระยะเวลาที่ระดับเสียงมีการเปลี่ยนแปลงไดนามิกของแต่ละสายเทียบกับระยะเวลาห่างโน้ต.....	58
ก.1 หน้าต่างเริ่มต้นของโปรแกรม RT Pro Photon เวอร์ชัน 6.34.9104.....	63
ก.2 สร้างโปรเจค Recorder เพื่ออัดเสียง.....	64
ก.3 หน้าต่างตั้งค่าสัญญาณ input.....	65
ก.4 หน้าต่างเลือกสัญญาณที่ต้องการบันทึก.....	66
ก.5 ตั้งค่า Sampling Frequency.....	67
ก.6 หน้าจอแสดงผลขณะทำการบันทึกเสียง.....	68
ก.7 หน้าต่างบันทึกไฟล์เสียง.....	69
ก.8 สร้างโปรเจคเรียกดูไฟล์เสียงที่อัดไว้.....	70
ก.9 เลือกไฟล์เสียงที่ต้องการเปิด.....	71
ก.10 ตั้งค่าความดันอ้างอิง.....	72
ก.11 เปิดหน้าต่างข้อมูลหลัก.....	73
ก.12.1 เลือกสัญญาณที่ต้องวิเคราะห์.....	74
ก.12.2 เรียกดูผลวิเคราะห์.....	75
ก.13 ตั้งค่าการเรียกดูข้อมูล.....	76

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้าที่
ก.14 บันทึกข้อมูลเป็นไฟล์ Excel	77
ข.1 ค่าเฉลี่ยความดันเสียงที่เวลาใด ๆ ของการติดสาย 5 ครั้ง	79
ข.2 คำสั่งคัดกรองข้อมูลที่มีค่ามากที่สุดในแต่ละลูกคลื่น.....	80
ข.3 กราฟความดันเสียงกับเวลาและเส้นแนวโน้ม (Trend line) แบบฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล.....	81
ข.4 กราฟความดันเสียงกับเวลาของเส้นไหม	81
ข.5 ค่าแอมพลิจูดและสัมประสิทธิ์เลขชี้กำลังของได้สมการเส้นโค้ง	82
ข.6 ผลการคำนวณค่าเฉลี่ยความถี่ของเส้นไหม	83
ข.7 ส่วนประกอบกำลังเสียงของแต่ละความถี่	84



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เครื่องดนตรีไทย คือเครื่องดนตรีที่สร้างสรรค์ขึ้นตามศิลปวัฒนธรรมของไทย ที่มีรูปแบบเอกลักษณ์ของความเป็นไทย ซึ่งสัมพันธ์กับชีวิตความเป็นอยู่ และถือว่าเป็นส่วนหนึ่งของชีวิตคนไทย โดยแบ่งตามอากัปภิกขัยของการบรรเลง ได้แก่ เครื่องดีด เครื่องสี เครื่องตีและเครื่องเป่า

การผลิตเครื่องดนตรีไทยได้รับอิทธิพลมาจากสภาพแวดล้อม ความเป็นอยู่ ศาสนาและวัฒนธรรม ยกตัวอย่างเช่น “จะเข้” ที่มีรูปร่างลอกเลียนแบบจากสัตว์คือตัวตะกวด เป็นเครื่องดนตรีไทยประเภทเครื่องดีด มี 3 สาย สันนิษฐานกันว่าได้รับอิทธิพลมาจากมอญ และได้ปรับปรุงแก้ไขมาจากพิณ คือ กระจับปี่ซึ่งมี 4 สาย นำมาวางติดกับพื้นเพื่อความสะดวก มีประวัติและมีหลักฐานครั้งแรกในสมัยกรุงศรีอยุธยา จะเข้ได้นำเข้าร่วมบรรเลงอยู่ในวงมโหรีคู่กับกระจับปี่ในสมัยรัชกาลที่ 2 แห่งกรุงรัตนโกสินทร์ มีผู้นิยมเล่นจะเข้กันมาก ทำให้กระจับปี่ค่อย ๆ หายไปในปัจจุบัน เนื่องจากหาผู้เล่นเป็นน้อย เครื่องดนตรีไทยที่ผลิตขึ้นในสมัยก่อน จะผลิตด้วยมือ เครื่องมือทางการผลิตไม่ได้มีคุณภาพเทียบเท่าปัจจุบัน การผลิตจึงต้องเกิดจากการลองผิดลองถูก ประกอบกับจิตวิทยาทางด้านดนตรี (Psychoacoustic) เป็นตัวตัดสินความไพเราะ

ซึ่งเครื่องดนตรีไทยในปัจจุบันก็ยังคงใช้วิธีการผลิตแบบเก่า ๆ ที่ถูกส่งทอดกันมาจากรุ่นสู่รุ่น ทำให้เครื่องดนตรีไทยไม่มีมาตรฐานในการผลิต และในปัจจุบันวัสดุที่ใช้เริ่มหายาก ดังนั้นจึงทำให้เครื่องดนตรีไทยได้รับการรู้จัก และได้รับการยอมรับน้อยกว่า เมื่อเทียบกับเครื่องดนตรีสากลที่มีมาตรฐานในการผลิต ดังนั้นเราจึงต้องการสร้างมาตรฐาน และหาวัสดุมาทดแทนใช้ทำเครื่องดนตรีจะเข้ เพราะว่าเครื่องดนตรีจะเข้เป็นเครื่องดนตรีประเภทดีดที่เก่าแก่ และได้รับการพัฒนาน้อยที่สุด ก่อนที่จะสร้างมาตรฐานให้กับเครื่องดนตรีจะเข้ เราจะต้องศึกษาให้เข้าใจถึงองค์ประกอบของเครื่องดนตรีจะเข้ก่อนเป็นอันดับแรก โดยเริ่มจากการศึกษาต้นกำเนิดของเสียงคือสาย โดยในรายงานฉบับนี้จะทำการศึกษาเกี่ยวกับลักษณะและคุณสมบัติของสาย ว่ามีผลต่อเสียงของเครื่องดนตรีจะเข้อย่างไร

โดยในปัจจุบันดนตรีไทยได้กลับมาได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก และมีงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ตัวอย่างงานวิจัยเช่น งานวิจัยเกี่ยวกับองค์ประกอบของกีตาร์ที่ถูกยอมรับว่าเป็นกีตาร์เสียงดีและเสียงแยของมหาลัยในประเทศสโลวีเนีย [6] และงานวิจัยของ ดร. ณัฏชนันท์ ชิดานนท์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมดนตรีและสื่อประสม การทดลองของเสียงขลุ่ย โดยที่ขลุ่ยแต่ละเลาทำมาจากวัสดุที่แตกต่างกันออกไป 3 ชนิด คือ ไม้ไผ่ ไม้ประดู่และพลาสติก [5] และงานวิจัยต่าง ๆ นี้เองที่มีส่วนช่วยผลักดันให้เกิดงานวิจัยนี้

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1) ศึกษาลักษณะและคุณสมบัติเชิงกลของสายต่าง ๆ
- 2) ศึกษาลักษณะของเสียงที่เกิดขึ้นจากสายต่าง ๆ
- 3) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ลักษณะและคุณสมบัติเชิงกลของสายกับลักษณะของเสียงที่เกิดขึ้น

1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1) พิจารณาเฉพาะสายเอกของเครื่องดนตรีจะเข้
- 2) สายที่นำมาใช้ในการทดลอง ได้มาจากผลสำรวจจากผู้เล่นจริง และสายที่ทำจากวัสดุที่คาดว่าสามารถใช้เป็นสายเครื่องดนตรีจะเข้ได้
- 3) ทำการทดลองโดยใช้เครื่องดนตรีจะเข้และเครื่องจำลองการตีของผู้เล่นตัวเดียวกัน

1.4 ขั้นตอนของการศึกษา

- 1) ศึกษาวิธีการทำเครื่องดนตรีจะเข้
- 2) ทำแบบสำรวจความนิยมของสายเอกชนิดต่าง ๆ
- 3) วัดคุณสมบัติเชิงกลของสาย
 - 3.1) ออกแบบและสร้างชุดวัดค่าคุณสมบัติของสายชนิดต่าง ๆ
 - 3.2) ทดสอบและบันทึกค่าคุณสมบัติเชิงกลของสายชนิดต่าง ๆ
- 4) บันทึกเสียงที่เกิดจากสายชนิดต่าง ๆ
- 5) วิเคราะห์ลักษณะของเสียงที่บันทึก
- 6) เปรียบเทียบผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลกับผลการวิเคราะห์เสียงและสรุปผล

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

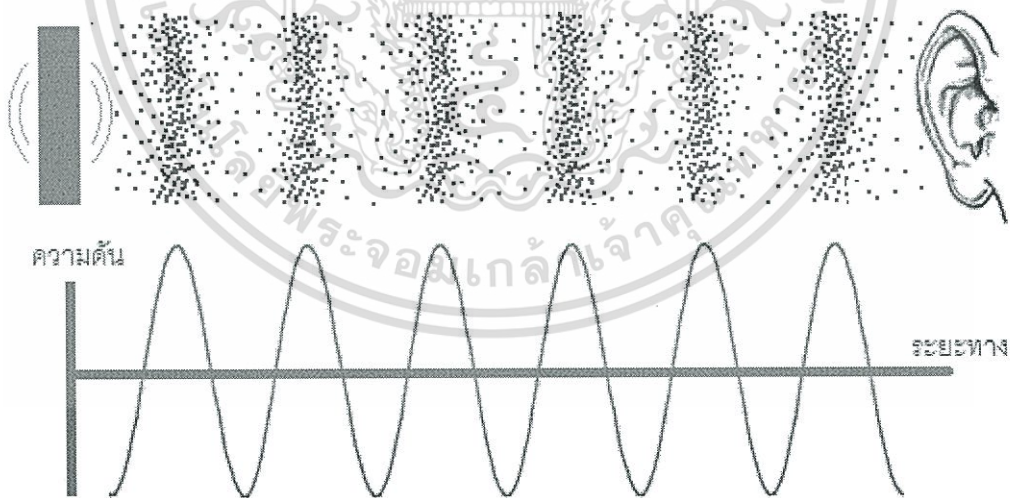
งานวิจัยฉบับนี้เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกลกับคุณภาพเสียงของสายชนิดต่าง ๆ ในอดีตได้เคยมีผู้ศึกษาเกี่ยวกับกลไกการเกิดเสียง คุณสมบัติของเสียง การสั่นของสายและคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ ซึ่งข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องทั้งหมดล้วนแต่เป็นพื้นฐานที่สำคัญที่นำมาใช้ในงานทางด้านวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกับเรื่องเสียง

ดังนั้นการศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง และงานวิจัยที่เคยทำมาก่อนที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยทางด้านเสียง จะทำให้สามารถนำแนวคิด และวิธีการมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยได้

2.1 เสียง

2.1.1 การกำเนิดเสียง

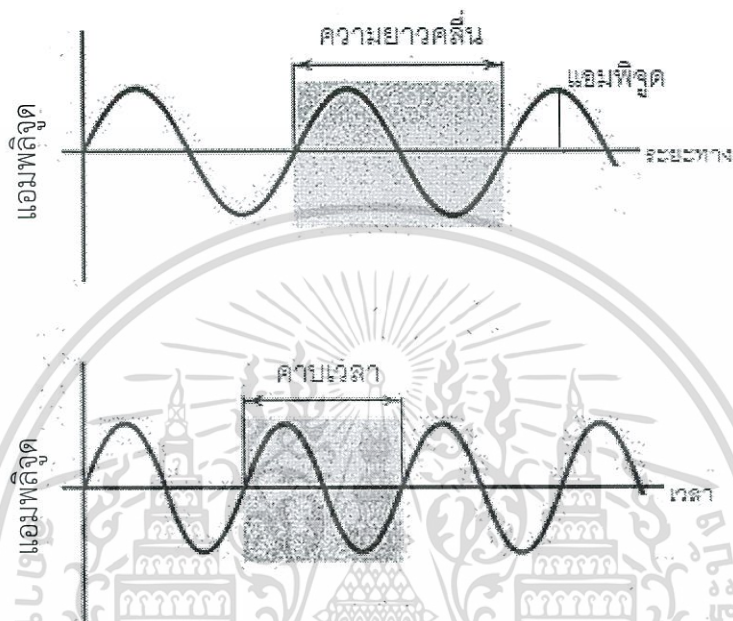
เสียงมีลักษณะเป็นคลื่นของความดันในสสารตัวกลาง โดยคลื่นเสียงในอากาศส่วนมากเกิดจากการสั่นสะเทือนของวัตถุ การกำเนิดเสียงสูงหรือเสียงต่ำขึ้นอยู่กับความเร็วในการสั่นสะเทือนของวัตถุ วัตถุที่สั่นเร็วจะให้เสียงสูงกว่าวัตถุที่สั่นช้า โดยมีหน่วยการวัดความถี่ของการสั่นสะเทือนต่อวินาทีเป็นเฮิรตซ์ (Hz) ความถี่ของเสียงจะมีค่าเท่ากับความถี่ของแหล่งกำเนิด ดังแสดงในรูป 2.1 ในขณะที่วัตถุสั่นไปทางขวา จะเกิดการถ่ายถอดพลังงาน โมเลกุลอากาศที่อยู่ติดกับวัตถุจะบีบตัวทำให้เกิดช่วงอัด ซึ่งเป็นช่วงที่มีความดันสูงสุด ในทางตรงกันข้ามหากวัตถุเคลื่อนที่ไปทางซ้าย โมเลกุลอากาศจะถูกแยกออกจากกัน เกิดเป็นช่วงขยายที่มีความดันต่ำที่สุด



รูปที่ 2.1 การกำเนิดเสียง [1]

2.1.2 ลักษณะทางกายภาพของคลื่นเสียง

คลื่นเสียงมีลักษณะทางกายภาพ 2 ลักษณะ ดังแสดงในรูป 2.2 ได้แก่ ความถี่ (f) คือ จำนวนรอบการสั่นของอนุภาคต่อวินาที ความถี่มีผลต่อความสูงต่ำของเสียง แอมพลิจูด (A) คือ ระยะขจัดสูงสุดของคลื่นวัดจากตำแหน่งสมดุล แอมพลิจูดมีผลต่อความดัง จากรูปที่ 2.2 ความยาวคลื่นคือระยะทางระหว่างส่วนที่ซ้ำกันของคลื่น และคาบเวลาคือเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ครบ 1 รอบ ซึ่งเท่ากับส่วนกลับของความถี่



รูปที่ 2.2 ลักษณะทางกายภาพของคลื่นเสียง [1]

2.2 หน่วยของเบล

เป็นหน่วยที่ใช้อธิบายคุณสมบัติต่าง ๆ ของเสียง เช่น ความดัน กำลังและความหนาแน่นพลังงาน มีช่วงกว้างเกินไป ยกตัวอย่างหูของมนุษย์สามารถรับรู้ความดังต่ำสุดที่ $20 \mu\text{Pa}$ และ สูงสุดที่ความดัน 20 Pa ซึ่งมีช่วงของผลต่างกว้างมาก จึงได้มีการสร้างหน่วยของความดังขึ้น โดย Alexander Graham Bell เพื่อให้ตรวจวัดได้ง่ายขึ้น เป็นไปตามสมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$L_p = 20 \log \left[\frac{P}{P_{ref}} \right] \quad (2-1)$$

- เมื่อ L_p คือ ระดับความดันเสียง (dB)
 P คือ ความดันเสียง (N/m^2)
 P_{ref} คือ ความดันเสียงที่มนุษย์เริ่มได้ยิน (0.00002 N/m^2)

และยังอธิบายความสัมพันธ์เดซิเบล (dB) ในพจน์ของค่าตัวแปรต่าง ๆ ดังตาราง 2.1

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์เดซิเบล (dB) ในพจน์ของค่าตัวแปรต่าง ๆ

Quantity	Definition, dB	Reference
Sound pressure level	$L_p = 20 \log_{10}(p/p_{\text{ref}})$	$p_{\text{ref}} = 20 \mu\text{Pa}$
Intensity level	$L_I = 10 \log_{10}(I/I_{\text{ref}})$	$I_{\text{ref}} = 1 \text{ pW/m}^2$
Power level	$L_W = 10 \log_{10}(W/W_{\text{ref}})$	$W_{\text{ref}} = 1 \text{ pW}$
Energy level	$L_E = 10 \log_{10}(E/E_{\text{ref}})$	$E_{\text{ref}} = 1 \text{ pJ}$
Energy density level	$L_D = 10 \log_{10}(D/D_{\text{ref}})$	$D_{\text{ref}} = 1 \text{ pJ/m}^3$
Vibratory acceleration level	$L_a = 20 \log_{10}(a/a_{\text{ref}})$	$a_{\text{ref}} = 10 \mu\text{m/s}^2$
Vibratory velocity level	$L_v = 20 \log_{10}(v/v_{\text{ref}})$	$v_{\text{ref}} = 10 \text{ nm/s}$
Vibratory displacement level	$L_d = 20 \log_{10}(d/d_{\text{ref}})$	$d_{\text{ref}} = 10 \text{ pm}$
Vibratory force level	$L_F = 20 \log_{10}(F/F_{\text{ref}})$	$F_{\text{ref}} = 1 \mu\text{N}$
Frequency level	$L_{fr} = 10 \log_{10}(f/f_{\text{ref}})$	$f_{\text{ref}} = 1 \text{ Hz}$

2.2.1 ระดับความเข้มเสียง

ระดับความเข้มเสียงนั้นเป็นค่าที่ไม่สามารถตรวจวัดได้ แต่ความดันเสียงนั้นสามารถตรวจวัดได้ ดังนั้นหากต้องการระดับความเข้มเสียงจึงต้องให้อยู่ในรูปของความดันสามารถเขียนได้สมการดังนี้

$$I = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} p(x, t)u(x, t)dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} p(x, t)u(x, t)d\theta \quad (2-2)$$

เมื่อ $\theta = 2\pi ft = \left(\frac{2\pi}{\tau}\right)t$ พิจารณาสมการของความดันของเสียงและสมการความเร็วของระนาบคลื่น

$$p(x, t) = \sqrt{2}p_{\text{rms}}\sin(2\pi t - kx) \quad (2-3)$$

$$u(x, t) = (\sqrt{2}p_{\text{rms}}/\rho c)\sin(2\pi t - kx) \quad (2-4)$$

นำสมการไปแทนในสมการที่ (2-2) จะได้

$$I = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{2(p_{\text{rms}})^2}{\rho c} \sin^2(\theta - kx)d\theta \quad (2-5)$$

$$I = \frac{2(p_{\text{rms}})^2}{2\pi\rho c} \left[\frac{1}{2}(\theta - kx) - \frac{1}{4}\sin(2\theta - 2kx) \right]_0^{2\pi} \quad (2-6)$$

จะได้สมการความเข้มเสียงออกมาดังนี้

$$I = \frac{p^2}{\rho c} \quad (2-7)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล (ตัวกลางในการส่งผ่านเสียง)

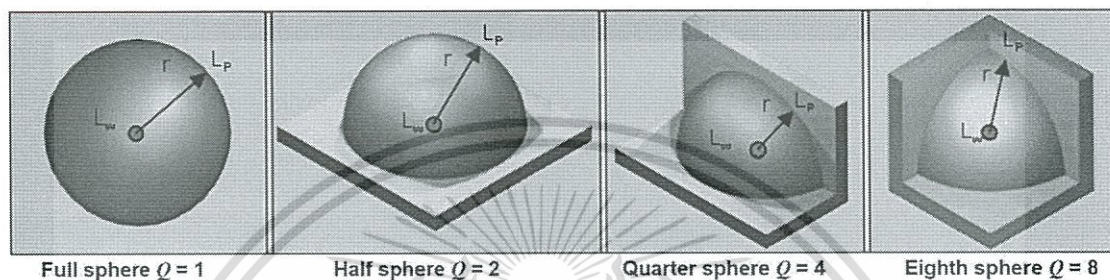
c คือ ความเร็วของเสียงอากาศ

ค่าความเข้มเสียงสามารถนำไปหาค่าของการส่งผ่านกำลังต่อพื้นที่ (Acoustic Power) ได้โดยทั่วไปแล้วเสียงมีการกระจายทุกทิศทาง แต่ค่าความเข้มจะขึ้นอยู่กับค่าตัวประกอบทิศทาง จะได้สมการดังนี้

$$I = \frac{QW}{4\pi r^2} \quad (2-8)$$

เมื่อ r คือ ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดเสียง (m)

Q คือ ตัวประกอบทิศทางของแหล่งกำเนิดเสียง ตามรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ค่าตัวประกอบทิศทางที่แหล่งกำเนิดเสียงต่าง ๆ [1]

จากการรวมสมการ (2-7) กับ (2-8) จะได้ ค่าของการส่งผ่านกำลังต่อพื้นที่

$$I = \frac{p^2}{\rho c} = \frac{QW}{4\pi r^2} \quad (2-9)$$

จัดรูปสมการ (2-9) จะได้

$$W = \frac{4\pi r^2 p^2}{Q\rho c} \quad (2-10)$$

ข้อมูลระดับความเข้มเสียงและความหนาแน่นที่อุณหภูมิต่าง ๆ จะถูกแสดงตามตารางที่ 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.2 ระดับความเข้มเสียงโดยประมาณจากแหล่งกำเนิดเสียงต่าง ๆ

แหล่งกำเนิดเสียง	ระดับความเข้มเสียง (เดซิเบล)
การหายใจปกติ	10
การกระซิบ (ที่ระยะห่าง 1 เมตร)	20
ห้องสมุด	40
สำนักงาน	50
การสนทนา (ที่ระยะห่าง 1 เมตร)	60
ถนนที่มีการจราจรหนาแน่น	80
เครื่องขุดถนน (ที่ระยะห่าง 1 เมตร)	90
แทรกรถ (ที่ระยะห่าง 10 เมตร)	90
แทรกรถ (ที่ระยะห่าง 1 เมตร)	110
วงดนตรีร็อก (ที่ระยะห่าง 2 เมตร)	120
เครื่องบินไอพ่น (ที่ระยะห่าง 50 เมตร)	130

ตารางที่ 2.3 ความหนาแน่นที่อุณหภูมิต่าง ๆ

Temperature [°C]	Density				Specific weight		Thermal expansion coefficient [$\times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$]
	[kg/m^3]	[lb_m/ft^3]	[$\text{sl}/\text{ft}^3 \times 10^{-3}$]	[$\text{lb}_m/\text{gal}(\text{US liq})$]	[N/m^3]	[lb_f/ft^3]	
-75	1.783	0.1113	3.460	0.01488	17.49	0.11131	5.14
-50	1.582	0.0988	3.070	0.01320	15.52	0.09878	4.55
-25	1.422	0.0888	2.759	0.01187	13.94	0.08877	4.08
-15	1.367	0.0853	2.652	0.01141	13.40	0.08532	3.92
-10	1.341	0.0837	2.601	0.01119	13.15	0.08370	3.84
-5	1.316	0.0821	2.553	0.01098	12.90	0.08214	3.76
0	1.292	0.0806	2.506	0.01078	12.67	0.08063	3.69
5	1.268	0.0792	2.461	0.01059	12.44	0.07919	3.62
10	1.246	0.0778	2.418	0.01040	12.22	0.07780	3.56
15	1.225	0.0765	2.376	0.01022	12.01	0.07645	3.50
20	1.204	0.0752	2.336	0.01005	11.81	0.07516	3.43
25	1.184	0.0739	2.297	0.00988	11.61	0.07390	3.38
30	1.164	0.0727	2.259	0.00972	11.42	0.07269	3.32
40	1.127	0.0704	2.188	0.00941	11.06	0.07039	3.21
50	1.093	0.0682	2.120	0.00912	10.72	0.06822	3.12
60	1.060	0.0662	2.057	0.00885	10.40	0.06619	3.02
80	1.000	0.0625	1.941	0.00835	9.81	0.06245	2.85
100	0.9467	0.0591	1.837	0.00790	9.28	0.05910	2.70
125	0.8868	0.0554	1.721	0.00740	8.70	0.05536	2.51
150	0.8338	0.0521	1.618	0.00696	8.18	0.05206	2.33
175	0.7868	0.0491	1.527	0.00657	7.72	0.04912	2.22
200	0.7451	0.0465	1.446	0.00622	7.31	0.04651	2.10
225	0.7078	0.0442	1.373	0.00591	6.94	0.04419	2.01
300	0.6168	0.0385	1.197	0.00515	6.05	0.03850	1.76
400	0.5238	0.0327	1.016	0.00437	5.14	0.03270	1.52
500	0.4567	0.0285	0.886	0.00381	4.48	0.02851	1.32
600	0.4043	0.0252	0.784	0.00337	3.96	0.02524	1.16
700	0.3626	0.0226	0.704	0.00303	3.56	0.02264	1.03
800	0.3289	0.0205	0.638	0.00274	3.23	0.02053	0.94
900	0.3009	0.0188	0.584	0.00251	2.95	0.01879	0.86
1000	0.2773	0.0173	0.538	0.00231	2.72	0.01731	0.80
1100	0.2571	0.0160	0.499	0.00215	2.52	0.01605	0.75

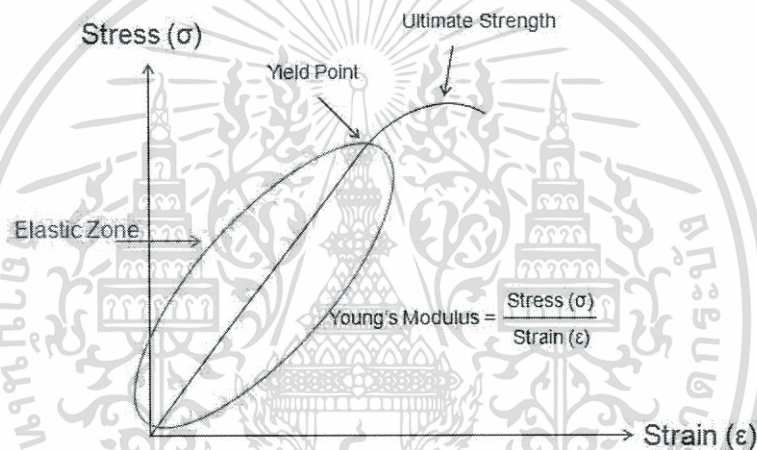
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 สมบัติเชิงกลของวัสดุ

วัสดุที่นำมาใช้ทำสายแต่ละชนิด มีคุณสมบัติเฉพาะตัวที่ต่างกัน ซึ่งคุณสมบัติที่นำมาวิเคราะห์คือ ค่า Young's Modulus (E) สามารถคำนวณได้โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine) และเขียนกราฟความสัมพันธ์ Stress-Strain ดังรูป 2.4 ค่า Young's Modulus (E) เท่ากับ ค่าความชันของกราฟในช่วงยืดหยุ่น (Elastic Zone)

$$E = \frac{\text{stress}}{\text{strain}} = \frac{F/A}{\Delta L/L} = \frac{FL}{A\Delta L} \quad (2-11)$$

เมื่อ	F	คือ แรงดึงในสาย
	A	คือ พื้นที่หน้าตัดของสาย
	ΔL	คือ ระยะที่สายยืดออกจากความยาวเดิม
	L	คือ ความยาวเริ่มต้นของสาย



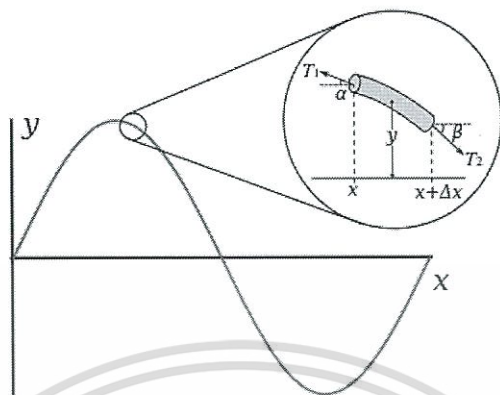
รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ Stress-Strain ของวัสดุ

2.4 ทฤษฎีการสั่นของสาย

เสียงที่เราได้ยินมีทั้งเสียงสูง เสียงต่ำ เสียงดัง เสียงเบาแตกต่างกันไป ซึ่งเสียงที่เราได้ยินนั้นเราสามารถบอกได้ว่ามีระดับเสียงสูงหรือต่ำ ระดับเสียงนั้นขึ้นอยู่กับความถี่ของเสียง เสียงสูงเป็นเสียงที่มีความถี่มากกว่า เรียกว่า “เสียงแหลม” ส่วนเสียงต่ำที่มีความถี่น้อยเรียกว่า “เสียงทุ้ม” ซึ่งความถี่ของสายนั้น จะแปรผันตามแรงดึงในสายมีความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

2.4.1 ทฤษฎีของ Vincenzo Galilei

เป็นทฤษฎีที่อธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วของการแพร่ของคลื่นในสาย (v) แรงตึงในสาย (T) และความหนาแน่นเชิงเส้นของสาย (μ)



รูปที่ 2.5 แผนภาพอิสระของสายขณะสั่น

จากรูปที่ 2.5 กำหนดให้

Δx คือ ความยาวของสายช่วงสั้น ๆ

m คือ มวลของสายช่วงนั้น

μ คือ ความหนาแน่นเชิงเส้นของสาย

ถ้าองค์ประกอบความเค้นในสายตามแนวแกน x มีค่าคงที่เท่ากับ T แล้ว ความเค้นที่กระทำต่อปลายแต่ละด้านของสายจะมีค่าเท่ากับ

$$T_{1x} = T_1 \cos(\alpha) \approx T \tag{2-12}$$

$$T_{2x} = T_2 \cos(\beta) \approx T \tag{2-13}$$

ถ้ามุม α และ β มีค่าน้อยมาก ความเค้น T_{1x} และ T_{2x} จะมีค่าเท่ากัน และแรงลัพธ์ที่กระทำต่อสายในแนวแกน x จะมีค่าเท่ากับศูนย์

$$\sum F_x = T_{2x} - T_{1x} = 0 \tag{2-14}$$

จากกฎข้อที่สองของนิวตัน ตามแนวแกน y ผลรวมของแรงที่กระทำต่อสายตามแนวแกน y จะมีค่าเท่ากับมวลของสายคูณกับความเร่งตามแนวแกน y ของสายนั้น

$$\sum F_y = T_{1y} - T_{2y} = -T_2 \sin(\beta) + T_1 \sin(\alpha) = \Delta m a \approx \mu \Delta x \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \tag{2-15}$$

หารสมการ (2-15) ด้วย T และแทนค่าด้วยสมการ (2-12) และ (2-13)

$$\frac{\mu \Delta x}{T} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -\frac{T_2 \sin(\beta)}{T_2 \cos(\beta)} + \frac{T_1 \sin(\alpha)}{T_1 \cos(\alpha)} = -\tan(\beta) + \tan(\alpha) \quad (2-16)$$

ค่า Tangent ของมุมที่ปลายของสาย มีค่าเท่ากับติดลบความชันของสายที่จุดปลายนั้นจะได้

$$\frac{1}{\Delta x} \left(\frac{\partial y}{\partial x} - \frac{\partial y}{\partial x} \right) = \frac{\mu}{T} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (2-17)$$

เมื่อค่า Δx มีค่าเข้าใกล้ศูนย์จะได้

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{\mu}{T} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (2-18)$$

สมการ (2-18) คือสมการคลื่นของ $y(x, t)$ และสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรอนุพันธ์อันดับสอง มีค่าเท่ากับ v^{-2} ดังนั้น

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad (2-19)$$

เมื่อ v คือ ความเร็วของคลื่นในสาย สำหรับสายซึ่งตั้งความยาว L จะได้ผลเฉลยรูปทั่วไปของสมการ (2-19) ดังนี้

$$u(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left(A_n \cos \frac{vn\pi t}{L} + B_n \sin \frac{vn\pi t}{L} \right) \sin \frac{n\pi x}{L} \quad (2-20)$$

เมื่อ

$$A_n = \frac{2}{L} \int_0^L f(x) \sin \frac{n\pi x}{L} dx \quad (2-21)$$

และ

$$B_n = \frac{2}{vn\pi} \int_0^L g(x) \sin \frac{n\pi x}{L} dx \quad (2-22)$$

เมื่อ n คือ โหมดการสั่น
 x คือ ตำแหน่งใด ๆ บนสาย
 L คือ ความยาวของสาย
 $f(x)$ คือ สมการระยะการกระจัดของสายจากตำแหน่งเดิมของสายเมื่อไม่มีแรงมากระทำ ที่เวลา t เท่ากับ 0
 $g(x)$ คือ สมการความเร็วของสายที่เวลา t เท่ากับ 0

โหมดการสั่น (n) หรือเรียกอีกอย่างว่าลูปการสั่น เมื่อลูปจากการสั่นของสายมีเพียงหนึ่งลูป ความถี่ในการสั่นนั้นจะถูกเรียกว่า “ฮาร์โมนิกที่ 1” และถ้ามี 2 ลูป ความถี่ในการสั่นจะถูกเรียกว่า “ฮาร์โมนิกที่ 2” ซึ่งมีค่าเป็น 2 เท่าของฮาร์โมนิกที่ 1 แสดงตามรูปที่ 2.6 กลุ่มของโหมด ($n=1, 2, 3, \dots$) เรียกว่า “Harmonic Spectrum” ในการสั่นของสายซึ่งตึง จะเกิดความถี่ที่ฮาร์โมนิกต่าง ๆ เป็นจำนวนอนันต์ แต่แอมพลิจูดของแต่ละฮาร์โมนิกจะไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับตัวแปรต่าง ๆ ทำให้เราสามารถแยกแยะเสียงจากเครื่องดนตรีที่ต่างกันได้ แม้จะเล่นโน้ตตัวเดียวกันก็ตาม



$$f_1 = \frac{\sqrt{F/\mu}}{2L}$$

ฮาร์โมนิกที่ 1



$$f_2 = 2f_1$$

ฮาร์โมนิกที่ 2



$$f_3 = 3f_1$$

ฮาร์โมนิกที่ 3



$$f_4 = 4f_1$$

ฮาร์โมนิกที่ 4

รูปที่ 2.6 จำนวนลูปและความถี่ของการสั่นที่ฮาร์โมนิกต่าง ๆ

2.4.2 กฎของ Mersenne

เป็นกฎที่อธิบายการสั่นที่เกิดขึ้นในเส้นลวดซึ่งตึง ซึ่งถูกนำมาใช้ในการออกแบบเครื่องดนตรีประเภทสาย เช่น เปียโน พิณ เป็นต้น โดยกฎของ Mersenne กล่าวว่า ความถี่ในสายจะแปรผกผันกับความยาวของสาย

$$f_n \propto \frac{1}{L} \quad (2-23)$$

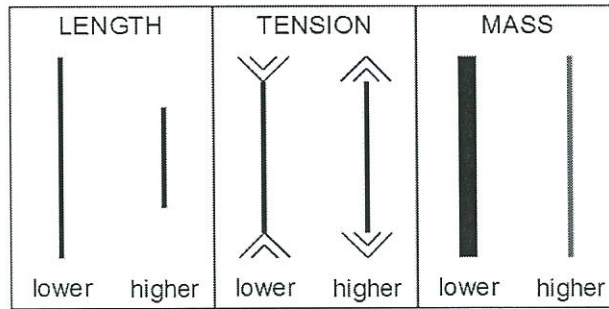
ความถี่ในสายจะแปรผันตรงกับรากที่สองของแรงตึงในสาย

$$f_n \propto \sqrt{T} \quad (2-24)$$

ความถี่ในสายจะแปรผกผันกับรากที่สองของความหนาแน่นเชิงเส้นของสาย

$$f_n \propto \frac{1}{\sqrt{\mu}} \quad (2-25)$$

กล่าวคือ เสียงจะมีความถี่สูงขึ้น ถ้าสายมีความยาวสั้นลง หรือมีแรงตึงในสายเพิ่มขึ้น หรือมีความหนาแน่นเชิงเส้นน้อยลง ดังแสดงในรูป 2.7



รูปที่ 2.7 ผลกระทบของความยาว แรงตึงและความหนาแน่นเชิงเส้น ต่อการสั่นของสาย

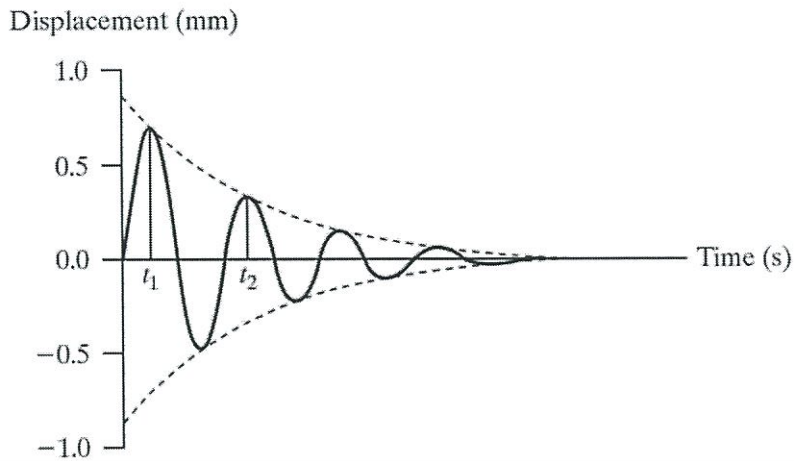
สรุปเป็นสมการของความถี่ของการสั่นในสายซึ่งตั้งได้ว่า

$$f_n = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad (2-26)$$

เมื่อ	f_n	คือ ความถี่ของการสั่นของสายซึ่งตั้งที่มีโหมดการสั่น n
	L	คือ ความยาวของสาย
	T	คือ แรงตึงในสาย
	μ	คือ ความหนาแน่นเชิงเส้นหรือน้ำหนักของสายต่อหน่วยความยาว

2.5 การสั่นภายใต้ตัวหน่วงการสั่นสะเทือน

ในระบบการสั่นสะเทือนที่ประกอบด้วยมวล (m) ค่าความแข็งสปริง (K) และค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง (c) นั้น ค่า m และ K ที่จะนำมาใช้ในแบบจำลองการสั่นสะเทือนนั้นมักจะหาได้ง่าย สำหรับมวลอาจใช้การชั่งด้วยตาชั่ง หรืออาจใช้การทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะที่เสียรูปไปในกรณีของค่า K อย่างไรก็ตามค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงมักจะหาค่าได้ยาก โดยทั่วไปมักจะประมาณจากลักษณะการสั่นสะเทือนของระบบ ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวิธีการหนึ่งที่ใช้ประมาณค่า c ของระบบที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงน้อยและเป็น under damped motion ซึ่งเป็นระบบที่พบได้มากในโครงสร้างทางวิศวกรรมทั่วไป หลักการที่ใช้เป็นการพิจารณาการลดลงของขนาดการสั่นสะเทือนของระบบ หรือที่เรียกกันว่า “Logarithmic decrement”



รูปที่ 2.8 Logarithmic decrement

พิจารณารูปแสดงการสั่นสะเทือนของระบบแสดงในรูปที่ 2.8 จากรูปจะนิยาม Logarithmic decrement (δ) ดังนี้

$$\delta = \ln \frac{x(t)}{x(t+T)} \quad (2-27)$$

โดยที่ $x(t)$ คือ ขนาดการสั่นสะเทือนที่ตำแหน่ง t ใด ๆ

T คือ คาบการสั่นสะเทือน

$x(t+T)$ คือ ขนาดการสั่นสะเทือนที่เวลาผ่านไป 1 คาบนับจากเวลา t

ตามนิยามจะใช้ขนาดการสั่นสะเทือนที่เวลา t ใด ๆ ก็ได้ แต่เพื่อความสะดวกในการกำหนดจุด จึงมักจะเลือกจุดยอดเป็นตำแหน่ง t เช่นในรูปที่ 2.8 หากให้ตำแหน่ง t_1 เป็นตำแหน่ง t แล้ว ตำแหน่ง t_2 ก็จะเป็นตำแหน่ง $t+T$

แทนค่า $x(t)$ และ $x(t+T)$ ด้วยสมการ $Ae^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_d t + \phi)$ ลงในสมการ (2-27) จะได้

$$\delta = \frac{Ae^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_d t + \phi)}{Ae^{-\zeta\omega_n(t+T)} \sin(\omega_d(t+T) + \phi)} \quad (2-28)$$

เนื่องจากฟังก์ชันไซน์ที่เวลา t ใด ๆ จะมีค่าเท่ากับค่าไซน์เมื่อเวลาผ่านไป 1 คาบ $t+T$ ดังนั้นสมการที่ (2-28) จะเขียนได้เป็น

$$\delta = \ln e^{\zeta\omega_n T} = \zeta\omega_n T \quad (2-29)$$

เนื่องจากคาบการสั่นสะท้อน $T = \frac{2\pi}{\omega_d}$ ดังนั้น

$$\delta = \zeta \omega_n \cdot \frac{2\pi}{\omega_d} = \zeta \omega_n \cdot \frac{2\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (2-30)$$

จากสมการที่ (2-30) จะพบว่าค่า Logarithmic decrement, δ จะขึ้นกับค่า Damping ratio, ζ เพียงอย่างเดียว ดังนั้นจึงอาจเขียนค่า ζ ในรูปฟังก์ชันของ δ ได้ดังสมการ

$$\zeta = \frac{\delta}{\sqrt{4\pi^2 + \delta^2}} \quad (2-31)$$

ในการทดลองวัดสัญญาณการสั่นสะท้อนของระบบที่สั่นสะท้อนอย่างอิสระ จะได้ลักษณะสัญญาณดังกราฟในรูปที่ 2.8 ดังนั้นจึงทราบขนาดการสั่นสะท้อน $x(t)$ และ $x(t+T)$ ทำให้สามารถคำนวณค่า Logarithmic decrement, δ และหาค่าอัตราส่วนความหน่วง ζ ได้จากสมการที่ (2-31)

ในการหาค่า Logarithmic decrement อาจใช้จำนวนคาบในการคำนวณมากกว่า 1 คาบก็ได้ หากใช้จำนวนคาบทั้งหมด n คาบ จะสามารถหาค่า δ ได้จากสมการ

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{x(t)}{x(t+T)} \quad (2-32)$$

2.6 ตัวบ่งชี้แต่ละเครื่องดนตรี

เครื่องดนตรีแต่ละชนิด หรือแม้กระทั่งชนิดเดียวกัน แต่คนละเครื่องกันก็สามารถสร้างเสียงที่ให้ความรู้สึกที่แตกต่างกันออกไป เช่น เสียงที่ให้ความรู้สึกใสมากกว่า หรือเสียงที่ให้ความรู้สึกที่หนักกว่า ซึ่งความรู้สึกเหล่านี้สามารถประมาณได้ว่าเครื่องดนตรีตัวไหนมีมากกว่าหรือน้อยกว่าดังต่อไปนี้

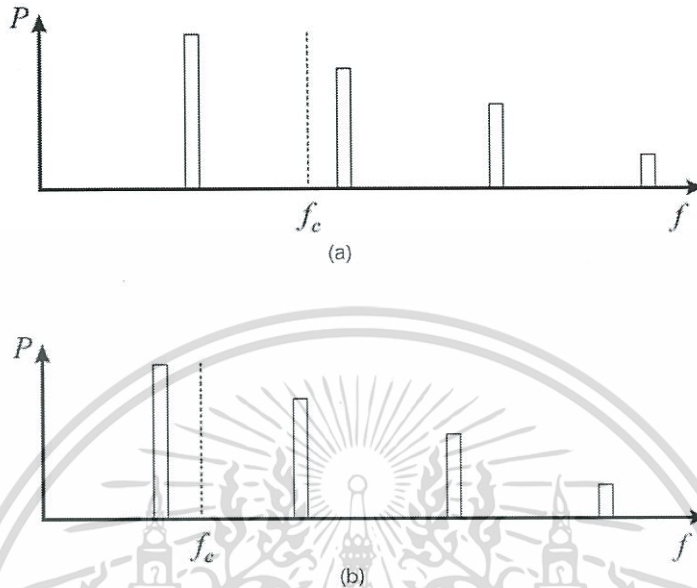
2.6.1 ค่าเฉลี่ยความถี่เสียง (Spectral Centroid)

โดยทั่วไปแล้วค่าเฉลี่ยความถี่เสียงถูกใช้ในการวัดค่าความใสของเสียงต่าง ๆ วิธีที่ใช้ในการวัดค่าเฉลี่ยความถี่เสียง จะใช้วิธีเดียวกับการหาค่า “จุดรวมของมวล” โดยใช้ความถี่และขนาดของข้อมูล จะมีสมการดังนี้ [10]

$$f_c = \frac{\sum_{k=1}^{N/2} f(k) P_i(k)}{\sum_{k=1}^{N/2} A_i(k)} \quad (2-33)$$

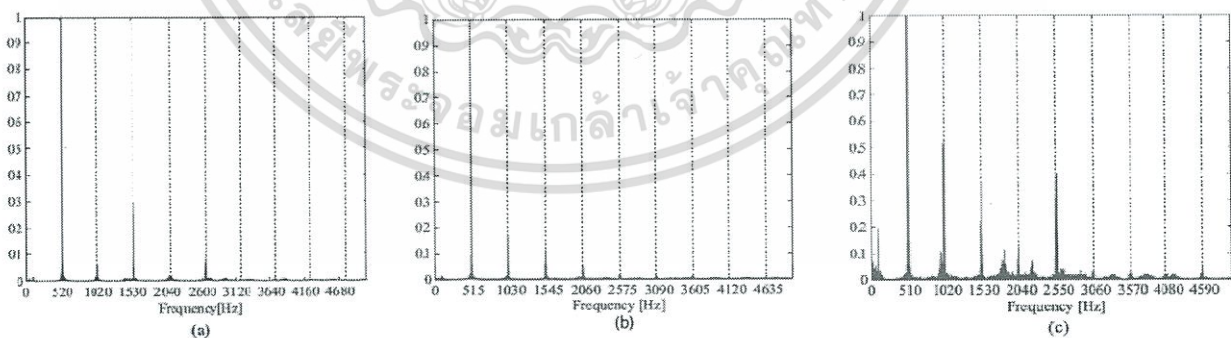
เมื่อ N = จำนวนครั้งของ Fast Fourier Transform
 $P_i(k)$ = ความดันเสียงในค่า k ไต ๆ ที่จุด i
 $f(k)$ = ความถี่ที่ค่า k ไต ๆ

การเปรียบเทียบความใสของเสียงจะดูจากค่าของ Spectral Centroid ถ้ามีค่าห่างจากค่าความถี่เริ่มต้น (Fundamental frequency) ความใสของเสียงจะมากกว่าค่าที่อยู่ใกล้ความถี่เริ่มต้น ดังรูปที่ 2.9 กราฟ (a) จะมีเสียงที่แหลมกว่ากราฟ (b) [3]



รูปที่ 2.9 Spectral Centroid

ตัวอย่างที่ได้ทำการทดลองมาแล้วคือการทดลองของเสียงขลุ่ย โดยที่ขลุ่ยแต่ละเลาทำมาจากวัสดุที่แตกต่างกันออกไป 3 ชนิด คือ ไม้ไผ่ ไม้ประดู่และพลาสติก ซึ่งผลการทดลองจะแสดงตามรูปที่ 2.10 โดยที่ (a) คือผลการทดลองของขลุ่ยที่ทำจากไม้ไผ่ (b) คือผลการทดลองของขลุ่ยที่ทำจากไม้ประดู่ (c) คือผลการทดลองของขลุ่ยที่ทำจากพลาสติก [5]



รูปที่ 2.10 Spectral Centroid ของขลุ่ยชนิดต่าง ๆ [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.2 Attack Time

สัญญาณของคลื่นเสียงแต่ละเครื่องดนตรีที่ส่งออกมาถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเรียกว่า “สัญญาณชั่วคราว” (Transient) ซึ่งจะเกิดขึ้นช่วงสั้น ๆ หลังจากเริ่มกำเนิดเสียง ส่วนที่ 2 เรียกว่า “สัญญาณเสถียร” จะเกิดหลังจากเริ่มกำเนิดเสียง และค่า Attack Time ถูกกำหนดโดยเอาเวลาที่สัญญาณใช้ไปถึงจุดสูงสุดลบกับเวลาในจุดต่ำสุด จะได้สมการ [2]

$$\text{Attack Time} = t_{\max} - t_{\text{threshold}} \quad (2-34)$$

2.6.3 ส่วนประกอบกำลังเสียง

ส่วนประกอบกำลังเสียงนั้นเป็นตัวบ่งชี้ว่าเครื่องดนตรีชนิดใด มีเนื้อเสียงหนาหรือเนื้อเสียงบาง ด้วยการพิจารณาผลรวมของส่วนประกอบของฮาร์โมนิกลำดับที่ 2 ถึง ลำดับที่ 6 โดยจากสมการที่ (2-10) จะได้เป็นกำลังของเสียงทั้งหมด แต่ส่วนประกอบกำลังเสียงจะพิจารณาเฉพาะส่วนจึงต้องนำค่าที่ได้จากสมการที่ (2-10) ไปหารกับความเข้มเสียงของทุกความถี่ จากนั้นนำค่าที่ได้ของความถี่ฮาร์โมนิกลำดับที่ 2 ถึงลำดับที่ 6 มารวมกัน หากเครื่องดนตรีตัวไหนมีผลรวมที่มากกว่าแสดงว่าเครื่องดนตรีชนิดนั้นจะมีเนื้อเสียงที่หนากว่านั่นเอง

2.6.4 ไดนามิกของเพลง

ดนตรีคลาสสิกแบ่งไดนามิกของเพลงเป็น 8 ช่วง และกำหนดความดังของแต่ละไดนามิกไว้ดังแสดงในตารางที่ 2.4 สังเกตเห็นว่าแต่ละไดนามิก มีระดับความดันเสียงต่างกัน 10 เดซิเบล ซึ่งหมายความว่า ถ้าระดับเสียงลดลงเกิน 10 เดซิเบล ไดนามิกของเสียงนั้นจะเปลี่ยนไป กล่าวคือ ถ้าระดับเสียงของตัวโน้ตลดลงจนเปลี่ยนไดนามิกก่อนที่จะมีการเล่นตัวโน้ตถัดไป จะทำให้ไม่สามารถรักษาระดับไดนามิกของเพลงได้ ส่งผลให้มีการขาดช่วงของเสียง โดยสามารถคำนวณระดับความดันเสียงจากความดันเสียงได้จากสมการ (2-1)

ตารางที่ 2.4 ระดับเสียงของแต่ละไดนามิกของดนตรี

Sound	Decibel Level	Musical Dynamics	
		Symbols	Name
Threshold of Hearing	0	-	-
Normal Breathing	10	-	-
Leaves Rustling	20	-	-
Empty Theater	30	-	-
Mosquito Buzzing	40	pp	pianissimo
Quiet Restaurant	50	p	piano
Normal Conversation	60	mp	mezzo piano
Traffic	70	mf	mezzo forte
Vacuum Cleaner	80	f	forte
Truck Engine	90	ff	fortissimo
Subway Train	100	-	-
Rock Band	110	-	-
Threshold of Pain	120	-	-
Machine Gun	130	-	-
Jet Engine	140	-	-

ดนตรีคลาสสิก แบ่งความดังเป็น 8 ช่อง ดังที่สุดคือ Fortissimo ที่ความดัง 90 dB ซึ่งมีความดังเทียบเท่ากับเสียงเครื่องยนต์รถบรรทุกในชีวิตประจำวัน และเบาที่สุดคือ Pianissimo ที่ความดัง 40 dB มีความดังเทียบเท่ากับเสียงยุงบิน และความดังในดนตรี สามารถเปรียบเทียบกับ ความดังที่ปรากฏในชีวิตประจำวัน

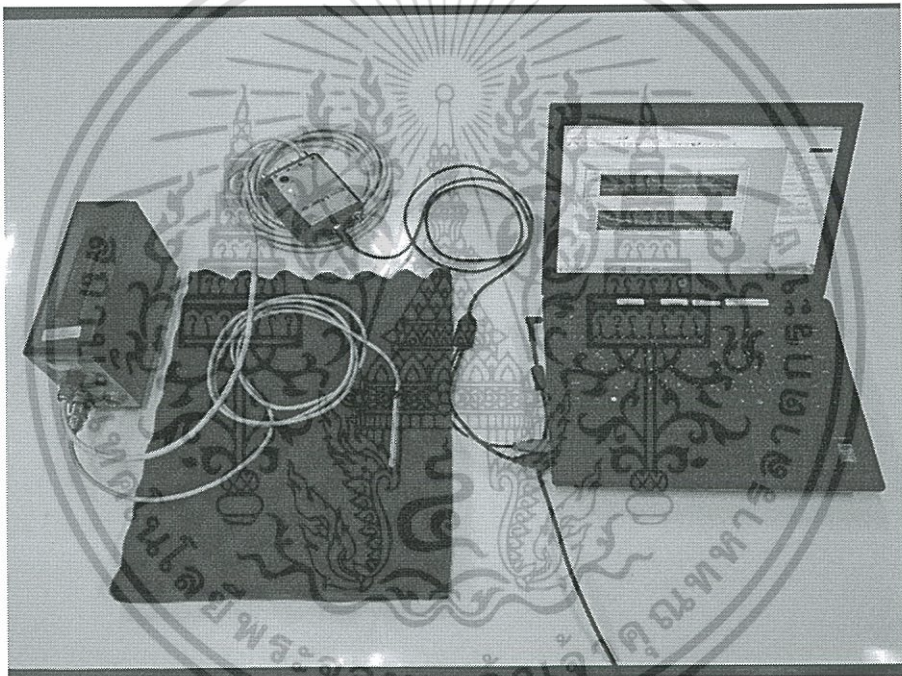
บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

บทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดเกี่ยวกับอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง อุปกรณ์วัดค่าต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในการทดลอง และวิธีการทดลองเพื่อศึกษาค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการสิ้นของสายเครื่องดนตรีจะเข้ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 อุปกรณ์ในการทดลอง

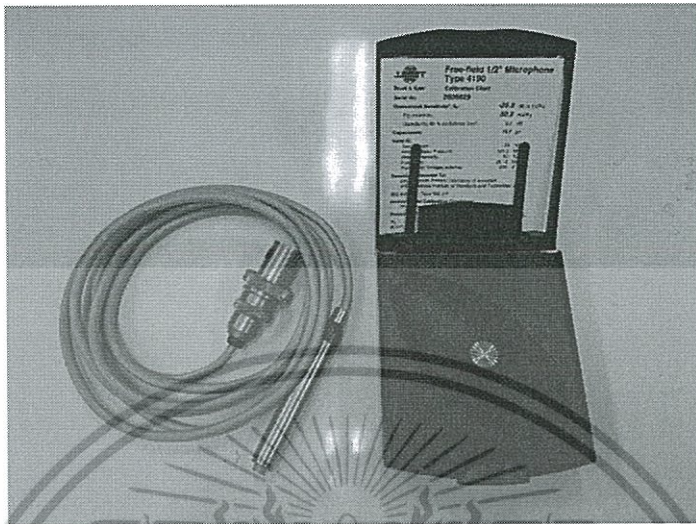
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองนี้ประกอบไปด้วย ไมโครโฟน เครื่องวิเคราะห์สัญญาณ โปรแกรมแสดงผล เครื่องทดสอบแรงดึง เครื่องดนตรีจะเข้และอุปกรณ์จำลองการดีดของผู้เล่น ชุดอุปกรณ์วิเคราะห์เสียง จะแสดงในรูป 3.1



รูปที่ 3.1 ชุดอุปกรณ์วิเคราะห์เสียง

3.1.1 ไมโครโฟน

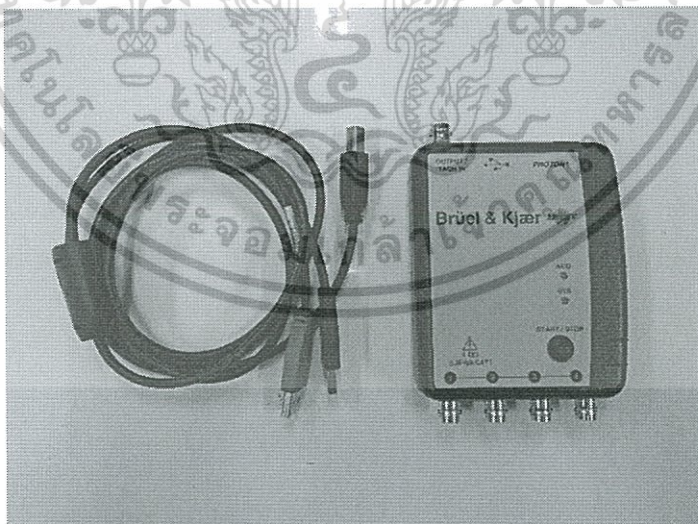
ไมโครโฟนผลิตโดย Brüel & Kjær รุ่น type 4190 ทำหน้าที่เป็นตัวรับเสียงจากแหล่งกำเนิดเสียงและส่งสัญญาณเป็นแบบ Analog ไปยังเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ รูปไมโครโฟนแสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ไมโครโฟน

3.1.2 เครื่อง Data Acquisition

เครื่อง Data Acquisition รุ่น Brüel & Kjær Photon+ ทำหน้าที่เป็นตัวรับสัญญาณ Analog จากไมโครโฟน เพื่อแปลงเป็นสัญญาณ Digital และส่งเข้าโปรแกรมวิเคราะห์สัญญาณ โดยเครื่อง Data Acquisition จะแสดงดังรูปที่ 3.3

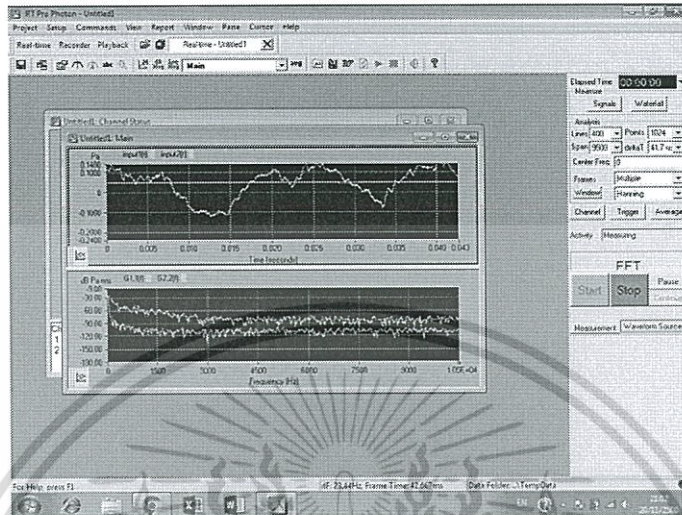


รูปที่ 3.3 เครื่อง Data Acquisition

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 โปรแกรมวิเคราะห์สัญญาณ

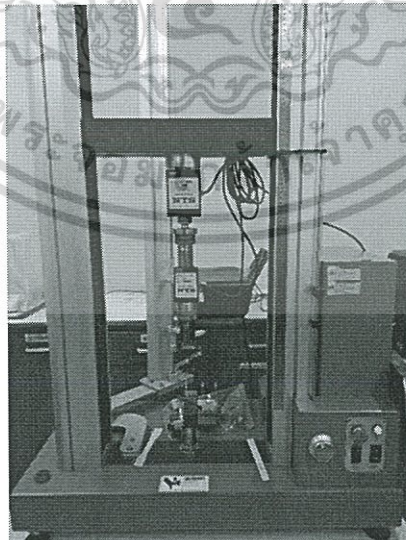
โปรแกรมวิเคราะห์สัญญาณ RT Pro Photon เวอร์ชัน 6.34.9104 ทำหน้าที่รับค่าจากเครื่อง Data Acquisition วิเคราะห์สัญญาณรับเข้าแสดงผลเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความถี่ของเสียง ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 โปรแกรมวิเคราะห์สัญญาณ

3.1.4 เครื่องทดสอบแรงดึง

เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine) ได้รับความอนุเคราะห์จากคณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยเครื่องทดสอบแรงดึง ทำงานโดยทำการดึงวัสดุจนถึงจุดคราก และบันทึกค่าความเค้น ความเครียดของวัสดุในแต่ละช่วงขณะ รูปที่ 3.5 จะแสดงรูปของเครื่องทดสอบแรงดึง

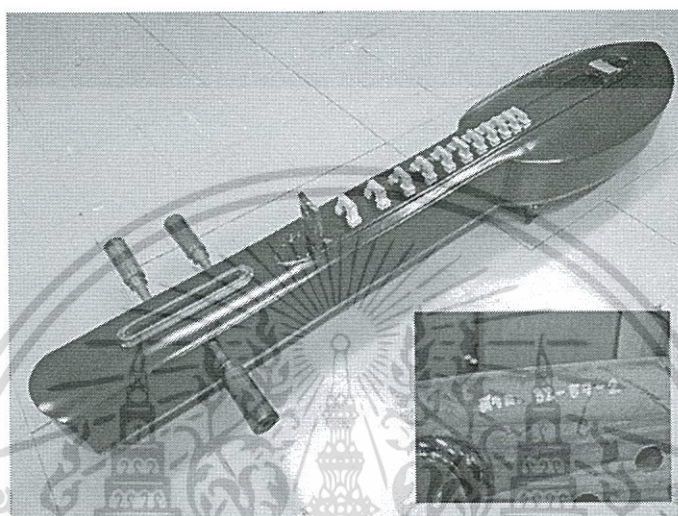


รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบแรงดึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.5 เครื่องดนตรีจะเข้

เครื่องดนตรีจะเข้ที่ใช้ในการทดลอง ทางผู้วิจัยได้ใช้เครื่องดนตรีจะเข้ของครูเอื้อ ฉัตรเฉลิม ซึ่งเครื่องดนตรีดังกล่าวได้รับความอนุเคราะห์จากชุมนุมดนตรีไทยของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ให้ใช้ในงานวิจัย เหตุผลที่เลือกใช้เครื่องดนตรีจะเข้ของครูเอื้อเพราะ เครื่องดนตรีจะเข้ของครูเอื้อได้รับการยอมรับจากนักดนตรีจะเข้ว่า มีคุณภาพเสียงที่ดี มีความประณีตในเรื่องการเลือกวัสดุอุปกรณ์ในการทำ และสัดส่วนที่มีความสวยงาม รวมถึงประวัติ เรื่องราวเกี่ยวกับตัวช่างที่ทำ รูปที่ 3.6 จะแสดงรูปของเครื่องดนตรีจะเข้ที่นำมาใช้ในการทดลอง [11]



รูปที่ 3.6 เครื่องดนตรีจะเข้ที่นำมาใช้ในการทดลอง

3.1.6 อุปกรณ์จำลองการตีของผู้เล่น

อุปกรณ์จำลองการตีของผู้เล่น ทำงานโดยยกไม้ตีขึ้นสูงทำมุม 45 องศาจากแนวดิ่ง แล้วปล่อยให้แกว่งลงมาตามแรงโน้มถ่วง รูปที่ 3.7 จะแสดงรูปของอุปกรณ์จำลองการตีของผู้เล่น



รูปที่ 3.7 อุปกรณ์จำลองการตีของผู้เล่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การติดตั้งอุปกรณ์ทดลอง

- 1) ถอดสายอื่นที่ไม่ได้ถูกวัดออก ให้เหลือเพียงสายเอกที่จะถูกวัดเพียงสายเดียวบนเครื่องดนตรีจะเข้
- 2) วางเครื่องดนตรีจะเข้และเครื่องจำลองการตีไว้ตามรอยสัญลักษณ์ที่ได้กำหนดไว้ พร้อมติดโพลัมกันกระแทกที่ฐานของเครื่องดนตรีและเครื่องจำลองการตี เพื่อลดการสั่นสะเทือนขณะทำการทดลอง
- 3) ทำการจัดวางตำแหน่งไม้มัดให้อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม โดยจัดวางไว้ที่ตำแหน่งห่างจากจุดที่สายสัมผัสโต๊ะเป็นระยะ 9 เซนติเมตร (ประมาณจุดกึ่งกลางระหว่างโต๊ะกับนม)
- 4) ติดตั้งไมโครโฟนบันทึกเสียงเข้ากับขาจับยึด และวางไมโครโฟนไว้ที่ตำแหน่งสูงจากตัวเครื่องดนตรีจะเข้ 11 เซนติเมตร และระยะห่างระหว่างจุดติดกับปลายไมโครโฟนเท่ากับ 17 เซนติเมตร รูปที่ 3.8 จะแสดงรูปของตำแหน่งการติดตั้งไม้มัดและไมโครโฟน [7]
- 5) ตั้งค่าโปรแกรมบันทึกเสียงตามภาคผนวก ก
- 6) ในการตีสาย ให้ทำการยกไม้มัดขึ้นสูงทำมุม 45 องศาจากแนวตั้ง พร้อมกดโปรแกรมเริ่มบันทึกเสียง แล้วปล่อยไม้มัดให้ตกตามแรงโน้มถ่วงโลก



รูปที่ 3.8 ตำแหน่งการติดตั้งไม้มัดและไมโครโฟน

3.3 วิธีการทดลอง

1) นำสายชนิดต่าง ๆ ที่ได้จากการทำแบบสำรวจชนิดของสายที่นักดนตรีจะเข้ นิยมนำมาใช้ และสายที่ทำจากวัสดุที่คาดว่าสามารถใช้ได้ ไปเข้าเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine) ตรวจสอบคุณสมบัติเชิงกล พร้อมวัดค่าทางกายภาพของสาย

2) ยึดสายบนเครื่องดนตรีจะเข้ โดยพิจารณาเพียงสายเอก และใช้อุปกรณ์จำลองการดีด เพื่อให้ได้แรงในการดีดที่เท่ากัน ทำการดีดสายหนึ่งครั้งสำหรับโน้ต C4 (262 เฮิรตซ์) [8] จากนั้นอัดเสียงเพื่อนำค่าที่ได้ไปพิจารณามีดังนี้

2.1) ฮาร์มอนิก (Harmonics)

โดยการหาค่า Harmonics ของสายต่าง ๆ จะหาได้จากการดีดสายหนึ่งครั้งพร้อมทั้งวัดค่าความดังและความถี่ด้วยไมโครโฟน ป้อนเข้าสู่เครื่อง Data Acquisition แสดงผลลัพธ์เป็นกราฟ Harmonics ผ่านโปรแกรม RT Pro Photon

2.2) ค่าความยาวของหางเสียง (Sustain)

โดยนำไฟล์เสียงที่อัดไว้ของแต่ละสาย มาเข้าโปรแกรมวิเคราะห์สัญญาณ RT Pro Photon แสดงผลในรูปกราฟ Spectrogram ศึกษาพฤติกรรมการลดลงของความดังกับเวลา

2.3) อัตราส่วนความหน่วง (Damping ratio)

โดยนำไฟล์เสียงที่อัดไว้ของแต่ละสาย มาเข้าโปรแกรมวิเคราะห์สัญญาณ RT Pro Photon แสดงผลในรูปสัญญาณเสียง (Wave form) นำข้อมูลการแสดงผลมาเขียนกราฟในโปรแกรม Microsoft Excel หาค่าความสัมพันธ์ระหว่างการลดลงของกราฟ พิจารณาการลดลงของสัญญาณ

2.4) ความใสของเสียง (Brightness of sound)

โดยนำไฟล์เสียงที่อัดไว้ของแต่ละสาย มาเข้าโปรแกรมวิเคราะห์สัญญาณ RT Pro Photon แสดงไฟล์เสียงในรูปของข้อมูลความถี่และความถี่ โดยพิจารณาจากการหาค่า Centroid ของแต่ละสายมาเปรียบเทียบกัน

3) นำข้อมูลต่าง ๆ ที่ได้จากการวัดเสียงของเครื่องดนตรีจะเข้ ไปเปรียบเทียบกับค่าคุณสมบัติภายในของสาย เพื่อสังเกตว่าคุณสมบัติภายในของสาย คุณสมบัติใดส่งผลต่อเสียงไปในทิศทางใด

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลการสำรวจชนิดของสายเครื่องดนตรีจะเข้ที่ผู้เล่นนิยมใช้

การเก็บข้อมูลเป็นแบบการเลือกกลุ่มตัวอย่างแบบสุ่ม จากผู้เล่นเครื่องดนตรีจะเข้จำนวน 24 คน จากแบบสอบถามพบว่า ส่วนที่ 1 ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มเล่นเครื่องดนตรีจะเข้ แสดงข้อมูลตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงจำนวนร้อยละของระยะเวลาที่เริ่มเล่นเครื่องดนตรีจะเข้ของผู้ตอบแบบสอบถาม

ระยะเวลา (ปี)	จำนวน (คน)	ร้อยละ
1-3	8	33.3
4-6	6	25.0
10-12	5	20.8
7-9	3	12.6
มากกว่า 12 ปี	2	8.3
รวม	24	100.0

จากการตอบแบบสอบถามพบว่า ผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่มีประสบการณ์ในการเล่นเครื่องดนตรีจะเข้เป็นระยะเวลา 1-3 ปี จำนวน 8 คน คิดเป็นร้อยละ 33.3 และเป็นผู้มีประสบการณ์ในการเล่นเครื่องดนตรีจะเข้เป็นระยะเวลามากกว่า 12 ปีน้อยที่สุด จำนวน 2 คน คิดเป็นร้อยละ 8.3

ส่วนที่ 2 ชนิดของสายเครื่องดนตรีจะเข้ที่เลือกใช้ แสดงข้อมูลตามตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงจำนวนร้อยละของชนิดของสายเครื่องดนตรีจะเข้ที่ผู้ตอบแบบสอบถามเลือกใช้

ชนิด	จำนวน (คน)	ร้อยละ
เอ็นก่อสร้างเบอร์ 120	14	58.3
เอ็นเทนนิส	8	33.3
เส้นไหม	2	8.4
รวม	24	100.0

จากการตอบแบบสอบถามพบว่า ผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่เลือกใช้สายเอ็นก่อสร้างเบอร์ 120 จำนวน 14 คน คิดเป็นร้อยละ 58.3 และเป็นสายเส้นไหมน้อยที่สุด จำนวน 2 คน คิดเป็นร้อยละ 8.4

ส่วนที่ 3 เหตุผลในการเลือกใช้สายชนิดต่าง ๆ แสดงข้อมูลตามตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงจำนวนร้อยละของเหตุผลในการเลือกใช้สายชนิดต่าง ๆ

เหตุผล	จำนวน (คน)	ร้อยละ
คุณภาพเสียง	8	33.3
ความง่ายในการเล่น	6	25.0
ความทนทาน	4	16.6
หาซื้อง่าย	3	12.5
ความเหมาะสมกับตัวจะเข้	2	8.4
ราคาถูก	1	4.2
รวม	24	100.0

จากการตอบแบบสอบถามพบว่า ผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่เลือกชนิดของสายเพราะคุณภาพเสียง จำนวน 8 คน คิดเป็นร้อยละ 33.3 และเลือกเพราะราคาถูกน้อยที่สุด จำนวน 1 คน คิดเป็นร้อยละ 4.2

ส่วนที่ 4 สถานที่ที่ซื้อสาย แสดงข้อมูลตามตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงจำนวนร้อยละของสถานที่ที่ซื้อสาย

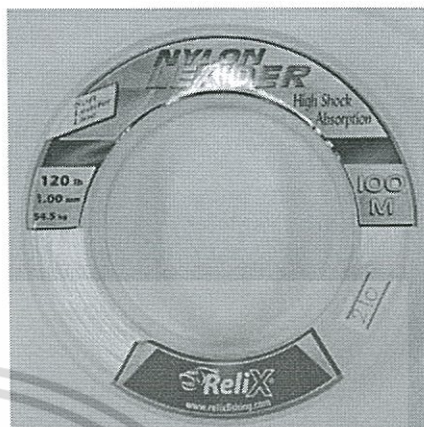
ชื่อร้าน	จำนวน (คน)	ร้อยละ
ศึกษาภัณฑ์	9	37.5
สมชัยดนตรีไทย	6	25.0
ไม่เจาะจงร้าน	5	20.8
Super Sports	3	12.5
พรานนก	1	4.2
รวม	24	100.0

จากการตอบแบบสอบถามพบว่า ผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่ซื้อสายที่ร้านศึกษาภัณฑ์ จำนวน 9 คน คิดเป็นร้อยละ 37.5 และซื้อสายที่ร้านพรานนกน้อยที่สุด จำนวน 1 คน คิดเป็นร้อยละ 4.2

จากผลการสำรวจชนิดของสายเครื่องดนตรีจะเข้ที่ผู้เล่นนิยมใช้ ผู้วิจัยเลือกสายชนิดที่ผู้เล่นใช้จริง และสายชนิดอื่น ๆ ที่คาดว่าจะสามารถนำมาใช้เป็นสายเครื่องดนตรีจะเข้ได้ มาทำการทดสอบ จำนวน 12 ชนิด แสดงตามรูปที่ 4.1 ถึง 4.12 ดังนี้



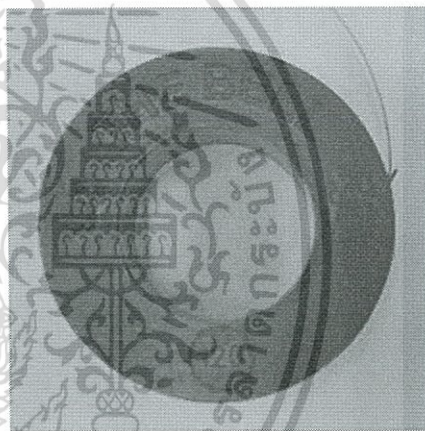
รูปที่ 4.1 เอ็นเทนนิส ยี่ห้อ ZONS เบอร์ 17



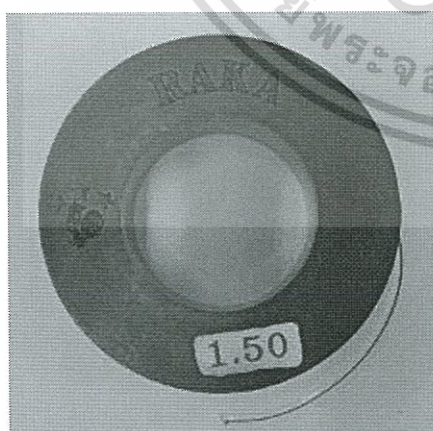
รูปที่ 4.2 เอ็นตกลา ยี่ห้อ ReliX ขนาด 120 ปอนด์



รูปที่ 4.3 เอ็นก่อสร้าง ยี่ห้อ THE BELL เบอร์ 100



รูปที่ 4.4 เอ็นก่อสร้าง ยี่ห้อ THE BELL เบอร์ 120

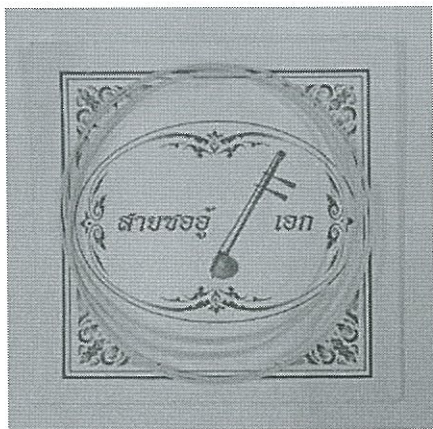


รูปที่ 4.5 เอ็นก่อสร้าง ยี่ห้อ RAKA เบอร์ 150

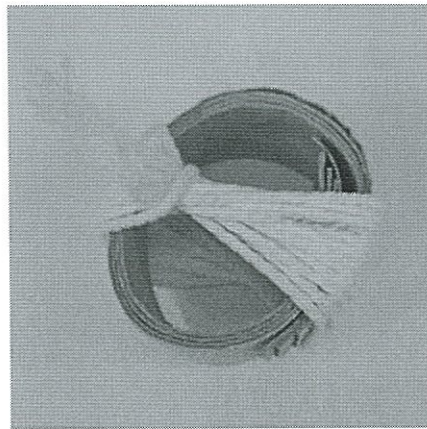


รูปที่ 4.6 สายข่อยขุ่ม (สายไหม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



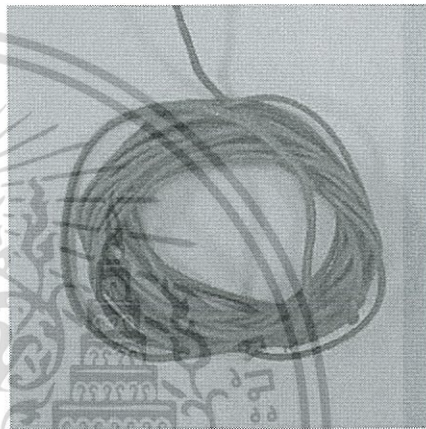
รูปที่ 4.7 สายขงอู้เอก (สายใหม่)



รูปที่ 4.8 เชือกขาวเบอร์ 60



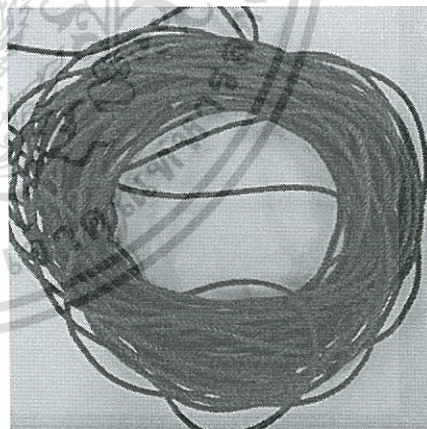
รูปที่ 4.9 เชือกถัก P.P. เบอร์ 5



รูปที่ 4.10 สายกีฟซีอ็อป



รูปที่ 4.11 เชือกขาวแดง



รูปที่ 4.12 เชือกไนล่อน (Nylon) ขนาด 2 มม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการวัดคุณสมบัติเชิงกลของสายชนิดต่าง ๆ

เนื่องจากวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์นี้ต้องการศึกษาคุณภาพของเสียงซึ่งมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติเชิงกลของสาย โดยที่คุณสมบัติเชิงกลของสายที่นำมาพิจารณาจะมีดังต่อไปนี้

4.2.1 ลักษณะทางกายภาพของสายแต่ละชนิด

วัดเส้นผ่านศูนย์กลางของสายชนิดต่าง ๆ ด้วยไมโครมิเตอร์ที่มีความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร และวัดความหนาแน่นเชิงเส้นด้วยเครื่องชั่งเชิงวิเคราะห์ที่มีความละเอียด 0.001 กรัม ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ลักษณะทางกายภาพของสายชนิดต่าง ๆ ในสภาวะปกติ (ไม่ได้รับแรง)

ชนิด	เส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	พื้นที่หน้าตัด (ตร. มม.)	ความหนาแน่นเชิงเส้น (กรัม/เมตร)
เอ็นเทนนิส (Tennis)	1.30	1.33	1.452
เอ็นตกลา	1.05	0.87	0.990
เอ็นก่อสร้างเบอร์ 100	1.00	0.79	0.911
เอ็นก่อสร้างเบอร์ 120	1.26	1.25	1.367
เอ็นก่อสร้างเบอร์ 150	1.58	1.96	2.092
สายซออุทู่้ม (เส้นไหม)	1.65	2.14	2.271
สายซออุโอ๊ก (เส้นไหม)	1.46	1.67	1.778
เชือกขาว เบอร์ 60	2.06	3.33	1.970
เชือกถัก P.P.เบอร์ 5	2.67	5.60	3.380
สายกีฟซ์อ็อป	1.60	2.01	1.550
เชือกขาวแดง	1.28	1.29	0.880
เชือกไนลอน (Nylon) 2 มม.	2.57	5.19	2.970

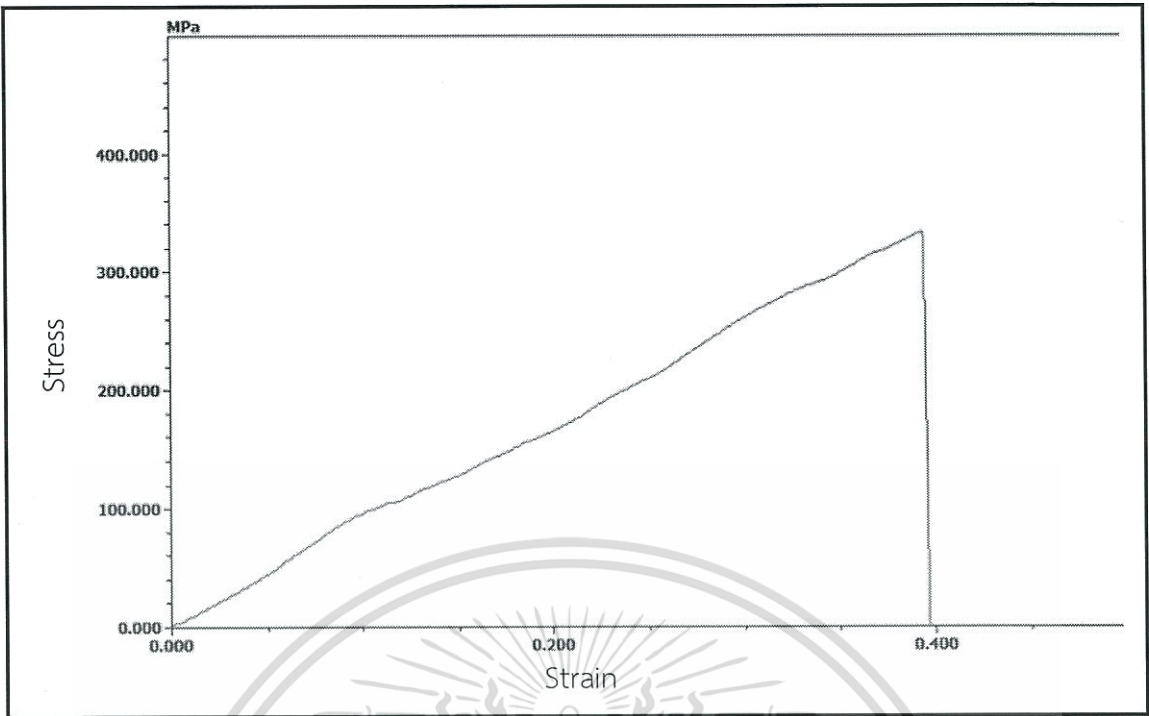
แต่เมื่อสายถูกดึงเพื่อให้มีความถี่ตามที่ต้องการ (262 เฮิรตซ์) ลักษณะทางกายภาพของสายจะเปลี่ยนแปลง โดยผู้วิจัยทำการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของสายขณะที่สายรับแรงดึง เพื่อให้มีความถี่ 262 เฮิรตซ์ จากนั้นทำการตัดที่สายตำแหน่งหย่องและโต๊ะของเครื่องดนตรีจะเข้า ขณะที่รับแรงดึงอยู่ไปชั่งน้ำหนัก เพื่อคำนวณหาค่าความหนาแน่นเชิงเส้นและลักษณะทางกายภาพต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงไป

ตารางที่ 4.6 ลักษณะทางกายภาพของสายชนิดต่าง ๆ ขณะรับแรงดึงเพื่อให้เกิดเสียงที่ 262 เฮิร์ตซ์

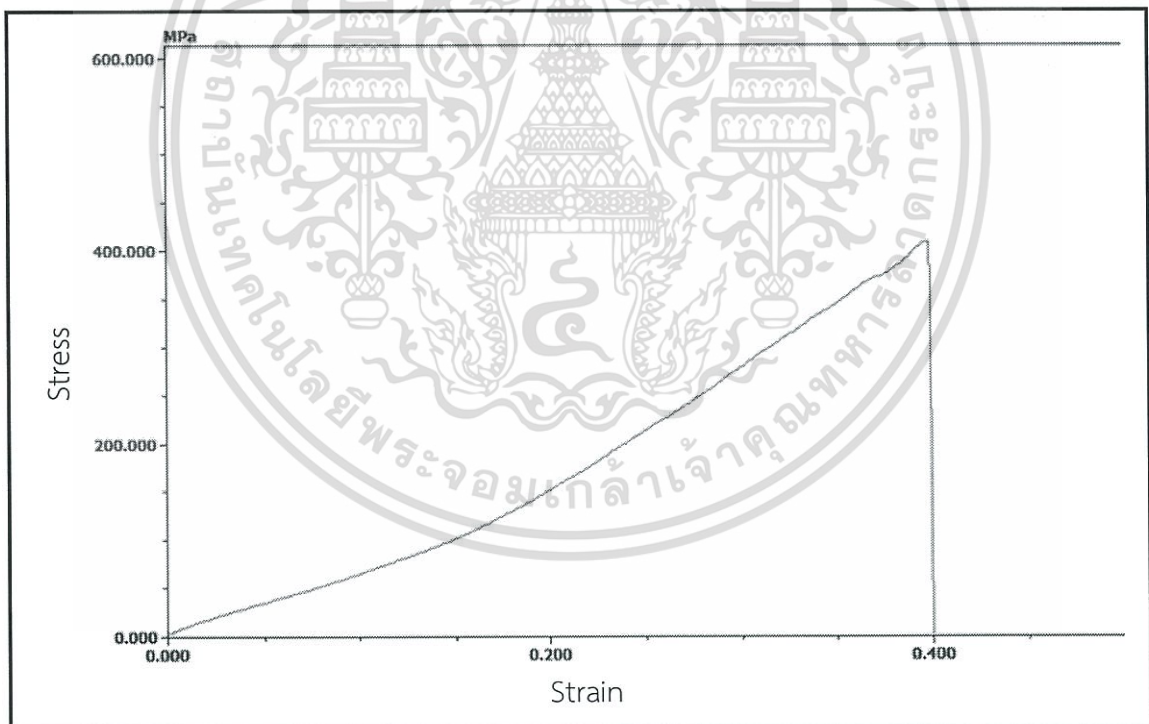
ชนิด	เส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	พื้นที่หน้าตัด (ตร. มม.)	ความหนาแน่นเชิงเส้น (กรัม/เมตร)
เอ็นเทนนิส (Tennis)	1.22	1.17	1.2788
เอ็นตกลา	1.00	0.79	0.8980
เอ็นก่อสร้างเบอร์ 100	0.98	0.75	0.8749
เอ็นก่อสร้างเบอร์ 120	1.16	1.06	1.1586
เอ็นก่อสร้างเบอร์ 150	1.46	1.67	1.7863
สายซออุทุม (เส้นไหม)	1.57	1.94	2.0561
สายซออุเอก (เส้นไหม)	ไม่สามารถรับแรงดึงได้		
เชือกขาว เบอร์ 60	1.67	2.19	1.2947
เชือกถัก P.P.เบอร์ 5	2.12	3.53	2.1309
สายกีฟชีอป	ไม่สามารถรับแรงดึงได้		
เชือกขาวแดง	ไม่สามารถรับแรงดึงได้		
เชือกไนลอน (Nylon) 2 มม.	ไม่สามารถใส่กับลูกบิดจะใช้ได้		

4.2.2 ผลการทดลองด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง

ผลการทดสอบคุณสมบัติของสายชนิดต่าง ๆ ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง โดยมีความยาวเริ่มต้น 5 เซนติเมตร ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดแสดงตามรูปที่ 4.13 ถึง 4.20 ดังนี้

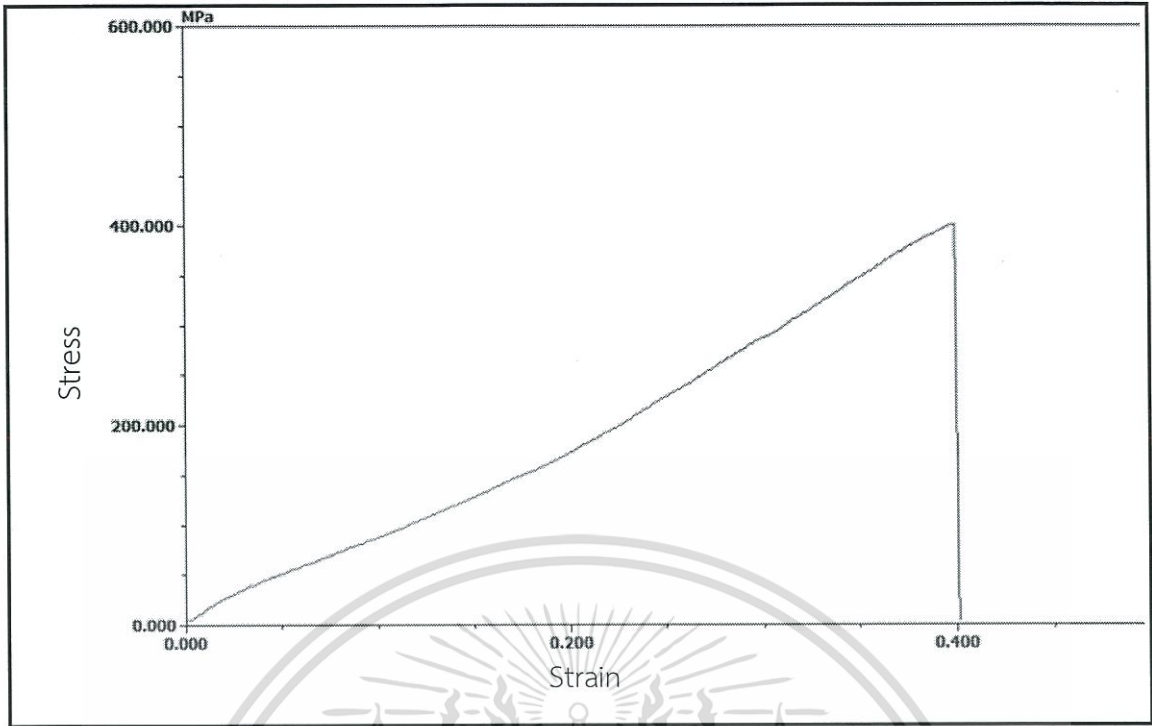


รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเอ็นเทนนิส

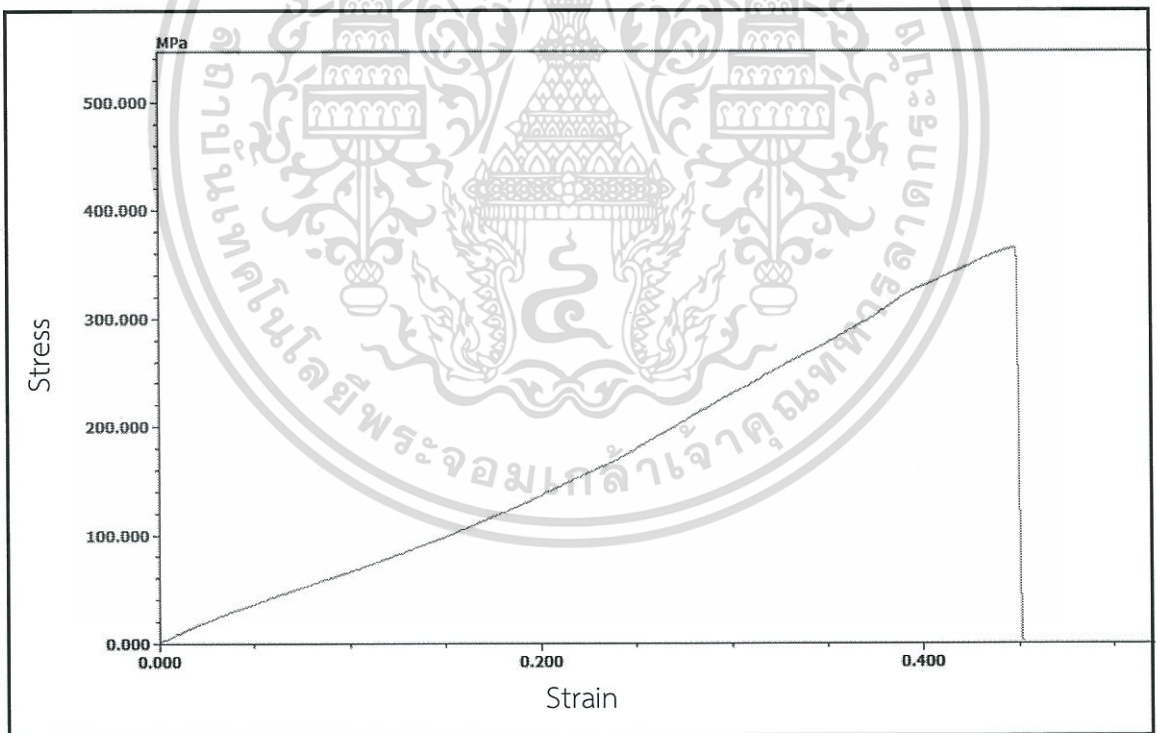


รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเอ็นตกปลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

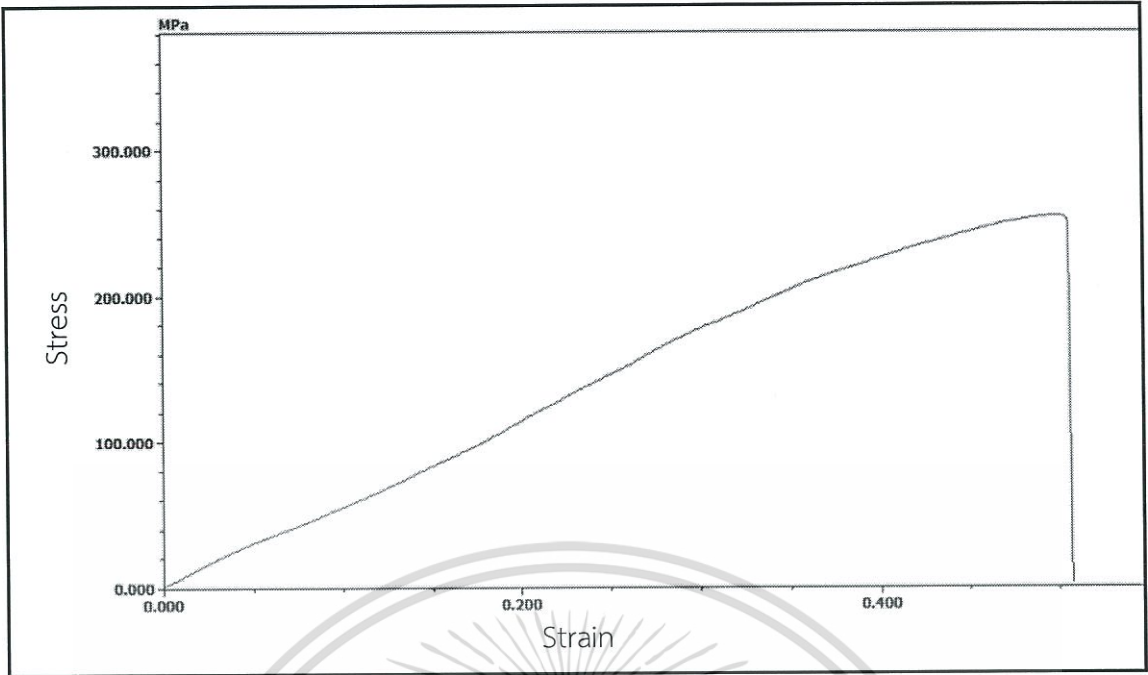


รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเอ็นก่อสร้างเบอร์ 100

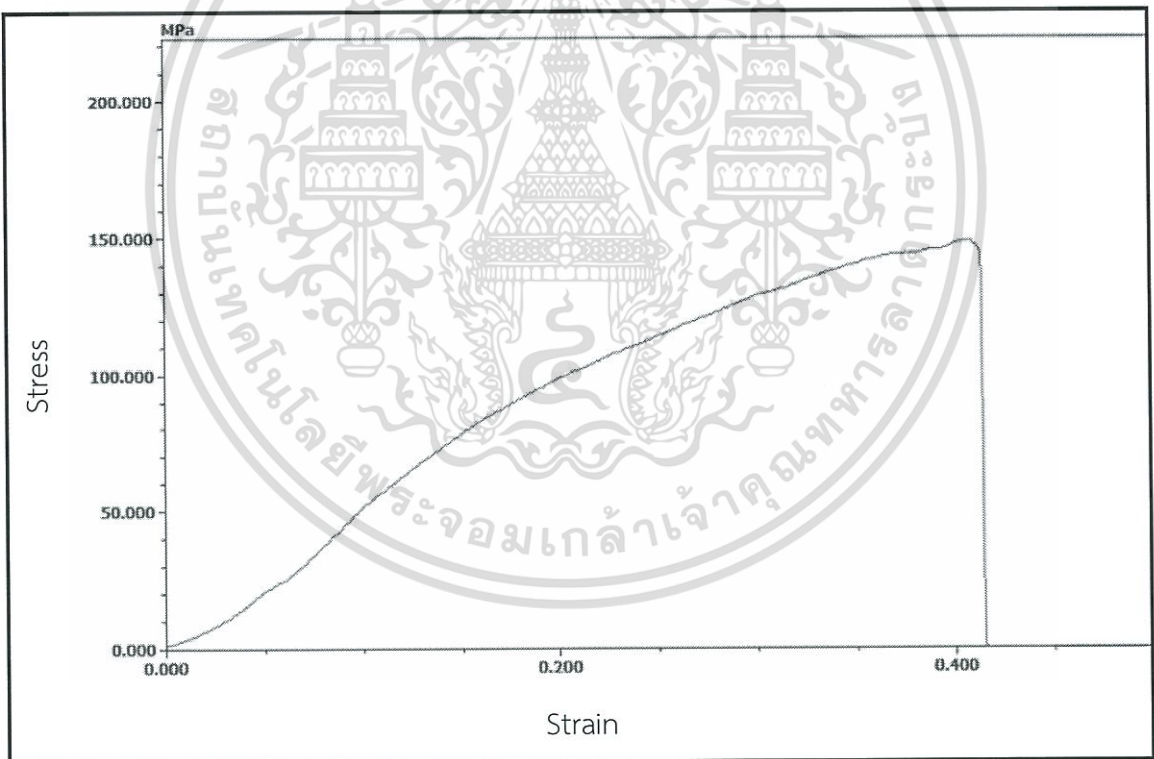


รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเอ็นก่อสร้างเบอร์ 120

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

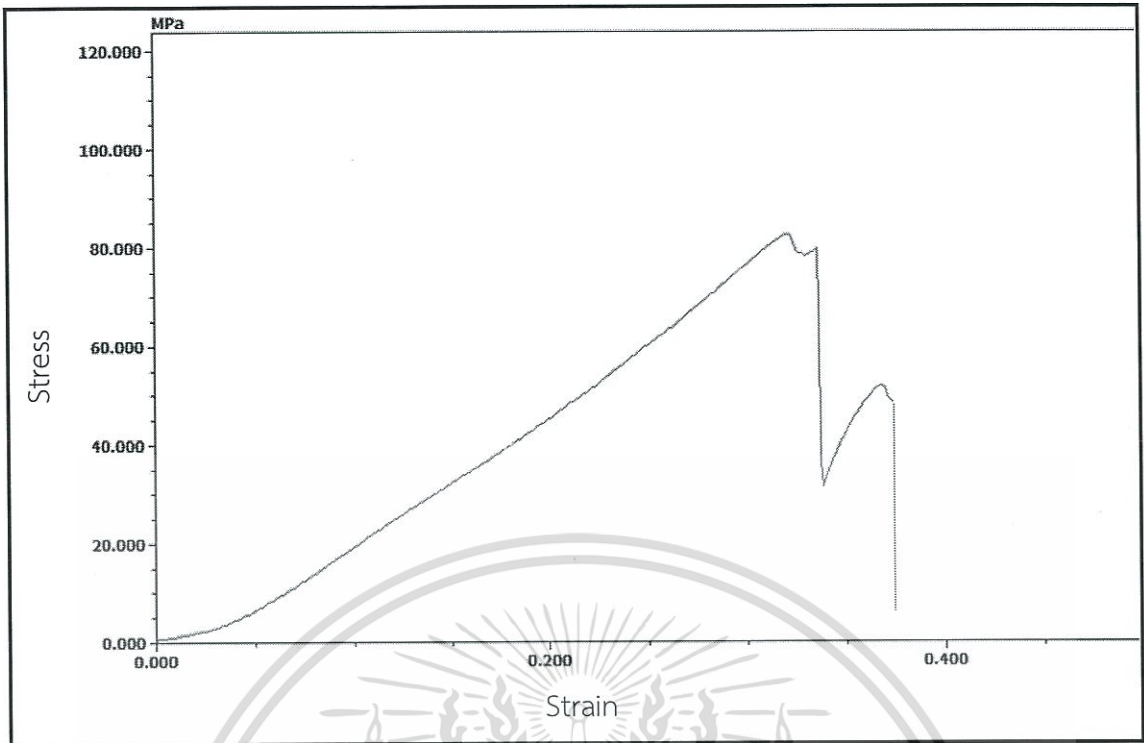


รูปที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเอ็นก่อสร้างเบอร์ 150

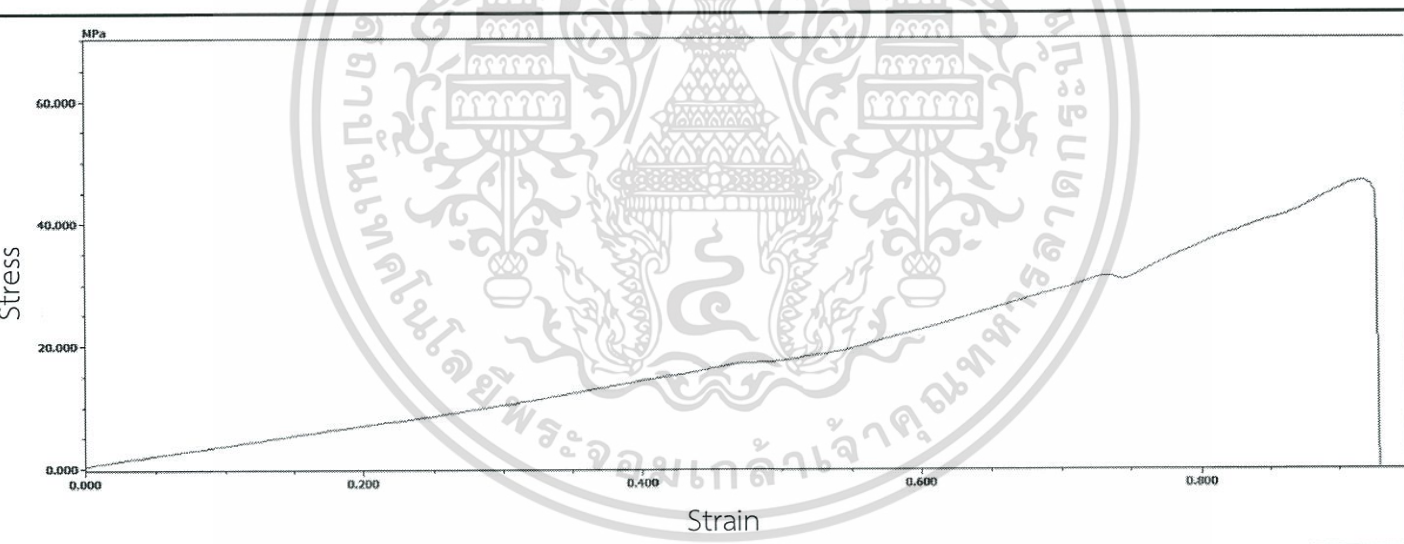


รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของซอู้หุ้ม (ใหม่)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเชือกขาวเบอร์ 60



รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเชือกถัก P.P. เบอร์ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากวัสดุที่ใช้ทดสอบมีรูปร่างเป็นทรงกระบอก ดังนั้นวัสดุที่ตำแหน่งหัวจับยึดของเครื่องทดสอบมีความแข็งแรงน้อยกว่าจุดอื่น ส่งผลให้ผลวัสดุขาดที่จุดจับยึด และแรงสูงสุดที่วัดได้ ไม่ใช่แรงสูงสุดที่วัสดุรับได้จริง แต่เรายังสามารถหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุได้

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด จะสังเกตเห็นว่าความชันของกราฟหรือค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุมีค่าไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นเพื่อหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุขณะใช้งาน ผู้วิจัยจึงพิจารณาเฉพาะช่วงที่สายรับแรงดึงเท่ากับแรงดึงที่ทำให้สายสั่นด้วยความถี่ 262 เฮิรตซ์ ± 20 นิวตันและหาความชันของข้อมูลด้วยวิธีกราฟที่สองกำลังสองเฉลี่ยได้ผลตามตารางที่ 4.7 ดังนี้

ตารางที่ 4.7 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Young's Modulus) ของสายแต่ละชนิด

ชนิด	ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (MPa)
เอ็นตบปลา	799.04
เอ็นก่อสร้างเบอร์ 100	767.58
เอ็นก่อสร้างเบอร์ 120	728.31
เอ็นเทนนิส (Tennis)	722.58
เอ็นก่อสร้างเบอร์ 150	574.67
เชือกขาว เบอร์ 60	393.28
เชือกถัก P.P.เบอร์ 5	210.79
สายซออุ้ม (เส้นไหม)	208.97

และจากตารางที่ 4.7 สายเอ็นตบปลามีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่มากที่สุดอยู่ที่ 799.04 MPa และสายซออุ้ม (เส้นไหม) มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่น้อยที่สุดอยู่ที่ 208.97 MPa

4.3 ลักษณะกายภาพที่มีผลต่อการเล่นเครื่องดนตรีจะเข้

ลักษณะทางกายภาพของสายแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน ทำให้มีความยากง่ายในการเล่น ซึ่งปัจจัยในการทำให้เล่นง่ายอย่างหนึ่งคือ แรงที่ใช้ในการตั้งเสียงและผิวสัมผัสขณะเปลี่ยนตัวโน้ต โดยตารางที่ 4.8 จะแสดงค่าความตึงของสายขณะที่สายถูกดึงให้มีความถี่ 262 เฮิรตซ์และลักษณะพื้นผิวสัมผัสของสาย

ตารางที่ 4.8 ลักษณะทางกายภาพและแรงที่ใช้ในการตีสาย

ชนิดของสาย	ลักษณะทางกายภาพ (พื้นผิวของสาย)	แรงดึงที่ 262 เฮิร์ตซ์ (นิวตัน)
เอ็นเทนนิส (Tennis)	เรียบเป็นเนื้อเดียวกัน, เคลือบน้ำมัน	182.074
เอ็นตกลปลา	เรียบเป็นเนื้อเดียวกัน	122.233
เอ็นก่อสร้างเบอร์ 100	เรียบเป็นเนื้อเดียวกัน	109.872
เอ็นก่อสร้างเบอร์ 120	เรียบเป็นเนื้อเดียวกัน	166.966
เอ็นก่อสร้างเบอร์ 150	เรียบเป็นเนื้อเดียวกัน	251.136
สายซออุทึม (เส้นไหม)	หยาบปานกลาง, สาก, เคลือบด้วยไข	250.351
เชือกขาว เบอร์ 60	หยาบเล็กน้อย, สาก	228.573
เชือกถัก P.P.เบอร์ 5	หยาบเล็กน้อย, สาก, ลื่น	297.243
สายกีฟซ็อป	หยาบเล็กน้อย, ละเอียดย	ไม่สามารถรับแรงดึงได้
สายซออุเอก (เส้นไหม)	หยาบปานกลาง, สาก, เคลือบด้วยไข	ไม่สามารถรับแรงดึงได้
เชือกขาวแดง	หยาบเล็กน้อย, เรียบ	ไม่สามารถรับแรงดึงได้
เชือกไนลอน (Nylon) 2 มม.	หยาบมาก, สาก	ไม่สามารถใส่กับลูกบิดเครื่อง ดนตรีจะใช้ได้

ตารางข้างต้นแสดงข้อมูล พื้นผิวของสายซึ่งเป็นลักษณะทางกายภาพที่ส่งผลต่อความยากง่ายในการเลือนนิ้วมือเปลี่ยนโน้ต กล่าวคือ สายที่มีพื้นผิวเรียบเป็นเนื้อเดียวกันจะง่ายต่อการเลือนนิ้วมือเปลี่ยนโน้ต ผู้เล่นไม่รู้สึกรู้สึกเจ็บ และไม่รู้สึกรู้สึกสากนิ้วเหมือนสายที่มีพื้นผิวหยาบ จากข้อมูลข้างต้นจะพบว่าสายจำพวกเอ็นก่อสร้างมีลักษณะพื้นผิวเรียบเป็นเนื้อเดียวกันทำให้ง่ายต่อการเล่น และสายจำพวกสายถักเกลียว เช่น เส้นไหม เชือกขาว เชือกถัก P.P. เชือกขาวแดงและเชือกไนลอน มีลักษณะพื้นผิวหยาบทำให้ยากต่อการเล่น เวลาเล่นทำให้รู้สึกรู้สึกเจ็บนิ้วมือ และเกิดอาการบาดเจ็บได้

แรงที่ใช้ในการเล่นมีค่าแปรผันโดยตรงกับค่าแรงดึงที่ 262 เฮิร์ตซ์ กล่าวคือ สายที่ถูกดึงด้วยแรงที่มากเพื่อให้ได้การสั่นที่มีความถี่ 262 เฮิร์ตซ์ จะส่งผลให้แรงที่ใช้ในการกดโน้ตหรือตีตีสายมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งเป็นสิ่งที่ผู้เล่นเครื่องดนตรีจะเข้าส่วนมากไม่ต้องการ เนื่องจากเล่นในระยะเวลาานจะทำให้เกิดอาการเมื่อยล้า และจากข้อมูลข้างต้นจะเห็นได้ว่ามีสายอยู่ 3 ชนิดที่ไม่สามารถรับแรงดึงได้ อีก 1 ชนิดไม่สามารถใส่กับลูกบิดเครื่องดนตรีจะใช้ได้ ดังนั้นสาย 4 ชนิดดังกล่าวจึงไม่นำมาทำการทดลอง

4.4 ผลการวัดเสียง

ในการทดลองนั้นจะใช้เครื่องดนตรีจะเข้ตัวเดียวกัน โดยเปลี่ยนเพียงแค่สายเอก และทุกสายจะถูกขึงให้มีความถี่ที่โน้ตตัวโด (262 เฮิรตซ์) หลังจากดีดโดยเครื่องจำลองการดีดสายแล้วจะถูกอัดเสียงเพื่อนำไปวิเคราะห์ ซึ่งในการอัดเสียงจะมีการตั้งโปรแกรมตามภาคผนวก ก ทุกครั้งที่สายถูกดีดจะใช้แรงที่เท่ากันโดยทำการยกไม้ดีดขึ้นท่ามุม 45 องศาจากแนวตั้ง และปล่อยให้ตกลงมาตามแรงโน้มถ่วงของโลก โดยจะเก็บค่าต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ แสดงข้อมูลที่ได้ตามรูปที่ 4.21 ผลการวัดเสียงของเอ็นก้อสร้างเบอร์ 100 รูปที่ 4.22 ผลการวัดเสียงของเอ็นก้อสร้างเบอร์ 120 รูปที่ 4.23 ผลการวัดเสียงของเอ็นก้อสร้างเบอร์ 150 รูปที่ 4.24 ผลการวัดเสียงของเอ็นตกลปลา รูปที่ 4.25 ผลการวัดเสียงของเอ็นเทนนิส (Tennis) รูปที่ 4.26 ผลการวัดเสียงของสายซออุทึม (เส้นไหม) รูปที่ 4.27 ผลการวัดเสียงของเชือกขาวเบอร์ 60 รูปที่ 4.28 ผลการวัดเสียงของเชือกถัก P.P.เบอร์ 5

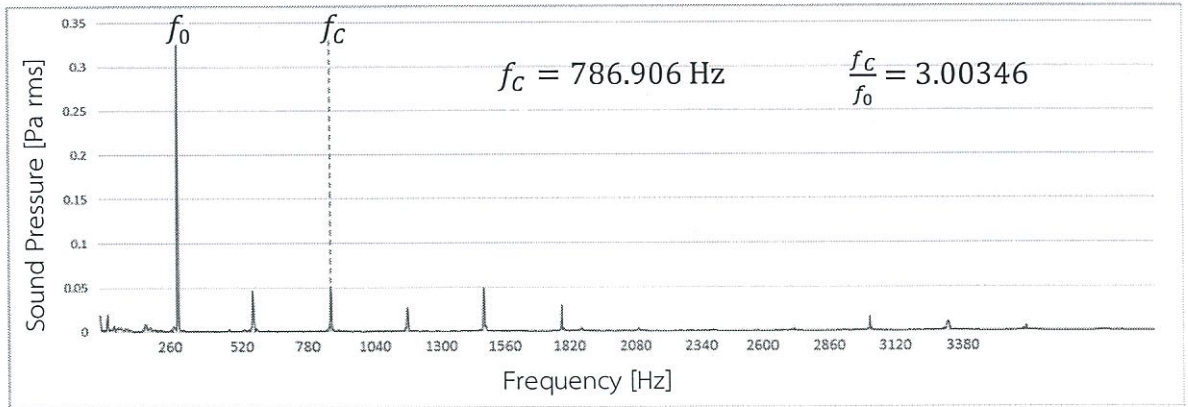
โดยรูป (ก) คือความสัมพันธ์ระหว่างความดันเสียงและความถี่ รูป (ข) คือความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอมป์ริจูดและความถี่ ทั้งรูป (ก) และ (ข) นำไปเพื่อประมาณค่าความถี่ของเสียงด้วยการหาค่าเฉลี่ย ความถี่เสียง รูป (ค) คือความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละพลังงานและความถี่ ด้วยการหาพลังงานทั้งหมด และหาของแต่ละความถี่ เพื่อไปประมาณค่าความรู้สึกหนาของเสียง รูป (ง) คือความสัมพันธ์ระหว่างความดังของเสียงและเวลา ด้วยการหาสมการการลดลงของความดังเสียงเพื่อนำไปหาค่าอัตราส่วนความหน่วง รูป (จ) คือความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และเวลา เพื่อนำไปสังเกตว่าที่เสียงที่ทำการวัดมีการลดลงอย่างไรของแต่ละความถี่ ซึ่งการคำนวณอย่างละเอียดจะแสดงอยู่ที่ภาคผนวก ข.

4.4.1 ค่าเฉลี่ยความถี่เสียง (Spectral Centroid)

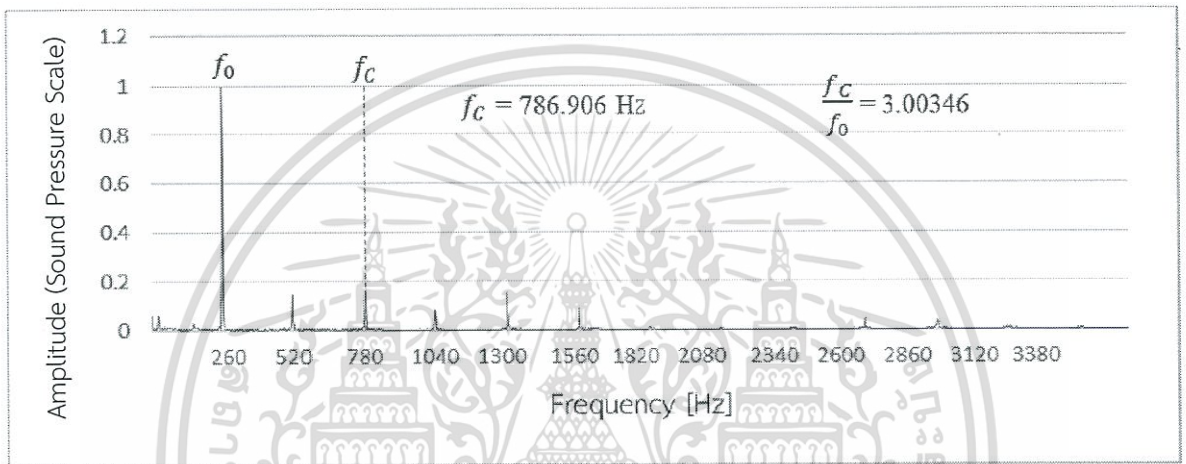
ในการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยความถี่เสียง จะติดตั้งระบบไปที่ line 800 point 2048 span 3200 delta T 122.1 μS . เพื่อให้ได้ความละเอียดของความถี่ที่สูง และค่าความคลาดเคลื่อนการวิเคราะห์ที่น้อย

4.4.2 ความดังในแต่ละช่วงและการลดลงของสัญญาณ

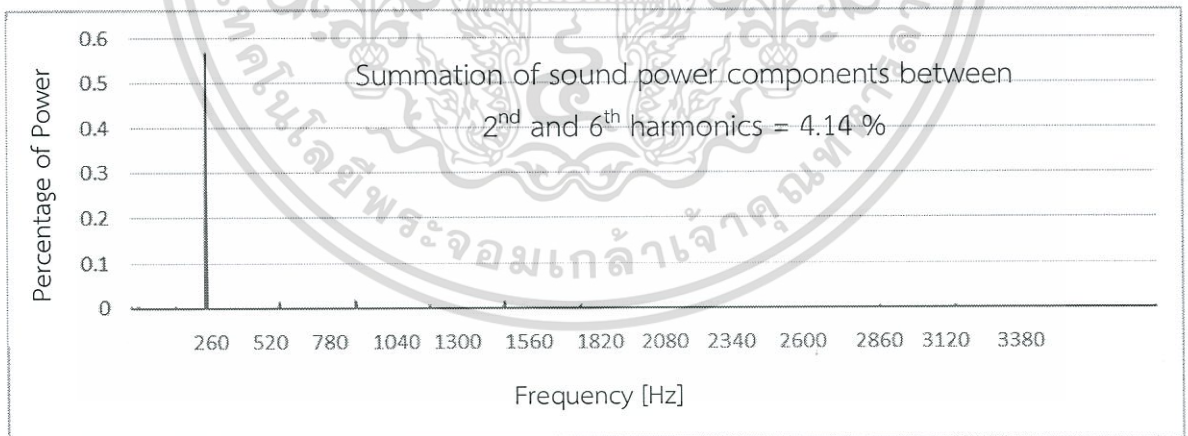
ในการวิเคราะห์ค่าสัญญาณของเสียง จะติดตั้งระบบไปที่ line 6400 point 16384 span 3200 delta T 122.1 μS . เพื่อให้ได้ช่วงความกว้างของสัญญาณที่กว้าง และความดันต่อความถี่ที่ชัดเจน



รูปที่ 4.21 (ก) Spectral Centroid (Sound Pressure) ของเอ็นก๋อสร้างเบอร์ 100

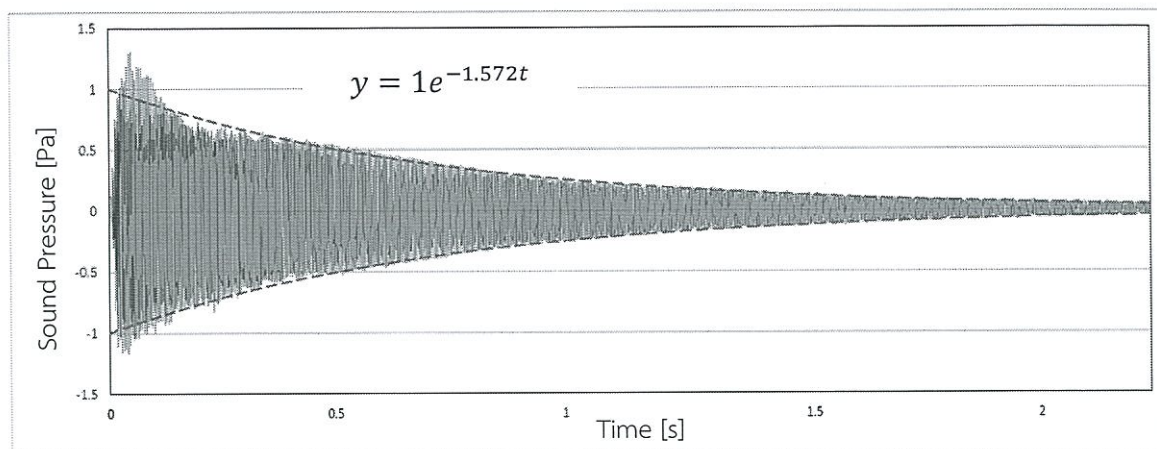


รูปที่ 4.21 (ข) Spectral Centroid (Amplitude) ของเอ็นก๋อสร้างเบอร์ 100

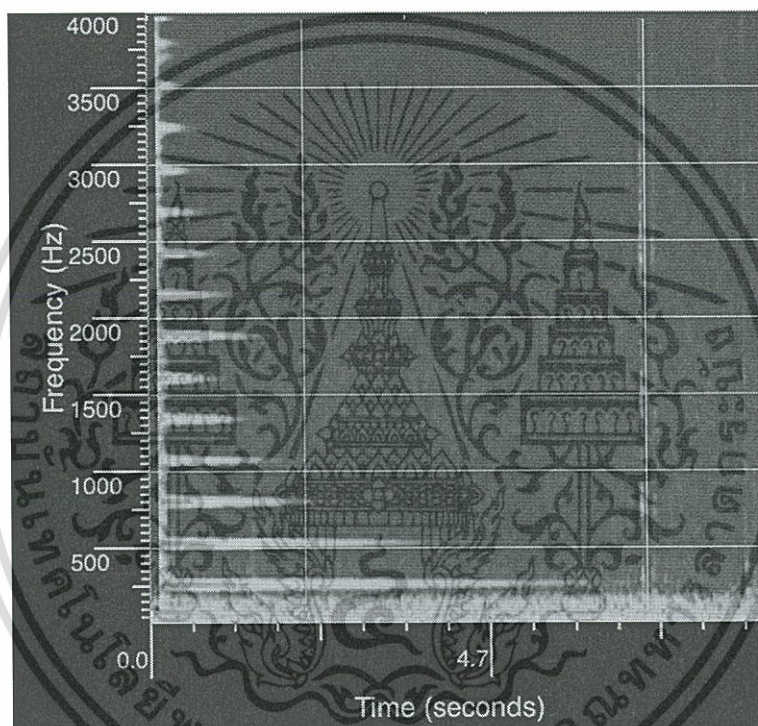


รูปที่ 4.21 (ค) พลังงานของฮาร์โมนิกแต่ละความถี่ของเอ็นก๋อสร้างเบอร์ 100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

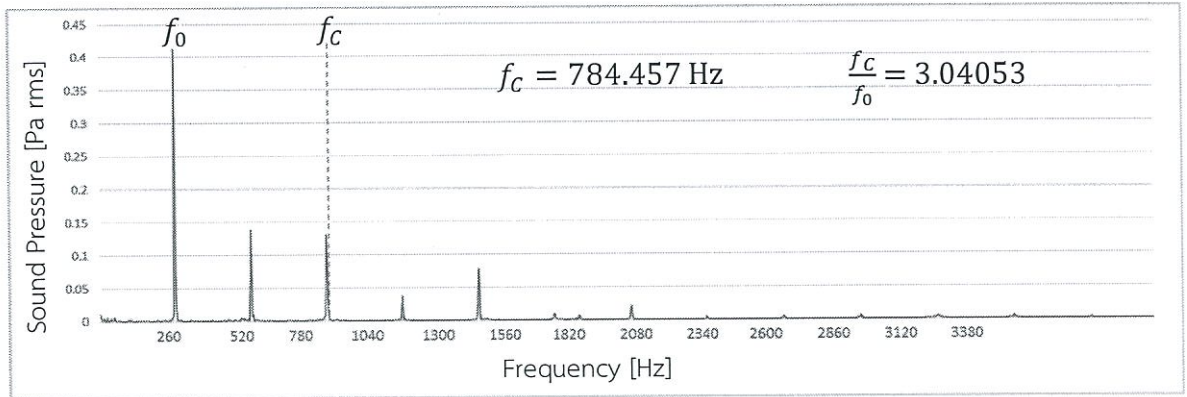


รูปที่ 4.21 (ง) การลดลงของสัญญาณของเอ็นกก่อสร้างเบอร์ 100

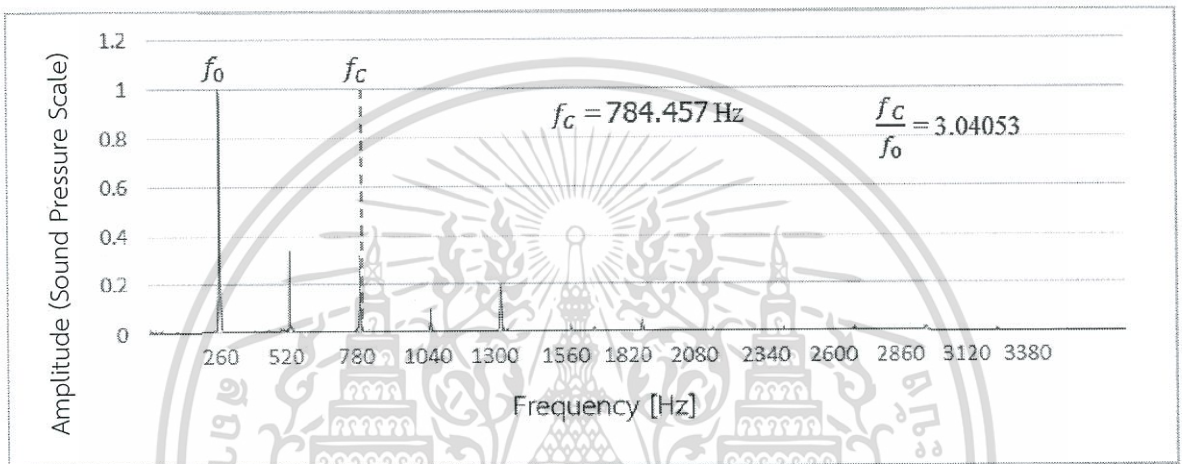


รูปที่ 4.21 (จ) Spectrum Diagram ของเอ็นกก่อสร้างเบอร์ 100

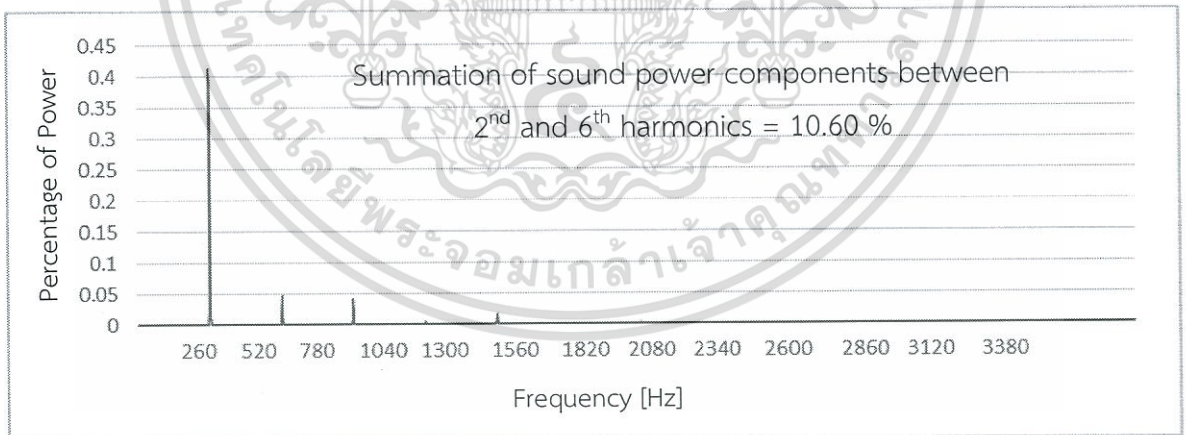
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 (ก) Spectral Centroid (Sound Pressure) ของเอ็นก๋อสร้างเบอร์ 120

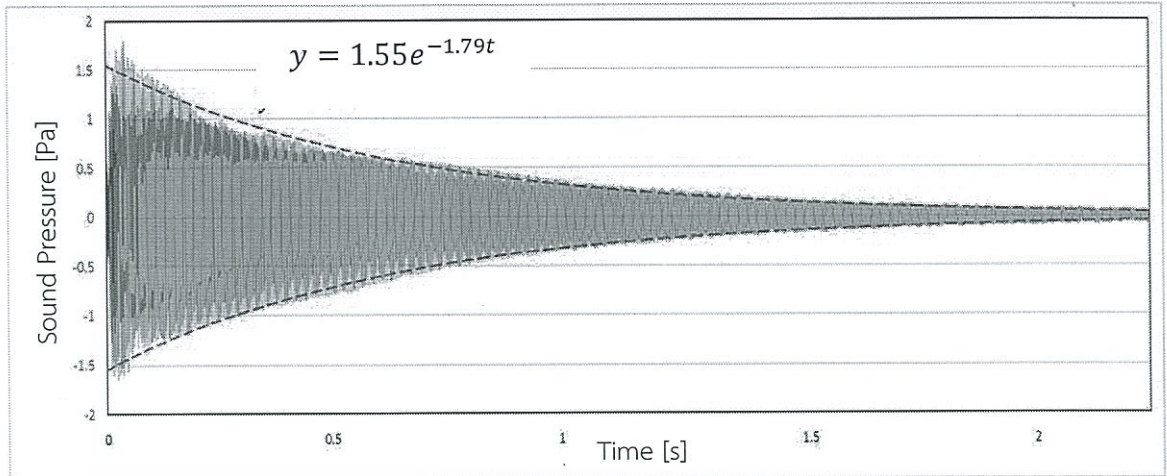


รูปที่ 4.22 (ข) Spectral Centroid (Amplitude) ของเอ็นก๋อสร้างเบอร์ 120

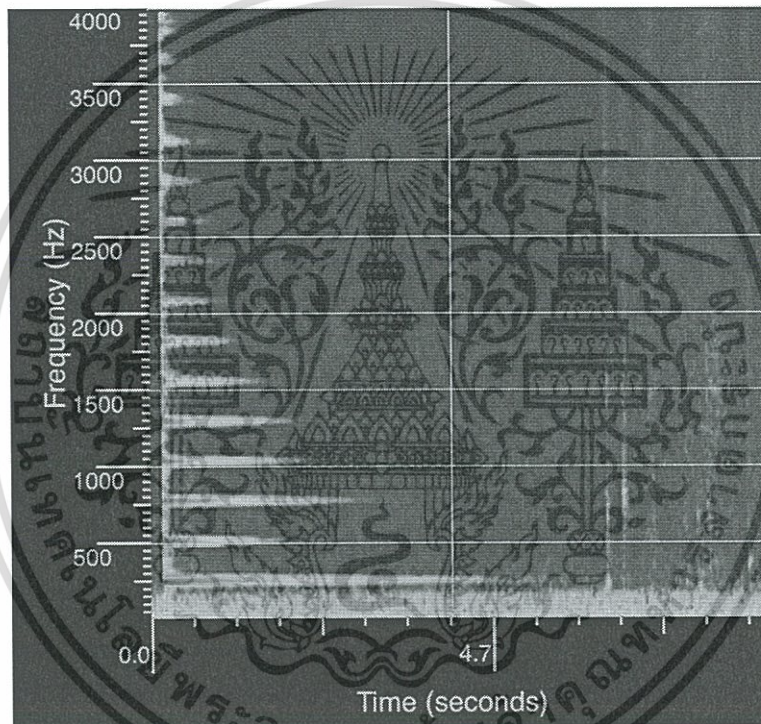


รูปที่ 4.22 (ค) พลังงานของฮาร์โมนิกแต่ละความถี่ของเอ็นก๋อสร้างเบอร์ 120

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

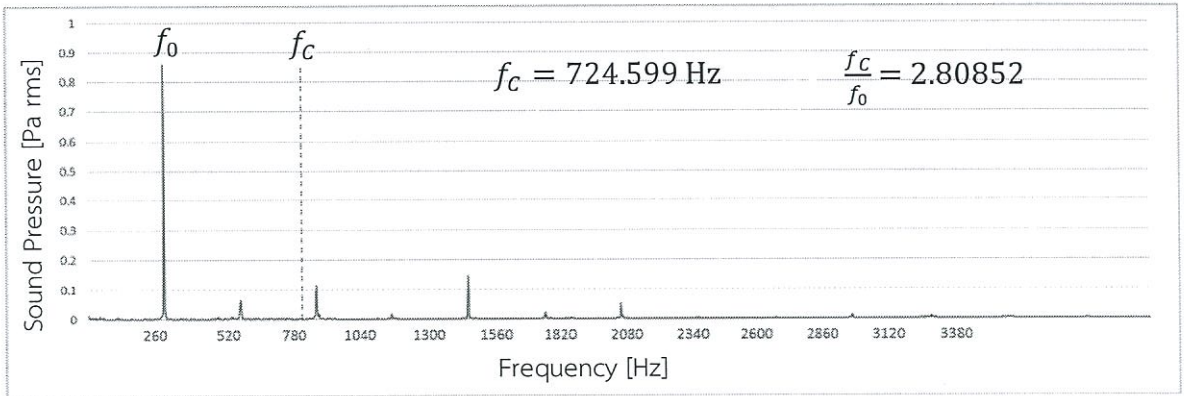


รูปที่ 4.22 (ง) การลดลงของสัญญาณของเอ็นก่ก่อสร้างเบอร์ 120

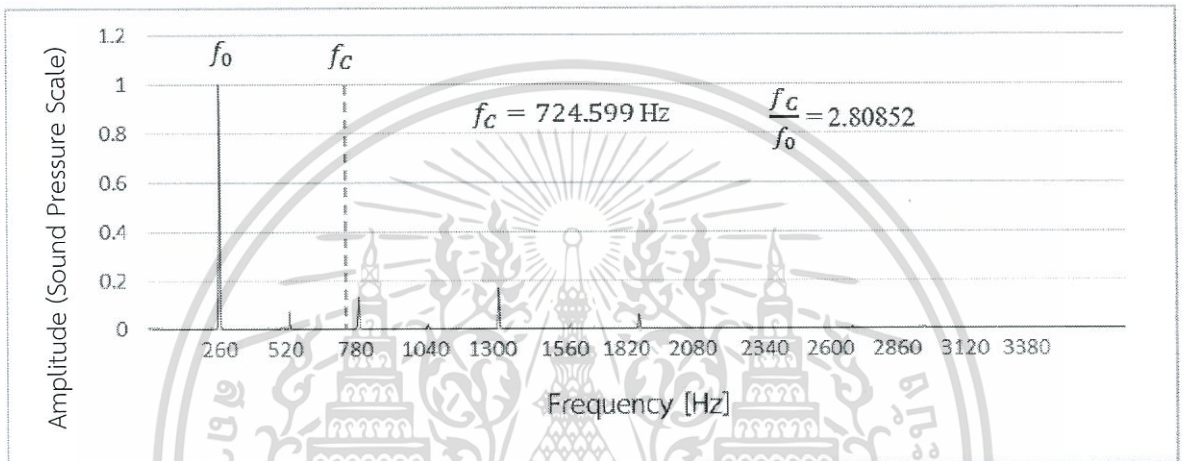


รูปที่ 4.22 (จ) Spectrum Diagram ของเอ็นก่ก่อสร้างเบอร์ 120

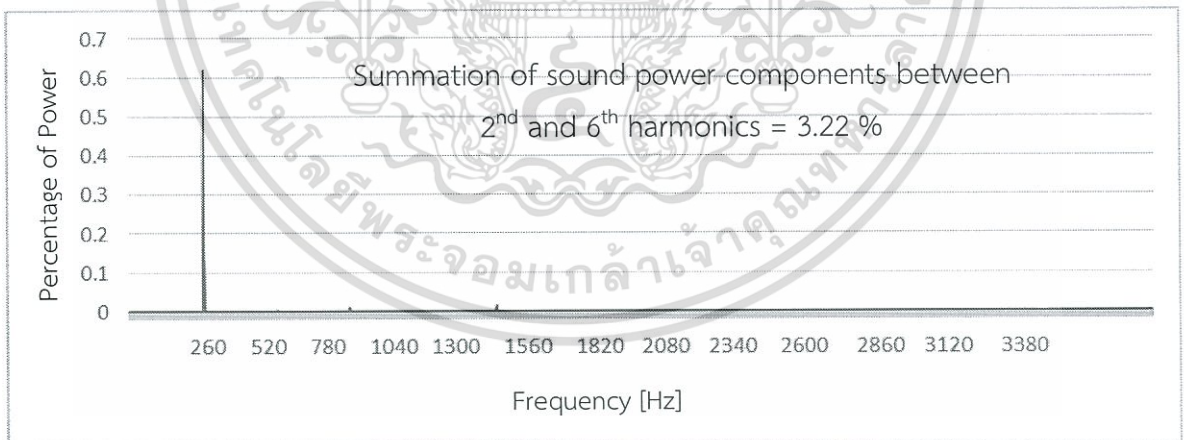
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 (ก) Spectral Centroid (Sound Pressure) ของเอ็นกอสร้างเบอร์ 150

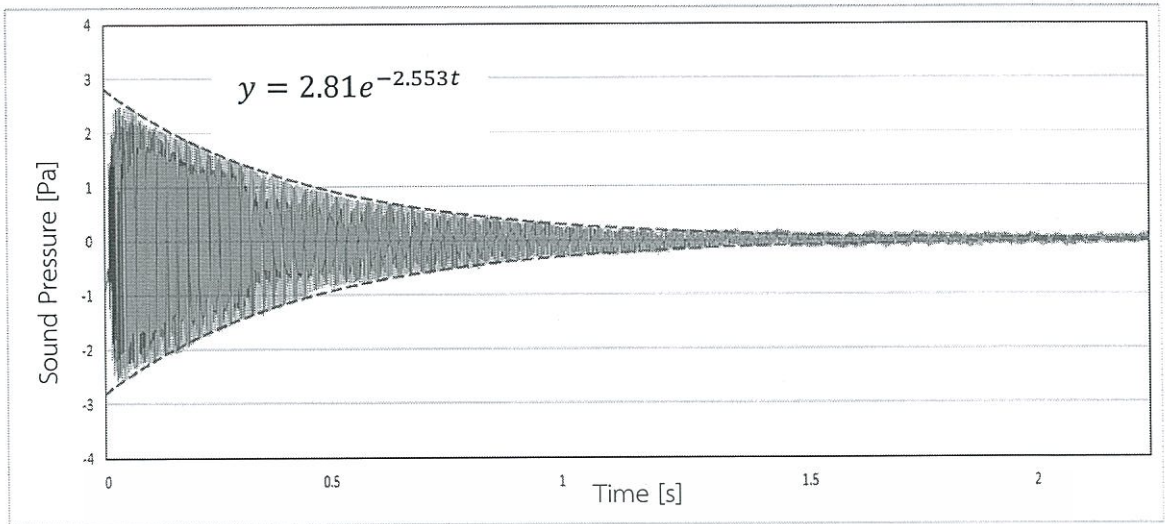


รูปที่ 4.23 (ข) Spectral Centroid (Amplitude) ของเอ็นกอสร้างเบอร์ 150

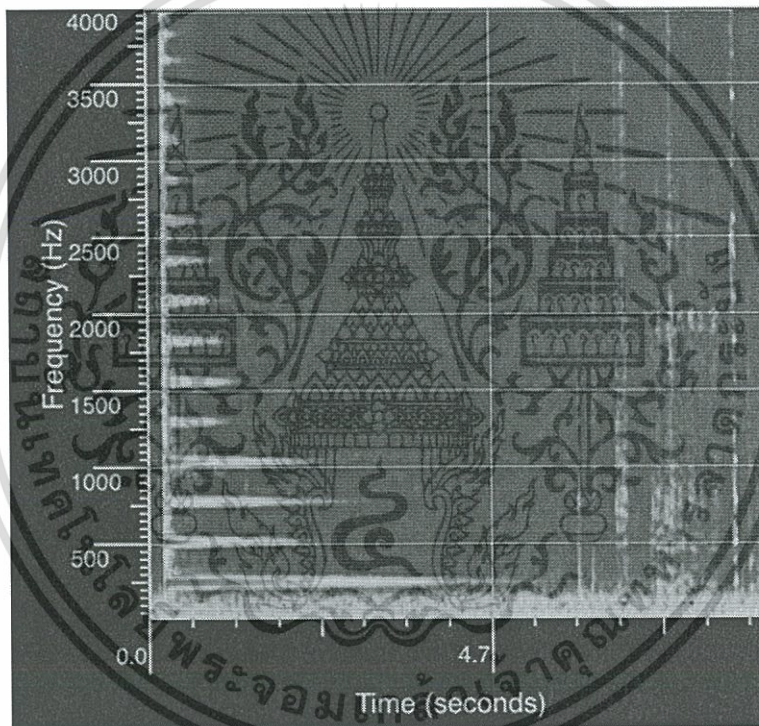


รูปที่ 4.23 (ค) พลังงานของฮาร์มอนิกแต่ละความถี่ของเอ็นกอสร้างเบอร์ 150

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

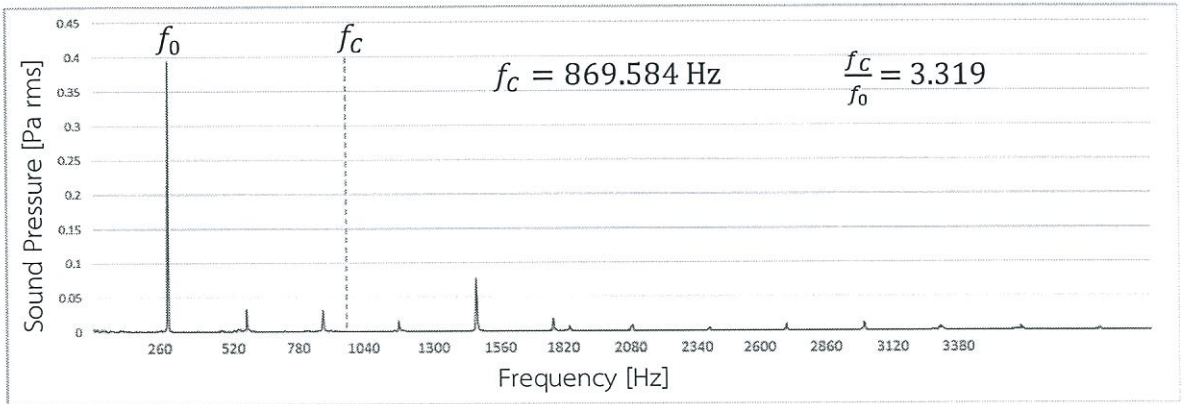


รูปที่ 4.23 (ง) การลดลงของสัญญาณของเอ็นก่ก่อสร้างเบอร์ 150

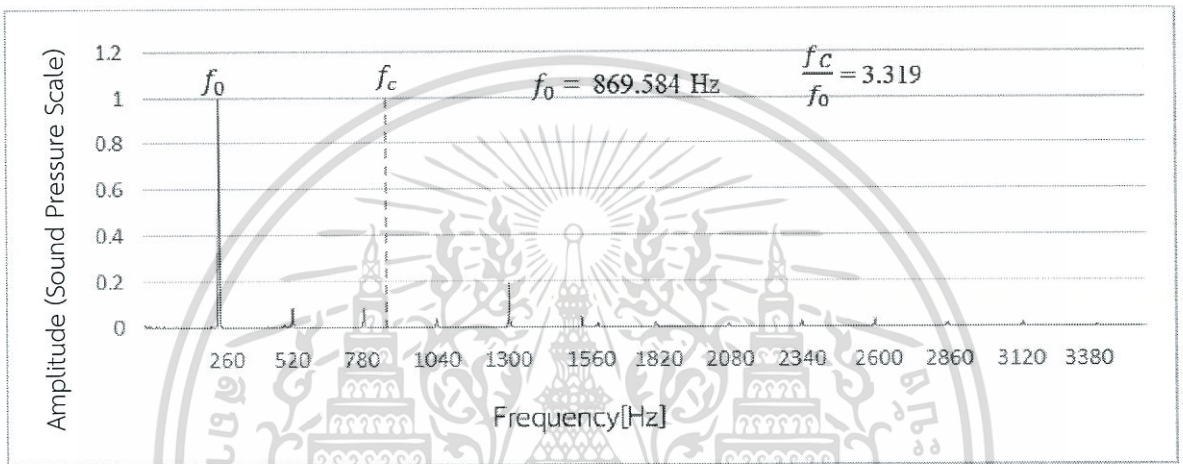


รูปที่ 4.23 (จ) Spectrum Diagram ของเอ็นก่ก่อสร้างเบอร์ 150

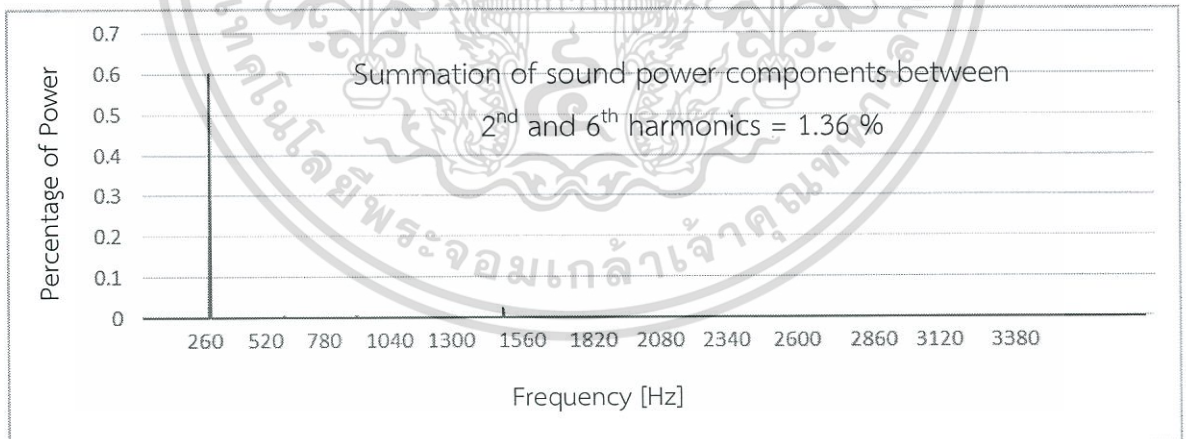
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 (ก) Spectral Centroid (Sound Pressure) ของเอ็นตปลา

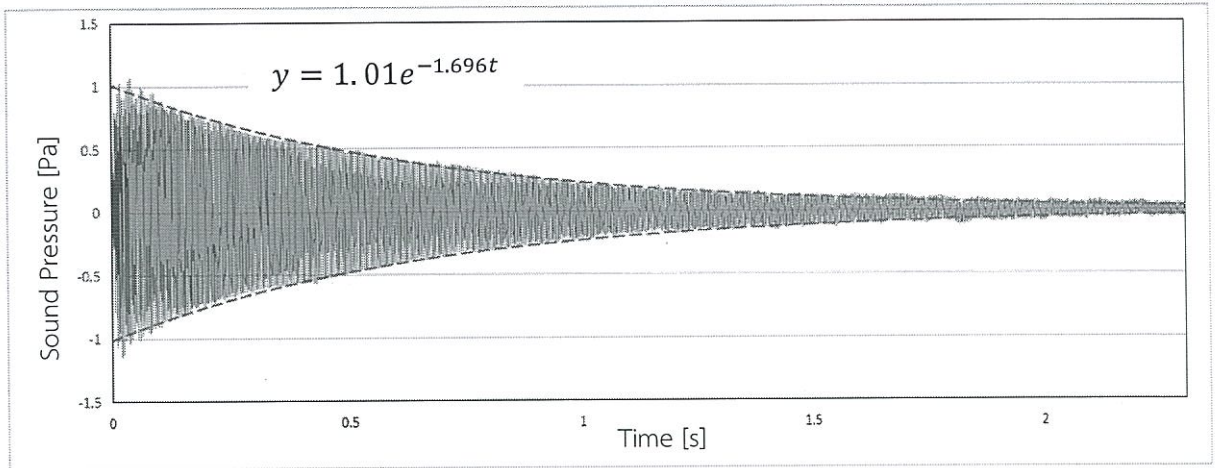


รูปที่ 4.24 (ข) Spectral Centroid (Amplitude) ของเอ็นตปลา

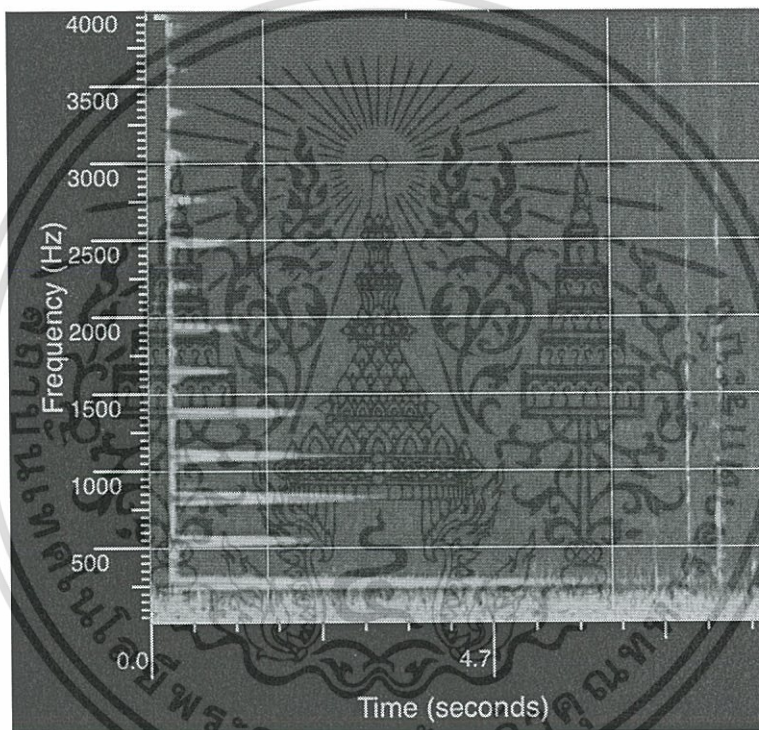


รูปที่ 4.24 (ค) พลังงานของฮาร์โมนิกแต่ละความถี่ของเอ็นตปลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

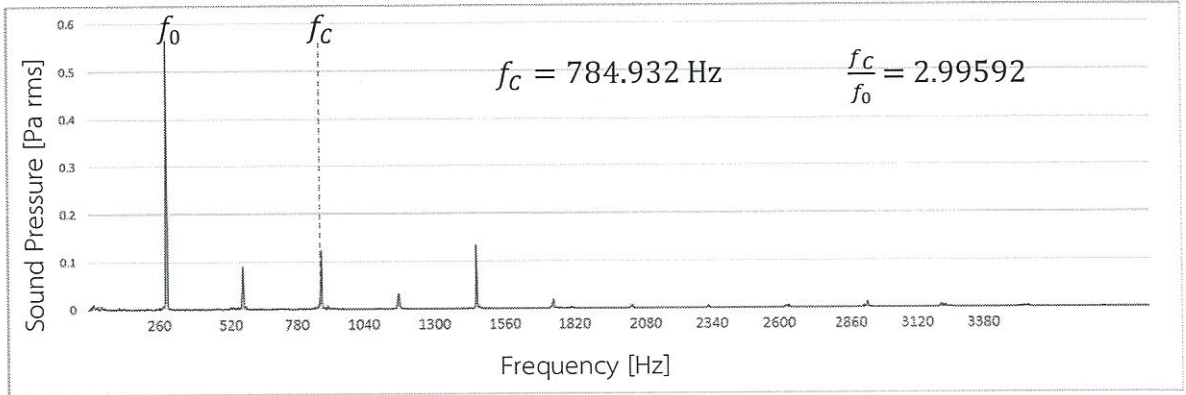


รูปที่ 4.24 (ง) การลดลงของสัญญาณของเอ็นटकปลา

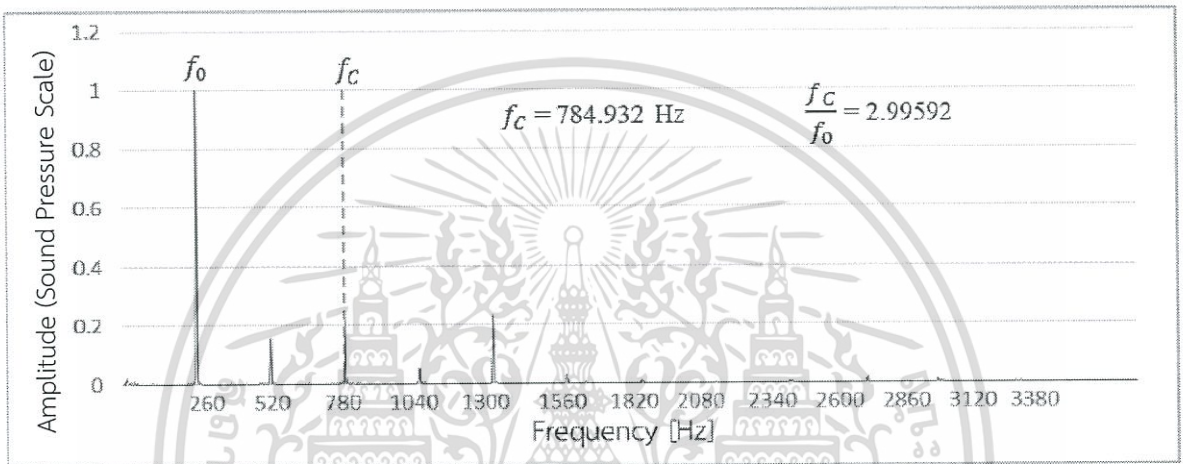


รูปที่ 4.24 (จ) Spectrum Diagram ของเอ็นटकปลา

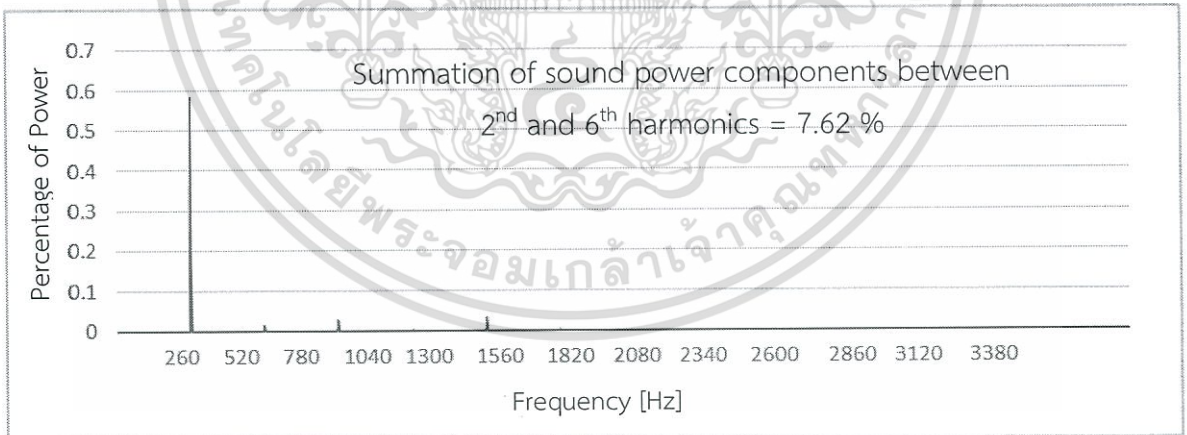
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 (ก) Spectral Centroid (Sound Pressure) ของเอ็นเทนนิส (Tennis)

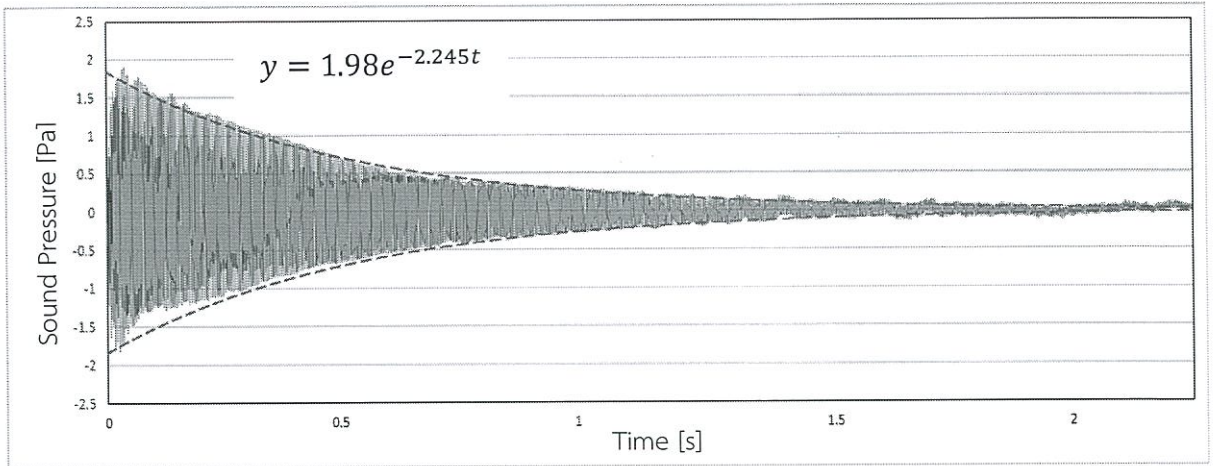


รูปที่ 4.25 (ข) Spectral Centroid (Amplitude) ของเอ็นเทนนิส (Tennis)

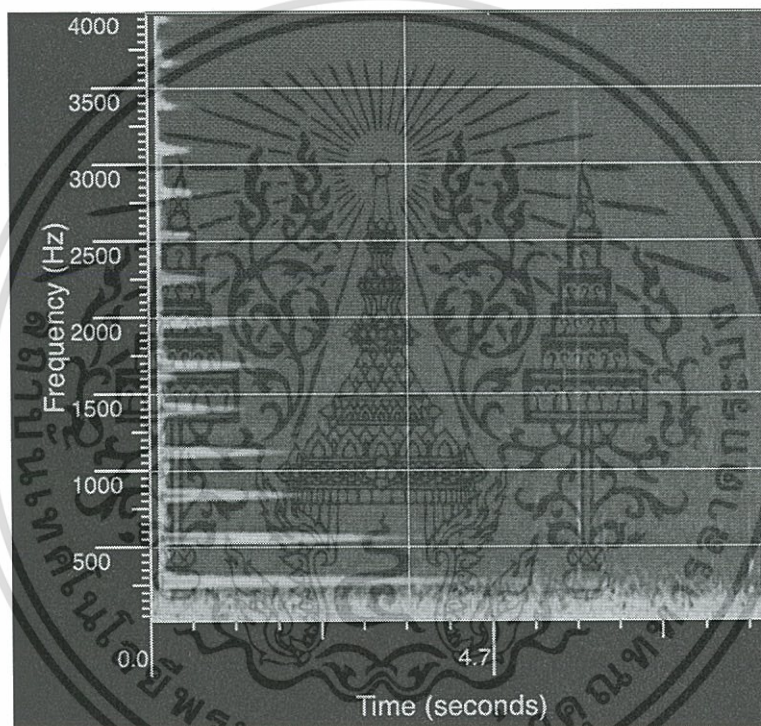


รูปที่ 4.25 (ค) พลังงานของฮาร์โมนิกแต่ละความถี่ของเอ็นเทนนิส (Tennis)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

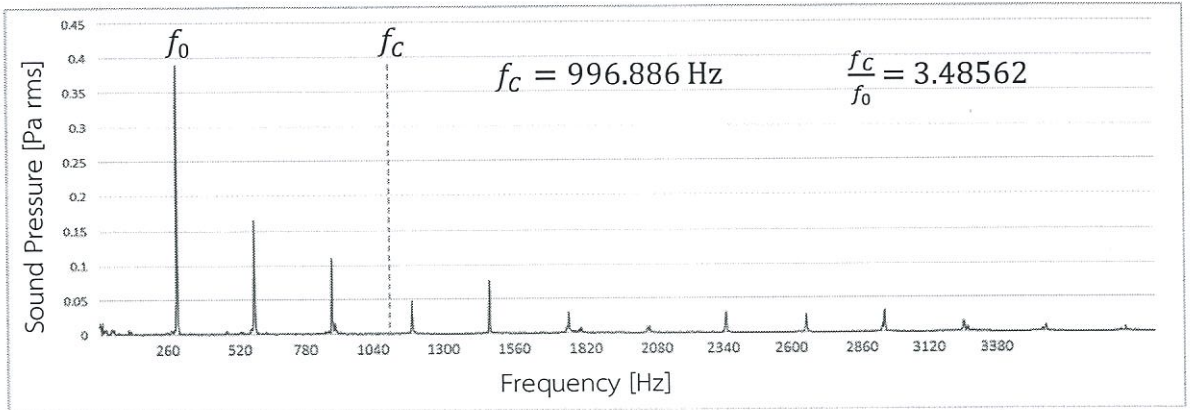


รูปที่ 4.25 (ง) การลดลงของสัญญาณของเอ็นเทนนิส (Tennis)

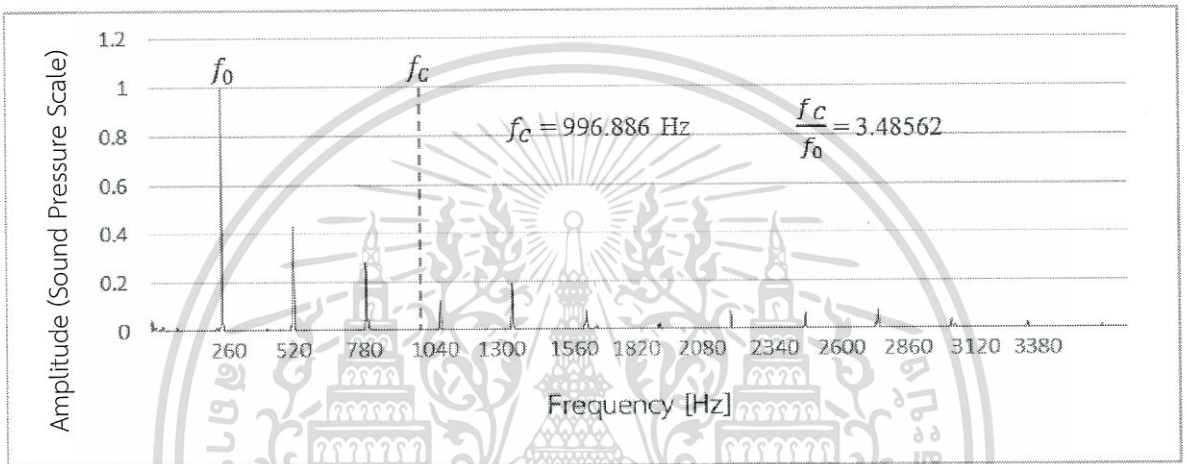


รูปที่ 4.25 (จ) Spectrum Diagram ของเอ็นเทนนิส (Tennis)

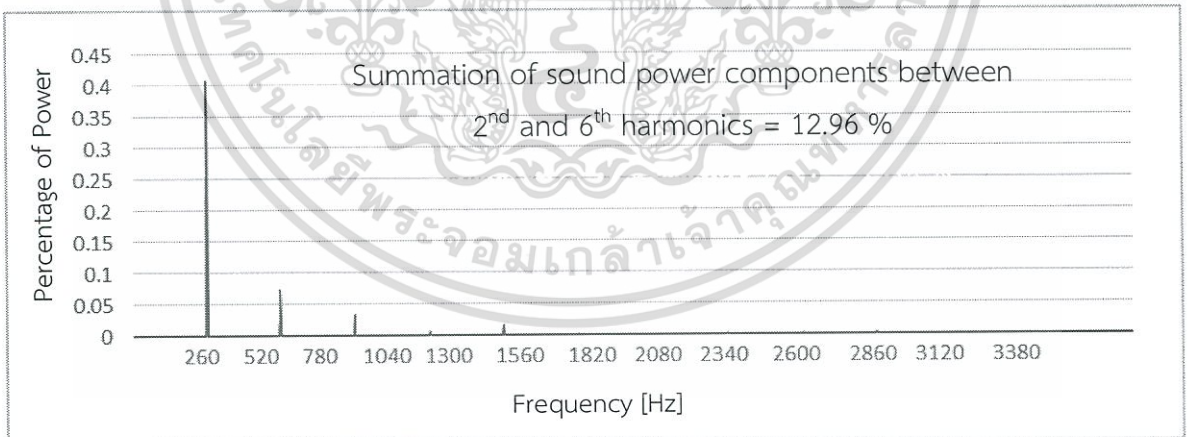
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 (ก) Spectral Centroid (Sound Pressure) ของสายซออุทุ้ม (เส้นไหม)

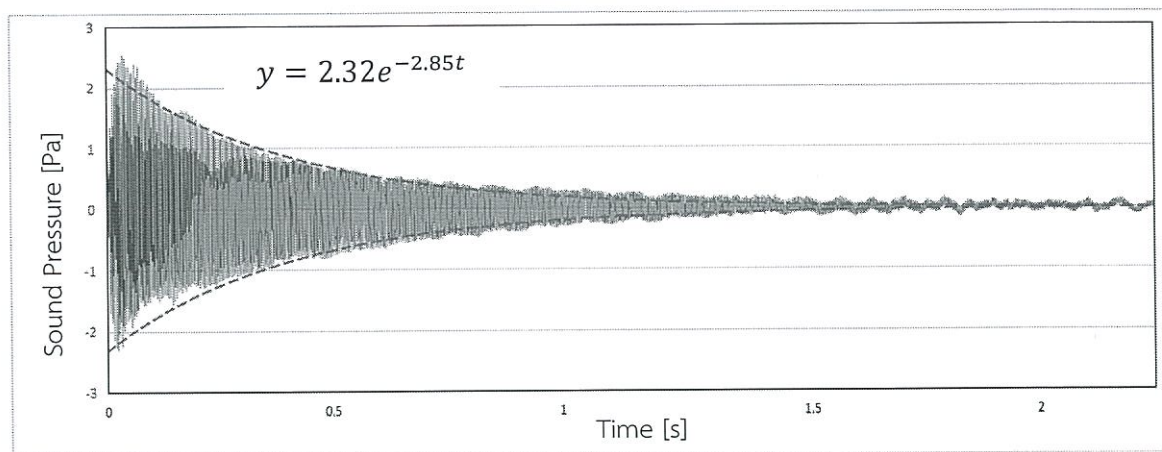


รูปที่ 4.26 (ข) Spectral Centroid (Amplitude) ของสายซออุทุ้ม (เส้นไหม)

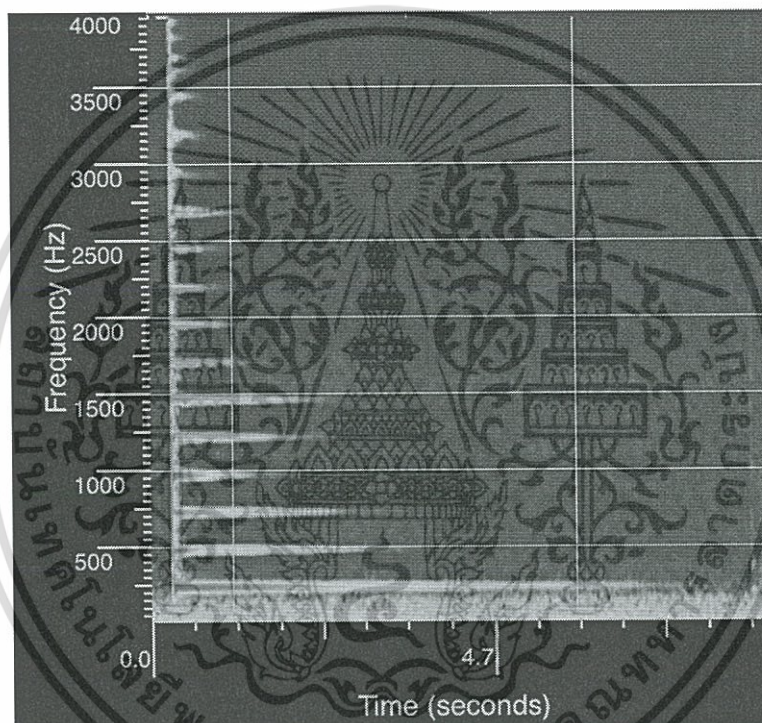


รูปที่ 4.26 (ค) พลังงานของฮาร์มอนิกแต่ละความถี่ของสายซออุทุ้ม (เส้นไหม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

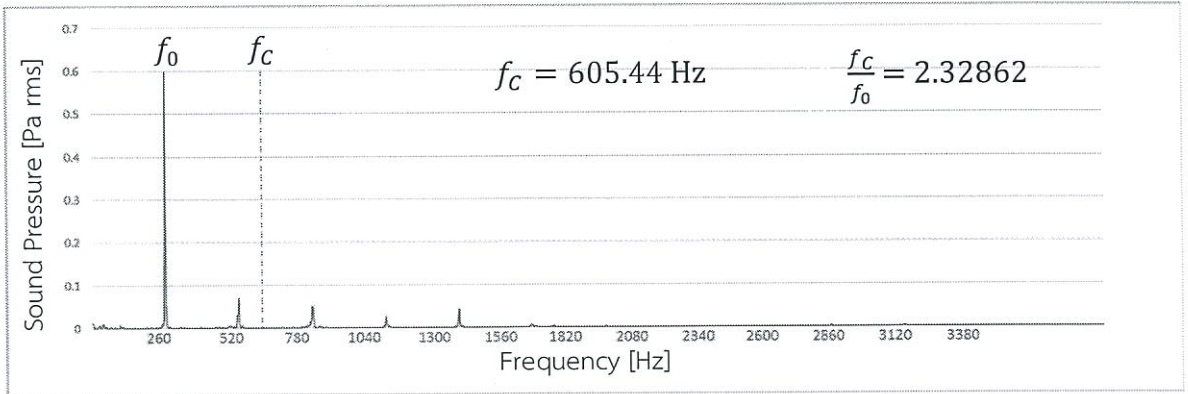


รูปที่ 4.26 (ง) การลดลงของสัญญาณของสายซออุ้ทึม (เส้นไหม)

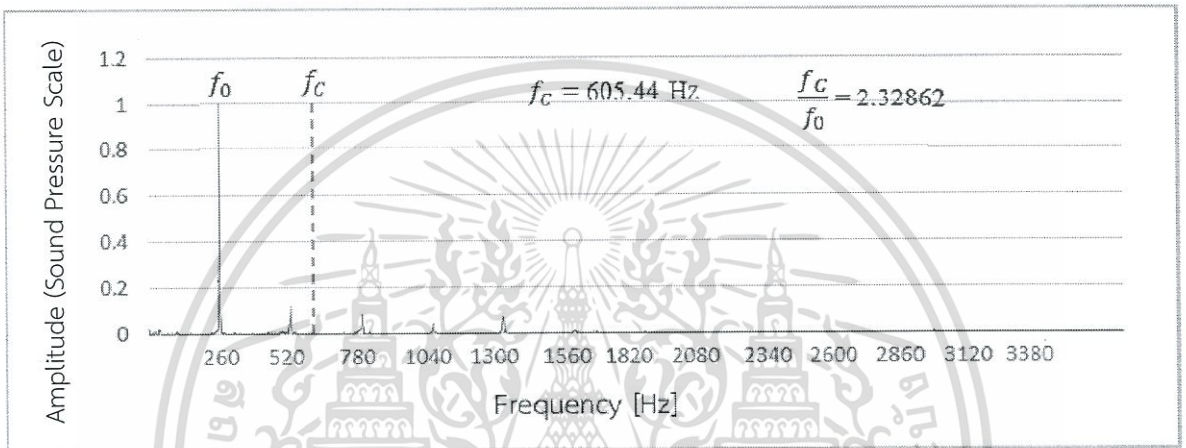


รูปที่ 4.26 (จ) Spectrum Diagram ของสายซออุ้ทึม (เส้นไหม)

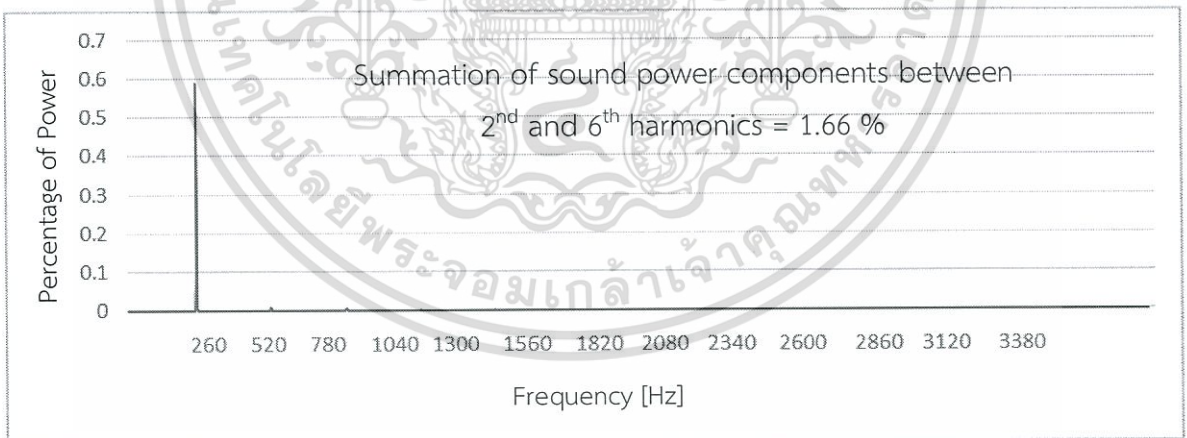
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 (ก) Spectral Centroid (Sound Pressure) ของเชือกขาวเบอร์ 60

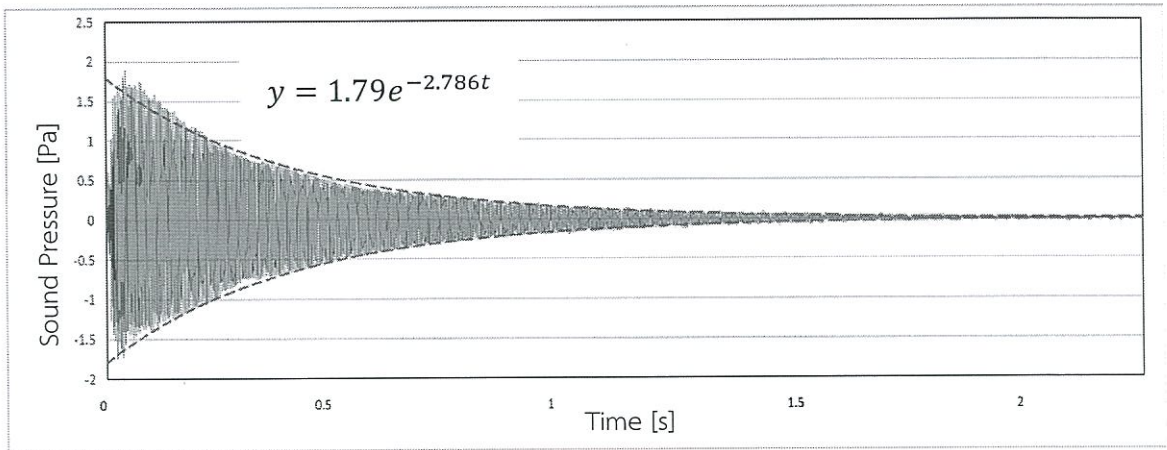


รูปที่ 4.27 (ข) Spectral Centroid (Amplitude) ของเชือกขาวเบอร์ 60

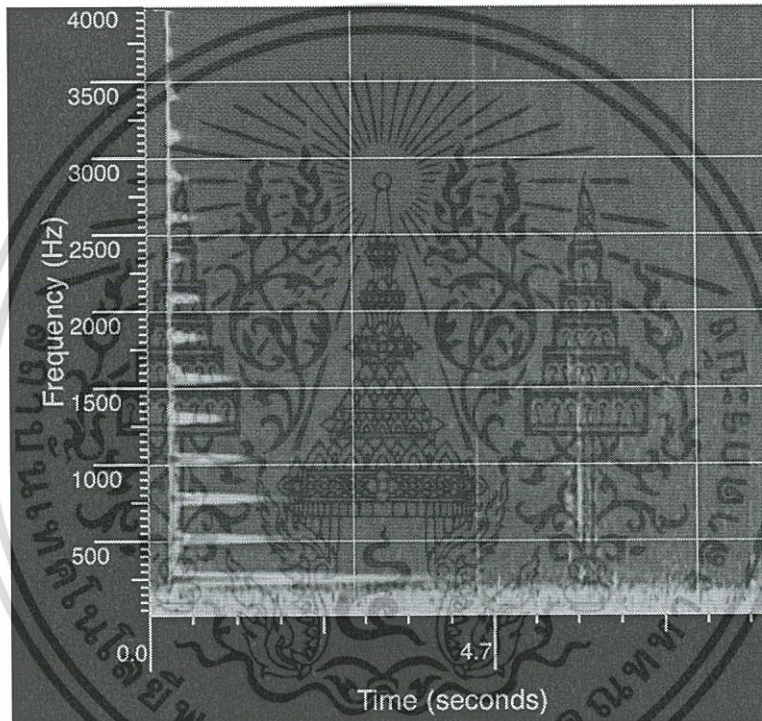


รูปที่ 4.27 (ค) พลังงานของฮาร์โมนิกแต่ละความถี่ของเชือกขาวเบอร์ 60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

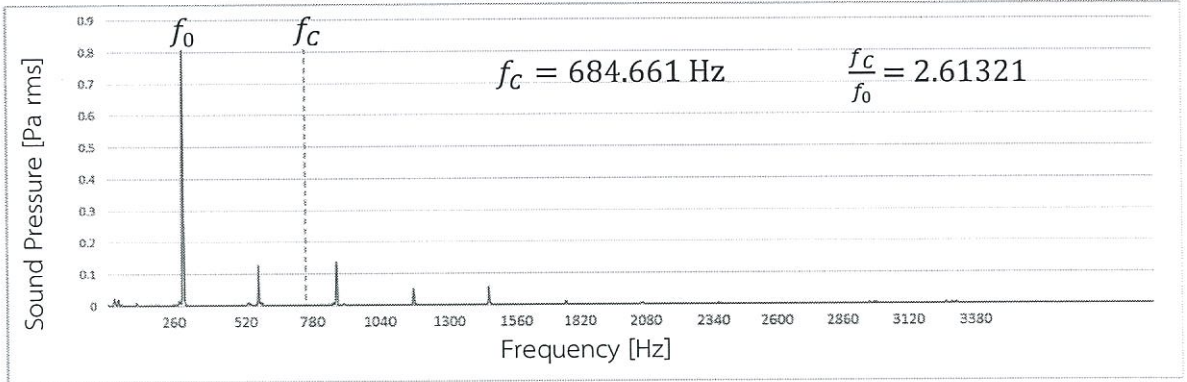


รูปที่ 4.27 (ง) การลดลงของสัญญาณของเชือกขาวเบอร์ 60

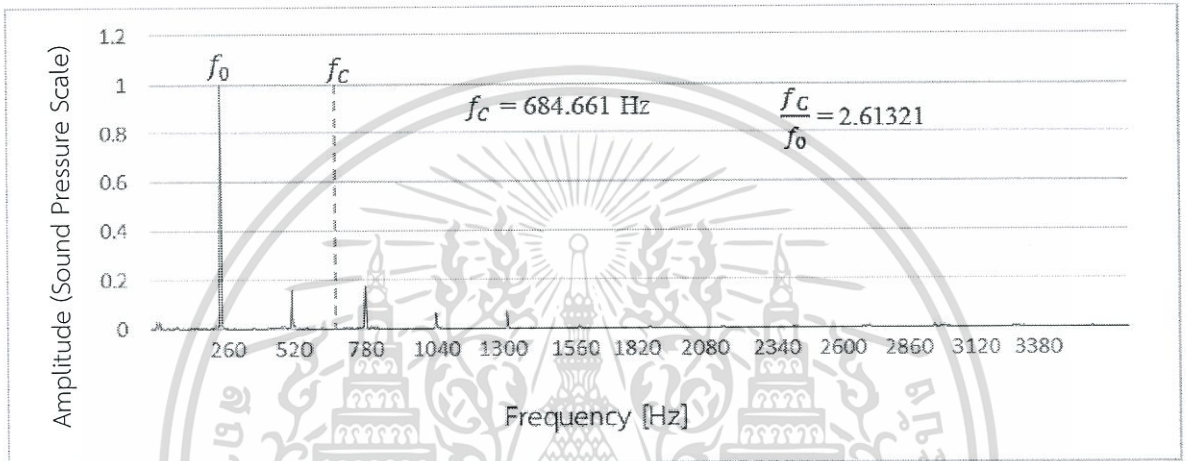


รูปที่ 4.27 (จ) Spectrum Diagram ของเชือกขาวเบอร์ 60

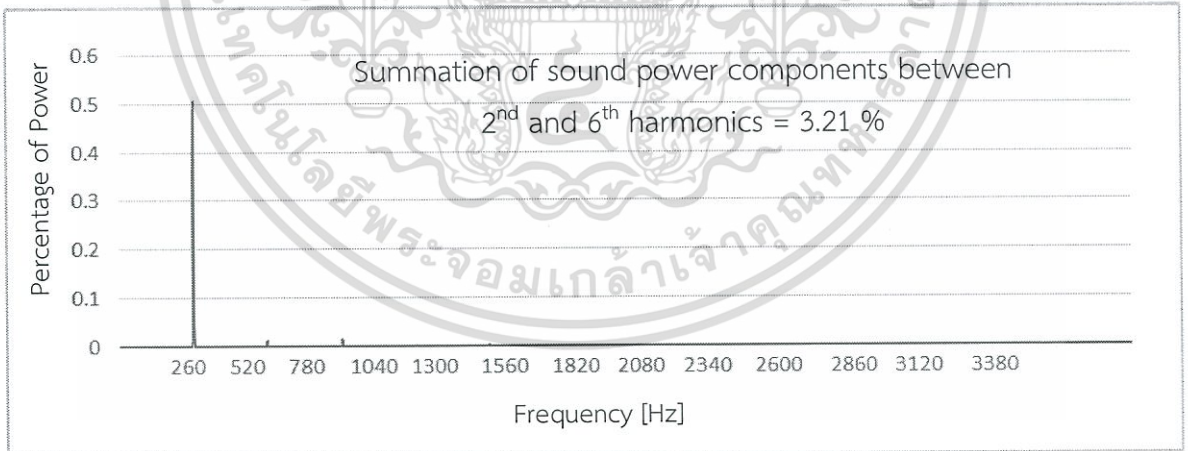
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.28 (ก) Spectral Centroid (Sound Pressure) ของเชือกถัก P.P.เบอร์ 5

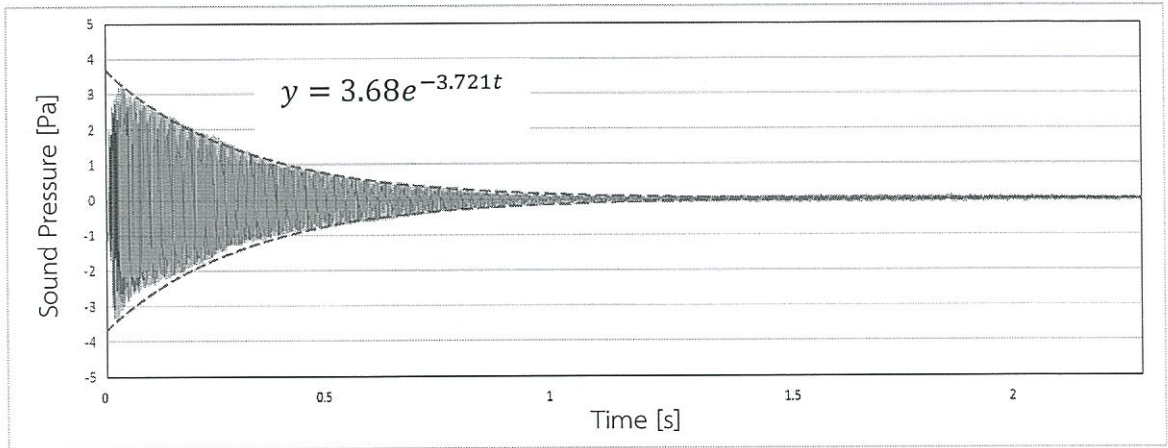


รูปที่ 4.28 (ข) Spectral Centroid (Amplitude) ของเชือกถัก P.P.เบอร์ 5

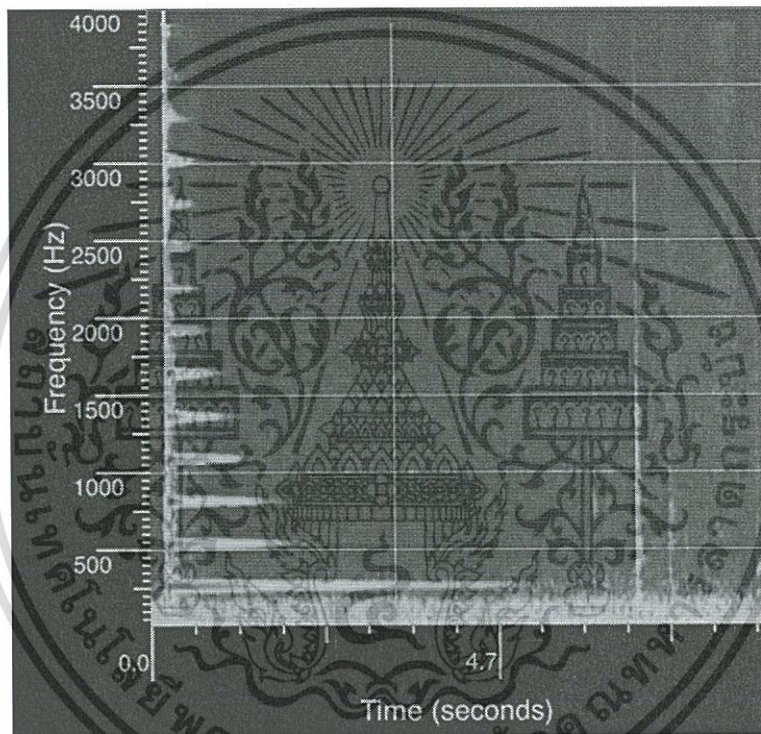


รูปที่ 4.28 (ค) พลังงานของฮาร์โมนิกแต่ละความถี่ของเชือกถัก P.P.เบอร์ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.28 (ง) การลดลงของสัญญาณของเชือกถัก P.P.เบอร์ 5



รูปที่ 4.28 (จ) Spectrum Diagram ของเชือกถัก P.P.เบอร์ 5

จากข้อมูลข้างต้นทำให้ทราบค่าต่าง ๆ ดังแสดงตารางที่ 4.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ค่าที่ได้จากการทดลอง

ชนิดของสาย	ความดันเสียงสูงสุด (Pa)	อัตราส่วนความหน่วง (Damping ratio)	ค่าเฉลี่ยความถี่ (f_c)	ค่าเฉลี่ยความถี่ส่วนความถี่ตั้งต้น (f_c/f_0)
เชือกถัก P.P. เบอร์ 5	3.68	2.26×10^{-3}	684.7	2.613
เอ็นก่อสร้างเบอร์ 150	2.81	1.55×10^{-3}	724.6	2.809
สายซออุทึม (เส้นไหม)	2.32	1.73×10^{-3}	996.9	3.486
เอ็นเทนนิส (Tennis)	1.98	1.36×10^{-3}	784.9	2.996
เชือกขาวเบอร์ 60	1.79	1.69×10^{-3}	605.4	2.329
เอ็นก่อสร้างเบอร์ 120	1.55	1.09×10^{-3}	784.5	3.041
เอ็นตกลา	1.01	1.03×10^{-3}	869.6	3.319
เอ็นก่อสร้างเบอร์ 100	1.00	0.95×10^{-3}	786.9	3.003

4.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง

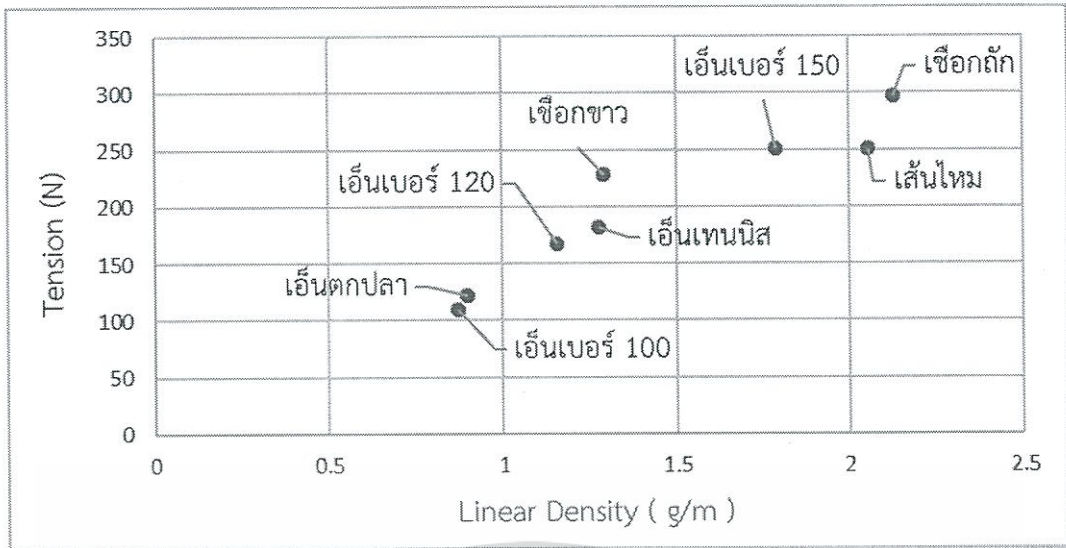
เมื่อนำค่าจากการทดลองมาเปรียบเทียบกัน เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ และนำค่าที่ได้มาเขียนกราฟ ได้ผลลัพธ์ดังนี้

4.5.1 แรงตึงในสายกับความหนาแน่นเชิงเส้น

เมื่อนำค่าแรงตึงในสายกับความหนาแน่นเชิงเส้นของสายแต่ละชนิดมาจัดเรียง ดังแสดงในตารางที่ 4.10 จากการวิเคราะห์พบว่า เมื่อความหนาแน่นเชิงเส้นของสายเพิ่มขึ้น แรงตึงในสายจะเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งตรงกับกฎของ Mersenne ดังสมการที่ (2-24) และสมการที่ (2-25) เพื่อให้สายสั่นด้วยความถี่เท่าเดิมดังแสดงในรูปที่ 4.29

ตารางที่ 4.10 แรงตึงในสายกับความหนาแน่นเชิงเส้น

ชนิด	ความหนาแน่นเชิงเส้น (กรัม/เมตร)	แรงตึงในสาย (นิวตัน)
เชือกถัก P.P. เบอร์ 5	2.13	297.2
สายซออุทึม (เส้นไหม)	2.06	250.35
เอ็นก่อสร้างเบอร์ 150	1.79	251.2
เชือกขาวเบอร์ 60	1.29	228.6
เอ็นเทนนิส (Tennis)	1.28	182.1
เอ็นก่อสร้างเบอร์ 120	1.16	166.9
เอ็นตกลา	0.90	122.2
เอ็นก่อสร้างเบอร์ 100	0.87	109.9



รูปที่ 4.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงในสายและความหนาแน่นเชิงเส้นที่ความถี่ 262 เฮิรตซ์

สังเกตเห็นว่าแรงดึงในสายแปรผันตรงกับค่าความหนาแน่นเชิงเส้น โดยสายเชือกถัก P.P. เบอร์ 5 มีความหนาแน่นเชิงเส้นมากที่สุดคือ 2.13 กรัมต่อเมตร และมีแรงดึง 297.2 นิวตัน ส่วนสายเอ็นก่อสร้างเบอร์ 100 มีความหนาแน่นเชิงเส้นน้อยที่สุดคือ 0.87 และมีแรงดึงเพียง 109.9 นิวตัน ดังแสดงในรูปที่ 4.29 ซึ่งแรงดึงในสายส่งผลให้อายุการใช้งานของเครื่องดนตรีลดลง เนื่องจากความเค้นที่วัสดุ (ตัวจะเข้) ได้รับ และส่งผลให้ต้องใช้แรงในการตั้งเสียงการดีดและการกดโน้ตสูงขึ้นด้วย

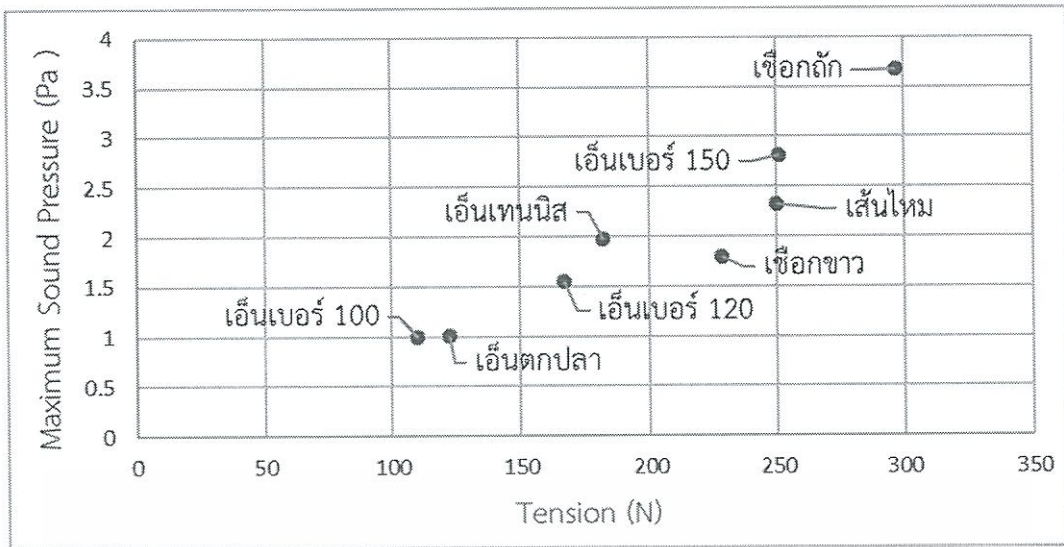
4.5.2 ความดันเสียงสูงสุดกับแรงดึงในสาย

เมื่อนำความดันเสียงสูงสุด (ความดังของเสียง) กับแรงดึงในสายแต่ละชนิดมาจัดเรียงดังแสดงในตารางที่ 4.11 จากการวิเคราะห์ผลการทดลองพบว่า เมื่อแรงดึงในสายเพิ่มขึ้น ความดันเสียงสูงสุด จะเพิ่มขึ้นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.30

ตารางที่ 4.11 ความดันเสียงสูงสุดกับแรงดึงในสาย

ชนิด	แรงดึงในสาย (นิวตัน)	ความดันเสียงสูงสุด (Pa)
เชือกถัก P.P. เบอร์ 5	297.2	3.68
เอ็นก่อสร้างเบอร์ 150	251.2	2.81
สายซออุ้ม (เส้นไหม)	250.35	2.32
เชือกขาวเบอร์ 60	228.6	1.79
เอ็นเทนนิส (Tennis)	182.1	1.98
เอ็นก่อสร้างเบอร์ 120	166.9	1.55
เอ็นตกปลา	122.2	1.01
เอ็นก่อสร้างเบอร์ 100	109.9	1.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันเสียงสูงสุดกับแรงดึงในสาย

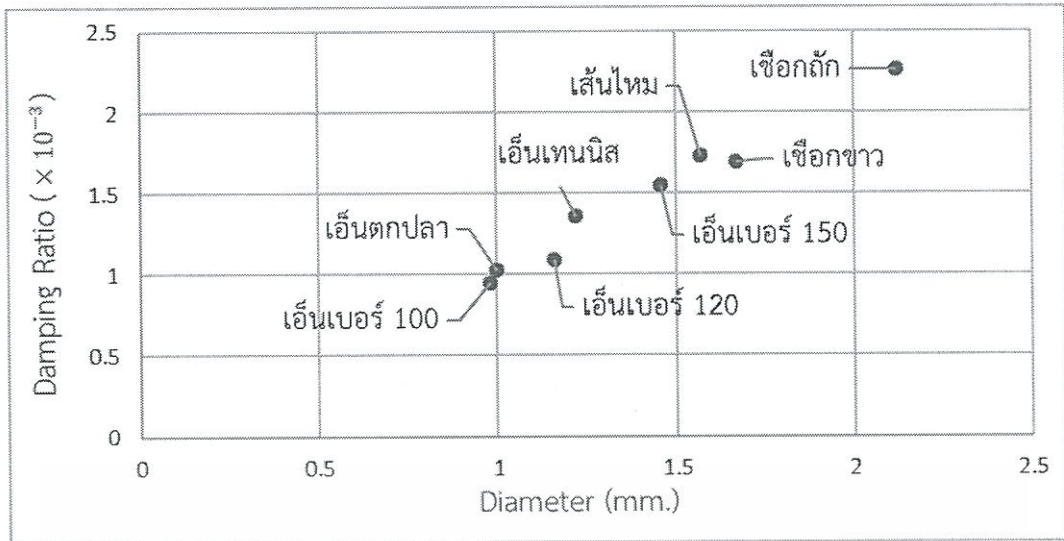
สังเกตเห็นว่าความดันเสียงสูงสุดแปรผันตรงกับแรงดึงในสาย โดยสายเชือกถัก P.P. เบอร์ 5 มีแรงดึงสูงสุดคือ 297.2 นิวตัน และมีความดันเสียงสูงสุดที่ 3.68 ปาสกาล ส่วนสายเอ็นก่อสร้างเบอร์ 100 มีแรงดึงน้อยที่สุดคือ 109.9 นิวตัน และมีความดันเสียงสูงสุดเพียง 1 ปาสกาล ดังแสดงในรูปที่ 4.22 สายที่มีแรงดึงในสายสูง เสียงจะมีความดังเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อดีดสาย สายจะพยายามเคลื่อนที่กลับสู่สภาวะปกติด้วยความเร่งสูง เพราะแรงดึงในสาย ดังนั้นสายจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง ส่งผลให้เกิน ความดันในอากาศหรือความดันเสียงสูงขึ้นด้วย

4.5.3 อัตราส่วนความหน่วง (Damping Ratio) กับเส้นผ่านศูนย์กลางของสาย

เมื่อนำอัตราส่วนความหน่วง (Damping Ratio) กับเส้นผ่านศูนย์กลางของสายแต่ละชนิด มาจัดเรียงดังแสดงในตารางที่ 4.12 จากการวิเคราะห์ผลการทดลองพบว่าเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของสายเพิ่มขึ้น อัตราส่วนความหน่วง (Damping Ratio) ของการสั่นจะเพิ่มขึ้นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.31

ตารางที่ 4.12 อัตราส่วนความหน่วง (Damping Ratio) กับเส้นผ่านศูนย์กลางของสาย

ชนิด	เส้นผ่านศูนย์กลางของสาย (มม.)	อัตราส่วนความหน่วง ($\times 10^{-3}$)
เชือกถัก P.P. เบอร์ 5	2.12	2.26
เชือกขาว เบอร์ 60	1.67	1.69
สายซออุ้ม (เส้นไหม)	1.57	1.73
เอ็นก่อสร้างเบอร์ 150	1.46	1.55
เอ็นเทนนิส (Tennis)	1.22	1.36
เอ็นก่อสร้างเบอร์ 120	1.16	1.09
เอ็นตบปลา	1.00	1.03
เอ็นก่อสร้างเบอร์ 100	0.98	0.95



รูปที่ 4.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความหน่วงและเส้นผ่านศูนย์กลางของสาย

สังเกตเห็นว่าอัตราส่วนความหน่วง (Damping Ratio) แปรผันตรงกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสาย โดยสายเชือกถัก P.P. เบอร์ 5 มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุดคือ 2.12 มิลลิเมตร และมีอัตราส่วนความหน่วง (Damping Ratio) เท่ากับ 2.26 กล่าวคือ สายเชือกถัก P.P. เบอร์ 5 มีหางเสียงสั้นที่สุด ส่วนสายเอ็นก่อสร้างเบอร์ 100 มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยที่สุดคือ 0.98 และมีอัตราส่วนความหน่วง (Damping Ratio) เท่ากับ 0.95 กล่าวคือ สายเอ็นก่อสร้างเบอร์ 100 มีหางเสียงยาวที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.31 สายที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ จะมีค่าอัตราส่วนความหน่วง (Damping Ratio) สูง กล่าวคือ ความดังของเสียงจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาผ่านไป เนื่องจากสายที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่จะมีพื้นที่ผิวกว้าง ซึ่งจะต้านอากาศขณะที่สายสั่น ส่งผลให้สายสูญเสียพลังงานการสั่นไปสู่บรรยากาศอย่างรวดเร็ว

4.5.4 ร้อยละพลังงานของฮาร์โมนิกแต่ละความถี่

เมื่อนำสัญญาณเสียงไปคิดเป็นร้อยละของพลังงานเพื่อสังเกตค่าฮาร์โมนิกลำดับต่าง ๆ ของแต่ละสาย จากรูป (ข) ของรูปที่ 4.21 ถึงรูปที่ 4.28 พบว่าร้อยละส่วนใหญ่จะอยู่ที่ค่าฮาร์โมนิกแรก ดังนั้นจึงนำค่าฮาร์โมนิกลำดับที่ 2 ถึงลำดับที่ 6 มารวมกัน ดังตารางที่ 4.13 โดยเรียงลำดับจากผลรวมของฮาร์โมนิกลำดับที่ 2 ถึง ลำดับที่ 6 มากที่สุดไปน้อยที่สุด

ตารางที่ 4.13 ร้อยละพลังงานของฮาร์โมนิก

ชนิด	ฮาร์โมนิกลำดับที่ 1 (×100%)	ผลรวมฮาร์โมนิกลำดับที่ 2 ถึงลำดับที่ 6 (×100%)
สายซออุทึม (เส้นใหม่)	0.408	0.12
เอ็นก่อสร้างเบอร์ 120	0.411	0.106
เอ็นเทนนิส (Tennis)	0.582	0.076
เอ็นก่อสร้างเบอร์ 100	0.565	0.041
เอ็นก่อสร้างเบอร์ 150	0.619	0.032
เชือกถัก P.P. เบอร์ 5	0.506	0.032
เชือกขาว เบอร์ 60	0.589	0.016
เอ็นตกลา	0.602	0.013

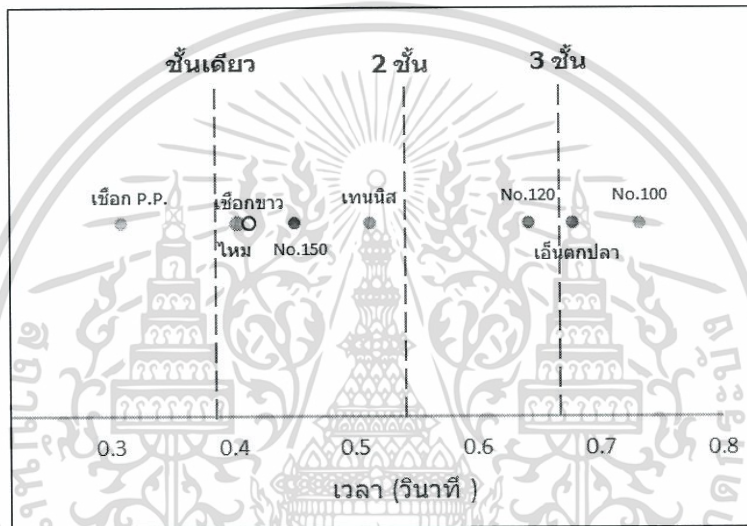
จากตารางที่ 4.13 จะพบว่าผลรวมของร้อยละพลังงานของฮาร์โมนิกลำดับที่ 2 ถึงลำดับที่ 6 ยังมีค่ามากก็จะส่งผลทำให้เสียงที่ออกมามีเนื้อเสียงหนา (Rich Sound) ยิ่งมีค่าน้อยก็จะส่งผลทำให้เสียงที่ออกมามีเนื้อเสียงบาง (Thin Sound) โดยสายซออุทึม (เส้นใหม่) เป็นสายที่มีผลรวมของร้อยละพลังงานของฮาร์โมนิกมากที่สุด ทำให้มีเสียงที่มีเนื้อเสียงหนาที่สุด และสายเอ็นตกลา เป็นสายที่มีผลรวมของร้อยละพลังงานของฮาร์โมนิกน้อยที่สุด ทำให้มีเสียงที่มีเนื้อเสียงบางที่สุด

4.5.5 เสียงจากสายที่เหมาะสมกับจังหวะเพลงไทยต่าง ๆ

จากภาคผนวก ค เมื่อเสียงจากโน้ตเบาลงจนเปลี่ยนไดนามิก ตามตารางที่ 4.14 ซึ่งสังเกตจากค่าเฉลี่ยความดังเมื่อความดังลดลงไป 10 เดซิเบล และบันทึกค่าเวลาที่ตำแหน่งนั้น ก่อนที่จะเล่นโน้ตตัวถัดไป เสียงจะมีการขาดช่วง ดังนั้นสายที่มีระยะเวลาที่ระดับเสียงมีการเปลี่ยนไดนามิกน้อยกว่า ระยะเวลาระหว่างโน้ตเฉลี่ยของเพลงแต่ละจังหวะ สายนั้นไม่เหมาะที่จะใช้เล่นเพลงจังหวะนั้น เพราะเสียงจากสายชนิดนั้นไม่สามารถรักษาระดับความดัง (ไดนามิก) ของเพลงไว้ได้รูปที่ 4.32 แสดงระยะเวลาที่ระดับเสียงมีการเปลี่ยนไดนามิกของแต่ละสาย เทียบกับระยะเวลาระหว่างโน้ตเฉลี่ยของแต่ละจังหวะ

ตารางที่ 4.14 ระยะเวลาที่ระดับเสียงมีการเปลี่ยนไดนามิก (ลดลง 10 เดซิเบล)

ชนิด	ระยะเวลา (วินาที)
เอ็นเทนนิส (Tennis)	0.51
เอ็นตกลา	0.68
เอ็นก่อสร้างเบอร์ 100	0.73
เอ็นก่อสร้างเบอร์ 120	0.64
เอ็นก่อสร้างเบอร์ 150	0.45
สายซออุ้ม (เส้นไหม)	0.40
เชือกขาว เบอร์ 60	0.41
เชือกถัก P.P.เบอร์ 5	0.31



รูปที่ 4.32 ระยะเวลาที่ระดับเสียงมีการเปลี่ยนไดนามิกของแต่ละสายเทียบกับระยะเวลาระหว่างโน้ต

จากรูปที่ 4.32 จะพบว่าเชือกถัก P.P.เบอร์ 5 จะมีระยะเวลาที่ความดังเสียงลดลงไป 10 เดซิเบล ที่สั้นที่สุด เมื่อพิจารณากับผลการทดลองตารางที่ 4.9 จะพบว่าเชือกถัก P.P.เบอร์ 5 มีค่าอัตราส่วนความหน่วงที่มากที่สุด และเมื่อพิจารณาที่สายเอ็นก่อสร้างเบอร์ 100 ที่มีระยะเวลาที่ความดังลดลง 10 เดซิเบล ที่นานที่สุด ค่าอัตราส่วนความหน่วงของสายเอ็นก่อสร้างเบอร์ 100 มีค่าที่น้อยที่สุด

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของสายที่มีผลกระทบต่อเสียงของเครื่องดนตรีจะเข้าได้ทำการสำรวจชนิดของสายที่ผู้เล่นเครื่องดนตรีจะเลือกใช้ เพื่อนำสายชนิดนั้น ๆ และสายชนิดอื่นที่มีลักษณะคล้ายเคียงกัน มาทำการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล และวัดเสียงที่เกิดจากสายชนิดต่าง ๆ แล้วทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร สามารถสรุปผลและปัญหาจากการทดลอง โดยมีข้อเสนอแนะดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล และผลการวิเคราะห์เสียงที่เกิดจากสายชนิดต่าง ๆ สามารถสรุปได้ 6 ข้อ ดังนี้

1) ค่าความหนาแน่นเชิงเส้นแปรผันตรงกับแรงตึงในสาย โดยสายที่มีค่าความหนาแน่นเชิงเส้นสูง จะต้องใช้แรงตึงที่สูงเพื่อให้สายสั่นด้วยความถี่ที่ต้องการ ซึ่งส่งผลให้อายุการใช้งานของเครื่องดนตรีลดลง เนื่องจากความเค้นที่วัสดุ (ตัวจะเข้) ได้รับ และส่งผลให้ต้องใช้แรงในการตั้งเสียงการดีดและการกดโน้ตสูงขึ้นด้วย ดังนั้นสายที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าจะส่งผลดีกว่า เนื่องจากมีแรงตึงในสายน้อยกว่ารูปที่ 4.29 พบว่าสายเอ็นกอสร้างเบอร์ 100 มีความหนาแน่นเชิงเส้นน้อยที่สุดคือ 0.87 กรัม/เมตร และมีแรงตึงในสาย 109.9 นิวตัน รองลงมาคือสายเอ็นตกลปามีความหนาแน่นเชิงเส้น 0.90 กรัม/เมตร และมีแรงตึงในสาย 122.2 นิวตัน และสายถัก P.P. เบอร์ 5 มีความหนาแน่นเชิงเส้นสูงที่สุดคือ 2.13 กรัม/เมตร และมีแรงตึงในสายสูงถึง 297.2 นิวตัน

2) ความดันเสียงสูงสุดแปรผันตรงกับแรงตึงในสาย หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ สายที่มีแรงตึงในสายสูง เสียงจะมีความดังเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อดีดสาย สายจะพยายามเคลื่อนที่กลับสู่สภาวะปกติด้วยความเร่งสูง เพราะแรงตึงในสาย ดังนั้นสายจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง ส่งผลให้เกิดความดันในอากาศหรือความดันเสียงสูงขึ้นด้วย ดังนั้นสายที่มีแรงตึงในสายสูงกว่าจะส่งผลดีกว่า เนื่องจากมีเสียงที่ดังกว่าจากรูปที่ 4.30 พบว่าสายเชือกถัก P.P. เบอร์ 5 มีแรงตึงในสายสูงที่สุดคือ 297.2 นิวตัน และมีแรงดันเสียงสูงสุด 3.68 ปาสกาล รองลงมาคือสายเอ็นกอสร้าง เบอร์ 150 มีแรงตึง 251.2 นิวตัน และมีแรงดันเสียงสูงสุด 2.81 ปาสกาล และสายเอ็นกอสร้าง เบอร์ 100 มีแรงตึงน้อยสุดคือ 109.9 นิวตัน และมีแรงดันเสียงสูงสุดเพียง 1 ปาสกาล

3) อัตราส่วนความหน่วง (Damping Ratio) แปรผันตรงกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสาย สายที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่จะมีค่าอัตราส่วนความหน่วง (Damping Ratio) สูง กล่าวคือ ความดังของเสียงจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาผ่านไป เนื่องจากสายที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่จะมีพื้นที่ผิวกว้าง ซึ่งจะต้านอากาศขณะที่สายสั่น ส่งผลให้สายสูญเสียพลังงานการสั่นไปสู่บรรยากาศอย่างรวดเร็ว ดังนั้นสายที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าจะส่งผลดีกว่า เพราะจะมีหางเสียงยาวกว่า จากรูปที่ 4.31 พบว่าสายเอ็นกอสร้าง เบอร์ 100 มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กที่สุดคือ 0.98 มิลลิเมตร และมีอัตราหน่วง 0.95×10^{-3} รองลงมาคือสายเอ็นตกลปามีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร และมีอัตราหน่วง

1.03×10^{-3} และสายเชือกถัก P.P. เบอร์ 5 มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ที่สุดคือ 2.12 มิลลิเมตร และมีอัตราห่วง 2.26×10^{-3}

4) ค่าเฉลี่ยความถี่ (f_c) แสดงถึงความใสของเสียง สัญญาณเสียงที่มีค่าเฉลี่ยความถี่สูง จะส่งผลให้ผู้ฟังได้ยินเสียงที่สูงกว่าสัญญาณเสียงที่มีค่าเฉลี่ยความถี่ต่ำ ถึงแม้ว่าทั้งสองสัญญาณเสียงจะมีความถี่ตั้งต้น (f_0) ที่เท่ากันก็ตาม จากตารางที่ 4.9 พบว่าสายเส้นไหมมีค่าเฉลี่ยความถี่สูงที่สุดคือ 996.9 เฮิรตซ์ รองลงมาคือสายเอ็นตกลา มีค่าเฉลี่ยความถี่ 869.6 เฮิรตซ์ และสายเชือกขาวเบอร์ 60 มีค่าเฉลี่ยความถี่ต่ำที่สุดคือ 605.4 เฮิรตซ์

5) ร้อยละพลังงานของฮาร์โมนิกแต่ละความถี่ จากการนำสัญญาณเสียงไปคิดเป็นร้อยละของพลังงานเพื่อสังเกตค่าฮาร์โมนิกลำดับต่าง ๆ ของแต่ละสาย ดังตารางที่ 4.13 พบว่าผลรวมของร้อยละพลังงานของฮาร์โมนิกลำดับที่ 2 ถึงลำดับที่ 6 ยังมีค่ามาก ก็จะทำให้เสียงที่ออกมาเป็นเสียงหนา (Rich Sound) ยังมีค่าน้อยก็จะส่งผลทำให้เสียงที่ออกมาเป็นเสียงบาง (Thin Sound) โดยสายชออุ้ทึม (เส้นไหม) เป็นสายที่มีผลรวมของร้อยละพลังงานของฮาร์โมนิกมากที่สุด ทำให้มีเสียงที่มีเนื้อเสียงหนาที่สุด และสายเอ็นตกลา เป็นสายที่มีผลรวมของร้อยละพลังงานของฮาร์โมนิกน้อยที่สุด ทำให้มีเสียงที่มีเนื้อเสียงบางที่สุด

จากตารางที่ 4.9 และตารางที่ 4.13 ทำให้ทราบว่าหากต้องการพิจารณาหาเสียงที่ใสควรพิจารณาที่ค่าเฉลี่ยความถี่ (Spectral Centroid) แต่ถ้าต้องการพิจารณาความหนาของเสียงควรพิจารณาค่าร้อยละพลังงานของเสียง

และจากการวิเคราะห์พบว่าสายที่มีความหนาแน่นเชิงเส้นสูงกว่าจะสร้างเสียงที่ดังกว่าเมื่อตีด้วยแรงที่เท่ากัน แต่จำเป็นต้องใช้แรงตึงในสายสูงขึ้นด้วย และสายที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าจะสร้างเสียงที่มีหางเสียงยาวกว่า

จากผลการทดลองทั้งหมด พบว่าสายชออุ้ทึม (เส้นไหม) มีค่าเฉลี่ยความถี่เสียงสูงที่สุดที่ 996.9 เฮิรตซ์ ซึ่งจะให้ลักษณะเสียงที่มีความใสสูงที่สุด และผลรวมของส่วนประกอบพลังงานเสียงของฮาร์โมนิกที่ 2 ถึง 6 มีค่าสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 13 ซึ่งจะให้เสียงที่ออกมาเป็นเนื้อเสียงหนาที่สุด จากการพิจารณาค่าที่วัดได้ สรุปได้ว่าจากสายทั้งหมดที่นำมาทดสอบ เสียงจากสายชออุ้ทึม (เส้นไหม) มีคุณสมบัติเสียงที่น่าจะถูกใจผู้เล่นมากที่สุด และคาดว่าจะได้รับความนิยมสูง แต่เนื่องจากลักษณะพื้นผิวของสายที่หยาบประคบกับความหนาแน่นต่ำทำให้ในปัจจุบันผู้เล่นจึงนิยมใช้เอ็นก่อสร้างเบอร์ 120 และเอ็นเทนนิสมากกว่าสายชออุ้ทึม (เส้นไหม) เห็นได้จากแบบสำรวจชนิดของสายเครื่องดนตรีจะเข้ที่เลือกใช้ (ตารางที่ 4.2)

6) จากภาคผนวก ค สายที่นำมาทดสอบ 8 ชนิด พบว่าเชือกถัก P.P. ไม่เหมาะสำหรับเพลงจังหวะชั้นเดียว 2 ชั้น และ 3 ชั้น เอ็นก่อสร้างเบอร์ 150 เส้นไหม เชือกขาวและเอ็นเทนนิส ไม่เหมาะสำหรับเพลงจังหวะ 2 ชั้น และ 3 ชั้น และเอ็นก่อสร้างเบอร์ 120 ไม่เหมาะสำหรับเพลงจังหวะ 3 ชั้น เนื่องจากมีระยะเวลาที่ความดังของเสียงมีการเปลี่ยนโดนามิค (ลดลง 10 เดซิเบล) น้อยกว่าระยะเวลาระหว่างตัวโน้ตในแต่ละจังหวะเพลง ดังแสดงในรูปที่ 4.32 ส่งผลให้เสียงจากสายนั้น ๆ ไม่สามารถคงโดนามิคของเพลงไว้ได้ กล่าวคือ เสียงมีการขาดช่วง

5.2 ปัญหาที่พบในการทดลอง

1) ในการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล วัสดุที่ใช้ทดสอบมีรูปร่างเป็นทรงกระบอก (สายเครื่องดนตรีจะเข้) ดังนั้นวัสดุที่ตำแหน่งหัวจับยึดของเครื่องทดสอบมีความแข็งแรงน้อยกว่าจุดอื่น ส่งผลให้ผลวัสดุขาดที่จุดจับยึด และแรงสูงสุดที่วัดได้ไม่ใช่แรงสูงสุดที่วัสดุรับได้จริง

2) เสียงที่เกิดขึ้น ไม่ได้เกิดจากสายเครื่องดนตรีจะเข้เพียงอย่างเดียว แต่ยังเกิดจากการสะท้อนภายในห้อง การสั่นของตัวเครื่องดนตรีจะเข้เอง การสั่นของอุปกรณ์ดีดสาย และเครื่องมือวัด จำเป็นต้องใช้วัสดุช่วยซับเสียงสะท้อน และใช้ฟองน้ำรองอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อลดการสั่นให้มากที่สุด

3) ระหว่างบันทึกเสียง อาจมีปัจจัยภายนอกมารบกวนสัญญาณ เช่น เสียงรบกวน ลมจากเครื่องปรับอากาศ สนามแม่เหล็กจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น ดังนั้นจึงต้องบันทึกเสียงหลายครั้งแล้วเลือกใช้ค่าที่มีความเสถียรที่สุด

4) สายที่นำมาทำการทดลองเมื่อผ่านการใช้งานไปช่วงเวลาหนึ่งจะเกิดการหย่อนตัว (จุดคราก) จึงต้องทำการปรับความถี่ของสายใหม่อยู่เสมอ

5.3 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

ในการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของสายที่มีผลกระทบต่อเสียงของเครื่องดนตรีจะเข้ ควรศึกษาสายชนิดเดียวกันบนเครื่องดนตรีจะเข้หลาย ๆ ตัว เพื่อดูว่าคุณสมบัติของสายส่งผลกระทบต่อเสียงของเครื่องดนตรีจะเข้ตัวอื่น ๆ เหมือนกันหรือไม่

บรรณานุกรม

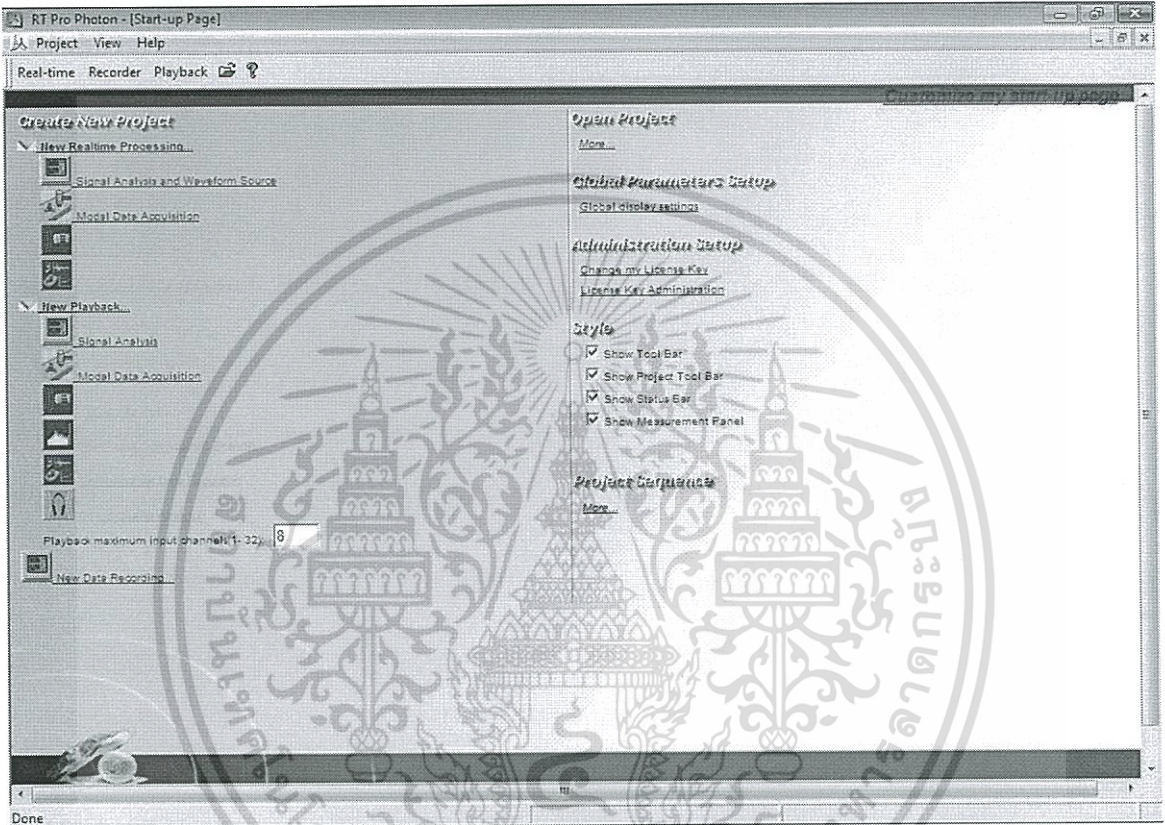
- [1] Alexander Sengpiel. Sound Power Level SWL. Tontechnik-Rechner-sengpielaudio Web site. 2010. Available at : <http://www.sengpielaudio.com/calculator-soundpower.htm> Accessed March 23, 2018.
- [2] Daniel D. Zundel. 24th April 2011. "Learning Musical Instruments through Spectral and Temporal Analysis". CprE585x - Developmental Robotics.
- [3] Emery Schubert and Joe Wolfe. 2006. "Does Timbral Brightness Scale with Frequency and Spectral Centroid?". ACTA ACUSTICA UNITED WITH ACUSTICA. Vol. 92 : 820-825
- [4] Jeremy F. Alm and James S. Walker. 2002. "Time-Frequency Analysis of Musical Instruments". Society for Industrial and Applied Mathematics. Vol. 44, No. 3
- [5] Nachanant Chitnaont, Pitak Thumwarin, Phonlasit Thinakorn na ayuthaya, Chawalit Prasit , "Sound analysis of Thai musical instrument: Khlui" The 2018 International Conference on Digital Arts, Media and Technology (ICDAMT 2018), Chiangrai, Thailand, February 25-28,2018..
- [6] Samo Šali & Janez Kopač. MEASURING A FREQUENCY RESPONSE OF A GUITAR. Faculty of Mechanical Engineering, University of Ljubljana Department of Manufacturing Engineering. Aškerčeva 6
- [7] Samo Šali & Janez Kopač. MEASURING THE QUALITY OF GUITAR TONE. Faculty of Mechanical Engineering, University of Ljubljana Department of Manufacturing Engineering. Aškerčeva 6
- [8] Thassuya. ความถี่เสียงดนตรีไทยแบบ 7 เสียงแบ่งเท่า. Thai classical Experimental music Web site. 2013. Available at : <http://thassuya.blogspot.com/2013/03/7.html?m=1> Accessed March 23, 2018.
- [9] Unjung Nam. April 28, 2001. Special Area Exam Part II.
- [10] Xin Zhang and Zbigniew W. Ras. "Analysis of Sound Features for Music Timbre Recognition". Department of Computer Science. University of North Carolina at Charlotte.
- [11] Xxa. เอื้อ ฉัตรเฉลิม ช่างจะเข้แห่งเมืองชล. ThaiLifeMusic Web site. 2009. Available at : <http://www.thailifemusic.com/2010/05/khruuea-music-journal/> Accessed May 17,2018.

ภาคผนวก ก

ขั้นตอนการใช้โปรแกรม RT Pro Photon

ในส่วนนี้จะอธิบายการตั้งค่า และการใช้โปรแกรม RT Pro Photon เวอร์ชัน 6.34.9104 เพื่อบันทึกและวิเคราะห์เสียงของเครื่องดนตรีจะเข้ โดยมีขั้นตอนดังนี้

- 1) เปิดโปรแกรมจะกับหน้าต่างเริ่มต้นดังรูป



รูปที่ ก.1 หน้าต่างเริ่มต้นของโปรแกรม RT Pro Photon เวอร์ชัน 6.34.9104

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

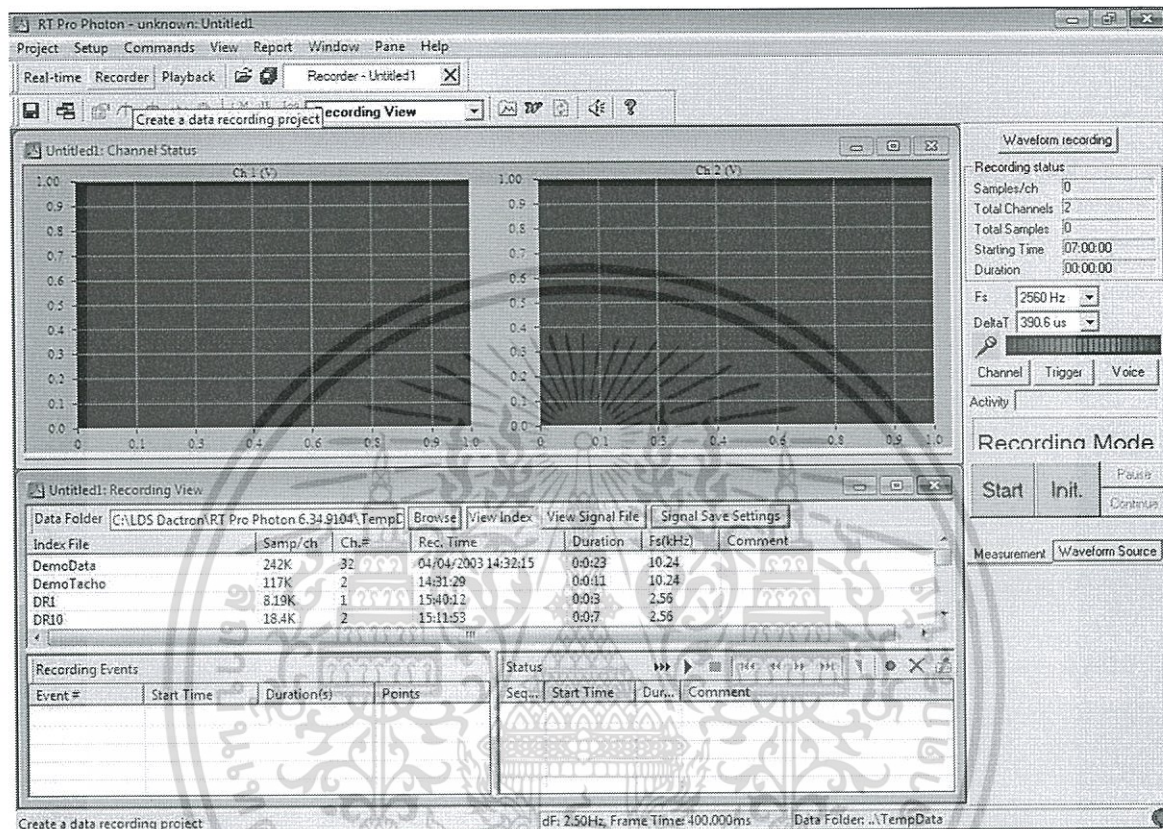
2) สร้างโปรเจกใหม่ สามารถเลือกโปรเจกได้ 3 แบบคือ

2.1) Real-time คือ การวิเคราะห์เสียงที่เกิดขึ้นขณะนั้น และแสดงผลทางหน้าจอ

2.2) Recorder คือ การอัดเสียงที่เกิดขึ้น โดยสามารถเรียกดูข้อมูลภายหลังได้

2.3) Playback คือ การเรียกดูข้อมูลของเสียงที่ได้ทำการอัดไว้ก่อนหน้า

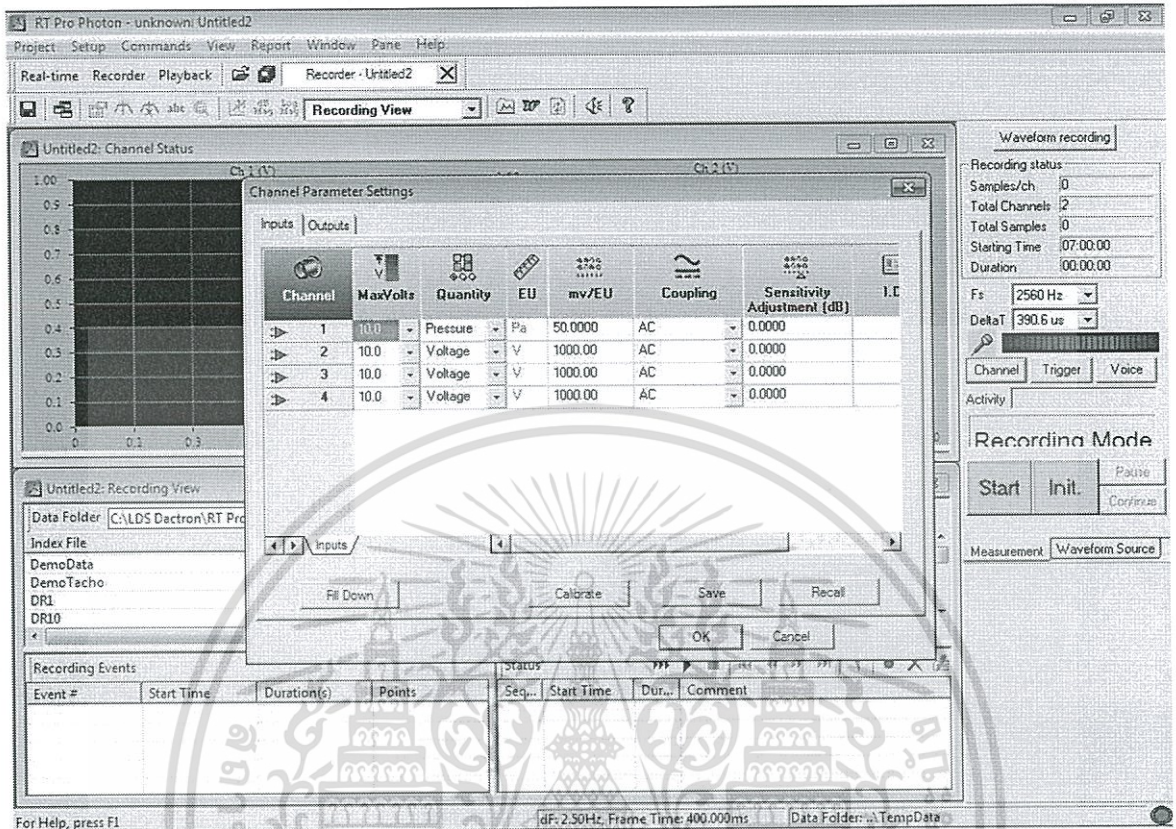
เลือก Recorder เพื่อทำการอัดเสียงเครื่องดนตรีจะเข้ด้งรูป



รูปที่ ก.2 สร้างโปรเจก Recorder เพื่ออัดเสียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

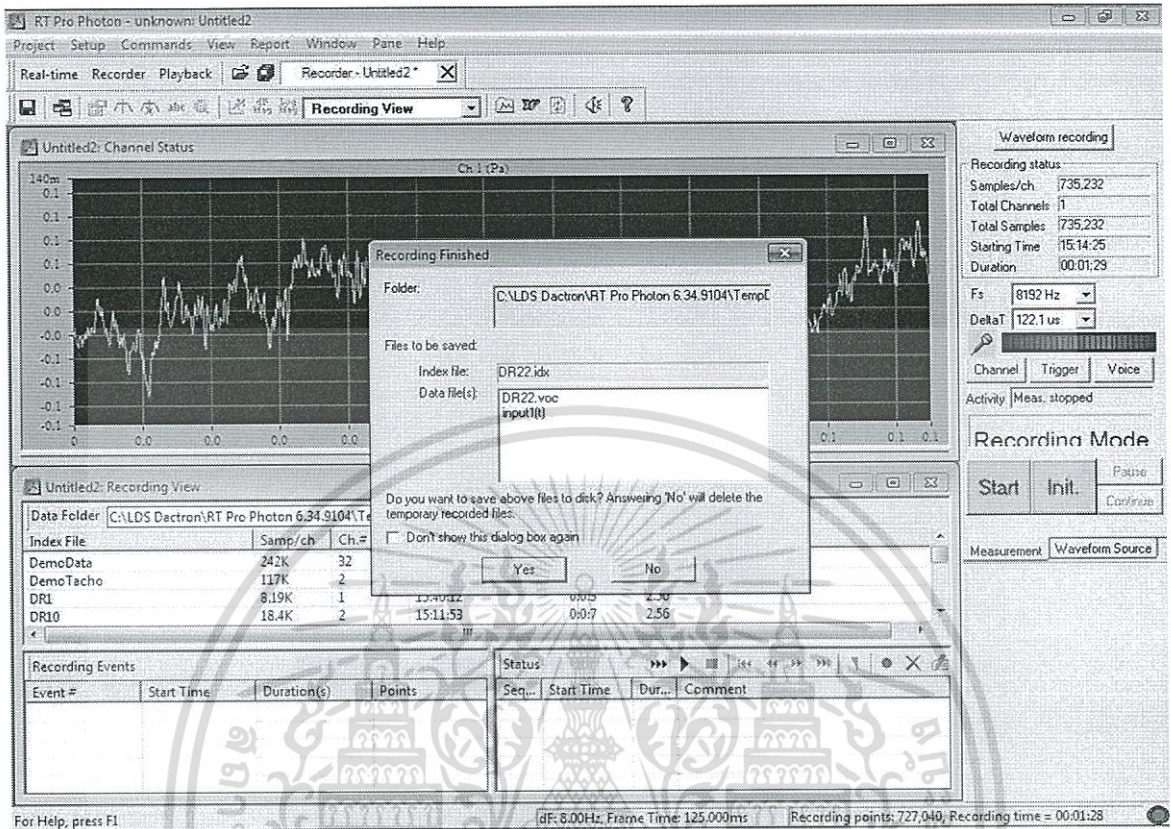
3) ตั้งค่าสัญญาณ input โดยเลือก Channel แล้วตั้งค่าต่าง ๆ ในตารางดังรูป (โดยเสียบสายสัญญาณไมโครโฟนเข้าที่ channel ที่ 1 ของเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ) จากนั้นกด OK



รูปที่ ก.3 หน้าต่างตั้งค่าสัญญาณ input

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) เลือกสัญญาณที่จะบันทึก โดยเลือก Waveform recording จากนั้นในช่อง Channels to be Recorded เลือกเฉพาะ Channel ของสัญญาณที่จะบันทึก จากนั้นกด OK ดังรูป



รูปที่ ก.4 หน้าต่างเลือกสัญญาณที่ต้องการบันทึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) ตั้งค่า Sampling Frequency ในช่อง Fs สำหรับปริญญาบัตรฉบับนี้ ตั้งค่า Fs เท่ากับ 8192 เฮิรตซ์

The screenshot shows the RT Pro Photon software interface during a recording session. A dialog box titled "Recording Finished" is open, showing the following details:

- Folder: C:\LDS Dactron\RT Pro Photon 6.34.9104\Temp
- Files to be saved:
 - Index file: DR22.idx
 - Data file(s): DR22.voc input(1)

The background interface includes a "Recording View" window showing a waveform graph for "Ch. 1 (Pa)". The status bar at the bottom indicates "dF: 8.00KHz, Frame Time: 125.000ms" and "Recording points: 727,040, Recording time = 00:01:28".

รูปที่ ก.5 ตั้งค่า Sampling Frequency

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6) เริ่มการบันทึกโดยกดปุ่ม Start

Recording status

Samples/ch	481,260
Total Channels	1
Total Samples	481,260
Starting Time	15:14:25
Duration	00:00:53

Fs: 8192 Hz
DeltaT: 122.1 us

Channel: Trigger Voice

Activity: Measuring

Disk occupied: 1.85 MB
Disk space avail: 152.60 GB

Start Stop Pause
Continue

Measurement Waveform Source

Data Folder	Index File	Samp/ch	Ch.#	Rec. Time	Duration	Fs (kHz)	Comment
CALDS Dactron\RT Pro Photon 6.34.9104\Temp	DemoData	242K	32	04/04/2003 14:32:15	0:0:23	10.24	
	DemoTacho	117K	2	14:31:29	0:0:11	10.24	
	DR1	8.19K	1	15:40:12	0:0:3	2.56	
	DR10	18.4K	2	15:11:53	0:0:7	2.56	

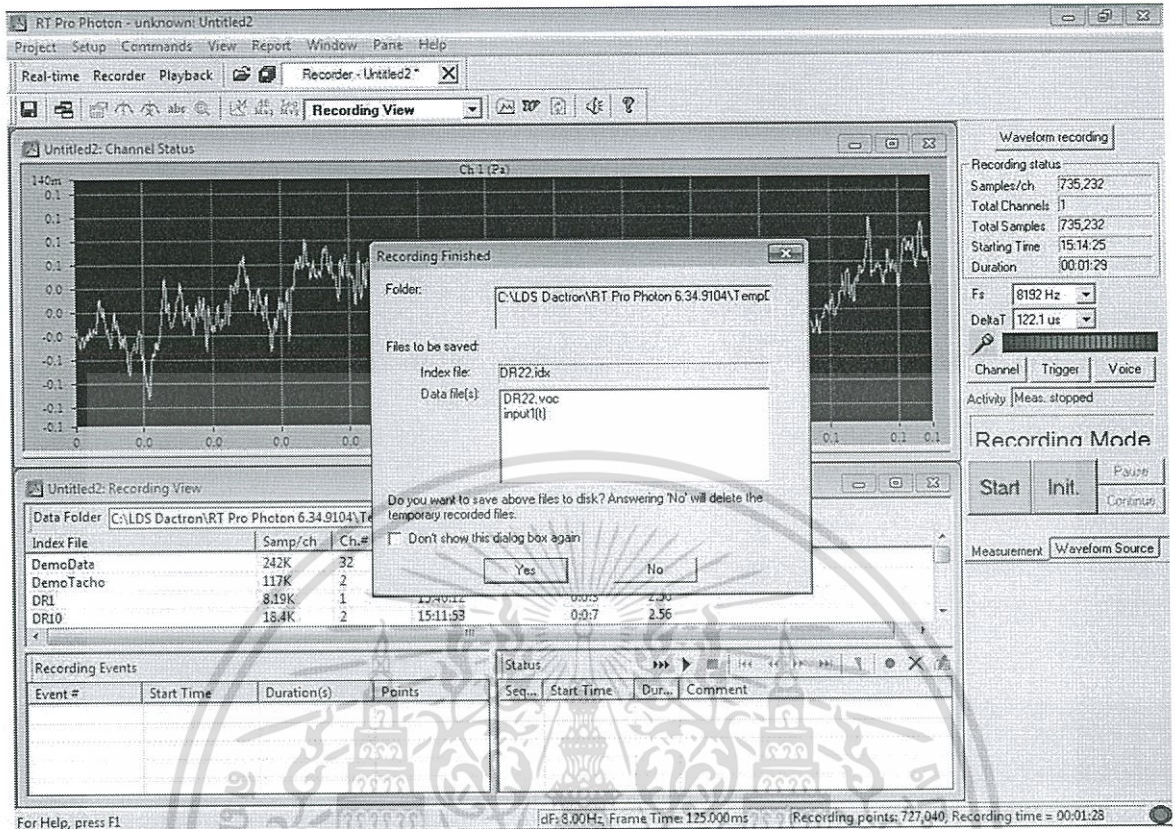
Recording Events	Status						
Event #	Start Time	Duration(s)	Points	Seq...	Start Time	Dur...	Comment

For Help, press F1 dF: 8.00kHz; Frame Time: 125.000ms Recording points: 481,260; Recording time = 00:00:53

รูปที่ ก.6 หน้าจอแสดงผลขณะทำการบันทึกเสียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7) กดปุ่ม Stop เมื่อต้องการหยุดการบันทึกเสียง และกด Yes เพื่อบันทึกไฟล์

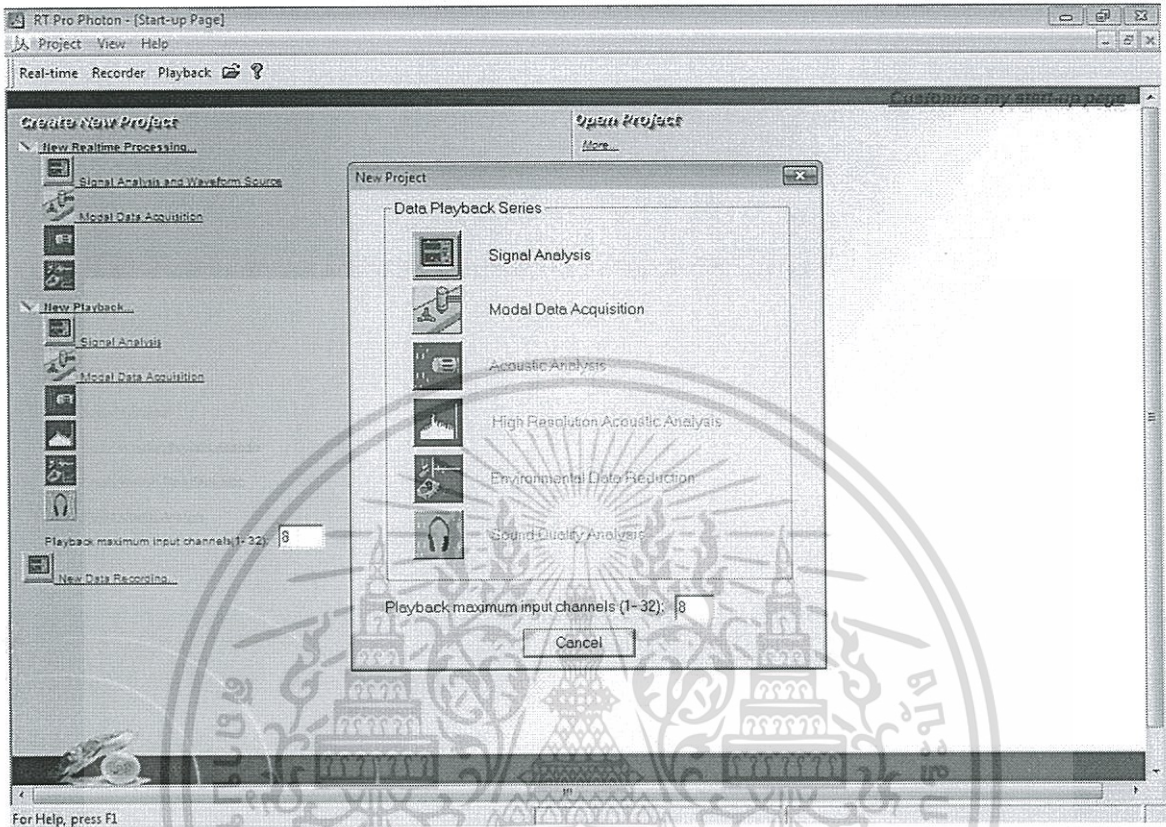


รูปที่ ก.7 หน้าต่างบันทึกไฟล์เสียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากอัดเสียงไว้แล้ว เราสามารถเรียกดูข้อมูลการวิเคราะห์เสียงที่อัดไว้ และปรับค่าความละเอียดของข้อมูลได้ แต่ต้องมีความละเอียดไม่เกินความละเอียดที่เลือกไว้ตอนอัดเสียง โดยมีขั้นตอนดังนี้

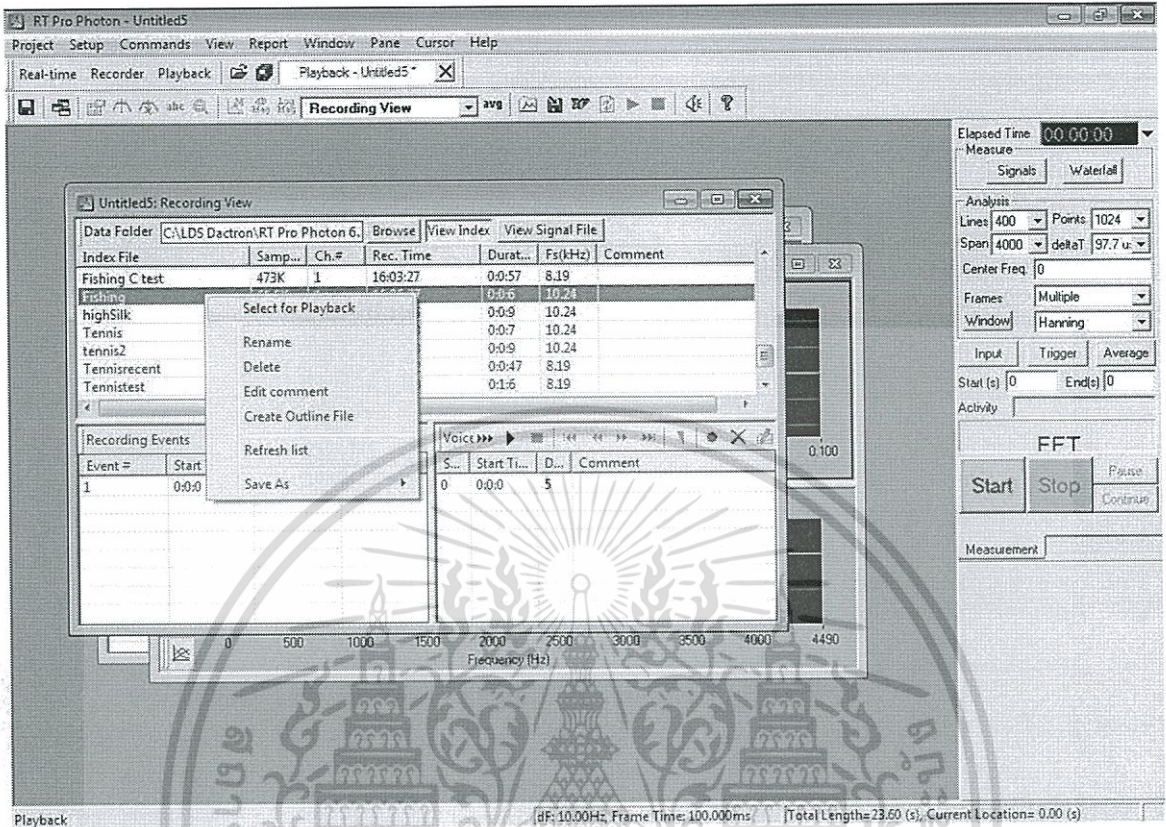
8) สร้างโปรเจค Playback แล้วเลือก Signal Analysis ดังรูป



รูปที่ ก.8 สร้างโปรเจคเรียกดูไฟล์เสียงที่อัดไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

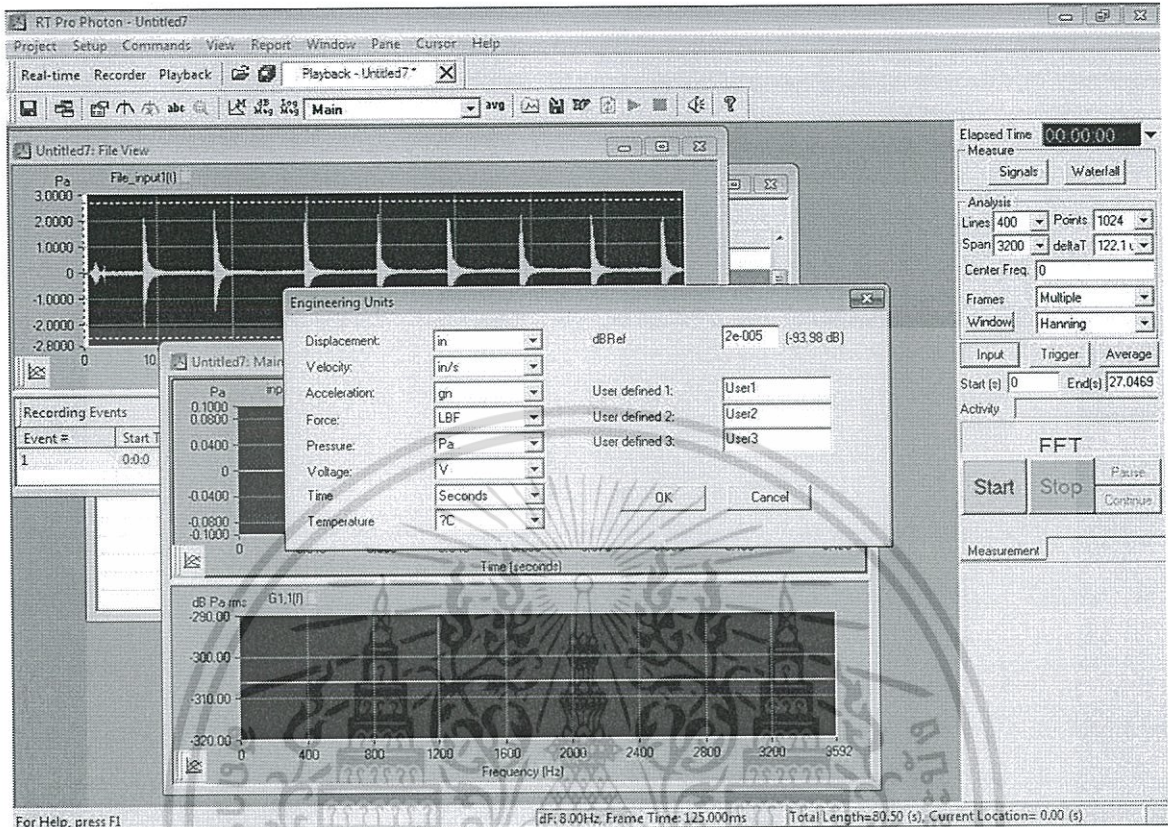
9) เปิดไฟล์เสียงที่ต้องการ โดยไปที่หน้าต่าง Recording View > Browse เลือก folder ที่บันทึกไฟล์ไว้ คลิกขวาที่ไฟล์เสียงที่ต้องการเปิด เลือก Select for Playback ดังรูป



รูปที่ ก.9 เลือกไฟล์เสียงที่ต้องการเปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

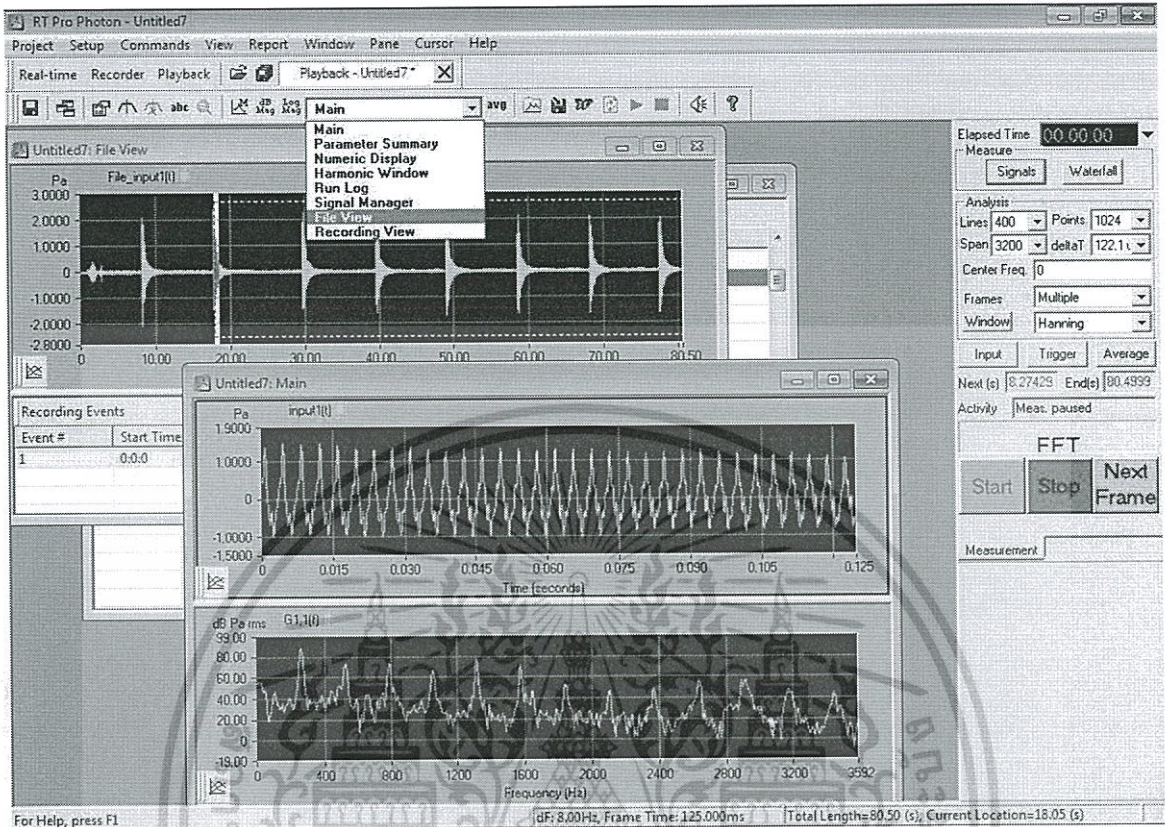
10) ตั้งค่าความดันอ้างอิง (P_{ref}) และเลือกหน่วยที่ใช้ในโปรแกรม ไปที่ Setup > Engineering Unit สำหรับปริญญาโทฉบับนี้ กำหนดความดันอ้างอิงเท่ากับ 0.00002 ปาสกาล ดังรูป



รูปที่ ก.10 ตั้งค่าความดันอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

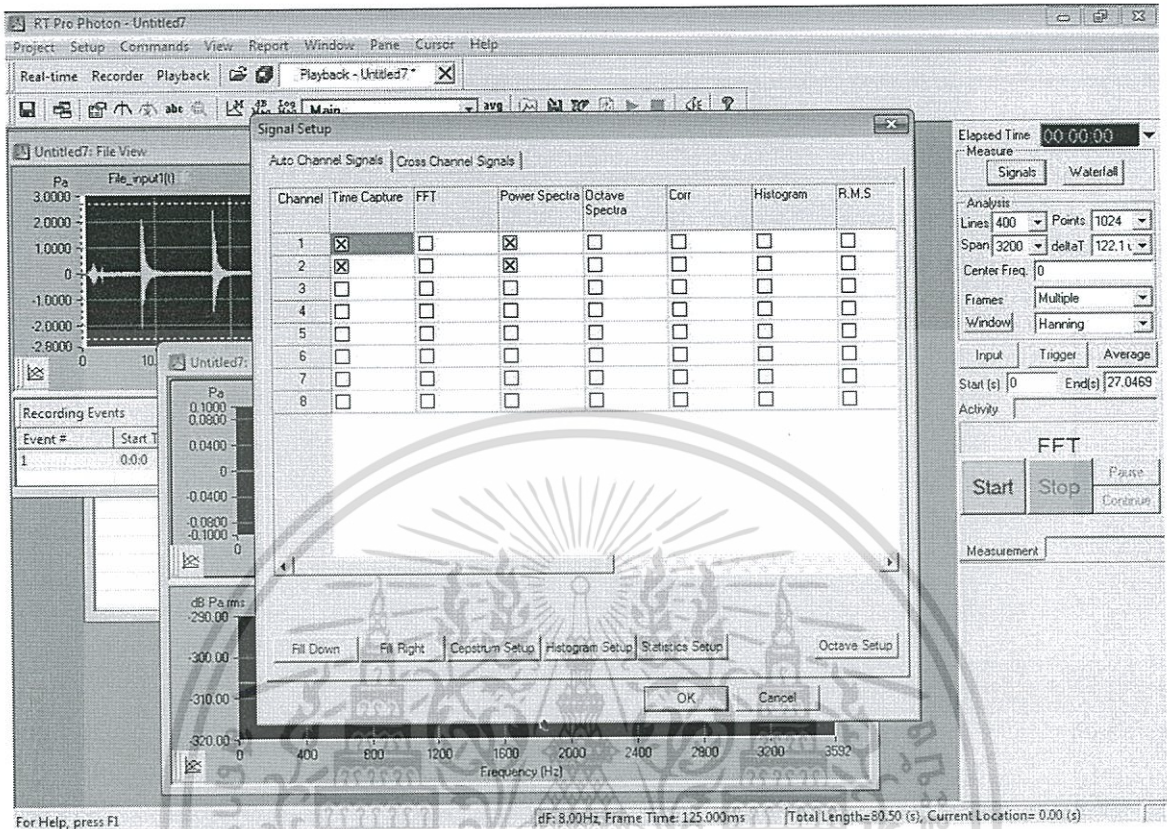
11) เปิดหน้าต่างข้อมูลการวิเคราะห์หลัก โดยแนะนำให้เปิดหน้าต่าง File View เพื่อดูสัญญาณทั้งหมด และเปิดหน้าต่าง Main เพื่อดูแอมพลิจูดเทียบกับเวลาและความถี่ดังรูป



รูปที่ ก.11 เปิดหน้าต่างข้อมูลหลัก

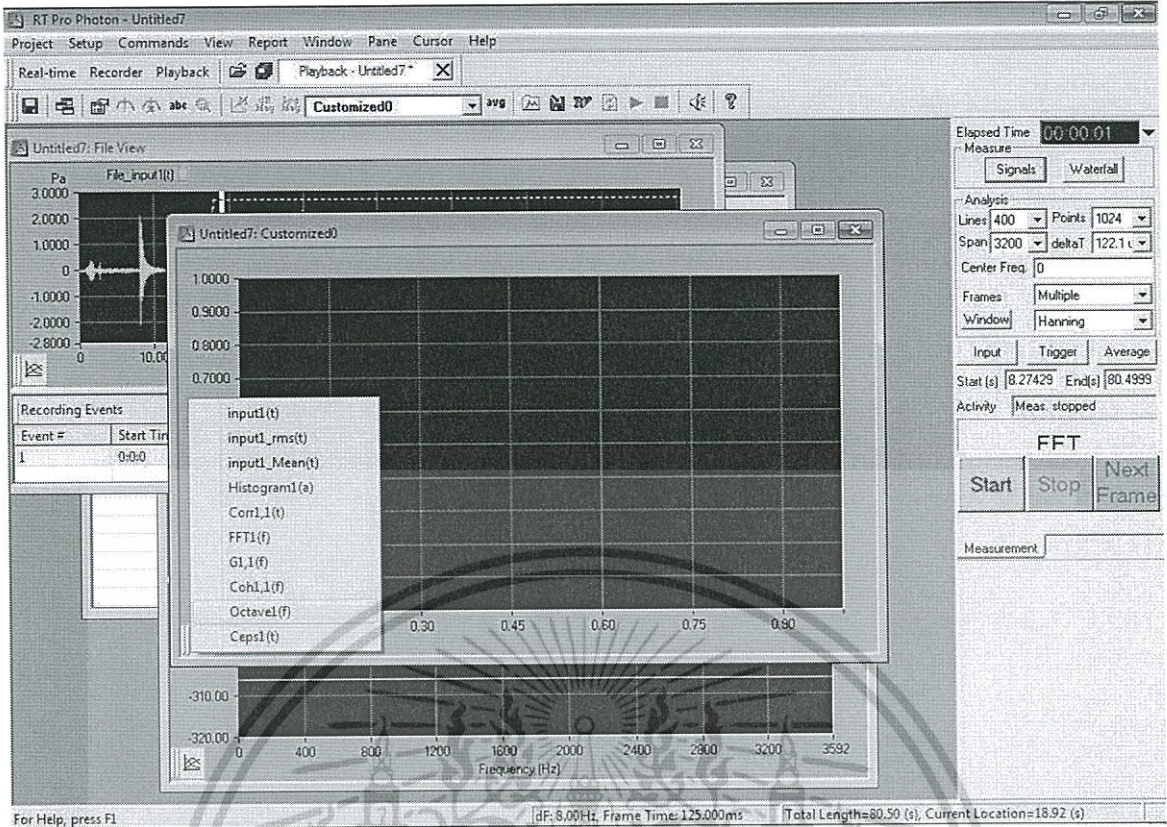
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12) เลือกสัญญาณที่ต้องการวิเคราะห์เพิ่มเติม โดยเลือกปุ่ม Signals และเรียกดูผลวิเคราะห์ที่ได้ โดยการสร้างหน้าต่างใหม่ Window > New Window ดังรูป



รูปที่ ก.12.1 เลือกสัญญาณที่ต้องวิเคราะห์

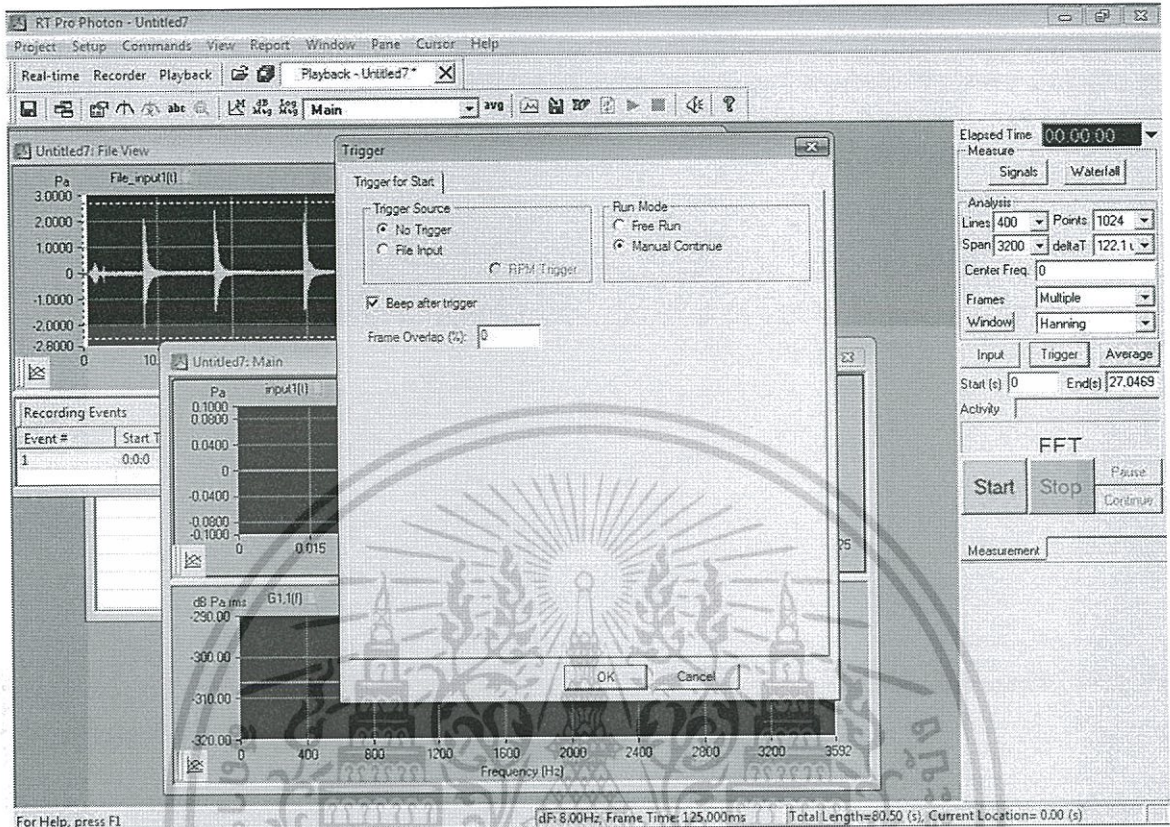
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.12.2 เรียกดุพลวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

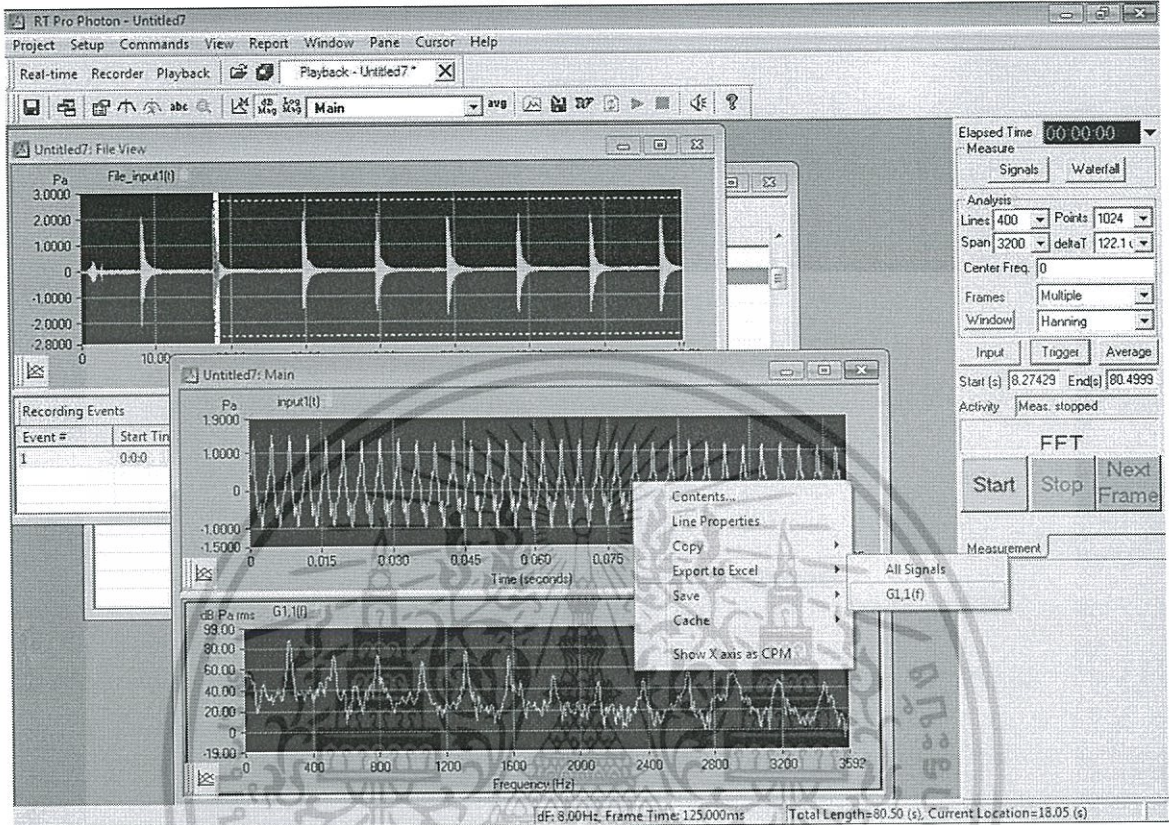
13) ตั้งค่าให้โปรแกรมเรียกดูข้อมูลที่ละช่วงเวลา เพื่อให้ง่ายสำหรับการบันทึกข้อมูล ไปที่ Trigger แล้วเลือก Manual Continue กด OK



รูปที่ ก.13 ตั้งค่าการเรียกดูข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

14) กด Start และกด Next Frame เพื่อเลื่อนดูข้อมูลในช่วงเวลาถัดไป และบันทึกข้อมูลเป็นไฟล์ Excel โดยคลิกขวาที่หน้าต่างข้อมูลที่ต้องการบันทึก เลือก Export to Excel แล้วเลือกสัญญาณที่ต้องการบันทึกดังรูป



รูปที่ ก.14 บันทึกข้อมูลเป็นไฟล์ Excel

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการคำนวณและคำสั่งที่ใช้ ในโปรแกรม Microsoft Excel

ในส่วนนี้จะแสดงวิธีการคำนวณ ค่าอัตราส่วนความหน่วง (Damping ratio) ค่าเฉลี่ยความถี่ (Spectral Centroid) และส่วนประกอบกำลังเสียงของแต่ละฮาร์โมนิก ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel จากข้อมูลที่ได้มาจากการบันทึกและวิเคราะห์เสียงตามขั้นตอนที่แสดงในภาคผนวก ก. โดยข้อมูลตัวอย่างที่นำมาแสดงเป็นข้อมูลการวิเคราะห์เสียงของเส้นไหม

1) การเลือกข้อมูลที่นำมาคำนวณ

การเลือกข้อมูลจากผลการทดลองที่นำมาคำนวณค่าต่าง ๆ จำเป็นต้องมีเกณฑ์การเลือกที่เหมือนกันสำหรับสายทุกชนิด เพื่อให้สามารถนำค่าต่าง ๆ มาเปรียบเทียบกัน แล้วมีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงน้อยที่สุด

1.1) ความดันเสียงเริ่มต้นของการสั่นของสาย

ความดันเสียงเริ่มต้น คือความดันเสียงขั้นต่ำที่จะเริ่มพิจารณาว่าสายเกิดการสั่น (ที่เวลาเท่ากับ 0) กล่าวคือ จะเริ่มใช้ข้อมูลที่มีค่าเท่ากับความดันเสียงเริ่มต้นมาคำนวณ ซึ่งมีค่าเท่ากับความดังของบทสนทนาทั่วไป (ความดัง 60 เดซิเบล ที่ระยะห่าง 1 เมตรจากแหล่งกำเนิดเสียง) [ตารางที่ 2.2] แต่เนื่องจากในการทดลอง ตำแหน่งของไมโครโฟนห่างจากจุดติดสายหรือจุดกำเนิดเสียงเป็นระยะ 17 เซนติเมตร ซึ่งสามารถหาค่าความดังที่ไมโครโฟนจะได้รับได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$L_2 = L_1 - 20 \log_{10} \left(\frac{r_1}{r_2} \right)$$

เมื่อ	L_1	คือ ความดังอ้างอิง (60 เดซิเบล)
	L_2	คือ ความดังที่ไมโครโฟนจะได้รับ
	r_1	คือ ระยะห่างอ้างอิง (1 เมตร)
	r_2	คือ ระยะห่างระหว่างไมโครโฟนกับจุดติดสาย (0.17 เมตร)

จากการคำนวณพบว่า

$$L_2 = 75.39 \text{ dB}$$

สามารถแปลงเป็นความดันเสียงได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$p_2 = p_{ref} \cdot 10^{\frac{L_2}{20}}$$

เมื่อ	p_2	คือ ความดันเสียงที่ไมโครโฟนจะได้รับ
	p_{ref}	คือ ความดันเสียงอ้างอิง (0.00002 Pa)

จากการคำนวณพบว่า

$$p_2 = 0.1176 \text{ Pa}$$

ดังนั้นความดันเสียงขั้นต่ำที่จะเริ่มพิจารณาว่าสายเกิดการสั่น มีค่าเท่ากับ 0.1176 Pa

1.2)..การเลือกตัวอย่างข้อมูล

ข้อมูลที่นำมาคำนวณ ได้มาจากการเฉลี่ยค่าความดันเสียงที่เวลาใด ๆ ของการติดสาย 5 ครั้ง จากการติดสาย 20 ครั้ง โดยเลือกข้อมูลด้วยวิธีการสุ่ม ดังแสดงในรูปที่ ข.1

เวลา		ความดันเสียงของการติดสาย		ความดันเสียงเฉลี่ย		ค่าเฉลี่ย
X Unit(s)	Y Unit(Pa)	X Unit(s)	Y Unit(Pa)	X Unit(s)	Y Unit(Pa)	X Unit(s)
0	0	0	0	0	0	0
0.00012	0.11099435	0.00012	0.11176013	0.00012	0.111388	0.120189972
0.00024	0.12192327	0.00024	0.11750592	0.00024	0.12405214	0.113643803
0.00037	0.10516041	0.00037	0.1016742	0.00037	0.10572774	0.124919322
0.00049	0.1204372	0.00049	0.1322753	0.00049	0.12954425	0.106597713
0.00061	0.09773394	0.00061	0.09680933	0.00061	0.09938497	0.123781157
0.00073	0.13508534	0.00073	0.1371135	0.00073	0.13095361	0.099733464
0.00085	0.11372192	0.00085	0.141005765	0.00085	0.11704379	0.136149193
0.00098	0.15055837	0.00098	0.15409738	0.00098	0.14824884	0.113883517
0.0011	0.04442263	0.0011	0.03656015	0.0011	0.04149746	0.152959865
0.00122	0.21827366	0.00122	0.23191908	0.00122	0.22188785	0.04185554
0.00134	0.23829463	0.00134	0.24715683	0.00134	0.2361287	0.228707136
0.00146	-0.12417857	0.00146	-0.13870796	0.00146	-0.14297136	0.24603109
0.00159	0.24626226	0.00159	0.26146712	0.00159	0.24553827	-0.136893952
0.00171	0.2945071	0.00171	0.30200068	0.00171	0.31937279	0.254539589
0.00183	-0.03143778	0.00183	-0.03615207	0.00183	-0.03263781	0.307201219
0.00195	0.18779675	0.00195	0.20303153	0.00195	0.18724366	-0.03517492
0.00208	0.22182854	0.00208	0.2291168	0.00208	0.22585536	0.195769432
0.0022	0.20602868	0.0022	0.20996645	0.0022	0.20490095	0.230136553
0.00232	0.13834321	0.00232	0.14962319	0.00232	0.15123812	0.211488174
0.00244	0.08606389	0.00244	0.08258724	0.00244	0.08709177	0.145161431
0.00256	-0.06831233	0.00256	-0.20458531	0.00256	-0.19247786	0.086984837
						-0.172147144

รูปที่ ข.1 ค่าเฉลี่ยความดันเสียงที่เวลาใด ๆ ของการติดสาย 5 ครั้ง

2)..การคำนวณค่าอัตราส่วนความหน่วง (damping ratio)

อัตราส่วนความหน่วงสามารถคำนวณได้จากค่าสัมประสิทธิ์ของเวลา (t) ในสมการเส้นโค้งของการลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลของความดันเสียง ซึ่งสมการเส้นโค้งสามารถหาได้ด้วยการเลือกเส้นกราฟที่เหมาะสมกับข้อมูล (curve fitting) ด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุด (least-square) โดยสามารถคำนวณด้วยโปรแกรม Microsoft Excel ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

2.1)..การกรองข้อมูล

เพื่อให้เฉพาะความดันเสียงที่มากและน้อยที่สุด ในคลื่นเสียงแต่ละลูกความถี่เสียงที่มีแอมพลิจูดสูงสุด คือความถี่มูลฐาน ($f = 262 \text{ Hz}$) สามารถหาคาบเวลาในการสั่นได้จาก

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{262} = 3.817 \times 10^{-3} \text{ sec/cycle}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งแต่ละข้อมูลมีระยะเวลาห่างกัน $\Delta t = 0.00012$ วินาที สามารถหาจำนวนข้อมูลของคลื่นเสียงแต่ละลูก (N) ได้จาก

$$N = \frac{T}{\Delta t} = \frac{3.817 \times 10^{-3}}{0.00012} = 31.8 \approx 32$$

ดังนั้นข้อมูลที่เป็นความดันเสียงสูงสุดในคลื่นเสียงแต่ละลูกจะมีค่ามากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ 31 ข้อมูลถัดไป สามารถคัดกรองได้ด้วยคำสั่ง

$$=AND(Q4>Q5,Q4>Q6,Q4>Q7,.....,Q4>Q34)$$

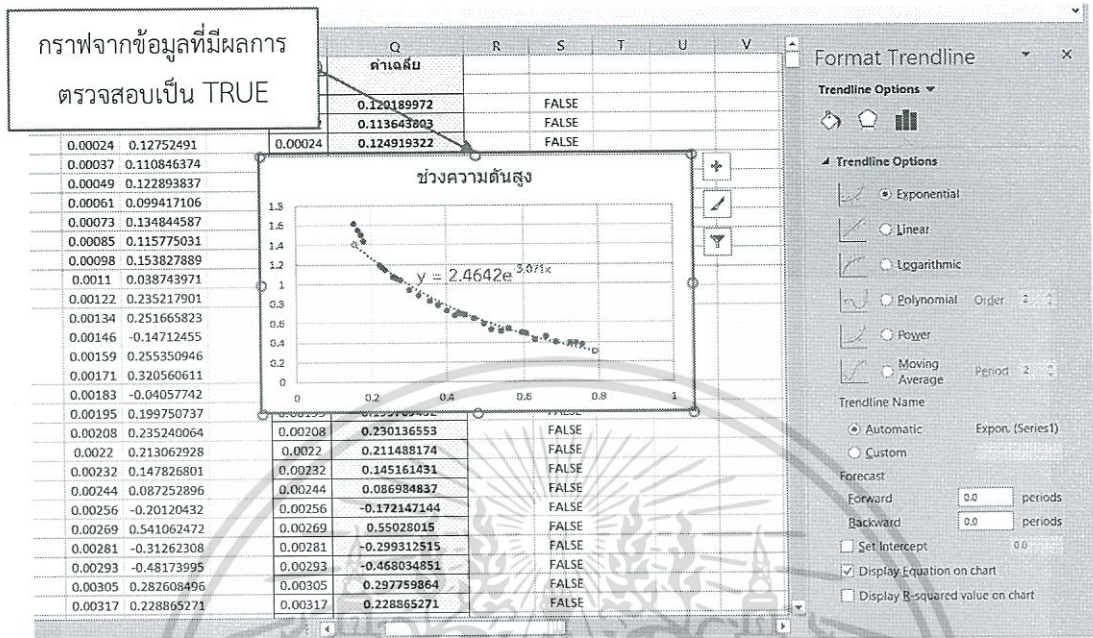
คำสั่งจะแสดง “TRUE” เมื่อเงื่อนไขทั้งหมดเป็นจริง และแสดง “FALSE” หากมีเงื่อนไขใดผิด ดังแสดงในรูป ข.2

	J	K	L	M	N	O	S	T
1					input1(t)			
2	X Uni				Y Unit(Pa)			
3	X Val				Value(Real)			
4	0				0.11883248			FALSE
5	0.00012	0.113508		0.00012	0.11580786	0.00012	0.113643803	FALSE
6	0.00024	0.12405214		0.00024	0.12752491	0.00024	0.124919322	FALSE
7	0.00037	0.10572724		0.00037	0.11084637	0.00037	0.106597713	FALSE
8	0.00049	0.11735519		0.00049	0.12289384	0.00049	0.123781157	FALSE
9	0.00061	0.09938497		0.00061	0.09941711	0.00061	0.099733464	FALSE
10	0.00073	0.13095361		0.00073	0.13484459	0.00073	0.136149193	FALSE
11	0.00085	0.11281919		0.00085	0.11577503	0.00085	0.113883517	FALSE
12	0.00098	0.14824884		0.00098	0.15382789	0.00098	0.152959865	FALSE
13	0.0011	0.04149746		0.0011	0.03874397	0.0011	0.04185554	FALSE
14	0.00122	0.22188785		0.00122	0.2352179	0.00122	0.228707136	FALSE
15	0.00134	0.2361287		0.00134	0.25166582	0.00134	0.24603109	FALSE
16	0.00146	-0.13148733		0.00146	-0.14712455	0.00146	-0.136893952	FALSE
17	0.00159	0.24453827		0.00159	0.25535095	0.00159	0.254539589	FALSE
18	0.00171	0.29956491		0.00171	0.32056061	0.00171	0.307201219	FALSE
19	0.00183	-0.03263781		0.00183	-0.04057742	0.00183	-0.03517492	FALSE
20	0.00195	0.18724366		0.00195	0.19975074	0.00195	0.195769432	FALSE
21	0.00208	0.22585536		0.00208	0.23524006	0.00208	0.230136553	FALSE
22	0.0022	0.20490055		0.0022	0.21306293	0.0022	0.211488174	FALSE
23	0.00232	0.13877583		0.00232	0.1478268	0.00232	0.145161431	FALSE
24	0.00244	0.08709177		0.00244	0.0872529	0.00244	0.086984837	FALSE
25	0.00256	-0.19247786		0.00256	-0.20120432	0.00256	-0.172147144	FALSE

รูปที่ ข.2 คำสั่งคัดกรองข้อมูลที่มีค่ามากที่สุดในแต่ละลูกคลื่น

ทำการเลือกเฉพาะข้อมูลที่แสดงค่า “TRUE” ด้วยคำสั่ง Filter โดยจะไม่พิจารณาข้อมูลที่อยู่ในช่วง Attack time ซึ่งช่วง Attack time ของสายแต่ละชนิดมีค่าไม่เท่ากัน สามารถประมาณค่าได้ด้วยตาเปล่าจากกราฟความดันเสียงกับเวลา โดยส่งผลกระทบต่อสมการที่จะได้น้อยมากจนสามารถละทิ้งได้

ข้อมูลของเส้นไหมจะพิจารณาเฉพาะที่เวลาเท่ากับ 0.15 ถึง 0.8 วินาที จะได้กราฟความดันเสียงกับเวลาและใช้คำสั่งสร้างเส้นแนวโน้ม (Trend line) ด้วยฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล ดังแสดงในรูปที่ ข.3



รูปที่ ข.3 กราฟความดันเสียงกับเวลาและเส้นแนวโน้ม (Trend line) แบบฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล

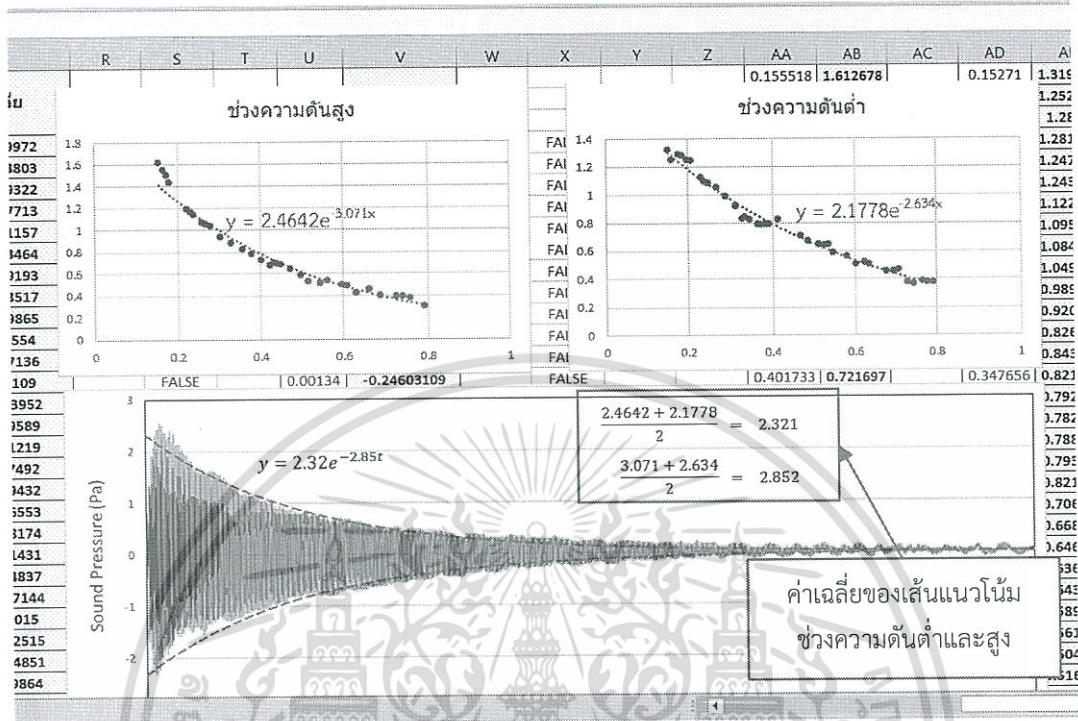
เนื่องจากความดันเสียงในช่วงความดันสูง (ค่าบวก) และความดันต่ำ (ค่าลบ) ไม่สมมาตรกัน ดังแสดงในรูปที่ ข.4



รูปที่ ข.4 กราฟความดันเสียงกับเวลาของเส้นไหม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จึงทำการคูณข้อมูลทั้งหมดด้วย -1 แล้วทำตามขั้นตอนทั้งหมดอีกครั้ง ค่าแอมพลิจูดและสัมประสิทธิ์เลขชี้กำลังของได้สมการเส้นโค้งของการลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลของความดันเสียงเท่ากับค่าเฉลี่ยของเส้นแนวโน้มของทั้งสองช่วงความดัน ดังแสดงในรูปที่ ข.5



รูปที่ ข.5 ค่าแอมพลิจูดและสัมประสิทธิ์เลขชี้กำลังของได้สมการเส้นโค้ง

จากรูปที่ ข.5 และสมการรูปทั่วไปของเส้นโค้งของการลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลจะได้

$$\zeta = \frac{2.85}{2\pi f} = \frac{2.85}{2\pi(262)} = 1.73 \times 10^{-3}$$

ดังนั้นค่าอัตราส่วนความหน่วง (ζ) ของการสั่นของเส้นไหม เท่ากับ 1.73×10^{-3}

3)...การคำนวณค่าเฉลี่ยความถี่ (Spectral Centroid)

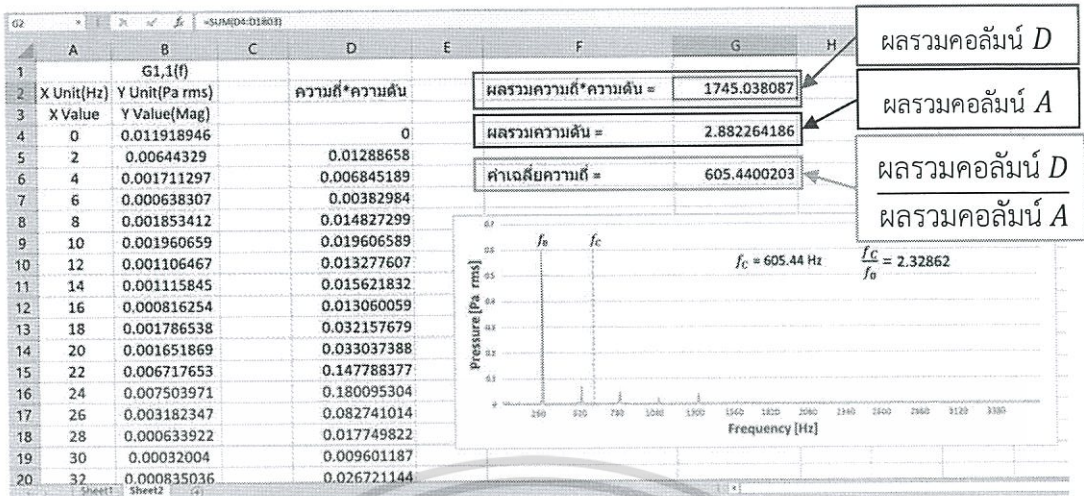
ข้อมูลที่พิจารณา คือค่าเฉลี่ยกำลังสอง (root mean square) ของความดันเสียงของแต่ละความถี่ที่เวลา (t) เท่ากับ 0 ถึง 0.25 วินาที

ค่าเฉลี่ยความถี่ เท่ากับผลรวมของผลคูณของความดันเสียงกับความถี่ ทหารด้วยผลรวมของความดันของข้อมูลทุกตัว การคำนวณผลรวมสามารถทำได้โดยใช้คำสั่ง

$$= \text{SUM}(\text{ข้อมูลตัวแรก} : \text{ข้อมูลตัวสุดท้าย})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการคำนวณค่าเฉลี่ยความถี่ของเส้นไหมถูกแสดงในรูปที่ ข.6



รูปที่ ข.6 ผลการคำนวณค่าเฉลี่ยความถี่ของเส้นไหม

ดังนั้นค่าเฉลี่ยความถี่ (f_c) ของเสียงจากเส้นไหม มีค่าเท่ากับ 605.44 Hz

4)..การคำนวณค่าส่วนประกอบกำลังเสียงของแต่ละฮาร์โมนิก

จากข้อมูลค่าเฉลี่ยกำลังสองของความดันในข้อ 3. สามารถคำนวณหา กำลังเสียงได้จาก

สมการ

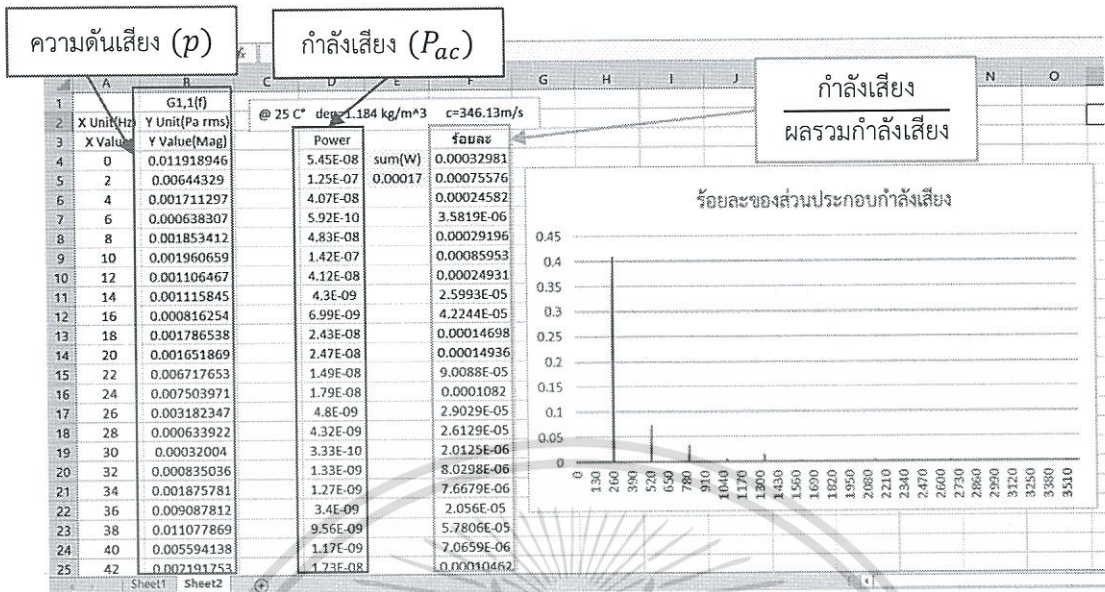
$$P_{ac} = \frac{4\pi(rp)^2}{Q\rho c}$$

เมื่อ

- P_{ac} คือ..กำลังเสียง(W)
 r คือ..ระยะห่างจากจุดกำเนิดเสียง (0.17 เมตร)
 p คือ..ความดันเสียง (Pa)
 Q คือ..ตัวคูณทิศทาง ($Q=2$ สำหรับคลื่นเสียงครึ่งทรงกลม)
 ρ คือ..ความหนาแน่นของอากาศ (1.184 kg/m³ ที่ 25 °c)
 c คือ..ความเร็วของเสียงในอากาศ (346.13 m/s ที่ 25 °c)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนประกอบกำลังเสียงของแต่ละความถี่ คิดเป็นร้อยละโดยหารด้วยผลรวมกำลังเสียงของข้อมูลทุกตัว ดังแสดงในรูปที่ ข.7



รูปที่ ข.7 ส่วนประกอบกำลังเสียงของแต่ละความถี่

ผลรวมร้อยละส่วนประกอบกำลังเสียงของฮาร์โมนิกที่ 2 ถึง 6 มีค่าเท่ากับผลรวมร้อยละส่วนประกอบกำลังของความถี่ 524 Hz , 786 Hz , 1048 Hz , 1310 Hz และ 1572 Hz ซึ่งผลรวมร้อยละส่วนประกอบกำลังเสียงของฮาร์โมนิกที่ 2 ถึง 6 ของเส้นไหมมีค่าเท่ากับ 0.1296

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ระยะเวลาระหว่างตัวโน้ตของดนตรีไทย ในแต่ละจังหวัด

ในส่วนนี้จะอธิบายขั้นตอนการคำนวณหาระยะเวลาระหว่างตัวโน้ตของดนตรีไทยในแต่ละจังหวัด โดยมีขั้นตอนดังนี้

1) เลือกเพลงไทยที่มีจังหวัดต่างกัน โดยเลือกแบบสุ่มตัวอย่าง มีรายชื่อเพลงดังแสดงในตารางที่ ข.1 และคำนวณหาจำนวนโน้ตเฉลี่ยในแต่ละห้องดนตรีจากสมการ

$$\text{จำนวนโน้ตเฉลี่ยในแต่ละห้องดนตรี} = \frac{\text{จำนวนโน้ตทั้งเพลง}}{\text{จำนวนห้องทั้งเพลง}}$$

ตารางที่ ค.1 ตัวอย่างเพลงไทยที่มีจังหวัดต่าง ๆ

จังหวัด	ชื่อเพลง	จำนวนโน้ตเฉลี่ยในแต่ละห้องดนตรี
ชั้นเดียว	คังคาวกีนกล้วย	2.682
	แสนคำนึง ชั้นเดียว	3.375
	โสมส่องแสง ชั้นเดียว	3.156
2 ชั้น	เฉลี่ย	3.071
	ลาวครวญ	2.125
	พม่าแปลง	2.178
	โคกพม่า	2.143
	ธรรณีกรรแสง	2.205
	มอญดูดาว	2.130
	ลาวดวงเดือน	2.395
3 ชั้น	เฉลี่ย	2.196
	นกขมิ้น	1.448
	เขมรไทรโยค	2.104
	เฉลี่ย	1.776

2) นับจำนวนเสียง “ฉิ่ง” และ “ฉับ” ต่อหน้าที่ มีหน่วยเป็น bpm (Beats per minute) โดย

เพลงชั้นเดียวจะมีเสียง “ฉิ่ง” หรือ “ฉับ” 2 ครั้งต่อ 1 ห้องเพลง

เพลง 2 ชั้นจะมีเสียง “ฉิ่ง” หรือ “ฉับ” 1 ครั้งต่อ 1 ห้องเพลง

เพลง 3 ชั้นจะมีเสียง “ฉิ่ง” หรือ “ฉับ” 1 ครั้งต่อ 2 ห้องเพลง

จากการทดลองพบว่าเพลงจังหวัด 2 ชั้น มีจังหวะ 47-54 bpm หรือคิดเป็นเวลาเฉลี่ยต่อห้องเพลงเท่ากับ 1.188 วินาที

3) คำนวณหาระยะเวลาระหว่างตัวโน้ตของดนตรีไทยในแต่ละจังหวัด ได้จากสมการ

$$\text{ระยะเวลาระหว่างตัวโน้ต} = \frac{\text{เวลาเฉลี่ยต่อห้องเพลง}}{\text{จำนวนโน้ตเฉลี่ยต่อห้องเพลง}}$$

ได้ผลดังนี้

ตาราง ค.2 ระยะเวลาระหว่างตัวโน้ตของดนตรีไทย ในแต่ละจังหวัด

จังหวัด	ระยะเวลาระหว่างตัวโน้ต (วินาที)
ชั้นเดียว	0.3868
2 ชั้น	0.541
3 ชั้น	0.669



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้