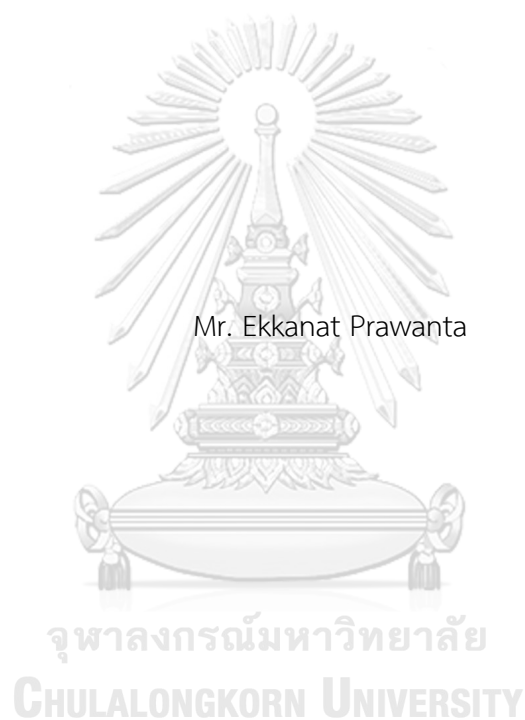


การศึกษาเสียงกระตุ้นเพื่อการตรวจวัดโครงสร้างละเอียดของเสียงสะท้อนจากหูชั้นในแบบดีพีโอเออี
ในกบนาและกบวีว



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A STUDY OF ACOUSTIC STIMULATIONS FOR DETECTION OF FINE STRUCTURE OF
DISTORTION-PRODUCT OTOACOUSTIC EMISSIONS FROM CHINESE EDIBLE FROG AND
NORTH AMERICAN BULLFROG



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Physics
Department of Physics
Faculty of Science
Chulalongkorn University
Academic Year 2019
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาเสียงกระตุ้นเพื่อการตรวจวัดโครงสร้างละเอียด ของเสียงสะท้อนจากหุ้ชั้นในแบบดีพีโอเออีในกบนาและกบ วัว
โดย	นายเอกณัฐ ประวันตา
สาขาวิชา	ฟิสิกส์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.ยุทธนา รุ่งธรรมสกุล

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณะบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุรเชษฐ์ หลิมกำเนิด)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.ยุทธนา รุ่งธรรมสกุล)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐกร ทับทอง)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.วัลย์รติ ลิ้มอภิชาติ)

เอกณัฐ ประวันตา : การศึกษาเสียงกระตุ้นเพื่อการตรวจวัดโครงสร้างละเอียดของเสียงสะท้อนจากหู
ชั้นในแบบดีพีโอเออีในกบนาและกบวัว. (A STUDY OF ACOUSTIC STIMULATIONS FOR
DETECTION OF FINE STRUCTURE OF DISTORTION-PRODUCT OTOACOUSTIC EMISSIONS
FROM CHINESE EDIBLE FROG AND NORTH AMERICAN BULLFROG) อ.ที่ปรึกษาหลัก : อ. ดร.
ยุทธนา รุ่งธรรมสกุล

เมื่อหูชั้นในถูกกระตุ้นด้วยเสียงสองความถี่ จะสามารถสร้างเสียงสะท้อนที่มีความถี่เป็นผลรวมเชิงเส้น
ของความถี่เสียงกระตุ้นทั้งสองได้ เรียกว่า เสียงสะท้อนจากหูชั้นในแบบดีพีโอเออี (Distortion Product
Otoacoustic Emissions, DPOAEs) ซึ่งเสียงดังกล่าวสามารถตรวจวัดได้โดยการนำไมโครโฟนสอดเข้าไปในรูหู
จากการทดลองในมนุษย์พบว่าระดับความเข้มของเสียงดีพีโอเออีที่ความถี่ $2f_1-f_2$ สัมพันธ์กับความถี่ของเสียง
กระตุ้นแบบคล้ายรายคาบ (quasi-periodic) โดยเรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวว่า โครงสร้างละเอียดของเสียง
สะท้อนจากหูชั้นในแบบดีพีโอเออี (DPOAE fine structure) โครงสร้างดังกล่าวอาจเกิดจากคลื่นตามขวางบน
แผ่นเนื้อเยื่อบาซิลลาร์ (basilar membrane) ในอวัยวะรูปก้นหอย (cochlea) ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ เป็นการ
ทดลองวัดโครงสร้างละเอียดของเสียงดีพีโอเออีจากกบสองชนิด คือ กบนา (Chinese edible frog) และกบวัว
(North American bullfrog) ที่หูชั้นในไม่สามารถเกิดคลื่นตามขวางได้ ผลการทดลองพบว่าหูชั้นในของกบ
นา สามารถสร้างโครงสร้างละเอียดของเสียงดีพีโอเออีได้ แม้ว่าโครงสร้างละเอียดนี้จะไม่พบในสัตว์เลี้ยงลูกด้วย
นมชนิดอื่นนอกจากมนุษย์ก็ตาม ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและผลการยับยั้งการสั่นของเยื่อแก้วหูอีกข้างหนึ่ง
บ่งชี้ว่า โครงสร้างละเอียดที่เกิดขึ้นในกบนาไม่ได้เกิดจากรีโซแนนซ์ ของเสียงดีพีโอเออีภายในหูชั้นในและช่อง
ปาก เพื่ออธิบายกระบวนการเกิดโครงสร้างละเอียดของเสียงดีพีโอเออีในหูชั้นในของกบ เราได้พัฒนาแบบจำลอง
ของระบบของตัวสันไม้เชิงเส้นในหนึ่งมิติที่เชื่อมต่อกันด้วยสปริง โดยผลการคำนวณในเบื้องต้นแสดงว่า เมื่อตัวสัน
มีการเรียงกันตามความถี่จำเพาะและได้รับแรงกระตุ้นที่เหมาะสม ระบบสามารถสร้างโครงสร้างละเอียดได้ ซึ่ง
เป็นผลจากการสั่นพ้องของระบบและการแทรกสอดของสัญญาณดีพีโอเออีที่ถูกสร้างจากตัวสันแต่ละตัว จากผล
การศึกษาวิจัยในครั้งนี้เรานำเสนอทฤษฎีทางเลือกที่ใช้ในการอธิบายกระบวนการพื้นฐานในการเกิดโครงสร้าง
ละเอียดของเสียงสะท้อนจากหูชั้นในแบบดีพีโอเออีในสำหรับสัตว์ที่ไม่ใช่สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมได้

สาขาวิชา ฟิสิกส์
ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6072013723 : MAJOR PHYSICS

KEYWORD:

Ekkanat Prawanta : A STUDY OF ACOUSTIC STIMULATIONS FOR DETECTION OF FINE STRUCTURE OF DISTORTION-PRODUCT OTOACOUSTIC EMISSIONS FROM CHINESE EDIBLE FROG AND NORTH AMERICAN BULLFROG. Advisor: Mr. Yuttana Roongthumskul, Ph.D.

Upon stimulations by sounds of two tones, the inner ear can produce acoustic energy whose frequencies correspond to the linear combinations of the stimulus frequencies. These low-amplitude sounds, termed Distortion Product Otoacoustic Emissions (DPOAEs), are detectable in the ear canal. The amplitude of DPOAEs from human exhibits a quasi-periodic dependence on the stimulus frequency. This distinctive characteristic, commonly referred to as a DPOAE fine structure, is attributed to the presence of a transverse wave mediated by a flexible basilar membrane in the cochlea. In this work, we investigated the occurrence of DPOAE fine structures in two anuran species whose inner ears lack a flexible structure that can support a transverse wave. Despite its absence in other mammals, DPOAE fine structure was observed from Chinese edible frog. Results from a manipulation of the body temperature and an immobilization of the unstimulated eardrum suggested that the fine structure was not mainly contributed by an acoustic resonance between the two eardrums via the mouth cavity. To further elucidate the underlying mechanism of the fine structure, we developed a mathematical model of a chain of mechanically coupled nonlinear oscillators. Preliminary results from the model indicated that the fine structure can only be observed when the oscillators were arranged in order of their characteristic frequencies. The system displayed a resonant frequency at which total DPOAEs exhibited a maximum. Furthermore, an interference of DPOAE signals produced by individual oscillators could lead to the occurrence of a local minimum, resulting in a fine structure. Our findings thus provide an alternative mechanism underlying the generation of DPOAE fine structure from a non-mammalian inner ear.

Field of Study: Physics

Student's Signature

Academic Year: 2019

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบคุณอาจารย์ ดร.ยุพธนา รุ่งธรรมสกุล อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัยเป็นอย่างสูงที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำแนวทาง ตลอดจนช่วยตรวจสอบ และแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ อีกทั้งยังให้ความรู้แก่ข้าพเจ้า ทำให้งานวิจัยฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ ขอขอบคุณอาจารย์ วิสิทธิ์ ลีลาศิริวงศ์ อาจารย์ประจำห้องปฏิบัติการสวนศาสตร์ ภาควิชาฟิสิกส์ ที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้สถานที่ทดลอง และขอขอบคุณอาจารย์ ดร.ภาณุพงศ์ ธรรมโชติ ที่ได้ช่วยจัดหาและดูแลสัตว์ทดลองที่ใช้ในการวิจัยในครั้งนี้

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ รศ.ดร. สุรเชษฐ์ หลิมกำเนิด ผศ.ดร.ณัฐกร ทับทอง และ ดร. วัลย์รติ ลิมอภิชาติ ที่ได้ให้ความกรุณาสละเวลามาเป็นประธานกรรมการสอบ กรรมการสอบ และกรรมการสอบภายนอกวิทยานิพนธ์ รวมถึงได้ให้ความรู้ ข้อเสนอแนะ เพื่อเป็นประโยชน์สำหรับการแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้เกิดความถูกต้องและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ข้าพเจ้าขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ถ่ายทอดความรู้ทางฟิสิกส์ และวิทยาศาสตร์ ซึ่งผมสามารถนำมาใช้ในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

ข้าพเจ้าขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำการทดลองและเครื่องมือในการทดลองจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

และสุดท้ายข้าพเจ้าขอขอบคุณโครงการพัฒนาและส่งเสริมผู้มีความสามารถพิเศษทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (พสวท.) ที่ได้มอบทุนสนับสนุนในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

เอกณัฐ ประวันตา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....ค	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....ง	ง
กิตติกรรมประกาศ.....จ	จ
สารบัญ.....ฉ	ฉ
สารบัญรูป.....ฌ	ฌ
บทที่ 1 บทนำ.....1	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....1	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....4	4
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....4	4
1.4 วิธีดำเนินการ.....4	4
1.4.1 ศึกษาเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และกำหนดวัตถุประสงค์ในการศึกษา.....4	4
1.4.2 ออกแบบการทดลองเพื่อวัดเสียงสะท้อนจากหูชั้นในแบบดีพีโอเออี และเตรียมการทดลอง.....5	5
1.4.2.1 การเตรียมการทดลอง.....5	5
1.4.2.2 การเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูล.....5	5
1.4.3 ทำการทดลองวัดเสียงสะท้อนจากหูชั้นในแบบดีพีโอเออีและวิเคราะห์ข้อมูล.....5	5
1.4.4 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายการเกิดเสียงดีพีโอเออี.....5	5
1.4.5 วิเคราะห์ สรุปผลการศึกษา และเขียนวิทยานิพนธ์.....6	6
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....6	6
1.6 ภาพรวม.....6	6
บทที่ 2 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....7	7

2.1 พลวัตของเซลล์รับเสียงในหูชั้นใน	7
2.2 เสียงสะท้อนจากหูชั้นใน.....	10
2.2.1 โครงสร้างละเอียดของเสียงสะท้อนจากหูชั้นในแบบตีฟิโอะเออีจากมนุษย์	10
2.2.2 เสียงสะท้อนแบบตีฟิโอะเออีจากกบ.....	12
2.3 อวัยวะรับเสียงของกบ.....	14
2.3.1 โครงสร้างของหูกบ	14
2.3.2 อวัยวะรับเสียงแอมฟิเบีย น พาทิลลา และบาซิลลาร์ พาทิลลา.....	15
2.3.2.1 แอมฟิเบีย น พาทิลลา	15
2.3.2.2 บาซิลลาร์ พาทิลลา	16
2.4 แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของเซลล์ขนและเสียงโอเออี.....	17
2.4.1 ซุปเปอร์คริติคอลลฮอปฟ์ไบเฟอ์เคชั่น (supercritical Hopf bifurcation).....	17
2.4.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสียงโอเออี.....	18
บทที่ 3 วิธีการทำการวิจัย.....	20
3.1 สัตว์ทดลองและอุปกรณ์การทดลอง.....	20
3.1.1 สัตว์ทดลอง.....	20
3.1.2 อุปกรณ์การทดลอง.....	20
3.2 การทดลอง.....	20
3.3 การวิเคราะห์ข้อมูล	21
3.4 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	22
บทที่ 4 ผลการทดลองวัดเสียงสะท้อนจากหูชั้นในแบบตีฟิโอะเออี	24
4.1 ผลการวัดเสียงสะท้อนจากหูชั้นในแบบตีฟิโอะเออีจากกบนา	24
4.2 ผลของการเปลี่ยนแปลงผลต่างของความถี่เสียงกระตุ้น (f_2-f_1) ที่มีต่อเสียงตีฟิโอะเออี.....	26
4.3 ผลของการเปลี่ยนแปลงความดังของเสียงกระตุ้นที่มีต่อเสียงตีฟิโอะเออี.....	27

4.4 ความถี่และความดังเสียงกระตุ้นที่เหมาะสมในการเกิดโครงสร้างละเอียดของเสียงดีพีโอเออีใน กบนา.....	30
4.5 ผลการวัดเสียงสะท้อนจากหูชั้นในแบบดีพีโอเออีจากกบว้าว	31
4.6 ผลของปัจจัยอื่นๆ ต่อการเกิดโครงสร้างละเอียดของเสียงดีพีโอเออีในกบนา.....	34
4.6.1 ผลของการสั่นของหูอีกข้างหนึ่งต่อกราฟดีพีแกรม	35
4.6.2 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ.....	36
บทที่ 5 ผลการจำลองการเกิดเสียงสะท้อนจากหูชั้นในแบบดีพีโอเออีในกบนาและกบว้าว	37
5.1 ผลจากแบบจำลองตัวสั่นไม่เชิงเส้นหนึ่งตัว	38
5.2 ผลของอันตรกิริยาระหว่างตัวสั่นที่อยู่ติดกัน	39
5.3 ผลของการเรียงตัวสั่นตามความถี่ธรรมชาติ	42
5.4 ผลของแอมพลิจูดของแรงภายนอก.....	43
บทที่ 6 อภิปรายผลการทดลอง.....	45
บทที่ 7 ข้อเสนอสรุปและข้อเสนอแนะ.....	48
รายการอ้างอิง.....	48
บรรณานุกรม	51
ภาคผนวก ก. จฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	53
ภาคผนวก ข. CHULALONGKORN UNIVERSITY	54
ประวัติผู้เขียน	58

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 แผนภาพแสดงส่วนขนของเซลล์รับเสียงจากหูชั้นในของไก่	1
รูปที่ 1.2 แผนภาพแสดงการกระจายของสเปกตรัมพลังงานของเสียงสะท้อนจากหูชั้นใน.....	2
รูปที่ 1.3 โครงสร้างละเอียดของเสียงดีพีโอเออี.....	3
รูปที่ 2.1 โครงสร้างส่วนขนของเซลล์ขนจากหนูและการเคลื่อนที่ของส่วนขนเนื่องจากแรงภายนอก..	7
รูปที่ 2.2 แรงที่ใช้ในการทำให้ส่วนขนของเซลล์ขนเกิดการกระจัดค่าต่างๆ และค่าคงที่สปริงของส่วน ขนกับการกระจัด	8
รูปที่ 2.3 การกระจัดของส่วนขนของเซลล์ขนจากหูชั้นในของกบวัวเมื่อไม่มีแรงกระตุ้นจากภายนอก	8
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของการสั่นของส่วนขนกับแอมพลิจูดของแรงภายนอกจาก เซลล์รับเสียงของกบวัว	9
รูปที่ 2.5 สเปกตรัมของการกระจัดของส่วนขนของเซลล์ขนจากกบวัวเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแรงภายนอก แสดงความถี่ไม่เชิงเส้นที่ความถี่ต่างๆ	9
รูปที่ 2.6 โครงสร้างของหูชั้นในของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม	11
รูปที่ 2.7 สมมติฐานการเกิดโครงสร้างละเอียดของเสียงดีพีโอเออีในมนุษย์.....	11
รูปที่ 2.8 เสียงดีพีโอเออีที่ความถี่ $2f_1-f_2$ จากกบเสื้อดาว	12
รูปที่ 2.9 ผลของความดังของเสียงกระตุ้นต่อของเสียงดีพีโอเออีที่ความถี่ $2f_1-f_2$ จากกบเสื้อดาว.....	13
รูปที่ 2.10 ความเป็นไปได้ในการพบโครงสร้างละเอียดของเสียงดีพีโอเออีจากกบเสื้อดาว.....	14
รูปที่ 2.11 โครงสร้างหูชั้นกลางและหูชั้นในของสัตว์ครึ่งบกครึ่งน้ำ.....	15
รูปที่ 2.12 แอมฟิเบียน พาพิลลา.....	15
รูปที่ 2.13 ความถี่จำเพาะของเซลล์ขนที่ตำแหน่งต่างๆในแอมฟิเบียนพาพิลลาของกบวัว	16
รูปที่ 2.14 บาซิลลาร์ พาพิลลา.....	17
รูปที่ 2.15 ปริภูมิเฟสของคำตอบของสมการเชิงอนุพันธ์ที่แสดงซูเปอร์คริติคอลฮอปฟ์ไบเฟอร์เคชั่น	17

รูปที่ 2.16 แบบจำลองตัวสั่นไม่เชิงเส้น สำหรับใช้ในการอธิบายการเกิดเสียงเอสโอเออี	18
รูปที่ 3.1 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	21
รูปที่ 3.2 แบบจำลองแถวของตัวสั่นไม่เชิงเส้น สำหรับอธิบายการเกิดเสียงดีพีโอเออีในกบ	22
รูปที่ 4.1 เสียงดีพีโอเออีที่ความถี่ต่างๆ เมื่อหูชั้นในของกบนาฏกกระตุ้นด้วยเสียง 2 ความถี่	24
รูปที่ 4.2 ระดับเสียงดีพีโอเออีที่ความถี่ $2f_1-f_2$ และ $2f_2-f_1$ จากกบนา	25
รูปที่ 4.3 ผลของการเปลี่ยนแปลงผลต่างของความถี่เสียงกระตุ้นต่อแอมพลิจูดของเสียงดีพีโอเออีที่ความถี่ $2f_1-f_2$ และ $2f_2-f_1$ จากกบนา.....	26
รูปที่ 4.4 ผลของการเปลี่ยนแปลงความดังของความถี่เสียงกระตุ้นต่อแอมพลิจูดของเสียงดีพีโอเออีที่ความถี่ $2f_1-f_2$ และ $2f_2-f_1$ จากกบนา.....	28
รูปที่ 4.5 แผนภาพดีพีแกรมของกบนาที่ความถี่ $2f_1-f_2$ เมื่อเปลี่ยนแปลงความดังของความถี่เสียงกระตุ้น	29
รูปที่ 4.6 โครงสร้างละเอียดของเสียงดีพีโอเออีจากกบ	30
รูปที่ 4.7 เสียงดีพีโอเออีที่ความถี่ต่างๆ เมื่อหูชั้นในของกบวัวถูกกระตุ้นด้วยเสียง 2 ความถี่	31
รูปที่ 4.8 ผลของการเปลี่ยนแปลงผลต่างของความถี่เสียงกระตุ้นต่อแอมพลิจูดของเสียงดีพีโอเออีที่ความถี่ $2f_1-f_2$ และ $2f_2-f_1$ จากกบวัว.....	32
รูปที่ 4.9 ผลของการเปลี่ยนแปลงความดังของความถี่เสียงกระตุ้นต่อแอมพลิจูดของเสียงดีพีโอเออีที่ความถี่ $2f_1-f_2$ และ $2f_2-f_1$ จากกบวัว.....	33
รูปที่ 4.10 แผนภาพดีพีแกรมของกบวัวที่ความถี่ $2f_1-f_2$ เมื่อเปลี่ยนแปลงความดังของความถี่เสียงกระตุ้น.....	34
รูปที่ 4.11 ผลของการสั้นของหูอีกข้างหนึ่งต่อแอมพลิจูดของเสียงดีพีโอเออีที่ความถี่ $2f_1-f_2$ จากกบนา	35
รูปที่ 4.12 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อแอมพลิจูดของเสียงดีพีโอเออีที่ความถี่ $2f_1-f_2$ จากกบนา	36
รูปที่ 5.1 แอมพลิจูดของความเพี้ยนไม่เชิงเส้นของตัวสั่นที่มีความถี่จำเพาะ 700 เฮิรตซ์	38
รูปที่ 5.2 แสดงความถี่จำเพาะของตัวสั่นที่ตำแหน่งต่างๆ เมื่อตัวสั่นมีการจัดเรียงตามลำดับความถี่จำเพาะของตัวสั่น	39

รูปที่ 5.3 ผลการเปรียบเทียบแอมพลิจูดของผลรวมความเพี้ยนไม่เชิงเส้นที่ความถี่ $2f_1-f_2$ และ $2f_2-f_1$ ของตัวสั่นที่อยู่ติดกันที่มีและไม่มีการเชื่อมกันโดยสปริง.....40

รูปที่ 5.4 แอมพลิจูดและมุมเฟสของการกระจัดที่ความถี่ $2f_1-f_2$ ของตัวสั่นแต่ละตัวเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแรงสองความถี่.....41

รูปที่ 5.5 ผลของการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่สปริงต่อแอมพลิจูดของผลรวมความเพี้ยนไม่เชิงเส้นที่ความถี่ $2f_1-f_2$ และ $2f_2-f_1$42

รูปที่ 5.6 ผลของลักษณะการจัดเรียงของตัวสั่นต่อแอมพลิจูดของผลรวมความเพี้ยนไม่เชิงเส้นที่ความถี่ $2f_1-f_2$43

รูปที่ 5.7 ผลของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดของแรงกระตุ้นต่อแอมพลิจูดของผลรวมความเพี้ยนไม่เชิงเส้นที่ความถี่ $2f_1-f_2$ และ $2f_2-f_1$44

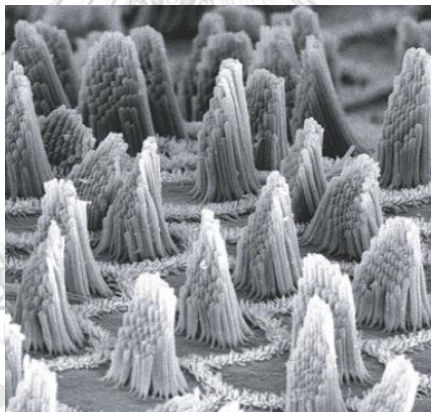


บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

การได้ยินเป็นหนึ่งในประสาทสัมผัสที่จำเป็นต่อการสื่อสารระหว่างสิ่งมีชีวิต สัตว์ส่วนใหญ่มีอวัยวะหรือกลุ่มเซลล์ที่ใช้ในการรับเสียงหรือการสั่นสะเทือน โดยหูของสัตว์แต่ละชนิดมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน เช่น หูของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมประกอบด้วย หูชั้นนอก หูชั้นกลาง และหูชั้นในซึ่งหมายรวมถึงท่อเอมิเซอร์คิวลาร์และกระดูกรูปกันหอยที่มีโครงสร้างซับซ้อนมากกว่าหูชั้นในของสัตว์มีกระดูกสันหลังชนิดอื่นๆ หูของสัตว์เลื้อยคลานและสัตว์ครึ่งบกครึ่งน้ำประกอบด้วยหูชั้นกลางและหูชั้นใน เป็นต้น แม้จะมีโครงสร้างแตกต่างกัน แต่หูของสัตว์มีกระดูกสันหลังล้วนทำหน้าที่รับเสียงโดยการทำงานของเซลล์ขน (hair cell) ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานกลจากคลื่นเสียงเป็นสัญญาณประสาทส่งต่อไปยังสมอง

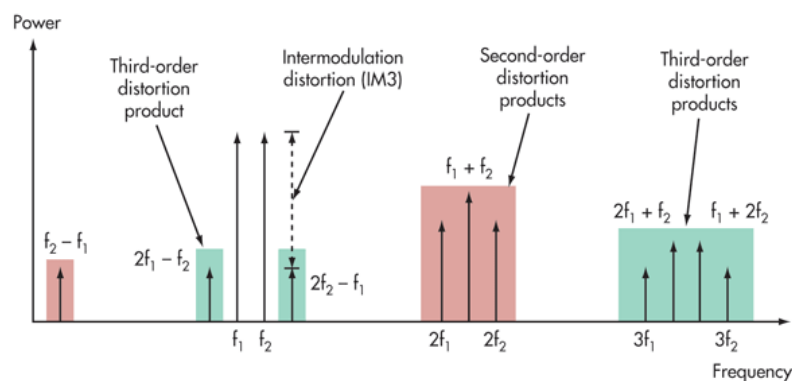


รูปที่ 1.1 แผนภาพแสดงส่วนขนของเซลล์รับเสียงจากหูชั้นในของไก่ ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน [1]

การได้ยินเกิดขึ้นเมื่อเซลล์ขนภายในหูชั้นใน (รูปที่ 1.1) ถูกกระตุ้นโดยคลื่นเสียง ส่วนขนของเซลล์ขน (hair-cell bundle) จะตอบสนองโดยการสั่นซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์ผ่านทางช่องไอออน ส่งผลให้เกิดการนำกระแสประสาทไปยังสมองทำให้เรารับรู้ถึงเสียงที่อยู่รอบตัวเราได้ [1, 2] เซลล์ขนแต่ละเซลล์สามารถตอบสนองได้ดีต่อคลื่นเสียงที่มีความถี่เฉพาะเจาะจง และสามารถสร้างพลังงานกลเพื่อใช้ในการขยายคลื่นเสียงที่มีแอมพลิจูดต่ำที่มีความถี่ดังกล่าวได้ [3]

ปัจจุบันการศึกษาด้านสรีรวิทยาของหูชั้นในในสัตว์หลายชนิดรวมทั้งมนุษย์สามารถบ่งบอกการทำงานของสมบัติทางกายภาพของเซลล์รับเสียงได้ในระดับหนึ่ง อย่างไรก็ตาม เรายังไม่สามารถ

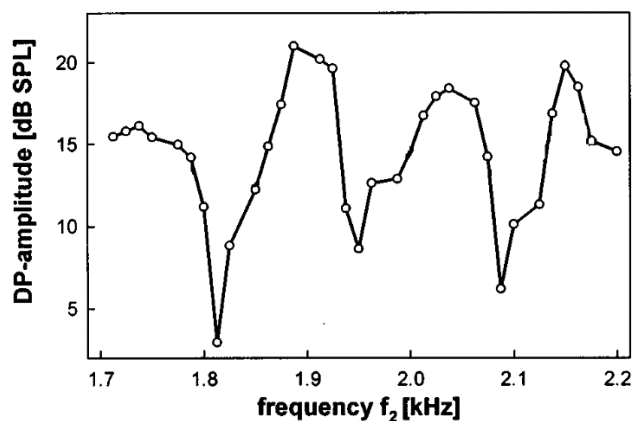
อธิบายกระบวนการรับรู้เสียงของหูชั้นในได้อย่างสมบูรณ์ เช่น การเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ เมื่อถูกกระตุ้นด้วยเสียงที่มีความถี่สูงกว่าค่าคงที่เวลาของเยื่อหุ้มเซลล์ หรือกลไกของเซลล์ขนในการขยายเสียงที่มีความดังในระดับศูนย์เดซิเบล เป็นต้น นอกจากนี้ ปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับหูชั้นในหลายประการยังคงเป็นปัญหาที่ต้องศึกษาวิจัยเพิ่มเติม โดยเฉพาะอย่างยิ่งความสามารถในสร้างเสียงสะท้อนจากหูชั้นใน (Otoacoustic emissions: OAEs) ที่สามารถตรวจวัดได้โดยการสอดไมโครโฟนขนาดเล็กเข้าไปในรูหู เสียงสะท้อนจากหูชั้นในแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ เสียงสะท้อนจากหูชั้นในโดยธรรมชาติ (Spontaneous otoacoustic emissions: SOAEs) และเสียงสะท้อนจากหูชั้นในโดยการกระตุ้น (Evoked otoacoustic emission: EOAEs) เสียงสะท้อนจากหูชั้นในโดยธรรมชาติเกิดขึ้นจากการที่หูชั้นในส่งเสียงออกมาสู่ภายนอกด้วยตัวเองโดยไม่มีเสียงกระตุ้น ซึ่งสามารถพบได้บ่อยในมนุษย์ นกและสัตว์เลื้อยคลาน เช่น ต๊กแตน [4] และจิ้งเหลน [5] เป็นต้น เสียงสะท้อนโดยการกระตุ้นเป็นการตอบสนองของหูชั้นในต่อสัญญาณต่างๆ เช่น การส่งคลื่นเสียงไปยังหูชั้นใน, การกระตุ้นเซลล์ขนโดยตรงด้วยการสร้างความต่างศักย์ไฟฟ้าในหูชั้นใน หรือการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายภายในหูชั้นใน เป็นต้น แล้วหูชั้นในจึงส่งเสียงสะท้อนออกมาสู่ภายนอก



รูปที่ 1.2 แผนภาพแสดงการกระจายของสเปกตรัมพลังงานของเสียงสะท้อนจากหูชั้นในแบบดีพีโอเออี [6]

เสียงสะท้อนจากหูชั้นในแบบดีพีโอเออีหรือเสียงดีพีโอเออี (Distortion-Product Otoacoustic Emissions: DPOAEs) เป็นเสียงสะท้อนจากหูชั้นในโดยการกระตุ้นชนิดหนึ่งที่ใช้อย่างแพร่หลายในทางการแพทย์ เมื่อหูชั้นในถูกกระตุ้นด้วยเสียงสองเสียงที่มีความถี่ใกล้เคียงกัน (เขียนแทนด้วย f_1 และ f_2) จะสามารถสร้างเสียงสะท้อนที่มีความถี่เป็นผลรวมเชิงเส้น (linear combination) ของความถี่เสียงกระตุ้น เช่น $2f_1 \pm f_2$, $2f_2 \pm f_1$, $f_1 \pm f_2$ เป็นต้น (รูปที่ 1.2) ปรากฏการณ์ดังกล่าวบ่งชี้ว่าหูชั้นในมีคุณสมบัติเป็นระบบไม่เชิงเส้น (nonlinear system) โดยทฤษฎีที่เป็นที่ยอมรับในปัจจุบันระบุว่าเสียงดีพีโอเออีเกิดจากคุณสมบัติไม่เชิงเส้นของส่วนขนของเซลล์รับเสียง [2, 7]

เสียงดีพีโอเออีจากมนุษย์มีลักษณะเฉพาะ กล่าวคือมีแอมพลิจูดที่ขึ้นกับความถี่ของเสียง กระตุ้นแบบคล้ายรายคาบ (quasi-periodic) (รูปที่ 1.3) เรียกว่า โครงสร้างละเอียดของเสียงดีพีโอเออี (DPOAE fine structure) [8] ทฤษฎีในปัจจุบันระบุว่าโครงสร้างดังกล่าวเกิดจากการแทรกสอดกันของเสียงดีพีโอเออี 2 สัญญาณ [9, 10] ได้แก่ สัญญาณดีพีโอเออีที่สร้างจากกลุ่มเซลล์รับเสียงที่ตอบสนองต่อเสียงความถี่ระหว่าง f_1 ถึง f_2 และเดินทางออกสู่หูชั้นนอกทันที และสัญญาณดีพีโอเออีที่เกิดจากเซลล์รับเสียงกลุ่มเดียวกัน แต่เกิดการสะท้อนกลับไปมาภายในหูชั้นในก่อนเดินทางออกสู่หูชั้นนอก ความแตกต่างของระยะทางที่สัญญาณทั้งสองเคลื่อนที่ได้ทำให้เกิดความต่างเฟสซึ่งอาจนำไปสู่การแทรกสอดแบบเสริมหรือหักล้าง อย่างไรก็ตาม ทฤษฎีดังกล่าวยังไม่มีผลการทดลองยืนยันอย่างชัดเจน และผลการศึกษาเสียงดีพีโอเออีจากสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมชนิดอื่นซึ่งมีโครงสร้างของหูชั้นในเช่นเดียวกับมนุษย์กลับไม่พบโครงสร้างละเอียดของเสียงดีพีโอเออี ทฤษฎีดังกล่าวจึงอาจไม่สามารถอธิบายการเกิดโครงสร้างละเอียดได้อย่างสมบูรณ์



รูปที่ 1.3 กราฟแสดงโครงสร้างละเอียดของเสียงดีพีโอเออีที่ความถี่ $2f_1-f_2$ ระดับความดังของเสียงดีพีโอเออีขึ้นกับความถี่ของเสียงกระตุ้นแบบคล้ายรายคาบ (quasi-periodic) [11]

ในทางตรงกันข้าม งานวิจัยชิ้นหนึ่งซึ่งศึกษาเสียงดีพีโอเออีจากกบเสือดาวเหนือ (Northern leopard frog) ได้แสดงแนวโน้มว่าอาจเกิดโครงสร้างละเอียดได้ [12] อย่างไรก็ตามปรากฏการณ์ดังกล่าวไม่ถูกอ้างถึงโดยผู้วิจัย หรือมีการศึกษาอย่างเป็นระบบ

ในโครงการวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงมุ่งศึกษาโครงสร้างละเอียดของเสียงดีพีโอเออีจากกบ การค้นพบปรากฏการณ์ดังกล่าวจะบ่งชี้ว่าโครงสร้างละเอียดของเสียงดีพีโอเออีอาจเกิดขึ้นได้จากหูชั้นในที่มีขนาดเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับความยาวคลื่นเสียง และมีโครงสร้างทางกายวิภาคแตกต่างจากหูชั้นในของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมโดยสิ้นเชิง และมีความจำเป็นต้องพัฒนาทฤษฎีทางเลือกอื่นที่เป็นไปได้เพื่ออธิบายการเกิดโครงสร้างละเอียดดังกล่าว อย่างไรก็ตาม หากเสียงดีพีโอเออีจากกบไม่แสดงโครงสร้างละเอียด จะเป็นการยืนยันความถูกต้องของทฤษฎีการแทรกสอดของสัญญาณดีพีโอเออีสองสัญญาณ

การใช้กบเป็นสัตว์ทดลองในโครงการวิจัยนี้มีข้อได้เปรียบสองประการคือ ประการที่หนึ่ง หูชั้นในของกบประกอบด้วยอวัยวะรับเสียง 2 ชนิด ได้แก่ แอมฟิเบียน พาพิลลา (Amphibian papilla, AP) และ บาซิลลาร์ พาพิลลา (Basillar papilla, BP) ซึ่งมีการเรียงตัวของเซลล์รับเสียงแตกต่างกัน การเปรียบเทียบเสียงสะท้อนจากสองอวัยวะจะช่วยบ่งชี้กลไกที่จำเป็นสำหรับการเกิดโครงสร้างละเอียดของเสียงดีพีโอเออีได้ และประการที่สอง เนื่องจากการศึกษาสมบัติเชิงกลของเซลล์รับเสียงมักทำในเซลล์จากหูชั้นในของกบ ทำให้เราสามารถนำข้อมูลจากงานวิจัยมาวิเคราะห์ผลการทดลองและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เบื้องต้นได้เหมาะสมยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อวัดเสียงสะท้อนจากหูชั้นในแบบดีพีโอเออีในกบนาและกบวัว
2. เพื่อหาช่วงความถี่และความดังของเสียงกระตุ้นที่เหมาะสมในการทำให้เกิดโครงสร้างละเอียดของเสียงสะท้อนจากหูชั้นในแบบดีพีโอเออีในกบนาและกบวัว
3. เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เบื้องต้นเพื่ออธิบายกลไกการเกิดเสียงสะท้อนจากหูชั้นในแบบดีพีโอเออีในกบนาและกบวัว

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

โครงการวิจัยนี้จะทำการวัดเสียงสะท้อนจากหูชั้นในแบบดีพีโอเออีในกบสองชนิด ได้แก่ กบนา (Chinese edible frog, *Hoplobatrachus rugulosus*) จำนวน 20 ตัว และกบวัว (North American bullfrog, *Lithobates catesbianus*) จำนวน 4 ตัว โดยส่งคลื่นเสียงสองคลื่นที่มีความถี่ต่างกันเล็กน้อยเข้าไปในหูสัตว์ทดลอง จากนั้นทำการวิเคราะห์ความดังและความถี่ของเสียงกระตุ้นที่ทำให้เกิดโครงสร้างละเอียดของเสียงดีพีโอเออี ผลการทดลองจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการคำนวณเชิงตัวเลขเบื้องต้นจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

1.4 วิธีดำเนินการ

1.4.1 ศึกษาเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และกำหนดวัตถุประสงค์ในการศึกษา

ศึกษาดำรงและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสำหรับใช้เป็นองค์ความรู้พื้นฐานในการทำโครงการวิจัยภายใต้ขอบเขตของการศึกษาเสียงสะท้อนแบบดีพีโอเออี โดยความรู้พื้นฐานที่สำคัญในการทำโครงการวิจัยในครั้งนี้ ได้แก่ โครงสร้างทางกายวิภาคและสรีรวิทยา รวมทั้งกระบวนการทำงานของหูชั้นในโดยเฉพาะของสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบก และพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น (Nonlinear dynamics) จากนั้นกำหนดวัตถุประสงค์ในการศึกษาโดยใช้องค์ความรู้ที่ได้ศึกษาเอกสารที่เกี่ยวข้องทั้งหมด และตั้งสมมติฐานในการทำโครงการวิจัย

1.4.2 ออกแบบการทดลองเพื่อวัดเสียงสะท้อนจากหูชั้นในแบบตีฟิโอะเออี และเตรียมการทดลอง

ออกแบบการทดลองโดยกำหนดชนิดและจำนวนของสัตว์ทดลอง กำหนดช่วงความถี่และช่วงความดังของเสียงที่ใช้กระตุ้นเสียงตีฟิโอะเออีให้เหมาะสมกับชนิดสัตว์ทดลอง จากนั้นจัดเตรียมอุปกรณ์การทดลอง และเขียนโปรแกรมสำหรับเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูล

1.4.2.1 การเตรียมการทดลอง

การทดลองวัดเสียงตีฟิโอะเออีจะกระทำในห้องไร้เสียงสะท้อน (anechoic chamber) ภายในห้องปฏิบัติการสวนศาสตร์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อุปกรณ์การทดลองประกอบด้วย ไมโครโฟนสัญญาณรบกวนต่ำ ลำโพง เครื่องขยายสัญญาณ และตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล เสียงกระตุ้นแต่ละความถี่จะถูกส่งจากลำโพงคนละตัว เสียงตีฟิโอะเออีจะถูกวัดโดยไมโครโฟนขนาดเล็กซึ่งติดอยู่ที่ปลายท่อพลาสติกรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 เซนติเมตร อีกปลายหนึ่งของท่อใช้ครอบเยื่อแก้วหูข้างหนึ่งของกบ กบจะถูกวางอยู่ในภาตใส่น้ำแล้วคลุมด้วยผ้าก๊อซเพื่อรักษาความชื้นสำหรับการหายใจทางผิวหนัง สัญญาณจากไมโครโฟนจะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณดิจิตอลโดยตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล

1.4.2.2 การเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูล

ตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอลจะถูกควบคุมโดยโปรแกรม LabVIEW สัญญาณจากไมโครโฟนจะถูกบันทึกที่ความถี่ 50,000 เฮิร์ตซ์ เพื่อการวิเคราะห์ภายหลัง

1.4.3 ทำการทดลองวัดเสียงสะท้อนจากหูชั้นในแบบตีฟิโอะเออีและวิเคราะห์ข้อมูล

กบจะถูกวางยาสลบด้วยโซเดียมเพนโทบาร์บิทอล (sodium pentobarbital) ขนาด 30-40 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัวหนึ่งกิโลกรัม เมื่อกบสลบจะถูกนำเข้าห้องไร้เสียงสะท้อนเพื่อทำการทดลอง เสียงกระตุ้นที่ความถี่และความดังต่างๆกันจะถูกส่งจากลำโพงไปยังท่อพลาสติกผ่านทางท่อนำเสียงขนาดเล็ก การทดลองแต่ละครั้งใช้ระยะเวลาประมาณ 4 ถึง 5 ชั่วโมง การวิเคราะห์เพื่อคำนวณแอมพลิจูดและเฟสของสัญญาณจะกระทำภายหลังการทดลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB

1.4.4 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายการเกิดเสียงตีฟิโอะเออี

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในโครงการนี้จะอยู่บนพื้นฐานของทฤษฎีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น โดยจะจำลองเซลล์รับเสียงแต่ละเซลล์เป็นตัวสั่นไม่เชิงเส้น ตัวสั่นเหล่านี้จะมีการเชื่อมต่อระหว่างกันแบบเชิงกล (mechanical coupling) ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะทางกายวิภาคของหูชั้นใน กล่าวคือ เซลล์รับเสียงทั้งหมดถูกยึดกับเยื่อคลุม (tectorial membrane) โดยผู้วิจัยจะศึกษาผลของแรงกระตุ้นสองความถี่ต่อระบบของตัวสั่นที่มีการเรียงลำดับความถี่ธรรมชาติทั้งจากสูงไปต่ำและแบบสุ่ม เพื่อเปรียบเทียบกับเสียงตีฟิโอะเออีที่วัดได้จากการทดลอง

1.4.5 วิเคราะห์ สรุปผลการศึกษา และเขียนวิทยานิพนธ์

วิเคราะห์และสรุปผลการศึกษาที่ได้จากการทดลองและผลการจำลองเชิงตัวเลขเบื้องต้นจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ข้อมูลโครงสร้างละเอียดของเสียงดีพีโอเออีในกบและสามารถระบุความสำคัญของการเรียงตัวของเซลล์รับเสียงที่มีต่อการเกิดโครงสร้างละเอียดดังกล่าว
2. ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถอธิบายการเกิดเสียงสะท้อนจากหูชั้นในแบบดีพีโอเออีของกบในเบื้องต้น
3. สามารถนำไปสู่ทฤษฎีทางเลือกที่อาจนำไปอธิบายการเกิดเสียงดีพีโอเออีในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมโดยเฉพาะมนุษย์

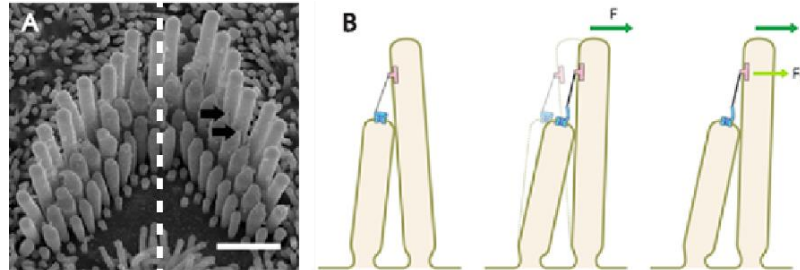
1.6 ภาพรวม

ในบทถัดไปจะกล่าวถึงแนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ ซึ่งประกอบด้วยสมการฮอปฟ์ไบเฟอเคชัน (Hopf bifurcation) อวัยวะรับเสียงของกบ และเสียงสะท้อนจากหูชั้นใน ตามลำดับ บทที่ 3 จะกล่าวถึงวิธีการทดลองซึ่งประกอบด้วยรายละเอียดของการเตรียมสัตว์ทดลอง สถานที่ทดลอง การกำหนดตัวแปรทดลอง และวิธีการทำการทดลอง ตามลำดับ บทที่ 4 จะแสดงผลการทดลองวัดเสียงสะท้อนจากหูชั้นในแบบดีพีโอเออีจากกบนาและกบวิว จากนั้นในบทที่ 5 จะกล่าวถึงผลการคำนวณเชิงตัวเลขเบื้องต้นจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยเปรียบเทียบกับผลการทดลองในบทที่ 4 และในบทที่ 6 เป็นการอภิปรายผลการทดลองและผลการคำนวณในบทที่ 4 และ 5 จากนั้นในบทสุดท้ายบทที่ 7 จะกล่าวถึงข้อสรุปและข้อเสนอแนะในการทำงานวิจัยในครั้งนี้

บทที่ 2

แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

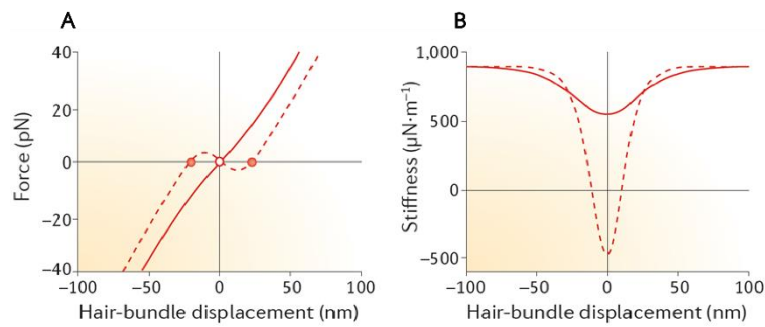
2.1 พลวัตของเซลล์รับเสียงในหูชั้นใน



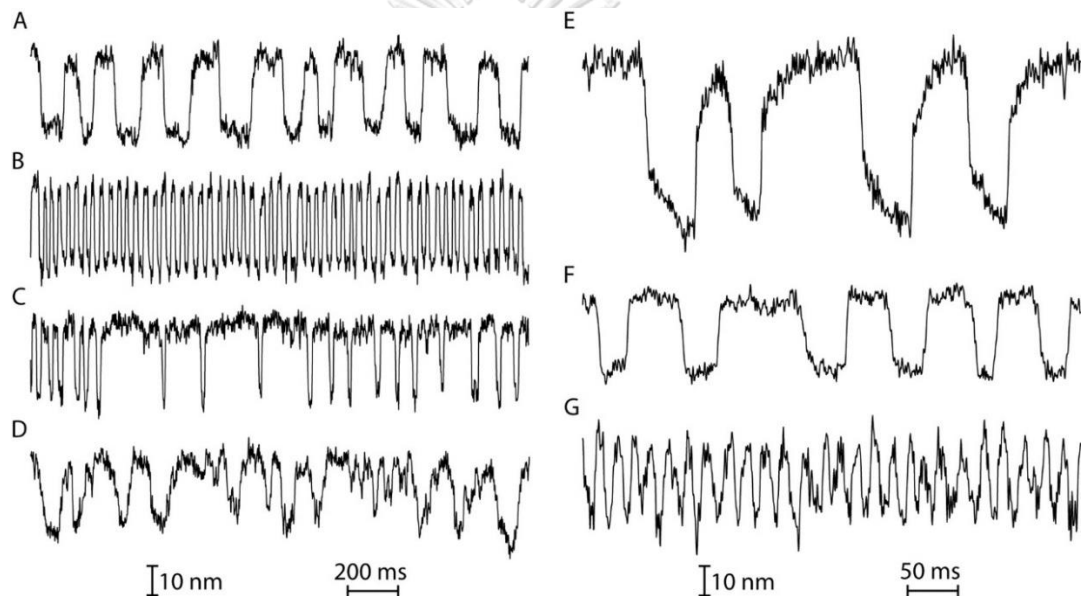
รูปที่ 2.1 (A) โครงสร้างส่วนขนของเซลล์ขนจากหนู (rat) (มาตราส่วนรูปแท่งมีความยาว 1 ไมครอน) เส้นประแสดงทิศการกระจัดของส่วนขนที่ทำให้ช่องไอออนเปิดหรือปิด (B) แผนภาพแสดงการเคลื่อนที่ของส่วนขนเนื่องจากแรงภายนอกที่ทำให้ช่องไอออนเปิด [2]

เซลล์ภายในหูชั้นในของสัตว์ที่ทำหน้าที่รับเสียงเรียกว่า เซลล์ขน (hair cell) ซึ่งประกอบด้วย ตัวเซลล์ซึ่งฝังอยู่ในเยื่อบุผิว (epithelium) และส่วนขน (hair-cell bundle) ซึ่งเป็นกลุ่มของซีเลีย (cilia) ที่เรียงลดหลั่นกันตามความสูง ดังรูปที่ 2.1(A) เมื่อส่วนขนได้รับแรงเนื่องจากคลื่นเสียงในทิศตามเส้นประในรูปที่ 2.1(A) จะเกิดการกระจัดซึ่งทำให้เส้นใยขนาดเล็กที่เชื่อมต่อกันระหว่างซีเลีย (cilia) ที่อยู่ติดกันเกิดแรงดึง โดยแรงดึงนี้จะดึงให้ช่องไอออนที่ติดอยู่ที่ปลายข้างหนึ่งของเส้นใยเปิดออกดังรูปที่ 2.1(B) ไอออนบวกจึงสามารถไหลเข้าสู่เซลล์และทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์ ส่งผลให้เกิดการปล่อยสารสื่อประสาทที่ฐานของเซลล์ และกระตุ้นให้เกิดกระแสประสาทส่งไปยังสมองในลำดับต่อไป

ส่วนขนของเซลล์รับเสียงแสดงคุณสมบัติเป็นตัวสั่นไม่เชิงเส้น กล่าวคือ เมื่อออกแรงคงที่กระทำต่อส่วนขน การกระจัดจะมีค่าขึ้นกับแรงแบบไม่เชิงเส้น (รูปที่ 2.2(A)) โดยเมื่อการกระจัดมีค่าน้อย ค่าคงที่สปริงของส่วนขนจะมีค่าต่ำ และอาจติดลบได้เมื่อสภาพแวดล้อมทางเคมีเหมาะสม (รูปที่ 2.2 เส้นประ) ลักษณะดังกล่าวทำให้ระบบขาดเสถียรภาพ และเป็นสมบัติหนึ่งที่น่าไปสู่การสั่นตัวเองของส่วนขนแม้ไม่ได้รับแรงกระตุ้นจากภายนอก (spontaneous oscillations) (รูปที่ 2.3) [13, 14]

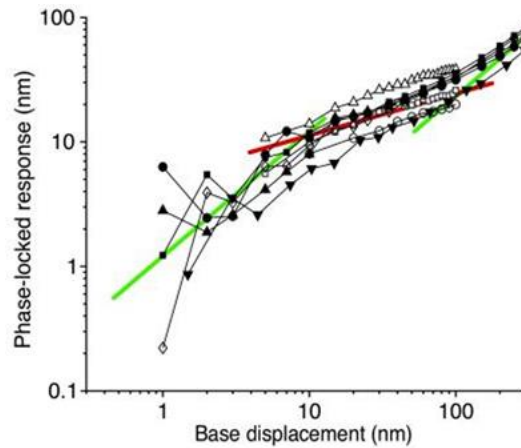


รูปที่ 2.2 (A) แผนภาพแสดงแรงที่ใช้ในการทำให้ส่วนขนของเซลล์ขนเกิดการกระจัดค่าต่างๆ (B) แผนภาพแสดงค่าคงที่สปริงของส่วนขนกับการกระจัด เปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ความเข้มข้นของแคลเซียมในสารละลายมีค่าสูง (เส้นทึบ) และต่ำ (เส้นประ) [13]



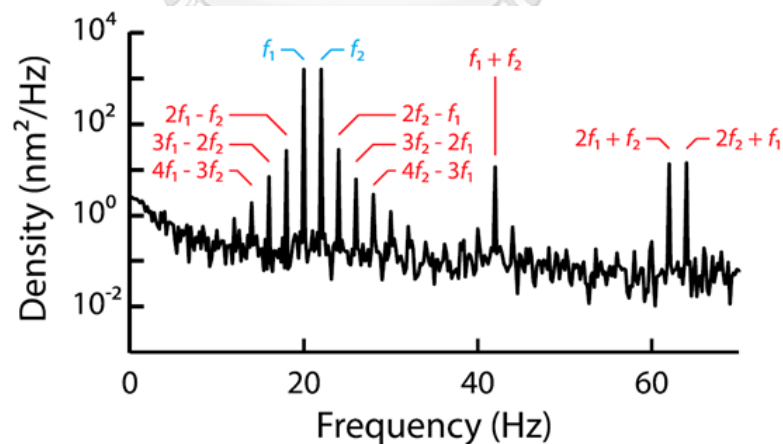
รูปที่ 2.3 การกระจัดของส่วนขนของเซลล์ขนจากหูชั้นในของกบวัวเมื่อไม่มีแรงกระตุ้นจากภายนอก (ข้อมูลจากเซลล์ขน 7 เซลล์) [14]

เมื่อออกแรงภายนอกที่มีลักษณะเป็นคลื่นรูปไซน์กระทำต่อส่วนขนของเซลล์ พบว่าแอมพลิจูดของการกระจัด (R) ขึ้นอยู่กับแอมพลิจูดของแรง (F) แบบไม่เชิงเส้น (compressive nonlinearity) ดังรูปที่ 2.4 โดยอธิบายได้ดังสมการ $R \sim F^{1/3}$ ซึ่งในทางชีววิทยาอาจมีบทบาทในการช่วยป้องกันความเสียหายของเซลล์ขนจากเสียงที่มีความดังมากเกินไป



รูปที่ 2.4 แอมพลิจูดของการสั่นของส่วนขนเพิ่มขึ้นกับแอมพลิจูดของแรงภายนอกแบบไม่เชิงเส้น ที่แรงภายนอกแอมพลิจูดต่ำ แอมพลิจูดของการกระจัดขึ้นอยู่กับขนาดของแรงภายนอกแบบเชิงเส้น (เส้นสีเขียว ซึ่งมีความชันเท่ากับ 1) เมื่อแอมพลิจูดของแรงเพิ่มขึ้น การกระจัดมีขนาดเพิ่มขึ้นแบบไม่เชิงเส้น (เส้นสีแดง ซึ่งมีความชันเท่ากับ 0.3) ผลการทดลองจากเซลล์รับเสียงของกบวัว เมื่อความถี่ของแรงกระตุ้นมีค่าใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของเซลล์ขน [15]

เมื่อถูกรบกวนด้วยแรงภายนอกที่มีมากกว่า 2 ความถี่ การกระจัดของส่วนขนสามารถแสดงความถี่ที่สอดคล้องกับผลรวมเชิงเส้นของความถี่ของแรง เรียกว่า ความเพี้ยนไม่เชิงเส้น (nonlinear distortion) ดังรูปที่ 2.5 สมบัตินี้นำไปสู่ข้อสันนิษฐานว่าส่วนขนของเซลล์รับเสียงเป็นแหล่งกำเนิดของเสียงสะท้อนจากหูชั้นในแบบดีพีโอเออี



รูปที่ 2.5 สเปกตรัมของการกระจัดของส่วนขนของเซลล์ขนจากกบวัวเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแรงภายนอก $F(t) = F \sin(2\pi f_1 t) + F \sin(2\pi f_2 t)$ โดยที่ $F = 10.1$ พิโคนิวตัน ความถี่ $f_1 = 20$ และ $f_2 = 22$ เฮิร์ตซ์ การกระจัดของเซลล์แสดงความเพี้ยนไม่เชิงเส้น (nonlinear distortion) ที่ความถี่ต่างๆ [7]

2.2 เสียงสะท้อนจากหูชั้นใน

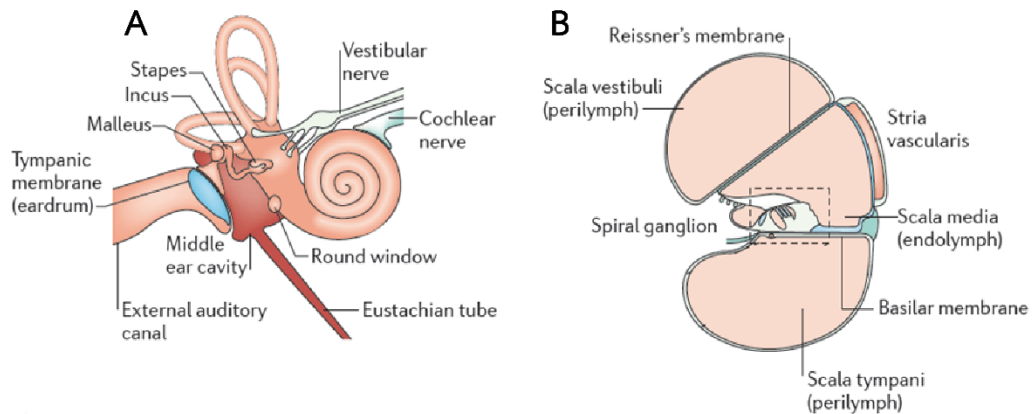
เสียงสะท้อนจากหูชั้นใน (Otoacoustic emissions: OAEs) เป็นเสียงที่หูชั้นในของสัตว์ที่มีชีวิตสร้างขึ้น สามารถตรวจวัดได้โดยการนำไมโครโฟนสอดเข้าไปในรูหูที่ต้องการวัด เสียงสะท้อนจากหูชั้นในแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ เสียงสะท้อนจากหูชั้นในโดยธรรมชาติหรือเสียงเอสโอเออี (Spontaneous otoacoustic emissions: SOAEs) และ เสียงสะท้อนจากหูชั้นในโดยการกระตุ้นหรือเสียงอีโอเออี (Evoked otoacoustic emission: EOAEs)

เสียงดีพีโอเออีเป็นเสียงที่เกิดจากการกระตุ้นหูชั้นในด้วยเสียงสองความถี่ (f_1 และ f_2) หูชั้นในสามารถตอบสนองโดยสร้างเสียงสะท้อนที่ความถี่ซึ่งเป็นผลรวมเชิงเส้นของ f_1 และ f_2 เช่น $2f_1 \pm f_2$, $2f_2 \pm f_1$, $f_1 \pm f_2$ เป็นต้น การตรวจพบเสียงดีพีโอเออีจากหูชั้นในของสัตว์มีกระดูกสันหลังรวมถึงมนุษย์เป็นข้อบ่งชี้ว่า หูชั้นในมีองค์ประกอบที่มีสมบัติไม่เชิงเส้น ทฤษฎีที่เป็นที่ยอมรับในปัจจุบันตั้งสมมติฐานว่าเสียงสะท้อนดังกล่าวเกิดจากเซลล์ขน เนื่องจากส่วนขนของเซลล์ขนแสดงสมบัติไม่เชิงเส้นหลายประการ รวมทั้งสามารถแสดงความเพี้ยนไม่เชิงเส้น (nonlinear distortion) ของการกระจัดได้ ดังที่ได้กล่าวในหัวข้อ 2.1 (รูปที่ 2.5) สมมติฐานดังกล่าวทำให้เสียงดีพีโอเออี ถูกนำมาใช้ในทางการแพทย์เพื่อประเมินการทำงานของเซลล์ขน โดยหากพบว่าระดับความดันเสียงดีพีโอเออีที่ความถี่ใดความถี่หนึ่งเบากว่าปกติ ในทางการแพทย์จะวินิจฉัยว่าเซลล์ขนที่ตอบสนองต่อความถี่ดังกล่าวมีความผิดปกติ

2.2.1 โครงสร้างละเอียดของเสียงสะท้อนจากหูชั้นในแบบดีพีโอเออีจากมนุษย์

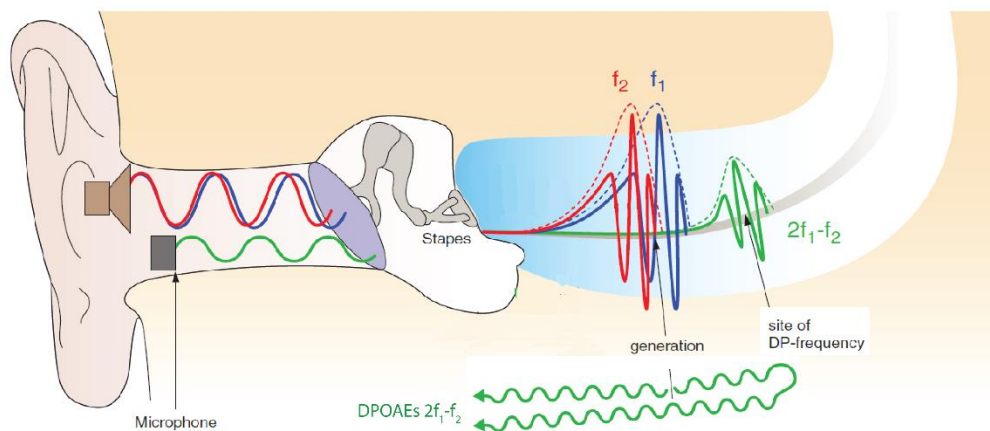
เสียงดีพีโอเออีที่วัดจากมนุษย์มีลักษณะเฉพาะ กล่าวคือระดับความเข้มของเสียงดีพีโอเออีที่ความถี่ $2f_1 - f_2$ สัมพันธ์กับความถี่ของเสียงกระตุ้นแบบคล้ายรายคาบ (quasi-periodic) ดังรูปที่ 1.3 โดยเรียกลักษณะดังกล่าวว่า โครงสร้างละเอียดของเสียงสะท้อนจากหูชั้นในแบบดีพีโอเออี (DPOAE fine structure) [8] ทฤษฎีที่ได้รับการยอมรับในปัจจุบันตั้งสมมติฐานว่าโครงสร้างละเอียดเกิดจากการแทรกสอดกันของเสียงดีพีโอเออีสองสัญญาณภายในหูชั้นใน [9, 10]

หูชั้นในของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมประกอบด้วยอวัยวะรูปก้นหอย ซึ่งมีลักษณะเป็นท่อของเหลวสามท่อวางตัวขนานกัน แผ่นเนื้อเยื่อหนึ่งที่คั่นระหว่างท่อตามแนวยาวเรียกว่าเนื้อเยื่อบาซิลลาร์ (basilar membrane) ดังรูปที่ 2.6(B) โดยเซลล์ขนเรียงตัวอยู่บนเนื้อเยื่อดังกล่าวตามลำดับความถี่ธรรมชาติของเซลล์จากสูงไปต่ำ เนื้อเยื่อบาซิลลาร์มีความกว้างและความยืดหยุ่นไม่คงที่ ขึ้นกับตำแหน่งของเนื้อเยื่อ เมื่อคลื่นเสียงเดินทางจากหูชั้นกลางสู่หูชั้นใน ผลต่างของความดันในท่อทั้งสองทำให้เกิดคลื่นตามขวางซึ่งเคลื่อนที่ตามแผ่นเนื้อเยื่อบาซิลลาร์ การเปลี่ยนแปลงความยืดหยุ่นของเนื้อเยื่อที่ตำแหน่งต่างๆ ทำให้คลื่นดังกล่าวมีแอมพลิจูดสูงสุด ณ ตำแหน่งที่เซลล์ขนมีความถี่ธรรมชาติใกล้เคียงกับความถี่ของคลื่นเสียง



รูปที่ 2.6 (A) หูชั้นในของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมมีลักษณะเป็นท่อขดคล้ายกันหอย (B) ภายในท่อประกอบด้วยท่อของเหลวขนาดเล็กสามท่อวางขนานกัน และมีแผ่นเนื้อเยื่อบาซิลลาร์คั่นตามแนวยาว ซึ่งมีเซลล์ขนเรียงอยู่บนแผ่นเนื้อเยื่อดังกล่าว [13]

ปรากฏการณ์คลื่นตามขวางในหูชั้นในยังไม่ถูกค้นพบในสัตว์ครึ่งบกครึ่งน้ำ และเนื่องจากหูชั้นในของกบไม่มีแผ่นเนื้อเยื่อที่ยึดหยุ่นเช่นเดียวกับเนื้อเยื่อบาซิลลาร์ในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม จึงเป็นที่เชื่อกันว่าคลื่นตามขวางนี้ไม่อาจเกิดขึ้นได้ในสัตว์ครึ่งบกครึ่งน้ำ



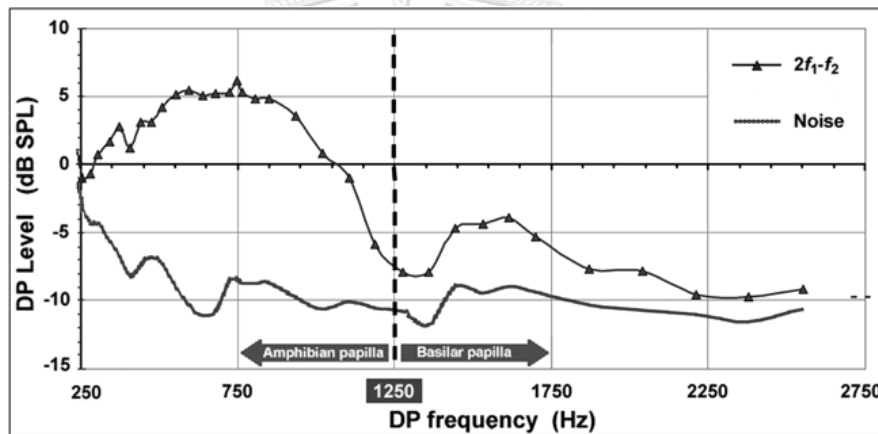
รูปที่ 2.7 เมื่อหูชั้นในของมนุษย์ได้รับเสียงกระตุ้น f_1 (คลื่นตามขวางแสดงด้วยเส้นสีน้ำเงิน) และ f_2 (เส้นสีแดง) กลุ่มเซลล์ขนที่อยู่ระหว่างความถี่ทั้งสองจะสร้างเสียงดีพีโอเออี ส่วนหนึ่งกลายเป็นเสียงแล้วออกจากหูชั้นใน อีกส่วนหนึ่งเคลื่อนที่ต่อไปยังปลายอีกข้างของอวัยวะรูปกันหอย (เส้นสีเขียว) แล้วสะท้อนกลับออกมาจากหูชั้นใน ทำให้เสียงทั้งสองเกิดการแทรกสอดกันกลายเป็นโครงสร้างละเอียดของเสียงดีพีโอเออี [2]

เมื่อหูชั้นในของมนุษย์ถูกรบกวนด้วยเสียงความถี่ f_1 และ f_2 กลุ่มเซลล์ขนที่ตอบสนองได้ดีต่อเสียงความถี่ระหว่าง f_1 ถึง f_2 จะถูกกระตุ้นและสร้างเสียงดีพีโอเออีที่ความถี่ต่างๆซึ่งเป็นผลรวมเชิงเส้นของ f_1 และ f_2 เช่น $2f_1-f_2$ สัญญาณดังกล่าวจะเคลื่อนที่ไปในสองทิศทาง ได้แก่ ทิศทางที่ออกจาก

หูชั้นในสู่หูชั้นนอก เกิดเป็นเสียงดีพีโอเออีสัญญาณที่หนึ่ง และทิศทางที่มุ่งหน้าสู่ส่วนปลายของอวัยวะรูปก้นหอย ซึ่งคลื่นนี้จะถูกสะท้อนกลับ ณ จุดที่มีความผิดปกติหรือความไม่ต่อเนื่อง (irregularity) ของสมบัติทางกายภาพของเซลล์ขนหรือเนื้อเยื่อบาซิลลาร์ และเดินทางออกสู่หูชั้นนอกเป็นเสียงดีพีโอเออีสัญญาณที่สอง การแทรกสอดของสัญญาณทั้งสองที่มีเฟสต่างกันอย่างนี้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความดังของเสียงดีพีโอเออีขึ้นอยู่กับความถี่ของเสียงกระตุ้น

แม้หูชั้นในของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมทุกชนิดจะมีโครงสร้างคล้ายคลึงกัน แต่โครงสร้างละเอียดของเสียงดีพีโอเออีพบได้ในมนุษย์เท่านั้น นอกจากนี้ ยังไม่ปรากฏหลักฐานจากการทดลองว่าการสะท้อนของสัญญาณดีพีโอเออีภายในหูชั้นในสามารถเกิดขึ้นได้จริง ทฤษฎีดังกล่าวจึงอาจยังไม่สามารถอธิบายการเกิดโครงสร้างละเอียดของเสียงดีพีโอเออีได้อย่างสมบูรณ์

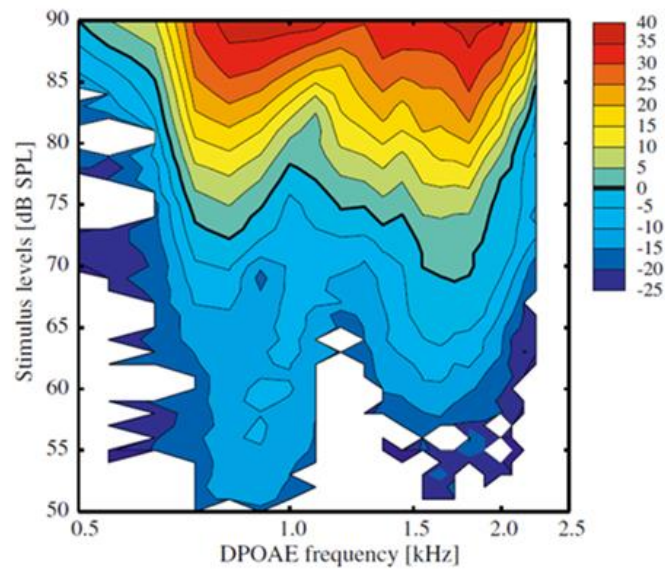
2.2.2 เสียงสะท้อนแบบดีพีโอเออีจากกบ



รูปที่ 2.8 กราฟแสดงแอมพลิจูดของเสียงดีพีโอเออีที่ความถี่ $2f_1-f_2$ จากกบเสือดาว (Northern leopard frog) เสียงกระตุ้นมีความดัง 60 เดซิเบล และความถี่เสียงกระตุ้น f_2 จาก 240 เฮิรตซ์ ถึง 3,000 เฮิรตซ์ โดย $f_2 = 1.15f_1$ [16].

การศึกษาเสียงดีพีโอเออีจากกบในวงศ์กบนา¹ (Ranidae) [12, 16, 17] พบว่าเมื่อเปลี่ยนความถี่ของเสียงกระตุ้นทั้งสอง โดยให้อัตราส่วนของความถี่ทั้งสอง (f_2/f_1) มีค่าคงที่ ระดับความดังของเสียงดีพีโอเออีมีค่าขึ้นอยู่กับความถี่ของเสียงกระตุ้นแบบทวิฐานนิยม (bimodal) กล่าวคือแอมพลิจูดของเสียงสะท้อนมีค่าสูงสุดที่ความถี่กระตุ้นสองค่า ตัวอย่างเช่น เสียงดีพีโอเออีจากกบเสือดาว มีความดังสูงสุดเมื่อเสียงสะท้อนมีความถี่ประมาณ 750 และ 1,600 เฮิรตซ์ ซึ่งสอดคล้องกับความถี่ของการตอบสนองจาก แอมฟิเบียน พาพิลลา และ บาซิลลาร์ พาพิลลา ตามลำดับ (รูปที่ 2.8)

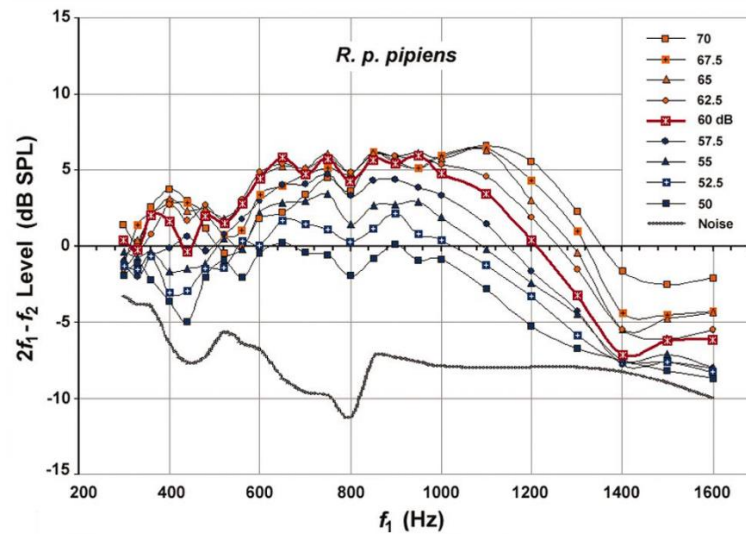
¹ กบในวงศ์กบนา (Ranidae) ไม่ได้หมายความถึงกบนาที่เราใช้ในการทดลองนี้ แต่หมายถึงกลุ่มของกบในวงศ์ Ranidae ที่รวมถึงกบนา กบวัว กบเสือดาวด้วย



รูปที่ 2.9 แผนภาพแสดงความดังของเสียงดีพีโอเออีที่ความถี่ $2f_1-f_2$ ที่ความดังของเสียงกระตุ้นจาก 50 ถึง 90 เดซิเบล ความถี่ของเสียงกระตุ้น f_1 มีค่าตั้งแต่ 500 เฮิรตซ์ ถึง 2,500 เฮิรตซ์ โดย $f_2 = 1.1f_1$ [12] ที่เสียงกระตุ้นประมาณ 68 เดซิเบล พบว่าแอมพลิจูดของเสียงดีพีโอเออีแสดงจุดสูงสุดสามตำแหน่ง

จากการทดลองวัดเสียงดีพีโอเออีจากกบเสือดาว (leopard frog) พบว่าแอมพลิจูดของเสียงสะท้อนอาจแสดงการเปลี่ยนแปลงกับความถี่ของเสียงกระตุ้นในลักษณะที่คล้ายกับโครงสร้างละเอียดของเสียงดีพีโอเออีได้ (รูปที่ 2.9) โดยเมื่อเสียงกระตุ้นมีระดับความดังเหมาะสม พบว่าช่วงความถี่ต่ำที่สอดคล้องกับช่วงความถี่ของการตอบสนองของแอมฟิเบียน พาพิลลา สามารถแสดงจุดสูงสุดสัมพัทธ์มากกว่าหนึ่งจุด อย่างไรก็ตามปรากฏการณ์นี้ไม่ถูกอ้างถึงในงานวิจัยดังกล่าว [12] งานวิจัยอีกชิ้นหนึ่งได้อ้างถึงความเป็นไปได้ในการเกิดโครงสร้างละเอียดของเสียงดีพีโอเออีจากหูชั้นในของกบวัว (รูปที่ 2.10) อย่างไรก็ตามผลการทดลองที่ผู้วิจัยนำเสนอ นั้นมิได้แสดงโครงสร้างละเอียดอย่างชัดเจน [16]

หากเสียงดีพีโอเออีจากกบสามารถแสดงโครงสร้างละเอียดได้ ปรากฏการณ์ดังกล่าวจะไม่อาจอธิบายได้ด้วยทฤษฎีการแทรกสอดของสัญญาณดีพีโอเออีสองสัญญาณ เนื่องจากแอมฟิเบียน พาพิลลามีขนาดเล็กเทียบกับความยาวคลื่นเสียงในของเหลว ระยะทางที่สัญญาณดีพีโอเออีเคลื่อนที่ต่างกันจะไม่ทำให้เกิดความต่างเฟสมากพอจะนำไปสู่การแทรกสอดแบบหักล้าง จึงอาจจำเป็นต้องพัฒนาทฤษฎีทางเลือกเพื่ออธิบายการเกิดโครงสร้างละเอียดของเสียงสะท้อนในกบ



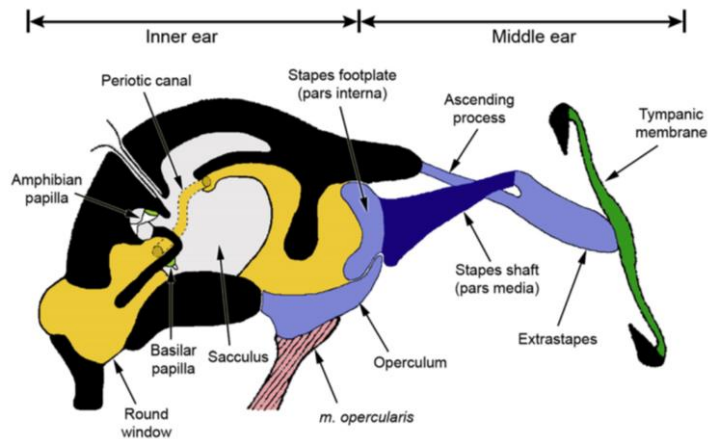
รูปที่ 2.10 กราฟแสดงแอมพลิจูดของเสียงดีพีโอเออีที่ความถี่ $2f_1-f_2$ จากกบเสือตาว (Northern leopard frog) เสียงกระตุ้นมีความดัง 50 ถึง 70 เดซิเบล และความถี่ f_2 จาก 300 เฮิรตซ์ ถึง 1,600 เฮิรตซ์ โดย $f_2 = 1.15f_1$ [16]

นอกจากนี้ จากผลทดลองดังกล่าว ผู้วิจัยได้ตั้งข้อสังเกตว่าลักษณะที่คล้ายกับโครงสร้างละเอียดสามารถพบได้ในช่วงความถี่ของแอมฟิเบียน พาพิลลาซึ่งแอมพลิจูดของเสียงสะท้อนเกิดการเปลี่ยนแปลงจาก 1 จุดสูงสุดสัมพัทธ์เป็น 2 จุดสูงสุดสัมพัทธ์ ผู้วิจัยจึงตั้งสมมติฐานว่าโครงสร้างละเอียดของเสียงดีพีโอเออีสามารถเกิดขึ้นได้ที่แอมฟิเบียน พาพิลลาของกบ ซึ่งเกิดจากลักษณะการจัดเรียงตัวของเซลล์ขนในแอมฟิเบียน พาพิลลาที่เรียงตัวกันตามลำดับความถี่จำเพาะ

2.3 อวัยวะรับเสียงของกบ

2.3.1 โครงสร้างของหูกบ

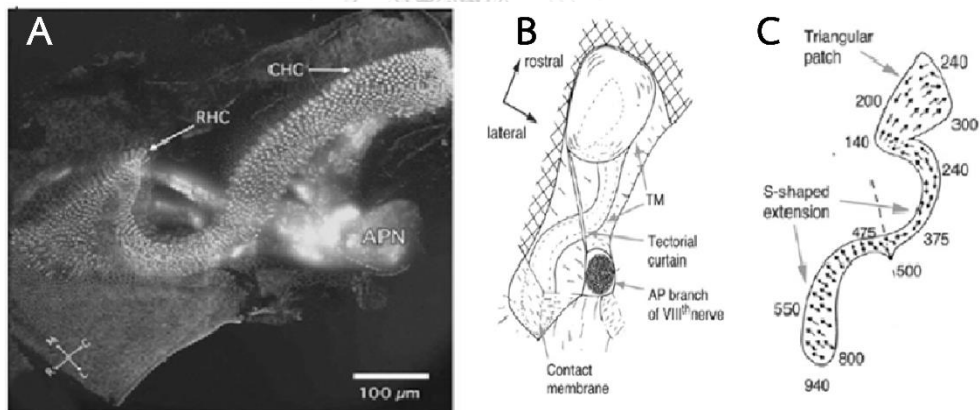
หูของสัตว์ครึ่งบกครึ่งน้ำในอันดับกบ (anuran amphibians) ประกอบด้วยหูชั้นกลางและหูชั้นใน โดยไม่มีหูชั้นนอก ดังรูปที่ 2.11 หูชั้นในประกอบด้วย 2 อวัยวะรับเสียง ได้แก่ แอมฟิเบียน พาพิลลา และบาซิลลาร์ พาพิลลา นอกจากนี้ยังประกอบด้วยอวัยวะอื่น ๆ ที่รับการสั่นสะเทือนความถี่ต่ำ ได้แก่ แซกคิวลัส (sacculus) ยูทริเคิล (utricle) และลาจีนนา (lagena) คลื่นเสียงจะถูกส่งผ่านไปยังอวัยวะเหล่านี้ผ่านท่อของเหลวขนาดต่างๆกัน ความแตกต่างของอิมพีแดนซ์ทางเสียง (acoustic impedance) ของแต่ละท่อทำให้พลังงานกลของเสียงถูกส่งผ่านไปยังอวัยวะที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับความถี่ของเสียง [18]



รูปที่ 2.11 หูชั้นกลางของสัตว์ครึ่งบกครึ่งน้ำประกอบด้วยกระดูกสองชิ้น ได้แก่ กระดูกโกลน (stapes) และกระดูกโกลนใหญ่ (extra stapes) หูชั้นในประกอบด้วยอวัยวะต่างๆซึ่งตอบสนองต่อแรงสั่นสะเทือนที่มีความถี่ต่างๆกัน โดยอวัยวะซึ่งตอบสนองต่อเสียงได้แก่ แอมฟิเบียน พาพิลลา และ บาซิลลาร์ พาพิลลา [19]

2.3.2 อวัยวะรับเสียงแอมฟิเบียน พาพิลลา และบาซิลลาร์ พาพิลลา

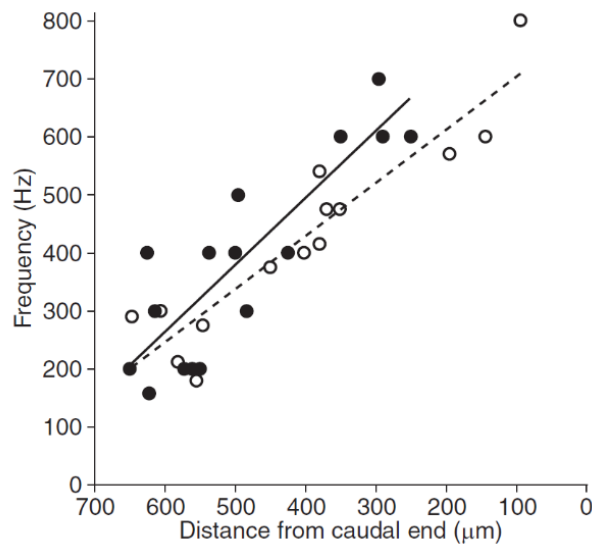
2.3.2.1 แอมฟิเบียน พาพิลลา



รูปที่ 2.12 (A) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอลแสดงเซลล์ขนในแอมฟิเบียน พาพิลลา ของกบหัว (จุดสว่าง) ซึ่งเรียงตัวอยู่บนพื้นผิวที่มีลักษณะเรียวยาว โดยแบ่งออกเป็น เซลล์ขนส่วนหัว (rostral hair cell, RHC) และเซลล์ขนส่วนหาง (caudal hair cell, CHC) (B) แผนภาพแสดงโครงสร้างของแอมฟิเบียน พาพิลลา (C) แผนภาพแสดงทิศทางการเปิดช่องไอออนของส่วนขนของ เซลล์รับเสียงในแอมฟิเบียน พาพิลลา [20, 21]

เซลล์ขนในแอมฟิเบียน พาพิลลาเรียงตัวบนพื้นผิวลักษณะเป็นแผ่นเรียวยาว แบ่งเป็น 2 ส่วน ต่อเนื่องถึงกัน ส่วนหัว (rostral) มีลักษณะคล้ายกับสี่เหลี่ยมผืนผ้าความกว้างประมาณ 30 เซลล์ขน และส่วนหาง (caudal) มีลักษณะคล้ายตัวโอเมกาความกว้างประมาณ 6-10 เซลล์ขน

ดั่งรูปที่ 2.12(A) เซลล์ทั้งหมดถูกปกคลุมด้วยเยื่อคลุม (tectorial membrane) ซึ่งมีลักษณะเป็นก้อนเนื้อเยื่อหนา โดยทิศทางการเรียงตัวของเซลล์ขน (แนวเส้นประในรูปที่ 2.1(A)) บ่งชี้ว่าเยื่อคลุม (tectorial membrane) และเซลล์ขนในบริเวณบริเวณส่วนหัวจะสั้นในทิศทางตามยาวของพาพิลลา และบริเวณส่วนหางจะสั้นในทิศทางตามขวางดั่งรูปที่ 2.12(B)



รูปที่ 2.13 แสดงความถี่จำเพาะของเซลล์ขนที่ตำแหน่งต่างๆในแอมฟิเบียนพาพิลลาของกบหัว ข้อมูลได้จากการวัดความถี่ของแรงกระตุ้นที่ทำให้เกิดการปล่อยสารสื่อประสาทมากที่สุด (จุดสีดำ) และความถี่ของแรงที่ทำให้อัตราการเกิดกระแสประสาทสูงสุด (จุดสีขาว) [19]

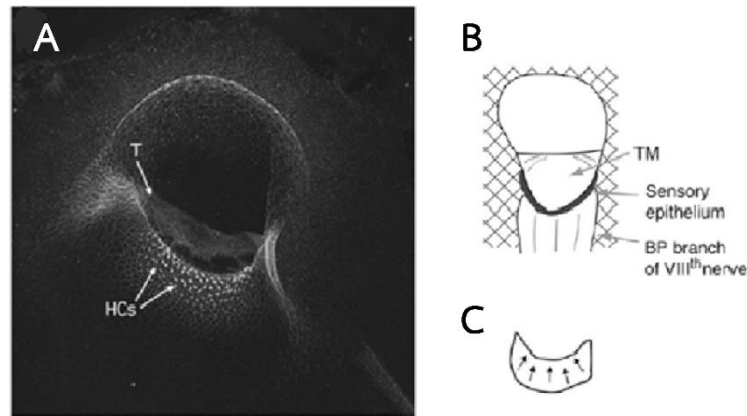
การเรียงตัวของเซลล์ขนในแอมฟิเบียน พาพิลลา จะเรียงตัวตามลำดับความถี่จำเพาะของแต่ละเซลล์ โดยจากส่วนหัวถึงส่วนหาง เซลล์ขนจะเรียงลำดับตามความถี่จำเพาะจากน้อยไปมาก ดั่งรูปที่ 2.12(C) สำหรับกบหัว เซลล์รับเสียงจะตอบสนองได้ดีในช่วงความถี่ประมาณ 100 ถึง 1,000 เฮิรตซ์

ความถี่จำเพาะของเซลล์ขนในแอมฟิเบียน พาพิลลาก็ับระยะห่างจากปลายส่วนหาง มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น ดั่งรูปที่ 2.13 ซึ่งแตกต่างจากเซลล์ขนในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมที่มีความสัมพันธ์ของความถี่จำเพาะกับตำแหน่งเป็นแบบเอกซ์โพเนนเชียล (exponential) [22]

2.3.2.2 บาซิลลาร์ พาพิลลา

เซลล์ขนบนบาซิลลาร์ พาพิลลาเรียงตัวกันอยู่ที่ผิวด้านในของโครงสร้างลักษณะคล้ายวงแหวน ดั่งรูปที่ 2.14(A) ซึ่งการเคลื่อนที่ของส่วนขนจะอยู่ในแนวรัศมีความโค้งของบาซิลลาร์ พาพิลลา ดั่งรูปที่ 2.14(C) การเรียงตัวของเซลล์ขนบนบาซิลลาร์ พาพิลลา ไม่มีการเรียงตัวกันตามความถี่

แต่เป็นการกระจายตัวกันอย่างสม่ำเสมอในพื้นที่แคบๆ สำหรับกบวัว เซลล์รับเสียงจะตอบสนองได้ดีในช่วงความถี่ประมาณ 1,000 ถึง 1,500 เฮิรตซ์

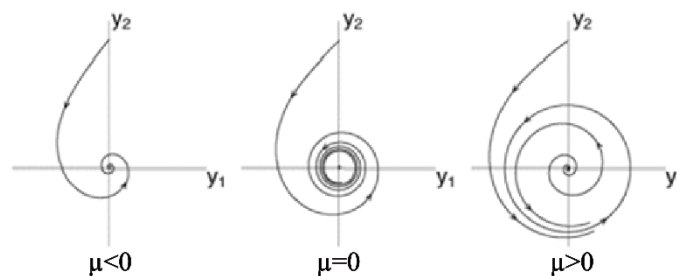


รูปที่ 2.14 (A) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอลแสดงเซลล์ขนในบาซิลลาร์ พาพิลลาของกบวัว (จุดสว่าง) ซึ่ง เรียงตัวอยู่บนพื้นผิวด้านในของโครงสร้างลักษณะคล้ายวงแหวน (B) แผนภาพแสดงโครงสร้างของบาซิลลาร์ พาพิลลา (C) แผนภาพแสดงทิศทางการเปิดช่องไอออนของส่วนขนของเซลล์รับเสียงในบาซิลลาร์ พาพิลลา [20, 21]

2.4 แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของเซลล์ขนและเสียงไอเออี

2.4.1 ซุปเปอร์คริติคอลลอปปี้ไบเฟอร์เคชัน (supercritical Hopf bifurcation)

การกระจัดของส่วนขนของเซลล์รับเสียงสามารถอธิบายได้โดยสมการเชิงอนุพันธ์แบบไม่เชิงเส้นที่แสดงฮอปป์ไบเฟอร์เคชัน (Hopf bifurcation) ซึ่งปริภูมิเฟสของคำตอบของสมการแสดง stable fixed point หรือ stable limit cycle ขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ควบคุม (control parameter)



รูปที่ 2.15 ปริภูมิเฟสของคำตอบของสมการเชิงอนุพันธ์ที่แสดงซุปเปอร์คริติคอลลอปปี้ไบเฟอร์เคชัน (supercritical Hopf bifurcation) แสดง stable fixed point หรือ Limit cycle oscillation เมื่อพารามิเตอร์ควบคุม (μ) เปลี่ยนแปลง [23]

สมการรูปทั่วไป (Normal form) ของระบบที่แสดงซูเปอร์คริติคอลฮอปฟ์ไบเฟอร์เคชัน (supercritical Hopf bifurcation) สามารถแสดงได้ดังนี้

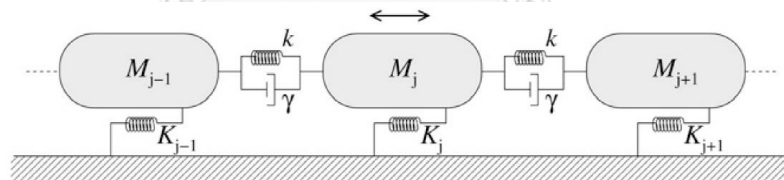
$$\dot{Z} = (\mu + i\omega_0)Z - |Z|^2 Z \quad (2.1)$$

โดยที่ Z เป็นจำนวนเชิงซ้อน ซึ่งมีส่วนจริง (real part) ของ Z เป็นการกระจัดของตัวสั่น, μ เป็นพารามิเตอร์ควบคุม (control parameter) และ ω_0 เป็นความถี่จำเพาะของตัวสั่น

สมการที่ 2.1 ถูกนำมาใช้อธิบายพลศาสตร์ไม่เชิงเส้นของเซลล์รับเสียงหลายประการ เช่น การแสดง limit-cycle oscillation ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นตัวเองของเซลล์ขน, การที่แอมพลิจูดของส่วนขนขึ้นอยู่กักับแอมพลิจูดของแรงภายนอกแบบไม่เชิงเส้น (compressive nonlinearity) และการเกิดความเพี้ยนไม่เชิงเส้น (nonlinear distortion) เนื่องจากแรงกระตุ้นสองความถี่ [24, 25] (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข.)

2.4.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสียงโอเออี

ปัจจุบันยังไม่มีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายการเกิดเสียงดีพีโอเออีในสัตว์มีกระดูกสันหลังชั้นต่ำที่ปราศจากคลื่นตามขวางบนเนื้อเยื่อในหูชั้นใน อย่างไรก็ตาม แบบจำลองของระบบของตัวสั่นไม่เชิงเส้นที่แสดงฮอปฟ์ไบเฟอร์เคชัน (Hopf bifurcation) ถูกใช้ในการอธิบายการเกิดเสียงเอสโอเออี (SOAEs) จากสัตว์เลื้อยคลาน [26, 27]



รูปที่ 2.16 แบบจำลองตัวสั่นไม่เชิงเส้นเชื่อมต่อกันด้วยสปริงและความหนืดของของเหลว สำหรับใช้ในการอธิบายการเกิดเสียงเอสโอเออี [27]

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เสนอโดย Vifan และ Duke [27] เป็นแบบจำลองที่ถูกใช้ในการอธิบายการเกิดเสียงเอสโอเออี (SOAEs) โดยอธิบายหูชั้นในด้วยแถวของตัวสั่นไม่เชิงเส้นที่แสดงซูเปอร์คริติคอลฮอปฟ์ไบเฟอร์เคชัน (supercritical Hopf bifurcation) ตัวสั่นที่อยู่ติดกันมีอันตรกิริยาต่อกันโดยสปริงที่เชื่อมระหว่างตัวสั่นและความหนืดของของเหลว ดังรูปที่ 2.16

$$\begin{aligned} \dot{Z}_j = & (i\omega_j + \varepsilon_j)Z_j + (d_R + id_I)(Z_{j+1} + Z_{j-1} - 2Z_j) \\ & + \zeta_j(t) - B|Z_j|^2 Z_j \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\text{เมื่อ } Z_j = X_j - \frac{1}{\omega_j} \dot{X}_j$$

โดยที่	X_j	คือ การกระจัดของตัวสั่น
	ω_j	คือ ความถี่จำเพาะของตัวสั่น
	ε_j	คือ ตัวแปรควบคุม ซึ่งบ่งบอกถึงความหน่วง (effective damping)
	d_R	คือ ผลของความหนืดของของเหลว
	d_I	คือ ผลของค่าคงที่สปริงที่เชื่อมระหว่างตัวสั่น
	ζ_j	คือ สัญญาณรบกวน
	B	คือ สัมประสิทธิ์ของความไม่เชิงเส้น

แบบจำลองนี้ไม่พิจารณาถึงความเป็นไปได้ของการเกิดคลื่นตามขวางภายในหูชั้นใน จึงเหมาะสมในการอธิบายการเกิดเสียงเอซโอเออีของสัตว์มีกระดูกสันหลังที่ไม่ใช่สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม ในกรณีที่ไม่มีแรงจากภายนอก ผลการศึกษาแบบจำลองของ Vilfan และ Duke แสดงว่า ตัวสั่นจะถูกแบ่งออกเป็นกลุ่มๆ โดยทุกตัวสั่นในกลุ่มจะสั่นที่ความถี่เท่ากันที่ประมาณค่าเฉลี่ยของความถี่จำเพาะของตัวสั่นในกลุ่มนั้นๆ การรวมกลุ่มของตัวสั่นนี้สามารถอธิบายการกระจายของความถี่ของเสียงเอซโอเออีจากสัตว์เลื้อยคลานได้

แบบจำลองดังกล่าวจะถูกใช้เป็นตัวแบบในการพัฒนาเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ อธิบายการเกิดเสียงสะท้อนจากหูชั้นในแบบดีฟิโอะเออีในกบนาและกบวัวสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ โดยการปรับปรุงลักษณะของแบบจำลองให้สอดคล้องกับวัฏจักรรับเสียงแอมฟิเบียน พาพิลลาของกบ

บทที่ 3

วิธีการทำการวิจัย

3.1 สัตว์ทดลองและอุปกรณ์การทดลอง

3.1.1 สัตว์ทดลอง

งานวิจัยชิ้นนี้ทำการวัดเสียงตีพีโอเออีจากหูชั้นในของกบ 2 ชนิด ได้แก่ กบนา (Chinese edible frog) จำนวน 20 ตัว และกบวัว (North American bullfrog) จำนวน 4 ตัว สัตว์ทดลองจะถูกวางยาสลบด้วยโซเดียมเพนโทบาร์บิทอล (sodium pentobarbital) ขนาด 30-40 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัวหนึ่งกิโลกรัม โดยวิธีการฉีดผ่านช่องท้อง (intraperitoneal injection)

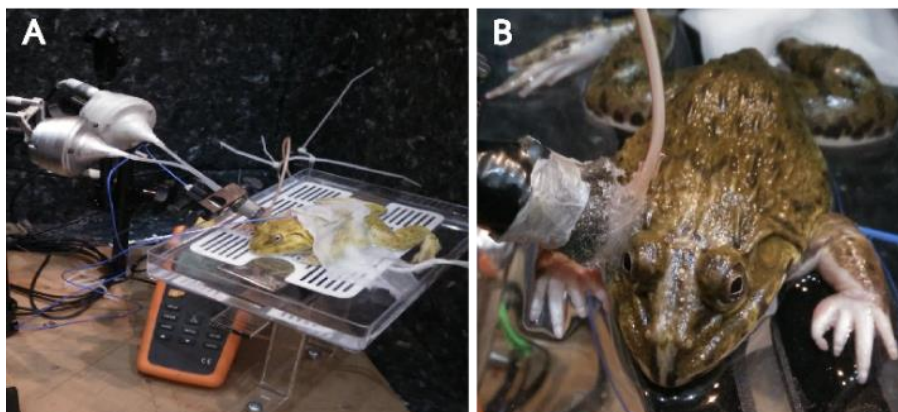
3.1.2 อุปกรณ์การทดลอง

1. ยาสลบสัตว์ทดลองชนิดโซเดียมเพนโทบาร์บิทอล (sodium pentobarbital)
2. ไมโครโฟนสัญญาณรบกวนต่ำ (ER10B+, Etymotic research)
3. ลำโพง 2 ตัว (MF1 speaker, Tucker-Devis technologies)
4. กล่องเก็บเสียง
5. อุปกรณ์แปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล (data acquisition card, NI PCIe 6353)
6. คอมพิวเตอร์

3.2 การทดลอง

สัตว์ทดลองที่สลบแล้วจะถูกนำไปวางไว้ที่แท่นวางสัตว์ในกล่องเก็บเสียงที่อยู่ภายในห้องไร้เสียงสะท้อน (anechoic chamber) ภายในห้องปฏิบัติการสวณศาสตร์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เยื่อแก้วหูข้างหนึ่งของสัตว์ทดลองจะถูกครอบด้วยท่อพลาสติก ซึ่งปลายท่อต่อกับไมโครโฟนและท่อขนาดเล็กจำนวน 2 ท่อที่เชื่อมต่อกับลำโพง 2 ตัว ดังรูปที่ 3.1

เสียงตีพีโอเออีจะถูกกระตุ้นโดยการส่งเสียงสองความถี่ (f_1 และ f_2) ที่ระดับความเข้มเสียงเท่ากันเป็นเวลา 2 ถึง 4 วินาที เนื่องจากยังไม่มีการศึกษาความถี่ที่เซลล์รับเสียงของกบนาตอบสนองได้ดี จึงเลือกช่วงความถี่ที่สอดคล้องกับช่วงการได้ยินของกบวัวซึ่งเป็นกบในวงศ์เดียวกัน มีขนาดใกล้เคียงกัน และมีถิ่นอาศัยคล้ายกัน คือประมาณ 200 ถึง 2,000 เฮิรตซ์ โดยทั่วไป ผลต่างของความถี่ของเสียงกระตุ้น (f_1-f_2) จะถูกกำหนดให้เป็นค่าคงที่ อย่างไรก็ตามในบางการทดลอง ความถี่ของเสียงกระตุ้นจะถูกเปลี่ยนแปลงโดยมีอัตราส่วนระหว่างความถี่ของเสียงกระตุ้น (f_2/f_1) คงที่



รูปที่ 3.1 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

สัญญาณจากไมโครโฟนซึ่งเป็นสัญญาณอนาลอกจะถูกแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิทัลด้วยการ์ดเก็บข้อมูล (National Instruments รุ่น PCIe 6353) ที่อัตราการซิกตัวอย่าง (sampling rate) 50,000 เฮิรตซ์ แล้วบันทึกเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลต่อไปภายหลัง ซึ่งการทำงานของอุปกรณ์ทั้งหมดถูกควบคุมโดยคอมพิวเตอร์ภายนอกห้องไร้เสียงสะท้อนผ่านโปรแกรม LabVIEW™

3.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

สัญญาณที่บันทึกได้จากไมโครโฟนจะถูกแปลงเป็นสัญญาณความดันด้วยค่าคงที่ 5 โวลต์ต่อปาสคาล สัญญาณดังกล่าวประกอบด้วยสัญญาณเสียงกระตุ้นและเสียงสะท้อนแบบดีพีโอเออี จากนั้นวิเคราะห์ระดับความเข้มของเสียงสะท้อน ด้วยกระบวนการการแปลงฟูเรียร์แบบจำกัดเวลา (Finite-time Fourier transform) ด้วยเทคนิคการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (FFT) [28] สัญญาณจะถูกแบ่งเป็นช่วงๆ ช่วงละ 0.1 วินาที แต่ละช่วงสัญญาณไม่มีการซ้อนทับกัน เนื่องจากขณะทำการทดลองสัตว์ทดลองจะมีการหายใจเป็นช่วงๆ จึงต้องมีการคัดกรองสัญญาณบางส่วนออก โดยในการคัดกรองสัญญาณจะทำการคำนวณค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแอมพลิจูดสูงสุดของทุกช่วงสัญญาณ และกำจัดช่วงสัญญาณที่มีค่าแอมพลิจูดสูงสุดมากกว่าค่าเฉลี่ยเกิน 2 เท่าของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานออกไปจากการวิเคราะห์ จากนั้นจึงนำขนาดของสเปกตรัมที่เหลือมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยแล้วจึงทำการแปลงสัญญาณเสียงให้อยู่ในหน่วยเดซิเบลของความดันเสียง (Sound Pressure Level, SPL) โดยสมการที่ 3.1

$$SPL = 20 \log(P / P_0) \quad (3.1)$$

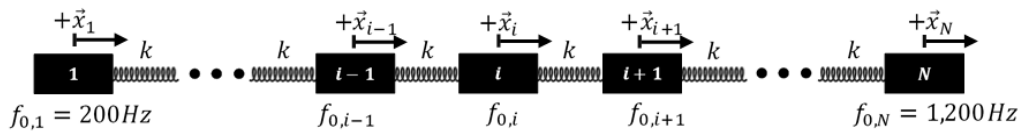
โดยที่ SPL คือ ระดับความดันเสียง (dB)

P คือ ความดันของเสียงที่วัดได้ (Pa)

P_0 คือ ความดันของเสียงที่ระดับ 0 เดซิเบล ($20 \mu Pa$)

3.4 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในโครงการวิจัยนี้พัฒนาขึ้นเพื่ออธิบายการเกิดเสียงสะท้อนจากหูชั้นในแบบตีฟิโอะเออีในกบนาและกบวัวในเชิงทฤษฎี อย่างไรก็ตาม แบบจำลองดังกล่าวเป็นเพียงการศึกษาในขั้นต้นเท่านั้น



รูปที่ 3.2 ตัวสั้น N ตัววางเรียงกันโดยมีสปริงค่าคงที่ k เชื่อมระหว่างแต่ละตัวสั้น โดยที่ความถี่จำเพาะของตัวสั้นมีค่าตั้งแต่ 200 ถึง 1,200 เฮิรตซ์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้พัฒนาจากข้อสมมติฐานว่าปัจจัยที่จำเป็นในการเกิดโครงสร้างละเอียดของเสียงตีฟิโอะเออี คือการเรียงตัวกันตามความถี่จำเพาะของเซลล์ขน (tonotopic organization) ผู้วิจัยจึงใช้แบบจำลองของระบบของตัวสั้นในหนึ่งมิติที่เชื่อมต่อกันด้วยสปริงที่มีค่าคงที่ k โดยตัวสั้นแต่ละตัวสามารถแสดงซูเปอร์คริติคอลลอซอปป์ไบเฟอร์เคชัน (supercritical Hopf bifurcation) และมีความถี่จำเพาะ (ω_0) เรียงลำดับจาก 200 ถึง 1,200 เฮิรตซ์ โดยผลต่างของความถี่จำเพาะของตัวสั้นที่อยู่ติดกันมีค่าคงที่ ไม่ขึ้นกับตำแหน่งของตัวสั้น (ช่วงความถี่ดังกล่าวอ้างอิงตามจุดสูงสุดของแอมพลิจูดของเสียงตีฟิโอะเออีในช่วงความถี่ต่ำจากผลการทดลอง) การกระจัดของตัวสั้นแต่ละตัวเป็นไปดังนี้

$$\frac{dZ_i}{dt} = (\mu + i\omega_{0,i})Z_i - |Z_i|^2 Z_i + k \cdot \text{Re}(Z_{i-1} - Z_i) + k \cdot \text{Re}(Z_{i+1} - Z_i) + F_1 \sin \omega_1 t + F_2 \sin \omega_2 t + \eta(t) \quad (3.2)$$

โดยที่	$\text{Re}(Z_i)$	คือ การกระจัดการสั้นของตัวสั้นที่ i
	μ	คือ พารามิเตอร์
	$\omega_{0,i}$	คือ ความถี่จำเพาะของตัวสั้นที่ i
	k	คือ ค่าคงที่สปริงที่เชื่อมต่อตัวสั้นที่อยู่ติดกัน
	F_1 และ F_2	คือ แอมพลิจูดของแรงความถี่ที่ 1 และ 2 ตามลำดับ
	ω_1 และ ω_2	คือ ความถี่ของแรงที่ 1 และ 2 ตามลำดับ
	$\eta(t)$	คือ สัญญาณรบกวน

สมการที่ 3.2 เป็นการดัดแปลงจากแบบจำลองที่ใช้อธิบายการเกิดเสียงสะท้อนจากหูชั้นในแบบเอสโอเออี (SOAEs) จากสัตว์เลื้อยคลาน [27] เนื่องจากส่วนขนของเซลล์รับเสียงทุกเซลล์ยึดติดกับเยื่อคลุม (tectorial membrane) ซึ่งเป็นก้อนเนื้อเยื่อหนา มีความยืดหยุ่นต่ำ จึงอาจประมาณได้ว่าการเชื่อมต่องดังกล่าวมีผลมากกว่าแรงเนื่องจากความหนืดของของเหลวระหว่างเซลล์ขนแบบจำลองในโครงการนี้จึงพิจารณาเฉพาะการเชื่อมต่อด้วยสปริง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นการจำลองแฉกของตัวสั้นทั้งหมด 101 ตัว ในการคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะใช้วิธีการเชิงตัวเลขด้วยระเบียบวิธีของรุงเงอ-คุททาอันดับที่ 4 (4th order Runge-Kutta) [29] เป็นเวลา 0.2 วินาที ที่ความถี่ 5×10^5 จุดต่อวินาที ผลการคำนวณที่ได้จะถูกวิเคราะห์ด้วยกระบวนการการแปลงฟูเรียร์แบบจำกัดเวลา (Finite-time Fourier transform) ด้วยเทคนิคการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (FFT) [28] จากนั้นหาผลรวมของความเพี้ยนไม่เชิงเส้น (nonlinear distortion) ของระบบ โดยการหาผลรวมแบบเวกเตอร์ขององค์ประกอบฟูเรียร์ (Fourier component) ที่ความถี่เท่ากับ $2f_1-f_2$ หรือ $2f_2-f_1$ จากแต่ละตัวสั้น ซึ่งความเพี้ยนไม่เชิงเส้น (nonlinear distortion) ของระบบจะถูกแสดงด้วยค่าลอการิทึมของผลรวมแบบเวกเตอร์จากตัวสั้นแต่ละตัวดังสมการที่ 3.3

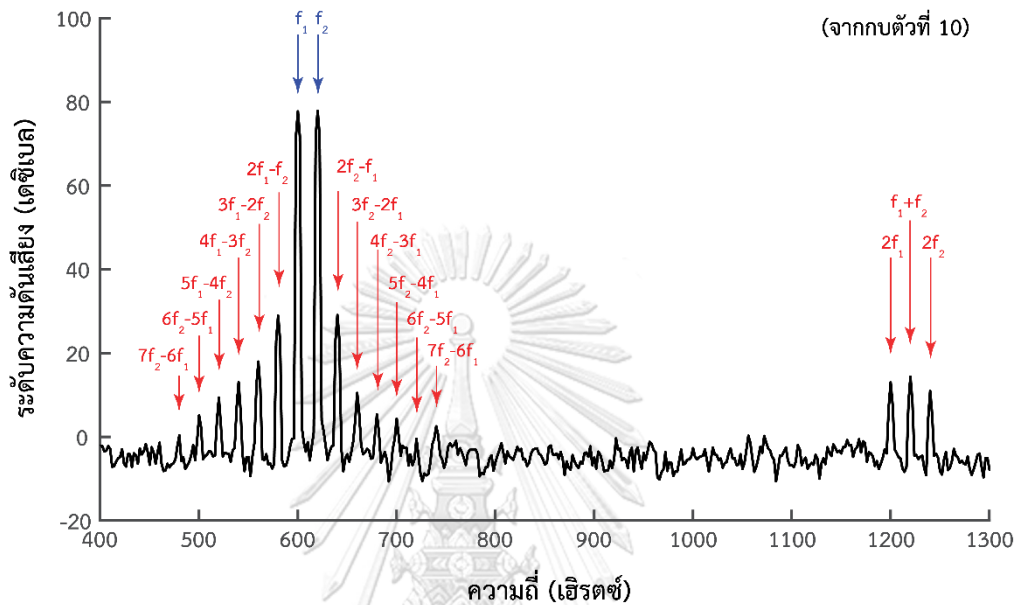
$$\text{Nonlinear distortion}(f) = \log_{10} X(f) \quad (3.3)$$

โดยที่ $X(f)$ คือ ผลรวมแบบเวกเตอร์ขององค์ประกอบฟูเรียร์ (Fourier component) ที่ความถี่ f จากแต่ละตัวสั้น

บทที่ 4

ผลการทดลองวัดเสียงสะท้อนจากหูชั้นในแบบตีฟิโอเออี

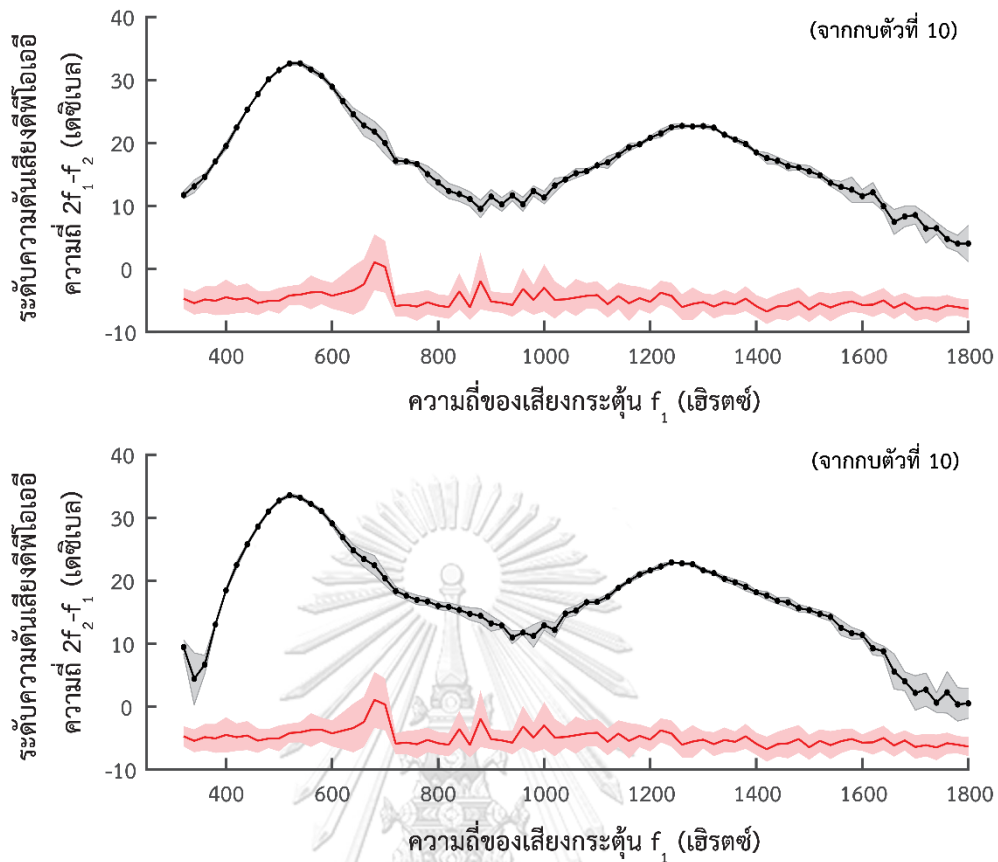
4.1 ผลการวัดเสียงสะท้อนจากหูชั้นในแบบตีฟิโอเออีจากกบนา



รูปที่ 4.1 เมื่อส่งเสียงกระตุ้นสองเสียงเข้าไปยังหูชั้นในของกบนา หูของกบนาจะสามารถสร้างเสียงตีฟิโอเออีที่ความถี่ต่างๆ ได้ ซึ่งความถี่ดังกล่าวจะสอดคล้องกับผลรวมเชิงเส้นของความถี่เสียงกระตุ้น ข้อมูลจากความถี่เสียงกระตุ้นเท่ากับ 600 และ 620 เฮิรตซ์ ที่ความดัง 81 เดซิเบล เท่ากันทั้งสอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

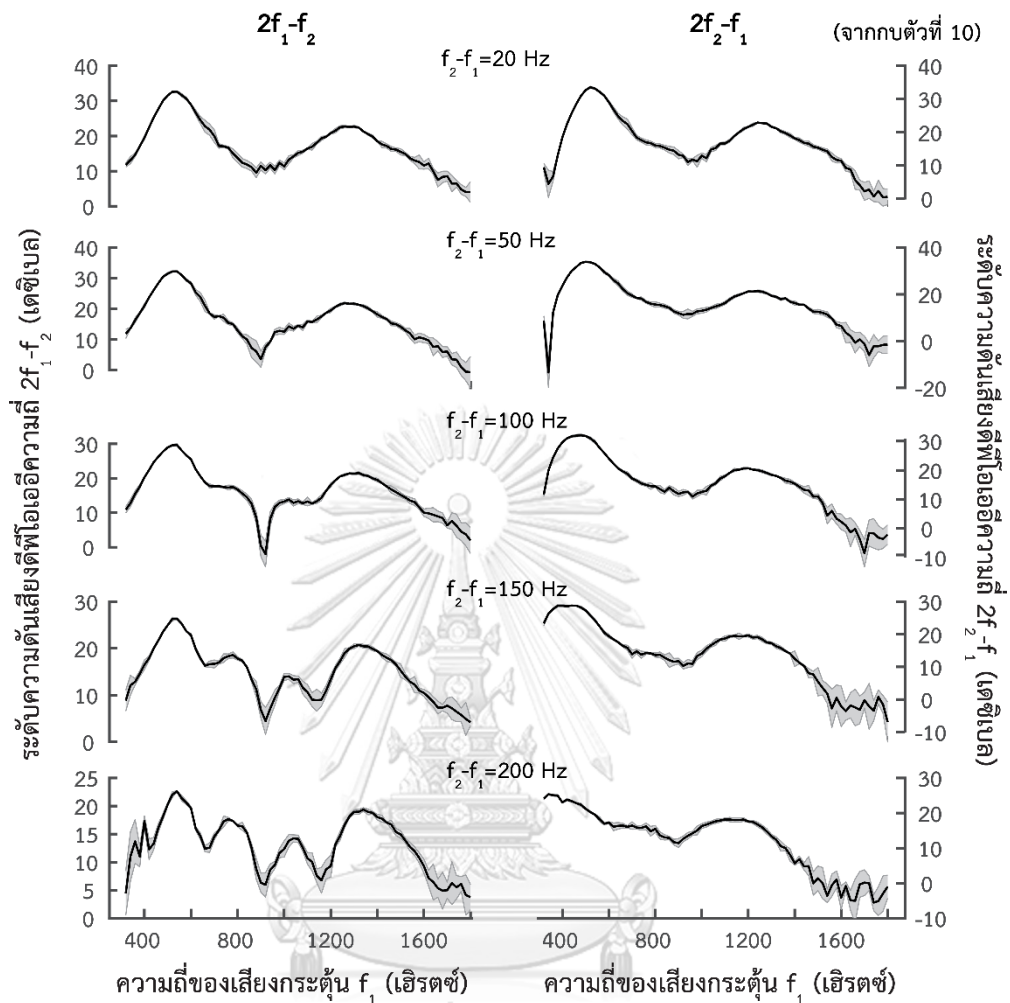
ผลการทดลองวัดเสียงสะท้อนจากหูชั้นในแบบตีฟิโอเออีของกบนา โดยการส่งเสียงกระตุ้นความถี่ 600 และ 620 เฮิรตซ์ ที่ระดับความดันเสียงเท่ากับ 81 เดซิเบล เท่ากันทั้ง 2 ความถี่ พบว่าหูชั้นในของกบนาสามารถสร้างเสียงตีฟิโอเออีได้ที่ความถี่ต่างๆ ซึ่งสอดคล้องกับผลรวมเชิงเส้นของความถี่เสียงกระตุ้น ได้แก่ $2f_1-f_2$, $2f_2-f_1$, $3f_1-2f_2$ และ $3f_2-2f_1$ เป็นต้น (รูปที่ 4.1) เช่นกันกับกบชนิดอื่นๆ ในวงศ์กบนา (Ranidae) ที่ได้มีการกล่าวถึงในงานวิจัยก่อนหน้า (บทที่ 2) เสียงตีฟิโอเออีที่ความถี่เท่ากับ $2f_1-f_2$ (580 เฮิรตซ์) และ $2f_2-f_1$ (640 เฮิรตซ์) มีระดับความดังประมาณ 30 เดซิเบล ซึ่งค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับเสียงตีฟิโอเออีที่วัดได้ในกบชนิดอื่นๆ ที่โดยทั่วไปจะมีความดังสูงสุดประมาณ 10-20 เดซิเบล ที่เสียงกระตุ้นความดัง 80 เดซิเบล เนื่องจากเสียงตีฟิโอเออีที่ความถี่ $2f_1-f_2$ และ $2f_2-f_1$ เป็นเสียงสะท้อนที่มีระดับความดังสูงสุด งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาเสียงสะท้อนที่ความถี่ทั้งสองนี้เป็นหลัก



รูปที่ 4.2 ระดับเสียงดีพีโอเออี (ดำ) ที่ความถี่ $2f_1-f_2$ (บน) และ $2f_2-f_1$ (ล่าง) จากกบนา และระดับสัญญาณรบกวน (แดง) เมื่อผลต่างของความถี่เสียงกระตุ้น (f_2-f_1) และความดังของเสียงกระตุ้นทั้งสองมีค่าคงที่เท่ากับ 20 เฮิรตซ์ และ 81 เดซิเบล ตามลำดับ ความถี่เสียงกระตุ้น f_1 มีค่าตั้งแต่ 300 ถึง 1,800 เฮิรตซ์ (เพิ่มขึ้นครั้งละ 20 เฮิรตซ์) แถบสีเทาและแดงแสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากการเฉลี่ยระดับเสียงจากสเปกตรัม

รูปที่ 4.2 แสดงแอมพลิจูดของเสียงดีพีโอเออีที่ความถี่เสียงกระตุ้นต่างๆ เรียกว่า กราฟดีพีแกรม (DPgram) ซึ่งมีลักษณะทวิฐานนิยม (bimodal) ที่สอดคล้องกับผลการวิจัยจากกบในวงศ์กบนาชนิดอื่นๆ ในงานวิจัยที่ผ่านมา การตีความจุดสูงสุดสัมพัทธ์ทั้งสองของกราฟดีพีแกรมจากกบมักอ้างอิงจากช่วงความถี่ของอวัยวะรับเสียง โดยเมื่อพิจารณาจุดสูงสุดสัมพัทธ์ของระดับความดังของเสียงสะท้อนที่ความถี่ $2f_1-f_2$ และ $2f_2-f_1$ ในรูปที่ 4.2 (บน) พบว่าจุดสูงสุดในช่วงความถี่ต่ำ ($f_1 = 550$ เฮิรตซ์) อาจเกิดจากการตอบสนองของเซลล์รับเสียงในแอมฟิเบีย นพาพิลลา เนื่องจากความถี่มีค่าอยู่ในช่วงที่สอดคล้องกับการตอบสนองของเส้นประสาทในแอมฟิเบีย นพาพิลลาของกบแก้ว (100 – 1,100 เฮิรตซ์) [16] และในทำนองเดียวกัน จุดสูงสุดสัมพัทธ์ในช่วงความถี่สูง ($f_1 = 1,300$ เฮิรตซ์) อาจเกิดจากการตอบสนองของบาซิลลาร์ พาพิลลา (1,000 – 1,500 เฮิรตซ์) [16]

4.2 ผลของการเปลี่ยนแปลงผลต่างของความถี่เสียงกระตุ้น (f_2-f_1) ที่มีต่อเสียงตีฟิโอะเออี



รูปที่ 4.3 แสดงแอมพลิจูดของเสียงตีฟิโอะเออีของกบนาที่ความถี่ $2f_1-f_2$ (ซ้าย) และ $2f_2-f_1$ (ขวา) เมื่อผลต่างของความถี่เสียงกระตุ้น (f_2-f_1) มีค่า 20, 50, 100, 150 และ 200 เฮิรตซ์ (จากบนลงล่าง) ความดังของเสียงกระตุ้นมีค่าคงที่ 81 เดซิเบล ความถี่เสียงกระตุ้น f_1 มีค่าตั้งแต่ 300 ถึง 1,800 เฮิรตซ์ (เพิ่มขึ้นครั้งละ 20 เฮิรตซ์)

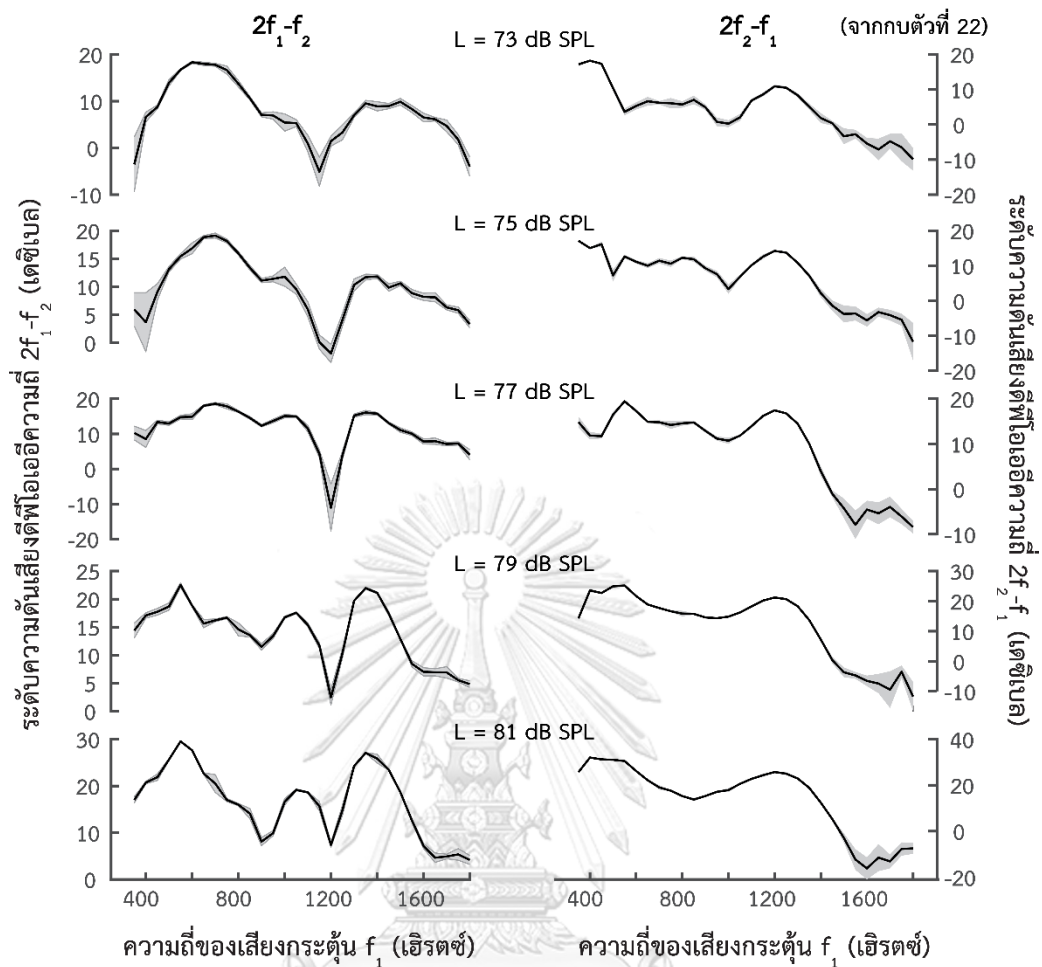
เมื่อเปลี่ยนผลต่างของความถี่เสียงกระตุ้น (f_2-f_1) พบว่าที่ผลต่างของความถี่เสียงกระตุ้นน้อยกว่า 100 เฮิรตซ์ กราฟตีฟิโอะเออีของเสียงความถี่ $2f_1-f_2$ แสดงจุดสูงสุดสัมพัทธ์สองจุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยอื่นๆ แต่ที่ผลต่างของความถี่มากกว่า 100 เฮิรตซ์ กราฟตีฟิโอะเออีของเสียงความถี่ $2f_1-f_2$ สามารถแสดงจุดสูงสุดสัมพัทธ์ได้มากกว่าสองจุด และผลต่างระหว่างระดับความเข้มเสียงที่จุดสูงสุดและจุดต่ำสุดที่อยู่ติดกันอาจสูงกว่า 20 เดซิเบล (รูปที่ 4.3) ทำให้แอมพลิจูดของเสียงตีฟิโอะเออีไม่มีลักษณะทวิฐานนิยม (bimodal) อีกต่อไป หากมีการเปลี่ยนแปลงกับความถี่ของเสียงกระตุ้นแบบคล้ายรายคาบ (quasi-periodic) ซึ่งคล้ายคลึงกับโครงสร้างละเอียดของเสียงตีฟิโอะเออีที่พบในมนุษย์

นอกจากนี้ยังพบว่า กราฟดีพีแกรมของเสียงความถี่ $2f_2-f_1$ ไม่ปรากฏลักษณะดังกล่าวเช่นเดียวกับเสียงดีพีโอเออีจากมนุษย์อีกด้วย โดยต่อจากนี้ ผู้วิจัยจะเรียกลักษณะที่กราฟดีพีแกรมแสดงจุดสูงสุดสัมพัทธ์มากกว่าสองจุดว่า โครงสร้างละเอียดของเสียงดีพีโอเออี อย่างไรก็ตาม ยังไม่สามารถสรุปได้ถึงกลไกการเกิดโครงสร้างละเอียดว่าเกิดขึ้นจากอวัยวะรับเสียงใด เนื่องจากโครงสร้างละเอียดอาจเกิดขึ้นได้ในช่วงความถี่ของทั้งแอมฟิเบียน พาพิลลา และบาซิลลาร์ พาพิลลา

4.3 ผลของการเปลี่ยนแปลงความดังของเสียงกระตุ้นที่มีต่อเสียงดีพีโอเออี

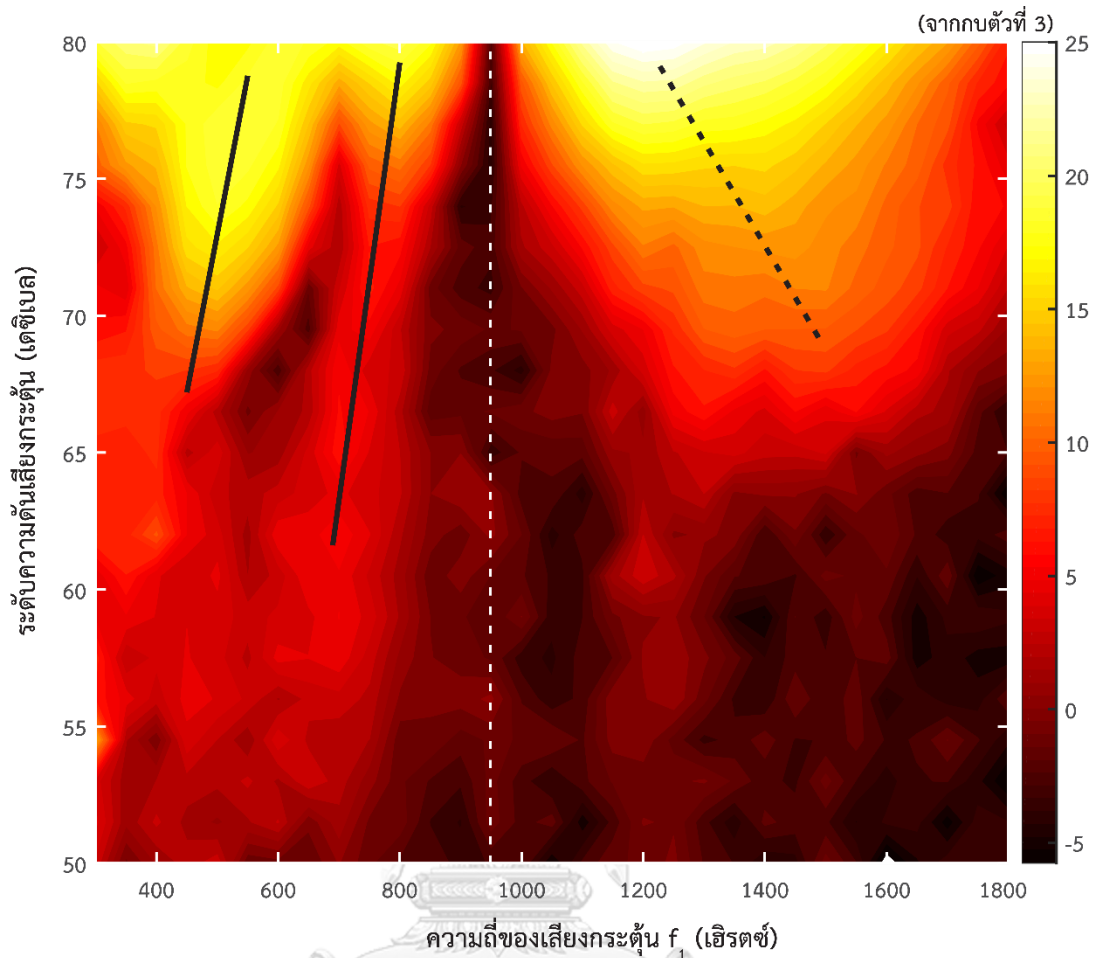
กราฟดีพีแกรมของเสียงสะท้อนที่ความถี่ $2f_1-f_2$ มีลักษณะขึ้นอยู่กับความดังของเสียงกระตุ้น จากรูปที่ 4.4 เมื่อระดับความดันเสียงกระตุ้นมีค่าเป็น 73 และ 75 เดซิเบล กราฟดีพีแกรมแสดง 2 จุดสูงสุดสัมพัทธ์ที่ความถี่ $f_1 = 700$ และ $1,400$ Hz ซึ่งความถี่ดังกล่าวสอดคล้องกับช่วงความถี่ของแอมฟิเบียนพาพิลลาและบาซิลลาร์ พาพิลลา ตามลำดับ เมื่อระดับความดันเสียงกระตุ้นมีค่าเป็น 77 เดซิเบล พบว่าแอมพลิจูดของเสียงสะท้อนในช่วงความถี่ต่ำขึ้นกับความถี่น้อยลง และไม่แสดงจุดสูงสุดชัดเจน เมื่อระดับความดันเสียงกระตุ้นสูงกว่า 79 เดซิเบล พบว่ากราฟดีพีแกรมแสดงโครงสร้างละเอียด โดยมีจุดสูงสุดสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นเป็น 2 จุดในช่วงความถี่ต่ำ ในทางตรงกันข้ามแอมพลิจูดของเสียงสะท้อนที่ความถี่ $2f_2-f_1$ มีลักษณะไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อความดังของเสียงกระตุ้นเพิ่มขึ้น

แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดของเสียงสะท้อนสามารถพิจารณาได้โดยละเอียดดังรูปที่ 4.5 ซึ่งแสดงแอมพลิจูดของเสียงสะท้อนที่ความถี่ $2f_1-f_2$ เมื่อเปลี่ยนแปลงความดังของเสียงกระตุ้นโดยละเอียดตั้งแต่ 50 ถึง 80 เดซิเบล แอมพลิจูดของเสียงสะท้อนเมื่อความถี่ f_1 สูงกว่า 1,000 เฮิรตซ์ปรากฏจุดยอดเพียงจุดเดียว โดยความถี่ที่จุดสูงสุดนั้นลดลงเป็นลำดับเมื่อเสียงกระตุ้นมีแอมพลิจูดสูงขึ้น (เส้นประสีดำ รูปที่ 4.5) ในทางตรงกันข้าม แอมพลิจูดของเสียงสะท้อนเมื่อความถี่ f_1 ต่ำกว่า 1,000 เฮิรตซ์มีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน โดยปรากฏโครงสร้างละเอียดของเสียงดีพีโอเออีขึ้นที่ความดังเสียงกระตุ้นระหว่าง 65 ถึง 80 เดซิเบล ความถี่ที่จุดสูงสุดสัมพัทธ์ในช่วงความถี่นี้มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเสียงกระตุ้นดังขึ้น (เส้นทึบสีดำ รูปที่ 4.5) และเมื่อความดังของเสียงกระตุ้นมีค่ามากกว่า 80 เดซิเบล กราฟดีพีแกรมกลับแสดงจุดสูงสุดเพียงสองจุดอีกครั้ง



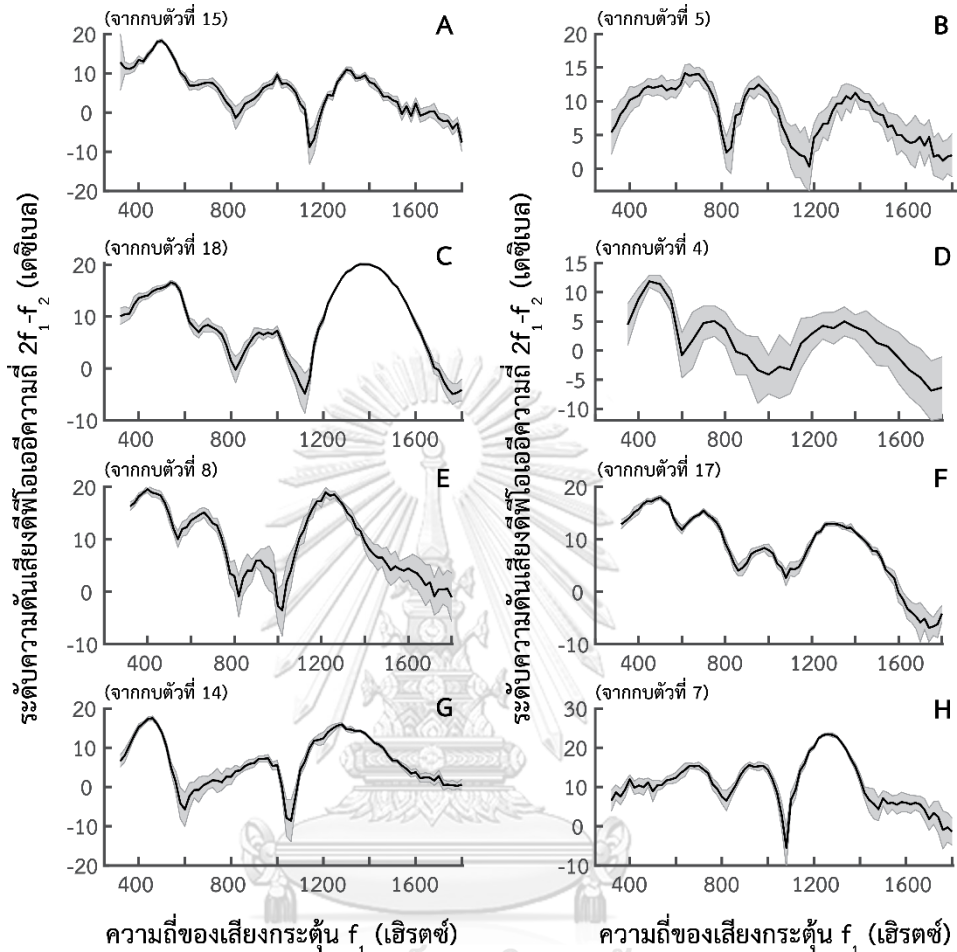
รูปที่ 4.4 แสดงกราฟดีพีแแกรมของกบนาที่ความถี่ $2f_1-f_2$ (ซ้าย) และ $2f_2-f_1$ (ขวา) เมื่อความดังเสียง กระตุ้นมีค่า 73, 75, 77, 79 และ 81 เดซิเบล ที่ผลต่างของความถี่เสียงกระตุ้นมีค่าคงที่ 150 เฮิรตซ์ โดยที่เสียงกระตุ้น f_1 มีค่าตั้งแต่ 300 ถึง 1,800 เฮิรตซ์ (เพิ่มขึ้นครั้งละ 50 เฮิรตซ์)

หากพิจารณากรณีที่ความถี่เสียงกระตุ้นคงที่เท่ากับ $f_1 = 600$ ถึง 700 เฮิรตซ์ พบว่า แอมพลิจูดของเสียงสะท้อนในช่วงความถี่ต่ำอาจมีค่าเพิ่มขึ้นแบบไม่ต่อเนื่อง (non-monotonic) กล่าวคือมีช่วงที่เสียงสะท้อนเบาลงเมื่อเสียงกระตุ้นดังขึ้น ลักษณะนี้สามารถพบได้ทั่วไปในเสียงดีพีโอเออีจากสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม



รูปที่ 4.5 แสดงแผนภาพคิตีเพแกรมของกบนาที่ความถี่ $2f_1-f_2$ เมื่อความดังเสียงกระตุ้นมีค่าตั้งแต่ 50 ถึง 80 เดซิเบล โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 1.5 เดซิเบล ที่ผลต่างของความถี่เสียงกระตุ้นคงที่ 100 เฮิรตซ์ เสียงกระตุ้น f_1 มีค่าตั้งแต่ 300 ถึง 1,800 เฮิรตซ์ (เพิ่มขึ้นครั้งละ 50 เฮิรตซ์) โดยสีที่แสดงในแผนภาพแสดงความดังเสียง จากต่ำ (สีดำ) ไปสูง (ขาว)

4.4 ความถี่และความดังเสียงกระตุ้นที่เหมาะสมในการเกิดโครงสร้างละเอียดของเสียงดีฟิโอเออี ในกบนา



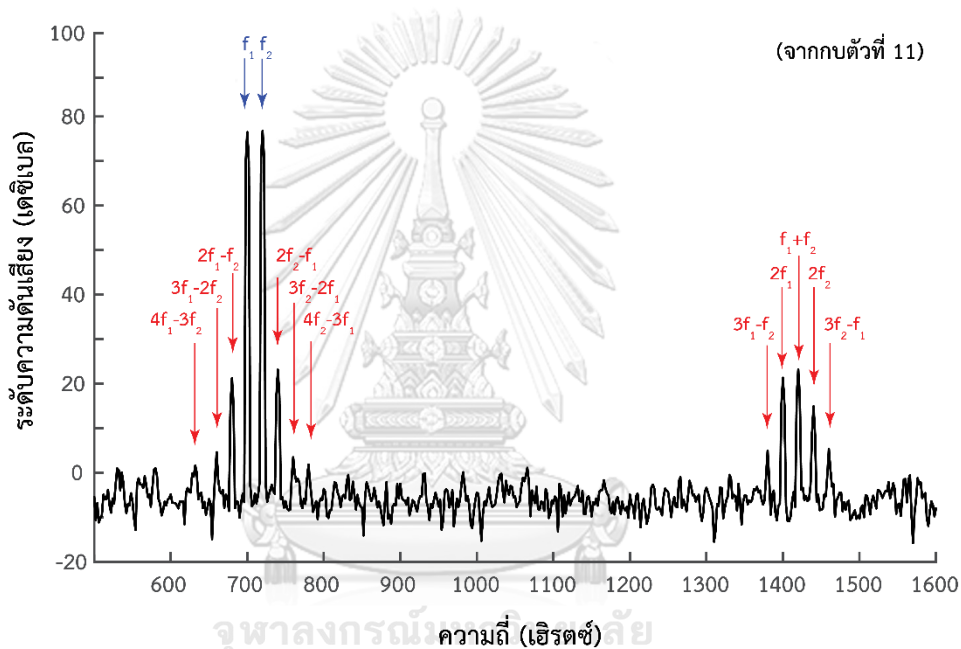
รูปที่ 4.6 ผลการวัดเสียงดีฟิโอเออีความถี่ $2f_1-f_2$ จากกบนา (ข้อมูลจากกบ 8 ตัว) เมื่อผลต่างของความถี่เสียงกระตุ้น (f_2-f_1) มีค่าคงที่เท่ากับ 100 (B, D, E, G และ H) , 150 (C และ F) และ 200 เฮิรตซ์ (A) ที่ความดังของเสียงกระตุ้นทั้งสองมีค่าคงที่เท่ากับ 68 (D), 75 (B และ H), 77 (E), 79 (A, F และ G) และ 81 เดซิเบล (C)

จากผลการวัดเสียงสะท้อนจากหูชั้นในแบบดีฟิโอเออีความถี่ $2f_1-f_2$ ในกบนา พบว่าแอมพลิจูดของเสียงดีฟิโอเออีสามารถแสดงโครงสร้างละเอียดได้ เมื่อระดับเสียงกระตุ้นมีค่าระหว่าง 65 – 80 เดซิเบล และผลต่างของเสียงกระตุ้นมีค่ามากกว่า 100 เฮิรตซ์ กบนาเกือบทุกตัวสามารถแสดงโครงสร้างละเอียดของเสียงดีฟิโอเออีเหมือนที่พบในมนุษย์ได้ (18 ตัวจาก 20 ตัว) โดยจุดสูงสุดของกราฟดีฟิโอแกรมจะมีความถี่ต่ำสุดประมาณ 400 – 600 เฮิรตซ์ และความถี่สูงสุดมากกว่า 1,200 เฮิรตซ์เสมอ ซึ่งอยู่ในช่วงความถี่ของแอมฟิเบียน พาพิลลาและบาซิลลาร์ พาพิลลา ตามลำดับ

4.5 ผลการวัดเสียงสะท้อนจากหูชั้นในแบบตีโพไอเออิจากกบวัว

กบวัวเป็นหนึ่งในกบในวงศ์ Ranidae ที่เป็นสัตว์ทดลองมาตรฐานสำหรับการศึกษากการทำงานของเซลล์รับเสียง และเสียงสะท้อนจากหูชั้นใน แม้ว่าจะมีงานวิจัยจำนวนหนึ่งที่ศึกษาเสียงตีโพไอเออิจากกบวัว แต่ไม่ได้มีการรายงานการค้นพบโครงสร้างละเอียดของเสียงสะท้อน ในโครงการวิจัยนี้จึงทำการวัดเสียงตีโพไอเออิจากกบวัวเพื่อเปรียบเทียบกับผลจากงานวิจัยที่ผ่านมา

ผลการทดลองวัดเสียงสะท้อนจากหูชั้นในแบบตีโพไอเออิจากกบวัว โดยการส่งเสียงกระตุ้นความถี่ 700 และ 720 เฮิรตซ์ ที่ระดับความดันเสียงเท่ากับ 79 เดซิเบล เท่ากันทั้ง 2 ความถี่ พบว่าหูชั้นในของกบวัวสามารถสร้างเสียงตีโพไอเออิจได้ที่ความถี่ต่างๆ ได้เช่นกัน



รูปที่ 4.7 เมื่อส่งเสียงกระตุ้นสองเสียงเข้าไปยังหูชั้นในของกบวัว หูของกบวัวจะสามารถสร้างเสียงตีโพ

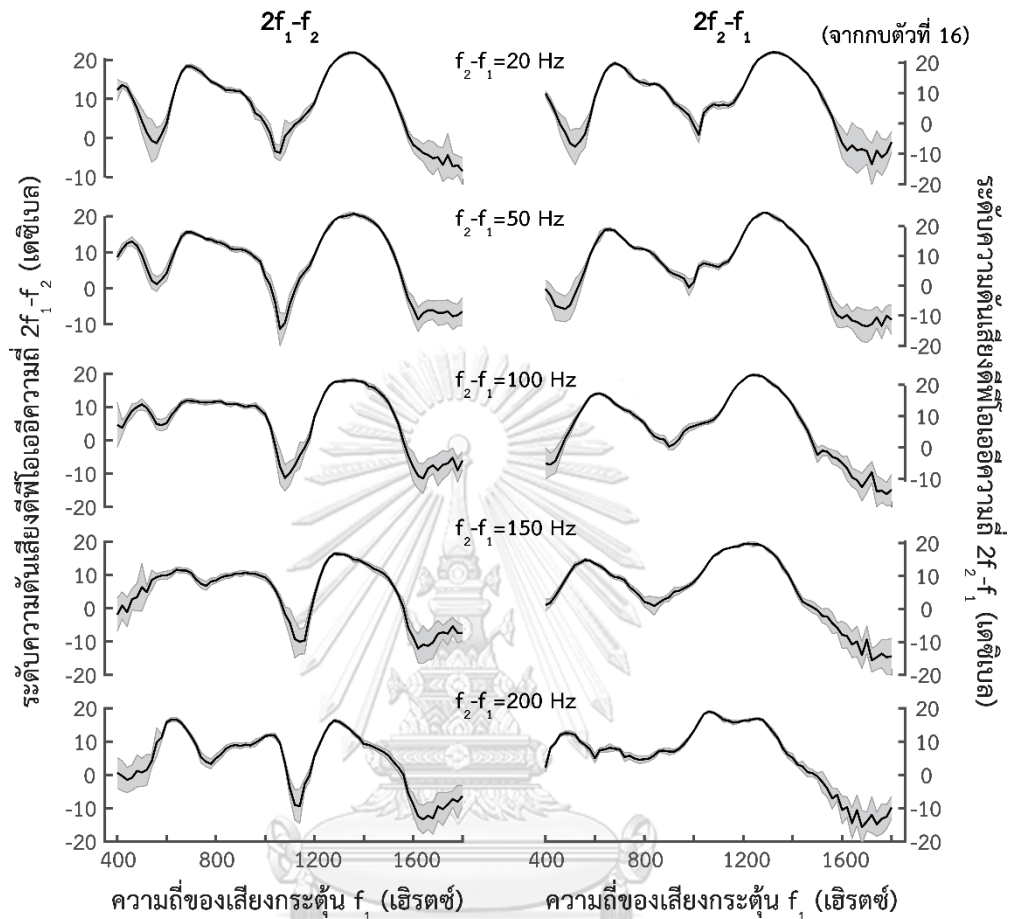
ไอเออิจความถี่ต่างๆซึ่งสอดคล้องกับผลรวมเชิงเส้นของความถี่เสียงกระตุ้น

ความถี่เสียงกระตุ้นเป็น 700 และ 720 เฮิรตซ์ ที่ความดัง 79 เดซิเบล เท่ากันทั้งสองความถี่

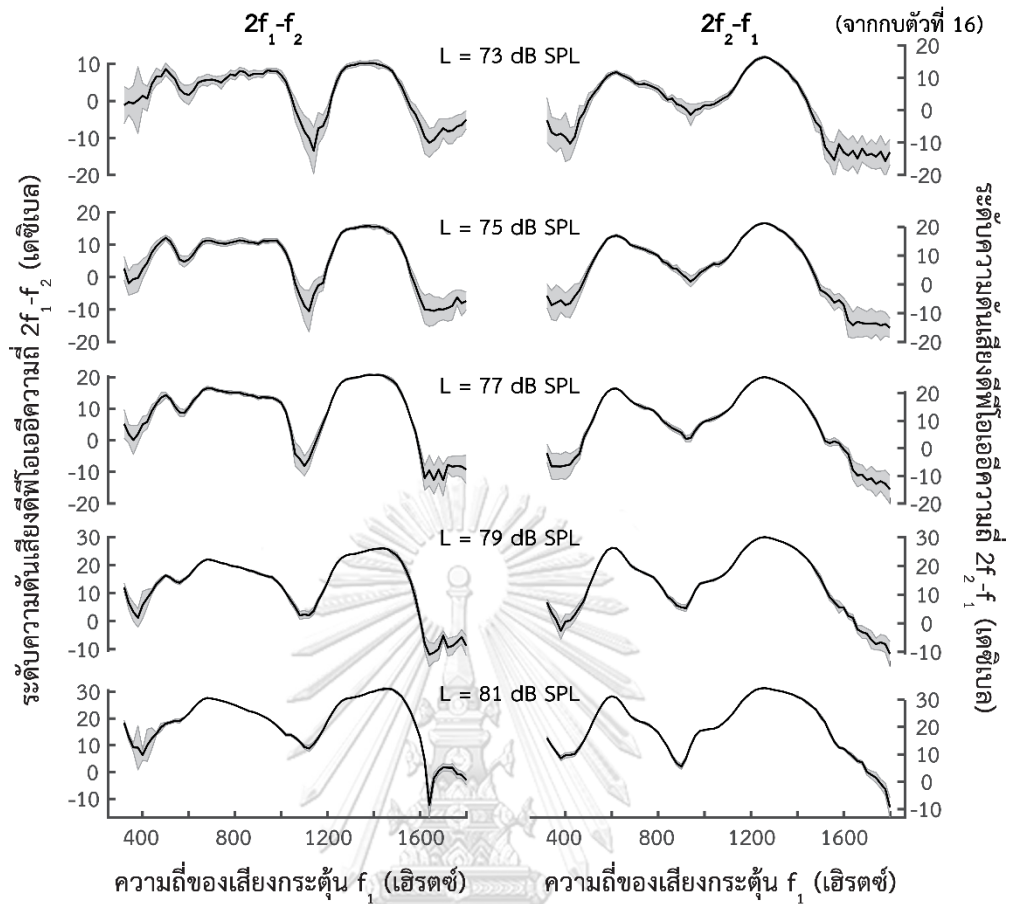
เมื่อเปลี่ยนความถี่ของเสียงกระตุ้นในช่วง 400 ถึง 1,800 เฮิรตซ์ พบว่ากราฟตีโพแกรมแสดงลักษณะทวิฐานนิยม (bimodal) เช่นเดียวกับกบนา (รูป 4.8 บน) โดยแอมพลิจูดของเสียงสะท้อนมีค่าต่ำสุดเมื่อความถี่เสียงกระตุ้น (f_1) มีค่าประมาณ 1,100 เฮิรตซ์ ซึ่งเป็นความถี่ในช่วงที่อวัยวะรับเสียงทั้งสองไม่ตอบสนอง

เมื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงผลต่างของความถี่เสียงกระตุ้น ($f_2 - f_1$) และระดับความดังของเสียงกระตุ้น พบว่ากราฟตีโพแกรมในช่วงความถี่สูง ($f_1 > 1,100$ เฮิรตซ์) มีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับช่วงความถี่ต่ำ ($f_1 < 1,100$ เฮิรตซ์) ซึ่งแสดงลักษณะคล้ายโครงสร้างละเอียดในบาง

กรณี อย่างไรก็ตามแอมพลิจูดของเสียงสะท้อนไม่ได้ขึ้นกับความถี่เสียงกระตุ้นแบบคล้ายรายคาบ (quasi-periodic) และไม่ได้มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงชัดเจนเช่นในกบนา (รูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9)

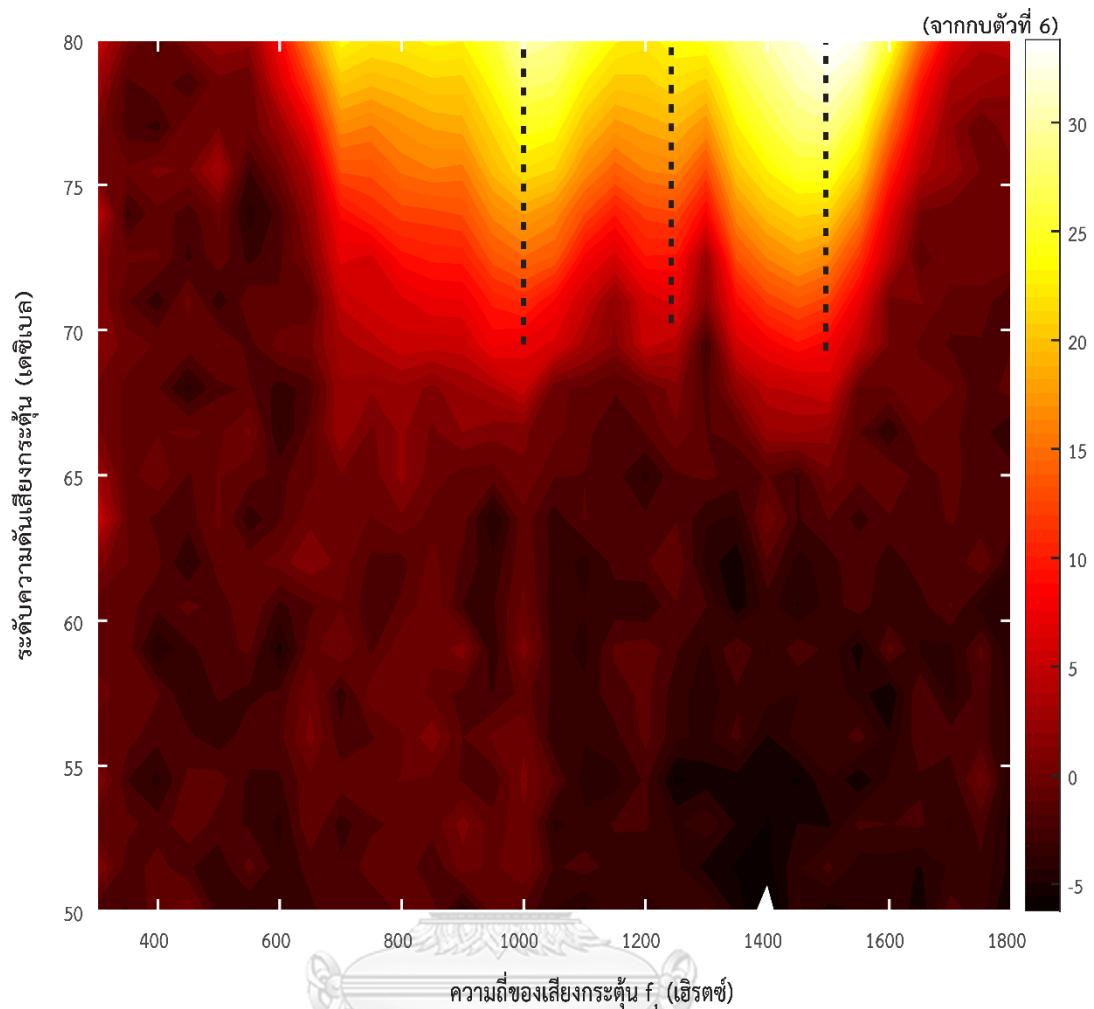


รูปที่ 4.8 แสดงกราฟพิพแกรมของกบว่าความถี่ $2f_1-f_2$ (ซ้าย) และ $2f_2-f_1$ (ขวา) เมื่อผลต่างของความถี่เสียงกระตุ้น (f_2-f_1) มีค่า 20, 50, 100, 150 และ 200 เฮิรตซ์ ตามลำดับ ที่ความดังของเสียงกระตุ้นมีค่าคงที่ 75 เดซิเบล โดยที่เสียงกระตุ้น f_1 มีค่าตั้งแต่ 400 ถึง 1,800 เฮิรตซ์ (เพิ่มขึ้นครั้งละ 20 เฮิรตซ์)



รูปที่ 4.9 แสดงกราฟดีพีแกรมของกบวว์ที่ความถี่ $2f_1-f_2$ (ซ้าย) และ $2f_2-f_1$ (ขวา) เมื่อความดังเสียงกระตุ้นมีค่า 73, 75, 77, 79 และ 81 เดซิเบล ตามลำดับ ที่ผลต่างของความถี่เสียงกระตุ้นมีค่าคงที่ 100 เฮิรตซ์ โดยที่เสียงกระตุ้น f_1 มีค่าตั้งแต่ 300 ถึง 1,800 เฮิรตซ์ (เพิ่มขึ้นครั้งละ 20 เฮิรตซ์)

แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดของเสียงสะท้อนสามารถพิจารณาได้โดยละเอียดดังรูปที่ 4.10 แผนภาพแสดงแอมพลิจูดของเสียงสะท้อนที่ความถี่ $2f_1-f_2$ เมื่อเปลี่ยนแปลงความดังของเสียงกระตุ้นโดยละเอียดตั้งแต่ 50 ถึง 80 เดซิเบล พบว่าเสียงดีพีโอเออีปรากฏชัดเจนในช่วงความถี่ 600 ถึง 1,700 เฮิรตซ์ เมื่อระดับความดังเสียงกระตุ้นมีค่า 65 ถึง 80 เดซิเบล ปรากฏลักษณะคล้ายโครงสร้างละเอียดของเสียงดีพีโอเออีโดยปรากฏจุดสูงสุดที่ความถี่กระตุ้นประมาณ 1,000, 1,250 และ 1,500 เฮิรตซ์ อย่างไรก็ตามความถี่ที่จุดสูงสุดนี้ไม่เปลี่ยนแปลงกับระดับความดังเสียงกระตุ้น (รูปที่ 4.10 เส้นประ) ลักษณะดังกล่าวจึงอาจเกิดจากเรโซแนนซ์ของเสียงสะท้อนในหูชั้นกลางและช่องปาก และอาจมิได้สะท้อนถึงการทำงานของหูชั้นใน



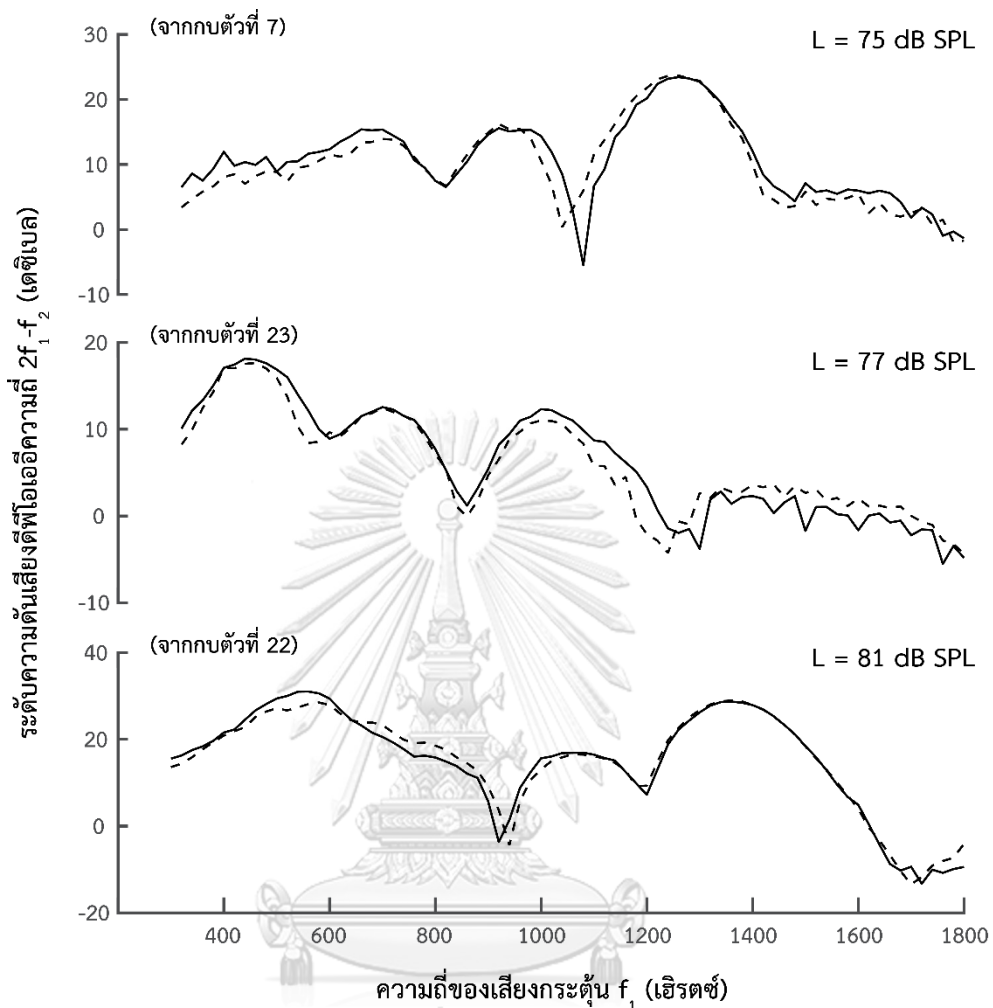
รูปที่ 4.10 แสดงแผนภาพดีพีแกรมของกบวว์ที่ความถี่ $2f_1-f_2$ เมื่อความถี่เสียงกระตุ่มมีค่าตั้งแต่ 50 และเพิ่มขึ้นครั้งละ 1.5 เดซิเบล ไปจนถึง 80 เดซิเบล ที่ผลต่างของความถี่เสียงกระตุ่มมีค่าคงที่ 100 เฮิรตซ์ โดยที่เสียงกระตุ่ม f_1 มีค่าตั้งแต่ 300 ถึง 1,800 เฮิรตซ์ (เพิ่มขึ้นครั้งละ 50 เฮิรตซ์)

4.6 ผลของปัจจัยอื่นๆ ต่อการเกิดโครงสร้างละเอียดของเสียงดีพีโอเออีในกบนา

การเกิดโครงสร้างละเอียดของเสียงดีพีโอเออีที่พบในงานวิจัยนี้มีสมมติฐานที่เป็นไปได้ 2 ประการ คือ 1. เกิดจากเรโซแนนซ์ของเสียงสะท้อนในหูชั้นกลางและช่องปาก หรือ 2. เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างเซลล์ขนภายในหูชั้นใน

ลักษณะทางกายวิภาคของช่องปากของกบจะมีท่อยูสเตเซียน (Eustachian tube) เชื่อมต่อกับหูชั้นกลางทั้งสองข้าง เมื่อเยื่อแก้วหูสั่น คลื่นเสียงที่เกิดขึ้นนอกจากจะเคลื่อนที่ออกจากหูสู่ภายนอกแล้ว ยังสามารถเคลื่อนที่ผ่านท่อยูสเตเซียนไปยังหูชั้นกลางอีกข้างหนึ่งผ่านช่องปากได้ การสะท้อนกลับของคลื่นเสียงจากเยื่อแก้วหูอีกข้างหนึ่งอาจทำให้เกิดการสั่นพ้อง และนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดของเสียงสะท้อนเมื่อความถี่ของเสียงกระตุ่มมีค่าแตกต่างกัน

4.6.1 ผลของการสั้นของหูอีกข้างหนึ่งต่อกราฟดีพีแกรม

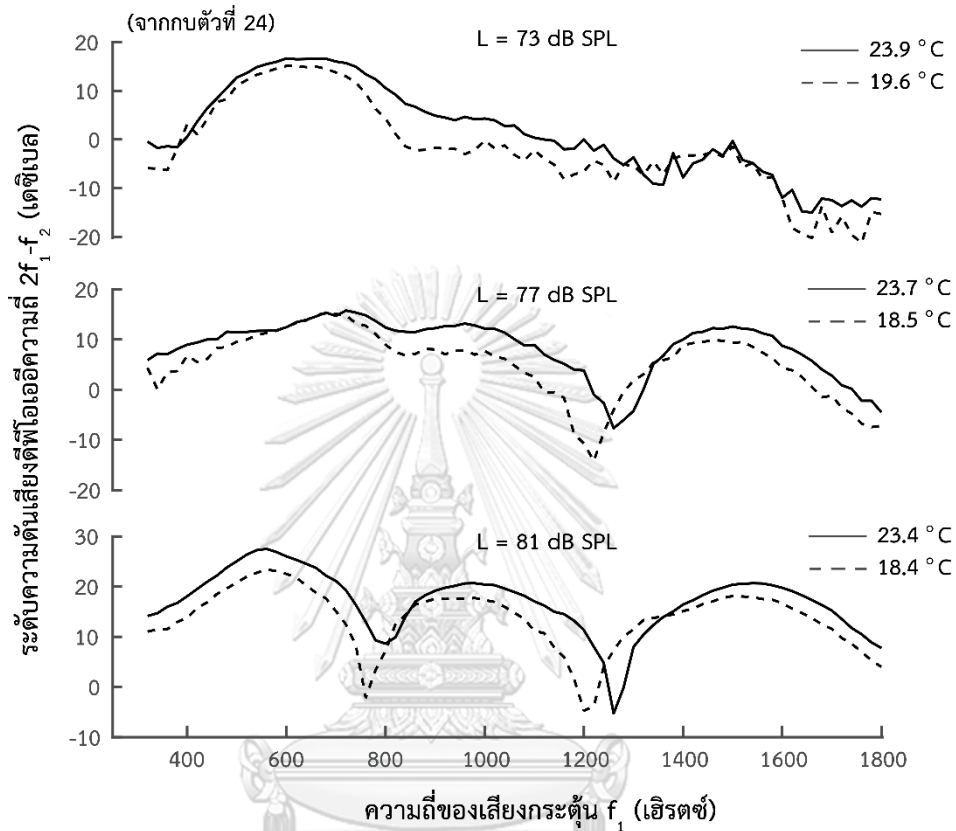


รูปที่ 4.11 แสดงกราฟดีพีแกรมของกบนาความถี่ $2f_1-f_2$ เมื่อไม่มีการกด (เส้นทึบ) และมีการกด (เส้นประ) สำลิก้านที่เยื่อแก้วหูข้างที่ไม่ถูกกระตุ้น โดยที่ผลต่างของความถี่เสียงกระตุ้น (f_2-f_1) มีค่า 100 เฮิรตซ์ ที่ความดังของเสียงกระตุ้นมีค่า 75, 77 และ 81 เดซิเบล ตามลำดับ และเสียงกระตุ้น f_1 มีค่าตั้งแต่ 300 ถึง 1,800 เฮิรตซ์ (เพิ่มขึ้นครั้งละ 20 เฮิรตซ์)

ในการทดลองนี้จะใช้สำลิก้านทาด้วยปิโตรเลียมเจล (Vaseline™) กดลงไปที่ยื่อแก้วหูข้างที่ไม่ได้ทำการวัด เพื่อยับยั้งการสั้นของเยื่อแก้วหู โดยหากเกิดการสั้นพ้องของเสียงระหว่างเยื่อแก้วหูทั้งสองข้าง ความยืดหยุ่นของเยื่อแก้วหูข้างหนึ่งย่อมส่งผลต่อความถี่มูลฐานของการสั้นพ้อง ผลการทดลองพบว่ากราฟดีพีแกรมที่วัดได้เมื่อเยื่อแก้วหูข้างที่ไม่ได้ถูกกระตุ้นถูกกด มีลักษณะใกล้เคียงกับกราฟดีพีแกรมที่วัดได้เมื่อเยื่อแก้วหูไม่ถูกกดด้วยสำลิก้าน (รูปที่ 4.11) จึงอาจสรุปได้ว่า กลไกหลักในการเกิดโครงสร้างละเอียดของเสียงดีพีโอเออีมีได้เกี่ยวข้องกับการสั้นพ้องระหว่างเยื่อแก้วหูทั้งสองข้าง อย่างไรก็ตาม การสั้นพ้องอาจมีผลเล็กน้อยต่อรูปร่างโครงสร้างละเอียด เนื่องจากพบว่าความถี่ที่จุด

ต่ำสุดในบางการทดลองอาจมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อเยื่อแก้วหูข้างที่ไม่ถูกกระตุ้นถูกยับยั้งการสั่น

4.6.2 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ



รูปที่ 4.12 แสดงกราฟดีพีแกรมของกบนาความถี่ $2f_1-f_2$ เมื่อวัดที่อุณหภูมิปกติในห้องทดลอง (เส้นทึบ) และเมื่อลดอุณหภูมิสัตว์ทดลอง (เส้นประ) โดยที่ผลต่างของความถี่เสียงกระตุ้น (f_2-f_1) มีค่า 150 เฮิรตซ์ ที่ความดังของเสียงกระตุ้นมีค่า 73, 77 และ 81 เดซิเบล ตามลำดับ และเสียงกระตุ้น f_1 มีค่าตั้งแต่ 300 ถึง 1,800 เฮิรตซ์ (เพิ่มขึ้นครั้งละ 20 เฮิรตซ์)

เมื่อลดอุณหภูมิร่างกายของกบ โดยลดอุณหภูมิน้ำลงประมาณ 4-5 องศาเซลเซียสจากอุณหภูมิปกติของห้องทดลอง (22-23 องศาเซลเซียส) พบว่าเสียงสะท้อนมีแอมพลิจูดโดยเฉลี่ยต่ำลง และแม้โครงสร้างละเอียดจะยังคงอยู่ แต่กราฟดีพีแกรมมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของจุดสูงสุดและต่ำสุดอย่างชัดเจน (รูปที่ 4.12) โดยตำแหน่งของจุดสูงสุดและต่ำสุดสัมพันธ์เลื่อนไปทางความถี่ต่ำ แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิส่งผลต่อลักษณะของกราฟดีพีแกรม ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวไม่สามารถเกิดขึ้นได้จากการสั่นพ้องในท่อหรือโพรงที่รูปร่างคงที่

บทที่ 5

ผลการจำลองการเกิดเสียงสะท้อนจากหูชั้นในแบบตีโพโอเออีในกบนาและกบวัว

ในบทนี้เป็นการนำเสนอผลการศึกษาเบื้องต้นจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายการเกิดโครงสร้างละเอียดของเสียงตีโพโอเออีในกบนา แบบจำลองที่ใช้ดัดแปลงจากแบบจำลองของการเกิดเสียงเอสโอเออีในกิ้งก่าโดย Vilfan และ Duke ซึ่งเป็นระบบของตัวสั่นไม่เชิงเส้นที่สามารถแสดงฮอปฟ์ไบเฟอร์เคชัน (Hopf bifurcation)

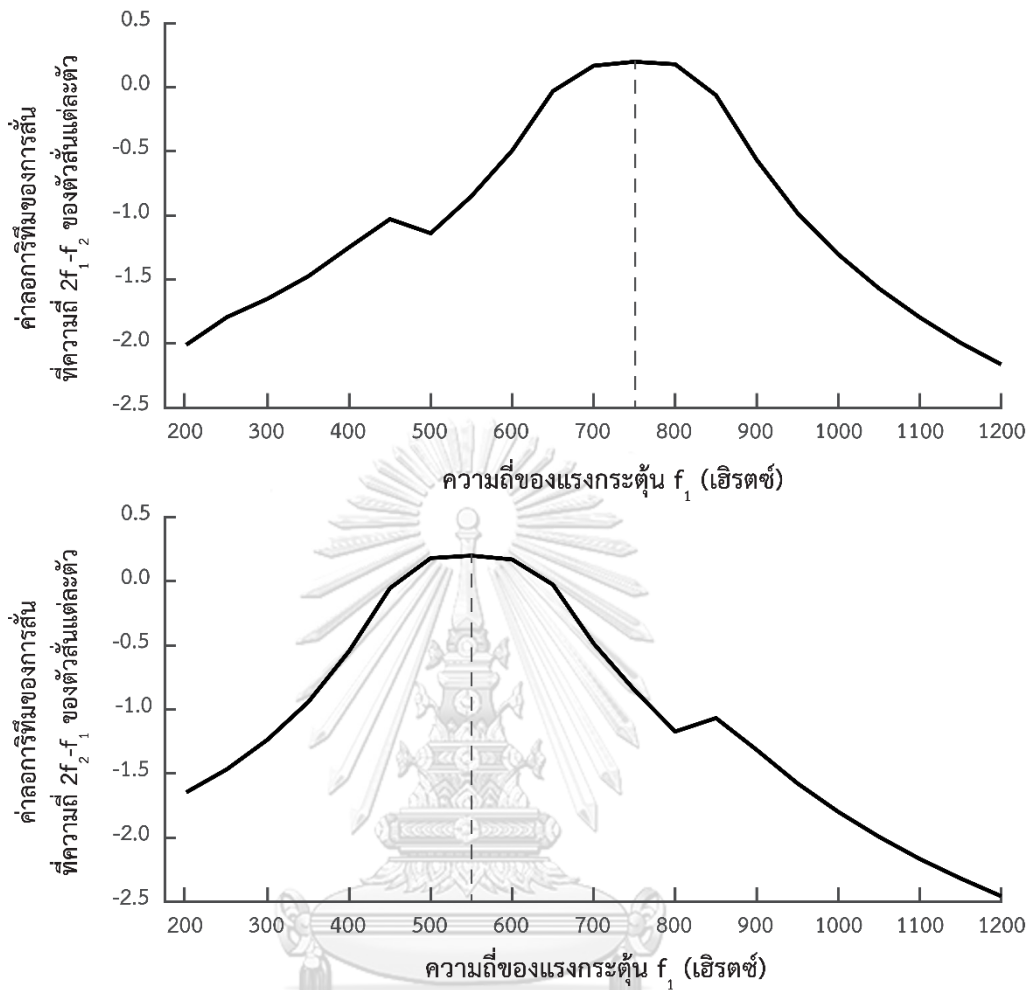
แบบจำลองนี้สร้างจากสมมติฐานคือ โครงสร้างละเอียดของเสียงสะท้อนแบบตีโพโอเออีอาจเกิดขึ้นจากเซลล์รับเสียงซึ่งเรียงตัวเป็นแถวโดยอาศัยปัจจัยหลักสองประการ ได้แก่ อันตรกิริยาระหว่างเซลล์รับเสียงที่อยู่ใกล้เคียงกันผ่านทาง การเชื่อมต่อเชิงกล (mechanical coupling) และการจัดเรียงตัวกันของเซลล์รับเสียงตามความถี่ธรรมชาติของเซลล์ นอกจากนี้ หูชั้นในของสัตว์ครึ่งบกครึ่งน้ำไม่มีโครงสร้างเนื้อเยื่อที่ยืดหยุ่นและสามารถเป็นตัวกลางของคลื่นตามขวางได้ ผู้วิจัยจึงตั้งสมมติฐานว่าเซลล์รับเสียงทั้งหมดได้รับแรงภายนอกพร้อมกันที่เฟสเดียวกัน และมีแอมพลิจูดเท่ากันทุกประการ

สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในงานวิจัยชิ้นนี้ จะมีลักษณะเป็นแถวของตัวสั่นจำนวน 101 ตัว ตัวสั่นที่อยู่ติดกัน เชื่อมต่อกันด้วยสปริงที่มีค่าคงที่สปริงเท่ากันทั้งหมด (รูปที่ 3.2) โดยการกระทำของแต่ละตัวสั่นอธิบายได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{dZ_i}{dt} = (\mu + i\omega_{0,i})Z_i - |Z_i|^2 Z_i + k \cdot \text{Re}(Z_{i-1} - Z_i) + k \cdot \text{Re}(Z_{i+1} - Z_i) + F \sin \omega_1 t + F \sin \omega_2 t + \eta(t)$$

ตัวสั่นทุกตัวอยู่ใกล้จุดซูเปอร์คริติคอลฮอปฟ์ไบเฟอร์เคชัน (supercritical Hopf bifurcation) (μ สุ่มในช่วง -0.03 ถึง $+0.03$) ความถี่จำเพาะของตัวสั่นมีค่าตั้งแต่ 200 ถึง 1,200 เฮิรตซ์ โดยอ้างอิงจากช่วงความถี่ของแอมฟิเบียน พาพิลลา ค่าตอบของระบบสมการ จะใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขด้วยระเบียบวิธีของรุงเงอ-คุททาคอันดับที่ 4 (4th order Runge-Kutta) และทำการแปลงฟูเรียร์ (Fourier transform) ของการกระทำของแต่ละตัวสั่น โดยความเพี้ยนไม่เชิงเส้น (nonlinear distortion) ของระบบเป็นค่าลอการิทึมของผลรวมแบบเวกเตอร์ของความเพี้ยนไม่เชิงเส้น (nonlinear distortion) ของตัวสั่นแต่ละตัว

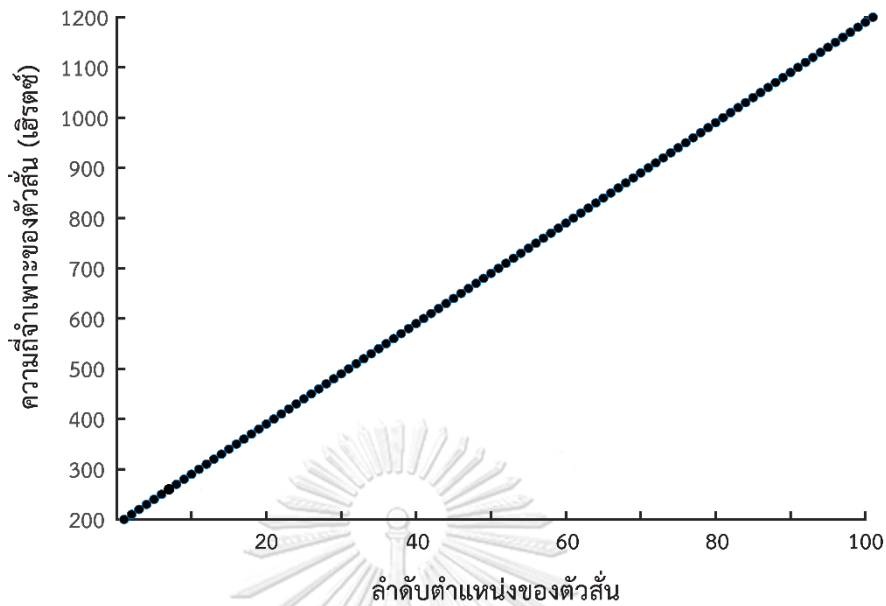
5.1 ผลจากแบบจำลองตัวสั่นไม่เชิงเส้นหนึ่งตัว



รูปที่ 5.1 แอมพลิจูดของความเพี้ยนไม่เชิงเส้น (nonlinear distortion) ของตัวสั่นที่มีความถี่จำเพาะ 700 เฮิรตซ์ ต่อแรงกระตุ้น $F = 5,000$ โดยที่ความถี่แรงกระตุ้น f_1 มีค่าตั้งแต่ 300 ถึง 1,800 เฮิรตซ์ และ $f_2 - f_1 = 50$ เฮิรตซ์

รูปที่ 5.1 แสดงแอมพลิจูดของความเพี้ยนไม่เชิงเส้น (nonlinear distortion) ที่ความถี่ $2f_1 - f_2$ และ $2f_2 - f_1$ ของตัวสั่นหนึ่งที่มีความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 700 เฮิรตซ์ กราฟแสดงแอมพลิจูดของการตอบสนองที่ความถี่แรงกระตุ้นต่างๆนี้เทียบกับกราฟตีพีแแกรมที่วัดได้จากการทดลองในช่วงความถี่ต่ำกว่า 1,200 เฮิรตซ์ โดยพบว่าแอมพลิจูดของความเพี้ยนไม่เชิงเส้น (nonlinear distortion) ที่ความถี่ $2f_1 - f_2$ และ $2f_2 - f_1$ มีค่าสูงสุดเมื่อความถี่ของแรงภายนอกมีค่า f_1 เท่ากับ 750 และ 550 เฮิรตซ์ ตามลำดับ เมื่อเปลี่ยนแปลงผลต่างของความถี่ของแรงกระตุ้น และแอมพลิจูดของแรงเป็นค่าต่างๆพบว่าแอมพลิจูดของความเพี้ยนไม่เชิงเส้น (nonlinear distortion) จากตัวสั่นเพียงตัวเดียวไม่สามารถแสดงจุดสูงสุดสัมพัทธ์มากกว่าหนึ่งจุดได้

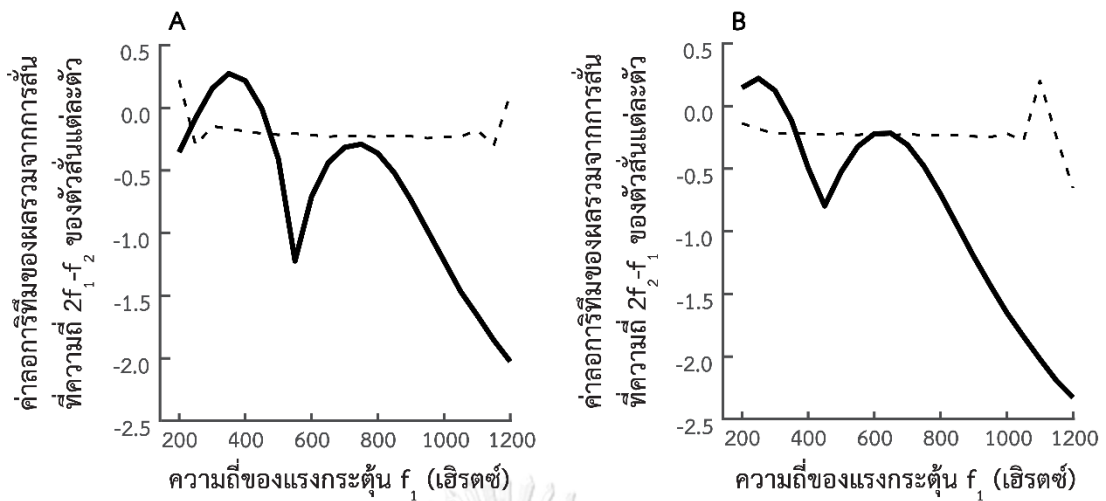
5.2 ผลของอันตรกิริยาระหว่างตัวสั่นที่อยู่ติดกัน



รูปที่ 5.2 แสดงความถี่จำเพาะของตัวสั่นที่ตำแหน่งต่างๆ เมื่อตัวสั่นมีการจัดเรียงตามลำดับความถี่จำเพาะของตัวสั่น

เมื่อใช้ตัวสั่นจำนวน 101 ตัวที่มีความถี่ธรรมชาติตั้งแต่ 200 ถึง 1,200 เฮิรตซ์และตัวสั่นทั้งหมดเรียงตัวเป็นเส้นโดยความถี่ธรรมชาติเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นจากน้อยไปมาก ดังรูปที่ 5.2 พบว่าเมื่อตัวสั่นทั้งหมดไม่มีการเชื่อมต่อกัน ($k=0$) ผลรวมแบบเวกเตอร์ของความเพี้ยนไม่เชิงเส้น (nonlinear distortion) ที่ความถี่ $2f_1-f_2$ และ $2f_2-f_1$ จากตัวสั่นทั้งหมดมีแอมพลิจูดคงที่ไม่ขึ้นอยู่กับความถี่ของแรงภายนอกดังรูปที่ 5.3 (เส้นประ)

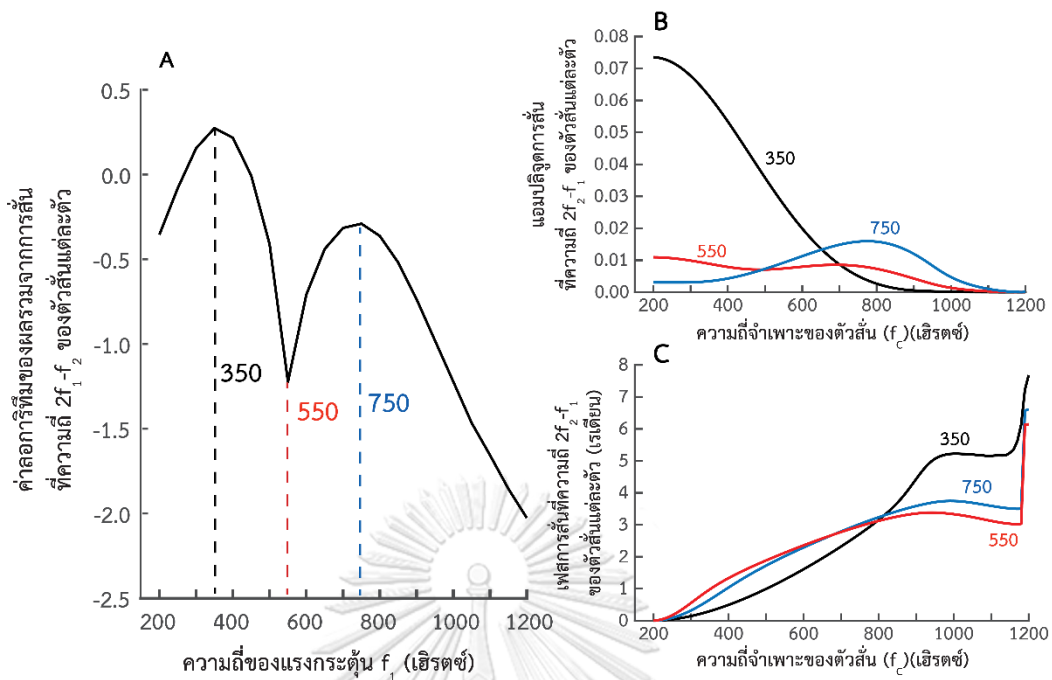
เมื่อตัวสั่นที่อยู่ติดกันมีการเชื่อมต่อกันผ่านทางสปริงค่าคงที่ k พบว่าแอมพลิจูดของผลรวมความเพี้ยนไม่เชิงเส้น (nonlinear distortion) ที่ความถี่ $2f_1-f_2$ และ $2f_2-f_1$ แสดงจุดต่ำสุดสัมพัทธ์ ดังรูปที่ 5.4 เมื่อค่าคงที่สปริงมีค่าเพิ่มขึ้น แอมพลิจูดที่จุดต่ำสุดจะมีค่าลดลง และมีลักษณะคล้ายโครงสร้างละเอียดของเสียงดีพีโอเออีที่พบจากผลการทดลองมากขึ้น อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดกับความถี่ของแรงกระตุ้นนี้สามารถพบได้ชัดเจนในความเพี้ยนไม่เชิงเส้น (nonlinear distortion) ความถี่ทั้ง $2f_1-f_2$ และ $2f_2-f_1$ ซึ่งแตกต่างจากผลการทดลอง



รูปที่ 5.3 (A, เส้นทึบ) แอมพลิจูดของผลรวมความเพี้ยนไม่เชิงเส้น (nonlinear distortion) ที่ความถี่ $2f_1-f_2$ แสดงจุดสูงสุดสัมพันธ์สองจุดเมื่อตัวลั่นที่อยู่ติดกันเชื่อมกันโดยสปริงที่มีค่าคงที่ $k = 5 \times 10^5$ (A, เส้นประ) แอมพลิจูดของผลรวมความเพี้ยนไม่เชิงเส้นมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับแรงภายนอกเมื่อตัวลั่น ไม่มีการเชื่อมต่อกับตัวลั่นที่อยู่ติดกัน ($k = 0$) (B) แอมพลิจูดของผลรวมความเพี้ยนไม่เชิงเส้นที่ความถี่ $2f_2-f_1$ ค่าพารามิเตอร์เช่นเดียวกับ (A) ($F = 5,000$, $f_2-f_1 = 100$ เฮิรตซ์)

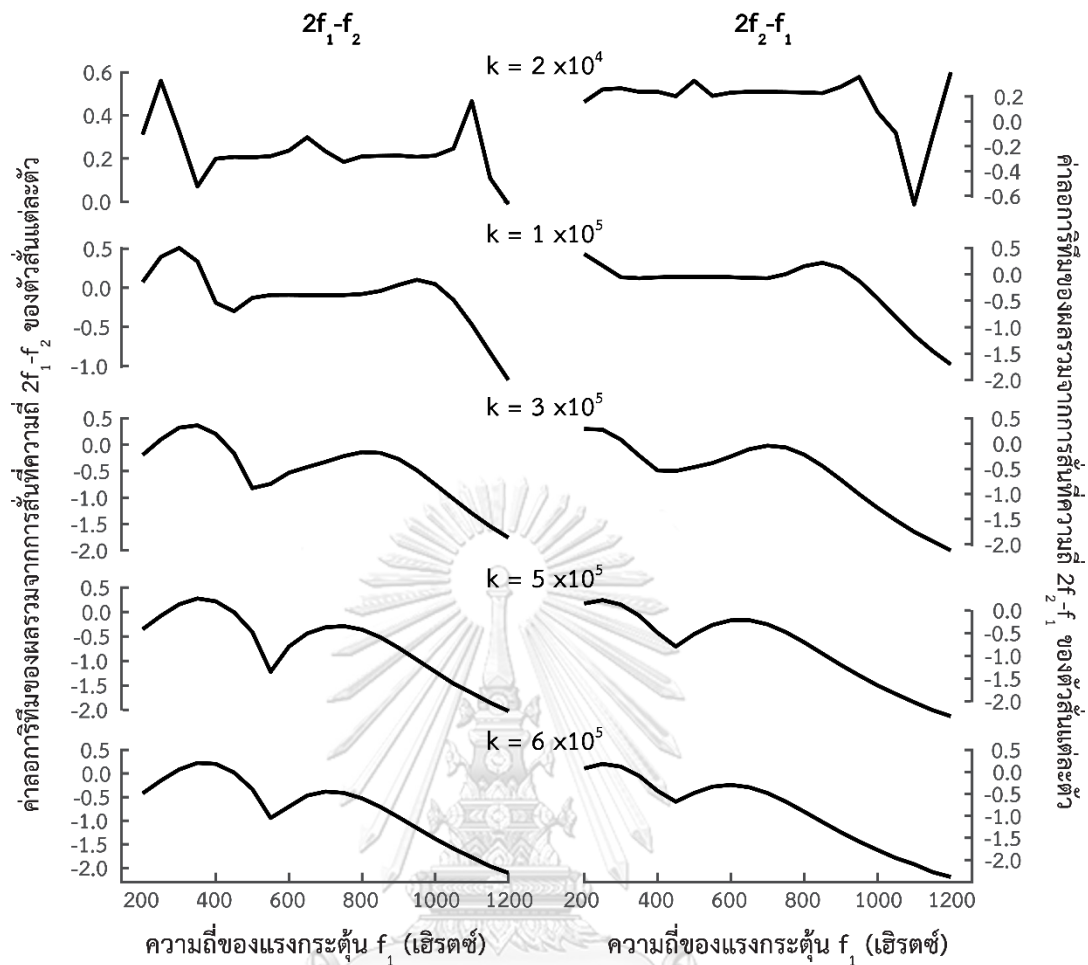
เมื่อความถี่แรงกระตุ้น f_1 มีค่า 350 เฮิรตซ์ ซึ่งสอดคล้องกับจุดสูงสุดของแอมพลิจูดของผลรวมความเพี้ยนไม่เชิงเส้น (nonlinear distortion) ในรูปที่ 5.3 แอมพลิจูดของการกระจัดของแต่ละตัวลั่นที่ความถี่ 250 เฮิรตซ์ ($2f_1-f_2$) มีค่าแตกต่างกัน โดยตัวลั่นที่มีความถี่จำเพาะต่ำและใกล้เคียงความถี่ของแรงกระตุ้นมีการตอบสนองสูง (รูปที่ 5.4) เมื่อคำนวณเฟสของการกระจัดของแต่ละตัวลั่นที่ความถี่ 250 เฮิรตซ์ (เทียบกับเฟสของการลั่นที่ความถี่จำเพาะต่ำสุด) พบว่าเฟสมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับของตัวลั่น เนื่องจากการกระจัดของตัวลั่นเหล่านี้มีเฟสต่างกัน ความเพี้ยนไม่เชิงเส้น (nonlinear distortion) ของระบบจึงเป็นการแทรกสอดกันของสัญญาณทั้งหมด

เมื่อความถี่ของแรงกระตุ้น f_1 เท่ากับ 550 เฮิรตซ์ ซึ่งสอดคล้องกับจุดต่ำสุดของแอมพลิจูดของผลรวมความเพี้ยนไม่เชิงเส้น (nonlinear distortion) พบว่าแอมพลิจูดของการกระจัดที่ความถี่ $2f_1-f_2$ ของตัวลั่นทั้งหมดมีค่าต่ำและใกล้เคียงกัน การลดลงของแอมพลิจูดของการลั่นนี้บ่งชี้ถึงความเป็นไปได้ในการเกิดการลั่นพ้องขึ้นในระบบของตัวลั่น โดยความถี่เสียงกระตุ้น f_1 เท่ากับ 350 เฮิรตซ์ อาจมีค่าใกล้เคียงความถี่มูลฐานของระบบ ซึ่งความถี่ดังกล่าวยังมีค่าน้อยลงเมื่อค่าคงที่สปริงลดลงอีกด้วย (รูปที่ 5.5) เมื่อพิจารณาเฟสของการกระจัดของแต่ละตัวลั่น พบว่าเฟสมีการเปลี่ยนแปลงไป π เรเดียนในช่วงที่ตัวลั่นแสดงแอมพลิจูดของความเพี้ยนไม่เชิงเส้น (nonlinear distortion) สูงจึงเกิดการแทรกสอดแบบหักล้าง



รูปที่ 5.4 (A) แสดงแอมพลิจูดของความเพี้ยนไม่เชิงเส้น (nonlinear distortion) ความถี่ $2f_1 - f_2$ (B) แอมพลิจูด และ (C) มุมเฟสของการกระจัดที่ความถี่ $2f_1 - f_2$ ของตัวลั่นแต่ละตัวเทียบกับเฟสของตัวลั่นที่มีความถี่จำเพาะ 200 เฮิรตซ์ ที่ความถี่จำเพาะต่างๆ เมื่อแรงกระตุ้น f_1 มีค่าเป็น 350 (เส้นสีดำ), 550 (เส้นสีแดง) และ 750 เฮิรตซ์ (เส้นสีฟ้า) ($F = 5,000$, $f_2 - f_1 = 100$ และ $k = 5 \times 10^{-5}$)

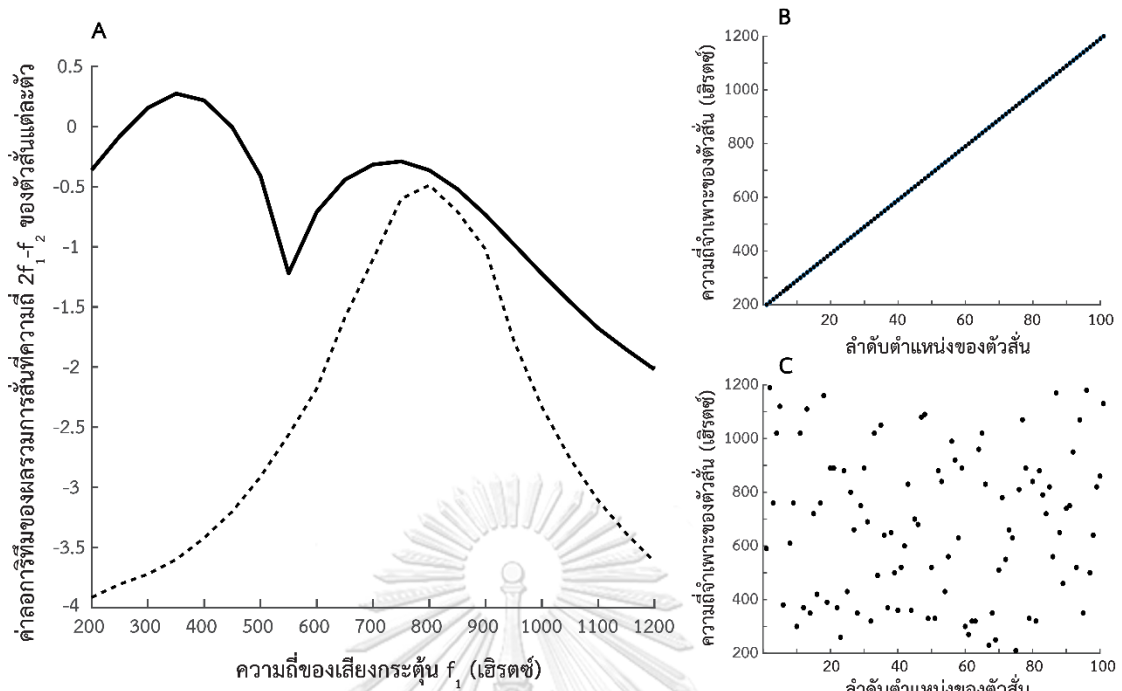
ที่ความถี่ของแรงกระตุ้น f_1 เท่ากับ 750 เฮิรตซ์ ตัวลั่นที่ความถี่จำเพาะใกล้เคียงกับความถี่แรงกระตุ้นมีแอมพลิจูดสูงชันเล็กน้อย และตัวลั่นที่ความถี่จำเพาะห่างจากความถี่แรงกระตุ้นมีการตอบสนองเข้าใกล้ศูนย์ ตัวลั่นที่แสดงแอมพลิจูดสูง ซึ่งมีความถี่จำเพาะประมาณ 600-1,000 เฮิรตซ์ แสดงความต่างเฟสเพียงเล็กน้อย (ประมาณ 1 เรเดียน) ลักษณะดังกล่าวทำให้การแทรกสอดไม่เกิดการหักล้างเท่ากับกรณี f_1 เท่ากับ 550 เฮิรตซ์ และผลรวมความเพี้ยนไม่เชิงเส้น (nonlinear distortion) มีค่าสูงขึ้น ในแง่ของการสิ้นเปลือง เราไม่สามารถสรุปได้ว่าความถี่เสียงกระตุ้นดังกล่าวทำให้เกิดการสิ้นเปลืองที่ความถี่เป็นสองเท่าของความถี่มูลฐาน เนื่องจากแอมพลิจูดของการกระจัดสูงสุดของตัวลั่นมีค่าน้อยกว่ากรณี f_1 เท่ากับ 350 เฮิรตซ์เป็น 4 เท่า และความถี่ของแรงกระตุ้นที่จุดสูงสุดสัมพันธ์ที่สองไม่เท่ากับสองเท่าของความถี่ที่จุดสูงสุดแรกเสมอไป (รูปที่ 5.5) การเกิดจุดสูงสุดและต่ำสุดของแอมพลิจูดของผลรวมความเพี้ยนไม่เชิงเส้น (nonlinear distortion) อาจเกิดจากปัจจัยทั้งสองร่วมกัน



รูปที่ 5.5 ลักษณะโครงสร้างละเอียดของเสียงดีพีโอเออีจะแสดงก็ต่อเมื่อตัวสั่นมีค่าคงที่สปริง (k) เหมาะสมเท่านั้น โดยค่าคงที่สปริง $k = 2 \times 10^4$, 1×10^5 , 3×10^5 , 5×10^5 และ 6×10^5 ($F = 5,000$ และ $f_2 - f_1 = 100$)

5.3 ผลของการเรียงตัวสั่นตามความถี่ธรรมชาติ

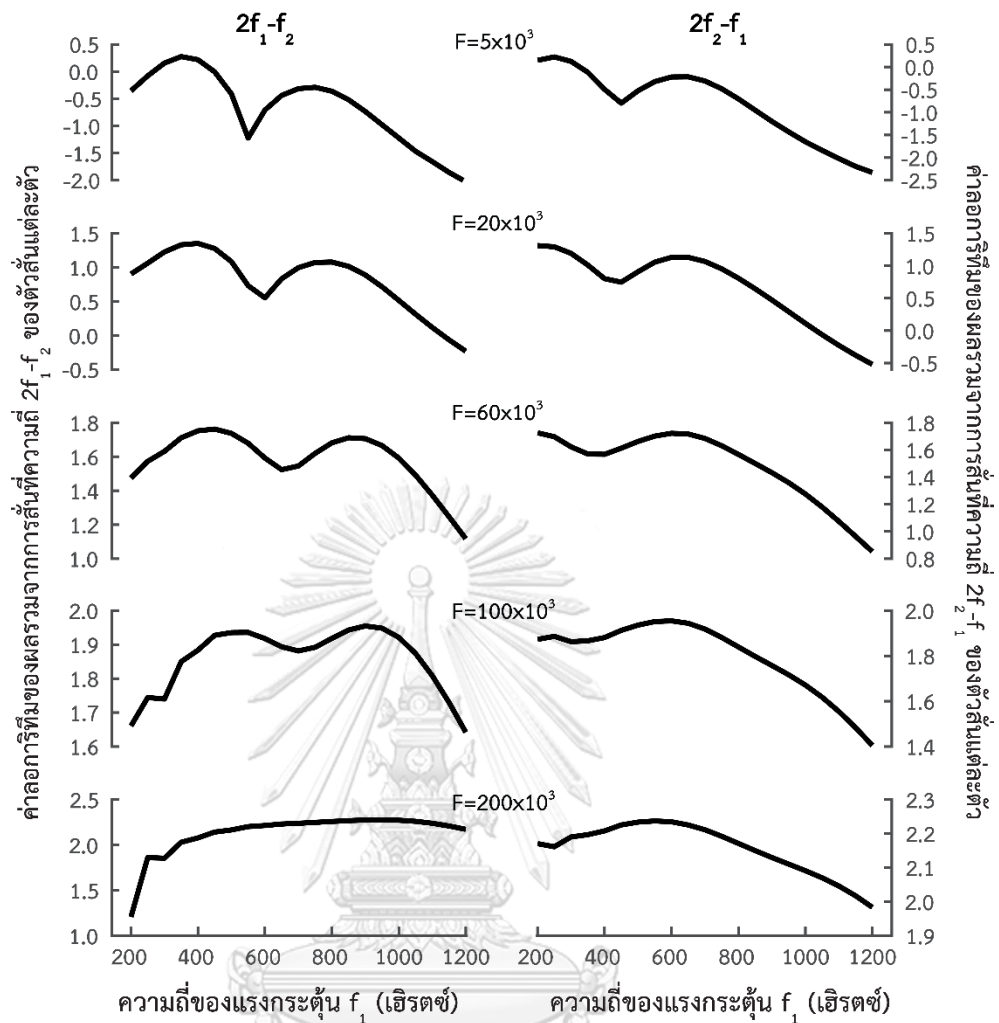
ผลการจำลองเชิงตัวเลขในหัวข้อที่ผ่านมาแสดงว่าลักษณะคล้ายโครงสร้างละเอียดของแอมพลิจูดของความเพี้ยนไม่เชิงเส้น (nonlinear distortion) สามารถพบได้เมื่อตัวสั่นมีการจัดเรียงตามลำดับความถี่จำเพาะ หากความถี่ของตัวสั่นมีการเรียงอย่างสุ่ม ลักษณะคล้ายโครงสร้างละเอียดจะไม่ปรากฏและแอมพลิจูดของความเพี้ยนไม่เชิงเส้น (nonlinear distortion) จะคล้ายการตอบสนองจากตัวสั่นหนึ่งตัวที่มีความถี่จำเพาะ 700 เฮิรตซ์ซึ่งเท่ากับความถี่จำเพาะเฉลี่ยของระบบ (รูปที่ 5.6)



รูปที่ 5.6 (A) แอมพลิจูดของความเพี้ยนไม่เชิงเส้น (nonlinear distortion) ที่ความถี่ $2f_1 - f_2$ แสดงลักษณะคล้ายโครงสร้างละเอียดโดยมีจุดสูงสุดสัมพันธ์ตำแหน่งเมื่อตัวส่งเรียงตามลำดับความถี่จำเพาะ (เส้นทึบ) และแอมพลิจูดของความเพี้ยนไม่เชิงเส้นมีเพียงจุดสูงสุดเดียวเมื่อตัวส่งเรียงแบบสุ่ม (เส้นประ) (B) ตัวส่งเรียงลำดับตามความถี่จำเพาะ (C) ตัวส่งเรียงตัวแบบสุ่มโดยความถี่จำเพาะไม่ขึ้นกับตำแหน่งของตัวส่ง ($F = 5,000$, $f_2/f_1 = 100$ และ $k = 5 \times 10^5$)

5.4 ผลของแอมพลิจูดของแรงภายนอก

เมื่อแอมพลิจูดของแรงภายนอกมีขนาดเพิ่มขึ้น และผลต่างของความถี่ของแรงมีค่าคงที่พบว่าแอมพลิจูดของผลรวมความเพี้ยนไม่เชิงเส้น (nonlinear distortion) มีค่าขึ้นอยู่กับความถี่ของแรงน้อยลง โดยเมื่อแรงมีค่าเท่ากับ 5×10^3 แอมพลิจูดแสดงลักษณะคล้ายโครงสร้างละเอียดโดยมี 2 จุดสูงสุดสัมพันธ์ เมื่อแรงมีขนาดเพิ่มขึ้นเป็น 20×10^3 , 60×10^3 และ 100×10^3 แอมพลิจูดที่จุดต่ำสุดสัมพันธ์มีค่าสูงขึ้นเป็นลำดับ และความถี่ที่จุดสูงสุดทั้งสองมีค่าเพิ่มขึ้น จนกระทั่งเมื่อแรงมีค่า 200×10^3 กราฟเหลือเพียงจุดสูงสุดสัมพันธ์เดียว ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่จุดสูงสุดของแอมพลิจูดของผลรวมความเพี้ยนไม่เชิงเส้น (nonlinear distortion) นี้สอดคล้องกับผลการทดลองวัดเสียงสะท้อนแบบดีพีโอเออีในกบนา



รูปที่ 5.7 ลักษณะโครงสร้างละเอียดของเสียงดีพีโอเออีจะแสดงก็ต่อเมื่อตัวสั่นได้รับแรงที่มีค่าเหมาะสมเท่านั้น โดยขนาดแรงกระตุ้น $F = 5 \times 10^3$, 20×10^3 , 60×10^3 , 100×10^3 และ 200×10^3 ($f_2 - f_1 = 100$ และ $k = 5 \times 10^5$)

บทที่ 6

อภิปรายผลการทดลอง

ในโครงการวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการวัดเสียงสะท้อนจากหูชั้นในแบบดีพีโอเออีในกบนาและกบวัว เพื่อสืบหาความเป็นไปได้ในการเกิดโครงสร้างละเอียดของเสียงดีพีโอเออีจากหูชั้นในของสัตว์ซึ่งไม่มีคลื่นตามขวางบนเนื้อเยื่อบาซิลลาร์ จากผลการทดลองพบว่ากบนาสามารถแสดงโครงสร้างละเอียดของเสียงสะท้อนแบบดีพีโอเออีได้ ซึ่งก่อนหน้านี้มีรายงานว่าพบได้ในมนุษย์เท่านั้น โดยโครงสร้างละเอียดในกบส่วนใหญ่เกิดขึ้นในช่วงความถี่ที่สอดคล้องกับการตอบสนองของแอมฟิเบีย พาพิลลา อย่างไรก็ตาม กบบางตัวแสดงโครงสร้างละเอียดในช่วงความถี่ที่สอดคล้องกับบาซิลลาร์ พาพิลลาด้วย ส่วนกบวัวไม่แสดงโครงสร้างละเอียดที่ชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยอื่นๆที่ผ่านมา

การเกิดโครงสร้างละเอียดของเสียงดีพีโอเออีมีกลไกที่เป็นไปได้สองประการที่แตกต่างกัน ได้แก่ การเกิดเรโซแนนซ์ของเสียงดีพีโอเออีภายในหูชั้นกลางและช่องปาก อย่างไรก็ตาม ความถี่ของเสียงกระตุ้นที่ตำแหน่งสูงสุดสัมพันธ์ของกราฟดีพีแกรมมีค่าขึ้นอยู่กับความดังของเสียงกระตุ้นและอุณหภูมิ (รูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.12) ซึ่งเป็นลักษณะที่ไม่สอดคล้องกับเรโซแนนซ์ของเสียงสะท้อนในโครงสร้างของหูชั้นกลางและช่องปาก นอกจากนี้ เมื่อยับยั้งการสั่นของเยื่อแก้วหูข้างที่ไม่ถูกกระตุ้น พบว่ากราฟดีพีแกรมไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด (รูปที่ 4.11) จึงอาจสรุปว่าเรโซแนนซ์ของเสียงสะท้อนระหว่างเยื่อแก้วหูทั้งสองข้างผ่านหูชั้นกลางและช่องปากมิใช่กลไกหลักในการเกิดโครงสร้างละเอียดของเสียงดีพีโอเออี

กลไกการเกิดโครงสร้างละเอียดที่เป็นไปได้ประการที่สองคืออันตรกิริยาระหว่างเซลล์ขนภายในหูชั้นในข้างที่ถูกกระตุ้น โดยอาจแบ่งได้เป็น 3 กรณี ดังนี้ กรณีที่ 1 โครงสร้างละเอียดเกิดจากการแทรกสอดของสัญญาณดีพีโอเออีจากแอมฟิเบีย พาพิลลาและบาซิลลาร์ พาพิลลา ซึ่งอาจให้สัญญาณที่มีความต่างเฟสกัน กรณีที่ 2 โครงสร้างละเอียดทั้งหมดเกิดจากอันตรกิริยาระหว่างเซลล์ขนในแอมฟิเบีย พาพิลลาเท่านั้น และกรณีที่ 3 โครงสร้างละเอียดในช่วงความถี่ต่ำเกิดจากอันตรกิริยาระหว่างเซลล์ขนในแอมฟิเบีย พาพิลลาและโครงสร้างละเอียดในช่วงความถี่สูงเกิดจากเซลล์ขนในบาซิลลาร์ พาพิลลา

หากสมมติฐานที่ 1 เป็นจริง เมื่อส่งเสียงกระตุ้นเข้าไปยังหูชั้นใน เสียงทั้งสองความถี่ต้องเดินทางไปยังอวัยวะรับเสียงทั้งสองของกบ เพื่อกระตุ้นสัญญาณดีพีโอเออีจากทั้งสองอวัยวะ โดยสัญญาณทั้งสองนี้ต้องมีความต่างเฟสที่ขึ้นอยู่กับความถี่ของเสียงกระตุ้น อย่างไรก็ตาม ผลจากงานวิจัยที่ทำการทดลองวัดแอมพลิจูดของการสั่นของเนื้อเยื่อภายในอวัยวะทั้งสองแสดงว่า หากเสียงที่ผ่านเข้าไปไม่อยู่ในช่วงความถี่ที่อวัยวะดังกล่าวตอบสนอง พลังงานเสียงจะถูกลดทอนจนความดังลดลงโดยเฉลี่ย 20 เดซิเบล ดังนั้น เสียงกระตุ้นที่อยู่ในช่วงความถี่ของแอมฟิเบีย พาพิลลาจึงอาจ

กระตุ้นให้เกิดเสียงดีพีโอเออีจากบาซิลลาร์ พาพิลลาที่แอมพลิจูดต่ำ การแทรกสอดกันของเสียงดีพีโอเออีจากทั้งสองอวัยวะจึงมีผลต่อระดับเสียงดีพีโอเออีน้อยมาก ทำให้การเกิดโครงสร้างละเอียดของเสียงดีพีโอเออีในกบเหลือความเป็นไปได้ 2 กรณี คือ โครงสร้างละเอียดเกิดจากแอมฟีเบียน พาพิลลาเท่านั้น และโครงสร้างละเอียดเกิดขึ้นได้ทั้งในแอมฟีเบียน พาพิลลาและบาซิลลาร์ พาพิลลา

การจำลองเชิงตัวเลขจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบุว่า แอมพลิจูดของผลรวมความเพี้ยนไม่เชิงเส้น (nonlinear distortion) จากระบบของตัวสั่นสามารถแสดงลักษณะคล้ายโครงสร้างละเอียดได้เมื่อตัวสั่นเรียงตัวตามลำดับความถี่จำเพาะเท่านั้น ในกรณีที่ตัวสั่นมีการเรียงตัวกันแบบสุ่ม การตอบสนองจะมีลักษณะคล้ายตัวสั่นหนึ่งตัวและไม่สามารถแสดงจุดสูงสุดสัมพัทธ์มากกว่า 1 จุดได้ (รูปที่ 5.6) เมื่อเปรียบเทียบกับเสียงของเซลล์ขนในบาซิลลาร์ พาพิลลาซึ่งเป็นการกระจายตัวอย่างสุ่มและมีความถี่จำเพาะใกล้เคียงกัน จึงมีความเป็นไปได้ต่ำที่โครงสร้างละเอียดของเสียงดีพีโอเออีจะเกิดจากบาซิลลาร์ พาพิลลา

ผลจากแบบจำลองยังให้ผลที่สอดคล้องกับผลการทดลองเมื่อความถี่ของเสียงกระตุ้นมีการเปลี่ยนแปลง โดยโครงสร้างละเอียดจะพบได้เมื่อความถี่ของเสียงกระตุ้นอยู่ในระดับที่เหมาะสม นอกจากนี้ การเปลี่ยนแปลงค่าคงที่สปริงที่เชื่อมต่อระหว่างตัวสั่นที่อยู่ติดกันยังสามารถแสดงแอมพลิจูดของความเพี้ยนไม่เชิงเส้น (nonlinear distortion) ที่คล้ายกับกราฟดีพีแอมจากกบวัว จึงอาจนำไปสู่ข้อสันนิษฐานว่าเยื่อคลุม (tectorial membrane) ของกบวัวอาจมีความยืดหยุ่นสูงกว่ากบนา จึงไม่แสดงโครงสร้างละเอียดที่ชัดเจนเท่า

ผลการศึกษาเบื้องต้นจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้นำไปสู่แนวคิดของกลไกการเกิดโครงสร้างละเอียดในสัตว์ที่ไม่มีคลื่นตามขวางในหูชั้นใน กล่าวคือ การเกิดโครงสร้างละเอียดอาจเป็นผลจากสองกระบวนการร่วมกัน ได้แก่ การสั่นพ้องของระบบตัวสั่น และการแทรกสอดของสัญญาณดีพีโอเออีจากแต่ละตัวสั่นซึ่งมีเฟสต่างกันและทำให้เกิดจุดสูงสุดและต่ำสุดสัมพัทธ์ได้ อย่างไรก็ตาม กลไกการเกิดโครงสร้างละเอียดดังกล่าวยังต้องอาศัยการศึกษาเพิ่มเติมจึงจะได้ข้อสรุปที่ชัดเจน เช่น การวิเคราะห์เฟสและแอมพลิจูดของสัญญาณดีพีโอเออีที่สร้างจากตัวสั่นแต่ละตัวที่ความถี่และความถี่ของแรงกระตุ้นต่างๆกัน รวมทั้งการศึกษาผลของเสียงรบกวนที่มีต่อโครงสร้างละเอียดของเสียงดีพีโอเออีทั้งในเชิงการทดลองและจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อวิเคราะห์บทบาทของเซลล์รับเสียงในแต่ละช่วงความถี่ที่มีต่อการเกิดโครงสร้างละเอียด เป็นต้น นอกจากนี้ ผลจากแบบจำลองไม่สามารถอธิบายการเกิดโครงสร้างละเอียดในช่วงความถี่ที่สอดคล้องกับบาซิลลาร์ พาพิลลา ซึ่งพบได้ในกบบางตัว (รูปที่ 4.3) ปรากฏการณ์ดังกล่าวอาจเป็นผลจากช่วงความถี่ของอวัยวะทั้งสองที่อาจเหลื่อมกันได้

แบบจำลองที่ใช้ในโครงการวิจัยนี้แสดงโครงสร้างละเอียดของเสียงดีพีโอเออีทั้งที่ความถี่ $2f_1-f_2$ และ $2f_2-f_1$ ซึ่งขัดแย้งกับผลการทดลองที่แสดงโครงสร้างละเอียดที่ความถี่ $2f_1-f_2$ เท่านั้น ทฤษฎี

การเกิดเสียงสะท้อนแบบตีโพยตีพายในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมเชื่อว่าเสียงสะท้อนทั้งสองความถี่นี้เกิดขึ้นจากคนละครบวนการกัน โดยเสียงสะท้อนที่ความถี่ $2f_2f_1$ ไม่ทำให้เกิดการสะท้อนกลับไปมาของคลื่นตามขวางภายในอวัยวะรูปก้นหอย ซึ่งเป็นผลจากการเรียงตัวของเซลล์รับเสียงตามลำดับความถี่จากสูงไปต่ำและคุณสมบัติของเนื้อเยื่อบาซิลลาร์ ข้อสันนิษฐานนี้ไม่สามารถนำมาใช้อธิบายเสียงตีโพยตีพายในสัตว์ครึ่งบกครึ่งน้ำที่ปราศจากคลื่นตามขวางได้ ความไม่สมมาตรของลักษณะเสียงสะท้อนดังกล่าวอาจเกิดจากปัจจัยอื่นๆ เช่น การที่ค่าคงที่สปริงมีค่าไม่คงที่ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของตัวสัน หรือความถี่เรโซแนนซ์ของเยื่อคลุม (tectorial membrane) ที่อาจส่งผลกระทบต่อเสียงตีโพยตีพายที่ความถี่ต่างๆ ไม่เท่ากัน เป็นต้น



บทที่ 7

ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาเสียงสะท้อนแบบตีฟิโอะเออีในกบนาและกบวัว พบว่าแอมพลิจูดของเสียงสะท้อนขึ้นอยู่กับความถี่ของเสียงกระตุ้นแบบทวิฐานนิยม (bimodal) ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะที่พบได้ในกบในวงศ์กบนา ที่ความถี่และความถี่ของเสียงกระตุ้นที่เหมาะสม กราฟตีฟิโอะเออีสามารถแสดงจุดสูงสุดสัมพัทธ์ได้มากกว่า 2 จุด โดยลักษณะดังกล่าวคล้ายกับโครงสร้างละเอียดของเสียงตีฟิโอะเออีที่พบได้ในมนุษย์ ในงานวิจัยนี้จึงเรียกลักษณะของกราฟตีฟิโอะเออีที่มีมากกว่า 2 จุดสูงสุดสัมพัทธ์ว่า โครงสร้างละเอียดของเสียงตีฟิโอะเออี

เสียงตีฟิโอะเออีของกบนาสามารถแสดงโครงสร้างละเอียดของเสียงตีฟิโอะเออีได้ เมื่อระดับเสียงกระตุ้นมีค่า 70 – 80 เดซิเบล และผลต่างของเสียงกระตุ้นมีค่า 100 – 250 เฮิรตซ์ โดยประมาณ ซึ่งกบนาทุกตัวที่ใช้ในการทดลอง (18 จาก 20 ตัว) สามารถแสดงโครงสร้างละเอียดของเสียงตีฟิโอะเออีได้ ผลการทดลองเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของร่างกายและการยับยั้งการสั่นของเยื่อแก้วหูข้างที่ไม่ถูกกระตุ้นบ่งชี้ว่าโครงสร้างละเอียดอาจเกิดจากอันตรกิริยาระหว่างเซลล์ขนในหูชั้นในข้างที่ถูกกระตุ้น โดยไม่ได้มีกลไกหลักมาจากการสั่นพ้องของเสียงระหว่างเยื่อแก้วหูทั้งสองข้างผ่านทางช่องปาก

เมื่อพิจารณาช่วงความถี่ของโครงสร้างละเอียดจากผลการทดลอง และผลการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ทำให้ได้ข้อสรุปเบื้องต้นว่า แอมฟิเบีย นพาลิลาสามารถแสดงโครงสร้างละเอียดของเสียงตีฟิโอะเออีได้ โดยปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดโครงสร้างละเอียดของเสียงตีฟิโอะเออีคือ เซลล์ขนมีการจัดเรียงตัวกันตามลำดับความถี่จำเพาะและเซลล์ขนทุกตัวมีอันตรกิริยาที่แข็งแรงระหว่างกัน โครงสร้างละเอียดอาจเกิดจากการสั่นพ้องของระบบของเซลล์รับเสียง และการแทรกสอดของสัญญาณตีฟิโอะเออีที่สร้างจากเซลล์ขนแต่ละเซลล์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในงานวิจัยนี้เป็นเพียงแบบจำลองเบื้องต้นเท่านั้น ถึงแม้ว่าจะให้ผลสอดคล้องกับผลการทดลอง แต่ยังมีข้อขัดแย้งโดยเฉพาะอย่างยิ่งการเกิดโครงสร้างละเอียดของเสียงตีฟิโอะเออีที่ความถี่ $2f_2 - f_1$ จึงต้องพัฒนาต่อเพื่อที่จะสามารถนำมาใช้ในการอธิบายการเกิดเสียงตีฟิโอะเออีในกบได้ดียิ่งขึ้น โดยขั้นต่อไปเป็นการศึกษาผลของเสียงรบกวนที่มีต่อโครงสร้างละเอียดของเสียงตีฟิโอะเออีทั้งในเชิงการทดลองและจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อวิเคราะห์บทบาทของเซลล์รับเสียงในช่วงความถี่ต่างๆที่มีต่อการเกิดโครงสร้างละเอียด

รายการอ้างอิง

- [1] Hudspeth, A., *Making an effort to listen: mechanical amplification in the ear*. Neuron, 2008. 59(4): p. 530-545.
- [2] Avan, P., B. Büki, and C. Petit, *Auditory distortions: origins and functions*. Physiological Reviews, 2013. 93(4): p. 1563-1619.
- [3] Martin, P. and A. Hudspeth, *Active hair-bundle movements can amplify a hair cell's response to oscillatory mechanical stimuli*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 1999. 96(25): p. 14306-14311.
- [4] Bergevin, C., et al., *Otoacoustic emissions in humans, birds, lizards, and frogs: evidence for multiple generation mechanisms*. Journal of Comparative Physiology A, 2008. 194(7): p. 665-683.
- [5] Manley, G.A., C. Köppl, and B.M. Johnstone, *Distortion-product otoacoustic emissions in the bobtail lizard. I: General characteristics*. The Journal of the Acoustical Society of America, 1993. 93(5): p. 2820-2833.
- [6] Hall, D., *Understanding intermodulation distortion measurements*. Electronic Design, 2013.
- [7] Barral, J. and P. Martin, *Phantom tones and suppressive masking by active nonlinear oscillation of the hair-cell bundle*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2012. 109(21): p. E1344-E1351.
- [8] Kummer, P., T. Janssen, and W. Arnold, *Suppression tuning characteristics of the $2f_1 - f_2$ distortion-product otoacoustic emission in humans*. The Journal of the Acoustical Society of America, 1995. 98(1): p. 197-210.
- [9] Mills, D.M., *Interpretation of distortion product otoacoustic emission measurements. I. Two stimulus tones*. The Journal of the Acoustical Society of America, 1997. 102(1): p. 413-429.
- [10] Talmadge, C.L., et al., *Experimental confirmation of the two-source interference model for the fine structure of distortion product otoacoustic emissions*. The Journal of the Acoustical Society of America, 1999. 105(1): p. 275-292.

- [11] Heitmann, J., et al., *Suppression of distortion product otoacoustic emissions (DPOAE) near $2f_1-f_2$ removes DP-gram fine structure—Evidence for a secondary generator*. The Journal of the Acoustical Society of America, 1998. 103(3): p. 1527-1531.
- [12] Meenderink, S.W. and P. van Dijk, *Level dependence of distortion product otoacoustic emissions in the leopard frog, Rana pipiens pipiens*. Hearing research, 2004. 192(1-2): p. 107-118.
- [13] Hudspeth, A., *Integrating the active process of hair cells with cochlear function*. Nature Reviews Neuroscience, 2014. 15(9): p. 600-614.
- [14] Martin, P., et al., *Spontaneous oscillation by hair bundles of the bullfrog's sacculus*. Journal of Neuroscience, 2003. 23(11): p. 4533-4548.
- [15] Martin, P. and A. Hudspeth, *Compressive nonlinearity in the hair bundle's active response to mechanical stimulation*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2001. 98(25): p. 14386-14391.
- [16] Vassilakis, P.N., S.W. Meenderink, and P.M. Narins, *Distortion product otoacoustic emissions provide clues to hearing mechanisms in the frog ear*. The Journal of the Acoustical Society of America, 2004. 116(6): p. 3713-3726.
- [17] Meenderink, S.W., P.M. Narins, and P. van Dijk, *Detailed f_1, f_2 area study of distortion product otoacoustic emissions in the frog*. Journal of the Association for Research in Otolaryngology, 2005. 6(1): p. 37-47.
- [18] Purgue, A. and P. Narins, *Mechanics of the inner ear of the bullfrog (Rana catesbeiana): the contact membranes and the periotic canal*. Journal of Comparative Physiology A, 2000. 186(5): p. 481-488.
- [19] Patel, S.H., et al., *Frequency-selective exocytosis by ribbon synapses of hair cells in the bullfrog's amphibian papilla*. Journal of Neuroscience, 2012. 32(39): p. 13433-13438.
- [20] Narins, P.M., A.S. Feng, and R.R. Fay, *Hearing and sound communication in amphibians*. Vol. 28. 2006: Springer Science & Business Media.
- [21] Van Dijk, P., et al., *Mechanics of the frog ear*. Hearing research, 2011. 273(1-2): p. 46-58.

- [22] Ruggero, M.A. and A.N. Temchin, *The roles of the external, middle, and inner ears in determining the bandwidth of hearing*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2002. 99(20): p. 13206-13210.
- [23] Kuznetsov, Y., *Andronov-Hopf bifurcation*. Scholarpedia, 2006. 1: p. 1858.
- [24] Camalet, S., et al., *Auditory sensitivity provided by self-tuned critical oscillations of hair cells*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2000. 97(7): p. 3183-3188.
- [25] Jülicher, F., D. Andor, and T. Duke, *Physical basis of two-tone interference in hearing*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2001. 98(16): p. 9080-9085.
- [26] Fruth, F., F. Jülicher, and B. Lindner, *An active oscillator model describes the statistics of spontaneous otoacoustic emissions*. Biophysical journal, 2014. 107(4): p. 815-824.
- [27] Vilfan, A. and T. Duke, *Frequency clustering in spontaneous otoacoustic emissions from a lizard's ear*. Biophysical journal, 2008. 95(10): p. 4622-4630.
- [28] Van Loan, C., *Computational frameworks for the fast Fourier transform*. Vol. 10. 1992: Siam.
- [29] Yang, W.Y., et al., *Applied numerical methods using MATLAB*. 2005: John Wiley & Sons.

บรรณานุกรม

1. Narins, P.M., A.S. Feng, and R.R. Fay, *Hearing and sound communication in amphibians*. Vol. 28. 2006: Springer Science & Business Media.
2. Strogatz, S.H., *Nonlinear dynamics and chaos: with applications to physics, biology, chemistry, and engineering*. 2018: CRC Press.
3. Yang, W.Y., et al., *Applied numerical methods using MATLAB*. 2005: John Wiley & Sons.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก.

ตารางที่ 1 แสดงข้อมูลของสัตว์ทดลอง

ตัวที่	วันที่ทำการทดลอง	ชนิดของกบ	เพศ	น้ำหนัก (กรัม)	ตัวที่	วันที่ทำการทดลอง	ชนิดของกบ	เพศ	น้ำหนัก (กรัม)
1	20/11/2561	กบนา	เมีย	216	13	17/4/2562	กบนา	ผู้	188
2	26/11/2561	กบนา	เมีย	231	14	3/5/2562	กบนา	ผู้	190
3	17/12/2561	กบนา	ผู้	206	15	7/5/2562	กบนา	ผู้	151
4	27/12/2561	กบนา	ผู้	213	16	9/5/2562	กบวัว	ผู้	190
5	14/1/2562	กบนา	ผู้	170	17	16/5/2562	กบนา	ผู้	162
6	16/1/2562	กบวัว	ผู้	147	18	21/5/2562	กบนา	ผู้	147
7	23/1/2562	กบนา	ผู้	139	19	13/6/2562	กบนา	ผู้	163
8	29/1/2562	กบนา	ผู้	199	20	27/8/2562	กบนา	ผู้	160
9	7/2/2562	กบนา	ผู้	131	21	4/9/2562	กบนา	เมีย	315
10	12/2/2562	กบนา	เมีย	218	22	10/9/2562	กบนา	ผู้	185
11	15/2/2562	กบวัว	ผู้	177	23	18/9/2562	กบนา	ผู้	192
12	5/4/2562	กบวัว	ผู้	173	24	9/10/2562	กบนา	ผู้	217

ภาคผนวก ข.

ตัวสั่นไม่เชิงเส้นที่มีแรงภายนอกกระทำอธิบายได้ดังนี้ [24, 25]

$$\dot{Z} = (\mu + i\omega_0)Z - |Z|^2 Z + F(t) \quad (\text{ผข.1})$$

โดยที่ Z คือ การกระจัดเชิงซ้อนของตัวสั่น
 μ คือ พารามิเตอร์ควบคุม (control parameter)
 ω_0 คือ ความถี่จำเพาะของตัวสั่น
 $F(t)$ คือ แรงกระตุ้น

เมื่อแรงภายนอกเป็นศูนย์พบว่า Z มีค่าเป็น $\sqrt{\mu} \cdot \exp(i\omega_0 t)$ และเมื่อ $F(t)$ เป็นแรงภายนอกรูปไซน์ที่มีหนึ่งความถี่ แอมพลิจูดของ Z จะขึ้นกับแอมพลิจูดของ $F(t)$ แบบไม่เชิงเส้น โดยมีความสัมพันธ์ $Z = F^{1/3}$ และเมื่อแรงกระทำมีสองความถี่ การกระจัดของ Z ที่ความถี่เท่ากับผลรวมเชิงเส้นของความถี่ของแรงภายนอกมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ สมมติให้การกระจัดของตัวสั่นอธิบายได้ดังสมการที่ ผข.2

$$X(t) = \sum_k X_{f_k} \exp(2\pi i f_k t) \quad (\text{ผข.2})$$

โดยที่ $f_k = f_1 + (k-1)\Delta f$ และ $\Delta f = f_2 - f_1$

พิจารณาที่ฮอปฟ์ไบเฟอร์เคชัน (Hopf bifurcation) และในกรณีที่ X_f มีค่าน้อยมากเราสามารถเขียนแรงในรูปทั่วไปได้ว่า

$$F_{f_k} = A(f_k)X_{f_k} + \sum_l B(f_k, f_l)X_{f_k-f_l}X_{f_l} + \sum_{mn} C(f_k, f_m, f_n)X_{f_k-f_m-f_n}X_{f_m}X_{f_n} + \dots \quad (\text{ผข.3})$$

ให้ $\Delta f = f_1$ พิจารณาโหมด $k=1$ โดยการประมาณถึงเทอมกำลัง 3 เท่านั้น จะได้ว่า

$$F_{f_1} \approx A(f_1)X_{f_1} + B(f_1, f_2)X_{-f_1}X_{f_2} + 2C(f_1, f_1, f_1)X_{-f_1}X_{f_1}X_{f_1} + 2C(f_1, f_2, -f_2)X_{f_1}X_{f_2}X_{-f_2} \quad (\text{ผข.4})$$

จากสมการที่ ผข.4 พบว่าการสั่นในโหมด $k=1$ ได้รับผลจากการสั่นในโหมด $k=2$ (X_{f_2}) ด้วย เมื่อพิจารณาโหมด $k=2$ โดยการประมาณถึงเทอมกำลัง 2 จะได้ว่า

$$F_{f_2} \approx A(f_2)X_{f_2} + B(f_2, f_1)X_{f_1}X_{f_1} \quad (\text{ผข.5})$$

ในกรณีที่ตัวสั่นไม่มีแรงภายนอกกระทำ ($F_{f_k} = 0$) จะได้ว่า

$$0 \approx A(f_1)X_{f_1} + B(f_1, f_2)X_{-f_1}X_{f_2} + 2C(f_1, f_1, f_1)|X_{f_1}|^2 X_{f_1} + 2C(f_1, f_2, -f_2)X_{f_1}|X_{f_2}|^2 \quad (\text{ผข.6})$$

$$0 \approx A(f_2)X_{f_2} + B(f_2, f_1)X_{f_1}^2 \quad (\text{ผข.7})$$

จากสมการที่ 7 จะได้ว่า

$$X_{f_2} \approx \frac{B(f_2, f_1)}{A(f_2)}X_{f_1}^2 \quad (\text{ผข.8})$$

แทน X_{f_2} ในสมการที่ ผข.6 จะได้ว่า

$$0 \approx A(f_1)X_{f_1} + \frac{[B(f_1, f_2) \cdot B(f_2, f_1)]}{A(f_2)}|X_{f_1}|^2 X_{f_1} + 2C(f_1, f_1, f_1)|X_{f_1}|^2 X_{f_1} + 2C(f_1, f_2, -f_2)X_{f_1} \left| \frac{B(f_2, f_1)}{A(f_2)}X_{f_1}^2 \right|^2 \quad (\text{ผข.9})$$

เมื่อ $2C(f_1, f_2, -f_2)X_{f_1} \left| \frac{B(f_2, f_1)}{A(f_2)}X_{f_1}^2 \right|^2 \approx 0$ จะได้

$$0 \approx \mathbf{A}X_{f_1} + \mathbf{B}|X_{f_1}|^2 X_{f_1} \quad (\text{ผข.10})$$

โดยที่ $\mathbf{A} = A(f_1)$ และ $\mathbf{B} = \frac{[B(f_1, f_2) \cdot B(f_2, f_1)]}{A(f_2)} + 2C(f_1, f_1, f_1)$

พิจารณาสมการที่ ผข.10 เมื่อ $X_{f_1} \neq 0$ จะได้ว่า

$$|X_{f_1}|^2 = -\frac{\mathbf{A}}{\mathbf{B}} \quad (\text{ผข.11})$$

จากสมการที่ ผข.11 แสดงว่าตัวสั่นสามารถสั่นได้ด้วยตัวเองโดยไม่ต้องอาศัยแรงภายนอก ถ้าอัตราส่วนของสัมประสิทธิ์ \mathbf{A} และ \mathbf{B} มีค่าเป็นจำนวนจริงลบ นั่นคือ ฮอปฟ์ไบเฟอร์เคชั่น (Hopf

bifurcation) เกิดขึ้นเมื่อ $\mathbf{A} = \mathbf{A}(f_1 = f_c) = 0$ โดยการพลวัตกรรมดังกล่าวแสดงคุณสมบัติการสั่นได้เองโดยไม่ต้องมีแรงกระตุ้นจากภายนอก (spontaneous oscillations)

และหากระบบไม่เชิงเส้นถูกกระตุ้นโดยแรงที่ขึ้นกับเวลาที่ประกอบด้วยแรงสองแรงที่มีความถี่ต่างกัน (f_1 และ f_2) ดังสมการที่ ผข.12

$$F(t) = F_{f_1} \exp(2\pi i f_1 t) + F_{f_2} \exp(2\pi i f_2 t) \quad (\text{ผข.12})$$

ระบบที่อยู่ใกล้ฮอปฟ์ไบเฟอร์เคชัน (Hopf bifurcation) จะสามารถสั่นด้วยความถี่ ซึ่งมีค่าเท่ากับผลรวมเชิงเส้นของความถี่ของแรงภายนอก $f_{\text{DPOAES}} = m f_1 + n f_2$ เมื่อ m และ n เป็นจำนวนเต็ม การตอบสนองของระบบที่ความถี่เหล่านี้เรียกว่า ความเพี้ยนไม่เชิงเส้น (nonlinear distortion)

เมื่อพิจารณาโหมดการสั่นที่ $k = 1$ โดยการประมาณเฉพาะเทอมกำลัง 1 และ 3 จะได้ว่า

$$F_{f_1} \approx A(f_1)X_{f_1} + 2C(f_1, f_1, f_1)|X_{f_1}|^2 X_{f_1} + 2C(f_1, f_1, f_2)|X_{f_2}|^2 X_{f_1} \quad (\text{ผข.13})$$

ในทำนองเดียวกัน ที่ $k = 2$ จะได้ว่า

$$F_{f_2} \approx A(f_2)X_{f_2} + 2C(f_2, f_2, f_2)|X_{f_2}|^2 X_{f_2} + 2C(f_2, f_2, f_1)|X_{f_1}|^2 X_{f_2} \quad (\text{ผข.14})$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ ผข.13 และ ผข.14 ที่จุดไบเฟอร์เคชัน (bifurcation) พบว่าในกรณีที่สมมติให้ $F_{f_1} = F$ และ $F_{f_2} = 0$ ส่งผลทำให้ $X_{f_2} = 0$ ทำให้ระบบมีการสั่นเพียงโหมดเดียวคือ X_{f_1} และหากเลือก $f_1 = f_c$ จะได้ว่า $A(f_c) = 0$ เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของแอมพลิจูดของการสั่นกับแรงจะได้ $|X_{f_1}| = |F / 2C(f_1, f_1, f_1)|^{1/3}$ ซึ่งแสดงสมบัติการตอบสนองของการกระตุ้นต่อแรงแบบไม่เชิงเส้น (compressive nonlinearity)

ความเพี้ยนไม่เชิงเส้น (nonlinear distortion) ของตัวสั่นไม่เชิงเส้นในระบบดังกล่าวสามารถเกิดขึ้นได้ โดยพจน์ที่มีดีกรีสาม เราสามารถแสดงได้ว่า ความเพี้ยนไม่เชิงเส้น (nonlinear distortion) ของตัวสั่นไม่เชิงเส้นที่มีความถี่ $2f_1 - f_2$ สามารถเกิดขึ้นได้จากการตอบสนองต่อแรงที่มีความถี่ f_1 และ f_2 โดยปราศจากแรงภายนอกที่มีความถี่ $2f_1 - f_2$ ($F_{2f_1 - f_2} = 0$)

เมื่อ $f_k = 2f_1 - f_2$ จากสมการที่ ผข.3 จะได้ว่า

$$F_{2f_1 - f_2} = A(2f_1 - f_2)X_{2f_1 - f_2} + 2C(2f_1 - f_2)|X_{2f_1 - f_2}|^2 X_{2f_1 - f_2} + 2C(2f_1 - f_2, f_1, -f_2)X_{f_1}^2 X_{-f_2} \quad (\text{ผข.15})$$

เมื่อ $C(2f_1 - f_2) = C(2f_1 - f_2, 2f_1 - f_2, 2f_1 - f_2)$

กรณีที่ $F_{2f_1-f_2} = 0$ จะได้ว่า

$$0 = A(2f_1 - f_2)X_{2f_1-f_2} + 2C(2f_1 - f_2)|X_{2f_1-f_2}|^2 X_{2f_1-f_2} \\ + 2C(2f_1 - f_2, f_1, -f_2)X_{f_1}^2 X_{-f_2}$$

$$F'_{2f_1-f_2} = A(2f_1 - f_2)X_{2f_1-f_2} + 2C(2f_1 - f_2)|X_{2f_1-f_2}|^2 X_{2f_1-f_2} \quad (\text{ผข.16})$$

$$\text{โดยที่ } F'_{2f_1-f_2} = -2C(2f_1 - f_2, f_1, -f_2)X_{f_1}^2 X_{-f_2}$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ ผข.16 พบว่าระบบสามารถสันที่ความถี่ $2f_1-f_2$ ได้ถึงแม้ว่าจะไม่มีแรงกระตุ้นที่มีความถี่ดังกล่าวก็ตาม ซึ่งความเพี้ยนไม่เชิงเส้น (nonlinear distortion) ที่ความถี่ดังกล่าวเกิดขึ้นโดยพจน์ตรี 3 ($X_{f_1}^2 X_{-f_2}$) ที่เกิดจากการตอบสนองของตัวสันต่อแรงกระตุ้น 2 แรงที่มีความถี่ f_1 และ f_2 นั้นเอง



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	เอกฉัตร ประวันตา
วัน เดือน ปี เกิด	24 ตุลาคม 2537
สถานที่เกิด	จังหวัดขอนแก่น
วุฒิการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์)
ที่อยู่ปัจจุบัน	7/13 ซ.รวงทอง3 ถ.ศุภสิทธิอุทิศ ต.เมืองพล อ.พล จ.ขอนแก่น 40120



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY