

ตัวดึงดูดแบบ CHEN เพื่อช่วยการประพันธ์เพลง

CHEN'S ATTRACTOR ASSISTING MUSIC COMPOSITION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2561

KMITL-2018-EN-M-230-116

ตัวดึงดูดแบบ CHEN เพื่อช่วยการประพันธ์เพลง

CHEN'S ATTRACTOR ASSISTING MUSIC COMPOSITION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2561

KMITL-2018-EN-M-230-116

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# CHEN'S ATTRACTOR ASSISTING MUSIC COMPOSITION



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

2018

KMITL-2018-EN-M-230-116

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2018

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์    ตัวดึงดูดแบบ CHEN เพื่อช่วยการประพันธ์เพลง  
Thesis Title        Chen's Attractor Assisting Music Composition  
นักศึกษา                นายศิน ไวยनिया  
รหัสประจำตัว        57601302  
ปริญญา                วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา            วิศวกรรมสารสนเทศ  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์    รศ.ดร.ปิติเชต สุรัรักษา  
หมายเลขวิทยานิพนธ์              KMITL-2018-EN-M-230-116

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ดร.วีระพล	โมนะกุล	
รศ.ดร.สุรพันธ์	เอื้อโทบลย์	
รศ.ดร.อรรถสิทธิ์	เหล่าสกุล	
รศ.ดร.ชวลิต	เบญจางคประเสริฐ	
รศ.ดร.ปิติเชต	สุรัรักษา	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ    วันพฤหัสบดีที่ 12 กรกฎาคม พ.ศ. 2561 เวลา 15.00-17.00 น.  
สถานที่สอบ            ณ ห้อง HM-302 อาคารเฉลิมพระเกียรติ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 12 กรกฎาคม พ.ศ. 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิทยานิพนธ์	ตัวดึงดูดแบบ CHEN เพื่อช่วยการประพันธ์เพลง
นักศึกษา	นายวศิน ไวยनिया
รหัสประจำตัว	57601302
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. ปิติเขต สุรักษา

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอสัญญาณตัวดึงดูดแบบ Chen (Chen's attractor) มาเป็นเครื่องสร้างตัวโน้ตในการประพันธ์บทเพลง โดยใช้ทฤษฎีเหตุการณ์ (Event Theory) มาอ้างอิงโน้ตที่เกิดขึ้น โดยมีการนำทฤษฎีเหตุการณ์ไปประยุกต์ใช้กับสัญญาณแผนภูมิโลจิสติก (Logistic Map) โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้อธิบายถึงความเป็นมาของทฤษฎีเหตุการณ์ การประยุกต์ใช้กับสัญญาณแผนภูมิโลจิสติก และการนำมาประยุกต์ใช้กับตัวดึงดูดแบบ Chen สุดท้าย วิทยานิพนธ์นี้แสดงข้อเปรียบเทียบให้เห็นถึงบทเพลงที่สร้างมาจากแผนภูมิโลจิสติก ตัวดึงดูดแบบ Lorenz และแบบ Chen ในเรื่องลักษณะของโน้ตที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาต่างๆของสัญญาณ ผลงานวิจัยชิ้นนี้สามารถนำไปใช้เป็นตัวช่วยในการประพันธ์เพลง เพื่อนำไปใช้เป็นชุดโน้ตตั้งต้น

**คำสำคัญ:** Chen's Attractor, Algorithmic Composition, Event Theory, Chaos

Thesis	CHEN'S ATTRACTOR ASSISTING MUSIC COMPOSITION
Student	Mr. Wasin Wainiya
Student ID.	57601302
Degree	Master of Engineering
Program	Information Engineering
Year	2018
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Pitikhate Sooraksa

## ABSTRACT

This thesis proposes the implementation of Chen's attractor as a melody generator for music composition by applying Event Theory for the reference notes. The theory is implemented by using Logistic map, Lorenz's and Chen's attractors. This thesis presents the origin of event theory, implementing in Logistic map, Lorenz's and Chen's attractors. Eventually, the result can be used to compose songs based on output from both signals. This thesis is proposed for the music composition scene as the beginning of the songs.

**KEYWORDS:** Chen's Attractor, Algorithmic Composition, Event Theory, Chaos

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ปิติเขต สุรักษา ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.กฤตากร กล่อมการ อาจารย์ที่ปรึกษา สำหรับความช่วยเหลือ ความรู้ คำแนะนำ และมุมมองที่ชวนให้สนใจและขบคิดต่อ

ขอขอบพระคุณนายศรัณยู ปาลกะวงศ์ ที่ให้ความช่วยเหลือในช่วงเวลาที่ศึกษาปริญญาโท

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

วศิน ไวยनिया



III  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
1.7 ข้อเสนอแนะ.....	3
1.8 คำจำกัดความที่ใช้ในการศึกษา.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 บทนำ.....	6
2.2 การประพันธ์เพลงโดยใช้ขั้นตอนวิธี (Algorithmic Composition).....	6
2.3 จิตวิทยาในดนตรี.....	9
2.4 แบบจำลองการสื่อความ-คติฉบับพลัน (Implication-Realization Model).....	12
2.5 ลักษณะที่ไม่ใช่ Pitch ในดนตรี.....	15
2.6 สัญญาณอลวน.....	17
2.7 ทฤษฎีเหตุการณ์ (Event Theory).....	24
2.8 บทสรุป.....	30
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	32
3.1 บทนำ.....	32
3.2 การอ่านโน้ตเบื้องต้น.....	32
3.3 Logistic Map.....	33

3.4 บทสรุป.....	39
บทที่ 4 สัญญาณตัวดึงดูดแบบ Lorenz และ Chen.....	40
4.1 บทนำ.....	40
4.2 สัญญาณตัวดึงดูดแบบ Lorenz และ Chen.....	40
4.3 บทสรุป.....	60
บทที่ 5 ผลการวิจัย.....	62
5.1 บทนำ.....	62
5.2 Logistic Map.....	62
5.3 สัญญาณตัวดึงดูดแบบ Lorenz และ Chen.....	62
5.4 บทสรุป.....	65
บทที่ 6 สรุปการวิจัย.....	66
6.1 สรุปการวิจัย.....	66
6.2 ปัญหาที่พบและข้อเสนอแนะ.....	67
บรรณานุกรม.....	68
ภาคผนวก ก.....	74
ประวัติผู้เขียน.....	78

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 พฤติกรรมของระบบสมการแบบแผนภูมิโลจิสติกที่แปรผันตามค่าพารามิเตอร์ $a$ .....	17
5.1 ผลการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณตัวดึงดูดแบบ Lorenz และ Chen ในเทอม $x$ .....	63
5.2 ผลการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณตัวดึงดูดแบบ Lorenz และ Chen ในเทอม $y$ .....	64
5.3 ผลการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณตัวดึงดูดแบบ Lorenz และ Chen ในเทอม $z$ .....	64



# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 กระบวนการทำงานวิจัย.....	4
2.1 Johan Sebastian Bach.....	7
2.2 Leon O. Chua.....	8
2.3 Art Tatum.....	10
2.4 การตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงใน Pitch และ Tempo ของผู้ฟัง.....	11
2.5 Heinrich Schenker.....	12
2.6 Eugene Narmour.....	13
2.7 ตัวอย่างของสถานะต่อเติมให้สมบูรณ์ (Fulfilled) และสถานะปฏิเสธ (Denied) สำหรับขั้นคู่ขนาดเล็ก และขั้นคู่ขนาดใหญ่.....	14
2.8 ตัวอย่าง Time Measure .....	16
2.9 ตัวอย่างสัญญาณ Logistic Map เมื่อระบุค่า $a = 3.6$ และ $x_0 = 0.1$ ตั้งแต่ iterations = (0-150) .....	18
2.10 Edward Norton Lorenz.....	19
2.11 แบบจำลองตัวดึงดูดแบบ Lorenz.....	19
2.12 สัญญาณตัวดึงดูดแบบ Lorenz เทอม x ในโดเมนเวลา.....	20
2.13 สัญญาณตัวดึงดูดแบบ Lorenz เทอม y ในโดเมนเวลา.....	20
2.14 สัญญาณตัวดึงดูดแบบ Lorenz เทอม z ในโดเมนเวลา.....	21
2.15 Guanrong Chen.....	22
2.16 สัญญาณตัวดึงดูดแบบ Chen.....	22
2.17 สัญญาณตัวดึงดูดแบบ Chen เทอม x ในโดเมนเวลา.....	23
2.18 สัญญาณตัวดึงดูดแบบ Chen เทอม y ในโดเมนเวลา.....	23
2.19 สัญญาณตัวดึงดูดแบบ Chen เทอม z ในโดเมนเวลา.....	24
2.20 ก้อนหินตกจากไหล่เขาแสดงถึงการเกิดเหตุการณ์ย่อยที่เกิดขึ้นในการกระทบกับพื้นดิน.....	25
2.21 โครงสร้างต้นไม้ของโน้ตต่างๆในบทเพลง Autumn leaves .....	26
2.22 แผนผังต้นไม้ของ Scale แบบ Analog (เทียบกับเปียโน).....	28
2.23 แผนผังต้นไม้ของ Scale แบบ Digital.....	29
2.24 การเปลี่ยนแปลงค่า Pitch ในลำดับ.....	30
2.25 การเปรียบเทียบรูปที่ปรากฏระหว่างการรับรู้ในอุดมคติ และการรับรู้ของมนุษย์.....	31

3.1 ลำดับโน้ตใน Scale C Major .....	32
3.2 สัญญาณ Logistic Map ในโดเมนความถี่ ที่ $\alpha = 3.6$ และ $x_0 = 0.1$ ระหว่าง iterations = (0 150).....	33
3.3 การพิจารณาลำดับการเกิดเหตุการณ์ในสัญญาณและร่างเป็นแผนผังต้นไม้ Event.....	34
3.4 แผนผังต้นไม้ Event ที่ได้จากสัญญาณแผนภูมิโลจิสติกในโดเมนความถี่.....	35
3.5 โน้ตที่เกิดขึ้นจากการนำบรรทัด 5 เส้นมาทาบลงไปบนสัญญาณเพื่อระบุค่า Pitch ของโน้ตที่ กำเนิดจาก Event ในสัญญาณ.....	36
3.6 ลำดับโน้ตที่กำเนิดจาก Event ที่เกิดขึ้นในรูปแบบที่ 3.5 โดยในรูปแบบนี้ยังไม่ยึดค่าความยาวของ โน้ต.....	36
3.7 นำบรรทัด 5 เส้นมาทาบ เพื่อเทียบค่า Pitch ของเหตุการณ์ทั้งหมดในสัญญาณ Logistic Map.....	37
3.8 Event ที่แปลงเป็นโน้ตในสัญญาณ Logistic Map.....	37
3.9 ระยะห่างระหว่าง Event ที่เกิดขึ้น เพื่อกำหนดค่าระยะเวลาของ Note ที่แปลงมาจาก Event ในสัญญาณ Logistic Map ในโดเมนความถี่.....	38
3.10 ชุดโน้ตที่แปลงมาจากรูปที่ 3.9.....	38
3.11 ชุดโน้ตจากสัญญาณ Logistic Map.....	39
4.1 สัญญาณตัวตั้งจุดแบบ Lorenz ในโดเมนเวลาในแต่ละเทอม เมื่อขยายไปที่ช่วง iterations ระหว่าง (0 150) และ Output ระหว่าง (-80 80).....	41
4.2 สัญญาณตัวตั้งจุดแบบ Lorenz เทอม x ในโดเมนความถี่.....	42
4.3 สัญญาณตัวตั้งจุดแบบ Lorenz เทอม y ในโดเมนความถี่.....	42
4.4 สัญญาณตัวตั้งจุดแบบ Lorenz เทอม z ในโดเมนความถี่.....	43
4.5 แผนผังต้นไม้ Event ในสัญญาณตัวตั้งจุดแบบ Lorenz เทอม x.....	44
4.6 แผนผังต้นไม้ Event ในสัญญาณตัวตั้งจุดแบบ Lorenz เทอม y.....	45
4.7 แผนผังต้นไม้ Event ในสัญญาณตัวตั้งจุดแบบ Lorenz เทอม z.....	46
4.8 สัญญาณตัวตั้งจุดแบบ Lorenz ทั้ง 3 เทอมแสดงผลพร้อมกัน.....	47

4.9 สัญญาณตัวดึงดูดแบบ Lorenz เมื่อทำนำบรรทัด 5 เส้นทาบลงไป.....	48
4.10 Event ที่เกิดขึ้นทั้งหมดในสัญญาณตัวดึงดูดแบบ Lorenz.....	49
4.11 ชุดโน้ตที่มาจาก การแปลง Event ทั้งหมดในสัญญาณตัวดึงดูดของ Lorenz มาเป็นโน้ต.....	50
4.12 การเลือกโน้ต F6 และตัดโน้ต D4 ออกไปเพื่อให้ชุดลำดับโน้ตในห้องที่ 1 มีสถานะต่อเติมให้สมบูรณ์.....	51
4.13 ตัวอย่างชุดโน้ตในห้องที่ 2 จากรูปที่ 4.11.....	51
4.14 Event ที่เลือกมาเป็นโน้ตหลังจากพิจารณาด้วยแบบจำลองการสื่อความ- คติฉบับพลัน.....	52
4.15 เพลงที่กำเนิดจากสัญญาณตัวดึงดูดของ Lorenz เมื่อผ่านการใช้แบบจำลอง การสื่อความ-คติฉบับพลันประกอบการพิจารณาเลือกโน้ตที่เหมาะสม.....	53
4.16 สัญญาณตัวดึงดูดแบบ Chen เหอมต่างๆในโดเมนเวลา เมื่อขยายไปที่ iterations ระหว่าง (0 150) และ Output ระหว่าง (-80 80).....	54
4.17 สัญญาณตัวดึงดูดแบบ Chen เหอม x ในโดเมนความถี่.....	55
4.18 สัญญาณตัวดึงดูดแบบ Chen เหอม y ในโดเมนความถี่.....	55
4.19 สัญญาณตัวดึงดูดแบบ Chen เหอม z ในโดเมนความถี่.....	56
4.20 แผนผังต้นไม้ Event ในสัญญาณตัวดึงดูดแบบ Chen เหอม x ในโดเมนความถี่.....	57
4.21 แผนผังต้นไม้ Event ในสัญญาณตัวดึงดูดแบบ Chen เหอม y ในโดเมนความถี่.....	58
4.22 แผนผังต้นไม้ Event ในสัญญาณตัวดึงดูดแบบ Chen เหอม z ในโดเมนความถี่.....	59
4.23 Event ทั้งหมดที่เกิดขึ้นพร้อมค่า Pitch ของแต่ละ Event ที่เตรียม แปลงเป็นโน้ตเพลง.....	60
4.24 บทเพลงที่ประพันธ์จากสัญญาณตัวดึงดูดแบบ Chen ในโดเมนความถี่หลัง จากพิจารณาผ่านแบบจำลองการสื่อความ-คติฉบับพลัน.....	61
5.1 บทเพลงจากสัญญาณตัวดึงดูดของ Chen ก่อนใช้หลักการสื่อความ- คติฉบับพลันมาพิจารณา.....	63

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ดนตรีและบทเพลงเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่นักวิจัยพยายามทำความเข้าใจและสร้างองค์ความรู้ทางศาสตร์เหล่านี้มาทำความเข้าใจที่มาของการประพันธ์บทเพลงต่างๆ โดยมีการบันทึกไว้ว่าดนตรีกับคณิตศาสตร์มีความสัมพันธ์กันอยู่ตั้งแต่สมัยก่อนคริสตกาล 1000 ปีถัดจากนั้นจึงเริ่มมีการกำหนดมาตรฐานในการอ่าน เขียนโน้ตดนตรีขึ้นมา เช่น การให้กำเนิดกุญแจต่างๆ เช่น กุญแจซอล กุญแจฟา เพื่อกำหนดค่าเสียงของโน้ตหรือ Pitch ที่ได้บันทึกลงไป และมีการกำหนดค่าระยะเวลาของโน้ตอีกหลังจากนั้น ซึ่งในการแสดงดนตรีในช่วงเวลาดังกล่าวจะเน้นการใช้คีตปฏิภาณ (Improvisation) ของผู้แสดงดนตรี ในศตวรรษที่ 13 แห่งคริสตกาล จึงเริ่มมีการประพันธ์เพลงที่มีการวางรูปแบบอย่างเป็นรูปธรรมหรือ “Form” (Formalized Music) ขึ้นมา ทำให้บทบาทของนักประพันธ์เพลง และผู้บรรเลงเพลงจึงเริ่มมีการแบ่งชัดเจนมากขึ้นนับแต่นั้น เมื่อเข้าสู่ช่วง Renaissance ได้เกิดเพลงที่มีลักษณะของการบรรเลงพร้อมกันทั้ง 2 มือในการเล่นเปียโน ซึ่งเรียกว่า “Polyphony” โดยสามารถพบได้ในเพลงตระกูล Canon และเพลงตระกูล Fugue โดยนักประพันธ์เพลงที่ได้รับการกล่าวขานมากที่สุดในยุคนี้คือ Johann Sebastian Bach โดยเฉพาะเพลง The Art of the Fugue (Bach, 1752) [16] ซึ่งใช้เป็นกรณีศึกษาการใช้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างทำนองกับจังหวะหรือที่เรียกว่า “Counterpoint” รวมถึงการประพันธ์เพลงตระกูล Canon และ Fugue ด้วย

ต่อมาในยุคโรแมนติกในศตวรรษที่ 19 แห่งคริสตกาล กลุ่มนักเรียนของ Richard Wegner ได้ทำการคิดค้นกระบวนการประพันธ์เพลงแบบใหม่ เรียกว่าการประพันธ์แบบเป็นลำดับโดยนำชุดโน้ต 12 ตัวหรือ Chromatic Scale ที่มีความสำคัญเท่าเทียมกันโดยทุกโน้ตจะบรรเลงโดยไม่มีการซ้ำกันจนกว่าโน้ตทั้ง 12 ตัวจะใช้งานทั้งหมดเสียก่อนจึงเริ่มมีการใช้ซ้ำได้ โดยมีส่วนช่วยในการขยายพจนานุกรมทางการใช้โน้ตและทำนองในช่วงหลังของยุคโรแมนติก และยังมีส่วนร่วมในการสร้างบทเพลงแบบใหม่ที่ใช้โน้ตนอก Scale หรือ Atonality อีกด้วย

ในช่วงกลางศตวรรษที่ 20 ได้มีกลุ่มนักวิจัยเริ่มนำหลักการทางวิศวกรรมและวิทยาศาสตร์มาประยุกต์ใช้ในการประพันธ์เพลง อัลกอริทึมทางคอมพิวเตอร์จึงเริ่มนำมาเป็นเครื่องมือใช้ในกระบวนการประพันธ์เพลง โดยวิธีการสโตแคสติก (Stochastic method) และวิธีการทางความน่าจะเป็น (Probabilistic Method) เป็นสองวิธีการแรกที่น่าสนใจในการประพันธ์เพลง ต่อมาได้มีการนำสัญญาณอลวน (Chaos) มาเป็นเครื่องมือในกระบวนการประพันธ์เพลงเนื่องจากทางกลุ่มนักวิจัยเห็นว่ากระบวนการทำงานของสัญญาณอลวนและกระบวนการทำงานของบทเพลงนั้นมีความใกล้เคียงกันในแง่ของการเคลื่อนไหวที่สะท้อนความเป็นไปโดยธรรมชาติ โดยในเบื้องต้นได้ทำการประพันธ์เพลงจากสัญญาณอลวนพื้นฐานอย่าง Logistic Mapping ต่อมาจึงมีการทดลองประพันธ์เพลงจากตัวดึงดูดของ Lorenz โดยอิงโครงสร้างจากบทเพลงในยุคคลาสสิก ซึ่งผู้วิจัยได้เกิดความสนใจในความสัมพันธ์ในกระบวนการเคลื่อนไหวของบทเพลง และสัญญาณอลวน เลยนำความสัมพันธ์นี้

มาใช้กับตัวดึงดูดของ Chen ซึ่งเป็นสัญญาณอลวนที่กำเนิดมาจากการตัดแปลงค่าสมการตัวดึงดูดแบบ Lorenz ว่าผลลัพธ์ที่ออกมาจากสัญญาณแบบ Chen จะประพันธ์เพลงออกมาได้ในรูปแบบใด

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ทางการศึกษา

เพื่อประยุกต์การนำทฤษฎี Event กับตัวดึงดูดแบบ Chen ในการศึกษาความเป็นไปได้ใหม่ของ การประพันธ์เพลงโดยการสร้างบทเพลงจากสัญญาณอลวน

## 1.3 สมมติฐานทางการศึกษา

1. Event เกิดขึ้นจากการกระทำที่เกิดขึ้นกับวัตถุที่อ้างอิง
2. สัญญาณอลวนเป็นสัญญาณที่มีคุณลักษณะใกล้เคียงกับปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ อันเนื่องมาจากคุณลักษณะที่ไม่มีความต่อเนื่องและคงที่
3. ตัวดึงดูดแบบ Chen มีการเคลื่อนที่ของสัญญาณแบบ 3 มิติ และมีเหตุการณ์เกิดขึ้นพร้อมกันได้ในช่วงเวลาเดียวกัน 2 เหตุการณ์ขึ้นไป
4. ลักษณะของบทเพลงที่เกิดขึ้นจากตัวดึงดูดของ Chen จะมีเมโลดี้หลายตัวเกิดขึ้นพร้อมกัน อันเนื่องมาจากการเกิดเหตุการณ์ในแต่ละเทอมที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาเดียวกัน

## 1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้ได้นำเสนอการนำสัญญาณตัวดึงดูดแบบ Chen (Chen's attractor) มาใช้ในการประพันธ์บทเพลง โดยอิงจากทฤษฎีเหตุการณ์ ซึ่งตัวสัญญาณนั้นสามารถสร้างได้ทั้งโน้ตเดี่ยวและโน้ตแบบกลุ่ม เนื่องจากการเกิดสัญญาณแบบ 3 มิติในช่วงเวลาเดียวกัน ตัวดึงดูดแบบ Chen จึงสามารถสร้างโน้ตมากกว่า 1 ตัวได้ในช่วงเวลาเดียวกันเมื่อทำการจำแนกสัญญาณออกในแต่ละเทอม จึงทำให้เกิดความหลากหลายของโน้ตมากขึ้นเมื่อเทียบกับแผนภูมิโลจิสติกที่นำมาใช้ในการศึกษาและประยุกต์ใช้ทฤษฎีในเบื้องต้น

## 1.5 ขอบเขตการวิจัย

1. สร้างสัญญาณตัวดึงดูดแบบ Chen ขึ้นมา
2. ตรวจสอบสัญญาณว่ามีจุดเปลี่ยนความชันของสัญญาณที่จุดใดบ้าง
3. สร้างบทเพลงโดยใช้จุดเปลี่ยนแปลงความชันเป็นจุดอ้างอิง

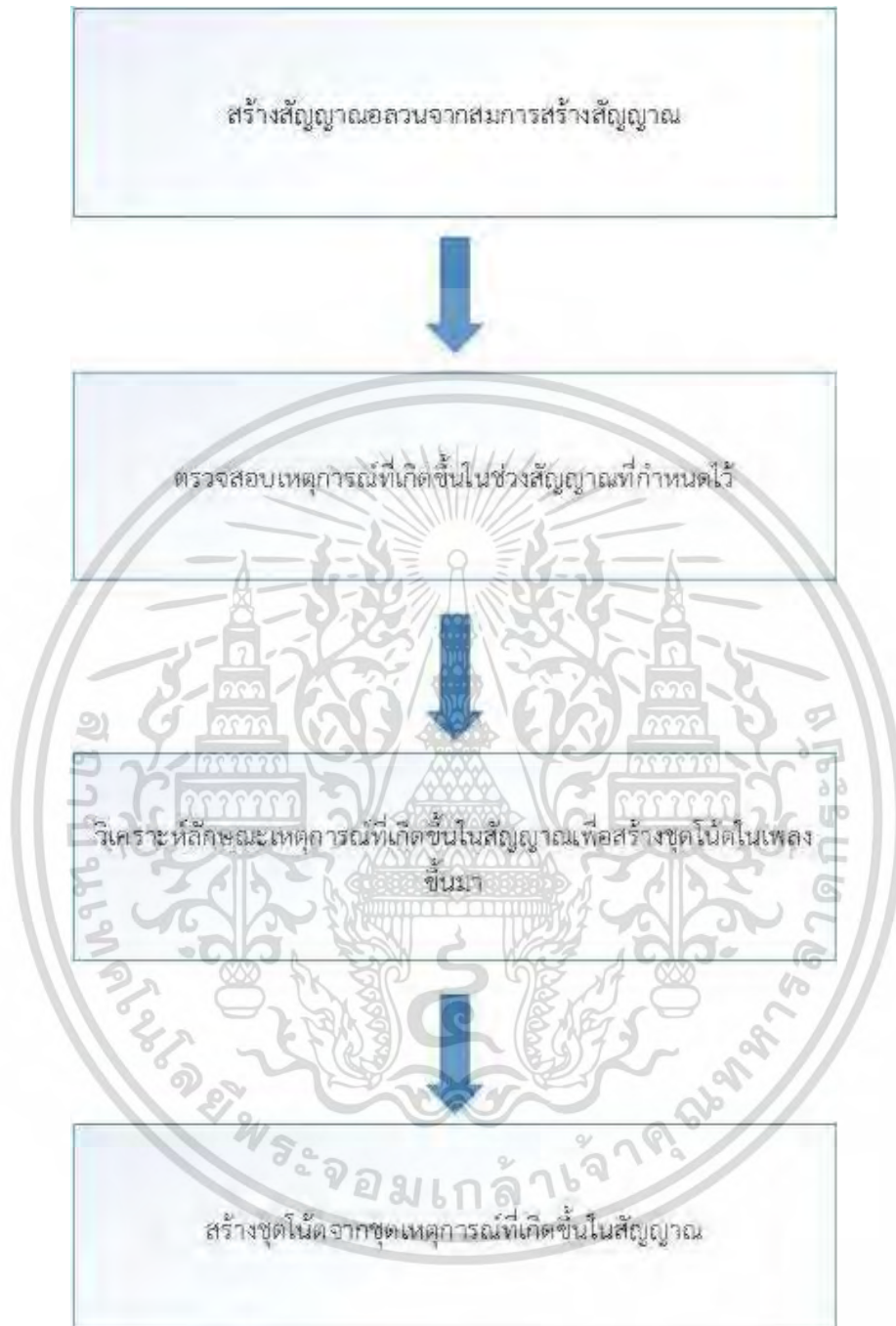
## 1.6 ขั้นตอนการศึกษา

ในการศึกษาวิจัยนั้น ได้เริ่มจากการวิเคราะห์ก่อนว่ามีการใช้ทฤษฎีเหตุการณ์กับสัญญาณลวนอย่างไร โดยเริ่มจากการนำไปประยุกต์ใช้กับสัญญาณ Logistic Map ก่อนในเบื้องต้น จากนั้นก็ได้ทำการประพันธ์เพลงจากแผนผังต้นไม้เหตุการณ์ (Event Tree) ที่เกิดขึ้นในสัญญาณแผนภูมิโลจิสติก จากนั้นก็ไปทำการวิจัยกับสัญญาณตัวดึงดูดแบบ Chen ว่าลักษณะการเกิดแผนผังเหตุการณ์ในสัญญาณนั้นเป็นอย่างไร และนำแผนผังต้นไม้เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในสัญญาณตัวดึงดูดแบบ Chen นั้นมาประพันธ์เป็นบทเพลง โดยลำดับการทำงานได้แสดงในรูปที่ 1.1

## 1.7 ข้อเสนอแนะ

จากบทวิจัยนี้สามารถเป็นรากฐานอื่นในการศึกษาในสัญญาณตัวดึงดูดแบบ Chen เพื่อเป็นอีก 1 ขั้นตอนวิธี (Algorithm) ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการประพันธ์เพลงได้ หรือประยุกต์ใช้ร่วมกับขั้นตอนวิธีประเภทอื่นๆ เพื่อทำการสร้างสรรค์เพลงรูปแบบใหม่ๆ ขึ้นมาได้โดยมีสัญญาณตัวดึงดูดแบบ Chen ร่วมเป็น 1 ในองค์ประกอบในการประพันธ์เพลงโดยใช้ขั้นตอนวิธีด้วย





รูปที่ 1.1 กระบวนการทำงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.8 คำจำกัดความที่ใช้ในการศึกษา

- Atonal Music – ดนตรีที่ขาดคีย์หรือโทนเสียงกลาง
- Atonality – ความไม่มีคีย์หรือโทนเสียงกลาง
- Beat – หน่วยนับจังหวะเวลา
- Counterpoint – จุดโน้ตที่ผสมผสานกันด้วยชุดเมโลดี้ที่เคลื่อนไหวไปพร้อมกันมากกว่า 1 ชุด
- Chord – การประสานโทนเสียง 3 เสียงหรือมากกว่าพร้อมกัน
- Chord Progression – ทิศทางการดำเนิน Chord ต่างๆ ทางเดิน Chord หรือลำดับของ Chord
- Chromatic – การเคลื่อนไปที่ละครึ่งก้าว (semitone)
- Chromatic Scale – ชุดโทนเสียงที่บรรเลงทั้ง 12 โทน
- Diatonic – โทนเสียงของ Scale ทาง Major หรือ Minor
- Dominant – ลำดับที่ 5 ของ Scale ทาง Major หรือ Minor
- Form – โครงสร้างทางดนตรี
- เมโลดี้ (Melody) – องค์ประกอบที่เป็นส่วนหลักของดนตรีที่ทำหน้าที่ในการขับเคลื่อนทิศทางของเพลง ซึ่งเป็นชุดของโน้ตเดี่ยว หรือคู่
- Major Scale – Diatonic Scale ที่ห่างกันครึ่งขั้นระหว่างลำดับที่ 3 กับ 4 และลำดับที่ 7 กับ 8
- Minor – ใช้อธิบายขั้นคู่ Chord และ Scale ซึ่งหมายถึงน้อยกว่า
- Minor Scale – Diatonic Scale ที่อันดับที่ 3 6 และ 7 ต่ำกว่าครึ่งขั้นจาก Major Scale
- Modality – ความสัมพันธ์กับโหมดทางดนตรี ซึ่งมี 2 โหมดคือ Major Mode และ Minor Mode
- โน้ต (Note) – เครื่องมือใช้อ่านลักษณะของเมโลดี้ที่เกิดขึ้นในเพลง
- Octave – ขั้นคู่ระหว่างลำดับที่ 1 และลำดับที่ 8 ของ Diatonic Scale
- Pitch – ค่าระบุความสูงต่ำของโทนเสียงของโน้ต
- Rhythm – รูปแบบของดนตรีที่สั้นหรือยาว
- Scale – ชุดอนุกรมของโทนเสียงที่สัมพันธ์กับโทนเสียงฐานซึ่งสามารถขึ้นหรือลงได้
- Semitone – ครึ่งเสียงที่ไปข้างหน้าหรือถอยหลัง
- Subdominant – ลำดับที่ 4 ของ Scale ทาง Major หรือ Minor
- Tempo – หน่วยเวลาในดนตรี ใช้กำหนดความเร็วในการบรรเลงดนตรี
- Tension – สีสันใหม่ๆซึ่งเกิดจากการเล่นโน้ตนอกสเกล Major หรือ Minor
- Tone – เสียงที่เฉพาะเจาะจง ซึ่งเป็นพื้นฐานของดนตรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 บทนำ

การประพันธ์เพลงแบบใช้ขั้นตอนวิธีเป็นหัวข้อวิจัยที่ครอบคลุมในหลากหลายสาขา ทั้งทางจิตวิทยา วิศวกรรม และการคำนวณ เดิมทีนั้น ขั้นตอนวิธีเป็นชุดของกฎเกณฑ์ต่างๆหรือลำดับขั้นตอนของปฏิบัติการที่ ออกแบบเพื่อทำภารกิจให้ลุล่วงหรือแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในปฏิบัติการต่างๆ โดยมีการกำหนดลำดับขั้นตอนซึ่ง มีทั้งการป้อนตัวแปรต้นเข้าไปเพื่อให้ได้มาซึ่งผลลัพธ์หลังตัวแปรต้นผ่านขั้นตอนวิธีของกระบวนการนั้นๆซึ่ง ผลลัพธ์ที่ได้นั้น ต่อมาในช่วงกลางศตวรรษที่ 20 จึงนำมาประยุกต์ใช้ควบคู่กับการประพันธ์เพลงซึ่งมี กระบวนการขั้นตอนเป็นการลองผิดลองถูกและทบทวนซ้ำ และมีการค้นพบความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกันระหว่าง กลไกการดำเนินเพลงกับกลไกการดำเนินไปของสัญญาณอลวนว่าเมื่อทั้งตัวเพลง และสัญญาณอลวนนั้นได้ ดำเนินไปถึงจุดๆหนึ่ง จะเกิดปรากฏการณ์ที่สร้างความเปลี่ยนแปลงภายในสภาพแวดล้อมของทั้งเพลง และ สัญญาณอลวน ซึ่งความเป็นมาของทฤษฎีต่างๆที่นำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยมีรายละเอียดดังนี้

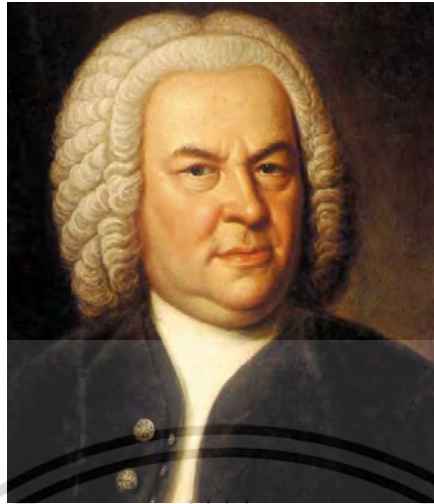
### 2.2 การประพันธ์โดยใช้ขั้นตอนวิธี (Algorithmic Composition)

การประพันธ์โดยใช้ขั้นตอนวิธีเป็นอีกหนึ่งกระบวนการในการประพันธ์บทเพลงขึ้นมาโดยอาศัยขั้นตอนวิธี เป็นหลัก ซึ่งมีการประยุกต์ใช้มานานนับศตวรรษ โดยมีการแทรกแซงจากมนุษย์น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ นอกเหนือจากการประพันธ์บทเพลงแล้วยังมีการนำการประพันธ์ขั้นตอนวิธีไปประยุกต์ใช้งานในศาสตร์ทาง จิตวิทยา วิศวกรรม และการประมวลผลคอมพิวเตอร์ โดยมีวิธีการประพันธ์โดยใช้ขั้นตอนวิธีแบบต่างๆดังนี้

#### 2.2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อ้างอิงมาจากสมการทางคณิตศาสตร์และเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นอย่างสุ่ม โดย วิธีการประพันธ์เพลงผ่านแบบจำลองคณิตศาสตร์นั้นใช้วิธีการที่เรียกว่า “กระบวนการสโตแคสติก” (Stochastic Process) ซึ่งควบคุมบางส่วนโดยผู้ประพันธ์เพลงโดยการให้น้ำหนักกับค่าความน่าจะเป็นของ เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นอย่างสุ่ม โดยตัวอย่างของขั้นตอนวิธีแบบสุ่ม ได้แก่ ลูกโซ่มาร์คอฟ (Markov Chains) ซึ่งมี แนวคิดสำคัญคือโน้ตที่เกิดขึ้นสามารถทำนายได้จากการสังเกตโน้ตที่เกิดขึ้นก่อนหน้า

ต่อมามีการใช้สัญญาณรบกวนแบบคาบหรือ “คาบสัญญาณรบกวนสีชมพู (Pink Noise)” โดยมีการ วิเคราะห์จากบทเพลงของ Bach ไปจนถึงบทเพลงของ Scott Joplin (Voss และ Clarke, 1978) [53] ซึ่ง ค้นพบว่าที่ความถี่ต่ำกว่า 1kHz มีความเหมาะสมเข้ากับการกระจายแบบคาบสัญญาณ ซึ่งจากคุณสมบัติส่วนนี้ รูปทรงของคาบใช้ควบคุมตัวแปรอื่นๆนอกจากค่า Pitch และยังสามารถเป็นตัวเริ่มต้นของขั้นตอนวิธีทาง พันธุกรรม (Genetic Algorithm) แทนที่จะเป็นการกระจายแบบสุ่มของค่า Pitch



รูปที่ 2.1 Johan Sebastian Bach (ค.ศ. 1685 – 1750) [22]

ในปีค.ศ. 1992 Bidlack [4] ได้ทำการทดลองกับระบบอลวนและร่างผลลัพธ์ไปยังค่า pitch ความเร็ว และระยะเวลาของแต่ละโน้ต ซึ่งค้นพบข้อสังเกตที่สำคัญดังนี้

- ค่าเริ่มต้นบางค่าสามารถทำให้ผลลัพธ์ออกมาอย่างไม่สิ้นสุดเป็นอนันต์
- ระดับของความแม่นยำในการคำนวณฟังก์ชันมีความสำคัญอย่างยิ่ง เมื่อมีข้อผิดพลาดเล็กน้อยเกิดขึ้น จะสามารถสร้างความแตกต่างของผลลัพธ์ได้อย่างมากมายและหลากหลายแบบด้วย เช่นเดียวกับการคำนวณบนตัวประมวลผลที่ต่างกัน จะให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกันด้วยเช่นกัน

ในปีค.ศ. 1993 Mayer-kress [32] และคณะได้ทำการสังเคราะห์เสียงจากวงจรไฟฟ้าของ Chua โดยได้ทำการสังเคราะห์เสียงที่มีคุณลักษณะคล้ายคลึงกับเสียงของบาสซูนและทำการศึกษาในคุณสมบัติการควบคุมตัวต้านทานไฟฟ้าที่รวดเร็วและการ Period Doubling ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างเสียงเครื่องให้ จังหวะหรือ Percussion ได้

ในปี 1996 Dabby [16] ได้ทำการวิจัยกับสมการของ Lorenz โดยทำการอ้างอิงจากเพลง Variation on a Prelude ของ Bach โดยเส้นโคจรที่เกิดขึ้นจะใช้เป็น “เส้นโคจรอ้างอิง” โดยแต่ละจุดในวงโคจรจะเป็นค่า Pitch ที่ตอบรับในชุด Pitch นั้นๆ และเมื่อทำการจำลองเส้นโคจรที่สองที่มีเงื่อนไขตั้งต้นใกล้เคียงกับเส้นโคจรอ้างอิง ซึ่งได้ผลลัพธ์เป็นชุดโน้ตที่มีความคล้ายคลึงกันกับบทเพลงของ Bach แต่มีความแตกต่างในรายละเอียดของโน้ตที่เกิดขึ้นจากเส้นโคจรในสัญญาณของ Lorenz นอกจากนี้ยังมีการใช้ fractal เป็นขั้นตอนวิธีในการแต่งเพลงเช่นเดียวกัน โดยคุณสมบัติของ fractal คือความคล้ายคลึงกันในตัวของ fractal เองในทุกระดับรายละเอียดในตัว fractal ที่ไม่มีจุดสิ้นสุด โดยตัวอย่างที่สังเกตได้ชัดเจนที่สุดของ fractal คือเกล็ดหิมะที่เมื่อสังเกตลงไปในตัวเกล็ดจะเห็นถึงความคล้ายคลึงกันในรายละเอียดข้างในเกล็ดหิมะ



รูปที่ 2.2 Leon O. Chua (ค.ศ. 1948 – ปัจจุบัน) [3]

### 2.2.2 ระบบฐานความรู้ (Knowledge-Based System)

ใจความสำคัญของระบบฐานความรู้คือการหยิบชุดข้อมูลที่ใช้ก่อนหน้านี้มาสร้างชุดข้อมูลใหม่ โดยมี set ของการตั้งกฎเกณฑ์ การทดสอบ และมีการกำหนดข้อจำกัดไว้ และผลงานเพลงที่ออกมาต้องสอดคล้องเข้ากับ set นี้ โดยข้อดีของระบบนี้คือสามารถอธิบายที่มาที่ไปของชุดเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในบทเพลงได้ แต่ว่าวิธีการนี้จำเป็นต้องใช้ความระมัดระวังอย่างมากก่อนที่จะได้ผลลัพธ์ออกมาโดยมีการทดลองโดย Schottstaedt (1984) [46] ที่นำระบบฐานกฎเกณฑ์ (Rule-Based System) มาสร้างชุดโน้ตแบบ Counterpoint และพบว่ากฎบางกฎที่สร้างขึ้นนั้นมีความกำกวมหรือไม่สมบูรณ์ต้องมีการปรับปรุงค่าของจุดควบคุม และข้อจำกัด จนกระทั่งผู้ออกแบบระบบได้ทำการเพิ่มจำนวนกฎลงไปในระบบเกือบ 2 เท่าของกฎเดิมที่มีอยู่ แต่ผลลัพธ์สุดท้ายก็ยังสามารถออกมาได้ไม่ตีพอ

### 2.2.3. ไวยากรณ์

บทเพลงสามารถสร้างขึ้นได้โดยการใช้ไวยากรณ์ทางดนตรี มองดนตรีเป็นภาษาที่มีชุดของไวยากรณ์ที่แน่นอน โดยมีประยุกต์ใช้งานโดย Steedman (1984) [51] ได้ทำการสร้างไวยากรณ์ทางการถ่ายทอด (Generative Grammar) สำหรับ chord progression ในดนตรีแจ๊สแบบ 12 ห้อง

### 2.2.4. วิธีทางวิวัฒนาการ (Evolutionary Method)

วิธีการนี้อ้างอิงจากขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรม (Genetic Algorithm) เป็นหลักและมีการผสมผสานร่วมกับฟังก์ชันความเหมาะสม (Fitness Function) ซึ่งใช้อ้างอิงในการศึกษาศาสตร์ต่างๆหลากหลายแขนง โดยได้มีการใช้วิธีการนี้ในการประพันธ์เพลงเช่นกัน โดย Biles [5] [6] ได้ทำการสร้างแบบจำลองสำหรับการเรียนรู้ที่จะสร้างคีตปฏิภาณในปีค.ศ. 1994 โดยมีมนุษย์เป็นผู้สอน ซึ่งยังมีข้อจำกัดในเรื่องของการใช้มนุษย์ในฐานะของ Fitness Function โดยที่มนุษย์นั้นมีมาตรฐานในตัวมนุษย์แตกต่างกันไปในการตัดสินผลลัพธ์ที่ออกมาจากโปรแกรม ต่อมาในปีค.ศ. 2007 Bilotta ได้ทำการนำวิธีทางวิวัฒนาการฟังก์ชันความเหมาะสม มาทดลองกับตัวดึงดูดของ Chua (Chua's Attractor) จากนั้นจึงสร้างชุดโน้ตจาก Matrix คะแนนที่ได้จากการนำสัญญาณเข้าฟังก์ชันความเหมาะสม [7]

## 2.3 จิตวิทยาในดนตรี

การศึกษาองค์ประกอบต่างๆในดนตรี ไม่ว่าจะเป็นจังหวะ Pitch โครงสร้างในบทเพลง และผลลัพธ์ทางจิตที่องค์ประกอบเหล่านั้นได้สร้างขึ้นในเพลง เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาทางจิตวิทยา ซึ่งรายละเอียดของการศึกษาจิตวิทยาในดนตรีมีรายละเอียดดังนี้

### 2.3.1 การศึกษาเบื้องต้น

ในช่วงแรกของการศึกษาปฏิกริยาทางอารมณ์ต่อดนตรีได้เกิดขึ้นโดย Hevner (1936) [20] โดยได้ทำการสำรวจผู้ฟังซึ่งมีพื้นฐานทางดนตรีหลากหลายแตกต่างกันโดยถามถึงคุณลักษณะของดนตรีที่พวกเขากำลังฟังอยู่ โดยคุณลักษณะเหล่านั้นจัดกลุ่มให้เป็นคุณลักษณะ 8 ประการ ได้แก่ ตื่นเต้น มีความสุข งดงาม สงบ ขวนฝืน เสียใจ มีเกียรติ และกระฉับกระเฉง และนำเสนอคุณลักษณะเหล่านั้นให้ผู้ฟังได้เลือก ซึ่งอนุญาตให้ผู้ฟังเลือกได้ตามที่ต้องการ โดยการศึกษานี้ได้แสดงให้เห็นว่าผู้ฟังที่ไม่ได้รับการฝึกฝนจะได้รับอารมณ์ปริมาณมากเท่ากับนักดนตรีที่ได้รับการฝึกฝน ด้วยพัฒนาการของแนวดนตรีร่วมสมัยอย่างเช่น Noise Music Free Jazz และ Atonal Music ซึ่งผลลัพธ์ที่ออกมาชวนทำให้ตั้งข้อสงสัยได้ต่อ ยกตัวอย่างเช่นผลงานเปียโนของนักเปียโนนาม Art Tatum ซึ่งทำให้เข้าใจผิดได้บ่อยโดยนักเปียโนสมัครเล่นว่าไม่ใช่เทคนิคมากนัก แต่นักดนตรีที่มีความเชี่ยวชาญจะสัมผัสได้ถึงความยากในเทคนิคการตกแตงโน้ตและการสร้างสรรค์ทำนองที่ซับซ้อนของเขา

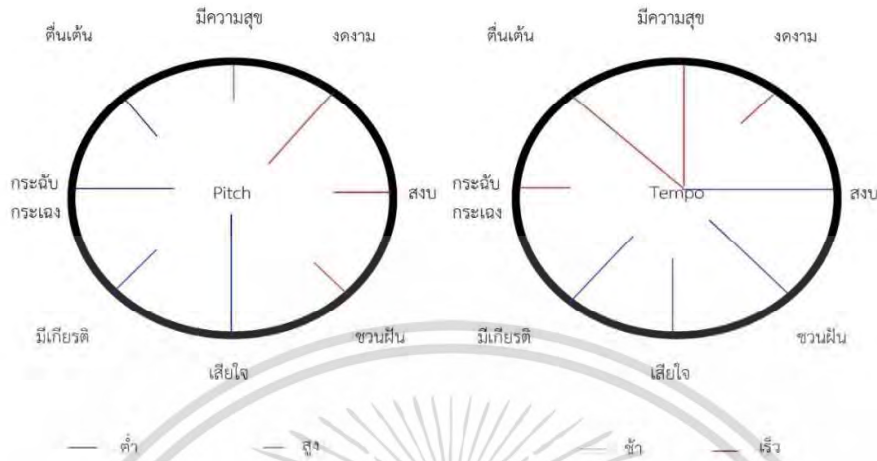


รูปที่ 2.3 Art Tatum (ค.ศ. 1909 – 1956) [40]

โดยในการศึกษานี้ได้ออกแบบให้สำรวจปัจจัยอย่างเช่น แผนภูมิแสดงลำดับชั้น (Contour) Major vs Minor Mode จังหวะที่ตายตัว หรือมีการเคลื่อนไหวของจังหวะ การซ้ำของเสียง (Consonance) และอื่นๆ โดยเพลงแต่ละเพลงที่เล่นให้ฟังจะกำหนดคะแนนในแต่ละประเภท และการให้คะแนนจะใช้กำหนดว่าคุณลักษณะใดที่เชื่อมเข้ากับแต่ละปัจจัยทางดนตรี ซึ่งเป็นที่ประจักษ์ได้ จากนั้น จะเห็นว่ามียปัจจัยที่ไม่ได้ *ครอบคลุม* ในการศึกษาครั้งนี้ซึ่งสามารถสร้างอิทธิพลต่อการเลือกคุณลักษณะที่เป็นคำตอบแก่ผู้ฟัง ทำให้ผลการศึกษานี้ไม่น่าเชื่อถือ

แต่อย่างไรก็ตาม การศึกษาข้างต้นก็เป็นพื้นฐานที่ดีสำหรับการวิจัยในขอบเขตของ “ดนตรีในการบรรลุ” ในงานวิจัยชิ้นที่ 2 ของ Hevner (1937) [21] ได้ทำการแก้ไขข้อตำหนิโดยการให้แต่ละเพลงเล่นให้ฟัง 2 ครั้ง โดยคงความดังเดิมไว้ 1 ครั้ง และ มีการเปลี่ยนแปลงค่า Pitch หรือคีย์ไป 1 คีย์ (Transposition) หรือเปลี่ยนแปลงค่า Tempo โดยค้นพบว่า Tempo เป็นปัจจัยสำคัญที่สามารถแสดงความรู้สึกของดนตรีได้ ด้วย Tempo ที่รวดเร็วจะสร้างความรู้สึกลงาม กระฉับกระเฉง ความสุข และความตื่นเต้น ในขณะที่ Tempo ที่ช้าจะสร้างอารมณ์ของความเสียใจ ความสงบ และ กรณิที่เกิเกิดขึ้นได้ยากอย่างความรู้สึกสง่างาม โดยแสดงไว้ในรูปที่ 2.4

นอกจาก Tempo แล้ว ในการศึกษานี้ได้แสดงให้เห็นอีกว่า Modality เป็นลักษณะที่สำคัญที่สุดของดนตรี โดย Major Mode จะนำไปสู่อารมณ์ที่มีความสุข (หรือโกรธเกรี้ยว) มากกว่า ในขณะที่ลักษณะอื่นๆ มีผลกระทบที่น้อยกว่า โดยเฉพาะกับขนาดของจำนวนนักดนตรี 40 คน ที่ Hevner ได้ทำการทดสอบ



รูปที่ 2.4 การตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงใน (ซ้าย) Pitch และ (ขวา) Tempo ของผู้ฟัง (Hevner, 1937) [21]

### 2.3.2 วิธีวิเคราะห์ของ Schenker (Schenkerian Analysis)

โดยทั่วไปแล้ว ทฤษฎีดนตรีจะให้ความสำคัญไปยังลักษณะของ Pitch มากกว่า Rhythm หรือ Form ซึ่งสามารถเห็นได้ในทฤษฎี Atonal Theory สมัยใหม่ โดยเฉพาะวิธีวิเคราะห์ของ Schenker ซึ่งคิดค้นโดย Heinrich Schenker นักทฤษฎีดนตรีชาวออสเตรีย ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งการวิเคราะห์นี้จะให้ความสำคัญไปที่โครงสร้างของ Tone เป็นหลัก ยกตัวอย่างเช่น ทฤษฎี Schenker ได้อ้างอิงถึงทุกๆ เพลงที่มีลักษณะเป็น Tonal Music ว่าเป็นการตกแต่งเมโลดี้บนทางเดินคอร์ด I-V โดยทิศทางของแต่ละเพลงสามารถค้นพบได้โดยการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของ Pitch ในเชิงเส้นระยะยาวที่ฝังอยู่ใน อย่างไรก็ตาม นักประพันธ์เพลงหลายๆ ท่านพิจารณา Pitch เป็น “ลักษณะเชิงย่อยของดนตรี” มากกว่าการเป็นองค์ประกอบหลัก

อย่างไรก็ตาม มีการค้นพบความซ้ำซ้อนในงานวิจัยจึงทำให้เกิดข้อผิดพลาดในทฤษฎีของ Schenker และแบบจำลองการรับรู้ที่ให้ความสำคัญไปยังค่า Pitch โดยกระบวนการจัดลำดับ (Serialism) ที่อิงจากโครงสร้างของความสัมพันธ์ใน Pitch ซึ่งการทดลองเกี่ยวกับหัวข้อนี้ได้แสดงอย่างซ้ำไปซ้ำมาว่าเป็น “ความหมองในการรับรู้” (Lerdahl และ Jackendoff, 1983; Millar, 1984) [30] [34] โดยแสดงให้เห็นถึงความไม่ต่อเนื่องในผลกระทบทางการรับรู้ในเพลง การเคลื่อนไหวของ Pitch เชิงเส้นในทฤษฎีของ Schenker ได้แสดงว่าไม่สามารถสร้างการรับรู้ของการประยุกต์ใช้งาน (Schellenberg, 1997) [43] โดยการเคลื่อนไหวของ Pitch เชิงเส้นในบางส่วนนั้น ผู้ฟังจะได้ยินของการทำซ้ำๆ ในทำนองช่วงสุดท้าย ไม่ใช่ความต่อเนื่องของการเคลื่อนไหวของเมโลดี้ในช่วงนั้น



รูปที่ 2.5 Heinrich Schenker (1868-1935) [13]

## 2.4 แบบจำลองการสื่อความ-คติฉบับพลัน (Implication-Realization Model)

แบบจำลองการสื่อความ-คติฉบับพลัน นำเสนอโดย Eugene Narmour นักวิชาการจากสหรัฐอเมริกาในปี 1977 [35] และตีพิมพ์แบบจำลองของเขาในปี 1991 [36] และ 1992 [37] เพื่อเป็นอีก 1 แบบจำลองทางเลือกจากทฤษฎีของ Schenker โดยอิงมาจากการงานของ Leonard Meyer ในปี 1956 [33] เกี่ยวกับการคาดการณ์ และจิตวิทยาของ Gestalt โดยแทนที่จะให้ความสำคัญกับ Tonality แบบจำลองนี้แสดงถึงการสื่อความ (Implication) ที่จะสร้างการคาดการณ์ล่วงหน้า (Expectation) สำหรับคติฉบับพลัน (Realization) ที่จะตามมา

โดยการสื่อความสามารถใช้ในการพัฒนาดนตรีในการบรรลุซึ่งสามารถโน้มน้าวความรู้สึกได้ โดย Meyer เสนอว่าความรู้สึกปลุกเร้าขึ้นมา “การคาดการณ์ไปจนถึงความอดทนในการตอบสนองจะปิดกั้นชั่วคราวหรือถาวร” โดยพัฒนาการคาดการณ์ล่วงหน้าขึ้นเพื่อใช้ในการเชื่อมต่อกันกับรูปแบบดนตรีเฉพาะทาง และรูปแบบความเข้าใจ การรับรู้ และการตอบสนอง ผลลัพธ์คืออารมณ์และผลข้างเคียงนั้นซับซ้อนให้สูงขึ้นเมื่อการคาดการณ์ล่วงหน้าทางดนตรีของผู้ฟังนั้นไม่เป็นไปตามที่คิดไว้ ซึ่งเป็นการค้นพบครั้งสำคัญว่า “การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีในเพลงร่วมสมัยส่วนใหญ่ไม่ได้มีการปรับใช้หลักคิดของการคาดการณ์ล่วงหน้าทั้งโดยนัย และเปิดเผย” (Schmuckler, 1989) [45] และการบอกโดยนัยนั้นยังสามารถใช้เพื่อคำนวณความคล้ายคลึงทางเมโลดี้ได้ (Grachten และ Arcos, 2004; Grachten และคณะ, 2005) [17] [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 Eugene Narmour (ค.ศ. 1939 – ปัจจุบัน) [2]

#### 2.4.1 แบบจำลองโดยย่อ

Narmour เริ่มแบบจำลองจากข้อสันนิษฐานทั่วไป 2 ประการดังนี้

- $A + A \rightarrow A$
- $A + B \rightarrow C$

โดยที่  $A$   $B$  และ  $C$  นั้นเป็นชั้นคู่หรือตัว Pitch เอง กฎนี้ได้แสดงให้เห็นว่า

- การได้ยินเสียง 2 เสียงที่คล้ายคลึงกันสามารถที่จะคาดการณ์ถึงการซ้ำของเสียงนั้นได้ล่วงหน้า
- การได้ยินเสียง 2 เสียงที่แตกต่างกันสามารถที่จะคาดการณ์ถึงการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นในลำดับต่อไป ซึ่งสามารถสรุปได้เป็นหัวข้อสำคัญๆดังนี้

#### 1 Registral Direction

- ชั้นคู่ขนาดเล็กจะบ่งบอกความต่อเนื่องของทิศทางของค่า Pitch โดยนัย
- ชั้นคู่ขนาดใหญ่จะบ่งบอกการเปลี่ยนแปลงทิศทางของค่า Pitch

โดยชั้นคู่ขนาดใหญ่นั้นมีขนาด 7 semitones หรือใหญ่กว่านั้น

The image displays five musical staves, each representing a different variable. The top two staves are labeled 'Fulfilled' and 'Denied' above them. The variables are: Regstral Direction, Intervallic Difference, Regstral Return, Proximity, and Closure. Each staff shows a sequence of notes on a treble clef staff, with the 'Fulfilled' and 'Denied' measures showing different patterns of intervals and registers.

รูปที่ 2.7 ตัวอย่างของสถานะต่อเติมให้สมบูรณ์ (Fulfilled) และสถานะปฏิเสธ (Denied) สำหรับชั้นคู่ (ชาย) ขนาดเล็ก และ (ขวา) ชั้นคู่ขนาดใหญ่ (Thompson และคณะ, 1997) [52]

## 2 Intervallic Difference

- ชั้นคู่ขนาดเล็กจะบ่งบอกขนาดของชั้นคู่ที่คล้ายคลึงกัน
  - ถ้า Regstral Direction เปลี่ยนแปลงไป ชั้นคู่ขนาดเล็กจะนิยมเป็นชั้นคู่ที่มีขนาดต่างกัน  $\pm 2$  semitones
  - ถ้า Regstral Direction ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ชั้นคู่จะมีขนาด  $\pm 3$  semitones
- ชั้นคู่ขนาดใหญ่จะบ่งบอกชั้นคู่ถัดไปที่มีขนาดเล็กลง

## 3 Regstral Return

ส่วนใหญ่แล้วรูปแบบของเมโลดี้จะเป็น aba หรือ aba' โดยโทนสุดท้ายจะใกล้เคียงกับ pitch เริ่มต้นมาก ( $\pm 2$  semitones) ยกตัวอย่างเช่น A-E-Eb ผู้ฟังจะจำได้และคาดการณ์ถึงรูปแบบนี้ที่เกิดขึ้น

## 4 Proximity

ชั้นคู่ขนาดเล็กจะมีการบ่งบอกโน้ตผลลัพธ์ที่ชัดเจน และคาดการณ์ได้ง่ายกว่าชั้นคู่ขนาดใหญ่

## 5 Closure

Closure นิยามว่าผู้ฟังสามารถแยกเมโลดี้ที่อิงจากทิศทางของ Pitch และขนาดของชั้นคู่ ซึ่งเกิด 2 กรณีขึ้นคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ทิศทางของเส้นระดับชั้น Pitch มีการพลิกกลับ
- ชั้นคู่ขนาดใหญ่จะตามด้วยชั้นคู่ขนาดเล็กกว่า โดย Closure ที่สวยงามกว่านั้นมีส่วนร่วมให้ทั้ง 2 กรณีนั้นเกิดขึ้นได้ใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ Closure แบบทั่วไปสามารถพบได้ 2 โทนเสียงที่
- โทนเสียงที่ 2 มีความยาวกว่าโทนเสียงแรก
- โทนเสียงที่ 2 เกิดขึ้นในจังหวะที่หนักแน่นกว่าโทนเสียงแรก
- โทนเสียงที่ 2 หนักแน่นหรืออยู่ในคีย์หรือโหมดตั้งต้นมากกว่าโทนเสียงแรก

ซึ่งแบบจำลองการสื่อความ-คติฉบับพลันได้นำไปพิสูจน์และเห็นว่าสมมุติผลจริง ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ได้กับดนตรีหลากหลายแนว ไม่ว่าจะเป็น British Folk, Atonal และ Chinese Folk (Krumhansl, Cuddy และ Lumney, 1995; Schellenberg, 1996; Thompson และคณะ, 1997) [15] [25] [52] ซึ่งงานวิจัยของ Krumhansl ในปี 1999 และ 2000 [26] [27] ได้ค้นพบว่าวัฒนธรรมทางดนตรีได้ก่อร่างวิธีการคาดการณ์ของผู้ฟังในรูปแบบที่เป็นตัวของตัวเองไม่มีนิยามที่ตายตัว ซึ่งงานวิจัยเหล่านี้สามารถใช้อ้างอิงหลักการในการสร้างความสัมพันธ์ของขนาดชั้นคู่และความต่อเนื่องที่แสดงของความสัมพันธ์ที่เกิดสถานะต่อเติมให้สมบูรณ์แสดงในรูปที่ 2.7

ต่อมา Schellenberg [43] ได้แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองนี้เฉพาะเจาะจงเกินไป แบบจำลองแบบใหม่ที่ปรับปรุงและทำให้ง่ายขึ้นประสบความสำเร็จในการคาดการณ์ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นในหมู่ผู้ฟังและแนวดนตรีเช่นกัน เดียวกับแบบจำลองการสื่อความ-คติฉบับพลันแบบดั้งเดิม โดยเฉพาะหลักของ Intervallic Difference ที่บ่งบอกถึงชั้นคู่ขนาดเล็ก และความสัมพันธ์กับหลัก Proximity ในส่วนของหลัก Closure ยังแสดงถึงความซ้ำซ้อนในเชิงแนวคิดอยู่

แบบจำลองการสื่อความ-คติฉบับพลันนั้นเหมาะสมเฉพาะในการประพันธ์เพลงโดยใช้ขั้นตอนวิธีซึ่งสามารถวางเป็นกฎและข้อบังคับโดยไม่จำเป็นต้องใช้การวิเคราะห์ทวลิตดนตรีแบบซับซ้อน

## 2.5 ลักษณะที่ไม่ใช่ Pitch ในดนตรี

### 2.5.1 จังหวะ

จังหวะในความหมายของดนตรีเป็นการวางตำแหน่งของเสียงตามช่วงเวลาต่างๆ โดยทั่วไปแล้ว จังหวะหมายถึงการผลัดเปลี่ยนที่จัดลำดับขององค์ประกอบที่แตกต่างกัน การรับรู้ของจังหวะเองก็สามารถเกิดขึ้นได้ในศิลปะแขนงอื่น (ยกตัวอย่างเช่น วรรณกรรม จิตรกรรม ประติมากรรม และสถาปัตยกรรม) เช่นเดียวกับธรรมชาติ (เช่น จังหวะทางชีววิทยา)

โดยจังหวะประกอบด้วย Beat ที่เป็นองค์ประกอบที่ยึดในการนับจังหวะ เช่นการเต้นของหัวใจ

Tempo เป็นองค์ประกอบที่ระบุความเร็วในการเล่นต่อ 1 ห้อง ซึ่งมีทั้งความเร็วที่ช้า เร็ว และ “ปานกลาง” ซึ่งความเร็วปานกลางสันนิษฐานว่าเป็นระยะก้าวที่มนุษย์ใช้เดินต่อนาที (ประมาณ 76 ถึง 80 ครั้งต่อนาที)



รูปที่ 2.8 ตัวอย่าง Time Measure (Crossley-Holland, 1998) [14]

หรืออัตราความเร็วของหัวใจ (72 ครั้งต่อนาที) โดย Tempo จะกำหนดโดยผู้ประพันธ์เพลง แต่สามารถมีการปรับเปลี่ยน Tempo ตามปัจจัยต่างๆเพื่ออรรถรสในการแสดงได้เช่นกัน

อีก 1 องค์ประกอบสำคัญในจังหวะคือการกำหนดค่าเวลา (Time measure) โดยยกตัวอย่างแสดงในรูปที่ 2.8

โดย Time measure ในรูปที่ 2.8 แสดงใน 1 ห้อง จากบรรทัดแรกหมายถึงว่า 1 ห้องจะประกอบด้วยโน้ต Whole note จำนวน 4 ตัว บรรทัดที่ 2 ประกอบด้วย half note 4 ตัวใน 1 ห้อง บรรทัดที่ 3 ประกอบด้วย quarter note จำนวน 4 ตัว และบรรทัดที่ 4 ประกอบด้วย the eighth note จำนวน 4 ตัว

ซึ่งหมายถึงว่าตัวเลขข้างล่างคือค่าเวลาของโน้ตใน 1 ห้อง และตัวเลขข้างบนคือจำนวนโน้ตที่ระบุไว้ข้างล่างต่อ 1 ห้อง ซึ่งตัวเลขข้างบนมีการเปลี่ยนแปลงได้ตามความต้องการของผู้ประพันธ์เพลง ซึ่งทำให้ได้ผลลัพธ์เป็นโครงสร้างของเพลงที่มีจังหวะที่ซับซ้อนยิ่งขึ้น

### 2.5.2 Form

โดยทั่วไปแล้ว Form ของดนตรีจะอยู่ใน Form ที่เรียกว่า Sonata Form ซึ่งมีโครงสร้างของ Form เป็น AABA โดย A และ B แทนท่อนแต่ละท่อนในเพลงที่มีลักษณะภายในแตกต่างกัน แต่ยังมี Form อื่นๆ อาทิเช่น Ballade (AAB), Rondo (A B A C A B A)

ในงานวิจัยเกี่ยวกับ Form นั้น นักวิเคราะห์ดนตรีสมัยใหม่มีมุมมองที่ร่วมกันว่าดนตรีนั้นมีความเป็นลำดับขั้น อ้างอิงจาก Schenker (1969) [44] ว่า “โครงสร้างของ Pitch และจังหวะแสดงชุดระดับในระหว่างความสัมพันธ์ของการลดทอน และการใส่รายละเอียด จะนำไปใช้งานในระดับใด”

แบบจำลองเกี่ยวกับ Tonal-Pitch-Space ของ Lerdahl (2001) [29] ได้เสนอว่า Tension เป็นการผสมผสานของ Melody Dissonance กับตำแหน่งของ Musical Event ใน Tree Structure โดยวิธีที่เข้าใกล้ Root จะสร้าง Tension ได้ลดลง

## 2.6 สัญญาณอลวน

คำว่า “อลวน” เป็นคำที่บัญญัติขึ้นในการศึกษาทางพลศาสตร์เพื่ออธิบายปรากฏการณ์ต่างๆที่เกิดขึ้นในธรรมชาติในรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ โดยระบบอลวนได้เริ่มมีการศึกษาในช่วงกลางทศวรรษ 1880 โดย Henri Poincare ทำการศึกษาปัญหาแรงดึงดูดระหว่างมวลวัตถุทั้งสาม (Three-body problem) และค้นพบว่าเมื่อทำการวาดเส้นกราฟจากเส้นวงโคจรนั้น ลักษณะกราฟที่เกิดขึ้นไม่เป็นรายคาบ และไม่สามารถหาคำตอบที่แม่นยำได้ โดยสัญญาณอลวนที่ใช้ในการวิจัย มีรายละเอียดดังนี้

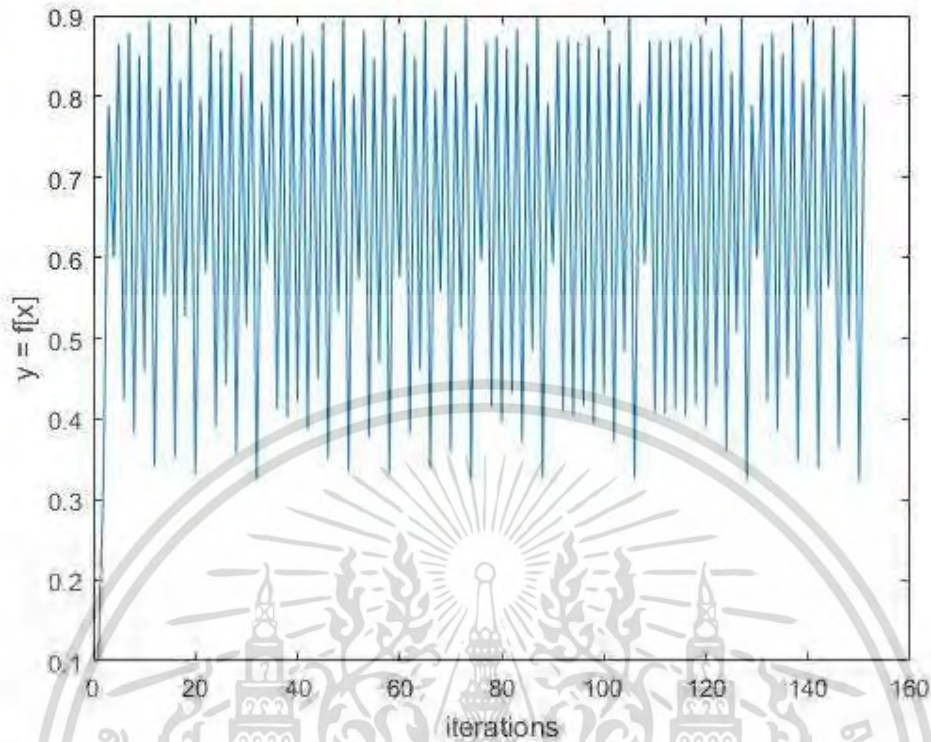
### 2.6.1 Logistic Map

Logistic Map เป็นสัญญาณอลวนพื้นฐานในการศึกษาเกี่ยวกับปรากฏการณ์อลวน โดยมีตัวแปร  $x$  และ พารามิเตอร์ควบคุมพารามิเตอร์เดียวคือ  $a$  โดยสามารถบรรยายได้ผ่านสมการ 2.1 โดยระบบมีพฤติกรรมโดยรวมสามารถสรุปได้ดังตาราง 2.1

$$f(x) = ax(1 - x) \quad (2.1)$$

ตารางที่ 2.1 พฤติกรรมของระบบสมการแบบแผนภูมิโลจิสติกที่แปรผันตามค่าพารามิเตอร์  $a$  [49]

ค่าพารามิเตอร์ $a$	พฤติกรรมของระบบ
$0 < a < 1$	เข้าใกล้ค่า 0
$1 < a < 3$	มี Limit Cycle หนึ่งคาบ อยู่ในช่วง 0- 0.7
$3 < a < 3.449$	มี 2 Limit Cycle
$3.449 < a < 3.599$	มี 4 Limit Cycle
$3.599 < a < 4$	อลวน



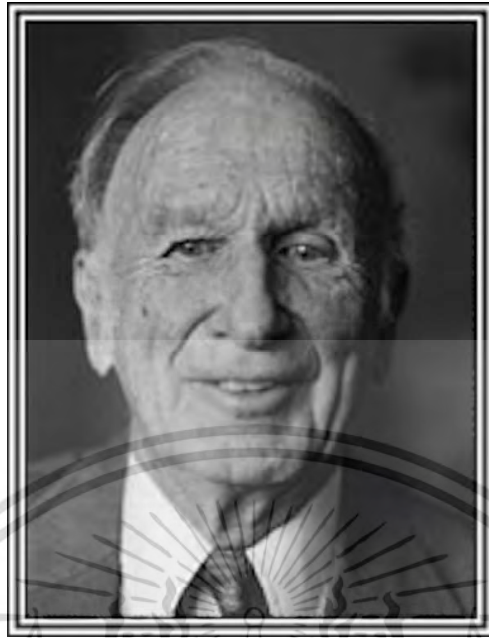
รูปที่ 2.9 ตัวอย่างสัญญาณ Logistic Map เมื่อระบุค่า  $a = 3.6$  และ  $x_0 = 0.1$  ตั้งแต่ iterations = (0 150)

ในการวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการใช้ค่า  $a = 3.6$  และ  $x_0 = 0.1$  อันเนื่องมาจากที่ค่า  $a = 3.6$  สัญญาณที่เกิดจากพารามิเตอร์  $a = 3.6$  เริ่มแสดงพฤติกรรมมอลวนออกมา ซึ่งสัญญาณลัพท์แสดงออกมาดังรูปที่ 2.9

#### 2.6.2 ตั้งตั้งดูดแบบ Lorenz (Lorenz's attractor)

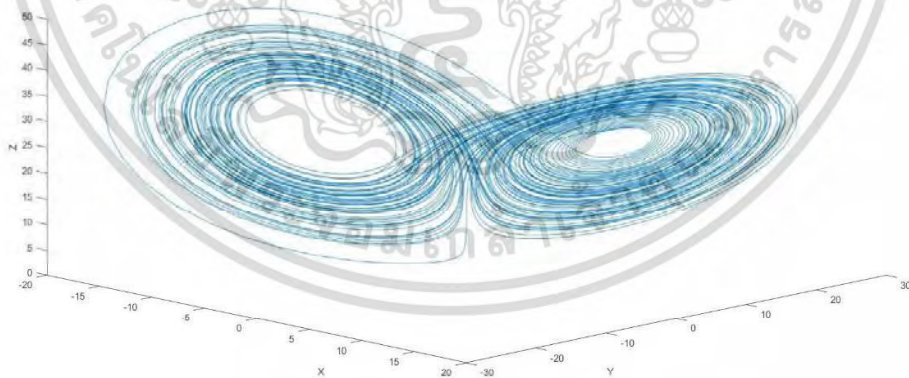
ตัวตั้งดูดแบบ Lorenz ค้นพบอย่างบังเอิญโดย Edward Lorenz นักอุตุนิยมวิทยาชาวสหรัฐอเมริกา ดังรูปที่ 2.10 โดยในปี.ศ. 1961 Lorenz ได้สังเกตเห็นความผิดปกติในงานจำลองสภาพอากาศของเขาซึ่งค้นพบว่ามีการพยากรณ์อากาศที่ผิดแปลกใจจากที่เคยทำมา ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าเงื่อนไขเริ่มต้น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเงื่อนไขเริ่มต้นเพียงเล็กน้อย ผลลัพธ์ที่แสดงออกมากลับมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมหาศาล จากการค้นพบนี้ Lorenz จึงนำเสนอแบบจำลองของเขาซึ่งแสดงได้ดังรูปสมการ (2.2)

$$\begin{aligned} \dot{x} &= a(y - x) \\ \dot{y} &= cx - xz - y \\ \dot{z} &= xy - bz \end{aligned} \quad (2.2)$$



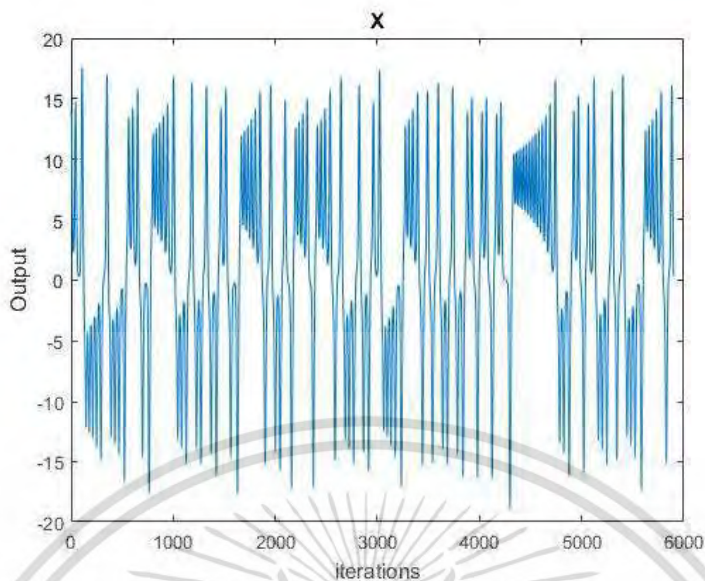
รูปที่ 2.10 Edward Norton Lorenz (ค.ศ.1917-2008) [1]

เมื่อกำหนดค่า  $a, b, c$  เป็น  $[10, 8/3, 28]$  และ  $x_0, y_0, z_0$  เป็น  $[14, 3, 34]$  จึงพบปรากฏการณ์ลอว์นดังแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งเมื่อแยกสัญญาณออกเป็นเทอม  $x, y$  และ  $z$  จะได้สัญญาณดังรูปที่ 2.12 2.13 2.14 ตามลำดับ

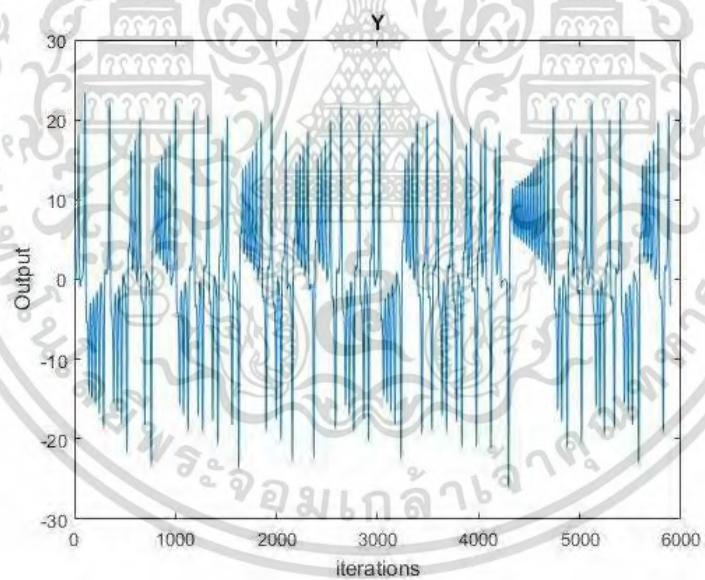


รูปที่ 2.11 แบบจำลองตัวดึงดูดแบบ Lorenz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

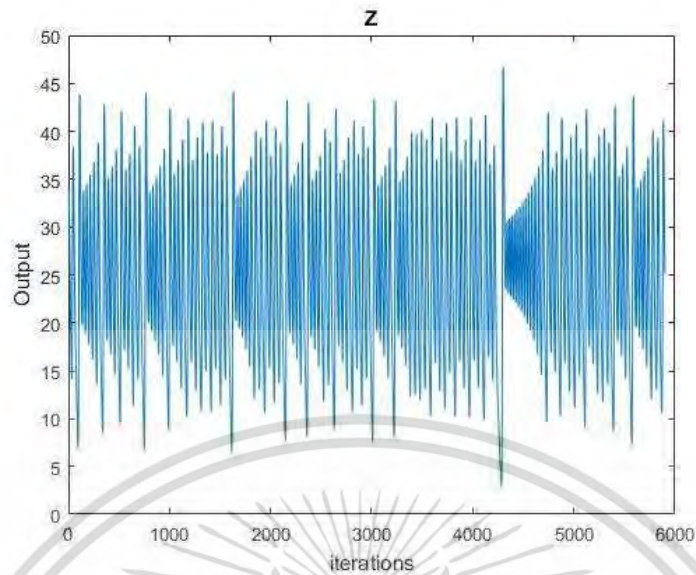


รูปที่ 2.12 สัญญาณตัวตั้งจุดแบบ Lorenz เทอม  $x$  ในโดเมนเวลา



รูปที่ 2.13 สัญญาณตัวตั้งจุดแบบ Lorenz เทอม  $y$  ในโดเมนเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 สัญญาณตัวดึงดูดแบบ Lorenz เทอม z ในโดเมนเวลา

### 2.6.3 ตัวดึงดูดแบบ Chen (Chen's attractor)

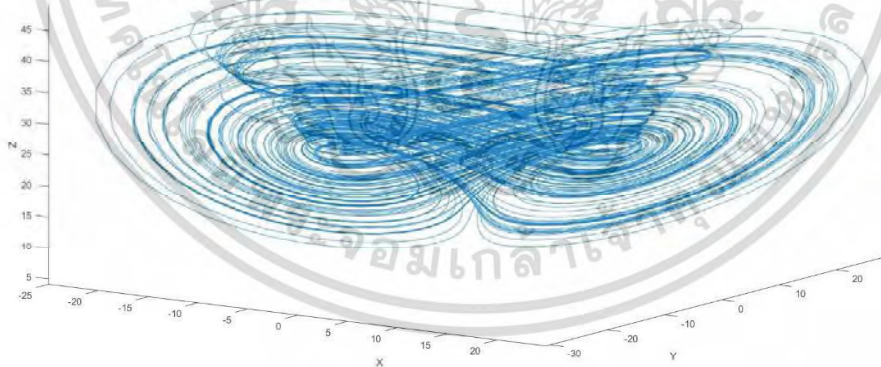
ตัวดึงดูดแบบ Chen คิดค้นขึ้นโดย Guanrong Chen ศาสตราจารย์ชาวอเมริกันเชื้อสายจีน ดังรูปที่ 2.15 จากการนำวงจรถอวนของ Chua มาศึกษาสัญญาณอววนโดยอาศัยสมการของ Lorenz และทำการควบคุมแบบย้อนกลับ (Feedback Control) ทำให้เกิดกระบวนการทำให้อววน (Chaotification) จากสมการของ Lorenz ซึ่งสามารถบรรยายในรูปแบบสมการคณิตศาสตร์ดังสมการ (2.3)

$$\begin{aligned} \dot{x} &= a(y - x) \\ \dot{y} &= (c - a)x - xz + cy \\ \dot{z} &= xy - bz \end{aligned} \quad (2.3)$$



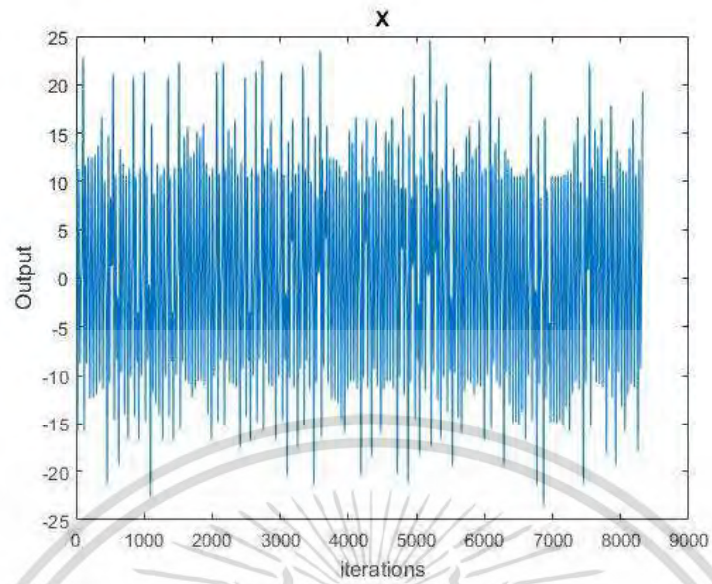
รูปที่ 2.15 Guanrong Chen (ค.ศ. 1948 – ปัจจุบัน) [9]

โดยเงื่อนไขเริ่มต้น  $x_0 \ y_0 \ z_0 = [14, 3, 34]$  และพารามิเตอร์  $a \ b \ c = [35, 8/3, 28]$  เพื่อนำมาจำลองตัวอย่างสัญญาณอลวนในรูปที่ 2.16 เมื่อแยกสัญญาณมาแสดงในแต่ละเทอมจะได้สัญญาณตัวตั้งจุดเทอม  $x \ y \ z$  แสดงดังรูปที่ 2.17 2.18 และ 2.19 ตามลำดับ

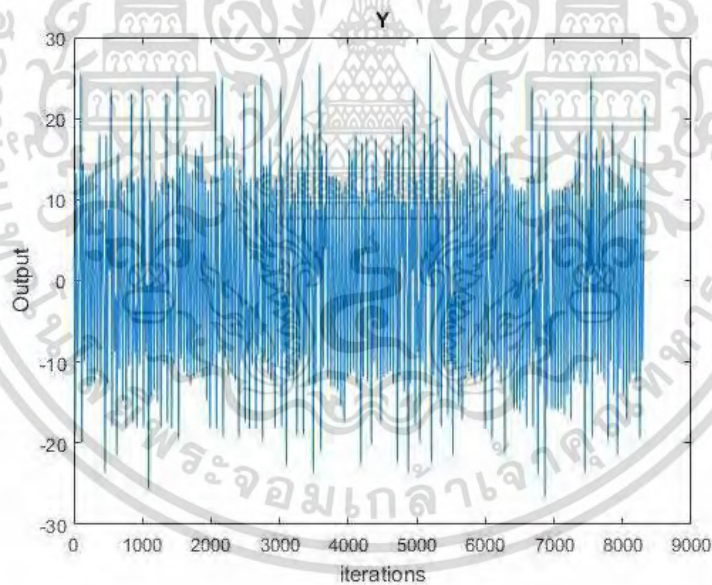


รูปที่ 2.16 สัญญาณตัวตั้งจุดแบบ Chen

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

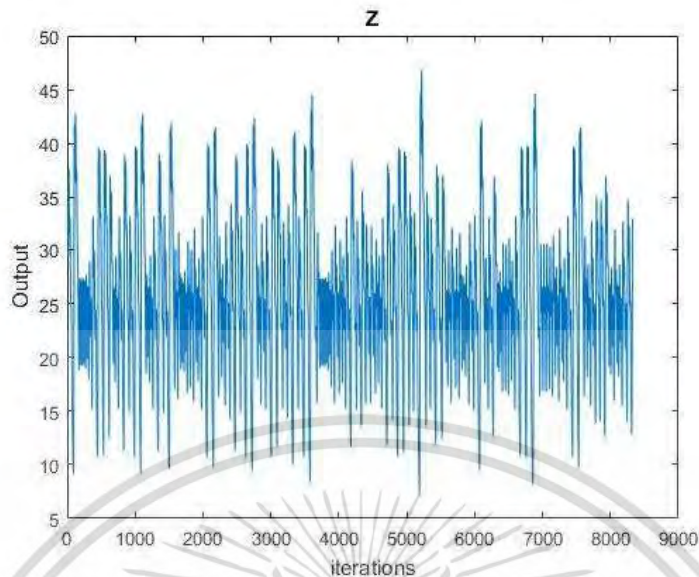


รูปที่ 2.17 สัญญาณตัวดึงดูดแบบ Chen เทอม  $x$  ในโดเมนเวลา



รูปที่ 2.18 สัญญาณตัวดึงดูดแบบ Chen เทอม  $y$  ในโดเมนเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 สัญญาณตัวดึงดูดแบบ Chen ในโดเมนเวลา

## 2.7 ทฤษฎีเหตุการณ์ (Event Theory)

ทฤษฎีเหตุการณ์คิดค้นขึ้นโดย Jeremy Leach และ John Fitch (1995) [28] โดยนำเสนอผ่านแผนผังต้นไม้เหตุการณ์ (Event Tree) ที่พัฒนาแนวคิดมาจากโครงสร้างรูปต้นไม้ (Tree Structure) ของ Fred Lerdahl และ Ray Jackendoff (1983) [30] ในการทำความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีเหตุการณ์จึงยกตัวอย่างก้อนหินที่ตกจากยอดหน้าผา ซึ่งมีพฤติกรรมที่สามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือพฤติกรรมก่อนที่ก้อนหินจะถึงพื้นดิน และพฤติกรรมหลังจากถึงพื้นดิน ถ้ามองการเคลื่อนที่ของก้อนหิน จะพบว่าตราบเท่าที่ก้อนหินไปถึงเข้าใกล้จุดหมายของมัน จะเกิดความรู้สึกตื่นเต้นมากขึ้นเรื่อยๆ และเมื่อมันถึงจุดล่างสุดซึ่งเป็นพื้นดิน ความตื่นเต้นก็จะถึงขีดสุด และก็จะลดลงในช่วง “หลัง” ในระหว่างที่ก้อนหินเข้าสู่ภาวะนิ่ง

เมื่อจำแนกแรงกระทบเอนทีตีทางนามธรรม ที่เรียกว่า “Event” เราสามารถบอกได้ว่ามี 2 เอนทีตีเกี่ยวกับ Event ได้แก่

1. ความตื่นเต้นเพิ่มขึ้นเพราะเราสามารถเห็นผลลัพธ์ของการเคลื่อนที่ หมายความว่า เรารู้ว่าเหตุการณ์จะเกิดขึ้นในเวลานั้น เพราะเราสามารถเห็นกระบวนการนำไปสู่ผลลัพธ์ได้
2. ความตื่นเต้นจะกลับมาเป็นปกติเมื่อมันไม่มีการเคลื่อนที่หรือพลังงานเหลืออยู่หลังผลลัพธ์ของ Event

ตัวอย่างอื่นๆของทฤษฎีเหตุการณ์นี้ สามารถพบเห็นได้ทุกที่ตามธรรมชาติ (สัตว์กำลังไล่ล่าเหยื่อ, กำลังลมที่เพิ่มขึ้นในพายุ, คลื่นกระทบชายฝั่ง ฯลฯ) เช่นเดียวกับการปฏิสัมพันธ์ของมนุษย์ ในความเป็นจริงแล้วทุกๆที่นั่นมีการคาดการณ์การเกิดขึ้นของ Event บาง Event จากทุกๆสิ่งที่กล่าวมานี้ จะเห็นได้ว่า Event คืออะไรบางอย่างที่เป็นส่วนหนึ่งของธรรมชาติ เช่นกระบวนการจัดการในชีวิต การมีความรู้สึกของผู้คนต่อเหตุการณ์ต่างๆ

นอกจากนี้ Event ไม่จำเป็นต้องมีวิธีการปฏิสัมพันธ์ในมิติเดียวเสมอไป สังเกตที่ก้อนหินอีกครั้ง คราวนี้ เปลี่ยนจากตกในแนวตั้งเป็นตกลงจากไหล่เขาตั้งรูปที่ 2.20 จะพบว่า จากที่จะตกลงอย่างอิสระจนถึงพื้นดิน ก้อนหินได้มีการกระเด็นไหลลงไปยังพื้นล่าง เพราะพื้นที่ไหล่เขาไม่ได้เป็นแนวตั้ง จึงเห็นได้ว่า แรงกระทบที่ก้อนหินกระทบกับไหล่เขานั้นเป็น Event ที่เกิดขึ้นโดยมีลำดับขั้นตอนก่อนจะนำไปสู่ Event ที่เข้มข้นขึ้นเมื่อก้อนหินกระทบกับชั้นล่างของภูเขาและเข้าสู่ภาวะนิ่งในเวลาต่อมา ดังนั้น เราก็จะมีชุดของ “Sub-Event” ที่นำไปสู่ “Major Event” ชัดเจนว่าเราสามารถจินตนาการเหตุการณ์อื่นๆที่เหตุการณ์ย่อยเกิดขึ้นมากมาย หลังจากเกิดเหตุการณ์ใหญ่นั้น ทั้งสภาวะก่อนและสภาวะหลัง

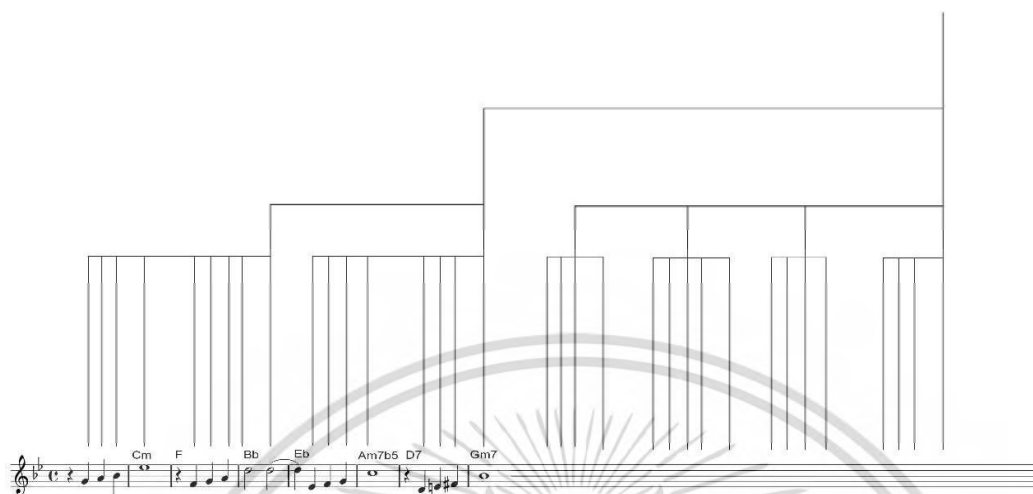


รูปที่ 2.20 ก้อนหินตกจากไหล่เขาแสดงถึงการเกิดเหตุการณ์ย่อยที่เกิดขึ้นในการกระทบกับพื้นดิน

### 2.7.1 ความสัมพันธ์ของทฤษฎีเหตุการณ์กับดนตรี

โครงสร้างการวางโน้ตในบทประพันธ์เพลงต่าง ๆ นั้นแฝงด้วยการวางองค์ประกอบที่มีโครงสร้างคล้ายๆกับโครงสร้างแบบต้นไม้แฝงเอาไว้ในแต่ละโน้ต พิจารณารูปที่ 2.21 เห็นว่าในบทเพลง Autumn Leaves ที่ยกมาพิจารณานั้น ประกอบด้วยกลุ่มตัวโน้ตกลุ่มหนึ่งที่มีการจัดเรียงที่เหมือนกันใน 3 โน้ตตัวแรก เมื่อมาถึงโน้ตที่ 4 จะมีค่าของโน้ตที่แตกต่างจากกลุ่มโน้ตแรกอยู่ ซึ่งกลุ่มโน้ตกลุ่มนี้จะจับเป็นกลุ่มกันและมีลำดับชั้นในตัวเองอยู่ด้วย เพียงแต่อาจมีความแตกต่างกันในค่า Pitch ของโน้ต ซึ่งถึงแม้ว่าจะทำการ เปลี่ยนแปลงคีย์เสียงหรือเพิ่มความถี่จากการคูณด้วยตัวแปรสมมติ  $x$  เราก็ยังสามารถจดจำการเคลื่อนไหวของโน้ตในบทเพลงนั้นๆได้เช่นเดิม นั้นหมายความว่าต่อให้มีการเปลี่ยนแปลงบทเพลงไม่ว่าจะเปลี่ยนแปลงค่า Pitch ทั้งหมดหรือการเปลี่ยนคีย์เสียงของทั้งเพลงนั้น ความสัมพันธ์ระหว่างตัวโน้ตหรือโครงสร้างแบบต้นไม้ของตัวโน้ตไม่มีการเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 โครงสร้างต้นไม้ของโน้ตต่างๆในบทเพลง Autumn leaves [47]

การเคลื่อนไหวของโน้ตในบทเพลงนั้นสามารถมองเป็น “Event” ได้เนื่องจากมีกระบวนการเคลื่อนไหวของเหตุการณ์ที่คล้ายคลึงกันกับตัวอย่างก้อนหินที่อ้างอิงไป มีการเคลื่อนที่จากโน้ตย่อยไปสู่ “Major Note” ซึ่งแสดงถึงจุดไคลแมกซ์ของชุดโน้ตนั้นๆ และกระบวนการนี้สามารถเกิดขึ้นกับชุดโน้ตในลำดับถัดๆไปได้เช่นกัน โดยโน้ตแต่ละตัวจะมีพลังงานแฝงอยู่ในตัว มีการไหลเวียนของพลังงานซึ่งมีทั้งช่วงที่สูญเสียพลังงานอยู่และรีดเค้นพลังงานไปจนถึงระดับสูงสุดและเข้าสู่สภาวะนิ่งสงบ ก่อนที่จะเกิดชุดเหตุการณ์ต่อไปเกิดขึ้น

ในโลกของดนตรีประกอบไปด้วยโน้ตทั้งหมด 12 ตัว ซึ่งแต่ละโน้ตจะมีกลุ่มโน้ตเฉพาะของตัวเองที่เรียกว่า “Scale” เราจึงสามารถแสดงความสัมพันธ์ของกลุ่มโน้ตแต่ละกลุ่มได้โดยการทำแผนผังต้นไม้ของ Scale (Scale Tree) ซึ่งประยุกต์มาจากโครงสร้างรูปต้นไม้เช่นกัน โดยแต่ละ Scale นั้นประกอบด้วย Basic Scale ที่เป็นส่วนหนึ่งใน “Octave” ซึ่งสามารถแบ่งส่วนได้เป็น  $n$  ส่วน โดย  $n$  จะมีค่าสูงสุดได้ที่ 12 เสมอ หรืออีกนัยหนึ่งหมายถึงโน้ตทุกตัว นั้นหมายความว่า Basic Scale คือ Chromatic Scale โดย Scale สามารถเห็นได้เป็นเซตที่จัดลำดับขององค์ประกอบ  $n$  ที่สามารถมีสถานะเป็น 0 หรือ 1 ซึ่งที่สถานะ 0 หมายถึงองค์ประกอบนั้นได้หายไปจาก Scale และสถานะ 1 หมายถึงว่าองค์ประกอบนั้นยังคงอยู่และมีตัวตนใน Scale โดยนิยามแล้ว Basic Scale แทนด้วยเซตที่จัดลำดับของสถานะ 1 จำนวน  $n$  โดยส่วนที่เกิดขึ้นในส่วนย่อยจาก Basic Scale เหล่านี้สามารถเรียกว่าเป็น “Sub-scale”

ในการค้นหา Sub-scale ต่างๆนั้น สามารถทำได้โดยการสมมติ  $y$  เป็น Sub-scale ของ Scale  $x$  ดังนั้นจำนวนขององค์ประกอบ  $n$  ที่มีสถานะเป็น 1 ที่สามารถเกิดขึ้นใน Sub-scale  $y$  จะน้อยกว่าหรือเท่ากับจำนวนขององค์ประกอบ  $n$  ที่เป็น 1 ใน Scale  $x$  โดยใน Sub-scale ต่างๆนั้นสามารถมี Sub-scale ลูกได้ในตัวของ Sub-scale เองได้เช่นกัน แต่จำนวนขององค์ประกอบ  $n$  ที่มีสถานะเป็น 1 ใน Sub-scale ที่ Scale ใดๆนั้น

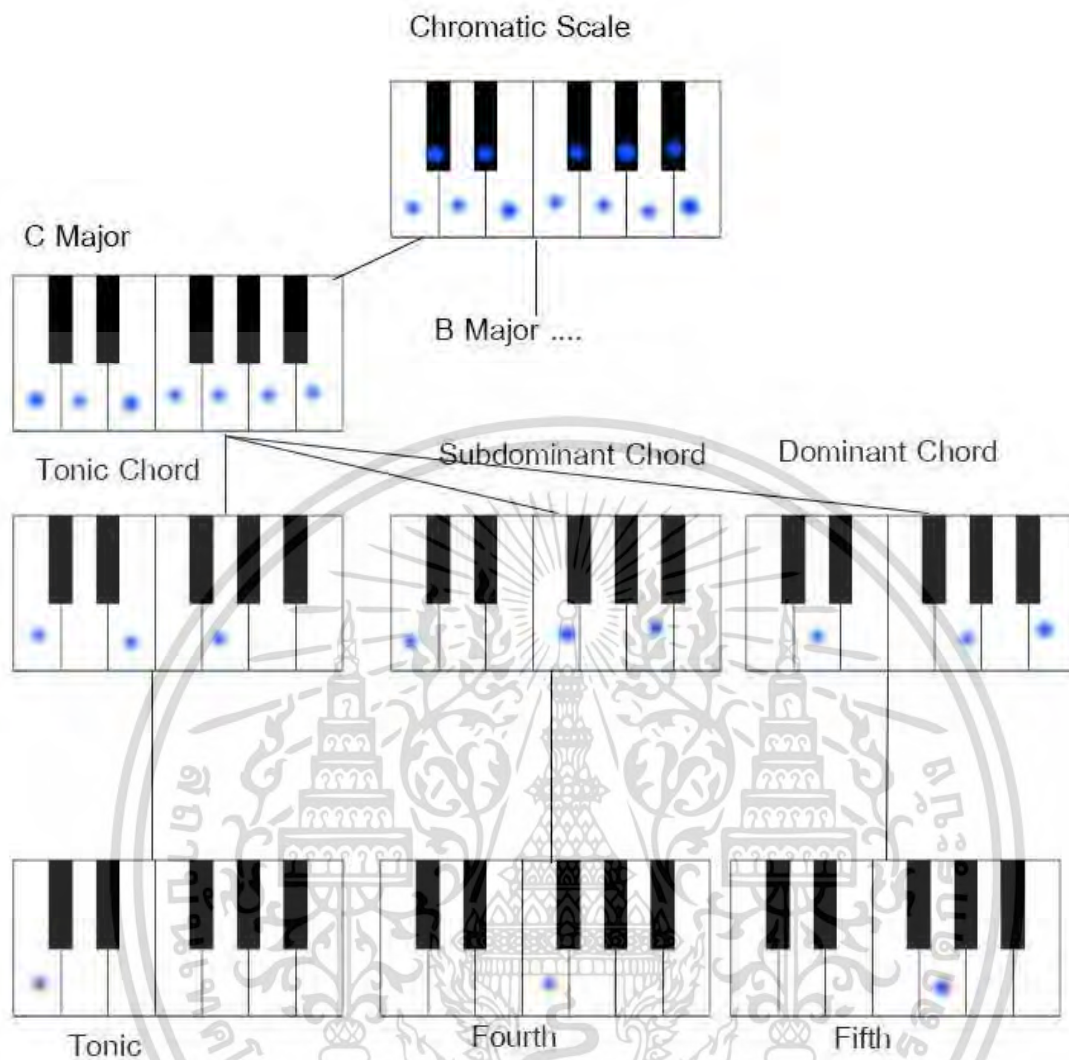
จำกัดโดยจำนวนขององค์ประกอบ  $n$  ที่มีสถานะเป็น 1 ที่มีอยู่ใน Sub-scale ที่อ้างอิง โดยจำนวนสูงสุดของ Scale คือ  $2^x - 1$  ( $x$  คือจำนวนของตัวประกอบ  $n$  ที่มีสถานะเป็น 1 และ Scale ไม่สามารถเกิดขึ้นได้เมื่อไม่มีโน้ตกำเนิดขึ้นหรือ  $n$  เป็น 0 ทุกตัว) ฉะนั้น แผนผังต้นไม้ของ Scale เป็นดังรูปที่ 2.22 และเมื่อแปลงเป็นรูปดิจิทัลจะได้แผนผังต้นไม้ของ Scale ดังรูปที่ 2.23 ยกตัวอย่างเช่น Scale C Major เป็นเซตที่ประกอบด้วย (1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1) เห็นได้ว่ามี Chord หลัก (Tonic Chord), Dominant Chord, Subdominant Chord เป็น Sub-scale ของ C Major และตัว Tonic note อย่างตัว C นั้นเป็น Sub-scale ของ Tonic chord เช่นเดียวกัน

กลับไปพิจารณา Event Tree ในบทเพลง Autumn Leaves ในรูปที่ 2.21 ซึ่งมีอัตราจังหวะอยู่ที่ 4/4 (หมายถึงใน 1 ห้อง สามารถประกอบด้วยโน้ตอัตราจังหวะที่ 1/4 ได้จำนวน 4 ตัว) ถ้ามองว่าแต่ละโน้ตที่เกิดขึ้นนั้นกำหนดให้วางอยู่ในสเกลเฉพาะเจาะจง โดยในบทเพลง Autumn Leaves นี้อยู่ในเซตของคีย์-Bb Major ซึ่งประกอบด้วยเซตของ  $n$  ที่เป็น (1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0) จึงมีการใช้ importance factor เพื่อกำหนดความสำคัญของโน้ตต่างๆว่าเป็น Major note หรือ Leaf note เพื่อนำทางไปสู่ Major note ซึ่งการวางคอร์ดในโน้ตต่างๆสามารถพิจารณาได้โดยการนำ Chord ต่างๆระบุงยัง Leaf note ที่มีค่า Importance factor เป็น 0 และนำ Tonic Chord ระบุใน Major note ที่มี Importance factor เป็น 1 ของทั้งลำดับนั้น เช่น Major note ในลำดับแรกคือ D เป็น Sub-Scale ของ Tonic Chord คือ Bb Major (0, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 0) ซึ่งใน Major Event ระดับสูงสุด (ในรูปที่ 2.20 Major Event สูงสุดมีค่า importance factor เป็น 2) สามารถใช้ Sub-scale ของ Basic Scale รากฐานซึ่งในที่นี้คือ Scale Bb Major และเมื่อได้แนวทางในการวางคอร์ด จะสามารถเลือกโน้ตหรือตั้งค่า Pitch ที่เหมาะสมกับบริบทต่างๆได้ เช่น Major Note ที่มี importance factor เป็น 2 คือ Bb เป็น Sub-Scale ของ Chord ลำดับที่ 6 ใน Scale Bb Major คือ Chord G Minor (0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 0)

นอกจากนี้ ในแต่ละโน้ตนั้นมีค่าความยาวของโน้ตหรือจังหวะที่แตกต่างกัน และมีการเปลี่ยนแปลงการในตัวของมันเอง กลับไปพิจารณารูปที่ 2.21 ในห้องที่ 1 ซึ่งประกอบด้วย Leaf note นั้น ค่าความยาวของโน้ตนั้นมีค่าเท่ากับ 1/4 และเมื่อมาถึง Major note ในห้องที่ 2 ค่าความยาวของ Major note มีการเปลี่ยนแปลงไปเป็น 1 (ซึ่งหมายถึงว่า Major note จะยังคงอยู่ไป 4 จังหวะ) หรือในลำดับของโน้ตชุดถัดไปในห้องที่ 3 Leaf note จะกลับมามีค่าความยาวโน้ตที่ 1/4 อีกครั้ง จนกระทั่งถึง Major note ในลำดับนั้น ในห้องที่ 4 ค่าความยาวของ Major note จะอยู่ที่ 1/2 โดยสิ่งที่น่าสนใจในค่าความยาวของโน้ต คือค่าความยาวมีการเปลี่ยนแปลงที่สัมพันธ์กับตัวประกอบ เช่นค่าความยาวที่ 1/4 กับ 1/2 มีความสัมพันธ์ผ่านการคูณด้วย 2 หรือ ค่าความยาว 1/4 กับ 1 มีความสัมพันธ์ผ่านการคูณด้วย 4

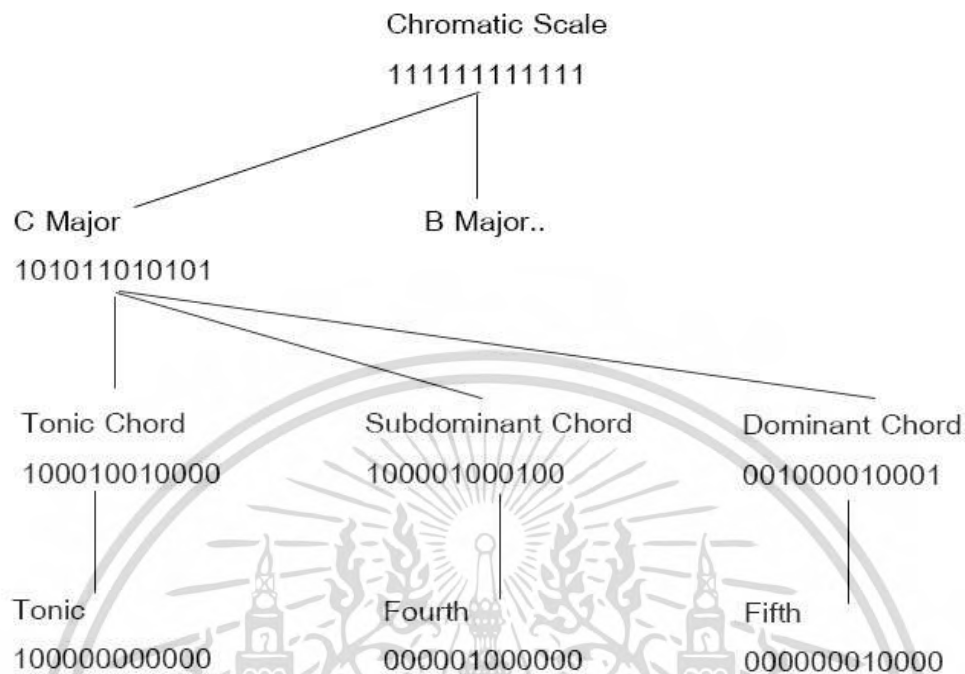
นอกจากนี้ พฤติกรรมในส่วนของโน้ต มีการเปลี่ยนแปลงได้เมื่อไปถึง Major note เช่นกัน ในขณะที่ โน้ตของเพลงกำลังดำเนินไปด้วยด้วยค่าความยาวคงตัว ดังนั้น ในลำดับของโน้ตนั้น ค่า Pitch จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงโดยอ้างอิงจาก constant pitch interval บางตัว เช่นเดียวกับที่เราเคลื่อนที่จากโน้ตหนึ่งไปยัง โน้ตถัดไป

ดังนั้น เมื่อโน้ตดำเนินไปจนถึง Major note ในชุดลำดับของโน้ตนั้น จึงทำการเปลี่ยน constant pitch interval ไปยังอีกค่าหนึ่ง ในกรณีนี้ “constant pitch interval” มีความหมายถึงค่าของโน้ตที่เป็นบวกหรือค่าเป็นลบ เช่นเมื่อโน้ตถัดไปมีค่า Pitch ต่ำกว่าโน้ตตั้งต้น ค่า constant pitch interval จะมีค่าเป็นลบ



รูปที่ 2.22 แผนผังต้นไม้ของ Scale แบบ Analog (เทียบกับเปียโน)

อีกกรณีหนึ่ง หากโน้ตถัดไปมีค่า Pitch สูงกว่าโน้ตตั้งต้น ค่า constant pitch interval จะมีค่าเป็นบวกแน่นอนว่า Major note จะมีค่า importance factor มากกว่า Major note ในชุดลำดับของโน้ตที่อยู่ก่อนและหลัง Major note ดังกล่าว ดังนั้น Scale ที่ใส่ใน Major Event จะต้องเป็น Sub-Scale ของ Scale ที่ใช้กับลำดับก่อนหรือหลังการเกิด Major note ยกตัวอย่างเช่น Scale C Major และ Scale สำหรับ Major note คือโน้ต Tonic ซึ่งเป็นซ้บเซตของเซต C Major ซึ่งเมื่อกำหนดค่าดังกล่าวจะได้เส้นโค้งการไหลของเมโลดี้หรือ Melodic Curve โดยเริ่มต้นจากทิศทางใดทิศทางหนึ่งก่อน โดยกำหนดให้โน้ตนั้นอยู่ในเซตของ Scale C Major และเมื่อโน้ตไปถึงตัว Tonic จะตกลงไปในอีกทิศทางหนึ่ง เมื่อกำหนดค่า Pitch ไว้ที่ระดับหนึ่งจะสามารถคำนวณหาค่า Pitch สำหรับโน้ตในลำดับก่อนที่จะถึง Major note และโน้ตในลำดับ

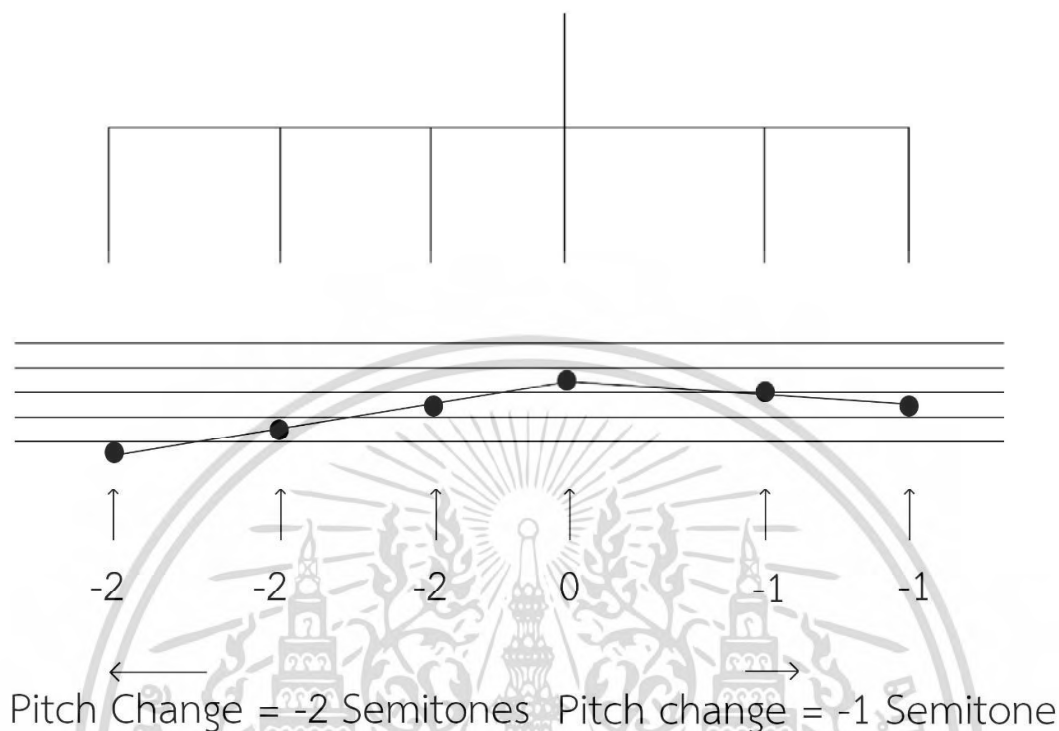


รูปที่ 2.23 แผนผังต้นไม้ของ Scale แบบ Digital

หลังที่เกิดขึ้นหลังผ่าน Major note ไป ตัวอย่างการแสดงความเปลี่ยนแปลงของค่า Pitch ได้แสดงดังรูปที่ 2.24 โดยจะเห็นว่าเมื่ออ้างอิงตัว Tonic เป็นหลัก ชุดโน้ตในลำดับที่เกิดก่อน Tonic จะมีค่า constant pitch interval เปลี่ยนแปลงไป -2 semitones ในขณะที่ชุดโน้ตในลำดับที่เกิดหลัง Tonic จะมีค่า constant pitch interval เปลี่ยนแปลงไป -1 semitone

#### 2.7.2. ขีดจำกัดของหน่วยความจำทางเสียง

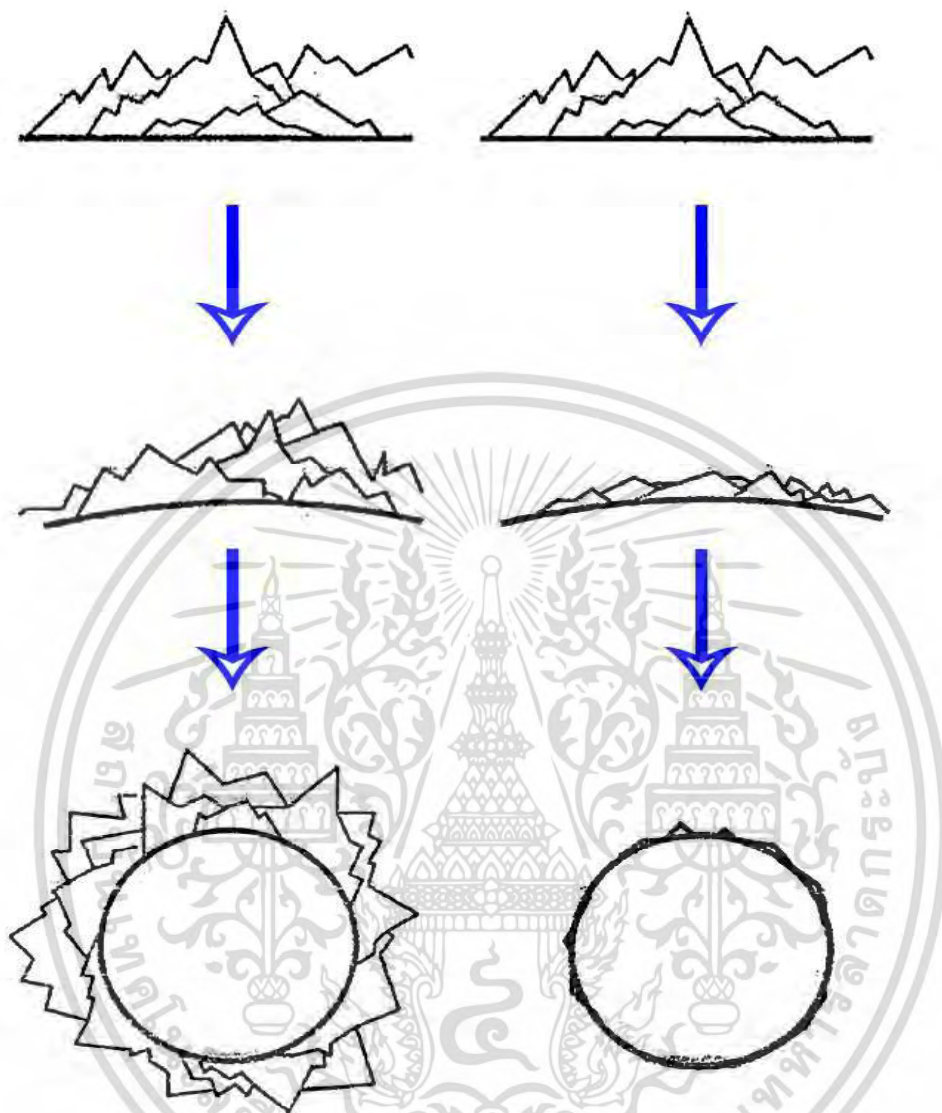
จากรูปที่ 2.25 สมมติว่ามีภูเขาที่เห็นอยู่ตรงหน้าสูงสลับกันไปอยู่หลายลูก ซึ่งถ้าเรามองจากพื้นโลก จะเห็นเป็นภูเขาสูงไม่ต่างจากตึกระฟ้าในเมืองใหญ่ต่างๆ แต่ถ้าเรามองจากภายนอกโลกลงมายังโลก เช่น มุมมองจากสถานีอวกาศ ภูเขาสูงที่เห็นจากพื้นโลกจะมีลักษณะเป็นพื้นผิวขรุขระบนพื้นโลก ซึ่งในทางมายาคติ ถ้าเรามองโลกจากสถานีอวกาศ จะเห็นภูเขาสูงที่มีลักษณะเหมือนกันกับภาพของภูเขาที่เห็นในมุมพื้นโลก นั่นเพราะว่ามนุษย์มีขีดจำกัดในการรับรู้และการจำ ทำให้ภูเขาสูงที่เห็นบนพื้นโลกจึงเป็นเพียงพื้นผิวที่ขรุขระบนพื้นผิวโลก ซึ่งภูเขาแต่ละลูกยังคงเอกลักษณ์ ลักษณะเฉพาะ ส่วนประกอบของตัวเองอยู่ซึ่งสามารถเห็นได้เมื่อขยายภาพลงไป เมื่อนำมาใช้ในแผนผังต้นไม้เหตุการณ์ ความสูงของแผนผังต้นไม้ที่มากพอจะทำให้โครงสร้างรูปต้นไม้ ใน 1 Event นั้นมีลักษณะเหมือนกับโครงสร้างใต้ Sub-nodes ของตัวมันเอง สมมติว่ามีค่าขีดจำกัดขนาด (Scale Limit) เป็น 1 ซึ่งเมื่อยึดผ่านความสูงของแผนผังต้นไม้ ไปก็จะได้ค่าขีดจำกัดขนาดค่าใหม่ แต่มีโอกาที่จะสูญเสีย Form บน Scale หลักไป



รูปที่ 2.24 การเปลี่ยนแปลงค่า Pitch ในลำดับ

## 2.8 บทสรุป

ในบทนี้เป็นการอารัมภบทถึงทฤษฎีที่นำมาใช้ในการทำวิจัยชิ้นนี้อันได้แก่ทฤษฎีออลวน และทฤษฎีเหตุการณ์ โดยในกระบวนการทำวิจัยจะนำสัญญาณออลวนขั้นพื้นฐานอย่างแผนภูมิโลจิสติกมาทำการวิจัยเป็นขั้นตอนแรกก่อน ก่อนที่จะมาทำวิจัยกับสัญญาณตัวดึงดูดของ Lorenz และวิจัยกับสัญญาณตัวดึงดูดของ Chen ซึ่งเป็นจุดประสงค์หลักในการทำวิจัยชิ้นนี้ โดยอ้างอิงจากเมื่อสัญญาณดำเนินไปจนถึงจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงความชัน เปรียบเสมือนการเปลี่ยนแปลงสัญญาณดิจิทัลจาก 0 ไป 1 เป็นจุดตรวจจับการเกิดขึ้นของ Event ในสัญญาณนั้นๆ ในส่วนของขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการประพันธ์บทเพลงนั้นทำการใช้ตัวระบบออลวน (Chaotic System) ซึ่งอยู่ในหมวดหมู่ของการประพันธ์โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันเนื่องมาจากผู้วิจัยทำการใช้ตัวสัญญาณตัวดึงดูดของ Chen ในโดเมนความถี่เป็นแหล่งอ้างอิงหลักในการแต่งเพลง จากนั้นจึงทำการแต่งเพลงโดยอ้างอิงจากแบบจำลองการสื่อความ-คติฉบับพลัน ในการวางโครงสร้างเมโลดี้ที่เหมาะสมตลอดช่วงสัญญาณ โดยคำนึงถึงขีดจำกัดในการบรรเลงตามทฤษฎีดนตรี



รูปที่ 2.25 การเปรียบเทียบภาพที่ปรากฏระหว่างการรับรู้ในอุดมคติ (ซ้าย) และการรับรู้ของมนุษย์ (ขวา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

# วิธีการดำเนินงานวิจัย

### 3.1 บทนำ

ในส่วนของขั้นตอนการวิจัยนั้น ตัววัตถุที่ผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษานั้นคือการเคลื่อนไหวของเส้นสัญญาณอลวน โดยเริ่มต้นจากการสำรวจการเคลื่อนไหวของสัญญาณ Logistic Map ซึ่งเป็นสัญญาณที่กำหนดจากสมการตัวแปรเดียวเพื่อศึกษาการเคลื่อนไหวของเส้นสัญญาณว่าเกิด Event ที่ตำแหน่งใด จากนั้นจึงทำการแปลงสัญญาณให้อยู่ในรูปของโดเมนความถี่ด้วยฟังก์ชัน Fast Fourier Transform เมื่อได้สัญญาณอลวนในโดเมนความถี่แล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการตรวจสอบจำนวน Event ที่เกิดขึ้นนสัญญาณ เพื่อพิจารณาในการแปลงเหตุการณ์เป็นตัวโน้ตในเพลงจากสัญญาณ

### 3.2 การอ่านโน้ตเบื้องต้น

ในงานวิจัยชิ้นนี้ใช้เซตของ Scale C Major เป็น Scale หลักในการอ้างอิงถึงโน้ตทุกตัวที่เกิดขึ้นจาก Event ในสัญญาณ เซตของ C Major ประกอบด้วย (1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1) โดยเซตดังกล่าวแสดงเป็นลำดับโน้ตออกมาดังรูปที่ 3.1 โดยแต่ละโน้ตนั้นมีระยะห่าง 2 semitone ยกเว้นระยะห่างระหว่างโน้ตที่ 3 กับโน้ตที่ 4 และโน้ตที่ 7 กับโน้ตที่ 8 ที่ห่างกัน 1 semitone โดยลำดับโน้ตดังรูปที่ 3.1 นั้นอยู่ octave ที่ 4 เมื่อเทียบกับจำนวนโน้ตในเปียโนซึ่งประกอบด้วยเซตของโน้ตตั้งแต่ (A0 C8) ดังนั้นลำดับโน้ตในรูปจึงประกอบด้วย C4 D4 E4 F4 G4 A4 B4 C5 ตามลำดับ



รูปที่ 3.1 ลำดับโน้ตใน Scale C Major

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 Logistic Map

ในการจัดทำแผนผังต้นไม้ Event ในสัญญาณ Logistic Map จากรูปที่ 2.8 ได้นั้น ต้องอิงสัญญาณในรูปของโดเมนความถี่ โดยทำการแปลงสัญญาณในรูปที่ 2.8 ให้อยู่ในรูปของสเปกตรัมความถี่ของสัญญาณเสียก่อน จึงสามารถดำเนินการต่อได้ ซึ่งสามารถทำได้โดยการใช้ฟังก์ชัน Fast Fourier Transform (FFT) โดยเรานิยามฟังก์ชันได้เป็นสมการ (3.1) โดยจากสมการ (2.1) เมื่อกำหนดค่า และนำสัญญาณเข้าฟังก์ชัน FFT จึงแสดงผลออกมาเป็นรูปสัญญาณ Logistic Map ในโดเมนความถี่ดังรูปที่ 3.2

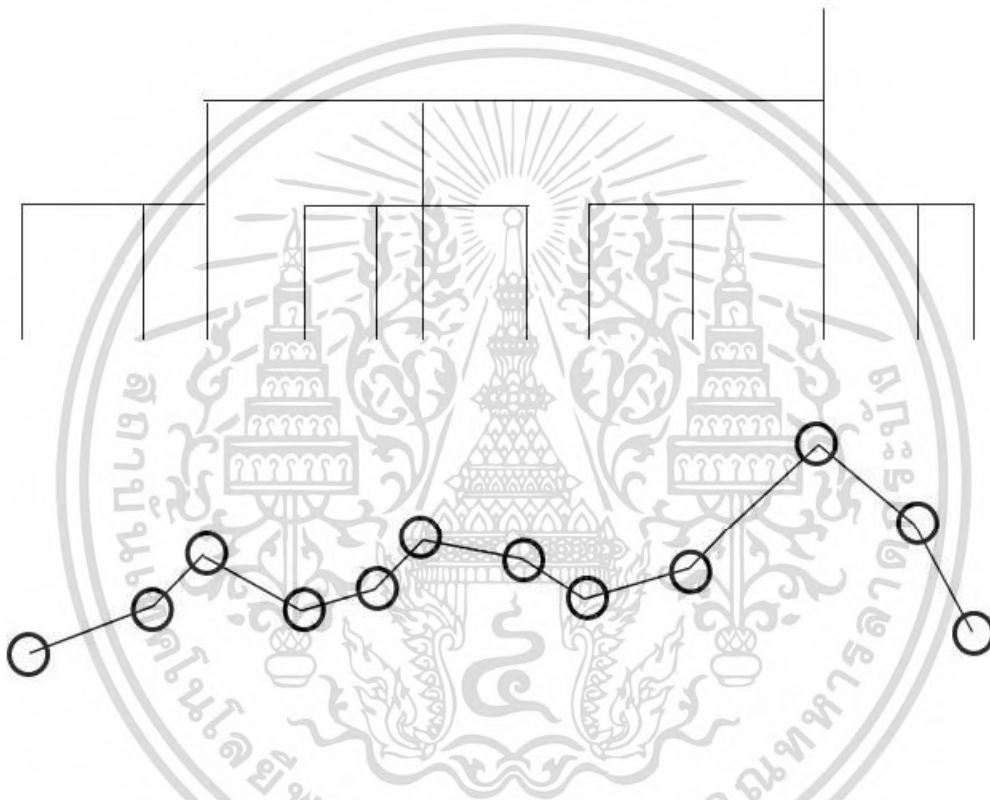
$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-i2\pi kn/N} \quad k = 0, \dots, N-1 \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.2 สัญญาณ Logistic Map ในโดเมนความถี่ ที่  $a = 3.6$  และ  $x_0 = 0.1$  ระหว่าง iterations = (0 150)

หลังจากที่ได้รูปสัญญาณในโดเมนความถี่แล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการจัดทำแผนผังต้นไม้เหตุการณ์เพื่อมาต่อยอดเป็นลำดับของโน้ตที่กำเนิดโดย Logistic Map โดยตรวจสอบการเกิด Event ขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงความชันในสัญญาณ เมื่อความชันในสัญญาณเกิดการเปลี่ยนแปลง หมายความว่ามีการเกิด Event ขึ้นในจุดนั้น จากรูปที่ 3.3 เมื่อความชันเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าของความชันไปเป็นอีกความชันหนึ่ง เปรียบเสมือนสัญญาณดิจิทัลที่เปลี่ยนแปลงจาก 0 ไปเป็น 1 Event จึงเกิดขึ้นด้วยสาเหตุดังกล่าว และ

Event ดังกล่าวก็จะดำเนินไปจนกระทั่งสัญญาณพุ่งขึ้นถึงจุดสูงสุดในคาบนั้นๆ จึงเกิดเป็น Major Event ในรายคาบของสัญญาณที่พิจารณา ซึ่ง Major Event ยังเป็น Sub Event ของ Major Event เมื่อพบว่า Major Event ดังกล่าวมีค่า Peak สูงที่สุดในสัญญาณที่นำมาพิจารณาทั้งหมด โดย Sub Event สามารถเกิดขึ้นก่อนเกิด Major Event หรือหลัง Major Event ได้เช่นกัน โดย แผนผังต้นไม้เหตุการณ์ในสัญญาณ Logistic Map สามารถแสดงดังรูปที่ 3.4



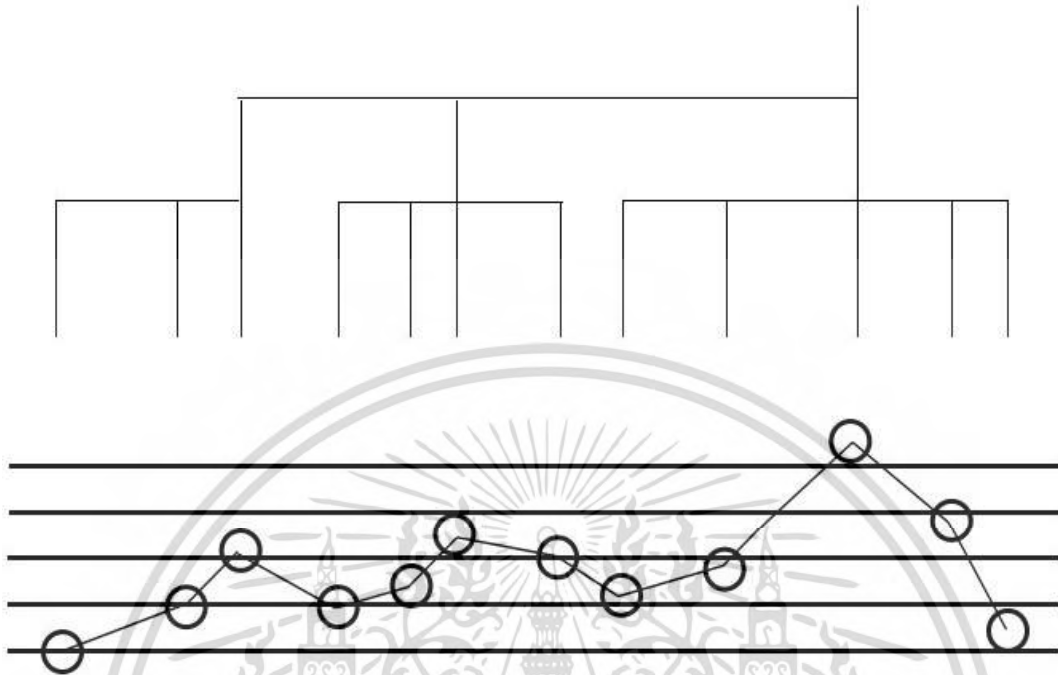
รูปที่ 3.3 การพิจารณาลำดับการเกิดเหตุการณ์ในสัญญาณและร่างเป็นแผนผังต้นไม้ Event



รูปที่ 3.4 แผนผังต้นไม้ Event ที่ได้จากสัญญาณแผนภูมิโลจิสติกในโดเมนความถี่

ในขั้นต่อไปเป็นการแปลง Event ที่เกิดขึ้นทั้งหมดเป็นโน้ตดนตรีโดยการนำบรรทัด 5 เส้น ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับการบันทึกโน้ตดนตรีมาทาบลงบนสัญญาณเพื่อกำหนดค่า Pitch ให้กับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นทั้งหมดในสัญญาณ Logistic Map กลับไปพิจารณารูปที่ 3.1 เมื่อทำการนำบรรทัด 5 เส้นมาทาบลงไปจะสามารถระบุค่า Pitch ของ Event ที่เกิดขึ้นในรูปที่ 3.5 และสามารถแปลงโน้ตออกดังรูปที่ 3.6

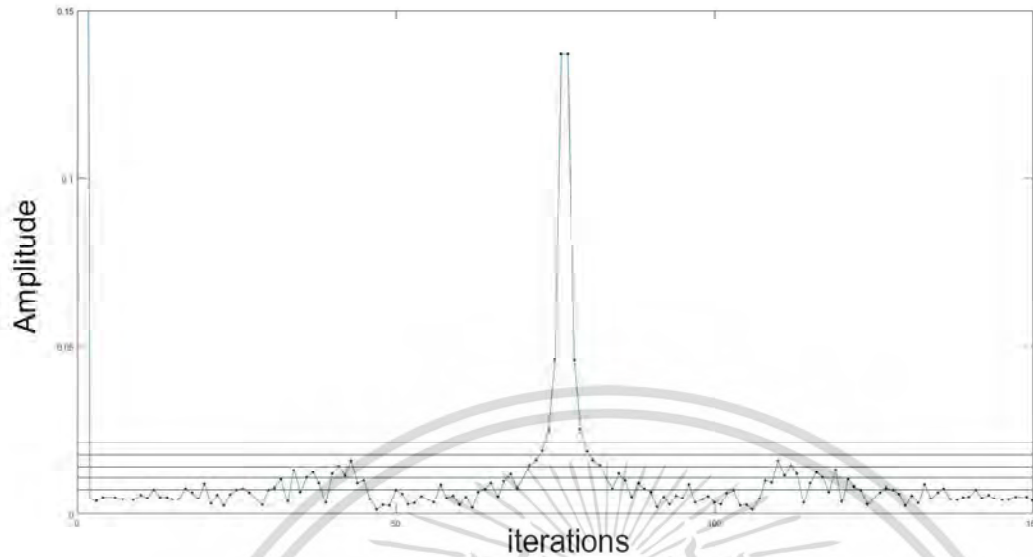
กลับมาพิจารณารูปที่ 3.4 โดยตั้งระยะห่างระหว่างแต่ละเส้นยาว 0.6 เซนติเมตร และตั้งค่าจุดวางเส้นบรรทัดล่างสุด ( $y_0$ ) อยู่ที่ 0.07 โดยเมื่อนำบรรทัด 5 เส้นมาทาบลงไปบนสัญญาณที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 3.7 และจะได้โน้ตที่มีค่า Pitch เฉพาะตัวที่กำเนิดมาจาก Event ในสัญญาณสำหรับในส่วนของค่าระยะเวลาของ Note แต่ละตัวนั้นได้ทำการวัดระยะโดยอ้างอิงจากแผนผังต้นไม้ Event โดยแสดงตัวอย่างอธิบายดังรูปที่ 3.8 จาก Event ที่ 1 กับ 2 มีระยะห่างกัน 4 เซนติเมตร ซึ่งเมื่อแปลงเป็นโน้ตแล้วจะได้โน้ตที่มีค่าเท่ากับ Quarter Note (ความยาว  $\frac{1}{4}$ ) และเมื่อถึง Event ที่ 2 และ 3 จะมีระยะห่างกัน 8 cm. ซึ่งเมื่อแปลงเป็นโน้ตแล้วจะได้โน้ตที่มีค่าเท่ากับ Half Note (ความยาว  $\frac{2}{4}$ ) และ Event ที่ 4 มีระยะห่างจาก Event ที่ 5 อยู่ 6 cm. ซึ่งจะได้ Quarter Note ที่มีเครื่องหมาย (.) อันเป็นสัญลักษณ์ของค่าระยะเวลาอีกครั้งหนึ่ง นั่นหมายถึงโน้ตดังกล่าวมีค่าของโน้ตอยู่ที่ 1 กับอีก  $\frac{1}{2}$  จาก 4



รูปที่ 3.5 โน้ตที่เกิดขึ้นจากการนำบรรทัด 5 เส้นมาทาบลงไปในสัญญาณเพื่อระบุค่า Pitch ของโน้ตที่กำเนิดจาก Event ในสัญญาณ

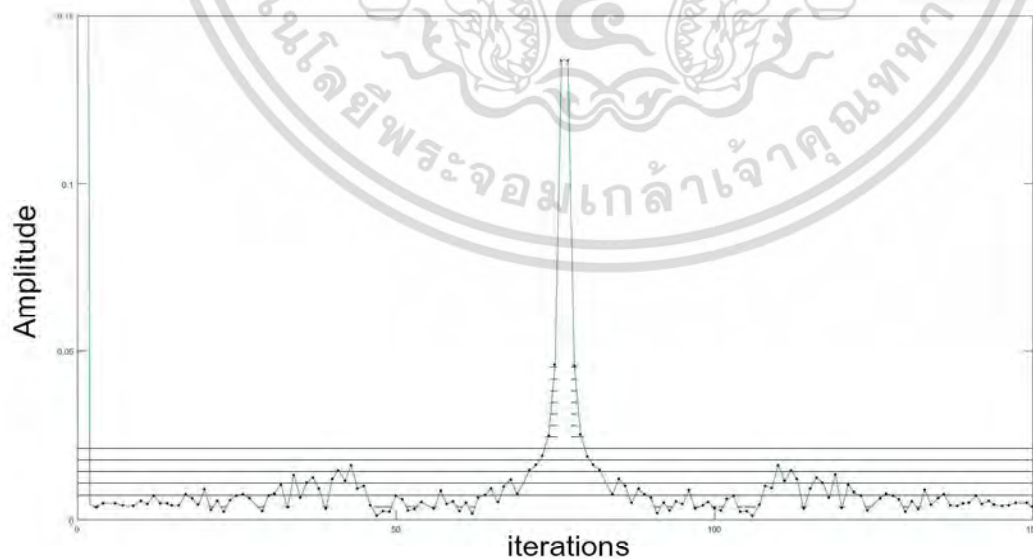


รูปที่ 3.6 ลำดับโน้ตที่กำเนิดจาก Event ที่เกิดขึ้นในรูปที่ 3.5 โดยในรูปนี้ยังไม่ยึดค่าความยาวของโน้ต



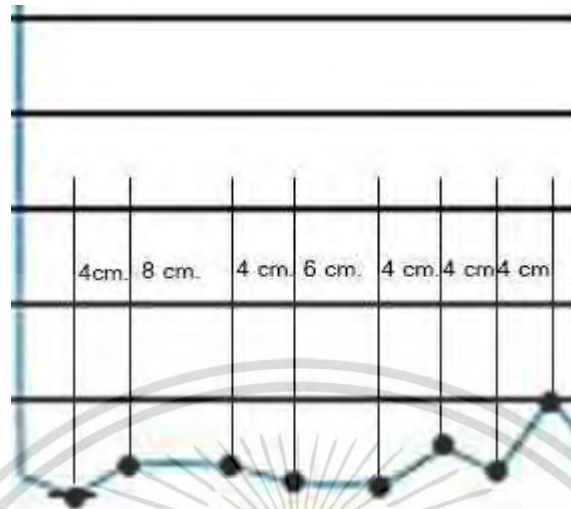
รูปที่ 3.7 นำบรรทัด 5 เส้นมาทาบ เพื่อเทียบหาค่า Pitch ของเหตุการณ์ทั้งหมดในสัญญาณ Logistic Map

เมื่อพิจารณารูปที่ 3.8 จะพบว่าเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น ณ จุดสูงสุดนั้น เมื่อนำมาเทียบกับบรรทัด 5 เส้นนั้น จะพบว่าเหตุการณ์ดังกล่าวอยู่ในโดเมนที่เกินจากโน้ต C8 ซึ่งเมื่อเทียบกับเปียโน เซตของโน้ตที่สามารถเล่นได้ นั้นอยู่ในโดเมน (A0 C8) ถึงแม้ว่าจะเป็น Major Event ของทั้งช่วงสัญญาณก็ตาม แต่ไม่สามารถรับรู้ได้ในความเป็นจริงจากขีดจำกัดหน่วยความจำทางเสียง ดังนั้น Major Event ดังกล่าวจึงไม่สามารถรับรู้ได้และไม่สามารถบรรจุน้ตลงในเพลงได้ โดยเมื่อทำการแปลงเหตุการณ์ทั้งหมดเป็นโน้ตแล้วจะได้ชุดโน้ตดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.8 Event ที่แปลงเป็นโน้ตในสัญญาณ Logistic Map

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 ระยะห่างระหว่าง Event ที่เกิดขึ้น เพื่อกำหนดค่าระยะเวลาของ Note ที่แปลงมาจาก Event ในสัญญาณ Logistic Map ในโดเมนความถี่



รูป 3.10 ชุดโน้ตที่แปลงมาจากรูปที่ 3.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Plot3.6 song

Piano

Logistic map  $R = 3.6$ ,  $X_0 = 0.1$

Wasin Wainiya

รูปที่ 3.11 ชุดโน้ตจากสัญญาณ Logistic Map

### 3.4 บทสรุป

ในส่วนของบทที่ 3 เป็นการทำการวิจัยเบื้องต้นในสัญญาณ Logistic Map เพื่อทำความเข้าใจการประยุกต์ใช้ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณ โดยเริ่มจากการนำสัญญาณมาเข้าในรูปของโดเมนความถี่ผ่านฟังก์ชัน Fast Fourier Transform จากนั้นจึงทำการตรวจสอบ Event ที่เกิดขึ้นทั้งหมดโดยอ้างอิงจากจุดที่ความชันของสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลง โดย Major Event เกิดขึ้น ณ จุดที่สัญญาณนั้นพุ่งขึ้นไปถึงจุดสูงสุดและทำการสร้างบรรทัด 5 เส้นขึ้นมาในสัญญาณเพื่อทำการสร้างชุดโน้ตเพราะมีค่า Pitch ของโน้ตตัวนั้นๆ โดยระยะห่างระหว่าง Event แต่ละ Event สามารถแทนค่าเวลาของโน้ตได้ โดยในบทถัดไปจะเป็นการทำการวิจัยกับสัญญาณตัวดึงดูดของ Chen

## บทที่ 4

# สัญญาณตัวดึงดูดแบบ Lorenz และ Chen

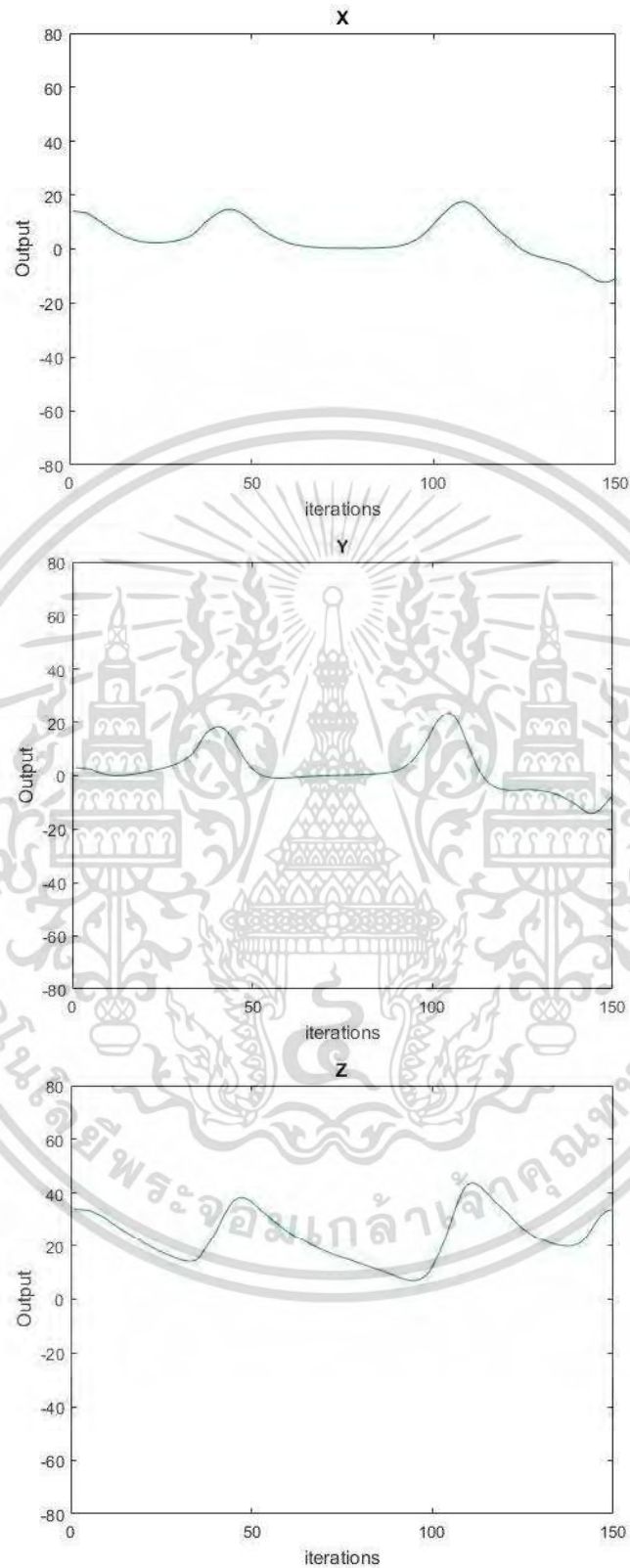
### 4.1 บทนำ

จากบทที่ 3 ที่ได้นำทฤษฎีที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ มาประยุกต์ใช้สัญญาณ Logistic Map ทำให้เห็นภาพรวมของกระบวนการเปลี่ยนแปลง Event ที่เกิดขึ้นในสัญญาณเป็นชุดโน้ตซึ่งสามารถเรียบเรียงเป็นเพลงที่ประพันธ์โดยสัญญาณเอง โดยในบทที่ 4 เป็นการนำกระบวนการที่ใช้ในการสร้างบทเพลงจากสัญญาณ Logistic Map นั้นมาใช้กับตัวดึงดูดแบบ Chen แต่เนื่องจากว่าสัญญาณตัวดึงดูดแบบ Chen เป็นสัญญาณที่เกิดจากการควบคุมแบบป้อนกลับสัญญาณตัวดึงดูดแบบ Lorenz ผู้วิจัยจึงเกิดความสนใจในการทำวิจัยกับสัญญาณตัวดึงดูดแบบ Lorenz ก่อน จากนั้นจึงวิจัยในสัญญาณตัวดึงดูดแบบ Chen ในขั้นต่อไป

### 4.2 สัญญาณตัวดึงดูดแบบ Lorenz และ Chen

หลังจากที่ทราบรายละเอียดเกี่ยวกับตัวดึงดูดแบบ Lorenz ในบทที่ 2 จะเห็นว่าสัญญาณเกิดขึ้น 3 เทอม ดังสมการ (2.2) กำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น  $x_0, y_0, z_0 = [14, 3, 34]$  และพารามิเตอร์  $a, b, c = [10, 8/3, 28]$  โดยเมื่อทำการขยายสัญญาณตัวดึงดูดแบบ Lorenz ในรูปที่ 2.12 2.13 และ 2.14 ตามลำดับ ในช่วง iterations ระหว่าง (0 150) และ Output ระหว่าง (-80 80) ซึ่งปรากฏสัญญาณในแต่ละเทอมดังรูปที่ 4.1 ในช่วงสัญญาณที่อยู่ในโดเมนเวลาในแต่ละเทอมไม่สามารถทำการแปลง Event เพื่อมาสร้างเป็นบทเพลงได้ เนื่องจากไม่มี Form ที่ปรากฏอย่างชัดเจน และระบุ Event ที่เกิดขึ้นในสัญญาณได้อย่างยากลำบาก อีกทั้งจุด Peak ของสัญญาณมีเพียงแค่ 2 จุดเท่านั้น อีก 1 ทางเลือกในการแก้ไขคือทำการแปลงสัญญาณให้อยู่ในโดเมนความถี่ด้วย Fast Fourier Transform เช่นเดียวกับสัญญาณ Logistic Map โดยขอบเขตที่ทำการสำรวจสัญญาณในโดเมนความถี่อยู่ในช่วง iterations ระหว่าง (0 150) และ Amplitude ระหว่าง (-80 80) ซึ่งลักษณะสัญญาณโดเมนความถี่ทั้ง 3 เทอมได้แก่ x y และ z ในช่วงดังกล่าวนี้ได้แสดงดังรูปที่ 4.1 จากนั้นจึงทำการร่างแผนผังเหตุการณ์เพื่อหา Event ที่เกิดขึ้นทั้งหมดในทั้ง 3 สัญญาณ ซึ่งแผนผัง Event ที่ได้จากสัญญาณในแต่ละเทอม (ทั้ง x y z) ได้แสดงดังรูปที่ 4.5 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ

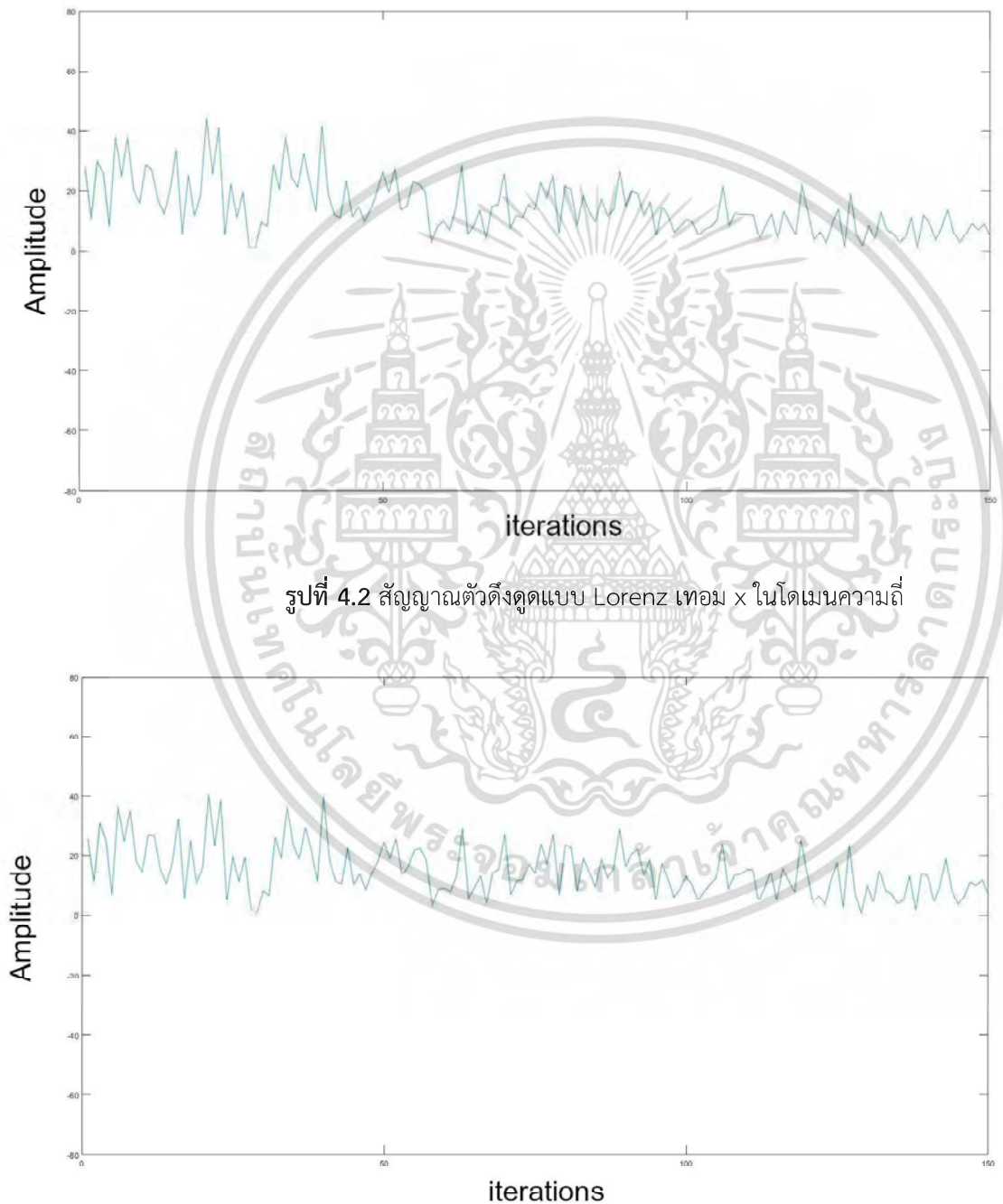
จากรูปที่ 4.2 4.3 และ 4.4 สิ่งที่สังเกตเห็นก็คือสัญญาณในแต่ละเทอมนั้นมีบางช่วงของ iterations ที่ความถี่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรง เมื่อวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองการส่อความ-คติฉับพลันนั้น แสดงให้เห็นว่าชุดโน้ตส่วนใหญ่ที่ได้นั้น มีสถานะเป็น Denied เสียส่วนใหญ่ทำให้สัญญาณในแต่ละเทอมนั้นไม่สามารถสร้างชุดโน้ตเฉพาะของตัวเองได้ จึงได้ทำการผนวกสัญญาณทั้ง 3 เทอมให้แสดงผลพร้อมกัน เพราะว่าสัญญาณทั้ง 3 เทอมนั้นกำเนิดขึ้นพร้อมๆกันในช่วงเวลาเดียวกัน ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ของการรวมสัญญาณทั้ง 3 เทอมนั้นแสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.1 สัญญาณตัวตั้งจุดแบบ Lorenz ในโดเมนเวลาในแต่ละเทอม เมื่อขยายไปที่ช่วง iterations ระหว่าง (0 150) และ Output ระหว่าง (-80 80)

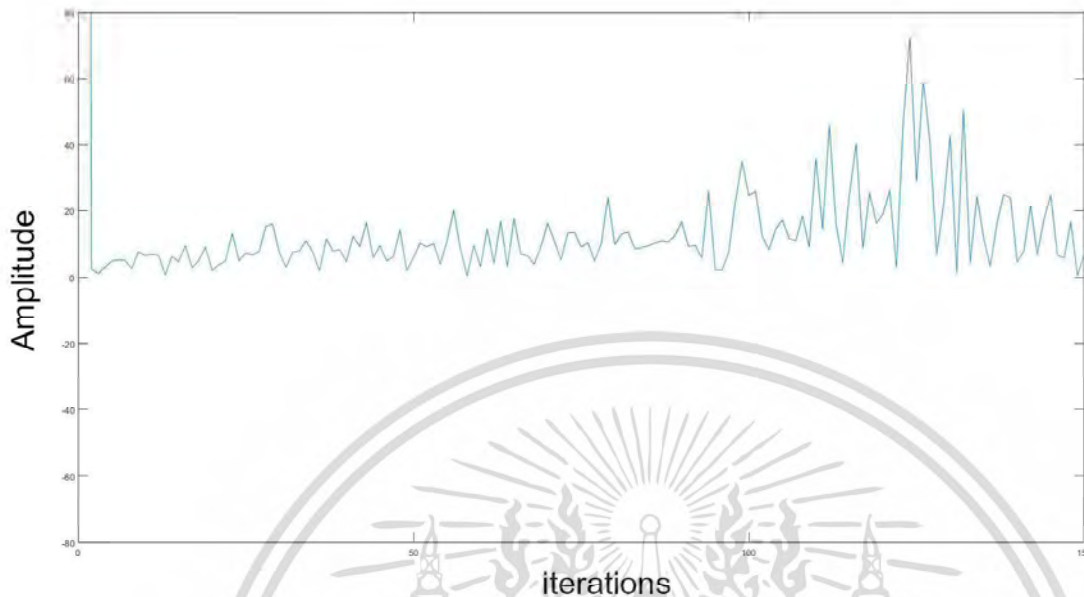
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขั้นตอนต่อไปเป็นการนำบรรทัด 5 เส้นมาวางในตัวสัญญาณในรูปที่ 4.7 ซึ่งบรรทัด 5 เส้นนี้ได้ตั้งให้แต่ละเส้นห่างกัน 0.6 cm โดยเส้นที่ต่ำที่สุดอยู่ที่  $y = 0.16$  โดยผลลัพธ์ได้แสดงดังรูปที่ 4.9 และเมื่อทำการระบุตำแหน่งของ Event ที่เกิดขึ้นทั้งหมดในรูปที่ 4.9 จะได้ Event ทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 4.10 และเมื่อทำการแปลง Event ทั้งหมดเป็นชุดไบนารี จะได้ชุดไบนารีดังรูปที่ 4.11



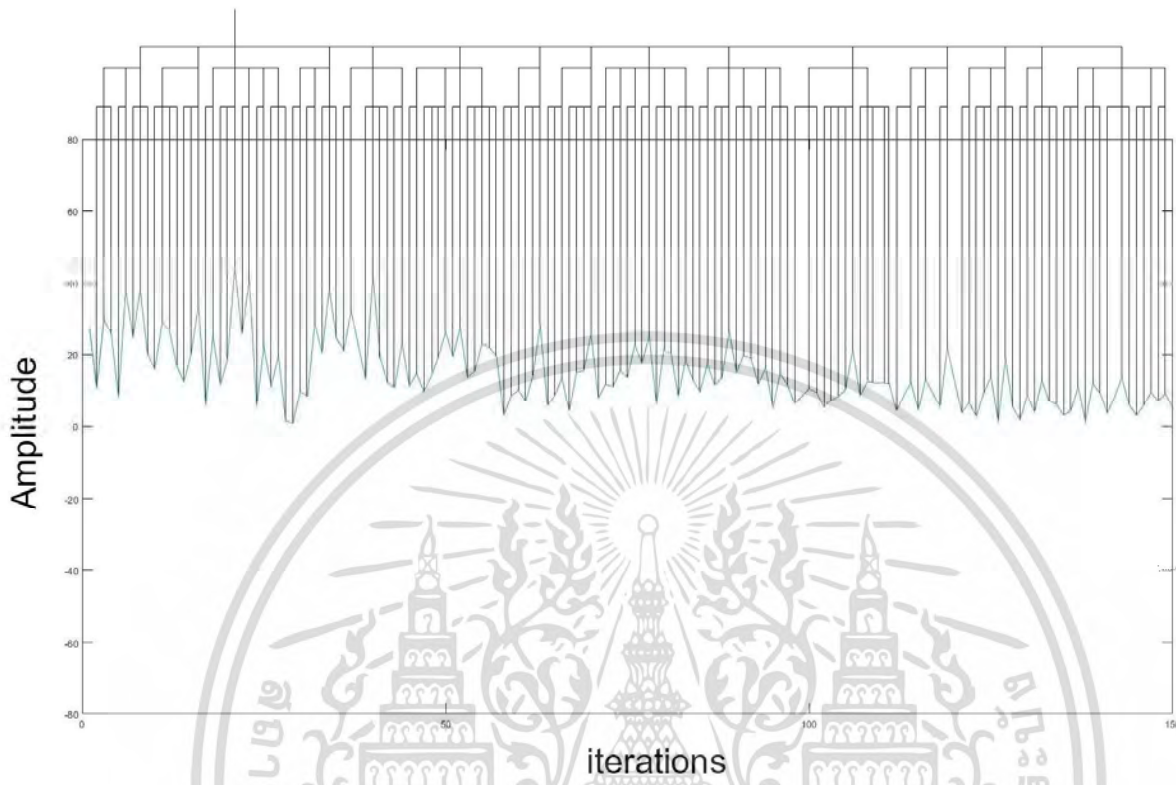
รูปที่ 4.3 สัญญาณตัวตั้งจุดแบบ Lorenz เทอม y ในโดเมนความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



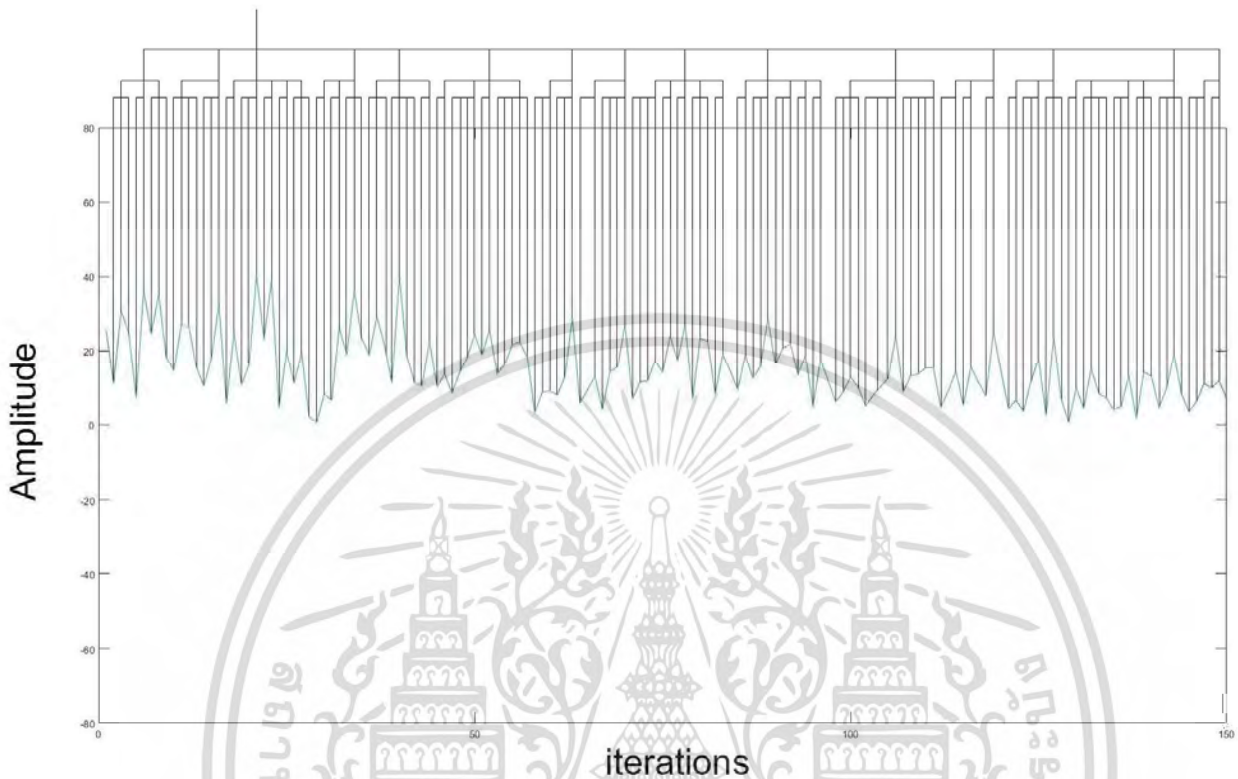
รูปที่ 4.4 สัญญาณตัวดึงดูดแบบ Lorenz เทอม  $z$  ในโดเมนความถี่

จากรูปที่ 4.2 4.3 และ 4.4 ลักษณะเด่นที่แตกต่างอย่างเห็นได้ชัดจากสัญญาณ Logistic Map คือการเคลื่อนไหวของสัญญาณนั้นไม่มีรูปแบบที่ตายตัว โดยสัญญาณ Logistic Map เมื่อผ่าน Major Event ของทั้งช่วงสัญญาณ สัญญาณจะมีทิศทางในการเคลื่อนไหวที่สามารถคาดเดาได้ ซึ่งผลลัพธ์ที่สังเกตได้คือสัญญาณการเคลื่อนไหวของสัญญาณนั้นมีลักษณะย้อนกลับไปยังจุดเริ่มต้น โดยที่การเคลื่อนไหวของสัญญาณนั้นกลับด้านกับการเคลื่อนไหวที่เกิดขึ้นก่อนเกิด Major Event ของทั้งช่วงสัญญาณ นอกจากนี้ ด้วยการใช้ตัวคูณสัญญาณพร้อมกัน 3 เทอมในช่วงเวลาเดียวกัน จึงทำให้ในบางช่วงของ iterations จะเกิด Event พร้อมกันในช่วงเวลาเดียวกัน ทำให้สามารถสร้างโน้ตได้มากกว่า 1 โน้ตในช่วงเวลาเดียวกัน แต่อุปสรรคที่เกิดขึ้นคือระยะห่างของ tone เสียงในแต่ละโน้ตที่เกิดขึ้นพร้อมกันในช่วง iterations เดียวกันนั้นมีช่วงที่ห่างกันเกิน 8 semitones ซึ่งเป็นระยะห่างมากที่สุดที่นักเปียโนทุกระดับสามารถเล่นได้บนเปียโน (นักเปียโนที่มีทักษะสูงและได้รับการฝึกฝนจนชำนาญสามารถเล่นคู่โน้ตมีระยะห่างมากที่สุดที่ 9 semitones) ดังนั้นจึงต้องเกิดกระบวนการคัดเลือกโน้ตออกไป ซึ่งวิธีการที่จะนำมาใช้ในการคัดเลือกโน้ตดังกล่าวคือแบบจำลองการสื่อความ-คติฉบับพลัน โดยใช้วิเคราะห์ทั้งช่วงประโยคโดยอิงจากหลัก 5 ประการได้แก่ Registral Direction Intervallic Difference Registral Return Proximity และ Closure



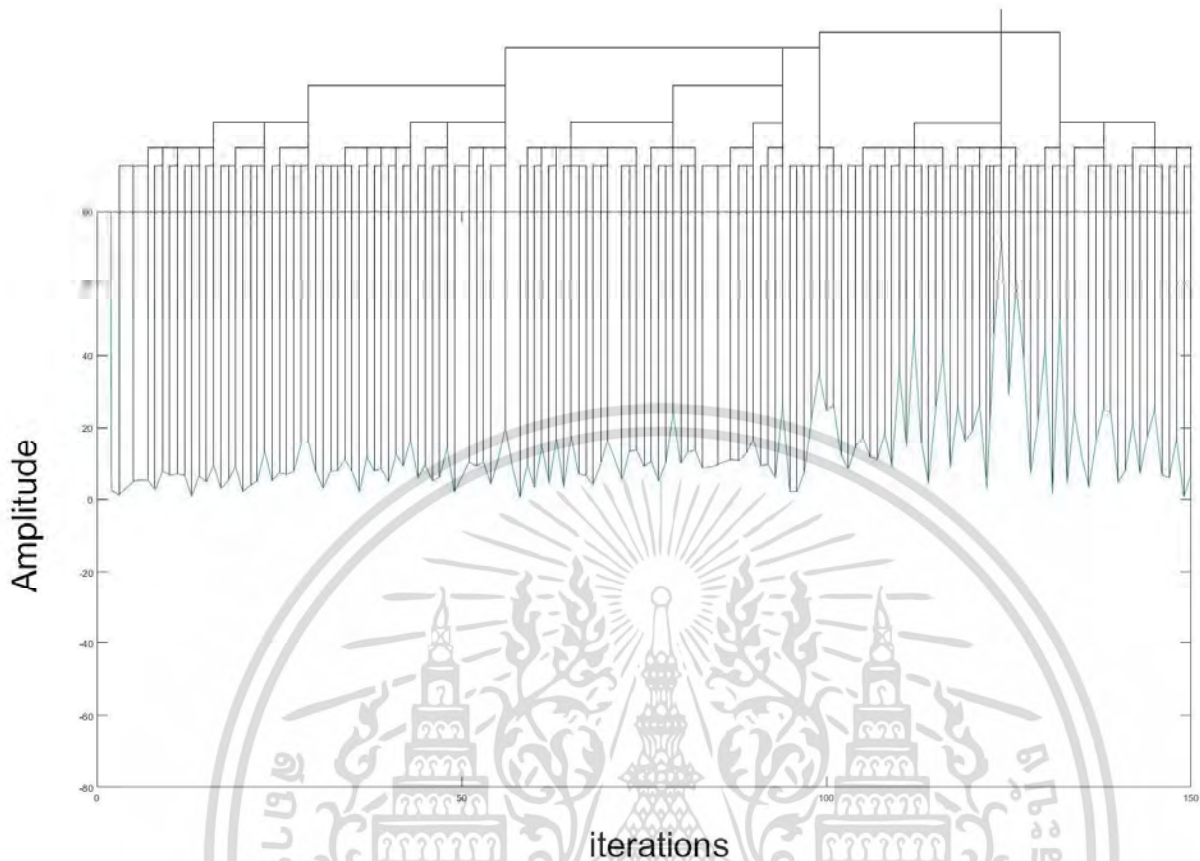
รูปที่ 4.5 แผนผังต้นไม้ Event ในสัญญาณตัวตั้งคูดแบบ Lorenz เทอม x

จากรูปที่ 4.5 ลักษณะของสัญญาณตัวตั้งคูดแบบ Lorenz เทอม x ในโดเมนความถี่จะมีค่าแอมพลิจูดที่สูงในช่วงค่า iterations ที่ (0 50) ซึ่งค่าแอมพลิจูดสูงสุดที่เกิดขึ้นในช่วงสัญญาณอยู่ในช่วง iterations ช่วงนี้เช่นกัน โดยเมื่อผ่านช่วง iterations = (0 50) จุดสูงสุดในช่วงสัญญาณต่าง ๆ นั้นได้ลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเมื่อจัดทำแผนผังต้นไม้ Event ในสัญญาณดังกล่าว จะได้ Major Event ที่มี Importance Factor ระดับ 2 โดยที่ผ่าน Major Event ที่มี Importance Factor ระดับ 1 เกิดขึ้น 1 Event โดยมี Major Event ที่มี Importance Factor ระดับสูงสุดอยู่ที่ระดับ 3 โดยในสัญญาณนี้ Major Event ที่มี Importance Factor ระดับ 3 ได้เกิดขึ้นหลังจากที่ Major Event ที่มี Importance Factor ระดับ 2 ไป 2 Events เมื่อทำการสังเกตทั้งช่วงสัญญาณจะพบว่ามี Event เกิดขึ้นทั้งหมด 142 Events โดยมี Major Event ที่มี Importance Factor ระดับ 1 เกิดขึ้นทั้งหมด 34 Events มี Major Event ที่มีค่า Importance Factor ระดับ 2 เกิดขึ้นทั้งหมด 16 Events และ Major Event ที่มีค่า Importance Factor ระดับ 3 เกิดขึ้น 1 Event



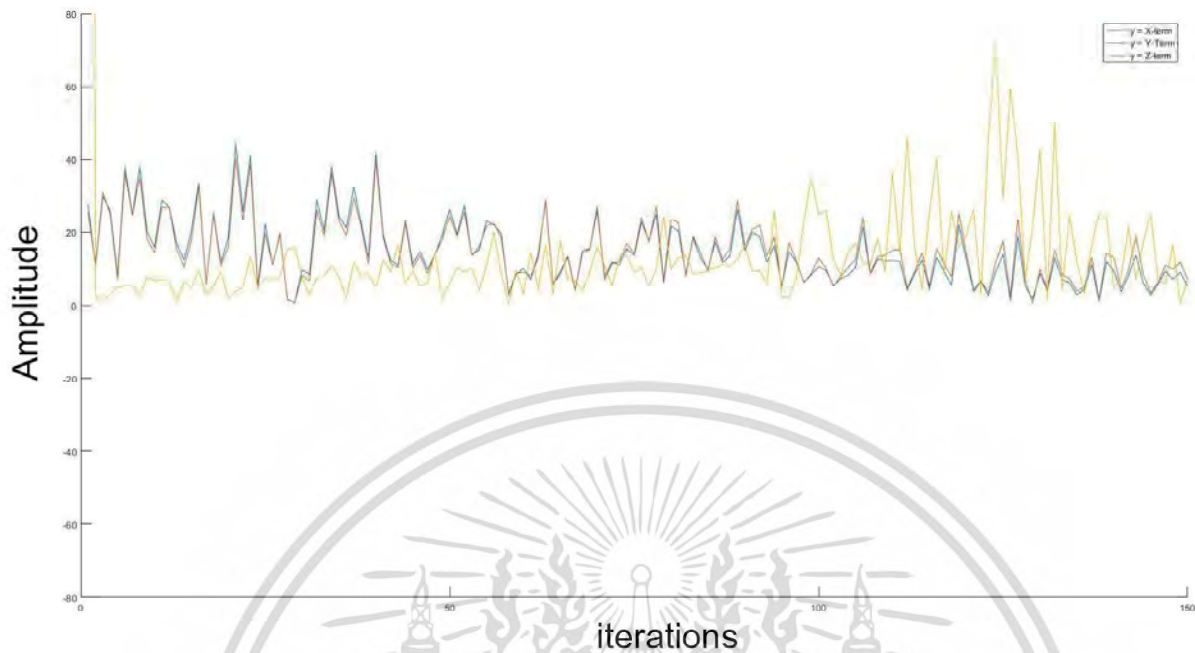
รูปที่ 4.6 แผนผังต้นไม้ Event ในสัญญาณตัวตั้งคูดแบบ Lorenz เทอม  $y$

จากรูปที่ 4.6 ลักษณะของสัญญาณที่เกิดในสัญญาณตัวตั้งคูดแบบ Lorenz เทอม  $y$  ในโดเมนความถี่มีลักษณะของสัญญาณที่คล้ายคลึงกับสัญญาณในเทอม  $x$  เพียงแต่มีความแตกต่างกันในเรื่องของค่าแอมพลิจูดเพียงเล็กน้อยในบางจุด แต่ความแตกต่างเล็กน้อยที่ว่ามันสามารถส่งผลถึงระดับ Importance Factor ที่เกิดขึ้นในสัญญาณด้วย โดยเมื่อจัดทำแผนผังต้นไม้ Event ของสัญญาณจะพบว่าระดับ Importance Factor สูงสุดยังเป็นระดับ 3 โดยมี Event เกิดขึ้นในสัญญาณทั้งหมด 142 Events โดย Major Event ที่มี Importance Factor ระดับ 1 เกิดขึ้นทั้งหมด 34 Events ส่วน Major Event ที่มี Importance Factor ระดับ 2 เกิดขึ้นทั้งหมด 15 Events และ Major Event ที่มี Importance Factor ระดับ 3 เกิดขึ้น 1 Event ซึ่งก่อนการเกิด Major Event ระดับ 3 นั้นมีการเกิด Event เกิดขึ้น 13 Events Major Event ระดับ 1 4 Events และ Major Event ระดับ 2 2 Events โดย Major Event ระดับ 3 นั้นเกิดขึ้นที่ iterations ช่วง (0 50)



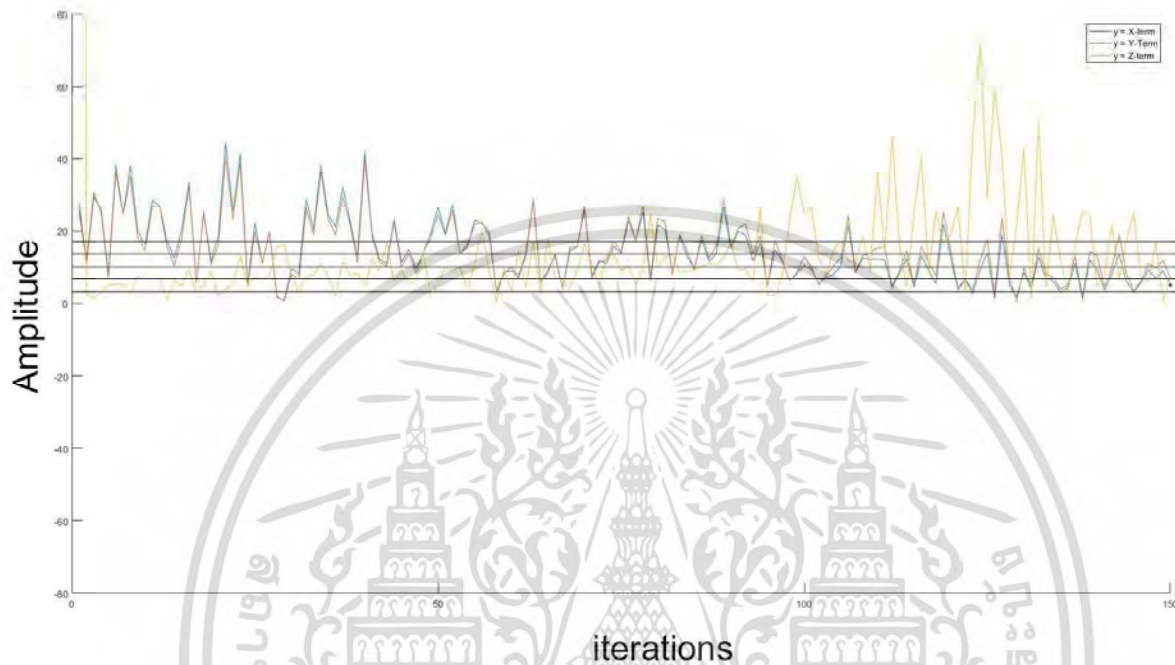
รูปที่ 4.7 แผนผังต้นไม้ Event ในสัญญาณตัวดึงดูดแบบ Lorenz เทอม z

จากรูปที่ 4.7 ในส่วนของสัญญาณตัวดึงดูดแบบ Lorenz ในโดเมนความถี่เทอม z มีความแตกต่างจากสัญญาณทั้ง 2 เทอมที่ผ่านมาอย่างชัดเจน โดยแอมพลิจูดของสัญญาณนั้นมีลักษณะที่ค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อการทำ iterations ยังดำเนินไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเมื่อ iterations ถึงที่ช่วง (100 150) นั้น แอมพลิจูดของสัญญาณมีการแปรผันอย่างรุนแรงในแต่ละ Event ที่เกิดขึ้น จึงทำให้เกิด Event ที่มีค่า Importance Factor สูงกว่าระดับ 3 ซึ่งเป็นค่าสูงสุดของสัญญาณเทอม x y ในโดเมนความถี่ โดยเมื่อทำการร่างแผนผังต้นไม้ Event ลงในสัญญาณจะได้ Major Event ที่มีค่า Importance Factor สูงสุดที่ระดับ 6 ซึ่งมี Event เกิดขึ้นในช่วงสัญญาณนี้ทั้งหมด 140 Events โดยมี Major Event ที่มี Importance Factor ระดับ 1 ทั้งหมด 35 Events ระดับ 2 ทั้งหมด 9 Events ระดับ 3 ทั้งหมด 2 Events ระดับ 4 ทั้งหมด 2 Events ระดับ 5 ทั้งหมด 2 Events และระดับ 6 เกิดขึ้น 1 Event ซึ่งก่อนที่จะถึง Major Event ที่มี Importance Factor ระดับ 6 นั้นได้เกิด Event ปกติ 73 Events Major Event ที่มี Importance Factor ระดับ 1 29 Events ระดับ 2 7 Events ระดับ 3 2 Events ระดับ 4 2 Events และระดับ 5 1 Event



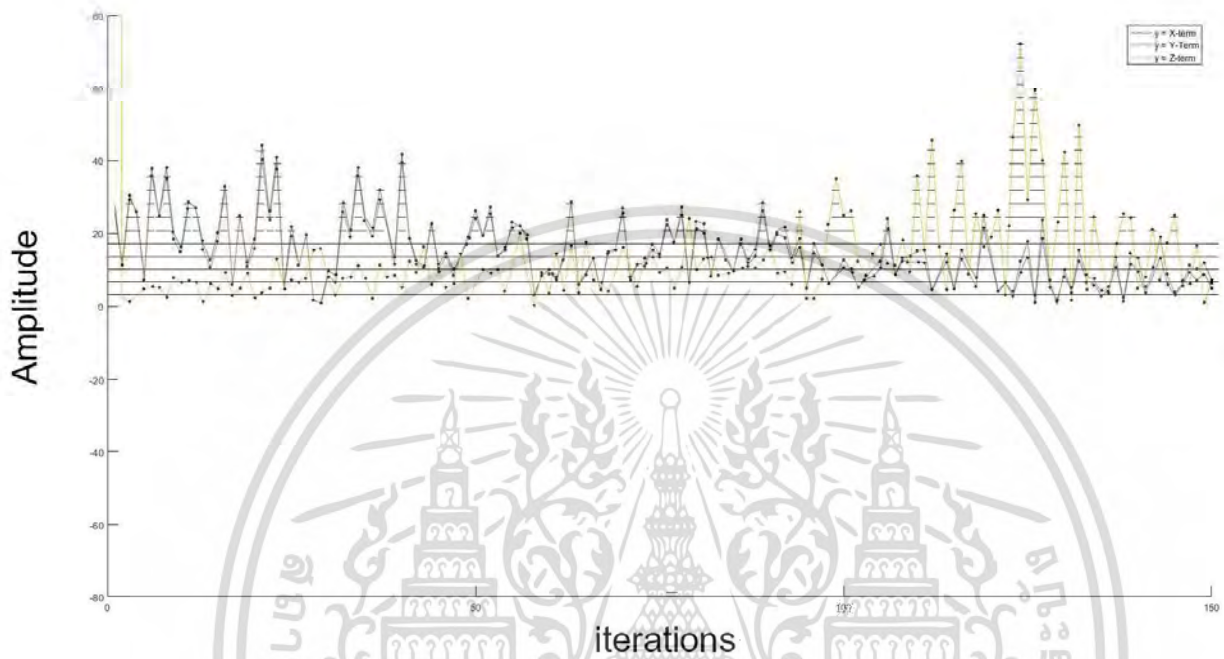
รูปที่ 4.8 สัญญาณตัวดึงดูดแบบ Lorenz ทั้ง 3 เทอมแสดงผลพร้อมกัน โดย

- เส้นสีน้ำเงินแทนสัญญาณในเทอม x
- เส้นสีแดงแทนสัญญาณในเทอม y
- เส้นสีเขียวแทนสัญญาณในเทอม z



รูปที่ 4.9 สัญญาณตัวดึงดูดแบบ Lorenz เมื่อทำนนำบรรทัด 5 เส้นทาบบลงไป

จากรูปที่ 4.8 เมื่อทำการนำบรรทัด 5 เส้นมาทาบบลงบนสัญญาณโดยเส้นล่างสุดวางอยู่ที่แอมพลิจูด = 0.16 และเส้นแต่ละเส้นห่างกัน 0.6 cm ดังรูปที่ 4.9 จะเห็นว่า Event ที่เกิดขึ้นในสัญญาณมีจำนวนไม่น้อยที่อยู่พ้นจากบรรทัดบนสุด แต่ไม่มีปัญหาใดๆ เพราะ Event เหล่านั้นยังสามารถนำมาใช้ได้โดยการอาศัยระยะห่างระหว่างเส้นที่ 0.6 cm เพื่อทำการเพิ่มเส้น ณ แอมพลิจูดเคลื่อนที่ไปจนกระทั่งไปจนถึงจุดที่เกิด Event ขึ้น โดยค่าของโน้ตที่มาจาก การแปลง Event ในรูปที่ 4.10 จะแสดงดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.10 Event ที่เกิดขึ้นทั้งหมดในสัญญาณตัวตั้งตูดแบบ Lorenz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Lorenz Song

Lorenz Attractor  
Wasin Wainiya

รูปที่ 4.11 ชุดโน้ตที่มาจากแปลง Event ทั้งหมดในสัญญาณตัวดึงดูดแบบ Lorenz มาเป็นโน้ต

จากรูปที่ 4.12 ซึ่งเป็นการขยายรูปของห้องที่ 1 จากรูปที่ 4.11 จะพบว่าโน้ตตัวที่ 2 ในห้องที่ 1 นั้นเป็นโน้ตคู่ประกอบด้วย D4 และ F6 ซึ่งมีระยะห่าง 16 semitones ซึ่งห่างเกิน 8 semitones จึงเกิดการเลือกใช้โน้ตตัวใดตัวหนึ่งระหว่าง D4 กับ F6 โดยในห้องแรกนี้จะนำหลัก Registral Direction ในแบบจำลองการสื่อความ-คติฉับพลันมาพิจารณา และพบว่าทิศทางของโน้ตที่ไปสูงเมื่อพิจารณาจากจุดตั้งต้น คือ C5 จะพบว่าโน้ตลัทธิระหว่าง C5 กับ F6 ได้โน้ตลัทธิออกมาเป็น D5 ซึ่งตรงตามหลัก Registral Direction เพราะ C5 กับ F6 เป็นชั้นคู่ขนาดใหญ่ที่ห่างกันเกิน 7 semitones ดังนั้นผลลัพธ์ในหลัก Registral Direction จึงควรมีทิศทางที่วกกลับ อีกทั้งยังทำให้ ลำดับ ของ Event นี้ในสัญญาณตัวดึงดูดของ Lorenz เทอม  $x$  กับ  $y$  มีสถานะ ต่อเติมให้สมบูรณ์ เช่นกัน ดังนั้นโน้ตที่เลือกใช้คือ F6

เมื่อมาดูห้องที่ 2 ดังรูปที่ 4.13 จะพบชุดโน้ต 3 ชุดเกิดขึ้นพร้อมกันได้แก่ชุดโน้ต [F4 C7] [F4 D6] และ [E4 A6 C7] การพิจารณาทั้งห้องนี้เริ่มพิจารณาจากคู่โน้ตตั้งต้นคือ [E4 A4] ในห้องที่ 1 และ คู่โน้ตที่ปิดลำดับคือ [A4 G5] เมื่อพิจารณาชุดลำดับโน้ตในวงกลมที่ 1. ชุดโน้ตดังกล่าวมีสถานะ ต่อเติมให้สมบูรณ์ ในหลัก Registral Direction (โน้ตที่ 3 มีทิศทางสวนกลับเมื่อเป็นชั้นคู่ขนาดใหญ่) Intervallic Difference (ชั้นคู่ขนาดใหญ่ให้โน้ตลัทธิเป็นชั้นคู่ขนาดเล็กกว่า) Registral Return (โน้ตตัวที่ 4 ซึ่งเป็นโน้ตลัทธิจากโน้ตตัวที่ 2 กับ 3 Return กลับมาเป็นโน้ตใกล้เคียงกับโน้ตตัวที่ 2) และหลัก Closure (โน้ตปิดมีชั้นคู่ขนาดเล็กกว่าชุดโน้ตตั้งต้น) ในขณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Fulfiled



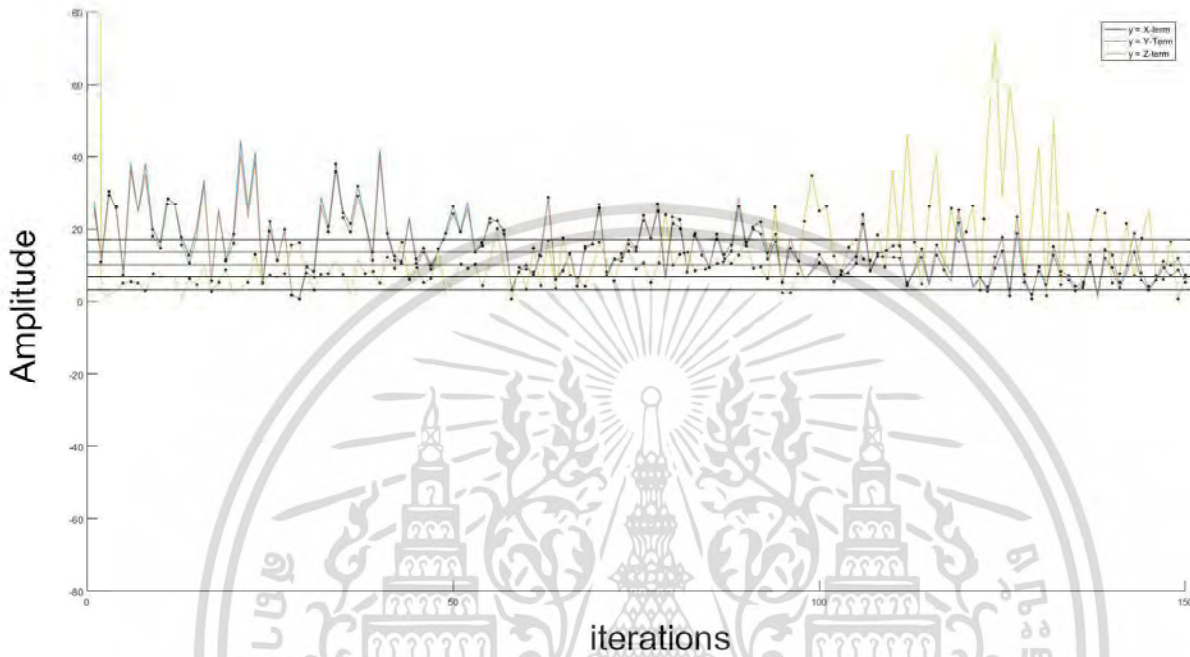
รูปที่ 4.12 การเลือกโน้ต F6 และตัดโน้ต D4 ออกไปเพื่อให้ชุดลำดับโน้ตในห้องที่ 1 มีสถานะต่อเติมให้สมบูรณ์

เดียวกันชุดลำดับโน้ตในวงกลมที่ 2. ก็มีสถานะ ต่อเติมให้สมบูรณ์ ในทั้ง 4 หลักเช่นกัน แต่ชุดลำดับโน้ตในวงกลมที่ 2 เป็นขั้นคู่ที่มีขนาดเล็กกว่าชุดลำดับโน้ตในวงกลมที่ 1 จึงมีสถานะต่อเติมให้สมบูรณ์ในหลัก Proximity ด้วย ดังนั้น จึงเลือกใช้ชุดลำดับโน้ตที่ 2 เพราะมีสถานะต่อเติมให้สมบูรณ์ครบทุกประการ

เมื่อทำการพิจารณาชุดลำดับโน้ตทั้งหมดตามแบบจำลองการสื่อความ-คติฉับพลัน จะได้ Event ที่ผ่านการพิจารณาตามแบบจำลองการสื่อความ-คติฉับพลันดังรูปที่ 4.14 และสามารถแปลงเป็นชุดโน้ตดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.13 ตัวอย่างชุดโน้ตในห้องที่ 2 จากรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.14 Event ที่เลือกมาเป็นโน้ตหลังจากพิจารณาด้วยแบบจำลองการสื่อความ-คติฉับพลัน

จากรูปที่ 4.14 แสดงจุดที่ใช้อ้างอิงถึง Event ที่นำมาใช้เป็นโน้ตในบทเพลง โดยอาศัยการพิจารณาจากแบบจำลองการสื่อความ-คติฉับพลัน ซึ่งเห็นได้ว่าในช่วง iterations = [100 150] นั้น สัญญาณตัวดึงดูดแบบ Lorenz เทอม z ในโดเมนความถี่มี Event เกิดขึ้นทั้งหมด 50 Event ซึ่งเมื่อนำมาพิจารณาร่วมกับสัญญาณเทอม x และ y ผ่านแบบจำลองการสื่อความ-คติฉับพลัน จะพบว่ามี Event ที่สามารถนำมาใช้ได้ทั้งหมด 36 Event โดยที่จุดพีคสุดของสัญญาณนั้นเมื่อทำการแปลค่าโน้ตแล้วจะได้ค่าโน้ตเป็น A9 ซึ่งอยู่พ้นจากขอบเขตของเซตโน้ตที่เปียโนสามารถเล่นได้ (เปียโนสามารถเล่นเซตโน้ตได้ตั้งแต่ [A0 C8] ทำให้จุดสูงสุดของสัญญาณในเทอม Z ไม่สามารถนำมาบรรจุเป็นโน้ตในเพลงได้ ซึ่งรวมถึง Event อื่นที่แปลงเป็นโน้ตแล้วได้โน้ตที่มีค่าเกิน C8 อื่นๆด้วย

## Lorenz Song

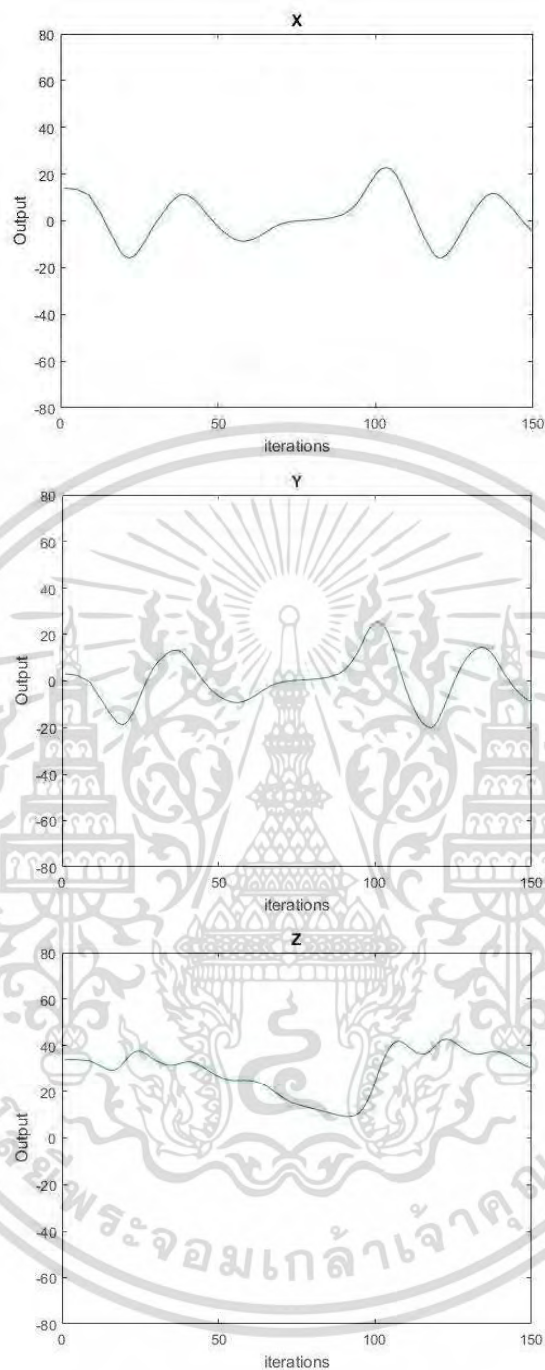
Lorenz Attractor  
Wasin Wainiya



รูปที่ 4.15 เพลงที่กำเนิดจากสัญญาณตัวดึงดูดของ Lorenz เมื่อผ่านการใช้แบบจำลองการสื่อความ-คติฉบับพลันประกอบการพิจารณาเลือกโน้ตที่เหมาะสม

เช่นเดียวกับสัญญาณตัวดึงดูดของ Lorenz สัญญาณตัวดึงดูดของ Chen ซึ่งนิยามดังสมการ (2.3) กำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น  $x_0 \ y_0 \ z_0 = [14, 3, 34]$  และพารามิเตอร์  $a \ b \ c = [35, 8/3, 28]$  โดยเมื่อนำสัญญาณจากรูปที่ 2.16 2.17 2.18 ตามลำดับ มาขยายดูที่ Time ระหว่าง (0 150) และ Output ระหว่าง (-80 80) จะแสดงผลดังรูปที่ 4.16 จะเห็นว่าสัญญาณทั้ง 3 เทอมนั้นมีลักษณะที่ยังไม่สามารถมาแปลงเป็นเพลงได้โดยมีสาเหตุที่เหมือนกันกับสัญญาณตัวดึงดูดแบบ Lorenz คือจำนวน peak ที่เกิดขึ้นในสัญญาณยังไม่เพียงพอที่จะสามารถเรียบเรียงเป็นเพลงจากสัญญาณได้และการเคลื่อนที่ของสัญญาณเป็นเส้นโค้งทำให้ไม่สามารถหาจุดกำหนด Event ได้ชัดเจน วิธีการแก้ไขก็นำสัญญาณในโดเมนเวลามาแปลงให้อยู่ในโดเมนความถี่ด้วยฟังก์ชัน Fast Fourier Transform จากสมการ (3.1) ทำให้ได้สัญญาณตัวดึงดูดของ Chen เทอม x, y และ z ในโดเมนความถี่ดังรูปที่ 4.17 4.18 และ 4.19 ตามลำดับ จากนั้นจึงทำการสร้างแผนผังต้นไม้ Event ขึ้นในสัญญาณแต่ละเทอมดังรูปที่ 4.20 4.21 และ 4.22 ตามลำดับ เพื่อนำมาพิจารณาผลการวิจัยหลังจากสร้างเพลงที่ประพันธ์โดยสัญญาณตัวดึงดูดของ Chen ซึ่งผ่านแบบจำลองการสื่อความ-คติฉบับพลัน

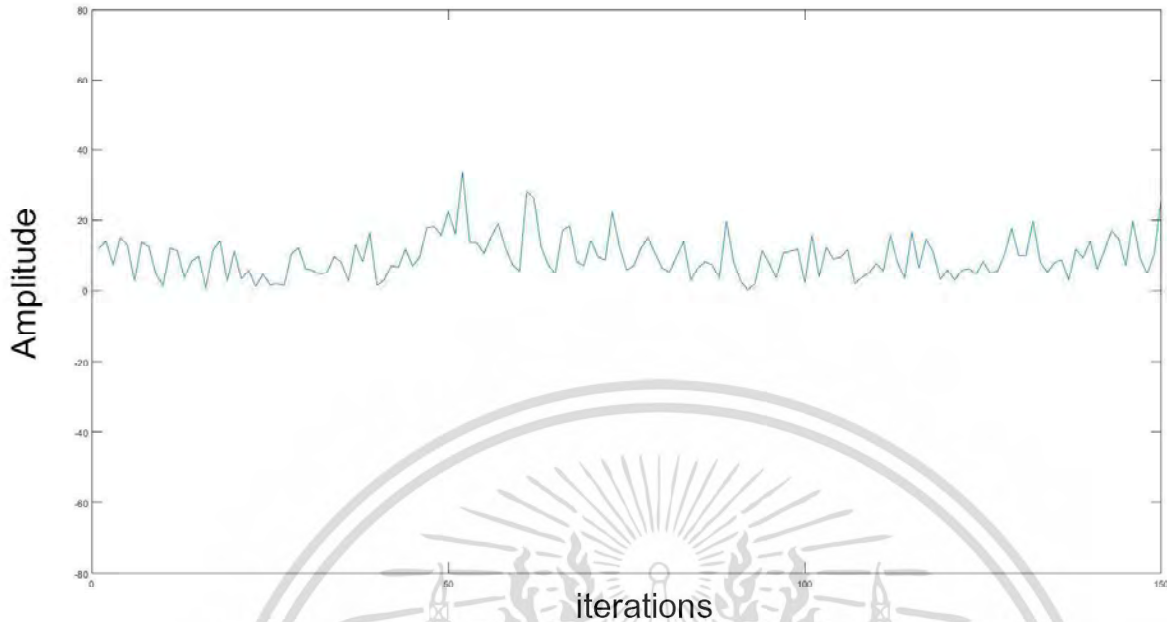
จากนั้นจึงทำการรวมสัญญาณทั้ง 3 เทอมเพื่อเตรียมการสร้างเพลงจากสัญญาณ และตีบรรทัด 5 เส้น โดยแต่ละบรรทัดห่างกัน 0.6 cm. และเริ่มเส้นล่างสุดที่  $y = 0.16$  เพื่อหาค่า Pitch ของ Event ทั้งหมดในสัญญาณเพื่อแปลงเป็นโน้ต โดย Event ทั้งหมดที่เกิดขึ้นพร้อมทั้ง ค่า Pitch ของ Event ที่จะแปลงเป็นโน้ตได้แสดงดังรูปที่ 4.23 ซึ่งเมื่อนำมาแปลงเป็นชุดโน้ตแล้วพบว่ายังมีโน้ตบางชุดที่ขึ้นคู่มีระยะห่างกันเกิน 8 -



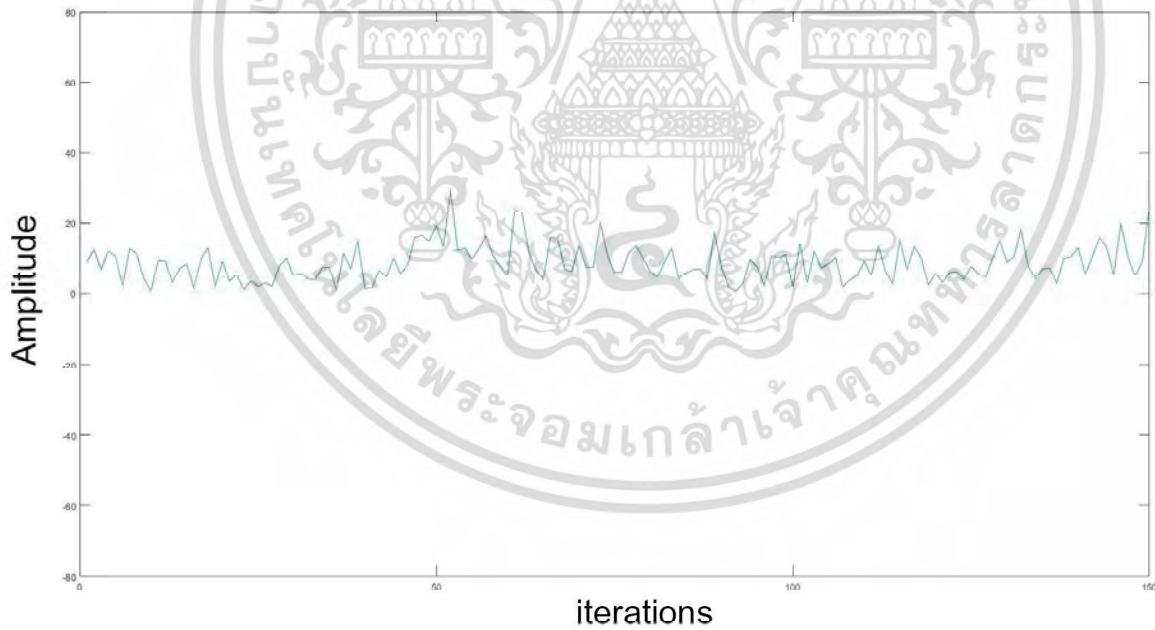
รูปที่ 4.16 สัญญาณตัวตั้งชุดแบบ Chen เเทมต่างๆในโดเมนเวลา เมื่อขยายไปที่ iterations ระหว่าง (0 150) และ Output ระหว่าง (-80 80)

semitones ซึ่งทำการเลือกโน้ตที่เหมาะสมโดยการใช้แบบจำลองการสื่อความ-คติฉบับปล้นมาพิจารณา โดยเมื่อผ่านการใช้แบบจำลองแล้ว จะได้บทเพลงจากสัญญาณตัวตั้งชุดของ Chen ดังรูปที่ 4.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

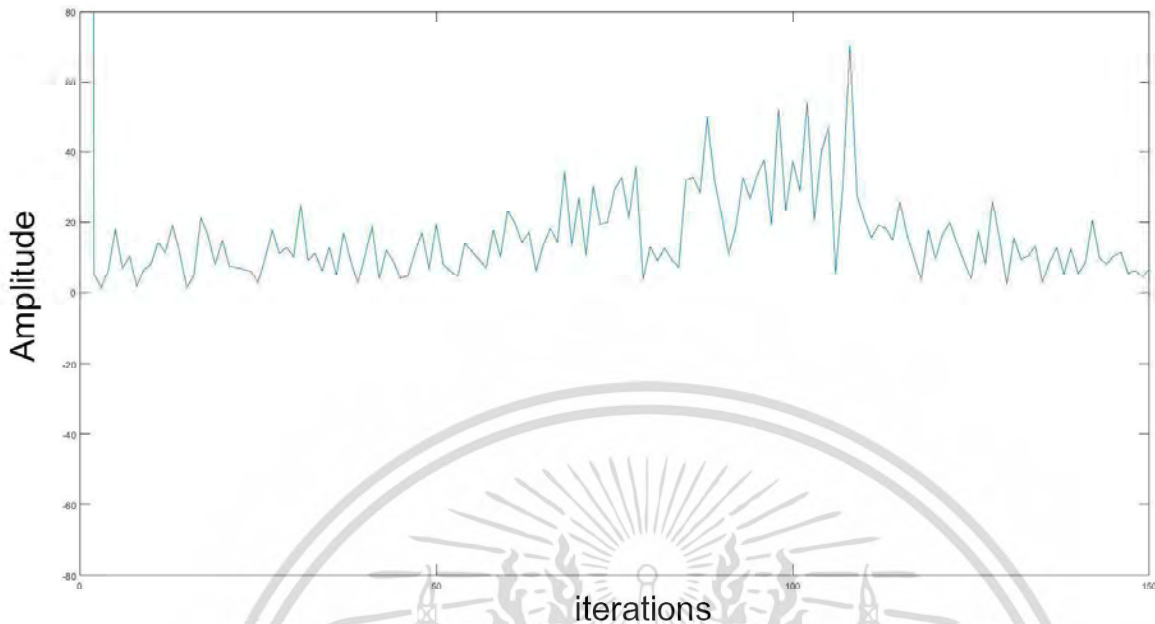


รูปที่ 4.17 สัญญาณตัวตั้งดูดแบบ Chen เทอม  $x$  ในโดเมนความถี่



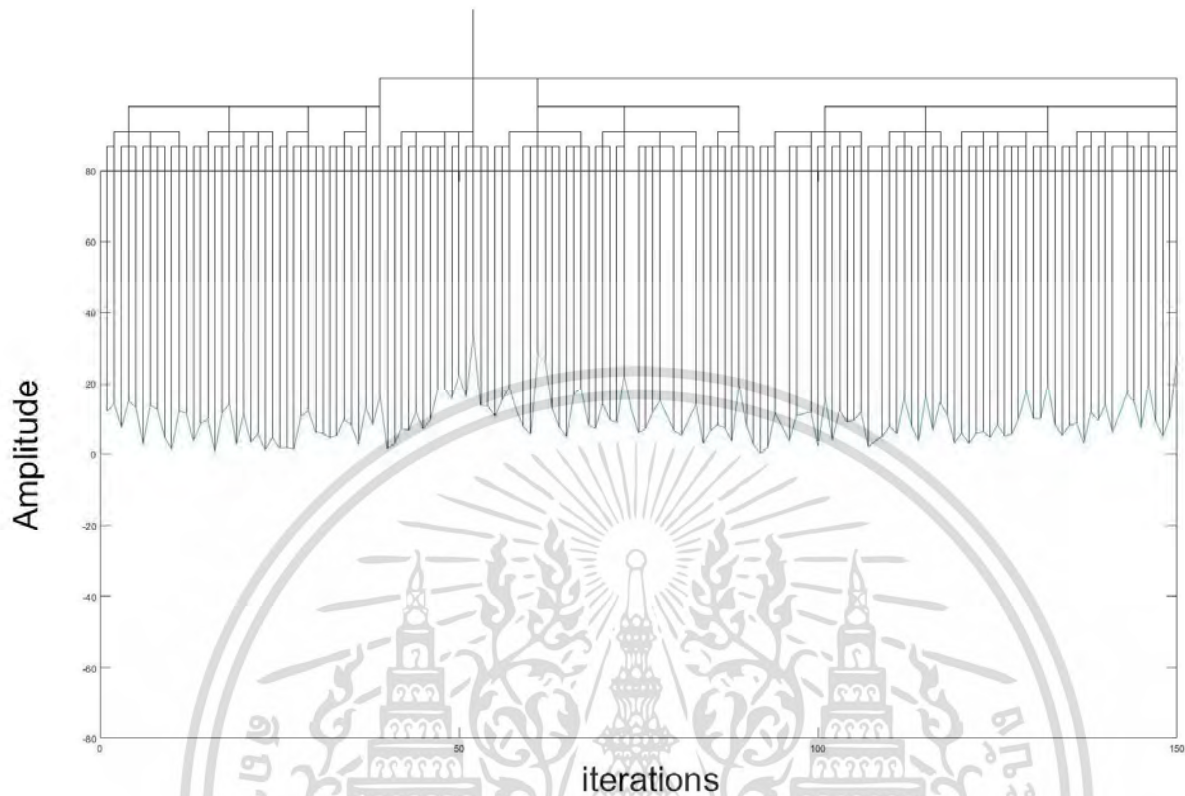
รูปที่ 4.18 สัญญาณตัวตั้งดูดแบบ Chen เทอม  $y$  ในโดเมนความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



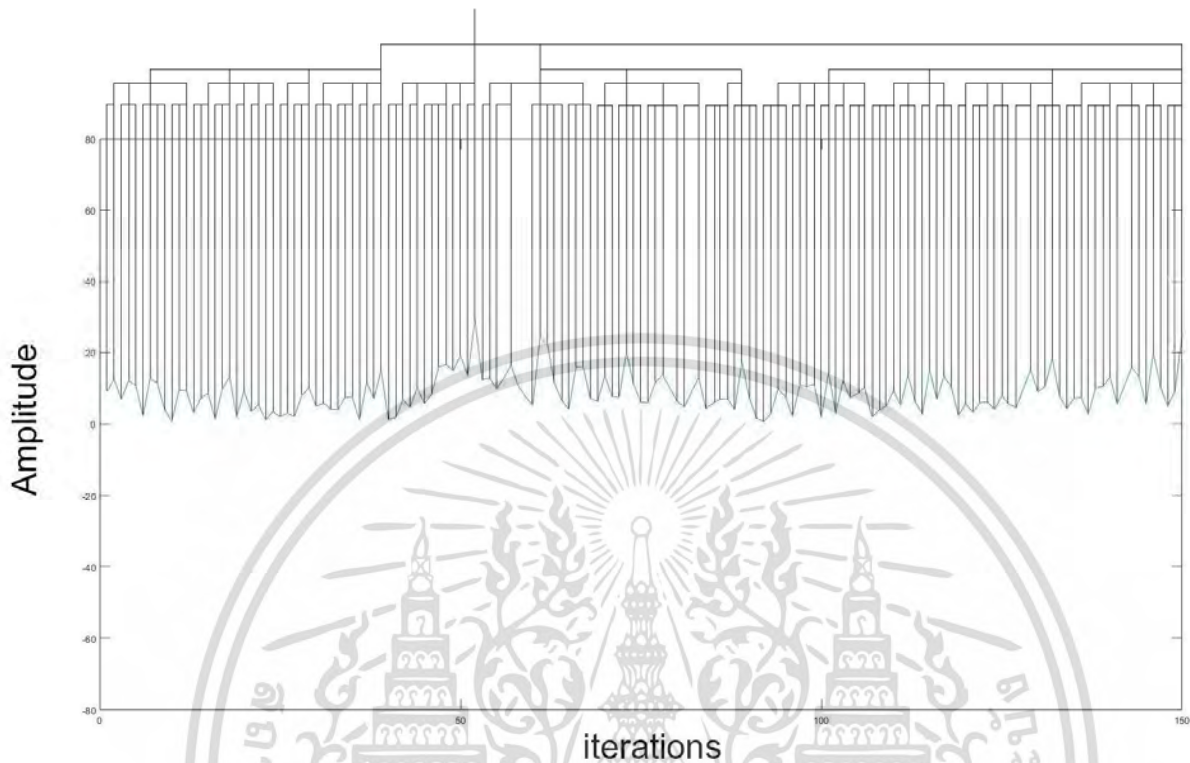
รูปที่ 4.19 สัญญาณตัวตั้งคูดแบบ Chen เอม z ในโดเมนความถี่

ลักษณะของสัญญาณตัวตั้งคูดแบบ Chen ในโดเมนความถี่จะมีลักษณะที่ค่อยๆ ไล่ระดับขึ้นเรื่อยๆ โดยในสัญญาณเอม x กับ y นั้น แอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณนั้นจะอยู่ในช่วง iterations = (50 100) ซึ่งแตกต่างจากสัญญาณตัวตั้งคูดแบบ Lorenz ที่จุดสูงสุดของสัญญาณอยู่ในช่วง iterations = (0 50) โดยสัญญาณตัวตั้งคูดแบบ Chen ในโดเมนความถี่เอม x เอม y นั้นจะมีความคล้ายคลึงกันโดยมีบางจุดที่มีค่าแอมพลิจูดที่แตกต่างกันเล็กน้อยเช่นเดียวกับสัญญาณตัวตั้งคูดแบบ Lorenz ในเรื่องของรูปทรง ส่วนสัญญาณตัวตั้งคูดแบบ Chen เอม z ในโดเมนความถี่นั้นมีทิศทางและรูปทรงของสัญญาณที่คล้ายๆ กับสัญญาณตัวตั้งคูดแบบ Lorenz เอม z ในโดเมนความถี่ที่แอมพลิจูดจะค่อยๆ ไล่ระดับเพิ่มขึ้นไป จนกระทั่งเมื่อ iterations ที่ 75 ขึ้นไป ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงความชันอย่างรุนแรง โดยที่จุดสูงสุดของสัญญาณในเอม z นั้นอยู่ในช่วง iterations = (100 150)



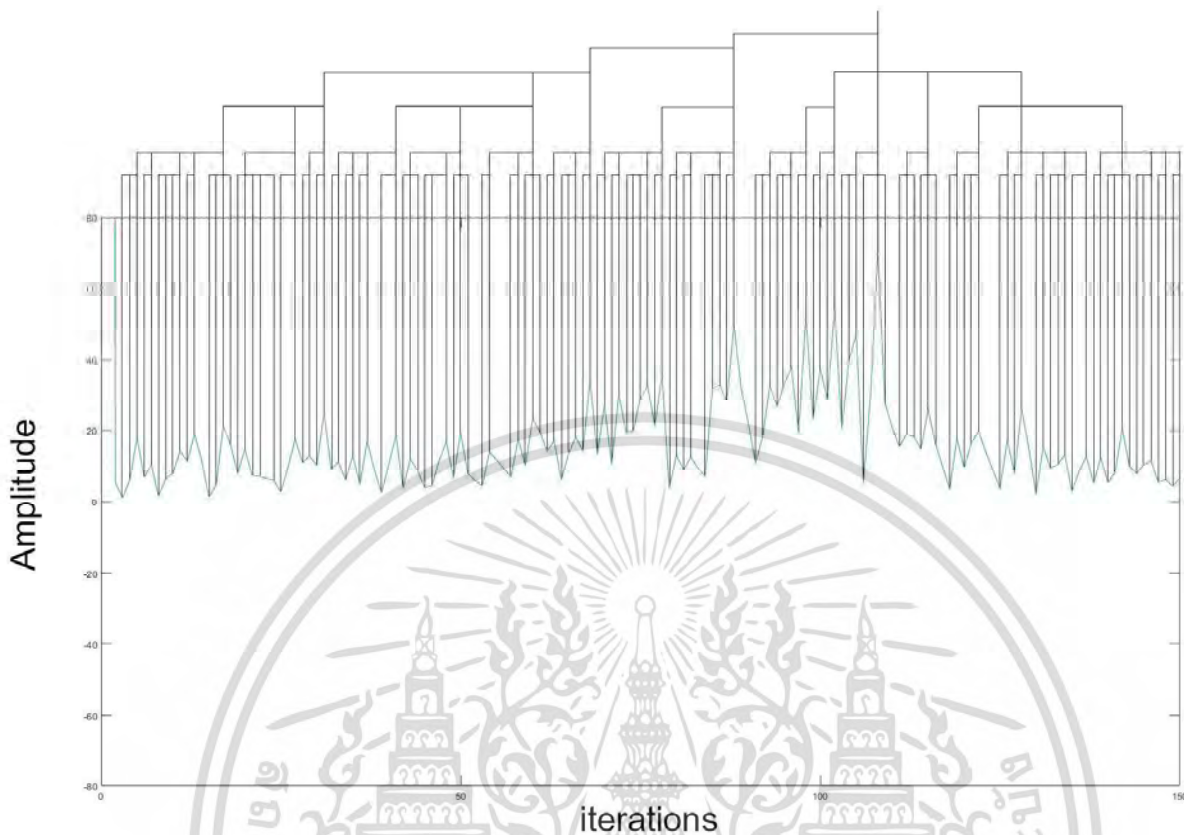
รูปที่ 4.20 แผนผังต้นไม้ Event ในสัญญาณตัวดึงดูดแบบ Chen เทอม  $x$  ในโดเมนความถี่

จากรูปที่ 4.20 จะเห็นว่า Major Event ที่มี Importance Factor ระดับสูงสุดนั้นอยู่ที่ระดับ 4 ซึ่งมากกว่าสัญญาณตัวดึงดูดแบบ Lorenz เทอม  $x$  อยู่ 1 ระดับ โดย Major Event ดังกล่าวเกิดขึ้นในช่วง iterations = (50 100) ซึ่งจากแผนผังต้นไม้นี้ทำให้ทราบว่ามี Event เกิดขึ้นทั้งหมด 143 Event โดยมี Major Event ที่มี Importance Factor ระดับ 1 30 Events Importance Factor ระดับ 2 13 Events Importance Factor ระดับ 3 ทั้งหมด 4 Events และ Importance Factor ระดับ 4 มีอยู่ 1 Event โดยก่อนเกิด Major Event ระดับ 4 นั้นได้มี Event เกิดขึ้น 33 Events Major Event ระดับ 1 เกิดขึ้น 13 Events Major Event ระดับ 2 เกิดขึ้น 4 Events และ Major Event ระดับ 3 เกิดขึ้น 1 Event



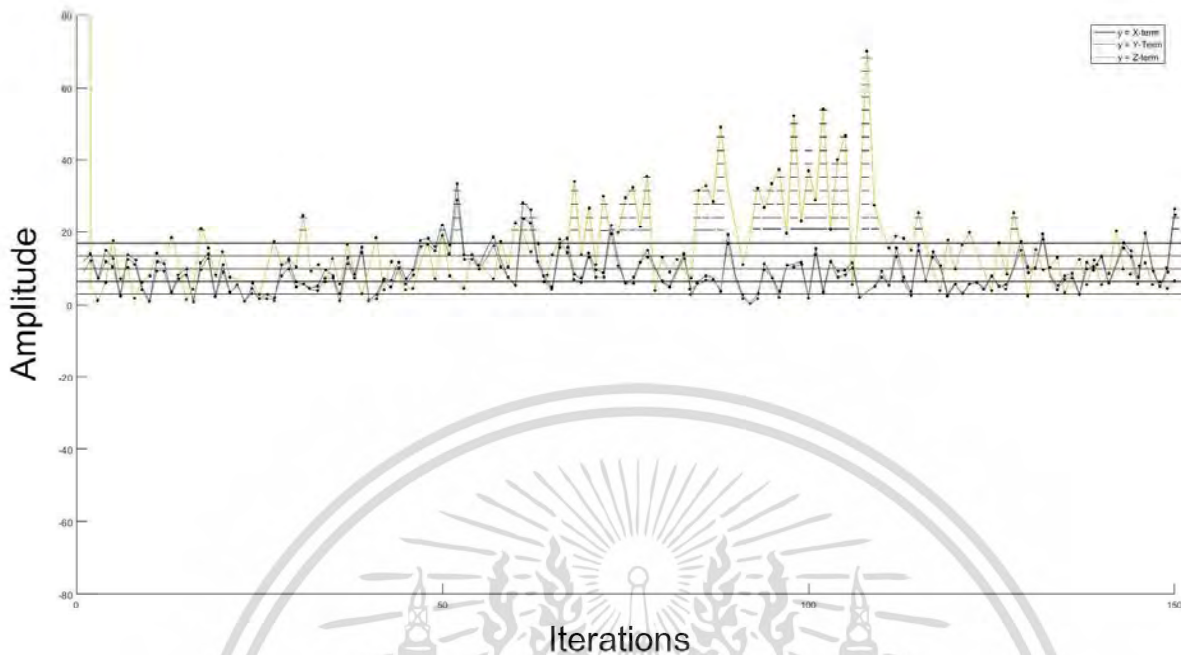
รูปที่ 4.21 แผนผังต้นไม้ Event ในสัญญาณตัวดึงดูดแบบ Chen เทอม  $y$  ในโดเมนความถี่

จากรูปที่ 4.21 จะเห็นว่า Major Event มีค่า Importance Factor สูงสุดอยู่ที่ระดับ 4 และอยู่ในช่วง iterations = (50 100) เช่นเดียวกับสัญญาณตัวดึงดูดแบบ Chen ในเทอม  $x$  และมี Importance Factor มากกว่าสัญญาณตัวดึงดูดแบบ Lorenz ในเทอมเดียวกันอยู่ 1 ระดับ โดยมี Event เกิดขึ้นทั้งหมด 143 Event มี Major Event ที่มี Importance Factor ระดับ 1 ทั้งหมด 38 Event Importance Factor ระดับ 2 ทั้งหมด 8 Event Importance Factor ระดับ 3 ทั้งหมด 3 Event และ Importance Factor ระดับ 4 มี 1 Event ซึ่งก่อนการเกิด Major Event ระดับ 4 นั้น มี Event เกิดขึ้นนั้น มี Event เกิดขึ้น 34 Event Major Event ระดับ 1 เกิดขึ้น 15 Event Major Event ระดับ 2 เกิดขึ้น 3 Event และ Major Event ระดับ 3 เกิดขึ้น 1 Event



รูปที่ 4.22 แผนผังต้นไม้ Event ในสัญญาณตัวดึงดูดแบบ Chen เทอม  $z$  ในโดเมนความถี่

จากรูปที่ 4.22 จะเห็นว่า Major Event มีค่า Importance Factor สูงสุดนั้นอยู่ที่ระดับ 6 ซึ่งสิ่งที่สังเกตได้ก็คือ Major Event ที่มีค่า Importance Factor ระดับ 6 ในสัญญาณตัวดึงดูดแบบ Chen ในเทอม  $z$  นั้นเกิดขึ้นในช่วงต้นของ iterations = (100 150) ซึ่งแตกต่างกับสัญญาณตัวดึงดูดแบบ Lorenz ในเทอมเดียวกันที่ Major Event ระดับ 6 เกิดขึ้นในช่วงปลายของช่วง iterations ดังกล่าว ทำให้เกิดชุด Event ย่อยเกิดขึ้นข้างล่างที่มากกว่าสัญญาณตัวดึงดูดแบบ Lorenz ในเทอมเดียวกัน โดยมี Event เกิดขึ้นทั้งหมด 129 Events โดยมี Major Event ที่มีค่า Importance Factor ระดับ 1 เกิดขึ้นทั้งหมด 35 Events Major Event ค่า Importance Factor ระดับ 2 เกิดขึ้นทั้งหมด 8 Events Importance Factor ระดับ 3 เกิดขึ้นทั้งหมด 5 Events Importance Factor ระดับ 4 เกิดขึ้นทั้งหมด 2 Event Importance Factor ระดับ 5 เกิดขึ้นทั้งหมด 1 Event และ Importance Factor เกิดขึ้นทั้งหมด 1 Event โดยก่อนเกิด Major Event ระดับ 6 ได้เกิด Event ปกติ 56 Events Major Event ระดับ 1 25 Events Major Event ระดับ 2 6 Events Major Event ระดับ 3 3 Events Major ระดับ 4 2 Events และ Major Event ระดับ 5 1 Event



รูปที่ 4.23 Event ทั้งหมดที่เกิดขึ้นในสัญญาณตัวตั้งคูดแบบ Chen พร้อมค่า Pitch ของแต่ละ Event ที่เตรียมแปลงเป็นโน้ตเพลง

### 4.3 บทสรุป

ในบทนี้เป็นการแสดงขั้นตอนวิธีการสร้างบทประพันธ์เพลงจากสัญญาณตัวตั้งคูดแบบ Chen ซึ่งอาศัยทฤษฎีเหตุการณ์มาเป็นตัวบ่งชี้โน้ตที่เกิดขึ้น โดยก่อนทำการวิจัยกับสัญญาณตัวตั้งคูดแบบ Chen ผู้วิจัยทำความเข้าใจกระบวนการสร้างเพลงจากสัญญาณ Logistic Map ก่อน โดยในการตรวจสอบ Event จากจุดที่สัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงความชัน หรือมีทิศทางการเคลื่อนไหวที่เปลี่ยนไป จากนั้นจึงทำการวิจัยลงในสัญญาณตัวตั้งคูดแบบ Lorenz ซึ่งเป็นสัญญาณตัวต้นแบบของสัญญาณตัวตั้งคูดแบบ Chen และทำการวิจัยในสัญญาณตัวตั้งคูดแบบ Chen ต่อไป สิ่งที่สังเกตได้ถึงความแตกต่างระหว่างสัญญาณ Logistic Map และสัญญาณตัวตั้งคูดทั้ง 2 ชนิด พบว่าในสัญญาณตัวตั้งคูดทั้ง 2 ชนิดนั้นมีชุดโน้ตขึ้นคู่ที่มีระยะห่างเกิน 8 semitones ทำให้ต้องเกิดกระบวนการเลือกโน้ตที่เหมาะสม จึงนำแบบจำลองการส่อความ-คดีฉบับกลับมาใช้เป็นหลักในการพิจารณาโน้ตที่เหมาะสม สำหรับรายละเอียดเชิงลึกจะแสดงในส่วนของผลการวิจัยในบทต่อไป

## Chen Song

Chen's Signal  
Wasin Wainiya



รูปที่ 4.24 บทเพลงที่ประพันธ์จากสัญญาณตัวดั้งเดิมแบบ Chen ในโดเมนความถี่หลังจากพิจารณาผ่านแบบจำลองการส่อความ-คติฉบับพลัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# ผลการวิจัย

### 5.1 บทนำ

จากวิธีการดำเนินวิจัยในบทที่ 3 ทำให้สามารถสร้างบทเพลงจากตัวสัญญาณอลวน 3 ชนิด ได้แก่ Logistic Map ตัวตั้งดูดแบบ Lorenz และตัวตั้งดูดแบบ Chen ด้วยการสำรวจหา Event ที่เกิดขึ้น โดยอาศัย การสังเกตการเปลี่ยนแปลงความชันและทิศทาง การเคลื่อนไหวของสัญญาณทั้ง 3 ชนิด ในส่วนของการวิจัยใน สัญญาณตัวตั้งดูดแบบ Lorenz และตัวตั้งดูดแบบ Chen ได้มีการนำแบบจำลองการสื่อความ-คติฉบับปล้น มาร่วมพิจารณาเลือกโน้ตที่เหมาะสมสำหรับชุดโน้ตที่มีระยะห่างเกิน 8 semitones โดยในบทนี้จะเป็นการ แสดงข้อมูลเชิงลึกและผลการวิจัย ซึ่งได้ผลดังต่อไปนี้

### 5.2 Logistic Map

ในการวิจัยนี้ได้ทำการวิจัยสัญญาณ Logistic Map ที่ค่า  $a = 3.6$  ซึ่งเป็นค่าเริ่มต้นที่สัญญาณแสดง พฤติกรรมอลวน โดยพบว่าสัญญาณ Logistic Map เป็นสัญญาณที่มาจากสมการสมการเดียว ดังนั้นสัญญาณ ที่เกิดขึ้นจึงเป็นสัญญาณเดียว โดยมี Event เกิดขึ้นในสัญญาณทั้งหมด 124 Event แต่ว่ามีอยู่ 1 Event ที่ค่า Pitch นั้นเกินจากขีดความสามารถที่เปียโน ซึ่งเป็นเครื่องดนตรีที่ผู้วิจัยใช้อ้างอิงขอบเขตของโน้ตที่เปียโน สามารถบรรเลงได้ ทำให้ไม่สามารถนำมาแปลงเป็นโน้ตในบทเพลงจากสัญญาณได้ ฉะนั้น จำนวนเหตุการณ์ที่ สามารถแปลงเป็นโน้ตในบทเพลงได้จึงมีทั้งหมด 123 Events

สิ่งที่สังเกตได้จากสัญญาณ Logistic Map ในโดเมนความถี่คือเมื่อผ่าน Major Event ของทั้งช่วง สัญญาณไป ทิศทางการเคลื่อนไหวของสัญญาณจะมีลักษณะเหมือนกระจกกลับด้านกับการเคลื่อนไหวก่อนถึง Major Event ซึ่งทำให้การเคลื่อนไหวของโน้ตนั้นสามารถคาดการณ์ได้ว่าโน้ตต่อไปที่เกิดขึ้นนั้นเป็นโน้ตตัวใด

### 5.3 สัญญาณตัวตั้งดูดแบบ Lorenz และ Chen

#### 5.3.1. เพลงที่ประพันธ์จากสัญญาณก่อนนำแบบจำลองการสื่อความ-คติฉบับปล้นมาพิจารณา

ในหัวข้อนี้จะเป็นการเปรียบเทียบเพลงที่ประพันธ์ขึ้นโดยสัญญาณตัวตั้งดูดทั้ง 2 ชนิด โดยที่ Event ทั้งหมดยังคงอยู่เพื่อเปรียบเทียบถึงความสามารถในการเอาไปใช้ได้จริงระหว่างทั้ง 2 สัญญาณ โดยพิจารณา จากรูปที่ 4.15 กับเพลงจากตัวตั้งดูดแบบ Chen ที่ยังไม่ผ่านการพิจารณาจากแบบจำลองการสื่อความ-คติ ฉบับปล้นดังรูปที่ 5.1 พิจารณาเพลงจากสัญญาณตัวตั้งดูดแบบ Lorenz ในรูปที่ 4.15 พบว่าจุดที่มีชุดโน้ต

## Chen Song

Chen's Signal  
Wasin Wainiya

รูปที่ 5.1 บทเพลงจากสัญญาณตัวดิ่งดุดของ Chen ก่อนใช้หลักการสื่อความ-คติฉับพลันมาพิจารณา

ชั้นคู่ที่มีระยะห่างกันเกิน 8 semitones มีทั้งหมด 36 จุด จากจุดที่มีโน้ตทั้งหมด 143 จุด คิดเป็น 25.17% ของจุดที่เกิดโน้ตทั้งหมดที่มนุษย์ไม่สามารถบรรเลงได้ ในส่วนของเพลงจากสัญญาณตัวดิ่งดุดแบบ Chen ในรูปที่ 5.1 พบว่ามีจุดที่มีชุดโน้ตชั้นคู่ที่มีระยะห่างเกิน 8 semitones มีทั้งหมด 20 จุด จากจุดที่มีโน้ตทั้งหมด 146 จุด คิดเป็น 13.7% ของจุดที่เกิดโน้ตทั้งหมดที่มนุษย์ไม่สามารถบรรเลงได้ จากข้อมูลดังกล่าวทำให้เห็นผลการวิจัยได้ว่าข้อมูลดิบของสัญญาณตัวดิ่งดุดแบบ Chen ดังรูปที่ 5.1 นั้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้ดีกว่าข้อมูลดิบของสัญญาณตัวดิ่งดุดของ Lorenz ดังรูปที่ 4.15

## 5.3.2. ผลการวิจัยหลังใช้แบบจำลองการสื่อความ-คติฉับพลัน

จากการใช้แบบจำลองการสื่อความ-คติฉับพลันมาพิจารณาโน้ตที่เหมาะสมจากชุดโน้ตชั้นคู่ที่ห่างกันเกิน 8 semitone สามารถแสดงผลการวิจัยได้ตามตารางดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.1 ผลการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณตัวดิ่งดุดแบบ Lorenz และ Chen ในเทอม x

หัวข้อ	สัญญาณตัวดิ่งดุดของ Lorenz	สัญญาณตัวดิ่งดุดของ Chen
จำนวน Event ที่เกิดขึ้นทั้งหมด	142	143
จำนวน Event ที่ใช้งานจริง	120 (85%)	129 (90%)
Major Event ที่มี Importance Factor สูงสุด	3	4
Major Event Importance Factor สูงสุดที่ใช้งานจริง	2	4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 ผลการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณตัวดึงดูดแบบ Lorenz และ Chen ในทอม y

หัวข้อ	สัญญาณตัวดึงดูดของ Lorenz	สัญญาณตัวดึงดูดของ Chen
จำนวน Event ที่เกิดขึ้นทั้งหมด	142	143
จำนวน Event ที่ใช้งานจริง	117 (82%)	133 (93%)
Major Event ที่มี Importance Factor สูงสุด	3	4
Major Event Importance Factor สูงสุดที่ใช้งานจริง	2	4

ตารางที่ 5.3 ผลการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณตัวดึงดูดแบบ Lorenz และ Chen ในทอม z

หัวข้อ	สัญญาณตัวดึงดูดของ Lorenz	สัญญาณตัวดึงดูดของ Chen
จำนวน Event ที่เกิดขึ้นทั้งหมด	140	128
จำนวน Event ที่ใช้งานจริง	111 (79%)	106 (83%)
Major Event ที่มี Importance Factor สูงสุด	6	6
Major Event Importance Factor สูงสุดที่ใช้งานจริง	5	5

ด้วยข้อมูลจากตารางข้างต้นจะสังเกตได้ว่าสัญญาณตัวดึงดูดทั้ง 2 ชนิด ในทอม x และ y มี Major Event ที่มี Importance Factor สูงสุดที่ 4 มีเพียงทอม z ที่พบ Major Event ที่มี Importance Factor สูงสุดที่ 6 เนื่องจากสัญญาณทอม z ในตัวดึงดูดทั้ง 2 ชนิดนั้นมีจุดสูงสุดที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดการเคลื่อนไหวของสัญญาณ อีกทั้งยังสังเกตเห็นความรุนแรงของการเพิ่มค่า peak ของแต่ละ Major Event ย่อยที่เกิดขึ้นก่อนเกิด Major Event ที่มีค่า Importance Factor เป็น 6 ซึ่งค่า peak ของ Major Event ย่อยดังกล่าวนั้นมากกว่า Major Event ที่มี Importance Factor เป็น 5

ในส่วนของสัญญาณทอม x และ y ที่พบจุดที่มีค่า peak รองลงมานั้นสามารถใช้อ้างอิงค่า Importance Factor ในระดับหนึ่ง และใช้เป็นเกณฑ์สำหรับกำหนดค่า Importance Factor ให้กับ Major Event ที่เกิดขึ้นในลำดับต่อไปได้ง่ายกว่าสัญญาณตัวดึงดูดในทอม z

หลังจากนำแบบจำลองการสื่อความ-คติฉบับกลับมาพิจารณาโน้ตเห็นได้ว่าประสิทธิภาพของสัญญาณตัวดึงดูดแบบ Chen มีจำนวน Event ที่ใช้งานจริงมากกว่าตัวดึงดูดของ Lorenz ในทุกทอม อีกทั้ง Major Event ที่มีค่า Importance Factor สูงสุดที่ใช้งานมีค่าสูงกว่า Major Event ของสัญญาณตัวดึงดูดของ Lorenz ทุกทอม โดยสัญญาณตัวดึงดูดแบบ Chen ในทอม y นั้นมีประสิทธิภาพสูงสุด โดย Event สามารถนำไปใช้งานจริง 133 Events จาก 143 Events ที่เกิดขึ้นทั้งหมด คิดเป็น 93%

## 5.4 บทสรุป

จากตารางแสดงผลการวิจัยที่แสดงไว้ตามตารางข้างต้น เห็นว่าสัญญาณตัวดึงดูดของ Chen นั้นให้ผลลัพธ์เป็นที่น่าพอใจ จากการที่ Major Event ที่มีค่า Importance Factor นั้นสามารถใช้งานในเพลงที่ประพันธ์โดยสัญญาณตัวดึงดูดแบบ Chen ได้ โดยมี Event ที่เกิดขึ้นในสัญญาณตัวดึงดูดของ Chen ทั้งหมด 414 Events และ Event ดังกล่าวสามารถใช้งานจริงได้ทั้งหมด 370 Events คิดเป็น 89.4% อีกทั้งการเคลื่อนไหวของสัญญาณตัวดึงดูดแบบ Chen นั้นมีทิศทางการเคลื่อนไหวของสัญญาณที่หลากหลายและคาดเดาได้ยาก ซึ่งทั้งสัญญาณตัวดึงดูดแบบ Chen และแบบ Lorenz นั้นแตกต่างจากสัญญาณ Logistic Map ที่การเคลื่อนไหวของสัญญาณหลังจากผ่าน Major Event ของทั้งสัญญาณแล้วมีลักษณะย้อนกลับไปจุดตั้งต้นด้วยทิศทางการเคลื่อนไหวเหมือนเดิมทุกประการเพียงแต่กลับด้าน อีกทั้งสัญญาณตัวดึงดูดแบบ Chen มีลักษณะเด่นที่แตกต่างจากสัญญาณ Logistic Map คือการที่มีสัญญาณเกิดขึ้นพร้อมกัน 3 เทอม ทำให้เกิดชุดโน้ตที่มีโน้ตมากกว่า 1 ตัวขึ้นไปเกิดขึ้นในเวลาเดียวกัน ซึ่งแตกต่างจากสัญญาณ Logistic Map ที่โน้ตที่เกิดขึ้นทั้งหมดในสัญญาณนั้นเป็นโน้ตเดี่ยว ทำให้เพลงจากสัญญาณตัวดึงดูดแบบ Chen นั้นมีมิติสีสนมากกว่าสัญญาณ Logistic Map



## บทที่ 6

# สรุปการวิจัย

### 6.1 สรุปการวิจัย

จากวิธีการดำเนินการวิจัยเพื่อสร้างบทเพลงจากสัญญาณตัวดึงดูแบบ Chen โดยอาศัยการใช้ทฤษฎีเหตุการณ์ เพื่อทำการค้นหา Event ที่เกิดขึ้นภายในสัญญาณ โดยใช้จุดที่ความชันของเส้นสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงค่าความชันหรือหักเหทิศทางความชันไปในอีกทิศทางหนึ่งเป็นจุดอ้างอิง จากนั้นจึงใช้แบบจำลองการสื่อความ-คดีฉบับสั้นเพื่อพิจารณาทุก Event ที่เกิดขึ้นในสัญญาณว่า Event ใดมีความเหมาะสมที่จะนำไปแปลงเป็นโน้ตในการสร้างบทเพลงจากตัวสัญญาณตัวดึงดูแบบ Chen ทำให้ได้ผลการวิจัยดังต่อไปนี้

6.1.1. ทฤษฎีเหตุการณ์มีความสัมพันธ์ในดนตรีจากการเป็นจุดอ้างอิงในการกำเนิดโน้ตดนตรี ซึ่งระบุตำแหน่งจากจุดที่สัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงความชัน หรือทิศทางของสัญญาณในโดเมนความถี่ เปรียบเสมือนสัญญาณดิจิทัลที่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจะได้ค่า 1 และเมื่อไม่มีการเปลี่ยนแปลงก็ได้ค่า 0 ซึ่งแต่ละตำแหน่งของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในสัญญาณอลวนสามารถแทนเป็นตัวโน้ตที่ให้กำเนิดโดยสัญญาณอลวนได้

6.1.2. สัญญาณตัวดึงดูแบบ Chen เป็นอีก 1 สัญญาณอลวนที่มีความน่าสนใจนำมาใช้ในการสร้างสรรค์บทเพลง ด้วยความที่เป็นสัญญาณอลวนจากสมการ 3 สมการรวมกัน จึงทำให้เกิดสัญญาณจำนวน 3 สัญญาณเกิดขึ้นในช่วงเวลาเดียวกัน

6.1.3 เมื่อสัญญาณดำเนินไปถึงจุดหนึ่ง จะพบว่ามีการเกิด Event ขึ้นมากกว่า 1 Event ในช่วงเวลาเดียวกัน ซึ่งทำให้เกิดโน้ตคู่หรือกลุ่มโน้ต 3 ตัวในช่วงเวลาเดียวกันเป็นซึ่งสามารถสัสนให้กับผู้ฟังเวลาได้ยินเสียง

## 6.2 ปัญหาที่พบและข้อเสนอแนะ

6.2.1. ในการวิจัยนี้ได้ทำการสำรวจในขอบเขตที่ iterations ระหว่าง 0 ถึง 150 ซึ่งในส่วนนี้สามารถปรับเปลี่ยนจำนวน iterations ที่ทำการสำรวจ หรือแม้กระทั่งเปลี่ยนแปลงขอบเขตการสำรวจสัญญาณ โดยไม่จำเป็นต้องสำรวจที่บริเวณ iterations ช่วง (0 150) หรือแอมพลิจูด ที่ (-80 80) บริเวณเดียว

6.2.2. นำทฤษฎีเหตุการณ์ไปศึกษา หรือประยุกต์ใช้กับสัญญาณอลวนรูปแบบอื่นๆนอกเหนือจากตัวตั้งจุดแบบ Chen ได้เพื่อหาความเป็นไปได้ใหม่ๆในการประพันธ์เพลงจากสัญญาณอลวน

6.2.3. นำตัวแปรทางการพยากรณ์อากาศมาใช้ในการประพันธ์บทเพลง ซึ่งสามารถสร้างเพลงที่มีลักษณะที่สัมพันธ์กับสภาพอากาศ

6.2.4. ปัญหาที่พบระหว่างการทำวิจัยคือ ความผันผวนในความชันของสัญญาณทอม z ของสัญญาณตัวตั้งจุดแบบ Chen ซึ่งทำให้เหตุการณ์ในสัญญาณทอม z นั้นนำไปแปลงเป็นโน้ตในเพลงได้น้อยกว่าสัญญาณทอมอื่นๆ อีกทั้งยังทำให้ค่า Importance Factor สูงสุดของ Major Event ในสัญญาณทอม z นั้นมีมากกว่าสัญญาณทอม x และ y 2 ระดับ

## บรรณานุกรม

- [1] Anonymous, *Edward Norton Lorenz: Publications*, Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology, 2018. [Online]. Available; <https://eapsweb.mit.edu/about/history/publications/lorenz>, Retrieved date: June 22, 2018.
- [2] Anonymous, *Eugene Narmour*, Department of Music, School of Arts and Sciences, University of Pennsylvania, 2018. [Online]. Available; <https://www.sas.upenn.edu/music/people/emeritus/eugene-narmour>, Retrieved date April 13, 2018.
- [3] Anonymous, *Leon O. Chua*, Department of Electrical Engineering and Computer Sciences, University of California Berkeley, 2018. [Online]. Available; <https://www2.eecs.berkeley.edu/Faculty/Homepages/chua.html>, Retrieved date: June 23, 2018.
- [4] Bidlack, R., “Chaotic Systems as Simple (But Complex) Compositional Algorithms,” *Computer Music Journal*, 1992, Vol.16, No.3, pp 33-47.
- [5] Biles, J., Anderson P., and Loggi L., “Neural network fitness functions for a musical IGA.” *International Computing Sciences Conferences (ICSC)*, 1996. [Online]. Available; <http://scholarworks.rit.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1187&context=other>, Retrieved date: July 5, 2018.
- [6] Biles, J.A., “GenJam: A genetic algorithm for generating jazz solos,” *International Computer Music Conference Proceedings*, 1994, pp. 131-137.
- [7] Bilotta, E., Pantano, P., Cupellini, E., Rizzuti, C., “Evolutionary Methods for Melodic Sequences Generation from Non-Linear Dynamic Systems,” *Application of Evolutionary Computing Proceedings*, 2007, Vol. 4448, pp. 585-592.
- [8] Castilho, P.L., *Chaotic Systems as Compositional Algorithms*, High-Performance and Automatic Computing, RWTH Aachen University, 2015. [Online]. Available;

<http://hpac.rwth-aachen.de/teaching/sem-mus-15/reports/Castilho.pdf> , Retrieved date July 15, 2015.

[9] Chen G., Department of Electronic Engineering, City University of Hong Kong, 2018. [Online]. Available;

<http://www.ee.cityu.edu.hk/~gchen/>, Retrieved date May 16, 2018.

[10] Chen, G. and Dong, X., *From Chaos to Order – Methodologies, Perspectives and Applications*, World Scientific Pub. Co, Singapore, 1998.

[11] Chen, G. and Ueta, T., “Yet another chaotic attractor,” *Int J. Bifurcation and Chaos*, 1999, Vol. 9, No.7, pp. 1465-1466.

[12] Coca, A.E., Zhao, L. and Tost, G.O., “Chaotic Melody Generation and Statistical Characterization,” *International Conference on Chaos and Nonlinear Dynamics*, 2010. [Online]. Available;

[https://www.researchgate.net/publication/232274757\\_CHAOTIC\\_MELODY\\_GENERATION\\_AND\\_STATISTICAL\\_CHARACTERIZATION?enrichId=rgreq-e133adb332693931042ffc0b29d6368d-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzIzMjI3NDc1NztBUzo5NzY2NTA4MTY3NTc5MUAxNDAwMjk2NTc5MDU3&el=1\\_x\\_2&\\_esc=publicationCoverPdf](https://www.researchgate.net/publication/232274757_CHAOTIC_MELODY_GENERATION_AND_STATISTICAL_CHARACTERIZATION?enrichId=rgreq-e133adb332693931042ffc0b29d6368d-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzIzMjI3NDc1NztBUzo5NzY2NTA4MTY3NTc5MUAxNDAwMjk2NTc5MDU3&el=1_x_2&_esc=publicationCoverPdf) , Retrieved date July 1, 2018.

[13] Cosel, A., 2018, *Heinrich Schenker*, Schenker Document Online in collaboration with Department of Digital Humanities, King’s College, London. [Online]. Available;

[http://www.schenkerdocumentsonline.org/colloquy/heinrich\\_schenker.html](http://www.schenkerdocumentsonline.org/colloquy/heinrich_schenker.html) , Retrieved date March 15, 2018.

[14] Crossley-Holland, P., “Rhythm”, *Encyclopedia Britannica*, 1998. [Online]. Available;

<https://www.britannica.com/art/rhythm-music>, Retrieved date September 9, 1998.

[15] Cuddy, L.L and Lumney, C.A., “Expectancies generated by melodic intervals: perceptual judgments of melodic continuity,” *Percept Psychophys*, 1995, Vol. 57, No.4, pp. 451-462

- [16] Dabby, D.S., *Music Variations from a Chaotic Mapping*, PhD. Thesis, Department of Electrical Engineering and Computer Science, Massachusetts Institute of Technology, 1995.
- [17] Grachten, M. and Arcos, J.L., “Using the Implication-Realization Model for Measuring Melodic Similarity,” *European Conference on Artificial Intelligence*, 2004. [Online]. Available;  
[https://www.researchgate.net/publication/220838530\\_Using\\_the\\_ImplicationRealization\\_Model\\_for\\_Measuring\\_Melodic\\_Similarity](https://www.researchgate.net/publication/220838530_Using_the_ImplicationRealization_Model_for_Measuring_Melodic_Similarity) , Retrieved date January 22, 2004.
- [18] Grachten, M., Arcos, J.L and de Mantaras, R.L., *Melody Retrieval using the Implication-Realization Model*, MIREX, 2005.
- [19] Harnum, J., *Basic Music Theory: How to read write and understand written music*, Sol-Ut Press, 2001.
- [20] Hevner, K., “Experimental Studies of the Elements of Expression in Music,” *The American Journal of Psychology*, 1936, Vol.48, No.2, pp. 246-268.
- [21] Hevner, K., “The Affective Value of Pitch and Tempo in Music,” *The American Journal of Psychology*, 1937, Vol.49, No.4, pp. 621-630.
- [22] Hunt, P., “J.S. Bach and Steganography” , *Electrum Magazine*, 2013, [Online]. Available;  
<http://www.electrummagazine.com/2013/12/j-s-bach-and-steganography> , Retrieved date December 31, 2013.
- [23] Johnson, R.J., “Counterpoint” , *Encyclopedia Britannica*, 1998. [Online]. Available;  
<https://www.britannica.com/art/counterpoint-music> , Retrieved date September 9, 1998.
- [24] Kirby, F.E., 1998, “Musical Form” , *Encyclopedia Britannica*, 1998. [Online]. Available;  
<https://www.britannica.com/art/musical-form> , Retrieved date July 20, 1998.
- [25] Krumhansl, C.L., “Music Psychology and Music Theory: Problems and Prospects,” *Music Theory Spectrum*, 1995, Vol.17, No.1, pp. 53-80.

- [26] Krumhansl, C.L., Louhivuori J., Toiviainen P., Jarvinen T. and Eerola T., “Melodic expectation in Finnish spiritual folk hymns: Convergence of statistical, behavioral and computational approaches,” *Music Perception*, 1999, Vol.17, No.2, pp. 151-95.
- [27] Krumhansl, C.L., Toivanen, P., Eerola, T., Jarvinen, P. and Louhivuori, J., “Cross-cultural music cognition: cognitive methodology applied to North Sami yoiks,” *Cognition*, 2000, Vol.76, No.1, pp. 13-58.
- [28] Leach, J. and Fitch, J., “Nature, Music and Algorithmic Composition,” *Computer Music Journal*, 1995, Vol.19 No.2, Massachusetts Institute of Technology, pp 23-33.
- [29] Lerdahl, F., *Tonal Pitch Space*, Oxford University Press, 2001.
- [30] Lerdahl, F. and Jackendoff, R. *A Generative Theory of Tonal Music*, MIT Press, 1983.
- [31] Lorenz, E. N., “Deterministic nonperiodic flow,” *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1963, Vol. 20, No. 2, pp.130-141.
- [32] Mayer-Kress, G., Choi, I., Weber, N., Bagar, R. and Hubler, A., “Musical Signals from Chua’s circuits,” *IEEE Trans. on Circuits and Systems*, 1993, Vol.40, No.2, pp 688-695.
- [33] Meyer, L., *Emotions and meaning in music*, The University of Chicago Press, Chicago, 1956.
- [34] Millar, J.K., *The aural perception of pitch-class set relations a computer-assisted investigation*, PhD Thesis, North Texas State University, 1984.
- [35] Narmour, E., *Beyond Schenkerism: The Need for Alternatives in Music Analysis*, University of Chicago Press, 1977.
- [36] Narmour, E., *The Analysis and Cognition of Basic Melodies Structures: The Implication-Realization Model*, University of Chicago Press, 1991.
- [37] Narmour, E., *The Analysis and Cognition of Melodic Complexity: The Implication-Realization Model*, University of Chicago Press, 1992.
- [38] Palmer, C., “Mapping musical thought to musical performance,” *Journal of experimental psychology Human perception and performance*, 1989, Vol.15, No.2, pp. 331-346.

- [39] Pietgen, H. and Saupe, D., *The Science of Fractal Images*, Berlin: Springer-Verlag, 1988.
- [40] Porter, L., 2017, “Deep Dive with Lewis Porter: In Praise of Art Tatum, Stealth Radical in the Jazz Piano Pantheon,” *88.3fmwbgo.org*. [Online]. Available; <http://wbgo.org/post/deep-dive-lewis-porter-praise-art-tatum-stealth-radical-jazz-piano-pantheon> Retrieved date September 5, 2017.
- [41] Salter, J.R., *Chaos in Music: Historical Developments and Applications to Music Theory and Composition*, PhD Thesis, ProQuest, 2009.
- [42] Schellenberg, E.G., “Expectancy in Melody: tests of the implication-realization model,” *Cognition*, 1996, Vol.58, No.1, pp. 75-125.
- [43] Schellenberg, E.G., “Simplifying the implication-realization model of melodic expectancy,” *Music Perception*, 1997, Vol.14, No.3, pp. 295-318.
- [44] Schenker, H., *Five Graphic Music Analyses*, Dover Publications, 1969.
- [45] Schmuckler, M.A., “Expectation in Music: Investigation of melodic and harmonic process,” *Music Perception*, 1989, Vol.7, No.2, pp. 109-150.
- [46] Schottstaedt, B., *Automatic Species Counterpoint*, CCRMA, Department of Music, Stanford University, 1984.
- [47] Sher, C., *The Real Book Volume 1*, Hal Leonard Corporation, 2004.
- [48] Simoni, M, *Algorithmic Composition: A Gentle Introduction to Music Composition Using Common LISP and Common Music*, The Scholarly Publishing Office, University of Michigan, University Library, 2003.[Online]. Available; <https://quod.lib.umich.edu/s/spobooks/bbv9810.0001.001/1:1/--algorithmic-composition-a-gentle-introduction-to-music?rgn=div1;view=fulltext> Retrieved date June 15, 2018.
- [49] Sooraksa, P., *Chaotic Robot*, King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang, 2017.
- [50] Steedman, M., *The Blues and the Abstract Truth: Music and Mental Models, Mental Models in Cognitive Science: Essays in Honour of Phil Johnson-Laird*, 1996.

[51] Steedman, M., “A Generative Grammar for Jazz Chord Sequences,” *Music Perception*, 1984, Vol.2, No.1, pp. 52-77.

[52] Thompson, W.F., Cuddy, L.L. and Plaus, C., “Expectancies generated by melodic intervals: evaluation of principles of melodic implication in a melody-completion task,” *Percept Psychophys*, 1997, Vol.59, No.7, pp. 1069-76.

[53] Voss, R.F. and Clarke, J., “1/f noise in music: Music from 1/f noise,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1978, Vol.63, pp. 258.

[54] Xenakis, I., *Formalized music*, Indiana University Press Bloomington, 1971.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.

## โค้ดในการประพันธ์เพลง

## ก.1 โค้ดในการประพันธ์เพลงจากสัญญาณ Logistic Map ผ่านโปรแกรม Lilypond

```

\header{
  title = "Plot3.6 song"

  instrument = "Piano"

  composer = "Logistic map R = 3.6, X0 = 0.1"
  arranger = "Wasin Wainiya"
}
{
  c'4 d'2 d'4 d'4. d'4 d'4 d'8(d'8) e'8(e'8) d'8(d'8) d'8 d'4
  d'4 f'4 d'4 d'4 f'4 b'4 d'4 b'4 d'4 e'4 f'4 d'4(d'4) b'4
  e'4 f'4 f'4 c'4 a'4 d'4 g'4 a'4 f'4 b'4 a'4 b'4
  a'4 c'4 a'4 a'4 d'4 b'4 b'4 b'4 e'4 d'4 b'4 b'4 d'2 b'4
  f'4 d'4 d'4 b'4 d'4 b'4 d'4 e'4 f'4 d'4 f'4 a'4 f'4(f'8)
  c''8(c''8) c''8(c''8) e''8(e''8) b''8(b''8)
  g''''8(g''''8 g''''8 g''''8 g''''8 g''''8 g''''8 g''''8 g''''8) b''8(b''8)
  e''8(e''8) c''8(c''8)
  c''8(c''8) f'8(f'4) a'4 f'4 d'4 f'4 e'4 d'4 b'4 b'4 d'4 d'4 f'4
  b'4 d'2 b'4 b'4 d'4 e'4 b'4 b'4 b'4 d'4 a'4 a'4 c'4 a'4
  b'4 a'4 b'4 f'4 a'4 g'4 d'4 a'4 c'4 f'4 f'4 e'4
  b'4 d'4(d'4) f'4 e'4 d'4 b'4 d'4 b'4 f'4 d'4 d'4 f'4 d'4

```

d'4 d'8 d'4 e'4 d'8(d'8) d'8(d'8) d'8(d'8) d'8(d'4) d'4 d'2 c'4

## ภ.2 โค้ดในการประพันธ์เพลงจากสัญญาณตัวดึงดูดแบบ Lorenz ผ่านโปรแกรม Lilypond

\version "2.18.2"

\header {

title = "Lorenz Song"

composer = "Lorenz Attractor"

arranger = "Wasin Wainiya"

copyright = "2017 by Wasin Wainiya"

}

{

c"4 <f" >4 d'"4 <f' a">4 <f">4 <f">4 <e">4 <a' g">4 <g' e">4 <d'" f">4 <d'">4 <e" g">4 <f' c">4

<f' g">4 <a">4 <d' f">4 <f">4 <a' c">4 <e" g">2 <f">4 <c">4 f'4

<a' g" b">4 <g' c">4 <a' g">4 <d' e">4 <d' e">4 a'4 <e' g' a">4 <a">4 <a' g" a">4 <c'">4 b"8 a'8

<g" b">4 <f'" g'">4 a'4 <a' c' d">4 <f">4 <c" g">4 <a' c">4 <c" e">4 <f">4 <a' b' c">4 <f' d' e">4

<f' a' b">4 e"4 <f'g">4 <b" d'">4 <b'g">4 <a">4 <b' d">4 <f' e">4 b"4 <g" b">4 g"4 <d' e">4 a'4

\tuplet 3/2 {<f' a' b">8 a'8 <a' e">8} <f' c">4 <e" f'">4 f'4

<a' g">4 <a' c">4 <f' g">4 <f' e">4 e"4 <e" d'">4 a'4 <f' c">4 <c">4 <d" e" f">4 <a' d" e">4 <c"b">4

<f' g">4 <c" d'">4 <b">4 <b' b">4 \tuplet 3/2 {<c" g' b">8 <c">8 <a' d">8} <a' g">4

\tuplet 3/2 {c"4 a'4 a'4} <c' f' g">8 c"8 c"4 <c" d' e">4 <c" d'">4 e"4 <a' g">4 <a' g' b">4

<a' c">4 <e" g" d'">4 <d' f">4 <d' e">4 <a' c">4 <b">4 a"4 <c" d'">4 <d'">4 <f' c">4

a'4 <a' e">4 <c" f">4 <c" b" c">4 <a' c">4 <c" g">8 c"16 a'16 d"4

<c" e">4 <c" e">4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

<f>4 e"4 <f' c" e">4 <d">4 <c" e">4 a'4 <d">4 <e" b' d">4 g"4 <d">4 <e' g">8 <b">8
<d' f">4 <a' c">4 <d" g">4 <d' e">4 <g" b">4 <f' a">4 <d">4 <a">4 <d' f">4 <c" e">4
<f' g' a">4 <f' a">4 <d' f">4 f4 <c" f">4 <d">4 <c" e" c">4 <f' a' c">4 <f' a">4 <b" b">4 <g' d" g">4
<f' a' g">4 <e' f">4 <f' g' a">4 <f' a' c">4 <a' b' e">4 <d' a' c">4 <f' g' a">4
}

```

### ก.3 โค้ดในการประพันธ์เพลงจากสัญญาณตัวดิ่งดูดแบบ Chen ผ่านโปรแกรม Lilypond

\version "2.18.2"

\header {

title = "Chen Song"

composer = "Chen's Signal"

arranger = "Wasin Wainiya"

copyright = "2017 by Wasin Wainiya"

}

{

```

<c" e">4 <d' a">4 <f' c" e">4 <c" g">4 <d' a">4 <c" e">4 <d' c">4 f4 <d' a">4 <a' c" e">4 <a' c">4 <f' g">4
a'4 <d' a' b">4 <d' f">4 <b' c" b">4 <c" e">4 <d' a">4 <a' c" e">4 <f' a">4 <f' g">4 d'4 <e' f">4 <d">4 <d">4 d'4
<a' c">4 <a' c">4 <f' b">4 <f">4 <f' a">4 <f' c">4 <f' a">4 <a' c">4 <d' f">4 <c" e">4 a'4 <d' e">4
d'4 <d' e">4 <f' g">4 <f' g' c">4 <a' c">4 <f' a">4 <f' a">4 <e" g">4 <e" g">4 <g' e">4 <g" b">4
<a' c" e">4 <f" a">4 <f' c" d">4 <c">4 <a' c">2 <a' e" g">4 g"4 <c" g">4 <a' c">4 <b">4 <b" f">4
<e" b" d">4 <c" e">4 <g' a">8 a'8 <f' e">4 <e" g">4 <e" g">4 <a">4 <f' a' c">4 <c" e" d">4
<a' c">4 <f">4 <g" b">4 <c" g">4 <f">4 <a">4 <c" b">4 <c" e">4 f4 <g' c">4 <f' a">4
c"4 c'4 <f' a">4 <d' f' a">4 <f">4 <g' a">4 <a">4 <f">4 <e" g">2 <d' c">4 d'4 <d">4 <a' c">4
<a">4 <d' f">4 <c" g">4 b'4 <c" b">4 <c">4 <c" a">4 f4 <c" a">4 a'4 a'4 <f' b' c">4 d'2 <f">4 a'4
<f' e">4 <c" e" g">4 <f' a' g">4 <d' f' e">4 <e" d">4 g'4 <c" e">4 <f' a' c">4 <g">4 <f' a">4 <e' e">4

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<f' g''>4 f'4 f'4 <f' a'>4 <f' f''>4 <f' a'>4 d''4 <e'' g''>4 <d' a'>4 <a' b' e''>4 <a' g''>4 <a' b'>4 <f' c''>4 <d' g' a'>4

a'4 <d' c''>4 <f' a' c''>4 <a' c''>4 16 b'16 <c''>8 <f' d''>4 <f' a'>4 g'4 <a' e''>4 <a' e''>4 <f' a' b''>4 <c'' g''>4

<f' a'>4 <f'>4 <f' a' b'>4 <g'>4 }



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายวศิน ไวยनिया
วัน เดือน ปีเกิด	14 มีนาคม 2534
ที่อยู่	33 ซอยเรวดี 22 ถนนติวานนท์ ตำบลตลาดขวัญ อำเภอเมือง จังหวัดนนทบุรี 11000 โทร. 02-580-0829
ประวัติการศึกษา	2555 หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) สัญญาณอลวน 2.) การประพันธ์ดนตรี
ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย	
พ.ศ.2556-2557	ผู้พัฒนาระบบการจัดการสหกิจศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง -พัฒนาระบบ Backend ของเว็บไซต์
พ.ศ.2557-2559	ตำแหน่งวิศวกร ประจำหลักสูตรวิศวกรรมดนตรีและสื่อประสม ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง -ทดสอบ, ดูแลอุปกรณ์สื่อการเรียนการสอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้