สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การสังเคราะห์เสียงโดยคอมพิวเตอร์

SOUND SYNTHESIS BY COMPUTER

โดย

นางสาวศิวพร สุกใส

นางสาวพิชญ์สินี เชาว์เหนือ

นายสุรวัตร บริบูรณ์โภคา

หมวดหมู่.....
เลขทะเบียน 62582
วัน,เดือน,ปี 19 ส.ค. 2549

b 11624 09
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SOUND SYNTHESIS BY COMPUTER

BY

Ms. SIWAPORN SUKSAI

Ms. PICHSINEE CHOWNUE

Mr. SURAWAT BORRIBOONPOKA

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF

THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

BACHELOR IN DEPARTMENT OF INFORMATION ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การสังเคราะห์เสียงโดยคอมพิวเตอร์	
ชื่อนักศึกษา	นางสาวศิวพร สุกใส	รหัสประจำตัว 45010770
	นางสาวพิชญ์สินี เชาว์เหนือ	รหัสประจำตัว 45010789
	นายสุรวัตร บริบูรณ์โภคา	รหัสประจำตัว 45010875
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ. ดลชัย สุขเจริญผล	
ระดับการศึกษา	ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	
	สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ	
ภาควิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ	
ปีการศึกษา	2548	

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับความเห็นชอบจากอาจารย์ที่ปรึกษาเป็นที่เรียบร้อยแล้ว

.....

(ผศ. ดลชัย สุขเจริญผล)

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การสังเคราะห์เสียงโดยคอมพิวเตอร์	
ชื่อนักศึกษา	นางสาวศิวพร สุกใส	รหัสประจำตัว 45010770
	นางสาวพิชญ์สินี เชาว์เหนือ	รหัสประจำตัว 45010789
	นายสุรวัตร บริบูรณ์โภคา	รหัสประจำตัว 45010875
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ. ดลชัย สุขเจริญผล	
ระดับการศึกษา	ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	
	สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ	
ภาควิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ	
ปีการศึกษา	2548	

บทคัดย่อ

โครงงานนี้เป็นการวิเคราะห์หาลักษณะรูปแบบของสัญญาณเสียง จากเครื่องดนตรีที่สนใจ ทั้งในเชิงเวลาและเชิงความถี่ เพื่อกำหนดตัวแปรเพื่อใช้ในการควบคุมลักษณะและคุณภาพของเสียงดนตรีที่ได้จากการประมาณด้วยโปรแกรมแมกซ์ – เอ็มเอสพี โดยอาศัยวิธีของดิจิตอลเอฟเอ็ม และการสังเคราะห์สัญญาณด้วยเทคนิคแอดดิทีฟในการสังเคราะห์เสียงขึ้นมา รวมทั้งนำเสนอเป็นเว็บไซต์ให้บุคคลทั่วไปได้ใช้งานผ่านทางอินเตอร์เน็ต เพื่อที่จะสามารถนำเสียงที่ได้ ไปประยุกต์ใช้กับงานดนตรี หรือเป็นเสียงประกอบได้ทันที โดยไม่ต้องบันทึกจากเครื่องดนตรีจริง และเพื่อใช้ประกอบในการเรียนการสอน ให้เข้าใจความสัมพันธ์ของตัวแปรของเสียงดนตรีกับตัวแปรทางสัญญาณไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Sound Synthesis by Computer	
Student	Ms. Siwaporn Suksai	ID. 45010770
	Ms. Pichsinee Chownue	ID. 45010789
	Mr. Surawat Borriboonpoka	ID. 45010875
Advisor	Asst. Prof. Donchai Sukchareonphol	
Graduate Level	Bachelor Degree of Information Engineering	
Department	Information Engineering	
Academic Year	2005	

ABSTRACT

This project involves an analysis of the sound pattern signals, in particular area of musical instruments. In order to examine this pattern, the "MAX/MSP program" has been utilized to determine parameters for controlling pattern and quality of sound signals using digital frequency modulation and additive synthesis methods for synthesizing the similar sounds. Furthermore, it can create the sound synthesis program, presented via website for public usage to implement this program in order to merge and mix all sound without recording from musical instruments. It also supports studying in relation between musical and signal parameters.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้คงไม่อาจสำเร็จไปได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความช่วยเหลือและความร่วมมือจากหลายฝ่ายด้วยกัน บุคคลที่ต้องกล่าวถึงเพราะมีความสำคัญที่ทำให้ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้ คือ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ดลชัย สุขเจริญผล อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ ที่ให้ความเอาใจใส่ ให้คำปรึกษา แนะนำ ตรวจแก้ไข และคอยช่วยเหลือตลอดเวลาทั้งหมดที่ทำปริญญานิพนธ์ จึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้อย่างยิ่ง

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูปภาพ	ช
สารบัญตาราง	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 แนวคิดและที่มาของปัญหา	1
1.2 จุดประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของโครงงาน	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 อุปกรณ์ที่ต้องใช้	2
บทที่ 2 ทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับโครงงาน	4
2.1 องค์ประกอบของเสียงดนตรี	4
2.1.1 ระดับเสียง (Pitch)	4
2.1.2 ความเข้มเสียง (Volume or Intensity)	7
2.1.3 สีสันเสียง (Timbre or Tone color)	7
2.1.4 คุณภาพเสียง (Tone Quality)	9
2.1.5 ความยาวเสียง (Duration)	9
2.2 การสังเคราะห์เสียงด้วยการมอดดูเลชั่นเชิงความถี่มอดดูเลชั่นเชิงความถี่ (Frequency Modulation)	10
2.2.1 การกระจายสมการสเปคตรัมของ FM	11
2.2.2 การสร้างสัญญาณ FM อย่างง่าย (Simple FM Generation)	11
2.2.3 สเปคตรัมของสัญญาณเสียง มอดดูเลชั่นเชิงความถี่	12
2.2.4 การคำนวณองค์ประกอบของความถี่ฮาร์โมนิค (Frequency of the Partials)	13
2.2.5 การคำนวณแอมพลิจูดของความถี่พาร์เชียล (Amplitude of the Partials)	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.2.6 สเปคตรัมของการสังเคราะห์เมื่อเวลาเปลี่ยนแปลง (Synthesizing Time-Varying Spectra)	18
2.2.7 กรอบของโทนเสียง (Sound Envelope)	18
2.2.8 อัตราส่วนความถี่สำหรับการออกแบบเสียง (Frequency Ratio and Sound Design)	21
2.2.9 รูปแบบการสร้างสัญญาณ FM แบบต่างๆ	22
2.3 การสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดิทีฟ (Additive Synthesis)	26
2.4 เทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบของเสียงดนตรี	27
2.4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของเสียงดนตรีในโดเมนของความถี่	28
2.4.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของเสียงดนตรี สำหรับการสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดิทีฟ	30
บทที่ 3 การออกแบบโครงงาน	31
3.1 โปรแกรมสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคมอดดูเลชั่นเชิงความถี่อย่างง่ายบน MAX/MSP	31
3.2 โปรแกรมสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดิทีฟบน MAX/MSP	37
บทที่ 4 การใช้งานและผลการทดลองการใช้โปรแกรม	42
4.1 การใช้งานโปรแกรมสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคมอดดูเลชั่นเชิงความถี่อย่างง่ายบน MAX/MSP	42
4.1.1 ขั้นตอนการทดลอง	42
4.1.2 ผลการทดลองใช้โปรแกรมสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคมอดดูเลชั่นเชิงความถี่อย่างง่าย (FM sound synthesis.exe)	47
4.1.3 ผลการทดลองปรับค่าพารามิเตอร์เพื่อเปรียบเทียบเสียงสังเคราะห์จากโปรแกรมสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคมอดดูเลชั่นเชิงความถี่อย่างง่าย	48
4.2 การใช้งานโปรแกรมสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดิทีฟบน MAX/MSP	59
4.2.1 ขั้นตอนการทดลอง	59
4.2.2 ผลการทดลองใช้โปรแกรมสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดิทีฟ (Additive sound synthesis.exe)	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
4.2.3 ผลการทดลองปรับค่าพารามิเตอร์เพื่อเปรียบเทียบเสียงสังเคราะห์จากโปรแกรมสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดิทีฟ	64
บทที่ 5 ปัญหาที่เกิดขึ้นและการพัฒนาโครงงาน	70
5.1 ปัญหาข้อจำกัดในการส่งผ่านค่าพารามิเตอร์ของโปรแกรมที่พัฒนาบนแมกซ์ – เอ็มเอสพี	70
5.2 ปัญหาความสมบูรณ์ของตัวอย่างเสียงสังเคราะห์	70
บรรณานุกรม	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

ภาพ	หน้า
รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับเสียงของตัวโน้ตและความถี่	5
รูปที่ 2.2 ความถี่ระดับเสียงของเปียโน	6
รูปที่ 2.3 ลักษณะของความกว้างคลื่นเสียง หรือความเข้มเสียง	7
รูปที่ 2.4 แหล่งกำเนิดเสียงที่ต่างกัน เช่น กีตาร์ และเปียโน	8
รูปที่ 2.5 ลักษณะสัญญาณเสียงที่เกิดจากแหล่งกำเนิดเสียงที่มีสีสันเสียงต่างกัน ในโดเมนเวลา (Time Domain) และโดเมนความถี่ (Frequency Domain)	8
รูปที่ 2.6 เปียโนสองตัว ที่อาจมีคุณภาพเสียงแตกต่างกัน	9
รูปที่ 2.7 เครื่องดนตรีกลองและฉลุ่ย ซึ่งมีความยาวเสียงต่างกัน	10
รูปที่ 2.8 บล็อกไดอะแกรมวงจรสร้างสัญญาณ FM อย่างง่าย	11
รูปที่ 2.9 ลักษณะการกระจายสเปคตรัมของสัญญาณ FM เมื่อใช้สัญญาณเสียงเพียง 1 สัญญาณ	13
รูปที่ 2.10 องค์ประกอบสเปคตรัมของสัญญาณ FM ในตัวอย่างที่ 1	15
รูปที่ 2.11 องค์ประกอบสเปคตรัมของสัญญาณ FM ในตัวอย่างที่ 2	17
รูปที่ 2.12 กรอบของโทนเสียง (Sound Envelope)	18
รูปที่ 2.13 ตัวอย่างของสเปคตรัมของเสียงทรัมเปต	19
รูปที่ 2.14 ตัวอย่างสเปคตรัมของเสียงคลาริเนต	20
รูปที่ 2.15 ตัวอย่างสเปคตรัมของเสียงออร์แกน	20
รูปที่ 2.16 ตัวอย่างสเปคตรัมของเสียงกลองไม้	20
รูปที่ 2.17 วงจรมอดดูเลชั่นเชิงความถี่มีสองความถี่พื้นฐานและความถี่มอดดูเลชั่นที่เป็นอิสระจากกัน	23
รูปที่ 2.18 วงจรมอดดูเลชั่นเชิงความถี่ที่มีความถี่มอดดูเลชั่นควบคุมสองความถี่พื้นฐาน	23
รูปที่ 2.19 วงจรมอดดูเลชั่นเชิงความถี่แบบความถี่พื้นฐานและสองความถี่มอดดูเลชั่นต่อขนานกัน	24
รูปที่ 2.20 วงจรมอดดูเลชั่นเชิงความถี่แบบหนึ่งความถี่พื้นฐานและสองความถี่มอดดูเลชั่นต่ออนุกรมกัน	25
รูปที่ 2.21 วงจรมอดดูเลชั่นเชิงความถี่แบบเซลฟ์มอดดูเลทติ้งแคริเออร์ (Self-modulating Carrier)	26
รูปที่ 2.22 วงจรสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดิทีฟ	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
รูปที่ 2.23 องค์ประกอบความถี่แต่ละช่วงเวลาของตัวอย่างเสียงทรัมเปต ที่วิเคราะห์ในโดเมนเวลาและความถี่โดยโปรแกรมสเปคตราแลป	28
รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมวงจรสังเคราะห์เสียงแบบมอดดูเลชั่นเชิงความถี่อย่างง่าย	31
รูปที่ 3.2 โปรแกรมสังเคราะห์สัญญาณเสียงด้วยเทคนิคมอดดูเลชั่นเชิงความถี่อย่างง่าย ใน MAX/MSP	32
รูปที่ 3.3 ส่วนควบคุมชนิดเครื่องดนตรีหรือปรับแต่งค่าเองและวงจรการทำงานภายใน	35
รูปที่ 3.4 ส่วนวงจรสังเคราะห์เสียงแบบมอดดูเลชั่นเชิงความถี่อย่างง่าย และวงจรการทำงานภายใน	36
รูปที่ 3.5 บล็อกไดอะแกรมวงจรสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดิทีฟ	37
รูปที่ 3.6 โปรแกรมสังเคราะห์สัญญาณเสียงด้วยเทคนิคแอดดิทีฟใน MAX/MSP	37
รูปที่ 3.7 ส่วนสร้างความถี่องค์ประกอบ ของวงจรสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดิทีฟ และวงจรการทำงานภายใน	40
รูปที่ 3.8 ส่วนเพิ่มองค์ประกอบของเสียงพาร์เชียลสูง และวงจรการทำงานภายใน	41
รูปที่ 4.1 โปรแกรม FM sound synthesis.exe	42
รูปที่ 4.2 ส่วนเลือกชนิดเครื่องดนตรีและโหมดปรับอิสระ	43
รูปที่ 4.3 ส่วนกำหนดความถี่พื้นฐาน อัตราส่วนความถี่และความยาวเสียง	43
รูปที่ 4.4 ส่วนกำหนดกรอบของดัชนีการมอดดูเลชั่น	44
รูปที่ 4.5 ส่วนควบคุมเรนจ์ของดัชนีการมอดดูเลชั่น	44
รูปที่ 4.6 ส่วนควบคุมกรอบของแอมพลิจูด	45
รูปที่ 4.7 อุปกรณ์ปรับระดับความดังเสียง	45
รูปที่ 4.8 อุปกรณ์เปิด – ปิด การเล่นเสียง	45
รูปที่ 4.9 ปุ่มเล่นเสียง	45
รูปที่ 4.10 ส่วนบันทึกเสียงและเล่นซ้ำ	46
รูปที่ 4.11 ส่วนกำหนดตัวอย่างเสียงล่วงหน้า	46
รูปที่ 4.12 ส่วนกำหนดและปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ของแต่ละเครื่องดนตรี	47
รูปที่ 4.13 พารามิเตอร์ของเครื่องดนตรีทองเหลืองที่กำหนดในโปรแกรมสังเคราะห์เสียง ด้วยเทคนิคมอดดูเลชั่นเชิงความถี่อย่างง่าย	48
รูปที่ 4.14 สเปคตรัมของเสียงสังเคราะห์ 4.1.3.1(A)	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
รูปที่ 4.15 สเปคตรัมของเสียงสังเคราะห์ 4.1.3.1(B)	50
รูปที่ 4.16 สเปคตรัมของเสียงสังเคราะห์ 4.1.3.2(A)	52
รูปที่ 4.17 สเปคตรัมของเสียงสังเคราะห์ 4.1.3.2(B)	52
รูปที่ 4.18 สเปคตรัมของเสียงสังเคราะห์ 4.1.3.3(A)	54
รูปที่ 4.19 สเปคตรัมของเสียงสังเคราะห์ 4.1.3.3(B)	54
รูปที่ 4.20 สเปคตรัมของเสียงสังเคราะห์ 4.1.3.4(A)	56
รูปที่ 4.21 สเปคตรัมของเสียงสังเคราะห์ 4.1.3.4(B)	56
รูปที่ 4.22 สเปคตรัมของเสียงสังเคราะห์ 4.1.3.5(A)	58
รูปที่ 4.23 สเปคตรัมของเสียงสังเคราะห์ 4.1.3.5(B)	58
รูปที่ 4.24 โปรแกรม Additive sound synthesis.exe	59
รูปที่ 4.25 ส่วนเลือกชนิดเครื่องดนตรีและโหมดปรับอิสระ	59
รูปที่ 4.26 ส่วนกำหนดความถี่พื้นฐาน	60
รูปที่ 4.27 ส่วนกำหนดความยาวเสียง	60
รูปที่ 4.28 ส่วนควบคุมองค์ประกอบของสัญญาณในแต่ละพาร์เชียล	60
รูปที่ 4.29 ส่วนกำหนดขนาดของแอมพลิจูดของสัญญาณที่สังเคราะห์ทุกพาร์เชียล	61
รูปที่ 4.30 ส่วนเพิ่มองค์ประกอบของเสียงพาร์เชียลสูง	61
รูปที่ 4.31 อุปกรณ์ปรับระดับความดังของเสียง	61
รูปที่ 4.32 อุปกรณ์เปิด – ปิด การเล่นเสียง	61
รูปที่ 4.33 ปุ่มเล่นเสียง	61
รูปที่ 4.34 ส่วนบันทึกเสียงและเล่นซ้ำ	62
รูปที่ 4.35 ส่วนกำหนดตัวอย่างเสียงล่วงหน้า	62
รูปที่ 4.36 ส่วนกำหนดและปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ของแต่ละเครื่องดนตรี	63
รูปที่ 4.37 พารามิเตอร์ของเครื่องดนตรีทองเหลืองที่กำหนดในโปรแกรมสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดิทีฟ	64
รูปที่ 4.38 สเปคตรัมของเสียงสังเคราะห์ 4.2.3.1(A)	66
รูปที่ 4.39 สเปคตรัมของเสียงสังเคราะห์ 4.2.3.1(B)	67
รูปที่ 4.40 สเปคตรัมของเสียงสังเคราะห์ 4.2.3.2(A)	69
รูปที่ 4.41 สเปคตรัมของเสียงสังเคราะห์ 4.2.3.2(B)	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 ค่าสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชั่นเบสเซล	16
ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่กำหนดในการทดลองสร้างเสียงสังเคราะห์ที่มีระดับเสียงต่างกัน ในโปรแกรมสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคมอดดูเลชั่นเชิงความถี่อย่างง่าย	49
ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ที่กำหนดในการทดลองสร้างเสียงสังเคราะห์ที่มีความยาวเสียงต่างกัน ในโปรแกรมสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคมอดดูเลชั่นเชิงความถี่อย่างง่าย	51
ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์ที่กำหนดในการทดลองสร้างเสียงสังเคราะห์ที่มีกรอบดัชนีการมอดดูเลชั่นต่างกันในโปรแกรมสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคมอดดูเลชั่นเชิงความถี่อย่างง่าย	53
ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์ที่กำหนดในการทดลองสร้างเสียงสังเคราะห์ที่มีกรอบของแอมพลิจูดต่างกันในโปรแกรมสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคมอดดูเลชั่นเชิงความถี่อย่างง่าย	55
ตารางที่ 4.5 พารามิเตอร์ที่กำหนดในการทดลองสร้างเสียงสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนความถี่ต่างกันในโปรแกรมสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคมอดดูเลชั่นเชิงความถี่อย่างง่าย	57
ตารางที่ 4.6 พารามิเตอร์ที่กำหนดในการทดลองสร้างเสียงสังเคราะห์ที่มีตำแหน่งขององค์ประกอบของสัญญาณในแต่ละพาร์เชียลต่างกันในโปรแกรมสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดิทีฟ	65
ตารางที่ 4.7 พารามิเตอร์ที่กำหนดในการทดลองสร้างเสียงสังเคราะห์ที่มีการเพิ่มและไม่เพิ่มองค์ประกอบพาร์เชียลสูงในโปรแกรมสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดิทีฟ	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 แนวคิดและที่มาของปัญหา

เสียงเป็นที่ยอมรับว่ามีอิทธิพลต่ออารมณ์ความรู้สึกของมนุษย์เราอย่างมาก โดยเฉพาะเสียงของเครื่องดนตรีที่เป็นการผสมกันของคลื่นเสียงหลากหลายรูปแบบ ซึ่งมีลักษณะเป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัวแตกต่างกันไปตามเครื่องดนตรีแต่ละชนิดโดยเฉพาะเครื่องดนตรีแบบอคูสติก (Acoustical Music Instruments)

ในสมัยก่อนนั้น การสร้างเสียงดนตรีขึ้นเพื่อการแสดงมหรสพ และกิจกรรมต่างๆ จะต้องอาศัยการประดิษฐ์คิดค้นเครื่องดนตรีชนิดนั้นๆ ขึ้นได้ก่อน และเล่นเครื่องดนตรีสดทุกครั้ง แม้ต่อมาจะมีเทคโนโลยีที่สามารถบันทึกเสียงเกิดขึ้น แต่ก็ยังมีความจำเป็นที่จะต้องเล่นเครื่องดนตรีสดเพื่อทำการบันทึกเสียงไว้เป็นต้นฉบับ (Master Tape) ก่อนที่จะนำไปใช้งาน

ปัจจุบัน เทคโนโลยีด้านเสียงได้มีการพัฒนาไปเป็นรูปแบบของสัญญาณดิจิตอล (Digital Signaling Formats) มากขึ้น ไม่เพียงแต่การบันทึก (Recording), ตัดต่อและแก้ไข (Edit and Equalized) เท่านั้น แต่ยังสามารถทำการสังเคราะห์เสียงดนตรี (Sound Synthesis) ขึ้นได้ โดยไม่จำเป็นต้องเล่นเครื่องดนตรีสด รวมไปถึงการสร้างเสียงสังเคราะห์อื่นๆ เช่น ซาวน์เอฟเฟ็กต์ประกอบภาพยนตร์หรือเสียงดนตรีสังเคราะห์ประกอบเกมส์คอมพิวเตอร์ ที่คำนึงถึงความซับซ้อนในการคำนวณที่ไม่มาก เพื่อประหยัดพื้นที่ของหน่วยความจำและใช้ความละเอียดน้อย (Low Resolution) เป็นต้น แต่ในการสังเคราะห์เสียงเครื่องดนตรีขึ้นนั้นจะต้องมีการวิเคราะห์เสียงที่ได้จากเครื่องดนตรีจริง เพื่อหาลักษณะของสัญญาณเสียงนั้นในเชิงเวลาและการแยกองค์ประกอบของฮาร์โมนิคของเสียงนั้น เพื่อนำมาสร้างเป็นรูปแบบของเสียง แล้วนำไปเป็นต้นแบบสำหรับการสังเคราะห์เสียง ทำให้การทำงานด้านดนตรีหรือเสียงประกอบต่างๆ สามารถลดขั้นตอนและเวลาได้

อย่างไรก็ตาม ในการสร้างจริงไม่ว่าเราสังเคราะห์เสียงดนตรีทั้งจากโปรแกรมซอฟแวร์หรือจากเครื่องสังเคราะห์เสียง (Synthesizer) เมื่อทำการออกแบบจะต้องคำนึงถึงโครงสร้างของสัญญาณไฟฟ้าซึ่งในความเป็นจริงเราจะต้องทำการประมาณสัญญาณไฟฟ้า (Distortion of Signals) แบบที่ต้องการขึ้นมา และไม่สามารถหลีกเลี่ยงความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่เราสังเคราะห์โดยการประมาณจากฟังก์ชั่นคณิตศาสตร์ได้ แต่เราสามารถประมาณค่าที่เราสามารถยอมรับได้และมีผลต่อการได้ยินน้อยที่สุด เช่น การประมาณโดยการสร้างตาราง, การปัดเศษ, การจำกัดความยาวของสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองความถี่ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้นฉบับของเสียงดนตรีที่มีใช้กันอยู่ ยังจำกัดอยู่แค่เฉพาะเครื่องดนตรีสากล แต่งานดนตรีในปัจจุบันมีความหลากหลายมากขึ้น โดยนิยมนำเอาเครื่องดนตรีท้องถิ่นของแต่ละประเทศเข้ามาผสมผสานกันเช่น World Music และ New Age ในประเทศไทย ได้มีการนำเอาเสียงเครื่องดนตรีไทยเข้ามาใช้ร่วมในงานดนตรีสากลเช่น วงฟองน้ำ, วงบางกอกอคูสติก และได้รับความสนใจมากขึ้นเรื่อยๆ สำหรับการวิเคราะห์และสร้างต้นฉบับในการสังเคราะห์เสียงเครื่องดนตรีไทยขึ้นนั้น จะทำให้ง่ายต่อการนำเสียงดนตรีไทยไปใช้ร่วมในงานด้านเสียงต่างๆ อีกทั้งยังส่งผลให้ดนตรีไทยได้รับการเผยแพร่มากยิ่งขึ้น

1.2 จุดประสงค์

1.2.1 เพื่อสร้างโปรแกรมสังเคราะห์เสียงดนตรีที่สามารถควบคุมลักษณะของเสียงได้ ด้วยการปรับค่าตัวแปรในรูปของสัญญาณไฟฟ้า

1.2.2 สร้างเครื่องมือในรูปของซอฟแวร์ เพื่อให้บุคคลทั่วไปสามารถใช้บริการสังเคราะห์เสียงผ่านทางเว็บไซต์ที่จัดทำขึ้นได้

1.2.3 สร้างตัวอย่างในการพัฒนาการสังเคราะห์เสียงดนตรี

1.3. ขอบเขตของโครงงาน

1.3.1 สามารถสังเคราะห์สัญญาณเสียงดนตรีขึ้นได้ โดยการเลือกรูปแบบของสัญญาณเสียงและปรับค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ ตามที่ได้จากการวิเคราะห์หรือตามความต้องการ

1.3.2 สามารถให้บริการโปรแกรมสังเคราะห์เสียงที่พัฒนาขึ้น แก่บุคคลทั่วไปผ่านทางเว็บไซต์

1.4. ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถสังเคราะห์เสียงดนตรีได้ 2 โครงสร้างคือ

1.4.1.1 โครงสร้างจากสัญญาณไม่เชิงเส้น

1.4.1.2 โครงสร้างจากการสังเคราะห์องค์ประกอบสเปคตราโดยตรง

1.4.2 บุคคลทั่วไปสามารถใช้บริการสังเคราะห์เสียงโดยใช้โปรแกรมที่พัฒนา ผ่านทางเว็บไซต์ที่จัดทำขึ้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 อุปกรณ์ที่ต้องใช้

1.5.1 ฮาร์ดแวร์

- เครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับพัฒนาโปรแกรมที่มีการเชื่อมต่อกับเน็ตเวิร์ค จำนวน 1 เครื่อง
- การ์ดเสียง (Sound Card) จำนวน 1 การ์ด
- เครื่องบันทึกเสียง จำนวน 1 เครื่อง

1.5.2 ซอฟต์แวร์

- MAX/MSP 4.5 เป็นโปรแกรมสำหรับพัฒนาโปรแกรมสังเคราะห์เสียง
- SpectraLab เป็นโปรแกรมช่วยในการวิเคราะห์สัญญาณเสียง
- Adobe Photoshop เป็นโปรแกรมช่วยในการออกแบบและพัฒนาเว็บไซต์
- Adobe ImageReady เป็นโปรแกรมที่ช่วยในการพัฒนาเว็บไซต์

1.5.3 อื่นๆ

- ตัวอย่างเสียงเครื่องดนตรีที่ต้องการสังเคราะห์เสียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับโครงงาน

2.1 องค์ประกอบของเสียงดนตรี

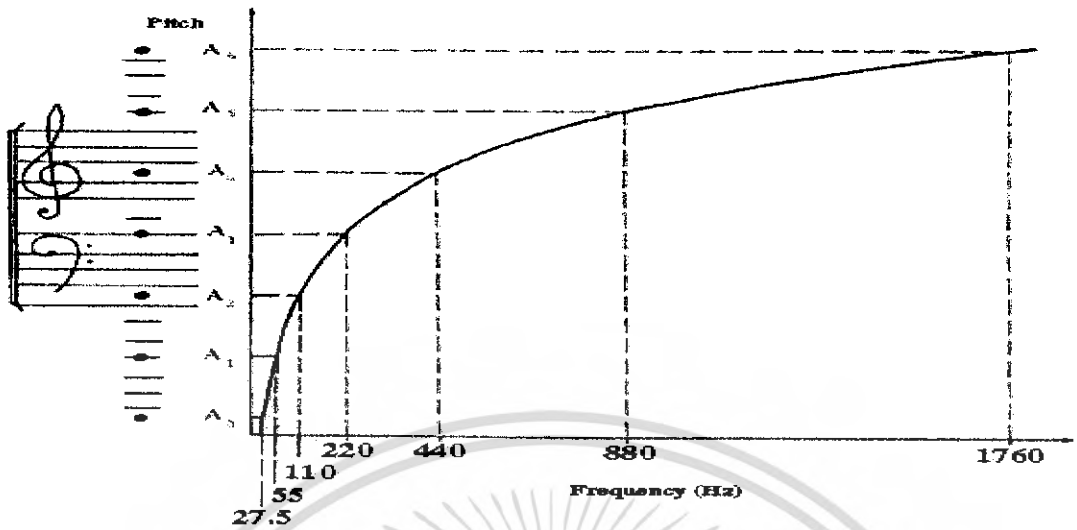
เสียงเกิดจากการสั่นสะเทือนของวัตถุ เมื่อวัตถุสั่นสะเทือนจะทำให้เกิดการอัดตัวและการขยายตัวของคลื่นเสียง ซึ่งถูกส่งไปยังหูโดยผ่านชั้นบรรยากาศ ดังนั้นเสียงที่ได้ยินก็เป็นผลจากการที่คลื่นเสียงถูกส่งจากวัตถุที่สั่นสะเทือนไปยังหูนั่นเอง เสียงที่ได้ยินจะเป็นเสียงสูง เสียงต่ำ เสียงดัง เสียงเบา หรือมีคุณภาพเสียงในลักษณะต่างๆ อย่างไรนั้น จะขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดเสียงและจำนวนรอบต่อวินาทีของการสั่นสะเทือนที่ทำให้เกิดเสียงนั้น เสียงแต่ละเสียงมีคุณสมบัติซึ่งสามารถแยกแยะ ได้ดังนี้

2.2.1 ระดับเสียง (Pitch)

ระดับเสียง หมายถึง เสียงสูง เสียงต่ำ เราสามารถเปรียบเทียบเสียง 2 เสียงได้ว่า เสียงไหนมีระดับสูงกว่า และเสียงไหนมีระดับต่ำกว่าโดยการฟัง ถ้าระดับเสียงต่างกันมากก็จะฟังง่าย ถ้าต่างกันเพียงเล็กน้อยก็จะฟังยากกว่า

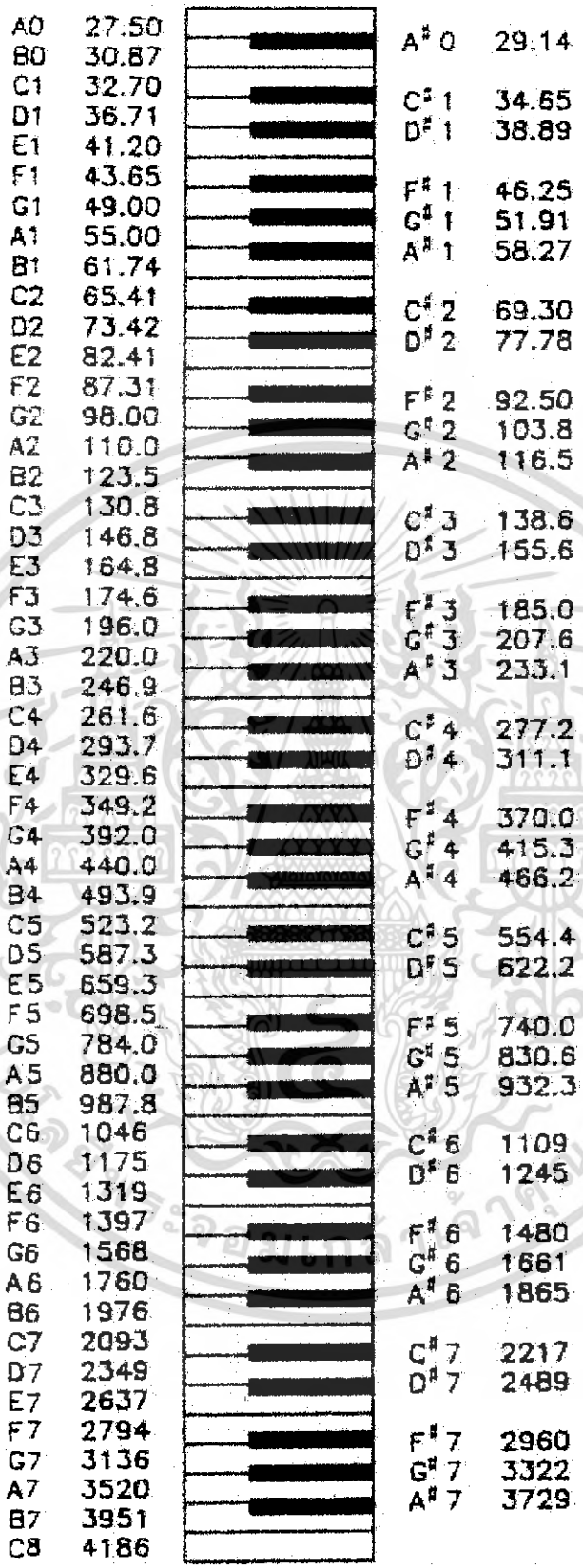
ระดับเสียง เกิดจากความถี่ของการสั่นสะเทือนของวัตถุ หรืออาจกล่าวได้ว่า ความถี่ของการสั่นสะเทือนเป็นตัวกำหนดระดับเสียง วัตถุที่สั่นสะเทือนเร็วกว่าทำให้เกิดระดับเสียงสูงกว่า ในขณะที่วัตถุที่สั่นสะเทือนช้ากว่าทำให้เกิดระดับเสียงต่ำกว่า ความถี่ซึ่งเป็นตัวกำหนดระดับเสียงได้มาจากการวัดความสั่นสะเทือนของวัตถุ โดยมีหน่วยเป็นรอบต่อวินาที วัตถุที่สั่นสะเทือนมากกว่าจะมีความถี่มากกว่าทำให้เกิดระดับเสียงสูงกว่า ถ้าความถี่มากขึ้นเท่าตัวระดับเสียงจะสูงขึ้น 1 ช่วงคู่แปด (Octave) เช่น โน้ตที่มีความถี่ 220 รอบต่อวินาที จะมีระดับเสียงสูงกว่าโน้ตที่มีความถี่ 110 รอบต่อวินาทีอยู่ 1 ช่วงคู่แปด และในทำนองเดียวกันกรณีที่ความถี่น้อยลง 1 เท่าตัว ระดับเสียงจะต่ำลง 1 ช่วงคู่แปด ฉะนั้นโน้ตที่มีความถี่ 440 รอบต่อวินาที จะมีระดับเสียงต่ำกว่าโน้ตที่มีความถี่ 880 รอบต่อวินาทีเป็นระยะ 1 ช่วงคู่แปด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับเสียงของตัวโน้ตและความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

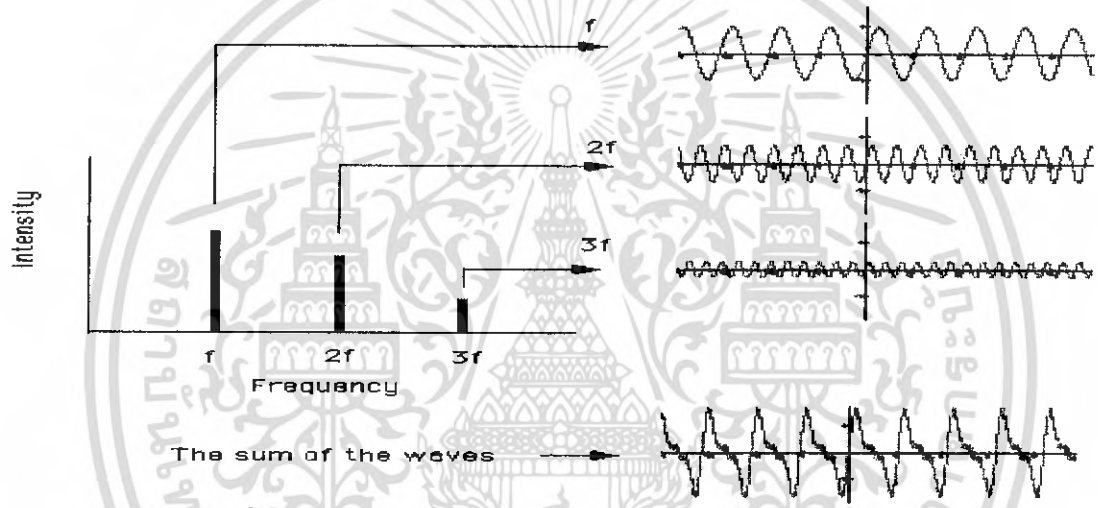


รูปที่ 2.2 ความถี่ระดับเสียงของเปียโน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 ความเข้มเสียง (Volume or Intensity)

ความเข้มเสียง หมายถึง เสียงเบา เสียงดัง ความเข้มเสียงเกิดจากแรงสั่นสะเทือนของวัตถุที่เป็นแหล่งกำเนิดเสียง ถ้าวัตถุสั่นสะเทือนมากเสียงจะดัง และในทางตรงกันข้ามถ้าวัตถุสั่นสะเทือนน้อยเสียงก็จะเบา ความเข้มเสียงขึ้นอยู่กับความแรงที่ส่งจากแหล่งกำเนิดเสียงไปยังหู เวลาที่เราตะโกนเส้นเสียงจะสั่นสะเทือนมากทำให้เกิดเสียงดัง ถ้าเราตีกลองโดยออกแรงมากขึ้นหน้ากลองจะสั่นมากขึ้นทำให้เสียงกลองดังขึ้น ความเข้มเสียงวัดได้จากความกว้างคลื่นเสียง (Amplitude) ถ้าคลื่นเสียงยิ่งกว้าง เสียงก็จะยิ่งดัง ในขณะที่เสียงเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศนั้นความเข้มเสียงจะน้อยลงตามลำดับ กล่าวคือ เสียงจะเบาลง ดังนั้นระยะทางที่เสียงต้องเดินทางก็จะมีผลต่อความเข้มเสียงด้วย



รูปที่ 2.3 ลักษณะของความกว้างคลื่นเสียง หรือความเข้มเสียง

2.1.3 สีสันเสียง (Timbre or Tone Color)

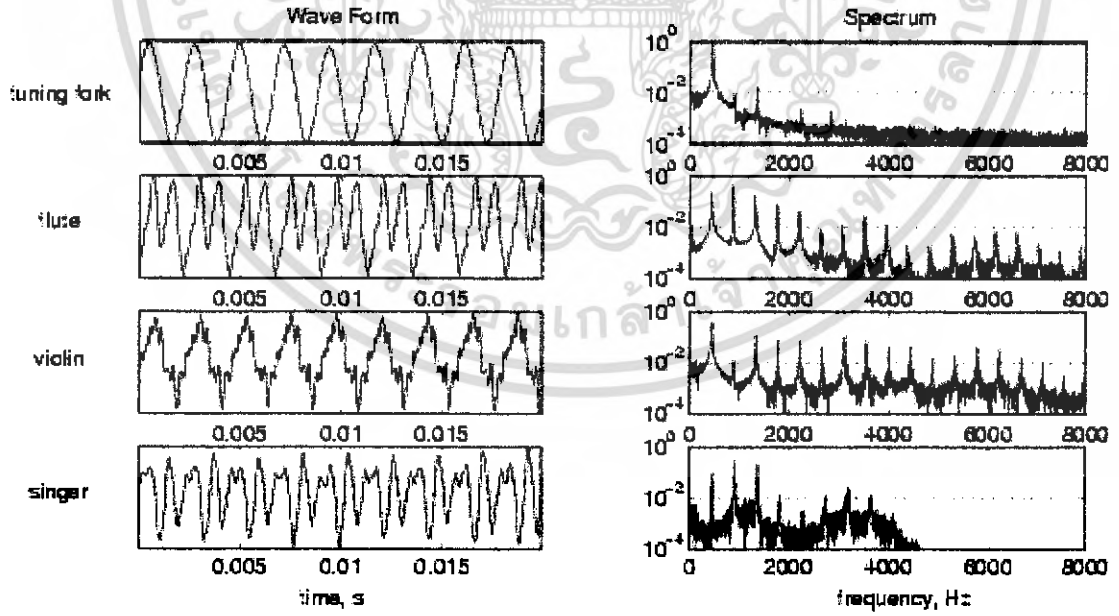
สีสันเสียง หมายถึง เสียงที่มาจากแหล่งกำเนิดเสียงต่างๆ กัน เช่น เสียงเปียโน เสียงกีต้าร์ เสียงลม เสียงร้อง ฯลฯ คลื่นเสียงที่เกิดจากแหล่งที่มีสีสันเสียงต่างกันจะมีรูปร่างลักษณะต่างกัน เช่น คลื่นเสียงของไวโอลิน จะมีรูปร่างต่างจากคลื่นเสียงของทรัมเป็ต สื่อดนตรีที่ต่างกันจะทำให้เกิดสีสันเสียงต่างกัน สื่อดนตรี ก็คือ เครื่องดนตรีหรือเส้นเสียงในกรณีของการขับร้อง เครื่องดนตรีต่างชนิดกันจะทำให้เกิดสีสันเสียงต่างกัน เพลงเดียวที่บรรเลงโดยเครื่องดนตรีต่างชนิดกันจะทำให้เกิดรสชาติต่างกันเพราะสีสันเสียงต่างกัน

สิ่งสำคัญที่สุดที่เป็นตัวกำหนดเสียง ก็คือ พาร์เชียล (Partials) ซึ่งเป็นระดับเสียงจำนวนหนึ่ง ที่ประกอบกันเป็นเสียงที่เราได้ยิน เพราะฉะนั้น จำนวนระดับเสียงของพาร์เชียล ความเข้มเสียงของพาร์เชียล และการกระจายของพาร์เชียล จะเป็นตัวกำหนดสีสันเสียงทั้งสิ้น เสียงที่มีจำนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พาร์เชียลน้อยจะมีเสียงใส เช่น เสียงของฟรุตที่เล่นโน้ตสูงๆ ส่วนเสียงที่มีจำนวนพาร์เชียลมาก จะมีเสียงที่หนักแน่นกว่า เช่น เสียงของ เชลโล เสียงที่ไม่มีจำนวนพาร์เชียลเลย หรือ เสียงบริสุทธิ์ เกิดขึ้นได้จากเครื่องดนตรีไฟฟ้า และจะเป็นช่วงเสียงสูงมากๆ ที่ไม่ไพเราะสำหรับหูคนทั่วไป

รูปที่ 2.4 แหล่งกำเนิดเสียงที่ต่างกัน เช่น กีตาร์ และเปียโน



รูปที่ 2.5 ลักษณะสัญญาณเสียงที่เกิดจากแหล่งกำเนิดเสียงที่มีสีสันเสียงต่างกัน ในโดเมนเวลา (Time Domain) และโดเมนความถี่ (Frequency Domain)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 คุณภาพเสียง (Tone Quality)

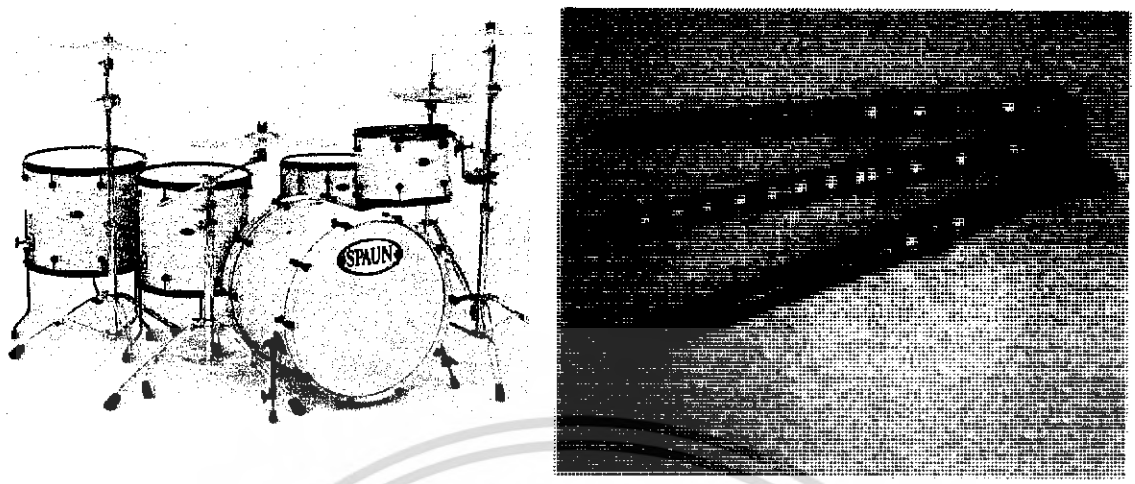
คุณภาพเสียง หมายถึง เสียงดีมาก ดีน้อย เช่น เสียงโน้ตตัวเดียวกันที่เกิดจากเปียโน 2 ตัว จะมีคุณภาพเสียงไม่เหมือนกันทีเดียว แม้จะมีระดับเสียง ความเข้มเสียง และสีสันเสียงเหมือนกันทุกประการ เสียงร้องหรือเสียงพูดของคนก็เช่นเดียวกัน บางคนมีคุณภาพเสียงที่ทุ้มนุ่มนวล ในขณะที่อีกคนหนึ่งมีคุณภาพเสียงที่ก้องกังวาน ในการปฏิบัติเครื่องดนตรี นักดนตรีต้องคำนึงอย่างมากถึงคุณภาพเสียง เพื่อให้ได้น้ำเสียงที่ไพเราะน่าฟัง

รูปที่ 2.6 เปียโนสองตัว ที่อาจมีคุณภาพเสียงแตกต่างกัน

2.1.5 ความยาวเสียง (Duration)

ความยาวเสียง เป็นพื้นฐานของดนตรีที่เกี่ยวข้องกับระยะเวลา เสียงแต่ละเสียงที่เกิดขึ้นต้องมีระยะเวลาซึ่งทำให้เกิดเสียงยาว เสียงสั้น เสียงไม่ว่าจะมีระดับเสียงที่แน่นอนหรือไม่ ก็ต้องมีความยาวเข้ามาเกี่ยวข้อง ความยาวเสียงเป็นที่มาของจังหวะ ซึ่งมีส่วนสำคัญอย่างยิ่งในดนตรีของทุกชาติทุกภาษา ความยาวเสียงในที่นี้ หมายรวมถึง ความเงียบของตัวหยุดด้วย เนื่องจากดนตรีเป็นผลของกระบวนการเกิดเสียง (Sound) สลับกับความเงียบ (Silence) ไม่ว่าจะเป็นเสียงหรือความเงียบ ย่อมต้องมีความยาวหรือระยะเวลาทั้งสิ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 เครื่องดนตรีกลองและขลุ่ย ซึ่งมีความยาวเสียงต่างกัน

2.2 การสังเคราะห์เสียงด้วยการมอดดูเลชั่นเชิงความถี่ (Frequency Modulation)

การสังเคราะห์เสียงด้วยกระบวนการมอดดูเลชั่นเชิงความถี่ เริ่มมีตั้งแต่ คศ. 1960 โดยผู้ประพันธ์ John Chowning[1] ณ มหาวิทยาลัย Stanford กระบวนการมอดดูเลชั่นเชิงความถี่มีพื้นฐานมาจากการส่งสัญญาณวิทยุในระบบ FM การทดลองแรกของ John คือใช้ สัญญาณเสียง (Audio Signal) เป็นมอดดูเลเตอร์ (Modulator) ไปควบคุมความถี่และฮาร์โมนิคของความถี่พื้นฐาน (Fundamental Frequency) เพื่อที่จะผลิตเสียงออกมา การทดลองต่อมา เมื่อใช้เสียงที่เป็นสัญญาณความถี่ต่ำ (Low Frequency Signal) หรือเสียงที่หูคนได้ยินที่ความถี่ 20 เฮิร์ตมาเป็นมอดดูเลเตอร์ จะได้เสียงที่มีความเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ แต่ถ้านำเสียงที่มีความถี่มากกว่า 20 เฮิร์ตมาเป็นมอดดูเลเตอร์ เปรียบเสมือนการเพิ่มสเปคตรัมของความถี่พื้นฐาน

การมอดดูเลชั่นเชิงความถี่ คือ การมอดดูเลชั่นที่ความถี่ของสัญญาณความถี่พื้นฐานและฮาร์โมนิคเปลี่ยนแปลงตามขนาดของสัญญาณความถี่เสียง โดยมีรูปสมการทั่วไปดังนี้

$$x(t) = A.\sin[\theta(t)] \quad \text{(Volt)} \qquad (2.1.1)$$

$$\theta(t) = [2\pi f_c t + I.\sin(2\pi f_m t)] \qquad (2.1.2)$$

$$f(t) = \frac{d\theta}{dt} \qquad (2.1.3.1)$$

$$= 2\pi f_c + 2\pi I f_m \cos(2\pi f_m t) \qquad (2.1.3.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $\theta(t)$ = มุมที่เปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง (radian)

f(t) = อัตราการเปลี่ยนแปลงมุมต่อเวลา (radian/sec)

f_c = ความถี่พื้นฐาน (Hz.)

f_m = ความถี่มอดดูเลชั่น (Hz.)

π = ค่าคงที่ 3.142

A = แอมพลิจูดของสัญญาณ (Volt)

I = อัตราการมอดดูเลชั่น

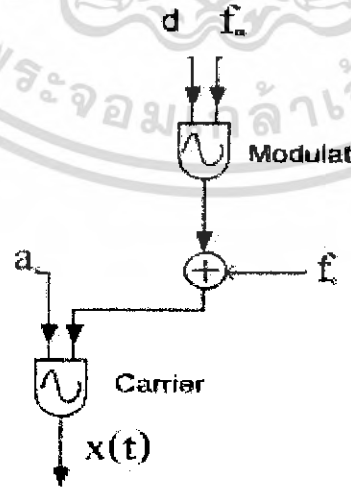
2.2.1 การกระจายสมการสเปคตรัมของ FM

เมื่อนำสัญญาณที่ได้จากการมอดดูเลชั่นเชิงความถี่ตามสมการที่ 2.1.1 มาวิเคราะห์แยกองค์ประกอบสเปคตรัมของสัญญาณจะได้สมการดังนี้

$$x(t) = \sin[\theta(t)] = \sin[2\pi f_c t + I\sin(2\pi f_m t)]$$
$$= J_0(I)\sin(2\pi f_c t) + J_1(I)\sin(2\pi f_c t + 2\pi f_m t) - J_1(I)\sin(2\pi f_c t - 2\pi f_m t) + J_2(I)\sin(2\pi f_c t + 2*2\pi f_m t) + J_2(I)\sin(2\pi f_c t - 2*2\pi f_m t) + J_3(I)\sin(2\pi f_c t + 3*2\pi f_m t) - J_3(I)\sin(2\pi f_c t - 3*2\pi f_m t) \quad (2.2)$$

2.2.2 การสร้างสัญญาณ FM อย่างง่าย (Simple FM Generation)

การสร้างสัญญาณ FM อย่างง่ายดังสมการที่ 2.1.1 นั้น เราสามารถแทนได้ด้วยบล็อกไดอะแกรมย่อยดังรูปที่ 2.8 ซึ่งประกอบด้วยบล็อกย่อย 3 บล็อกดังนี้



รูปที่ 2.8 บล็อกไดอะแกรมวงจรสร้างสัญญาณ FM อย่างง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บล็อกแรกเป็นมอดดูเลเตอร์ ซึ่งจะรับสัญญาณความถี่มอดดูเลชั่นและค่าความถี่เบี่ยงเบนป้อนเข้ามา และให้สัญญาณมอดดูเลชั่นออกมาแล้วจะป้อนเข้าสู่บล็อกที่สอง ซึ่งจะนำสัญญาณมอดดูเลชั่นไปรวมกับสัญญาณความถี่พื้นฐานส่งต่อไปยังบล็อกที่สาม คือ แคริเออร์ (Carrier) ที่บล็อกนี้จะรับค่าแอมพลิจูดและสัญญาณที่มาออกมาจากบล็อกที่สอง โดยค่าแอมพลิจูดที่ป้อนเข้าจะคือ แอมพลิจูดของสัญญาณมอดดูเลชั่นเชิงความถี่ คือสัญญาณ x(t) ในรูปที่ 2.8

จากรูปที่ 2.8 ค่าต่างๆ อธิบายได้ดังนี้

d = ความถี่แปรผัน (Frequency Deviation) หรือแอมพลิจูดของมอดดูเลเตอร์

f_m = ความถี่มอดดูเลเตอร์(Modulator Frequency)

a_c = แอมพลิจูดคลื่นพาห์(Fundamental Amplitude)

f_c = ความถี่พื้นฐาน (Fundamental Frequency)

การเปลี่ยนแปลงความถี่ของคลื่นพาห์ขึ้นกับ ความถี่แปรผัน และความถี่มอดดูเลเตอร์ดังนี้

- ถ้าความถี่มอดดูเลเตอร์เป็นค่าคงที่ แล้วความถี่แปรผันเพิ่มขึ้น เอาท์พุตของ Carrier จะมีคาบเวลา (Period) กว้างขึ้น หรือความถี่น้อยลง ตามสมการ $f = 1/T$

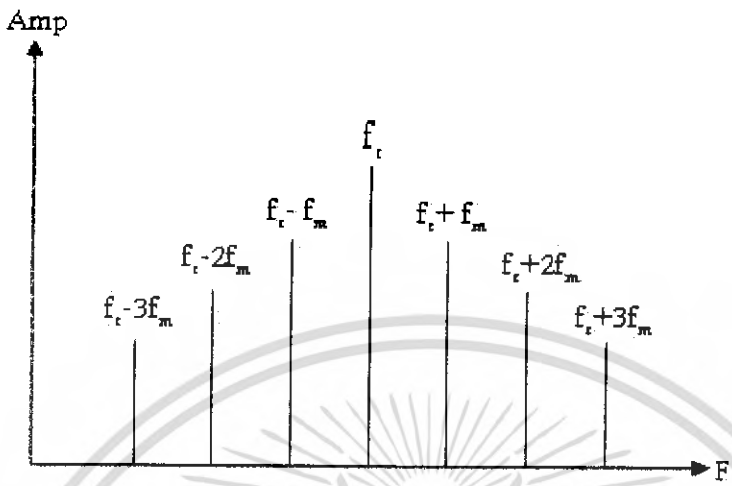
- ถ้าความถี่มอดดูเลเตอร์เพิ่มขึ้น แล้วความถี่แปรผันคงที่ เอาท์พุตของ Carrier จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่มากขึ้น

2.2.3 สเปคตรัมของสัญญาณเสียง มอดดูเลชั่นเชิงความถี่

ในการมอดดูเลชั่นเชิงความถี่ รูปแบบของคลื่นพาห์และคลื่นมอดดูเลชั่นที่นิยมใช้คือ Sine Wave โดยทั่วไปไม่จำเป็นต้องใช้รูปแบบของคลื่นแบบอื่น เช่น Pulse หรือ Sawtooth มาใช้ในการสร้างเสียงให้มีลักษณะแตกต่างไปจากเสียงของเครื่องดนตรีทั่วไป ซึ่งนับเป็นข้อดีอีกข้อหนึ่งของวิธีการสังเคราะห์เสียงด้วยการมอดดูเลชั่นเชิงความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 การคำนวณองค์ประกอบของความถี่ฮาร์โมนิค (Frequency of the Partials)



รูปที่ 2.9 ลักษณะการกระจายสเปคตรัมของสัญญาณ FM
เมื่อใช้สัญญาณเสียงเพียง 1 สัญญาณ

สเปคตรัมของเสียงที่เกิดจากการมอดดูเลชั่นเชิงความถี่ประกอบด้วย ความถี่คลื่นพาห์คงที่ และจำนวนฮาร์โมนิค (Harmonic) ซึ่งห่างกันเท่ากับความถี่มอดดูเลเตอร์ (f_m) ในทุกๆ ฮาร์โมนิค โดยฮาร์โมนิคที่ไม่ใช่ความถี่คลื่นพาห์จะเรียกว่า ความถี่ข้างเคียง (Sideband Frequency) หาได้จากสมการ

$$\text{Sideband Frequency} = f_c \pm kf_m \qquad (2.3)$$

; k = จำนวนเต็มที่มากกว่า 0

ตามทฤษฎีของการมอดดูเลชั่นเชิงความถี่มีอัตราการมอดดูเลชั่น(Modulation Index = I) ควบคุมจำนวนความถี่ข้างเคียง โดยที่ อัตราการมอดดูเลชั่นเป็นอัตราส่วนระหว่าง ความถี่แปรผันกับความถี่มอดดูเลเตอร์ตามสมการ I = d/m โดยที่จำนวนคู่ของความถี่ข้างเคียงเท่ากับอัตราการมอดดูเลชั่นบวกหนึ่ง

2.2.5 การคำนวณแอมพลิจูดของความถี่พาร์เชียล (Amplitude of the Partials)

ในการสังเคราะห์เสียงด้วยวิธีมอดดูเลชั่นเชิงความถี่ โดยปกติแล้วความถี่คลื่นพาห์ (Carrier Frequency; f_c) จะเป็นส่วนสำคัญที่จะระบุระดับเสียง (Pitch) ของเสียงสังเคราะห์ที่จะได้จากกระบวนการสังเคราะห์เสียง วิศวกรเสียง (Sound Engineer) จะเรียกความถี่นี้ว่า *ความถี่พื้นฐาน (Fundamental Frequency)*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งนี้ ในการสังเคราะห์เสียงด้วยวิธีมอดดูเลชั่นเชิงความถี่ มีบางกรณีที่ความถี่พาห์ (f_c) ไม่ได้เป็นส่วนที่จะระบุระดับเสียง (Pitch) ได้โดยตรง ซึ่งในการคำนวณนี้จะไม่ได้กล่าวถึง

การคำนวณแอมพลิจูดของความถี่พาร์เชียล จะใช้ฟังก์ชันเบสเซล (Bessel Function) ในการหาค่าสัมประสิทธิ์แอมพลิจูดของแต่ละฮาร์โมนิค

ฟังก์ชันเบสเซล เป็นฟังก์ชันที่แสดงสัมประสิทธิ์แอมพลิจูดของแต่ละฮาร์โมนิค เกิดจากการกระจายสเปคตรัมความถี่พื้นฐานออกไปยังความถี่ข้างเคียง (Sideband Frequency or Partials) โดยเป็นได้ทั้งค่าบวกและค่าลบ ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าของอัตราการมอดดูเลชั่น (Modulation Index; I) โดย

$J_0(I)$ แสดงสัมประสิทธิ์แอมพลิจูดของ f_c

$J_1(I)$ แสดงสัมประสิทธิ์แอมพลิจูดของ $f_c \pm f_m$

$J_n(I)$ แสดงสัมประสิทธิ์แอมพลิจูดของ $f_c \pm nf_m$

(สัมประสิทธิ์เบสเซลฟังก์ชัน แสดงในตารางที่ 2.1)

ตัวอย่าง 1 การวิเคราะห์สเปคตรัมของสัญญาณ FM อย่างง่าย

กำหนดให้ $f_m(t) = \cos(2\pi * 1000t)$; $I = 1$

$f_c(t) = 10\sin(2\pi * 500 * 10^3 t)$

$A_c = 10$

$f_m = 1$ Hz.

$f_c = 500$ Hz.

$n = 0, 1, 2, 3$

จากตาราง Bessel Function (ตารางที่ 2.1) ;

$I = 1,\ J_0 = 0.77,\ J_1 = 0.44,\ J_2 = 0.11,\ J_3 = 0.02$

$$\text{Spectrum} = A_c[\sum_{i=0}^{n} J_n(f_c \pm nf_m)]$$

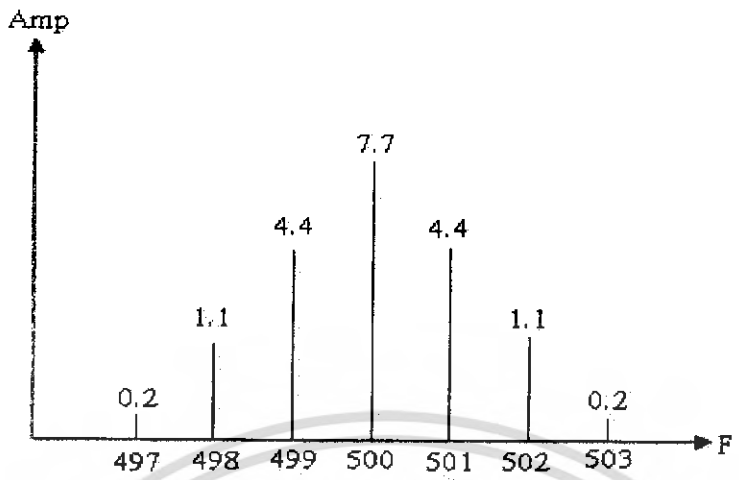
จะได้ $AJ_0 = 10*0.77 = 7.7$

$AJ_1 = 10*0.44 = 4.4$

$AJ_2 = 10*0.11 = 1.1$

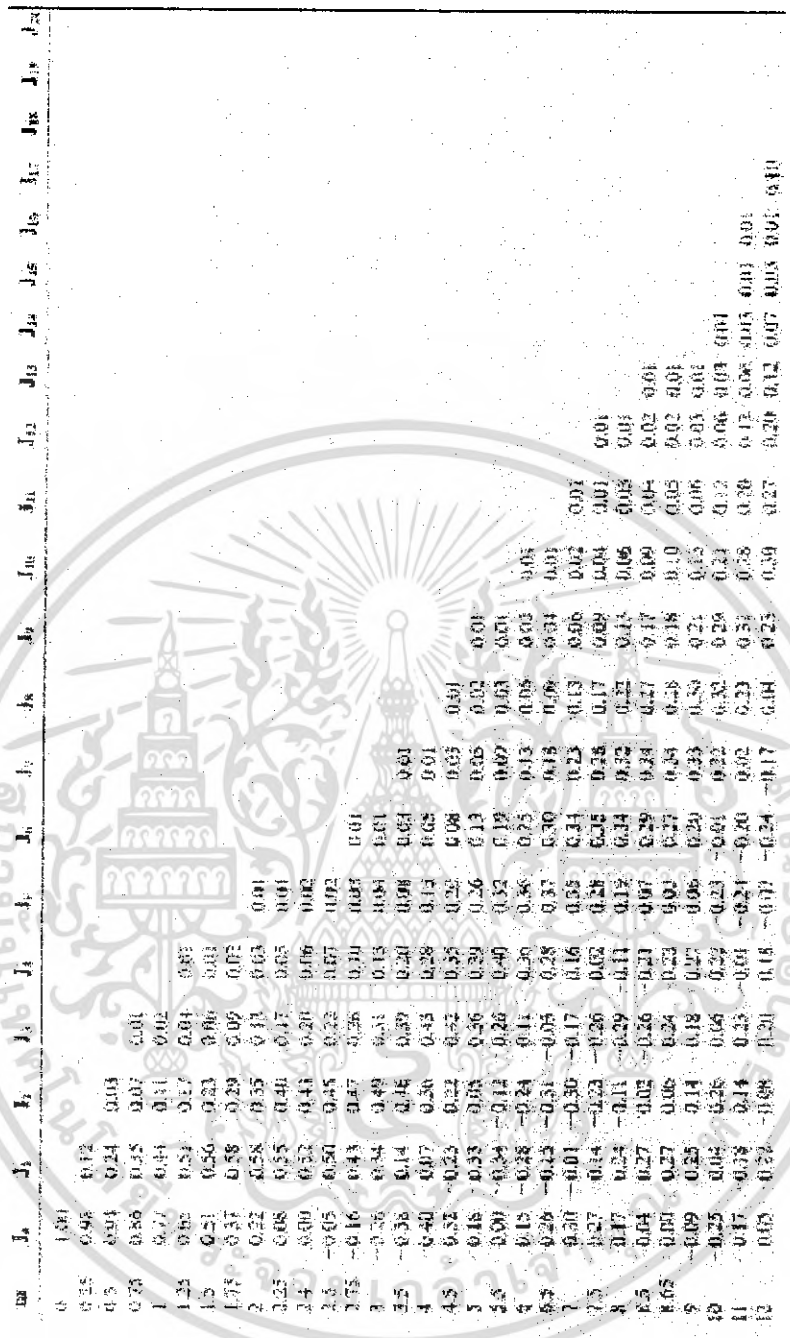
$AJ_3 = 10*0.02 = 0.2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 องค์ประกอบสเปคตรัมของสัญญาณ FM ในตัวอย่าง 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตารางที่ 2.1 ค่าสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชั่นเบสเซล

นอกจากนี้ การวิเคราะห์แอมพลิจูดของความถี่พาร์เชียล ในการสังเคราะห์เสียงด้วยวิธีมอดดูเลชั่นเชิงความถี่ เบื้องต้นมีข้อพิจารณาสองประการ คือ

1. จากสัมประสิทธิ์ฟังก์ชันเบสเซล แสดงให้เห็นว่า บางพาร์เชียลอาจมีสัมประสิทธิ์เป็นค่าลบ ซึ่งในความเป็นจริงแอมพลิจูดไม่สามารถเป็นค่าลบ (Negative) ได้ ความหมายของค่าลบในกรณีนี้คือ การกลับเฟสของพาร์เชียลหรือฮาร์โมนิคนั้นๆ (Out of Phase)

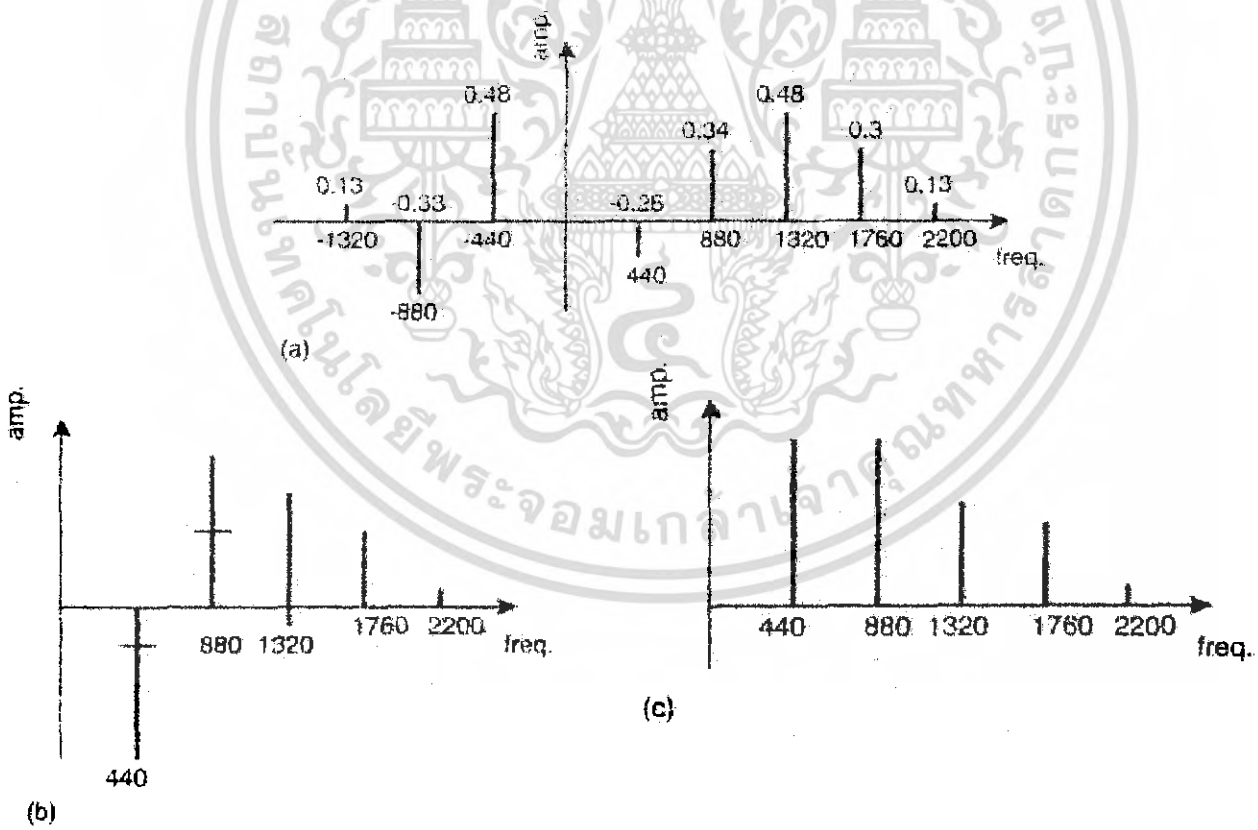
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ในกรณีที่ไม่มีความถี่ฮาร์โมนิคเดียวกันเกิดขึ้น จากการที่มีการเล่น (Play) เสียงอื่นอยู่ในเวลาเดียวกัน ปรากฏการณ์นี้จะไม่ส่งผลกระทบใดๆ ต่อสัญญาณเสียงในฮาร์โมนิคนั้นๆ แต่หากมีฮาร์โมนิคเดียวกันเกิดขึ้นพร้อมกัน แอมพลิจูดอาจเสริมกันหรือหักล้างกันเอง ซึ่งจะขึ้นอยู่กับเฟสว่าแตกต่างกันเท่าไร

2. ปรากฏการณ์เมื่อความถี่คลื่นพาห์มีค่าต่ำแต่อัตราการมอดดูเลชั่นมีค่าสูง กรณีนี้การมอดดูเลชั่นอาจทำให้เกิดความถี่ข้างเคียง (Sideband) หรือพาร์เชียล ในช่วงความถี่ที่เป็นลบ (Negative Frequency) ในการคำนวณแอมพลิจูดของพาร์เชียลจะต้องทำการกลับพาร์เชียลที่อยู่ในช่วงความถี่ที่เป็นลบมาอยู่ในช่วงความถี่ที่เป็นบวก (Positive Frequency) โดยยึดแกน 0 เฮิร์ต เป็นหลัก โดยพาร์เชียลที่กลับมาแล้ว จะมีเฟสตรงกันข้ามกับของเดิม จากนั้นหากมีพาร์เชียลที่ตรงกันอยู่ จะต้องทำการรวมค่าแอมพลิจูดใหม่ ดังแสดงตามตัวอย่างที่ 2

ตัวอย่าง 2 การวิเคราะห์สัญญาณ FM เมื่อความถี่หลัก $f_c = 440$ Hz. , ความถี่สัญญาณเสียง $f_m = 440$ Hz. และค่าดัชนีการมอดดูเลท $I = 3$



รูปที่ 2.11 องค์ประกอบสเปคตรัมของสัญญาณ FM ในตัวอย่างที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
62582

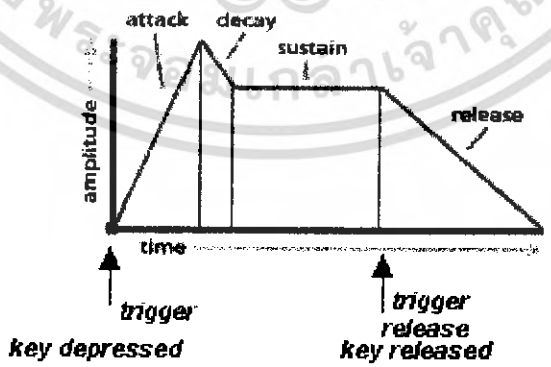
2.2.6 สเปคตรัมของการสังเคราะห์เมื่อเวลาเปลี่ยนแปลง (Synthesizing Time-Varying Spectra)

ส่วนสำคัญในการสังเคราะห์เสียงอีกส่วน คือ ความสามารถในการควบคุมองค์ประกอบสเปคตรัมของเสียงให้แปรเปลี่ยนได้ในแต่ละช่วงเวลาของความยาวเสียง (Duration) ต่อการเล่นเครื่องดนตรีในหนึ่งตัวโน๊ต เนื่องจากแอมพลิจูดของพาร์เชียลต่างๆ ที่กำเนิดจากเครื่องดนตรีอคูสติก จะมีลักษณะที่แปรเปลี่ยนไปภายในระยะความยาวเสียง ซึ่งลักษณะการแปรเปลี่ยนที่แตกต่างกันนี้ จะเป็นส่วนหนึ่งที่ช่วยในการสร้างเอกลักษณ์ของสีสันของเสียง (Timbre) จากเครื่องดนตรีแต่ละชนิดให้แตกต่างกันออกไป

การสังเคราะห์เสียงด้วยวิธีการมอดดูเลชั่นเชิงความถี่ มีจุดเด่นกว่าวิธีอื่น คือสามารถจะปรับพารามิเตอร์เพื่อสร้างเสียงที่มีแอมพลิจูดของพาร์เชียลต่างๆ ให้มีลักษณะแปรเปลี่ยนไปในแต่ละช่วงเวลาของความยาวเสียงได้ โดยการกำหนดอัตราการมอดดูเลชั่น (Modulation Index) ในแบบกรอบของโทนเสียง (Sound Envelope) ซึ่งมีค่าแปรเปลี่ยนไปในแต่ละระยะเวลา ภายในช่วงความยาวเสียง

2.2.7 กรอบของโทนเสียง (Sound Envelope)

ในเทคนิคการสังเคราะห์เสียงด้วยการมอดดูเลชั่นเชิงความถี่ เพื่อให้ได้เสียงใกล้เคียงกับเครื่องดนตรีจริง เราสามารถกำหนดอัตราการมอดดูเลชั่นให้มีการเปลี่ยนแปลงค่ามากน้อยได้ในแต่ละช่วงเวลาของความยาวเสียง โดยอาศัยการประมาณจากการวิเคราะห์สเปคตรัมของเสียงเครื่องดนตรีจริงแต่ละชนิด ลักษณะกรอบของโทนเสียงทั่วๆ มีรูปร่างแบบเอดีเอสอาร์ (ADSR shape) ดังรูปที่ 2.12 ไปสามารถแบ่งออกเป็น 4 ส่วนได้ดังนี้



รูปที่ 2.12 กรอบของโทนเสียง (Sound Envelope)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. *ช่วงแอทแท็ค (Attack)* เป็นช่วงที่เสียงมีการเปลี่ยนแปลงทางขนาดในรูปของสัญญาณไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างกระทันหัน (Transient) ในช่วงเวลาอันรวดเร็ว

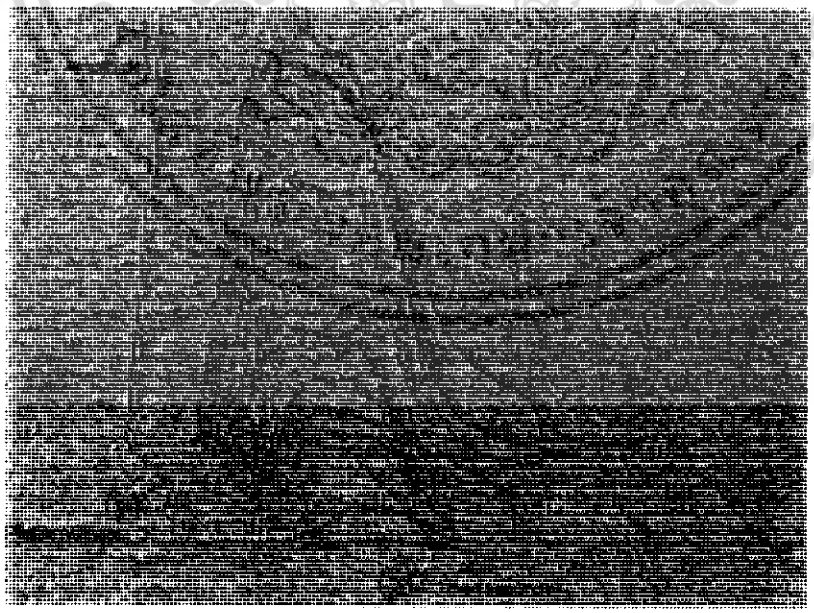
2. *ช่วงดีเคย์ (Decay)* เป็นช่วงที่เสียงมีขนาดของสัญญาณเสียงลดลงอย่างมีนัยสำคัญจากขนาดสูงสุดของสัญญาณในช่วงแอทแท็ค

3. *ช่วงซัสเทน (Sustain)* เป็นช่วงที่เสียงมีขนาดของสัญญาณคงที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงลดลงเพียงเล็กน้อย อยู่ในช่วงเวลาหลังจากช่วงดีเคย์จนถึงเวลาที่หยุดเล่นเสียง

4. *ช่วงรีลีส (Release)* เป็นช่วงที่ขนาดสัญญาณเสียงลดลงจากช่วงซัสเทนภายหลังการหยุดเล่นเสียงจนขนาดของสัญญาณเสียงมีค่าเป็นศูนย์

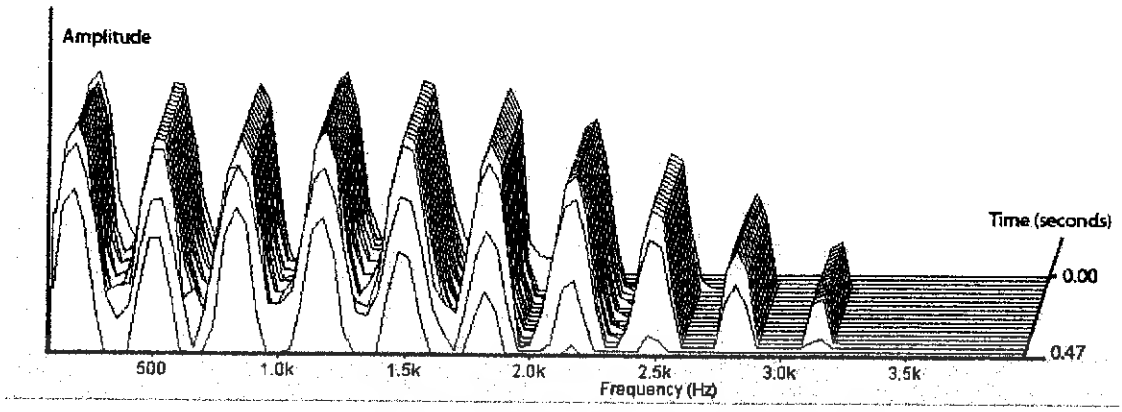
รูปร่างและระยะเวลาของส่วนแอทแท็คและดีเคย์ มีอิทธิพลอย่างมากกับสีสันเสียง ในเครื่องดนตรีอคูสติก โดยทั่วไปจะมีระยะเวลาของช่วงแอทแท็คที่ค่อนข้างสั้นกว่าช่วงดีเคย์ ช่วงแอทแท็คที่สั้นมากจะเป็นลักษณะเฉพาะของเสียงจากเครื่องดนตรีประเภทตีหรือเคาะ (Percussive Sounds) ในขณะที่ช่วงแอทแท็คที่ยาวกว่าจะพบในเครื่องดนตรีอคูสติก เช่น ออร์แกน ซึ่งสร้างเสียงจากกระแสอากาศที่รุนแรงข้ามผ่านขอบของพื้นผิว เครื่องดนตรีอคูสติกหลายชนิดมีช่วงแอทแท็คที่ยาวกว่าเมื่อเล่นที่ระดับเสียงต่ำกว่า การสังเคราะห์เสียงด้วยช่วงดีเคย์ที่สั้นเมื่อเทียบกับช่วงแอทแท็คที่ยาวกว่า จะสร้างเสียงที่มีลักษณะคล้ายกับเสียงจากการเล่นเทปบันทึกย้อนหลัง

รูปร่างแบบเอดีเอสอาร์ เป็นการพยายามที่จะเลียนแบบกรอบของเสียงที่พบในเครื่องดนตรีอคูสติก และใช้อย่างแพร่หลายในคีย์บอร์ดสังเคราะห์เสียงอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป

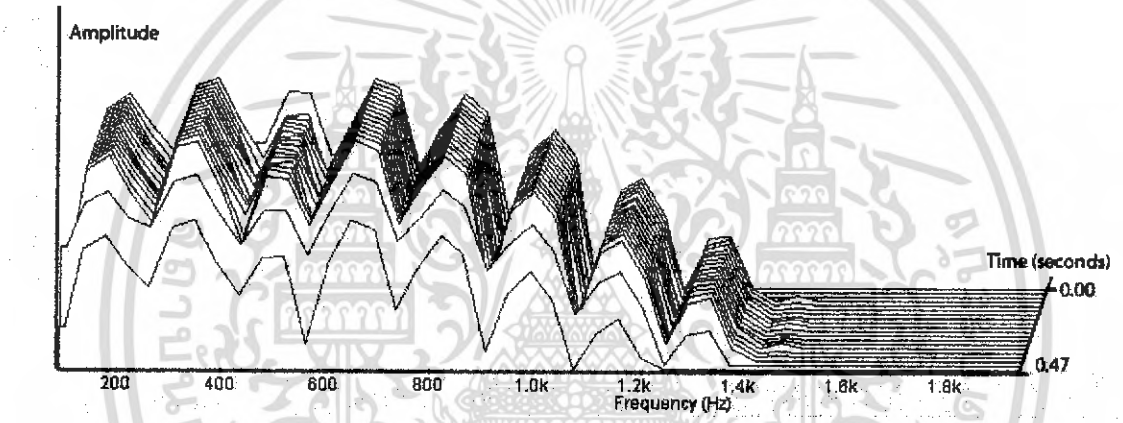


รูปที่ 2.13 ตัวอย่างสเปคตรัมของเสียงทรัมเปต

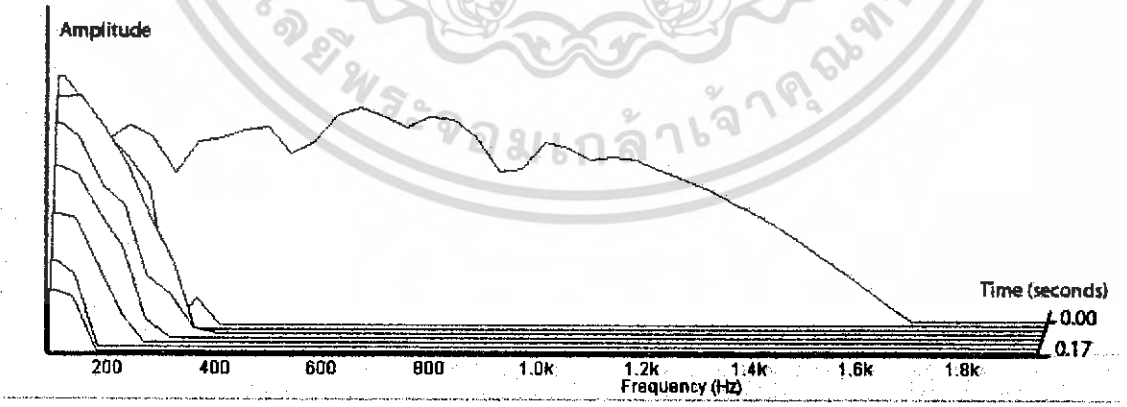
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 ตัวอย่างสเปคตรัมของเสียงคลาริเนต



รูปที่ 2.15 ตัวอย่างสเปคตรัมของเสียงออร์แกน



รูปที่ 2.16 ตัวอย่างสเปคตรัมของเสียงกลองไม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั่วไปจะกำหนดอัตราการมอดดูเลชั่น ให้มีลักษณะเป็นกรอบของโทนเสียงของเครื่องดนตรีแต่ละชนิด เรียกว่า **Modulation Envelope** การกำหนดกรอบอาศัยการประมาณให้ใกล้เคียงกับสเปคตรัมของเสียงเครื่องดนตรีจริง

อัตราการมอดดูเลชั่นสามารถคำนวณจำนวนคู่ของความถี่ข้างเคียงได้ แต่ถ้าเพิ่มอัตราการมอดดูเลชั่นเป็นเชิงเส้น ค่าแอมพลิจูดของความถี่ข้างเคียงอันดับที่สูงกว่า (High Order Sideband) ไม่จำเป็นต้องเพิ่มเป็นเชิงเส้น ในทำนองเดียวกัน ถ้าอัตราการมอดดูเลชั่นเพิ่มแบบเชิงเส้น ค่าพลังงานของความถี่ข้างเคียงอันดับที่สูงกว่าไม่จำเป็นต้องเพิ่มเป็นเชิงเส้นเสมอไป

นอกจากนี้ เสียงเครื่องดนตรีแต่ละชนิดจะมีแอมพลิจูดของเสียงโดยรวม (ทุกๆ ฮาร์โมนิค) เปลี่ยนแปลงไปตามช่วงเวลาในความยาวเสียง ดังนั้น การสังเคราะห์เสียงให้ใกล้เคียงกับเสียงของเครื่องดนตรีจริง จึงออกแบบให้มีส่วนควบคุมแอมพลิจูดของเสียงโดยรวม ที่มีลักษณะเป็นกรอบแอมพลิจูดของเสียง (Amplitude Envelope) ลงในวงจรสังเคราะห์เสียงแทนการใช้ค่าคงที่ได้ ทำให้ในการควบคุมและกำหนดลักษณะของเสียง ทำได้โดยควบคุมเพียงตัวแปรเดียวซึ่งในลักษณะนี้ทำให้ง่ายต่อการควบคุมทั้งฮาร์ดแวร์และซอฟท์แวร์

2.2.8 อัตราส่วนความถี่สำหรับการออกแบบเสียง (Frequency Ratio and Sound Design)

ค่าอัตราส่วนที่เป็นพื้นฐานระหว่างตัวแปรในระบบมอดดูเลชั่นเชิงความถี่ มี 2 ค่า คือ

1. อัตราการมอดดูเลชั่น (I) $= \dfrac{\text{ความถี่แปรผัน (d)}}{\text{ความถี่มอดดูเลเตอร์ } (f_m)}$ (2.4)

2. อัตราส่วนความถี่ $= \dfrac{\text{ความถี่คลื่นพาห์ } (f_c)}{\text{ความถี่มอดดูเลเตอร์ } (f_m)}$ (2.5)

โดยอัตราการมอดดูเลชั่น เป็นค่าที่ควบคุมจำนวนและแอมพลิจูดสเปคตรัมของความถี่ข้างเคียง (Sideband Frequency) อัตราส่วนความถี่ เป็นค่าสำคัญในการควบคุมสีสันเสียง อัตราส่วนความถี่จะมีค่าเฉพาะตัวที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์เสียงเครื่องดนตรีแต่ละชนิด ทั่วไปเครื่องดนตรีกลุ่มเดียวกัน มีค่าอัตราส่วนความถี่เท่ากันหรือใกล้เคียงกัน

ถ้าอัตราส่วนความถี่ และอัตราการมอดดูเลชั่นคงที่ ขณะที่ความถี่คลื่นพาห์เปลี่ยนแปลงไป เสียงที่สังเคราะห์จะมีการเปลี่ยนระดับเสียง (Pitch) แต่สีสันเสียง (Timbre) จะคงเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พื้นฐานการออกแบบเสียงโดยใช้ อัตราส่วนความถี่ มี 6 กรณี

1. ถ้าความถี่คลื่นพาห์เป็นจำนวนเต็มใดๆ และความถี่มอดดูเลเตอร์มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 4 แล้ว เสียงที่ออกมาจะเป็นเอกลักษณ์ เพราะความถี่คลื่นพาห์เปลี่ยนตามความถี่มอดดูเลเตอร์อย่างเห็นได้ชัด
2. ถ้าความถี่คลื่นพาห์เป็นจำนวนเต็มใดๆ และความถี่มอดดูเลเตอร์มีค่ามากกว่า 4 แล้ว เสียงที่ออกมาจะมีหลายฮาร์โมนิคแต่ฮาร์โมนิคพื้นฐานอาจสังเกตได้ไม่ชัด
3. ถ้าความถี่คลื่นพาห์เป็นจำนวนเต็มใดๆ และความถี่มอดดูเลเตอร์มีค่าเท่ากับ 1 แล้ว การมอดดูเลชั่นจะได้สเปคตรัมที่ประกอบขึ้นจากหลายฮาร์โมนิค เช่น 1:1 ได้ Sawtooth – Like Wave
4. ถ้าความถี่คลื่นพาห์เป็นจำนวนเต็มใดๆ และความถี่มอดดูเลเตอร์มีค่าเป็นจำนวนคู่แล้ว การมอดดูเลชั่นจะได้สเปคตรัมที่ประกอบด้วยฮาร์โมนิคเป็นคี่ เช่น 2 : 1 ได้ Square – Like Wave
5. ถ้าความถี่คลื่นพาห์เป็นจำนวนเต็มใดๆ และความถี่มอดดูเลเตอร์มีค่าเท่ากับ 3 แล้ว การมอดดูเลชั่นจะได้สเปคตรัมที่มีฮาร์โมนิคที่ 3 หายไป เช่น 3:1 ได้ Narrow Pulse – Like Waves

1. ถ้าความถี่คลื่นพาห์เป็นจำนวนเต็มใดๆ และความถี่มอดดูเลเตอร์มีค่าไม่เป็นจำนวนเต็มแล้ว การมอดดูเลชั่นจะได้สเปคตรัมที่ไม่เป็นฮาร์โมนิค (Non-harmonic) เช่น 2:1.29 ได้เสียงระฆังโลหะ

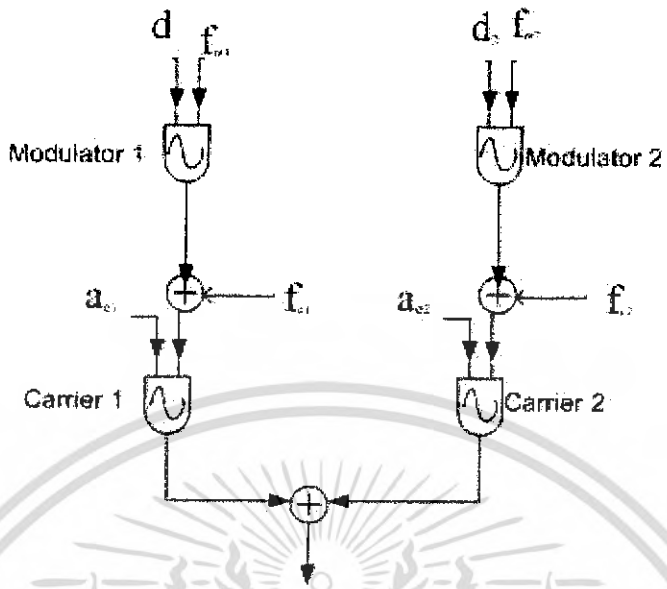
2.2.9 รูปแบบการสร้างสัญญาณ FM แบบต่างๆ

องค์ประกอบของการมอดดูเลชั่นเชิงความถี่แบบซับซ้อนมีส่วนประกอบหลัก 5 ส่วน ประกอบไปด้วย อุปกรณ์สร้างคลื่นพาห์ (Carrier), อุปกรณ์สร้างมอดดูเลเตอร์ (Modulator) อย่างละ 2 ชุดขึ้นไป และตัวรวมสัญญาณ

2.2.9.1 Additive Carriers with Independent Modulators

วิธีนี้เป็นการนำโมดูลของบล๊อกสร้างสัญญาณความถี่พื้นฐาน ที่ต่ออยู่กับบล๊อกสร้างสัญญาณมอดดูเลชั่นซึ่งแต่ละโมดูลนั้นเป็นอิสระจากกันมารวมกันตั้งแต่ 2 โมดูลขึ้นไป

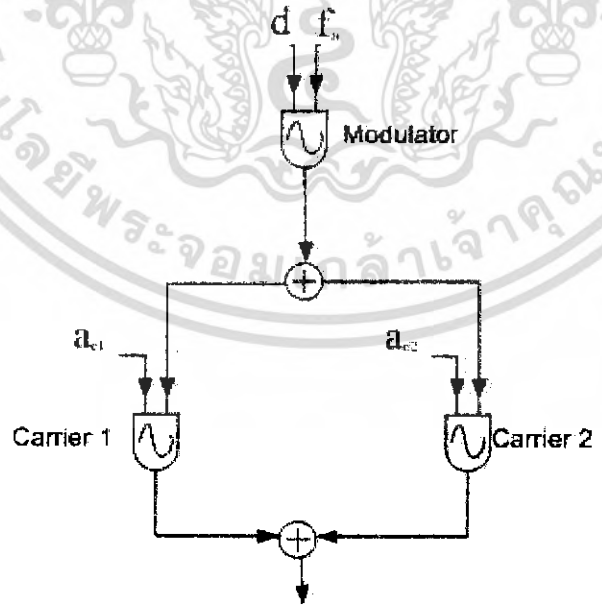
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 วงจรมอดดูเลชั่นเชิงความถี่มีสองความถี่พื้นฐาน
และความถี่มอดดูเลชั่นที่เป็นอิสระจากกัน

2.2.9.2 Additive Carriers with One Modulator

สามารถสร้างสัญญาณ FM โดยนำโมดูลของบล็อกสร้างสัญญาณความถี่พื้นฐานตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปมารวมกัน และใช้บล็อกสร้างสัญญาณมอดดูเลชั่นตัวเดียว

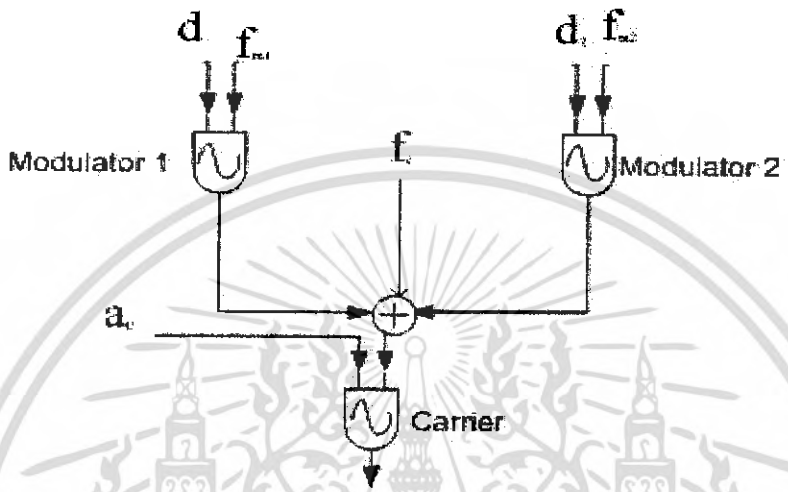


รูปที่ 2.18 วงจรมอดดูเลชั่นเชิงความถี่ที่มีความถี่มอดดูเลชั่น
ควบคุมสองความถี่พื้นฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.9.3 Single Carrier with Parallel Modulators

สามารถสร้างสัญญาณ FM โดยนำโมดูลของบล็อกสร้างสัญญาณความถี่มอดดูเลชั่นตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปมาต่อขนานกันแล้วนำสัญญาณที่ได้ไปรวมกับสัญญาณความถี่พื้นฐานเพื่อสร้างสัญญาณมอดดูเลชั่นเชิงความถี่ต่อไป



รูปที่ 2.19 วงจรมอดดูเลชั่นเชิงความถี่แบบความถี่พื้นฐาน
และสองความถี่มอดดูเลชั่นต่อขนานกัน

คำนวณ คู่ของความถี่ข้างเคียงดังนี้ (Sideband Pairs) ดังนี้

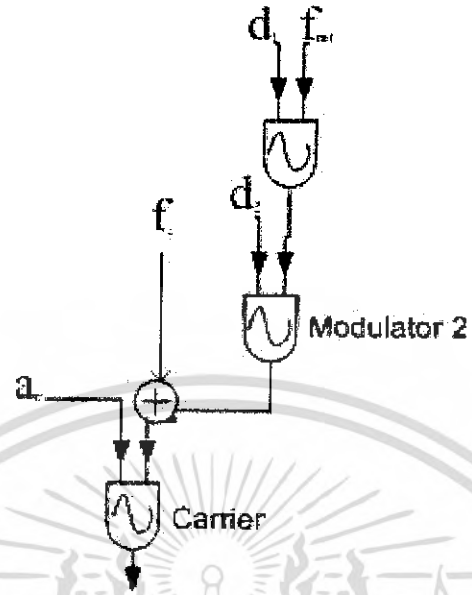
$$f_c \pm [(k_1 * f_{m1}) + (k_2 * f_{m2}) + \ldots + (ck_n * f_{mn})] \quad (2.6.1)$$

$$f_c \pm [(k_1 * f_{m1}) - (k_2 * f_{m2}) - \ldots - (ck_n * f_{mn})] \quad (2.6.2)$$

2.2.9.4 Single Carrier with Serial Modulators

สามารถสร้างสัญญาณ FM โดยนำโมดูลของบล็อกสร้างสัญญาณความถี่มอดดูเลชั่นตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปมาต่ออนุกรมกัน แล้วนำสัญญาณที่ได้ไปรวมกับสัญญาณความถี่พื้นฐานเพื่อสร้างสัญญาณมอดดูเลชั่นเชิงความถี่ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



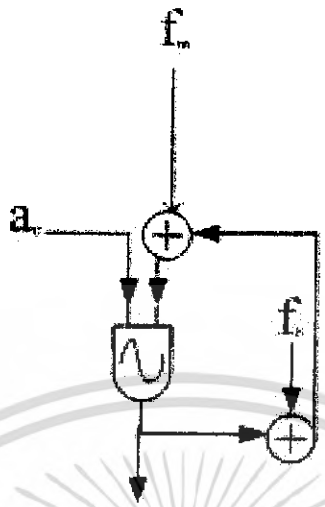
รูปที่ 2.20 วงจรมอดดูเลชั่นเชิงความถี่แบบหนึ่งความถี่พื้นฐาน
และสองความถี่มอดดูเลชั่นต่ออนุกรมกัน

การคำนวณคู่ของความถี่ข้างเคียง (Sideband Pairs) ได้จากสมการที่ 2.6.1 และ 2.6.2 ความแตกต่างระหว่าง Single Carrier with Parallel Modulators และ Single Carrier with Serial Modulators เมื่ออัตราส่วนความถี่ และอัตราการมอดดูเลชั่นเท่ากัน คือ การต่อแบบอนุกรมจะมีความถี่ข้างเคียงที่มีแอมพลิจูดสูงมากกว่าการต่อแบบขนาน

2.2.9.5 Self – Modulating Carrier

สร้างสัญญาณ FM โดยมีตัวกำเนิดสัญญาณตัวเดียว โดยนำสัญญาณเอาท์พุตไปมอดดูเลชั่นกับความถี่ที่ได้จากตัวกำเนิดสัญญาณ โดยสัญญาณเอาท์พุตนั้นจะต้องนำมารวมกับความถี่ฟีดแบค (Feedback Frequency) จากนั้นนำไปรวมกับความถี่มอดดูเลชั่นก่อนที่จะนำมาเป็นอินพุตในครั้งต่อมา การมอดดูเลชั่นแบบนี้จะได้รูปคลื่นเป็น Sawtooth-like Wave Form มีข้อจำกัดคือถ้าความถี่ฟีดแบคมากกว่า 2 จะเกิดสัญญาณรบกวนขึ้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



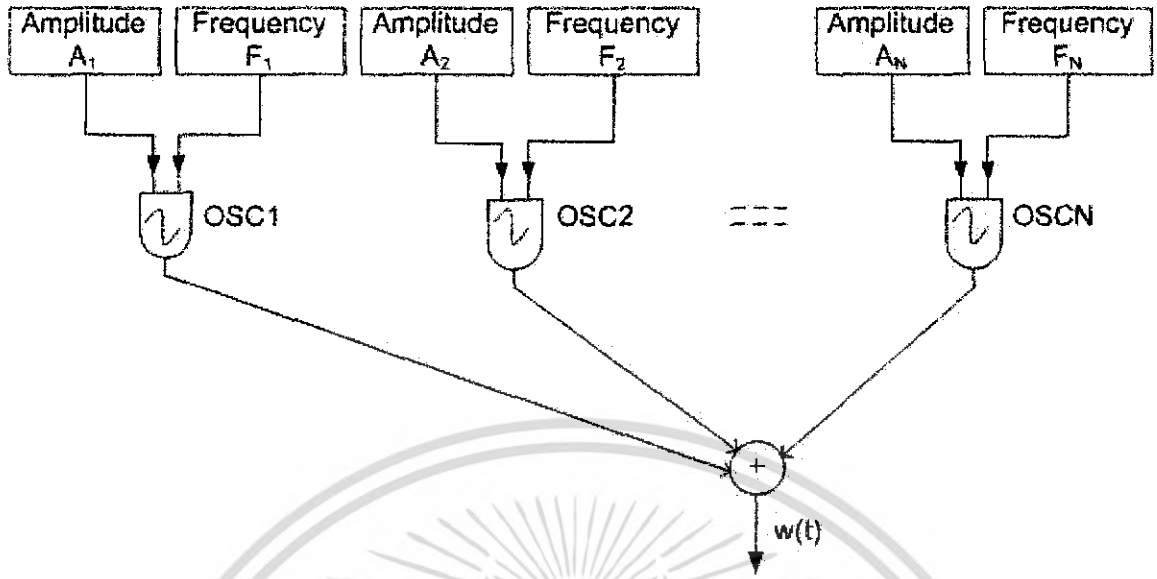
รูปที่ 2.21 วงจรมอดดูเลชั่นเชิงความถี่
แบบเซลฟ์มอดดูเลทติ้งแคริเออร์ (Self-modulating Carrier)

จำนวนคู่ของความถี่ข้างเคียงขึ้นกับดัชนีการมอดดูเลชั่น แต่แอมพลิจูดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามความถี่ฟีดแบค

2.3 การสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดิทีฟ (Additive Synthesis)

หลักการของการสังเคราะห์เสียงด้วยกระบวนการแอดดิทีฟ คือ กระบวนการที่เรียกว่า Fourier Recomposition หมายถึง การสังเคราะห์สัญญาณความถี่ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของเสียง โดยอาศัยค่าความถี่และแอมพลิจูดที่ได้จากการวิเคราะห์เสียงตัวอย่าง โดยใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณสร้างสัญญาณคลื่นไซน์ (Sine Wave) ที่มีแอมพลิจูดและความถี่ขององค์ประกอบต่างๆ ตามที่ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบสเปคตรัมของเสียง แล้วนำสัญญาณทั้งหมดที่ได้จากเครื่องกำเนิดสัญญาณมารวมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 วงจรสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดิทีฟ

ซึ่งผลลัพธ์ของสัญญาณสามารถเขียนในรูปสมการดังนี้

$$w(t) = \sum_{i=1}^{n} A_i \mathrm{Sin}(w_i t) \qquad (2.7.1)$$

$$w(t) = A_1\mathrm{Sin}(2\pi f_1 t) + A_2\mathrm{Sin}(2\pi f_2 t) + A_3\mathrm{Sin}(2\pi f_3 t) + \ldots + A_n\mathrm{Sin}(2\pi f_n t) \qquad (2.7.2)$$

ข้อดีของการสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดิทีฟ คือ สามารถสังเคราะห์เสียงได้เหมือนจริง แม้ว่าเสียงนั้นจะมีความยืดหยุ่นมากก็ตาม แต่ในขณะเดียวกันเทคนิคนี้มีข้อเสียในด้านการวิเคราะห์เสียงตัวอย่าง ที่จำเป็นต้องใช้ข้อมูลมากพอสมควรเพื่ออธิบายลักษณะของเสียง ดังนั้นอาจไม่เหมาะสมกับเสียงที่มีความซับซ้อนมาก เช่น เสียงจากไวโอลิน เป็นต้น

2.4 เทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบของเสียงดนตรี

ในการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของเสียงดนตรี เพื่อนำค่าพารามิเตอร์ไปใช้ในการสร้างเสียงสังเคราะห์ จะต้องวิเคราะห์ให้เหมาะสมกับเทคนิคการสังเคราะห์เสียงที่จะนำมาใช้ ซึ่งในโครงงานนี้ จะจำแนกเทคนิคการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วน คือ

1. เทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบของเสียงดนตรีในโดเมนของความถี่
2. เทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบของเสียงดนตรีสำหรับการสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดิทีฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

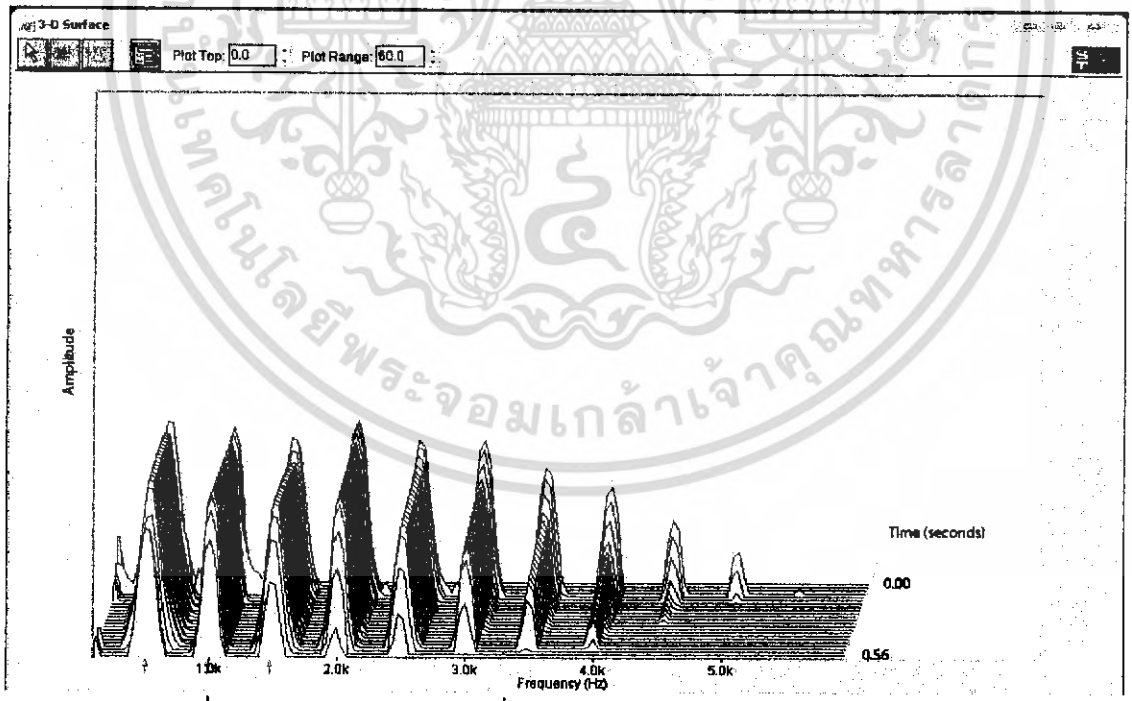
2.4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของเสียงดนตรีในโดเมนของความถี่

การสังเคราะห์เสียงดนตรีให้มีลักษณะใกล้เคียงกับเสียงตัวอย่าง ในเทคนิคการมอดดูเลชั่นเชิงความถี่อย่างง่าย จะต้องทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของเสียงตัวอย่าง เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ทั้งหมด 4 ค่า ดังนี้

1. ความถี่พื้นฐาน
2. อัตราส่วนของความถี่
3. กรอบของดัชนีการมอดดูเลชั่น
4. กรอบของแอมพลิจูด
5. ความยาวเสียง

การวิเคราะห์องค์ประกอบของเสียงดนตรีโดยใช้โปรแกรมสเปกตราแลป (SpectraLab) มีขั้นตอนดังนี้

1. นำไฟล์เสียงตัวอย่างในสกุล .wav หรือ .aiff มาป้อนเข้าโปรแกรม
2. โปรแกรมจะทำการวิเคราะห์โดยการกระจายสเปกตรัมทั้งในโดเมนเวลาและความถี่ ได้กราฟสามมิติที่ประกอบด้วยแกนเวลา, ความถี่ และแอมพลิจูด ออกมาดังรูป



รูปที่ 2.23 องค์ประกอบความถี่แต่ละช่วงเวลาของตัวอย่างเสียงทรัมเปต ที่วิเคราะห์ในโดเมนเวลาและความถี่โดยโปรแกรมสเปคตราแลป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.23 จะเห็นว่าที่ช่วงเวลาต่างกัน องค์ประกอบของความถี่จะต่างกัน

2.4.1.1 การวิเคราะห์หาสัญญาณความถี่พื้นฐาน มี 2 วิธีคือ

1. สัญญาณความถี่พื้นฐาน คือ สัญญาณความถี่ที่ปรากฏตลอดความยาวเสียง ในกราฟการกระจายสเปกตรัม 3 มิติบนโปรแกรมสเปกตราแลป
2. สามารถสันนิษฐานตำแหน่งของสัญญาณความถี่พื้นฐาน จากลักษณะการกระจายพลังงานของสัญญาณความถี่พื้นฐานไปเป็นสัญญาณความถี่ข้างเคียง ที่อธิบายได้ด้วยเบสเซลฟังก์ชั่น

โดยการวิเคราะห์หาตำแหน่งสัญญาณความถี่พื้นฐาน จะพิจารณาจากทั้งสองวิธีร่วมกัน

2.4.1.2 การวิเคราะห์หาอัตราส่วนของความถี่

ทำการคำนวณหาค่าความถี่มอดดูเลชั่นก่อน โดยจากกราฟการกระจายสเปคตรัม สามารถคำนวณค่าความถี่มอดดูเลชั่นได้จากระยะห่างระหว่างแต่ละองค์ประกอบความถี่ ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ 2.3 (หน้า 13)

นำค่าความถี่มอดดูเลชั่นที่คำนวณได้ มาประมาณเป็นอัตราส่วน $f_c : f_m$ และคำนวณเป็นอัตราส่วนอย่างต่ำ

2.4.1.3 การวิเคราะห์หากรอบของดัชนีการมอดดูเลชั่น

จากรูปที่ 2.23 เราทราบจำนวนความถี่ข้างเคียงซึ่งจะมีจำนวนแตกต่างกันไปตลอดระยะความยาวเสียง โดยคำนวณค่าดัชนีการมอดดูเลชั่นได้จากความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีการมอดดูเลชั่น (I) และจำนวนความถี่ข้างเคียง ที่เป็นไปตามฟังก์ชันเบสเซลตามตารางที่ 2.1

จากนั้น นำค่าดัชนีการมอดดูเลชั่นมาประมาณเป็นกรอบของค่าดัชนีการมอดดูเลชั่น โดยกำหนดเป็นช่วงเวลาที่มีขนาดเท่ากับช่วงความยาวของเสียง จากกราฟการกระจายสเปคตรัมในรูปที่ 2.23 สามารถประมาณกรอบของดัชนีการมอดดูเลชั่นได้

2.4.1.4 การวิเคราะห์หากรอบของแอมพลิจูด

จากทฤษฎีดนตรี เครื่องดนตรีเกือบทุกชนิดจะมีกรอบของแอมพลิจูดใกล้เคียงกับกรอบของดัชนีการมอดดูเลชั่น ดังนั้นสามารถประมาณให้กรอบของแอมพลิจูดมีลักษณะใกล้เคียงกับกรอบของดัชนีการมอดดูเลชั่นได้ เพื่อลดความซับซ้อนในการสังเคราะห์และง่ายต่อการควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1.5 ความยาวของเสียง

ความยาวเสียงสามารถพิจารณาได้จากระยะเวลาที่ต้องใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของเสียงตัวอย่าง

2.4.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของเสียงดนตรี สำหรับการสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดิทีฟ

ในการสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดิทีฟ จะต้องทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของเสียงตัวอย่าง เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ ดังนี้

1. ความถี่ของแต่ละองค์ประกอบ
2. แอมพลิจูดของแต่ละองค์ประกอบ
3. ความยาวเสียง

การวิเคราะห์องค์ประกอบของเสียงดนตรีโดยใช้โปรแกรมสเปกตราแลป (SpectraLab) มีขั้นตอนดังนี้

1. นำไฟล์เสียงตัวอย่างในสกุล .wav หรือ .aiff มาป้อนเข้าโปรแกรม
2. โปรแกรมจะทำการวิเคราะห์โดยการกระจายสเปกตรัมทั้งในโดเมนเวลาและความถี่ ได้กราฟสามมิติที่ประกอบด้วยแกนเวลา, ความถี่ และแอมพลิจูด ออกมาดังรูป 2.23

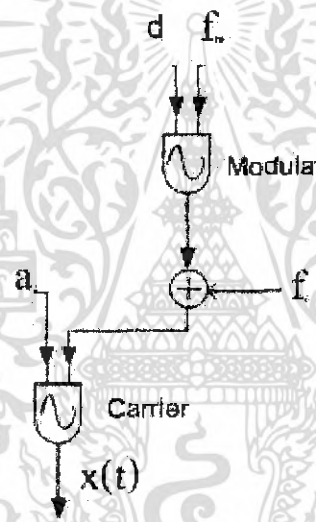
นำค่าความถี่และแอมพลิจูดที่อ่านได้จากกราฟใช้เป็นพารามิเตอร์ในการสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดิทีฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การออกแบบโครงงาน

โครงงานนี้ใช้โปรแกรมแมกซ์-เอ็มเอสพี (MAX/MSP) เวอร์ชั่น 4.5 ในการออกแบบและซีมูเลต (Simulate) วงจรสังเคราะห์สัญญาณเสียง โดยออกแบบวงจรสังเคราะห์เสียง 2 แบบ คือ วงจรสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคมอดดูเลชั่นเชิงความถี่อย่างง่าย และวงจรสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดิทีฟ มาใช้ในการพัฒนาโปรแกรมสังเคราะห์เสียง

3.1 โปรแกรมสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคมอดดูเลชั่นเชิงความถี่อย่างง่ายบน MAX/MSP



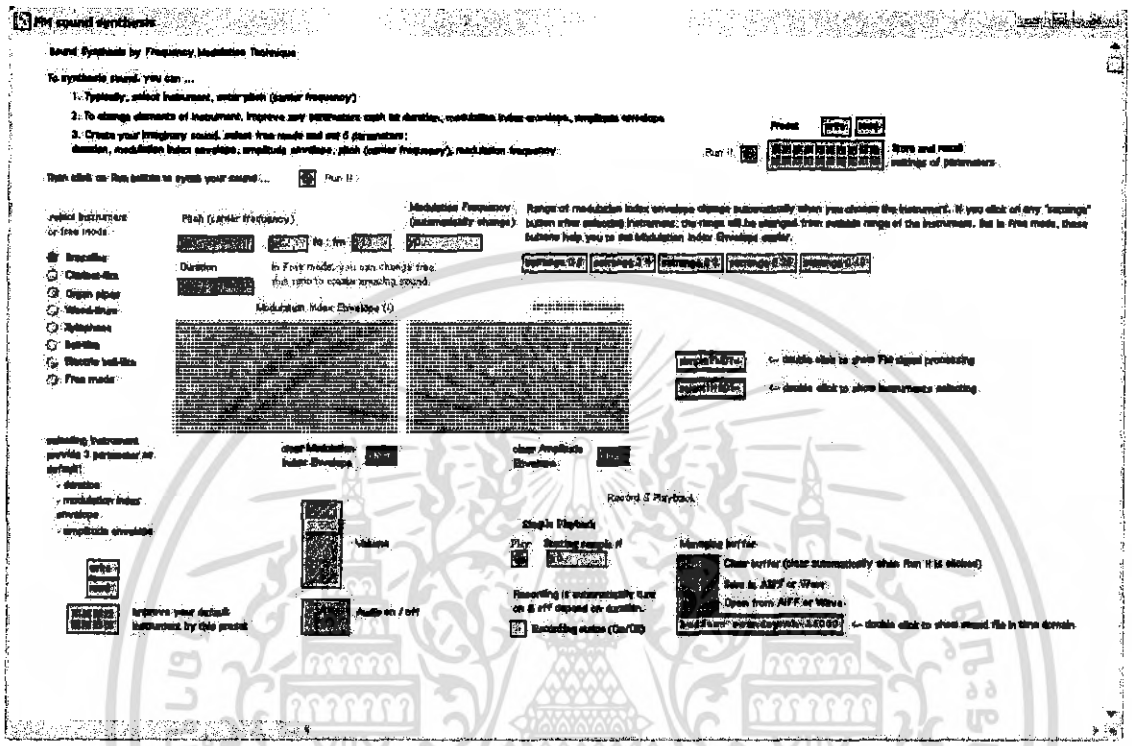
รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมวงจรสังเคราะห์เสียงแบบมอดดูเลชั่นเชิงความถี่อย่างง่าย

จากวงจรดังรูปที่ 3.1 เมื่อนำไปออกแบบเป็นโปรแกรมสังเคราะห์เสียงในโปรแกรม MAX/MSP จะได้ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งในส่วนของการป้อนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาท์พุต (a_c) และค่าความถี่เบี่ยงเบน (d) บนโปรแกรม MAX/MSP จะเพิ่มเติมบล็อกที่สามารถกำหนดขนาดของทั้งสองค่าได้เป็นแบบเอนเวโลป คือ แอมพลิจูดเอนวิโลป และมอดดูเลชันดินเด็กซ์เอนเวโลป ซึ่งจะทำให้ได้ค่าทั้งสองมีขนาดเปลี่ยนแปลงได้ ในช่วงเวลาต่างๆ ซึ่งจะทำให้สัญญาณที่สังเคราะห์ได้มีการประมาณที่ใกล้เคียงกับลักษณะธรรมชาติของเสียงเครื่องดนตรีจริงมากยิ่งขึ้น

รูปที่ 3.2 จะแสดงโปรแกรมสังเคราะห์เสียงที่ออกแบบบนโปรแกรม MAX/MSP โดยยังคงอาศัยกระบวนการมอดดูเลชั่นเชิงความถี่อย่างง่ายเป็นหลักสำคัญของการออกแบบ ทั้งนี้มีการเพิ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความยาวเสียงเข้าไปด้วย เพื่อให้สัญญาณเสียงที่สร้างสอดคล้องกับสัญญาณเสียงของเครื่องดนตรีแต่ละชนิดที่จะมีความยาวเสียงแตกต่างกันไป



รูป 3.2 โปรแกรมสังเคราะห์สัญญาณเสียงด้วยเทคนิคมอดดูเลชั่นเชิงความถี่อย่างง่าย ใน MAX/MSP

การออกแบบโปรแกรมสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคมอดดูเลชั่นเชิงความถี่อย่างง่าย ประกอบด้วย

3.1.1 ***ส่วนเล่นเสียง*** ***(Play note : Run)*** เมื่อคลิกจะเป็นการเล่นเสียงผลลัพธ์ที่ได้จากการปรับแต่งค่าในส่วนต่างๆ ของวงจร

3.1.2 ***ส่วนป้อนความยาวเสียง*** ***(Duration)*** มีหน่วยเป็นมิลลิวินาที (ms) และนำค่าความยาวเสียงไปใช้เป็นโดเมน (Domain) ของส่วนควบคุมกรอบของแอมพลิจูด (Amplitude Envelope) และส่วนควบคุมกรอบของดัชนีการมอดดูเลชั่น (Modulation Index Envelope)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 *ส่วนควบคุมกรอบของแอมพลิจูด (Amplitude Envelope)* ใช้สำหรับกำหนดขนาดของสัญญาณเสียงผลลัพธ์ในแต่ละช่วงเวลาของความยาวเสียง ซึ่งสามารถกำหนดได้โดยอาศัยการคลิกเมาส์เพื่อระบุพิกัดของกรอบ และสามารถลบพิกัดที่มีอยู่เดิมเพื่อปรับแต่งใหม่ได้ที่ปุ่มเคลียร์ (Clear)

3.1.4 *ส่วนควบคุมกรอบของดัชนีการมอดดูเลชั่น (Modulation Index Envelope)* ใช้สำหรับกำหนดค่าดัชนีการมอดดูเลชั่น ซึ่งเปลี่ยนแปลงได้ในแต่ละช่วงเวลา โดยอาศัยการคลิกระบุพิกัดเช่นเดียวกับส่วนควบคุมกรอบของแอมพลิจูด

3.1.5 *ส่วนป้อนความถี่พื้นฐาน (Fundamental Frequency)* ป้อนความถี่พื้นฐานซึ่งจะเป็นระดับเสียง (Pitch) ของสัญญาณเสียงผลลัพธ์

3.1.6 *ส่วนป้อนอัตราส่วนความถี่ (Frequency Ratio; $f_c : f_m$)* และคำนวณความถี่มอดดูเลชั่น (Modulation Frequency) สำหรับป้อนอัตราส่วนระหว่างความถี่พื้นฐานและความถี่มอดดูเลชั่น และทำการคำนวณหาค่าความถี่มอดดูเลชั่น (Modulation Frequency) จากความถี่พื้นฐานและอัตราส่วนความถี่โดยอัตโนมัติ

3.1.7 *ส่วนกำหนดตัวอย่างเสียงล่วงหน้า (Preset)* ใช้ในการบันทึกค่าต่างๆ สำหรับการเรียกกลับมาใช้งานใหม่ เช่น ความยาวเสียง ความถี่พื้นฐาน ความถี่มอดดูเลชั่น กรอบของแอมพลิจูด กรอบของดัชนีการมอดดูเลชั่น เป็นต้น

3.1.8 *ส่วนปรับระดับความดังของเสียง (Volume)* ไว้ปรับความดังของเสียงที่จะสังเคราะห์ออกทางลำโพง (Speaker)

3.1.9 *ส่วนเปิด-ปิดการเล่นเสียง (Audio on/off)* ไว้สำหรับเลือกเปิดหรือปิด เสียงที่จะเล่นออกทางลำโพง

3.1.10 *ส่วนบันทึกและเล่นเสียง (Record and Playback)* ใช้ในการบันทึกเสียงสังเคราะห์ครั้งล่าสุด โดยจัดเก็บในหน่วยความจำชั่วคราว (Buffer) ที่รองรับความยาวเสียงได้สูงสุด 15 วินาที ประกอบด้วยส่วนที่ทำหน้าที่ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.10.1 *ปุ่มเล่น (Play)* กดเพื่อเล่นเสียงที่จัดเก็บอยู่ในหน่วยความจำชั่วคราว

3.1.10.2 *ส่วนป้อนตำแหน่งเริ่มเล่นซ้ำ (Starting sample #)* สำหรับป้อนตำแหน่งบนหน่วยความจำช่วยคราวที่ต้องการเริ่มเล่นเสียง

3.1.10.3 *ส่วนแสดงสถานะการบันทึก (Recording status)* แสดงเครื่องหมายกากบาทขณะที่โปรแกรมกำลังบันทึกเสียงสังเคราะห์ลงในหน่วยความจำชั่วคราวโดยอัตโนมัติ

3.1.10.4 *ปุ่มเคลียร์ (Clear)* กดเพื่อยกเลิกข้อมูลที่จัดเก็บอยู่ในหน่วยความจำชั่วคราว

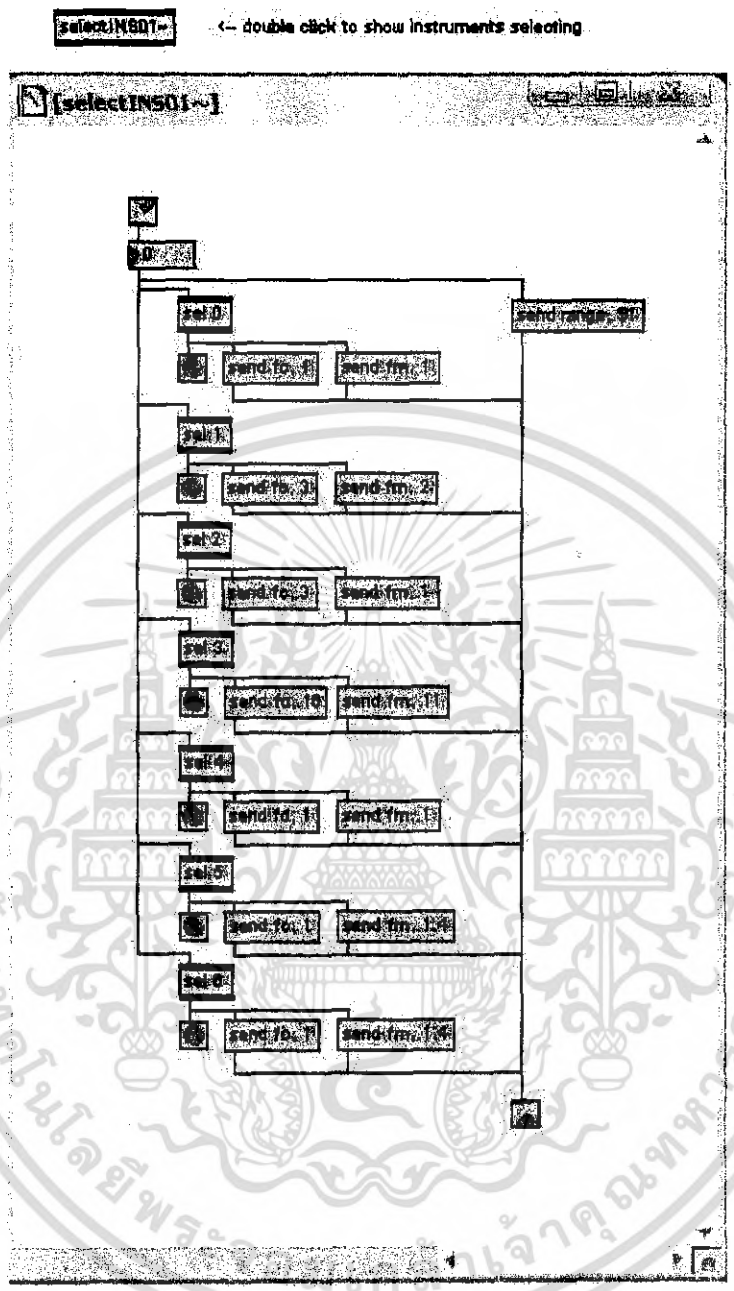
3.1.10.5 *ปุ่มเขียน (Write)* กดเพื่อบันทึกเสียงสังเคราะห์จากหน่วยความจำชั่วคราว สามารถเลือกบันทึกไฟล์เสียงได้ 2 ชนิด คือ .wav และ .aiff

3.1.10.6 *ปุ่มอ่าน (Read)* กดเพื่อเลือกเสียงไฟล์เสียงมาจัดเก็บในหน่วยความจำชั่วคราวเพื่อเล่น โดยสามารถเลือกไฟล์เสียงได้ 2 ชนิด คือ .wav และ .aiff

3.1.11 *ส่วนเลือกชนิดเครื่องดนตรีหรือปรับแต่งอิสระ (Select instrument or free mode)*

กดเลือกชนิดเครื่องดนตรี โปรแกรมจะทำการกำหนดค่าอัตราส่วนระหว่างความถี่พื้นฐานกับความถี่มอดดูเลชั่น ความยาวเสียง กรอบของดัชนีการมอดดูเลชั่น กรอบของแอมพลิจูด ที่เหมาะสมกับการสังเคราะห์เสียงเครื่องดนตรีชนิดต่างๆ ด้วยเทคนิคมอดดูเลชั่นเชิงความถี่อย่างง่ายให้โดยอัตโนมัติ หรือกดเลือกปรับแต่งอิสระสำหรับการปรับแต่งค่าต่างๆ โดยมีกระบวนการทำงานภายในแสดงดังรูปที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

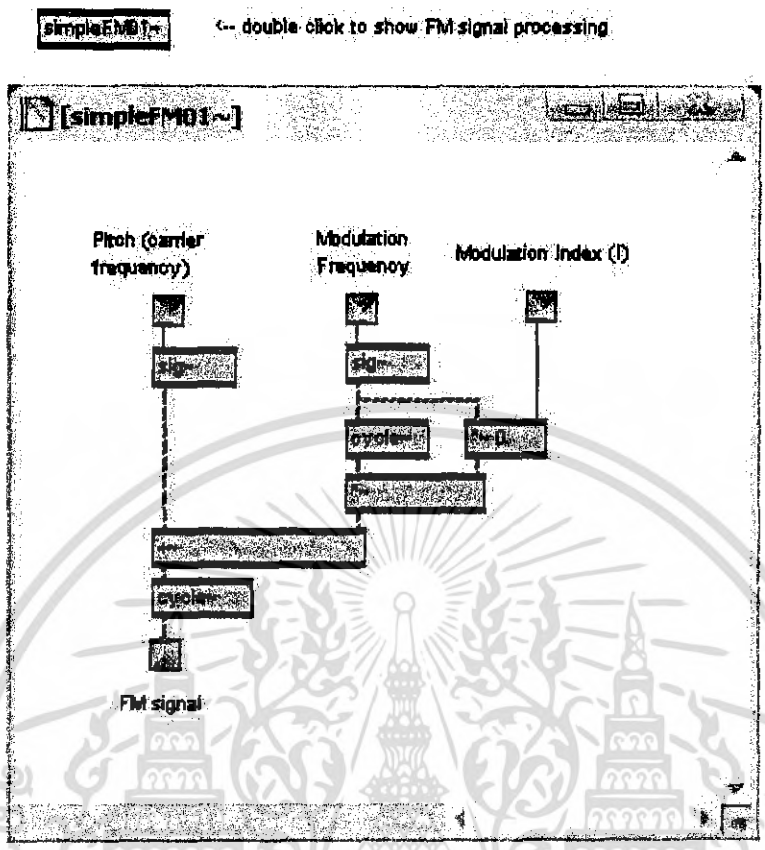


รูปที่ 3.3 ส่วนควบคุมชนิดเครื่องดนตรีหรือปรับแต่งค่าเอง
และวงจรการทำงานภายใน

3.1.12 ส่วนวงจรสังเคราะห์เสียงแบบมอดดูเลชั่นเชิงความถี่อย่างง่าย

ทำการสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคมอดดูเลชั่นเชิงความถี่อย่างง่าย โดยรับค่าพารามิเตอร์จากส่วนป้อนความถี่พื้นฐาน ค่าความถี่มอดดูเลชั่นและค่าดัชนีการมอดดูเลชั่น รูปที่ 3.4 แสดงกระบวนการทำงานภายใน

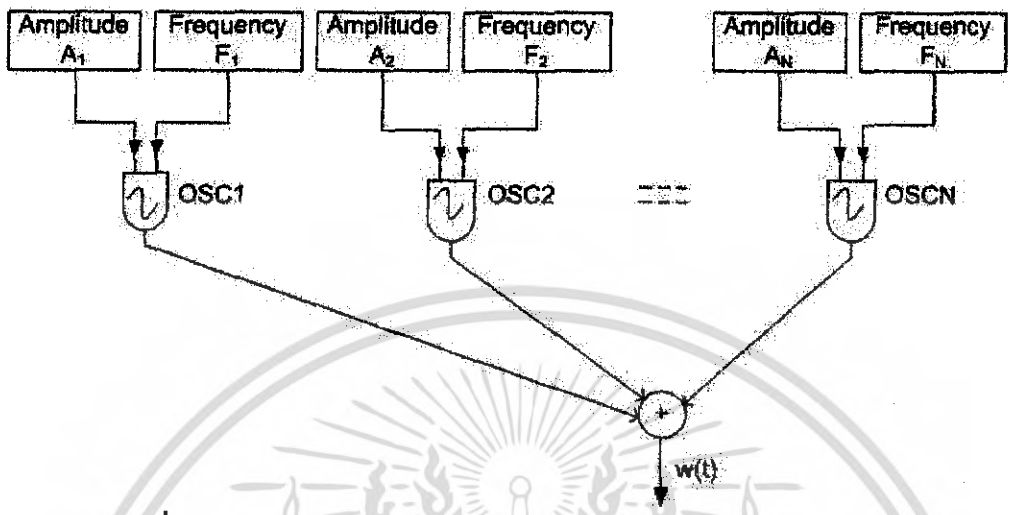
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 ส่วนวงจรสังเคราะห์เสียงแบบมอดดูเลชั่นเชิงความถี่อย่างง่าย และวงจรการทำงานภายใน

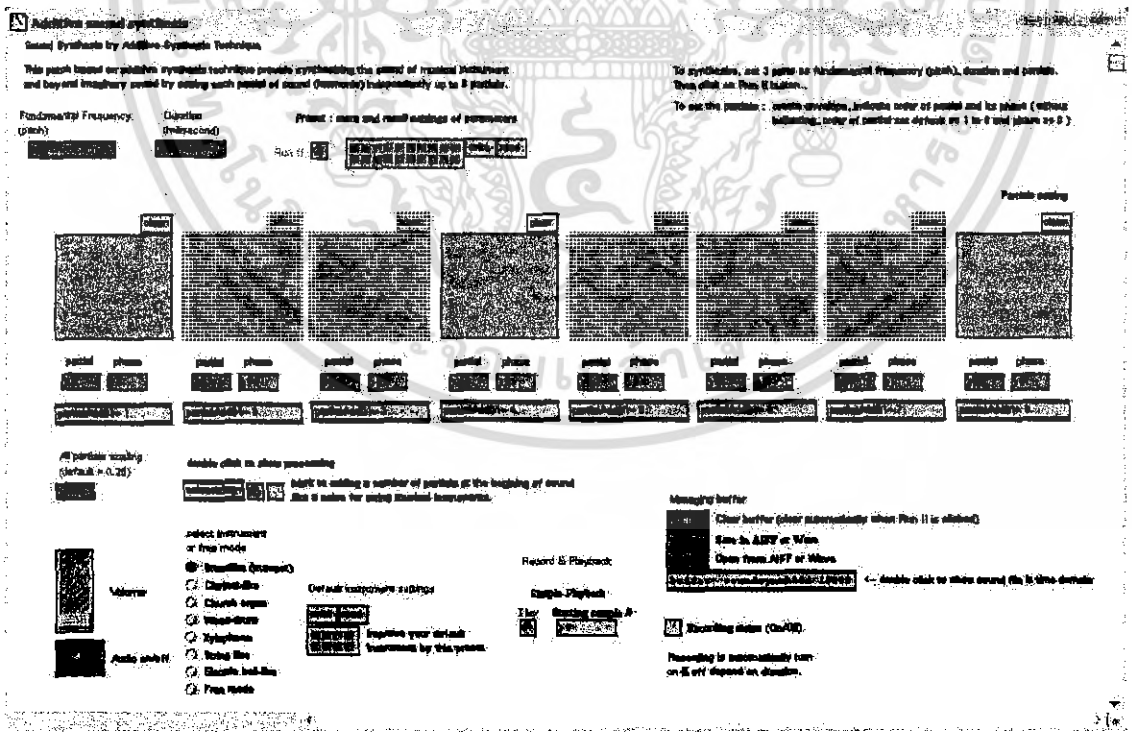
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 โปรแกรมสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดิทีฟบน MAX/MSP



รูปที่ 3.5 บล็อกไดอะแกรมวงจรสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดิทีฟ

จากวงจรดังรูปที่ 3.5 เมื่อนำไปออกแบบเป็นโปรแกรมสังเคราะห์เสียงในโปรแกรม MAX/MSP จะได้ดังรูปที่ 3.6



รูป 3.6 โปรแกรมสังเคราะห์สัญญาณเสียงด้วยเทคนิคแอดดิทีฟ ใน MAX/MSP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบโปรแกรมสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดิทีฟ

ประกอบด้วย

3.2.1 *ส่วนเล่นเสียง (Play note : Run)* เมื่อคลิกจะเป็นการเล่นเสียงผลลัพธ์ที่ได้จากการปรับแต่งค่าในส่วนต่างๆ ของวงจร

3.2.2 *ส่วนป้อนความยาวเสียง (Duration)* โดยมีหน่วยเป็นมิลลิวินาที (ms) และนำค่าความยาวเสียงไปใช้เป็นโดเมน (Domain) ของส่วนควบคุมกรอบของแอมปลิจูด (Amplitude Envelope) และส่วนควบคุมกรอบของดัชนีการมอดดูเลชั่น (Modulation Index Envelope)

3.2.3 *ส่วนป้อนความถี่พื้นฐาน (Fundamental Frequency)* ป้อนความถี่พื้นฐานซึ่งจะเป็นระดับเสียง (Pitch) ของสัญญาณเสียงผลลัพธ์

3.2.4 *ส่วนกำหนดตัวอย่างเสียงล่วงหน้า (Preset)* ใช้ในการบันทึกค่าต่างๆ สำหรับการเรียกกลับมาใช้งานใหม่ เช่น ความยาวเสียง ความถี่พื้นฐาน กรอบของแอมพลิจูดในแต่ละพาร์เชียล ลำดับและเฟสของแต่ละพาร์เชียลที่จะทำการสังเคราะห์ เป็นต้น

3.2.5 *ส่วนปรับระดับความดังของเสียง (Volume)* ไว้ปรับความดังของเสียงที่จะสังเคราะห์ออกทางลำโพง (Speaker)

3.2.6 *ส่วนเปิด – ปิดการเล่นเสียง (Audio on/off)* ไว้สำหรับเลือกเปิดหรือปิดเสียงที่จะเล่นออกทางลำโพง

3.2.7 *ส่วนบันทึกและเล่นเสียง (Record and Playback)* ใช้ในการบันทึกเสียงสังเคราะห์ครั้งล่าสุด โดยจัดเก็บในหน่วยความจำชั่วคราว (Buffer) ที่รองรับความยาวเสียงได้สูงสุด 15 วินาที ประกอบด้วยส่วนที่ทำหน้าที่ ดังนี้

3.2.7.1 *ปุ่มเล่น (Play)* กดเพื่อเล่นเสียงที่จัดเก็บอยู่ในหน่วยความจำชั่วคราว

3.2.7.2 *ส่วนป้อนตำแหน่งเริ่มเล่น (Starting sample #)* สำหรับป้อนตำแหน่งที่ต้องการเริ่มเล่นเสียงบนหน่วยความจำช่วยคราว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.7.3 *ส่วนแสดงสถานะการบันทึก (Recording status)* แสดงเครื่องหมายกากบาทขณะที่โปรแกรมกำลังบันทึกเสียงสังเคราะห์ลงในหน่วยความจำชั่วคราวโดยอัตโนมัติ

3.2.7.4 *ปุ่มเคลียร์ (Clear)* กดเพื่อยกเลิกข้อมูลที่จัดเก็บอยู่ในหน่วยความจำชั่วคราว

3.2.7.5 *ปุ่มเขียน (Write)* กดเพื่อบันทึกเสียงสังเคราะห์จากหน่วยความจำชั่วคราว สามารถเลือกบันทึกไฟล์เสียงได้ 2 ชนิด คือ .wav และ .aiff

3.2.7.6 *ปุ่มอ่าน (Read)* กดเพื่อเลือกเสียงไฟล์เสียงมาจัดเก็บในหน่วยความจำชั่วคราวเพื่อเล่น โดยสามารถเลือกไฟล์เสียงได้ 2 ชนิด คือ .wav และ .aiff

3.2.8 *ส่วนเลือกชนิดเครื่องดนตรีหรือปรับแต่งอิสระ (Select instrument or free mode)* กดเลือกชนิดเครื่องดนตรี โปรแกรมจะทำการกำหนดความยาวเสียง กรอบของแอมพลิจูดและเฟสของแต่ละพาร์เชียล ระดับแอมพลิจูดของสัญญาณเสียงสังเคราะห์โดยรวม ที่เหมาะสมกับการสังเคราะห์เสียงเครื่องดนตรีชนิดต่างๆ ด้วยเทคนิคแอดดิทีฟให้โดยอัตโนมัติ หรือกดเลือก *ปรับแต่งอิสระสำหรับการปรับแต่งค่าต่างๆ*

3.2.9 *ส่วนควบคุมองค์ประกอบของสัญญาณที่จะสังเคราะห์ในแต่ละพาร์เชียล (Partial setting)* รองรับได้สูงสุด 8 พาร์เชียล โดยในแต่ละพาร์เชียลแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ

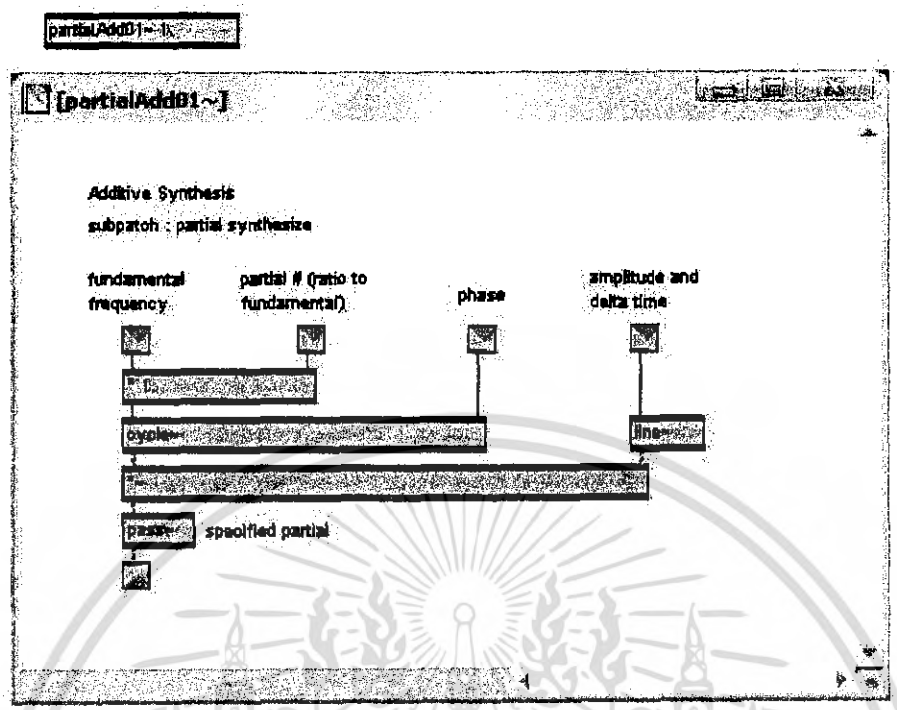
3.2.9.1 *ส่วนควบคุมตำแหน่งความถี่องค์ประกอบ (Partial)* ทำหน้าที่ระบุตำแหน่งความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่พื้นฐานใช้เป็นค่าความถี่ในการสังเคราะห์สัญญาณเสียงแต่ละพาร์เชียล

3.2.9.2 *ส่วนควบคุมเฟส (Phase)* กำหนดเฟสเริ่มต้นของสัญญาณเสียงที่จะสังเคราะห์ในแต่ละพาร์เชียล ค่าปกติกำหนดให้เป็นศูนย์

3.2.9.3 *ส่วนควบคุมกรอบของแอมพลิจูด* ใช้กำหนดกรอบของแอมพลิจูดของสัญญาณเสียง ที่จะสังเคราะห์ในแต่ละพาร์เชียล

3.2.10 ส่วนสังเคราะห์สัญญาณความถี่องค์ประกอบ ทำหน้าที่นำค่าความถี่ ตำแหน่งของความถี่องค์ประกอบ เฟสและกรอบของแอมพลิจูดที่กำหนดไว้ มาสร้างเป็นสัญญาณความถี่องค์ประกอบที่มีลักษณะเป็นรูปไซน์ โดยมีวงจรการทำงานภายในแสดงดังรูปที่ 3.7

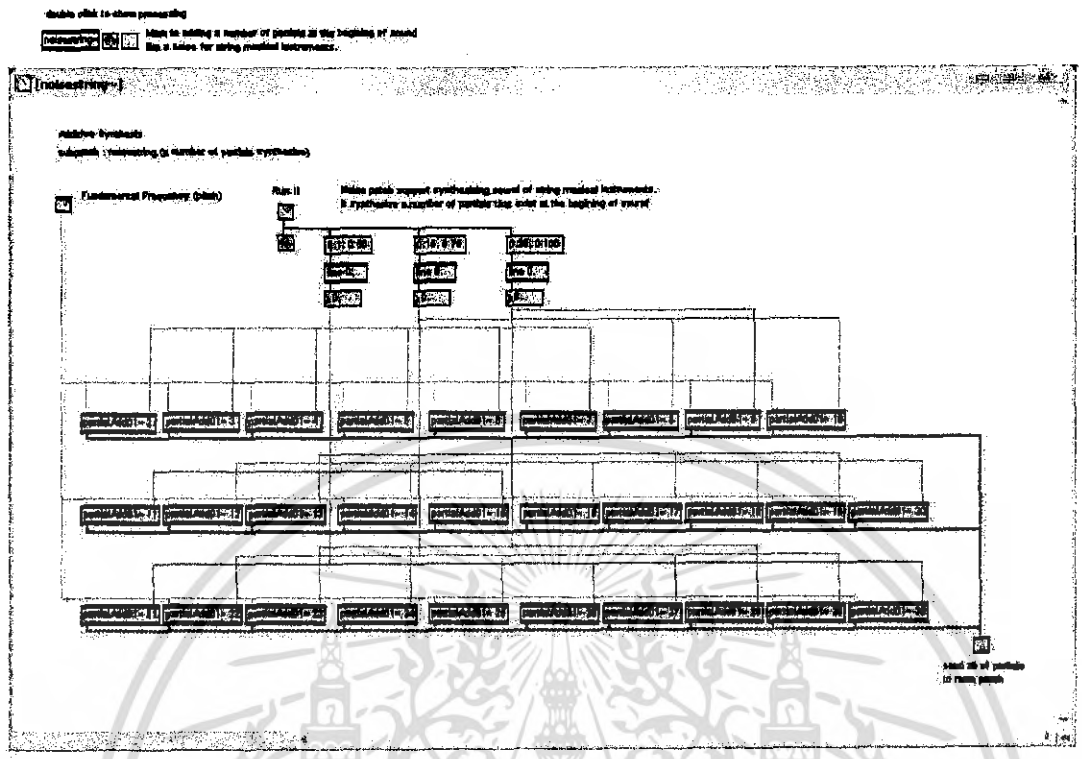
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ส่วนสร้างความถี่องค์ประกอบ ของวงจรสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดิทีฟ และวงจรการทำงานภายใน

3.2.11 ส่วนเพิ่มองค์ประกอบของเสียงพาร์เชียลสูง ทำหน้าที่สร้างสัญญาณความถี่ข้างเคียงในลำดับที่ 2 ถึง 30 ที่จำเป็นในการสังเคราะห์เสียงเครื่องดนตรีประเภทเครื่องดีดบางประเภท เพื่อให้ได้เสียงสังเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับเครื่องดนตรีจริง โดยมีวงจรการทำงานดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 ส่วนเพิ่มองค์ประกอบของเสียงพาร์เชียลสูง และวงจรการทำงานภายใน

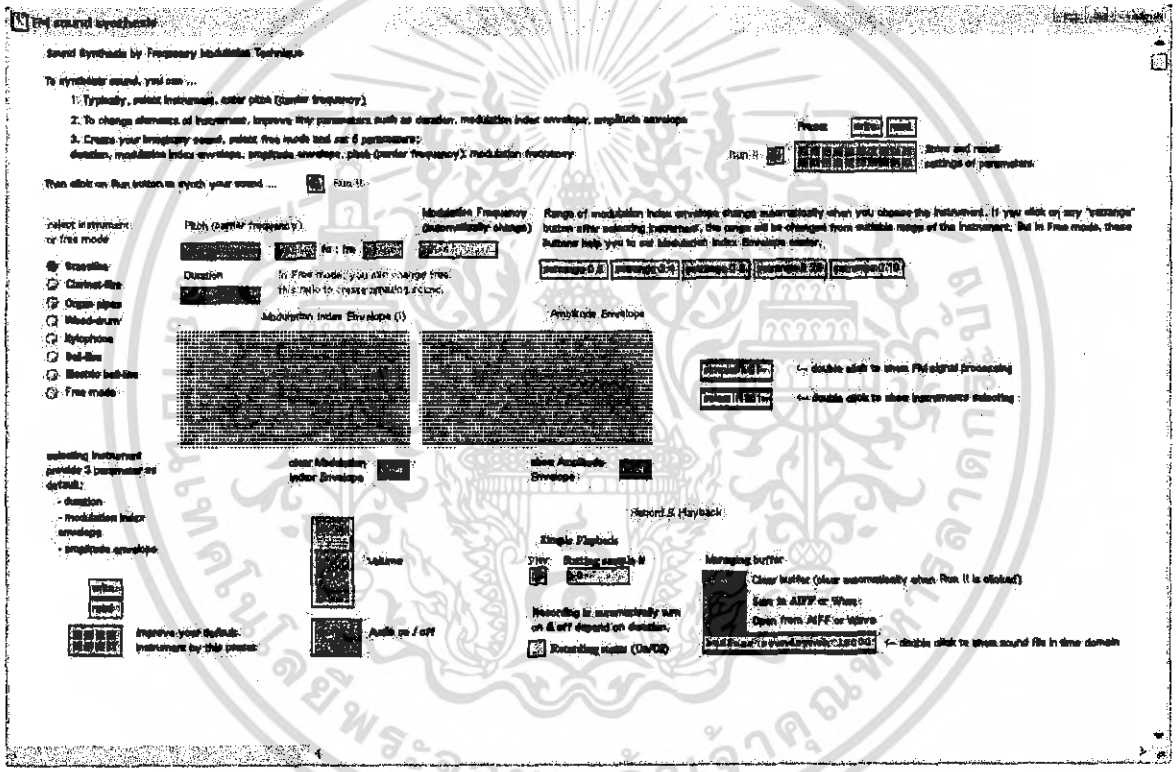
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
การใช้งานและผลการทดลองการใช้โปรแกรม

4.1 การใช้งานโปรแกรมสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคมอดดูเลชั่นเชิงความถี่อย่างง่ายบน MAX/MSP

4.1.1 ขั้นตอนการทดลอง

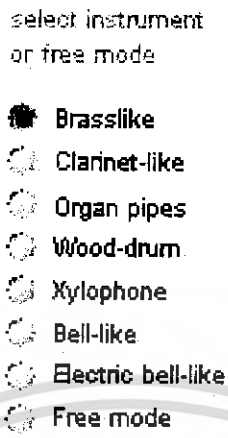
4.1.1.1 เปิดโปรแกรม "FM sound synthesis.exe"



รูปที่ 4.1 โปรแกรม FM sound synthesis.exe

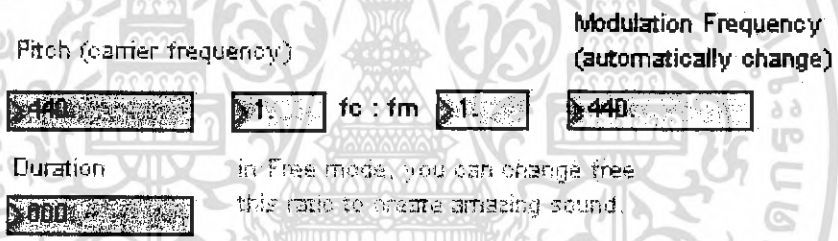
4.1.1.2 เลือกชนิดเครื่องดนตรีที่ต้องการสังเคราะห์เสียง หรือเลือกโหมดปรับอิสระ (Free mode) สำหรับการปรับแต่งค่าด้วยตัวเอง ที่ส่วนเลือกชนิดเครื่องดนตรีหรือปรับแต่งอิสระ (Select instrument or free mode)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ส่วนเลือกชนิดเครื่องดนตรีและโหมดปรับอิสระ

4.1.1.3 กำหนดความถี่พื้นฐานหรือระดับเสียงที่ต้องการสังเคราะห์ (Pitch)



รูปที่ 4.3 ส่วนกำหนดความถี่พื้นฐาน อัตราส่วนความถี่และความยาวเสียง

4.1.1.4 กำหนดอัตราส่วนความถี่ (f_c:f_m) ดังรูปที่ 4.3

- กรณีเลือกชนิดเครื่องดนตรี อัตราส่วนความถี่จะถูกกำหนดโดยอัตโนมัติ
- กรณีเลือกโหมดปรับอิสระ ให้กำหนดอัตราส่วนความถี่ตามที่ต้องการ

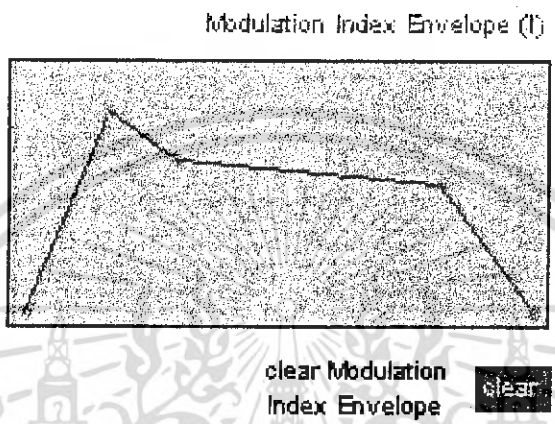
4.1.1.5 กำหนดความยาวเสียง (Duration) ดังรูปที่ 4.3

- กรณีเลือกชนิดเครื่องดนตรี ความยาวเสียงจะถูกกำหนดโดยอัตโนมัติ
- กรณีเลือกโหมดปรับอิสระ ให้กำหนดความยาวเสียงตามที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

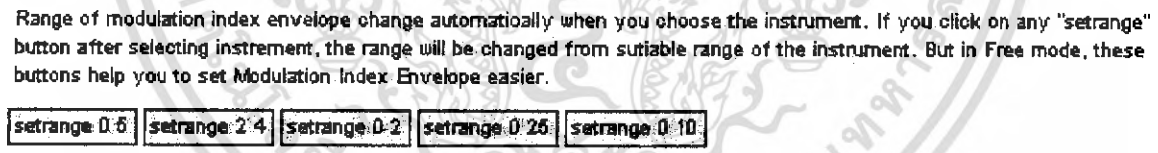
4.1.1.6 กำหนดกรอบของดัชนีการมอดดูเลชั่น (Modulation Index Envelope)

- กรณีเลือกชนิดเครื่องดนตรี กรอบของดัชนีการมอดดูเลชั่นจะถูกกำหนดโดยอัตโนมัติ
- กรณีเลือกโหมดปรับอิสระ ให้กำหนดกรอบของดัชนีการมอดดูเลชั่นตามที่ต้องการ



รูปที่ 4.4 ส่วนกำหนดกรอบของดัชนีการมอดดูเลชั่น

ใช้ส่วนควบคุมเรนจ์ของดัชนีการมอดดูเลชั่น ช่วยในการปรับแต่งช่วงของดัชนีการมอดดูเลชั่นให้เหมาะสมและง่ายในการกำหนดกรอบดัชนีการมอดดูชั่น

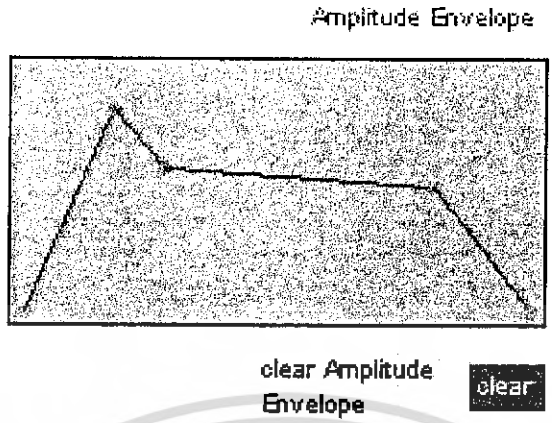


รูปที่ 4.5 ส่วนควบคุมเรนจ์ของดัชนีการมอดดูเลชั่น

4.1.1.7 กำหนดกรอบของแอมพลิจูด (Amplitude Envelope)

- กรณีเลือกชนิดเครื่องดนตรี กรอบของแอมพลิจูดจะถูกกำหนดโดยอัตโนมัติ
- กรณีเลือกโหมดปรับอิสระ ให้กำหนดกรอบของแอมพลิจูดตามที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ส่วนควบคุมกรอบของแอมพลิจูด

4.1.1.8 ปรับระดับความดังของเสียง กำหนดโดยใช้เมาส์เลื่อนขึ้น - ลง

รูปที่ 4.7 อุปกรณ์ปรับระดับความดังเสียง

4.1.1.9 กดเปิดการเล่นเสียงที่ปุ่มเลือกเปิด - ปิดการเล่นเสียง

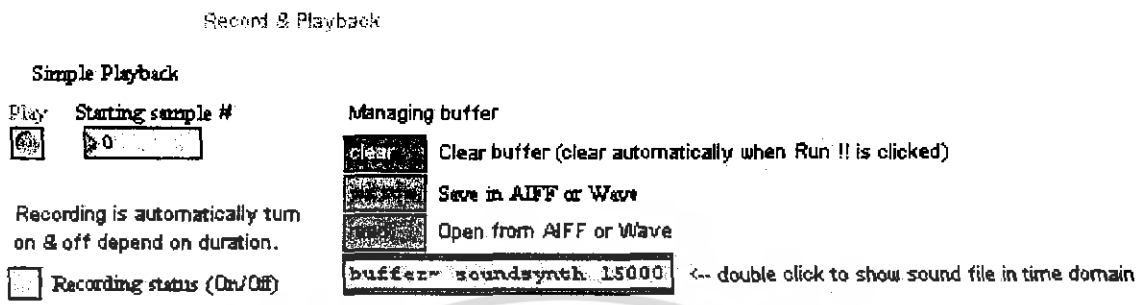
รูปที่ 4.8 อุปกรณ์เปิด – ปิด การเล่นเสียง

4.1.1.10 คลิกที่ปุ่มเล่นเสียง (Run) เพื่อทำการสังเคราะห์เสียงตามพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้

รูปที่ 4.9 ปุ่มเล่นเสียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1.11 โปรแกรมจะบันทึกเสียงที่สังเคราะห์ขึ้นโดยอัตโนมัติ จัดเก็บไว้ที่หน่วยความจำชั่วคราว



รูปที่ 4.10 ส่วนบันทึกเสียงและเล่นซ้ำ

คลิกปุ่มเล่น (Play) เพื่อเล่นเสียงที่จัดเก็บอยู่ในหน่วยความจำชั่วคราว

กรณีต้องการนำเสียงที่สังเคราะห์ได้ไปใช้ เลือกปุ่มเขียน (write) เพื่อทำการบันทึกไฟล์เสียง โดยกำหนดชื่อไฟล์และชนิดของไฟล์ (.wav, .aiff) และตำแหน่งที่จะบันทึก

กรณีต้องการนำเสียงมาเล่นบนโปรแกรม เลือกปุ่มอ่าน (read) จากนั้นเลือกเปิดไฟล์เสียงชนิด .wav หรือ .aiff ที่มีความยาวเสียงไม่เกินกว่า 15 วินาที

กรณีต้องการยกเลิกข้อมูลที่อยู่ในหน่วยความจำชั่วคราว เลือกปุ่มเคลียร์ (clear) เพื่อทำการลบข้อมูล

4.1.1.12 ทดลองใช้ตัวอย่างเสียงจากส่วนกำหนดตัวอย่างเสียงล่วงหน้า ซึ่งกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ ไว้พร้อมสำหรับการสังเคราะห์เสียงเครื่องดนตรีตัวอย่างแล้ว

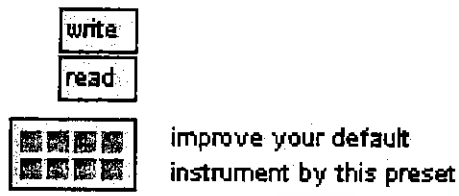
รูปที่ 4.11 ส่วนกำหนดตัวอย่างเสียงล่วงหน้า

กรณีต้องการกำหนดตัวอย่างเสียงล่วงหน้าใหม่ ทำการกำหนดพารามิเตอร์ทุกค่า แล้วกดปุ่มชิป (Shift) ที่แผงแป้นอักขระ (Keyboard) ค้างไว้ พร้อมกับคลิกเลือกช่องใดๆ ในส่วนกำหนดตัวอย่างเสียงล่วงหน้า

เลือกปุ่มเขียน (write) ตั้งชื่อชุดตัวอย่างเสียง จากนั้นเลือก "บันทึก" เพื่อบันทึกชุดตัวอย่างเสียงล่วงหน้า และเลือกปุ่มอ่าน (read) สำหรับเรียกใช้งานชุดตัวอย่างเสียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1.13 กำหนดและปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ของแต่ละเครื่องดนตรี



รูปที่ 4.12 ส่วนกำหนดและปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ของแต่ละเครื่องดนตรี

กรณีต้องการกำหนด และปรับปรุงพารามิเตอร์เฉพาะของแต่ละเครื่องดนตรีตามที่ต้องการได้แก่ ความยาวเสียง กรอบของดัชนีการมอดดูเลชั่น และกรอบของแอมพลิจูด ทำการกำหนดพารามิเตอร์ จากนั้นกดปุ่มชิป(Shift) ค้างไว้พร้อมคลิกเลือกช่องที่ตรงตามลำดับของเครื่องดนตรี

เลือกปุ่มเขียน (write) สำหรับบันทึกชุดพารามิเตอร์ของเครื่องดนตรี และเลือกปุ่มอ่าน (read) สำหรับเรียกใช้งานชุดพารามิเตอร์ของเครื่องดนตรี

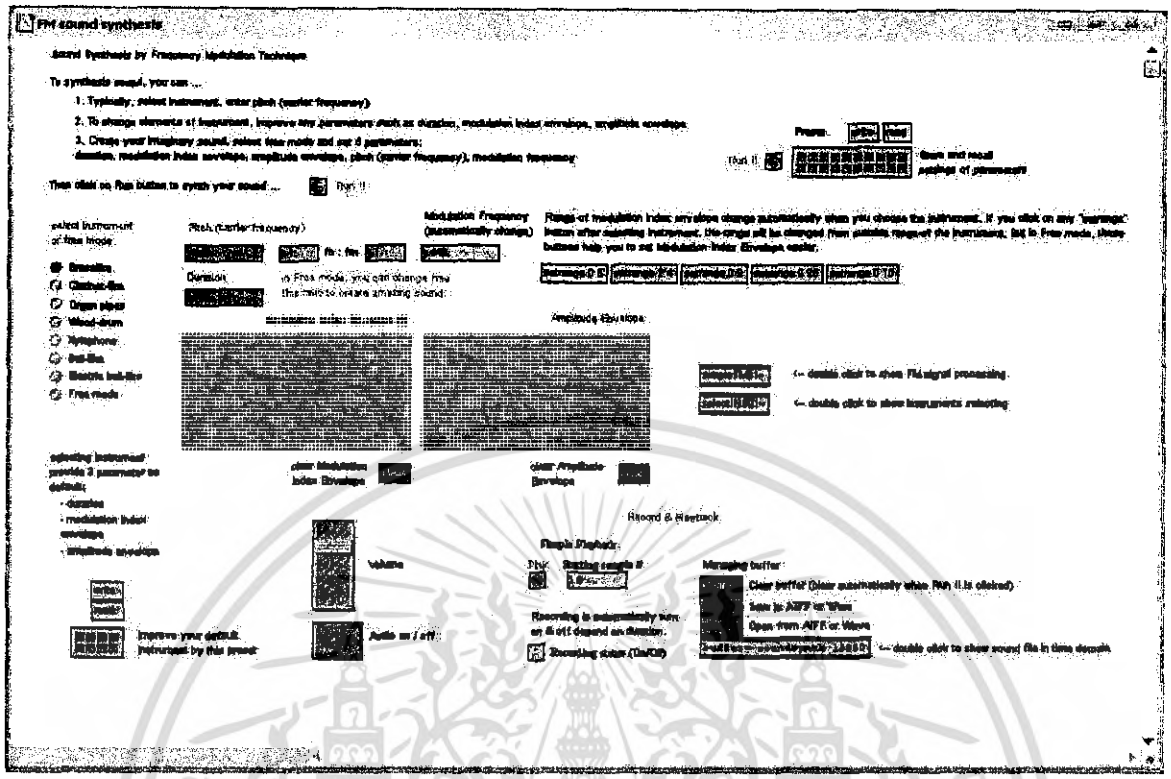
4.1.2 ผลการทดลองใช้โปรแกรมสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคมอดดูเลชั่นเชิงความถี่อย่างง่าย (FM sound synthesis.exe)

เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ตามขั้นตอนดังกล่าว แล้วคลิกที่ปุ่มเล่นเสียง โปรแกรมจะเล่นเสียงที่สังเคราะห์ออกทางลำโพง พร้อมกับจัดเก็บลงในหน่วยความจำชั่วคราว เมื่อทำการบันทึกจะได้เป็นไฟล์เสียงตามที่ต้องการ

ตัวอย่างผลการทดลอง

ทำการเลือกชนิดของเครื่องดนตรี คือ เครื่องทองเหลือง (Brasslike) โปรแกรมทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์อัตโนมัติ ได้แก่ ความยาวเสียง อัตราส่วนความถี่ กรอบของดัชนีการมอดดูเลชั่น กรอบของแอมพลิจูด จากนั้นกำหนดระดับเสียง (Pitch) เปิดส่วนเล่นเสียงออกทางลำโพง ปรับระดับความดังของเสียง ได้เป็นดังรูปที่ 4.13 เมื่อคลิกปุ่มเล่นเสียง (Run) จะได้ยินเสียงสังเคราะห์ของเครื่องดนตรีทองเหลืองสำหรับเล่นซ้ำหรือบันทึกเป็นไฟล์เสียงสำหรับนำไปใช้งานต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 พารามิเตอร์ของเครื่องดนตรีทองเหลืองที่กำหนด
ในโปรแกรมสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคมอดดูเลชั่นเชิงความถี่อย่างง่าย

4.1.3 ผลการทดลองปรับค่าพารามิเตอร์เพื่อเปรียบเทียบเสียงสังเคราะห์ จากโปรแกรมสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคมอดดูเลชั่นเชิงความถี่อย่างง่าย

4.1.3.1 เสียงสังเคราะห์ที่มีระดับเสียงต่างกัน

ทดลองสังเคราะห์เสียงคลาริเนตที่มีระดับเสียงแตกต่างกัน คือกำหนดความถี่พื้นฐานเท่ากับ 440 เฮิร์ต และ 493.9 เฮิร์ต โดยมีพารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 4.1

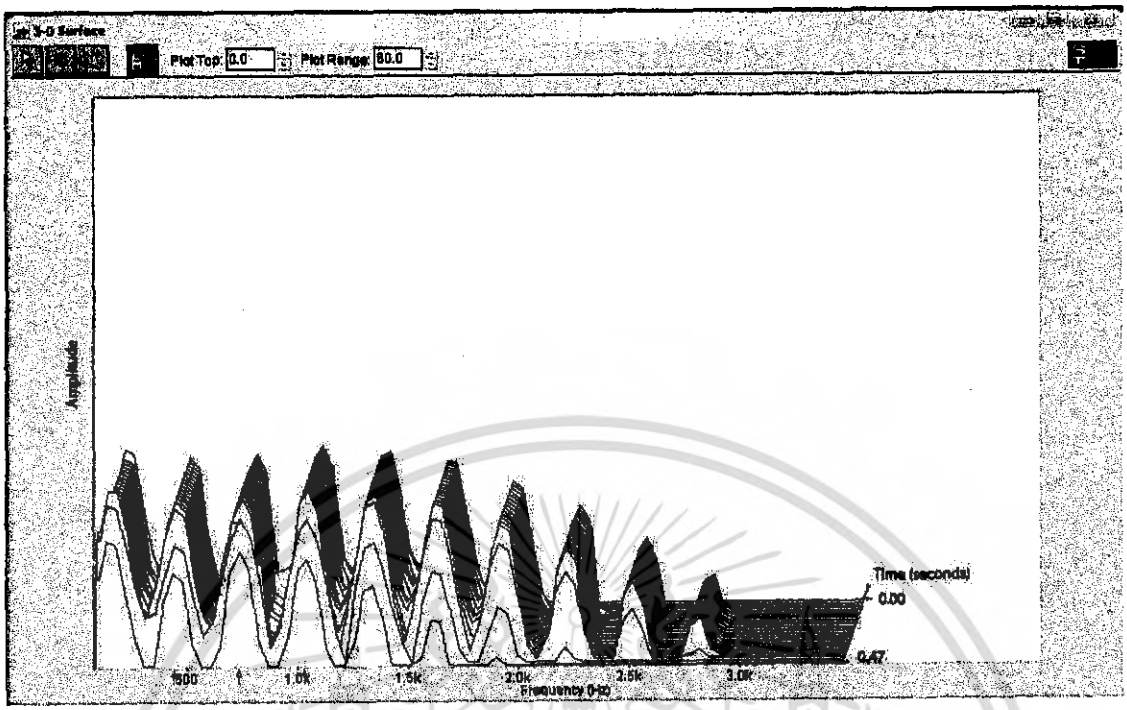
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พารามิเตอร์ที่กำหนด	เสียงสังเคราะห์ 4.1.3.1(A)	เสียงสังเคราะห์ 4.1.3.1(B)
ระดับเสียง (ความถี่พื้นฐาน)	Pitch (carrier frequency)	Pitch (carrier frequency)
อัตราส่วนความถี่ ($f_c : f_m$)	fc : fm In Free mode, you can change free this ratio to create amazing sound.	
ความยาวเสียง	Duration	
กรอบดัชนีการมอดดูเลชั่น	Modulation Index Envelope (I)	
ช่วงของดัชนีการมอดดูเลชั่น	0 - 4	
กรอบของแอมพลิจูด	Amplitude Envelope	

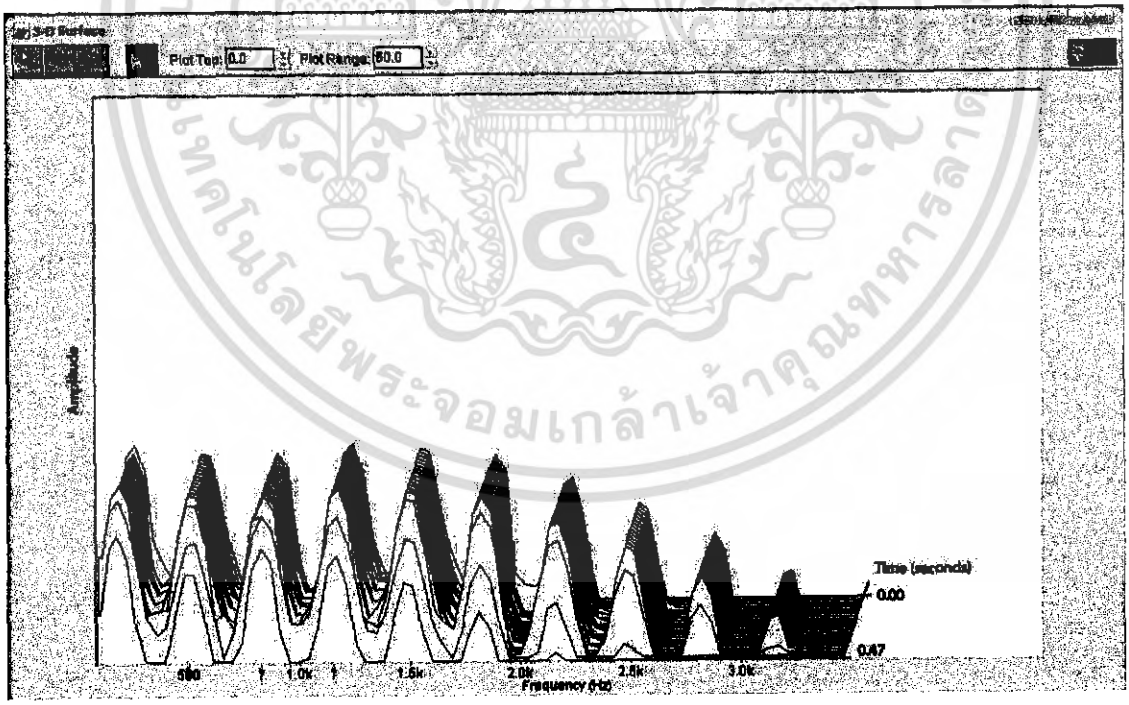
ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่กำหนดในการทดลองสร้างเสียงสังเคราะห์ที่มีระดับเสียงต่างกัน ในโปรแกรมสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคมอดดูเลชั่นเชิงความถี่อย่างง่าย

เสียงสังเคราะห์ 4.1.3.1(A) และ 4.1.3.1(B) เมื่อป้อนเข้าโปรแกรมสเปคตราแลป์เพื่อทำการวิเคราะห์ จะได้รูปองค์ประกอบของสเปคตรัมดังรูปที่ 4.14 และ 4.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 สเปคตรัมของเสียงสังเคราะห์ 4.1.3.1(A)

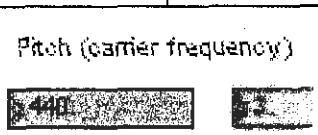
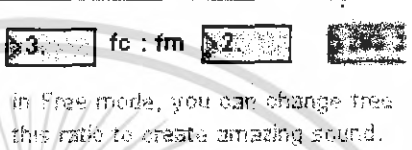
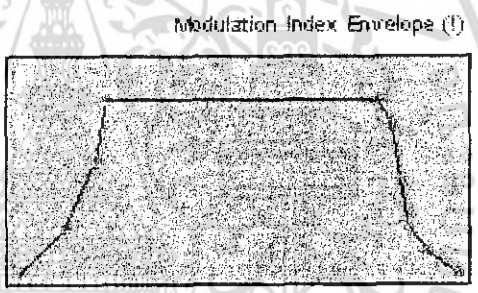
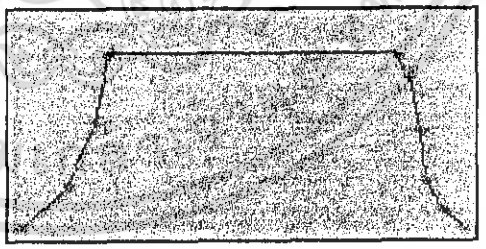


รูปที่ 4.15 สเปคตรัมของเสียงสังเคราะห์ 4.1.3.1(B)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3.2 เสียงสังเคราะห์ที่มีความยาวเสียงต่างกัน

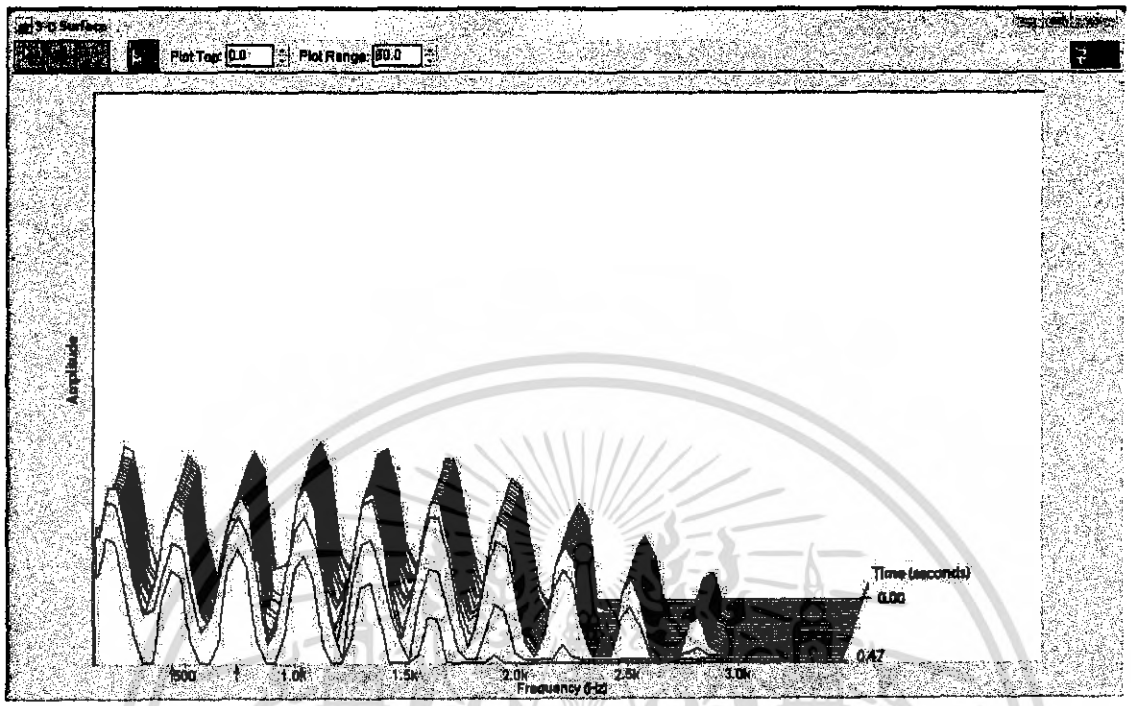
ทดลองสังเคราะห์เสียงคลาริเนตที่มีความยาวเสียงต่างกัน คือกำหนดความยาวเสียงเท่ากับ 500 มิลลิวินาที และ 1 วินาที โดยมีพารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 4.2

พารามิเตอร์ที่กำหนด	เสียงสังเคราะห์ 4.1.3.2(A)	เสียงสังเคราะห์ 4.1.3.2(B)
ระดับเสียง (ความถี่พื้นฐาน)		
อัตราส่วนความถี่ ($f_c : f_m$)		
ความยาวเสียง		
กรอบดัชนีการมอดดูเลชั่น		
ช่วงของดัชนีการมอดดูเลชั่น	0 - 4	
กรอบของแอมพลิจูด		

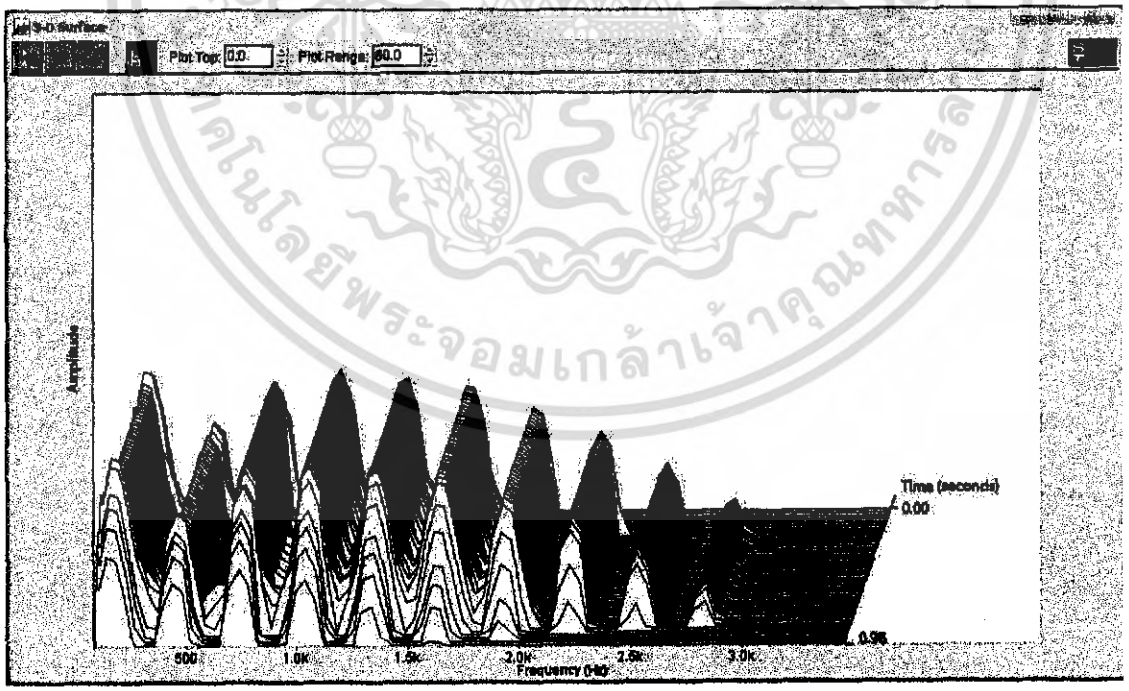
ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ที่กำหนดในการทดลองสร้างเสียงสังเคราะห์ที่มีความยาวเสียงต่างกันในโปรแกรมสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคมอดดูเลชั่นเชิงความถี่อย่างง่าย

เสียงสังเคราะห์ 4.1.3.2(A) และ 4.1.3.2(B) เมื่อป้อนเข้าโปรแกรมสเปคตราแลปเพื่อทำการวิเคราะห์ จะได้รูปองค์ประกอบของสเปคตรัมดังรูปที่ 4.16 และ 4.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 สเปคตรัมของเสียงสังเคราะห์ 4.1.3.2(A)



รูปที่ 4.17 สเปคตรัมของเสียงสังเคราะห์ 4.1.3.2(B)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3.3 เสียงสังเคราะห์ที่มีกรอบดัชนีการมอดดูเลชั่นต่างกัน

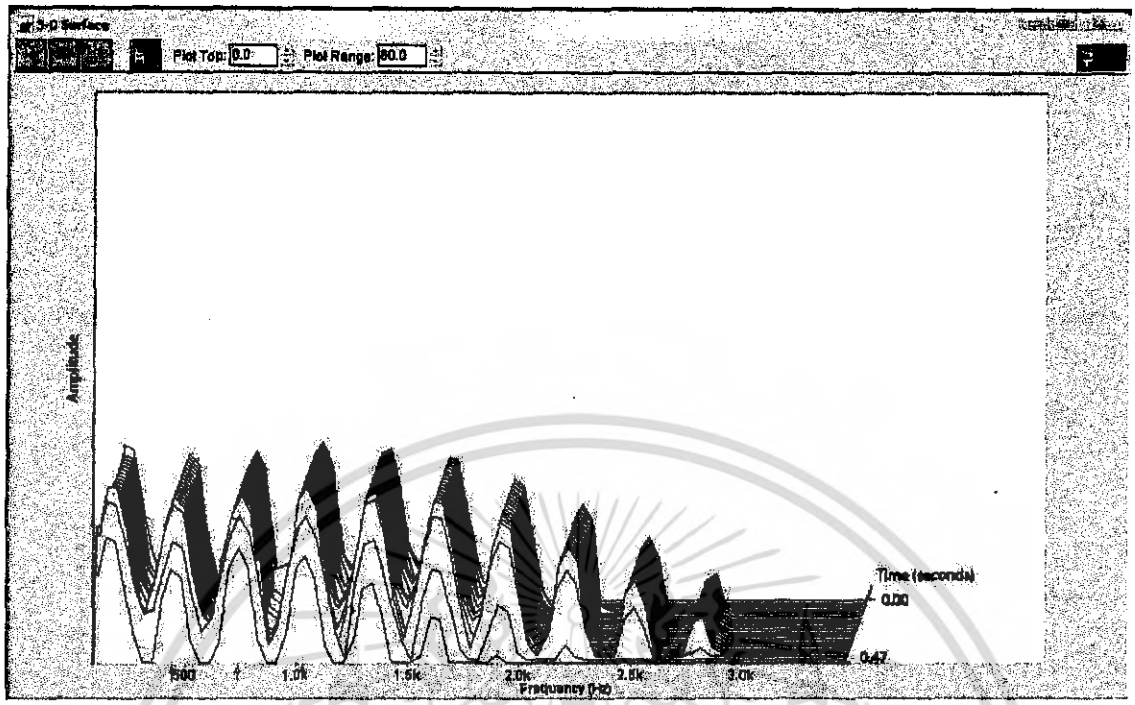
ทดลองสังเคราะห์เสียงคลาริเนตที่มีกรอบดัชนีการมอดดูเลชั่นต่างกัน คือกำหนดพารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 4.3

พารามิเตอร์ที่กำหนด	เสียงสังเคราะห์ 4.1.3.3(A)	เสียงสังเคราะห์ 4.1.3.3(B)
ระดับเสียง (ความถี่พื้นฐาน)	Pitch (carrier frequency)	
อัตราส่วนความถี่ ($f_c : f_m$)	fc : fm	
ความยาวเสียง	Duration	
กรอบดัชนีการมอดดูเลชั่น	Modulation Index Envelope (I)	Modulation Index Envelope (I)
ช่วงของดัชนีการมอดดูเลชั่น	0 - 4	
กรอบของแอมพลิจูด	Amplitude Envelope	

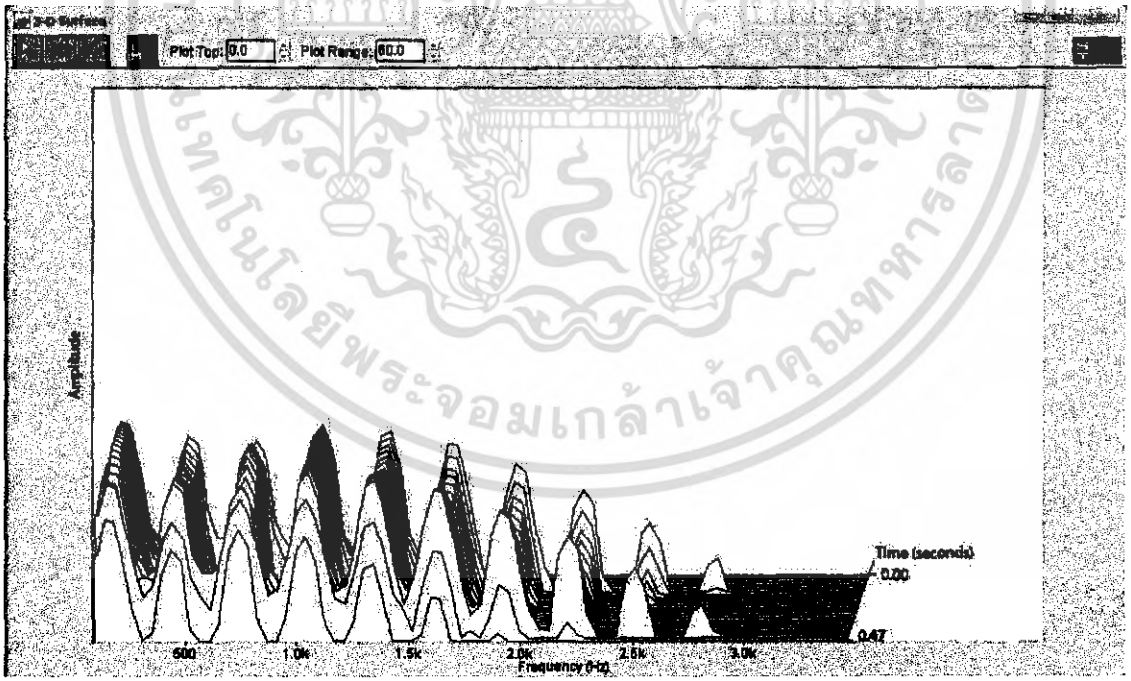
ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์ที่กำหนดในการทดลองสร้างเสียงสังเคราะห์ที่มีกรอบดัชนีการมอดดูเลชั่นต่างกันในโปรแกรมสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคมอดดูเลชั่นเชิงความถี่อย่างง่าย

เสียงสังเคราะห์ 4.1.3.3(A) และ 4.1.3.3(B) เมื่อป้อนเข้าโปรแกรมสเปคตราแลปเพื่อทำการวิเคราะห์ จะได้รูปองค์ประกอบของสเปคตรัมดังรูปที่ 4.18 และ 4.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 สเปคตรัมของเสียงสังเคราะห์ 4.1.3.3(A)

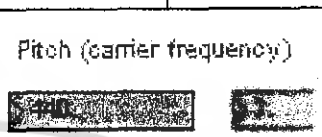
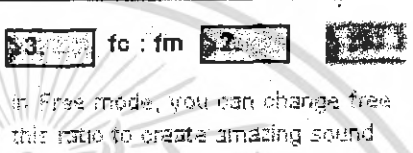
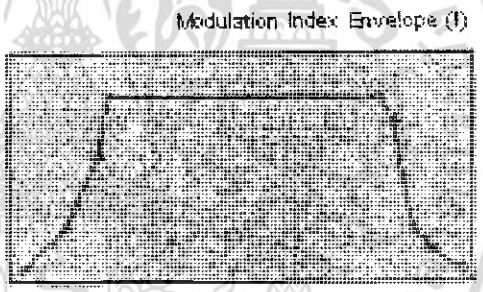
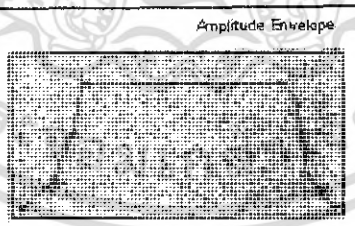
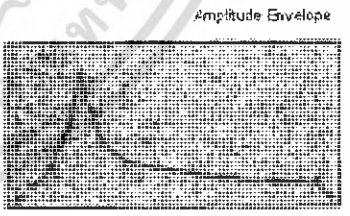


รูปที่ 4.19 สเปคตรัมของเสียงสังเคราะห์ 4.1.3.3(B)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3.4 เสียงสังเคราะห์ที่มีกรอบดัชนีการมอดดูเลชั่นต่างกัน

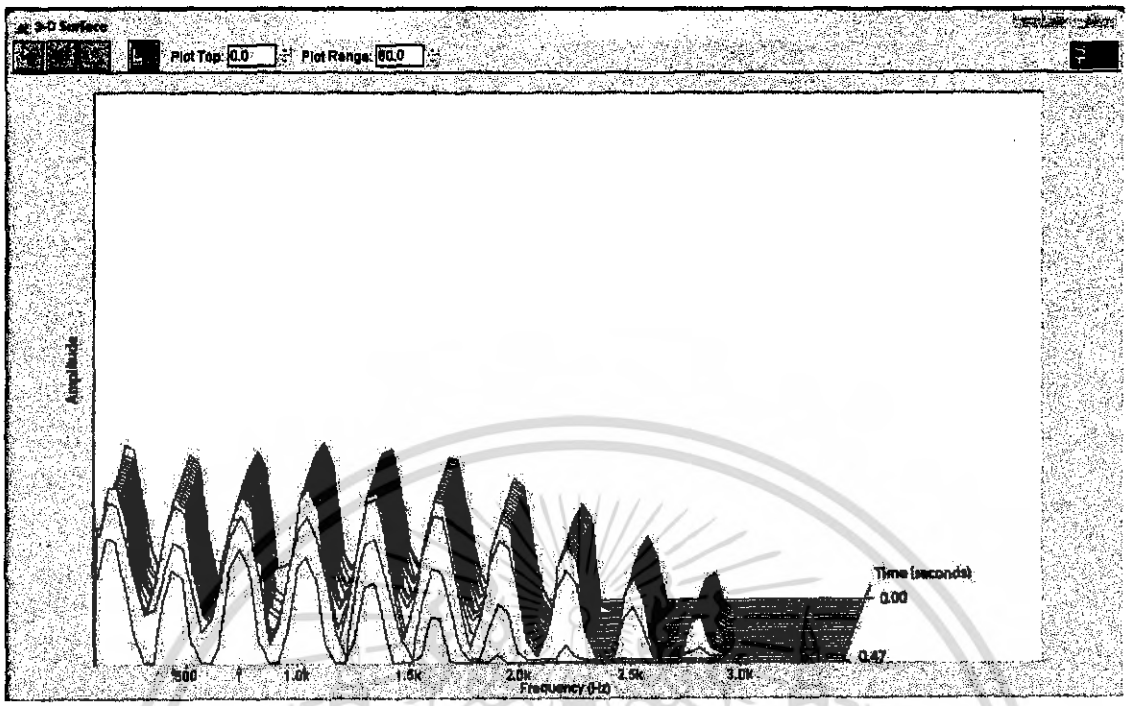
ทดลองสังเคราะห์เสียงคลาริเนตที่มีกรอบดัชนีการมอดดูเลชั่นต่างกัน คือกำหนดพารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 4.4

พารามิเตอร์ที่กำหนด	เสียงสังเคราะห์ 4.1.3.4(A)	เสียงสังเคราะห์ 4.1.3.4(B)
ระดับเสียง (ความถี่พื้นฐาน)		
อัตราส่วนความถี่ ($f_c : f_m$)		
ความยาวเสียง		
กรอบดัชนีการมอดดูเลชั่น		
ช่วงของดัชนีการมอดดูเลชั่น	0 - 4	
กรอบของแอมพลิจูด		

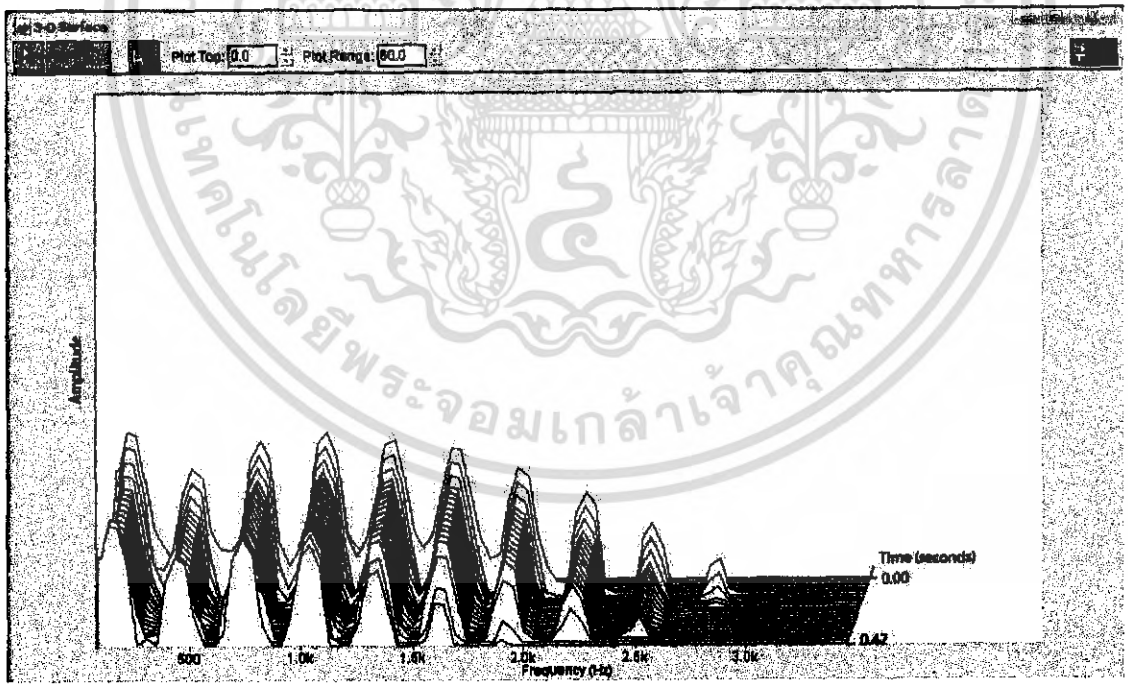
ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์ที่กำหนดในการทดลองสร้างเสียงสังเคราะห์ที่มีกรอบของแอมพลิจูดต่างกันในโปรแกรมสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคมอดดูเลชั่นเชิงความถี่อย่างง่าย

เสียงสังเคราะห์ 4.1.3.4(A) และ 4.1.3.4(B) เมื่อป้อนเข้าโปรแกรมสเปคตราแลปเพื่อทำการวิเคราะห์ จะได้รูปองค์ประกอบของสเปคตรัมดังรูปที่ 4.20 และ 4.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 สเปคตรัมของเสียงสังเคราะห์ 4.1.3.4(A)

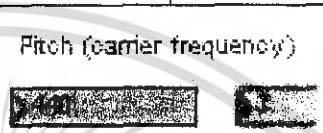
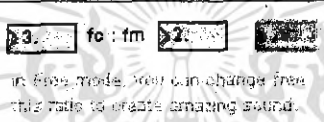
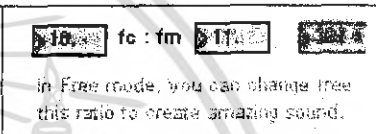
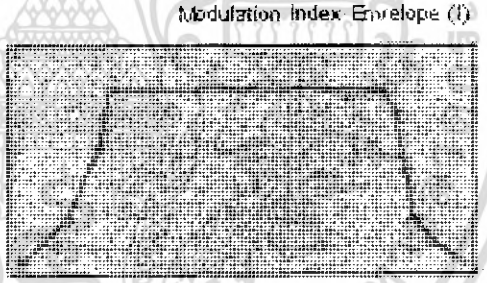
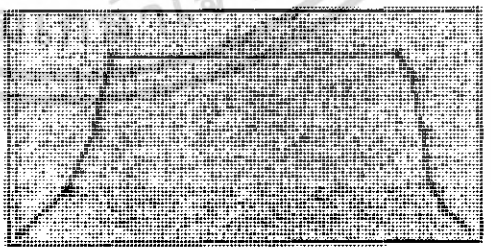


รูปที่ 4.21 สเปคตรัมของเสียงสังเคราะห์ 4.1.3.4(B)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3.5 เสียงสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนความถี่ (f_c:f_m) ต่างกัน

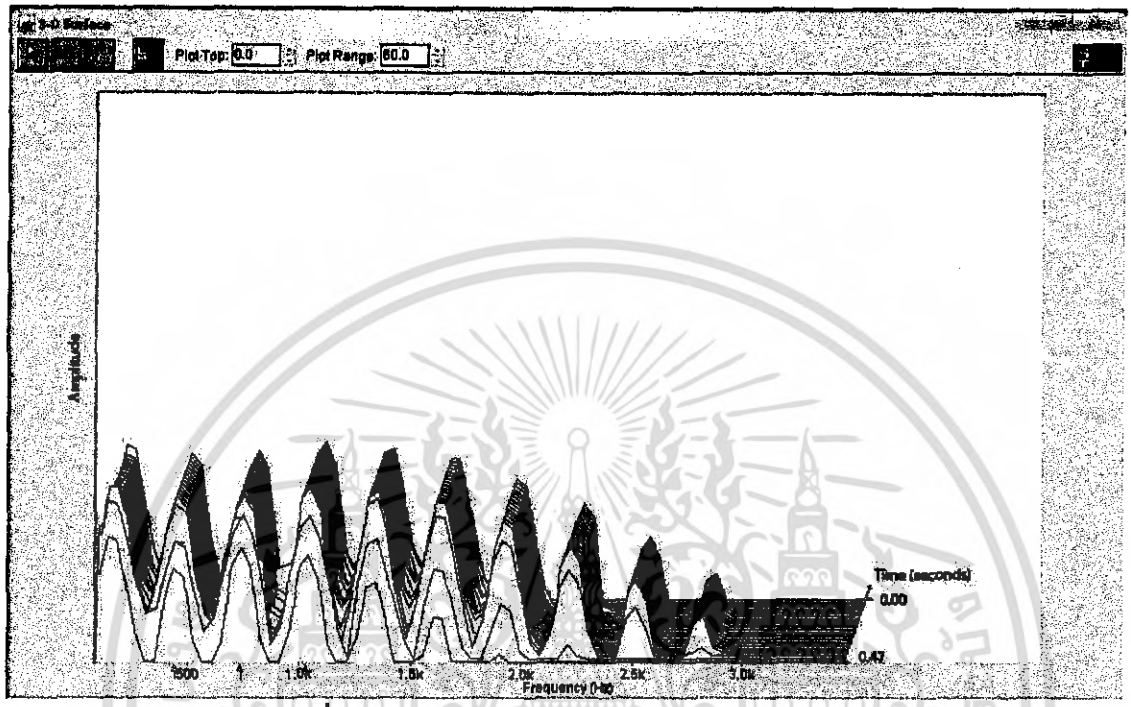
ทดลองสังเคราะห์เสียงเครื่องดนตรีที่มีอัตราส่วนความถี่ต่างกัน คือ เป็นเครื่องดนตรีต่างชนิดกัน โดยกำหนดให้เสียงสังเคราะห์ 4.1.3.5(A) เป็นเสียงของคลาริเนต และเสียงสังเคราะห์ 4.1.3.5(B) เปลี่ยนค่าอัตราส่วนความถี่เป็น 16 : 11 ซึ่งเป็นอัตราส่วนความถี่ที่ใช้กำหนดให้กับกลองไม้ โดยกำหนดพารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 4.5

พารามิเตอร์ที่กำหนด	เสียงสังเคราะห์ 4.1.3.5(A)	เสียงสังเคราะห์ 4.1.3.5(B)
ระดับเสียง (ความถี่พื้นฐาน)		
อัตราส่วนความถี่ (f_c : f_m)		
ความยาวเสียง		
กรอบดัชนีการมอดดูเลชั่น		
ช่วงของดัชนีการมอดดูเลชั่น	0 - 4	
กรอบของแอมพลิจูด		

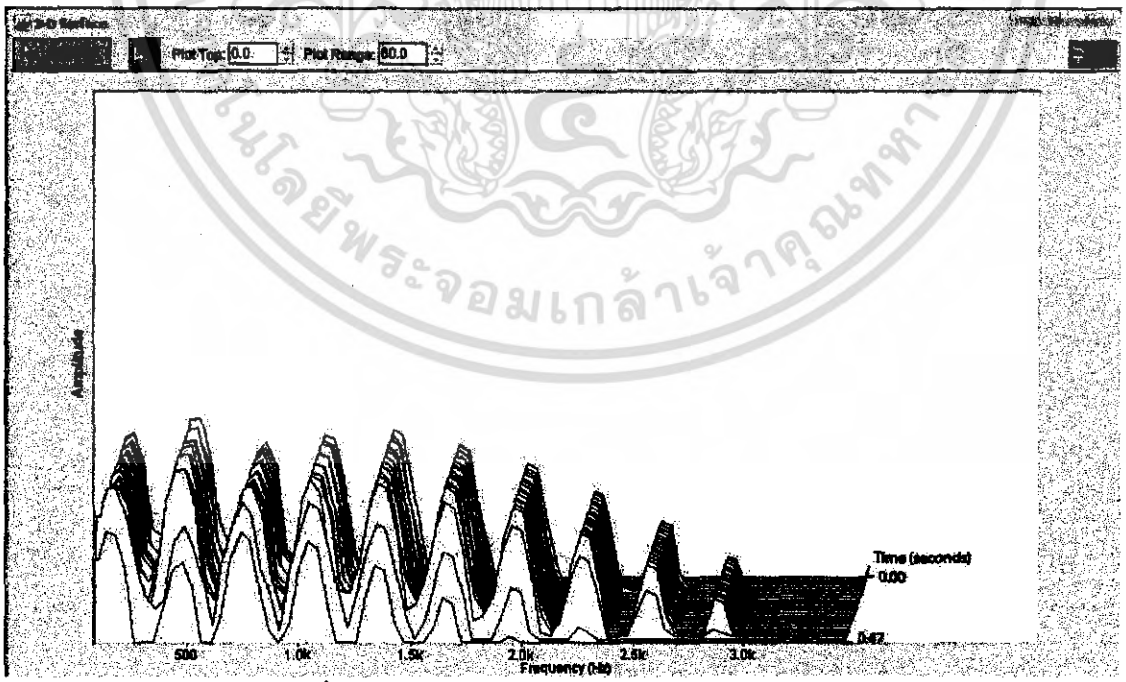
ตารางที่ 4.5 พารามิเตอร์ที่กำหนดในการทดลองสร้างเสียงสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนความถี่ต่างกันในโปรแกรมสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคมอดดูเลชั่นเชิงความถี่อย่างง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสียงสังเคราะห์ 4.1.3.5(A) และ 4.1.3.5(B) เมื่อป้อนเข้าโปรแกรมสเปคตราแลปเพื่อทำการวิเคราะห์ จะได้รูปองค์ประกอบของสเปคตรัมดังรูปที่ 4.22 และ 4.23



รูปที่ 4.22 สเปคตรัมของเสียงสังเคราะห์ 4.1.3.5(A)



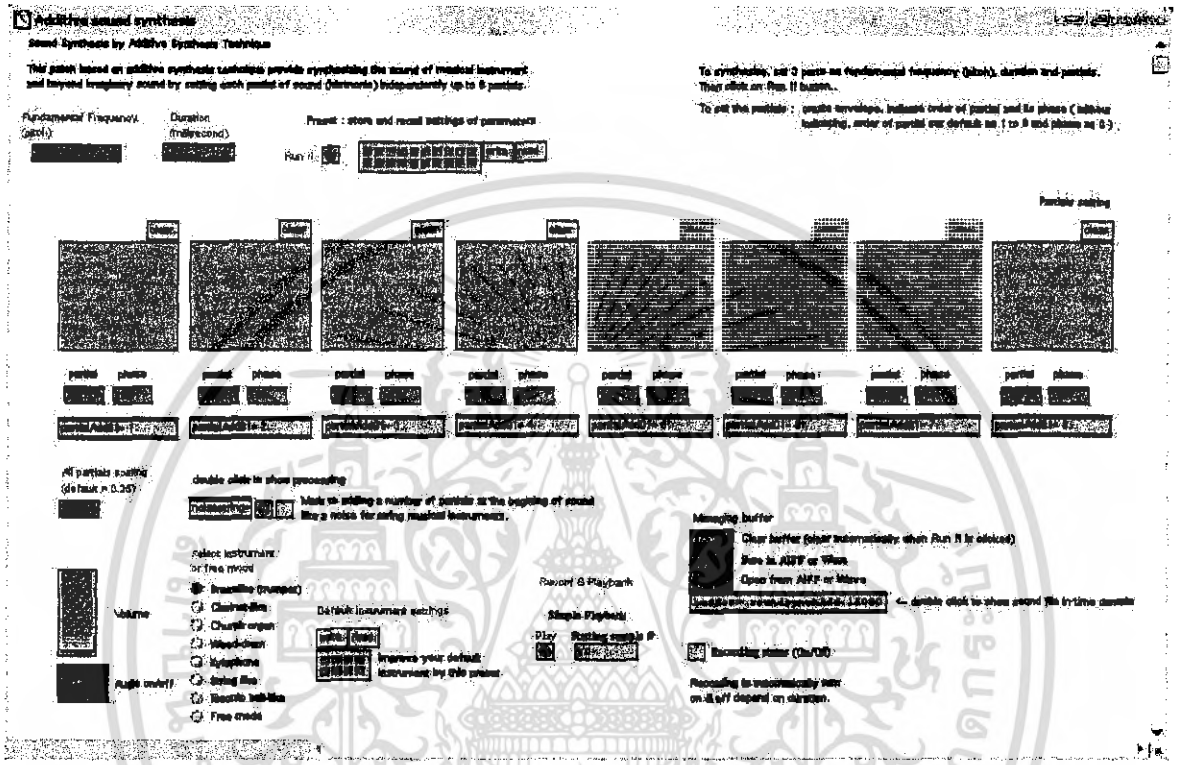
รูปที่ 4.23 สเปคตรัมของเสียงสังเคราะห์ 4.1.3.5(B)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การใช้งานโปรแกรมสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดิทีฟบน MAX/MSP

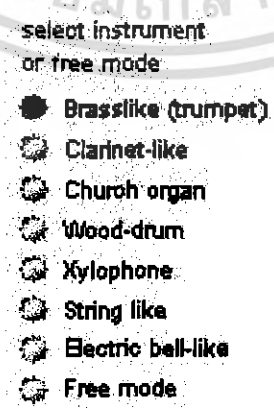
4.2.1 ขั้นตอนการทดลอง

4.2.1.1 เปิดโปรแกรม Additive sound synthesis.exe



รูปที่ 4.24 โปรแกรม Additive sound synthesis.exe

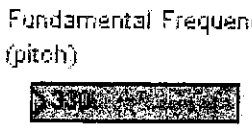
4.2.1.2 เลือกชนิดเครื่องดนตรีที่ต้องการสังเคราะห์เสียง หรือ เลือกโหมดปรับอิสระ (Free mode) สำหรับการปรับแต่งค่าด้วยตัวเอง ดังรูป 4.25



รูปที่ 4.25 ส่วนเลือกชนิดเครื่องดนตรีและโหมดปรับอิสระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1.3 กำหนดความถี่พื้นฐานหรือระดับเสียงที่ต้องการสังเคราะห์ (Pitch)



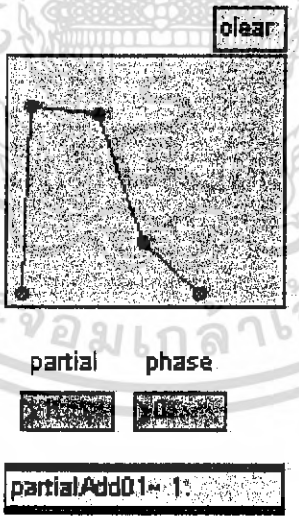
รูปที่ 4.26 ส่วนกำหนดความถี่พื้นฐาน

4.2.1.4 กำหนดความยาวเสียง (Duration) ดังรูปที่

- กรณีเลือกชนิดเครื่องดนตรีความยาวเสียงจะถูกกำหนดโดยอัตโนมัติ
- กรณีเลือกโหมดปรับอิสระให้กำหนดความยาวเสียงตามที่ต้องการ

รูปที่ 4.27 ส่วนกำหนดความยาวเสียง

4.2.1.5 กำหนดกรอบของแอมพลิจูด ตำแหน่งความถี่พาร์เชียลเป็นจำนวนเท่าของความถี่พื้นฐาน และเฟสของแต่ละองค์ประกอบของเสียงที่ต้องการสังเคราะห์ ที่ส่วนควบคุมองค์ประกอบของสัญญาณในแต่ละพาร์เชียล (Partial setting)



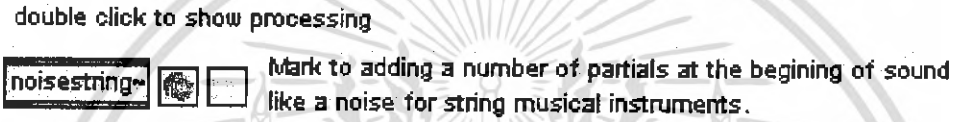
รูปที่ 4.28 ส่วนควบคุมองค์ประกอบของสัญญาณในแต่ละพาร์เชียล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1.6 กำหนดขนาดของแอมพลิจูดของสัญญาณที่สังเคราะห์ทุกพาร์เชียล เพื่อความสะดวกของผู้ใช้งาน โปรแกรมจะกำหนดเริ่มต้นมาให้เป็น 0.25

รูปที่ 4.29 ส่วนกำหนดขนาดของแอมพลิจูดของสัญญาณที่สังเคราะห์ทุกพาร์เชียล

4.2.1.7 เลือกเพิ่มองค์ประกอบของเสียงพาร์เชียลสูง สำหรับการสังเคราะห์เสียงเครื่องดนตรีประเภทดีดบางชนิด เช่น กีตาร์

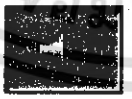


รูปที่ 4.30 ส่วนเพิ่มองค์ประกอบของเสียงพาร์เชียลสูง

4.2.1.8 ปรับระดับความดังของเสียง กำหนดโดยใช้เมาส์เลื่อนขึ้น - ลง

รูปที่ 4.31 อุปกรณ์ปรับระดับความดังของเสียง

4.2.1.9 กดเปิดการเล่นเสียงที่ปุ่มเลือกเปิด - ปิดการเล่นเสียง



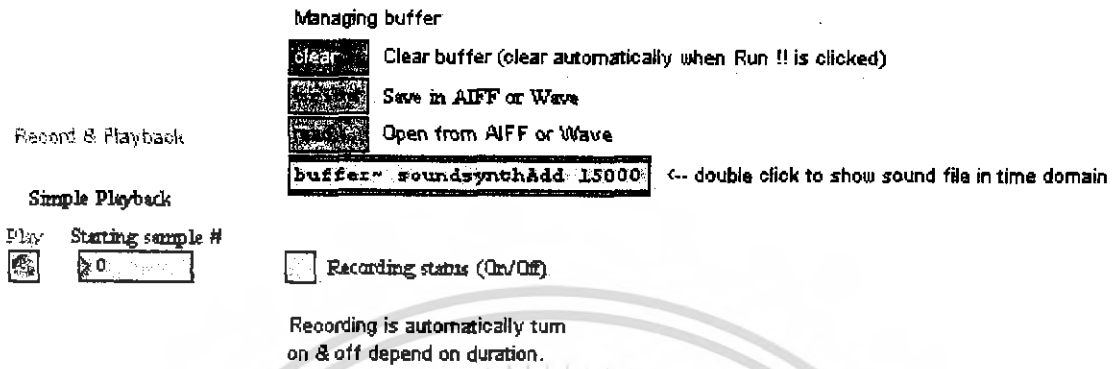
รูปที่ 4.32 อุปกรณ์เปิด - ปิด การเล่นเสียง

4.2.1.10 คลิกที่ปุ่มเล่นเสียง (Run) เพื่อทำการสังเคราะห์เสียงตามพารามิเตอร์ที่กำหนด

รูปที่ 4.33 ปุ่มเล่นเสียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1.11 โปรแกรมจะบันทึกเสียงที่สังเคราะห์ขึ้นโดยอัตโนมัติ จัดเก็บไว้ที่หน่วยความจำชั่วคราว



รูปที่ 4.34 ส่วนบันทึกเสียงและเล่นซ้ำ

คลิกปุ่มเล่น (Play) เพื่อเล่นเสียงที่จัดเก็บอยู่ในหน่วยความจำชั่วคราว

กรณีต้องการนำเสียงที่สังเคราะห์ได้ไปใช้ เลือกปุ่มเขียน (write) เพื่อทำการบันทึกไฟล์เสียง โดยกำหนดชื่อไฟล์และชนิดของไฟล์ (.wav, .aiff) และตำแหน่งที่จะบันทึก

กรณีต้องการนำเสียงมาเล่นบนโปรแกรม เลือกปุ่มอ่าน (read) จากนั้นเลือกเปิดไฟล์เสียงชนิด .wav หรือ .aiff ที่มีความยาวเสียงไม่เกินกว่า 15 วินาที

กรณีต้องการยกเลิกข้อมูลที่อยู่ในหน่วยความจำชั่วคราว เลือกปุ่มเคลียร์ (clear) เพื่อทำการลบข้อมูล

4.2.1.12 ทดลองใช้ตัวอย่างเสียงจากส่วนกำหนดตัวอย่างเสียงล่วงหน้า ซึ่งกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ ไว้พร้อมสำหรับการสังเคราะห์เสียงเครื่องดนตรีตัวอย่างแล้ว

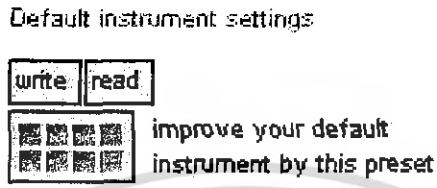
รูปที่ 4.35 ส่วนกำหนดตัวอย่างเสียงล่วงหน้า

กรณีต้องการกำหนดตัวอย่างเสียงล่วงหน้าใหม่ ทำการกำหนดพารามิเตอร์ทุกค่า แล้วกดปุ่มชิป (Shift) ที่แผงแป้นอักขระ (Keyboard) ค้างไว้ พร้อมกับคลิกเลือกช่องใดๆ ในส่วนกำหนดตัวอย่างเสียงล่วงหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลือกปุ่มเขียน (write) ตั้งชื่อชุดตัวอย่างเสียง จากนั้นเลือก "บันทึก" เพื่อบันทึกชุดตัวอย่างเสียงล่วงหน้า และเลือกปุ่มอ่าน (read) สำหรับเรียกใช้งานชุดตัวอย่างเสียง

4.2.1.13 กำหนดและปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ของแต่ละเครื่องดนตรี



รูปที่ 4.36 ส่วนกำหนดและปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ของแต่ละเครื่องดนตรี

กรณีต้องการกำหนด และปรับปรุงพารามิเตอร์เฉพาะของแต่ละเครื่องดนตรีตามที่ต้องการได้แก่ ความยาวเสียง กรอบของดัชนีการมอดดูเลชั่น และกรอบของแอมพลิจูด ทำการกำหนดพารามิเตอร์ จากนั้นกดปุ่มชิป (Shift) ค้างไว้พร้อมคลิกเลือกช่องที่ตรงตามลำดับของเครื่องดนตรี

เลือกปุ่มเขียน (write) สำหรับบันทึกชุดพารามิเตอร์ของเครื่องดนตรี และเลือกปุ่มอ่าน (read) สำหรับเรียกใช้งานชุดพารามิเตอร์ของเครื่องดนตรี

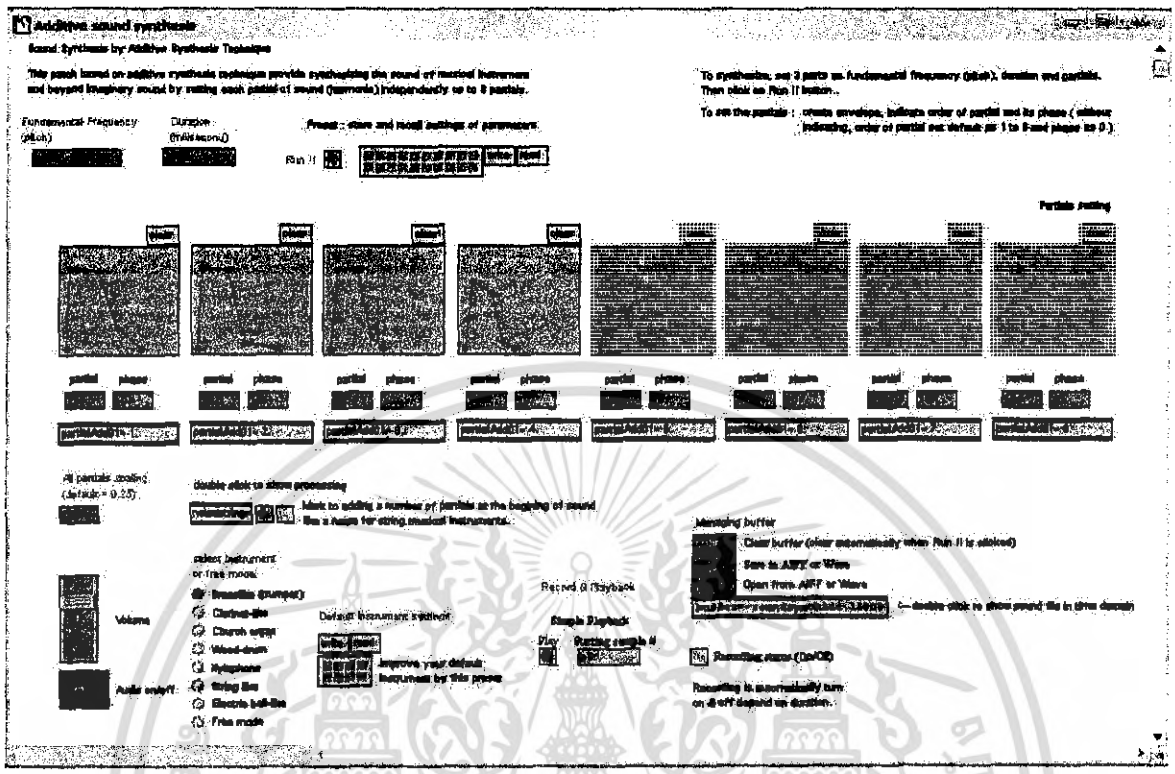
4.2.2 ผลการทดลองใช้โปรแกรมสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดิทีฟ (Additive sound synthesis.exe)

เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ตามขั้นตอนดังกล่าว แล้วคลิกที่ปุ่มเล่นเสียง โปรแกรมจะเล่นเสียงที่สังเคราะห์ออกทางลำโพง พร้อมกับจัดเก็บลงในหน่วยความจำชั่วคราว เมื่อทำการบันทึกจะได้เป็นไฟล์เสียงตามที่ต้องการ

ตัวอย่างผลการทดลอง

ทำการเลือกชนิดของเครื่องดนตรี คือ เครื่องทองเหลือง (Brasslike) ในตัวอย่างนี้คือ ทรัมเป็ต (Trumpet) โปรแกรมทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์อัตโนมัติ ได้แก่ ความยาวเสียง กรอบของแอมพลิจูด ตำแหน่งของพาร์เชียลและเฟสของแต่ละพาร์เชียลที่เป็นองค์ประกอบของเสียง ขนาดของแอมพลิจูดของทุกพาร์เชียล จากนั้นกำหนดระดับเสียง (Pitch) เปิดส่วนเล่นเสียงออกทางลำโพง ปรับระดับความดังของเสียง ได้เป็นดังรูปที่ 4.37 เมื่อคลิกปุ่มเล่นเสียง (Run) จะได้ยินเสียงสังเคราะห์ของเครื่องดนตรีทองเหลือง สำหรับเล่นซ้ำหรือบันทึกเป็นไฟล์เสียงสำหรับนำไปใช้งานต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.37 พารามิเตอร์ของเครื่องดนตรีทองเหลืองที่กำหนด
ในโปรแกรมสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดิทีฟ

4.2.3 ผลการทดลองปรับค่าพารามิเตอร์เพื่อเปรียบเทียบเสียงสังเคราะห์ จากโปรแกรมสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดิทีฟ

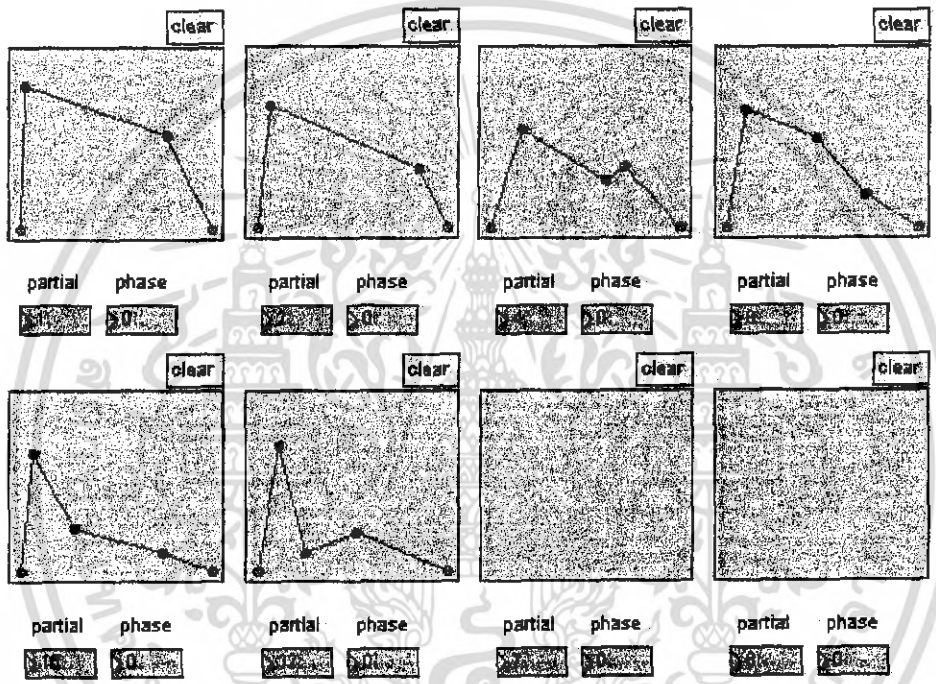
4.2.3.1 เสียงสังเคราะห์ที่มีตำแหน่งของพาร์เชียลแตกต่างกัน

ทดลองสังเคราะห์เสียงออร์แกน (Church Organ) ที่มีตำแหน่งของพาร์เชียลแตกต่างกันแตกต่างกัน โดยกำหนดพารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 4.6

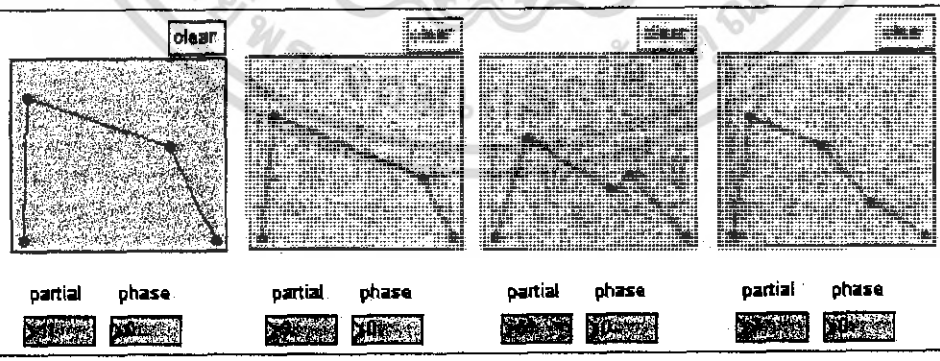
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พารามิเตอร์ที่กำหนด	เสียงสังเคราะห์ 4.2.3.1(A)	เสียงสังเคราะห์ 4.2.3.1(B)
ระดับเสียง (ความถี่พื้นฐาน)	Fundamental Frequency (pitch)	
ความยาวเสียง	Duration (millisecond)	
การเพิ่มองค์ประกอบพาร์เชียลสูง	ไม่เพิ่ม	

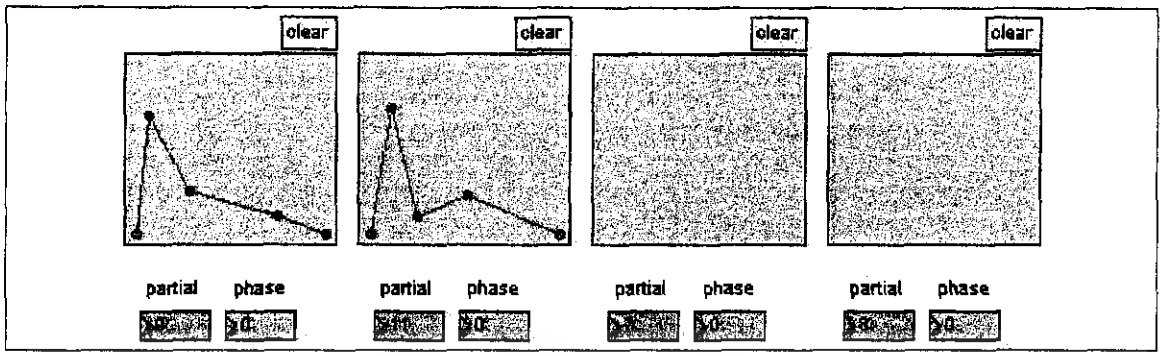
องค์ประกอบของสัญญาณในแต่ละพาร์เชียล ของเสียงสังเคราะห์ 4.2.3.1(A)



องค์ประกอบของสัญญาณในแต่ละพาร์เชียล ของเสียงสังเคราะห์ 4.2.3.1(B)

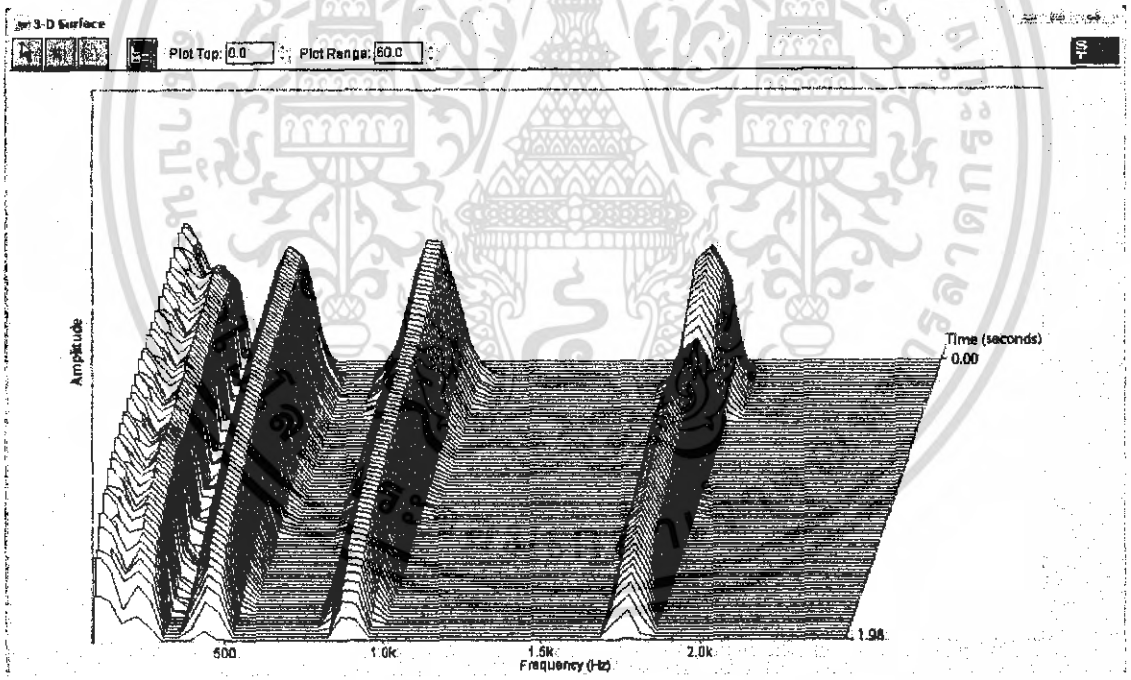


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



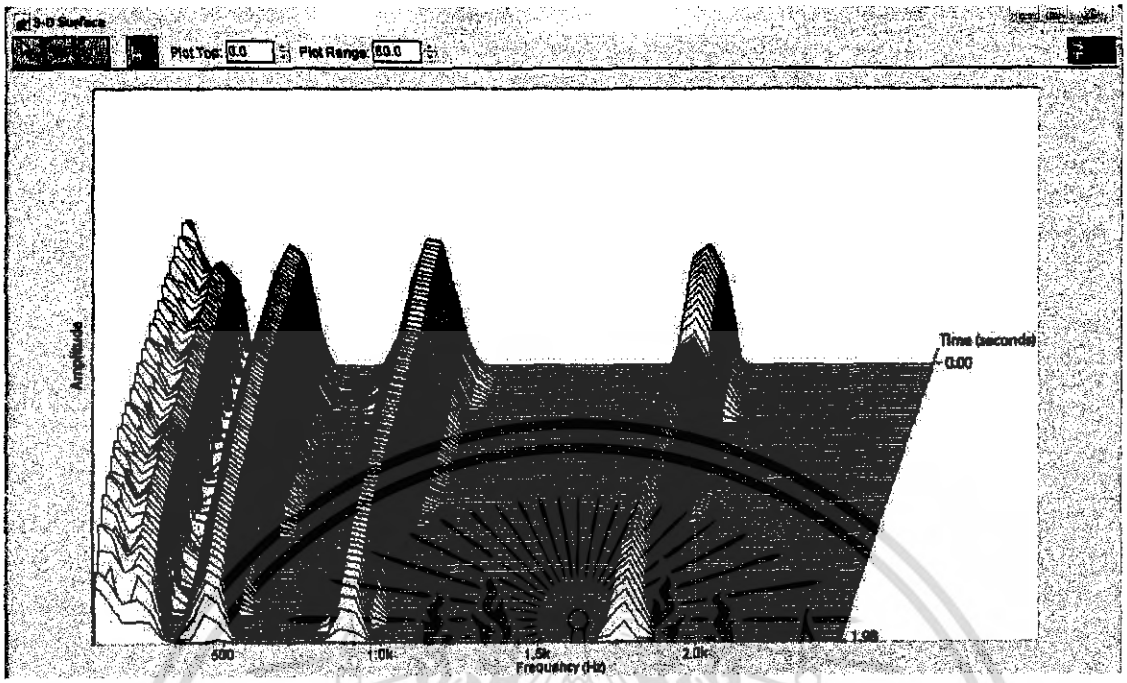
ตารางที่ 4.6 พารามิเตอร์ที่กำหนดในการทดลองสร้างเสียงสังเคราะห์ที่มีตำแหน่งขององค์ประกอบของสัญญาณในแต่ละพาร์เชียลต่างกันในโปรแกรมสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดิทีฟ

เสียงสังเคราะห์ 4.2.3.1(A) และ 4.2.3.1(B) เมื่อป้อนเข้าโปรแกรมสเปคตราแลปเพื่อทำการวิเคราะห์ จะได้รูปองค์ประกอบของสเปคตรัมดังรูปที่ 4.38 และ 4.39



รูปที่ 4.38 สเปคตรัมของเสียงสังเคราะห์ 4.2.3.1(A)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



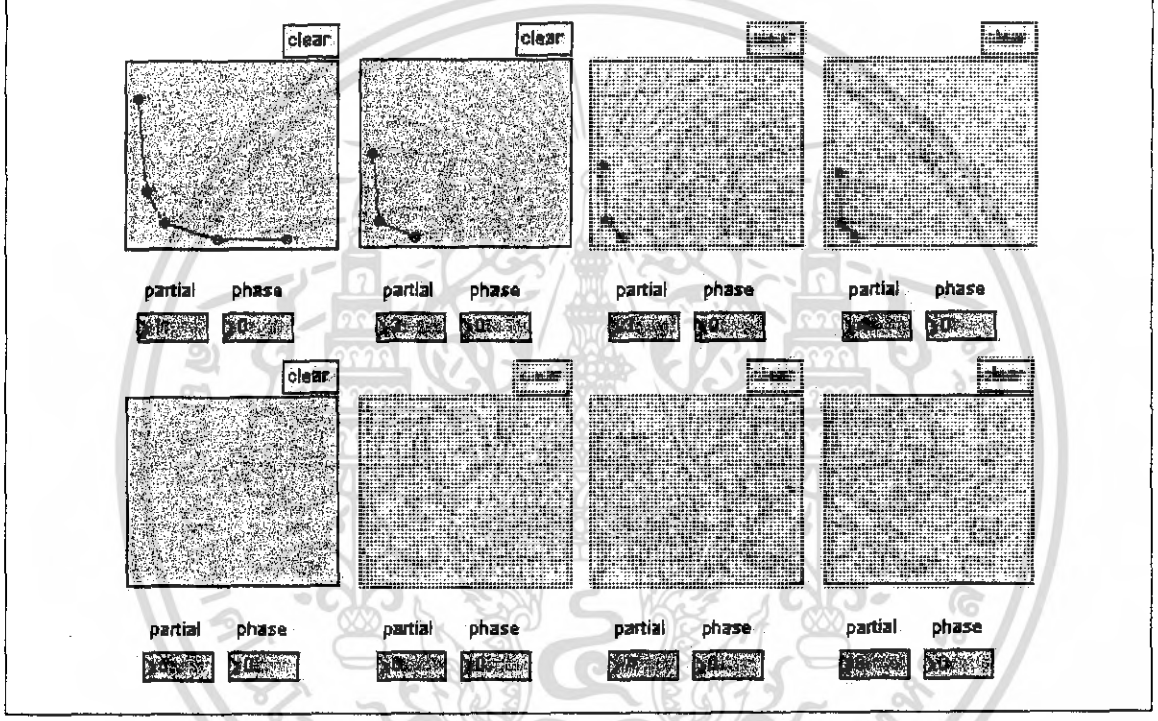
รูปที่ 4.39 สเปคตรัมของเสียงสังเคราะห์ 4.2.3.1(B)

4.2.3.2 เสียงสังเคราะห์ที่มีการเพิ่มและไม่เพิ่มองค์ประกอบพาร์เชียลสูง

ทดลองสังเคราะห์เสียงกีตาร์ที่ไม่มีการเพิ่มองค์ประกอบพาร์เชียลสูง ในเสียงสังเคราะห์ที่ 4.2.3.2(A) และมีการเพิ่มองค์ประกอบพาร์เชียลสูงในเสียงสังเคราะห์ที่ 4.2.3.2(B) โดยกำหนดพารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

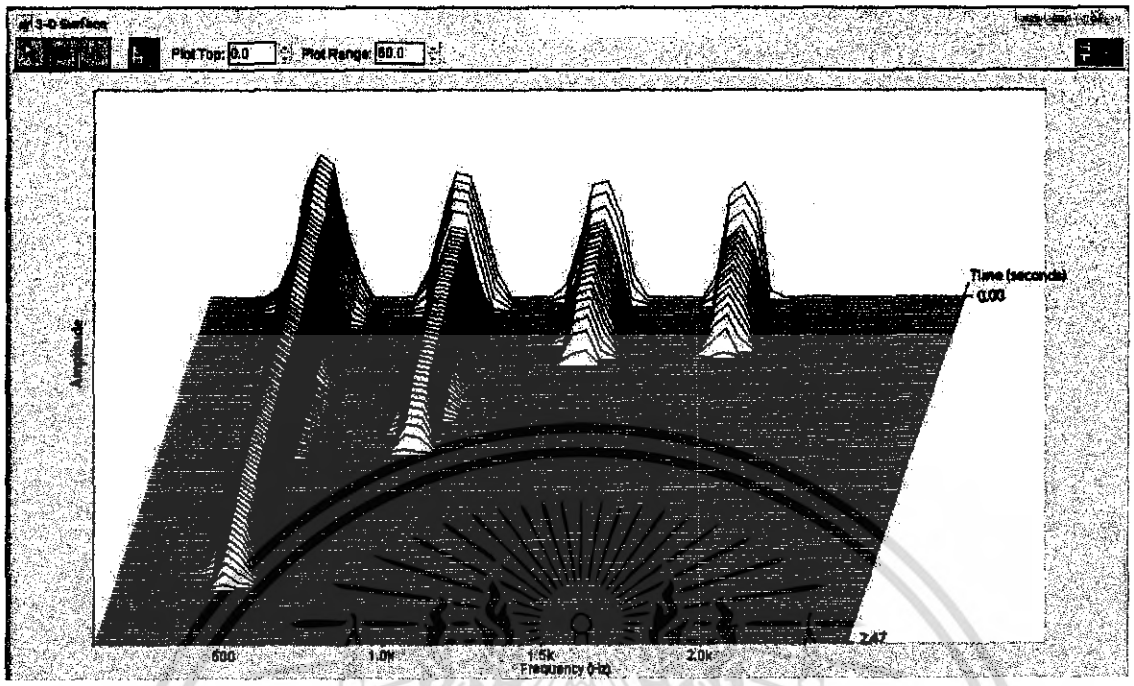
พารามิเตอร์ที่กำหนด	เสียงสังเคราะห์ 4.2.3.2(A)	เสียงสังเคราะห์ 4.2.3.2(B)
ระดับเสียง (ความถี่พื้นฐาน)	Fundamental Frequency (pitch)	
ความยาวเสียง	Duration (milisecond)	
การเพิ่มองค์ประกอบพาร์เชียลสูง	ไม่เพิ่ม	เพิ่ม
องค์ประกอบของสัญญาณในแต่ละพาร์เชียล ของเสียงสังเคราะห์ 4.2.3.2(A) และ 4.2.3.2(B)		



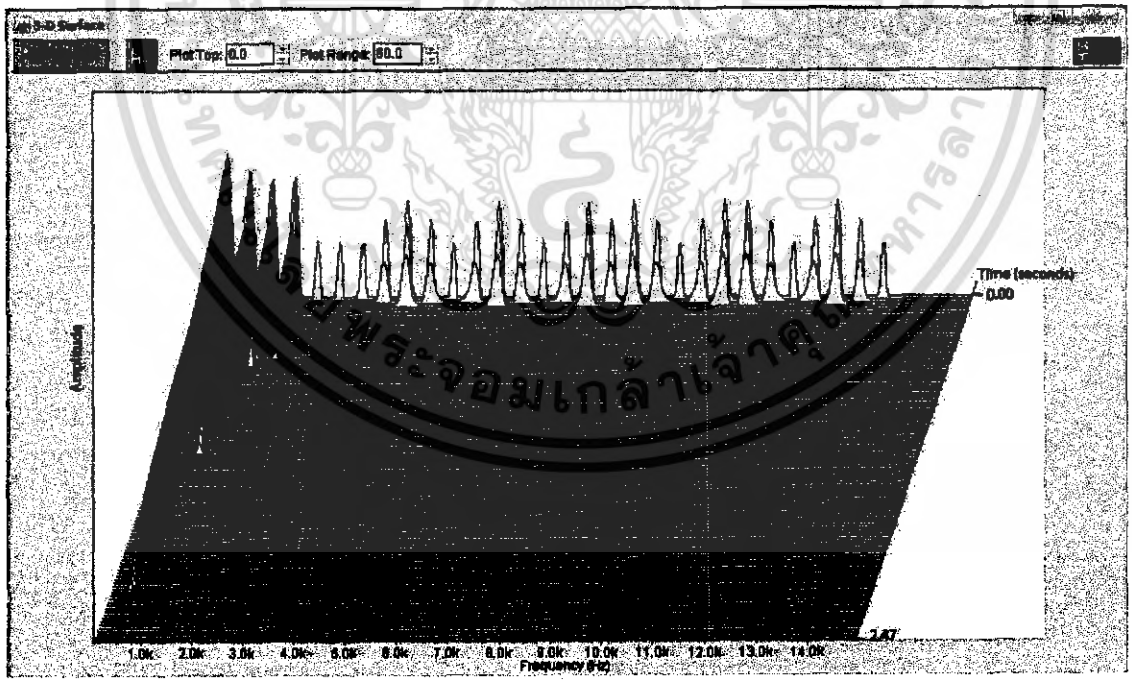
ตารางที่ 4.7 พารามิเตอร์ที่กำหนดในการทดลองสร้างเสียงสังเคราะห์ที่มีการเพิ่มและไม่เพิ่มองค์ประกอบพาร์เชียลสูงในโปรแกรมสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดิทีฟ

เสียงสังเคราะห์ 4.2.3.2(A) และ 4.2.3.2(B) เมื่อป้อนเข้าโปรแกรมสเปคตราแลปเพื่อทำการวิเคราะห์ จะได้รูปองค์ประกอบของสเปคตรัมดังรูปที่ 4.40 และ 4.41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.40 สเปคตรัมของเสียงสังเคราะห์ 4.2.3.2(A)



รูปที่ 4.41 สเปคตรัมของเสียงสังเคราะห์ 4.2.3.2(B)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
ปัญหาที่เกิดขึ้นและการพัฒนาโครงงาน

5.1 ปัญหาข้อจำกัดในการส่งผ่านค่าพารามิเตอร์ของโปรแกรมที่พัฒนาบนแมกซ์ - เอ็มเอสพี

เนื่องจากการพัฒนาโปรแกรมบน MAX/MSP มีข้อจำกัดในการส่งผ่านค่าพารามิเตอร์ร่วมกับการพัฒนาโปรแกรมบนเทคโนโลยีอื่นๆ ในการพัฒนาโปรแกรมบนแมกซ์ – เอ็มเอสพี จึงจำเป็นต้องพัฒนาโปรแกรมทั้งหมดขึ้นด้วยแมกซ์ – เอ็มเอสพีเท่านั้น แม้ว่าแมกซ์ – เอ็มเอสพี จะรองรับการออกแบบและพัฒนาโปรแกรมด้านเสียงได้อย่างหลากหลายและยืดหยุ่นมาก แต่จากข้อจำกัดดังกล่าว ทำให้โปรแกรมที่พัฒนาโดยแมกซ์ – เอ็มเอสพี ไม่สามารถพัฒนาให้ใช้งานได้ในบางกรณี เช่น การให้บริการแบบไคลเอนท์ – เซิร์ฟเวอร์บนระบบเครือข่าย เป็นต้น จากที่กล่าวมาทำให้การใช้งานโปรแกรมสังเคราะห์เสียงที่พัฒนาขึ้นทั้งสองเทคนิคนี้ ผู้ใช้จะต้องทำการดาวน์โหลดโปรแกรมผ่านเว็บไซต์ และทำการติดตั้งโปรแกรมลงในเครื่องก่อน

โปรแกรมสังเคราะห์เสียงที่พัฒนานี้สามารถเรียกใช้งานได้อย่างอิสระ จากการเปิดโปรแกรม FM sound synthesis.exe และ Additive sound synthesis.exe โดยอาศัยส่วนรันไทม์ (Runtime) ที่รวมอยู่ด้วยแล้วในโปรแกรม โดยไม่จำเป็นต้องมีการติดตั้งโปรแกรมแมกซ์ – เอ็มเอสพีบนเครื่องของผู้ใช้ นอกจากนี้ยังรองรับการนำโปรแกรมไปพัฒนาต่อบนแมกซ์ – เอ็มเอสพีโดยใช้ไฟล์ FM sound synthesis.mxf และ Additive sound synthesis.mxf ที่รวมอยู่ในชุดโปรแกรมที่ให้บริการได้

5.2 ปัญหาความสมบูรณ์ของตัวอย่างเสียงสังเคราะห์

เสียงที่สังเคราะห์ขึ้นมาได้ ยังคงมีความคลาดเคลื่อนจากเสียงจริงอยู่บ้าง ซึ่งจะขึ้นกับความละเอียดของค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากขั้นตอนการวิเคราะห์สัญญาณเสียงต้นฉบับ การจะทำให้เสมือนจริงจะต้องอาศัยการศึกษาองค์ประกอบของเสียงที่สลับซับซ้อนมากขึ้น และต้องออกแบบวงจรสังเคราะห์เสียงที่มีความสลับซับซ้อนสูงขึ้นเช่นเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

1. Eduardo Reck Miranda, "Computer Sound Design Synthesis Techniques and Programming", 2nd Edition, Focal Press
2. Curtis Roads, John Strawn, "Foundations of Computer Music", The MIT Press, Fourth printing, 1988
3. Charles Dodge, Thomas A. Jerse, "Computer Music Synthesis Composition and Performance", Schirmer Books
4. Wayne Bateman, "Introduction to Computer Music", A Wiley-Interscience Publication
5. ณัชชา โสคติยานุรักษ์, "ทฤษฎีดนตรี", สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พิมพ์ครั้งที่ 4 , พ.ศ. 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้