

การสร้างลายน้ำบนสัญญาณเสียงดิจิทัลโดยใช้การแปลงเวฟเล็ต  
และการหาค่าที่ดีที่สุดแบบพาร์ทิเคิลสวอม



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2556

**WAVELET-BASED DIGITAL AUDIO WATERMARKING  
USING PARTICLE SWARM OPTIMIZATION**



**Kankamon Phucronghin**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering**

**Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2013**

การสร้างลายน้ำบนสัญญาณเสียงดิจิทัลโดยใช้การแปลงเวฟเล็ต  
และการหาค่าที่ดีที่สุดแบบพาร์ทิเคิลสวอม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.อนันต์ อุ่นศิริไฉย)

ประธานกรรมการ

(รศ. ดร.กิตติ อัดถกิจมงคล)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(รศ. ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว)

กรรมการ

(ผศ. ร.อ. ดร.ประโยชน์ คำสวัสดิ์)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิ้มปีจางค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

กรณัฏกมล ภูครองหิน : การสร้างลายน้ำบนสัญญาณเสียงดิจิทัลโดยใช้การแปลงเวฟเล็ต และการหาค่าที่ดีที่สุดแบบพาร์ทิเคิลสวอม (WAVELET-BASED DIGITAL AUDIO WATERMARKING USING PARTICLE SWARM OPTIMIZATION)

อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติ อัครกิมงคล, 194 หน้า.

เทคโนโลยีลายน้ำเป็นการนำศาสตร์ทางด้านต่าง ๆ มารวมเข้าด้วยกัน เพื่อประยุกต์ใช้ในการป้องกันการละเมิดลิขสิทธิ์ของข้อมูลดิจิทัลโดยไม่ได้รับอนุญาต เนื่องจากปัจจุบันการเข้าถึงเสียงดิจิทัลนั้นสามารถทำได้ง่าย ทำให้เสียงดิจิทัลถูกจัดเก็บ ทำซ้ำ และเผยแพร่อย่างรวดเร็ว การแสดงความเป็นเจ้าของลิขสิทธิ์ของเสียงดิจิทัลจึงถูกนำมาใช้เพื่อป้องกันการละเมิดลิขสิทธิ์จากผู้ที่ไม่ได้รับอนุญาต โดยในวิธีการฝังลายน้ำนั้น ข้อมูลลายน้ำจะถูกฝังลงในสัญญาณเสียงต้นฉบับ ซึ่งจะต้องไม่สามารถรับรู้ได้โดยการฟัง และสามารถทนทานต่อการโจมตีที่พบมากในปัจจุบัน ในวิทยานิพนธ์นี้ ได้นำเสนอการฝังลายน้ำแบบปิดบนสัญญาณเสียงในโดเมนเวฟเล็ต และใช้การค้นหาค่าที่ดีที่สุดแบบพาร์ทิเคิลสวอม (PSO) ค้นหาความเข้มของลายน้ำ เพื่อลายน้ำที่ได้มีความทนทานต่อการโจมตีทางการประมวลผลสัญญาณ กระบวนการสกัดลายน้ำในอัลกอริทึมที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ไม่ต้องใช้สัญญาณเสียงต้นฉบับในการตรวจจับ ซึ่งจากผลการทดสอบลายน้ำที่ทำการฝังไม่สามารถรับรู้ถึงความเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเสียงจากการฟัง และมีความทนทานต่อการโจมตีการประมวลผลสัญญาณหลายรูปแบบ เช่น การตัด การกรองด้วยตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน การเพิ่มสัญญาณรบกวน การบีบอัดแบบมีการสูญเสีย การเปลี่ยนแปลงช่วงเวลา

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2556

ลายมือชื่อนักศึกษา \_\_\_\_\_

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา \_\_\_\_\_



KANKAMON PHUCRONGHIN : WAVELET-BASED DIGITAL AUDIO  
WATERMARKING USING PARTICLE SWARM OPTIMIZATION.

THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. KITTI ATTAKITMONGCOL, Ph.D.,

194 PP.

DIGITAL WATERMARKING/ IMAGE PROCESSING/ WAVELET TRANSFORM

Digital watermarking technology requires elements from many disciplines in order to prevent illegal use of digital data. Since audio signal is one of the digital contents which are easily stored, distributed and duplicated, the ownership verification using audio watermarking is an efficient tool to provide copyright protection of digital audio data. This technique embeds watermark into the host audio signal in such a way that the watermark is inaudible and robust against common attacks. In this thesis, an algorithm for blind audio watermarking in wavelet transform domain is proposed to achieve high quality watermarked audio signal and robust watermark. A search algorithm called particle swarm optimization is used to find the optimal intensity of watermark. The watermark detection process can be performed without using the original audio signal. The experimental results demonstrate that watermark is inaudible and robust to many digital signal processing such as resampling, cropping, low pass filter, additive noise, lossy compression and time scale modification.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2013

Student's Signature \_\_\_\_\_

Advisor's Signature \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากพระคุณของ คุณพ่อเรื่องศักดิ์ คุณแม่คมคาย ภูครองหิน ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณท่านทั้งสองที่มอบชีวิต ให้ความรักความอบอุ่น ให้การอบรมเลี้ยงดู และให้คำปรึกษา ความสำเร็จนี้คือความภาคภูมิใจของท่านทั้งสอง

ขอขอบพระคุณในความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการและการดำเนินการวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคล อันได้แก่

รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติ อัครกัจจมงคล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้มอบความรู้ ให้ความช่วยเหลือ และคำปรึกษาทั้งทางด้านงานวิจัย การใช้ชีวิต และเป็นกำลังใจให้ผู้ทำวิจัยโดยตลอด

รองศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว ผู้คอยชี้แนะแนวทางในการงานวิจัยที่ถูกต้อง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.ประโยชน์ คำสวัสดิ์ ผู้ให้ความช่วยเหลือในการแก้ไขปัญหา และคอยให้คำปรึกษาในการดำเนินงานวิจัย

คณาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความรู้และคำปรึกษาเป็นอย่างดีตลอดระยะเวลาการศึกษา และขอบคุณบุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการทำงานของข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ นายเชาวลิต คิติกู นายสุดจกม จำมัน นายบรรณกิจ คิติกู นายภูริชญ์ งามคง นายโกศล ชัยเจริญอุดมรุ่ง นายชวลิต ปัญญาอิสระ นายณัฐวุฒิ พจน์ปริญญา นายเทอดศิลป์ ไสมูล บัณฑิตศึกษาทุกท่าน พี่ น้อง และเพื่อน รวมถึงมิตรสหายที่คอยให้คำปรึกษา คอยให้กำลังใจและมิตรภาพที่ดีมาโดยตลอด

ท้ายนี้ขอขอบพระคุณครูบาอาจารย์ทุกท่านตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันที่ประสิทธิ์ประสาท วิชาการความรู้ต่าง ๆ กราบขอบพระคุณ คุณพ่อเรื่องศักดิ์ คุณแม่คมคาย ภูครองหิน และขอขอบคุณ นายณัฐพงษ์ ภูครองหิน ขอขอบคุณครอบครัวภูครองหินที่ให้ความอบอุ่น และอยู่เคียงข้างผู้วิจัยเสมอ รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่คอยให้กำลังใจเสมอมา ขอขอบคุณ คุณแพรวไพลิน ต้นวิไล ที่ได้มอบความรัก ความห่วงใย และคอยเป็นกำลังใจให้ผู้วิจัยมาโดยตลอด

กรัณฑ์กมล ภูครองหิน

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ .....	ค
สารบัญ .....	ง
สารบัญตาราง .....	ช
สารบัญรูป .....	ฉ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ .....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของเรื่องค้น .....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย .....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์ .....	4
<b>2 การสร้างลายน้ำและปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง .....</b>	<b>5</b>
2.1 บทนำ .....	5
2.2 การสร้างลายน้ำ.....	5
2.2.1 คุณสมบัติที่สำคัญของลายน้ำ.....	5
2.2.2 การแบ่งประเภทของลายน้ำ .....	5
2.2.3 การประยุกต์ใช้ลายน้ำ.....	6
2.2.4 การวัดประสิทธิภาพของลายน้ำ .....	7
2.3 รูปแบบสัญญาณเสียงดิจิทัล .....	8
2.3.1 ประวัติความเป็นมา.....	8
2.3.2 รูปแบบไฟล์ WAV.....	8
2.3.3 รูปแบบไฟล์ MP3.....	9



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.4	รูปแบบไฟล์ FLAC .....	9
2.4	ปริทรรศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	9
<b>3</b>	<b>ทฤษฎีเบื้องต้น .....</b>	<b>20</b>
3.1	ภาพรวมของเวฟเล็ต .....	20
3.2	การแปลงเวฟเล็ต .....	21
3.2.1	การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง .....	22
3.2.2	การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย .....	23
3.2.2.1	การวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายระดับความละเอียด .....	23
3.2.2.2	การวิเคราะห์สัญญาณแบบตัวกรองสัญญาณ .....	26
3.3	ตระกูลเวฟเล็ต .....	30
3.4	การหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค .....	34
3.4.1	อัลกอริทึม PSO .....	34
3.4.2	อัลกอริทึม PSO พื้นฐาน .....	36
3.4.3	พารามิเตอร์ของ PSO .....	39
<b>4</b>	<b>การฝังลายน้ำและการตรวจจับลายน้ำ .....</b>	<b>40</b>
4.1	บทนำ .....	40
4.2	การฝังลายน้ำ .....	40
4.2.1	การเตรียมข้อมูลสัญญาณเสียงและสัญญาณลายน้ำ .....	40
4.2.2	การฝังลายน้ำในโดเมนเวฟเล็ต .....	42
4.2.3	การค้นหาค่าความเข้มของลายน้ำด้วย PSO .....	47
4.3	การตรวจจับลายน้ำ .....	51
4.4	วิเคราะห์พารามิเตอร์ของ PSO .....	53
4.4.1	วิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากค่าคงที่ความเร่งของ PSO .....	54
4.4.2	การวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากจำนวนของพาร์ติเคิล .....	68
4.4.3	การวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากพารามิเตอร์ค่าถ่วงน้ำหนัก .....	72
<b>5</b>	<b>ผลการทดสอบ .....</b>	<b>78</b>
5.1	บทนำ .....	78

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.2 ผลการทดสอบความทนทานต่อการโจมตี .....	78
5.2.1 ผลการทดสอบความทนทานต่อการโจมตีแสดงค่าสหสัมพันธ์ .....	80
5.2.2 ผลการทดสอบความทนทานต่อการโจมตีแสดงค่าความผิดพลาด ของบิตลายน้ำ .....	86
5.3 วิเคราะห์ผลการทดสอบ .....	93
<b>6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....</b>	<b>94</b>
6.1 สรุปผลการวิจัย .....	94
6.2 ข้อเสนอแนะ .....	95
รายการอ้างอิง .....	96
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ข้อมูลเพลงที่ใช้ในงานวิจัย .....	98
ภาคผนวก ข รูปภาพลายน้ำที่ใช้ในงานวิจัยและรูปภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้เมื่อ ผ่านการโจมตีแบบต่าง ๆ .....	103
ภาคผนวก ค โปรแกรม MATLAB ที่ใช้ในงานวิจัย .....	165
ภาคผนวก ง ตารางแสดงผลการทดสอบความทนทานต่อการโจมตี และตารางแสดง ค่าความผิดพลาดของบิตลายน้ำ .....	169
ภาคผนวก จ ตารางแสดงค่าความเข้มในการฝังลายน้ำของเพลงต่าง ๆ ที่ได้จาก การค้นหาค่าที่ดีที่สุดแบบพาร์ทิเคิลสวอม .....	182
ภาคผนวก ฉ บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา .....	186
ประวัติผู้เขียน .....	194

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
5.1	ค่าสหสัมพันธ์จากผลการทดสอบอัลกอริทึมกับเพลง ไทยลูกทุ่ง ..... 80
5.2	ค่าสหสัมพันธ์จากผลการทดสอบอัลกอริทึมกับเพลง ไทยสุนทราภรณ์..... 81
5.3	ค่าสหสัมพันธ์จากผลการทดสอบอัลกอริทึมกับเพลง ไทยเดิม..... 82
5.4	ค่าสหสัมพันธ์จากผลการทดสอบอัลกอริทึมกับเพลงสากล Classics ..... 83
5.5	ค่าสหสัมพันธ์จากผลการทดสอบอัลกอริทึมกับเพลงสากล Pop ..... 84
5.6	ค่าสหสัมพันธ์จากผลการทดสอบอัลกอริทึมกับเพลงสากล Jazz ..... 85
5.7	ค่าความผิดพลาดของบิตลายน้ำจากผลการทดสอบอัลกอริทึมกับ เพลงไทยลูกทุ่ง ..... 86
5.8	ค่าความผิดพลาดของบิตลายน้ำจากผลการทดสอบอัลกอริทึมกับ เพลงไทยสุนทราภรณ์..... 87
5.9	ค่าความผิดพลาดของบิตลายน้ำจากผลการทดสอบอัลกอริทึมกับ เพลงไทยเดิม..... 88
5.10	ค่าความผิดพลาดของบิตลายน้ำจากผลการทดสอบอัลกอริทึมกับ เพลงสากล Classics ..... 89
5.11	ค่าความผิดพลาดของบิตลายน้ำจากผลการทดสอบอัลกอริทึมกับ เพลงสากล Pop ..... 90
5.12	ค่าความผิดพลาดของบิตลายน้ำจากผลการทดสอบอัลกอริทึมกับ เพลงสากล Jazz ..... 91
ก.1	รายชื่อเพลงไทยลูกทุ่ง ..... 100
ก.2	รายชื่อเพลงไทยสุนทราภรณ์..... 100
ก.3	รายชื่อเพลงไทยเดิม..... 101
ก.4	รายชื่อเพลง Classics..... 101
ก.5	รายชื่อเพลง Pop ..... 102
ก.6	รายชื่อเพลง Jazz..... 102
ง.1	ค่าสหสัมพันธ์จากผลการทดสอบอัลกอริทึมกับเพลงไทยลูกทุ่ง(ต่อ)..... 170

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ง.2	ค่าสหสัมพันธ์จากผลการทดสอบอัลกอริทึมกับเพลงไทยสุนทราภรณ์(ต่อ) ..... 171
ง.3	ค่าสหสัมพันธ์จากผลการทดสอบอัลกอริทึมกับเพลงไทยเดิม(ต่อ) ..... 172
ง.4	ค่าสหสัมพันธ์จากผลการทดสอบอัลกอริทึมกับเพลงสากล Classics(ต่อ)..... 173
ง.5	ค่าสหสัมพันธ์จากผลการทดสอบอัลกอริทึมกับเพลงสากล Pop(ต่อ) ..... 174
ง.6	ค่าสหสัมพันธ์จากผลการทดสอบอัลกอริทึมกับเพลงสากล Jazz(ต่อ) ..... 175
ง.7	ค่าความผิดพลาดของบิตลายน้ำจากผลการทดสอบอัลกอริทึมกับ เพลงไทยลูกทุ่ง(ต่อ)..... 176
ง.8	ค่าความผิดพลาดของบิตลายน้ำจากผลการทดสอบอัลกอริทึมกับ เพลงไทยสุนทราภรณ์(ต่อ) ..... 177
ง.9	ค่าความผิดพลาดของบิตลายน้ำจากผลการทดสอบอัลกอริทึมกับ เพลงไทยเดิม(ต่อ)..... 178
ง.10	ค่าความผิดพลาดของบิตลายน้ำจากผลการทดสอบอัลกอริทึมกับ เพลงสากล Classics(ต่อ)..... 179
ง.11	ค่าความผิดพลาดของบิตลายน้ำจากผลการทดสอบอัลกอริทึมกับ เพลงสากล Pop(ต่อ) ..... 180
ง.12	ค่าความผิดพลาดของบิตลายน้ำจากผลการทดสอบอัลกอริทึมกับ เพลงสากล Jazz(ต่อ) ..... 181
จ.1	ค่าความเข้มในการฝังลายน้ำของเพลงไทยลูกทุ่ง..... 183
จ.2	ค่าความเข้มในการฝังลายน้ำของเพลงไทยสุนทราภรณ์ ..... 183
จ.3	ค่าความเข้มในการฝังลายน้ำของเพลงไทยเดิม ..... 184
จ.4	ค่าความเข้มในการฝังลายน้ำของเพลงสากล Classics ..... 184
จ.5	ค่าความเข้มในการฝังลายน้ำของเพลงสากล Pop ..... 185
จ.6	ค่าความเข้มในการฝังลายน้ำของเพลงสากล Jazz..... 185

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1	ตัวอย่างฟังก์ชันสัญญาณเวฟเล็ด..... 20
3.2	ลักษณะของการสเกลและการเลื่อนตำแหน่งของเวฟเล็ด ..... 22
3.3	ลักษณะการสเกลสัญญาณ ..... 22
3.4	แผนภาพแสดงการกระจายสัญญาณแบบหลายระดับความละเอียด..... 25
3.5	การแยกสัญญาณด้วยตัวกรองแบบ 2 ช่องสัญญาณ ..... 27
3.6	การแปลงกลับสัญญาณด้วยตัวกรองแบบ 2 ช่องสัญญาณ ..... 28
3.7	ก) การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยโดยใช้โครงสร้างต้นไม้แบบทวิภาค ( ระดับ 3 ) ข) ช่วงความถี่ของสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงต่อการแปลงในระดับต่างๆ ..... 28
3.8	ลักษณะการแยกสัญญาณ และการรวมกลับสัญญาณของการแปลงเวฟเล็ด แบบเต็มหน่วย ..... 29
3.9	ฟังก์ชันเวฟเล็ดแบบ Haar..... 30
3.10	ฟังก์ชันเวฟเล็ดแบบ Daubechies ..... 31
3.11	ฟังก์ชันเวฟเล็ดแบบ Biorthogonal ..... 32
3.12	ฟังก์ชันเวฟเล็ดแบบ Coiflet ..... 33
3.13	แผนผังอัลกอริทึมพื้นฐานของ PSO ..... 35
3.14	ลักษณะการค้นหาคำตอบของ PSO ..... 38
4.1	ลักษณะของสัญญาณที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ด ..... 41
4.2	รูปภาพลายน้ำ..... 41
4.3	แผนผังแสดงขั้นตอนการฝังลายน้ำทั้งหมด ..... 45
4.4	กระบวนการฝังลายน้ำโดยใช้ PSO..... 46
4.5	ลักษณะการตรวจสอบเงื่อนไขในการทำงานของ PSO ..... 50
4.6	แผนผังแสดงกระบวนการตรวจจับลายน้ำ ..... 52
4.7	ลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบเมื่อ $c_p = 0.001$ $c_g = 0.001$ ..... 54
4.8	ลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบเมื่อ $c_p = 0.1$ $c_g = 0.1$ ..... 55

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 ลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบเมื่อ $c_p = 0.5 c_g = 0.5$ .....	56
4.10 ลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบเมื่อ $c_p = 1.2 c_g = 1.2$ .....	57
4.11 ลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบเมื่อ $c_p = 2.0 c_g = 2.0$ .....	58
4.12 ลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบเมื่อ $c_p = 1.5 c_g = 0.5$ .....	59
4.13 ลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบเมื่อ $c_p = 0.5 c_g = 1.5$ .....	60
4.14 ลักษณะการเดินทางของ PSO เมื่อ $c_p = 0.001 c_g = 0.001$ .....	63
4.15 ลักษณะการเดินทางของ PSO เมื่อ $c_p = 0.1 c_g = 0.1$ .....	64
4.16 ลักษณะการเดินทางของ PSO เมื่อ $c_p = 0.5 c_g = 0.5$ .....	65
4.17 ลักษณะการเดินทางของ PSO เมื่อ $c_p = 1.2 c_g = 1.2$ .....	66
4.18 ลักษณะการเดินทางของ PSO เมื่อ $c_p = 2.0 c_g = 2.0$ .....	67
4.19 ลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบเมื่อ PSO มีพาร์ทิเคิลเท่ากับ 5 .....	68
4.20 ลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบเมื่อ PSO มีพาร์ทิเคิลเท่ากับ 10 .....	69
4.21 ลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบเมื่อ PSO มีพาร์ทิเคิลเท่ากับ 20 .....	70
4.22 ลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบเมื่อ PSO มี $\beta_1 = 0.1 \beta_2 = 0.9$ .....	72
4.23 ลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบเมื่อ PSO มี $\beta_1 = 0.5 \beta_2 = 0.5$ .....	73
4.24 ลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบเมื่อ PSO มี $\beta_1 = 0.9 \beta_2 = 0.1$ .....	74
ข.1 รูปภาพลายน้ำที่ใช้ในงานวิจัย .....	104
ข.2 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการโจมตีเพลงแจ๊ส.....	105
ข.3 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการโจมตีเพลงเขมรพายเรือ .....	106
ข.4 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการโจมตีเพลงคัคนิทรราชาคริต.....	107
ข.5 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการโจมตีเพลงเขมรพวง .....	108
ข.6 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการโจมตีเพลงคัคนิทรวิภาห้พระสมุทร .....	109
ข.7 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการโจมตีมหาฤกษ์-มหาชัย.....	110
ข.8 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการโจมตีเพลงหลังน้ำพระพุทธรมณต์.....	111
ข.9 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการโจมตีเพลงขับไม้บัณเฑาะว์ .....	112
ข.10 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการโจมตีเพลงลมพัดชายเขา.....	113

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข.11 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลงสร้อยเพชร.....	114
ข.12 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลงสุขกันเถอะเรา .....	115
ข.13 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลงพลอร์เฟื่องฟ้า.....	116
ข.14 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลงคนเรารักกันยาก .....	117
ข.15 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลงชื่นชีวิต.....	118
ข.16 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลงดาวล้อมเดือน .....	119
ข.17 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลงพรหมลิขิต.....	120
ข.18 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลงสวรรค์ปีใหม่ .....	121
ข.19 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลงริมฝั่งน้ำ.....	122
ข.20 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลงนางฟ้าจำแลง.....	123
ข.21 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลงทำน้ำ .....	124
ข.22 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลงไก่จ๋า.....	125
ข.23 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลงแพร์บนารัก .....	126
ข.24 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลงสายลมพองว่าน้องลิ้ม.....	127
ข.25 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลงอภัสวาทอนแก่น .....	128
ข.26 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลงฝันยังไกล ใจยังหวัง .....	129
ข.27 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลงให้ใจอย่าให้เจ็บ.....	130
ข.28 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลงหัวใจที่ถูกอายทิ้ง.....	131
ข.29 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลงไม่คิดว่าเธอมีคาว .....	132
ข.30 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลงรักคนโทรมาจingle.....	133
ข.31 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลงควนแม่กลอง.....	134
ข.32 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลง Confutatis.....	135
ข.33 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลง Benedictus .....	136
ข.34 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลง Kyrie .....	137
ข.35 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลง Lacrimosa .....	138
ข.36 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลง Requiem.....	139

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข.37 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลง Allegro in D major.....	140
ข.38 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลง Romance in D major.....	141
ข.39 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลง Rondo in D major .....	142
ข.40 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลง Allegro in B flat major.....	143
ข.41 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลง Larghetto in B flat major .....	144
ข.42 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลง I Love You for Sentimental Reasons....	145
ข.43 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลง Blue Moon .....	146
ข.44 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลง Look for the Silver Lining .....	147
ข.45 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลง Fly Me to the Moon .....	148
ข.46 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลง Love Is A Many Splendored Thing .....	149
ข.47 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลง Dream A Little Dream Of Me .....	150
ข.48 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลง Moon River.....	151
ข.49 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลง Can't Take My Eyes Off You .....	152
ข.50 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลง Misty.....	153
ข.51 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลง Mission Impossible.....	154
ข.52 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลง Love Is All Around.....	155
ข.53 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลง She's Out Of My Life.....	156
ข.54 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลง Thinking Of You .....	157
ข.55 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลง What Can I Do.....	158
ข.56 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลง That's Why You Go Away.....	159
ข.57 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลง Don't Know Why .....	160
ข.58 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลง Cherish.....	161
ข.59 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลง Tonight I Celebrate My Love .....	162
ข.60 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลง Nothing Compares to you.....	163
ข.61 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลง Ocean Deep.....	164



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันคอมพิวเตอร์ได้มีบทบาทสำคัญต่อความเป็นอยู่มากขึ้น เนื่องจากมีการนำคอมพิวเตอร์ไปใช้งานเพื่อให้เกิดประโยชน์ในด้านต่าง ๆ อย่างแพร่หลายในชีวิตประจำวัน เช่น เพื่อประมวลผลข้อมูลทางธุรกิจ เพื่อความบันเทิง เพื่อการศึกษารวมถึงการสื่อสารและอื่น ๆ อีกมากมาย จากระบบการนำเสนอข้อมูลที่ทันสมัยในปัจจุบัน ได้ถูกออกแบบมาเพื่อรองรับข้อมูลดิจิทัลให้สามารถใช้ประโยชน์จากทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งข้อมูลดิจิทัลที่ถูกใช้งานนั้นก็ยังมีหลายประเภทเช่นกัน ข้อมูลดิจิทัลที่เป็นที่นิยมคือ สัญญาณเสียงดิจิทัล และรูปภาพดิจิทัล โดยมีการนำเอาลายน้ำซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่นำศาสตร์ทางด้านต่าง ๆ รวบรวมเข้าด้วยกันมาใช้ในการป้องกันการละเมิดลิขสิทธิ์ของทรัพย์สินจากบุคคลซึ่งไม่ได้รับอนุญาต และเสียงก็เป็นทรัพย์สินในรูปแบบหนึ่งในปัจจุบันมีการถูกละเมิดเป็นอย่างมากจากผลของเทคโนโลยีดิจิทัล เช่น MP3 ผ่านทางการสื่อสารข้อมูลที่รวดเร็วทางอินเทอร์เน็ตไม่ว่าจะเป็นคอมพิวเตอร์ โทรศัพท์มือถือ สมาร์ทโฟน PDA ซึ่งนับวันจะสร้างความเสียหายเป็นอย่างมาก เนื่องจากสื่อข้อมูลเหล่านี้สามารถเข้าถึงได้อย่างรวดเร็ว ง่ายต่อการจัดเก็บ ทำสำเนา และเผยแพร่

ต่อมาได้มีการใช้การเข้ารหัสลับเพื่อช่วยในการปกป้องการเข้าถึงข้อมูล แต่ถึงแม้การเข้ารหัสจะช่วยป้องกันการถูกละเมิดของข้อมูลได้ แต่ก็ยังมีข้อเสียประการหนึ่งคือ ผู้ที่ได้รับข้อมูลต้องถอดรหัสข้อมูลก่อนนำไปใช้ ทำให้การป้องกันสิ้นสุดลงทันที เกิดช่องทางการทำสำเนาและเผยแพร่ข้อมูลอย่างผิดกฎหมายให้กับผู้อื่นที่ไม่ได้รับอนุญาต ดังนั้นการเข้ารหัสของข้อมูลจึงยังไม่สามารถแก้ปัญหาการละเมิดลิขสิทธิ์ได้ทั้งหมด

เทคโนโลยีลายน้ำดิจิทัล เป็นการฝังข้อมูลของผู้เป็นเจ้าของสื่อลงบนสื่อดิจิทัลแบบต่าง ๆ เช่น เสียง ภาพ และวิดีโอ ข้อมูลลายน้ำเหล่านี้ส่วนมากแล้วจะไม่สามารถตรวจพบได้ในทันทีโดยประสาทสัมผัสของมนุษย์ เราเรียกข้อมูลที่ฝังนี้ว่า “ลายน้ำดิจิทัล” เมื่อมีการนำเสนอสื่อ ข้อมูลลายน้ำดิจิทัลจะต้องติดไปกับสื่ออื่น ๆ ด้วย และต้องสามารถดึงข้อมูลลายน้ำเหล่านี้ออกมาเพื่อใช้แสดงสิทธิ์ความเป็นเจ้าของสื่ออื่นได้ ในภายหลัง โดยการฝังลายน้ำถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนสำคัญคือ ขั้นตอนการฝังลายน้ำลงบนสื่อ และการตรวจจับลายน้ำจากสื่อที่ถูกฝัง

## 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- 1) เพื่อพัฒนาอัลกอริทึมที่ใช้ฝังลายน้ำลงบนสัญญาณเสียงดิจิทัล
- 2) เพื่อนำเสนออัลกอริทึมในการฝังลายน้ำที่ให้ความทนทานต่อการโจมตีต่าง ๆ
- 3) เพื่อสนับสนุนการปกป้องสิทธิในผลงานเพลง การระบุความเป็นเจ้าของผลงานที่ถูกต้อง และเพื่อป้องกันผลกระทบทางเศรษฐกิจ

## 1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

ในงานวิจัยนี้ใช้การค้นหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบพาร์ติเคิลสวอม (Particle Swarm Optimization) และการแปลงเวฟเลตแบบเต็มหน่วยในการสร้างลายน้ำในสัญญาณเสียงดิจิทัลแบบปิด (Blind watermarking) โดยทำการศึกษาภายใต้เงื่อนไขดังนี้

- 1) พิจารณาสัญญาณเสียงดิจิทัลทั้งเสียงเพลงสากล และเพลงไทย บันทึกแบบ 16 บิต 44 kHz แต่ละเพลงมีความยาว 30 วินาที
- 2) ลายน้ำที่ทำการฝังเป็นรูปภาพขาวดำขนาด 25x25 พิกเซล ดังรูปที่ 1.1
- 3) คุณภาพเสียงที่ทำการฝังลายน้ำแล้วต้องมีค่า SNR ไม่ต่ำกว่า 20 เดซิเบล เมื่อเทียบกับสัญญาณเสียงต้นฉบับ
- 4) คุณภาพของลายน้ำที่ตรวจจับได้จากสัญญาณเสียงที่ผ่านการโจมตี ต้องมีค่าสหสัมพันธ์ (Similarity) ไม่ต่ำกว่า 0.9



รูปที่ 1.1 ตัวอย่างภาพข้อมูลลายน้ำที่ใช้ในการฝัง

จากรูปที่ 1.1 ภาพลายน้ำที่ใช้ในงานวิจัยเป็นรูปภาพขาวดำ มีขนาด 25x25 Pixel โดยที่ SUT มีความหมายคือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และ EE หมายถึงสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

#### 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) พัฒนาอัลกอริทึมที่ใช้ฝังลายน้ำลงบนสัญญาณเสียงแบบปิด
- 2) ข้อมูลลายน้ำต้องทนทานต่อการโจมตีด้วยการประมวลผลสัญญาณแบบต่าง ๆ ดังนี้
  1. Random noise ที่กำลังงาน 1% ของสัญญาณเสียง
  2. Low pass filter ที่ cutoff frequency 6 kHz, 15 kHz
  3. White Gaussian noise ที่กำลังงาน 1%
  4. Down sampling , 44.1kHz – 22.05 kHz – 44.1 kHz
  5. Crop ที่อัตราต่าง ๆ
    - Jitter
    - 5x100
    - 10x100
    - 10x500
    - 10x1000
  6. การบีบอัดข้อมูลแบบมีการสูญเสีย, MP3 ที่ 64 kbps, 128 kbps
  7. การบีบอัดข้อมูลแบบไม่มีการสูญเสีย, Free Lossless Audio Codec (FLAC)
  8. การกำจัดสัญญาณรบกวนด้วยการแปลงเวฟเล็ต
  9. Time scale modification
  10. การแปลง Digital to Analog และ Analog to Digital (DA/AD)
- 3) ตรวจสอบคุณภาพของเสียงที่ทำการฝังลายน้ำแล้วต้องมีค่า SNR มากกว่าหรือเท่ากับ 20 เดซิเบล และลายน้ำต้องมีค่า data payload ไม่ต่ำกว่า 20 bps (bit per second) ตามที่ International Federation of Phonographic Industry (IFPI) กำหนด
- 4) รูปภาพลายน้ำที่ทำการตรวจจับจากสัญญาณเสียงหลังผ่านการโจมตีด้วยวิธีข้างต้นต้องมีค่าสหสัมพันธ์ไม่ต่ำกว่า 0.9
- 5) ใช้การค้นหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบพาร์ติเคิลสวอม (Particle Swarm Optimization) ในกระบวนการฝังลายน้ำเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมภายใต้ข้อกำหนดข้างต้น
- 6) ทำการจำลองอัลกอริทึมตามขอบเขตที่กำหนดด้วยโปรแกรม MATLAB

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ใช้ระบุความเป็นเจ้าของผลงาน การมีสิทธิและได้รับประโยชน์จากผลงานอย่างถูกต้อง
- 2) ลดปัญหาการละเมิดลิขสิทธิ์

- 3) สามารถนำเอากระบวนการทางปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้ในกระบวนการฝังลายน้ำบนสัญญาณเสียง

## 1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบไปด้วยเนื้อหาทั้งหมด 6 บท และมีภาคผนวกทั้งสิ้น 7 ส่วน โดยมีรายละเอียดของเนื้อหาแต่ละบทดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์การวิจัย ข้อตกลงในการวิจัย ขอบเขตของการวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึงการสร้างลายน้ำ รูปแบบของสัญญาณเสียง การทบทวนงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการฝังลายน้ำ

บทที่ 3 นำเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ได้แก่ การแปลงเวฟเล็ต และการค้นหาค่าที่ดีที่สุดแบบพาร์ทิเคิลสวอม

บทที่ 4 กล่าวถึงรายละเอียดการฝังลายน้ำลงบนสัญญาณเสียงดิจิทัลในเวฟเล็ตโดเมน โดยการประยุกต์ใช้การค้นหาค่าที่ดีที่สุดแบบพาร์ทิเคิลสวอมมาใช้ในกระบวนการ เพื่อให้ลายน้ำที่ฝังมีความทนทานต่อการโจมตีด้วยการประมวลผลสัญญาณแบบต่าง ๆ

บทที่ 5 แสดงผลการทดสอบความทนทานของลายน้ำที่ฝังลงบนสัญญาณเสียงดิจิทัลต่อการโจมตีแบบต่าง ๆ ด้วยระเบียบวิธีของงานวิจัย แสดงค่าสหสัมพันธ์ของลายน้ำ จำนวนบิตที่ผิดพลาดของลายน้ำ วิเคราะห์และอภิปรายผลการทดสอบ

บทที่ 6 สรุปผลการทดสอบทั้งหมดของงานวิจัยและข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

ภาคผนวกประกอบด้วยเนื้อหาทั้งหมด 6 ส่วน ได้แก่ ภาคผนวก ก. ข้อมูลเพลงทั้งหมดที่นำมาใช้ทดสอบในงานวิจัยนี้ ภาคผนวก ข. แสดงรูปภาพลายน้ำที่ใช้ในงานวิจัย และรูปภาพที่ตรวจจับได้หลังจากผ่านการโจมตี ภาคผนวก ค. โปรแกรม MATLAB ที่ใช้ในการวิจัยวิทยานิพนธ์ ภาคผนวก ง. ตารางแสดงผลการทดสอบความทนทานต่อการโจมตี และตารางแสดงค่าความผิดพลาดของบิตลายน้ำ ภาคผนวก จ. ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ความเข้มของเพลงต่าง ๆ ที่ใช้ทดสอบจากอัลกอริทึมที่นำเสนอ ภาคผนวก ฉ. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

## บทที่ 2

### การสร้างลายน้ำและปริทรรศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

ในบทนี้กล่าวถึงความหมายของลายน้ำ สัญญาณเสียง ความรู้พื้นฐานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย และปริทรรศน์วรรณกรรมต่าง ๆ ของงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวกับการฝังลายน้ำ

#### 2.2 การสร้างลายน้ำ

การสร้างลายน้ำดิจิทัล (Digital watermarking) เป็นการฝังข้อมูลลงบนสื่อดิจิทัลแบบต่าง ๆ เช่น เสียง ภาพ และวิดีโอ ข้อมูลลายน้ำเหล่านี้ไม่สามารถตรวจรับรู้ได้ทันทีโดยประสาทสัมผัสของมนุษย์ เราเรียกข้อมูลที่ฝังนี้ว่า “ลายน้ำดิจิทัล” เมื่อมีการทำสำเนาสื่อที่ทำการฝังลายน้ำแล้ว ข้อมูลลายน้ำจะต้องติดไปกับสื่อต้น ๆ ด้วย และต้องสามารถดึงข้อมูลลายน้ำเหล่านี้ออกมาเพื่อใช้แสดงสิทธิ์ความเป็นเจ้าของสื่อต้นได้ ในภายหลัง การฝังลายน้ำแบ่งออกเป็นสองส่วนสำคัญคือ ขั้นตอนการฝังลายน้ำลงบนสื่อ และขั้นตอนในการตรวจจับลายน้ำออกจากสื่อที่ถูกฝัง โดยกระบวนการในการฝังลายน้ำนั้นมีหลายรูปแบบ ซึ่งให้ผลความทนทานต่อการโจมตีแตกต่างกัน

##### 2.2.1 คุณสมบัติที่สำคัญของลายน้ำ

- 1) Invisibility ลายน้ำที่ฝังจะต้องไม่สามารถตรวจจับ หรือรับรู้ได้ทันทีจากประสาทสัมผัสของมนุษย์ เช่น การมองเห็น หรือการได้ยิน
- 2) Robustness ลายน้ำที่ทำการฝังลงไปบนสื่อจะต้องมีความทนทานต่อการโจมตีจากกระบวนการประมวลผลทางสัญญาณต่าง ๆ ซึ่งเป็นการโจมตีเพื่อการละเมิดลิขสิทธิ์
- 3) Security ความปลอดภัยของลายน้ำในกระบวนการตรวจจับ เมื่อมีการตรวจจับลายน้ำออกมาจากสื่อ หากปราศจากข้อมูลสำคัญซึ่งถือเป็นกุญแจของกระบวนการก็จะได้มาซึ่งข้อมูลที่ไร้ความหมาย และไม่สามารถยืนยันการเป็นเจ้าของได้

##### 2.2.2 การแบ่งประเภทของลายน้ำ

ลายน้ำถูกแบ่งออกเป็นชนิดต่าง ๆ ตามลักษณะ และคุณสมบัติ ดังนี้ แบ่งตามความสามารถในการมองเห็น

- 1) Visible watermarking เป็นการสร้างลายน้ำที่สามารถมองเห็นได้ เช่น โลโก้

เครื่องหมายการค้า ตราสัญลักษณ์ โดยการฝังทับลงบนข้อมูลทำให้คุณภาพของข้อมูลลดลง

2) Invisible watermarking เป็นการสร้างลายน้ำที่ไม่สามารถมองเห็นได้ โดยมีคุณภาพของสัญญาณที่ดีกว่าแบบ Visible watermarking

แบ่งตามความทนทานในการโจมตีของลายน้ำ

1) Robust watermarking ลายน้ำมีความทนทานต่อการโจมตีทางการประมวลผลสัญญาณในรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากในปัจจุบันนั้นการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเพื่อลบข้อมูลลายน้ำมีอยู่หลายรูปแบบ Robust watermarking จึงถูกออกแบบให้มีความทนทานที่พบมากในปัจจุบัน

2) Semi fragile watermarking คล้ายกับแบบแรกแต่ความทนทานในการประมวลผลสัญญาณจะมีเพียงตามรูปแบบที่กำหนดไว้

3) Fragile watermarking เป็นลายน้ำที่ไม่ทนทานต่อการโจมตีทางการประมวลผลสัญญาณเลย นิยมใช้เพื่อตรวจสอบว่าสื่อเป็นของจริงที่ไม่มีการตัดแปลง

แบ่งตามวิธีที่ใช้ในการตรวจจับลายน้ำ

1) Public watermarking เป็นการฝังลายน้ำที่ในกระบวนการตรวจจับต้องใช้สื่อต้นฉบับในการดึงข้อมูลลายน้ำ ไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากการเปิดเผยสื่อต้นฉบับ และไม่สะดวกในการตรวจจับ

2) Semi private watermarking วิธีการนี้ไม่จำเป็นต้องใช้สื่อต้นฉบับในการดึงข้อมูล แต่ใช้เพียงข้อมูลที่สัมพันธ์กัน

3) Private watermarking วิธีการนี้สามารถดึงข้อมูลลายน้ำออกจากสื่อได้โดยไม่ต้องอาศัยข้อมูลจากสื่อต้นฉบับเลย ทำให้มีความปลอดภัยมากที่สุด

แบ่งตามกระบวนการฝังลายน้ำ

1) Spatial Domain เป็นการสร้างลายน้ำที่ดำเนินการในโดเมนเวลา

2) Frequency Domain เป็นการสร้างลายน้ำที่ดำเนินการในโดเมนความถี่

### 2.2.3 การประยุกต์ใช้ลายน้ำ

การฝังลายน้ำสามารถใช้ประโยชน์ได้หลายทางเช่น

1) Copyright protection ใช้ปกป้องข้อมูลของผู้ที่เป็นเจ้าของสื่อ โดยเป็นการระบุลิขสิทธิ์ลงบนข้อมูลเหล่านั้น เพื่อใช้เป็นหลักฐานในการพิสูจน์ความเป็นเจ้าของ และการมีสิทธิ์ในข้อมูลในกรณีที่มีการละเมิดลิขสิทธิ์

2) Copy protection โดยข้อมูลที่ใช้เป็นลายน้ำสามารถใช้ในการควบคุมเครื่อง

บันทึกแบบดิจิทัลเพื่อการป้องกันการทำซ้ำโดยใช้เทคนิคพิเศษ ข้อมูลลายน้ำจะบอกจำนวนการทำซ้ำได้ และอนุญาตให้เครื่องบันทึกทำซ้ำได้ตามที่อนุญาตเท่านั้น

3) Broadcast monitoring เป็นการฝังลายน้ำลงบนสื่อโฆษณาที่ออกอากาศ โดยระบบตรวจจับจะทำการตรวจเช็คว่ามีโฆษณาออกมตรงตามที่ตกลงไว้หรือไม่ นอกจากนี้ระบบตรวจจับยังสามารถเช็คการออกอากาศสัญญาณจากสถานีโทรทัศน์ในแต่ละช่อง และทำการเรียกเก็บค่าธรรมเนียมจากจำนวน และระยะเวลาที่ใช้ในการโฆษณาได้จากข้อมูลเหล่านี้อีกด้วย

4) Fingerprinting เป็นเทคนิคที่ใช้ในการติดตามการทำซ้ำที่ผิดกฎหมาย โดยเจ้าของสื่อจะทำการฝังลายน้ำลงบนข้อมูลที่ทำซ้ำแต่ละชิ้นให้มีรูปแบบที่แตกต่างกัน เพื่อแจกจ่ายให้กับลูกค้าแต่ละราย ลายน้ำดังกล่าวอาจจะเป็นหมายเลขประจำตัวลูกค้า หรือหลักฐานที่แสดงให้เห็นถึงความเกี่ยวข้องกันระหว่างลูกค้ากับข้อมูลนั้น ๆ จะถูกบันทึกไว้เป็นลายน้ำ เมื่อมีการละเมิดลิขสิทธิ์เจ้าของสามารถใช้ข้อมูลที่ฝังลงเป็นลายน้ำนี้เพื่อพิสูจน์การละเมิดดังกล่าวได้

5) Data authentication การฝังลายน้ำแบบ fragile watermarking เป็นการฝังลายน้ำเพื่อรองรับการปลอมแปลงข้อมูล เนื่องจากลายน้ำประเภทนี้จะเสียหายทันทีเมื่อมีการแก้ไขข้อมูลเกิดขึ้น

นอกจากนี้ลายน้ำยังสามารถใช้ประโยชน์ได้ในด้านต่าง ๆ เช่น

- 1) Indexing เป็นการจัดวางข้อความหรือคำอธิบายลงในสื่อต่าง ๆ เช่น วิดีโอ ภาพยนตร์
- 2) Medical safety เป็นการฝังลายน้ำโดยการระบุข้อมูลเกี่ยวกับคนไข้ เช่น ชื่อ วัน และเวลา ลงบนรูปที่ใช้เป็นข้อมูลการรักษาทางการแพทย์
- 3) Data hiding เป็นการซ่อนข้อมูลลับโดยใช้เทคนิคการฝังลายน้ำลงบนสื่อทั่วไปที่ต้องการ ซึ่งข้อมูลดังกล่าวสามารถล่วงรู้ได้เฉพาะผู้มีสิทธิ์เท่านั้น บุคคลที่สามไม่สามารถสังเกตหรือรับรู้ได้ถึงการใช้ข้อมูลลับที่ซ่อนอยู่ในสื่อเหล่านี้ได้เลย

#### 2.2.4 การวัดประสิทธิภาพของลายน้ำ

- 1) Bit Rate หมายถึงจำนวนของข้อมูลที่ฝังตัวอยู่บนสัญญาณข้อมูลต่อหน่วยของเวลาหรือช่องว่าง มีหน่วยเป็น บิตต่อวินาที
- 2) Perceptual Quality หมายถึงการที่ข้อมูลลายน้ำเพียงเล็กน้อยฝังตัวอยู่ในสัญญาณเสียงนั้น โดยทั่วไปจะไม่ปรากฏให้เห็น จึงทำให้ยากต่อการตรวจสอบคุณภาพ จึงนิยมใช้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio - SNR) ของข้อมูลที่มีการแฝงลายน้ำในการวัดคุณภาพของสัญญาณ
- 3) Robustness to Signal Processing โดยปกติแล้วความทนทานสัญญาณลายน้ำ

แบบดิจิทัลนั้นมีความเกี่ยวข้องกับการประมวลผลสัญญาณ เช่น การกรองสัญญาณ การสุ่มจัดระดับสัญญาณ การเปลี่ยนรูปแบบสัญญาณจากอนาลอกเป็นดิจิทัล หรือดิจิทัลเป็นอนาลอก และการบีบอัดข้อมูล ซึ่งกระบวนการเหล่านี้จะไม่ส่งผลกระทบต่อสัญญาณหลักจนสามารถสังเกตหรือรู้สึกได้ แต่อาจส่งผลกระทบต่อข้อมูลลายน้ำ ดังนั้นสิ่งสำคัญคือการทราบระดับขีดจำกัดของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น เพื่อให้ขั้นตอนกระบวนการฝังลายน้ำสามารถทำงานได้โดยไม่เกิดผลกระทบต่อสัญญาณหลัก

## 2.3 รูปแบบสัญญาณเสียงดิจิทัล

### 2.3.1 ประวัติความเป็นมา

ในยุคแรกก่อนที่คอมพิวเตอร์จะเข้ามามีบทบาทสำคัญ สัญญาณเสียงจะถูกบันทึกลงบนซีดีเพื่อทำการเล่นกับเครื่องเล่นซีดีเพียงอย่างเดียวเท่านั้น ซึ่งถูกเรียกว่า Compact Disk Digital Audio (CD - DA) ซึ่งจะจัดเก็บเป็นรูปแบบมาตรฐานเรียกว่า red book คิดค้นโดยบริษัท Sony และ Philips ซึ่งเป็นผู้คิดค้นต้นแบบของเทคโนโลยีซีดีขึ้น red book ไม่ได้เป็นเพียงแค่การจัดเก็บสัญญาณเสียงเท่านั้น แต่ยังคำนึงถึงความสัมพันธ์ต่อลักษณะของแผ่นซีดี ขนาดที่เป็นไปได้ของข้อมูลที่ทำกรจัดเก็บ ระยะห่างระหว่างแทร็กเหล่านี้เป็นต้น ซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งในการระบุว่าข้อมูลเหล่านี้จะถูกอ่านให้ถูกต้องได้อย่างไร ซึ่งจากพื้นฐานของ red book นี้ได้มีการพัฒนาให้เป็นซีดีในปัจจุบันเพื่อจัดเก็บข้อมูล

การจัดเก็บข้อมูลในรูปแบบของ CD - DA เริ่มจากการชักตัวอย่างจากแหล่งกำเนิดเสียง จากนั้นจะถูกเข้ารหัสดิจิทัลเพื่อแปลงเป็น CD - DA โดยใช้ความถี่อัตราชักตัวอย่างที่ 44.1 kHz แต่ละแซมเปิลจะมีความละเอียด 16 บิต แบบสเตอริโอ ซึ่งใช้พื้นที่ในการจัดเก็บ 176 kbps

ข้อมูลที่เป็นสัญญาณเสียงจะถูกเก็บบนดิสก์ในลักษณะเป็นบล็อก หรือบางทีเรียกว่าเซกเตอร์ ซึ่งแต่ละบล็อกจะเก็บข้อมูลได้ 2,352 ไบต์ โดยสัญญาณเสียงที่ไม่มีการบีบอัด เมื่อถูกจัดเก็บในรูปแบบ CD (44.1 kHz, 16 bit, stereo) จะใช้พื้นที่ในการจัดเก็บประมาณ 10 MB

### 2.3.2 รูปแบบไฟล์ WAV

WAV เป็นรูปแบบหนึ่งของรูปแบบไฟล์เสียงที่ใช้ในการจัดเก็บแบบดิจิทัล ไฟล์นามสกุล WAV นี้ถูกคิดค้นขึ้นโดยบริษัท Microsoft ร่วมมือกับ IBM สำหรับระบบปฏิบัติการ Windows รูปแบบไฟล์เสียงชนิดนี้จะบรรจุข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับลักษณะสมบัติของรูปคลื่นสัญญาณเสียงรวมไปถึงรูปแบบการจัดเก็บ เช่น อัตราสุ่มของสัญญาณเสียง bit - depth ความยาวของรูปคลื่น และอัตราการอ่านข้อมูลต่อวินาที เป็นต้น โดยปราศจากการบีบอัดข้อมูลทำให้



สัญญาณเสียงที่ได้จากไฟล์นามสกุล WAV สามารถนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวาง และสามารถใช้ในการประมวลผลสัญญาณแบบต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดีจึงได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย

### 2.3.3 รูปแบบไฟล์ MP3 (Moving Pictures Experts Group Audio Layer-3)

ไฟล์ MP3 จัดเป็นรูปแบบการเข้ารหัสเพื่อลดขนาดของข้อมูลลงแบบมีการสูญเสีย (Lossy) ซึ่งปกติความยาวของเพลงหนึ่งเพลงที่จัดเก็บแบบ WAV จะมีขนาดประมาณ 50 MB ทำให้ไม่สะดวกต่อการส่งต่อ และจัดเก็บ ไฟล์ MP3 จึงเข้ามามีบทบาทที่สำคัญในการลดขนาดของไฟล์ข้อมูลเหล่านี้ถึง 10 – 12 เท่า หรือให้เหลือขนาดเพียง 4-5 MB ซึ่งกระบวนการนี้จะทำให้คุณภาพของสัญญาณเสียงลดลง ถึงแม้ว่าจะทำการถอดรหัสข้อมูลกลับมาในรูปแบบ WAV แต่คุณภาพของสัญญาณเสียงที่ลดลงจากกระบวนการบีบอัดนั้นไม่สามารถกลับมาเหมือนเดิมได้ จึงจัดเป็นการบีบอัดแบบสูญเสีย โดยส่วนมากแล้ว MP3 จะใช้อัตรา bit rate อยู่ที่ 128 kbps ในปัจจุบันนั้น MP3 เป็นที่วิพากษ์วิจารณ์กันเป็นอย่างมากในเรื่องผลกระทบต่อลิขสิทธิ์ของเพลงที่ทำการบีบอัด ซึ่งโดยความจริงแล้ว MP3 เป็นเพียงไฟล์ที่ทำการจัดเก็บสัญญาณประเภทหนึ่งเท่านั้น จึงจัดได้ว่าเป็นรูปแบบที่ถูกกฎหมาย แต่จะผิดกฎหมายในกรณีที่มีการใช้ MP3 ในการทำซ้ำ เผยแพร่ หรือกระทำการอื่นใด ซึ่งขัดต่อกฎหมายลิขสิทธิ์ของประเทศไทยโดยไม่ได้รับการอนุญาตที่ถูกต้องจากเจ้าของลิขสิทธิ์

### 2.3.4 รูปแบบไฟล์ FLAC (Free Lossless Audio Codec)

ไฟล์ FLAC จัดเป็นรูปแบบการเข้ารหัสเพื่อลดขนาดของข้อมูลลงแบบไม่มีการสูญเสีย (Lossless) ที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากคุณภาพของสัญญาณเสียงที่ได้นั้นเหมือนกับสัญญาณต้นฉบับทุกประการ และเป็นรูปแบบฟรี ไม่เสียค่าใช้จ่ายใด ๆ และยังเปิดให้พัฒนาต่อได้ ไฟล์ FLAC นั้นได้รับความนิยมในต่างประเทศค่อนข้างสูง และกำลังเป็นที่นิยมมากขึ้นในประเทศไทย นอกจากข้อดีที่กล่าวไว้ในส่วนแรกแล้ว ไฟล์ชนิดนี้ยังสามารถทำงานได้อย่างรวดเร็ว โดยมีโปรแกรมและอุปกรณ์ที่สามารถรองรับไฟล์ชนิดนี้ได้มากมาย ไฟล์ FLAC นั้นรองรับ sample rate ตั้งแต่ 1 Hz ถึง 1048.57k Hz และ bit depth ที่ 32 bit ซึ่งโดยทั่วไปแล้วขนาดของไฟล์จะมีขนาดลดลงจากต้นฉบับไม่มากนัก แต่ด้วยคุณภาพของไฟล์ที่ได้ และการทำงานที่รวดเร็ว จึงทำให้เป็นที่นิยมในปัจจุบัน

## 2.4 ปิรทรรศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันนั้น มีการนำเสนอเทคนิคในการฝังลายน้ำหลากหลายรูปแบบบนสัญญาณเสียงดิจิทัล ซึ่งการฝังลายน้ำนั้นจะถูกแบ่งออกเป็นสองจำพวกใหญ่ ๆ คือการฝังลายน้ำลงบนโดเมนเวลา และการฝังลายน้ำลงบนโดเมนความถี่ จากงานวิจัยของ Shao Ya-fei, Wu Guo-wei และ Lin

Xing-gang (2001) และ Jianzhen Wu และ Jianying Xie (2003) เป็นการฝังลายน้ำในสัญญาณภาพ ซึ่งในผลการวิจัยของพวกเขาทำให้ทราบว่า การฝังลายน้ำในโดเมนความถี่นั้นมีความทนทานต่อการโจมตีมากกว่าในโดเมนเวลา

ในงานวิจัยของ Changtsheng Xu, Jiankang Wu และ Qibin Sun (1999) ได้ทำการสรุปเทคนิคต่าง ๆ ที่นิยมในการฝังลายน้ำลงบนโดเมนเวลา เช่น Low-bit coding เป็นวิธีการฝังลายน้ำลงบนสัญญาณเสียงโดยการแทนที่บิตที่มีนัยสำคัญน้อยในแต่ละแชนเนลของข้อมูลสัญญาณเสียงด้วยรหัสเลขฐานสองที่ได้จากข้อมูลลายน้ำ ยกตัวอย่างเช่น ในสัญญาณเสียงแบบ 16 บิต บิตที่มีนัยสำคัญน้อยสุด 4 ตัวหลังจะถูกลบออกแล้วแทนที่ด้วยรหัสของข้อมูลลายน้ำ วิธี Low-bit coding นี้จัดได้ว่าเป็นวิธีการพื้นฐานที่ง่ายในการฝังข้อมูลลายน้ำลงบนสัญญาณเสียง ข้อเสียของเทคนิคนี้คือความไม่คงทนต่อสัญญาณรบกวน และการเปลี่ยนอัตราสุ่ม (Resampling) เป็นต้น Phase coding เป็นอีกวิธีหนึ่งที่จัดได้ว่ามีประสิทธิภาพเมื่อทำการคำนึงถึงการชีวิตคุณภาพเสียง เช่น อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) เนื่องจากการฝังลายน้ำด้วยวิธีนี้ ผู้ฟังแทบไม่รู้สึกถึงความผิดเพี้ยนของสัญญาณเสียงที่เกิดจากการเปลี่ยนเฟสที่ราบรื่น แม้ว่าเทคนิคนี้จะนำมาซึ่งการเปลี่ยนแปลงแบบแผนของเสียงทำให้องค์ประกอบในแต่ละความถี่เปลี่ยนไป แต่ก็ไม่ทำให้ผู้ฟังรับรู้ถึงความแตกต่างจากเสียงเดิมตราบใดที่กระบวนกรยังอยู่ในขอบเขตที่กำหนด ซึ่งวิธีการนี้ยังมีข้อเสียอยู่ที่ความทนทานต่อการบีบอัดสัญญาณ วิธี Spread spectrum เป็นเทคนิคที่ซ่อนข้อมูลลายน้ำโดยการกระจายข้อมูลลายน้ำลงบนสเปกตรัมความถี่ของสัญญาณเสียงต้นฉบับให้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ โดยการมอดูเลชันสัญญาณเสียงต้นฉบับกับลำดับของพัลส์สุ่มแบบไบนารี “1 หรือ -1” ซึ่งบรรจุข้อมูลลายน้ำอยู่ วิธีดังกล่าวเป็นการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับบิตจำนวนมากของข้อมูล โดยขั้นตอนการฝังลายน้ำเริ่มจากลายน้ำแบบไบนารีจะถูกเข้ารหัสให้เกิดความผิดพลาด เพื่อลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการฝัง แล้วนำมาคูณเข้ากับคลื่นที่ได้จาก pseudo-random noise sequence จากขั้นตอนนี้จะได้ข้อมูลที่มีสเปกตรัมความถี่กว้างตามต้องการ แล้วทำการลดระดับความเข้มของข้อมูลลายน้ำลง ก่อนรวมเข้ากับสัญญาณเสียงต้นฉบับคล้ายกับการเกิดสัญญาณรบกวน วิธีนี้ได้ผลเป็นที่น่าพอใจเมื่อนำมาใช้กับการฝังลายน้ำลงบนสัญญาณเสียงสัญญาณที่ได้มีความคงทนต่อการโจมตีทางการประมวลผลสัญญาณแบบต่าง ๆ เช่น การบีบอัด และ Cropping วิธี Echo hiding ใช้เทคนิคการสร้าง echo บนสัญญาณเสียง โดยสัญญาณเสียงจะถูกแบ่งออกเป็นช่วงให้เท่ากับจำนวนข้อมูลลายน้ำ สัญญาณเสียงแต่ละช่วงจะถูกทำ echo ซึ่งในการฝังลายน้ำกำหนดให้การประวิงเวลามีขนาด  $d$  สำหรับการฝังบิตที่มีค่า 1 และมีขนาด  $d'$  สำหรับการฝังบิตที่มีค่า 0 ซึ่งขนาดของ  $d$  และ  $d'$  ต้องมีขนาดเหมาะสมโดยไม่ทำให้สัญญาณเสียงผิดเพี้ยนไปจากเดิม ขั้นตอนการตรวจจับลายน้ำจะนำสัญญาณเสียงที่ต้องการมาวิเคราะห์ cepstrum เพื่อหา

ตำแหน่งการเติม echo จากนั้นจะทำการวัดขนาดการประวิงเวลาเพื่อหา  $d$  และ  $d'$  ซึ่งเทคนิคการฝังลายน้ำแบบ echo hiding นี้มีความทนทานต่อการประมวลผลสัญญาณ และการบีบอัด แต่อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้สามารถตรวจจับลายน้ำได้ง่ายจากบุคคลที่สามเช่นกัน

ในงานวิจัยของ Jiwu Huang, Young Wang และ Yun Q. Shi (2002) ได้นำเสนอการฝังลายน้ำลงบนสัมประสิทธิ์ของการแปลงโคไซน์แบบเต็มหน่วย(DCT) ซึ่งประยุกต์ใช้ synchronization code กับข้อมูลลายน้ำก่อน โดยเลือกสัมประสิทธิ์ของ DCT ที่ระดับความถี่ต่ำเพื่อความทนทานต่อการโจมตี ข้อดีของ synchronization code คือเมื่อรวมกับข้อมูลลายน้ำแล้ว เราสามารถตรวจจับตำแหน่งของข้อมูลลายน้ำจากสัญญาณเสียงได้ กระบวนการนี้เลือกใช้การแปลง DCT ทำให้ลดเวลาในการตรวจจับลายน้ำลงมาเมื่อเปรียบเทียบกับแปลงอื่น ๆ กระบวนการเริ่มต้นด้วยการนำสัญญาณเสียงต้นฉบับแบ่งออกเป็นช่วง ๆ ให้เท่ากับข้อมูลลายน้ำ แล้วทำการแปลง DCT ในทุกๆ ช่วงของเสียงที่แบ่งแล้วจากนั้นนำ synchronization code มาสร้างลำดับร่วมกับข้อมูลลายน้ำก่อนแล้วนำมาหาค่าความหนาแน่นในการฝังก่อนรวมกับสัมประสิทธิ์ของ DCT ในแต่ละช่วงดังกล่าว โดยการเลือกขนาดช่วงในการแบ่งสัญญาณเสียงซึ่งต้องสอดคล้องกับจำนวนชุดของข้อมูลลายน้ำที่ต้องการฝัง และจำนวนสัมประสิทธิ์ของ DCT ในขั้นตอนการตรวจจับข้อมูลลายน้ำ สัญญาณเสียงที่ต้องการตรวจจับจะถูกแบ่งออกเป็นช่วง ๆ จากนั้นจะทำการแปลง DCT เพื่อทำการตรวจจับข้อมูลลายน้ำซึ่งการรู้ค่าที่ถูกต้องของขนาดความยาวช่วงที่เหมาะสมจะได้มาซึ่งข้อมูลลายน้ำที่ถูกต้อง เทคนิคนี้ความยาวของข้อมูลลายน้ำกับ synchronization code ที่ใส่ลงไปเป็นสิ่งสำคัญ สัญญาณเสียงที่ได้จากกระบวนการนี้มีความคงทนต่อการโจมตีในระดับที่น่าพอใจ ในงานวิจัยนี้มีจุดเด่นที่น่าสนใจคือ การเลือกค่าความหนาแน่นที่แตกต่างกันเพื่อความเหมาะสมกับการฝังลายน้ำในสัญญาณเสียงแต่ละสัญญาณ แต่ค่าความหนาแน่นที่เลือกนี้ยังต้องขึ้นอยู่กับประสบการณ์ที่ได้จากการทดลองหลาย ๆ ครั้ง

ในงานวิจัยของ Xueyao Li, Min Zhang และ Shillang Sun, (2003) เป็นการใส่ลายน้ำที่เป็นภาพขาวดำฝังลงบนสัญญาณเสียงโดยใช้การแปลงเวฟเล็ทแบบดิสครีต (DWT) ข้อดีของการใส่ลายน้ำที่เป็นภาพคือสามารถระบุความเป็นเจ้าของได้อย่างเด่นชัด อีกทั้งยังสามารถนำเครื่องหมายการค้า ตรายี่ห้อ มาใช้เป็นลายน้ำได้ ในอัลกอริทึมได้ใช้ SNR เป็นตัวกำหนดความเข้มในการฝังลายน้ำลงบนสัญญาณเสียง ตั้งสมมุติฐานไว้ว่าผลที่ได้ต้องดีกว่าการใช้ผลการทดลองหลาย ๆ ครั้งเป็นตัวกำหนดค่าความเข้มในการฝังลายน้ำ ซึ่งมีข้อเสียคือต้องใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจำนวนมาก และค่าความเข้มดังกล่าวนี้ ต้องมีค่าเปลี่ยนไปตามคุณลักษณะที่ไม่เหมือนกันของสัญญาณเสียงแต่ละตัวอย่าง กระบวนการฝังลายน้ำเริ่มจากนำสัญญาณเสียงมาแบ่งออกเป็นช่วงทั้งหมด  $k$  ช่วง ให้เท่ากับจำนวนข้อมูลภาพลายน้ำ ซึ่งแต่ละช่วงจะถูกนำมาแยกองค์ประกอบเวฟเล็ท 3 ระดับ ใน

งานวิจัยนี้ได้เลือกสัมประสิทธิ์เวฟเล็ตใน detail subband จากการแปลงเวฟเล็ตลำดับที่ 3 ซึ่งแทนด้วย  $cD_k^3$  สัมประสิทธิ์เหล่านี้จะถูกส่งลงน้ำที่ผ่านกระบวนการเพิ่มความปลอดภัยในการเข้าถึงข้อมูลโดยการเข้ารหัส การส่งลงน้ำจะถูกส่งข้อมูลเพียงหนึ่งค่า (0 หรือ 1) ลงในสัมประสิทธิ์เวฟเล็ตที่มีค่าสูงที่สุดในช่วง  $cD_k^3$  นั้น ๆ แต่การส่งข้อมูลลงน้ำลงบนสัมประสิทธิ์เวฟเล็ตโดยตรงจะทำให้สัญญาณเสียงที่ได้เพิ่มขึ้นไปจากเดิมจนสามารถรับรู้ได้จากการฟัง ดังนั้นการส่งจึงต้องคูณค่าความเข้มในการส่งเข้ากับข้อมูลลงน้ำเสียก่อน เพื่อทำการสเกลขนาดของข้อมูลลงน้ำก่อนจะส่งส่งผลให้เมื่อส่งลงน้ำแล้วไม่สามารถรับรู้ความแตกต่างที่เกิดขึ้นกับสัญญาณเสียงได้ ค่าความหนาแน่นนี้คำนวณได้จากค่า SNR ระหว่างสัมประสิทธิ์ของสัญญาณเสียงเดิมกับสัมประสิทธิ์ของสัญญาณเสียงที่ได้ทำการส่งลงน้ำแล้ว โดยค่า SNR ต้องมีค่าไม่เกินค่าที่กำหนดไว้ เมื่อทำจนครบสัญญาณทั้งหมด  $k$  ช่วง แล้วนำค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวมาทำการแปลงกลับเวฟเล็ตจะได้สัญญาณเสียงที่ส่งลงน้ำสมบูรณ์

จากผลการทดลองนั้นได้แสดงว่าอัลกอริทึมนี้ ทนทานต่อการโจมตีโดยการประมวลผลสัญญาณแบบต่าง ๆ และการบีบอัดแบบ MP3 ที่ 56 kbps ได้ดี โดยค่าสหสัมพันธ์ของลงน้ำที่ได้จากสัญญาณเสียงที่ผ่านการโจมตีแบบต่าง ๆ มีค่ามากกว่า 90% ในผลการทดลองยังได้เปรียบเทียบระหว่างอัลกอริทึมที่ใช้ SNR กับผลการทดลองที่ไม่ได้ใช้ ซึ่งได้ผลที่สอดคล้องกับสมมุติฐานที่ตั้งไว้ ซึ่งให้เห็นถึงข้อดีของอัลกอริทึมที่ใช้ SNR แต่ข้อเสียของกระบวนการนี้คือในการตรวจจับลงน้ำนั้นจำเป็นต้องใช้สัญญาณเสียงต้นฉบับร่วมด้วย (Non-blind watermarking) ซึ่งเป็นการเสียอย่างมากในการเปิดเผยสัญญาณเสียงต้นฉบับ ทำให้อาจสูญเสียข้อมูลให้กับผู้ละเมิดได้

ในงานวิจัยของ Lili Cui, Shu-xun Wang และ Tanfeng Sun (2003) ได้ทำการนำเสนอวิธีการส่งลงน้ำข้อมูลภาพขาวดำลงบนสัญญาณเสียงโดยอาศัยหลักการของ Human Auditory System (HAS) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์สเปกตรัมของสัญญาณเสียงในความถี่ย่านต่างๆ เทียบกับสเปกตรัมของสัญญาณเสียงที่มนุษย์สามารถรับฟังได้ในช่วงความถี่ 20 Hz ถึง 20KHz ลงน้ำจะถูกส่งลงบนย่านความถี่ที่มีค่า sound pressure level (SPL) ต่ำกว่าระดับการได้ยินของมนุษย์โดยใช้แพ็คเกจควบคุมค่าหนึ่ง ในกระบวนการส่งลงน้ำจะใช้วิธีการวิเคราะห์ cepstrum ซึ่งมักนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์และจดจำเสียงพูดเป็นอย่างมาก กระบวนการเริ่มต้นโดยนำสัญญาณเสียงมาแปลงฟูริเยร์แล้วทำลอการิทึม จากนั้นจึงทำการแปลงกลับฟูริเยร์อีกครั้ง ซึ่งการทำลอการิทึมในขั้นตอนที่สองเป็นลอการิทึมเชิงซ้อน เราเรียกสัญญาณที่ได้จากกระบวนการดังกล่าวว่า complex cepstrum

ขั้นตอนการเตรียมลงน้ำเริ่มจากการนำสัญญาณเสียงมาแบ่งเป็นช่วง แล้วทำการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว (FFT) สเปกตรัมที่ได้จะถูกนำไปเทียบกับสเปกตรัมการได้ยินของมนุษย์ ช่วงสเปกตรัม

ที่ต่ำกว่าการได้ยินของมนุษย์มากที่สุดจะถูกเลือก เพื่อป้องกันความผิดเพี้ยนของสัญญาณเสียง หลังฟังลายน้ำแล้วจึงทำการแปลงกลับฟูรีเยร์แบบเร็ว ผลลัพธ์จะได้แฟกเตอร์ควบคุมซึ่งต้องทำสเกลให้ มีค่าเหมาะสมก่อน ด้วยค่าที่ได้จากประสบการณ์โดยการทดลองหลาย ๆ ครั้ง ก่อนนำไปมอดูเลท กับสัญญาณลายน้ำก็จะได้สัญญาณลายน้ำที่พร้อมจะทำการส่ง ในขั้นตอนการฟังลายน้ำ สัญญาณเสียงต้นฉบับจะถูกแบ่งออกเป็นช่วง ๆ ให้พอดีกับจำนวนข้อมูลลายน้ำ แล้วนำสัญญาณแต่ละช่วงมาวิเคราะห์ cepstrum จากนั้นคำนวณค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์ cepstrum ในแต่ละช่วง นำค่าเฉลี่ยดังกล่าวมาลบออกจากสัมประสิทธิ์ทุกตัวเพื่อปรับให้สัมประสิทธิ์ cepstrum ในช่วงนั้นๆ มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ จากนั้นทำการรวมลายน้ำที่เตรียมไว้เข้ากับสัมประสิทธิ์เหล่านี้ แล้วทำการแปลงกลับ cepstrum ก็จะได้สัญญาณเสียงที่ฟังลายน้ำเรียบร้อยแล้ว ในขั้นตอนการตรวจจับลายน้ำจะทำการคำนวณค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์ cepstrum ในแต่ละช่วงเทียบกับระดับที่กำหนด เพื่อระบุว่าลายน้ำที่ตรวจจับได้มีค่า 0 หรือ 1 ซึ่งกระบวนการดังกล่าวเป็นการฟังลายน้ำแบบปิด (Blind watermarking) ยังคงอาศัยการเลือกค่าแฟกเตอร์ควบคุมที่ได้จากประสบการณ์โดยการทดลองหลาย ๆ ครั้ง และไม่สามารถแทนที่การโจมตีด้วยวิธีการ Low pass filter

ในงานวิจัยของ Wei Li, Xiangyang Xue, Xiaoqiang Li และ Peizhong Lu (2003) ได้ทำการฟังลายน้ำแบบปิดที่ไม่ต้องใช้สัญญาณเสียงต้นฉบับในการตรวจจับร่วมกับการใช้รหัสแก้ไขความผิดพลาด ซึ่งข้อดีของการทำรหัสแก้ไขข้อผิดพลาด คือสามารถกู้คืนข้อมูลที่เสียหายให้กลับมาสมบูรณ์ดังเดิมได้ภายใต้เงื่อนไขของรหัสที่ใช้เมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับลายน้ำ ทำให้ลายน้ำที่เสียหายจากการโจมตีมีโอกาสคืนสู่สภาพเดิมได้ ซึ่งในขั้นตอนการฟังนั้น สัญญาณเสียงจะถูกแบ่งออกเป็นช่วง ๆ จากนั้นทำการแปลงเวฟเล็ตกับสัญญาณแต่ละช่วงโดยเลือกสัมประสิทธิ์ใน approximation subband จากการแปลงเวฟเล็ตลำดับที่ห้า  $cA^5$  ที่ระดับสัญญาณนี้ทำการคำนวณค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์ทั้งหมดในช่วง แล้วทำการลบค่าเฉลี่ยดังกล่าวออกจากสัมประสิทธิ์ทั้งช่วง ในช่วงนี้จะได้สัมประสิทธิ์ที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ จากนั้นนำข้อมูลลายน้ำที่ผ่านการเข้ารหัสแก้ไขความผิดพลาดแล้วนำมาทำการฟังลายน้ำเพียงหนึ่งค่าต่อหนึ่งช่วง โดยถ้าลายน้ำมีค่า '-1' จะทำการลบสัมประสิทธิ์ทุกตัวในช่วงนั้นออกด้วย  $\Delta$  หรือถ้าลายน้ำมีค่า '1' จะทำการบวก  $\Delta$  เข้ากับสัมประสิทธิ์ทุกตัวในช่วง ๆ นั้น ค่าแฟกเตอร์  $\Delta$  ที่ใช้ในการฟังลายน้ำหาได้จากการสเกลค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์ที่คำนวณได้ในช่วงๆนั้นก่อนหน้าด้วยค่าที่ได้จากประสบการณ์การทดลอง ในขั้นตอนการตรวจจับลายน้ำทำได้ง่ายเพียงแปลงเวฟเล็ตที่ระดับ  $cA^5$  จากนั้นทำการคำนวณค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์เวฟเล็ตในช่วงดังกล่าว ซึ่งค่าเฉลี่ยที่ได้หากมากกว่าศูนย์แสดงว่าช่วงดังกล่าวฟังลายน้ำที่มีค่าเป็น '1' หากน้อยกว่าศูนย์แสดงว่าช่วงดังกล่าวฟังลายน้ำที่มีค่า '-1'

ผลการทดลองแสดงข้อดีของการประยุกต์ใช้รหัสแก้ไขความผิดพลาด ทำให้ข้อมูลลายน้ำที่ได้รับความเสียหายจากการโจมตีสามารถกู้คืนให้ใกล้เคียงกับของเดิมได้ แต่เวลาที่ใช้สำหรับอัลกอริทึมนี้ค่อนข้างมาก และยังคงใช้ค่าแฟคเตอร์  $\Delta$  ในการควบคุมน้ำหนักของการฝังลายน้ำจากการทดลองหลาย ๆ ครั้ง

ในงานวิจัยของ Lili Cui, Shu-xun Wang และ Tanfeng Sun (2003) ได้ทำการฝังข้อมูลลายน้ำเป็นลำดับตัวเลข 0 และ 1 ภายใต้หลักการบีบอัดสัญญาณเสียง ที่เปลี่ยนแปลงข้อมูลเพียงบางส่วนของสัญญาณเสียงโดยไม่ทำให้คุณภาพของสัญญาณเสียงต่ำกว่ากำหนด ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้คุณภาพเสียงหลังจากการฝังลายน้ำมีความแตกต่างระหว่างค่าต่ำสุดของ hearing threshold กับค่าสูงสุดของ error power spectrum ไม่เกิน 1 เดซิเบล ซึ่งปกติประสาทการรับรู้ของมนุษย์จะตอบสนองต่อสัญญาณเสียงที่ความถี่ต่ำได้ดีกว่าสัญญาณเสียงที่ความถี่สูง การวิเคราะห์ดังกล่าวจึงจำเป็นในการเลือกความถี่จากการแปลงเวฟเล็ต ที่มีความสำคัญต่อสัญญาณเสียงน้อย การฝังลายน้ำเริ่มจากสัญญาณเสียงถูกแยกองค์ประกอบ 4 ระดับด้วยเวฟเล็ต แล้วเลือกสัมประสิทธิ์เวฟเล็ตใน detail subband ที่ระดับที่ 1 ถึง 3 แทนด้วย  $cD^1, cD^2, cD^3$  ตามลำดับ กระบวนการเลือกเฟ้นสัมประสิทธิ์ที่จะนำมาทำการฝังลายน้ำ เริ่มจากตั้งค่าเริ่มต้นเป็นครึ่งหนึ่งของค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดในระดับนั้น ๆ จากนั้นนำค่าเริ่มต้นดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับสัมประสิทธิ์ทุกตัวในระดับนั้น ๆ หากค่าสัมประสิทธิ์ตัวใดมีค่ามากกว่าค่าเริ่มต้นนี้ จะถูกเลือกเก็บเอาไว้จนได้จำนวนเท่ากับข้อมูลลายน้ำ หากได้ไม่ครบจำนวนข้อมูลลายน้ำ จะลดค่าเริ่มต้นนี้อีกครึ่งหนึ่งแล้วทำการค้นหาซ้ำจนกว่าจะได้จำนวนครบตามต้องการ สัมประสิทธิ์ที่ได้เหล่านี้จะถูกฝังลายน้ำโดยคูณกับค่าแฟคเตอร์ควบคุมที่ได้จากประสบการณ์การทดลองหลายๆ ครั้งอีกทีหนึ่ง กระบวนการนี้หลีกเลี่ยงการฝังลายน้ำลงบนสัมประสิทธิ์เวฟเล็ตใน detail subband ที่ระดับความถี่สูงสุด หรือ  $cD^0$  และที่ความถี่ต่ำสุดใน approximation subband หรือ  $cA^4$  โดยให้ความเห็นว่าที่ความถี่ดังกล่าวสามารถถูกโจมตีโดยการประมวลผลสัญญาณ และการบีบอัดได้ง่าย ผลของการฝังลายน้ำด้วยวิธีนี้สามารถทนต่อการโจมตีแบบต่างๆ ได้ดีแต่ต้องใช้สัญญาณเสียงต้นฉบับในการตรวจจับลายน้ำ ผลการทดลองได้ทดสอบกับเวฟเล็ตตระกูล Daubechies (db) หลายแบบ และที่ได้ผลดีที่สุดคือ db8

ในงานวิจัยของ Ronghui Tu and Jiying Zhao (2003) ได้ทำการฝังลายน้ำแบบ semi-fragile กล่าวคือลายน้ำประเภทนี้สามารถทนทานต่อการโจมตีทางการประมวลผลสัญญาณเฉพาะแบบตามที่กำหนดไว้เท่านั้น โดยการควบคุมพารามิเตอร์ที่กำหนด กระบวนการนี้เริ่มต้นด้วยสัญญาณเสียงจะถูกแยกองค์ประกอบเวฟเล็ตออก L ระดับ ซึ่งจะทำการฝังลายน้ำลงบนสัมประสิทธิ์เวฟเล็ตทุก L ระดับในแต่ละระดับจะทำการแบ่งสัมประสิทธิ์เวฟเล็ตออกเป็นช่วง ๆ ให้พอดีกับข้อมูลลายน้ำ และจะฝังข้อมูลลายน้ำที่เหมือนกันเพียงหนึ่งค่าต่อหนึ่งช่วงสัมประสิทธิ์ โดยเลือก

สัมประสิทธิ์เวฟเล็ดที่มีค่ามากที่สุดจำนวน 50 ค่าในแต่ละช่วงมาผ่านกระบวนการควอนไทเซชัน เพื่อระบุว่าสัมประสิทธิ์ตัวใดจะถูกคัดเลือกให้ฝังลายน้ำ ในการฝังลายน้ำข้อมูลลายน้ำจะถูกคูณเข้ากับควอนไทเซชันพารามิเตอร์ก่อนเพื่อทำการสเกลขนาด ซึ่งในทางปฏิบัติค่าควอนไทเซชันพารามิเตอร์จะมีค่าต่างกันในแต่ละ L ระดับ ซึ่งจะมีค่าเท่าใดนั้นขึ้นอยู่กับประสบการณ์ในการทดลองหลาย ๆ ครั้ง โดยขนาดของควอนไทเซชันที่เล็กเกินไปจะทำให้ลายน้ำไม่คงทนต่อการโจมตี แต่ถ้ามีขนาดใหญ่เกินไปจะทำให้สัญญาณเสียงที่ได้มีความผิดเพี้ยน การเลือกย่านความถี่ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ดก็เป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากเทคนิคการใช้ควอนไทเซชันนี้จะทำให้ความทนทานของข้อมูลลายน้ำบนสัมประสิทธิ์เวฟเล็ดในระดับความถี่ระดับกลางดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสัมประสิทธิ์เวฟเล็ดที่ระดับความถี่อื่น เนื่องจากระดับความถี่ต่ำเป็นข้อมูลสำคัญของสัญญาณเสียง การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ในส่วนนี้จะส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของเสียง ทำให้สัญญาณเสียงผิดเพี้ยนได้ง่าย และในขณะเดียวกันสัมประสิทธิ์ที่ความถี่สูงจะถูกโจมตีได้ง่ายโดยการประมวลผลสัญญาณแบบต่าง ๆ ในการตรวจจับลายน้ำสัญญาณเสียงจะถูกแบ่งออกเป็นช่วง ๆ และในแต่ละช่วงทำการเลือกสัมประสิทธิ์เวฟเล็ดที่มีค่ามากที่สุดมาจำนวน 50 ค่า ซึ่งสัมประสิทธิ์กลุ่มดังกล่าวจะต้องให้ลายน้ำที่เหมือนกับต้นฉบับไม่เช่นนั้นจะแสดงว่ามีการละเมิดกับสัญญาณเสียงเกิดขึ้น เนื่องจากการฝังลายน้ำ 1 บิตต้องใช้สัมประสิทธิ์มากถึง 50 ตัว ทำให้สัญญาณเสียงที่ใช้มีความยาวมาก ผลการทดลองของเขาทำให้เห็นว่าการเลือกใช้ควอนไทเซชันพารามิเตอร์เพียงค่าเดียว ให้ผลในสัญญาณเสียงแต่ละแบบไม่ดีนกและต้องใช้ผลการทดลองจำนวนมากเพื่อให้ได้ค่าควอนไทเซชันพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

ในงานวิจัยของ N. Sriyingyong และ K. Attakitmongkol (2006) โดยได้นำเสนอการฝังลายน้ำแบบกึ่งปิด (semi-blind watermarking) ซึ่งลายน้ำที่ทำการฝังนั้นเป็นรูปภาพ binary โดยทำการ permutation ใช้การเข้ารหัส Key1 เพื่อเป็นการป้องกันข้อมูลของลายน้ำ แล้วทำการฝังลายน้ำลงบนสัมประสิทธิ์ของเวฟเล็ดแบบดิสครีตใน approximation subband ( $cA^L$ ) ในอัลกอริทึมนี้ได้เลือกใช้เวฟเล็ดแบบ Daubechies 4 หรือ db4 ในงานวิจัยนี้สัญญาณเสียงจะถูกแยกองค์ประกอบเวฟเล็ดออก 5 ระดับ ซึ่งจะใช้สัมประสิทธิ์เวฟเล็ด  $cA^5$  ที่ระดับสัญญาณนี้ทำการคำนวณค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์ทั้งหมดในช่วง แล้วทำการลบค่าเฉลี่ยดังกล่าวออกจากสัมประสิทธิ์ทั้งช่วง จะได้สัมประสิทธิ์ที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ และนำสัมประสิทธิ์ที่ได้นี้ไปทำการฝังลายน้ำ โดยการฝังลายน้ำจะค้นหาค่าความเข้มที่เหมาะสมของลายน้ำจากการแลกคุณภาพเสียงของสัญญาณที่ฝังลายน้ำ และความทนทานของลายน้ำโดยใช้การค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว (ATS) โดยในอัลกอริทึมจะใช้ SNR และการทำสหสัมพันธ์ระหว่างลายน้ำต้นฉบับกับลายน้ำที่ตรวจจับได้เป็นตัวชี้คุณภาพของเสียงและความทนทานของลายน้ำตามลำดับ ซึ่งในการตรวจจับลายน้ำนั้นผู้ที่ต้องการตรวจจับจะต้องทราบ

ข้อมูล Key1 และ Key2 จึงจะสามารถตรวจจับข้อมูลที่ถูกต้องออกมาได้ หากไม่ทราบรหัสลับนี้ก็จะตรวจจับได้แค่ข้อมูลที่ไม่มีความหมาย

ซึ่งผลการทดสอบของงานวิจัยนี้ลายน้ำมีความคงทนต่อการโจมตีต่าง ๆ ได้ดี และค่าสหสัมพันธ์ที่ได้มีค่าที่น่าพอใจ แต่การเลือกชนิดของเวฟเลตที่มีสัมประสิทธิ์สเกลลิงฟิลเตอร์จำนวนต่าง ๆ กันมีผลต่อเวลาที่ใช้ในการคำนวณ ยิ่งมีมากก็จะใช้เวลาในการคำนวณมากส่งผลต่อความเร็วของการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว และเกินความจำเป็น แต่ก็สามารถขจัดเซย์ได้จากการเลือก subband ที่ได้จากการแยกองค์ประกอบด้วยการแปลงเวฟเลตแบบดิสครีตเพื่อเลือกฝั่งลายน้ำที่ subband ระดับสูง ซึ่งมีจำนวนสัมประสิทธิ์เวฟเลตที่ลดลงทำให้ลดเวลาในการคำนวณได้ การฝั่งลายน้ำจะถูกฝั่งลงบน approximation subband ของเวฟเลตเพื่อความทนทาน และคุณภาพเสียงที่ดี ถึงแม้การเลือก detail subband จะส่งผลกระทบต่อคุณภาพเสียงน้อยกว่าแต่ลายน้ำจะไม่มี ความทนทาน

ในงานวิจัยของ B. Charmchamras, S. Kaengin, S. Airphaiboon และ M. Sangworasil (2007) ได้นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับการฝั่งลายน้ำที่เป็นรูปภาพขาวดำในโดเมนเวฟเลต และใช้การแปลงเวฟเลตแบบเต็มหน่วย ซึ่งใช้ค่า SNR เป็นตัววัดคุณภาพของสัญญาณเสียงและใช้ในการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ในงานวิจัย ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ว่าเป็นคือค่าความเข้มของลายน้ำที่จะทำการฝังในสัญญาณเสียง ได้มาจากการทดลองซ้ำหลาย ๆ ครั้ง และนำมาคำนวณค่า SNR เพื่อหาค่าที่เหมาะสม โดยอัลกอริทึมที่นำเสนอเริ่มจากแยกสัญญาณเสียงต้นฉบับด้วยการแปลงเวฟเลตแบบเต็มหน่วย L ระดับ และทำการฝั่งลายน้ำลงในสัญญาณที่ถูกแยกองค์ประกอบออกมา โดยเลือกทำการฝั่งลายน้ำในส่วนของ Detailed coefficients โดยสมการในการฝั่งลายน้ำคือ

$$CD'_L(I(j)) = CD_L(I(j)) + \alpha\omega \quad (2.1)$$

โดยที่ค่า  $CD_L$  คือค่าสัมประสิทธิ์ใน Detail subband ซึ่งมี  $I(j)$  คือเวกเตอร์ที่เก็บข้อมูลตำแหน่งของสัมประสิทธิ์  $CD_L$   $\alpha$  คือค่าความเข้มของลายน้ำ  $\omega$  คือค่าสัมประสิทธิ์ของลายน้ำ และ  $CD'_L$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ทำการฝั่งลายน้ำแล้ว เมื่อฝั่งลายน้ำครบทุกบิตแล้วทำการแปลงกลับเวฟเลตเพื่อให้ได้สัญญาณเสียงที่อยู่ในโดเมนเวฟเลตเดิม ในส่วนของการตรวจจับลายน้ำนั้นดำเนินการโดย ทำการแปลงเวฟเลต L ระดับกับสัญญาณเสียงที่ได้ทำการฝั่งลายน้ำมาแล้ว โดยทำการสกัดลายน้ำจากสัมประสิทธิ์  $CD'_L$  นั้นมาทำการดำเนินการ โดยตรวจจับลายน้ำจากสมการ  $\omega' = \frac{V' - V}{\alpha}$  เมื่อ  $\omega'$  คือลายน้ำที่ทำการตรวจจับได้  $V'$  คือเวกเตอร์ที่มีสมาชิกเป็นค่าสัมประสิทธิ์ในแต่ละจุดที่



ได้ทำการฝังลายน้ำของสัญญาณเสียงที่ทำการฝังลายน้ำแล้ว และ  $V$  คือเวกเตอร์ที่มีสมาชิกเป็นค่าสัมประสิทธิ์ในแต่ละจุดที่ได้ทำการฝังลายน้ำของสัญญาณเสียงต้นฉบับ แต่ในอัลกอริทึมนี้การหาค่าความเข้มของลายน้ำนั้นยังคงต้องอาศัยการทดลองหลาย ๆ ครั้ง และข้อมูลที่ได้จากการคำนวณนั้นมีมากเกินไปจนจำเป็น

ในงานวิจัยของ Satid Vongpraphip และ Mahasak Ketcham (2009) ได้นำเสนอการฝังลายน้ำรูปภาพขาวดำในสัญญาณเสียงบนพื้นฐานการแปลงเวฟเลต และเพิ่มกระบวนการ Singular Value Decomposition พร้อมทั้งใช้กระบวนการทางปัญญาประดิษฐ์ในการค้นหาค่าความแข็งแกร่งของลายน้ำ โดยใช้การแปลงเวฟเลตแบบ Daubechies 4 (Db4) ในระดับ 5 และใช้ Singular Value Decomposition (SVD) ในสัญญาณที่ได้จากการแปลงเวฟเลต แล้วทำการฝังลายน้ำในเมตริกที่เก็บค่า Eigenvalue พร้อมทั้งทำการกลับคืนค่า (Inverse SVD) และนำค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้มาทำการแปลงกลับเวฟเลต (IDWT) จะได้สัญญาณเสียงที่อยู่ในโดเมนเวลา โดยในการค้นหาค่าพารามิเตอร์  $\alpha$  นั้นจะใช้ATS ในการค้นหา

จากสัญญาณเสียงที่ได้ทำการฝังลายน้ำจากอัลกอริทึมข้างต้น และทำการทดสอบอัลกอริทึมนี้ในสัญญาณเสียงแบบ Rock , Pop , Dance และ Classics ซึ่งผลที่ได้คือลายน้ำที่มีความแข็งแรง ทนทานต่อการโจมตีในรูปแบบต่าง ๆ มีความทนทานต่อ Low-pass filtering และ Cropping ได้ดี โดยงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า การนำเอากระบวนการปัญญาประดิษฐ์มาช่วยในกระบวนการหาค่าที่ดีที่สุดในการหาค่าความแข็งแกร่งของลายน้ำ เพื่อคุณภาพของลายน้ำและสัญญาณเสียงที่ดี แต่อย่างไรก็ตามด้วยวิธีการเชิงปัญญาประดิษฐ์ที่ถูกเสนอในงานวิจัยนี้ก็ยังไม่ใช่วิธีที่ได้ผลดีที่สุด

ในงานวิจัยของ Prayoth Kumsawat (2010) ได้นำเสนอการฝังลายน้ำดิจิทัลโดยการนำเอาแนวคิดทางปัญญาประดิษฐ์มาใช้ในกระบวนการค้นหาค่าความแข็งแกร่งของลายน้ำ โดยใช้ อัลกอริทึมที่ชื่อว่า จินเนติกอัลกอริทึม (Genetic algorithm ;GA) ซึ่งเป็นการค้นหาค่าเหมาะสมที่สุด โดยใช้หลักการทางธรรมชาติ และหลักการทางสายพันธ์ ซึ่งในอัลกอริทึมของ GA จะมีกระบวนการที่เรียกว่าการวิวัฒนาการในการค้นหาค่าตอบ โดยกระบวนการฝังลายน้ำที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ได้ทำการดำเนินการฝังลายน้ำ โดยใช้การแปลงมัลติเวฟเลตของสัญญาณเสียงเพื่อนำสัมประสิทธิ์ของมัลติเวฟเลตมาใช้ในการฝังลายน้ำ รูปภาพลายน้ำจะถูกทำการแปลงและนำรหัสลับใส่เข้าไปในรูปภาพลายน้ำเพื่อเพิ่มความปลอดภัยในกระบวนการตรวจจับ ถึงแม้ผู้ทำการละเมิดลิขสิทธิ์จะสามารถรู้ และดำเนินการตามอัลกอริทึมได้ แต่หากไร้ซึ่งรหัสลับนี้ ข้อมูลที่ตรวจจับได้จะกลายเป็นเพียงข้อมูลที่ไร้ความหมายเท่านั้น ในกระบวนการค้นหาของ GA ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ

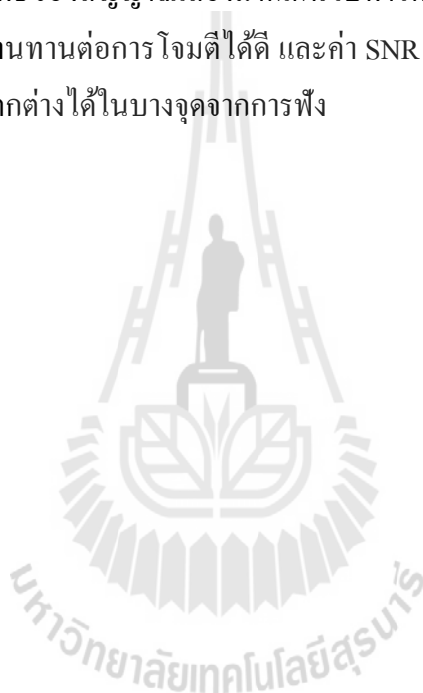
$$f_{obj} = \delta_{DIF} \times DIF + \delta_{NC} \times NC_{ave} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $DIF$  คือค่าความต่างระหว่าง SNR ของสัญญาณเสียงที่กำหนดซึ่งในงานวิจัยกำหนดไว้ที่ 24 dB และค่า SNR ของสัญญาณเสียงที่คำนวณได้ในแต่ละรอบการค้นหา และ  $NC_{ave}$  คือค่าเฉลี่ยของความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณลายน้ำที่ตรวจจับได้กับสัญญาณลายน้ำต้นฉบับ โดยที่  $\delta_{DIF}$  และ  $\delta_{NC}$  คือค่าถ่วงน้ำหนักของ  $DIF$  และ  $NC_{ave}$  ตามลำดับ และในกระบวนการตรวจจับลายน้ำไม่ต้องใช้สัญญาณเสียงต้นฉบับ ซึ่งผลการทดสอบในงานวิจัยแสดงให้เห็นถึงความทนทานจากการโจมตีในการประมวลผลสัญญาณ และยังทนทานต่อการทำ DA/AD อีกด้วย อีกทั้งยังทำการเปรียบเทียบผลระหว่างอัลกอริทึมในงานวิจัยที่ใช้ GA กับอัลกอริทึมที่ใช้ ATS ซึ่งผลที่ได้ อัลกอริทึมของ GA ให้ผลความทนทานที่ดีกว่า และมีค่า SNR ที่มากกว่า

ในงานวิจัยของ Baiying Lei, IngYa Soon, Zhen Li และ Peng Dai (2011) ได้นำเสนอการฝังลายน้ำในสัญญาณเสียงโดยนำการหาค่าที่ดีที่สุดแบบ Particle Swarm Optimization มาใช้ในการฝังลายน้ำ โดยกำหนด Particle 50 ตัว, 50 Generation,  $c_1 = c_2 = 1.8$ ,  $c_0 = 0.4$  และใช้การแปลง Singular Value Decomposition ในการเตรียมสัญญาณและค่าสัมประสิทธิ์ที่จะใช้ในการฝังลายน้ำ โดยลายน้ำที่ใช้เป็นรูปภาพแบบ Binary และนำภาพลายน้ำนี้มาผ่านกระบวนการ Chaotic map เพื่อเตรียมข้อมูลที่จะใช้ในอัลกอริทึม ในอัลกอริทึมนี้การฝังลายน้ำจะถูกดำเนินการบนโดเมนเวฟเลต และนำสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเลตผ่านกระบวนการ Singular Value Decomposition โดยในการฝังลายน้ำนั้น ค่าสัมประสิทธิ์ของลายน้ำจะถูกนำไปคูณเข้ากับเมตริกที่เก็บค่า Eigenvalue โดยทำการคูณค่าสัมประสิทธิ์ของลายน้ำเข้ากับค่าความแข็งแกร่งก่อนนำไปเก็บไว้ในเมตริกดังกล่าว แล้วทำการแปลงกลับเวฟเลตจากสมการที่ได้ จะได้สัญญาณเสียงที่ทำการฝังลายน้ำแล้ว ในกระบวนการตรวจจับลายน้ำนั้น สามารถทำได้ไม่ยาก โดยอาศัยกระบวนการ Singular Value Decomposition ซึ่งสิ่งที่เป็นจุดสำคัญของงานวิจัยนี้คือการทำเอากระบวนการทางปัญญาประดิษฐ์ มาใช้ในกระบวนการหาค่าที่ดีที่สุดของพารามิเตอร์ความเข้มของลายน้ำ โดยต้องการความแข็งแกร่งของลายน้ำ และคุณภาพของสัญญาณเสียงที่เหมาะสมซึ่งค่า fitness function ของกระบวนการคือ ค่า SNR และค่า BER (Bit Error Raito) จากสมการ

$$BER = \frac{1}{N_w} \sum_{n=1}^{N_w} w_n \oplus w'_n \quad (2.3)$$

โดยกำหนด  $w_n'$  คือลายน้ำที่ทำการตรวจจับได้  $w_n$  คือลายน้ำต้นฉบับ และ  $N_w$  คือจำนวนบิตของลายน้ำ BER เป็นค่าความผิดพลาดของบิตลายน้ำที่ตรวจจับได้เทียบกับลายน้ำต้นฉบับ โดยที่ค่า BER นั้นจะมีหลายค่าเนื่องจากการฝังลายน้ำนั้นจะถูกทดสอบด้วยการโจมตีแบบต่างๆ ซึ่งในงานวิจัยนี้มีทั้งหมด 4 แบบ คือ Resampling, MP3 compression, Cropping และ Additive Noise โดยทำการทดสอบกับสัญญาณเสียง 16 bit Mono 44.1kHz ที่ความยาว 30 วินาที โดยสัญญาณเสียงหลังจากทำการฝังลายน้ำมีคุณภาพเสียงที่ดีแต่ในอัลกอริทึมนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของสัญญาณเสียงมากเกินไปทำให้สัญญาณเสียงที่ได้มีความผิดเพี้ยน ถึงแม้ลายน้ำที่ได้มีความทนทานต่อการโจมตีได้ดี และค่า SNR อยู่ในมาตรฐานแต่สัญญาณเสียงก็ยังสามารถรู้สึกถึงความแตกต่างได้ในบางจุดจากการฟัง

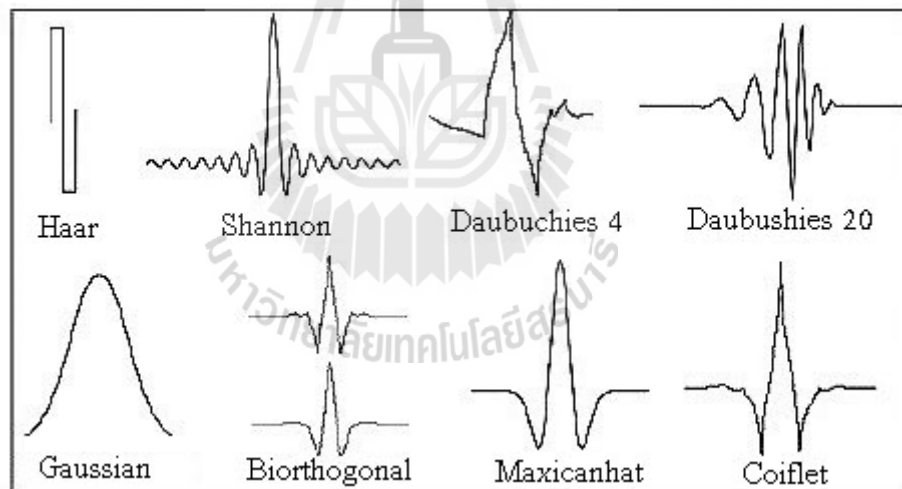


## บทที่ 3

### ทฤษฎีเบื้องต้น

#### 3.1 ภาพรวมของเวฟเล็ต

การแปลงเวฟเล็ต (Wavelet Transform) เป็นคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์และสังเคราะห์ลักษณะของสัญญาณ ซึ่งมีประโยชน์อย่างมากในงานทางด้านการประมวลผลสัญญาณ (Signal Processing) ทฤษฎีเวฟเล็ตสามารถนำมาประยุกต์เพื่อใช้อธิบายลักษณะของสัญญาณต่างๆ หรือระบบใด ๆ ได้ เช่น การบีบอัดรูปภาพ การวิเคราะห์สัญญาณรบกวนทางไฟฟ้า การวิเคราะห์การมองเห็น การทำนายแผ่นดินไหว หรือแม้แต่การวิเคราะห์สัญญาณเสียง ซึ่งตัวอย่างของฟังก์ชันสัญญาณเวฟเล็ตนั้นถูกแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างฟังก์ชันสัญญาณเวฟเล็ต

หลักการของกระบวนการแปลงเวฟเล็ตนั้นถูกพัฒนามาจากการแปลงสัญญาณพื้นฐานที่มีอยู่แล้ว โดยมีการปรับรูปแบบการวิเคราะห์ให้มีความเหมาะสมกับงานเฉพาะทางมากขึ้น ซึ่งสามารถแก้ไขข้อด้อยของกระบวนการแปลงสัญญาณพื้นฐานแบบเก่าได้ เช่น เมื่อใช้การแปลงฟูรีเยร์ในการวิเคราะห์สัญญาณเฉพาะบางช่วงเวลา และความถี่นั้น จะใช้เวลาในการคำนวณมากเพราะต้องคำนวณใหม่ตลอดย่านความถี่ ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาการวิเคราะห์สัญญาณที่สามารถวิเคราะห์

ได้เฉพาะช่วงเวลาและความถี่ที่สนใจ ทำให้พิจารณาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเฉพาะช่วงได้อย่างสะดวก และรวดเร็ว ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ถูกพัฒนาขึ้น โดยการแปลงเวฟเลต

การแปลงเวฟเลตจะใช้อธิบายโครงสร้างของระบบสัญญาณที่ประกอบด้วยกลุ่มของสัญญาณเฉพาะมารวมกันเป็นสัญญาณ หรือระบบนั้น ๆ โดยสัญญาณเฉพาะนี้เป็นคลื่นขนาดเล็ก ที่เรียกว่า เวฟเลต ลักษณะของเวฟเลตจะเป็นคลื่นที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง (Oscillatory) และขนาดของคลื่นจะลดลงสู่ศูนย์อย่างรวดเร็วทั้งสองด้าน

### 3.2 การแปลงเวฟเลต

การแปลงเวฟเลตจะถูกแสดงผลในรูปของผลรวมองค์ประกอบความถี่สูง (Detail Version) และองค์ประกอบความถี่ต่ำ (Approximated Version) โดยจะมีค่าสัมประสิทธิ์เวฟเลตทำหน้าที่เป็นค่าน้ำหนักขององค์ประกอบความถี่แต่ละระดับ ในการอธิบายสัญญาณใด ๆ ด้วยการแปลงเวฟเลต จึงทำได้โดยการนำกลุ่มของเวฟเลตที่มีโครงสร้างแบบฟังก์ชันเดียวกันเป็นตัวอธิบาย ซึ่งฟังก์ชันนี้เป็นฟังก์ชันต้นกำเนิดที่เรียกว่า เวฟเลตแม่ (Mother Wavelet) โดยคลื่นเวฟเลตแต่ละอันในกลุ่มจะเกิดจากการปรับสเกล (Scale ; a) หรือการแสดงผลการยืดหรือหดตัวของเวฟเลตนั่นเอง ส่วนการเลื่อนตำแหน่ง (Translation ; b) จะเป็นการแสดงตำแหน่งบนแกนเวลา โดยจะสามารถเขียนสมการของเวฟเลตได้ดังนี้

$$\psi_{b,a}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (3.1)$$

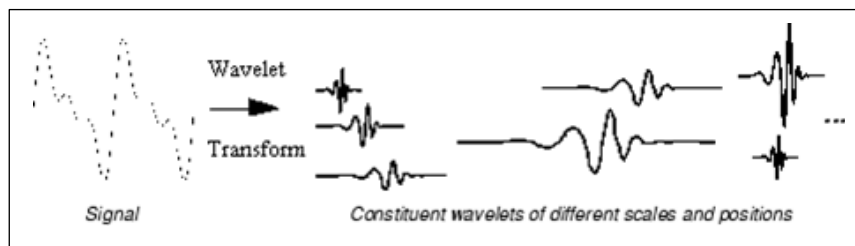
เมื่อ  $\psi_{b,a}(t)$  คือ ฟังก์ชันเวฟเลตที่ทำการสเกลและเลื่อนตำแหน่ง

$\psi(t)$  คือ ฟังก์ชันเวฟเลตแม่

$a$  คือ พารามิเตอร์ที่ใช้ในการสเกล (Scale)

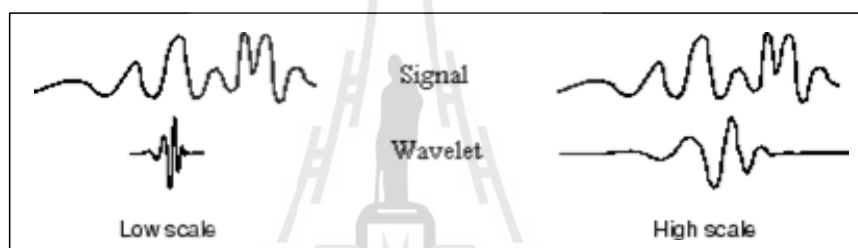
$b$  คือ พารามิเตอร์ที่ใช้ในการเลื่อนตำแหน่ง (Translation)

โดยที่ช่วงเวลาและความถี่ในการแปลงจะสัมพันธ์กัน และเพื่อให้เวฟเลตที่ถูกสเกลไปแล้ว มีพลังงานเท่ากับเวฟเลตแม่จึงต้องทำการนอร์มัลไลซ์ด้วย  $\frac{1}{\sqrt{a}}$  เสมอ



รูปที่ 3.2 ลักษณะของการสเกลและการเลื่อนตำแหน่งของเวฟเล็ต

ในรูปที่ 3.2 เป็นลักษณะของสัญญาณที่นำมาวิเคราะห์เมื่อถูกทำการแปลงเวฟเล็ต โดยอยู่ในรูปของฟังก์ชันเวฟเล็ตที่ถูกปรับสเกลและเลื่อนตำแหน่งเพื่อใช้ในกระบวนการวิเคราะห์สัญญาณ



รูปที่ 3.3 ลักษณะการสเกลสัญญาณ

ในรูปที่ 3.3 เป็นลักษณะของเวฟเล็ตที่มีการสเกลในขนาดที่ต่างกัน โดยการนำสัญญาณใดๆ มาผ่านกระบวนการแปลงเวฟเล็ตนั้นเปรียบเหมือนการแตกสัญญาณนั้นให้ออกมาดังรูปของเวฟเล็ตแม่ที่มีการปรับสเกลและตำแหน่งที่แตกต่างกันไป ซึ่งรูปแบบของการแปลงเวฟเล็ตโดยทั่วไปนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง (Continuous Wavelet Transform) และการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform)

### 3.2.1 การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง (Continuous Wavelet Transform)

การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องนั้น มีลักษณะเป็นการวิเคราะห์สัญญาณในทุก ๆ ค่าของความถี่ ซึ่งมีสมการในการวิเคราะห์เวฟเล็ตแบบต่อเนื่องดังสมการที่ 3.2

$$CWT(a,b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3.2)$$

- เมื่อ  $f(t)$  คือ สัญญาณที่ทำการวิเคราะห์  
 $\psi(t)$  คือ ฟังก์ชันเวฟเล็ต  
 $a$  คือ พารามิเตอร์ที่ใช้ในการสเกล (Scale)  
 $b$  คือ พารามิเตอร์ที่ใช้ในการเลื่อนตำแหน่ง (Translation)

การแปลงเวฟเล็ตจะมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติด้วยการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์  $a$  และ  $b$  ทำให้ในช่วงที่มีความถี่สูง จะใช้ช่วงเวลาในการวิเคราะห์ที่แคบ และในช่วงที่มีความถี่ต่ำจะใช้ช่วงเวลาในการวิเคราะห์ที่กว้าง

### 3.2.2 การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform)

การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยเป็นการแปลงเวฟเล็ตรูปแบบหนึ่งที่มีลักษณะการวิเคราะห์โดยพัฒนารูปแบบการปรับสเกลและการเลื่อนตำแหน่งในลักษณะเป็นช่วง ๆ ไม่ต่อเนื่องกัน ซึ่งในการวิเคราะห์แบบเต็มหน่วยนั้น จำเป็นต้องกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานเพื่อความเข้าใจกระบวนการมากขึ้น ดังนี้

#### 3.2.2.1 การวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายระดับความละเอียด (Multiresolutoin

##### Analysis : MRA)

การวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายระดับความละเอียด เป็นการวิเคราะห์สัญญาณที่เลือกระดับความละเอียดได้ โดยการนำสัญญาณเล็ก ๆ ที่ปรับค่าตามสเกล  $a$  : ซึ่งมี  $b$  หลาย ๆ ตำแหน่งมารวมกัน เกิดเป็นสัญญาณที่ระดับความละเอียดที่เลือกไว้ และเมื่อนำสัญญาณทั้งหมดมารวมกันแล้ว จะทำให้ได้สัญญาณต้นแบบดั้งเดิมขึ้นมา ซึ่งหลักการในการวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายระดับความละเอียดนั้น จำเป็นต้องใช้ทฤษฎีของปริภูมิเวกเตอร์ (Space Vector) ดังนี้

ปริภูมิเวกเตอร์ คือ ปริภูมิของสัญญาณที่เกิดจากการรวมตัวกันของสัญญาณย่อย ๆ ที่เรียกว่า ฟังก์ชันพื้นฐาน (Basis Function) ซึ่งเมื่อกำหนดให้  $V$  เป็นปริภูมิเวกเตอร์ที่มี  $j$  แสดงถึงระดับความละเอียดและจำนวนฟังก์ชันพื้นฐานที่ประกอบขึ้นเป็นฟังก์ชันนั้นแล้ว สามารถเรียกฟังก์ชันนี้ว่า ฟังก์ชันการปรับความละเอียด (Scaling Function ;  $\Phi(t)$ ) ซึ่งการปรับความละเอียดจะปรับตามค่าของความถี่ โดยถ้าช่วงความถี่ต่ำระดับความละเอียดก็จะอยู่ในระดับที่ต่ำ เช่นเดียวกับระดับช่วงความถี่สูงระดับความละเอียดก็จะอยู่ในระดับที่สูงด้วย โดยจะพบว่า การปรับระดับความละเอียดลดลงมาหนึ่งระดับฟังก์ชันพื้นฐานจะมีความถี่ลดลงครึ่งละ 2 เท่า โดยเมื่อใช้คุณสมบัติของการวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายระดับความละเอียดแล้วจะสามารถวิเคราะห์สัญญาณ  $f(t)$  ที่ปริภูมิระดับ  $j$  ใดๆ ดังสมการที่ 3.3

$$f_j(t) = \sum_k c_k^j \Phi_k^j(t) \quad (3.3)$$

โดยกำหนดให้

- $c_k^j$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์จากการปรับระดับความละเอียด  $j$  ณ ตำแหน่งที่  $k$  ใด ๆ
- $j$  คือ ระดับความละเอียด
- $k$  คือ ตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์ในสัญญาณ

โดยสามารถเขียนสมการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันการปรับความละเอียดในปริภูมิใด ๆ ดังสมการที่ 3.4

$$\Phi_k^j(t) = 2^{-\frac{j}{2}} \Phi(2^j t - k) \quad ; \quad j, k \in \mathbb{Z} \quad (3.4)$$

โดยกำหนดให้

- $\mathbb{Z}$  คือ เซตของจำนวนเต็ม

จากสมการที่ 3.3 จะพบว่าสัญญาณต้นแบบ  $f(t)$  สามารถคำนวณได้จากการนำค่าสัมประสิทธิ์  $c_k^j$  คูณกับฟังก์ชันการปรับความละเอียดที่ตำแหน่ง  $k$  ใด ๆ ที่ระดับความละเอียด  $j$  ในการวิเคราะห์ที่ระดับความละเอียดต่ำลงอีก จะทำให้สัญญาณบางส่วนหายไปอยู่ในอีกปริภูมิหนึ่ง ซึ่งเรียกว่า ปริภูมิเวกเตอร์เวฟเล็ต (Wavelet Vector Space ;  $W^j$ ) ซึ่งประกอบด้วยฟังก์ชันพื้นฐานที่เรียกว่าฟังก์ชันเวฟเล็ต (Wavelet Function ;  $\psi(t)$ ) โดยมีสมการดังนี้

$$\Psi_k^j(t) = \frac{1}{2^{j/2}} \Psi(2^j t - k) \quad (3.5)$$

เมื่อกำหนดให้  $g_j(t)$  เป็นสัญญาณที่เกิดจากฟังก์ชันพื้นฐาน ( $\Psi_k^j(t)$ ) ภายใต้ปริภูมิเดียวกันมารวมกันเป็นสัญญาณใด ๆ จะได้ว่า

$$g_j(t) = \sum_k d_k^j \Psi_{kj}(t) \quad (3.6)$$



เมื่อกำหนดให้

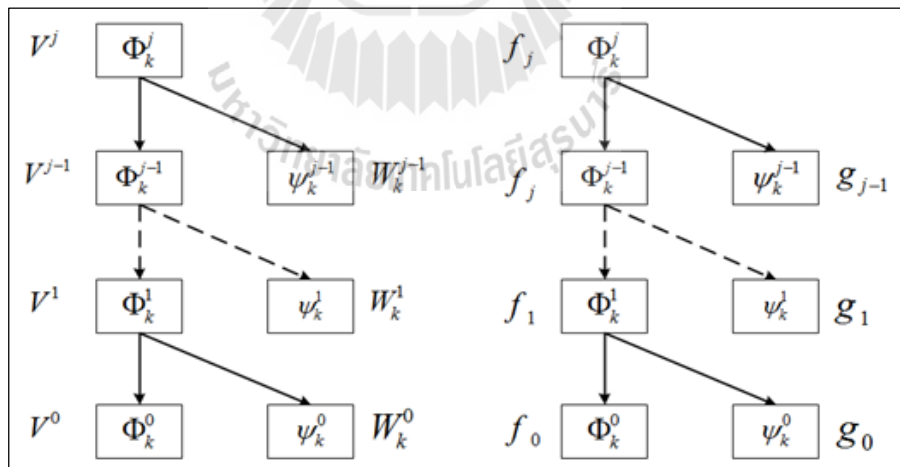
$d_k^j$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์จากการปรับระดับความละเอียด  $j$  ณ ตำแหน่งที่  $k$  ใด ๆ เพื่อเกิดเป็นสัญญาณ  $g(t)$  ดังนั้น จากความสัมพันธ์  $V^{j-1} \oplus W^{j-1} = V^j$  จะได้ว่า

$$f_j(t) = f_{j-1}(t) + g_{j-1}(t) \tag{3.7}$$

ถ้า  $f(t) \in V^j$  สามารถแตกกระจายให้  $f(t)$  มีความละเอียดน้อยลงจากความสัมพันธ์ของ  $V^{j-1} \oplus W^{j-1} = V^j$  ในขณะเดียวกัน  $V^j$  สามารถแตกต่อไปอีกเรื่อยๆจนกระทั่ง  $j = 0$  ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 3.8

$$V^j = V^0 \oplus W^0 \oplus W^1 \oplus \dots \oplus W^{j-1} \tag{3.8}$$

ในทำนองเดียวกัน  $f_j = f_{j-1} + g_{j-1}$  ก็สามารถกระจาย  $f_{j-1}, g_{j-1}$  ได้เช่นกัน โดยสามารถเขียนแผนภาพการกระจายสัญญาณไปยังความละเอียดลำดับต่างๆ ได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แผนภาพแสดงการกระจายสัญญาณแบบหลายระดับความละเอียด

ซึ่งสัญญาณ  $f(t)$  สามารถแสดงในลักษณะของฟังก์ชันการปรับความละเอียดและฟังก์ชันเวฟเล็ทได้ดังสมการที่ 3.10

$$f(t) = f_0 + g_0 + g_1 + g_2 + \dots + g_{j-1} \quad (3.9)$$

$$f(t) = \sum_k c_k^0 \Phi_k^0(t) + \sum_{j=0}^{j-1} \sum_k d_k^j \Psi_k^j(t) \quad (3.10)$$

ดังนั้นสัมประสิทธิ์เวฟเลตจึงสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.11 และ 3.12

$$c_k^j = \langle f(t), \Phi_k^j(t) \rangle \quad (3.11)$$

$$d_k^j = \langle f(t), \Psi_k^j(t) \rangle \quad (3.12)$$

โดยกำหนดให้

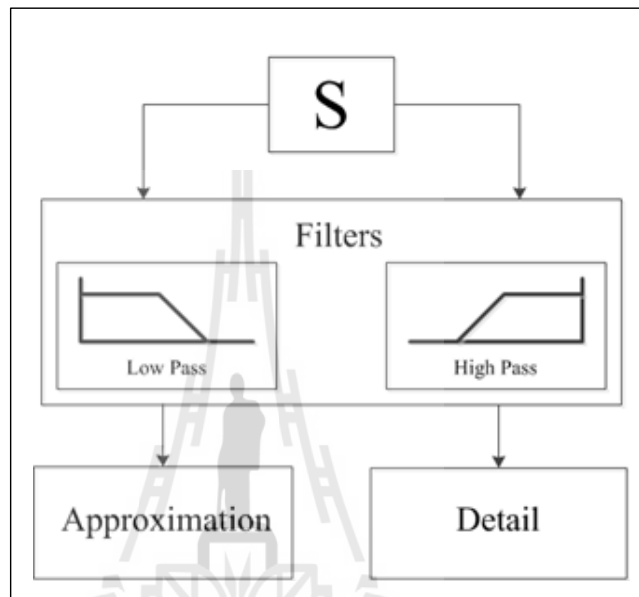
$\langle \ , \ \rangle$  คือ การทำผลคูณเชิงสเกลาร์ (Dot Product)

เมื่อทำการแยกสัญญาณ  $f(t)$  จนถึงระดับความละเอียดที่  $j$  สัมประสิทธิ์  $c_k^j$  จะถูกแตกออกเป็นสัมประสิทธิ์  $c_k^0$  และกลุ่มของเซต  $d_k^{j-1}, \dots, d_k^1, d_k^0$  ในระดับความละเอียดที่ต่างกัน ซึ่ง  $c_j(m)$  และ  $d_j(m)$  จะสามารถคำนวณได้จากการทำเซอร์คูลาคอนโวลูชันระหว่างสัญญาณต้นแบบกับ  $\phi_{j,m}(t)$  และการทำเซอร์คูลาคอนโวลูชันระหว่างสัญญาณต้นแบบกับ  $\psi_{j,m}(t)$  ตามลำดับ ซึ่งกระบวนการดังกล่าวคือลักษณะของการแปลงเวฟเลตแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform)

### 3.2.2.2 การวิเคราะห์สัญญาณแบบตัวกรองสัญญาณ (Filter Bank Analysis)

การวิเคราะห์สัญญาณแบบตัวกรองสัญญาณนั้น (Filter Bank Analysis) จะทำการแยกสัญญาณต้นแบบออกเป็น 2 ส่วน คือส่วนที่มีความถี่สูงกับส่วนที่มีความถี่ต่ำ โดยจะใช้ตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter) สำหรับแยกองค์ประกอบส่วนที่มีความถี่ต่ำ และใช้ตัวกรองความถี่สูงผ่าน (High Pass Filter) สำหรับแยกองค์ประกอบความถี่สูง สัญญาณที่ได้มานั้นจะผ่านอัตราสุ่มลง (Down Sampling) ด้วย 2 ซึ่งจะทำให้ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ลดลงครึ่งหนึ่งในการวิเคราะห์แต่ละขั้น โดยสรุปคือ เมื่อนำสัญญาณต้นแบบมาทำการวิเคราะห์ด้วยการแปลงเวฟเลตแบบเต็มหน่วย โดยการทำเซอร์คูลาคอนโวลูชันระหว่างสัญญาณที่จะนำมาวิเคราะห์กับตัวกรองความถี่ต่ำผ่านและ

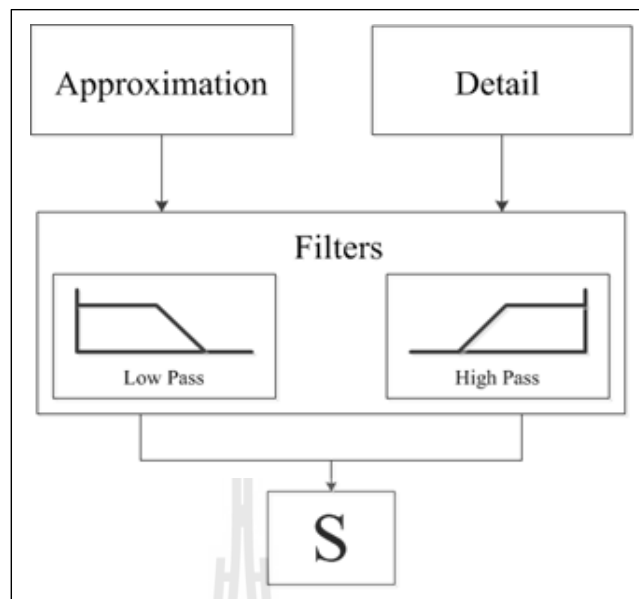
ตัวกรองความถี่สูงผ่าน จะทำให้สัญญาณต้นแบบถูกแยกองค์ประกอบด้วยตัวกรองความถี่สูงและตัวกรองความถี่ต่ำ ซึ่งจะแยกความถี่ได้ตามช่วงที่ต้องการ โดยผลที่ได้จะถูกลดอัตราสุ่มลงครึ่งหนึ่ง ทำให้ได้สัญญาณเป็นสองส่วน คือ สัญญาณองค์ประกอบที่มีความถี่สูง ที่เรียกว่า “Detail” และสัญญาณองค์ประกอบที่มีความถี่ต่ำ ที่เรียกว่า “Approximation” ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การแยกสัญญาณด้วยตัวกรองแบบ 2 ช่องสัญญาณ

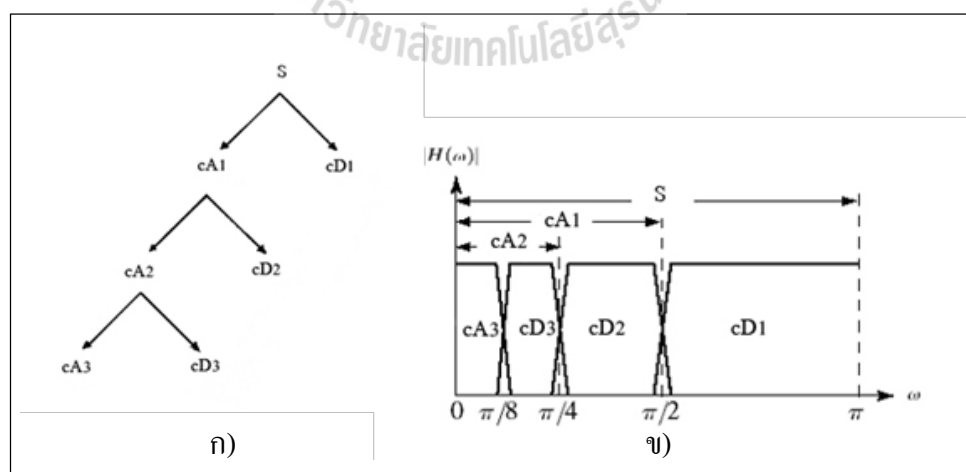
โดย Detail และ Approximation คือผลที่ได้จากการทำเซอร์คูลาคอนโวลูชันระหว่างสัญญาณต้นแบบกับตัวกรองความถี่สูงผ่านและตัวกรองความถี่ต่ำผ่านตามลำดับ

นอกจากนี้ในโครงสร้างที่กลับกัน การวิเคราะห์แบบสร้างกลับสองช่องสัญญาณ (Reconstruction 2 Channel Synthesis Filter Bank) จะนำส่วนของสัญญาณความถี่สูงและความถี่ต่ำมารวมกันเป็นสัญญาณต้นแบบได้ ซึ่งกระบวนการนี้เรียกว่าการสังเคราะห์สัญญาณ (Synthesis) โดยแสดงกระบวนการดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การแปลงกลับสัญญาณด้วยตัวกรองแบบ 2 ช่องสัญญาณ

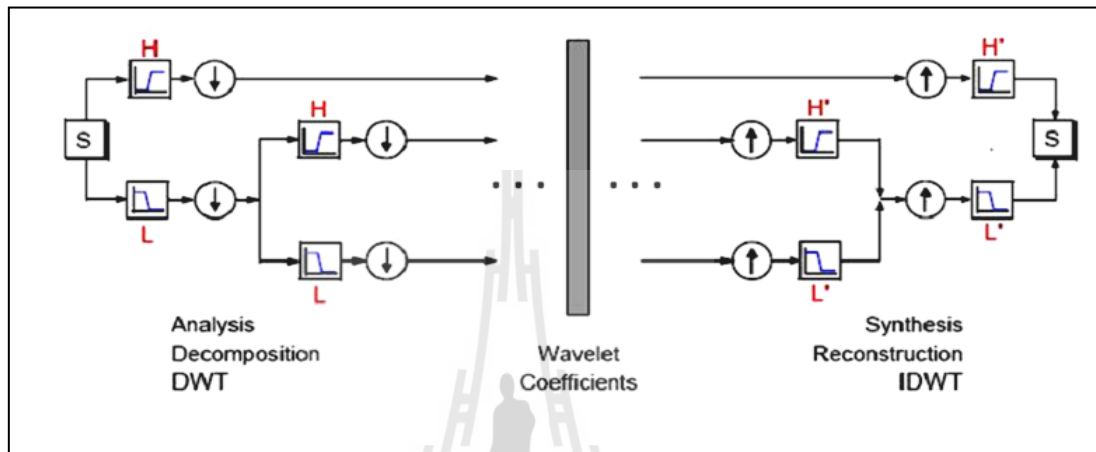
เมื่อเอาตัวกรองแบบสองช่องสัญญาณมาเรียงต่อกันโดยใช้สัญญาณทางด้านความถี่ต่ำมาใช้ในการแยกองค์ประกอบอีกครั้งหนึ่ง การแปลงเวฟเล็ดเข้าไปในสัญญาณความถี่ต่ำนั้นสามารถเรียกโครงสร้างของการแปลงเวฟเล็ดลักษณะนี้ว่ามีโครงสร้างแบบทวิภาค (Dyadic Tree Structure) ซึ่งรูปที่ 3.7 จะแสดงถึงการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยโดยอาศัยโครงสร้างดังกล่าว



รูปที่ 3.7 ก) การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยโดยใช้โครงสร้างต้นไม้แบบทวิภาค (ระดับ 3)

ข) ช่วงความถี่ของสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงต่อการแปลงในระดับต่างๆ

จากรูปที่ 3.7 สัญญาณที่ได้จะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนย่อยคือ Approximation Coefficients ( $cA_n$ ) และ Detail Coefficients ( $cD_n$ ) ซึ่งได้มาจากการทำเซอรัคลาคอน โวลูชันระหว่างสัญญาณต้นแบบ  $S$  กับวงจรมความถี่ต่ำผ่าน และวงจรมความถี่สูงผ่าน แล้วทำการลดอัตราสุ่มลงสองเท่าเมื่อ  $n$  คือ ค่าระดับความละเอียดซึ่งเป็นเลขจำนวนเต็ม ตั้งแต่  $1, 2, \dots, \infty$



รูปที่ 3.8 ลักษณะการแยกสัญญาณ และการรวมกลับสัญญาณของการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (Misiti al. 2004)

ในรูปที่ 3.8 เป็นภาพรวมของลักษณะการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยและการแปลงกลับเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยในการวิเคราะห์แบบหลายระดับ โดยข้อมูลที่นำมาทำการแปลงเวฟเล็ตในระดับต่อไปคือข้อมูลที่อยู่ในส่วนของ Approximation Coefficients หรือชุดข้อมูลที่อยู่ในส่วนของความถี่ต่ำ ข้อมูลที่อยู่ในส่วนของ Detail Coefficients หรือส่วนที่มีความถี่สูงจะถูกนำมาใช้ในกระบวนการแปลงกลับเวฟเล็ต

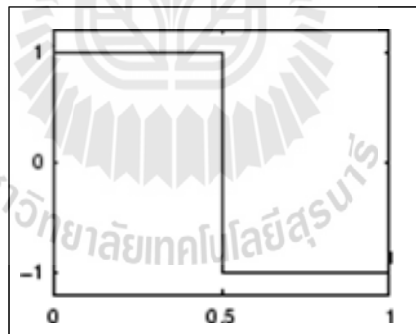
### 3.3 ตระกูลเวฟเล็ต (Wavelet Families)

ตระกูลของเวฟเล็ตเป็นตระกูลของฟังก์ชันพื้นฐานสำหรับการแปลงเวฟเล็ตซึ่งมีรูปแบบให้เลือกใช้หลายรูปแบบ โดยแต่ละรูปแบบจะมีความเหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานแตกต่างกัน ซึ่งตระกูลของฟังก์ชันพื้นฐานสำหรับการแปลงเวฟเล็ตมีหลายตระกูล เช่น Haar Coiflets Daubechies Biorthogonal

#### Haar Wavelet

Haar wavelet เป็นฟังก์ชันเวฟเล็ตที่นำมาประยุกต์ใช้ได้ง่ายที่สุด ใช้เวลาในการประมวลผลสั้นและใช้หน่วยความจำในการคำนวณอย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากไม่ต้องใช้อะเรย์ชั่วคราว (Temporary Array) ในการเก็บข้อมูลระหว่างการประมวลผล ดังเช่นเวฟเล็ตชนิดอื่น ๆ นอกจากนี้ฟังก์ชันเวฟเล็ตแบบ Haar ยังมีคุณสมบัติตั้งฉาก (Orthogonality) นั่นคือฟังก์ชันเวฟเล็ตทุกฟังก์ชันจะตั้งฉากกันทั้งหมด

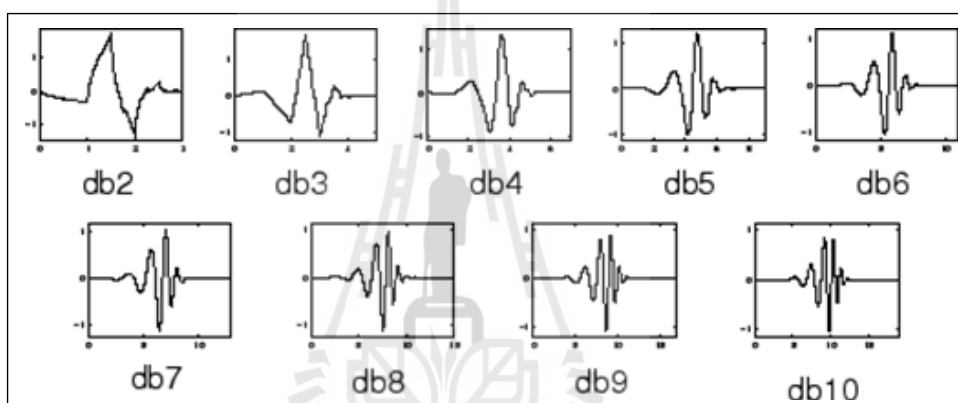
ค่าของฟังก์ชันเวฟเล็ตแบบ Haar จะทำการหาค่าเฉลี่ยและค่าผลต่างของข้อมูลในตำแหน่งข้างเคียง โดยค่าเฉลี่ยที่คำนวณได้จะเป็นค่าสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ตในช่วงความถี่ต่ำ และค่าผลต่างที่คำนวณได้จะเป็นค่าสัมประสิทธิ์ในช่วงความถี่สูง



รูปที่ 3.9 ฟังก์ชันเวฟเล็ตแบบ Haar

### Daubechies Wavelet

การแปลงเวฟเลตแบบ Daubechies นี้เรียกชื่อตามนักคณิตศาสตร์ผู้คิดค้น คือ “Ingrid Daubechies” เป็นหนึ่งในฟังก์ชันเวฟเลตที่มีลักษณะตั้งฉาก (Orthogonal Wavelet) โดยเป็นฟังก์ชันไม่ต่อเนื่อง (Discrete Function) ซึ่งเวฟเลตชนิดนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นฟังก์ชันการกรองความยาวจำกัด (Finite Length Filter) ได้ง่าย ด้วยฟังก์ชันการกรองความยาวจำกัดนี้เป็นคุณสมบัติที่สำคัญในการวิเคราะห์ข้อมูลในเชิงตำแหน่งเฉพาะพื้นที่ได้ (Spatial Domain Localization) และยังมีคุณสมบัติที่สามารถวิเคราะห์ความต่อเนื่องของการเปลี่ยนแปลงฟังก์ชันต่อการหาอนุพันธ์ต่อเนื่อง (Continuous Derivatives Analyze)



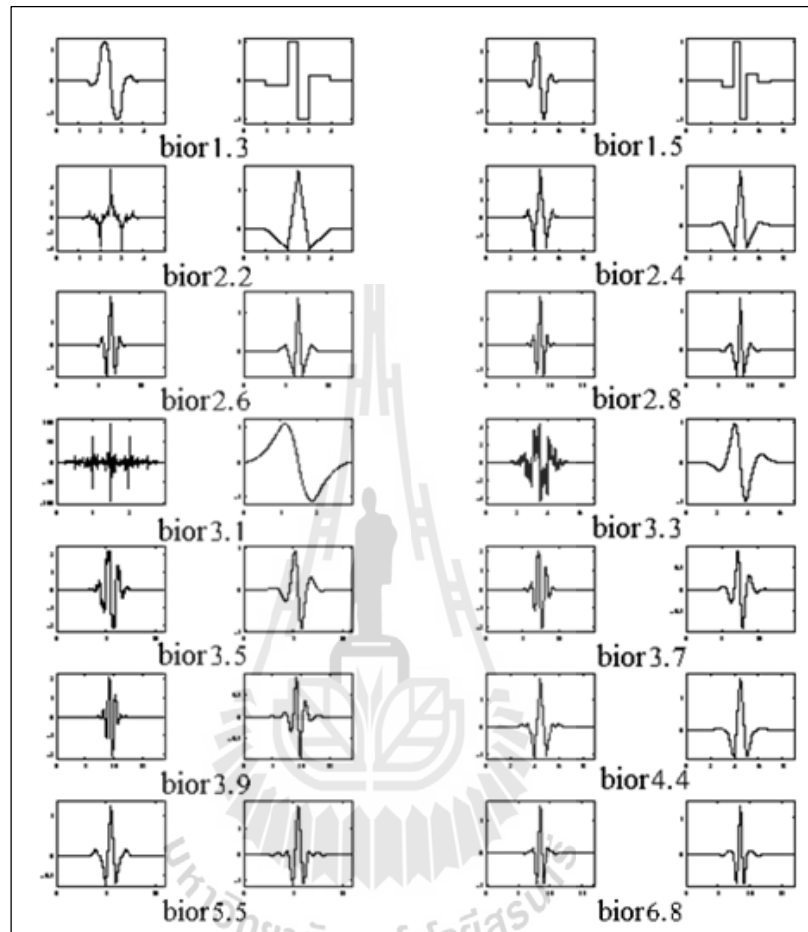
รูปที่ 3.10 ฟังก์ชันเวฟเลตแบบ Daubechies

ด้วยการออกแบบที่เหมาะสมของค่าสัมประสิทธิ์ฟังก์ชันเวฟเลตแบบ Daubechies ทำให้สามารถรักษาแนวโน้มของข้อมูลได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะเมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์เวฟเลตที่มีความถี่ต่ำถึงแม้ว่าการแปลงเวฟเลตด้วยฟังก์ชันเวฟเลตชนิดนี้จะไม่ให้ผลที่ดีกว่าการแปลงเวฟเลตชนิดอื่น ๆ ในทุกรูปแบบของการประยุกต์การใช้งาน แต่ในการศึกษาวิจัยจะพบว่าในกรณีของสัญญาณที่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด (Sharp Spike) ฟังก์ชันเวฟเลตแบบ Daubechies สามารถวิเคราะห์ได้ดี

### Biorthogonal Wavelet

ในการแปลงเวฟเลตหรือการหาค่าสัมประสิทธิ์เวฟเลตส่วนใหญ่แล้วฟังก์ชันเวฟเลตในการแปลงจะมีคุณสมบัติตั้งฉาก แต่ในความเป็นจริงฟังก์ชันการแปลงเวฟเลตไม่จำเป็นต้องมีคุณสมบัติตั้งฉากเสมอไป ดังนั้นเพื่อความยืดหยุ่นในการสร้างฟังก์ชันเวฟเลตที่จะใช้เป็นพื้นฐานในการแปลงสัมประสิทธิ์เวฟเลตสามารถลดเงื่อนไขการตั้งฉาก เนื่องจากการออกแบบให้ฟังก์ชันเวฟเลตมี

คุณสมบัติตั้งฉาก (Orthogonal) กระจับ (Compactly Support) และสมมาตร (Symmetric) พร้อมกัน  
ทุกคุณสมบัตินั้นเป็นไปได้ยาก โดยส่วนใหญ่คุณสมบัตินี้จะอยู่ในฟังก์ชันเฉพาะของตัวเอง



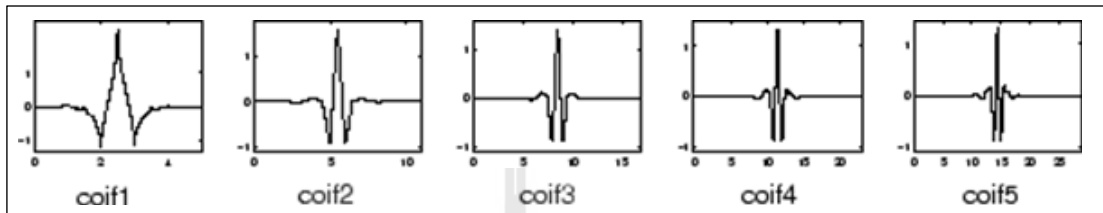
รูปที่ 3.11 ฟังก์ชันเวฟเลตแบบ Biorthogonal

ฟังก์ชันเวฟเลตแบบ Biorthogonal มีความสามารถในการรวบรวม (Capturing) ค่ากำลังของสัญญาณที่ต้องการได้อย่างรวดเร็วด้วยการใช้จำนวนของค่าสัมประสิทธิ์ที่น้อย ซึ่งเทคนิคแบบนี้นิยมประยุกต์ใช้กับงานทางด้านการประมวลผลสัญญาณ (Signal Processing) การลดขนาดของข้อมูล เช่นการบีบอัดภาพแบบมีข้อมูลสูญเสีย (Lossy Compression) และการบีบอัดภาพแบบไม่มีข้อมูลสูญเสีย (Lossless Compression) นอกจากนี้ฟังก์ชันเวฟเลตแบบ Biorthogonal ยังมีคุณสมบัติสมมาตรและกระจับ ซึ่งคุณสมบัติสมมาตรนี้เป็นคุณสมบัติที่ต้องการในการสร้างฟังก์ชันการกรอง เนื่องจากผลลัพธ์ของฟังก์ชันเป็นการแปลงที่ให้ความสัมพันธ์ของฟังก์ชันเชิงเส้น



### Coiflet Wavelet

ฟังก์ชันเวฟเลตชนิดนี้ถูกพัฒนาขึ้น โดย Ingrid Daubechies โดยความต้องการของ R. Coifman โดยลักษณะทั่วไปของฟังก์ชันเวฟเลตชนิดนี้คือ มีคุณสมบัติตั้งฉาก (Orthogonal) กระชับ (Compactly Support)



รูปที่ 3.12 ฟังก์ชันเวฟเลตแบบ Coiflet



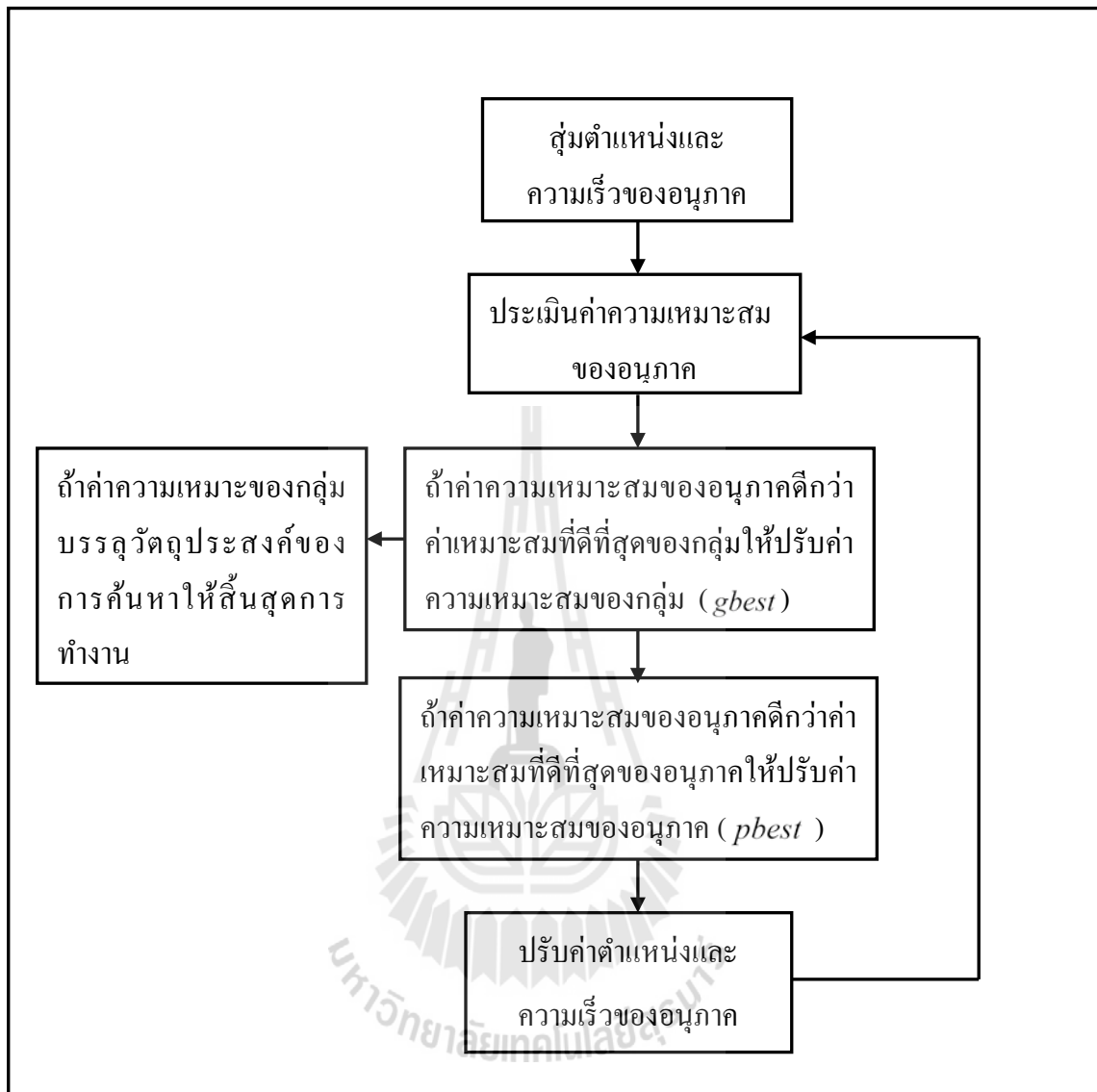
### 3.4 การหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization)

การหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (PSO) (James Kennedy, Russell Eberhart, 1995) (อาทิตย์ ศรีแก้ว, 2545) PSO เป็นอัลกอริทึมที่มีแรงจูงใจมาจากธรรมชาติ ซึ่งจัดเป็นวิธีการค้นหาแบบสุ่ม โดยอาศัยจุดเริ่มต้นหลายจุด โดยประยุกต์มาจากหลักการทางจิตวิทยา สังคมในการหาอาหารของสัตว์ เช่น ผีเสื้อกลางคืน หรือ ปลา เป็นต้น โดยธรรมชาตินั้นปลาหรือนกสามารถเคลื่อนที่ไปเป็นฝูง แยกตัวออกจากฝูงแล้วรวมกลับเข้ามาในฝูงอีกครั้ง การเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคนี้สามารถพิจารณาเป็นพฤติกรรมทางสังคม

ฝูงสัตว์ (Swarm) ใน PSO แท้จริงแล้ว คือ กลุ่มของอนุภาคในพื้นที่หลายมิติ ซึ่งแต่ละอนุภาคจะต้องเก็บข้อมูลเวกเตอร์สองเวกเตอร์ คือ เวกเตอร์ระบุตำแหน่ง และเวกเตอร์ระบุความเร็ว ในการบิน เราสมมติให้ฝูงอนุภาคบินอยู่ในพื้นที่ค้นหาหลายมิติ ตัวอนุภาคแต่ละตัวในฝูงจะต้องจำตำแหน่งที่ดีที่สุดของตัวเอง และตำแหน่งที่ดีที่สุดของเพื่อนร่วมฝูง ความหมายของคำว่าตำแหน่งที่ดีที่สุดในที่นี้ หมายถึง ตำแหน่งที่มีค่าคำตอบที่ดีที่สุดนั่นเอง สมาชิกในฝูงจะทำการสื่อสารข้อมูลของตำแหน่งกับสมาชิกตัวอื่น และทำการเปลี่ยนความเร็ว แล้วเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งใหม่เพื่อให้เข้าใกล้ตำแหน่งที่ดีที่สุดมากยิ่งขึ้น

#### 3.4.1 อัลกอริทึม PSO (PSO Algorithm)

PSO เป็นอัลกอริทึมเชิงประชากร โดยใช้หลักการทำงานร่วมมือกันในการแก้ปัญหาของอนุภาค สิ่งที่น่าสนใจใน PSO คือความเรียบง่ายของอัลกอริทึม และกระบวนการคิด ทำให้นำไปใช้งานจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ แผนผังพื้นฐานการทำงานของ PSO แสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แผนผังอัลกอริทึมพื้นฐานของ PSO

การเคลื่อนที่เป็นกลุ่มประกอบไปด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค โดยที่แต่ละอนุภาคเป็นตัวแทนของคำตอบของระบบที่เราต้องการหา โดยตำแหน่งของแต่ละอนุภาคจะเปลี่ยนไปตามข้อมูลของสถานะแวดล้อมที่เคลื่อนที่ผ่านมา และข้อมูลจากอนุภาคภายในกลุ่มด้วยตัวเอง

### 3.4.2 อัลกอริทึม PSO พื้นฐาน

1. ทำการสุ่มเวกเตอร์ตำแหน่งและความเร็วของแต่ละอนุภาคในกลุ่มประชากร เวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาคมีมิติเท่ากับ  $N$  ซึ่งเป็นขนาดของตัวแปรในปัญหาที่ต้องการค้นหา ดังนั้นเราสามารถมองตำแหน่งของอนุภาคในรูปเวกเตอร์  $\vec{p}_i(t)$  ขนาด  $N$  และค่าสุ่มความเร็วของแต่ละอนุภาคจะมีขนาดเท่ากับ  $N$  ด้วย โดยเรียกว่าเวกเตอร์ความเร็ว (Velocity vector) กำหนดให้เป็น  $\vec{v}_i$  ซึ่งแต่ละองค์ประกอบของเวกเตอร์ความเร็วจะเป็นค่าความเร็วของแต่ละตัวแปรในอนุภาคนั้นเอง ดังนั้นตำแหน่งของอนุภาค  $p_i$  จะเปลี่ยนแปลงไปด้วยการบวกเวกเตอร์ตำแหน่งเข้ากับความเร็วคั้งสมการ

$$\vec{p}_i(t) = \vec{p}_i(t-1) + \vec{v}_i(t) \quad (3.13)$$

2. ทำการประเมินค่าความเหมาะสม  $F$  ของแต่ละอนุภาค ซึ่งการประเมินค่าดังกล่าวนี้จะขึ้นอยู่กับแต่ละปัญหา ค่าความเหมาะสมที่ได้จากการประเมินจะถูกพิจารณาในสองขั้นตอนดังนี้ ถ้าความเหมาะสมของอนุภาค  $p_i$  มีค่าดีกว่าความเหมาะสมที่ดีที่สุดของทั้งกลุ่มอนุภาค ให้ทำการบันทึกเวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาคนั้นไว้ โดยเรียกค่าความเหมาะสมนี้ว่าค่าความเหมาะสมที่ดีที่สุดแบบวงกว้าง (global best fitness) หรือ  $gbest$  กล่าวคือ ถ้า  $F(\vec{p}_i(t)) < gbest$  ในกรณีที่ทำค่าน้อยที่สุด ให้ทำการบันทึกค่าความเหมาะสมของระบบและเวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาคนั้นไว้ โดยใช้สมการ

$$gbest = F(\vec{p}_i(t)) \quad (3.14)$$

$$\vec{p}_{best} = \vec{p}_i(t) \quad (3.15)$$

ถ้าค่าความเหมาะสมของอนุภาค  $p_i$  มีค่าดีกว่าค่าความเหมาะสมของอนุภาคนั้น ๆ ซึ่งเรียกว่า  $pbest_i$  กล่าวคือ ถ้า  $F(\vec{p}_i(t)) < pbest_i$  ให้ทำการบันทึกค่าความเหมาะสมของระบบและเวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาคนั้นไว้ใน  $pbest_i$  โดยใช้สมการ

$$pbest = F(\vec{p}_i(t)) \quad (3.16)$$

$$\vec{p}_{best} = \vec{p}_i(t) \quad (3.17)$$

3. ทำการปรับความเร็วของอนุภาค  $p_i$

$$\vec{v}_i(t) = \vec{v}_i(t-1) + \rho_p [\vec{p}_{pbest_i} - \vec{p}_i(t)] + \rho_g [\vec{p}_{gbest_i} - \vec{p}_i(t)] \quad (3.18)$$

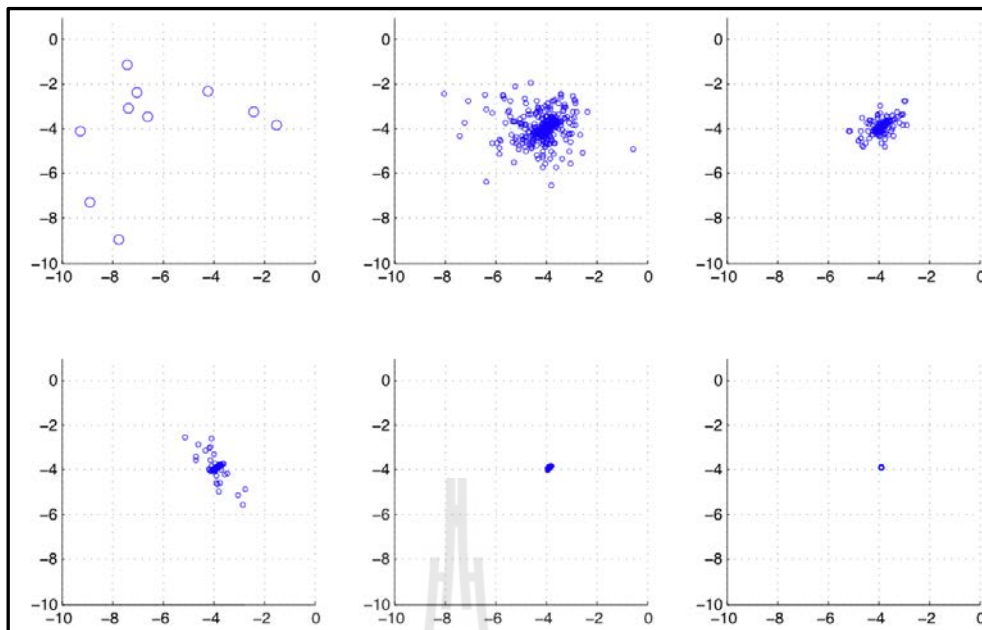
โดยที่  $\rho_p$  และ  $\rho_g$  เป็นตัวแปรสุ่ม เทอมที่สองของสมการข้างต้นเรียกว่าองค์ประกอบเชิงปริชาณ (cognitive component) และเทอมสุดท้ายเรียกว่าองค์ประกอบทางสังคม (social component)

4. ทำการปรับค่าเวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาค  $p_i$

$$\vec{p}_i(t) = \vec{p}_i(t-1) + \vec{v}_i(t) \quad (3.19)$$

5. ทำการปรับค่าตัวแปรเวลา  $t=t+1$  และดำเนินขั้นตอนทั้งหมดกับอนุภาคถัดไปในกลุ่มประชากร จนครบทุกอนุภาค

6. วนรอบการทำงานทั้งหมดจนกระทั่งมีการเข้าสู่ค่าตอบของอนุภาคที่ดีที่สุดในกลุ่มหรือตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ โดยรูปแบบการค้นหาและลักษณะการเข้าสู่ค่าตอบที่ดีที่สุดแสดงไว้ในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ลักษณะการค้นหาคำตอบของ PSO

โดยทั่วไปจะทำการกำหนดรอบในการค้นหาไว้ หรือกำหนดเงื่อนไขในการสิ้นสุดการค้นหา เมื่อได้ค่า  $gbest$  ที่บรรลุวัตถุประสงค์ แต่ละองค์ประกอบของเวกเตอร์อนุภาคที่ได้คือตัวแปรของปัญหาที่ต้องการค้นหานั้นเอง องค์ประกอบเชิงปริมาตรแทนประสิทธิภาพการค้นหาของแต่ละอนุภาค ในขณะที่องค์ประกอบเชิงสังคมนั้นแทนประสิทธิภาพการค้นหาของกลุ่มอนุภาค ถ้าเราไม่พิจารณาองค์ประกอบเชิงสังคมนั้นในการปรับค่าเวกเตอร์ความเร็ว อัลกอริทึมนั้นจะถูกระบุว่าเป็นแบบเฉพาะที่ (local best) ค่าของ  $\rho_p$  เป็นพารามิเตอร์ที่มีค่าสุ่มและกำหนดขนาดโดยผู้ใช้พารามิเตอร์ดังกล่าวใช้จำกัดขนาดเส้นทางเดินของอนุภาคออกจากตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด ค่า  $\rho_p$  ที่มากจะทำให้เส้นทางเดินของอนุภาคมีการกวัดแกว่ง (oscillate) ในขณะที่ค่า  $\rho_p$  มีค่าน้อยจะทำให้เส้นทางเดินมีความเรียบ (smooth) ในทำนองเดียวกัน ค่า  $\rho_g$  เป็นพารามิเตอร์ที่จำกัดเส้นทางเดินของกลุ่มอนุภาค ทั้งค่า  $\rho_p$  และ  $\rho_g$  จะถูกกำหนดเป็น  $\rho_p = r_p c_p$  และ  $\rho_g = r_g c_g$  โดยที่  $r_p, r_g \in (0,1)$   $c_p$  และ  $c_g$  เป็นค่าคงที่ความเร่ง (acceleration constant) โดยมีค่าเป็นบวกทั้งคู่

### 3.4.3 พารามิเตอร์ของ PSO (PSO Parameters)

ในหัวข้อนี้ จะกล่าวถึงพารามิเตอร์หลักที่มีผลต่อการค้นหาคำตอบของ PSO ซึ่งได้แก่ ค่าคงที่ความเร่ง ( $c_p$  และ  $c_g$ ) ค่าช่วงเวลาระหว่างรอบ และจำนวนอนุภาคในกลุ่มการเคลื่อนที่ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. ค่าคงที่ความเร่ง (acceleration constant) ใช้กำหนดการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคในกลุ่ม โดย  $c_p$  จะมีอิทธิพลต่อ  $pbest$  ของอนุภาคนั้น ๆ ในขณะที่  $c_g$  จะมีอิทธิพลต่อ  $gbest$  ถ้า  $c_g > c_p$  จะส่งผลให้อนุภาคเคลื่อนที่รอบ ๆ คำตอบที่ดีที่สุด (global) และถ้า  $c_p > c_g$  แต่ละอนุภาคจะเคลื่อนที่รอบ ๆ คำตอบที่ดีที่สุดเฉพาะถิ่น (local) ของอนุภาคนั้น ๆ กล่าวคืออนุภาคจะเคลื่อนที่อย่างเป็นอิสระต่อกัน

2. ค่าช่วงเวลาระหว่างรอบ (time interval) เป็นการกำหนดระยะเวลาห่างของเวลาที่มีการเคลื่อนที่ของอนุภาคจะได้รับการปรับหรือเปลี่ยนแปลง ค่าช่วงเวลาน้อยจะทำให้การเคลื่อนที่มีความละเอียดขึ้น เวลาที่ใช้ในการคำนวณจะมากขึ้น และค่าช่วงเวลาที่มากจะทำให้การเคลื่อนที่มีขนาดมากขึ้น เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่จะน้อยลง

3. จำนวนของอนุภาคภายในกลุ่ม เป็นปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมการค้นหาของระบบ โดยตรง จำนวนอนุภาคที่มากจะทำให้ระบบครอบคลุมปริภูมิการค้นหาที่กว้างกว่า อย่างไรก็ดี เมื่อจำนวนอนุภาคมาก เวลาที่ใช้ในการค้นหาก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่จะเพิ่มโอกาสในการค้นพบคำตอบที่ดีที่สุดในช่วงกว้าง (global)

ค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ขึ้นอยู่กับชนิดของปัญหา ดังนั้นการใช้งาน PSO จะต้องมีการปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เหล่านี้ ให้เหมาะสมกับปัญหาแต่ละแบบ

## บทที่ 4

### การฝังลายน้ำและการตรวจจับลายน้ำ

#### 4.1 บทนำ

ในบทนี้กล่าวถึงระเบียบวิธีการทั้งหมดที่เกี่ยวกับกระบวนการฝังลายน้ำ การตรวจจับลายน้ำ และการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของ PSO ซึ่งในหัวข้อที่ 4.2 กล่าวถึงการฝังลายน้ำโดยประกอบด้วยกระบวนการเตรียมสัญญาณลายน้ำ การฝังลายน้ำในโดเมนเวฟเลต และการประยุกต์นำ PSO มาใช้ในกระบวนการหาค่าความเข้มของลายน้ำ เพื่อความทนทานต่อการโจมตี และการประมวลผลสัญญาณ ในหัวข้อที่ 4.3 กล่าวถึงกระบวนการตรวจจับลายน้ำ และในหัวข้อที่ 4.4 กล่าวถึงการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของ PSO โดยกล่าวถึงลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบที่ดีที่สุด เมื่อพารามิเตอร์มีการเปลี่ยนแปลง

#### 4.2 การฝังลายน้ำ

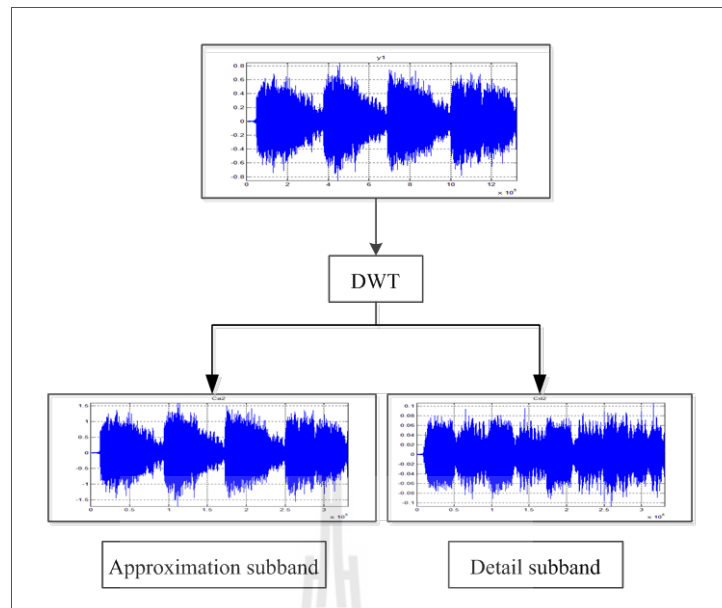
ในส่วนของกระบวนการฝังลายน้ำถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ การเตรียมข้อมูลสัญญาณเสียงและสัญญาณลายน้ำ และขั้นตอนการฝังลายน้ำในโดเมนเวฟเลต โดยกำหนดพารามิเตอร์ทั้งหมด ดังนี้

1. ใช้การแปลงเวฟเลตแบบ Daubechies1 ในระดับที่ 10
2. PSO มีจำนวนพาร์ติเคิลทั้งหมด 10 พาร์ติเคิล และมีจำนวนรอบการค้นหา 100 รอบ
3. กำหนดให้พารามิเตอร์ความเร่งของ PSO  $c_p = 1.2$   $c_g = 1.2$

##### 4.2.1 การเตรียมข้อมูลสัญญาณเสียงและสัญญาณลายน้ำ

ในงานวิจัยนี้สัญญาณเสียงที่นำมาทำการทดสอบเป็นสัญญาณเสียงแบบ mono นามสกุล WAV มี Sampling rate 44.1 kHz 16 bit และมีความยาว 30 วินาที ซึ่งสัญญาณเสียงนี้จะถูกนำมาทำการแปลงเวฟเลตแบบเต็มหน่วย เพื่อเป็นการเตรียมชุดข้อมูลของสัมประสิทธิ์เวฟเลตที่ใช้ในกระบวนการฝังลายน้ำ และรูปภาพดิจิทัลที่ถูกใช้เป็นสัญญาณลายน้ำในงานวิจัยเป็นรูปภาพขาวดำ ขนาด 25x25 พิกเซล





รูปที่ 4.1 ลักษณะของสัญญาณที่ได้จากการแปลงเวฟเลต

ในรูปที่ 4.1 เป็นลักษณะของโครงสร้างสัญญาณเสียงที่ผ่านการแปลงเวฟเลตแบบเต็มหน่วย โดยสัญญาณถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน คือส่วนที่มีความถี่สูง (Detail) และส่วนที่มีความถี่ต่ำ (Approximation)



รูปที่ 4.2 รูปภาพลายน้ำ

ในรูปที่ 4.2 คือรูปภาพลายน้ำที่นำมาใช้ในงานวิจัย โดยเป็นรูปภาพขาวดำ ขนาด 25x25 พิกเซล

#### 4.2.2 การฝังลายน้ำในโดเมนเวฟเล็ต

1. สัญญาณลายน้ำเป็นรูปภาพขาวดำขนาด  $m \times n$  พิกเซล จะถูกจัดรูปแบบใหม่ให้อยู่ในรูปของเมตริกแบบหนึ่งมิติและจัดรูปของข้อมูลเพื่อให้สะดวกและง่ายต่อกระบวนการฝังลายน้ำโดยใช้สมการ

$$w_1 = \{w_1(x, y) \mid 0 \leq x < m, 0 \leq y < n\} \quad (4.1)$$

สมการข้างต้นนี้คือสัญญาณลายน้ำ  $w_1$  ที่มีขนาด  $m \times n$  โดยจะถูกนำมาแปลงให้อยู่ในรูปที่สะดวกต่อกระบวนการฝังลายน้ำ โดยใช้สมการ

$$w_2 = \{w_2(k) = w_1(x, y) \mid 0 \leq x < m, 0 \leq y < n\} \quad (4.2)$$

โดยที่  $k = x \times n + y$

$w_2(k)$  คือ สัญญาณลายน้ำในรูปหนึ่งมิติ ซึ่ง  $w_2(k) \in \{0, 1\}$

ในอัลกอริทึมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ค่าของสัมประสิทธิ์ลายน้ำจะถูกแปลงเพื่อให้ง่ายต่อการฝังและการตรวจจับโดยใช้สมการ

$$w = \{w(k) = 1 - 2w_2(k)\} \quad (4.3)$$

โดยที่  $k = 0, 1, 2, \dots, m \times n - 1$  และ

$w(k)$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในกระบวนการฝังลายน้ำ ซึ่ง  $w(k) \in \{-1, 1\}$

หรือเงื่อนไข

ถ้า  $w_2(k) = 1$  กำหนดให้  $w(k) = -1$

และ ถ้า  $w_2(k) = 0$  กำหนดให้  $w(k) = 1$

2. สัญญาณเสียงดิจิทัลจะถูกแบ่งออกเป็น  $k$  ส่วน แทนด้วยตัวแปร  $Y_k(i)$  โดยที่  $k=m \times n$  และทำการแปลงเวฟเลตแบบเต็มหน่วยในระดับที่ 10 ในทุกส่วนของชุดข้อมูล โดยเลือกใช้ฟังก์ชันเวฟเลตแม่แบบ Daubechies1 เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์เวฟเลตในระดับที่ 10 แบบ Daubechies1 ให้ความทนทานต่อการโจมตีในรูปแบบของ Time scale modification และสเปกตรัมความถี่ของสัญญาณมีค่าที่ต่ำมาก ซึ่งในกระบวนการฝังลายน้ำสัมประสิทธิ์ที่ถูกนำมาใช้ในกระบวนการอยู่ในส่วนของ Detail subband ( $cD_k^{10}(i)$ )
3. ทำการหาค่าเฉลี่ยแต่ละส่วนของ  $cD_k^{10}(i)$  แทนด้วยตัวแปร  $cD_k^{10\_mean}$  ในงานวิจัยนี้ค่าสัมประสิทธิ์ของ  $cD_k^{10}(i)$  ในแต่ละส่วนจะถูกทำให้มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์เพื่อใช้ในกระบวนการฝังลายน้ำ โดยทำการนำค่าเฉลี่ยของแต่ละส่วนมาลบออกจากข้อมูลในส่วนนั้น ๆ โดยใช้สมการ

$$cD_k^{10\_emb}(i) = cD_k^{10}(i) - cD_k^{10\_mean} \quad (4.4)$$

ซึ่ง  $cD_k^{10\_emb}(i)$  นี้มีค่าเฉลี่ยในแต่ละส่วนเป็นศูนย์

4. ทำการฝังลายน้ำในค่าสัมประสิทธิ์ในแต่ละส่วน โดยใช้สมการในการฝังลายน้ำคือ

$$cD_k^{10\_final}(i) = cD_k^{10\_emb}(i) + \alpha w(k) \quad (4.5)$$

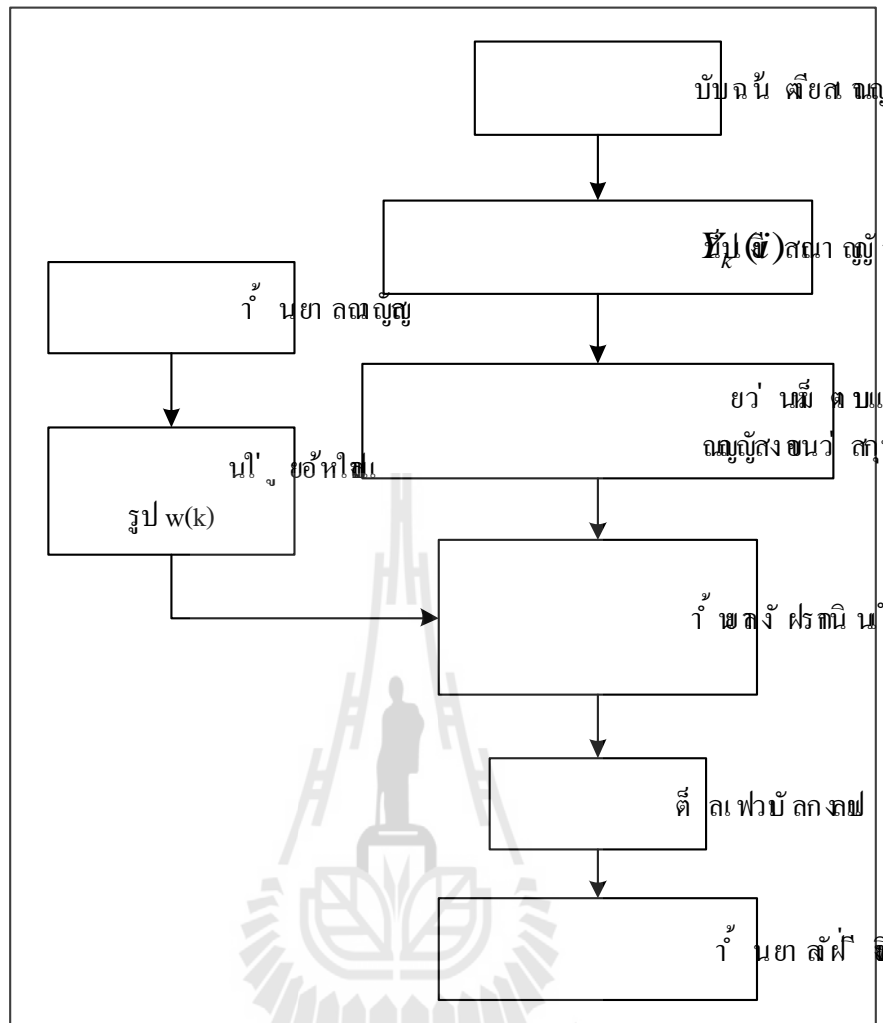
โดยที่  $k=0,1,2,\dots,m \times n - 1$   
 $i=0,1,2,\dots,N$   
 $N$  เป็นตัวเลขจำนวนเต็มบวก

เมื่อกำหนดให้  $\alpha$  คือค่าความเข้มของลายน้ำซึ่งจะถูกค้นหาโดย PSO โดยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ PSO นั้นใช้ค่า SNR เพื่อวัดคุณภาพของสัญญาณเสียง และค่า Sim ที่ใช้ในการวัดคุณภาพของสัญญาณลายน้ำที่ตรวจจับได้กับลายน้ำต้นฉบับ เป็นค่า *fitness value* โดยหลักการทำงานของ PSO นั้นจะเริ่มจากการสุ่มค่าตำแหน่งของพาร์ติเคิลแต่ละตัว ซึ่งเป็นการดำเนินงานแบบวนรอบค้นหา เพื่อให้ได้ค่าความ

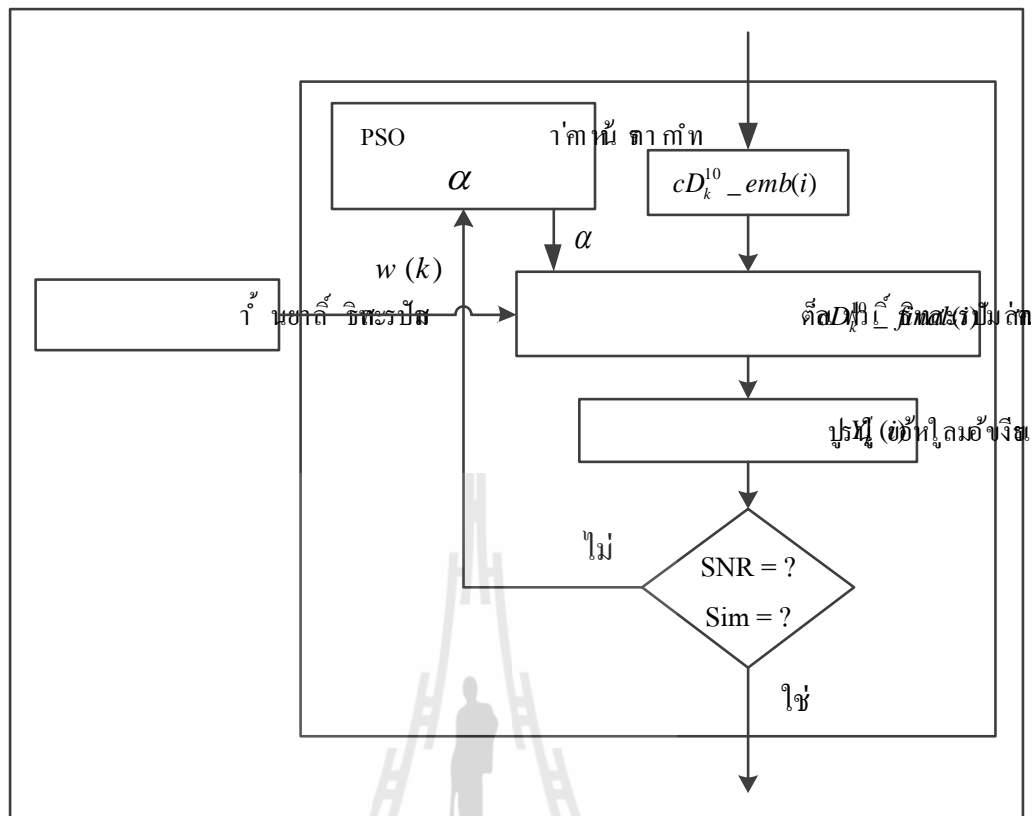
เหมาะสมที่สุดของกลุ่มในแต่ละรอบ พาร์ทิเคิลแต่ละตัวจะเปลี่ยนตำแหน่งของตัวเอง เพื่อเคลื่อนที่ไปเข้าใกล้ตำแหน่งที่ดีที่สุดเพิ่มมากขึ้น โดย PSO จะหยุดทำการค้นหาเมื่อครบจำนวนรอบที่กำหนดไว้ หรืออยู่ในเงื่อนไขที่กำหนดไว้ในฟังก์ชันวัตถุประสงค์

5. ทำซ้ำในกระบวนการที่ 4 จนฟังลายน้ำครบทุกบิต จากนั้นทำการนำค่าสัมประสิทธิ์  $cD_k^{10} - final(i)$  ที่ทำการฟังลายน้ำเรียบร้อยแล้ว ทำการจัดเรียงให้อยู่ในรูปสัญญาณก่อนจะทำการฟังลายน้ำหรือในรูปของสัญญาณต้นฉบับ โดยกำหนดให้เป็น  $Y_k'(i)$  และทำการแปลงกลับเวฟเลตแบบเต็มหน่วย (IDWT) เพื่อให้ได้สัญญาณเสียงที่ทำการฟังลายน้ำแล้วในโดเมนเวลา ซึ่งในรูปที่ 4.3 เป็นแผนภาพแสดงโครงสร้างหลักของกระบวนการฟังลายน้ำที่ใช้ในวิทยานิพนธ์





รูปที่ 4.3 แผนผังแสดงขั้นตอนการฟ้งลายน้ำทั้งหมด



รูปที่ 4.4 กระบวนการฝังลายน้ำโดยใช้ PSO

จากรูปที่ 4.4 แสดงกระบวนการในขั้นตอนที่ 4) โดยกระบวนการค้นหาค่าความเข้มของลายน้ำค่า SNR ของสัญญาณเสียงที่ทำการฝังลายน้ำแล้ว และ Sim จากสัญญาณลายน้ำที่ทำการตรวจจับได้จะถูกใช้เป็น *fitness function* ในการค้นหาของ PSO และในกระบวนการฝังลายน้ำค่าความเข้มของลายน้ำ ( $\alpha$ ) ที่เหมาะสมนั้นจะให้คุณภาพเสียงที่อยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด และสัญญาณลายน้ำที่ได้จะมีความทนทานต่อการโจมตีตามเงื่อนไข และข้อตกลงของวิทยานิพนธ์

### 4.2.3 การค้นหาค่าความเข้มของลายน้ำด้วย PSO

ในกระบวนการฝังลายน้ำนั้น ความทนทานต่อการโจมตีในการประมวลผลสัญญาณ และคุณภาพของสัญญาณเสียงจะถูกนำมาใช้เป็นเกณฑ์ของ *fitness function* ในกระบวนการค้นหา ซึ่งทั้งสองค่านี้จะถูกแทนด้วยตัวแปร Sim และ SNR ตามลำดับ ซึ่งสัญญาณเสียงที่ทำการฝังลายน้ำโดยใช้ค่าความเข้มของลายน้ำที่ค้นหาโดย PSO จะต้องอยู่ในเกณฑ์ที่ได้กำหนดไว้ในขอบเขตของงานวิจัย

จากที่กล่าวมาข้างต้นค่า SNR คือค่าที่ใช้วัดสัญญาณรบกวนของสัญญาณเสียงที่ทำการฝังลายน้ำกับสัญญาณเสียงต้นฉบับ หากเรามองการฝังลายน้ำเป็นการเพิ่มสัญญาณรบกวนชนิดหนึ่งของสัญญาณ ค่า SNR ที่คำนวณได้ใช้เพื่อระบุว่าสัญญาณที่กำลังวิเคราะห์มีค่าการรบกวนอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานหรือไม่ โดยจาก International Federation of Phonographic Industry (IFPI) ได้กำหนดคุณภาพของสัญญาณเสียงต่อสัญญาณรบกวนไว้ที่มากกว่าหรือเท่ากับ 20 dB โดยสมการที่ใช้คำนวณคือ

$$SNR = 10 \log \frac{\sum_i S_o^2(i)}{\sum_i [S_o(i) - S_w(i)]^2} \quad (4.6)$$

โดยกำหนดให้

$S_o$  คือ สัญญาณเสียงต้นฉบับ

$S_w$  คือ สัญญาณเสียงที่ฝังลายน้ำแล้ว

$i$  คือ ค่าเป็นเลขจำนวนเต็ม ตั้งแต่ 1,2,...,N

N คือ ความยาวของสัญญาณเสียง

ตามหลักแล้วเมื่อค่าความเข้มของลายน้ำ ( $\alpha$ ) มีค่าเพิ่มขึ้น สัญญาณเสียงที่ได้นั้นจะมีความผิดเพี้ยนไปมากจนอาจสามารถรู้สึกได้จากการฟังซึ่งเป็นเรื่องที่ไม่พึงประสงค์ในการฝังลายน้ำ แต่สัญญาณลายน้ำที่ได้จะมีความทนทานต่อการโจมตี และการประมวลผลสัญญาณ ในกรณีตรงข้ามกัน ถ้าค่าความเข้มของลายน้ำ มีค่าที่น้อยเกินไปสัญญาณเสียงที่ได้จะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยหรือมีคุณภาพที่ดี แต่ลายน้ำที่ได้จะไม่มีความทนทานต่อการโจมตี และการประมวลผลสัญญาณ ในวิทยานิพนธ์นี้ ค่า SNR จะถูกกำหนดไว้ที่ 21 dB เพื่อผลของความทนทานต่อการโจมตีที่สูงที่สุดที่ได้จากอัลกอริทึม โดยค่า SNR อยู่ในข้อกำหนดมาตรฐานของ IFPI และในส่วนของค่า Sim นั้นคือ

ค่าที่ได้จากการทำสหสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณลายน้ำที่ตรวจจับได้กับสัญญาณลายน้ำต้นฉบับและมีค่าสูงสุดเท่ากับหนึ่ง ( $\max(Sim) = 1$ ) ซึ่งจะถูกใช้เป็นส่วนหนึ่งของ *fitness function* ในการค้นหาของ PSO เช่นเดียวกับค่า SNR โดยในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการกำหนดค่า Sim ที่ได้จากการทดสอบความทนทานต่อการโจมตีของลายน้ำนั้นมากกว่าหรือเท่ากับ 0.9 โดยกำหนดการโจมตีในรูปแบบต่างๆ ดังนี้

- 1) Random noise ที่กำลังงาน 1% ของสัญญาณเสียง
- 2) Low pass filter ที่ cutoff frequency 6 kHz, 15 kHz
- 3) White Gaussian noise ที่กำลังงาน 1%
- 4) Down sampling , 44.1kHz – 22.05 kHz – 44.1 kHz
- 5) Crop ที่อัตราต่าง ๆ
  - Jitter
  - 5x100
  - 10x100
  - 10x500
  - 10x1000
- 6) การบีบอัดข้อมูลแบบมีการสูญเสีย, MP3 ที่ 64 kbps, 128 kbps
- 7) การบีบอัดข้อมูลแบบไม่มีการสูญเสีย, FLAC
- 8) การกำจัดสัญญาณรบกวนด้วยการแปลงเวฟเล็ต
- 9) Time scale modification
- 10) DA/AD conversation

โดยในการคำนวณค่า Sim สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการ

$$Sim = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n W(i, j)W^*(i, j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n W(i, j)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n W^*(i, j)^2}} \quad (4.7)$$

โดยกำหนดให้

$W(i, j)$  คือภาพลายน้ำต้นฉบับที่มีขนาด  $m \times n$

$W^*(i, j)$  คือภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้ที่มีขนาด  $m \times n$



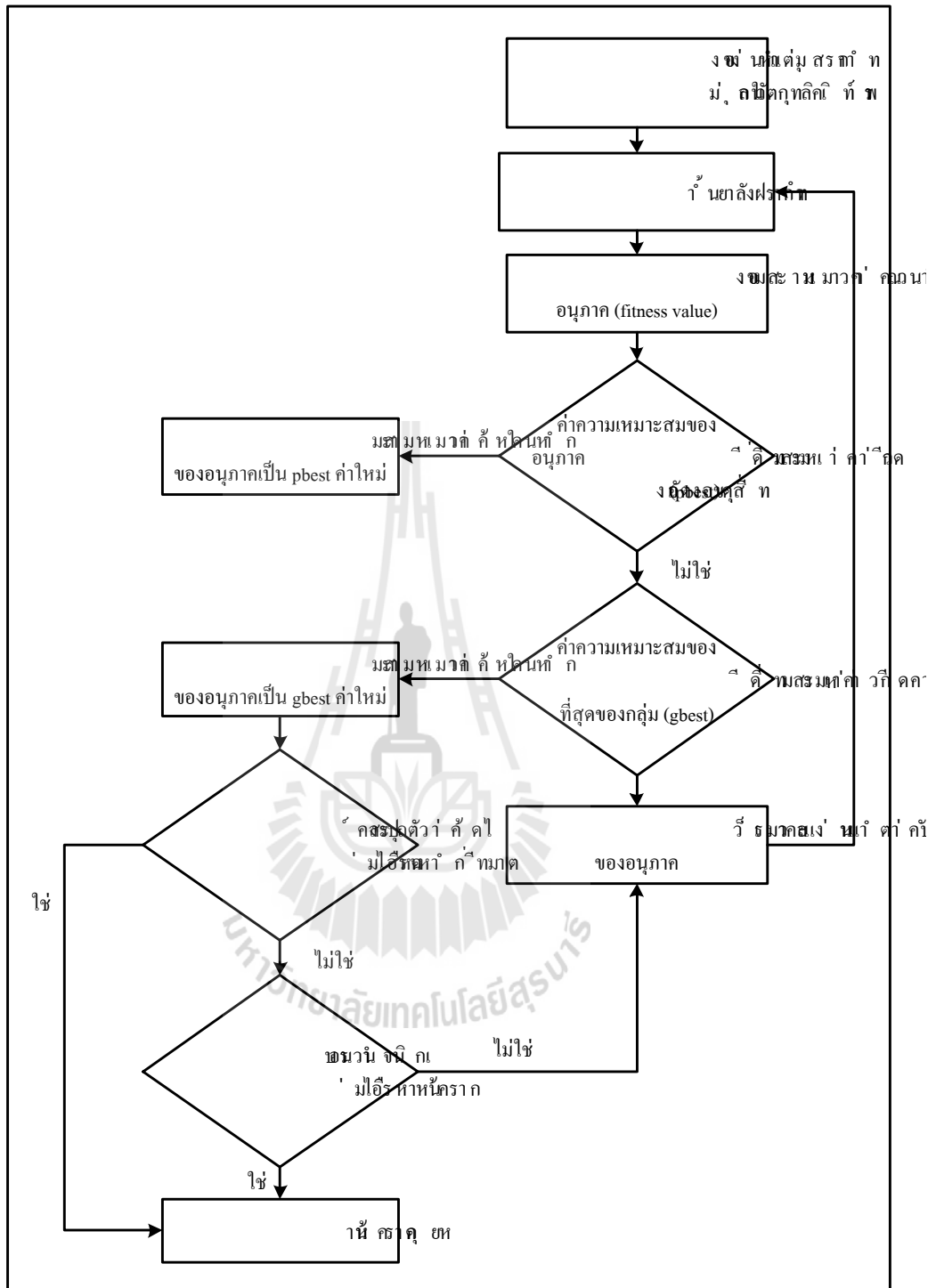
โดยหาค่าสหสัมพันธ์มีค่าเท่ากับหนึ่ง ( $Sim=1$ ) บ่งชี้ว่าลายน้ำที่ตรวจจับได้นั้นเป็นลายน้ำที่สมบูรณ์เหมือนกับลายน้ำต้นฉบับทุกประการ เนื่องจากค่า  $Sim$  และ  $SNR$  ทั้งสองค่าเป็นตัวบ่งชี้คุณภาพของสัญญาณลายน้ำและสัญญาณเสียงซึ่งทั้งสองค่านี้จะมีความขัดแย้งกัน การกำหนด *fitness function* ที่เหมาะสมจะทำให้ PSO มีความน่าเชื่อถือมากขึ้น โดยในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ *fitness function* ตามสมการที่ 4.8

$$fitness\ functions = \beta_1 |(SNR - 21)| + \beta_2 \left| \sum_{i=1}^n (1 - Sim_i) \right| \quad (4.8)$$

โดยกำหนดให้

$SNR$  คือค่าสัญญาณรบกวนของสัญญาณเสียงที่ทำการฝังลายน้ำกับสัญญาณเสียงต้นฉบับ  
 $Sim$  คือค่าการสหสัมพันธ์ระหว่างลายน้ำที่ตรวจจับได้กับลายน้ำต้นฉบับ

ในสมการที่ 4.8 ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณจะถูกเรียกว่าค่าความเหมาะสม หรือ *fitness value* ซึ่งใช้เป็นข้อกำหนดในการตัดสินใจของ PSO ในการเดินทางเข้าหาคำตอบ โดยมีค่า  $\beta_1$  และ  $\beta_2$  เป็นตัวประกอบถ่วงน้ำหนักเพื่อกำหนดความสำคัญของแต่ละตัวแปร ซึ่งค่าตัวประกอบถ่วงน้ำหนักทั้งสองค่านี้มีผลรวมเท่ากับหนึ่ง โดยเริ่มจาก PSO ทำการสุ่มตำแหน่งของอนุภาคทุกตัวในกลุ่ม และคำนวณค่าความเหมาะสมของตัวเอง เพื่อหาค่าความเหมาะสมที่สุดของกลุ่ม แล้วทำการปรับความเร็ว และตำแหน่งของตัวเองเพื่อหาค่าความเหมาะสมที่ดีกว่าเดิม หรือตำแหน่งที่ดีกว่าเดิม ในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดหลักการทำงานของ PSO คือ PSO ทำการคำนวณหาค่า *fitness value* ที่น้อยที่สุดเพื่อให้ลายน้ำที่ได้มีความทนทานต่อการโจมตีสูงที่สุดจากผลของอัลกอริทึมที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ และสัญญาณเสียงที่ทำการฝังลายน้ำแล้วมีคุณภาพที่ดีตามที่มาตรฐานกำหนด และเงื่อนไขในการหยุดการทำงานของ PSO คือ เมื่อค่า *fitness value* < 0.01 หรือเมื่อครบจำนวนรอบการค้นหาที่กำหนด รูปที่ 4.5 ใช้อธิบายกระบวนการวนรอบค้นหาและการเช็คเงื่อนไขของ PSO



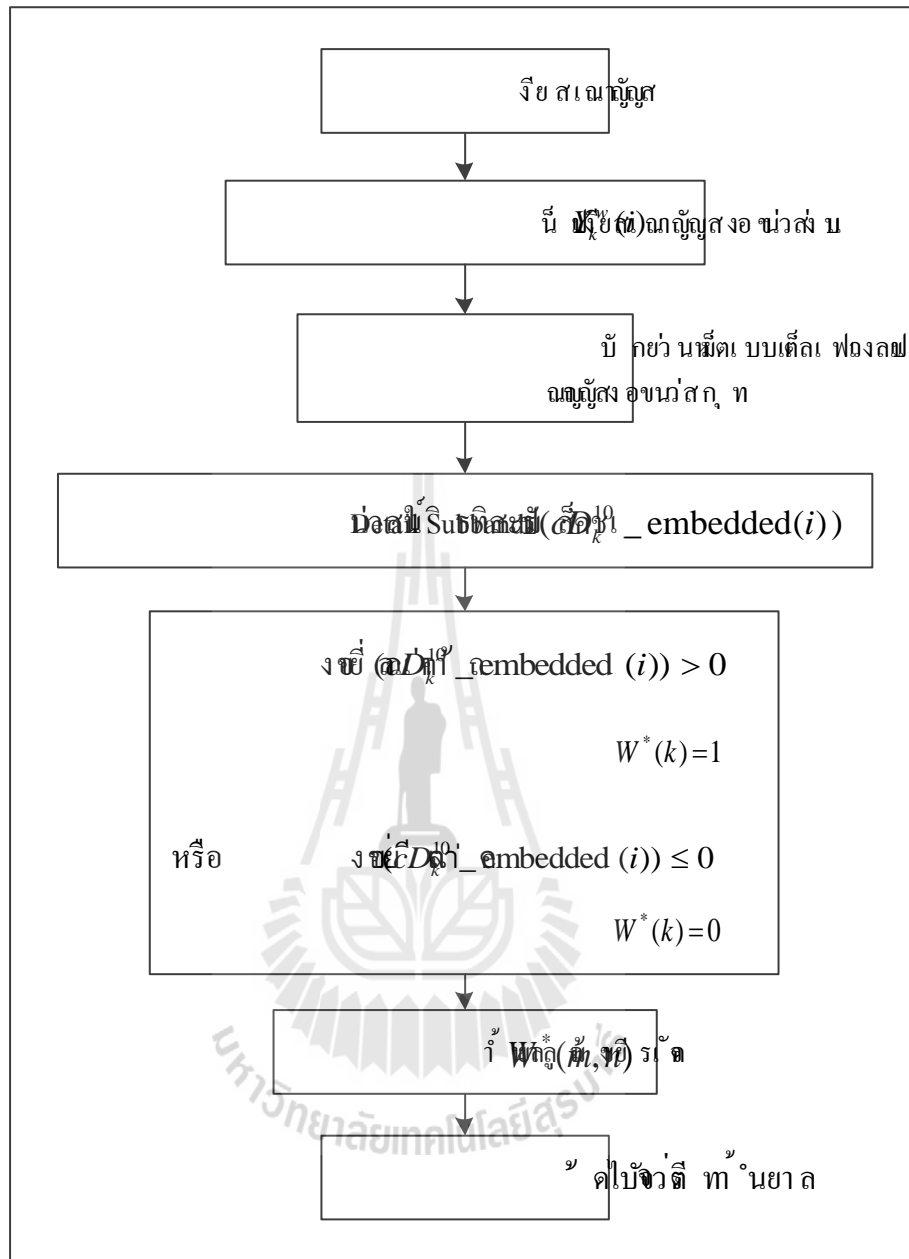
รูปที่ 4.5 ลักษณะการตรวจสอบเงื่อนไขในการทำงานของ PSO

### 4.3 การตรวจจับลายน้ำ

เพื่อความปลอดภัยของข้อมูล และความสะดวกในการทำงานของอัลกอริทึม กระบวนการตรวจจับลายน้ำถูกออกแบบให้ไม่ต้องใช้สัญญาณเสียงต้นฉบับช่วยในกระบวนการ โดยมีรายละเอียดของกระบวนการดังนี้

1. นำสัญญาณเสียงที่จะทำการตรวจจับลายน้ำมาทำการแบ่งออกเป็น  $k$  ส่วนเหมือนกับกระบวนการฝังลายน้ำแทนด้วยตัวแปร  $Y_k^n(i)$
2. ทำการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยกับชุดข้อมูลที่ได้ทำการแบ่งจากกระบวนการที่ 1. แทนด้วยตัวแปร  $cD_k^{10\_embedded}(i)$
3. ทำการคำนวณค่าเฉลี่ยในแต่ละส่วนของชุดข้อมูล  $cD_k^{10\_embedded}(i)$  และใช้เงื่อนไขในการตรวจจับคือ ถ้าค่าเฉลี่ยของชุดข้อมูลมีค่ามากกว่าศูนย์ กำหนดให้บิตของลายน้ำที่ตรวจจับได้มีค่าเป็น '1' และถ้าค่าเฉลี่ยของชุดข้อมูลมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับศูนย์ กำหนดให้บิตของลายน้ำที่ตรวจจับได้มีค่าเป็น '0'
4. ทำซ้ำในกระบวนการที่ 3. จนครบทุก  $k$  บิตของลายน้ำ  $W^*(k)$  แล้วทำการจัดเรียงเมทริกของบิตลายน้ำให้อยู่ในรูปเมทริกที่มีขนาด  $m \times n$  สุดท้ายจะได้รูปภาพลายน้ำ  $W^*(m,n)$  ที่เป็นภาพขาวดำเพื่อแสดงผลที่ได้จากการตรวจจับ





รูปที่ 4.6 แผนผังแสดงกระบวนการตรวจจับลายน้ำ

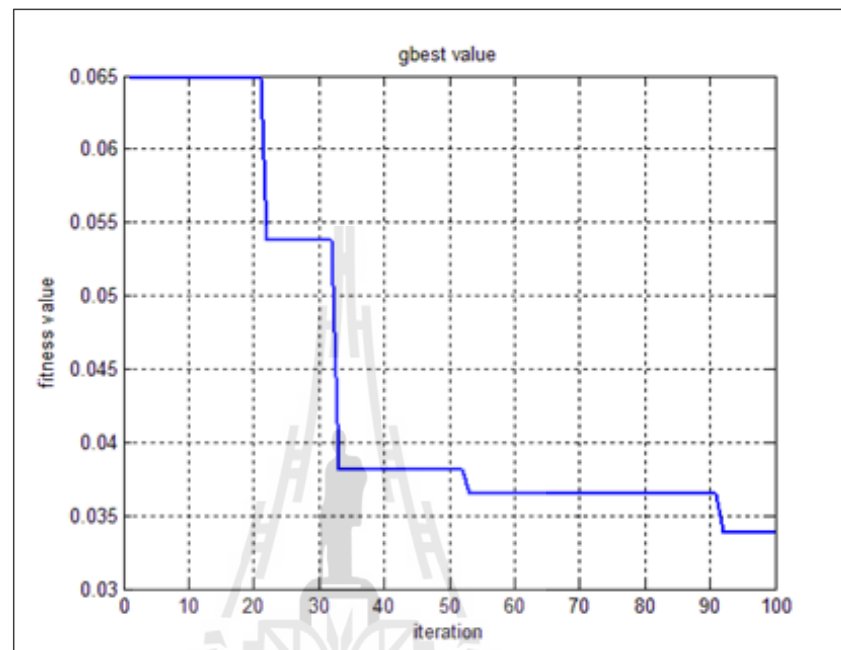
#### 4.4 วิเคราะห์พารามิเตอร์ของ PSO

บทนำ โดยทั่วไปพารามิเตอร์ของ PSO นั้นมีความสัมพันธ์กับลักษณะทางเดินเข้าหาคำตอบของ PSO เช่น ค่าถ่วงน้ำหนักความเร็วซึ่งเป็นพารามิเตอร์จำกัดความเร็วในการเคลื่อนที่ของ PSO เพื่อให้ทางเดินเข้าหาคำตอบของ PSO นั้นมีความละเอียดและไม่ให้เดินข้ามคำตอบที่ดีที่สุด พารามิเตอร์ค่าเวลาระหว่างรอบ (Time interval) เป็นการกำหนดระยะห่างระหว่างเวลาที่มีการเคลื่อนที่ของอนุภาคจะได้รับการปรับเปลี่ยน ซึ่งหากค่าพารามิเตอร์นี้มีค่าน้อยจะทำให้การเคลื่อนที่มีความละเอียด แต่จะใช้เวลาในการทำงานที่นาน เช่นเดียวกันหากค่าพารามิเตอร์นี้มีค่ามาก การเคลื่อนที่จะมีขนาดที่มากขึ้นเวลาการทำงานก็จะน้อย โดยปกติแล้วช่วงเวลาของโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะมีลักษณะเป็นดิสคริตเป็นลำดับ 1,2,3,.. กล่าวคือ ค่าเวลาระหว่างรอบเท่ากับ '1' ซึ่งปกติแล้วไม่มีผลกับการทำงานของ PSO พารามิเตอร์ค่าคงที่ความเร็ว  $c_p$  และ  $c_g$  มีผลกระทบต่อ การลู่เข้าหาคำตอบของ PSO โดย หากค่า  $c_g > c_p$  จะส่งผลให้อนุภาคเคลื่อนที่รอบ ๆ คำตอบที่ดีที่สุด (global) และหากค่า  $c_p > c_g$  แต่ละอนุภาคจะเคลื่อนที่รอบ ๆ คำตอบที่ดีที่สุดเฉพาะถิ่น (local) ของอนุภาคนั้น ๆ จำนวนของพาร์ทิเคิลเป็นอีกหนึ่งตัวแปรที่มีความสำคัญต่อการทำงานของ PSO ทั้งความเร็วในการค้นหา ลดปัญหาการข้ามคำตอบที่ดีที่สุดแบบวงกว้าง และพารามิเตอร์ค่าถ่วงน้ำหนักของฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะใช้กำหนดความสำคัญของตัวแปรที่จะทำการค้นหาซึ่งจะใช้ระบุความสำคัญให้กับแต่ละตัวแปรในการทำงาน

ในหัวข้อนี้ แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ 4.4.1 นำเสนอการวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากค่าคงที่ความเร็วของ PSO 4.4.2 นำเสนอการวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากจำนวนของพาร์ทิเคิล 4.4.3 นำเสนอการวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากค่าพารามิเตอร์ถ่วงน้ำหนัก เพื่อให้เห็นลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบของ PSO และเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับงานวิจัย โดยกำหนดพารามิเตอร์เบื้องต้นคือ จำนวนอนุภาคทั้งหมด 10 อนุภาค รอบการค้นหา 100 รอบ ปัญหาที่นำมาทำการวิเคราะห์ผลนี้เป็นการทดสอบฟังก์ชันค่าโดยใช้อัลกอริทึมที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงในการลู่เข้าหาคำตอบ โดยใช้ *fitness function* ตามสมการที่ 4.8

#### 4.4.1 การวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากค่าคงที่ความเร่งของ PSO

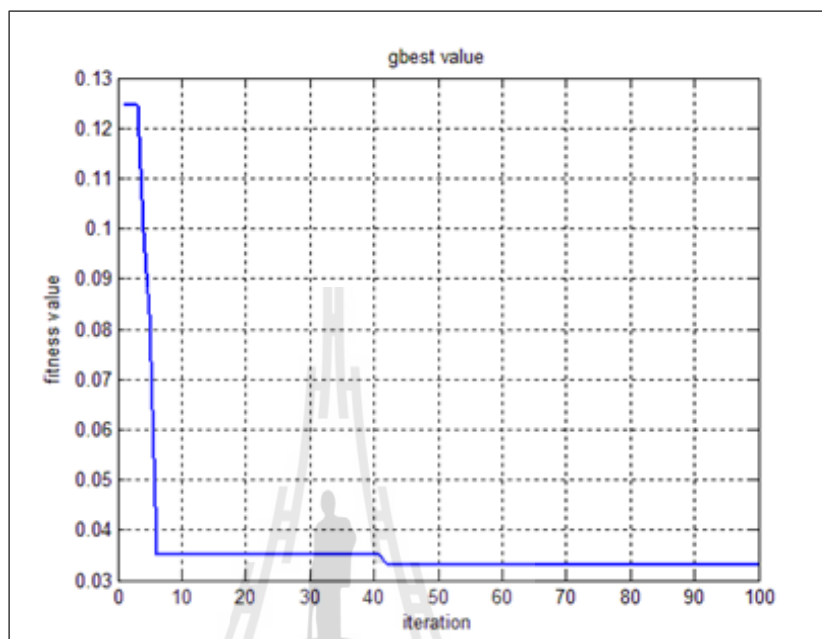
รูปแบบที่ 1 กำหนดให้พารามิเตอร์ของ PSO มีค่า  $c_p = 0.001$   $c_g = 0.001$  มีลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบเมื่อ  $c_p = 0.001$   $c_g = 0.001$

จากรูปที่ 4.7 ค่า *gbest* จะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ 4 ครั้ง เริ่มต้นจาก  $gbest = 0.065$  ลดลงมาจนสุดท้าย  $gbest = 0.0335$  ในการเปลี่ยนแปลงครั้งสุดท้ายที่จำนวนรอบเท่ากับ 92

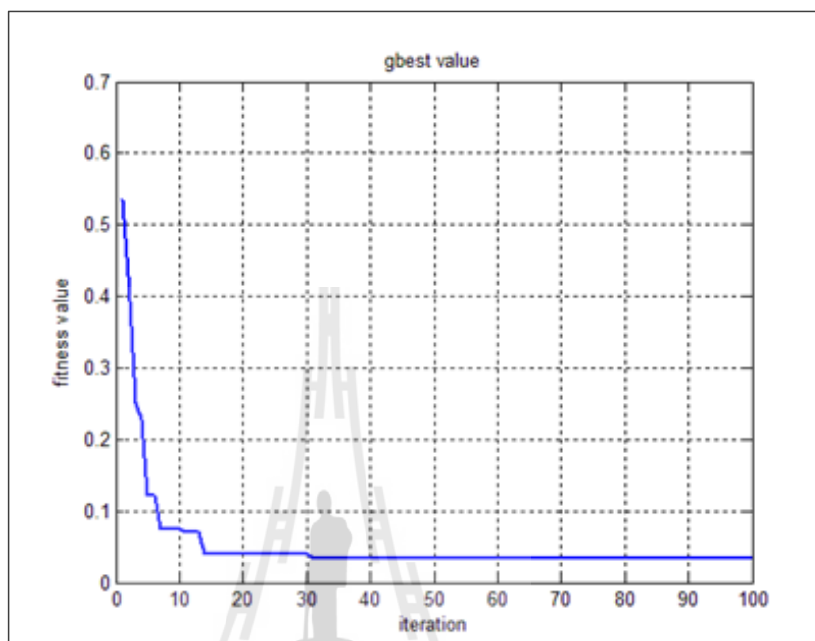
รูปแบบที่ 2 กำหนดให้พารามิเตอร์ของ PSO มีค่า  $c_p = 0.1$   $c_g = 0.1$  มีลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบเมื่อ  $c_p = 0.1$   $c_g = 0.1$

จากรูปที่ 4.8 ค่า *gbest* จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด 2 ครั้ง เริ่มต้นจาก  $gbest = 0.125$  ลดลงมาจนสุดท้าย  $gbest = 0.0330$  ในการเปลี่ยนแปลงครั้งสุดท้ายที่จำนวนรอบเท่ากับ 42

รูปแบบที่ 3 กำหนดให้พารามิเตอร์ของ PSO มีค่า  $c_p = 0.5$   $c_g = 0.5$  มีลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบดังรูปที่ 4.9

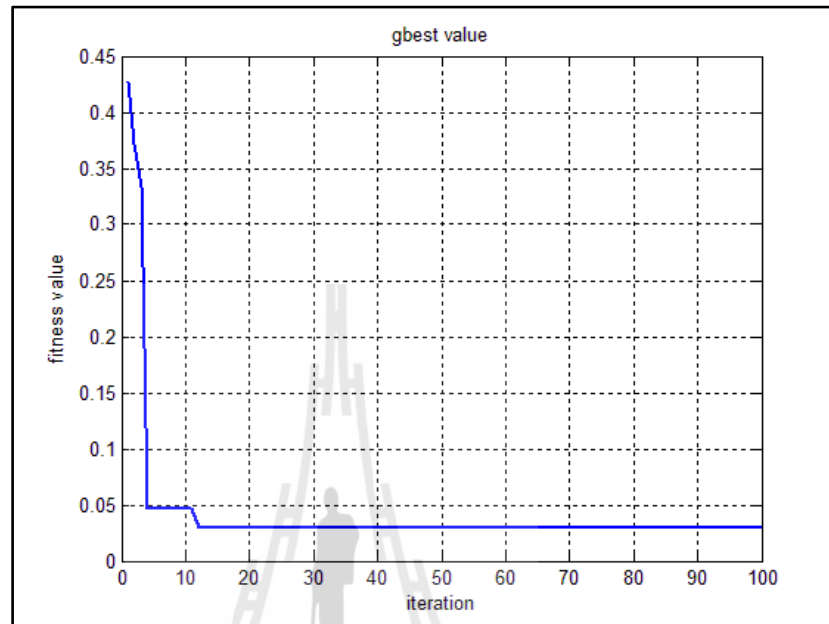


รูปที่ 4.9 ลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบเมื่อ  $c_p = 0.5$   $c_g = 0.5$

จากรูปที่ 4.9 ค่า *gbest* จะมีการเปลี่ยนแปลงแบบเล็กน้อย 4 ครั้ง เริ่มต้นจาก  $gbest = 0.536$  ลดลงมาจนสุดท้าย  $gbest = 0.0334$  ในการเปลี่ยนแปลงครั้งสุดท้ายที่จำนวนรอบเท่ากับ 14



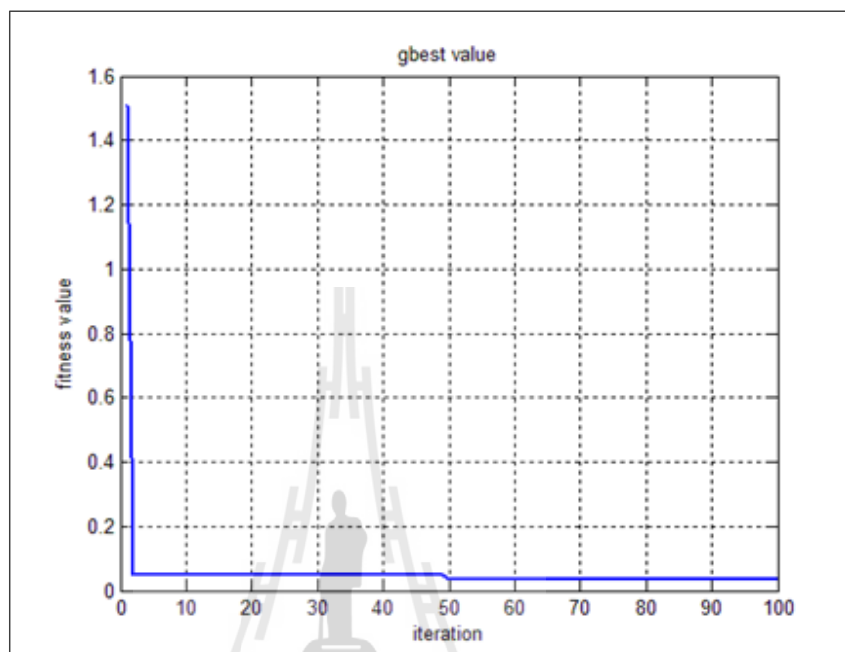
รูปแบบที่ 4 กำหนดให้พารามิเตอร์ของ PSO มีค่า  $c_p = 1.2$   $c_g = 1.2$  มีลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบเมื่อ  $c_p = 1.2$   $c_g = 1.2$

จากรูปที่ 4.10 ค่า  $gbest$  จะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ 3 ครั้ง เริ่มต้นจาก  $gbest = 0.4266$  ลดลงมาจนสุดท้าย  $gbest = 0.03001$  ในการเปลี่ยนแปลงครั้งสุดท้ายที่จำนวนรอบเท่ากับ 11

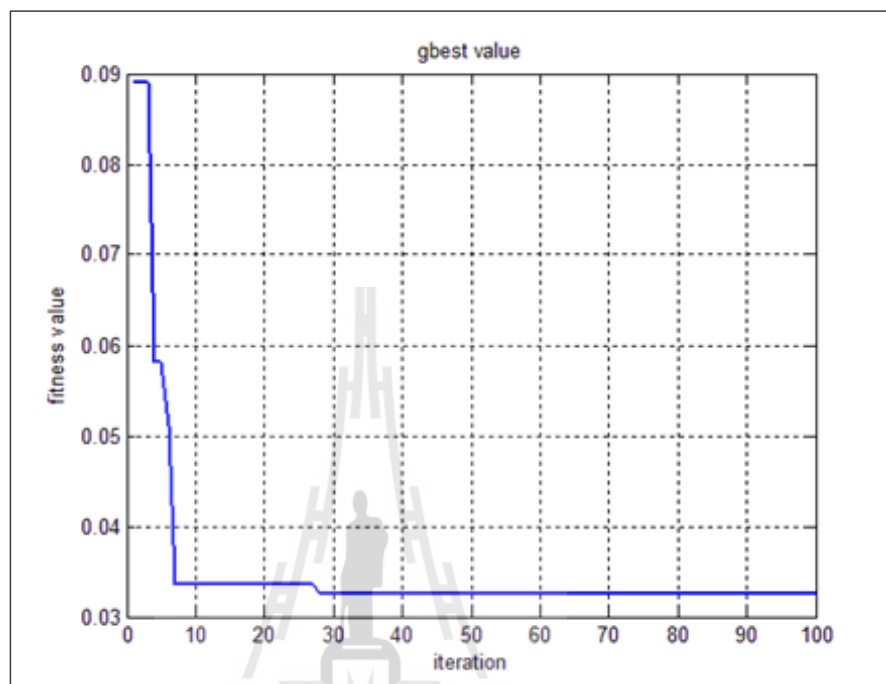
รูปแบบที่ 5 กำหนดให้พารามิเตอร์ของ PSO มีค่า  $c_p = 2.0$   $c_g = 2.0$  มีลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบเมื่อ  $c_p = 2.0$   $c_g = 2.0$

จากรูปที่ 4.11 ค่า *gbest* จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนทั้งหมด 2 ครั้ง เริ่มต้นจาก  $gbest = 0.1509$  ลดลงมาจนสุดท้าย  $gbest = 0.0330$  ในการเปลี่ยนแปลงครั้งสุดท้ายที่จำนวนรอบเท่ากับ 50

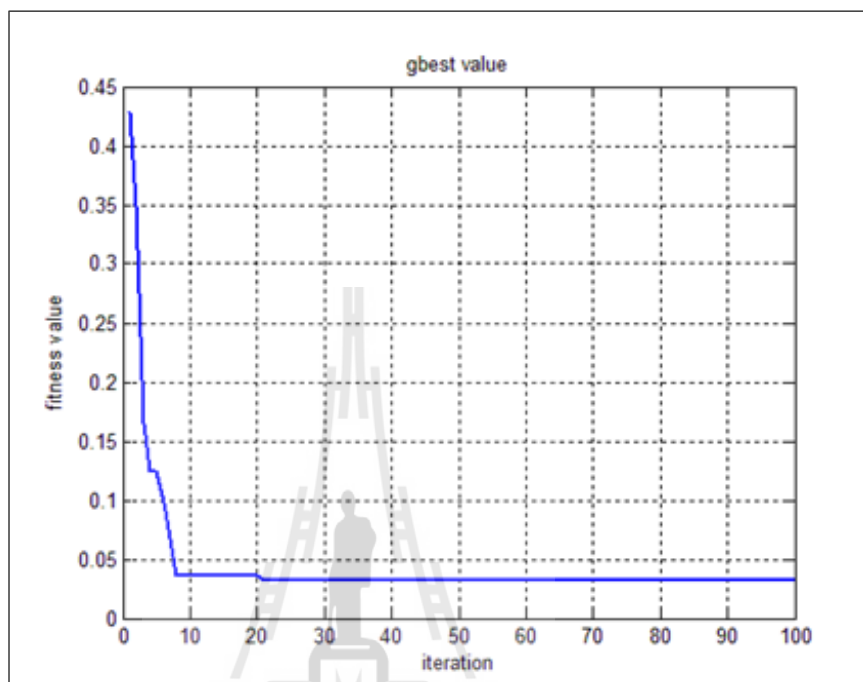
รูปแบบที่ 6 กำหนดให้พารามิเตอร์ของ PSO มีค่า  $c_p = 1.5$   $c_g = 0.5$  มีลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบเมื่อ  $c_p = 1.5$   $c_g = 0.5$

จากรูปที่ 4.12 ค่า *gbest* จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเล็กน้อยทั้งหมด 3 ครั้ง เริ่มต้นจาก  $gbest = 0.089$  ลดลงมาจนสุดท้าย  $gbest = 0.0325$  ในการเปลี่ยนแปลงครั้งสุดท้ายที่จำนวนรอบเท่ากับ 27

รูปแบบที่ 7 กำหนดให้พารามิเตอร์ของ PSO มีค่า  $c_p = 0.5$   $c_g = 1.5$  มีลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 ลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบเมื่อ  $c_p = 0.5$   $c_g = 1.5$

จากรูปที่ 4.13 ค่า  $gbest$  จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเล็กน้อยทั้งหมด 3 ครั้ง เริ่มต้นจาก  $gbest = 0.428$  ลดลงมาจนสุดท้าย  $gbest = 0.0323$  ในการเปลี่ยนแปลงครั้งสุดท้ายที่จำนวนรอบเท่ากับ 21

จากผลทดสอบการลู่เข้าหาคำตอบที่ดีที่สุดของ PSO ได้ทำการพล็อตกราฟวิเคราะห์ผล โดยในการทดสอบใช้ปัญหาการฝังลายน้ำที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์เพื่อสังเกตลักษณะของการลู่เข้าที่เกิดจากผลกระทบของพารามิเตอร์  $c_p$  และ  $c_g$  ในแต่ละกรณี ผลที่วิเคราะห์ได้สามารถแบ่งเป็นกรณีต่าง ๆ ได้คือ

กรณีที่ 1 เมื่อพารามิเตอร์  $c_p$  และ  $c_g$  มีค่าน้อยมาก  $c_p = 0.001$   $c_g = 0.001$  ลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบที่ดีที่สุดของกรณีนี้คือ ค่า  $g_{best}$  จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดทั้งหมด 4 ครั้ง และคำตอบสุดท้ายที่ได้จากการค้นหาคือที่จำนวนรอบเท่ากับ 92 แสดงให้เห็นว่า PSO มีทางเดินเข้าหาคำตอบที่ละเอียด และให้ผลเป็นแนวโน้มนำที่ดี โดยอาจจะต้องใช้จำนวนรอบในการทำงานที่สูงเพื่อให้ได้คำตอบอยู่ในเกณฑ์ที่ต้องการ

กรณีที่ 2 เมื่อพารามิเตอร์  $c_p$  และ  $c_g$  มีค่าอยู่ในช่วง  $0 < c_p < 1, 0 < c_g < 1$  ดังในผลการวิเคราะห์ในรูปแบบที่ 2 และ 3 ในกรณีนี้การลู่เข้าหาคำตอบของ PSO มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ 2 ครั้ง ที่  $c_p = 0.1$   $c_g = 0.1$  ที่จำนวนรอบเท่ากับ 42 และ 4 ครั้ง ที่  $c_p = 0.5$   $c_g = 0.5$  มีจำนวนรอบเท่ากับ 14 ในกรณีนี้ชี้ให้เห็นว่า เมื่อค่าพารามิเตอร์  $c_p$  และ  $c_g$  มีค่าที่มากขึ้นทางเดินเข้าหาคำตอบของ PSO ก็จะมีขนาดมากขึ้นทำให้มีการลู่เข้าหาคำตอบที่ดีที่สุดเร็วขึ้น ถึงแม้ทางเดินเข้าหาคำตอบจะไม่ละเอียดเท่าในกรณีที่ 1 แต่คำตอบที่ดีที่สุดที่ได้จาก PSO อยู่ในเงื่อนไขที่กำหนดไว้ในเงื่อนไขการทำงานและให้คำตอบที่ใกล้เคียงกัน

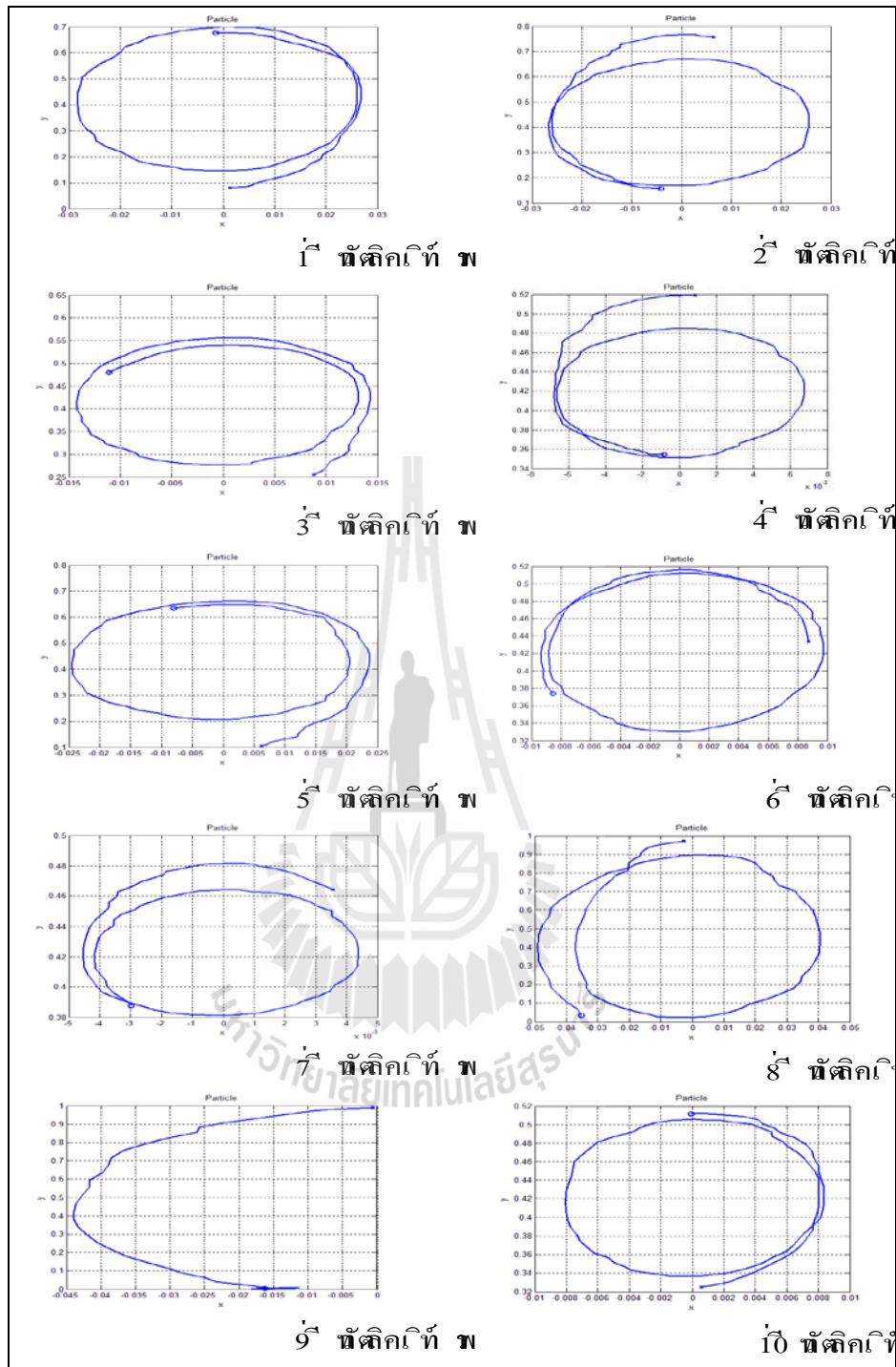
กรณีที่ 3 เมื่อพารามิเตอร์  $c_p$  และ  $c_g$  มีค่าอยู่ในช่วง  $1 < c_p < 2, 1 < c_g < 2$  โดยผลการวิเคราะห์อยู่รูปแบบที่ 4 และ 5 โดยที่  $c_p = 1.2$   $c_g = 1.2$  มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะการลู่เข้า 3 ครั้ง ที่จำนวนรอบเท่ากับ 11 และ  $c_p = 2.0$   $c_g = 2.0$  การเปลี่ยนแปลงลักษณะการลู่เข้า 3 ครั้ง ที่จำนวนรอบเท่ากับ 50 โดยมีค่า  $g_{best}$  เท่ากับ 0.030 และ 0.033 ตามลำดับ ซึ่งจากผลที่แสดงในรูปแบบที่ 4.10 และ 4.11 สามารถวิเคราะห์ได้ว่า การเปลี่ยนแปลงในกรณีที่ค่า  $c_p$  และ  $c_g$  เป็นแบบฉับพลันซึ่งแสดงว่า PSO มีขนาดทางเดินเข้าหาคำตอบที่มาก การลู่เข้าหาคำตอบจึงเป็นลักษณะแบบก้าวกระโดด

กรณีที่ 4 เมื่อพารามิเตอร์  $c_p$  และ  $c_g$  มีค่าที่แตกต่างกันโดยรูปแบบที่ 6 คือ  $c_p = 1.5$   $c_g = 0.5$  ซึ่งผลการทดสอบที่ได้คือ PSO มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะการลู่เข้า 3 ครั้ง ที่จำนวนรอบเท่ากับ 27 และรูปแบบที่ 7 คือ พารามิเตอร์  $c_p = 0.5$   $c_g = 1.5$  ผลที่ได้คือ PSO มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะการลู่เข้าทั้งหมด 3 ครั้ง จำนวนรอบเท่ากับ 21 โดยในรูปแบบที่ 1 นั้น PSO จะทำการเดินทางเข้าหาคำตอบไปรอบ ๆ คำตอบที่ดีที่สุดแบบท้องถิ่น (local) เนื่องจากพารามิเตอร์  $c_p$  มีค่ามากกว่า  $c_g$  และในรูปแบบที่ 2 PSO จะทำการเดินทางไปรอบ ๆ คำตอบที่ดีที่สุดแบบสากล (global) เนื่องจากพารามิเตอร์  $c_g$  มีค่ามากกว่า  $c_p$

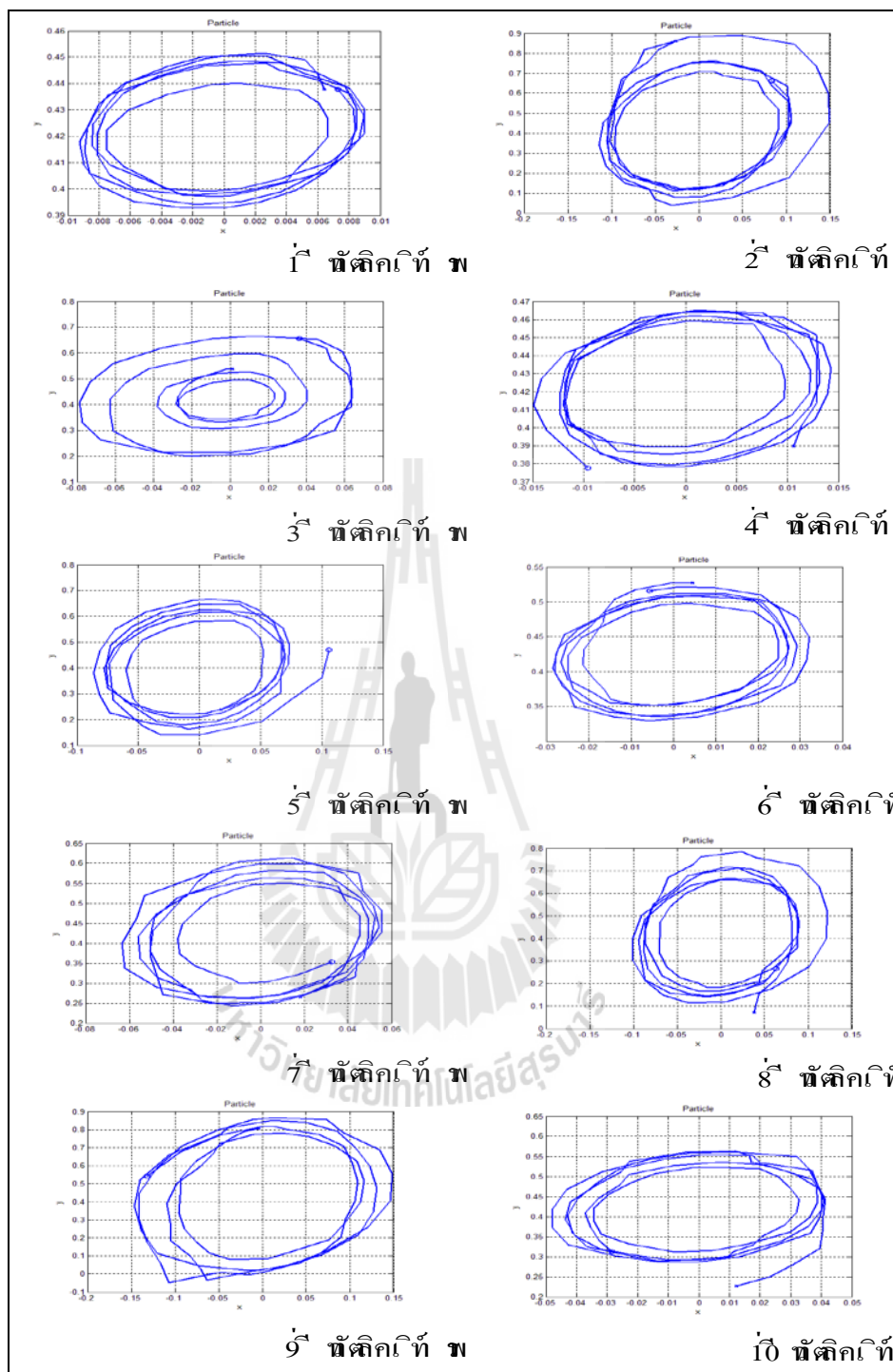
### วิเคราะห์ผล

จากทั้งหมด 4 กรณีที่กล่าวข้างต้นสามารถชี้ให้เห็นว่าค่าพารามิเตอร์  $c_p$  และ  $c_g$  มีผลต่อทางเดินเข้าหาคำตอบของ PSO มาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัญหาที่ทำการทดสอบ โดยในผลที่แสดงข้างต้นใช้ปัญหาการฝังสายน้ำในสัญญาณเสียงที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์เพื่อคุณลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบ และเลือกใช้พารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการแก้ปัญหา ซึ่งพารามิเตอร์  $c_p$  และ  $c_g$  ส่งผลต่อขนาดของทางเดินของ PSO ถ้ามีค่ามากเกินไปลักษณะทางเดินเข้าหาคำตอบของ PSO จะหยวบไม่ละเอียด มีการลู่เข้าหาคำตอบที่รวดเร็ว หากพารามิเตอร์ทั้งสองมีค่าน้อยลักษณะทางเดินเข้าหาคำตอบของ PSO จะละเอียด แต่เพื่อให้ได้คำตอบที่ดีจึงต้องใช้จำนวนรอบที่มากขึ้น และเมื่อพารามิเตอร์ทั้งสองมีค่าที่แตกต่างกัน เช่น  $c_p$  มีค่ามากกว่า  $c_g$  PSO จะทำการเดินทางไปรอบ ๆ คำตอบที่ดีที่สุดแบบท้องถิ่น (local) ใช้เวลาในการเดินทางมากแต่มีโอกาสจะพบตำแหน่งที่ดีที่สุดแบบสากล (global) และถ้า  $c_g$  มีค่ามากกว่า  $c_p$  PSO จะทำการค้นหาไปรอบ ๆ คำตอบที่ดีที่สุดแบบสากล (global) .ที่พบในรอบการค้นหานั้น ๆ ซึ่งมีโอกาสที่จะติดอยู่ที่คำตอบที่ดีที่สุดแบบท้องถิ่น (local) เพื่อให้การเดินทางของ PSO นั้นไม่ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบมากเกินไป และลดโอกาสที่จะติดอยู่ที่คำตอบที่ดีที่สุดแบบท้องถิ่น (local) จึงทำการพล็อตกราฟลักษณะทางเดินเข้าหาคำตอบของ PSO ในกรณีต่าง ๆ ที่กำหนดเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการเลือกพารามิเตอร์ที่จะใช้ในกระบวนการค้นหาของ PSO



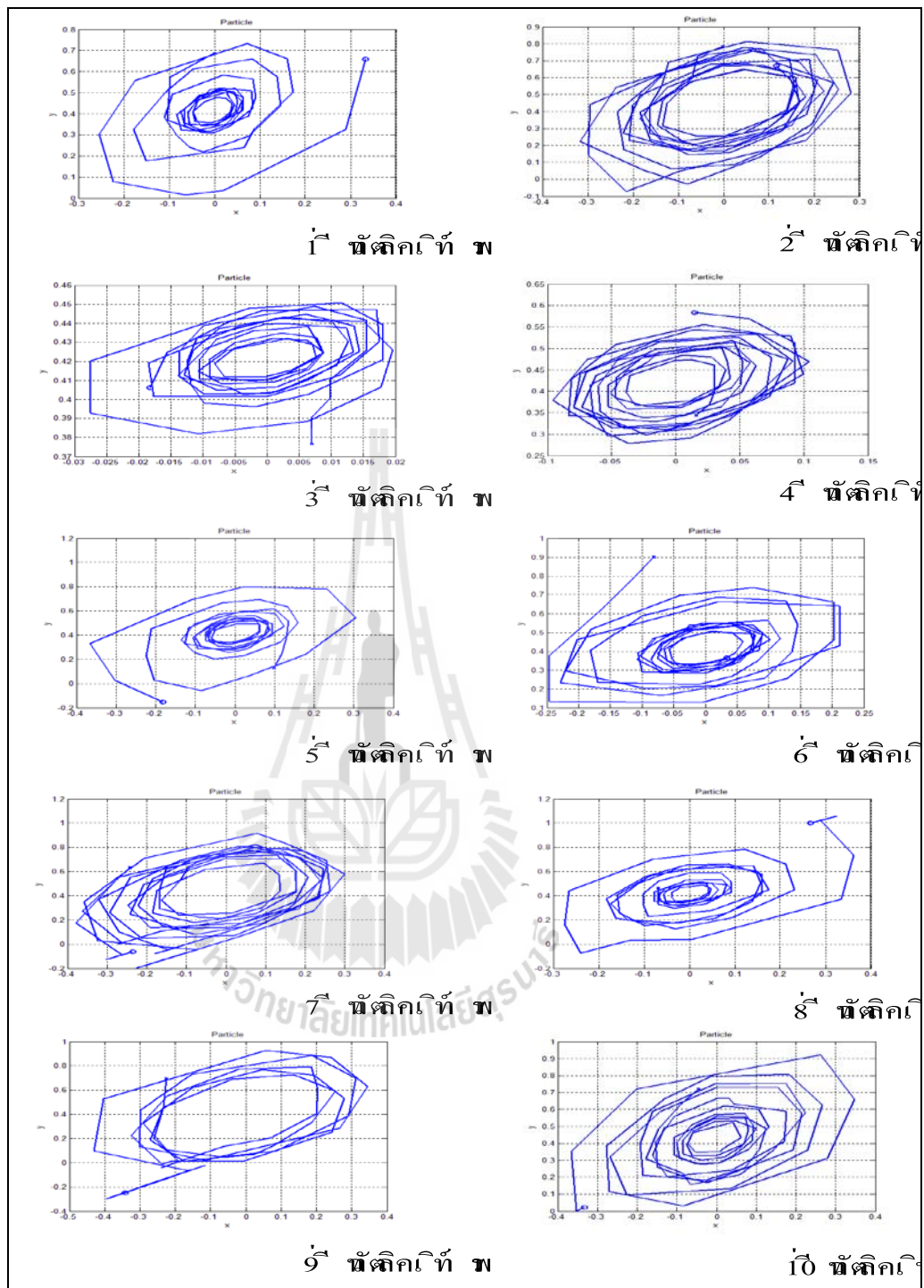


รูปที่ 4.14 ลักษณะการเดินทางของ PSO เมื่อ  $c_p = 0.001$   $c_g = 0.001$

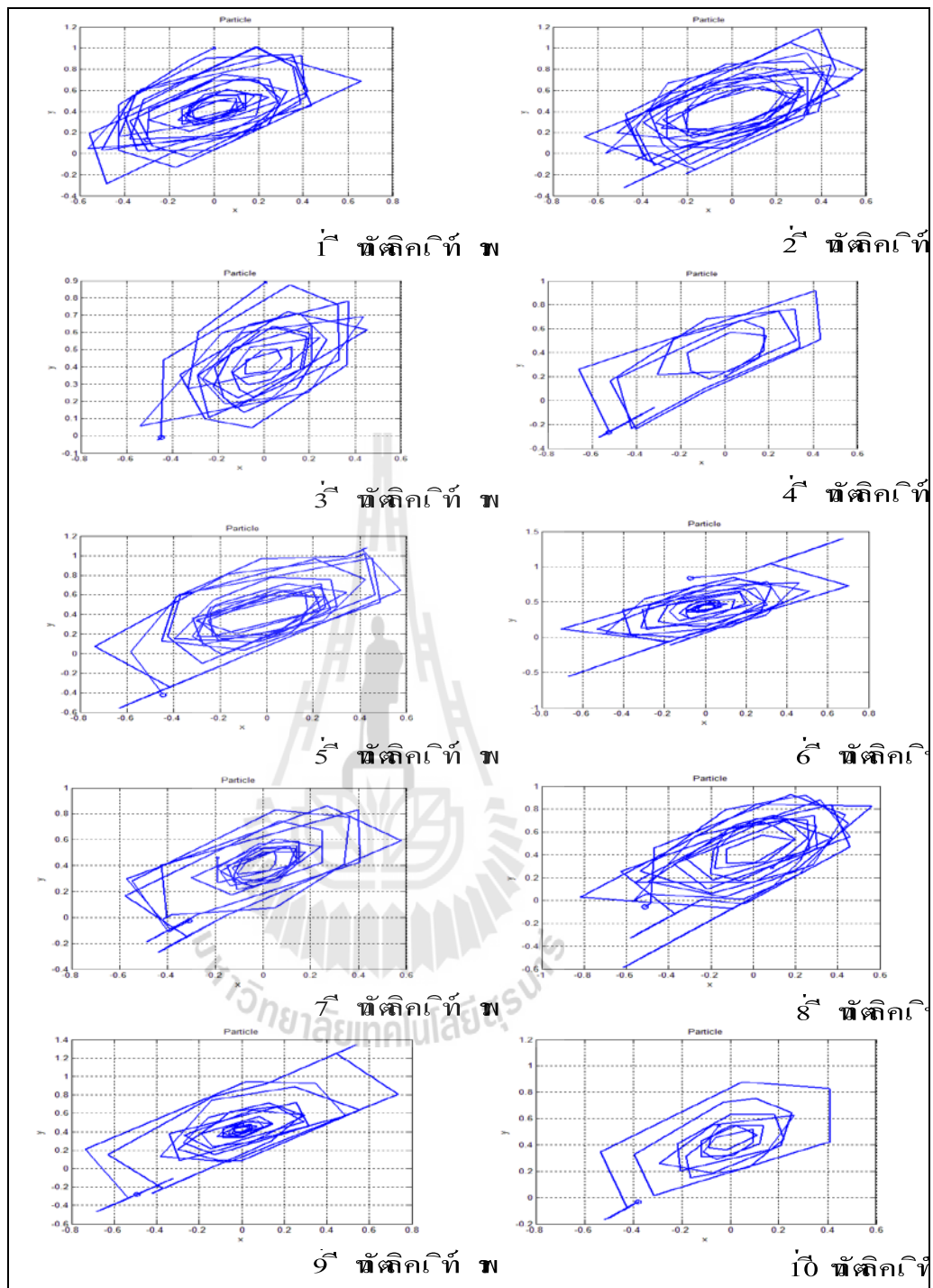


รูปที่ 4.15 ลักษณะการเดินทางของ PSO เมื่อ  $c_p = 0.1$   $c_g = 0.1$

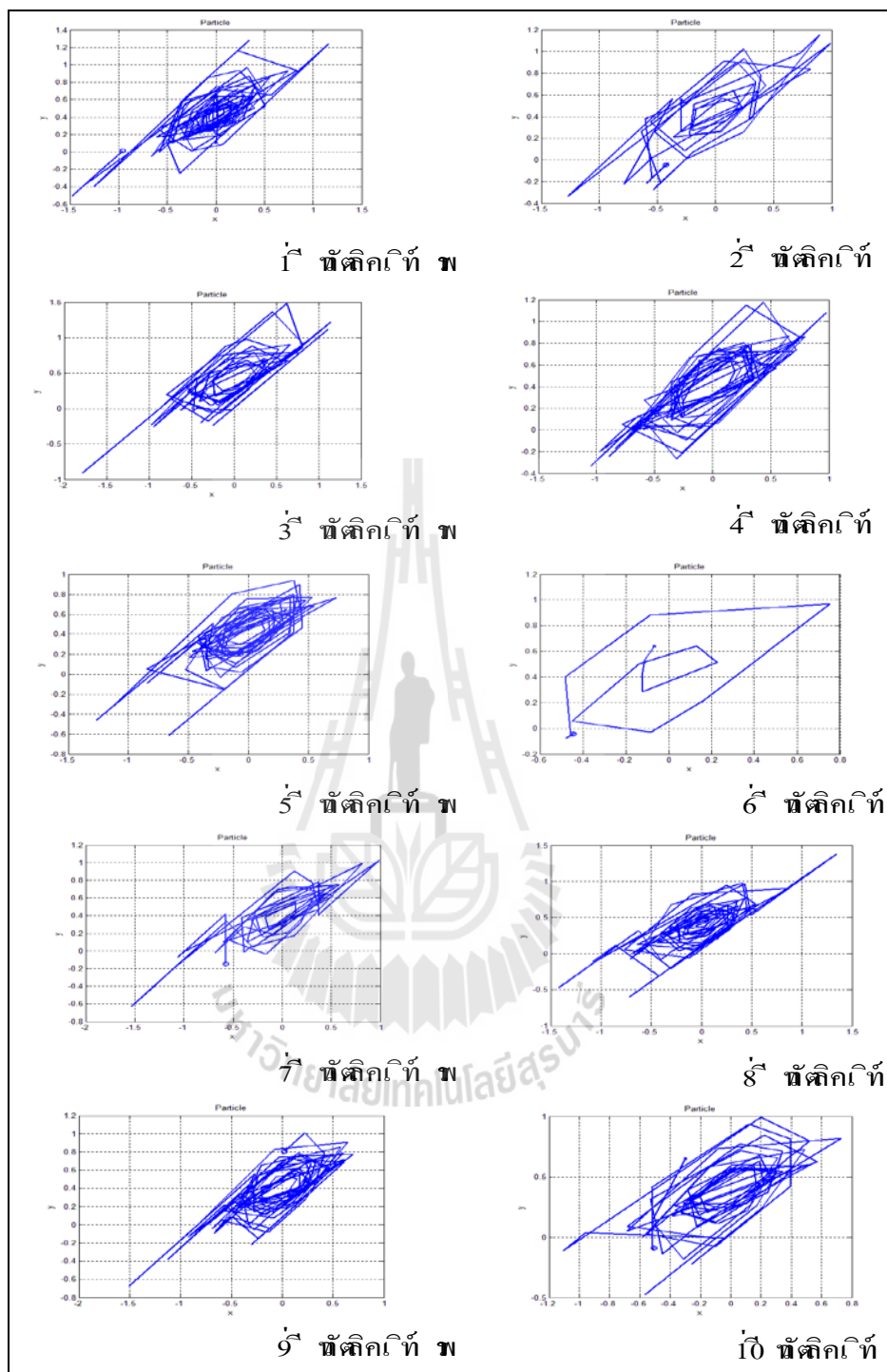




รูปที่ 4.16 ลักษณะการเดินทางของ PSO เมื่อ  $c_p = 0.5$   $c_g = 0.5$



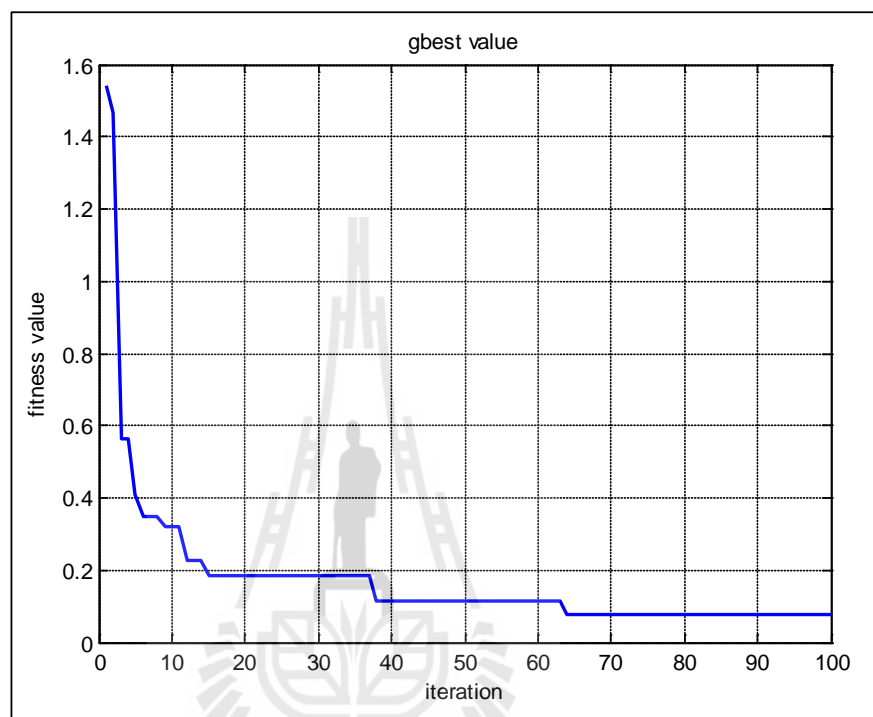
รูปที่ 4.17 ลักษณะการเดินทางของ PSO เมื่อ  $c_p = 1.2$   $c_g = 1.2$



รูปที่ 4.18 ลักษณะการเดินทางของ PSO เมื่อ  $c_p = 2.0$   $c_g = 2.0$

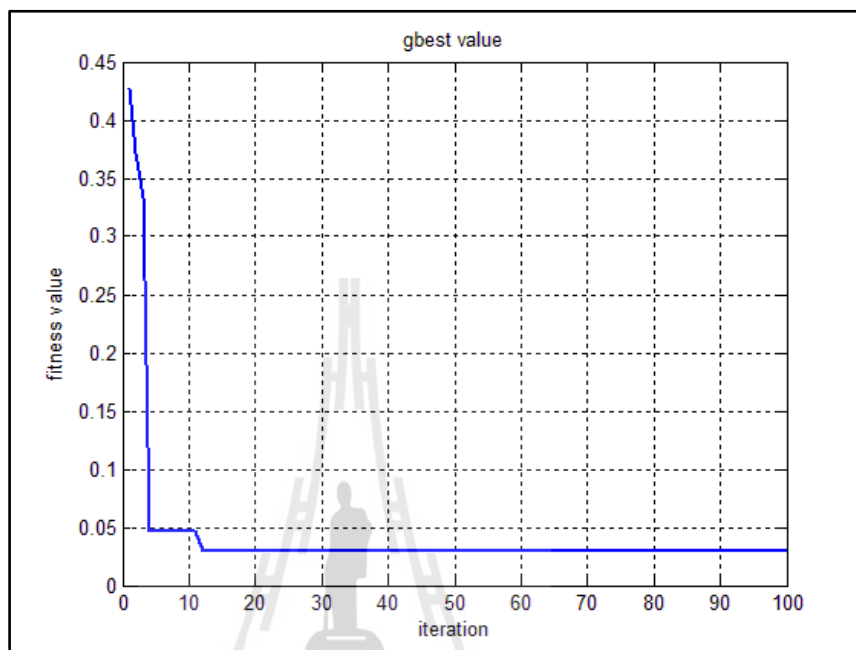
#### 4.4.2 การวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากจำนวนของพาร์ทิเคิล

รูปแบบที่ 1 กำหนดให้พารามิเตอร์ของ PSO มีจำนวนพาร์ทิเคิลเท่ากับ 5 มีลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบดังรูปที่ 4.19



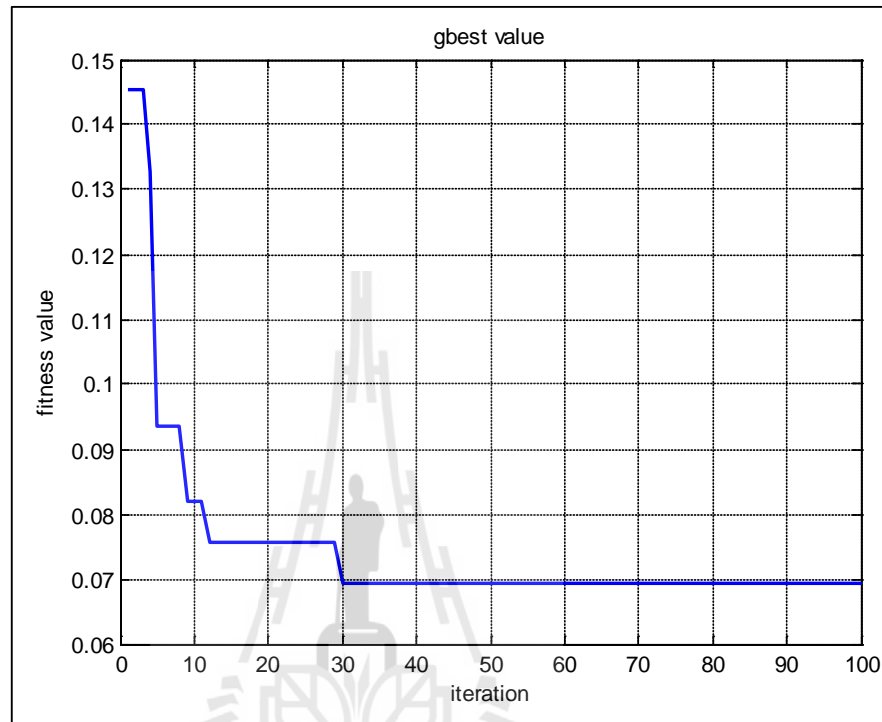
รูปที่ 4.19 ลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบเมื่อ PSO มีพาร์ทิเคิลเท่ากับ 5

รูปแบบที่ 2 กำหนดให้พารามิเตอร์ของ PSO มีจำนวนพาร์ทิเคิลเท่ากับ 10 มีลักษณะการดูเข้าหาคำตอบดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 ลักษณะการดูเข้าหาคำตอบเมื่อ PSO มีพาร์ทิเคิลเท่ากับ 10

รูปแบบที่ 3 กำหนดให้พารามิเตอร์ของ PSO มีจำนวนพาร์ทิเคิลเท่ากับ 20 มีลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 ลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบเมื่อ PSO มีพาร์ทิเคิลเท่ากับ 20

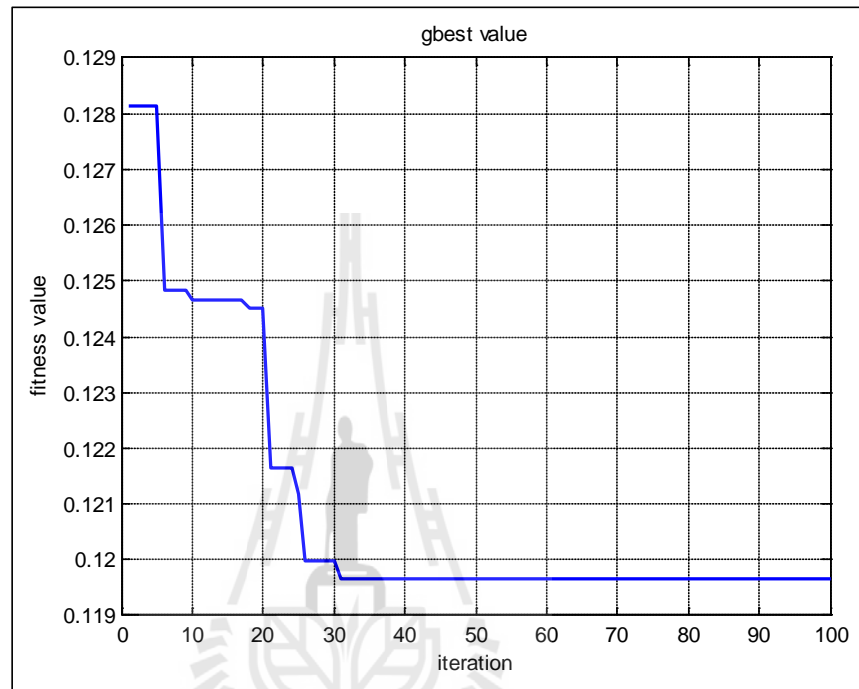
### วิเคราะห์ผล

จากทั้งหมด 3 กรณีที่กล่าวข้างต้นได้แสดงให้เห็นว่าจำนวนของ PSO ส่งผลกระทบต่อจำนวนรอบในการรู้เข้าหาคำตอบ และส่งผลโดยตรงต่อความเร็วในการค้นหา ในกรณีที่ PSO มีจำนวนพาร์ติเคิลที่มาก PSO จะใช้เวลาในการคำนวณที่เพิ่มขึ้นตามจำนวนพาร์ติเคิลที่เพิ่มขึ้น ซึ่งถึงแม้ว่าระยะเวลาในการค้นหาจะมากขึ้นแต่ PSO จะเดินทางได้ละเอียดในวงกว้าง กล่าวคือ เมื่อ PSO มีจำนวนพาร์ติเคิลที่มากจะสามารถลดปัญหาในการติดอยู่ที่ตำแหน่งที่ดีที่สุดแบบท้องถิ่น และในกรณีที่ PSO มีจำนวนพาร์ติเคิลที่น้อยความเป็นไปได้ที่ PSO จะติดอยู่ในตำแหน่งที่ดีที่สุดก็จะมีมากขึ้น การสุ่มตำแหน่งเริ่มต้นมีผลต่อการทำการของ PSO เป็นอย่างมาก ในกรณีที่จำนวนพาร์ติเคิลมีหลายตัว การสุ่มตำแหน่งเริ่มต้นจะถูกกระจายไว้หลายจุด ซึ่งอาจส่งผลให้การค้นหาสามารถพบคำตอบได้ในการค้นหาเพียงไม่กี่รอบ แสดงให้เห็นว่าจำนวนพาร์ติเคิลที่มากจะทำให้มีโอกาสพบคำตอบได้มากกว่า



#### 4.4.3 การวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากพารามิเตอร์ค่าถ่วงน้ำหนัก

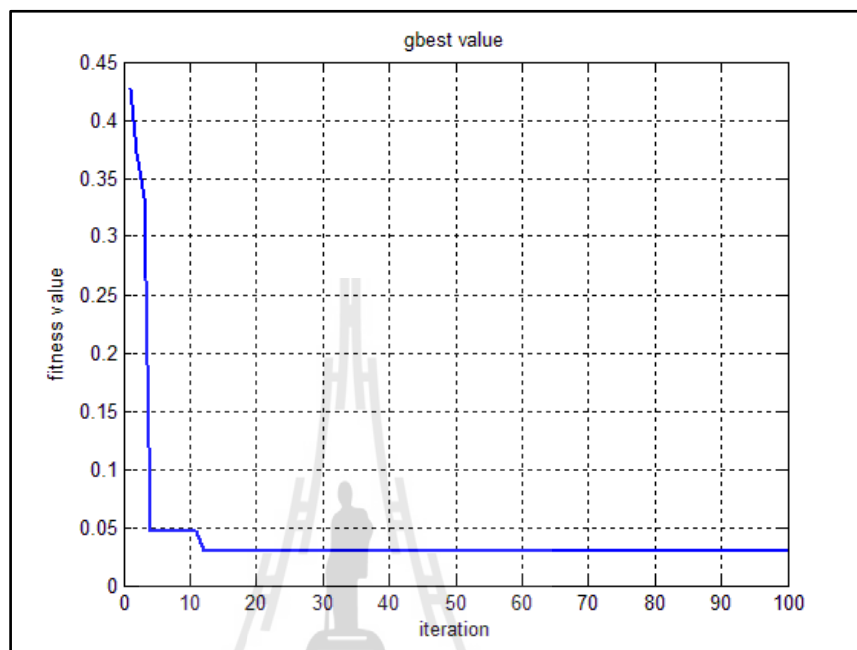
รูปแบบที่ 1 กำหนดให้พารามิเตอร์ของ PSO มีค่า  $\beta_1 = 0.1$   $\beta_2 = 0.9$  มีลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 ลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบเมื่อ PSO มี  $\beta_1 = 0.1$   $\beta_2 = 0.9$

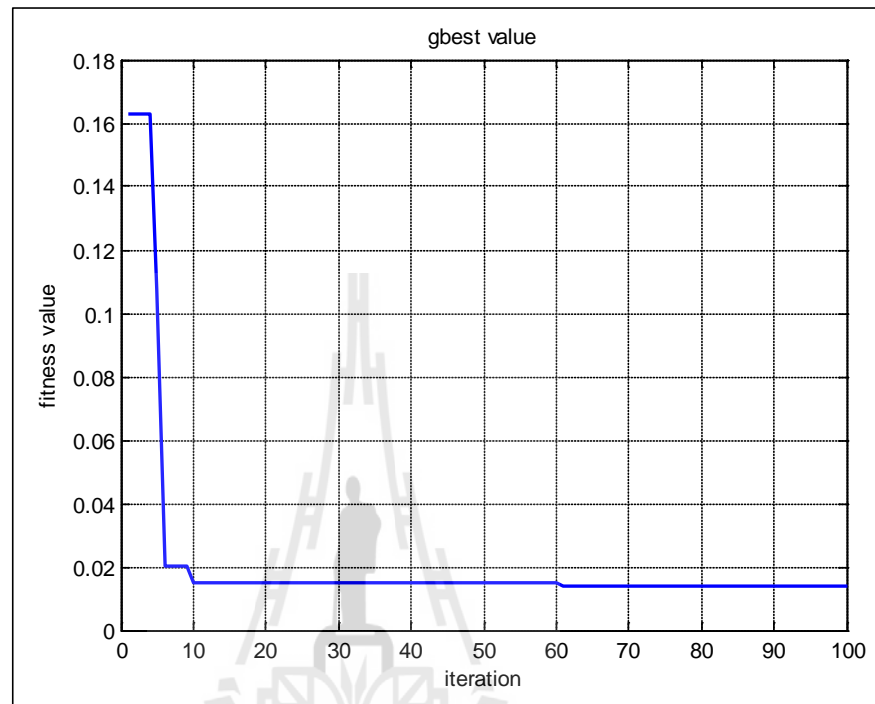


รูปแบบที่ 2 กำหนดให้พารามิเตอร์ของ PSO มีค่า  $\beta_1 = 0.5$   $\beta_2 = 0.5$  มีลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 ลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบเมื่อ PSO มี  $\beta_1 = 0.5$   $\beta_2 = 0.5$

รูปแบบที่ 3 กำหนดให้พารามิเตอร์ของ PSO มีค่า  $\beta_1 = 0.9$   $\beta_2 = 0.1$  มีลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 ลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบเมื่อ PSO มี  $\beta_1 = 0.9$   $\beta_2 = 0.1$

### วิเคราะห์ผล

จากทั้งหมด 3 กรณีที่กล่าวข้างต้นได้แสดงให้เห็นว่าค่าถ่วงน้ำหนักของ PSO ใน fitness function ส่งผลกระทบลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบ และจำนวนรอบในการลู่เข้าหาคำตอบ ตัวอย่างเช่น ในกรณีที่  $\beta_1=0.1$   $\beta_2=0.9$  ค่า fitness value จะเบนไปทางค่า Sim ที่มีค่าถ่วงน้ำหนักมากกว่า คือ 0.9 ส่วนค่า SNR ก็มีผลกระทบต่อ PSO แต่น้ำหนักที่ถูกนำมารวมในค่าการตัดสินใจนั้นจะมีขนาดเล็ก แต่ในกรณีนี้ ถึงแม้ค่า SNR ที่นำมาวิเคราะห์จะมีขนาดเล็กแต่โดยปกติแล้วค่า SNR นั้นมีค่ามากกว่า Sim อยู่มาก จึงไม่ส่งผลกระทบต่อลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบมากนัก ในกรณีที่  $\beta_1=0.9$   $\beta_2=0.1$  ค่าถ่วงน้ำหนักของ SNR มีค่าที่มากซึ่งประกอบกับค่า SNR มีค่ามากกว่า Sim อยู่แล้วจึงทำให้ลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบที่ก้าวกระโดดเนื่องจากค่าน้ำหนักของ Sim มีค่าน้อย ประกอบกับ Sim มีค่าน้อยมาก จึงแทบจะไม่มีผลต่อ fitness value และในกรณีที่  $\beta_1=0.5$   $\beta_2=0.5$  เป็นการกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละตัวแปรให้มีความสำคัญเท่ากันไม่เน้นไปที่ตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งมากกว่า แต่เนื่องจากขนาดของแต่ละตัวแปรมีขนาดที่ต่างกัน ค่า SNR จึงมีผลต่อ fitness value มากกว่า Sim แต่อยู่ในขนาดที่เหมาะสมเนื่องจากวิเคราะห์ถึงความสำคัญของปัญหา



### สรุปผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของ PSO

เนื่องจากพารามิเตอร์ของ PSO นั้นจะใช้ในการกำหนดลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบของ PSO ซึ่ง PSO มีรูปแบบเป็นการค้นหาแบบสุ่ม โดยใช้หลักจิตวิทยาการหาอาหารของฝูงสัตว์ จึงทำให้ผลในการค้นหาแต่ละรอบอาจไม่เท่ากัน แต่มีความใกล้เคียงกัน ขึ้นอยู่กับการกำหนดเงื่อนไขในการลู่เข้า การกำหนดค่าวัตถุประสงค์ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ PSO และขึ้นอยู่กับการกำหนดลักษณะของปัญหา

จากผลการวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากพารามิเตอร์ความเร่งของ PSO และทำการแสดงลักษณะการเดินทางของ PSO ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.14 รูปที่ 4.15 รูปที่ 4.16 รูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18 โดยผลที่ได้จากพารามิเตอร์  $c_p = 1.2$   $c_g = 1.2$  มีลักษณะทางเดินเข้าหาคำตอบที่ไม่ละเอียดหรือหยวบจนเกินไป ทำให้มีผลกระทบต่อเวลาที่ใช้ในการคำนวณน้อยลง สังเกตได้ถึงลักษณะการเดินทางที่ชัดเจน และให้คำตอบอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด ในวิทยานิพนธ์นี้จึงกำหนดพารามิเตอร์ค่าความเร่งที่ใช้ในการทดสอบการส่งลายน้ําของ PSO มีค่าดังต่อไปนี้  $c_p$  มีค่าเท่ากับ 1.2  $c_g$  มีค่าเท่ากับ 1.2

จากผลการวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากจำนวนของพาร์ทิเคิลที่ใช้ในการค้นหาสามารถวิเคราะห์ได้ว่าจำนวนรอบในการค้นหานั้นมีผลต่อโอกาสการเดินทางข้ามคำตอบที่ดีที่สุดแบบวงกว้าง กรณีที่พาร์ทิเคิลมีจำนวนน้อย ระยะเวลาในการค้นหาคำตอบจะเร็วแต่ความเป็นไปได้ที่จะพบคำตอบที่ดีที่สุดแบบวงกว้างก็จะลดลง ในกรณีที่พาร์ทิเคิลมีจำนวนมาก ความเร็วในการคำนวณจะมากขึ้น แต่โอกาสที่จะเดินทางข้ามคำตอบที่ดีที่สุดแบบวงกว้างจะลดลง ซึ่งจากรูปที่ 4.19 รูปที่ 4.20 รูปที่ 4.21 แสดงให้เห็นถึงลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบ ซึ่งในกรณีที่ 1 มีลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบที่ช้า และในกรณีที่ 2 และ 3 มีการลู่เข้าหาคำตอบที่เร็วขึ้น แต่สำหรับงานวิจัยเลือกใช้จำนวนพาร์ทิเคิลตามกรณีที่ 2 เนื่องจากมีลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบที่เร็ว และระยะเวลาในการคำนวณไม่มากจนเกินไป จึงกำหนดให้ PSO มีจำนวนพาร์ทิเคิลในการค้นหา 10 พาร์ทิเคิล

จากผลการวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากพารามิเตอร์ค่าถ่วงน้ำหนัก โดยปกติแล้วพารามิเตอร์ถ่วงน้ำหนักจะส่งผลเด่นชัดในกรณีที่พารามิเตอร์ที่ใช้เป็นตัวประกอบของ fitness function มีค่าใกล้เคียงกัน การกำหนดให้ค่าถ่วงน้ำหนักเอียงไปทางพารามิเตอร์ตัวใดตัวหนึ่ง จะส่งผลให้การค้นหาของ PSO ให้ความสำคัญกับพารามิเตอร์นั้นมากกว่า ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ค่าพารามิเตอร์ SNR และ Sim มีความสำคัญที่เท่าเทียมกันจึงกำหนดให้พารามิเตอร์ทั้งสองมีค่าเท่ากัน ที่  $\beta_1 = 0.5$   $\beta_2 = 0.5$

สรุป กำหนดพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทำงานของ PSO ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ คือ PSO มีจำนวนพาร์ติเคิลทั้งหมด 10 พาร์ติเคิล จำนวนรอบการค้นหา 100 รอบ ค่าเวลาระหว่างรอบมีค่าเป็น 1 ค่าพารามิเตอร์ความเร่ง  $c_p = 1.2$   $c_g = 1.2$  พารามิเตอร์ค่าถ่วงน้ำหนัก  $\beta_1 = 0.5$   $\beta_2 = 0.5$  โดยเป้าหมายของการทำงานคือค้นหาค่าความเข้มของลายน้ำ  $\alpha$  ซึ่งค่าความเข้มที่ได้จะต้องทำให้สัญญาณเสียงที่ทำการฝังลายน้ำแล้วมีค่า SNR มากกว่าหรือเท่ากับ 21 dB และมีค่า Sim สำหรับทุกการโจมตีที่กำหนดมากกว่า 0.9



## บทที่ 5

### ผลการทดสอบ

#### 5.1 บทนำ

ในหัวข้อนี้นำเสนอผลการทดสอบความทนทานของลายน้ำต่อการโจมตีและการประมวลผลสัญญาณแบบต่าง ๆ ทั้งหมด 17 รูปแบบ ผลการทดสอบแบ่งออกตามชนิดของเพลงทั้งหมด 6 ชนิด ชนิดละ 10 บทเพลง รวมทั้งสิ้น 60 บทเพลง โดยในหัวข้อที่ 5.2 แสดงผลความทนทานต่อการโจมตีทั้งหมด 6 ชนิด ชนิดละ 5 บทเพลง รวมทั้งหมด 30 บทเพลง และที่เหลือ 30 บทเพลงแสดงไว้ในภาคผนวก

#### 5.2 ผลการทดสอบความทนทานต่อการโจมตี

ในหัวข้อนี้ ผลการทดสอบถูกแบ่งออกเป็นสองหัวข้อ หัวข้อที่หนึ่งคือผลการทดสอบที่แสดงในรูปแบบของการทำสหสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณลายน้ำต้นฉบับกับสัญญาณลายน้ำที่ตรวจจับได้ หัวข้อที่สองคือผลการทดสอบที่แสดงในรูปค่าความผิดพลาดของบิตลายน้ำเมื่อเปรียบเทียบกับลายน้ำต้นฉบับ โดยรูปแบบการโจมตีที่ทำการทดสอบมีดังนี้

##### 1. การยืดหดสัญญาณโดยใช้รูปแบบ Time scale modification (TSM)

การโจมตีในรูปแบบนี้มีลักษณะเป็นการยืดหดสัญญาณคล้ายกับการเร่งความเร็วและลดความเร็วของสัญญาณเสียง ในวิทยานิพนธ์ใช้กระบวนการประมาณค่าในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของสัญญาณเสียงขึ้นใหม่ โดย Time scale -5% คือการลดความยาวของสัญญาณเสียงลด 5% และ Time scale +5% คือการเพิ่มความยาวของสัญญาณเสียงขึ้นอีก 5%

##### 2. การแปลงสัญญาณโดยใช้รูปแบบ Digital to Analog และ Analog to Digital (DA/AD)

การโจมตีในรูปแบบของ DA/AD คือการเล่นสัญญาณเสียงจากคอมพิวเตอร์เครื่องที่หนึ่งและทำการบันทึกโดยคอมพิวเตอร์เครื่องที่สอง ซึ่งทำการกำหนดความละเอียดของสัญญาณให้ตรงกันที่ Sample frequency 44.1 kHz 16 bit mono

##### 3. การเพิ่มสัญญาณรบกวนโดยใช้รูปแบบ Random noise และ White Gaussian noise

การโจมตีในรูปแบบ Random noise เป็นการสุ่มสัญญาณรบกวนที่มีความยาวเท่ากับสัญญาณเสียงที่ทำการทดสอบและมีกำลังงานเฉลี่ยของสัญญาณรบกวนเท่ากับ 1% ของสัญญาณเสียงที่ทำการ

ทดสอบ และการโจมตีรูปแบบ White Gaussian noise (WGN) เป็นการสร้างสัญญาณรบกวนที่มีกำลังงานของสัญญาณรบกวนคงที่ โดยสเปกตรัมของสัญญาณจะมีลักษณะที่เรียบ กล่าวคือทุก ๆ ส่วนของสัญญาณจะมีค่าพลังงานเท่ากันตลอดย่านเพื่อดูผลความทนทานต่อการโจมตีกับในลักษณะการเพิ่มสัญญาณรบกวน

#### 4. การกรองสัญญาณโดยใช้รูปแบบ Lowpass filter (LPF)

การโจมตีในรูปแบบ LPF คือการนำเอาสัญญาณที่ทำการทดสอบมาผ่านกระบวนการกรองด้วยตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน โดยในวิทยานิพนธ์นำเสนอการดำเนินงานที่ค่า Cutoff frequency 6 kHz และ 15 kHz

#### 5. การสุ่มลบข้อมูลของสัญญาณโดยใช้รูปแบบ Crop และ Jitter

การโจมตีในรูปแบบ Crop เป็นการสุ่มลบค่าสัมประสิทธิ์ของสัญญาณเสียงอย่างถาวรเพื่อดูผลความทนทานต่อการโจมตีในกรณีที่ข้อมูลสัญญาณเสียงสูญหายไปบางส่วน ตัวอย่างการโจมตีรูปแบบ Crop(5x100) คือการสุ่มลบค่าสัมประสิทธิ์ 5 ครั้ง ครั้งละ 100 ค่า โดยทำการโจมตีทั้งหมด 4 รูปแบบคือ Crop(5x100) Crop(10x100) Crop(10x500) และ Crop(10x1000) และการโจมตีในรูปแบบ Jitter เป็นการสุ่มลบค่าสัมประสิทธิ์ของสัญญาณเสียง 1 ค่า ทุก ๆ 100 ค่าของสัญญาณเสียง

#### 6. การลดสัญญาณรบกวนโดยใช้ Wavelet transform (Denoising Wavelet Transform)

การประมวลผลสัญญาณในลักษณะการลดสัญญาณรบกวนในกรณีที่มองสัญญาณลายน้ำที่ทำการฝังลงในสัญญาณเสียงเป็นการเพิ่มสัญญาณรบกวนรูปแบบหนึ่ง

#### 7. การบีบอัดแบบมีการสูญเสียโดยใช้รูปแบบ MPEG Audio Layer 3 (MP3)

การโจมตีโดยใช้หลักการการบีบอัดแบบมีการสูญเสียนั้นเป็นการบีบอัดโดยใช้การตัดข้อมูลบางส่วนออก ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้การทดสอบความทนทานต่อการโจมตีในลักษณะการบีบอัดข้อมูลแบบมีการสูญเสียในรูปแบบของ MP3 ซึ่งสามารถลดขนาดของข้อมูลได้กว่า 10 เท่า ในคุณภาพที่ยอมรับได้ โดยรูปแบบในการโจมตีที่นำเสนอทำการกำหนด Bit rate ที่ 68 kbps และ 128 kbps

#### 8. การบีบอัดแบบไม่มีการสูญเสียโดยใช้รูปแบบ Free Lossless Audio Codec (FLAC)

การโจมตีในรูปแบบ FLAC เป็นการบีบอัดข้อมูลโดยที่รายละเอียดของข้อมูลจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงเมื่อผ่านการเข้ารหัสของสัญญาณ ซึ่งสัญญาณที่ได้จะมีขนาดใหญ่กว่าการบีบอัดแบบมีการสูญเสียแต่มีคุณภาพที่ดีกว่าเป็นอย่างมาก

#### 9. การลดอัตราสุ่มลงโดยใช้รูปแบบ Down sampling

การโหมตีในรูปแบบ Down sampling ในวิทยานิพนธ์นี้มีลักษณะเป็นการลดอัตราสุ่มของข้อมูล สัญญาณเสียงที่ทำการทดสอบลงครึ่งหนึ่งจาก 44.1kHz เป็น 22.05 kHz และทำการ Up sampling กลับคืนที่ 44.1 kHz

### 5.2.1 ผลการทดสอบความทนทานต่อการโหมตีแสดงค่าสหสัมพันธ์

ผลการทดสอบความทนทานต่อการโหมตีในรูปแบบต่าง ๆ ทั้งหมด 17 รูปแบบการโหมตี แสดงผลในรูปแบบตารางค่าสหสัมพันธ์ระหว่างลายน้ำต้นฉบับกับลายน้ำที่ตรวจจับได้จาก สัญญาณเสียงทั้งหมด 6 ชนิด ชนิดละ 5 บทเพลง ดังแสดงในตารางที่ 5.1 ถึงตารางที่ 5.6 รวม ทั้งหมด 30 บทเพลง โดยรูปภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการโหมตีที่ค่าสหสัมพันธ์ต่าง ๆ แสดงไว้ในภาพผนวก ข

ตารางที่ 5.1 ค่าสหสัมพันธ์จากการทดสอบอัลกอริทึมกับเพลงไทยลูกทุ่ง

	เพลงทดสอบ ที่ 1	เพลงทดสอบ ที่ 2	เพลงทดสอบ ที่ 3	เพลงทดสอบ ที่ 4	เพลงทดสอบ ที่ 5
ไม่มีการโหมตี	1	1	1	1	1
Time scale -5%	0.917	0.971	0.992	0.958	0.927
Time scale +5%	0.954	0.934	0.979	0.962	0.928
DA/AD	1	0.912	0.959	0.943	0.963
Random noise 1%	1	1	1	1	1
Low pass filter 6kHz	1	1	1	1	0.984
Low pass filter 15kHz	1	1	1	1	1
Crop 5x100	1	1	1	1	1
Crop 10x100	1	1	1	1	1
Crop 10x500	0.998	0.998	1	1	1
Crop 10x1000	1	0.996	1	0.9937	0.988
WGN	1	1	1	1	1
DWT	1	1	1	1	0.986
MP3 : 64 kbps	0.996	0.996	1	0.993	0.984
MP3 : 128 kbps	0.998	0.998	1	1	1
Jitter 1%	1	1	1	1	1
FLAC	1	1	1	1	1
Downsampling	1	1	1	1	1



ตารางที่ 5.2 ค่าสหสัมพันธ์จากผลการทดสอบอัลกอริทึมกับเพลงไทยสุนทราภรณ์

	เพลงทดสอบ ที่ 1	เพลงทดสอบ ที่ 2	เพลงทดสอบ ที่ 3	เพลงทดสอบ ที่ 4	เพลงทดสอบ ที่ 5
ไม่มีการโจมตี	1	1	1	1	1
Time scale -5%	0.917	0.933	0.927	0.960	0.927
Time scale +5%	0.921	0.925	0.927	0.958	0.953
DA/AD	0.948	0.956	0.918	0.967	0.928
Random noise 1%	1	1	1	1	1
Low pass filter 6kHz	0.992	0.992	0.976	1	1
Low pass filter 15kHz	1	1	1	1	1
Crop 5x100	1	1	1	1	1
Crop 10x100	1	1	1	1	1
Crop 10x500	0.991	1	0.973	1	0.996
Crop 10x1000	0.989	0.991	0.972	1	0.993
WGN	0.993	1	1	1	1
DWT	1	0.990	1	0.995	1
MP3 : 64 kbps	0.984	0.978	1	0.989	0.988
MP3 : 128 kbps	0.984	0.978	1	0.993	1
Jitter 1%	0.993	1	1	1	1
FLAC	1	1	1	1	1
Downsampling	1	1	1	1	1

ตารางที่ 5.3 ค่าสหสัมพันธ์จากผลการทดสอบอัลกอริทึมกับเพลงไทยเดิม

	เพลงทดสอบ ที่ 1	เพลงทดสอบ ที่ 2	เพลงทดสอบ ที่ 3	เพลงทดสอบ ที่ 4	เพลงทดสอบ ที่ 5
ไม่มีการ โจมตี	1	1	1	1	1
Time scale -5%	0.971	0.978	0.986	0.998	0.973
Time scale +5%	0.989	0.971	0.998	0.989	0.979
DA/AD	0.954	0.965	0.992	0.921	0.979
Random noise 1%	1	1	1	1	1
Low pass filter 6kHz	1	1	1	1	1
Low pass filter 15kHz	1	1	1	1	1
Crop 5x100	1	1	1	1	1
Crop 10x100	1	1	1	1	1
Crop 10x500	1	1	1	1	1
Crop 10x1000	1	1	1	1	0.998
WGN	1	1	0.998	1	1
DWT	1	1	1	1	1
MP3 : 64 kbps	0.998	1	1	1	1
MP3 : 128 kbps	1	1	1	1	1
Jitter 1%	1	1	1	1	1
FLAC	1	1	1	1	1
Downsampling	1	1	1	1	1

ตารางที่ 5.4 ค่าสหสัมพันธ์จากผลการทดสอบอัลกอริทึมกับเพลงสากล Classics

	เพลงทดสอบ ที่ 1	เพลงทดสอบ ที่ 2	เพลงทดสอบ ที่ 3	เพลงทดสอบ ที่ 4	เพลงทดสอบ ที่ 5
ไม่มีการโจมตี	1	1	1	1	1
Time scale -5%	0.950	0.952	0.965	0.963	0.954
Time scale +5%	0.983	0.992	0.986	0.979	0.988
DA/AD	0.974	0.956	0.935	0.951	0.992
Random noise 1%	1	1	1	1	1
Low pass filter 6kHz	1	1	1	1	1
Low pass filter 15kHz	1	1	1	1	1
Crop 5x100	1	1	1	1	1
Crop 10x100	1	1	1	1	1
Crop 10x500	1	1	1	1	1
Crop 10x1000	1	0.998	1	1	0.996
WGN	1	0.957	1	0.979	1
DWT	1	1	1	1	1
MP3 : 64 kbps	1	1	1	1	1
MP3 : 128 kbps	1	1	1	1	1
Jitter 1%	1	1	1	1	1
FLAC	1	1	1	1	1
Downsampling	1	1	1	1	1

ตารางที่ 5.5 ค่าสหสัมพันธ์จากผลการทดสอบอัลกอริทึมกับเพลงสากล Pop

	เพลงทดสอบ ที่ 1	เพลงทดสอบ ที่ 2	เพลงทดสอบ ที่ 3	เพลงทดสอบ ที่ 4	เพลงทดสอบ ที่ 5
ไม่มีการ โจมตี	1	1	1	1	1
Time scale -5%	0.902	0.909	0.935	0.931	0.966
Time scale +5%	0.917	0.920	0.938	0.929	0.983
DA/AD	0.915	0.947	0.950	0.949	0.969
Random noise 1%	0.992	0.995	1	1	1
Low pass filter 6kHz	0.992	0.993	1	1	1
Low pass filter 15kHz	1	1	1	1	1
Crop 5x100	1	1	1	1	1
Crop 10x100	1	1	1	1	1
Crop 10x500	1	1	1	1	1
Crop 10x1000	1	0.992	1	0.982	0.998
WGN	0.991	0.993	0.996	0.985	0.993
DWT	0.989	1	0.996	0.983	1
MP3 : 64 kbps	0.992	0.988	0.992	1	1
MP3 : 128 kbps	1	1	1	1	1
Jitter 1%	1	1	1	1	1
FLAC	1	1	1	1	1
Downsampling	1	1	1	1	1

ตารางที่ 5.6 ค่าสหสัมพันธ์จากผลการทดสอบอัลกอริทึมกับเพลงสากล Jazz

	เพลงทดสอบ ที่ 1	เพลงทดสอบ ที่ 2	เพลงทดสอบ ที่ 3	เพลงทดสอบ ที่ 4	เพลงทดสอบ ที่ 5
ไม่มีการ โจมตี	1	1	1	1	1
Time scale -5%	0.956	0.971	0.949	0.971	0.947
Time scale +5%	0.952	0.976	0.952	0.957	0.971
DA/AD	0.963	0.960	0.942	0.956	0.941
Random noise 1%	1	1	1	1	1
Low pass filter 6kHz	0.998	1	1	1	1
Low pass filter 15kHz	1	1	1	1	1
Crop 5x100	1	1	1	1	1
Crop 10x100	1	1	1	1	1
Crop 10x500	1	1	1	1	1
Crop 10x1000	0.998	0.993	0.996	0.998	0.998
WGN	0.996	0.983	1	1	0.998
DWT	1	1	1	1	1
MP3 : 64 kbps	1	1	1	1	1
MP3 : 128 kbps	1	1	1	1	1
Jitter 1%	1	1	1	1	1
FLAC	1	1	1	1	1
Downsampling	1	1	1	1	1

## 5.2.2 ผลการทดสอบความทนทานต่อการโจมตีแสดงค่าความผิดพลาดของบิตลายน้ำ

ผลการทดสอบความทนทานต่อการโจมตีแสดงในรูปค่าความผิดพลาดของบิตลายน้ำ คือ จำนวนของบิตลายน้ำที่แตกต่างกันระหว่างลายน้ำที่ตรวจจับได้กับลายน้ำต้นฉบับ เพื่อแสดงจำนวนบิตที่ผิดพลาดเมื่อเทียบกับค่าการทำสหสัมพันธ์ที่ได้ในหัวข้อที่ 5.2.1

ตารางที่ 5.7 ค่าความผิดพลาดของบิตลายน้ำจากผลการทดสอบอัลกอริทึมกับเพลงไทยลูกทุ่ง

	เพลงทดสอบ ที่ 1	เพลงทดสอบ ที่ 2	เพลงทดสอบ ที่ 3	เพลงทดสอบ ที่ 4	เพลงทดสอบ ที่ 5
ไม่มีการโจมตี	0	0	0	0	0
Time scale -5%	49	17	5	25	44
Time scale +5%	27	39	12	23	43
DA/AD	0	52	24	33	22
Random noise 1%	0	0	0	0	0
Low pass filter 6kHz	0	0	0	0	9
Low pass filter 15kHz	0	0	0	0	0
Crop 5x100	0	0	0	0	0
Crop 10x100	1	0	0	0	0
Crop 10x500	1	1	0	0	0
Crop 10x1000	2	2	0	4	7
WGN	0	0	0	0	0
DWT	0	0	0	0	8
MP3 : 64 kbps	2	2	0	4	9
MP3 : 128 kbps	1	1	0	0	0
Jitter 1%	0	0	0	0	0
FLAC	0	0	0	0	0
Downsampling	0	0	0	0	0

ตารางที่ 5.8 ค่าความผิดพลาดของบิตลายน้ำจากผลการทดสอบอัลกอริทึมกับเพลง

ไทยสุนทราภรณ์

	เพลงทดสอบ ที่ 1	เพลงทดสอบ ที่ 2	เพลงทดสอบ ที่ 3	เพลงทดสอบ ที่ 4	เพลงทดสอบ ที่ 5
ไม่มีกร โจมตี	0	0	0	0	0
Time scale -5%	49	42	44	24	44
Time scale +5%	47	45	44	25	29
DA/AD	30	27	49	19	43
Random noise 1%	0	0	0	0	0
Low pass filter 6kHz	4	5	14	0	0
Low pass filter 15kHz	0	0	0	0	0
Crop 5x100	0	0	0	0	0
Crop 10x100	0	0	0	0	0
Crop 10x500	8	0	17	0	2
Crop 10x1000	9	12	19	0	4
WGN	4	0	0	0	0
DWT	0	6	0	3	0
MP3 : 64 kbps	9	13	0	6	7
MP3 : 128 kbps	7	11	0	4	0
Jitter 1%	4	0	0	0	0
FLAC	0	0	0	0	0
Downsampling	0	0	0	0	0

ตารางที่ 5.9 ค่าความผิดพลาดของบิตตายน้ําจากผลการทดสอบอัลกอริทึมกับเพลงไทยเดิม

	เพลงทดสอบ ที่ 1	เพลงทดสอบ ที่ 2	เพลงทดสอบ ที่ 3	เพลงทดสอบ ที่ 4	เพลงทดสอบ ที่ 5
ไม่มีการ โจมตี	0	0	0	0	0
Time scale -5%	17	13	8	1	16
Time scale +5%	7	17	3	6	12
DA/AD	27	37	5	47	12
Random noise 1%	0	0	0	0	0
Low pass filter 6kHz	0	0	0	0	0
Low pass filter 15kHz	0	0	0	0	0
Crop 5x100	0	0	0	0	0
Crop 10x100	0	0	0	0	0
Crop 10x500	0	0	0	0	0
Crop 10x1000	0	0	0	0	1
WGN	0	0	1	0	0
DWT	0	0	0	0	0
MP3 : 64 kbps	1	0	0	0	0
MP3 : 128 kbps	0	0	0	0	0
Jitter 1%	0	0	0	0	0
FLAC	0	0	0	0	0
Downsampling	0	0	0	0	0



ตารางที่ 5.10 ค่าความผิดพลาดของบิตลายน้ำจากผลการทดสอบอัลกอริทึมกับเพลงสากล Classics

	เพลงทดสอบ ที่ 1	เพลงทดสอบ ที่ 2	เพลงทดสอบ ที่ 3	เพลงทดสอบ ที่ 4	เพลงทดสอบ ที่ 5
ไม่มีการโจมตี	0	0	0	0	0
Time scale -5%	30	29	21	22	28
Time scale +5%	10	5	8	12	7
DA/AD	15	26	39	29	5
Random noise 1%	0	0	0	0	0
Low pass filter 6kHz	0	0	0	0	0
Low pass filter 15kHz	0	0	0	0	0
Crop 5x100	0	0	0	0	0
Crop 10x100	0	0	0	0	0
Crop 10x500	0	0	0	0	0
Crop 10x1000	0	1	0	0	2
WGN	0	26	0	9	0
DWT	0	0	0	0	0
MP3 : 64 kbps	0	0	0	0	0
MP3 : 128 kbps	0	0	0	0	0
Jitter 1%	0	0	0	0	0
FLAC	0	0	0	0	0
Downsampling	0	0	0	0	0

ตารางที่ 5.11 ค่าความผิดพลาดของบิตลายน้ำจากผลการทดสอบอัลกอริทึมกับเพลงสากล Pop

	เพลงทดสอบ ที่ 1	เพลงทดสอบ ที่ 2	เพลงทดสอบ ที่ 3	เพลงทดสอบ ที่ 4	เพลงทดสอบ ที่ 5
ไม่มีการโจมตี	0	0	0	0	0
Time scale -5%	58	54	39	41	20
Time scale +5%	50	48	37	42	10
DA/AD	52	32	30	31	18
Random noise 1%	0	3	0	0	0
Low pass filter 6kHz	0	5	0	0	0
Low pass filter 15kHz	0	0	0	0	0
Crop 5x100	0	0	0	0	0
Crop 10x100	0	0	0	0	0
Crop 10x500	0	0	0	0	0
Crop 10x1000	0	5	0	11	1
WGN	7	5	2	9	4
DWT	6	0	2	10	0
MP3 : 64 kbps	5	7	5	0	0
MP3 : 128 kbps	0	0	0	0	0
Jitter 1%	0	0	0	0	0
FLAC	0	0	0	0	0
Downsampling	0	0	0	0	0

ตารางที่ 5.12 ค่าความผิดพลาดของบิตลายน้ำจากผลการทดสอบอัลกอริทึมกับเพลงสากล Jazz

	เพลงทดสอบ ที่ 1	เพลงทดสอบ ที่ 2	เพลงทดสอบ ที่ 3	เพลงทดสอบ ที่ 4	เพลงทดสอบ ที่ 5
ไม่มีการโจมตี	0	0	0	0	0
Time scale -5%	26	17	30	17	31
Time scale +5%	29	14	29	26	17
DA/AD	22	24	35	26	35
Random noise 1%	0	0	0	0	0
Low pass filter 6kHz	1	0	0	0	0
Low pass filter 15kHz	0	0	0	0	0
Crop 5x100	0	0	0	0	0
Crop 10x100	0	0	0	0	0
Crop 10x500	0	0	0	0	0
Crop 10x1000	1	0	2	1	1
WGN	2	10	0	0	1
DWT	0	3	0	0	0
MP3 : 64 kbps	0	0	0	0	0
MP3 : 128 kbps	0	0	0	0	0
Jitter 1%	0	0	0	0	0
FLAC	0	0	0	0	0
Downsampling	0	0	0	0	0

ผลการทดสอบลายน้ำที่ตรวจจับได้ให้ค่าสหสัมพันธ์มากกว่า 0.9 ทุกกรณีการโจมตีและการประมวลผลสัญญาณตามที่ได้กำหนดไว้ในขอบเขตวิทยานิพนธ์ แสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึมที่นำเสนอให้ความทนทานต่อการโจมตีเป็นอย่างดี ในกรณีที่ลายน้ำมีค่าสหสัมพันธ์เท่ากับ 1 แสดงว่าลายน้ำที่ตรวจจับได้ไม่มีบิดผิดพลาด เป็นลายน้ำที่สมบูรณ์ ค่าสหสัมพันธ์มีค่าต่ำสุดที่ 0.902 ในส่วนการโจมตีแบบ Time scale modification -5% จากเพลง Love Is All Around ซึ่งเป็นการโจมตีในรูปแบบของการยืดหดสัญญาณ โดยทำการประมาณค่าของสัญญาณขึ้นมาใหม่ตามเวลาที่กำหนด -5% หมายถึง เวลาของสัญญาณเสียงที่ปกติ 30 วินาที จะลดลง 5% เหลือ 28.5 วินาที ซึ่งในการประมาณค่าสัญญาณขึ้นมาใหม่ข้อมูลของสัญญาณเสียงจะถูกคำนวณใหม่และแตกต่างจากค่าเดิมทำให้ส่งผลกระทบต่อสัมประสิทธิ์ลายน้ำที่ฝังอยู่ในสัญญาณเสียงเป็นอย่างมาก และในส่วนของ การโจมตีในรูปแบบ DA/AD หรือการแปลงดิจิทัลเป็นอนาล็อก และแปลงอนาล็อกเป็นดิจิทัล คือการบันทึกสัญญาณเสียงที่เปิดจากคอมพิวเตอร์ตัวที่หนึ่งผ่านสายสัญญาณและทำการบันทึกเสียงโดยคอมพิวเตอร์ตัวที่สองโดยการประมวลผลสัญญาณในรูปแบบนี้มีสัญญาณรบกวนทั้งจากสายส่งสัญญาณและอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ การกำหนดขอบเขตของสัญญาณในการบันทึกเป็นอีกเหตุผลหนึ่งที่ทำให้สัญญาณเสียงที่ได้จากการแปลง DA/AD มีความผิดพลาดของบิตลายน้ำมากขึ้น โดยอัลกอริทึมที่นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์สามารถสร้างลายน้ำที่มีความทนทานสูงและครอบคลุมทุกรูปแบบการโจมตีที่กำหนดไว้ในขอบเขตวิทยานิพนธ์

#### Maximum Capacity (Maximum load)

ในการฝังลายน้ำนั้น Capacity Load ที่มาก หรือจำนวนของบิตลายน้ำที่มากจะทำให้เกิด Distortion ซึ่งหมายถึงสัญญาณเสียงจะมีคุณภาพที่ต่ำหรือคุณภาพไม่ดี และส่งผลกระทบต่อ การโจมตีในรูปแบบของ Time scale modification ซึ่งลายน้ำไม่สามารถทนทานได้ อัลกอริทึมในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงถูกออกแบบให้ค่า Maximum load มีค่าอยู่ที่ 625 bit หรือ 21 bps เนื่องจากการโจมตีที่ทำการทดสอบในงานวิจัยนั้นมีผลต่อสัญญาณเสียงเป็นอย่างมาก เพื่อไม่ให้สัญญาณเสียงที่ได้มีค่า SNR และค่า Data pay load ที่ต่ำกว่ามาตรฐาน อัลกอริทึมจึงถูกออกแบบมาเพื่อรองรับการโจมตีโดยมี Maximum load มีค่าอยู่ที่ 625 bit หรือ 21 bps เพื่อส่งผลให้อัลกอริทึมมีประสิทธิภาพสูงสุด

### 5.3 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

พิจารณาผลการทดสอบความทนทานต่อการโจมตีของลายน้ำในรูปแบบต่าง ๆ ที่กำหนดไว้ในขอบเขตของวิทยานิพนธ์ โดยนำเสนออัลกอริทึมในการฝังลายน้ำที่มีความทนทานต่อการโจมตีและการประมวลผลสัญญาณที่พบในปัจจุบัน ผลที่ได้คือลายน้ำมีค่าการทำสหสัมพันธ์มากกว่า 0.9 ทุกรูปแบบการโจมตี ค่า SNR ถูกกำหนดไว้ที่ 21 เดซิเบล และมีค่า Data pay load เท่ากับ 21 bps ซึ่งผลที่ได้นั้นสอดคล้องกับข้อกำหนดของสมาพันธ์ผู้ผลิตสื่อบันทึกเสียงแห่งสหประชาชาติ (IFPI) โดยลายน้ำที่ตรวจจับได้มีความสมบูรณ์ ชัดเจน สามารถใช้ระบุความเป็นเจ้าของสื่อได้อย่างเด่นชัด แสดงให้เห็นถึงความสามารถของอัลกอริทึมที่นำเสนอ โดยเป็นการฝังลายน้ำซึ่งเป็นข้อมูลของผู้ที่เป็นเจ้าของสื่อลงบนสัมประสิทธิ์เวฟเล็ตที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยและใช้ค่าความเข้มของลายน้ำที่ได้จากกระบวนการค้นหาที่ดีที่สุดแบบพาร์ทิเคิลสวอมลายน้ำที่ได้จากอัลกอริทึมที่นำเสนอมีความทนทานที่สูง แต่จากการออกแบบอัลกอริทึมเพื่อให้รองรับกับการโจมตีในรูปแบบของ Time scale modification และ DA/AD ซึ่งทั้งสองรูปแบบส่งผลต่อคุณภาพของสัญญาณเสียงและความทนทานต่อสัญญาณลายน้ำเป็นอย่างมาก จึงทำให้ค่า SNR ถูกกำหนดไว้ที่ 21 เดซิเบลเพื่อรองรับการโจมตีทั้งสองรูปแบบ ในกระบวนการตรวจจับลายน้ำถูกออกแบบให้มีความง่ายและสะดวกต่อการแสดงความเป็นเจ้าของ โดยสัญญาณเสียงที่จะนำมาทำการตรวจจับลายน้ำสามารถดำเนินการได้โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพของสัญญาณ และไม่ต้องใช้สัญญาณเสียงต้นฉบับในกระบวนการตรวจจับ

## บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ศึกษาเกี่ยวกับการส่งถ่ายน้ำแบบปิด ใช้การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบพาร์ทิกิลสวอม (PSO) ในกระบวนการส่งถ่ายน้ำ โดยทำการค้นหาค่าความเข้มของถ่ายน้ำซึ่งเป็นตัวกำหนดคุณภาพของสัญญาณเสียงที่ทำการส่งถ่ายน้ำและความทนทานต่อการโจมตีของถ่ายน้ำที่ส่งตัวอยู่ โดยแบ่งการสรุปผลออกเป็น 5 ส่วน ตามกระบวนการทำงานหลักที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์

1) การวิเคราะห์สัญญาณด้วยการแปลงเวฟเล็ทแบบเต็มหน่วย การเลือกชนิดของเวฟเล็ทมีผลโดยตรงต่อคุณภาพของสัญญาณเสียงหลังจากทำการแปลงกลับให้อยู่ในโดเมนเวลา โดยส่งผลต่อค่า SNR ของสัญญาณเสียงและ SIM ของถ่ายน้ำ ชนิดของเวฟเล็ทที่มีสัมประสิทธิ์เวฟเล็ทหลายค่าจะใช้เวลาในการคำนวณที่มากซึ่งส่งผลกระทบต่อความเร็วในการคำนวณของ PSO การเลือกระดับในการแปลงที่เหมาะสมจะส่งผลให้สัญญาณเสียงที่ทำการส่งถ่ายน้ำมีคุณภาพที่ดี สัญญาณถ่ายน้ำมีความทนทานต่อการโจมตี และการประมวลผลสัญญาณ

2) อัลกอริทึมในการส่งถ่ายน้ำ ทำการส่งถ่ายน้ำในข้อมูลส่วน Detail Subband โดยการเลือกใช้การแปลงเวฟเล็ทในระดับที่สูงทำให้สัญญาณเสียงที่ทำการส่งถ่ายน้ำใน Detail Subband มีความทนทานต่อการโจมตีในรูปแบบต่าง ๆ ลดจำนวนของสัมประสิทธิ์เวฟเล็ทเพื่อลดเวลาในการคำนวณของ PSO และคุณภาพของสัญญาณเสียงอยู่ในเกณฑ์ดี อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่ IFPI กำหนด

3) การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบพาร์ทิกิลสวอม หลักการค้นหาแบบฝูง โดยอาศัยจุดกำเนิดหลายจุด มีแนวคิดมาจากหลักการหาอาหารของฝูงสัตว์ หรือเรียกว่า Particle Swarm Optimization (PSO) มาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ เพื่อแสดงถึงอัลกอริทึมในการทำงานที่ง่าย ให้ผลการค้นหาที่มีประสิทธิภาพตามข้อกำหนดที่ต้องการ โดยขึ้นอยู่กับข้อกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เหมาะสม โดยในวิทยานิพนธ์นี้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ถูกกำหนดจากค่าที่ใช้วัดคุณภาพเสียงต่อสัญญาณรบกวน (SNR) และค่าสหสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณถ่ายน้ำต้นฉบับกับสัญญาณถ่ายน้ำที่ทำการตรวจจับได้ (SIM) โดยค่าทั้งสองมีความขัดแย้งกันตามหลักในการส่งถ่ายน้ำ คือสัญญาณถ่ายน้ำเปรียบเสมือนสัญญาณรบกวน เมื่อมีการนำสัญญาณรบกวนมารวมเข้ากับสัญญาณเสียง จะทำให้คุณภาพของสัญญาณเสียงลดลง เมื่อต้องการความทนทานของถ่ายน้ำที่ดีสัญญาณเสียงที่ได้จะมี

คุณภาพที่ลดลง PSO จะทำการค้นหาค่าความเข้มของลายน้ำ โดยกำหนดเงื่อนไขให้อยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐาน IFPI กำหนดที่มากกว่าหรือเท่ากับ 20 dB และมีค่า SIM อยู่ในข้อกำหนดของวิทยานิพนธ์คือมากกว่า 0.9 ทุกรูปแบบการโจมตีตามที่กำหนด

4) การตรวจจับลายน้ำจากสัญญาณเสียง อัลกอริทึมที่นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ถูกออกแบบให้มีความสะดวกในการดำเนินงาน อัลกอริทึมมีความง่าย ไม่ซับซ้อน ไม่ต้องใช้สัญญาณเสียงต้นฉบับในกระบวนการตรวจจับลายน้ำ และไม่ต้องทำการปรับปรุงสัญญาณก่อนการตรวจจับ

5) คุณภาพของสัญญาณเสียงและความทนทานต่อการโจมตีของลายน้ำ ในอัลกอริทึมที่นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์สามารถสร้างลายน้ำที่มีความทนทานต่อการโจมตีในรูปแบบต่าง ๆ ลงในสัญญาณเสียงดิจิทัล โดยไม่ทำให้สัญญาณเสียงเกิดความผิดพลาด หรือเปลี่ยนไปจากต้นฉบับเมื่อทำการตรวจสอบโดยการฟัง สามารถนำไปใช้งานได้จริงซึ่งผู้รับฟังทั่วไปไม่สามารถรู้ได้ว่ามีลายอยู่ในสัญญาณเสียงที่กำลังฟัง

จากตัวอย่างการทดสอบ 60 ตัวอย่าง ทำการทดสอบทั้งหมด 17 รูปแบบการทดสอบ รวมทั้งหมด 1,020 ผลการทดสอบ ทำให้สามารถสรุปได้ว่า งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้สามารถสร้างลายน้ำบนสัญญาณเสียงดิจิทัลที่มีความทนทานต่อการโจมตีทางการประมวลผลสัญญาณในรูปแบบต่าง ๆ ที่พบมากที่สุดในปัจจุบัน และคุณภาพของสัญญาณเสียงที่ได้อยู่ในเกณฑ์ที่ดี ค่าสหสัมพันธ์อยู่ในขอบเขตที่กำหนดคือมากกว่า 0.9 เพื่อสามารถระบุ และยืนยันความเป็นเจ้าของผลงานได้อย่างชัดเจน ทำการทดสอบคุณภาพของสัญญาณเสียงที่ทำการฝังลายน้ำเปรียบเทียบกับสัญญาณเสียงต้นฉบับให้ข้อสังเกตว่าคุณภาพของสัญญาณไม่มีความแตกต่างกันจนสามารถรับรู้ได้จากการฟัง

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

1) ควรศึกษากระบวนการทำงาน เทคนิคต่าง ๆ ในการเพิ่มคุณภาพของสัญญาณเสียง เพื่อให้ค่า SNR ของสัญญาณมีค่ามากขึ้น โดยที่ความทนทานต่อการโจมตียังคงอยู่เท่าเดิม

2) เพื่อเพิ่มความเร็วในกระบวนการค้นหาค่าเหมาะสมที่สุดของ PSO พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทำงานควรใช้ให้เหมาะสมโดยคำนึงถึงคุณลักษณะที่แตกต่างกันของสัญญาณเสียงแต่ละแบบเพื่อความเร็วในการหาคำตอบและความละเอียดในการค้นหาที่เหมาะสม และขึ้นอยู่กับความสามารถของอุปกรณ์ประมวลผล

3) การโจมตีและการประมวลผลสัญญาณในปัจจุบันมีการพัฒนาอยู่เสมอ ดังนั้นการพัฒนาอัลกอริทึมเพื่อให้สามารถรองรับการโจมตีและประมวลผลสัญญาณรูปแบบใหม่ ๆ จึงเป็นสิ่งจำเป็น

## รายการอ้างอิง

ผศ.ดร. อาทิตย์ ศรีแก้ว “ปัญหาประดิษฐ์เชิงคำนวณ” ครั้งที่ 1 หน้า 141-183 พ.ศ. 2552

Changsheng Xu, Jiankang Wu and Qibin Sun (1999) “A Robust Digital Audio Watermarking Technique”. **Fifth International Symposium on Signal Processing and its Applications, ISSPA 99,**

Shao Ya-fei, Wu Guo-wei and Lin Xing-gang (2001) . “A Wavelet Based Adaptive Watermarking Algorithm” **IEEE 0-7803-7010-4/01**

Jiwu Huang, Young Wang and Yun Q. Shi (2002) “A Blind Audio Watermarking Algorithm With Self- Synchronization”. **IEEE International Symposium on Circuits and Systems 2002.3:** 627-630

Xueyao Li, Min Zhang and Shillang Sun, (2003) “Adaptive Audio Watermarking Algorithm Based on SNR in Wavelet domain” . **Natural Language Processing and Knowledge Engineering.** 287– 292.

Jianzhen Wu and Jianying Xie (2003) “Blind wavelet – base watermarking scheme using fuzzy clustering” **Neural networks and Signal Prrocessing.2:** 1521 – 1524

Wei Li, Xiangyang Xue, Xiaoqiang Li and Peizhong Lu (2003) “A Novel Feature-Based Robust Audio Watermarking for Copyright Protection”. **Proceedings of the International Conference on Information Technology: Computer and Communication (ITCC'03)**

Lili Cui, Shu-xun Wang and Tanfeng Sun (2003) “The Application of binary image in digital audio watermarking”. **Neural networks and Signal Prrocessing.2:** 1497 – 1500(IEEE 0-7803-7702-8/03)

Ronghui Tu and Jiying Zhao (2003) “A novel Semi-Fragle Audio Watermarking Scheme”. **Audio and Visual Enviroments and Their Application. :** 89-94.

S. Wu, J. Huang, D. Huang and Y. Q. Shi (2005)., “Efficiently Self-Synchronized Audio Watermarking for Assured Audio Data Transmission, **IEEE Transactions on Broadcasting, vol 51, no. 1, pp. 69 - 76 Mar**



- N. Sriyingyong and K. Attakitmongkol (2006) “Wavelet – Base Digital Audio Watermarking Using Adaptive Tabu Search”. **IEEE(0-7803-9410-0/06)**
- B. Charmchamras, S. Kaengin, S. Airphaiboon and M. Sangworasil,(2007) Audio Watermarking Technique using Binary Image in Wavelet Domain, **Information, Communications & Signal Processing, 2007 6th International Conference IEEE(1-4244-0983-7/07)**, 1 – 3
- Veysel Aslantas, A. Latif Dogan and Serkan Ozturk,(2008). DWT – SVD BASE IMAGE WATERMARKING USING PARTICLE SWARM OPTIMIZER. **Multimedia and Expo, 2008 IEEE International Conference. : 241 – 244.**
- Satid Vongpraphip and Mahasak Ketcham, (2009). An Intelligence Audio Watermarking Based on DWT- SVD Using ATS. **Intelligent Systems, 2009. GCIS '09. WRI Global Congress IEEE International Conference.:** 150 – 154.
- Baiying Lei, IngYan Soon, Zhen Li and Peng Dai, (2011) A Particle Swarm Optimization Based Audio Watermarking Scheme. **Communications and Signal Processing (ICICS) 2011 8th International Conference. : 1 – 4.**
- Ali Al – Haj and Ahmad Mohamad, (2010) Digital Audio Watermarking Based on The Discrete Wavelets Transform and Singular Value Decomposition. **European Journal of Scientific Research, 6 - 21**
- Prayoth Kumsawat. (2010) An Efficient digital Audio Watermarking Scheme Based on Genetic Algorithm. **Communications and Information Technologies (ISCIT), 2010 International Symposium. : 481 - 485**
- Zhang Yongping. (2011) Digital Watermarking for Digital Audio Signal Based on DWT. **Internet Technology and Applications (iTAP), 2011 International Conference. : 1 - 4**
- Wei Li and Xiangyang Wue. (2004) Audio Watermarking Based on Music Content Analysis : Robust against Time Scale Modification. **Springer – Verlag Berlin Heidelberg 2004 : 289 – 300**

ภาคผนวก ก

ข้อมูลเพลงที่ใช้ในงานวิจัย



สัญญาณเสียงที่นำมาทำการทดสอบนั้นมีทั้งหมด 6 ชนิด คือ ไทยลูกทุ่ง, ไทยสุนทราภรณ์, ไทยเดิม, Classics, Jazz, Pop ชนิดละ 10 บทเพลง รวมทั้งหมด 60 บทเพลงแต่ละบทเพลงมีความยาว 30 วินาที



ตารางที่ ก.1 รายชื่อเพลงไทยลูกทุ่ง

ลำดับ	ชื่อเพลง	ศิลปิน
เพลงทดสอบที่ 1	ไก่อ้า	สายันท์ สัญญา
เพลงทดสอบที่ 2	แพร์บสนามรัก	มนต์แคน แก่นคูณ
เพลงทดสอบที่ 3	สายลมฟุ้งว่าน้องลิ้ม	มนต์แคน แก่นคูณ
เพลงทดสอบที่ 4	ฮักสาวขอนแก่น	พนม นพพร
เพลงทดสอบที่ 5	ฝันยังไกล ใจยังหวัง	ต่าย อรทัย
เพลงทดสอบที่ 6	ให้ใจอย่าให้เจ็บ	ต่าย อรทัย
เพลงทดสอบที่ 7	หัวใจที่ถูกอายทิ้ง	ต่าย อรทัย
เพลงทดสอบที่ 8	ไม่คิดว่าเธอมีคาว	ลูกแพร์ ใหมไทย
เพลงทดสอบที่ 9	รักคนโทรมมาจ้งเลย	พีสะเดิด
เพลงทดสอบที่ 10	ด่วนแม่กลอง	ยอดรัก สลักใจ

ตารางที่ ก.2 รายชื่อเพลงไทยสุนทราภรณ์

ลำดับ	ชื่อเพลง	ศิลปิน
เพลงทดสอบที่ 1	สุขกันเถอะเรา	แกรมมี่ โกลด์ ซีรีส์ สุนทราภรณ์
เพลงทดสอบที่ 2	พลอร์เฟื่องฟ้า	แกรมมี่ โกลด์ ซีรีส์ สุนทราภรณ์
เพลงทดสอบที่ 3	คนเรารักกันยาก	แกรมมี่ โกลด์ ซีรีส์ สุนทราภรณ์
เพลงทดสอบที่ 4	ชื่นชีวิต	แกรมมี่ โกลด์ ซีรีส์ สุนทราภรณ์
เพลงทดสอบที่ 5	ดาวล้อมเดือน	แกรมมี่ โกลด์ ซีรีส์ สุนทราภรณ์
เพลงทดสอบที่ 6	พรหมลิขิต	แกรมมี่ โกลด์ ซีรีส์ สุนทราภรณ์
เพลงทดสอบที่ 7	สวัสดิ์ปิใหม่	แกรมมี่ โกลด์ ซีรีส์ สุนทราภรณ์
เพลงทดสอบที่ 8	ริมฝั่งน้ำ	แกรมมี่ โกลด์ ซีรีส์ สุนทราภรณ์
เพลงทดสอบที่ 9	นางฟ้าจำแลง	แกรมมี่ โกลด์ ซีรีส์ สุนทราภรณ์
เพลงทดสอบที่ 10	ทำน้ำ	แกรมมี่ โกลด์ ซีรีส์ สุนทราภรณ์

ตารางที่ ก.3 รายชื่อเพลงไทยเดิม

ลำดับ	ชื่อเพลง	ศิลปิน
เพลงทดสอบที่ 1	แขกสาย	มโหรี พิธีมงคลสมรส
เพลงทดสอบที่ 2	เขมรพายเรือ	มโหรี พิธีมงคลสมรส
เพลงทดสอบที่ 3	ตบนิทราชาคริต	มโหรี พิธีมงคลสมรส
เพลงทดสอบที่ 4	เขมรพวง	มโหรี พิธีมงคลสมรส
เพลงทดสอบที่ 5	ตบวิวาท้พระสมุทร	มโหรี พิธีมงคลสมรส
เพลงทดสอบที่ 6	นางนาค-มหาฤกษ์-มหาชัย	มโหรี พิธีมงคลสมรส
เพลงทดสอบที่ 7	หลังน้ำพระพุทธรมนต์	มโหรี พิธีมงคลสมรส
เพลงทดสอบที่ 8	จับไม้บัณเฑาะว์	ไทยเดิม มโหรี
เพลงทดสอบที่ 9	ลมพัดชายเขา	ไทยเดิม มโหรี
เพลงทดสอบที่ 10	สร้อยเพชร	ไทยเดิม มโหรี

ตารางที่ ก.4 รายชื่อเพลง Classics

ลำดับ	ชื่อเพลง	ศิลปิน
เพลงทดสอบที่ 1	Confutatis	Gert Frischmuth
เพลงทดสอบที่ 2	Benedictus	Gert Frischmuth
เพลงทดสอบที่ 3	Kyrie	Gert Frischmuth
เพลงทดสอบที่ 4	Lacrimosa	Gert Frischmuth
เพลงทดสอบที่ 5	Requiem	Gert Frischmuth
เพลงทดสอบที่ 6	Allegro in D major	Monteverdi Choir
เพลงทดสอบที่ 7	Romance in D major	Monteverdi Choir
เพลงทดสอบที่ 8	Rondo in D major	Monteverdi Choir
เพลงทดสอบที่ 9	Allegro in B flat major	Jenö Jandó
เพลงทดสอบที่ 10	Larghetto in B flat major	Jenö Jandó

ตารางที่ ก.5 รายชื่อเพลง Pop

ลำดับ	ชื่อเพลง	ศิลปิน
เพลงทดสอบที่ 1	Love Is All Around	Wet Wet Wet
เพลงทดสอบที่ 2	She's Out Of My Life	Josh Groban
เพลงทดสอบที่ 3	Thinking Of You	Katy Perry
เพลงทดสอบที่ 4	What Can I Do	The Corrs
เพลงทดสอบที่ 5	That's Why You Go Away	Michael Learns To Rock
เพลงทดสอบที่ 6	Don't Know Why	Norah Jones
เพลงทดสอบที่ 7	Cherish	Kool & The Gang
เพลงทดสอบที่ 8	Tonight I Celebrate My Love	Peabo Bryson
เพลงทดสอบที่ 9	Nothing Compares to you	Sinead O'Connor
เพลงทดสอบที่ 10	Ocean Deep	Cliff Richard

ตารางที่ ก.6 รายชื่อเพลง Jazz

ลำดับ	ชื่อเพลง	ศิลปิน
เพลงทดสอบที่ 1	I Love You for Sentimental Reasons	Nat King Cole
เพลงทดสอบที่ 2	Blue Moon	Robert De Niro & Liza Minnelli
เพลงทดสอบที่ 3	Look for the Silver Lining	Chet Baker
เพลงทดสอบที่ 4	Fly Me to the Moon	Julie London
เพลงทดสอบที่ 5	Love Is A Many Splendored Thing	Joe Lovano & Joshua Redman
เพลงทดสอบที่ 6	Dream A Little Dream Of Me	Nat King Cole
เพลงทดสอบที่ 7	Moon River	Nancy Wilson
เพลงทดสอบที่ 8	Can't Take My Eyes Off You	Vikki Carr
เพลงทดสอบที่ 9	Misty	Julie London
เพลงทดสอบที่ 10	Mission Impossible	Billy May

ภาคผนวก ข

รูปภาพลายน้ำที่ใช้ในงานวิจัย  
และรูปภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้เมื่อผ่านการโจมตีแบบต่าง ๆ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ ข.1 รูปภาพลายน้ำที่ใช้ในงานวิจัย

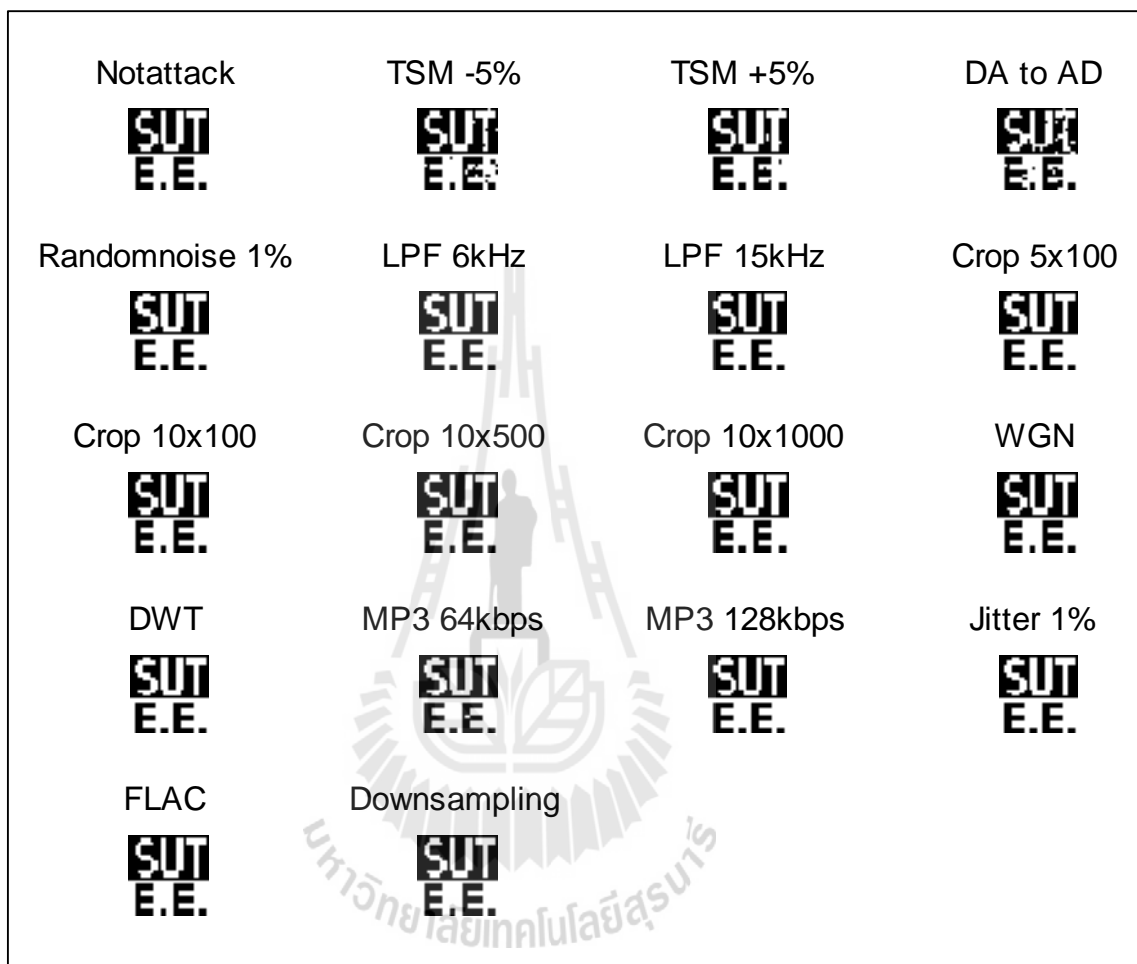
รูปภาพลายน้ำที่ใช้ในงานวิจัยเป็นรูปภาพขาวดำ มีขนาด 25x25 Pixel โดยที่ SUT มีความหมายคือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และ EE หมายถึงสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า





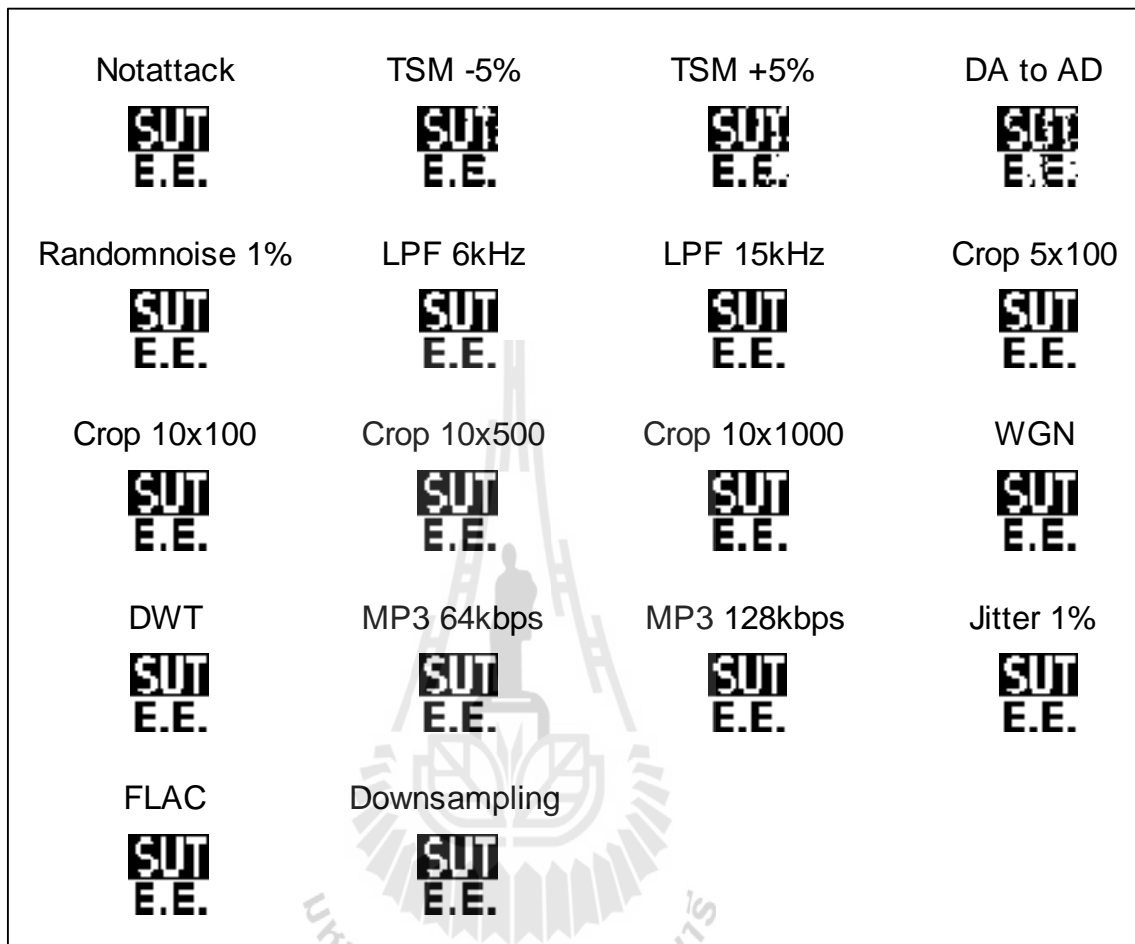
## รูปภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้เมื่อผ่านการโจมตีแบบต่าง ๆ

เพลงแขกสาย



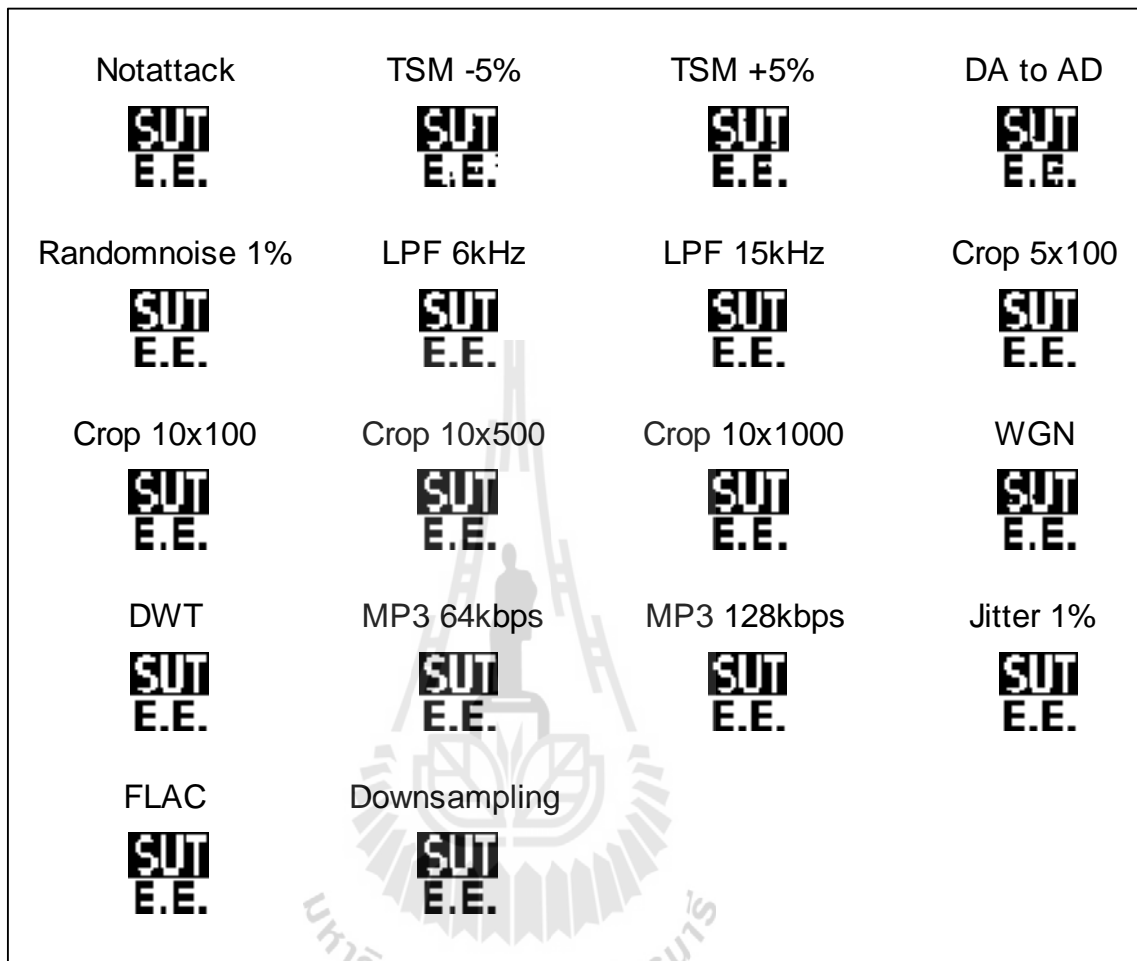
รูปที่ ข.2 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการโจมตีเพลงแขกสาย

## เพลงเขมรพายเรือ



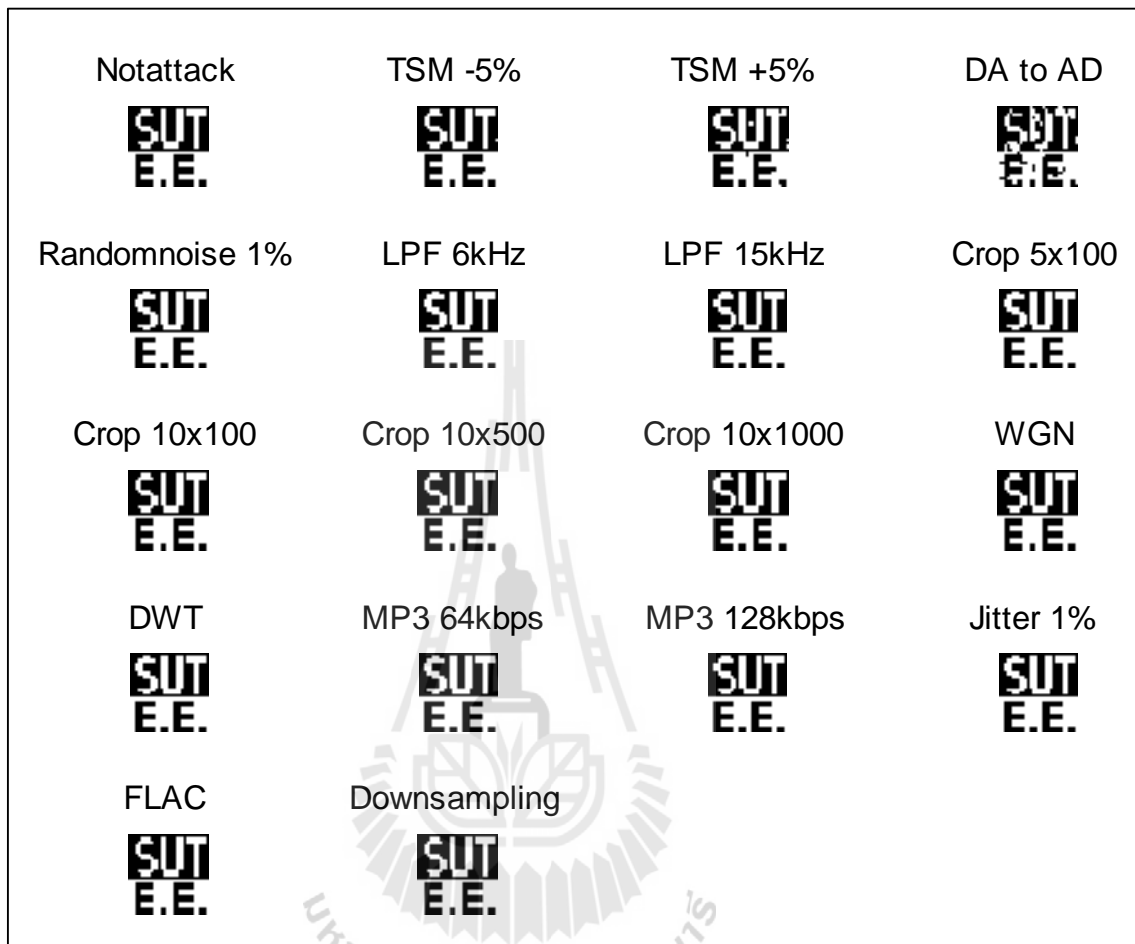
รูปที่ ข.3 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลงเขมรพายเรือ

## เพลงต้นนิทราชาคริต



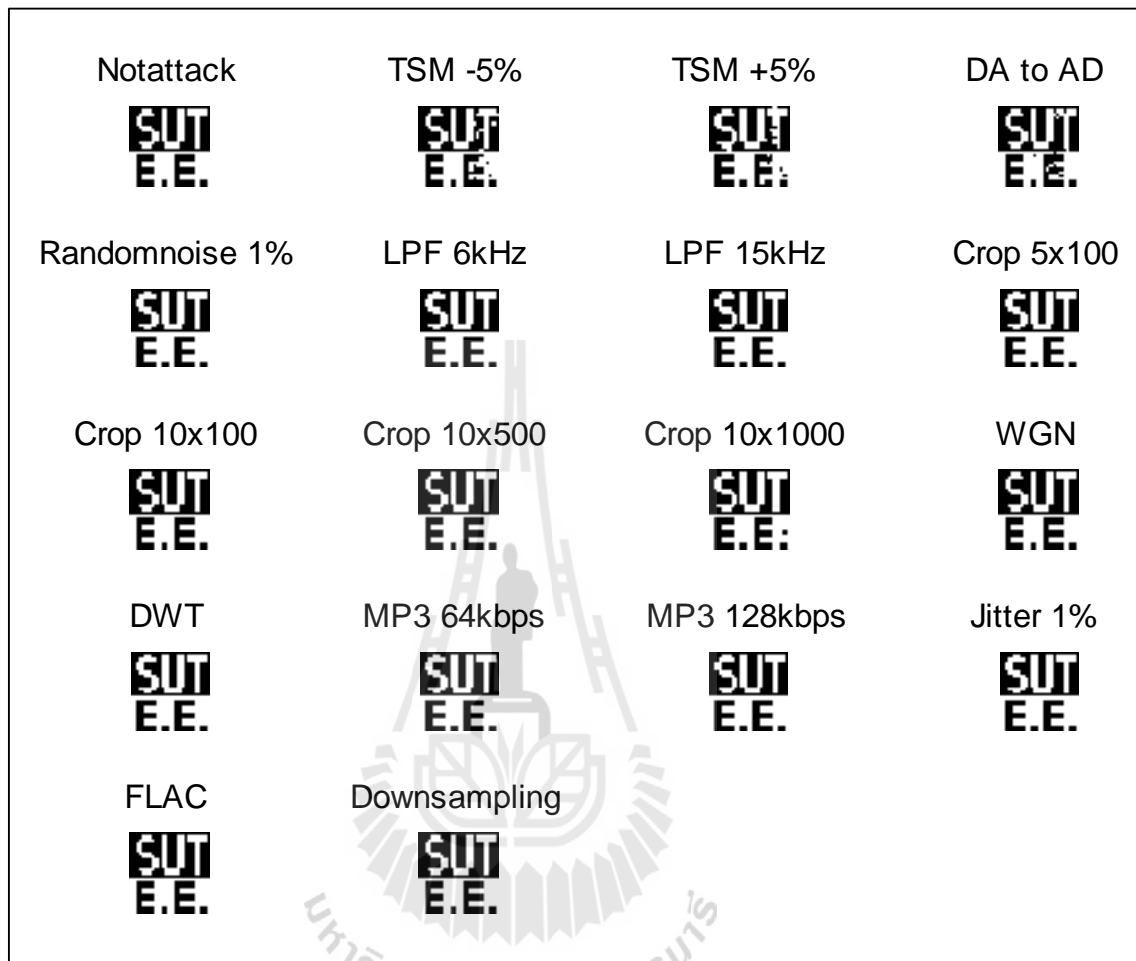
รูปที่ ข.4 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลงต้นนิทราชาคริต

## เพลงเขมรพวง



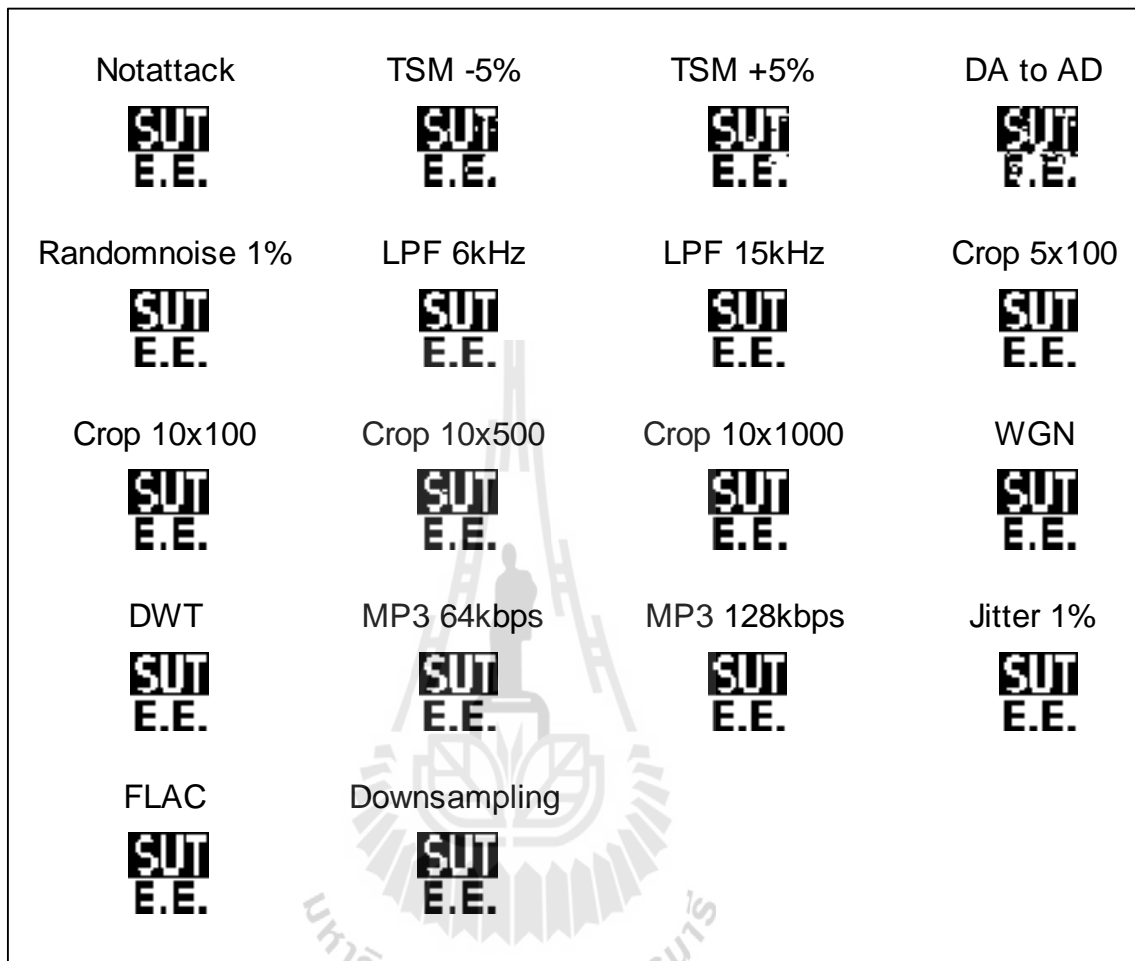
รูปที่ ข.5 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลงเขมรพวง

## เพลงตับวิวาท์พระสมุทร



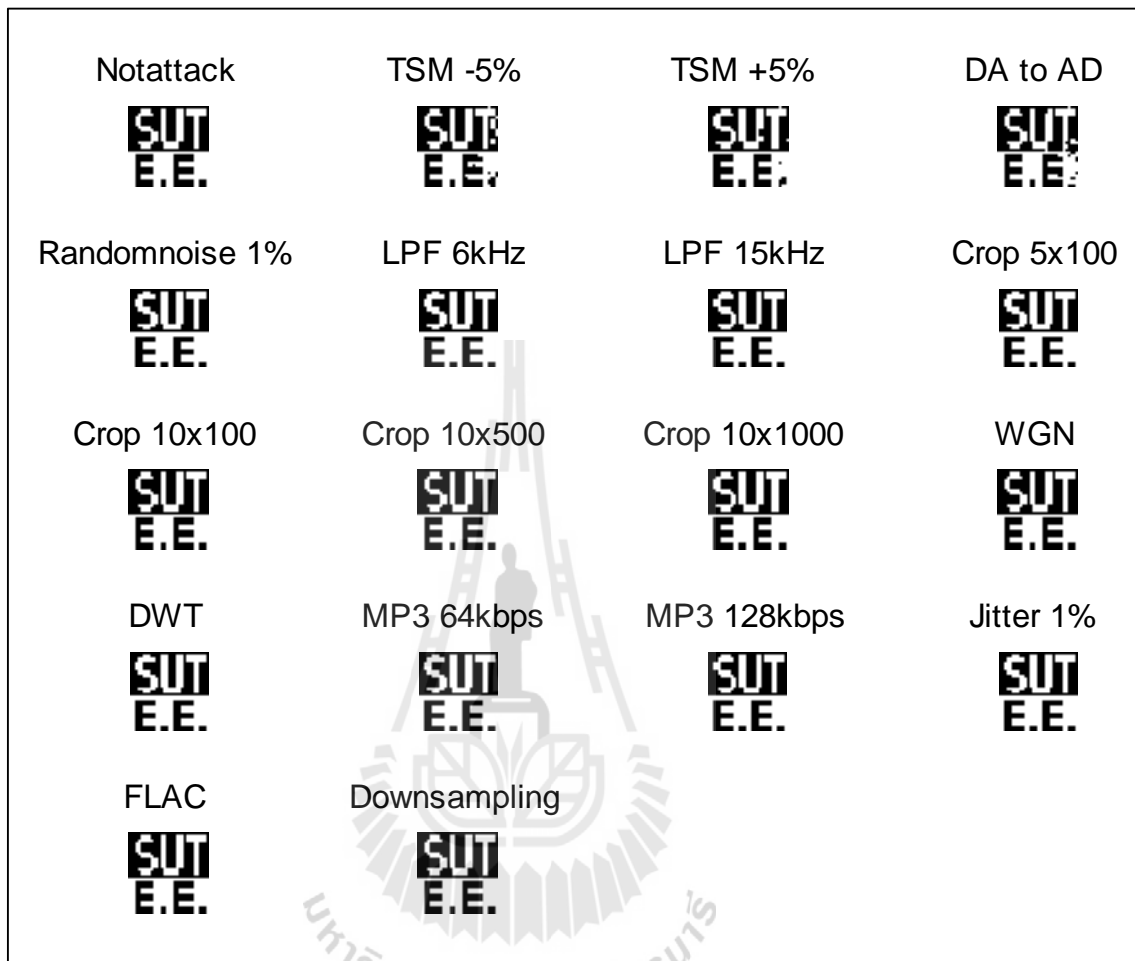
รูปที่ ข.6 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลงตับวิวาท์พระสมุทร

## เพลงมหาฤกษ์-มหาชัย



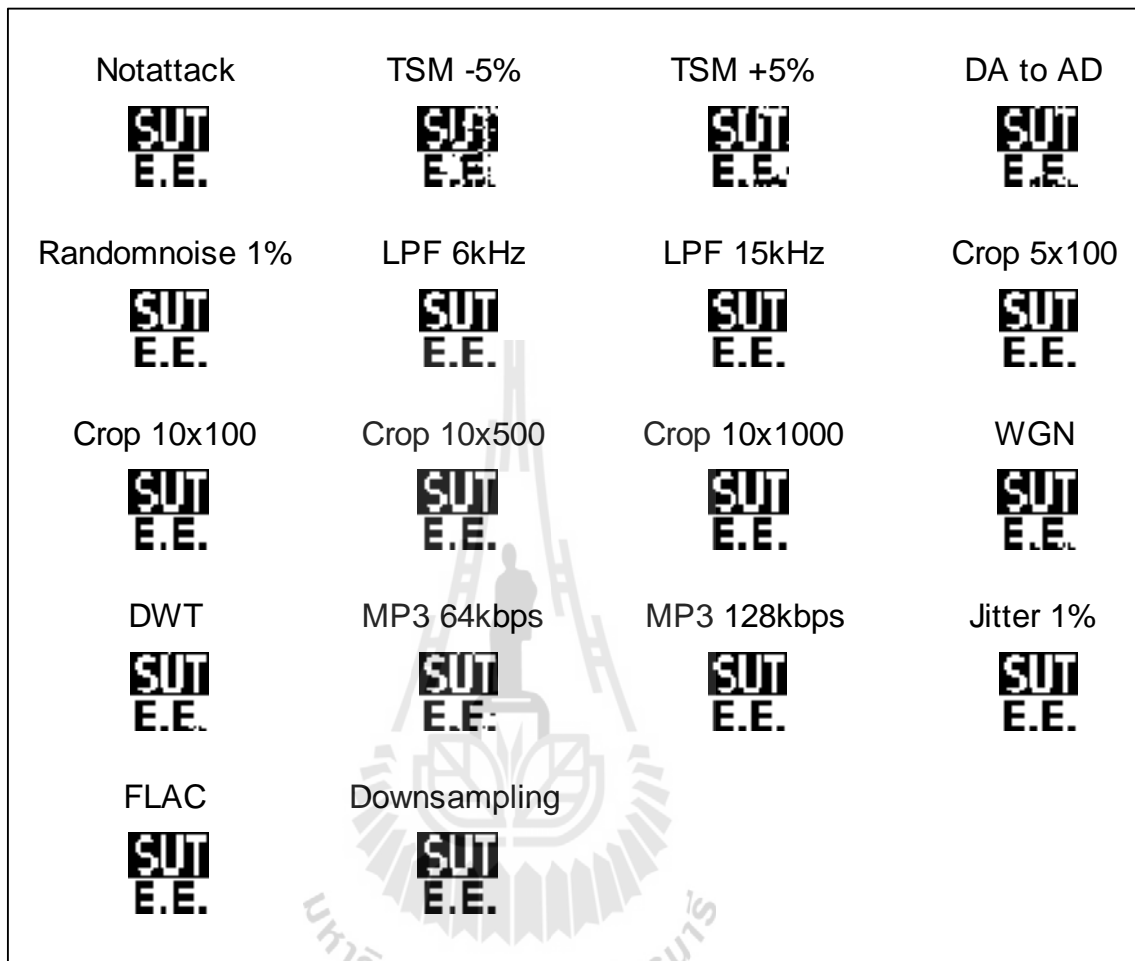
รูปที่ ข.7 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีมหาฤกษ์-มหาชัย

## เพลงหลังน้ำพระพุทธรมณฑ์



รูปที่ ข.8 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลงหลังน้ำพระพุทธรมณฑ์

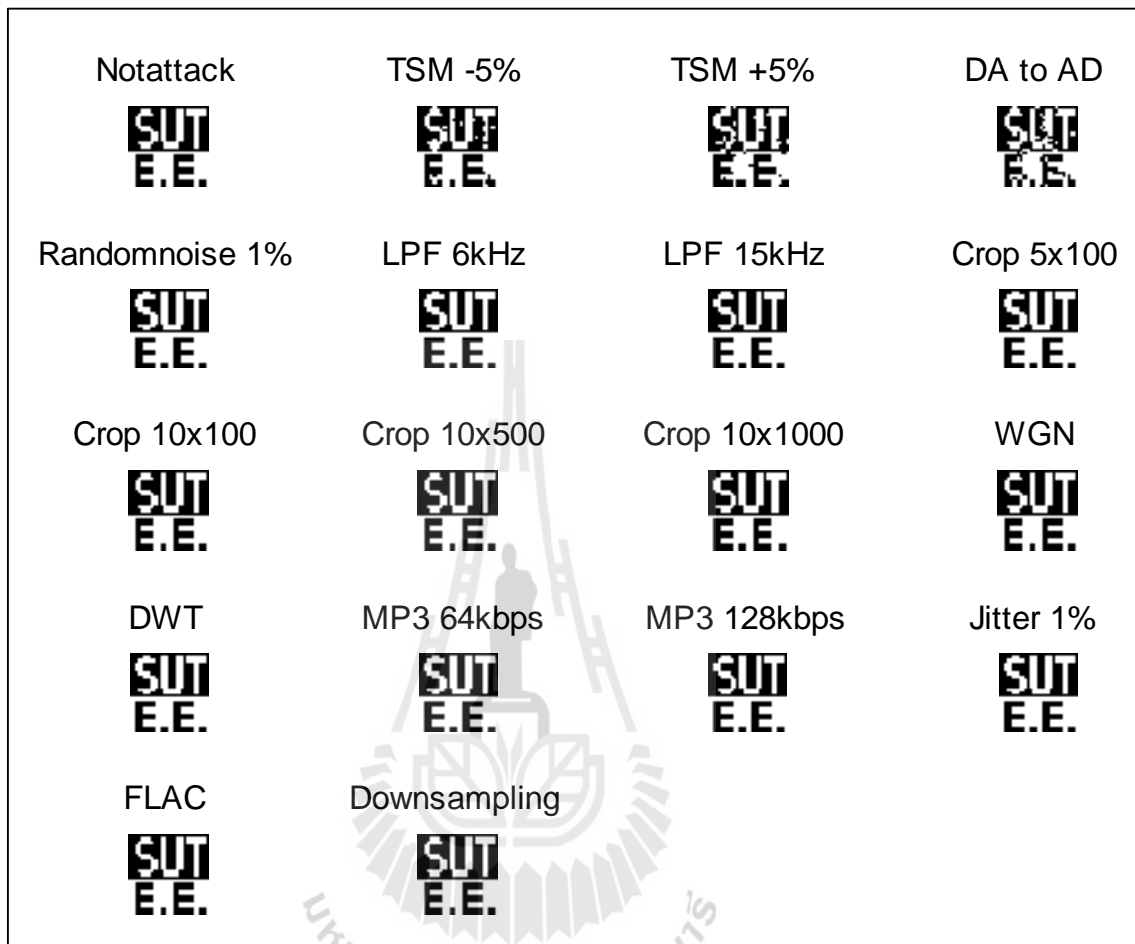
## เพลงขับไม้บัณเฑาะว์



รูปที่ ข.9 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการโจมตีเพลงขับไม้บัณเฑาะว์

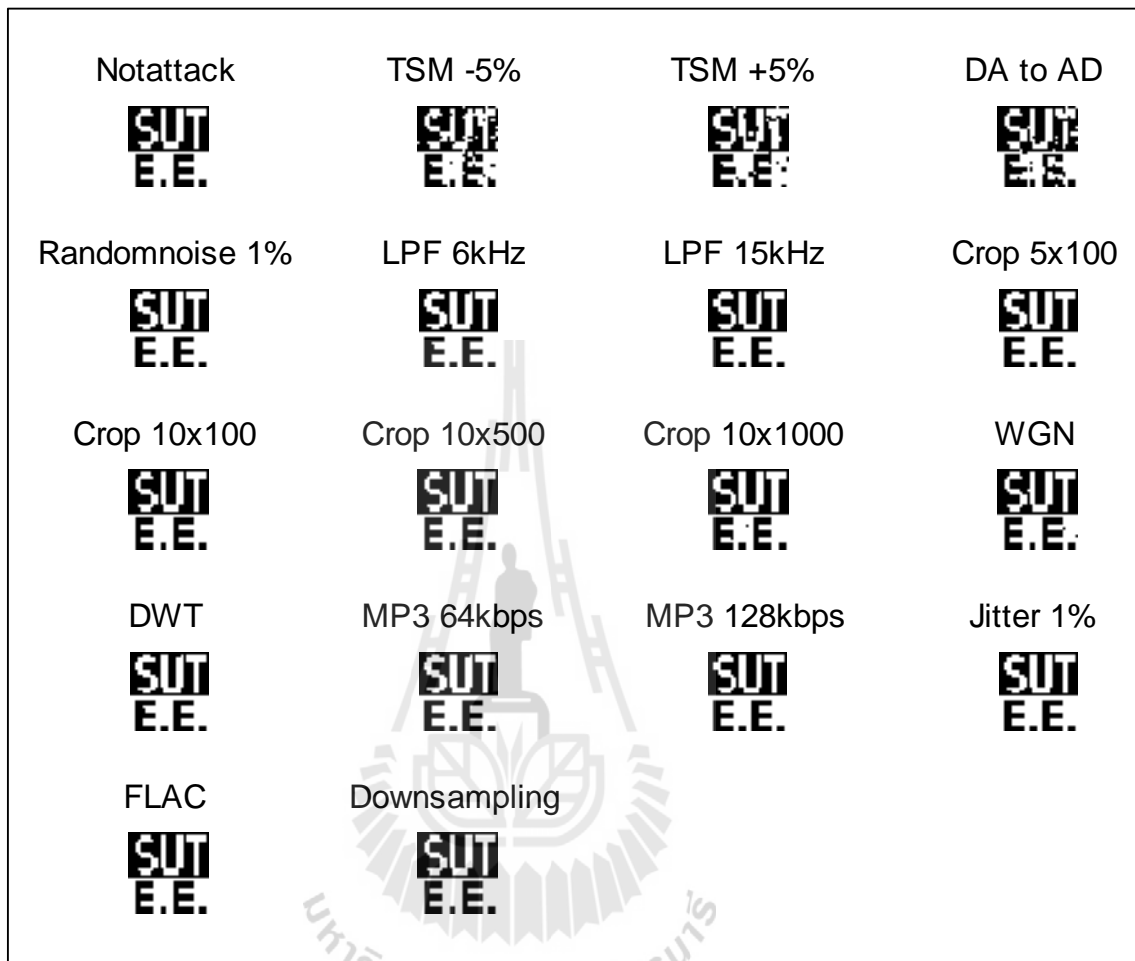


## เพลงลมพัดชายเขา



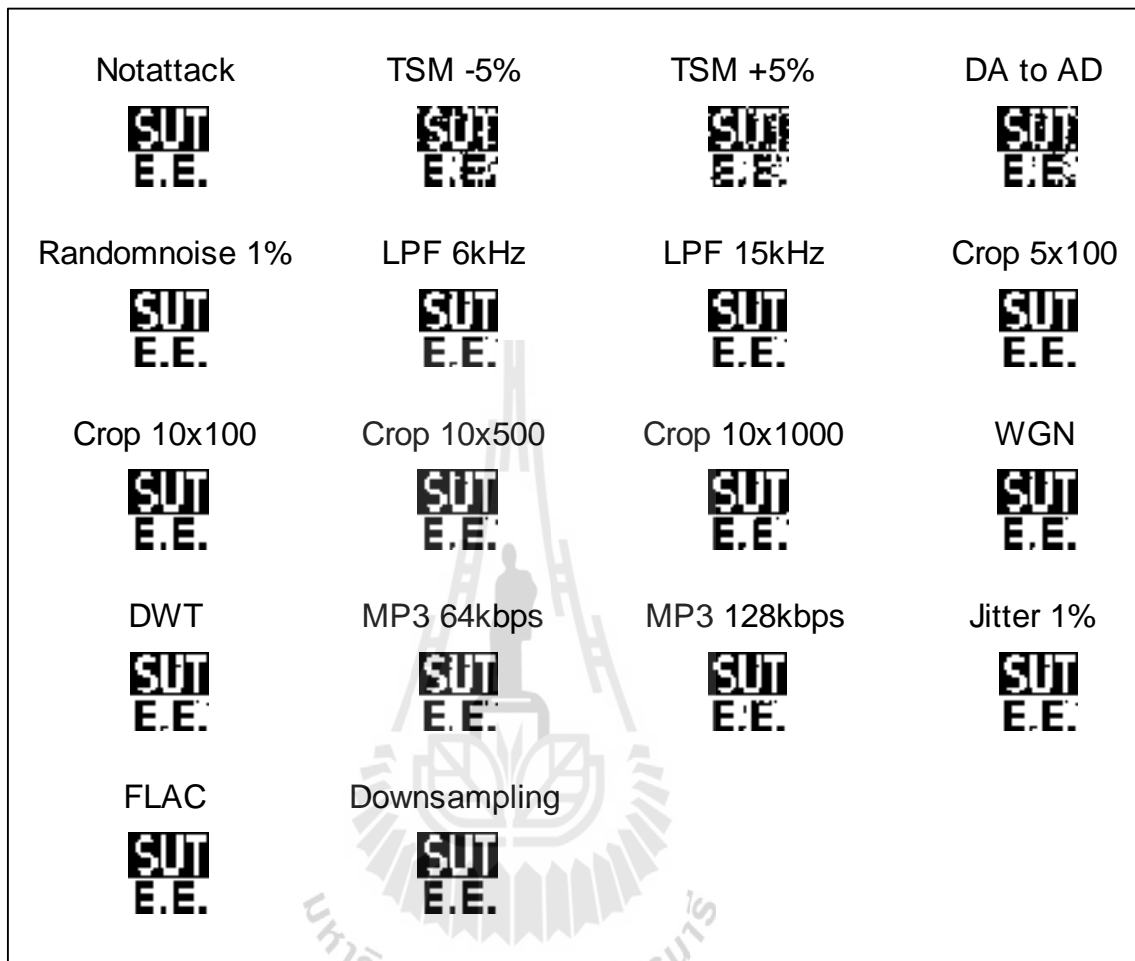
รูปที่ ข.10 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลงลมพัดชายเขา

## เพลงสร้อยเพชร



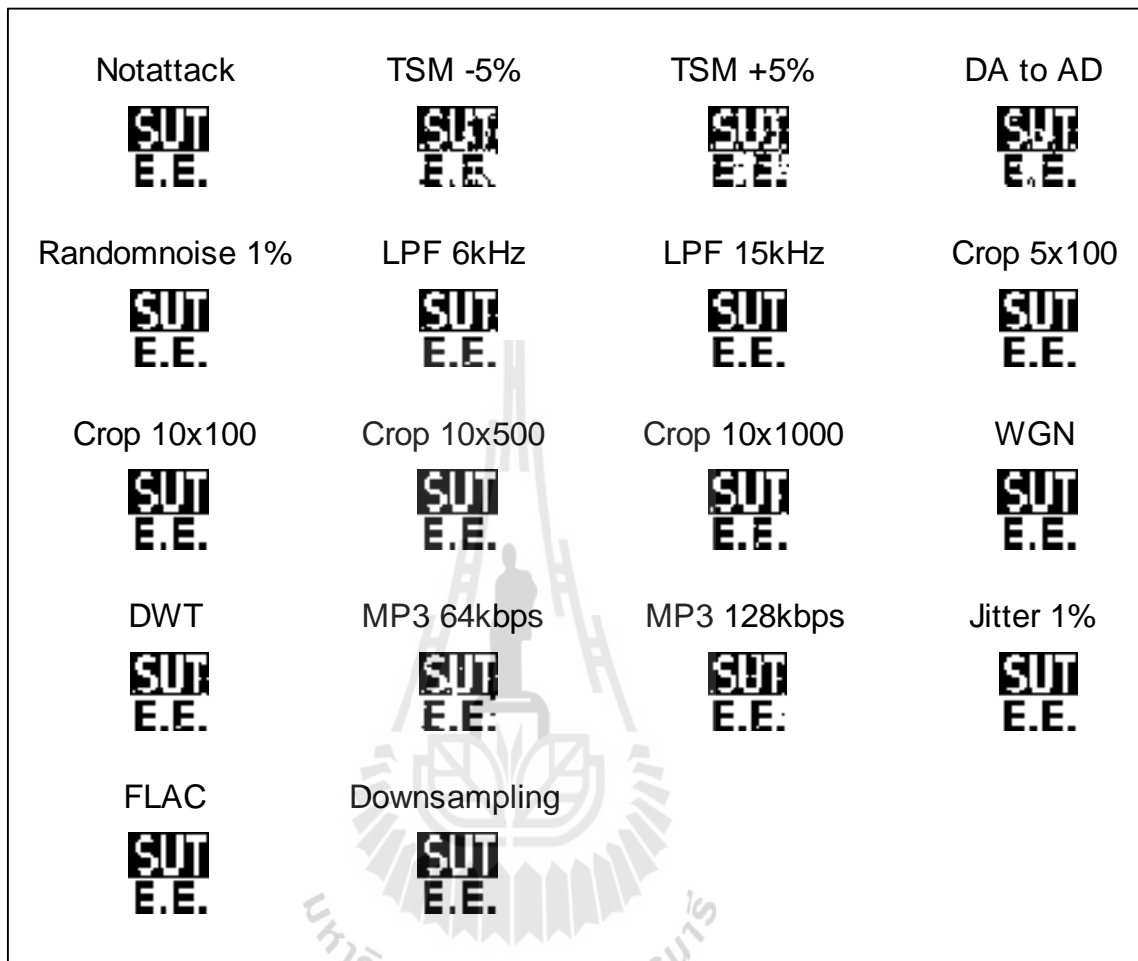
รูปที่ ข.11 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการโจมตีเพลงสร้อยเพชร

## เพลงสุกกันเถอะเรา



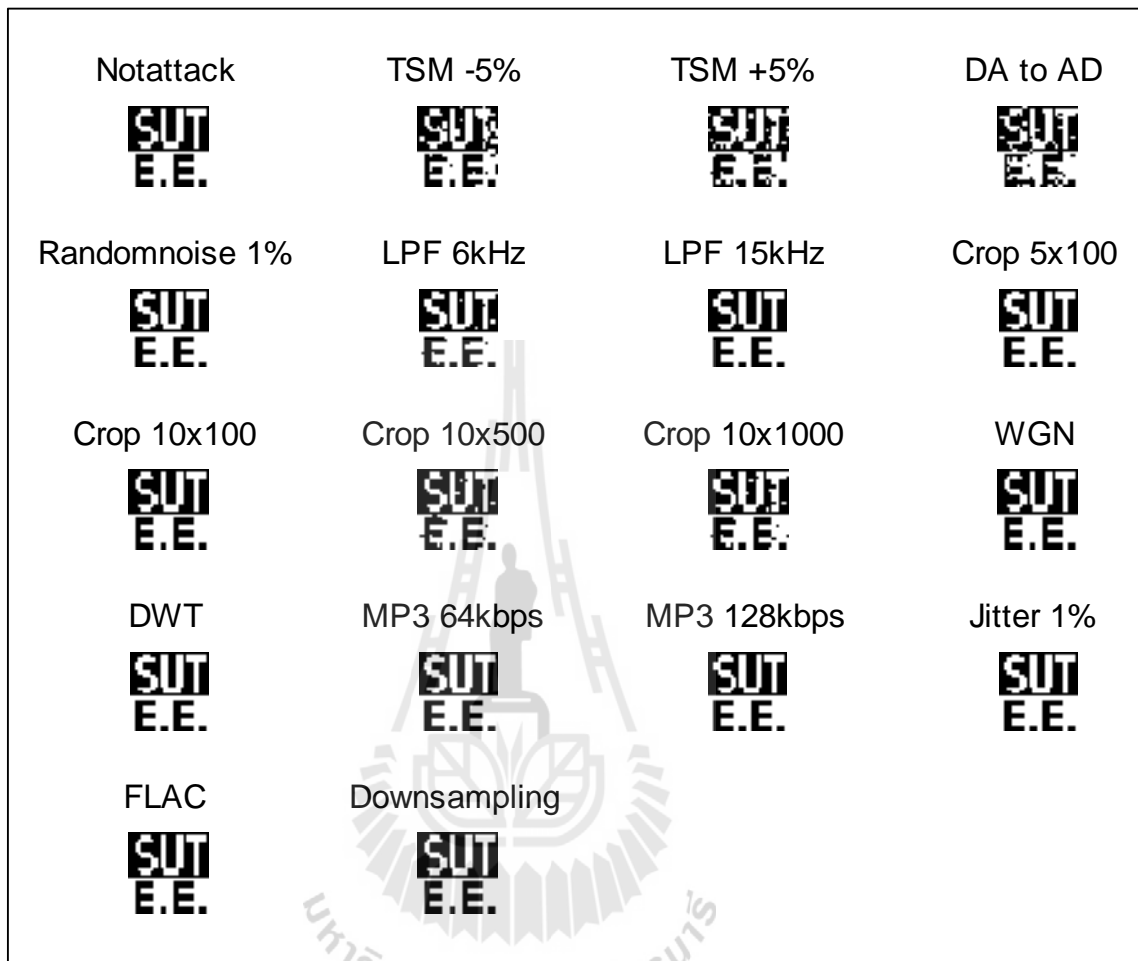
รูปที่ ข.12 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการโจมตีเพลงสุกกันเถอะเรา

## เพลงฟลอร์เฟื่องฟ้า



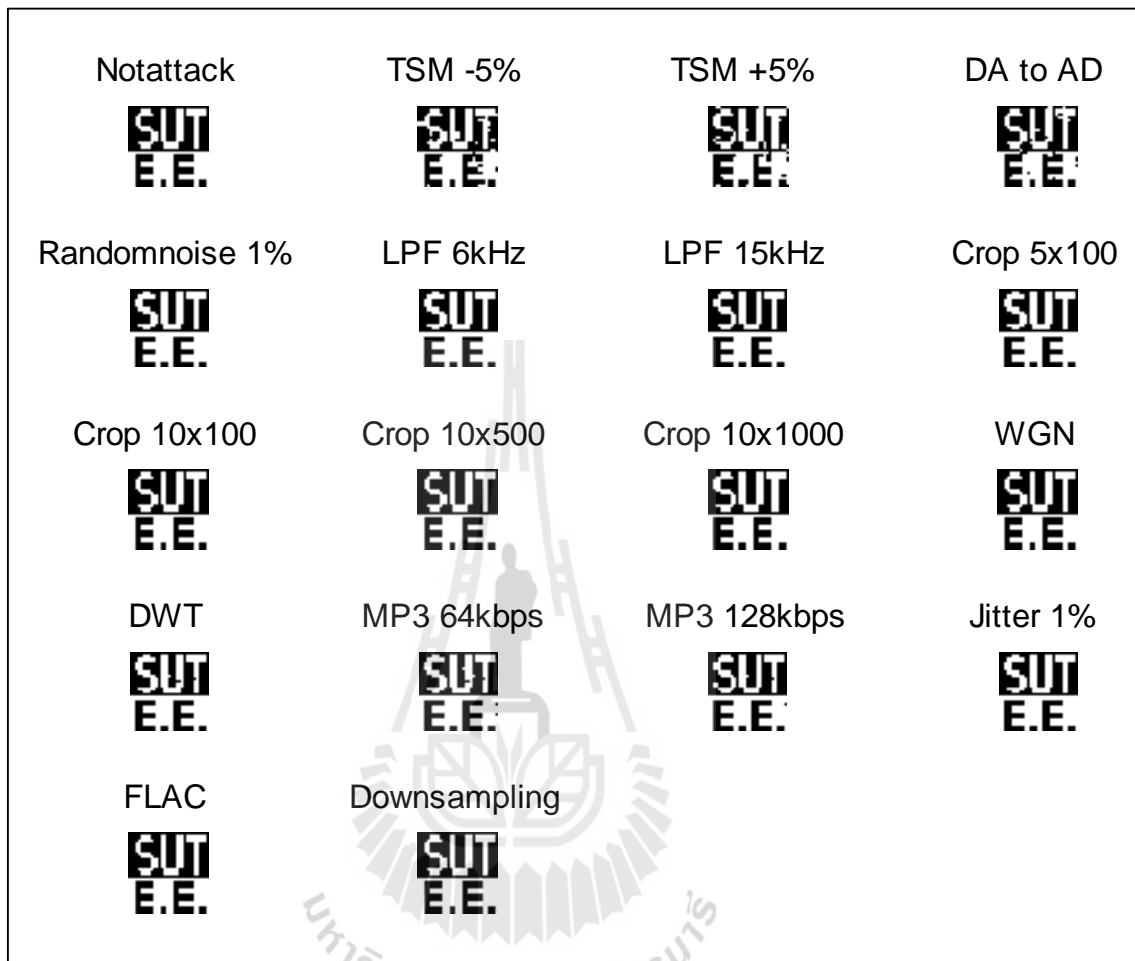
รูปที่ ข.13 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลงฟลอร์เฟื่องฟ้า

## เพลงคนเรารักกันยาก



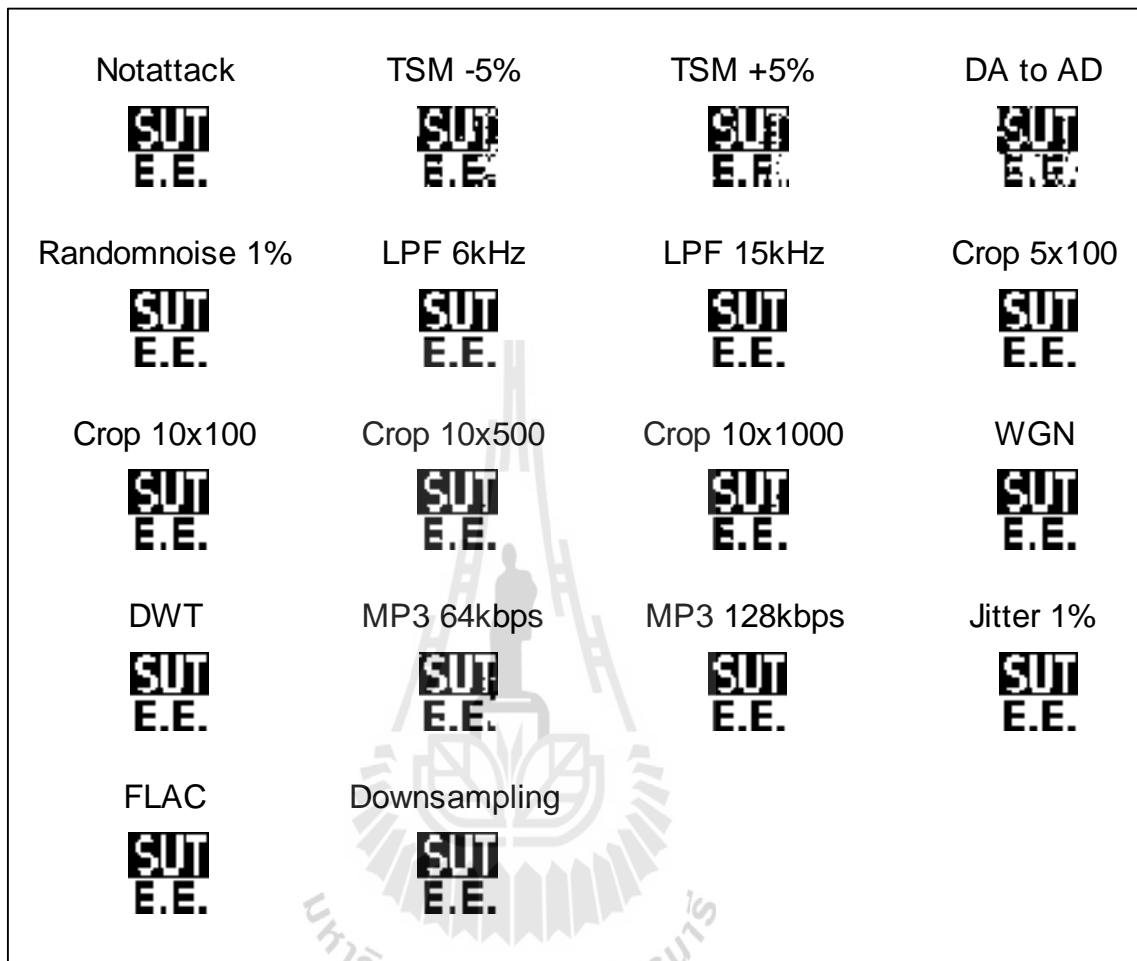
รูปที่ ข.14 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลงคนเรารักกันยาก

## เพลงชั้นชีวิต



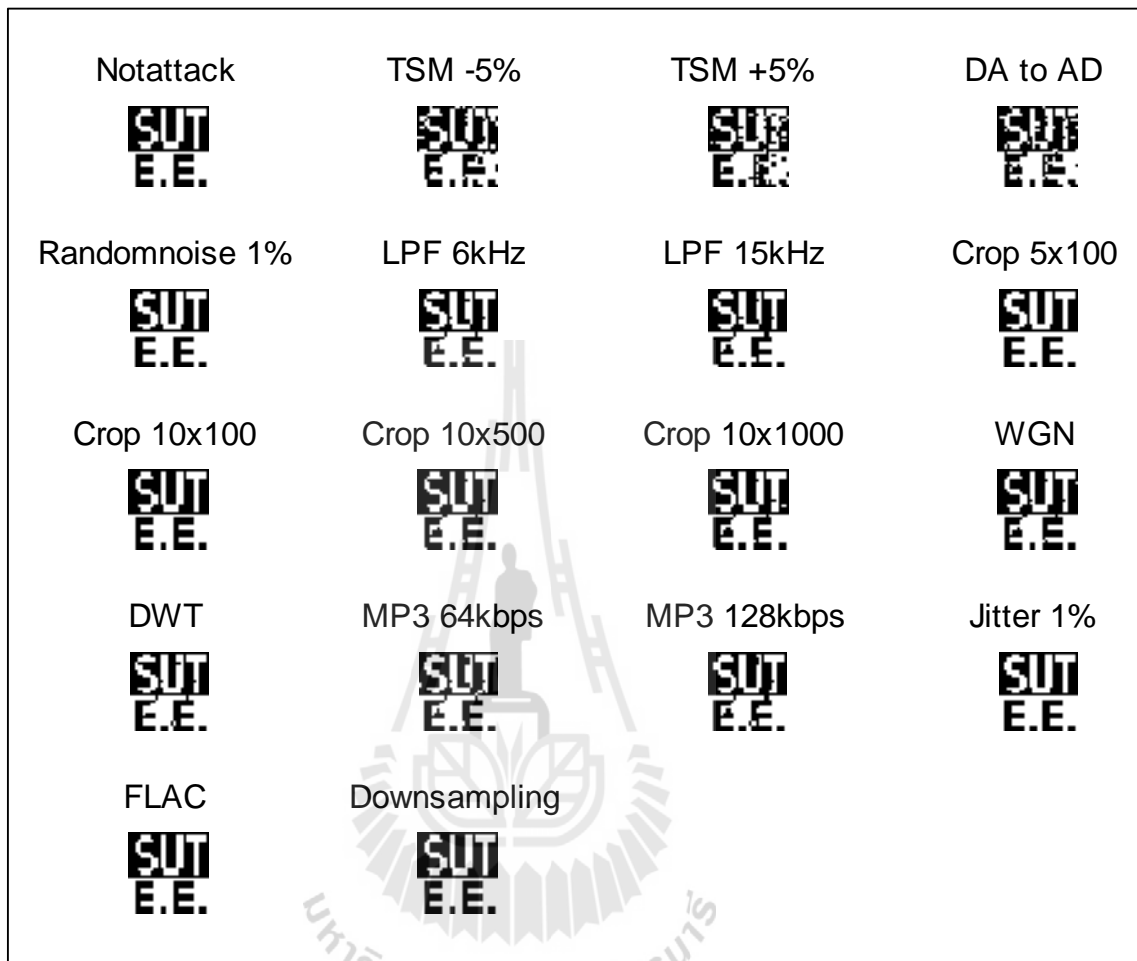
รูปที่ ข.15 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลงชั้นชีวิต

## เพลงดาวล้อมเดือน



รูปที่ ข.16 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลงดาวล้อมเดือน

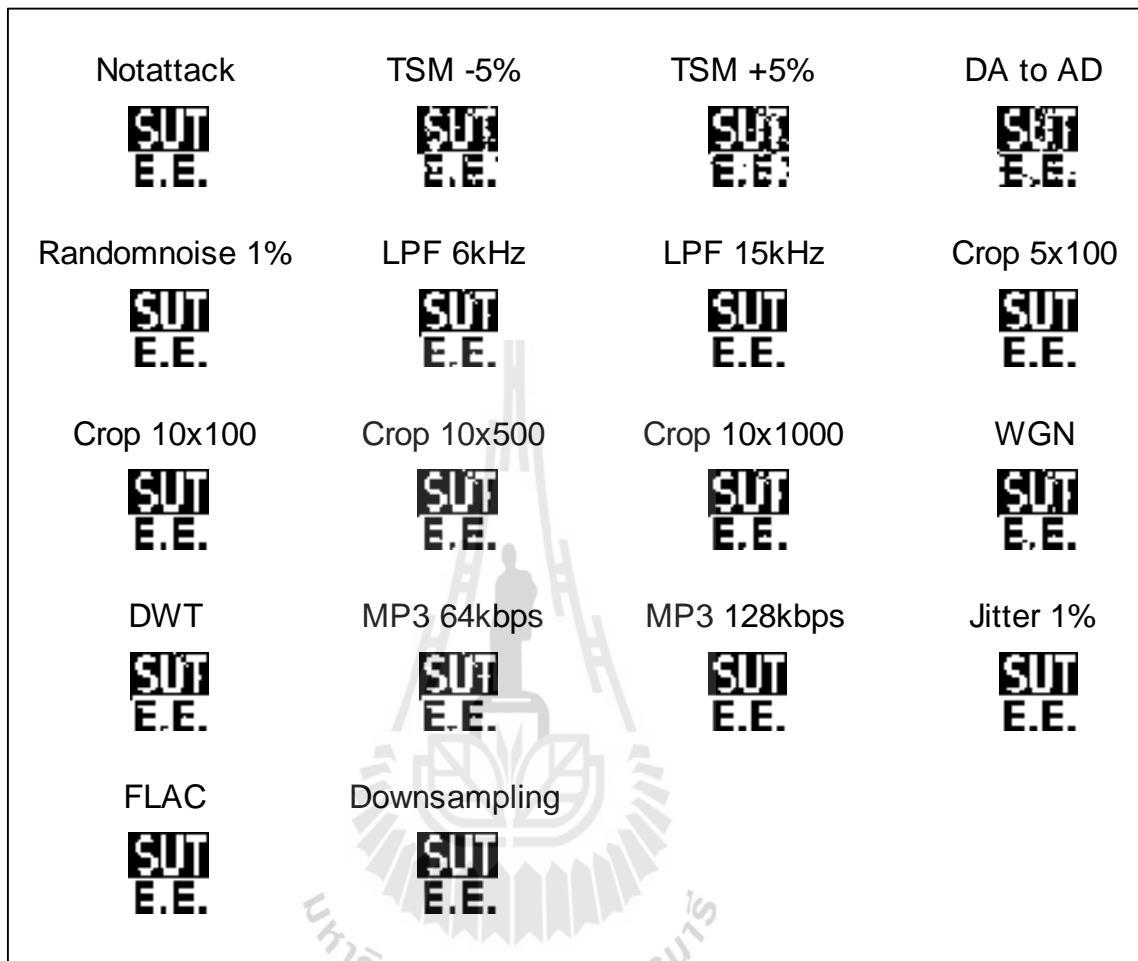
## เพลงพรหมลิขิต



รูปที่ ข.17 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการโจมตีเพลงพรหมลิขิต

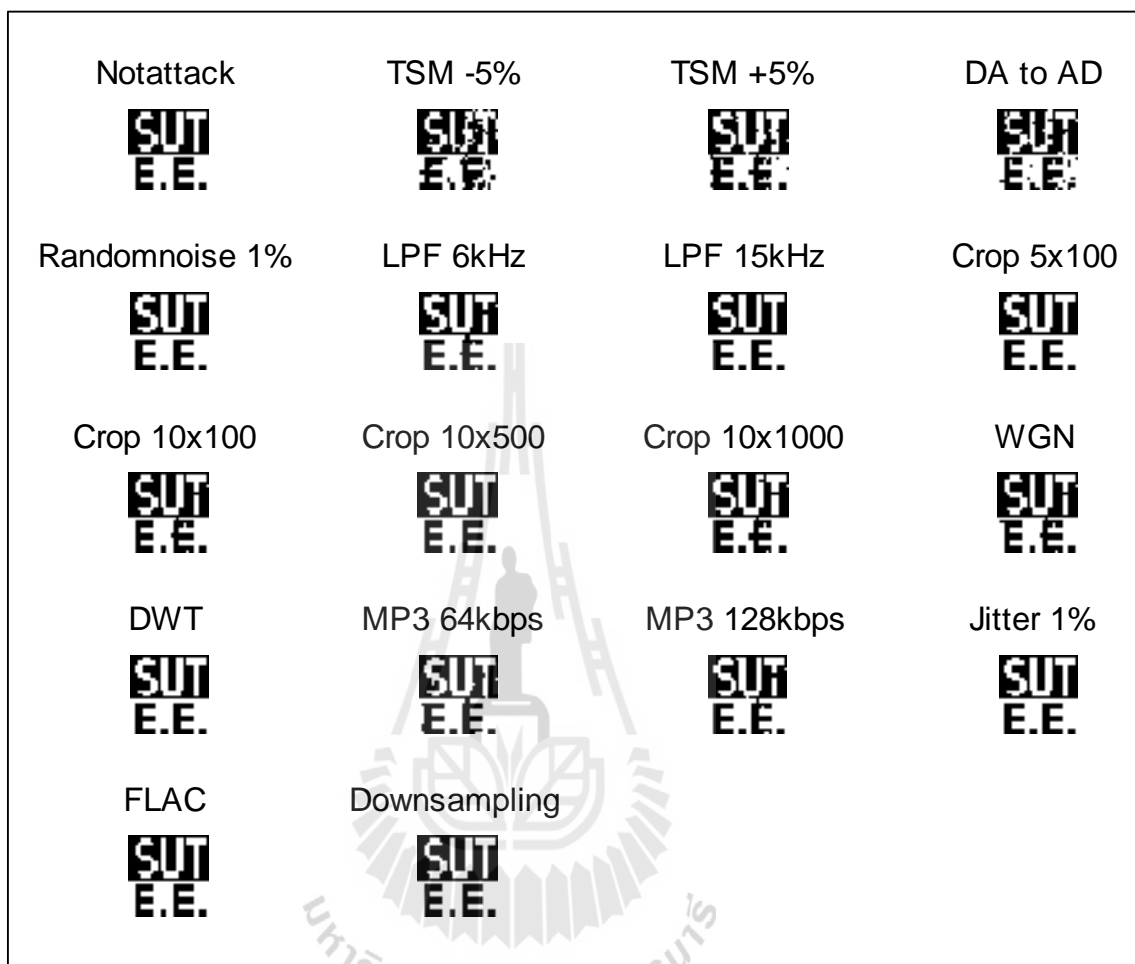


## เพลงสวีตตีปี่ใหม่



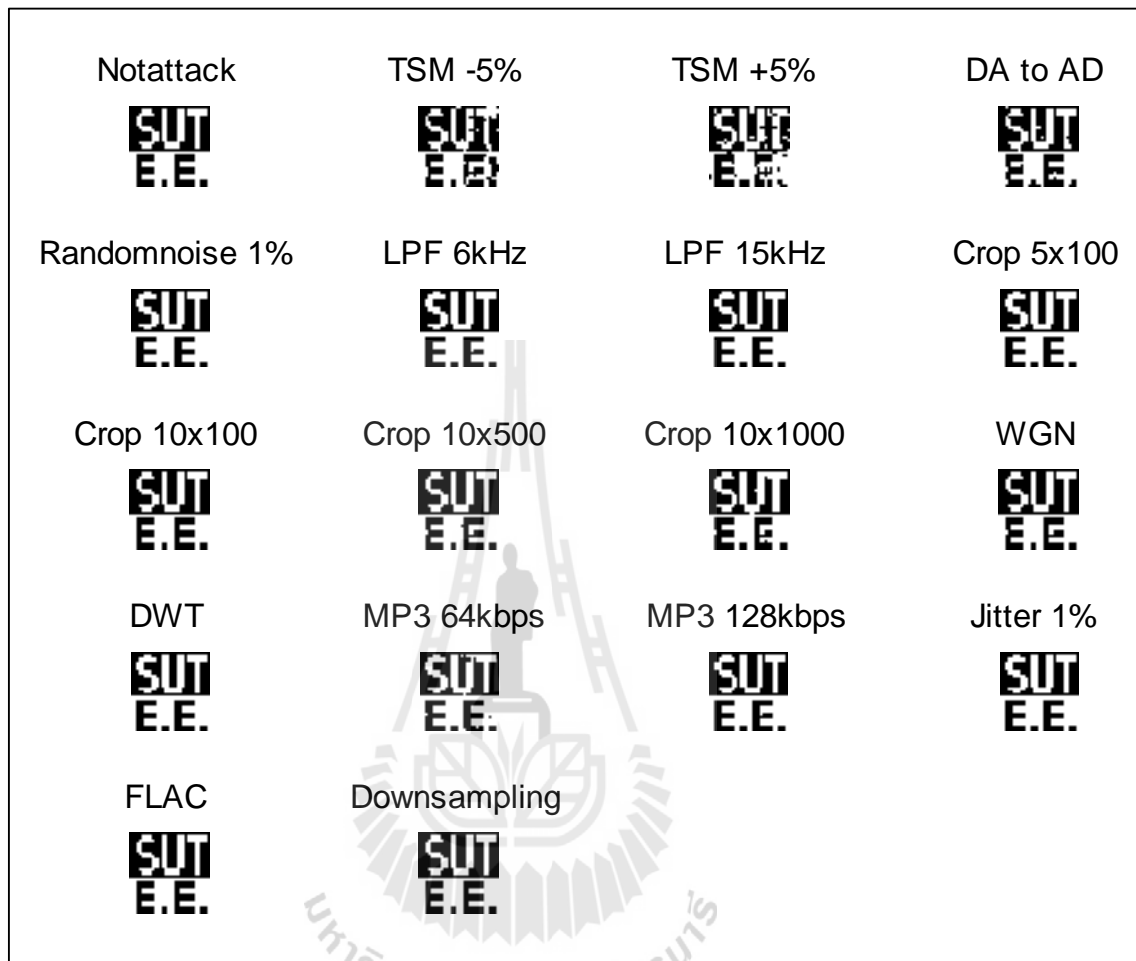
รูปที่ ข.18 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลงสวีตตีปี่ใหม่

## เพลงริมฝั่งน้ำ



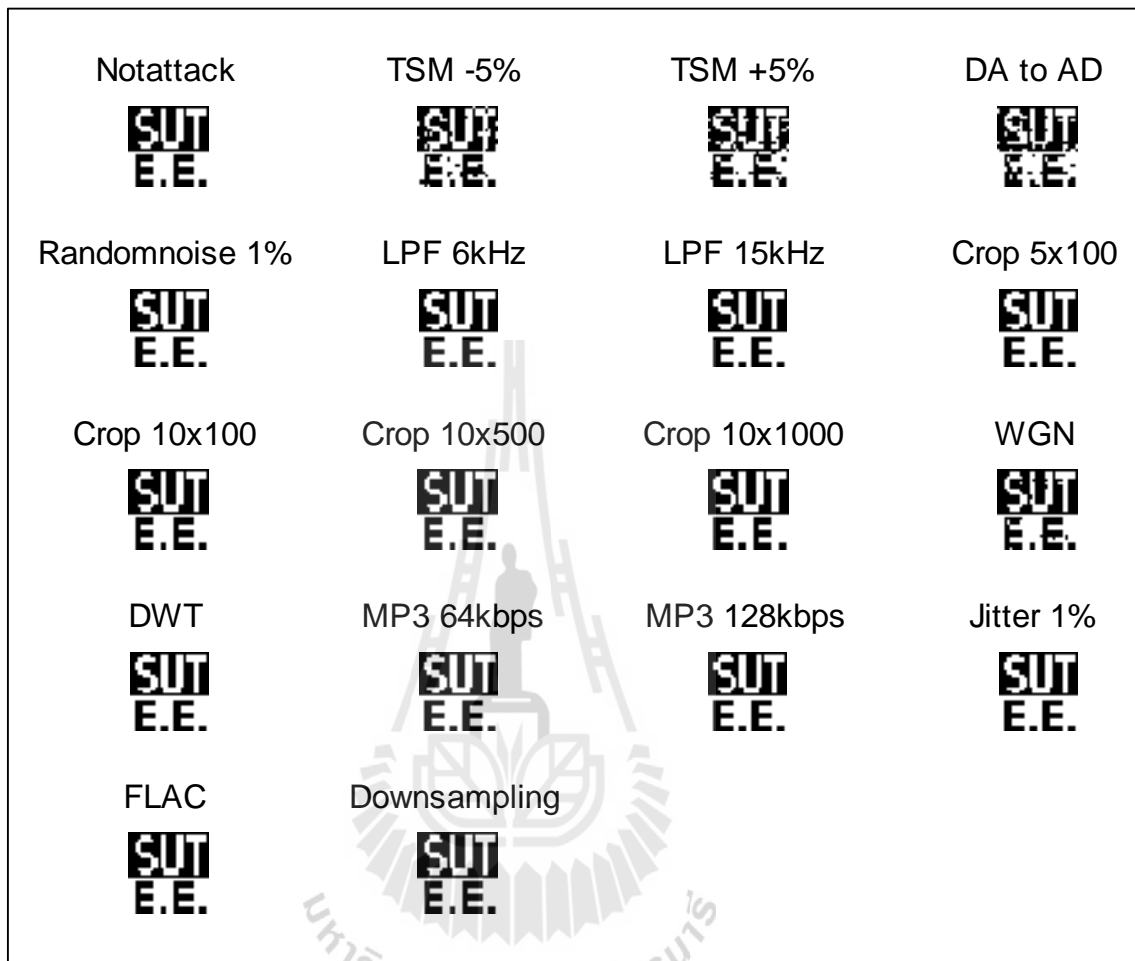
รูปที่ ข.19 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลงริมฝั่งน้ำ

## เพลงนางฟ้าจำลอง



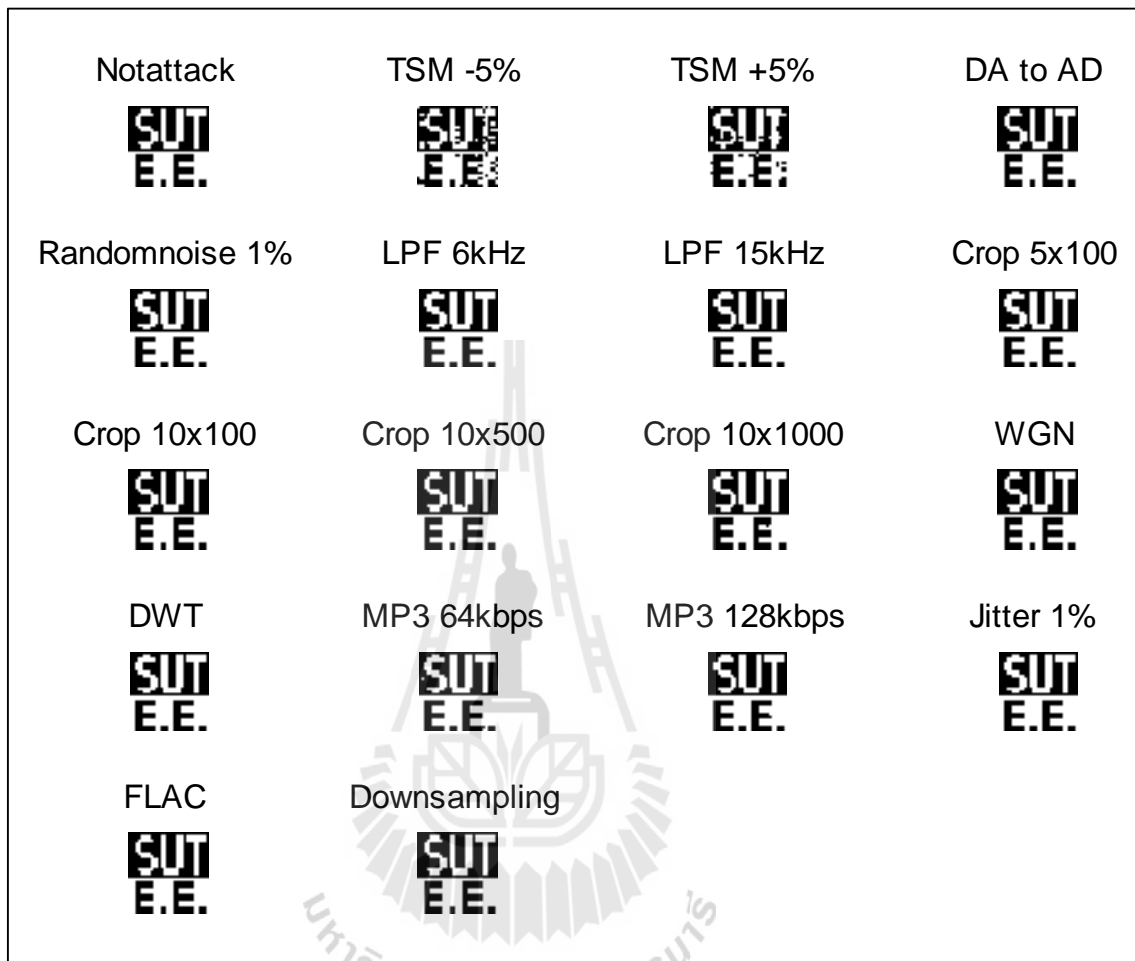
รูปที่ ข.20 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลงนางฟ้าจำลอง

## เพลงทำน้ำ



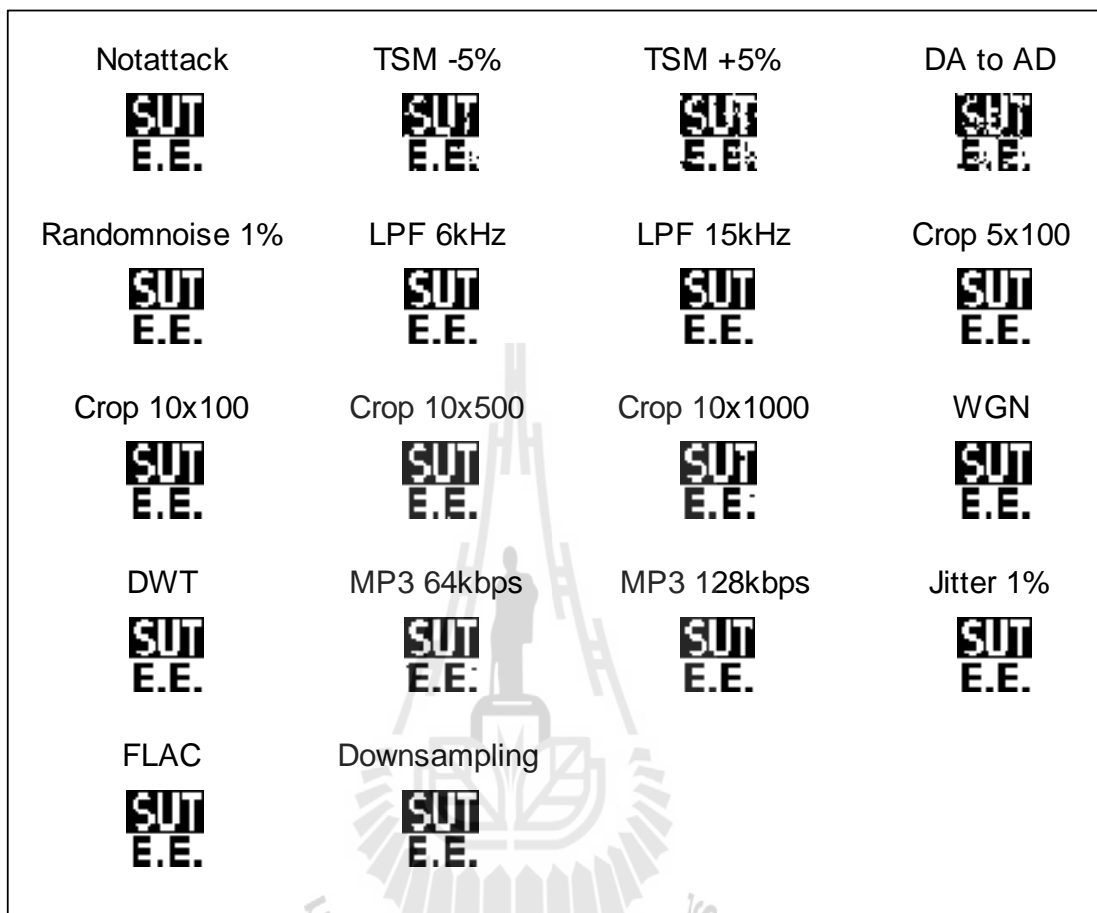
รูปที่ ข.21 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลงทำน้ำ

## เพลงไถ่จำ



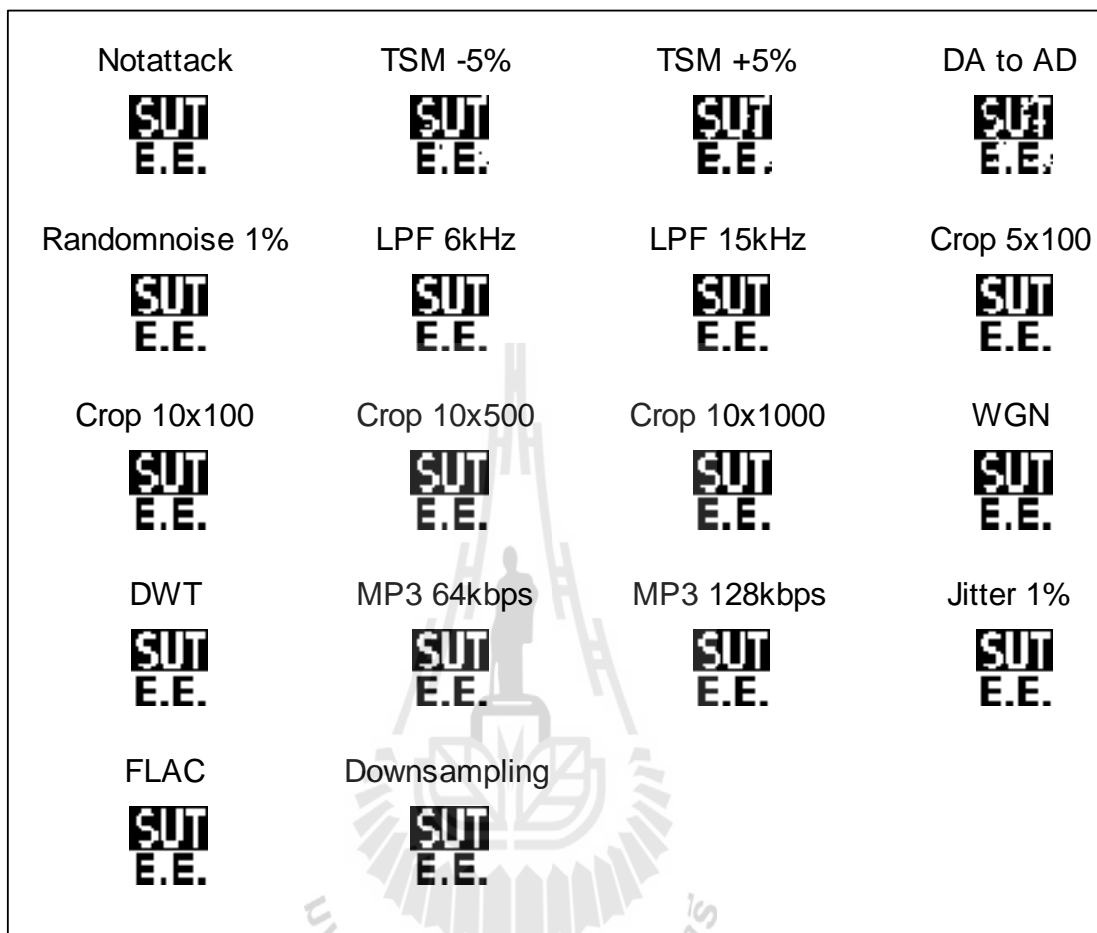
รูปที่ ข.22 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการโจมตีเพลงไถ่จำ

## เพลงแพร์บสนามรัก



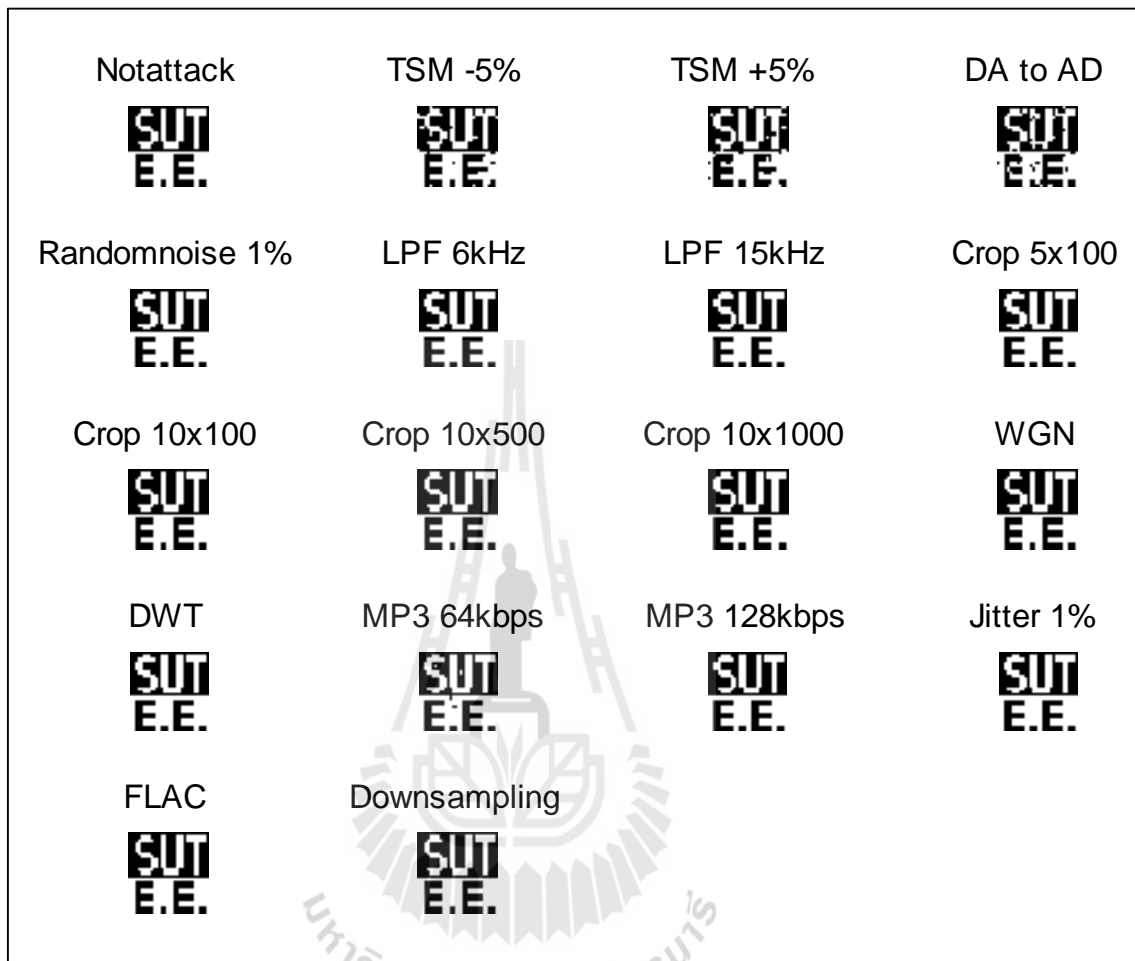
รูปที่ ข.23 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลงแพร์บสนามรัก

## เพลงสายลมฟองว่าน้องลิ้ม



รูปที่ ข.24 ภาพลายน้ที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลงสายลมฟองว่าน้องลิ้ม

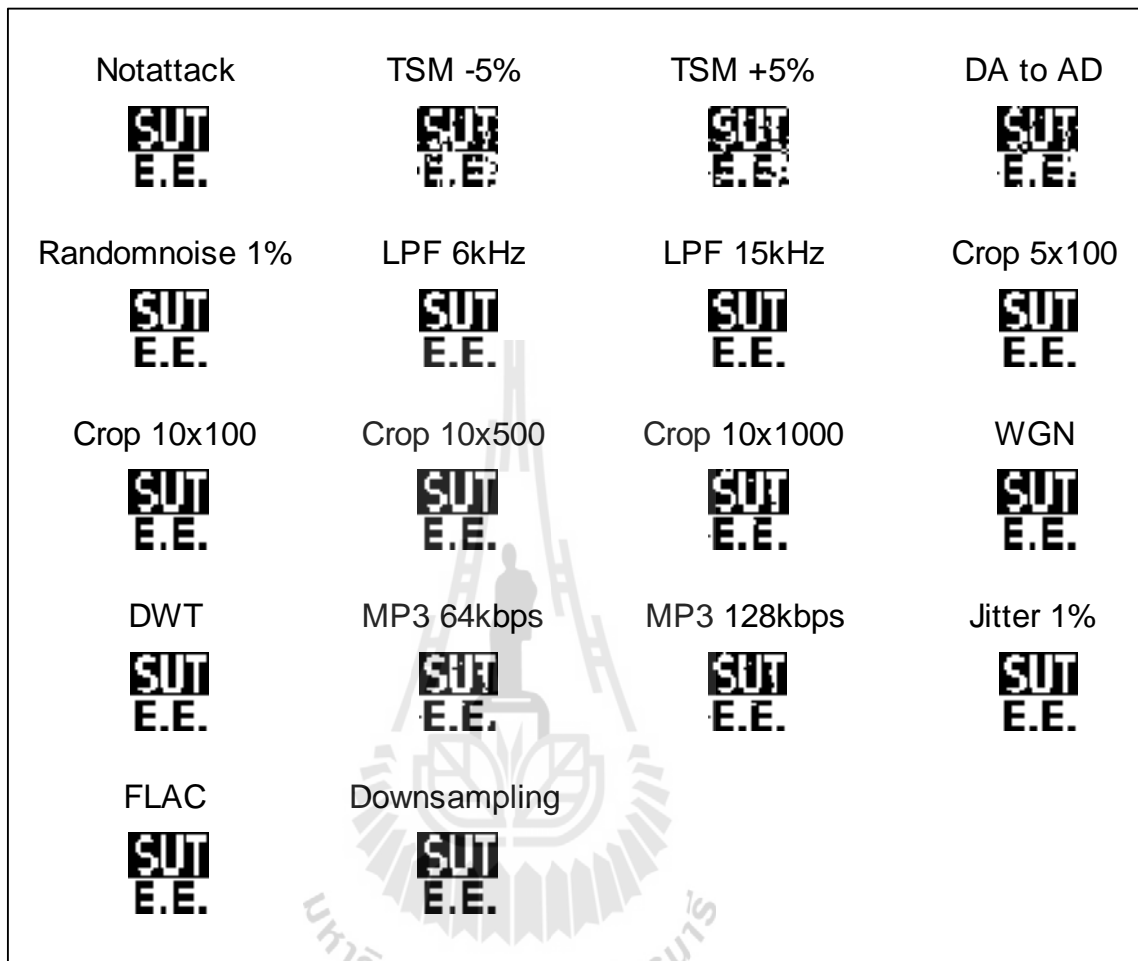
## เพลงฮักสาวขอนแก่น



รูปที่ ข.25 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการโจมตีเพลงฮักสาวขอนแก่น

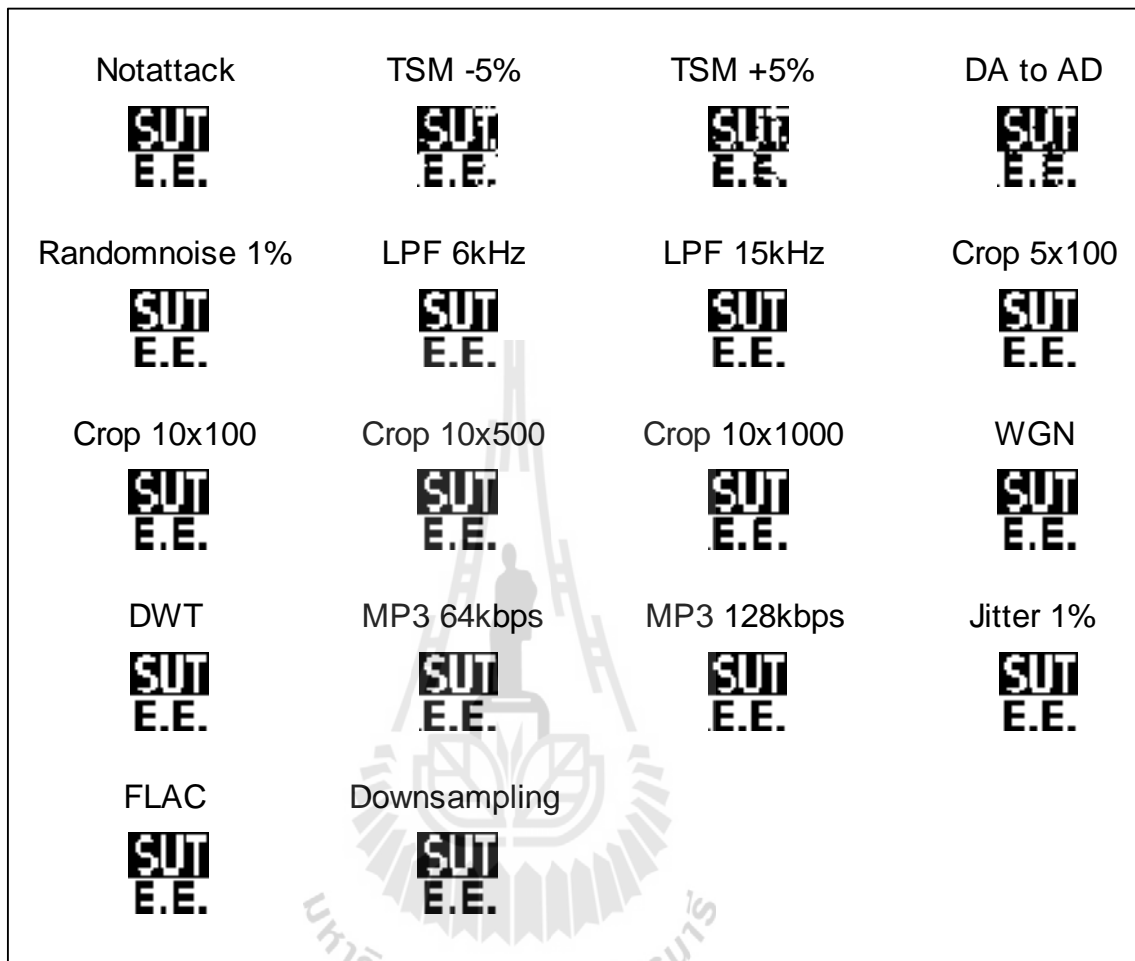


## เพลงผืนยังไกล ใจยังหวัง



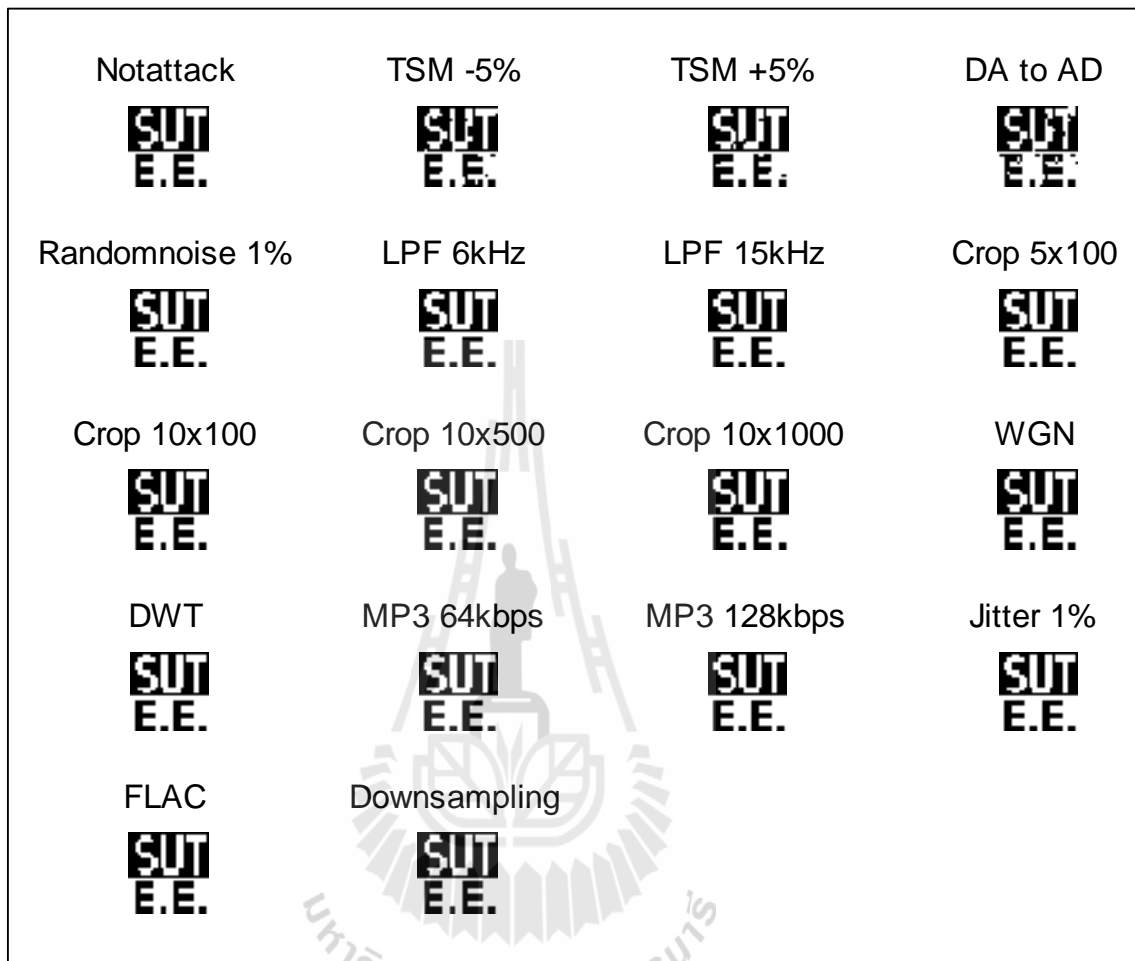
รูปที่ ข.26 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลงผืนยังไกล ใจยังหวัง

## เพลงให้ใจอย่าให้เจ็บ



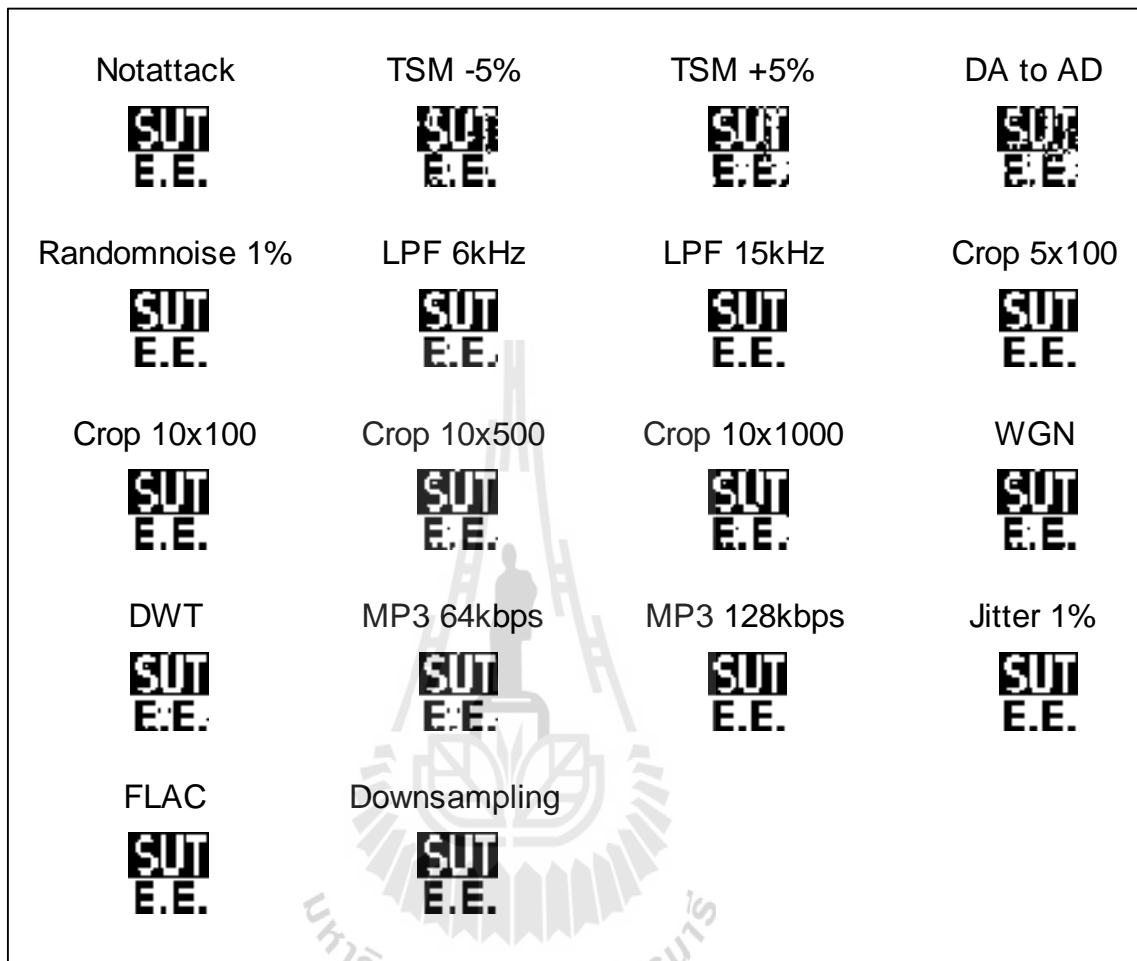
รูปที่ ข.27 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลงให้ใจอย่าให้เจ็บ

## เพลงหัวใจที่ถูกอ้ายทิ้ง



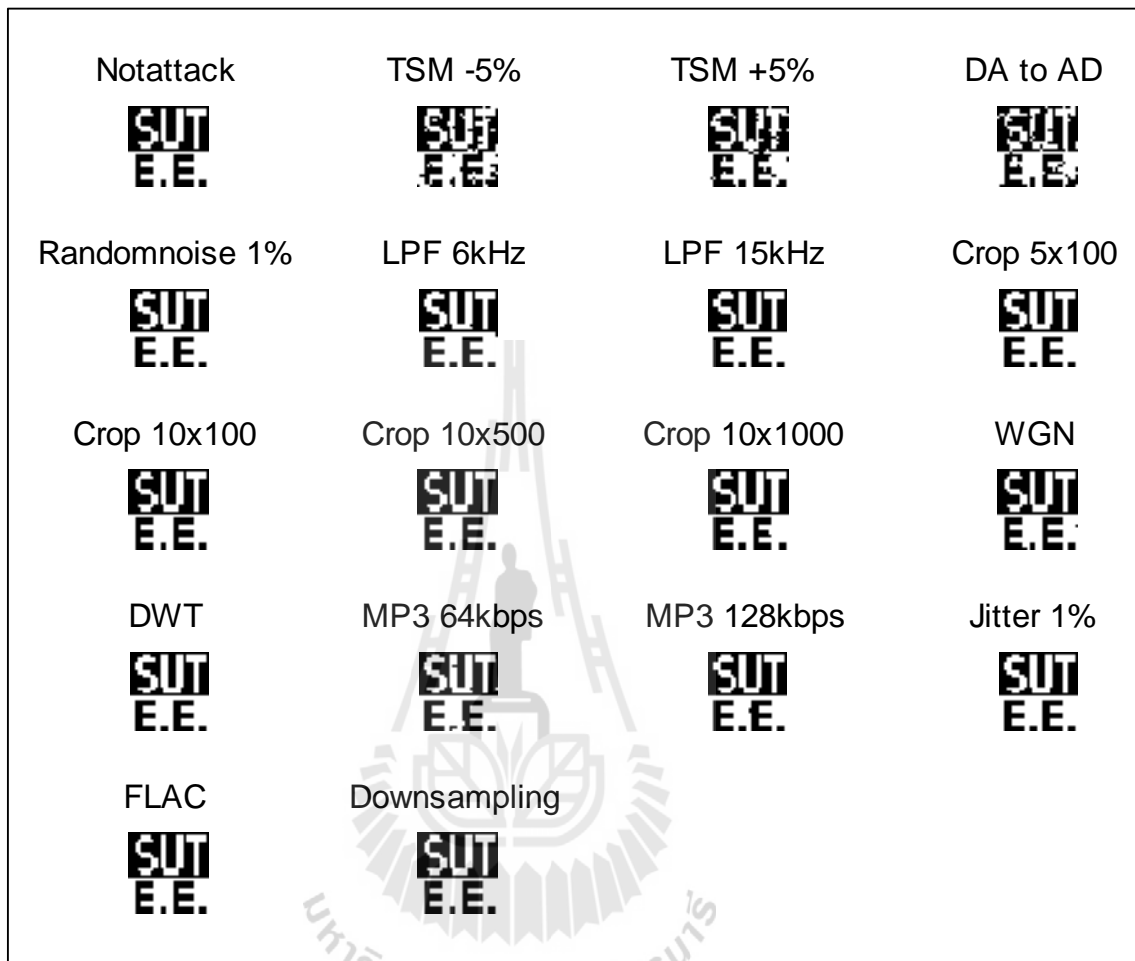
รูปที่ ข.28 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลงหัวใจที่ถูกอ้ายทิ้ง

## เพลงไม่คิดว่าเธอมีค่า



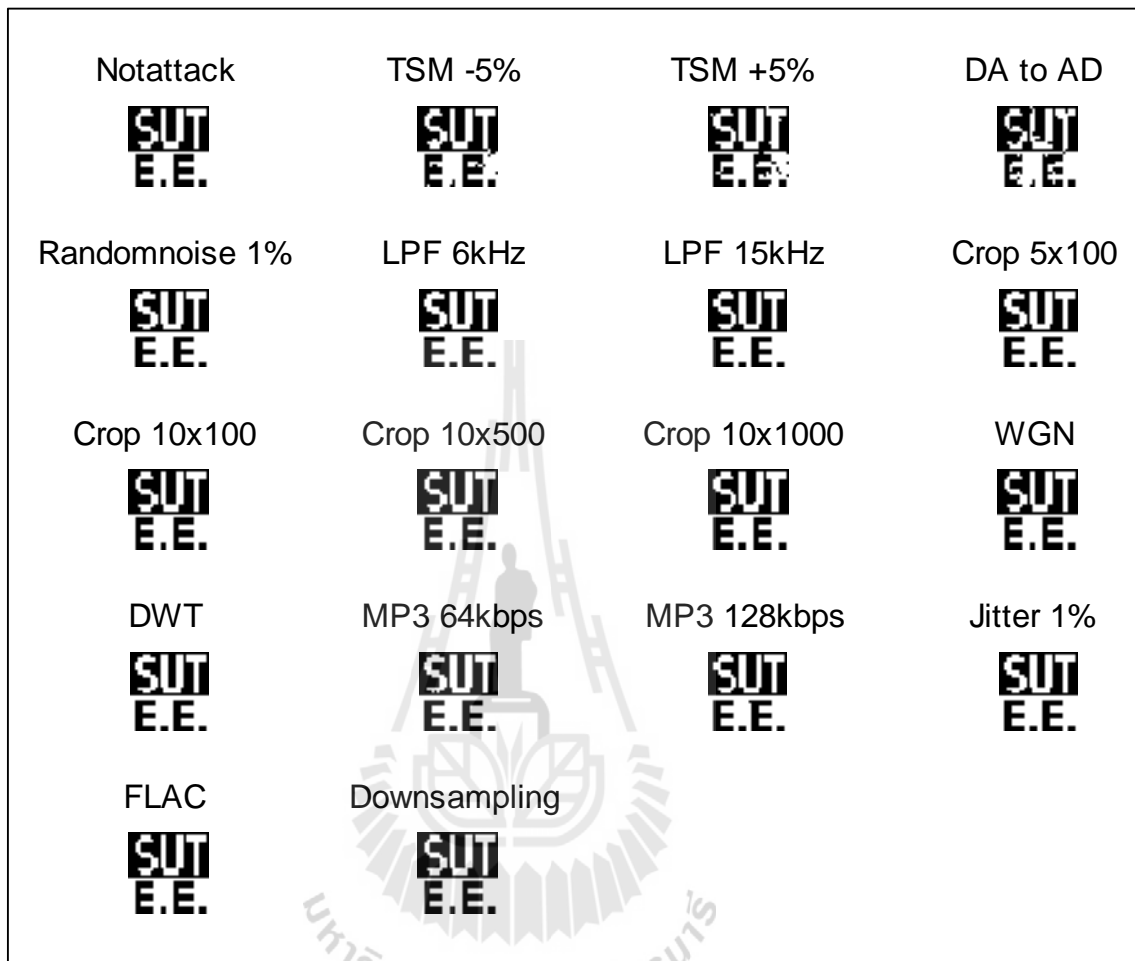
รูปที่ ข.29 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการโจมตีเพลงไม่คิดว่าเธอมีค่า

## เพลงรักคนโทรมาจingle



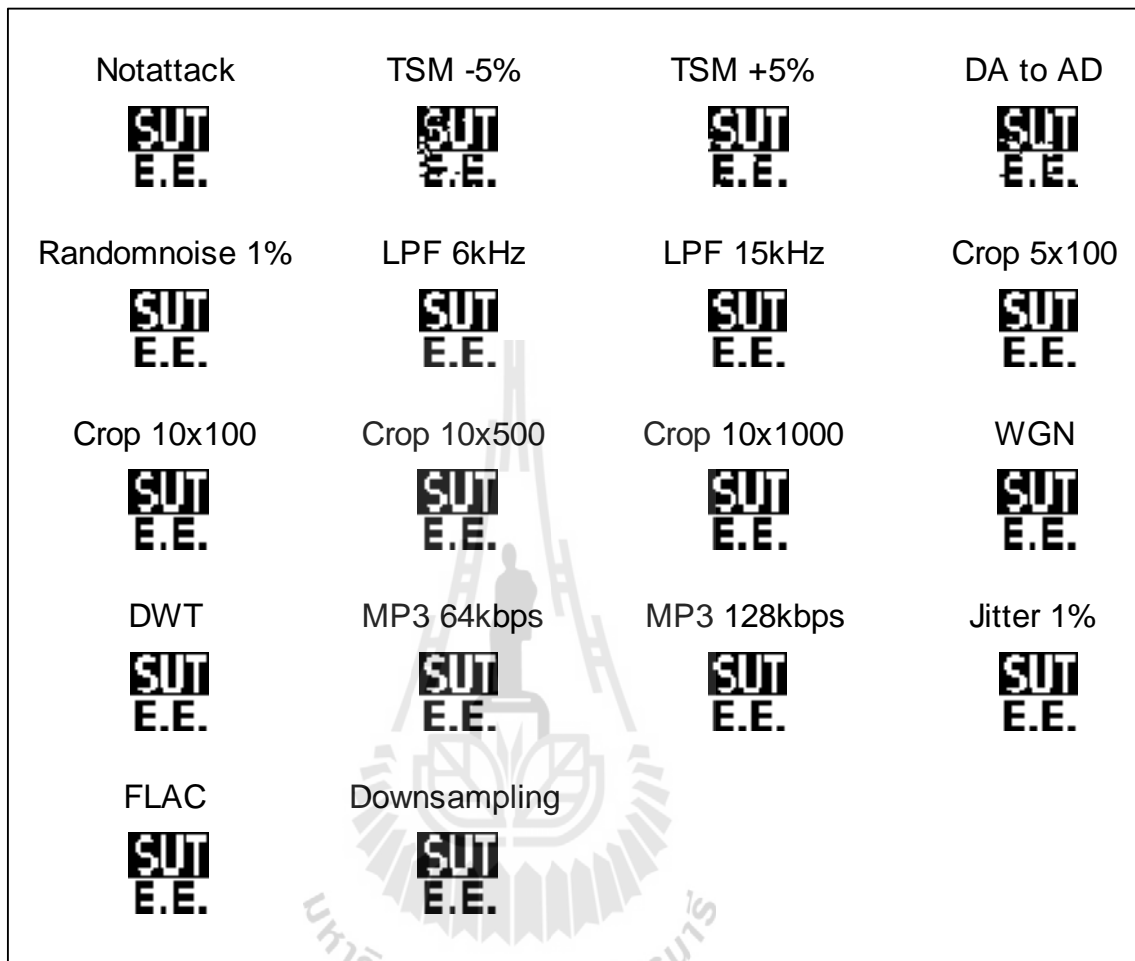
รูปที่ ข.30 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลงรักคน โทรมาจingle

## เพลงด่วนแม่กลอง



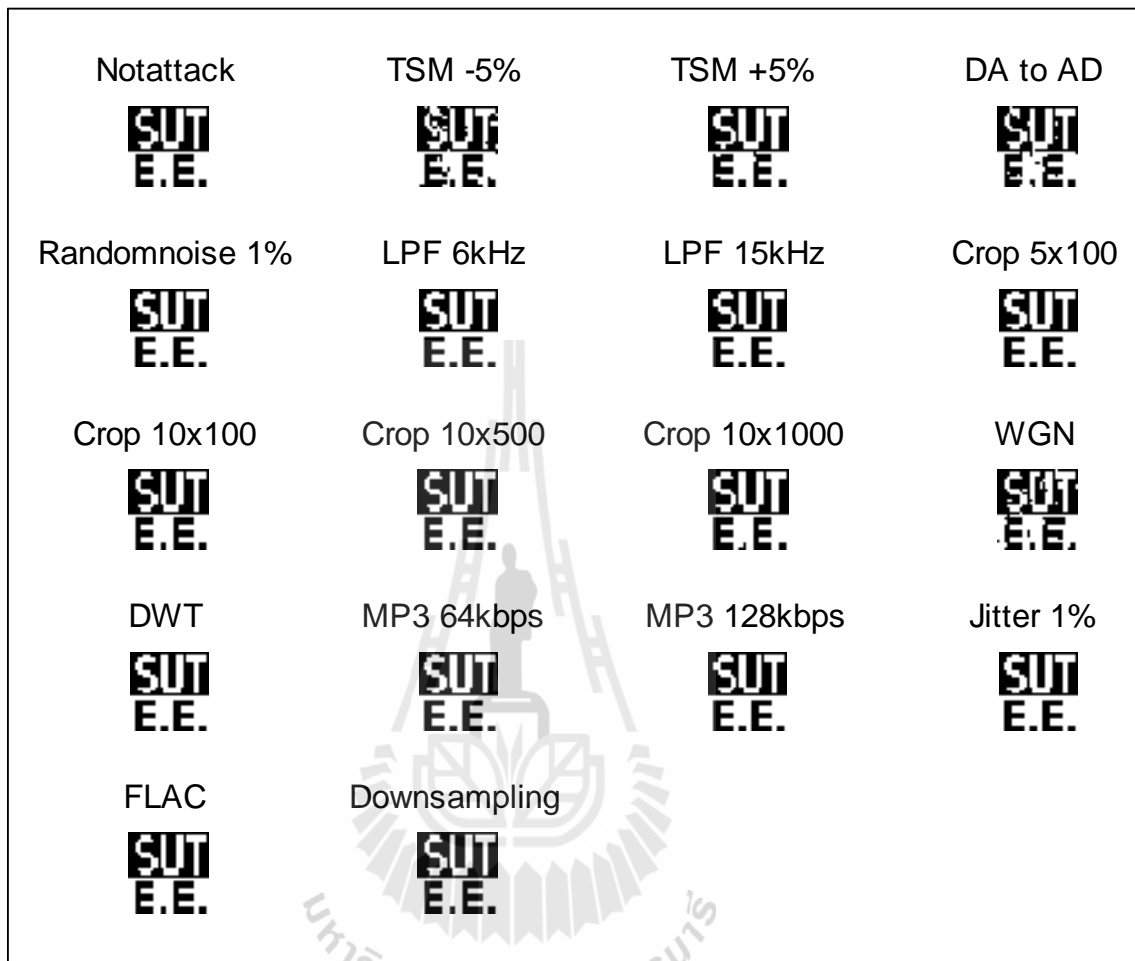
รูปที่ ข.31 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลงด่วนแม่กลอง

## เพลง Confutatis



รูปที่ ข.32 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลง Confutatis

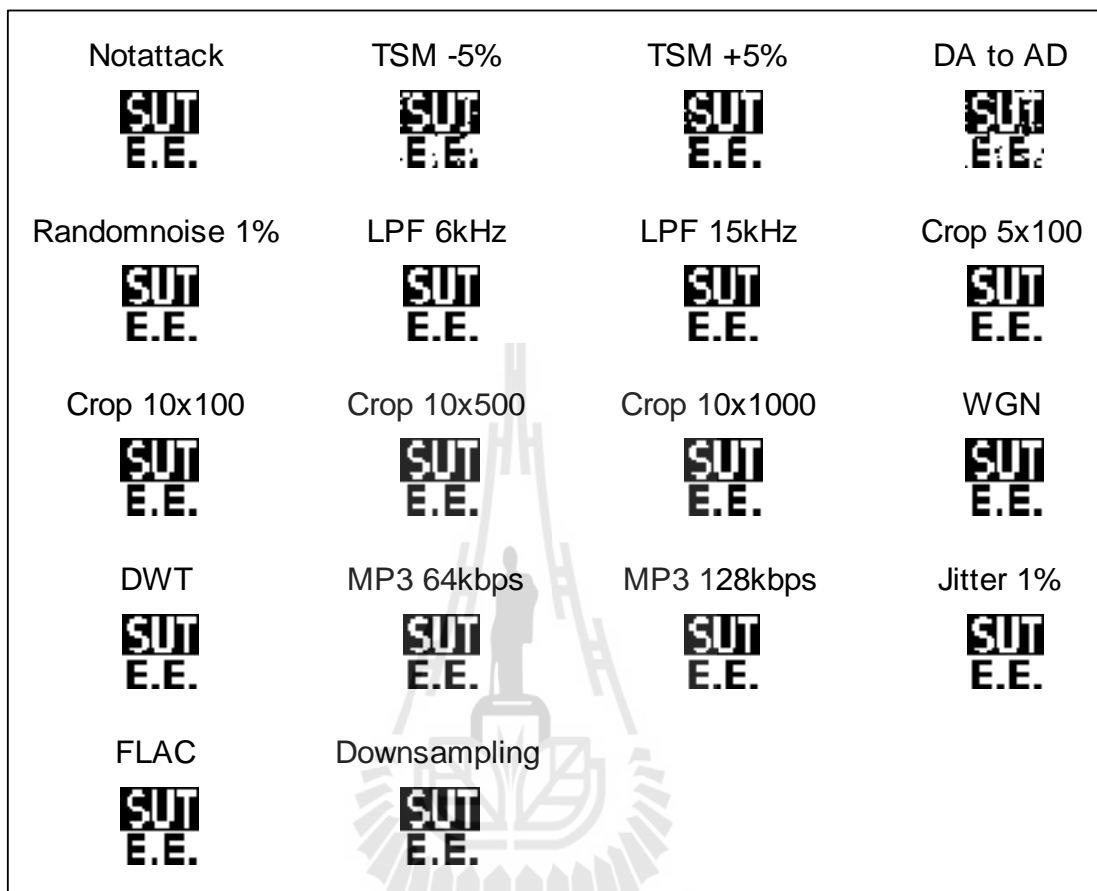
## เพลง Benedictus



รูปที่ ข.33 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการโจมตีเพลง Benedictus

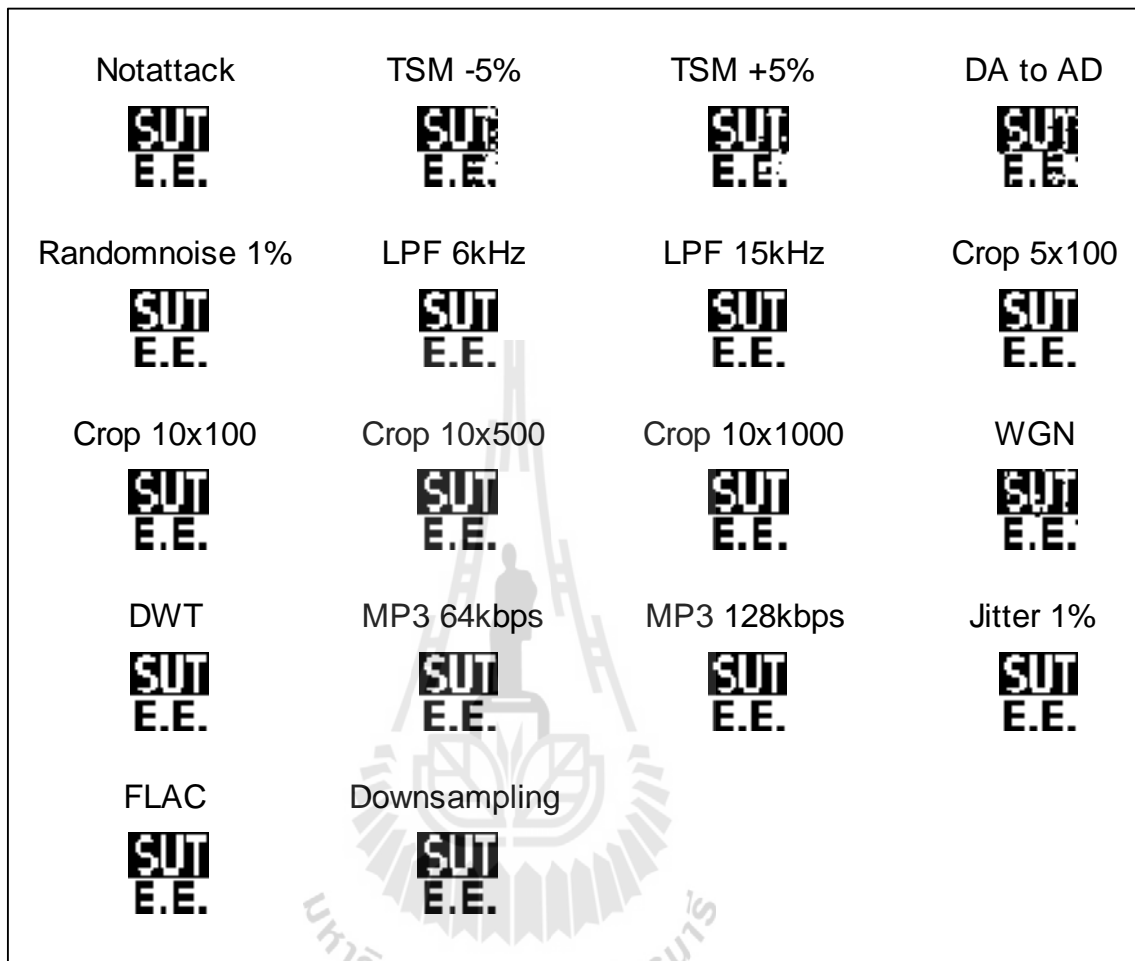


## เพลง Kyrie



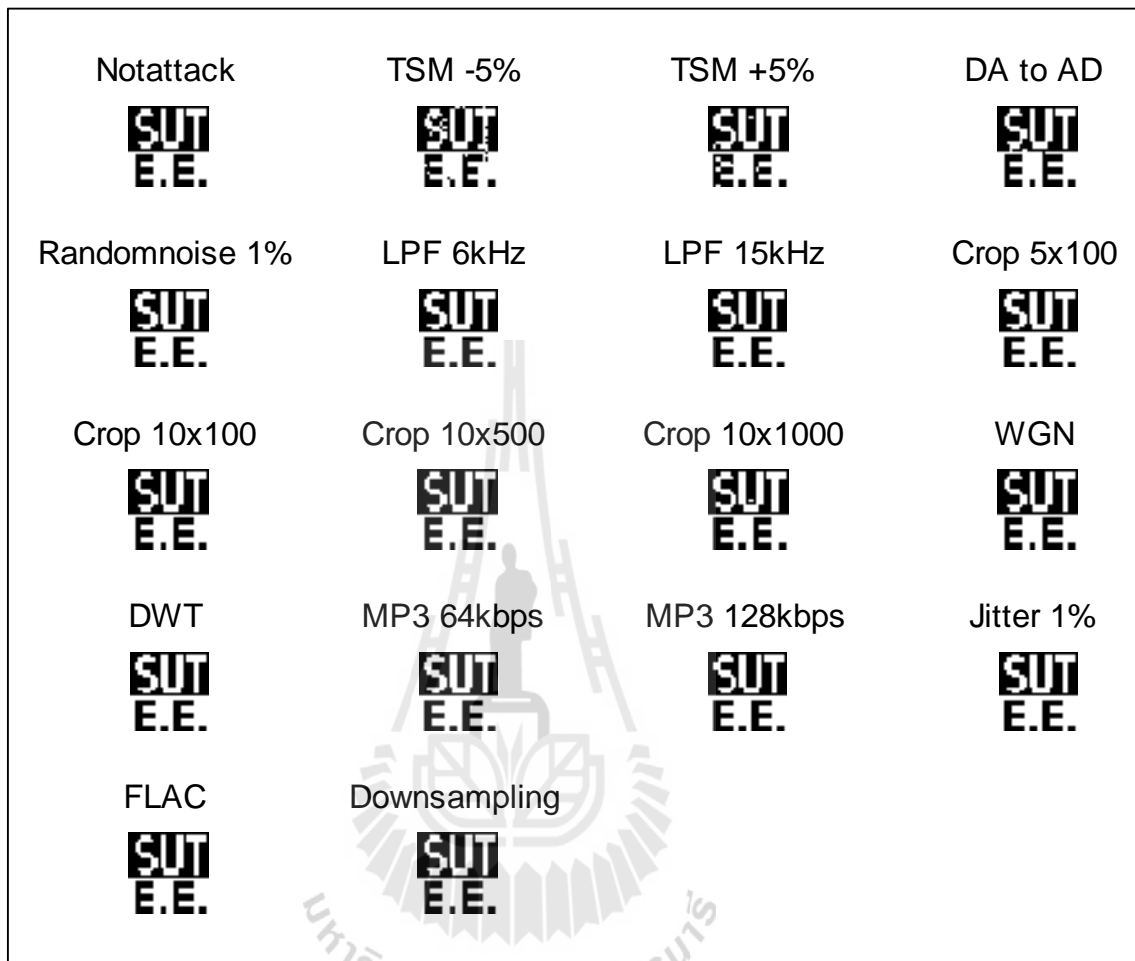
รูปที่ ข.34 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการโจมตีเพลง Kyrie

## เพลง Lacrimosa



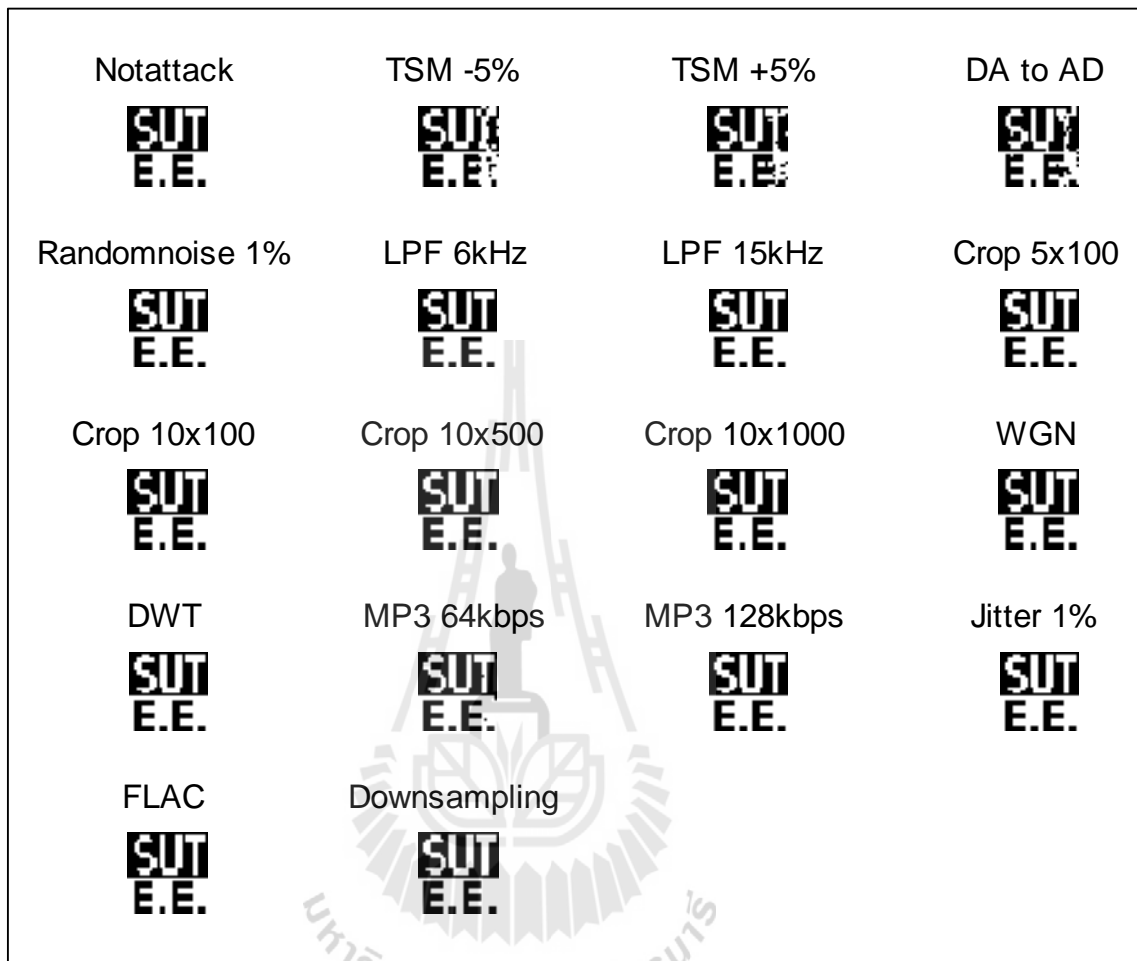
รูปที่ ข.35 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการโจมตีเพลง Lacrimosa

## เพลง Requiem



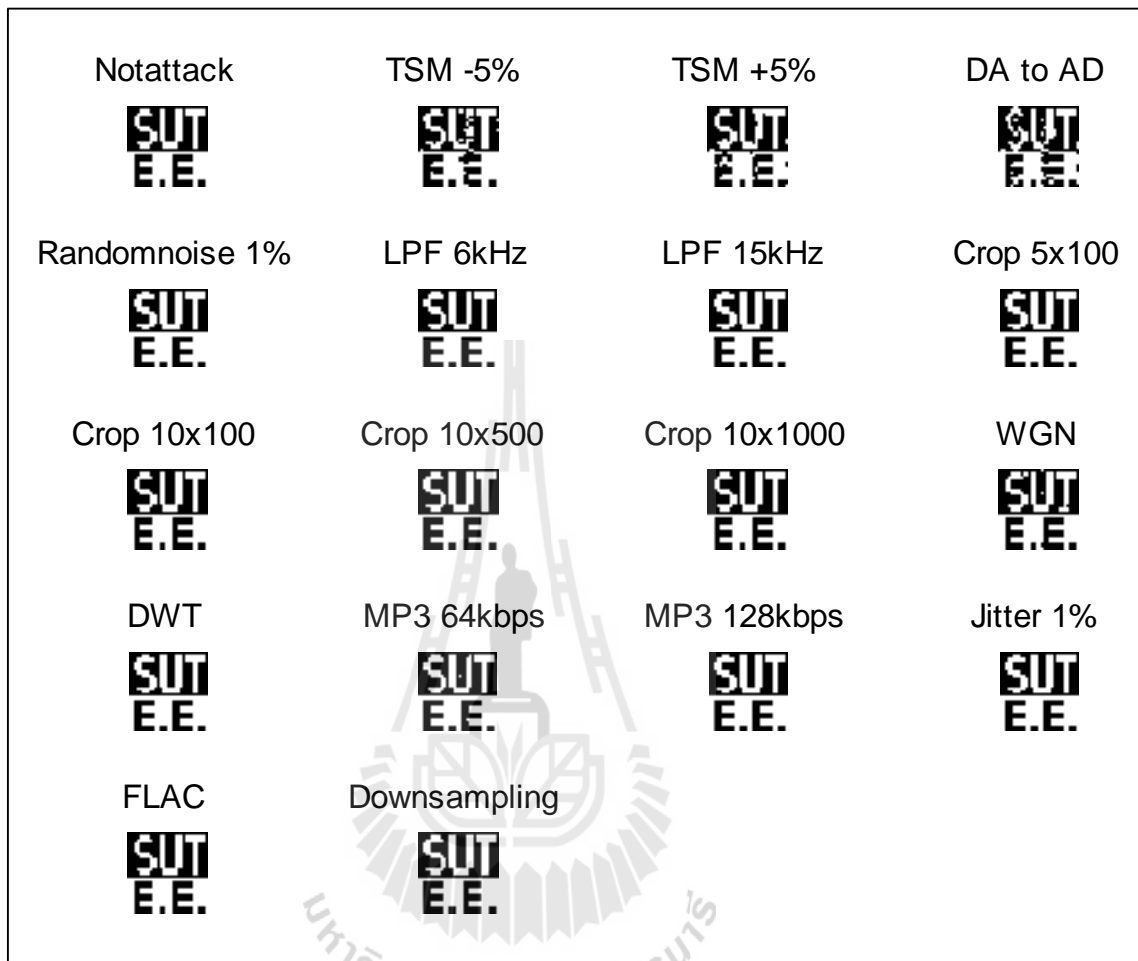
รูปที่ ข.36 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการโจมตีเพลง Requiem

## เพลง Allegro in D major



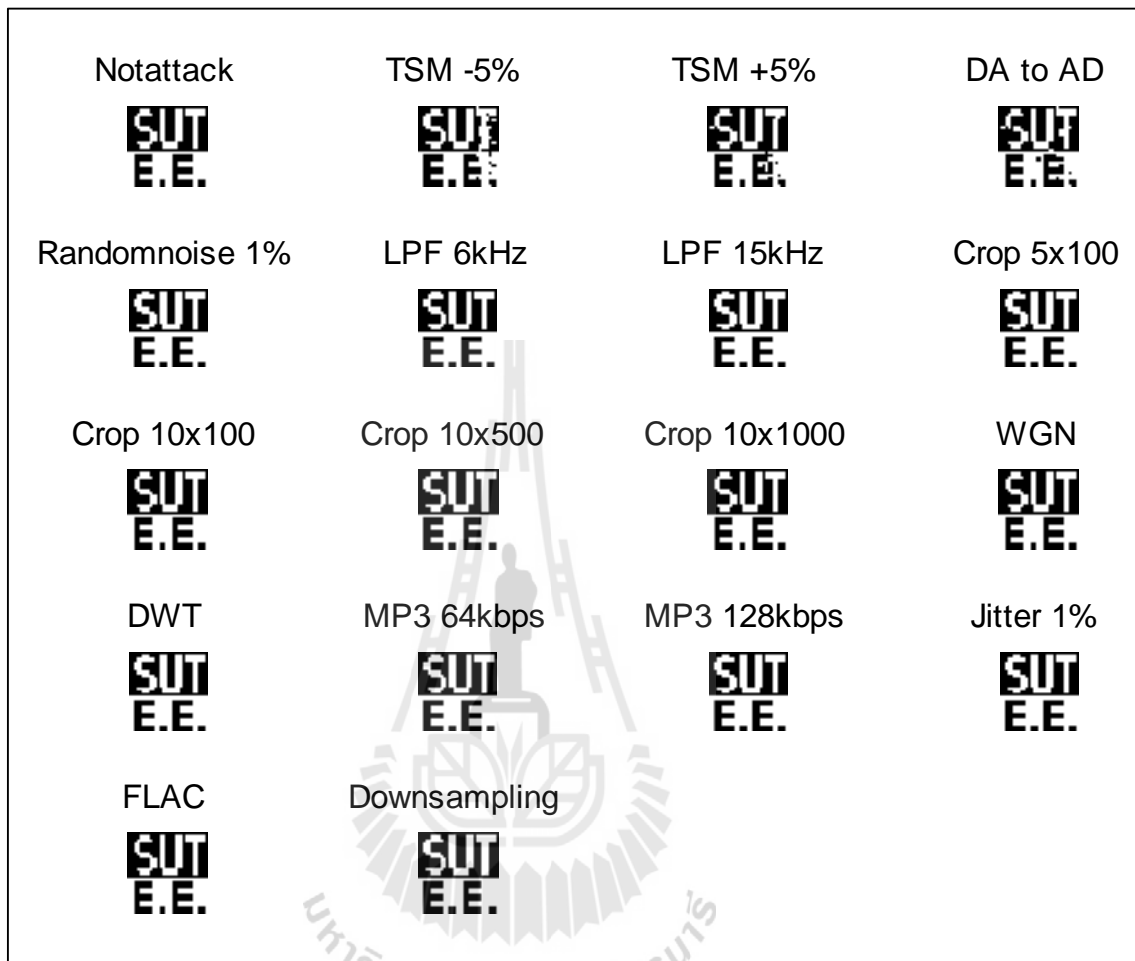
รูปที่ ข.37 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลง Allegro in D major

## เพลง Romance in D major



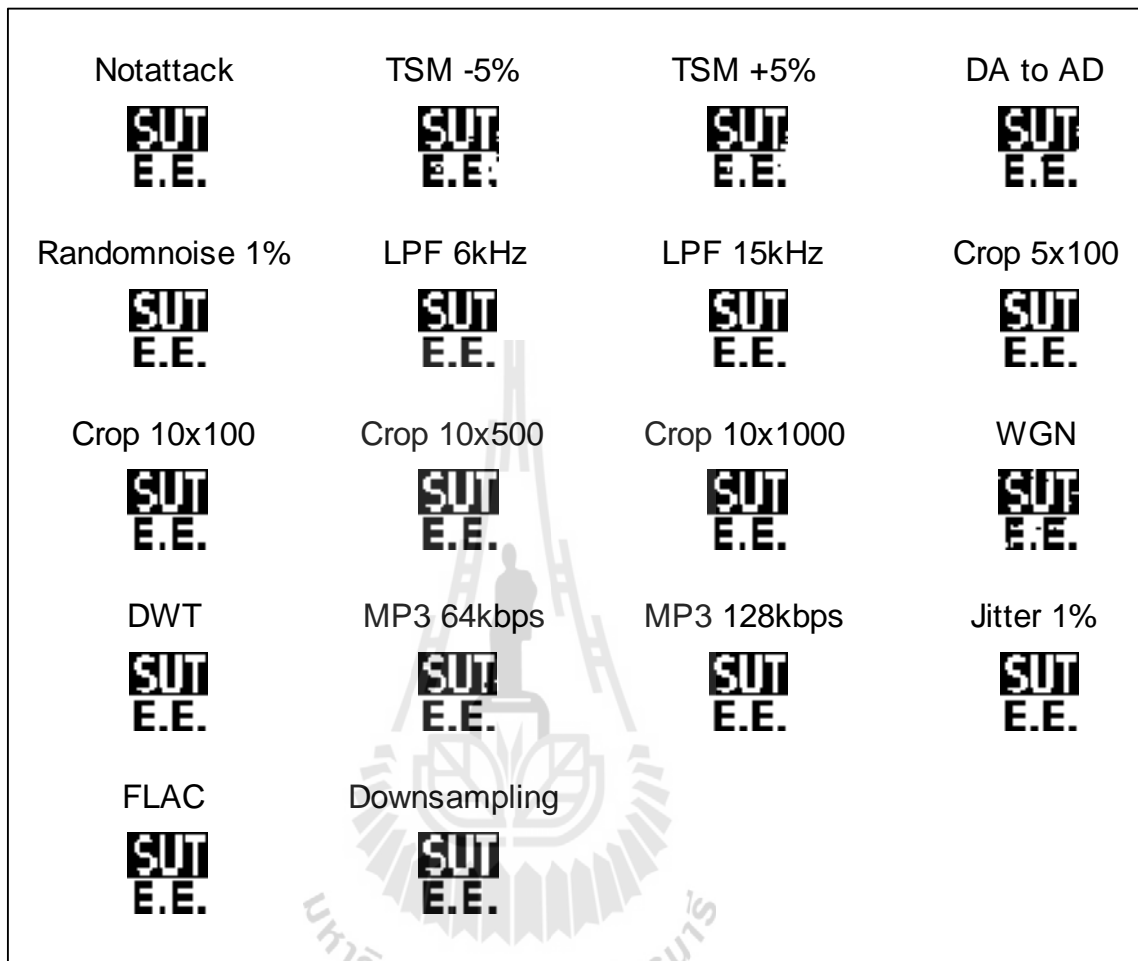
รูปที่ ข.38 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลง Romance in D major

## เพลง Rondo in D major



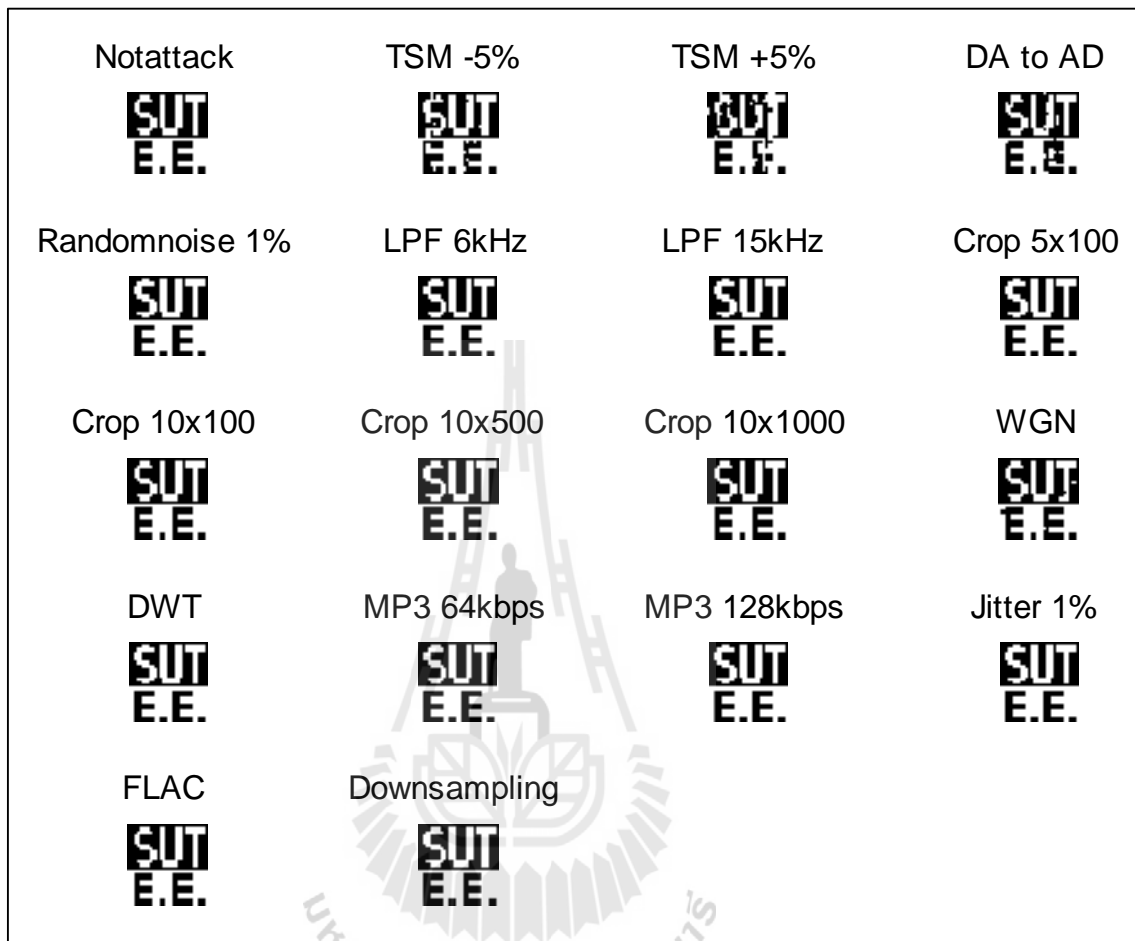
รูปที่ ข.39 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลง Rondo in D major

## เพลง Allegro in B flat major



รูปที่ ข.40 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลง Allegro in B flat major

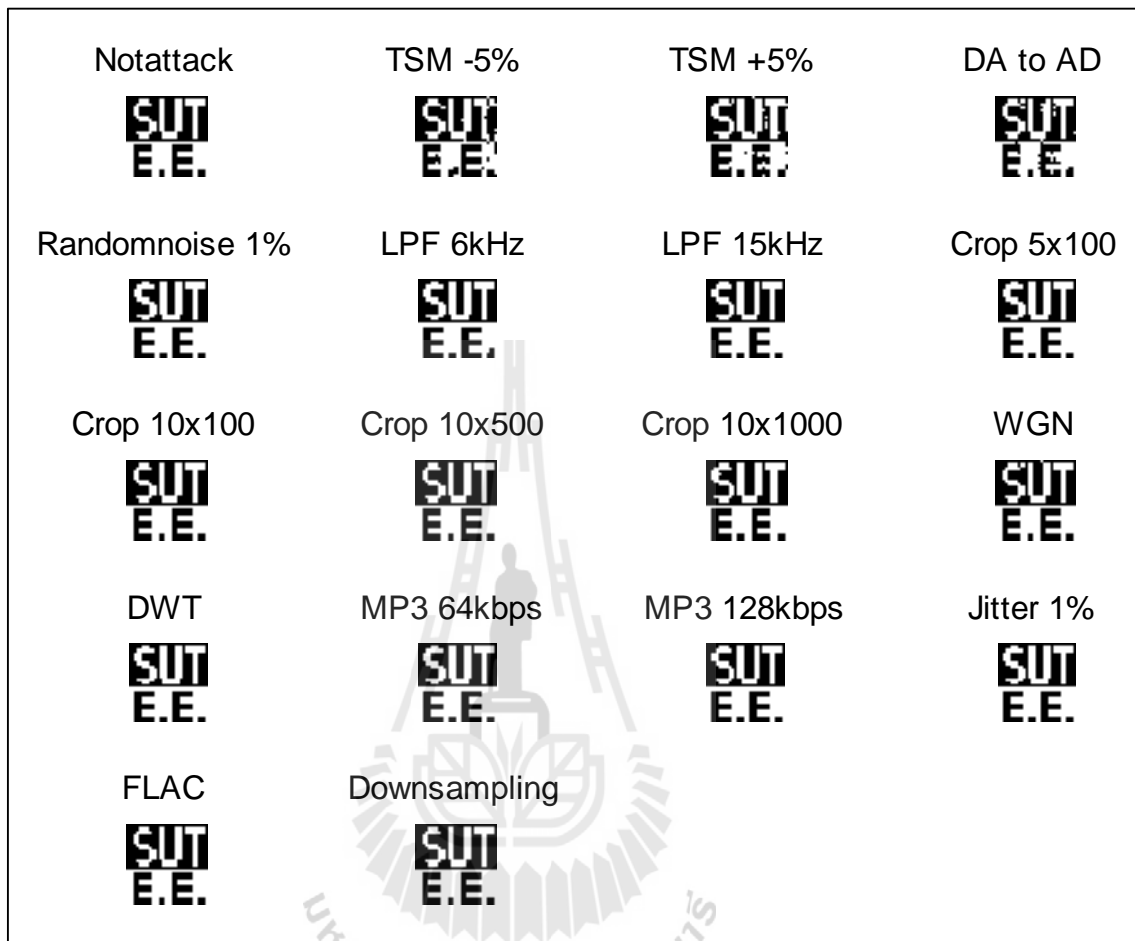
## เพลง Larghetto in B flat major



รูปที่ ข.41 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการโจมตีเพลง Larghetto in B flat major

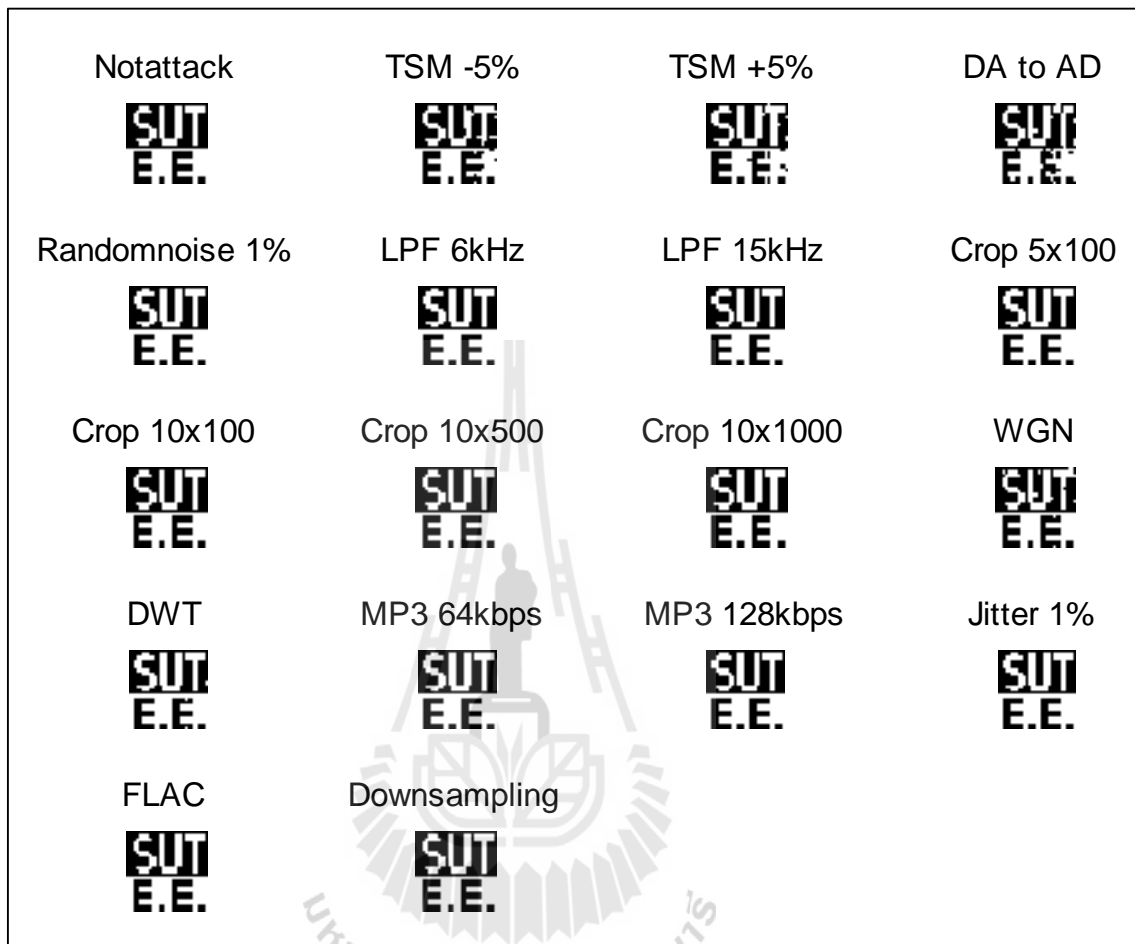


## เพลง I Love You for Sentimental Reasons



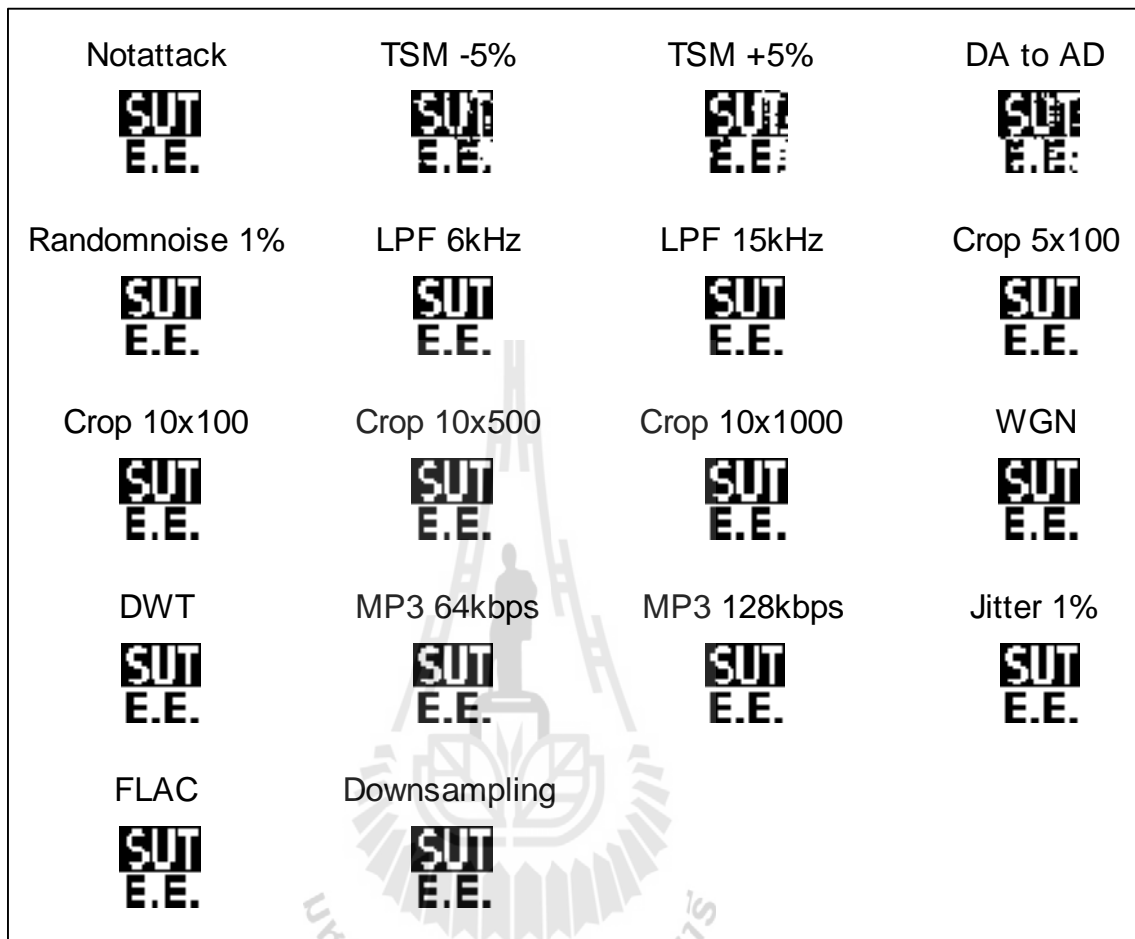
รูปที่ ข.42 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลง I Love You for Sentimental Reasons

## เพลง Blue Moon



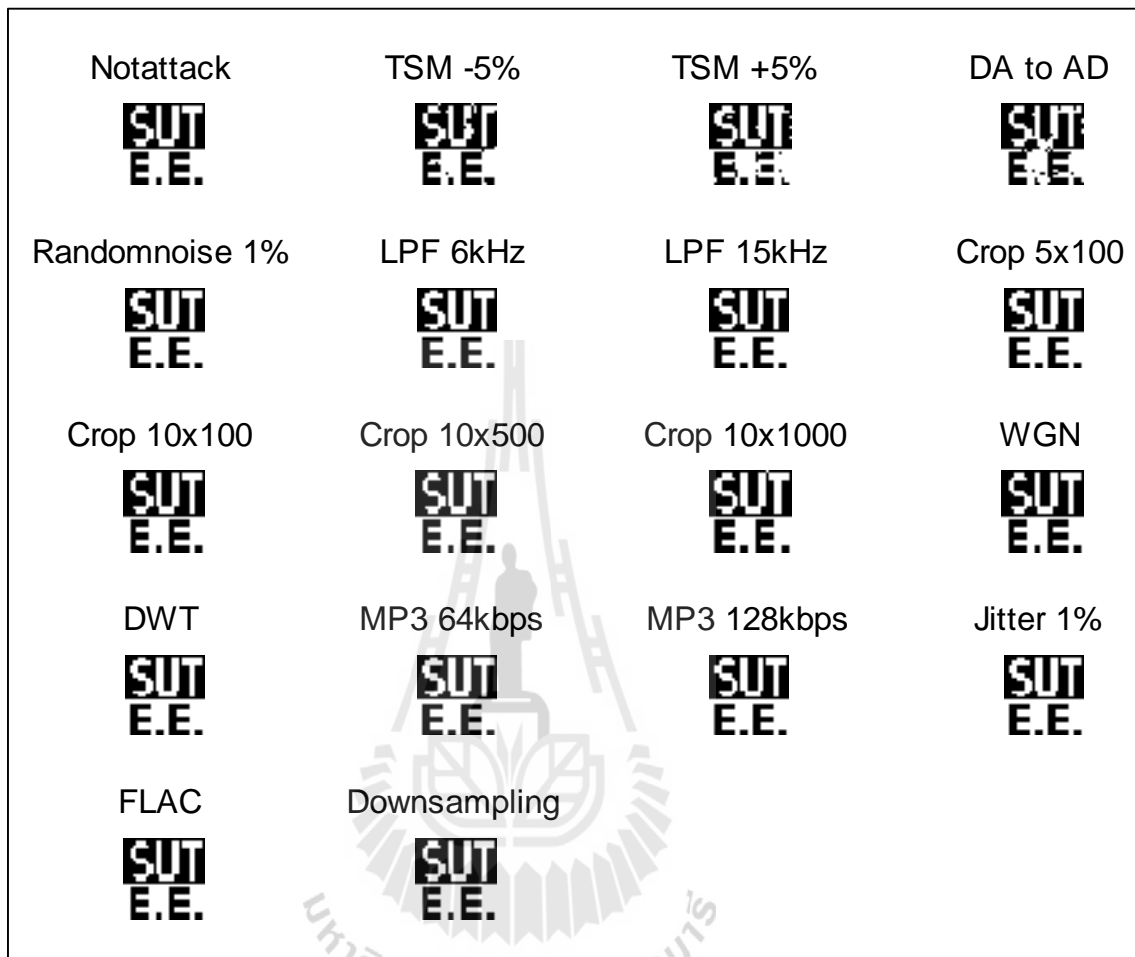
รูปที่ ข.43 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการโจมตีเพลง Blue Moon

## เพลง Look for the Silver Lining



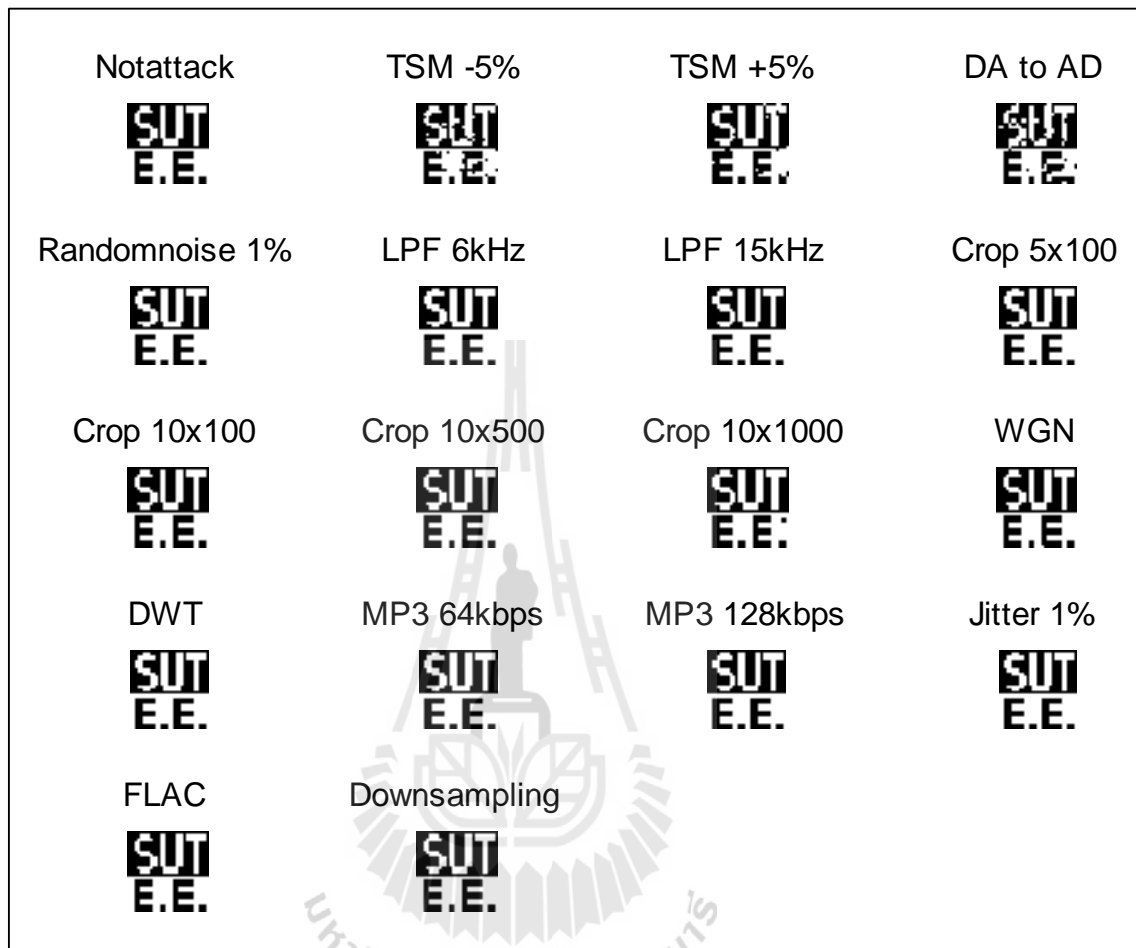
รูปที่ ข.44 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลง Look for the Silver Lining

## เพลง Fly Me to the Moon



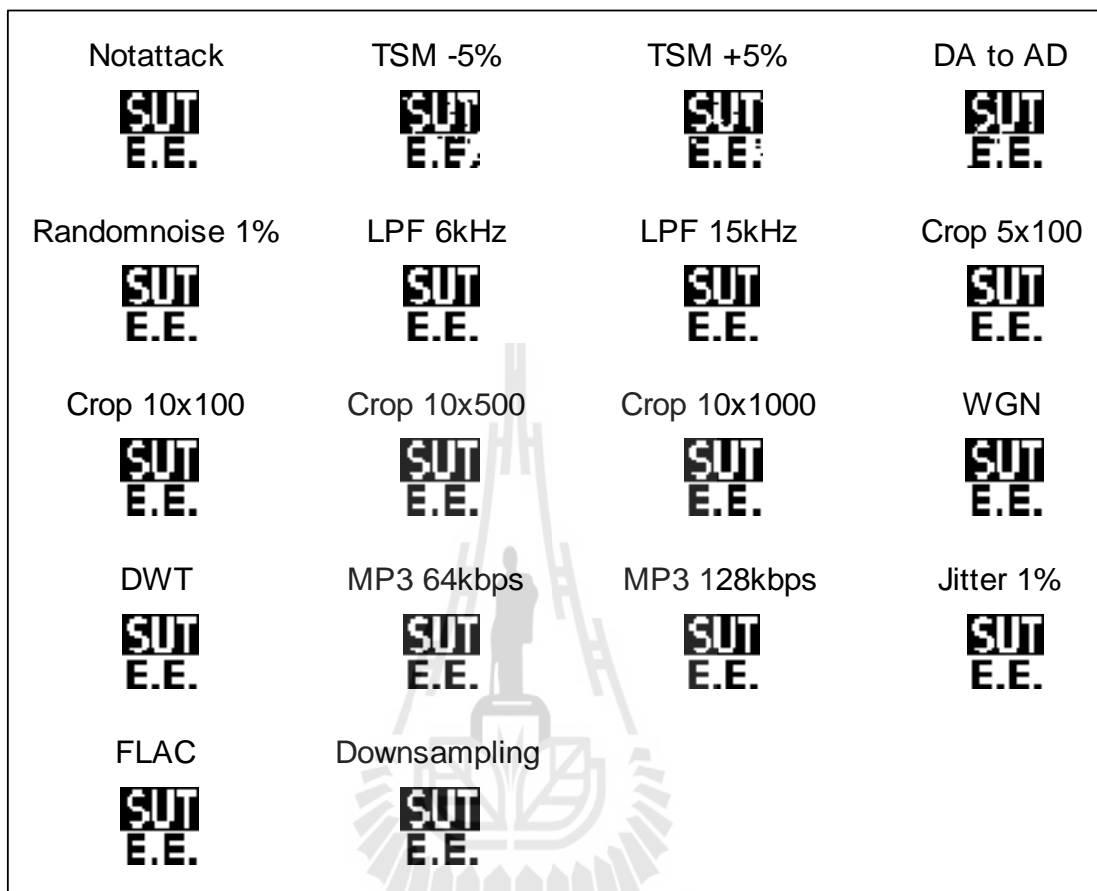
รูปที่ ข.45 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลง Fly Me to the Moon

## เพลง Love Is A Many Splendored Thing



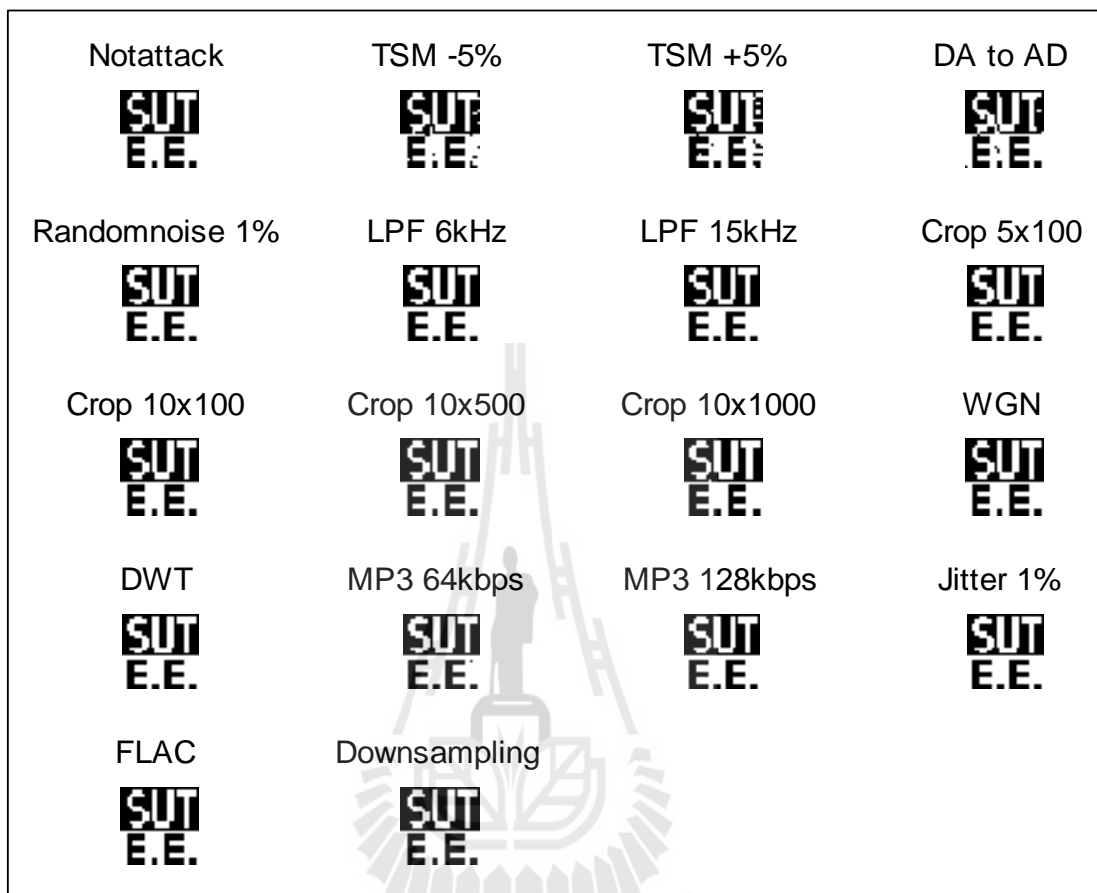
รูปที่ ข.46 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลง Love Is A Many Splendored Thing

## เพลง Dream A Little Dream Of Me



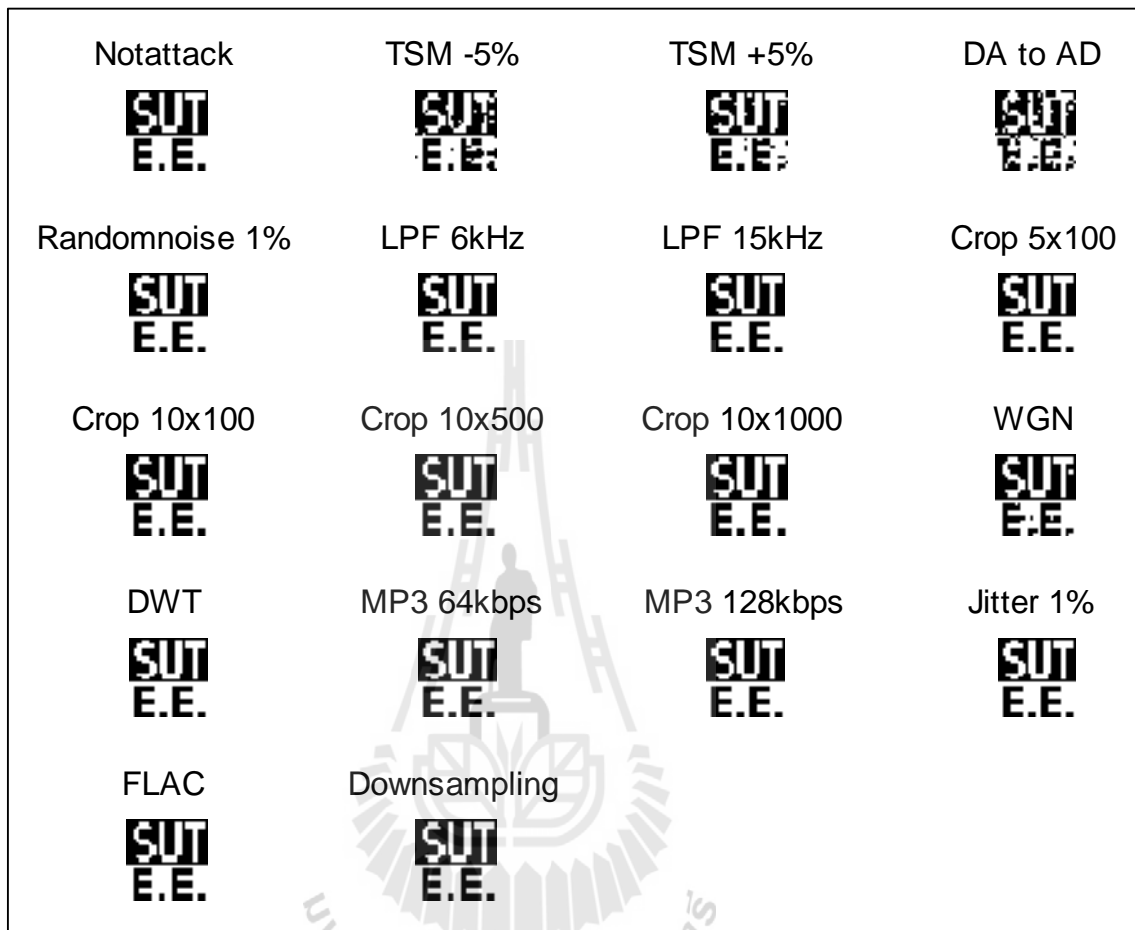
รูปที่ ข.47 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการโจมตีเพลง Dream A Little Dream Of Me

## เพลง Moon River



รูปที่ ข.48 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลง Moon River

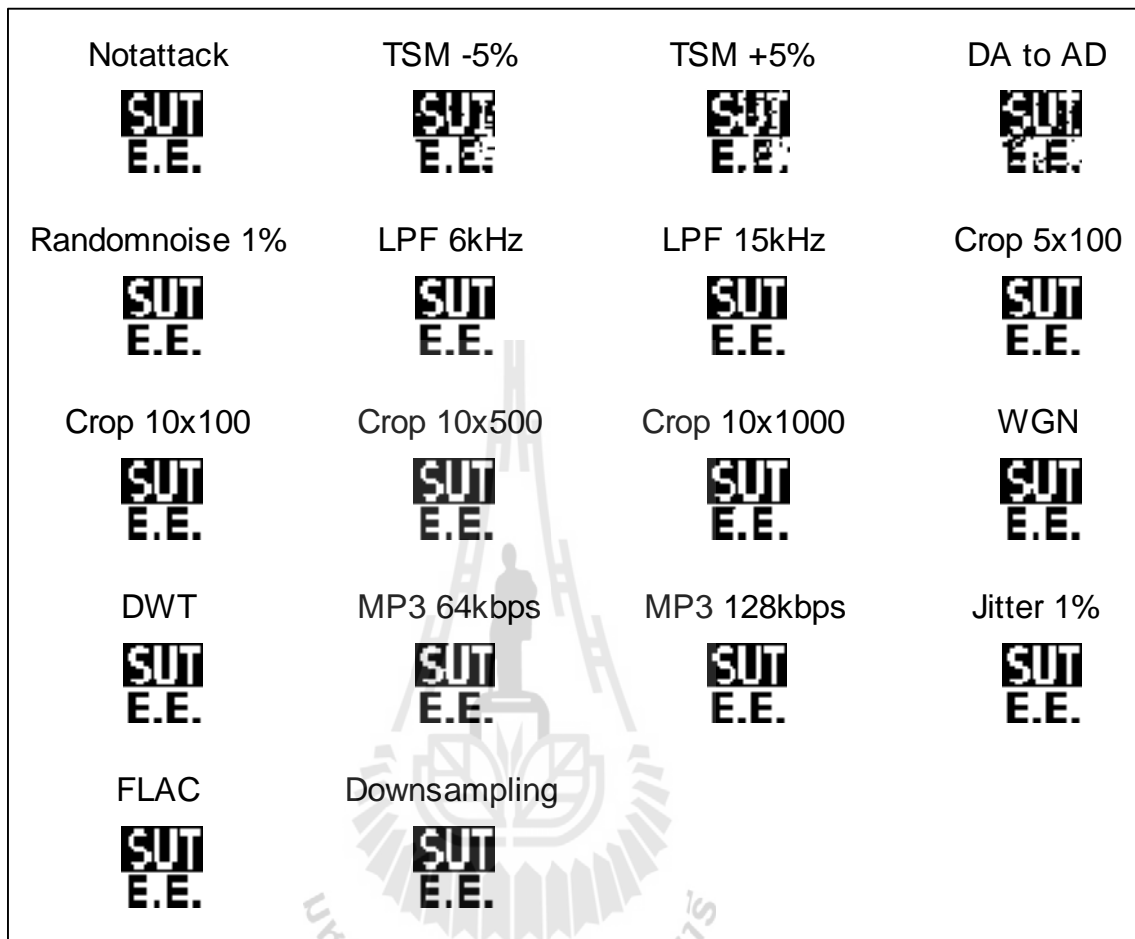
## เพลง Can't Take My Eyes Off You



รูปที่ ข.49 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลง Can't Take My Eyes Off You

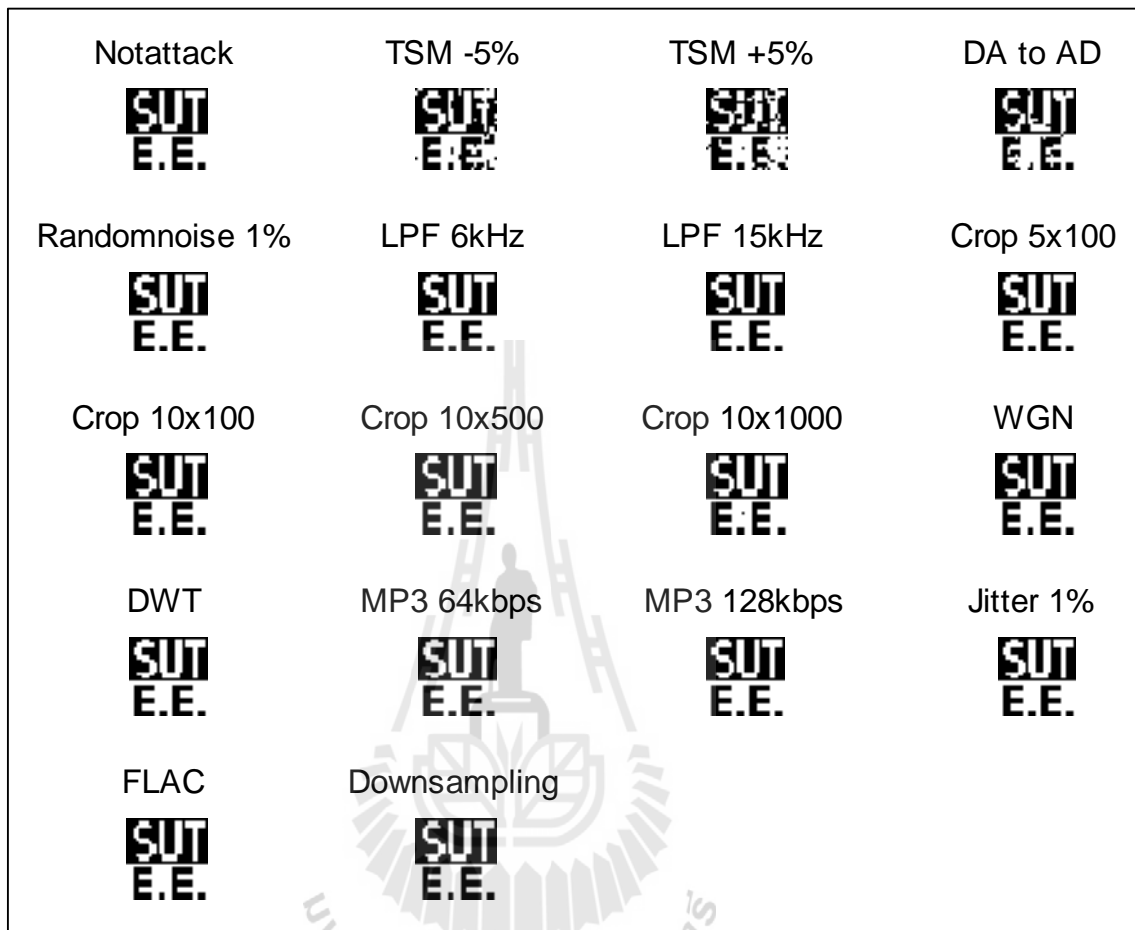


## เพลง Misty



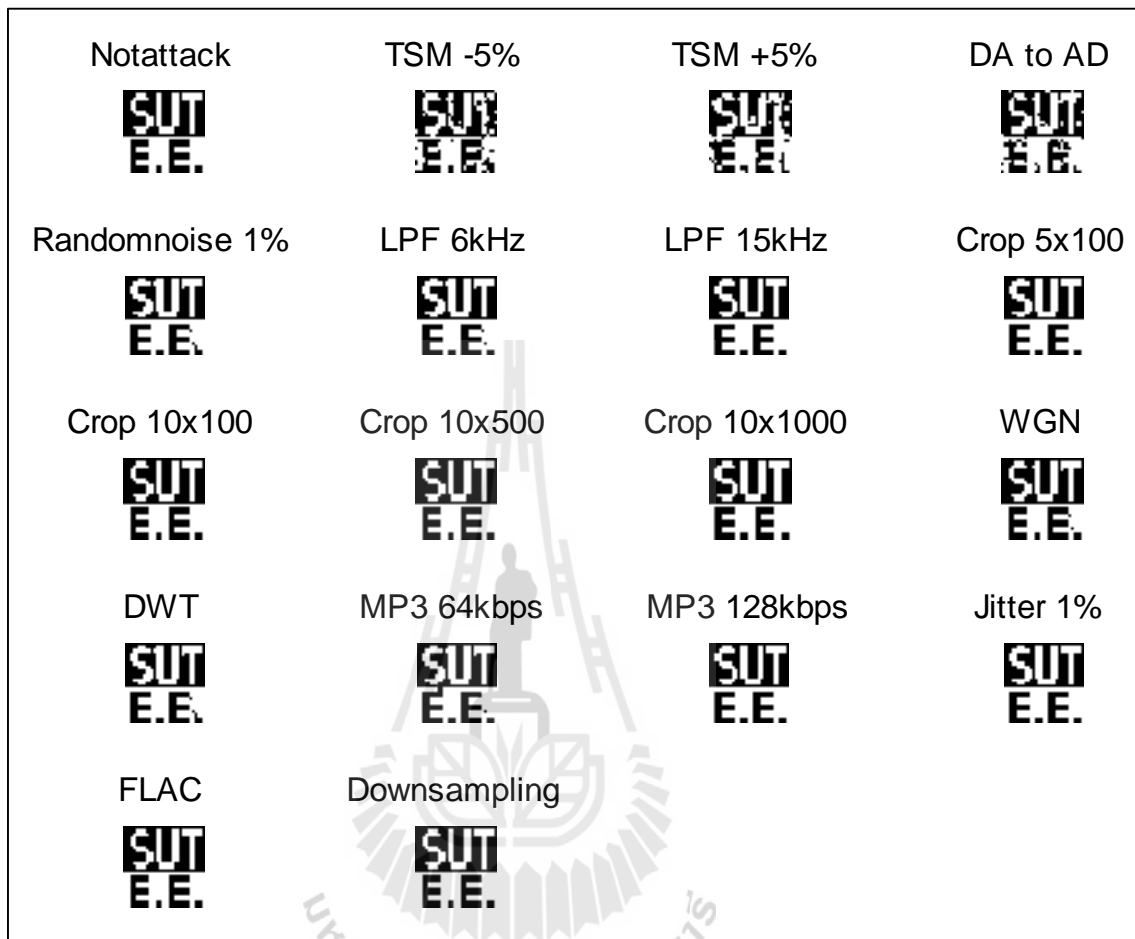
รูปที่ ข.50 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลง Misty

## เพลง Mission Impossible



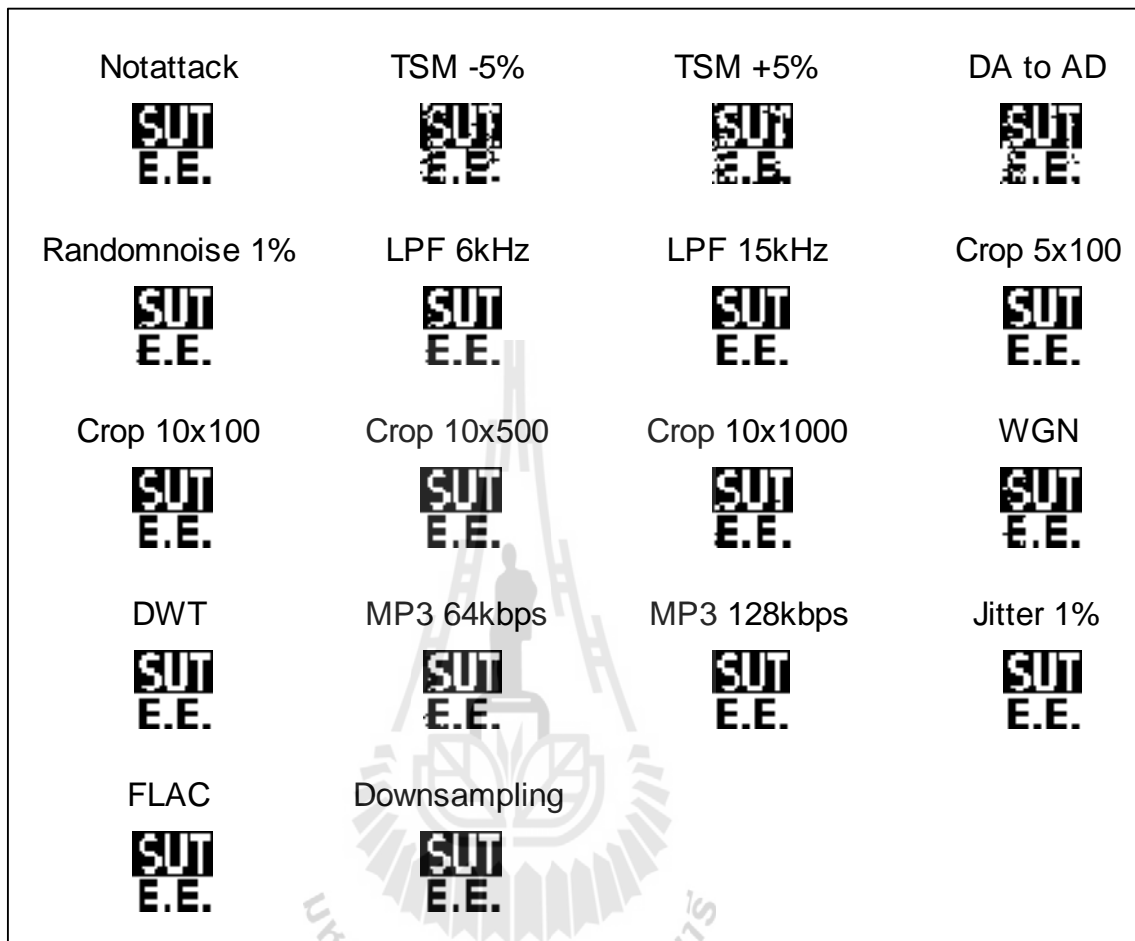
รูปที่ ข.51 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลง Mission Impossible

## เพลง Love Is All Around



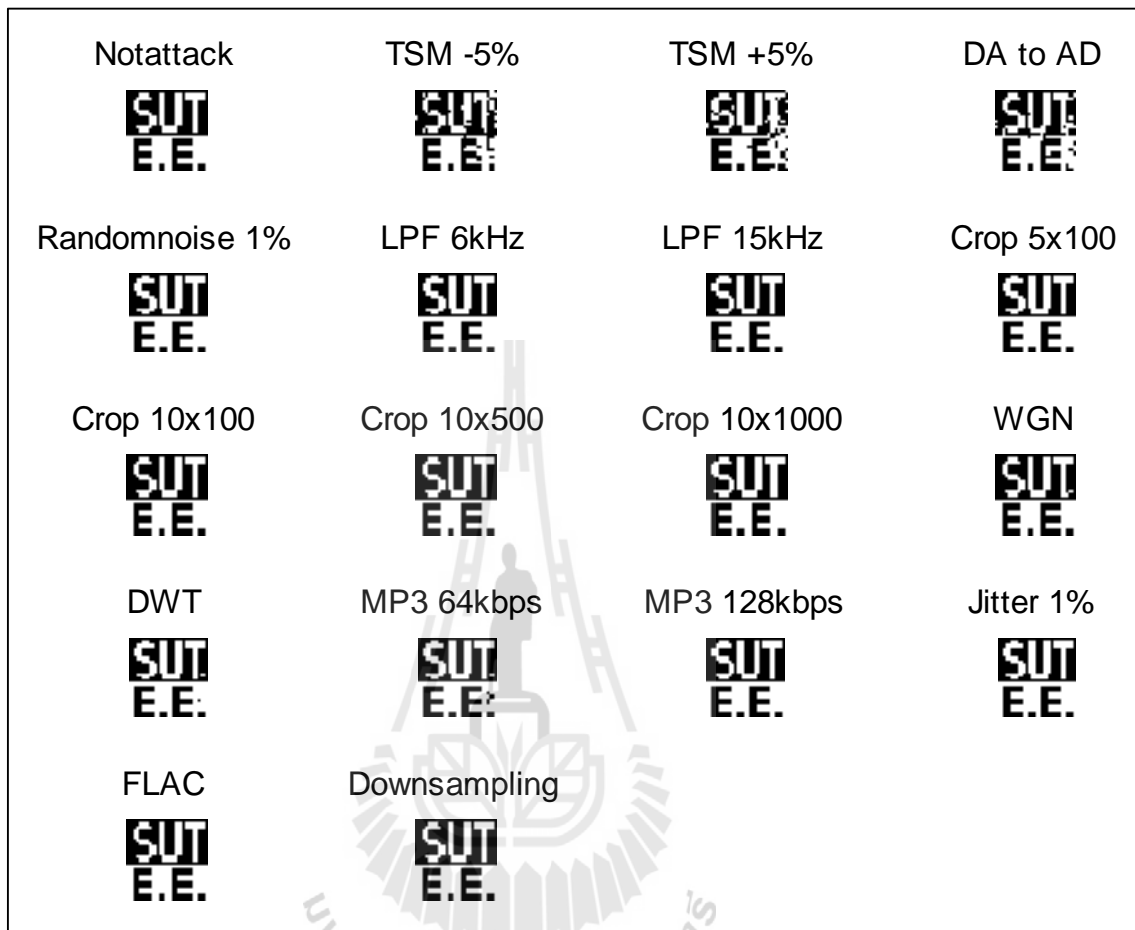
รูปที่ ข.52 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลง Love Is All Around

## เพลง She's Out Of My Life



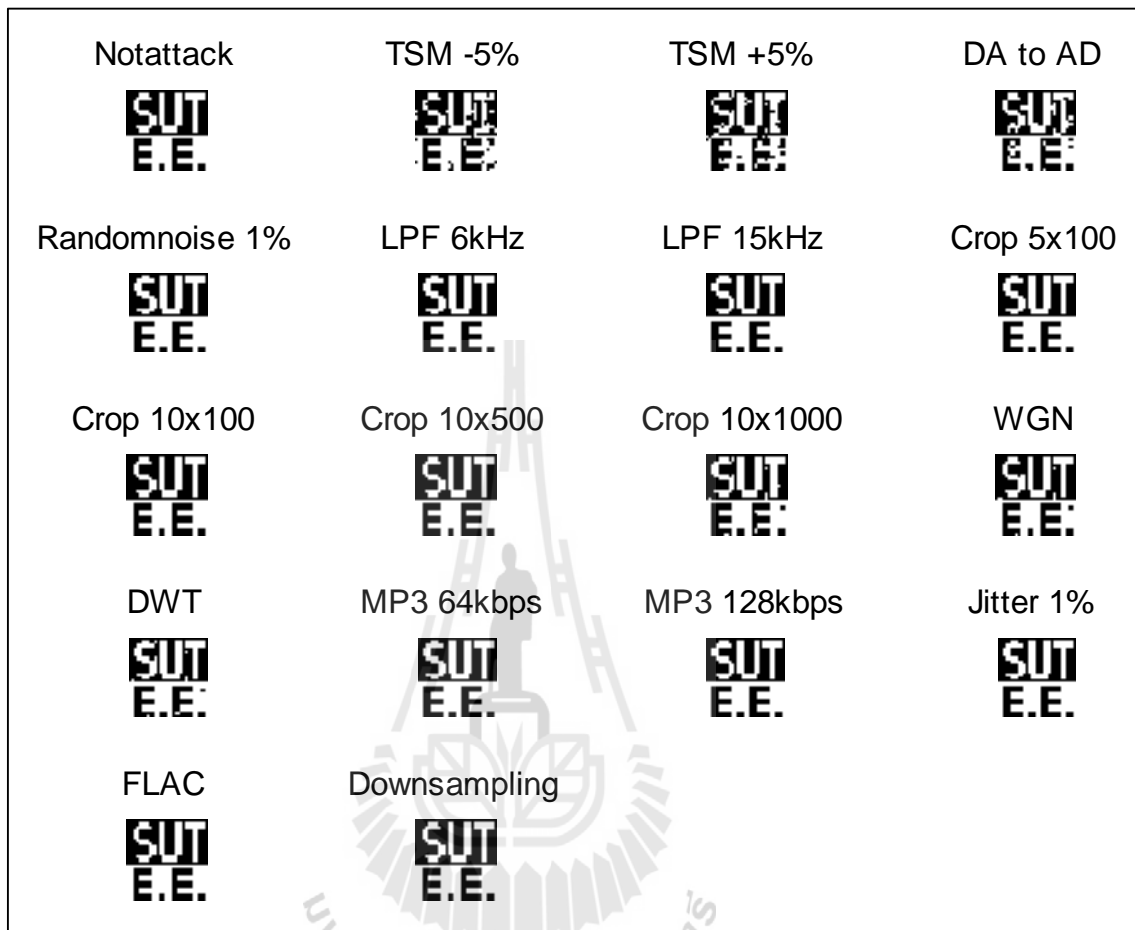
รูปที่ ข.53 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลง She's Out Of My Life

## เพลง Thinking Of You



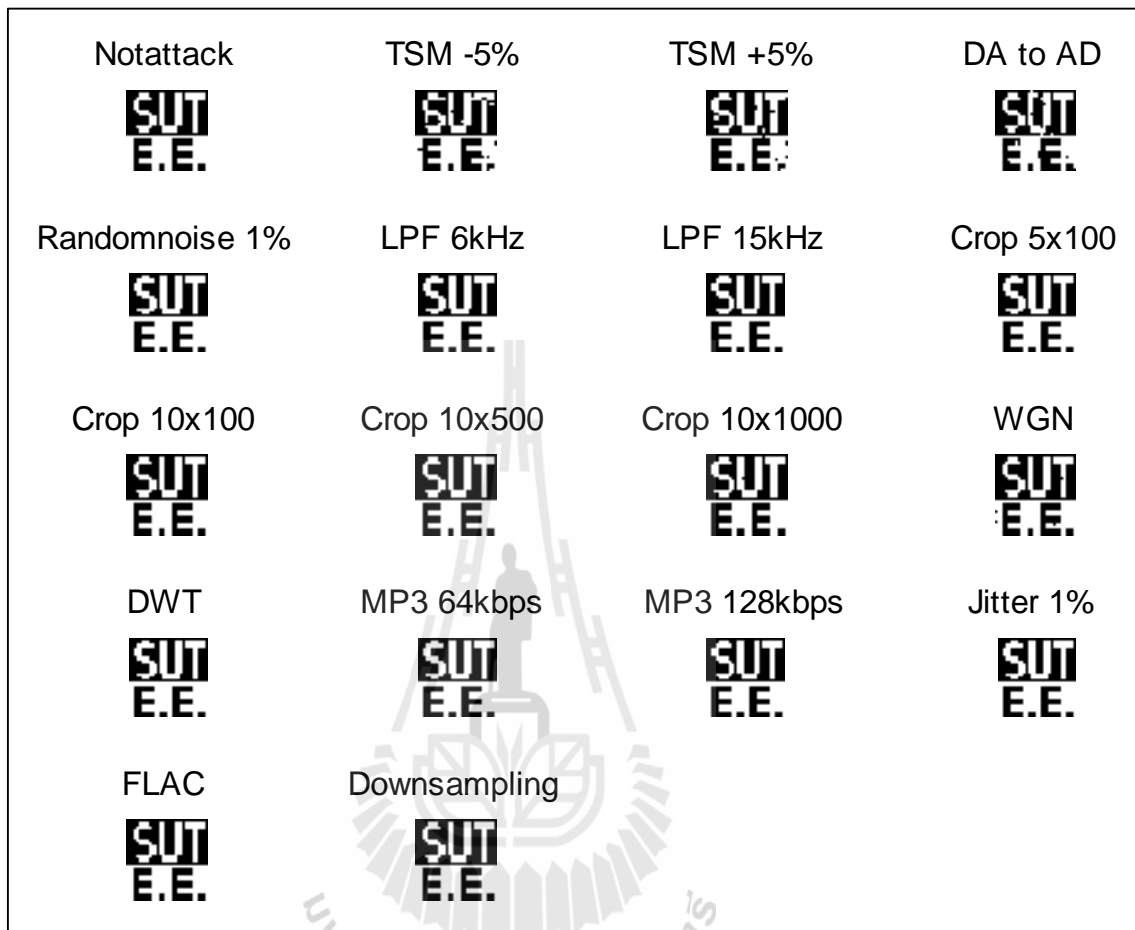
รูปที่ ข.54 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลง Thinking Of You

## เพลง What Can I Do



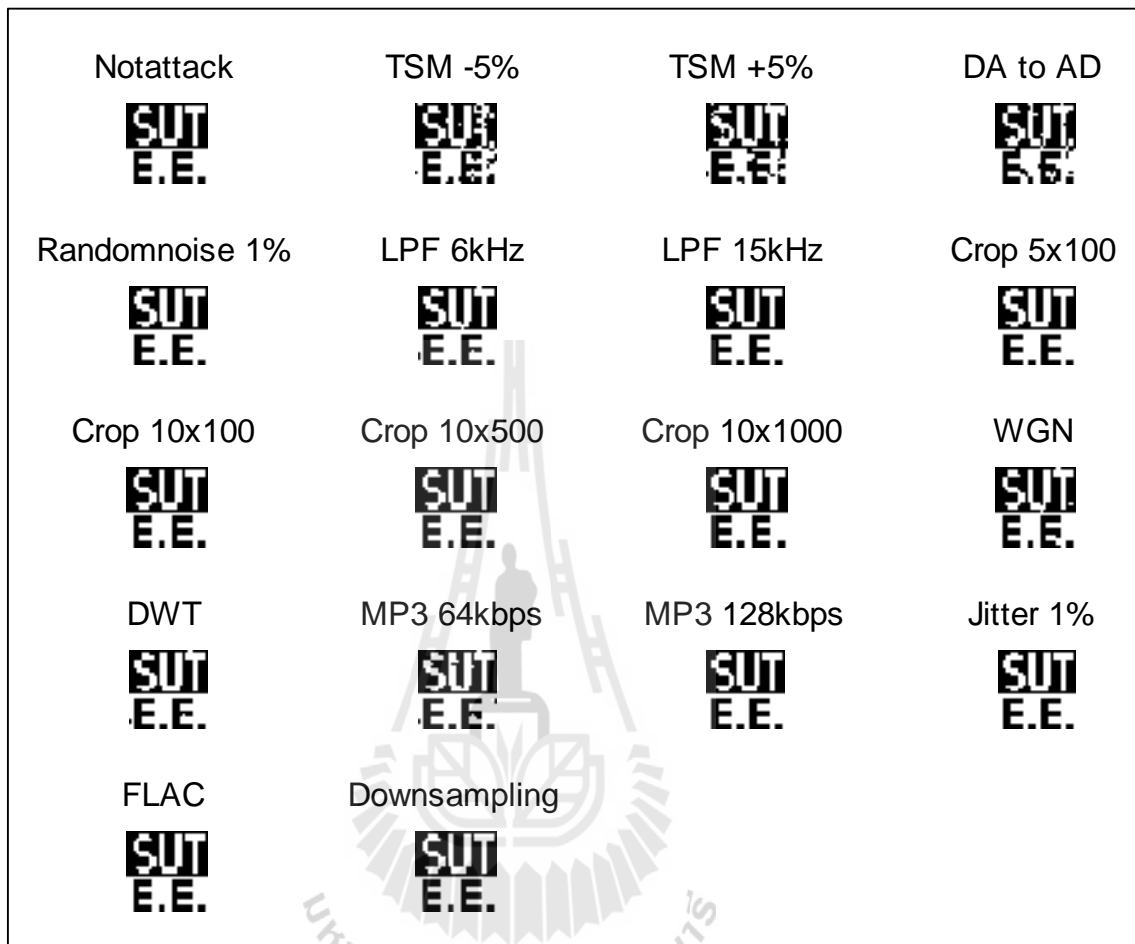
รูปที่ ข.55 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลง What Can I Do

## เพลง That's Why You Go Away



รูปที่ ข.56 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลง That's Why You Go Away

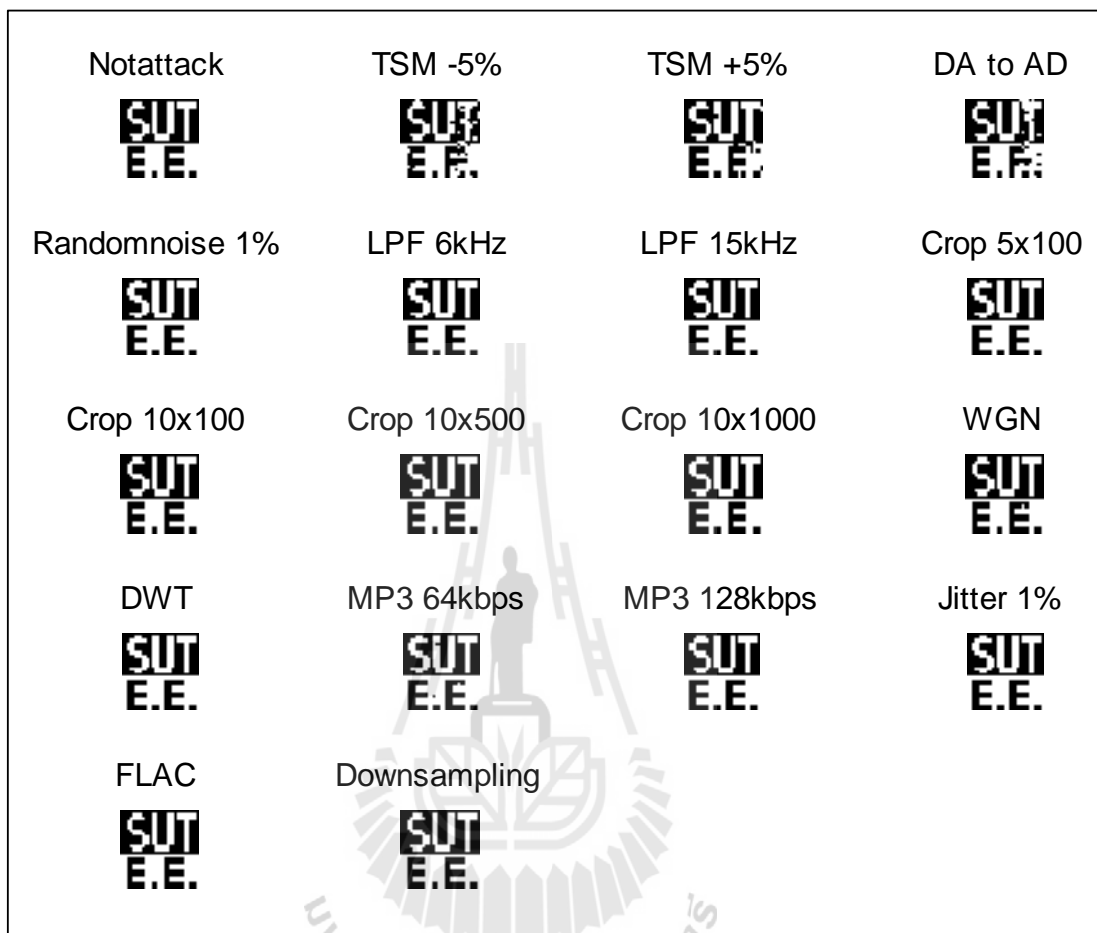
## เพลง Don't Know Why



รูปที่ ข.57 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลง Don't Know Why

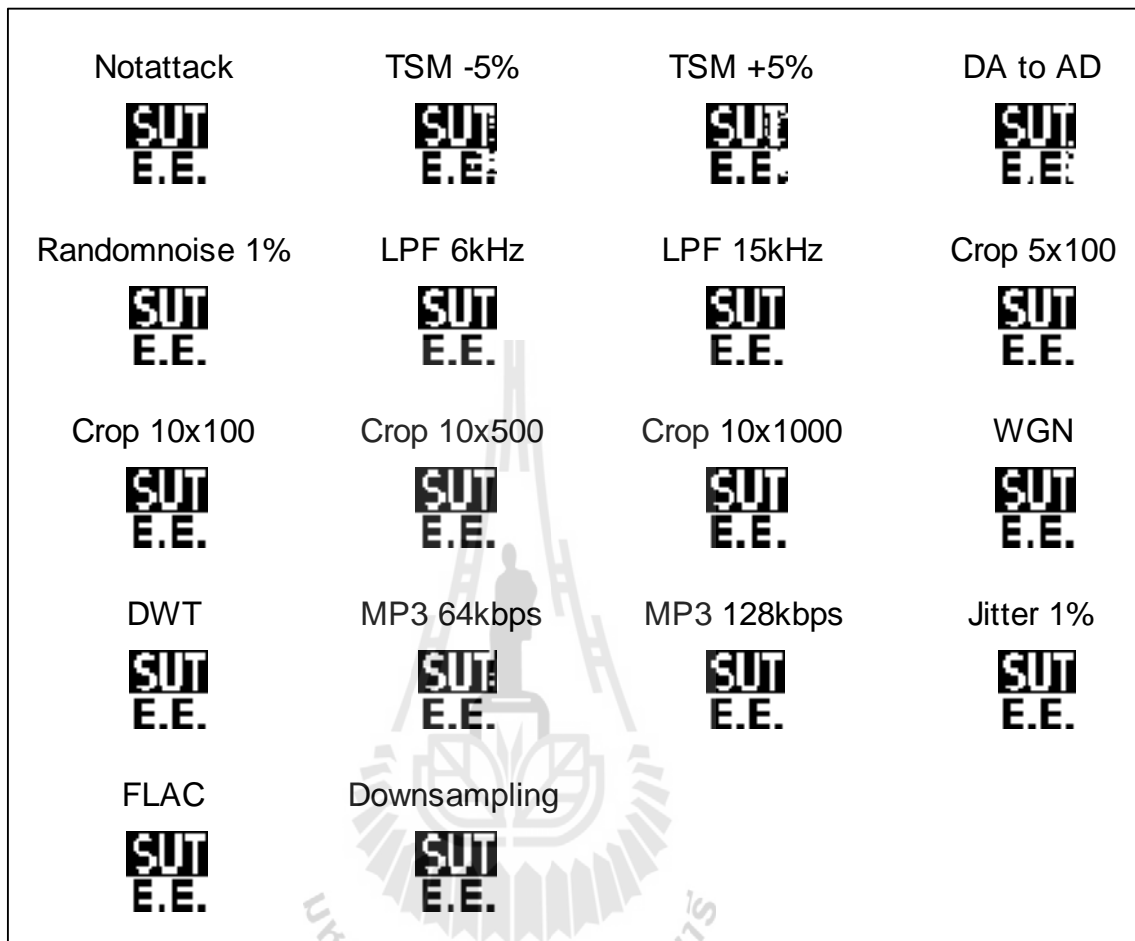


## เพลง Cherish



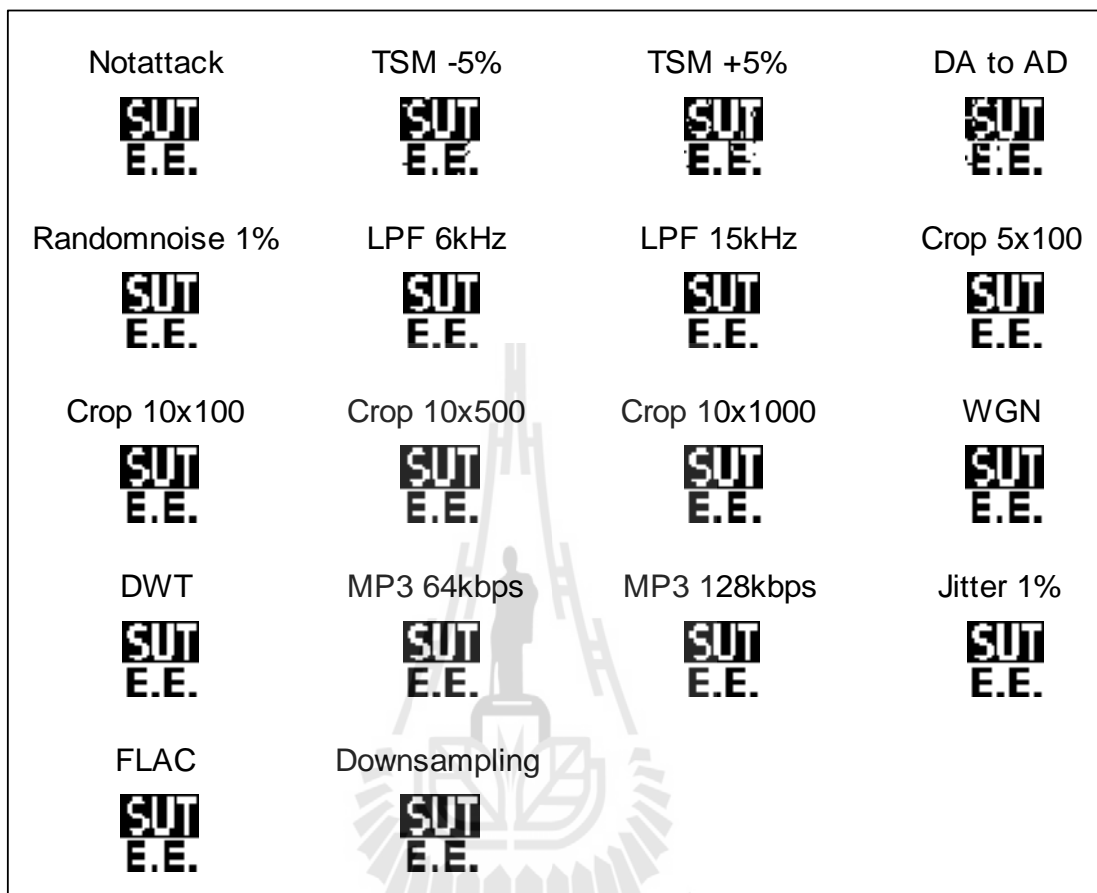
รูปที่ ข.58 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลง Cherish

## เพลง Tonight I Celebrate My Love



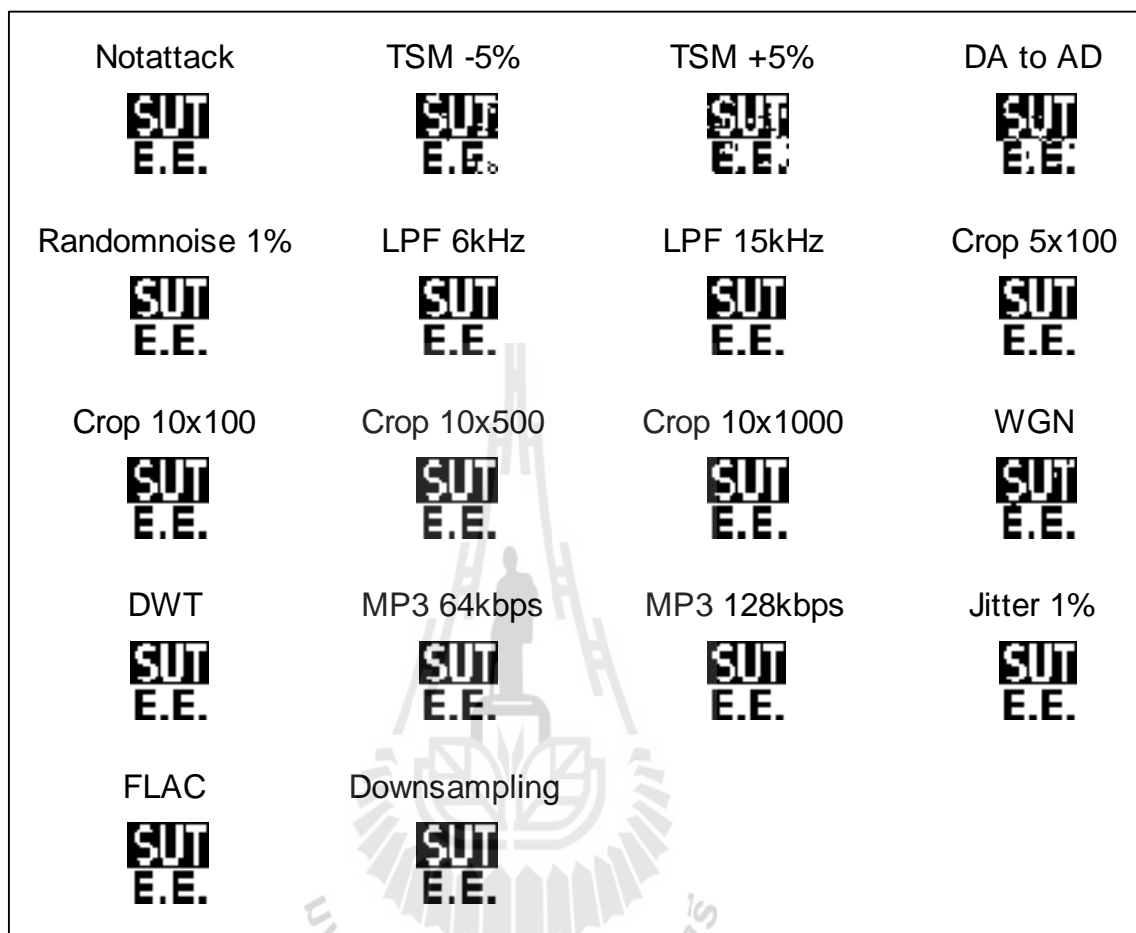
รูปที่ ข.59 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลง Tonight I Celebrate My Love

## เพลง Nothing Compares to you



รูปที่ ข.60 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการโจมตีเพลง Nothing Compares to you

## เพลง Ocean Deep



รูปที่ ข.61 ภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้หลังผ่านการ โจมตีเพลง Ocean Deep

ภาคผนวก ค

ตัวอย่างโปรแกรม Matlab ที่ใช้งานวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

### CODE ที่ใช้ในการเตรียมสัญญาณภาพลายน้ำ

```
p=imread('eesut.jpg');
pic=double(im2bw(p));
[row,col]=size(pic);
vc=reshape(pic,1,row*col);
    for i=1:length(vc)
        if vc(i)==1
            W(i)=-1;
        else
            W(i)=1;
        end
    end
```

### CODE ที่ใช้ในการเตรียมสัญญาณเสียง

```
[y,Fs1,bit1] = wavread('Test.wav');
y1=rot90(y(:,1),1);
Sy1=length(y1);
sc=length(y1);
seg=row*col;
seg_w =fix(sc/seg);
ca_reshape=reshape(y1(1:seg*seg_w),seg_w,seg);
```

### CODE ที่ใช้ในการฝังลายน้ำ

```

for i=1:seg;
    level=10;wv='db1';% step 1.5
    [C,L] = wavedec(ca_reshape(:,i)',level,wv);
    ca10 = appcoef(C,L,wv,level);
    [cd1,cd2,cd3,cd4,cd5,cd6,cd7,cd8,cd9,cd10]=detcoef(C,L,[1,2,3,4,5,6,7,
8,9,10]);
    s_meanS2=mean(cd10);
    if W(i)==-1
        Sa_1new2=(cd10-s_meanS2)+bestvalue;
    elseif W(i)==1
        Sa_1new2=(cd10-s_meanS2)- bestvalue;
    end
    cd10=Sa_1new2;
    Cnew = [ca10 cd10 cd9 cd8 cd7 cd6 cd5 cd4 cd3 cd2 cd1];
    audio2 = waverec(Cnew,L,wv);
    ca_reshape_new(:,i)=audio2;
end

audio_new=reshape(ca_reshape_new,1,seg_w*seg);
audio_new (seg_w*seg+1:Sy1)=y1(seg_w*seg+1:Sy1);
wavwrite(audio_new,Fs1,bit1,'music_emb');

```

### CODE ที่ใช้ในการตรวจจับลายน้ำ

```
[A2,Fs1,bit1] = wavread('music_emb.wav');% step 1.2
A2=rot90(A2(:,1),1);
sc=length(A2);
seg=row*col;
seg_w =fix(sc/seg);
ca_reshape2=reshape(A2(1:seg*seg_w),seg_w,seg);
    for i=1:row*col
        [C,L] = wavedec(ca_reshape2(:,i)',level,wv);
        ca10 = appcoef(C,L,wv,level);
        [cd1,cd2,cd3,cd4,cd5,cd6,cd7,cd8,cd9,cd10]=detcoef(C,L,[1,2,3,4,5,6,7,8,9,10]);
        if mean(cd10)>0
            watermark(i)=1;
        else
            watermark (i)=0;
        end
    end
Pic_ watermark =reshape(watermark,row,col);
Figure();
imshow(Pic_ watermark);
```



ภาคผนวก ง

ตารางผลการทดสอบความทนทานต่อการโจมตี  
และตารางแสดงค่าความผิดพลาดของบิตลายน้ำ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ง.1 ค่าสหสัมพันธ์จากผลการทดสอบอัลกอริทึมกับเพลงไทยลูกทุ่ง (ต่อ)

	เพลงทดสอบ ที่ 6	เพลงทดสอบ ที่ 7	เพลงทดสอบ ที่ 8	เพลงทดสอบ ที่ 9	เพลงทดสอบ ที่ 10
ไม่มีการ โจมตี	1	1	1	1	1
Time scale -5%	0.965	0.972	0.942	0.912	0.979
Time scale +5%	0.953	0.986	0.946	0.942	0.969
DA/AD	0.968	0.954	0.923	0.915	0.958
Random noise 1%	1	1	1	1	1
Low pass filter 6kHz	1	1	0.988	0.996	1
Low pass filter 15kHz	1	1	1	1	1
Crop 5x100	1	1	1	1	1
Crop 10x100	1	1	1	1	1
Crop 10x500	1	1	0.988	1	1
Crop 10x1000	0.996	1	0.983	0.998	0.996
WGN	1	1	0.989	0.996	1
DWT	1	1	0.988	1	1
MP3 : 64 kbps	1	1	0.988	0.991	0.998
MP3 : 128 kbps	1	1	1	0.998	0.998
Jitter 1%	1	1	1	1	1
FLAC	1	1	1	1	1
Downsampling	1	1	1	1	1

ตารางที่ ง.2 ค่าสหสัมพันธ์จากผลการทดสอบอัลกอริทึมกับเพลงไทยสุนทราภรณ์ (ต่อ)

	เพลงทดสอบ ที่ 6	เพลงทดสอบ ที่ 7	เพลงทดสอบ ที่ 8	เพลงทดสอบ ที่ 9	เพลงทดสอบ ที่ 10
ไม่มีการโจมตี	1	1	1	1	1
Time scale -5%	0.913	0.945	0.903	0.930	0.917
Time scale +5%	0.910	0.936	0.954	0.933	0.924
DA/AD	0.911	0.947	0.942	0.972	0.915
Random noise 1%	1	1	1	1	1
Low pass filter 6kHz	0.978	1	0.984	0.998	1
Low pass filter 15kHz	0.979	1	1	1	1
Crop 5x100	1	1	1	1	1
Crop 10x100	1	1	0.988	1	1
Crop 10x500	0.978	0.982	1	0.996	1
Crop 10x1000	0.976	0.980	0.984	0.990	1
WGN	0.986	0.978	0.983	0.996	0.978
DWT	0.983	0.982	1	1	1
MP3 : 64 kbps	0.973	0.982	0.979	0.986	1
MP3 : 128 kbps	0.979	1	0.979	0.986	1
Jitter 1%	1	1	1	1	1
FLAC	1	1	1	1	1
Downsampling	1	1	1	1	1

ตารางที่ ง.3 ค่าสหสัมพันธ์จากผลการทดสอบอัลกอริทึมกับเพลงไทยเดิม (ต่อ)

	เพลงทดสอบ ที่ 6	เพลงทดสอบ ที่ 7	เพลงทดสอบ ที่ 8	เพลงทดสอบ ที่ 9	เพลงทดสอบ ที่ 10
ไม่มีการ โจมตี	1	1	1	1	1
Time scale -5%	0.983	0.972	0.934	0.967	0.928
Time scale +5%	0.986	0.988	0.963	0.938	0.941
DA/AD	0.931	0.971	0.974	0.933	0.930
Random noise 1%	1	1	1	1	1
Low pass filter 6kHz	1	1	1	1	0.996
Low pass filter 15kHz	1	1	1	1	0.998
Crop 5x100	1	1	1	1	1
Crop 10x100	1	1	1	1	1
Crop 10x500	0.998	1	1	1	1
Crop 10x1000	1	1	1	1	0.996
WGN	0.998	1	0.989	1	0.995
DWT	1	1	0.993	1	0.996
MP3 : 64 kbps	1	1	0.988	1	0.998
MP3 : 128 kbps	1	1	1	1	1
Jitter 1%	1	1	1	1	1
FLAC	1	1	1	1	1
Downsampling	1	1	1	1	1

ตารางที่ ง.4 ค่าสหสัมพันธ์จากผลการทดสอบอัลกอริทึมกับเพลงสากล Classics (ต่อ)

	เพลงทดสอบ ที่ 6	เพลงทดสอบ ที่ 7	เพลงทดสอบ ที่ 8	เพลงทดสอบ ที่ 9	เพลงทดสอบ ที่ 10
ไม่มีการ โจมตี	1	1	1	1	1
Time scale -5%	0.949	0.954	0.963	0.983	0.967
Time scale +5%	0.966	0.964	0.978	0.986	0.916
DA/AD	0.949	0.922	0.975	0.993	0.957
Random noise 1%	1	1	1	1	1
Low pass filter 6kHz	1	1	1	1	1
Low pass filter 15kHz	1	1	1	1	1
Crop 5x100	1	1	1	1	1
Crop 10x100	1	1	1	1	1
Crop 10x500	1	1	1	1	1
Crop 10x1000	1	1	1	1	1
WGN	1	0.988	1	0.976	0.986
DWT	1	1	1	1	1
MP3 : 64 kbps	0.995	0.995	1	0.996	1
MP3 : 128 kbps	1	1	1	1	1
Jitter 1%	1	1	1	1	1
FLAC	1	1	1	1	1
Downsampling	1	1	1	1	1

ตารางที่ ๓.5 ค่าสหสัมพันธ์จากผลการทดสอบอัลกอริทึมกับเพลงสากล Pop (ต่อ)

	เพลงทดสอบ ที่ 6	เพลงทดสอบ ที่ 7	เพลงทดสอบ ที่ 8	เพลงทดสอบ ที่ 9	เพลงทดสอบ ที่ 10
ไม่มีการ โจมตี	1	1	1	1	1
Time scale -5%	0.937	0.943	0.976	0.985	0.961
Time scale +5%	0.936	0.976	0.968	0.975	0.944
DA/AD	0.942	0.961	0.988	0.973	0.961
Random noise 1%	1	1	1	1	1
Low pass filter 6kHz	0.988	1	1	1	1
Low pass filter 15kHz	1	1	1	1	1
Crop 5x100	1	1	1	1	1
Crop 10x100	1	1	1	1	1
Crop 10x500	1	1	1	1	1
Crop 10x1000	1	1	0.998	1	1
WGN	0.988	0.998	1	1	0.993
DWT	0.993	1	1	1	1
MP3 : 64 kbps	0.979	0.995	0.995	1	1
MP3 : 128 kbps	1	1	1	1	1
Jitter 1%	1	1	1	1	1
FLAC	1	1	1	1	1
Downsampling	1	1	1	1	1

ตารางที่ ๓.6 ค่าสหสัมพันธ์จากผลการทดสอบอัลกอริทึมกับเพลงสากล Jazz (ต่อ)

	เพลงทดสอบ ที่ 6	เพลงทดสอบ ที่ 7	เพลงทดสอบ ที่ 8	เพลงทดสอบ ที่ 9	เพลงทดสอบ ที่ 10
ไม่มีการ โจมตี	1	1	1	1	1
Time scale -5%	0.968	0.976	0.930	0.949	0.926
Time scale +5%	0.981	0.959	0.961	0.949	0.912
DA/AD	0.983	0.973	0.912	0.930	0.955
Random noise 1%	1	1	1	1	1
Low pass filter 6kHz	1	1	1	1	1
Low pass filter 15kHz	1	1	1	1	1
Crop 5x100	1	1	1	1	1
Crop 10x100	1	1	1	1	1
Crop 10x500	1	1	1	1	1
Crop 10x1000	1	0.998	1	0.995	0.998
WGN	1	1	0.986	0.996	1
DWT	1	1	1	1	1
MP3 : 64 kbps	1	0.998	1	0.996	1
MP3 : 128 kbps	1	1	1	1	1
Jitter 1%	1	1	1	1	1
FLAC	1	1	1	1	1
Downsampling	1	1	1	1	1

ตารางที่ ง.7 ค่าความผิดพลาดของบิตตายน้ําจากผลการทดสอบอัลกอริทึมกับเพลงไทยลูกทุ่ง (ต่อ)

	เพลงทดสอบ ที่ 6	เพลงทดสอบ ที่ 7	เพลงทดสอบ ที่ 8	เพลงทดสอบ ที่ 9	เพลงทดสอบ ที่ 10
ไม่มีการ โจมตี	0	0	0	0	0
Time scale -5%	21	17	34	53	12
Time scale +5%	28	8	32	34	18
DA/AD	19	27	46	50	27
Random noise 1%	1	0	0	0	0
Low pass filter 6kHz	1	0	7	2	0
Low pass filter 15kHz	1	0	0	0	0
Crop 5x100	1	0	0	0	0
Crop 10x100	1	0	0	0	0
Crop 10x500	1	0	7	0	0
Crop 10x1000	2	0	10	1	2
WGN	1	0	6	1	0
DWT	1	0	7	0	0
MP3 : 64 kbps	1	0	7	5	1
MP3 : 128 kbps	1	0	0	1	1
Jitter 1%	1	0	0	0	0
FLAC	1	0	0	0	0
Downsampling	1	0	0	0	0



ตารางที่ ง.8 ค่าความผิดพลาดของบิตลายนี้จากผลการทดสอบอัลกอริทึมกับเพลง

ไทยสุนทราภรณ์ (ต่อ)

	เพลงทดสอบ ที่ 6	เพลงทดสอบ ที่ 7	เพลงทดสอบ ที่ 8	เพลงทดสอบ ที่ 9	เพลงทดสอบ ที่ 10
ไม่มีกร โจมตี	0	0	0	0	0
Time scale -5%	52	33	57	42	44
Time scale +5%	54	38	27	40	45
DA/AD	53	31	34	17	50
Random noise 1%	0	0	0	0	0
Low pass filter 6kHz	13	0	9	1	0
Low pass filter 15kHz	12	0	0	0	0
Crop 5x100	0	0	0	0	0
Crop 10x100	0	0	7	0	0
Crop 10x500	11	11	0	3	0
Crop 10x1000	12	11	11	6	0
WGN	11	12	10	2	13
DWT	10	11	0	0	0
MP3 : 64 kbps	16	11	12	8	0
MP3 : 128 kbps	12	0	8	1	0
Jitter 1%	0	0	0	0	0
FLAC	0	0	0	0	0
Downsampling	0	0	0	0	0

ตารางที่ ง.9 ค่าความผิดพลาดของบิตลายน้ําจาก ผลการทดสอบอัลกอริทึมกับเพลงไทยเดิม (ต่อ)

	เพลงทดสอบ ที่ 6	เพลงทดสอบ ที่ 7	เพลงทดสอบ ที่ 8	เพลงทดสอบ ที่ 9	เพลงทดสอบ ที่ 10
ไม่มีการ โจมตี	0	0	0	0	0
Time scale -5%	10	17	39	19	43
Time scale +5%	8	7	22	36	35
DA/AD	41	17	15	40	42
Random noise 1%	0	0	0	0	0
Low pass filter 6kHz	0	0	0	0	2
Low pass filter 15kHz	0	0	0	0	1
Crop 5x100	0	0	0	0	0
Crop 10x100	0	0	0	0	0
Crop 10x500	1	0	0	0	0
Crop 10x1000	0	0	0	0	2
WGN	1	0	4	0	3
DWT	0	0	4	0	2
MP3 : 64 kbps	0	0	7	0	1
MP3 : 128 kbps	0	0	0	0	0
Jitter 1%	0	0	0	0	0
FLAC	0	0	0	0	0
Downsampling	0	0	0	0	0

ตารางที่ ง.10 ค่าความผิดพลาดของบิตลายน้ำจากผลการทดสอบอัลกอริทึมกับเพลง

สากล Classics (ต่อ)

	เพลงทดสอบ ที่ 6	เพลงทดสอบ ที่ 7	เพลงทดสอบ ที่ 8	เพลงทดสอบ ที่ 9	เพลงทดสอบ ที่ 10
ไม่มีการ โจมตี	0	0	0	0	0
Time scale -5%	30	27	22	10	19
Time scale +5%	20	21	13	8	52
DA/AD	30	46	15	4	25
Random noise 1%	0	0	0	0	0
Low pass filter 6kHz	0	0	0	0	0
Low pass filter 15kHz	0	0	0	0	0
Crop 5x100	0	0	0	0	0
Crop 10x100	0	0	0	0	0
Crop 10x500	0	0	0	0	0
Crop 10x1000	0	0	0	0	0
WGN	0	7	0	14	8
DWT	0	0	0	0	0
MP3 : 64 kbps	3	3	0	2	0
MP3 : 128 kbps	0	0	0	0	0
Jitter 1%	0	0	0	0	0
FLAC	0	0	0	0	0
Downsampling	0	0	0	0	0

ตารางที่ ง.11 ค่าความผิดพลาดของบิตลายน้ำจากผลการทดสอบอัลกอริทึมกับเพลง

สากล Pop (ต่อ)

	เพลงทดสอบ ที่ 6	เพลงทดสอบ ที่ 7	เพลงทดสอบ ที่ 8	เพลงทดสอบ ที่ 9	เพลงทดสอบ ที่ 10
ไม่มีการ โจมตี	0	0	0	0	0
Time scale -5%	37	35	14	9	23
Time scale +5%	37	14	19	15	33
DA/AD	34	24	7	16	23
Random noise 1%	0	0	0	0	0
Low pass filter 6kHz	7	0	0	0	0
Low pass filter 15kHz	0	0	0	0	0
Crop 5x100	0	0	0	0	0
Crop 10x100	0	0	0	0	0
Crop 10x500	0	0	0	0	0
Crop 10x1000	0	0	1	0	0
WGN	7	1	0	0	4
DWT	4	0	0	0	0
MP3 : 64 kbps	12	3	3	0	0
MP3 : 128 kbps	0	0	0	0	0
Jitter 1%	0	0	0	0	0
FLAC	0	0	0	0	0
Downsampling	0	0	0	0	0

ตารางที่ ง.12 ค่าความผิดพลาดของบิตลายน้ำจากผลการทดสอบอัลกอริทึมกับเพลง

สากล Jazz(ต่อ)

	เพลงทดสอบ ที่ 6	เพลงทดสอบ ที่ 7	เพลงทดสอบ ที่ 8	เพลงทดสอบ ที่ 9	เพลงทดสอบ ที่ 10
ไม่มีการ โจมตี	0	0	0	0	0
Time scale -5%	19	14	41	30	44
Time scale +5%	11	24	23	30	52
DA/AD	10	16	53	41	27
Random noise 1%	0	0	0	0	0
Low pass filter 6kHz	0	0	0	0	0
Low pass filter 15kHz	0	0	0	0	0
Crop 5x100	0	0	0	0	0
Crop 10x100	0	0	0	0	0
Crop 10x500	0	0	0	0	0
Crop 10x1000	0	1	0	1	1
WGN	0	0	8	0	0
DWT	0	0	0	0	0
MP3 : 64 kbps	0	1	0	2	0
MP3 : 128 kbps	0	0	0	0	0
Jitter 1%	0	0	0	0	0
FLAC	0	0	0	0	0
Downsampling	0	0	0	0	0

ภาคผนวก จ

ตารางแสดงค่าความเข้มในการฝังลายน้ำของ  
เพลงต่าง ๆ ที่ได้จากการค้นหาที่ดีที่สุดแบบพาร์ทิเคิลสวอม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ จ.1 ค่าความเข้มในการฟังลายน้ำของเพลงไทยลูกทุ่ง

ลำดับ	รายชื่อเพลง	ค่าความเข้มของลายน้ำ
เพลงทดสอบที่ 1	ไก่อ้า	0.41864041
เพลงทดสอบที่ 2	แพ้รบสนามรัก	0.87345849
เพลงทดสอบที่ 3	สายลมฟ่องว่าน้องลิ้ม	0.69278184
เพลงทดสอบที่ 4	ฮักสาวขอนแก่น	0.56690124
เพลงทดสอบที่ 5	ฝันยังไกลใจยังหวัง	0.72457660
เพลงทดสอบที่ 6	ให้ใจอย่าให้เจ็บ	0.74976968
เพลงทดสอบที่ 7	หัวใจที่ถูกอายทิ้ง	0.63982070
เพลงทดสอบที่ 8	ไม่คิดว่าเธอมีดาว	0.27002096
เพลงทดสอบที่ 9	รักคน โทรมมาจingle	0.78698281
เพลงทดสอบที่ 10	ควนแม่กลอง	0.30428745

ตารางที่ จ.2 ค่าความเข้มในการฟังลายน้ำของเพลงไทยสุนทราภรณ์

ลำดับ	รายชื่อเพลง	ค่าความเข้มของลายน้ำ
เพลงทดสอบที่ 1	สุขกันเถอะเรา	0.42289750
เพลงทดสอบที่ 2	พลอร์เฟื่องฟ้า	0.45770283
เพลงทดสอบที่ 3	คนเรารักกันยาก	0.42750152
เพลงทดสอบที่ 4	ชื่นชีวิต	0.52134651
เพลงทดสอบที่ 5	ดาวล้อมเดือน	0.57854420
เพลงทดสอบที่ 6	พรหมลิขิต	0.28914261
เพลงทดสอบที่ 7	สวัสดิปีใหม่	0.35048658
เพลงทดสอบที่ 8	ริมฝั่งน้ำ	0.37851086
เพลงทดสอบที่ 9	นางฟ้าจำแลง	0.52231111
เพลงทดสอบที่ 10	ทำน้ำ	0.48272950

ตารางที่ จ.3 ค่าความเข้มในการฟังลายนำของเพลงไทยเดิม

ลำดับ	รายชื่อเพลง	ค่าความเข้มของลายนำ
เพลงทดสอบที่ 1	แขกสาย	0.25754775
เพลงทดสอบที่ 2	เขมรพายเรือ	0.26137499
เพลงทดสอบที่ 3	ตบนิทราชาคริต	0.23167751
เพลงทดสอบที่ 4	เขมรพวง	0.23501022
เพลงทดสอบที่ 5	ตบวิวาท์พระสมุทร	0.26801683
เพลงทดสอบที่ 6	มหาฤกษ์มหาชัย	0.29855109
เพลงทดสอบที่ 7	หลังน้ำพระพุทธรมณฑ์	0.19466616
เพลงทดสอบที่ 8	ขับไม้บัณเฑาะว์	0.27038491
เพลงทดสอบที่ 9	ลมพัดชายเขา	0.38746025
เพลงทดสอบที่ 10	สร้อยเพชร	0.23249251

ตารางที่ จ.4 ค่าความเข้มในการฟังลายนำของเพลงสากล Classics

ลำดับ	รายชื่อเพลง	ค่าความเข้มของลายนำ
เพลงทดสอบที่ 1	Confutatis	0.34758330
เพลงทดสอบที่ 2	Benedictus	0.13828608
เพลงทดสอบที่ 3	Kyrie	0.27398536
เพลงทดสอบที่ 4	Lacrimosa	0.14975984
เพลงทดสอบที่ 5	Requiem	0.47610160
เพลงทดสอบที่ 6	Allegro in D major	0.21894636
เพลงทดสอบที่ 7	Romance in D major	0.15096894
เพลงทดสอบที่ 8	Rondo in D major	0.25909689
เพลงทดสอบที่ 9	Allegro in B flat major	0.13739069
เพลงทดสอบที่ 10	Larghetto in B flat major	0.15795096



**ตารางที่ จ.5 ค่าความเข้มในการฟังलयน้ำของเพลงสากล Pop**

ลำดับ	รายชื่อเพลง	ค่าความเข้มของलयน้ำ
เพลงทดสอบที่ 1	Love Is All Around	0.40882032
เพลงทดสอบที่ 2	She's Out Of My Life	0.24617857
เพลงทดสอบที่ 3	Thinking Of You	0.48830152
เพลงทดสอบที่ 4	What Can I Do	0.35290578
เพลงทดสอบที่ 5	That's Why You Go Away	0.20995715
เพลงทดสอบที่ 6	Don't Know Why	0.33751566
เพลงทดสอบที่ 7	Cherish	0.41150671
เพลงทดสอบที่ 8	Tonight I Celebrate My Love	0.29551788
เพลงทดสอบที่ 9	Nothing Compares to you	0.34995117
เพลงทดสอบที่ 10	Ocean Deep	0.21259754

**ตารางที่ จ.6 ค่าความเข้มในการฟังलयน้ำของเพลงสากล Jazz**

ลำดับ	รายชื่อเพลง	ค่าความเข้มของलयน้ำ
เพลงทดสอบที่ 1	I Love You for sentimental Reasons	0.24998236
เพลงทดสอบที่ 2	Blue Moon	0.18035069
เพลงทดสอบที่ 3	Look for the Silver Lining	0.30132237
เพลงทดสอบที่ 4	Fly Me to the Moon	0.25901550
เพลงทดสอบที่ 5	Love Is A Many Splendored Thing	0.24352571
เพลงทดสอบที่ 6	Dream A Little Dream Of Me	0.63251198
เพลงทดสอบที่ 7	Moon River	0.46525780
เพลงทดสอบที่ 8	Can't Take My Eyes Off You	0.18952577
เพลงทดสอบที่ 9	Misty	0.27282544
เพลงทดสอบที่ 10	Mission Impossible	0.26382508

ภาคผนวก ฉ

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์



## บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

กรัณฑ์กมล ภูครองหิน กิตติ อรรถกิจมงคล อาทิตย์ ศรีแก้ว ประโยชน์ คำสวัสดิ์ (2556) “การสร้าง  
ลายน้ำบนสัญญาณเสียงดิจิทัลโดยใช้การแปลงเวฟเล็ตและการหาค่าที่ดีที่สุดแบบพาร์ทิ  
เคิลสวอม”, งานประชุมวิชาการ งานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 5 (ECTI CARD-  
5), หัวข้อระบบความปลอดภัย การควบคุมการเข้าถึง การยืนยันตัวตน ระบบตรวจจับ,  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 8 – 10 พฤษภาคม 2556, หน้า 411-416



Paper ID: 1150

## การสร้างลายน้ำบนสัญญาณเสียงดิจิทัลโดยใช้การแปลงเวฟเล็ต และการหาค่าที่ดีที่สุดแบบพาร์ทิเคิลสวอม

กรณัทกมล ภูครองหิน	กิตติ อัดถกกิจมงคล	อาทิตย์ ศรีแก้ว	ประโยชน์ คำสวัสดิ์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
shift_art@hotmail.com	kitti@sut.ac.th	ra@sut.ac.th	prayoth@sut.ac.th

### บทคัดย่อ

ในบทความนี้ ได้นำเสนอการฝังลายน้ำแบบปิดบนสัญญาณเสียงในโดเมนเวฟเล็ต และ ใช้การค้นหาค่าที่ดีที่สุดแบบพาร์ทิเคิลสวอม (PSO) ค้นหาความเข้มของลายน้ำ เพื่อลายน้ำที่ได้มีความทนทานต่อการโจมตีทางประมวลผลสัญญาณ กระบวนการการสกัดลายน้ำในอัลกอริทึมที่นำเสนอไม่ต้องใช้สัญญาณเสียงต้นฉบับในการตรวจจับ ซึ่งจากผลการทดสอบลายน้ำที่ทำการฝังไม่สามารถรับรู้ถึงความเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเสียงจากการฟัง และมีความทนทานต่อการโจมตีการประมวลผลสัญญาณหลายรูปแบบ เช่น การตัด การกรองด้วยตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน การเพิ่มสัญญาณรบกวน การบีบอัดแบบมีการสูญเสีย การเปลี่ยนแปลงช่วงเวลา

### Abstract

In this paper, an algorithm for blind audio watermarking in wavelet transform domain is proposed to achieve high quality watermarked audio signal and robust watermark. A search algorithm called particle swarm optimization is used to find the optimal intensity of watermark. The watermark detection process can be performed without using the original audio signal. The experimental results demonstrate that watermark is inaudible and robust to many digital signal processing such as resampling, cropping, low pass filter additive noise, lossy compression and time scale modification.

### คำสำคัญ

Discrete wavelet transform, audio watermarking, Particle swarm optimization

### 1. บทนำ

ในปัจจุบันข้อมูลดิจิทัลได้ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายผ่านทางช่องทางต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์ อินเทอร์เน็ต โทรศัพท์มือถือ กล้องถ่ายรูป เป็นต้น ซึ่งข้อมูลดิจิทัลที่ถูกใช้งานนั้นก็มียุทธศาสตร์ และ ข้อมูลที่เป็นที่นิยมอย่างหนึ่ง คือ สัญญาณเสียงโดยเสียงนั้น

เป็นสัญญาณรูปแบบหนึ่งในปัจจุบันมีปัญหากลุกละเมิดเป็นอย่างมากจากผลของเทคโนโลยีดิจิทัล ผ่านการสื่อสารข้อมูลที่รวดเร็วทางอินเทอร์เน็ต ไม่ว่าจะเป็นทางคอมพิวเตอร์ โทรศัพท์มือถือ ซึ่งนับวันจะสร้างความเสียหายออกเป็นวงกว้าง เนื่องจากข้อมูลดิจิทัลเหล่านี้สามารถเข้าถึงได้อย่างรวดเร็ว ง่ายต่อการจัดเก็บ ทำสำเนา และเผยแพร่ เทคโนโลยีลายน้ำจึงถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ไขปัญหาการยืนยันความเป็นเจ้าของสื่อ การละเมิดลิขสิทธิ์ การสร้างลายน้ำดิจิทัลเป็นการฝังข้อมูลของผู้ที่เป็นเจ้าของสื่อลงบนสื่อดิจิทัลชนิดต่าง ๆ เช่น เสียง ภาพ และวีดีโอ ข้อมูลลายน้ำเหล่านี้ส่วนมากไม่สามารถตรวจจับ หรือรับรู้ได้ทันทีโดยประสาทสัมผัสของมนุษย์

### 2. ที่มาและแรงจูงใจของปัญหา

ในการวิเคราะห์สัญญาณเสียงนั้น เป้าหมายหลักของการฝังลายน้ำในสัญญาณเสียงคือการนำเอาข้อมูลที่เหมาะสมซ่อนไว้ในสัญญาณเสียงต้นฉบับ โดยในทางอุดมคติจะต้องไม่มีความแตกต่างระหว่างสัญญาณเสียงที่ฝังลายน้ำกับสัญญาณเสียงต้นฉบับ ง่ายต่อการสกัดลายน้ำ นำเชื่อถือ และมีความทนทานต่อการโจมตีทางประมวลผลสัญญาณ โดย International Federation of the Phonographic Industry (IFPI) [1], ได้ให้ข้อกำหนดคุณสมบัติของลายน้ำเสียงคือ 1) สัญญาณเสียงที่ทำการฝังลายน้ำไม่ควรรับรู้ได้จากการฟัง 2) ค่า SNR ต้องมากกว่า 20 dB และควรมีค่า data payload มากกว่า 20 bps 3) ลายน้ำควรจะสามารถต้านทานการดำเนินงานที่พบมากที่สุดในการประมวลผลสัญญาณเสียง และการโจมตี 4) ลายน้ำควรที่จะสามารถป้องกันการ

ตรวจสอบโดยไม่ได้รับอนุญาต การลบ และการฝัง โดยทั่วไปสามารถแปลงรูปแบบการฝังลายน้ำออกเป็นสองรูปแบบคือการฝังลายน้ำในโดเมนเวลา และการฝังลายน้ำในโดเมนความถี่ โดยการฝังลายน้ำในโดเมนความถี่นั้นได้รับความนิยมมากกว่า ในโดเมนที่เนื่องจากสัญญาณที่ได้มีคุณภาพที่ดีกว่า และลายน้ำมีความทนทานต่อการโจมตีมากกว่า [2,3] ใน [4] Cui et al. ได้ทำการฝังลายน้ำที่เป็นรูปภาพขาวดำลงในสัญญาณเสียงบนโดเมน cepstrum โดยใช้ audio masking เป็นตัวแปรควบคุม ซึ่งผลที่ได้มีลายน้ำไม่สามารถทนทานต่อตัวกรองความถี่ต่ำผ่านได้ ใน [5] Li et al. ได้นำเอาสัมประสิทธิ์เวฟเล็ต และค่า SNR มาใช้ในการคำนวณค่าความเข้มของลายน้ำ ซึ่งจากผลการทดสอบ ลายน้ำที่ได้มีความทนทานต่อการโจมตีหลายรูปแบบ แต่ในกระบวนการสกัดลายน้ำยังต้องอาศัยสัญญาณเสียงต้นฉบับ ใน [6] Cui et al. ใช้เทคนิคในเชิงการบีบอัดเสียงในการค้นหาตำแหน่งที่ทำการฝังลายน้ำบนโดเมนการแปลงเวฟเล็ตโดยใช้การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์เวฟเล็ตในส่วนความถี่สูง ซึ่งผลการทดสอบลายน้ำยังไม่สามารถทนทานต่อตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน และต้องใช้สัญญาณเสียงต้นฉบับในกระบวนการตรวจสอบ

ในงานวิจัยทางด้านลายน้ำสัญญาณเสียงในอดีตแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของพารามิเตอร์ที่เรียกว่า ค่าความเข้มของลายน้ำ ซึ่งถ้าพารามิเตอร์นี้มีค่าสูงลายน้ำจะมีความทนทาน แต่คุณภาพของสัญญาณที่ได้จะต่ำลง ในทางกลับกันหากพารามิเตอร์นี้มีค่าน้อยสัญญาณเสียงจะมีคุณภาพที่ดี แต่ลายน้ำที่ได้จะไม่มีความทนทานต่อการโจมตี ในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการฝังลายน้ำบนโดเมนการแปลงเวฟเล็ต ค่าความเข้มของลายน้ำจะถูกค้นหาโดยเทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์ที่เรียกว่า ฟาร์ทิลิตัลวอม ออฟฟิโมเซชัน โดยใช้ค่า SNR และค่าการทำสหสัมพันธ์ของลายน้ำเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ซึ่งค่า SNR และค่าการทำสหสัมพันธ์นั้นหมายถึงคุณภาพของสัญญาณเสียงที่ทำการฝังลายน้ำ และความทนทานต่อการโจมตี ตามลำดับ

### 3. งานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 3.1 Discrete Wavelet Transform (DWT)

การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยนั้นได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในงานด้านการประมวลผลสัญญาณ โดยเฉพาะการสร้างลายน้ำในสัญญาณเสียง และสัญญาณภาพ โดยได้ถูกพัฒนาด้วยแนวคิดการมองสัญญาณออกเป็นหลายส่วนย่อย และนำสัญญาณที่ได้เหล่านั้นมาวิเคราะห์ โดยฟังก์ชันโมดูลฐานของเวฟเล็ตคำนวณจากฟังก์ชันให้กำเนิดที่ได้จากการสเกล และการเลื่อนตำแหน่ง ซึ่งวัตถุประสงค์หลักของการแปลงเวฟเล็ตคือการแยกสัญญาณที่นำมาวิเคราะห์เป็นชุดผลรวมของข้อมูลที่มีความถี่ต่ำกับชุดข้อมูลที่มีความถี่สูง ในส่วนของการแปลงเวฟเล็ตในแต่ละระดับจะใช้ส่วนข้อมูลที่มีความถี่ต่ำในการนำมาวิเคราะห์ และส่วนข้อมูลที่มีความถี่สูงจะถูกนำมาใช้ในกระบวนการรวมกลับเวฟเล็ต

#### 3.2 Particle Swarm Optimization (PSO)

ฟาร์ทิลิตัลวอมออฟฟิโมเซชันเป็นวิธีการค้นหาแบบสุ่มโดยอาศัยจุดเริ่มต้นหลายจุด PSO แท้จริงแล้วคือ กลุ่มของฟาร์ทิลิตัลในพื้นที่หลายมิติ ซึ่งแต่ละฟาร์ทิลิตัลจะเก็บข้อมูลเวกเตอร์สองเวกเตอร์ คือเวกเตอร์ระบุตำแหน่ง และเวกเตอร์ระบุความเร็วในการบิน โดยสมมุติให้ฝูงฟาร์ทิลิตัลอยู่ในพื้นที่ค้นหาหลายมิติ ตัวฟาร์ทิลิตัลแต่ละตัวในฝูงจะต้องจดจำตำแหน่งที่ดีที่สุดของตัวเอง และตำแหน่งที่ดีที่สุดของเพื่อนร่วมฝูง ความหมายของคำว่า ตำแหน่งที่ดีที่สุดในที่นี้ หมายถึงตำแหน่งที่มีค่าคำตอบที่ดีที่สุดนั่นเอง สมาชิกในฝูงจะทำการสื่อสารข้อมูลของตำแหน่งกับสมาชิกตัวอื่น และทำการเปลี่ยนความเร็วแล้วเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งใหม่เพื่อให้เข้าใกล้ตำแหน่งที่ให้คำตอบที่ดีที่สุดมากยิ่งขึ้น โดยความเร็ว และตำแหน่งของฟาร์ทิลิตัลจะคำนวณจากสมการ

$$v_{id}(t+1) = c_0 v_{id}(t) + c_1 (p_{id}^{best} - p_{id}(t)) + c_2 (p_{gd}^{best} - p_{id}(t)) \quad (1)$$

$$p_{id}(t+1) = p_{id}(t) + v_{id}(t+1) \quad (2)$$

โดยที่  $v_{id}(t)$  คือค่าความเร็วของตัวฟาร์ทิลิตัล มีค่าอยู่ระหว่าง  $[V_{\min}, V_{\max}]$   $p_{id}$  คือตำแหน่งที่ถูกพบโดยตัวฟาร์ทิลิตัล  $p_{gd}^{best}$  คือตำแหน่งที่ดีที่สุดสากล  $c_0$  คือพารามิเตอร์ที่

ใช้ในการควบคุมผลกระทบของความเร็วที่การวนซ้ำก่อนหน้า ซึ่งมีผลต่อความเร็วในการวนซ้ำปัจจุบันของตัวพารามิเตอร์  $c_p$  และ  $c_g$  เป็นค่าคงที่ความถี่มีค่าเป็นบวก

3.3 Data Pay Load

พารามิเตอร์นี้หมายถึงจำนวนบิตข้อมูลที่ทำการฝังลงไป สัญญาณเสียงต้นฉบับโดยมีหน่วยเป็น *bps* (bit per second) โดยสัญญาณเสียงมีความยาว *S* วินาที ข้อมูลลายน้ำมีจำนวน *M* บิต โดย data pay load *B* กำหนดจาก

$$B = M/S \text{ bps} \tag{3}$$

4. รายละเอียดการพัฒนา

ในส่วนของการพัฒนาระบบ อัลกอริทึมที่ทำการนำเสนอนี้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้รองรับการโจมตีทางการประมวลผลสัญญาณที่พบมากในปัจจุบัน โดย PSO จะถูกใช้ในกระบวนการค้นหาค่าความเข้มของลายน้ำ และไม่ใช้สัญญาณเสียงต้นฉบับในกระบวนการตรวจจับลายน้ำ

4.1 ภาพรวมของระบบ

ในส่วนของการภาพรวมของระบบที่จะนำเสนอถูกแบ่งออกเป็นสองกระบวนการหลัก คือกระบวนการฝังลายน้ำ และกระบวนการตรวจจับลายน้ำ โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1.1 อัลกอริทึมในการฝังลายน้ำ

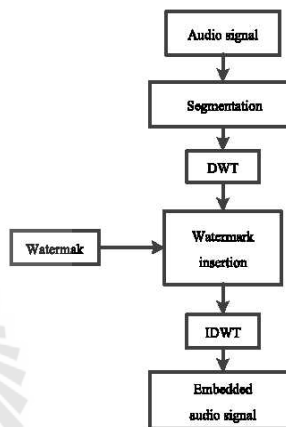
ในบทความนี้ ข้อมูลลายน้ำที่ทำการฝังเป็นภาพสัญลักษณ์ขาวดำ โดยลายน้ำจะถูกฝังลงบนสัมประสิทธิ์เวฟเล็ต ซึ่งได้จากการแปลงเวฟเล็ตแบบ Daubechies4 ในระดับที่ 2 โดยกระบวนการฝังลายน้ำจะดำเนินการตามลำดับ ดังนี้

1. ข้อมูลลายน้ำเป็นภาพขนาด  $M_1 \times M_2$  พิกเซล และถูกแปลงให้อยู่ในรูป  $w(i) \in \{+1, -1\}$  เมื่อ  $M_1$  และ  $M_2$  คือค่าของแถว และคอลัมน์ ตามลำดับ
2. สัญญาณเสียงจะถูกแบ่งออกเป็น *K* ส่วนทำการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยในระดับที่ 2 กับข้อมูลทุกส่วน โดยใช้สัมประสิทธิ์ในส่วนที่มีความถี่ต่ำในการฝังลายน้ำ จะได้สัมประสิทธิ์เวฟเล็ต  $cA_i^2$
3. คำนวณค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์เวฟเล็ตในแต่ละส่วน  $mcA_i^2$  และทำการลบสัมประสิทธิ์เวฟเล็ตในแต่ละส่วนด้วยค่าเฉลี่ยกำหนดให้เป็น  $cA_i^2$

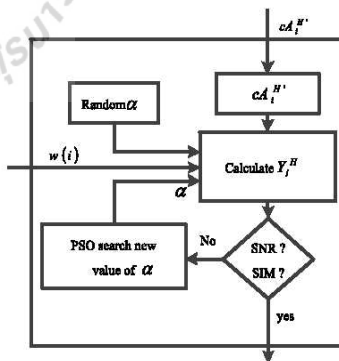
4. ทำการฝังข้อมูลลายน้ำแต่ละบิตลงในชุดของสัมประสิทธิ์แต่ละส่วน โดยใช้พารามิเตอร์  $\alpha$  ในการควบคุมคุณภาพและความทนทานต่อการโจมตีของลายน้ำ โดย  $\alpha$  คือพารามิเตอร์ความเข้มของลายน้ำซึ่งจะถูกค้นหาโดย PSO ซึ่งใช้ค่า SNR และค่าการทำสหสัมพันธ์ เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ โดยสมการในการฝังลายน้ำคือ

$$Y_i^2 = cA_i^2 + \alpha w(i) \tag{4}$$

5. เมื่อทำการฝังลายน้ำจนครบทุกบิต จึงทำการแปลงกลับเวฟเล็ตเพื่อให้ได้สัญญาณเสียงที่ทำการฝังลายน้ำแล้ว ในโดเมนเวลา



รูปที่ 1 แผนภาพแสดงโครงสร้างการดำเนินงาน



รูปที่ 2 แผนภาพแสดงกระบวนการฝังลายน้ำ

ในรูปที่ 2 แสดงรายละเอียดการฝังลายน้ำ โดยพารามิเตอร์  $\alpha$  จะถูกสุ่มค่าโดย PSO เพื่อให้ได้สัญญาณเสียงที่มีค่า SNR และ SIM ที่เหมาะสมตามข้อกำหนดสากล ที่ International Federation of the Phonographic Industry (IFPI) ได้กำหนดไว้ โดยค่า SNR ของสัญญาณเสียงที่ทำการฝังลายน้ำแล้วต้องมีค่ามากกว่า หรือเท่ากับ 20 dB โดยจากผลการทดสอบในอัลกอริทึมที่นำเสนอมีค่า SNR ที่คำนวณได้มีค่า 21 dB เพื่อให้สัญญาณลายน้ำมีความทนทานต่อการโจมตีในรูปแบบที่พบมากในปัจจุบัน และมีคุณภาพของสัญญาณเสียงที่เหมาะสม

#### 4.1.2 อัลกอริทึมในการตรวจจับลายน้ำ

ในอัลกอริทึมที่นำเสนอนี้ กระบวนการตรวจจับลายน้ำไม่ต้องใช้สัญญาณเสียงต้นฉบับร่วมในกระบวนการ โดยทำการแบ่งสัญญาณเสียงที่ได้เป็น  $K$  ส่วน ทำการแปลงเวฟเฟิร์มแบบเต็มหน่วยในระดับที่ 2 กับข้อมูลทุกชุด และทำการหาค่าเฉลี่ยของข้อมูล โดยมีเงื่อนไขคือ หากค่าเฉลี่ยของข้อมูลมีค่ามากกว่า "0" บิตของลายน้ำจะถูกกำหนดให้มีค่าเป็น "1" และหากค่าเฉลี่ยของข้อมูลมีค่าน้อยกว่า "0" บิตของลายน้ำจะถูกกำหนดให้มีค่าเป็น "0" ดำเนินการจนครบทุกบิตของลายน้ำและสุดท้าย ทำการจัดข้อมูลที่ตรวจจับได้ให้อยู่ในรูปแบบของภาพขาวดำ

#### 4.2 ข้อจำกัดของระบบ

ในอัลกอริทึมที่นำเสนอนี้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ PSO เป็นสิ่งสำคัญที่จะทำให้เกิดการค้นหาประสิทธิภาพ เพื่อสัญญาณเสียงที่มีคุณภาพ และลายน้ำที่มีความทนทานต่อการโจมตี โดยค่าตัวแปรวัตถุประสงค์ของ PSO ในอัลกอริทึมที่นำเสนอมีคำนวณจากสมการ

$$fitness = \sigma_1 ESNR + \sigma_2 \sum_{i=1}^n ESIM \quad (5)$$

โดย  $ESNR$  คือค่าผลต่างระหว่าง SNR ที่คำนวณได้กับ SNR ที่กำหนด ( $SNR = 21$  dB) และ  $ESIM$  คือค่าผลต่างระหว่าง SIM ที่คำนวณได้กับ SIM ที่กำหนด ( $SIM = 1$ )

$\sigma_1$  และ  $\sigma_2$  คือค่าถ่วงน้ำหนักของพารามิเตอร์  $ESNR$  และ  $ESIM$

#### 5. การทดสอบการใช้งาน

ในอัลกอริทึมที่ทำการนำเสนอนี้ สัญญาณเสียงที่นำมาทำการทดสอบมีความยาว 30 วินาที บันทึกแบบ 16 bit mono sampling rate ที่ 44100 Hz ลายน้ำเป็นรูปภาพขาวดำขนาด 25x25 พิกเซล การคำนวณค่าสหสัมพันธ์ระหว่างลายน้ำต้นฉบับกับลายน้ำที่ตรวจจับได้ โดยใช้สมการความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$SIM = \frac{\sum_{i=1}^{M1} \sum_{j=1}^{M2} w(i, j) w'(i, j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{M1} \sum_{j=1}^{M2} w(i, j)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{M1} \sum_{j=1}^{M2} w'(i, j)^2}} \quad (6)$$

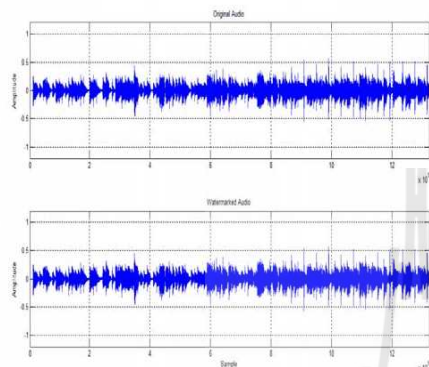
โดย  $w$  และ  $w'$  คือลายน้ำต้นฉบับและลายน้ำที่ได้จากการตรวจจับ ตามลำดับ  $M1$  และ  $M2$  คือขนาดของภาพลายน้ำที่ใช้ในการดำเนินงาน โดยในอัลกอริทึมที่นำเสนอมีความเข้มของลายน้ำจะถูกกำหนดขอบเขตให้มีค่าอยู่ระหว่าง "0" กับ "1" โดยค่า data payload ของกระบวนการที่นำเสนออยู่ที่ประมาณ 21 bps ดำเนินการทดสอบโดยการฟังเพื่อยืนยันผลที่ได้จากอัลกอริทึมในการฝังลายน้ำ ซึ่งผู้ฟังส่วนใหญ่ไม่สามารถแยกแยะความแตกต่างระหว่างสัญญาณเสียงต้นฉบับกับสัญญาณเสียงที่ทำการฝังลายน้ำได้

#### 5.1 สภาพแวดล้อมในการทดสอบ

ทำการทดสอบฝังลายน้ำกับสัญญาณเสียงในรูปแบบ Rock Pop Classics และ Jazz โดยการทดสอบความทนทานของลายน้ำ รูปแบบการโจมตีที่นำมาทดสอบในอัลกอริทึมที่นำเสนอมีดังนี้ (1) Downsampling (2) Lowpass filter 6 kHz (3) Randomnoise (4) WhiteGaussiannoise (5) Mp3 compression 64kbps (6) Jitter 1% (7) Cropping (8) Time - scale modification  $\pm 5\%$  โดยทุกตัวอย่างที่ทำการทดสอบค่า SNR ของสัญญาณเสียงจะถูกกำหนดไว้ที่ 21 dB พารามิเตอร์  $\sigma_1 = 1.5$  และ  $\sigma_2 = 1.5$   $C_p$  และ  $C_g$  มีค่าเท่ากับ 1.5 และ  $C_0 = 0.5$

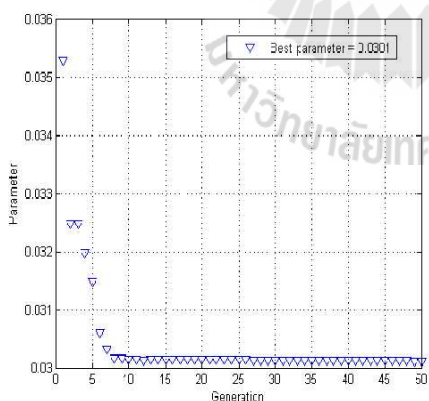
5.2 ผลการทดสอบและการวิจารณ์ผล

จากผลการทดสอบ ทำการพล็อตกราฟเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างสัญญาณเสียงต้นฉบับกับสัญญาณเสียงที่ฝังลายน้ำ แสดงไว้ในรูปที่ 3



รูปที่ 3 สัญญาณเสียงต้นฉบับ และสัญญาณเสียงที่ฝังลายน้ำ

จากผลการทดสอบ ทำการพล็อตกราฟแสดงลักษณะการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดของ PSO โดยใช้พารามิเตอร์ตามที่ได้กำหนดไว้ในหัวข้อที่ 5.1 ซึ่งผลที่ได้คือ  $\alpha = 0.0301$  และทำการทดสอบความทนทานของลายน้ำที่ได้จากค่าพารามิเตอร์ กราฟแสดงลักษณะการค้นหาคำตอบ และตารางผลการทดสอบแสดงไว้ในรูปที่ 4 และตารางที่ 1 ตามลำดับ



รูปที่ 4 ลักษณะการค้นหาคำที่ดีที่สุดโดย PSO

ตารางที่ 1. ผลการทดสอบความทนทานต่อการโจมตี

Attack	SNR of audio file				
	Classics	Jazz	Pop	Rock	Dance
No attack	1	1	1	1	1
AWGN	1	1	1	1	1
Low pass Filtering 5 kHz	1	1	1	1	1
MP3 64 kbps	1	0.996	1	1	0.996
Cropping	1	0.996	1	1	1
Denoising	1	1	1	1	1
Randomnoise	0.996	0.996	0.996	0.996	0.992
lifter 1%	1	1	1	1	1
TSM +5 %	1	0.980	0.996	0.996	0.996
ISM -6 %	1	0.966	0.996	0.996	0.996

ภาพลายน้ำที่ค่า SIM ต่าง ๆ ที่ทำการตรวจจับได้ หลังจากผ่านการโจมตีทางการประมวลผลสัญญาณที่นำเสนอ แสดงไว้ในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ลายน้ำที่ตรวจจับได้ที่มีค่า SIM แตกต่างกัน

6. บทสรุป

ในบทความนี้ กระบวนการค้นหาค่าที่ดีที่สุดแบบพาร์ทิเคิลสวอม (PSO) ถูกนำเสนอเพื่อค้นหาค่าความเข้มของลายน้ำ โดยดำเนินการฝังลายน้ำในโดเมนการแปลงเวฟเลต ซึ่งจากการทดสอบได้แสดงให้เห็นถึงความทนทานต่อการโจมตีในรูปแบบต่าง ๆ อัลกอริทึมที่นำเสนอขึ้นนี้ไม่มีความ



ซับซ้อน และไม่ต้องใช้สัญญาณเสียงต้นฉบับในกระบวนการตรวจรับลายน้ำ

### 6.1 แนวทางการพัฒนาต่อ

ในอัลกอริทึมที่นำเสนอฟังก์ชันวัดประสิทธิผลของ PSO เป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อความทนทานของลายน้ำ และค่า SNR ของสัญญาณ แนวทางในการพัฒนาอัลกอริทึมที่นั่นจึงควรมีการออกแบบที่เหมาะสมของฟังก์ชันวัดประสิทธิผลของ PSO การออกแบบพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องเพื่อให้ลายน้ำที่ได้มีความทนทานต่อการโจมตี และมีผลกระทบต่อสัญญาณเสียงน้อยลง

### 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Wu, J. Huang, D. Huang and Y. Q. Shi, "Efficient Self-Synchronized Audio Watermarking for Assured Audio Data Transmission," *IEEE Trans. on Broadcasting*, vol 51, no. 1, pp. 69 - 76 Mar 2005.
- [2] C. Xu, J. Wu, Q. Sun, "Digital audio watermarking and its application in multimedia database," *Fifth International Symposium on Signal Processing and its Application (ISSPA '99)*, pp. 91 - 94, Aug. 22-25, 1999.
- [3] Y. Shao, G. Wu, X. Lin, "A Wavelet based adaptive watermarking algorithm," *Inter. Conf. on Info tech and Info net (ICIT'01)*, vol. 3, pp. 384 - 389, Beijing, 2001.
- [4] L. Cui, S. Wang, and T. Sun, "The application of binary image in digital audio watermarking," *Neural Network and Signal Processing*, vol. 2, pp. 1497 - 1500, 2003.
- [5] X. Li, M. Zhang, and S. Sun, "Adaptive audio watermarking algorithm base on SNR in wavelet domain," *Natural Language Processing and Knowledge Engineer*, pp. 287 - 292, 2003.
- [6] L. Cui, S. Wang and T. Sun, "The application of wavelet analysis and audio compression technology in digital audio watermarking," *Neural Networks and Signal Processing*, vol. 2, pp. 1533 - 1537, 2003.
- [7] B. Lei, I. Soon and Z. Li, "Blind and robust audio watermarking scheme base on SVD-DCT," *Signal Processing*, vol. 91, pp. 1973 - 1984, 2011.
- [8] ผศ.ดร. อาทิตย์ ศรีแก้ว "ปัญญาประดิษฐ์เชิงคำนวณ" ครั้งที่ 1 หน้า 141-183 พ.ศ. 2552

## ประวัติผู้เขียน

นายกรัณฑ์กมล ภูครองหิน เกิดเมื่อวันที่ 28 พฤษภาคม พ.ศ. 2532 เกิดที่อำเภอขามเฒ่า จังหวัดกาฬสินธุ์ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนขามเฒ่าวิทยาคาร เมื่อปี พ.ศ. 2550 และได้เข้ารับการศึกษต่อในระดับปริญญาตรี ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) ในปี พ.ศ. 2553 หลังจากสำเร็จการศึกษาได้เข้ารับการศึกษต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยขณะศึกษาได้ปฏิบัติงานเป็นผู้ช่วยสอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีจำนวน 4 รายวิชา ได้แก่ (1) ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า (2) ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้ามูลฐาน (3) ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า 1 และ (4) ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า 2 ทั้งนี้มีความสนใจในด้านการวิเคราะห์สัญญาณดิจิทัล การแปลงเวฟเล็ต และการฝังลายน้ำในสัญญาณดิจิทัลรวมไปถึงการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีทางปัญญาประดิษฐ์มาใช้ในการวิเคราะห์และแก้ใขปัญหาทางวิศวกรรม

ระหว่างศึกษาในระดับปริญญาโท ได้มีผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ โดยมีปรากฏดังภาคผนวก ฉ.

