

การลดเสียงรบกวนจากเครื่องรอฟันที่ขึ้นกับการตัดออกเสียงรบกวนแบบปรับตัว



นายจิฎิณ เข็มวงษ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Adaptive Noise Cancellation-based Dental-Drill Noise Reduction



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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การลดเสียงรบกวนจากเครื่องรอฟันที่ขึ้นกับการตัดออก  
เสียงรบกวนแบบปรับตัว

โดย

นายจิภูณ เข็มวงษ์

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. นิตาชล ตั้งเสี้ยมวิสัย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญชัย ปลื้มจิตวิริยะเวช)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร. นิตาชล ตั้งเสี้ยมวิสัย)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรีย์ พุ่มรินทร์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เผ่าภาค ศิริสุข)

จิฎิณ เข็มวงษ์ : การลดเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันที่ขึ้นกับการตัดออกเสียงรบกวนแบบปรับตัว (Adaptive Noise Cancellation-based Dental-Drill Noise Reduction) อ.ที่  
 ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. นิตาชล ตั้งเสงี่ยมวิสัย, 55 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอเทคนิคการลดเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันแบบสองขั้นตอน (Two-Step Dental-Drill Noise Reduction, TSDNR) โดยใช้ระบบการตัดออกเสียงรบกวนแบบปรับตัว (Adaptive Noise Cancellation, ANC) เทคนิคที่นำเสนอถูกออกแบบสำหรับหูฟังสวมศีรษะตัดออกเสียงรบกวน (noise-cancelling headphone) เพื่อให้ทันตแพทย์และคนไข้สวมใส่ขณะที่มีการรักษาฟัน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เพื่อป้องกันการสูญเสียการได้ยินของทันตแพทย์ที่ต้องทำงานภายใต้สถานการณ์ที่มีเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันเป็นระยะเวลานานๆ เทคนิค TSDNR ประกอบด้วยสองขั้นตอน เพื่อลดเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟัน ในขั้นตอนแรก ขั้นตอนวิธีการสกัดความถี่หลักมูลและความถี่ฮาร์โมนิก (fundamental-and-harmonic frequencies extraction algorithm) ถูกนำเสนอเพื่อใช้ประมาณความถี่หลักมูลและความถี่ฮาร์โมนิกของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟัน หลังจากนั้น สัญญาณไซน์ซอซอด์ของความถี่หลักมูลและความถี่ฮาร์โมนิกต่างๆถูกสร้างและใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงของระบบ ANC หลายระบบพร้อมๆกันเพื่อตัดออกความถี่หลักมูลและความถี่ฮาร์โมนิกของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟัน ในขั้นตอนที่สอง ตัวกรองแบบปรับตัวอีกตัวหนึ่งของระบบ ANC จะถูกใช้ร่วมกับตัวกรองผ่านสูงเพื่อกำจัดองค์ประกอบความถี่สูงอื่นๆของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟัน ผลการจำลองผ่านคอมพิวเตอร์ใช้เสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันที่บันทึกเสียงไว้ และสัญญาณเสียงพูดจากฐานข้อมูล IEEE แสดงให้เห็นว่าเทคนิค TSDNR ที่นำเสนอสามารถลดเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งในด้านของสมรรถนะในการลดทอนเสียงรบกวนและในด้านของคุณภาพเสียงพูด ยิ่งไปกว่านั้น ผลจากการทดสอบฟังจากผู้ฟัง 15 คน ยืนยันประสิทธิภาพของเทคนิคที่นำเสนออีกด้วย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2560

# # 5970124921 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: DENTAL-DRILL NOISE / NOISE REDUCTION / ADAPTIVE NOISE CANCELLATION / FUNDAMENTAL-AND-HARMONIC FREQUENCIES EXTRACTION

JITIN KHEMWONG: Adaptive Noise Cancellation-based Dental-Drill Noise Reduction. ADVISOR: ASSOC. PROF. NISACHON TANGSANGIUMVISAI, Ph.D., 55 pp.

A Two-Step Dental-Drill Noise Reduction (TSDNR) technique, based upon Adaptive Noise Cancellation (ANC) system, is proposed in this thesis. The proposed NR technique is particularly designed for noise-cancelling headphone; which the patients should be wearing while having their dental treatment. Similarly, the dentists are also suggested to wear these noise-cancelling headphones to prevent from hearing impairment due to excessive exposure to high level of drill noise. The TSDNR technique is proposed to reduce high-speed dental-drill sound in two steps. In the first step, a fundamental and its harmonic frequencies are extracted. Then, each of the sinusoidal signals with the extracted frequencies are simultaneously generated and subsequently used as the reference signals of the ANC systems. Hence, the fundamental and its harmonic frequencies can be removed from the dental-drill noise. In the second step, another adaptive filter of the ANC system is employed together with a highpass filter to eliminate the residual high-frequency components of the dental-drill noise. Computer simulations based on recorded dental-drill sounds and speech signals from IEEE database have demonstrated the effectiveness of the proposed TSDNR technique, both in terms of the noise attenuation performance and the speech quality of the enhanced speech signal. Moreover, results of a subjective listening test with 15 listeners are also given to guarantee satisfied speech quality of the enhanced speech signal employing the proposed TSDNR technique.

Department: Electrical Engineering      Student's Signature .....

Field of Study: Electrical Engineering      Advisor's Signature .....

Academic Year: 2017

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือจากรองศาสตราจารย์ ดร.นิศาชล ตั้งเสงี่ยมวิสัย ที่ให้คำแนะนำ คำปรึกษา ตลอดจนแนวทางในการแก้ปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นระหว่างการทำวิทยานิพนธ์ นอกจากนี้ ยังให้โอกาสในการศึกษาเรียนรู้และการทำงานวิจัยต่างๆในหลากหลายด้านซึ่งถือว่าเป็นโอกาสที่ดีในการเรียนรู้สิ่งใหม่เพิ่มเติม ทั้งนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณประธานกรรมการผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ปลื้มปิติวิริยะเวช อีกทั้งกรรมการในการสอบ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรียีย์ พุ่มรินทร์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เผ่าภาค ศิริสุข ซึ่งให้คำแนะนำ พร้อมทั้งข้อเสนอแนะเพิ่มเติมเพื่อปรับปรุงวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์แบบยิ่งขึ้น นอกจากนี้ ผู้วิจัยยังขอขอบคุณรุ่นพี่ เพื่อน และรุ่นน้อง ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าที่ช่วยเหลือ และให้ข้อเสนอแนะต่างๆเพิ่มเติม ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์แบบยิ่งขึ้น ยิ่งไปกว่านั้น ผู้วิจัยขอขอบคุณสำหรับงบประมาณในการทำวิจัยเพิ่มเติมจากทุนศิษย์กัณกฤฏี ซึ่งสนับสนุนโดยภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

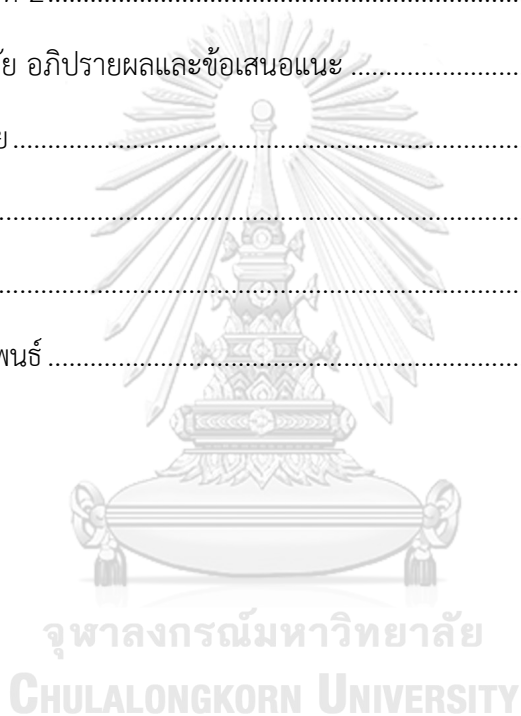
สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดาและมารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนในทุกๆด้าน ทั้งด้านการศึกษา ค่าใช้จ่าย และกำลังใจตลอดการศึกษาเรียนรู้และการทำงานจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ .....	4
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	5
1.5 นิยามศัพท์เฉพาะ .....	5
1.6 สมมติฐานการวิจัยในวิทยานิพนธ์.....	6
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	7
2.1 วิธีลบทางสเปกตรัม (SS).....	7
2.2 วิธีตัดออกสัญญาณรบกวนแบบปรับตัว (ANC).....	8
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	11
3.1 การวิเคราะห์ในลักษณะทางความถี่ของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟัน .....	11
3.2 เทคนิค TSDNR.....	15
3.2.1 หลักการทำงานของเทคนิค TSDNR.....	16
3.2.2 ขั้นตอนวิธีการสกัดความถี่หลักมูล .....	19
3.3 การปรับปรุงเทคนิค TSDNR.....	22

3.3.1 หลักการทำงานของเทคนิค MTSDNR .....	23
3.3.2 ขั้นตอนวิธีการสกัดความถี่หลักและความถี่ฮาร์โมนิก.....	25
3.4 ความซับซ้อนในการคำนวณของเทคนิค TSDNR และ MTSDNR ที่นำเสนอ.....	30
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	32
4.1 การทดสอบชุดที่ 1 .....	34
4.2 การทดสอบชุดที่ 2.....	40
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ .....	48
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	48
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	49
รายการอ้างอิง .....	50
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	55





## สารบัญตาราง

ตารางที่ 4-1	เกณฑ์การให้คะแนนสำหรับการทดสอบฟัง (MOS test) .....	33
ตารางที่ 4-2	การปรับปรุงค่า SegSNR ของสัญญาณเสียงพูดที่ปนเปื้อนด้วยเสียงรบกวนจากเครื่องกรรพินจาก [26-28] โดยใช้เทคนิค NR ต่างๆที่พิจารณา .....	38
ตารางที่ 4-3	ค่า LSD ของสัญญาณเสียงพูดที่ปนเปื้อนด้วยเสียงรบกวนจากเครื่องกรรพินจาก [26-28] โดยใช้เทคนิค NR ต่างๆที่พิจารณา.....	38
ตารางที่ 4-4	ค่า MOS ของสัญญาณเสียงต่างๆ และเสียงขาออกของแต่ละเทคนิค NR ที่พิจารณาในการทดสอบชุดที่ 1 .....	39
ตารางที่ 4-5	การปรับปรุงค่า SegSNR ของสัญญาณเสียงพูดที่ปนเปื้อนด้วยเสียงรบกวนจากเครื่องกรรพินจาก [29, 30] โดยใช้เทคนิค NR ต่างๆที่พิจารณา .....	46
ตารางที่ 4-6	ค่า LSD ของสัญญาณเสียงพูดที่ปนเปื้อนด้วยเสียงรบกวนจากเครื่องกรรพินจาก [29, 30] โดยใช้เทคนิค NR ต่างๆที่พิจารณา.....	46
ตารางที่ 4-7	ค่า MOS ของสัญญาณเสียงต่างๆ และเสียงขาออกของแต่ละเทคนิค NR ที่พิจารณาในการทดสอบชุดที่ 2.....	47

## สารบัญรูปร่างภาพ

รูปที่ 2-1 แบบจำลองสัญญาณไมโครโฟนสองตัวในระบบสื่อสารทางเสียง .....	8
รูปที่ 2-2 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของระบบ ANC แบบสองไมโครโฟน .....	10
รูปที่ 3-1 การพิจารณาการซ้อนทับกันของสเปกตรัมขนาด ณ เฟรมที่ 10 50 และ 100 ของ (ก) เสียงจากเครื่องรอฟันอัตราเร็วสูงจาก [26] (ข) เสียงจากเครื่องรอฟันอัตราเร็วสูงจาก [27] (ค) เสียงจากเครื่องรอฟันทั่วไปจาก [29] และ (ง) เสียงจากเครื่องรอฟันทั่วไปจาก [30] (อัตราการซัดตัวอย่างเท่ากับ 32 กิโลเฮิร์ตซ์).....	12
รูปที่ 3-2 สเปกโตรแกรมพล็อตของ (ก) เสียงจากเครื่องรอฟันอัตราเร็วสูงจาก [26] (ข) เสียงจากเครื่องรอฟันอัตราเร็วสูงจาก [27] (ค) เสียงจากเครื่องรอฟันทั่วไปจาก [29] และ (ง) เสียงจากเครื่องรอฟันโดยทั่วไปจาก [30] (อัตราการซัดตัวอย่างเท่ากับ 32 กิโลเฮิร์ตซ์) .....	13
รูปที่ 3-3 สเปกตรัมขนาดของสัญญาณเสียงพูดใน [25].....	14
รูปที่ 3-4 การใช้งานหูฟังสวมศีรษะลดเสียงรบกวนจากเครื่องรอฟัน .....	15
รูปที่ 3-5 บล็อกไดอะแกรมของเทคนิค TSDNR .....	17
รูปที่ 3-6 แผนภูมิผังงานแสดงการทำงานของเทคนิค TSDNR .....	18
รูปที่ 3-7 มอดูลสกัดความถี่หลักมูลของวิธี TSDNR.....	21
รูปที่ 3-8 บล็อกไดอะแกรมของเทคนิค MTSDNR.....	23
รูปที่ 3-9 แผนภูมิผังงานแสดงการทำงานของเทคนิค MTSDNR.....	24
รูปที่ 3-10 บล็อกไดอะแกรมของขั้นตอนวิธีการสกัดความถี่หลักมูลและความถี่ฮาร์โมนิกของเทคนิค MTSDNR.....	25

รูปที่ 4-1 การพิจารณารูปคลื่น (waveform plot) ของ (ก) สัญญาณเสียงพูดต้นฉบับ (ข) สัญญาณเสียงพูดที่ปนเปื้อนด้วยเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันจาก [27] (SNR ขาเข้าเท่ากับ -10 เดซิเบล) (ค) สัญญาณเสียงพูดที่ได้จากการลดเสียงรบกวนโดยใช้ระบบ ANC แบบทั่วไปที่ใช้ไมโครโฟนสองตัว (ง) สัญญาณเสียงพูดที่ได้จากการลดเสียงรบกวนโดยใช้เทคนิค TSDNR ชั้นตอนแรก และ (จ) สัญญาณเสียงพูดที่ได้จากการลดเสียงรบกวนโดยใช้เทคนิค TSDNR ทั้งสองขั้นตอน ..... 35

รูปที่ 4-2 สเปกโตรแกรมพล็อตของ (ก) สัญญาณเสียงพูดต้นฉบับ (ข) สัญญาณเสียงพูดที่ปนเปื้อนด้วยเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันจาก [27] (SNR ขาเข้าเท่ากับ -10 เดซิเบล) (ค) สัญญาณเสียงพูดที่ได้จากการลดเสียงรบกวนโดยใช้ระบบ ANC แบบทั่วไปที่ใช้ไมโครโฟนสองตัว (ง) สัญญาณเสียงพูดที่ได้จากการลดเสียงรบกวนโดยใช้เทคนิค TSDNR ชั้นตอนแรก และ (จ) สัญญาณเสียงพูดที่ได้จากการลดเสียงรบกวนโดยใช้เทคนิค TSDNR ทั้งสองขั้นตอน..... 36

รูปที่ 4-3 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของสเปกตรัมขนาดของ 50 เฟรมติดกันของสัญญาณเสียงพูดต้นฉบับ สัญญาณเสียงพูดที่ปนเปื้อนสัญญาณเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันจาก [27] และสัญญาณเสียงพูดที่ได้จากการลดเสียงรบกวนโดยใช้เทคนิคต่างๆที่พิจารณา ..... 37

รูปที่ 4-4 ค่าเฉลี่ยของสเปกตรัมขนาดของ 50 เฟรมติดกันของสัญญาณเสียงพูดที่ได้จากการลดเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันจาก [29] โดยใช้เทคนิค TSNDR เมื่อเลือกความถี่ตัดของตัวกรองผ่านสูงเป็น 6 กิโลเฮิร์ตซ์..... 41

รูปที่ 4-5 การพิจารณารูปคลื่นของ (ก) สัญญาณเสียงพูดต้นฉบับ (ข) สัญญาณเสียงพูดที่ปนเปื้อนด้วยเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันจาก [29] (SNR ขาเข้าเท่ากับ -10 เดซิเบล) (ค) สัญญาณเสียงพูดที่ได้จากการลดเสียงรบกวนโดยใช้ระบบ ANC แบบทั่วไปที่ใช้ไมโครโฟนสองตัว (ง) สัญญาณเสียงพูดที่ได้จากการลดเสียงรบกวนโดยใช้เทคนิค TSDNR ชั้นตอนแรก (จ) สัญญาณเสียงพูดที่ได้จากการลดเสียงรบกวนโดยใช้เทคนิค MTSDNR ชั้นตอนแรก และ (ฉ) สัญญาณเสียงพูดที่ได้จากการลดเสียงรบกวนโดยใช้เทคนิค MTSDNR ทั้งสองขั้นตอน ..... 43

- รูปที่ 4-6 สเปกโตรแกรมพล็อตของ (ก) สัญญาณเสียงพูดต้นฉบับ (ข) สัญญาณเสียงพูดที่ปนเปื้อนด้วยเสียงรบกวนจากเครื่องรอฟันจาก [29] (SNR ขาเข้าเท่ากับ -10 เดซิเบล) (ค) สัญญาณเสียงพูดที่ได้จากการลดเสียงรบกวนโดยใช้ระบบ ANC แบบทั่วไปที่ใช้ไมโครโฟนสองตัว (ง) สัญญาณเสียงพูดที่ได้จากการลดเสียงรบกวนโดยใช้เทคนิค TSDNR ขั้นตอนแรก (จ) สัญญาณเสียงพูดที่ได้จากการลดเสียงรบกวนโดยใช้เทคนิค MTSDNR ขั้นตอนแรก และ (ฉ) สัญญาณเสียงพูดที่ได้จากการลดเสียงรบกวนโดยใช้เทคนิค MTSDNR ทั้งสองขั้นตอน ..... 44
- รูปที่ 4-7 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของสเปกตรัมขนาดของ 50 เฟรมติดกัน ของสัญญาณเสียงพูดต้นฉบับ สัญญาณเสียงพูดที่ปนเปื้อนสัญญาณเสียงรบกวนจากเครื่องรอฟันจาก [29] และสัญญาณเสียงพูดที่ได้จากการลดเสียงรบกวนโดยใช้เทคนิคต่างๆที่พิจารณา ..... 45



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โดยปกติแล้ว เราจำเป็นต้องมีการตรวจสุขภาพช่องปากทุกๆ 6 เดือน อย่างไรก็ตามหลายคนหลีกเลี่ยงการไปพบทันตแพทย์เนื่องจากกลัวเสียงจากเครื่องกรอฟัน (dental-drill sound) [1] ในความเป็นจริง เสียงจากเครื่องกรอฟันไม่เพียงแต่สร้างความกังวลต่อคนไข้ในขณะที่ทำการรักษาฟันเท่านั้น แต่ยังสามารถก่อให้เกิดอันตรายต่อระบบการได้ยิน (hearing system) ของทันตแพทย์ที่ต้องทำงานในห้องทันตกรรมด้วย โดยทั่วไป เสียงจากเครื่องกรอฟันอัตราเร็วสูง (high-speed dental drill) ที่เกิดจากการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าภายในมีความถี่หลักมูล (fundamental frequency) อยู่ในช่วง 6 ถึง 8 กิโลเฮิรตซ์ [2] ซึ่งสามารถก่อให้เกิดระดับความดันเสียง (sound pressure level, SPL) ได้ถึง 80 dB[A] [3] ด้วยเหตุนี้ ทันตแพทย์ซึ่งทำงานภายใต้สภาวะที่มีเสียงจากเครื่องกรอฟันโดยปราศจากเครื่องป้องกันต่อเนื่องนานเกินกว่า 6 ชั่วโมง ในแต่ละวันอาจประสบกับการสูญเสียการได้ยินชั่วคราว (temporary hearing loss) ได้ [4] และยังสามารถส่งผลให้เกิดการสูญเสียการได้ยินอย่างถาวร (permanent hearing loss) หากทำงานภายใต้สภาวะดังกล่าวติดต่อกันเกิน 5 ปี [5] ดังนั้น การลด SPL ของเสียงจากเครื่องกรอฟันขณะทำการรักษาฟันจึงเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อลดความเสี่ยงของการสูญเสียการได้ยินของทันตแพทย์ รวมถึงลดความกังวลของคนไข้ในขณะที่ทำการรักษาฟันอีกด้วย เสียงจากเครื่องกรอฟันนี้จึงถือเป็นเสียงรบกวนการสนทนาโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อทันตแพทย์พูดคุยกับคนไข้ หรือในทางกลับกันก็เป็นเสียงรบกวนในกรณีที่คนไข้ต้องพูดจาโต้ตอบกับทันตแพทย์

ในปัจจุบัน เทคนิคการลดเสียงรบกวน (noise reduction, NR) มากมายถูกพัฒนาสำหรับหูฟังสวมศีรษะตัดออกเสียงรบกวนภายนอก (noise-cancelling headphone) เทคนิคการลดเสียงรบกวนที่ดำเนินการทางกายภาพ (physical way) ซึ่งเป็นที่รู้จักอย่างกว้างขวางคือ เทคนิคการควบคุมเสียงรบกวนแบบพาสซีฟ (Passive Noise Control) [6], [7] เทคนิคนี้ถูกใช้เพื่อกำจัดองค์ประกอบความถี่สูงของเสียงรบกวนภายนอก (external noise) โดยอาศัยการออกแบบวัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษเพื่อลดระดับความดันของเสียงที่ผ่านเข้าไปในหู ในขณะที่องค์ประกอบความถี่ต่ำของเสียงรบกวนภายนอกสามารถถูกกำจัดโดยการใช้เทคนิคการควบคุมเสียงรบกวนแบบแอกทีฟ (Active Noise Control) [8], [9] เทคนิคดังกล่าวอาศัยไมโครโฟนในการตรวจจับเสียงรบกวนภายนอกและใช้พลังงานไฟฟ้าในการสร้างเสียงเฟสตรงข้ามเพื่อหักล้างกับเสียงรบกวนที่ผ่านเข้ามา [9] ทั้งสองเทคนิคนี้ถูกประยุกต์ใช้ร่วมกันในหูฟังสวมศีรษะตัดออกเสียงรบกวนที่มีอยู่ในปัจจุบัน [6] อย่างไรก็ตาม ทั้งสองเทคนิคดังกล่าวไม่เพียงแต่ถูกออกแบบมาเพื่อลดเสียงรบกวนในช่วงความถี่ไม่เกิน 500 เฮิรตซ์

เท่านั้น แต่ยังป้องกันการสื่อสารระหว่างทันตแพทย์และคนไข้ด้วย ส่งผลให้คนไข้ไม่สามารถโต้ตอบกับทันตแพทย์ได้อย่างสะดวก ในขณะที่เทคนิคการลดเสียงรบกวนที่ดำเนินการทางไฟฟ้า (electrical way) สามารถลดเสียงรบกวนได้ดีกว่าโดยที่ประสิทธิภาพของการดำเนินการสำหรับแต่ละเทคนิคขึ้นอยู่กับขั้นตอนวิธี (algorithm) ที่ถูกออกแบบ เทคนิคการลดเสียงรบกวนที่ดำเนินการทางไฟฟ้าจำเป็นต้องอาศัยไมโครโฟนในการตรวจจับเสียงรบกวน หลังจากนั้นเสียงที่ตรวจจับได้จะถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัล ก่อนที่จะดำเนินการตามขั้นตอนวิธีที่ออกแบบเพื่อกำจัดองค์ประกอบของเสียงรบกวน โดยที่แต่ละขั้นตอนวิธีอาศัยความได้เปรียบบนโดเมนที่แตกต่างกัน ได้แก่ โดเมนเวลา และโดเมนความถี่ เป็นต้น

โดยทั่วไป วิธีที่ใช้ในการลดเสียงรบกวนในระบบการสื่อสารทางเสียงมีมากมายหลายวิธี หนึ่งในวิธีที่นิยมมากที่สุดคือวิธีลบทางสเปกตรัม (Spectral Subtraction, SS) [10] ซึ่งใช้ไมโครโฟนเพียงตัวเดียวในการตรวจจับสัญญาณเสียงพูดที่ปนเปื้อนด้วยเสียงรบกวน (noisy signal) และอาศัยหลักการอย่างง่ายโดยลบสเปกตรัมของเสียงรบกวน (noise spectrum) ออกจากสเปกตรัมของสัญญาณเสียงพูดที่ปนเปื้อนด้วยเสียงรบกวน (noisy speech signal spectrum) ถึงแม้ว่าวิธีดังกล่าวจะใช้ทรัพยากรในการคำนวณต่ำ อย่างไรก็ตาม วิธี SS นี้ก่อให้เกิดความเพี้ยนของสัญญาณเสียงพูด (speech distortion) ที่ถูกลบสเปกตรัมของเสียงรบกวน อีกทั้งยังก่อให้เกิดเสียงรบกวนแบบดนตรี (musical noise) ซึ่งยากที่จะตัดออกอีกด้วย [11] วิธี SS ซึ่งใช้ฟังก์ชันอัตราขยายแบบปรับตัว (adaptive gain function) แทนการลบสเปกตรัมของเสียงรบกวนออกโดยตรงถูกนำเสนอเพื่อลดผลกระทบของเสียงรบกวนแบบดนตรีนี้ โดยที่ฟังก์ชันดังกล่าวได้จากการหาค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนของสเปกตรัมย่อย (sub-spectrum) ของสัญญาณเสียงพูด (speech signal) [12] ในขณะที่ วิธี SS แบบมัลติแบนด์ (multi-band SS) ถูกนำเสนอเพื่อลดเสียงรบกวนที่ปนเปื้อนในแถบสเปกตรัมของเสียงพูดด้วยสัดส่วนที่แตกต่างกันในแต่ละช่วงความถี่ โดยการแบ่งเป็นแถบสเปกตรัมย่อยๆ เพื่อดำเนินการแยกกัน [13] ใน [14] นำเสนอเทคนิคการลบเกิน (oversubtraction) ของสเปกตรัมของเสียงรบกวน เพื่อลดผลกระทบจากเสียงรบกวนแบบดนตรี รวมทั้งเสียงรบกวนตกค้าง (residual noise) อย่างไรก็ตาม เทคนิคการลบเกินนี้ก่อให้เกิดความเพี้ยนของเสียงพูดในสัญญาณขาออกที่ได้เป็นอย่างมาก นอกจากนี้ มีการนำเสนอวิธีลบทางสเปกตรัมแบบไม่เชิงเส้น (non-linear SS) ซึ่งใช้พารามิเตอร์การลบเกิน (oversubtraction parameter) ที่แตกต่างกันสำหรับช่วงความถี่ต่างๆ ภายใต้สมมติฐานที่ว่าเสียงรบกวนมีการแทรกสอด (interference) ที่แตกต่างกันในแต่ละย่านความถี่ของสัญญาณเสียงพูด [15] ยิ่งไปกว่านั้น มีการนำเสนอการประมาณอัตราส่วนสัญญาณพูดต้นฉบับต่อสัญญาณรบกวน (a priori Signal-to-Noise Ratio) สำหรับเทคนิค NR เหล่านี้ ซึ่งไม่ก่อให้เกิดเสียงรบกวนแบบดนตรี [16], [17] อย่างไรก็ตาม วิธีทั้งหลายเหล่านี้จำเป็นต้องพึ่งพาขั้นตอนวิธีการตรวจจับกิจกรรมเสียงพูด (Voice Activity Detection, VAD) เพื่อใช้ในการหาค่าประมาณของสเปกตรัมของ

เสียงรบกวน ดังนั้นสมรรถนะของเทคนิคการลดเสียงรบกวนเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับความแม่นยำของ VAD ด้วย ยิ่งไปกว่านั้น หลายงานวิจัยทำการพัฒนาเทคนิคการประมาณเสียงรบกวน (noise estimation) [18-22] แทนการใช้ VAD แต่เทคนิคการประมาณเสียงรบกวนเหล่านี้หาค่าประมาณของเสียงรบกวน แต่ไม่สามารถปรับตัวตามสัญญาณรบกวนที่มีการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็วได้ทัน ทำให้ค่าประมาณของเสียงรบกวนที่ได้มีความผิดพลาดค่อนข้างสูง

ทางเลือกหนึ่งที่ใช้ในการลดเสียงรบกวนแบบบวก (additive noise) ที่ไม่ก่อให้เกิดเสียงรบกวนแบบดนตรี คือระบบการตัดออกเสียงรบกวนแบบปรับตัว (Adaptive Noise Cancellation, ANC) [7], [23], [24] ซึ่งใช้ไมโครโฟนสองตัวในการดำเนินการ ไมโครโฟนตัวแรกใช้เพื่อตรวจจับเสียงพูดที่ปนเปื้อนด้วยเสียงรบกวน ในขณะที่ไมโครโฟนตัวที่สองถูกใช้เป็นไมโครโฟนอ้างอิงเพื่อตรวจจับเสียงรบกวนโดยตรงจากแหล่งกำเนิด แทนการใช้ VAD ในการแยกความแตกต่างระหว่างช่วงเสียงพูด (speech duration) และช่วงเสียงรบกวน (noise duration) เพื่อหาค่าประมาณเสียงรบกวนพื้นหลังจากสัญญาณไมโครโฟนตัวแรก ตัวกรองแบบปรับตัว (adaptive filter) จะทำการประมาณสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (background noise signal) โดยใช้สัญญาณจากไมโครโฟนอ้างอิง และตัดออกจากสัญญาณเสียงพูดที่ปนเปื้อนด้วยเสียงรบกวน ทั้งนี้สัมประสิทธิ์ของตัวกรองแบบปรับตัวจะถูกปรับตัวอย่างเหมาะสมที่สุดเพื่อให้สัญญาณมีผลพลได้มีแนวโน้มที่ลดลงโดยใช้การป้อนกลับของสัญญาณผิดพลาด ณ เวลาหนึ่งๆ การปรับแบบนี้จะถูกทำซ้ำเมื่อมีสัญญาณขาเข้าใหม่จนกระทั่งสัญญาณความผิดพลาดมีค่าต่ำที่สุด อย่างไรก็ตาม ในสถานการณ์ขณะทำการรักษาฟัน ไมโครโฟนทั้งสองตัวอาจจะอยู่ใกล้กันมาก ทำให้มีการแทรกสอดของเสียงพูดในไมโครโฟนอ้างอิง ส่งผลให้สัญญาณขาออกของเทคนิค ANC สูญเสียองค์ประกอบบางส่วนของเสียงพูดไป ทำให้ทันตแพทย์ไม่สามารถสื่อสารกับคนไข้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ [23] ในความเป็นจริง หูฟังสวมศีรษะตัดออกเสียงรบกวนควรจะถูกออกแบบเพื่อตัดออกเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันโดยรักษาคุณภาพของเสียงพูดระหว่างทันตแพทย์และคนไข้ ดังนั้น วัตถุประสงค์ของเทคนิคการลดเสียงรบกวนที่น่าเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ คือเพื่อกำจัดเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันออกจากสัญญาณเสียงพูดที่ต้องการ โดยที่ก่อให้เกิดความเพี้ยนของเสียงพูดน้อยที่สุด

วิทยานิพนธ์นี้จะทำการออกแบบเทคนิคการลดเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันโดยใช้ระบบ ANC สองขั้นตอน (Two-step Dental-Drill Noise Reduction technique, TSDNR) ซึ่งอาศัยการออกแบบโดยใช้ความถี่เปรียบจากลักษณะทางความถี่ของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟัน เทคนิคที่ออกแบบรองรับการสื่อสารระหว่างทันตแพทย์และคนไข้โดยที่ไม่ก่อให้เกิดเสียงรบกวนแบบดนตรี และไม่จำเป็นต้องอาศัย VAD ในการดำเนินการ เทคนิค TSDNR ประกอบด้วยสองขั้นตอน ขั้นตอนแรกใช้เพื่อกำจัดความถี่หลักมูลและความถี่ฮาร์โมนิกของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันที่อยู่ในช่วงองค์ประกอบทางความถี่ของเสียงพูดส่วนใหญ่ กล่าวคือช่วงต่ำกว่า 8 กิโลเฮิร์ตซ์ ในขั้นตอนนี้จะทำ

การสกัดความถี่หลักมูลและความถี่ฮาร์โมนิกของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันด้วยขั้นตอนวิธีสกัดความถี่หลักมูลและความถี่ฮาร์โมนิก (fundamental-and-harmonic frequencies extraction algorithm) ที่นำเสนอขึ้นในวิทยานิพนธ์นี้ สัญญาณไซน์ซอซอด์ของความถี่หลักมูลและความถี่ฮาร์โมนิกต่างๆจะถูกสร้างและใช้เป็นสัญญาณไมโครโฟนตัวที่สอง (สัญญาณอ้างอิง) ของระบบ ANC หลายระบบพร้อมๆกันเพื่อตัดออกความถี่หลักมูลและความถี่ฮาร์โมนิกของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟัน หลังจากนั้น ขั้นตอนที่สองใช้เพื่อกำจัดองค์ประกอบความถี่สูงอื่นๆของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันที่อยู่สูงกว่าองค์ประกอบทางความถี่ของเสียงพูดส่วนใหญ่ขึ้นไป กล่าวคือสูงกว่า 8 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยใช้ตัวกรองผ่านสูงซึ่งมีความถี่ตัด (cutoff frequency) ที่เหมาะสม สัญญาณขาออกของตัวกรองผ่านสูงจะถูกใช้แทนสัญญาณไมโครโฟนตัวที่สองของระบบ ANC อีกระบบหนึ่ง จากการประเมินสมรรถนะทั้งในแง่ของในการลดทอนเสียงรบกวน และคุณภาพของเสียงพูด พบว่าเทคนิค TSDNR สามารถลดเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในขณะที่สนับสนุนการสื่อสารระหว่างทันตแพทย์และคนไข้

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1) การออกแบบเทคนิคการตัดออกเสียงรบกวนแบบปรับตัวเพื่อลดเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟัน
- 2) การออกแบบ “มอดูลสกัดความถี่หลักมูลและความถี่ฮาร์โมนิก” ของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันโดยอาศัยการวิเคราะห์ข้อมูลทางความถี่

## 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ด้วยระบบการตัดออกเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันที่นำเสนอจะทำให้เราสามารถลดผลกระทบของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันได้เป็นที่น่าพึงพอใจ โดยใช้ในการตัดออกความถี่หลักมูลและความถี่ฮาร์โมนิกของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันที่อยู่ในช่วงขององค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณเสียงพูดส่วนใหญ่ รวมทั้งกำจัดองค์ประกอบความถี่สูงอื่นๆของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันที่อยู่สูงกว่าองค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณเสียงพูดส่วนใหญ่ขึ้นไปด้วย ในขณะที่ยังคงรักษาคุณภาพของการสื่อสารระหว่างทันตแพทย์และคนไข้ไว้ การดำเนินการดังกล่าวเป็นการลดความเสี่ยงของการสูญเสียการได้ยินของทันตแพทย์ที่จำเป็นต้องทำงานภายใต้สภาวะที่มีเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟัน รวมทั้งลดความกังวลของคนไข้ที่มีต่อเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟัน จึงเป็นการส่งเสริมให้คนไข้มาตรวจสุขภาพช่องปากตามระยะเวลาที่เหมาะสม อันจะก่อให้เกิดสุขภาพช่องปากที่ดีด้วย



#### 1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

- 1) การพัฒนาขั้นตอนวิธีเพื่อลดเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟัน ด้วยการจำลองระบบบนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB
- 2) สัญญาณเสียงพูดที่นำมาใช้ในการทดสอบได้มาจากฐานข้อมูล IEEE [25] (จำนวน 10 สัญญาณ)
- 3) เสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันซึ่งบันทึกเสียงจากเครื่องกรอฟัน ณ คลินิกทันตกรรม และจากเว็บเพจ [26-30]
- 4) ตัวชี้วัดประสิทธิภาพการลดเสียงรบกวนคือ อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่แบ่งเป็นตอน (Segmental Signal-to-Noise Ratio, SegSNR) โดยหาค่าเฉลี่ยจาก 30 สัญญาณ และตัวชี้วัดความเพี้ยนของเสียงพูดคือ ลอการิทึมของระยะทางเชิงสเปกตรัม (Log-Spectral Distance, LSD) โดยหาค่าเฉลี่ยจาก 30 สัญญาณ
- 5) การประเมินคุณภาพเสียงของสัญญาณเสียงพูดด้วยการทดสอบฟัง (MOS test) โดยเก็บข้อมูลจากผู้ฟังจำนวน 15-20 คน

#### 1.5 นิยามศัพท์เฉพาะ

การลดเสียงรบกวน (noise reduction) หมายถึง การลดผลกระทบของเสียงรบกวนที่ไม่ต้องการออกไปจากสัญญาณเสียงพูดที่ต้องการซึ่งปนเปื้อนด้วยเสียงรบกวน เพื่อให้สามารถรับรู้สัญญาณเสียงพูดที่ต้องการได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

เสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟัน (dental-drill noise) หมายถึง เสียงความถี่สูงที่เกิดจากการทำงานของมอเตอร์ภายในเครื่องกรอฟันขณะที่ทันตแพทย์ทำการรักษาฟัน

การสกัดความถี่หลักมูลและความถี่ฮาร์โมนิก (fundamental-and-harmonic frequencies extraction) หมายถึง การตรวจจับความถี่หลักมูลและความถี่ฮาร์โมนิกของสัญญาณเสียง

ระบบการตัดออกเสียงรบกวนแบบปรับตัว (Adaptive Noise Cancellation, ANC, system) หมายถึง การใช้ตัวกรองแบบปรับตัวเพื่อประมาณเสียงรบกวน และสร้างสัญญาณเสียงรบกวนที่มีเฟสตรงข้ามเพื่อตัดออกจากสัญญาณที่ปนเปื้อนด้วยเสียงรบกวน

ความเพี้ยนของเสียงพูด (speech distortion) หมายถึง ความแตกต่างของสัญญาณเสียงพูดที่ได้จากการลดสัญญาณรบกวนเมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณเสียงพูดต้นฉบับในเชิงความถี่

## 1.6 สมมติฐานการวิจัยในวิทยานิพนธ์

ระบบ ANC ประกอบด้วยไมโครโฟนสองตัว ไมโครโฟนตัวที่หนึ่งใช้ในการตรวจจับสัญญาณเสียงพูดที่ปนเปื้อนด้วยเสียงรบกวน สัญญาณที่ตรวจจับได้จะถูกใช้เป็นสัญญาณปฐมภูมิ (primary signal) ของตัวกรองแบบปรับตัว ขณะที่ไมโครโฟนตัวที่สองใช้ในการตรวจจับเสียงรบกวนโดยตรงจากแหล่งกำเนิดเสียงรบกวนซึ่งจะถูกใช้เป็นสัญญาณอ้างอิง (reference signal) ของตัวกรองแบบปรับตัวในระบบ ANC โดยทั่วไปแล้ว ระบบดังกล่าวสามารถตัดออกเสียงรบกวนได้ดีเยี่ยม ถ้าไมโครโฟนตัวที่สองตรวจจับเสียงรบกวนได้โดยไม่มีการแทรกสอดของสัญญาณเสียงพูดที่ต้องการเลย นั่นหมายความว่าไมโครโฟนตัวที่สองจำเป็นต้องอยู่ห่างจากไมโครโฟนตัวที่หนึ่งมากพอโดยไม่มีการปนเปื้อนของเสียงพูดอยู่ในสัญญาณอ้างอิงเลย อย่างไรก็ตาม ในสถานการณ์จริง สัญญาณอ้างอิงจะมีสัญญาณเสียงพูดที่ต้องการปนเปื้อนด้วยเสมอเนื่องจากไมโครโฟนทั้งสองตัววางอยู่ใกล้กัน ทำให้ผลลัพธ์ของระบบการตัดออกเสียงรบกวนแบบปรับตัวก่อให้เกิดความเพี้ยนของเสียงพูดในสัญญาณขาออกของระบบ ANC

วิทยานิพนธ์นี้จึงมีแนวคิดเพื่อทำให้สัญญาณอ้างอิงไม่มีการปนเปื้อนด้วยเสียงพูดที่ต้องการจากไมโครโฟนตัวที่หนึ่งเลย ทั้งนี้วิธีที่นำเสนอยังสามารถลดจำนวนไมโครโฟนในระบบลงจากสองตัวเหลือเพียงตัวเดียวด้วย กล่าวคือ ไม่ต้องใช้ไมโครโฟนตัวที่สองในการตรวจจับสัญญาณอ้างอิงของระบบ ANC โดยออกแบบ “มอดูลสกัดความถี่ลักษณะและความถี่ฮาร์โมนิก” ของเสียงรบกวนจากเครื่องรบกวนเพื่อใช้สร้างสัญญาณอ้างอิงแทนการใช้ไมโครโฟนตัวที่สอง จึงทำให้ระบบ ANC ที่นำเสนอมีต้นทุนที่ต่ำลง

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 วิธีลบทางสเปกตรัม (SS)

วิธีลบทางสเปกตรัม [10] ใช้ไมโครโฟนเพียงตัวเดียวในระบบ มีหลักการทำงานภายใต้สมมติฐานที่ว่า สัญญาณเสียงพูดและสัญญาณรบกวนในระบบไม่มีความสัมพันธ์กัน (uncorrelated) โดยสัญญาณไมโครโฟน หาได้จาก

$$x(n) = s(n) + d(n) \quad (2.1)$$

เมื่อ  $s(n)$  เป็นสัญญาณเสียงพูด  $d(n)$  เป็นสัญญาณเสียงรบกวนเชิงบวก  $x(n)$  เป็นสัญญาณไมโครโฟน และ  $n$  คือดรรชนีเวลาวิยุต (discrete-time index) ดังนั้นความสัมพันธ์ของสัญญาณเหล่านี้ในโดเมนความถี่เป็นดังนี้

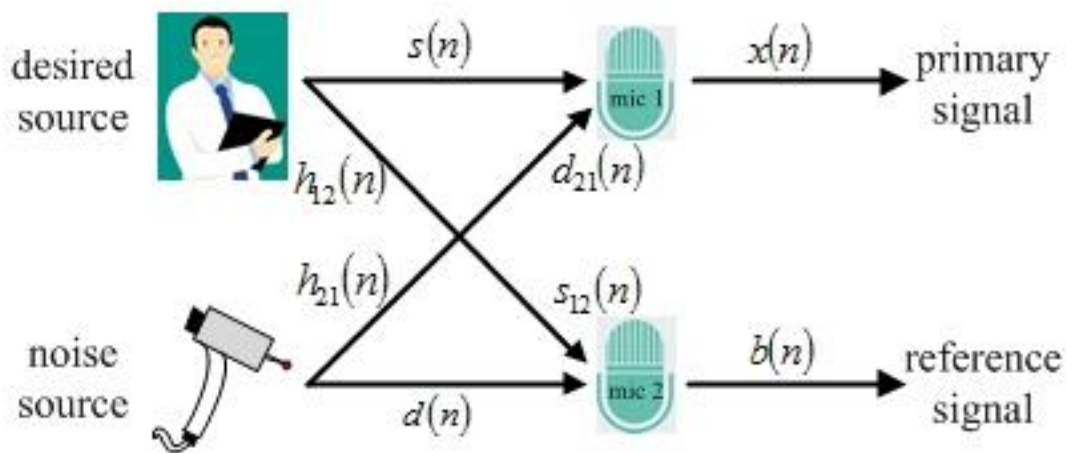
$$X(f) = S(f) + D(f) \quad (2.2)$$

โดยที่  $S(f)$  เป็นสเปกตรัมของสัญญาณเสียงพูด  $D(f)$  เป็นสเปกตรัมของสัญญาณเสียงรบกวน  $X(f)$  เป็นสเปกตรัมของสัญญาณเสียงพูดที่ปนเปื้อนด้วยเสียงรบกวน และ  $f$  แทนความถี่ในหน่วยเฮิรตซ์ วิธีนี้ต้องอาศัย VAD เพื่อแยกแยะช่วงที่มีสัญญาณเสียงพูด และช่วงที่ไม่มีสัญญาณเสียงพูด โดยช่วงที่ไม่มีสัญญาณเสียงพูดจะถูกนำมาหาค่าประมาณของสเปกตรัมของสัญญาณเสียงรบกวน  $\hat{D}(f)$  หลังจากนั้นทำการลบค่าประมาณนี้ออกจากสเปกตรัม  $X(f)$  ดังนี้

$$\hat{S}(f) = X(f) - \alpha \cdot \hat{D}(f) \quad (2.3)$$

โดยที่  $\alpha$  เป็นตัวประกอบการลบสเปกตรัมของสัญญาณรบกวน (noise subtraction factor) ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง  $(0,1)$  ซึ่งในกรณีที่  $\alpha > 1$  การลบดังกล่าวจะเรียกว่าการลบเกิน หลังจากนั้น ทำการแปลงฟูเรียร์ผกผัน (Inverse Discrete Fourier Transform, IDFT) สเปกตรัมของเสียงพูด  $\hat{S}(f)$  เพื่อสร้างสัญญาณเสียงพูดที่ถูกลบเสียงรบกวนออก  $\hat{s}(n)$  โดยคุณภาพของสัญญาณเสียงพูดที่ถูกลบเสียงรบกวนออกนี้ขึ้นอยู่กับความแม่นยำในการประมาณสเปกตรัมของเสียงรบกวน รวมไปถึงการเลือกค่าตัวประกอบการลบสเปกตรัมของสัญญาณรบกวนที่เหมาะสม ซึ่งค่าตัวประกอบ  $\alpha$  ที่สูงเกินไปจะทำให้เกิดการลบด้วยขนาดของสเปกตรัมของเสียงรบกวนที่มากจนเกินพอดี อาจส่งผลให้เกิดการสูญเสียองค์ประกอบของสัญญาณเสียงพูดบางความถี่ นอกจากนี้ สเปกตรัมของเสียงรบกวนที่หลงเหลืออยู่ และกระจายตัวแบบสุ่ม ณ ความถี่ต่างๆจะก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนแบบดนตรี [11] ด้วย ทั้งสองปัจจัยนี้ การใช้งานวิธี SS อาจก่อให้เกิดความเพี้ยนของสัญญาณเสียงพูดขาออก

## 2.2 วิธีตัดออกสัญญาณรบกวนแบบปรับตัว (ANC)



รูปที่ 2-1 แบบจำลองสัญญาณไมโครโฟนสองตัวในระบบสื่อสารทางเสียง

ระบบการตัดออกเสียงรบกวนแบบปรับตัว [24] ใช้ไมโครโฟน 2 ตัว ไมโครโฟนตัวแรก (mic1) ดังแสดงในรูปที่ 2-1 ใช้ในการตรวจจับสัญญาณเสียงพูดที่ปนเปื้อนด้วยเสียงรบกวนซึ่งจะถูกเรียกว่าสัญญาณปฐมภูมิ ส่วนไมโครโฟนตัวที่สอง (mic2) จะถูกวางไว้ใกล้แหล่งกำเนิดเสียงรบกวนเพื่อให้สามารถตรวจจับเพียงเสียงรบกวน โดยไม่ปนเปื้อนด้วยเสียงพูดที่ต้องการซึ่งจะถูกเรียกว่าสัญญาณอ้างอิง แบบจำลองสัญญาณไมโครโฟนทั้งสองตัวถูกแสดงในรูปที่ 2-1 ซึ่งสัญญาณไมโครโฟนตัวที่หนึ่งหาได้จาก

$$x(n) = s(n) + d_{21}(n) \quad (2.4)$$

โดยที่  $s(n)$  แทนสัญญาณเสียงพูดโดยตรงจากแหล่งกำเนิด และ  $d_{21}(n)$  เป็นสัญญาณเสียงรบกวนเชิงบวกที่ไม่มีความสัมพันธ์กับสัญญาณเสียงพูดซึ่งเดินทางผ่านวิถีสัญญาณ (signal path) ระหว่างแหล่งกำเนิดสัญญาณเสียงรบกวนและไมโครโฟนตัวที่หนึ่ง โดยสามารถจำลองได้ด้วยผลตอบสนองอิมพัลส์แบบจำกัด (Finite Impulse Response)  $h_{21}(n)$  ดังนั้นเราสามารถเขียนได้ว่าสัญญาณรบกวนที่ไมโครโฟนตัวที่หนึ่งหาได้จาก

$$d_{21}(n) = h_{21}(n) * d(n) = \mathbf{h}_{21}^T(n) \mathbf{d}(n) \quad (2.5)$$

โดยที่สัญลักษณ์  $\langle * \rangle$  แสดงการคอนโวลูชัน (convolution) ของสองสัญญาณ ขณะที่  $\mathbf{h}_{21}(n) = [h_{21,0}(n), h_{21,1}(n), \dots, h_{21,L-1}(n)]^T$  และ  $\mathbf{d}(n) = [d(n), d(n-1), \dots, d(n-L+1)]^T$  เป็นเวกเตอร์ของวิถีสัญญาณ (signal path vector) และเวกเตอร์ของสัญญาณเสียงรบกวน (noise

signal vector) จากแหล่งกำเนิดเสียงรบกวนที่มีความยาว  $L$  เท่ากัน ในขณะที่สัญญาณไมโครโฟนตัวที่สองหาได้จาก

$$b(n) = d(n) + s_{12}(n) \quad (2.6)$$

โดยที่  $d(n)$  เป็นสัญญาณเสียงรบกวนจากแหล่งกำเนิดสัญญาณเสียงรบกวน และ  $s_{12}(n)$  เป็นสัญญาณเสียงพูดที่เดินทางผ่านวิถีสัญญาณระหว่างแหล่งกำเนิดเสียงพูดและไมโครโฟนตัวที่สอง จำลองได้ด้วย  $h_{12}(n)$  ดังนั้นเราสามารถหาสัญญาณเสียงพูดที่ปนเปื้อนในสัญญาณไมโครโฟนตัวที่สองได้จาก

$$s_{12}(n) = h_{12}(n) * s(n) = \mathbf{h}_{12}^T(n)\mathbf{s}(n) \quad (2.7)$$

ขณะที่  $\mathbf{h}_{12}(n) = [h_{12,0}(n), h_{12,1}(n), \dots, h_{12,L-1}(n)]^T$  และ  $\mathbf{s}(n) = [s(n), s(n-1), \dots, s(n-L+1)]^T$  เป็นเวกเตอร์ของวิถีสัญญาณ (signal path vector) อีกวิธีหนึ่ง และเวกเตอร์ของสัญญาณเสียงพูด (speech signal vector) จากแหล่งกำเนิดเสียงพูดที่มีความยาว  $L$  เท่ากัน โดยบล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของระบบ ANC ถูกแสดงในรูปที่ 2-2 ทั้งนี้ สำหรับกรณีอุดมคติ  $\mathbf{h}_{12}(n) = \mathbf{0}$  จะได้ว่า ตัวกรองแบบปรับตัว  $\mathbf{w}(n)$  ของระบบ ANC จะพยายามทำการประมาณวิถีสัญญาณระหว่างแหล่งกำเนิดสัญญาณเสียงรบกวนและไมโครโฟนตัวที่หนึ่ง  $h_{21}(n)$  ดังนั้นตัวกรองแบบปรับตัวจะลู่เข้าสู่ค่าของสัญญาณรบกวนเชิงบวกในไมโครโฟนตัวที่หนึ่ง โดยเราจะแทนด้วย  $d_{21}(n)$  ดังนั้นสัญญาณผิดพลาด (error signal) จะถูกกำหนดให้เท่ากับ

$$e(n) = x(n) - d_{21}(n) \approx \hat{s}(n) \quad (2.8)$$

และถูกใช้เพื่อควบคุมการปรับตัวของสัมประสิทธิ์ของตัวกรองแบบปรับตัว  $\mathbf{w}(n)$  ภายใต้ขั้นตอนวิธีการกรองแบบปรับตัวที่เหมาะสม ในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ขั้นตอนวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดที่ถ่วงน้ำหนัก (Normalized Least Mean Square, NLMS) เนื่องจากเหตุผลในเรื่องของทรัพยากรการคำนวณที่ต่ำกว่าขั้นตอนวิธีอื่นๆ โดยสมการปรับให้ทันกาลของตัวกรองแบบปรับตัวจะถูกกำหนดดังนี้ [24]

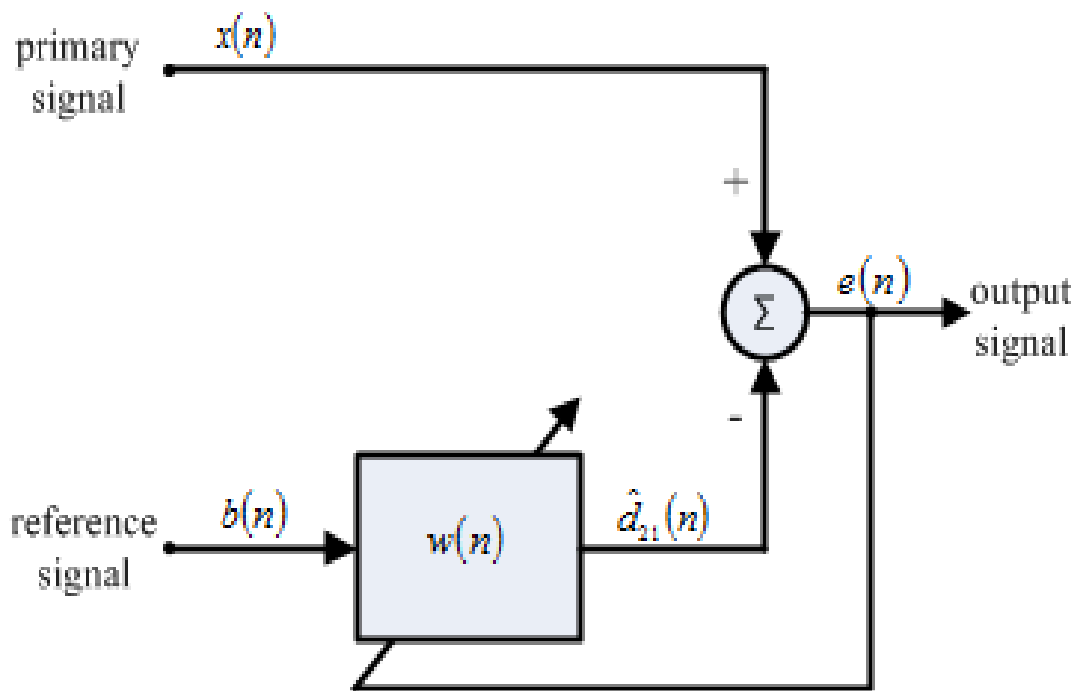
$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \mu \cdot \frac{e(n)\mathbf{d}_{21}(n)}{\varepsilon + \|\mathbf{d}_{21}(n)\|^2} \quad (2.9)$$

ขณะที่  $\mathbf{w}(n) = [w_0(n), w_1(n), \dots, w_{L-1}(n)]^T$  เป็นเวกเตอร์สัมประสิทธิ์ (coefficient vector) ของตัวกรองแบบปรับตัวที่ยาว  $L$  และ  $\mathbf{d}_{21}(n) = [d_{21}(n), d_{21}(n-1), \dots, d_{21}(n-L+1)]^T$  เป็นเวกเตอร์ของสัญญาณขาเข้าของตัวกรองแบบปรับตัว (input signal vector)  $\mu$  เป็นตัวแปรค่า

ช่วงก้าว (step-size parameter) และ  $\varepsilon$  เป็นค่าคงตัวเล็กๆ ตัวแปรค่าช่วงก้าว  $\mu$  มีบทบาทสำคัญในการควบคุมอัตราการลู่เข้าของตัวกรองปรับตัวเพื่อทำให้สัญญาณความผิดพลาด  $e(n)$  มีแนวโน้มต่ำที่สุดในแต่ละขั้นของการปรับตัว ตัวแปรค่าช่วงก้าวถูกกำหนดให้อยู่ในช่วง  $(0, \frac{2}{\lambda_{\max}})$  โดยที่  $\lambda_{\max}$  เป็นค่าเจาะจงสูงสุด (maximum eigenvalue) ของเมทริกซ์อัตโนมัติสหสัมพันธ์ (autocorrelation matrix) ของสัญญาณอ้างอิงของระบบ ANC  $R_{bb}$  ซึ่งหาได้จาก [24]

$$\mathbf{R}_{bb} = [\mathbf{b}(n)\mathbf{b}^H(n)] \quad (2.10)$$

โดยที่  $[\cdot]^H$  คือตัวดำเนินการสลับเปลี่ยนเมทริกซ์แบบเฮอร์มิเทียน (Hermitian Transposition operator) สำหรับเมทริกซ์ใดๆ



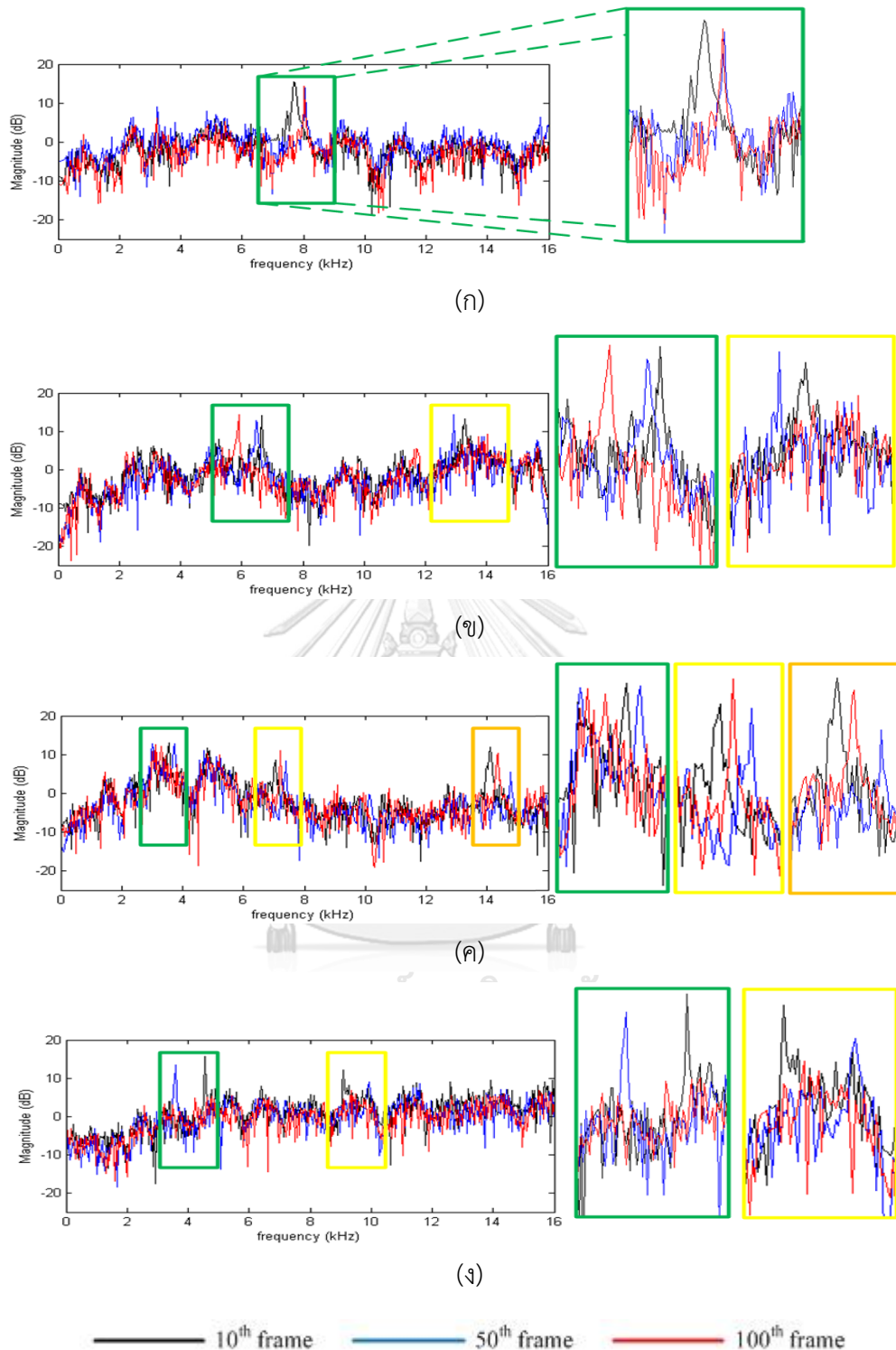
รูปที่ 2-2 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของระบบ ANC แบบสองไมโครโฟน

### บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 การวิเคราะห์ในลักษณะทางความถี่ของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟัน

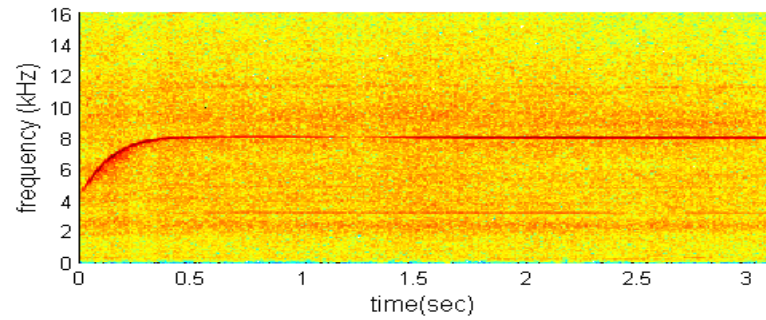
เราทำการวิเคราะห์ที่เสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันจาก [26-30] ผ่านการพิจารณาการซ้อนทับกันของสเปกตรัมขนาด (overlay plot of magnitude spectrum) จากการตรวจสอบจากรูปที่ 3-1 (ก) ซึ่งเป็นเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันอัตราเร็วสูง [26] จะพบว่ามีค่ายอดของสเปกตรัม (spectral peak) เปลี่ยนแปลงตามเวลาอย่างเล็กน้อยในช่วง 7-8 กิโลเฮิร์ตซ์ และไม่มีฮาร์มอนิกที่สอง ในขณะที่รูปที่ 3-1 (ข) เป็นเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันอัตราเร็วสูงขณะที่กำลังทำการกรอฟัน [27] จะพบว่ามีค่ายอดของสเปกตรัมมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาในช่วง 6-7 กิโลเฮิร์ตซ์ และมีความถี่ฮาร์มอนิกที่สองเปลี่ยนแปลงตามเวลาเช่นกัน โดยมีขนาดของสเปกตรัมรองลงมาจากรวมของสเปกตรัมของความถี่หลักมูลและอยู่ในช่วง 12-14 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งอยู่สูงกว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่ของเสียงพูด ในขณะที่รูปที่ 3-1 (ค) และ (ง) เป็นเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันทั่วไป [29, 30] ขณะที่กำลังทำการกรอฟัน จะพบว่ามีค่ายอดของสเปกตรัมเปลี่ยนแปลงตามเวลาในช่วง 3-4 กิโลเฮิร์ตซ์ และมีฮาร์มอนิกที่สองซึ่งเปลี่ยนแปลงตามเวลาเช่นกัน โดยมีขนาดสเปกตรัมรองลงมาจากฮาร์มอนิกที่หนึ่ง และอยู่ในช่วง 6-8 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งซ้อนทับกับองค์ประกอบทางสเปกตรัมส่วนใหญ่ของเสียงพูด ขณะที่ความถี่ฮาร์มอนิกอื่นๆอยู่สูงกว่าองค์ประกอบทางสเปกตรัมส่วนใหญ่ของเสียงพูดขึ้นไป อันที่จริงแล้วเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันเป็นผลมาจากการทำงานของมอเตอร์ภายในของเครื่องมือ โดยมีทันตแพทย์เป็นผู้ควบคุมอัตราเร็วของมอเตอร์ขณะทำฟัน นอกจากนี้ สเปกตรัมของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันในรูปที่ 3-1 (ก)-(ง) ยังมีลักษณะที่กระจายตัวตลอดทั้งแถบความถี่ของเสียงที่สามารถได้ยินได้ (audible frequency band) กล่าวคือ 0-20,000 เฮิร์ตซ์ แต่เนื่องจากใช้อัตราการซีกตัวอย่างเท่ากับ 32 กิโลเฮิร์ตซ์ ดังนั้นจึงแสดงความถี่ของข้อมูลตลอดทั้งแบนด์วิดท์ (0-16,000 เฮิร์ตซ์) แม้ว่าขนาดของสเปกตรัมจะมีค่าต่ำก็ตาม โดยเราสามารถตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของค่ายอดของสเปกตรัมของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันในรูปที่ 3-1 ได้จากสเปกโตรแกรมพล็อต (spectrogram) ในรูปที่ 3-2

ดังนั้น เราได้ข้อสรุปจากทั้งการพิจารณาการซ้อนทับกันของสเปกตรัมขนาดในรูปที่ 3-1 และสเปกโตรแกรมพล็อตในรูปที่ 3-2 ว่าเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันจาก [26-30] มีลักษณะไม่คงที่ (nonstationary) โดยมีสเปกตรัมกระจายทั่วทั้งแถบความถี่การได้ยินของมนุษย์ แต่ส่วนใหญ่กำลังจะอยู่ที่ค่ายอดของสเปกตรัมที่โดดเด่น ทั้งนี้ เราจะออกแบบเทคนิคการลดเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันโดยอาศัยลักษณะทางความถี่เหล่านี้ในหัวข้อถัดไป

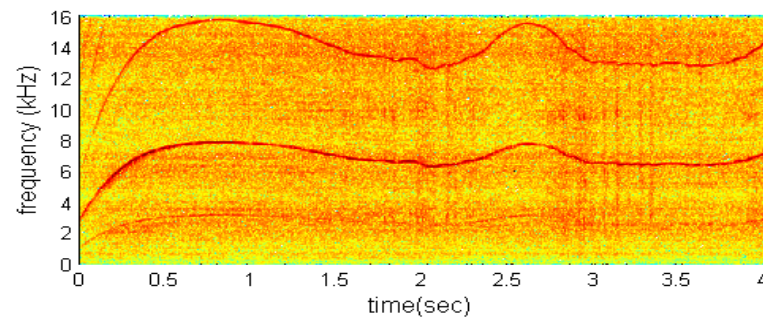


**รูปที่ 3-1** การพิจารณาการซ้อนทับกันของสเปกตรัมขนาด ณ เฟรมที่ 10 50 และ 100 ของ (ก) เสียงจากเครื่องร่อนอัตราเร็วสูงจาก [26] (ข) เสียงจากเครื่องร่อนอัตราเร็วสูงจาก [27] (ค) เสียงจากเครื่องร่อนทั่วไปจาก [29] และ (ง) เสียงจากเครื่องร่อนทั่วไปจาก [30] (อัตราการซัดตัวอย่างเท่ากับ 32 กิโลเฮิร์ตซ์)

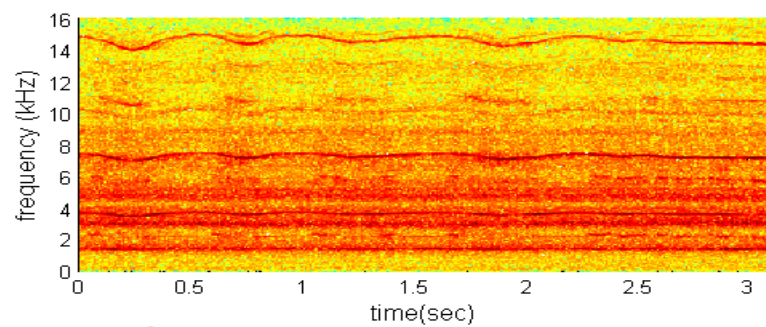




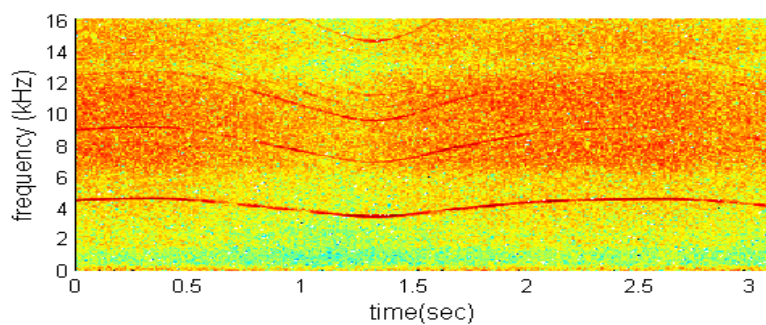
(ก)



(ข)



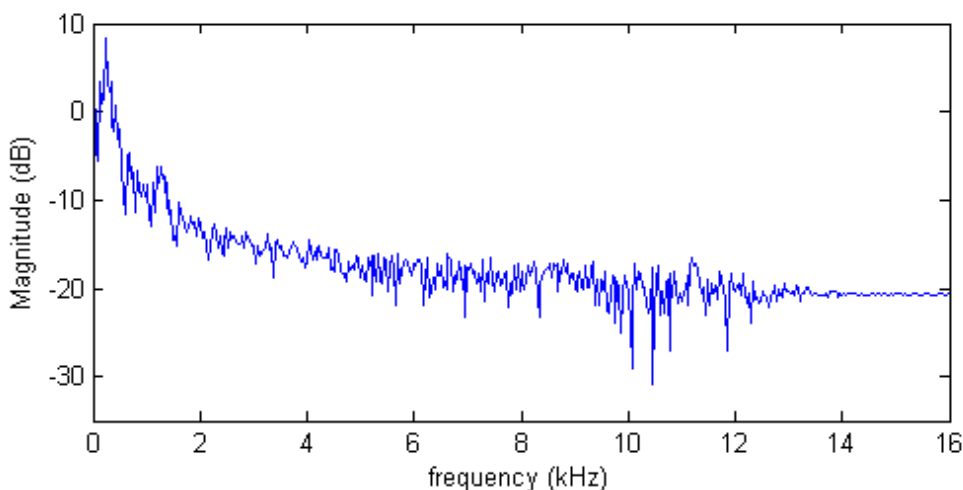
(ค)



(ง)

**รูปที่ 3-2** สเปกโตรแกรมพล็อตของ (ก) เสียงจากเครื่องกรอฟันอัตราเร็วสูงจาก [26] (ข) เสียงจากเครื่องกรอฟันอัตราเร็วสูงจาก [27] (ค) เสียงจากเครื่องกรอฟันทั่วไปจาก [29] และ (ง) เสียงจากเครื่องกรอฟันโดยทั่วไปจาก [30] (อัตราการซักร้อยเท่าเท่ากับ 32 กิโลเฮิร์ตซ์)

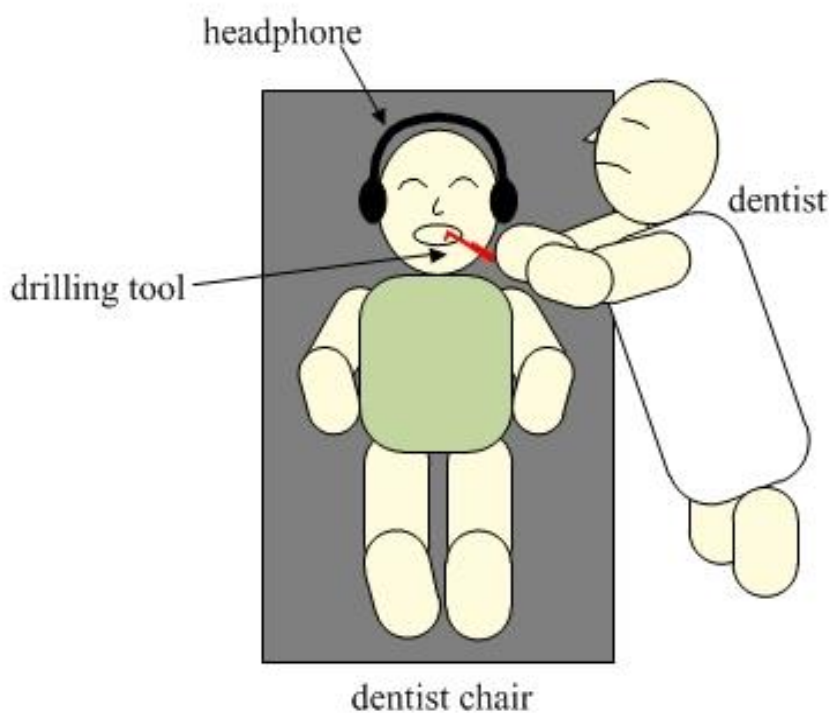
นอกจากนี้ สำหรับการพิจารณาลักษณะทางสเปกตรัมของสัญญาณเสียงพูด เป็นที่ทราบกันดี ว่ากำลังส่วนใหญ่ของสัญญาณเสียงพูดปรากฏอยู่ในแถบความถี่ที่ต่ำกว่า 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งเป็นสเปกตรัมของเสียงสระ (vowel sound) ขณะที่สเปกตรัมของเสียงพยัญชนะ (consonant sound) จะปรากฏอยู่ในแถบความถี่ที่สูงกว่าคือ ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ จนถึง 5 ถึง 8 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งสำคัญต่อความเข้าใจเสียงพูด (speech intelligibility) จากการเปรียบเทียบระหว่างสเปกตรัมของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟีน และสเปกตรัมของเสียงพูดในรูปที่ 3-3 โดยใช้อัตราการซีกตัวอย่าง (sampling rate) เท่ากับ 32 กิโลเฮิร์ตซ์เท่ากัน จะเห็นได้ว่าองค์ประกอบของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟีนจาก [26-30] ที่อยู่ในช่วงแบนด์วิดท์ของเสียงพูดนั้นคือช่วง 0 ถึง 8 กิโลเฮิร์ตซ์ จะถูกกำบัง (masking) โดยองค์ประกอบทางสเปกตรัมของเสียงพูด ในทางกลับกัน ช่วงความถี่ที่สูงกว่า 8 กิโลเฮิร์ตซ์ จะมีเพียงองค์ประกอบทางความถี่ของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟีน เพราะว่าช่วงความถี่ที่นอกเหนือจากแบนด์วิดท์ของเสียงพูดเป็นช่วงความถี่ที่ไม่ค่อยมีองค์ประกอบของเสียงพูดอยู่แล้ว



รูปที่ 3-3 สเปกตรัมขนาดของสัญญาณเสียงพูดใน [25]

### 3.2 เทคนิค TSDNR

ในงานวิจัยนี้ เราสมมติว่าคนไข้สวมใส่หูฟังสวมศีรษะเพื่อตัดออกเสียงรบกวน ซึ่งใช้เทคนิคการลดเสียงรบกวนทั้งสองข้างของหูฟังขณะทำการรักษาฟัน ดังแสดงในรูปที่ 3-4 เราจะอธิบายสำหรับการดำเนินการในข้างใดข้างหนึ่งของหูฟัง โดยที่การดำเนินการนี้จะถูกทำเช่นเดียวกันสำหรับอีกด้านหนึ่งของหูฟังด้วย เมื่อพิจารณาระบบ ANC แบบที่ใช้ไมโครโฟนสองตัว ไมโครโฟนตัวแรกจะถูกติดตั้งอยู่ด้านในของลำโพงของหูฟังสวมศีรษะ เพื่อตรวจจับสัญญาณเสียงพูดที่ปนเปื้อนด้วยเสียงรบกวน ขณะที่ไมโครโฟนตัวที่สองควรถูกติดตั้งอยู่ด้านนอกของลำโพงของหูฟัง หรือตำแหน่งที่ใกล้กับเครื่องกรอฟัน เพื่อตรวจจับเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟัน ผลที่ตามมาคือ เสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันที่ผ่านเข้าไปในหูจะถูกตัดออกจากสัญญาณเสียงพูดภายใต้สมมติฐานที่ว่าสัญญาณอ้างอิงประกอบด้วยสัญญาณเสียงรบกวนเท่านั้น อย่างไรก็ตาม สมมติฐานนี้ไม่สามารถอ้างอิงในกรณีระบบ ANC แบบสองไมโครโฟนนี้ได้ เนื่องจากแหล่งกำเนิดสัญญาณเสียงรบกวนซึ่งคือเครื่องกรอฟันอยู่ติดกับหูของคนไข้เสมอขณะทำการรักษาฟัน ดังนั้น จึงเป็นไปได้ที่จะเลือกตำแหน่งไมโครโฟนอ้างอิงเพื่อให้ตรวจจับเพียงเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันเท่านั้น ส่งผลให้สัญญาณขาออกของระบบ ANC ที่ได้จากการลดเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันมีคุณภาพเสียงพูด (speech quality) แย่ลงหลังจากการลดเสียงรบกวน



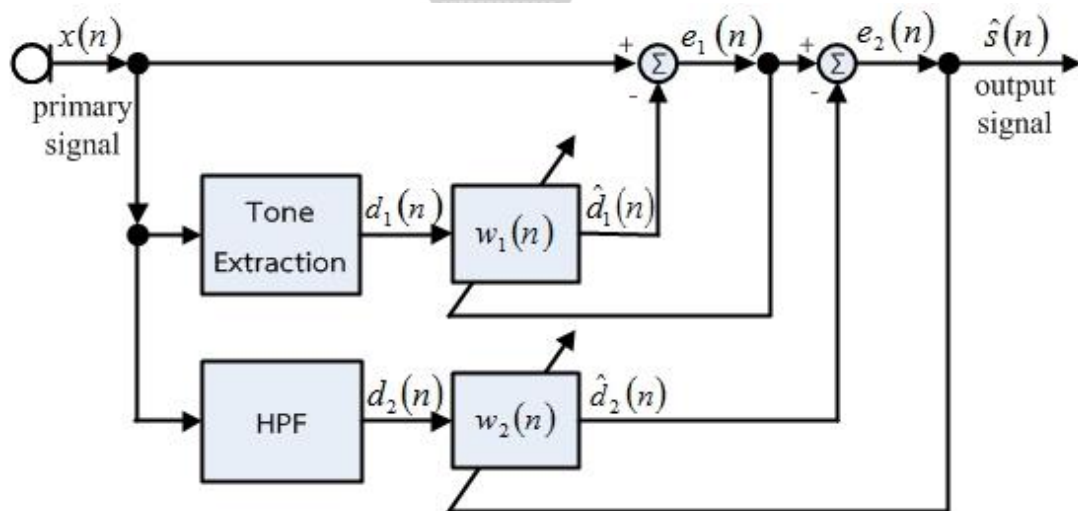
รูปที่ 3-4 การใช้งานหูฟังสวมศีรษะลดเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟัน

### 3.2.1 หลักการทำงานของเทคนิค TSDNR

เราออกแบบเทคนิค TSDNR โดยเริ่มจากการพิจารณาเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันอัตราเร็วสูงจาก [26-28] ก่อน เนื่องจากมีความถี่หลักมูลที่สูงกว่าจึงสามารถส่งผลกระทบต่อระบบการได้ยินของทันตแพทย์ค่อนข้างมาก จากการสังเกตรูปที่ 3-2 (ก) และ (ข) เราจะเห็นได้ว่าเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันอัตราเร็วสูงมีความถี่หลักมูลเปลี่ยนแปลงตามเวลาในช่วง 6 ถึง 8 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งอยู่ในช่วงขององค์ประกอบทางความถี่ของเสียงพูดส่วนใหญ่ และมีฮาร์โมนิกที่สองอยู่ในช่วงที่สูงกว่าองค์ประกอบทางความถี่ของเสียงพูดส่วนใหญ่ขึ้นไป ดังนั้น เราจะออกแบบเทคนิค TSDNR เป็นสองขั้นตอน ในขั้นตอนแรก เราจะตัดออกเพียงความถี่หลักมูลของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันเท่านั้นเพื่อเก็บรักษาองค์ประกอบของเสียงพูดส่วนใหญ่ไว้ ส่วนความถี่สูงอื่นๆของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันซึ่งรวมทั้งฮาร์โมนิกที่สองซึ่งสูงกว่าองค์ประกอบทางความถี่ของเสียงพูดส่วนใหญ่ขึ้นไปนั้นจะถูกตัดออกในขั้นตอนที่สอง บล็อกไดอะแกรมของเทคนิค TSDNR ที่นำเสนอแสดงในรูปที่ 3-5 อาศัยระบบ ANC สองขั้นตอนและใช้ไมโครโฟนเพียงตัวเดียว ซึ่งสามารถลดเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อเปรียบเทียบกับระบบ ANC แบบทั่วไปซึ่งใช้ไมโครโฟนสองตัวดังแสดงในรูปที่ 2-2 โดยระบบ TSDNR จะใช้ตัวกรองปรับตัวสองตัวคือ  $w_1(n)$  และ  $w_2(n)$  เพื่อประมาณสัญญาณความถี่หลักมูล และความถี่สูงอื่นๆจากเครื่องกรอฟัน ตามลำดับ โดยที่องค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันจะถูกสกัดจากสัญญาณเสียงพูดที่ปนเปื้อนด้วยเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันโดยใช้วิธีที่แตกต่างกัน (ซึ่งจะถูกอธิบายในหัวข้อย่อยถัดไป) เพื่อใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงทดแทนการใช้ไมโครโฟนตัวที่สองสำหรับระบบ ANC ทั้งสองขั้นตอน ดังนั้น เทคนิค TSDNR ที่นำเสนอ เป็นการใช้งานระบบ ANC ที่ใช้ไมโครโฟนตัวเดียว (single-microphone ANC system) ซึ่งจะเป็นการลดการสูญเสียองค์ประกอบเสียงพูด รวมถึงต้นทุนในการดำเนินการ เมื่อเทียบกับระบบ ANC ที่ใช้ไมโครโฟนสองตัวในการดำเนินการ

อันเนื่องมาจากความจริงที่ว่ากำลังส่วนใหญ่ของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันปรากฏอยู่บริเวณค่ายอดสเปกตรัม และสเปกตรัมช่วงความถี่ต่ำของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันถูกกำบังโดยสเปกตรัมของเสียงสระในช่วงที่มีกิจกรรมเสียงพูด (voice-activity duration) ขั้นตอนแรกของเทคนิค TSDNR ที่นำเสนอ จะทำการกำจัดเสียงความถี่หลักมูลของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟัน เสียงความถี่หลักมูลของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันจะถูกสกัดจากสัญญาณปฐมภูมิซึ่งเป็นสัญญาณจากไมโครโฟน และถูกใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงสำหรับตัวกรองแบบปรับตัวตัวแรก  $w_1(n)$  โดยประเด็นสำคัญในขั้นตอนนี้คือเราจะไม่ทำการกำจัดเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันที่อยู่ในแถบความถี่ของเสียงพยัญชนะเพื่อรักษาข้อมูลของเสียงพูดไว้

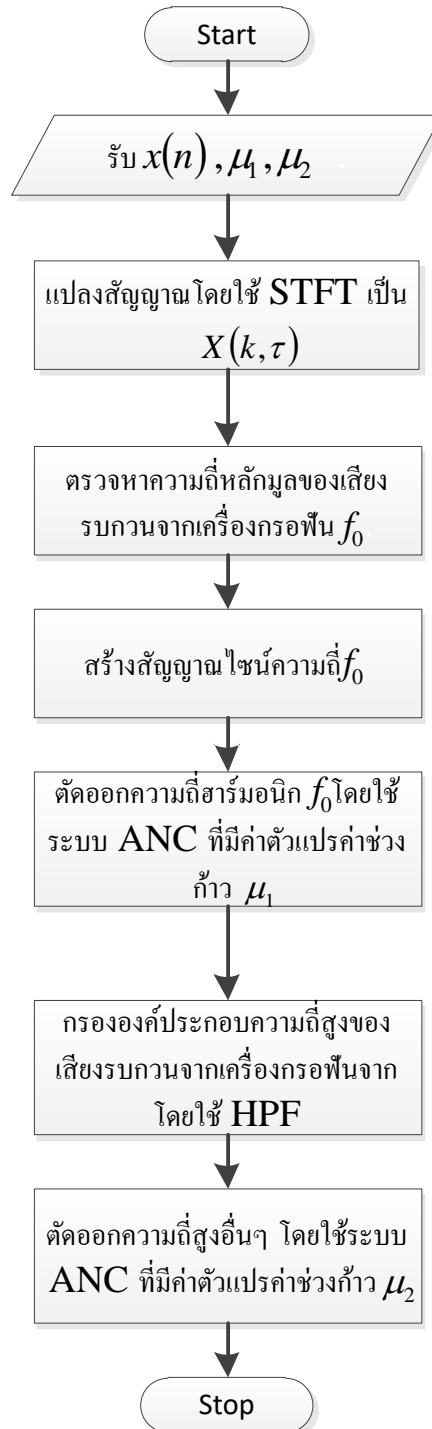
ขั้นตอนที่สองของเทคนิค TSDNR ที่นำเสนอทำการกำจัดองค์ประกอบเสียงรบกวนจากเครื่องรอกฟันที่อยู่นอกเหนือแถบความถี่ของเสียงพูดซึ่งรวมทั้งฮาร์โมนิกของความถี่หลักมูลของเสียงรบกวนจากเครื่องรอกฟันด้วยเช่นกัน โดยใช้ตัวกรองแบบปรับตัวที่สอง  $w_2(n)$  และสัญญาณอ้างอิงที่สกัดได้จากการกรองผ่านสูงของสัญญาณเสียงพูดที่ปนเปื้อนด้วยเสียงรบกวนโดยใช้ตัวกรองผ่านสูง (high-pass filter, HPF) ซึ่งถูกแสดงในรูปที่ 3-5 ทั้งนี้ ความถี่ตัดของ HPF ถูกเลือกให้มีค่าต่ำพอที่จะลดองค์ประกอบความถี่สูงของเสียงรบกวนจากเครื่องรอกฟัน และต้องสูงพอเพื่อหลีกเลี่ยงการแทรกสอดในช่วงแบนด์วิดท์ของเสียงพูด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในแถบสเปกตรัมของเสียงสระเพื่อไม่ทำให้คุณภาพของเสียงพูดต่ำลง ในขณะที่อันดับของตัวกรอง (filter order)  $N_h$  กำหนดความซับซ้อนในการดำเนินการ (implementation complexity) โดย HPF ที่มีอันดับต่ำจะก่อให้เกิดแถบการเปลี่ยนผ่าน (transition band) ที่กว้างกว่า ส่งผลให้เกิดการแทรกสอดของเสียงพูดที่สูงขึ้น ดังนั้นเราจำเป็นต้องเลือกที่จะให้ความสำคัญกับอย่างใดอย่างหนึ่งระหว่าง ประสิทธิภาพการลดเสียงรบกวนคุณภาพของเสียงพูด และความซับซ้อนในการดำเนินการ โดยระบบ ANC ขั้นตอนแรกช่วยในการลดความถี่หลักมูลของเสียงรบกวนจากเครื่องรอกฟัน ซึ่งปรากฏในสเปกตรัมของเสียงพยัญชนะทำให้การเลือกระหว่าง การลดเสียงรบกวน คุณภาพของเสียงพูด และความซับซ้อนในการดำเนินการทำได้ง่ายขึ้น



รูปที่ 3-5 บล็อกไดอะแกรมของเทคนิค TSDNR

ดังนั้น เราสามารถกำจัดทั้งความถี่หลักมูล และความถี่สูงของเสียงรบกวนจากเครื่องรอกฟันออกจากสัญญาณปฐมภูมิ  $x(n)$  ได้โดยใช้เทคนิค TSDNR ซึ่งจะได้สัญญาณเสียงพูดขาออก  $\hat{s}(n)$  ประกอบด้วยเสียงพูดที่ต้องการของทันตแพทย์ ในกรณีที่พิจารณาหูฟังสวมศีรษะที่คนใช้สวมใส่อยู่

การทำงานของเทคนิค TSDNR สามารถนำเสนอด้วยแผนภูมิสายงาน (flow chart) ดังแสดงในรูปที่ 3-6 โดยเราจะลงรายละเอียดขั้นตอนวิธีการสกัดความถี่หลักมูลในหัวข้อย่อยถัดไป



รูปที่ 3-6 แผนภูมิผังงานแสดงการทำงานของเทคนิค TSDNR

### 3.2.2 ขั้นตอนวิธีการสกัดความถี่หลักมูล

องค์ประกอบทางสเปกตรัมของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันส่วนใหญ่ที่อยู่ในแบนด์วิดท์ของเสียงพูดจะถูกกำบัง (mask) ด้วยองค์ประกอบของเสียงพูด ขั้นตอนแรกของวิธี TSDNR จะทำการตัดออกเสียงความถี่หลักมูลของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันโดยอาศัยการจำลองสัญญาณไขว้ซอซอดต์ความถี่หลักมูลที่สกัดได้ เพื่อใช้แทนสัญญาณอ้างอิง (หรือไมโครโฟนตัวที่สอง) ของระบบ ANC โดยกระบวนการจำลองเสียงความถี่หลักมูลถูกดำเนินการใน “มอดูลสกัดความถี่หลักมูล” ซึ่งถูกแสดงในรูปที่ 3-7 เริ่มจากการแบ่งสัญญาณเสียงพูดที่ปนเปื้อนด้วยเสียงรบกวนเป็นเฟรมสั้นๆ เฟรมละ 30 มิลลิวินาที [31] สำหรับอัตราการซีกตัวอย่าง 32 กิโลเฮิรตซ์ เราจะใช้  $x(\tau)$  แทนสัญญาณเสียงพูดที่ปนเปื้อนด้วยเสียงรบกวนสำหรับเฟรมที่  $\tau$  และทำการวิเคราะห์เพื่อตรวจจับความถี่หลักมูลของเสียงรบกวนผ่านการแปลงฟูเรียร์ช่วงสั้น (Short Time Fourier Transform, STFT) ดังนี้

$$X(k, \tau) = \sum_{i=0}^{L-1} [x(\tau L + i) - \overline{x(\tau)}] \cdot e^{-j(2\pi/L)ik} \quad (3.1)$$

โดยที่  $k$  แทนดัชนีความถี่ (frequency index)  $L$  แทนความยาวของ  $x(\tau)$  และ  $\overline{x(\tau)}$  คือองค์ประกอบกระแสตรง (DC component) ของ  $x(\tau)$  โดยความถี่ค้ำยอด (tone frequency) ของสเปกตรัมที่โดดเด่น ของสัญญาณรบกวนจากเครื่องกรอฟันจะถูกประมาณได้จากการตรวจจับค้ำยอดสูงสุด (maximum peak) ของสเปกตรัมขนาดในช่วงสั้น อย่างไรก็ตาม ความถี่ค้ำยอดนี้จะมีการเลื่อน (shifting) เล็กน้อยในทางเวลา เราจำเป็นต้องจำลองสัญญาณไขว้ซอซอดต์ด้วยเฟสที่ต่อเนื่อง (continuous phase sinusoidal signal) เพื่อป้องกันการรั่ว (leakage) ของสเปกตรัม เรากำหนดให้ดัชนีความถี่ของค้ำยอดของเฟรมที่  $\tau$  แทนด้วยสัญลักษณ์  $k_{max}(\tau)$  โดยดัชนีความถี่ค้ำยอดนี้จะถูกคืนค่าเป็นความถี่  $f_{max}(\tau)$  ของสัญญาณไขว้ซอซอดต์ที่จะถูกจำลองสำหรับเฟรมที่  $\tau$  นอกจากนี้ยังถูกใช้เพื่อปรับค่าขีดเริ่มเปลี่ยนของความถี่ (frequency threshold)  $\kappa(\tau)$  เพื่อใช้สร้างเงื่อนไขสำหรับการรับประกันการตรวจจับความถี่ของสัญญาณเสียงรบกวนสำหรับเฟรมถัดไปด้วย โดย “มอดูลการปรับตัวขีดเริ่มเปลี่ยนของความถี่” (Frequency Threshold Adaptation Module) ดำเนินการปรับตัวขีดเริ่มเปลี่ยนของความถี่  $\kappa(\tau)$  ดังนี้

$$\kappa(\tau) = [\gamma \cdot \kappa(\tau - 1) + (1 - \gamma) \cdot k_{max}(\tau)] \quad (3.2)$$

โดยที่  $\gamma$  แทนตัวประกอบการถ่วงน้ำหนัก (weighted factor) และ  $[\cdot]$  แทนตัวดำเนินการปิดลง (floor operator) ขีดเริ่มเปลี่ยนของความถี่  $\kappa(\tau)$  นี้จะถูกใช้ใน “มอดูลการปรับช่วงความถี่” (frequency bound updating) สำหรับการกำหนดช่วงของความถี่ค้ำยอดของสัญญาณเสียงรบกวน

ในเฟรมถัดไปเพื่อรับประกันว่าความถี่ค่ายอดที่ตรวจจับได้เป็นของสัญญาณเสียงรบกวน ไม่ใช่ของเสียงพูด นั่นคือความถี่ค่ายอดของสัญญาณเสียงรบกวนเฟรมถัดไปจะต้องอยู่ในช่วง  $\kappa(\tau) - \delta \leq k_{max}(\tau + 1) \leq \kappa(\tau) + \delta$  ขณะที่  $\delta$  เป็นค่าบวกเล็กๆที่ถูกเลือกอย่างเหมาะสมจากการสังเกตการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเสียงรบกวนภายใต้สมมติฐานที่ว่า สัญญาณเสียงรบกวนจากเครื่องกรอพื้นเปลี่ยนแปลงอย่างค่อยเป็นค่อยไปในโดเมนเวลา ขณะเดียวกัน “มอดูลการปรับตัวของเฟสเริ่มต้น” (Initial Phase Adaptation Module) จะดำเนินการหาเฟสเริ่มต้นที่เหมาะสมสำหรับสัญญาณในแต่ละเฟรมเพื่อให้ไม่มีรอยต่อกันของสัญญาณไซน์ซอชยด์ที่จะถูกจำลองสำหรับแต่ละเฟสในขั้นถัดไปโดยอาศัยสมการการต่อเฟส (phase-concatenation equation) ซึ่งถูกแสดงดังนี้

$$\phi(\tau) = [k_{max}(\tau) - k_{max}(\tau - 1)] \cdot (\tau - 1) \cdot L + \phi(\tau - 1) \quad (3.3)$$

ขั้นตอนสุดท้าย ขนาดของสัญญาณไซน์ซอชยด์ที่จะถูกจำลองสำหรับช่วงที่  $\tau$   $|d_1(\tau)|$  จะต้องถูกประมาณ และปรับตัวอย่างต่อเนื่องเพื่อหลีกเลี่ยงความไม่ต่อเนื่องจากการต่อสัญญาณช่วงสั้น “มอดูลการประมาณขนาด” (Magnitude Estimation Module) ผ่านทาง สมการปรับเทียบขนาด (Smoothing Magnitude Equation) หาได้จาก

$$|d_1(\tau)| = \lambda \cdot |d_1(\tau - 1)| + (1 - \lambda) \cdot |x(\tau)| \quad (3.4)$$

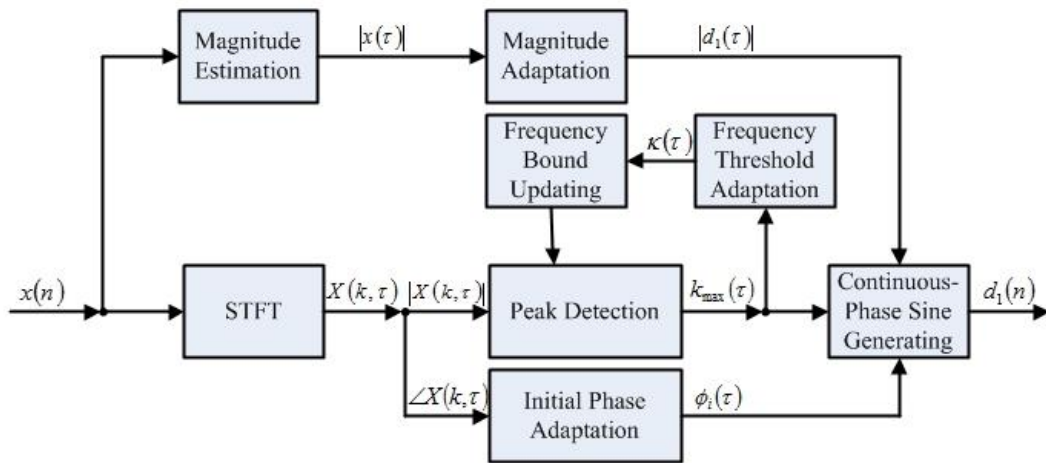
โดยที่  $\lambda$  แทนตัวประกอบปรับเทียบขนาด (smoothing magnitude factor) เราจำเป็นต้องจำลองสัญญาณไซน์ซอชยด์ที่มีเฟสต่อเนื่องเพื่อป้องกันการรั่วของสเปกตรัมจากการเลื่อนของความถี่หลักมูลของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอพื้นในทางเวลาโดยการใช้ “มอดูลจำลองสัญญาณไซน์ซอชยด์ที่มีเฟสต่อเนื่อง” (Continuous-Phase Sine Generating Module) ดังนั้นสัญญาณเสียงความถี่หลักมูลช่วงที่  $\tau$  หาได้ดังนี้

$$d_1(\tau) = |d_1(\tau)| \cdot \sin(2\pi f_{max}(\tau)t + \phi(\tau)) \quad (3.5)$$

โดย  $t = 0, \frac{1}{f_s}, \frac{2}{f_s}, \dots, \frac{(L-1)}{f_s}$  ขณะที่  $f_s$  แทนอัตราการซีกตัวอย่างของสัญญาณ  $x(\tau)$  ดังนั้นสัญญาณเสียงความถี่หลักมูลของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอพื้น  $d_1(n)$  จะถูกประมาณได้จากการต่อกันของสัญญาณเสียงความถี่หลักมูลช่วงสั้น  $d_1(\tau)$

ในสถานการณ์จริง องค์กรประกอบทางสเปกตรัมของสัญญาณเสียงความถี่หลักมูลที่ได้ซึ่งมีความถี่ประมาณ 8 กิโลเฮิร์ตซ์ ถูกตรวจจับ ดังนั้นเราสามารถสร้างสัญญาณไซน์ซอชยด์ที่มีความถี่เดียวกันนี้ และใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงของตัวกรองปรับตัวตัวแรกของเทคนิค TSDNR ซึ่งสามารถกำจัดเสียงความถี่หลักมูลของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอพื้นได้





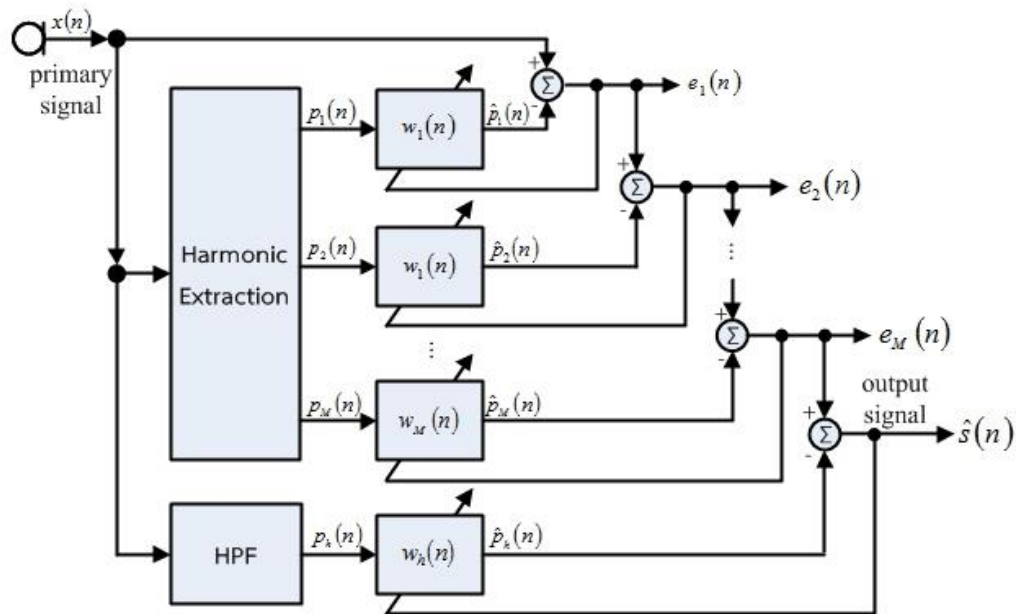
รูปที่ 3-7 มอดูลสกัดความถี่หลักของวิธี TSDNR



### 3.3 การปรับปรุงเทคนิค TSDNR

เทคนิค TSDNR ในหัวข้อ 3.2 ดำเนินการลดเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันอัตราเร็วสูงจาก [26-28] ด้วยการตัดออกความถี่หลักมูลของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันซึ่งอยู่ในช่วง 6 ถึง 8 กิโลเฮิร์ตซ์ รวมทั้งตัดออกองค์ประกอบความถี่สูงอื่นๆของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟัน ก่อนอื่นขอพิจารณาที่ขั้นตอนการตัดออกองค์ประกอบความถี่สูงของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันในขั้นตอนที่สองก่อน ซึ่งใช้ระบบ ANC ร่วมกับตัวกรองผ่านสูงที่มีความถี่ตัดที่เหมาะสม เพื่อตัดออกองค์ประกอบความถี่สูงของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันที่อยู่สูงกว่าช่วงขององค์ประกอบส่วนใหญ่ของเสียงพูด โดยที่ยังเก็บรักษาองค์ประกอบสำคัญของเสียงพูดไว้ การเลือกความถี่ตัดของตัวกรองผ่านสูงนี้จึงจะถูกเลือกภายใต้เงื่อนไขที่ว่า เพื่อตัดเพียงองค์ประกอบความถี่สูงอื่นๆของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟัน กล่าวคือฮาร์โมนิกอื่นๆที่หลงเหลืออยู่ในขณะที่ยังคงรักษาองค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณเสียงพูดไว้ให้ได้มากที่สุด ดังนั้นความถี่ตัดของตัวกรองผ่านสูงที่เหมาะสมจึงมีค่าประมาณ 8 ถึง 9 กิโลเฮิร์ตซ์ จากผลการทดสอบด้วยการฟังพบว่า เทคนิค TSDNR สามารถดำเนินการตัดออกเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันอัตราเร็วสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพเป็นที่น่าพึงพอใจ อย่างไรก็ดี สำหรับเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันโดยทั่วไป [29, 30] ซึ่งมีความถี่หลักมูลต่ำกว่า กล่าวคือเพียงประมาณ 3 ถึง 4 กิโลเฮิร์ตซ์ เท่านั้น จะมีฮาร์โมนิกที่สองอยู่ในช่วง 6 ถึง 8 กิโลเฮิร์ตซ์ ดังนั้น การเลือกความถี่ตัดของตัวกรองผ่านสูงที่ต่ำลงเพื่อกรององค์ประกอบความถี่สูงอื่นๆ ของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันในขั้นตอนที่สองของระบบ TSDNR ไม่สามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากจะทำให้องค์ประกอบทางความถี่ของเสียงพูดถูกรองออกไปด้วย ส่งผลให้เกิดการสูญเสียองค์ประกอบของเสียงพูดในขั้นตอนการตัดออกองค์ประกอบความถี่สูงของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟัน ในทางกลับกัน ถ้าเราพยายามที่จะคงไว้ซึ่งองค์ประกอบของเสียงพูดให้ได้มากที่สุดโดยการเลือกความถี่ตัดที่สูงขึ้นไป จะทำให้ไม่สามารถตัดออกความถี่ฮาร์โมนิกที่สองของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันดังกล่าวนี้ได้ ด้วยเหตุนี้ เราจะทำการปรับปรุงเทคนิค TSDNR และเรียกว่าเทคนิค MTSDNR (Modified Two-Step Dental-Drill Noise Reduction, MTSDNR) เพื่อความสะดวกในการอ้างอิง เพื่อให้สามารถตัดออกทั้งความถี่หลักมูลและความถี่ฮาร์โมนิก รวมถึงองค์ประกอบความถี่สูงอื่นๆของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันโดยเก็บรักษาองค์ประกอบทางความถี่ของเสียงพูดส่วนใหญ่ไว้ โดยในขั้นตอนแรก เรานำเสนอการใช้ “**มอดูลสกัดความถี่หลักมูลและความถี่ฮาร์โมนิก**” แทนการใช้ “**มอดูลสกัดความถี่หลักมูล**” เพื่อใช้สกัดความถี่หลักมูล รวมทั้งความถี่ฮาร์โมนิกทั้งหมดที่อยู่ในช่วงขององค์ประกอบส่วนใหญ่ของเสียงพูด และตัดออกสำหรับแต่ละฮาร์โมนิกของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันจากสัญญาณเสียงพูดที่ปนเปื้อนเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟัน

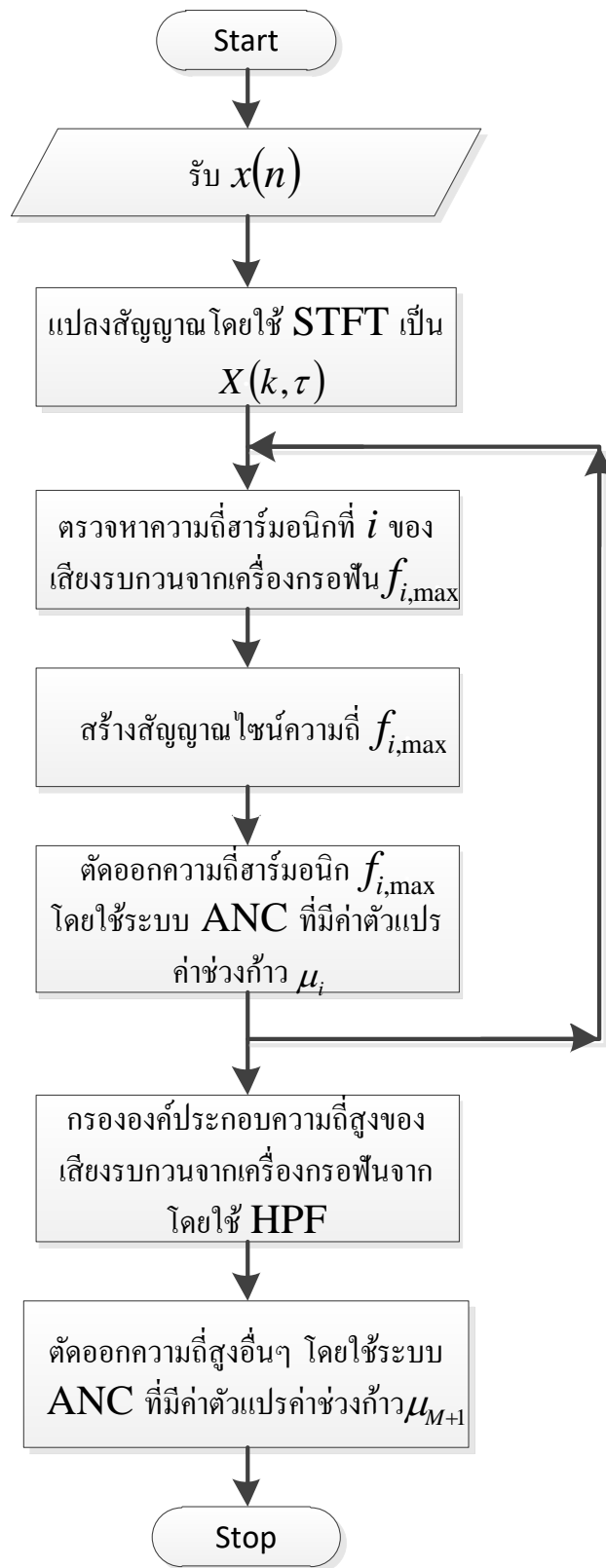
### 3.3.1 หลักการทำงานของเทคนิค MTSDNR



รูปที่ 3-8 บล็อกไดอะแกรมของเทคนิค MTSDNR

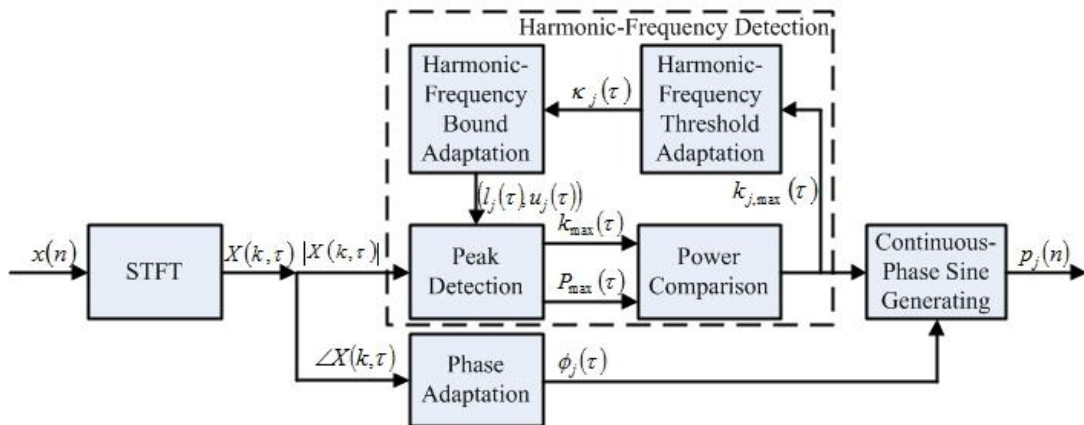
บล็อกไดอะแกรมของเทคนิค MTSDNR ดังแสดงในรูปที่ 3-8 นี้ใช้งานระบบ ANC หลายระบบ และใช้งานไมโครโฟนเพียงตัวเดียวเพื่อตรวจจับสัญญาณเสียงพูดที่ปนเปื้อนด้วยเสียงรบกวนจากเครื่องกรอพื้น ขั้นตอนแรกของเทคนิค MTSDNR จะถูกออกแบบเพื่อตัดออกความถี่หลักมูลและความถี่ฮาร์โมนิกทั้งหมดของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอพื้นที่อยู่ในช่วง 3 ถึง 8 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งเป็นช่วงที่องค์ประกอบทางความถี่ของเสียงพูดส่วนใหญ่ถูกกำบังจากองค์ประกอบทางความถี่ของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอพื้น ขั้นตอนนี้อาศัย “มอดูลสกัดความถี่หลักมูลและความถี่ฮาร์โมนิก” (รายละเอียดดังแสดงในหัวข้อ 3.3.2) ในการจำลองสัญญาณไซนูซอยด์ความถี่หลักมูล และสัญญาณไซนูซอยด์ความถี่ฮาร์โมนิกแต่ละสัญญาณ ถ้าสมมติว่ามีสัญญาณไซนูซอยด์ทั้งหมด  $M$  สัญญาณ ในช่วงความถี่ดังกล่าว จะได้ว่าสัญญาณไซนูซอยด์แต่ละสัญญาณดังกล่าวจะถูกใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงสำหรับตัวกรองแบบปรับตัว  $w_i(n)$  แต่ละตัว โดยที่  $i = 1, 2, \dots, M$  ตามลำดับ โดยประเด็นสำคัญในขั้นตอนนี้คือ เราจะทำการกำจัดเสียงความถี่ฮาร์โมนิกของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอพื้นที่อยู่ในแถบความถี่ของเสียงพัญชนะเท่านั้นเพื่อรักษาข้อมูลของเสียงพูดไว้ให้มากที่สุด

หลังจากนั้น ขั้นตอนที่สองของเทคนิค MTSDNR จะทำการกำจัดองค์ประกอบเสียงรบกวนที่อยู่สูงกว่าประกอบทางความถี่ส่วนใหญ่ของเสียงพูด ซึ่งรวมทั้งฮาร์โมนิกอื่นๆของเสียงความถี่หลักมูลโดยแผนภูมิผังงานของเทคนิค MTSDNR เป็นดังแสดงในรูปที่ 3-9



รูปที่ 3-9 แผนภูมิผังงานแสดงการทำงานของเทคนิค MTSDNR

### 3.3.2 ขั้นตอนวิธีการสกัดความถี่หลักและความถี่ฮาร์โมนิก



รูปที่ 3-10 บล็อกไดอะแกรมของขั้นตอนวิธีการสกัดความถี่หลักมูลและความถี่ฮาร์โมนิกของเทคนิค MTSDNR

ขั้นตอนแรกของเทคนิค MTSDNR นี้จะทำการตัดออกสำหรับความถี่หลักมูลและความถี่ฮาร์โมนิกของเสียงรบกวนจากเครื่องรอฟัน โดยอาศัยการจำลองสัญญาณไขว้ขอยด์จากแต่ละความถี่ฮาร์โมนิกที่สกัดได้ สัญญาณไขว้ขอยด์ที่จำลองขึ้นนี้จะถูกใช้แทนสัญญาณไมโครโฟนตัวที่สองของระบบ ANC ในแต่ละระบบแยกกัน เพื่อตัดออกความถี่ฮาร์โมนิกทั้งหมดในช่วง 3 ถึง 8 กิโลเฮิร์ตซ์ตามลำดับ

กระบวนการจำลองสัญญาณไขว้ขอยด์ความถี่หลักมูลและสัญญาณไขว้ขอยด์ความถี่ฮาร์โมนิกถูกดำเนินการใน “มอดูลสกัดความถี่หลักมูลและความถี่ฮาร์โมนิก” ซึ่งถูกแสดงในรูปที่ 3-10 โดยเริ่มจากการแบ่งสัญญาณเสียงพูดที่ปนเปื้อนด้วยเสียงรบกวนเป็นเฟรมสั้นๆ เฟรมละ 30 มิลลิวินาที [31] เราจะใช้  $x(\tau)$  แทนสัญญาณเสียงพูดที่ปนเปื้อนด้วยเสียงรบกวนสำหรับเฟรมที่  $\tau$  และเริ่มทำการวิเคราะห์เพื่อตรวจจับความถี่ฮาร์โมนิกของเสียงรบกวนจากเครื่องรอฟันผ่านโดเมนความถี่ โดยอาศัย STFT ดังสมการที่ (3.1) เช่นเดียวกับเทคนิค TSDNR เราจะกำหนดให้  $k_{j,max}(\tau)$  เป็นดัชนีความถี่ค้ำยอดของฮาร์โมนิกที่  $j$  ณ เฟรมที่  $\tau$  โดยเราจะทำการตรวจจับความถี่ฮาร์โมนิกที่อยู่ในช่วงความถี่ 3 ถึง 8 กิโลเฮิร์ตซ์ ตามแนวคิดที่ได้นำเสนอไว้ก่อนหน้านี้ ภายใต้สมมติฐานที่ว่าเสียงพูดมีพลังงานของสเปกตรัมส่วนใหญ่ซึ่งสูงกว่าพลังงานของเสียงรบกวนจากเครื่องรอฟันอยู่ในช่วงความถี่ต่ำกว่า 3 กิโลเฮิร์ตซ์ และมีพลังงานของสเปกตรัมต่ำมากในช่วงความถี่ที่สูงกว่า 8 กิโลเฮิร์ตซ์ขึ้นไป ทั้งนี้ ช่วงความถี่ 3 ถึง 8 กิโลเฮิร์ตซ์ เป็นช่วงที่ประกอบด้วยองค์ประกอบทางความถี่ที่สำคัญของเสียงพูดซึ่งถูกกำบังด้วยองค์ประกอบทางความถี่ของเสียงรบกวนจากเครื่องรอฟัน ดังนั้น ในช่วง

ความถี่ดังกล่าวเราจะทำการตรวจจับและตัดออกเฉพาะความถี่หลักมูลและความถี่ฮาร์โมนิกของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟัน โดยรักษาองค์ประกอบทางความถี่ของเสียงพูดไว้ให้ได้มากที่สุด ขั้นตอนการทำงานของมอดูลต่างๆสำหรับการสกัดความถี่ฮาร์โมนิกเป็นดังต่อไปนี้

“มอดูลการตรวจจับค่ายอด” (Peak Detection Module) จะทำการตรวจจับความถี่ค่ายอดของสัญญาณเสียงพูดที่ปนเปื้อนด้วยเสียงรบกวน  $x(\tau)$  ภายในช่วงของดัชนีความถี่  $[l, u]$  เราจะกำหนดให้  $P_{max}$  และ  $k_{max}$  แทนค่ายอดของสเปกตรัมขนาด และตำแหน่งของดัชนีความถี่ค่ายอดที่ตรวจจับได้ตามลำดับ หลังจากนั้น ค่ายอดของสเปกตรัมขนาด  $P_{max}$  จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยของสเปกตรัมขนาด  $P_{av}$  ในช่วงของดัชนีความถี่  $[l, u]$  (ในงานวิจัยนี้  $l$  และ  $u$  เป็นค่าดัชนีความถี่ ณ ความถี่ 3 และ 8 กิโลเฮิร์ตซ์ ตามลำดับ) ดังกล่าวภายใน “มอดูลการเปรียบเทียบสเปกตรัมขนาด” (Power Comparison Module) ถ้า  $P_{max} \geq d \cdot P_{av}$  โดยที่  $d > 1$  เราจะถือว่าค่ายอดของสเปกตรัมขนาด  $P_{max}$  ที่ถูกตรวจจับเป็นความถี่ฮาร์โมนิกที่หนึ่ง และ  $k_{max}$  เป็นดัชนีความถี่ฮาร์โมนิกที่หนึ่ง ณ เฟรมที่  $\tau = 1$  ตามลำดับ โดยที่ค่าดัชนีความถี่ฮาร์โมนิกที่หนึ่ง ณ เฟรมที่  $\tau = 1$  นี้จะถูกใช้ในการคำนวณหาจำนวนฮาร์โมนิก  $M$  ที่เป็นไปได้ของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันในช่วงของดัชนีความถี่  $[l, u]$  ดังสมการ

$$M = \left\lfloor \frac{u}{k_{max}} \right\rfloor \quad (3.6)$$

จำนวนฮาร์โมนิก  $M$  ที่เป็นไปได้ จะถือเป็นจำนวนฮาร์โมนิกของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันทั้งหมดในช่วงของดัชนีความถี่  $[l, u]$  ที่พิจารณา และจะถูกใช้สำหรับการสร้างช่วงของดัชนีความถี่ย่อยๆ  $[l_j, u_j]$  ณ เฟรมที่  $\tau = 1$  เพื่อตรวจจับดัชนีความถี่ฮาร์โมนิกอื่นๆของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันที่อยู่ในช่วงดัชนีความถี่  $[l, u]$  เมื่อ  $j = 2, \dots, M$  หลังจากนั้น “มอดูลการตรวจจับค่ายอด” จะทำการตรวจจับค่ายอดอื่นๆภายในแต่ละช่วงดัชนีความถี่ย่อย  $[l_j, u_j]$  โดยค่ายอดที่ถูกตรวจจับได้  $P_{j,max}$  ภายในแต่ละช่วงดัชนีความถี่ย่อย  $[l_j, u_j]$  จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยของสเปกตรัมขนาด  $P_{j,av}$  ในช่วงของดัชนีความถี่ย่อยนั้นๆ ถ้า  $P_{j,max} \geq d_j \cdot P_{j,av}$  โดยที่  $d_j > 1$  เราจะถือว่าค่ายอดของสเปกตรัมขนาด  $P_{j,max}$  ที่ถูกตรวจจับและดัชนีความถี่ค่ายอด  $k_{j,max}$  เป็นค่ายอดของสเปกตรัมขนาดฮาร์โมนิกที่  $j$  และดัชนีความถี่ฮาร์โมนิกที่  $j$  ณ เฟรมที่  $\tau = 1$  ตามลำดับ เพื่อความสะดวกในการนิยามช่วงของดัชนีย่อย ณ เฟรมที่  $\tau$  ใดๆ เราจะกำหนดให้  $P_{j,max}(\tau)$  และ  $k_{j,max}(\tau)$  แทนค่ายอดของสเปกตรัมขนาดฮาร์โมนิกที่  $j$  และดัชนีความถี่ฮาร์โมนิกที่  $j$  ณ เฟรมที่  $\tau$  นอกจากนี้ เราจะแทนช่วงของดัชนีความถี่ย่อย ณ เฟรมที่  $\tau$  ด้วย  $[l_j(\tau), u_j(\tau)]$

ดัชนีความถี่ฮาร์โมนิก  $k_{j,max}(\tau)$  นี้จะถูกคืบค่าเป็นความถี่ฮาร์โมนิก  $f_{j,max}(\tau)$  ของสัญญาณไขว้ขอยด์ความถี่ฮาร์โมนิกที่  $j$  ที่จะถูกจำลองสำหรับเฟรมที่  $\tau$  และยังคงถูกใช้เพื่อปรับค่าขีด

เริ่มเปลี่ยนของความถี่ฮาร์โมนิก (harmonic-frequency threshold)  $\kappa_j(\tau)$  เพื่อใช้สร้างเงื่อนไข สำหรับการตรวจจับความถี่ฮาร์โมนิกของสัญญาณเสียงรบกวนสำหรับเฟรมถัดไปด้วย “**มอดูลการปรับตัวขีดเริ่มเปลี่ยนของดัชนีความถี่ฮาร์โมนิก**” (Harmonic-Frequency Threshold Adaptation Module) มีการหาค่าขีดเริ่มเปลี่ยนของความถี่ฮาร์โมนิก  $\kappa_j(\tau)$  ที่ปรับตัวได้ดังนี้

$$\kappa_j(\tau) = \lfloor \gamma_j \cdot \kappa_j(\tau - 1) + (1 - \gamma_j) \cdot k_{j,max}(\tau) \rfloor \quad (3.7)$$

โดยที่  $j = 1, 2, \dots, M$  และ  $\gamma_j$  แทนตัวประกอบการถ่วงน้ำหนักสำหรับฮาร์โมนิกที่  $j$  ทั้งนี้ ขีดเริ่มเปลี่ยนของความถี่ฮาร์โมนิก  $\kappa_j(\tau)$  จะถูกใช้เพื่อกำหนดช่วงการตรวจจับความถี่ค่ายอดของสัญญาณเสียงรบกวนในเฟรมถัดไปภายใน “**มอดูลการปรับช่วงความถี่ฮาร์โมนิก**” (Harmonic-Frequency Bound Adaptation Module) เพื่อให้มั่นใจว่าความถี่ค่ายอดที่ตรวจจับได้เป็นความถี่ของฮาร์โมนิกเดียวกัน โดยที่ความถี่ฮาร์โมนิกที่  $j$  ของสัญญาณเสียงรบกวนเฟรมถัดไปจะต้องอยู่ในช่วงดัชนีความถี่  $[l_j(\tau), u_j(\tau)]$  ซึ่งจะหาได้ดังนี้ สำหรับเฟรมแรก ( $\tau = 1$ )

$$l_j(\tau) = \min \left( \left\lfloor \frac{4 \cdot j - 1}{4} \cdot k_{\tau,max}(\tau) \right\rfloor, u \right) \text{ และ} \\ u_j(\tau) = \min \left( \left\lfloor \frac{4 \cdot j + 1}{4} \cdot k_{\tau,max}(\tau) \right\rfloor, u \right) \text{ สำหรับ } j = 2, \dots, M \quad (3.8)$$

สำหรับเฟรมอื่นๆ

$$l_j(\tau) = \min(\lfloor \kappa_j(\tau - 1) - \delta(\tau - 1)/2 \rfloor, u) \text{ และ} \\ u_j(\tau) = \min(\lfloor \kappa_j(\tau - 1) + \delta(\tau - 1)/2 \rfloor, u) \text{ สำหรับ } j = 1, 2, \dots, M \quad (3.9)$$

โดยที่  $\delta(\tau)$  คือค่าความกว้างของช่วงของดัชนีความถี่ฮาร์โมนิก ณ เฟรมที่  $\tau$  และจะเปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงของขีดเริ่มเปลี่ยนของความถี่ฮาร์โมนิกที่หนึ่ง  $\kappa_1(\tau)$  ดังสมการ

$$\delta(\tau) = \delta(1) + c * |\kappa_1(\tau) - \kappa_1(\tau - 1)| \quad (3.10)$$

เมื่อ  $c$  เป็นค่าคงที่บวกในการปรับสัดส่วนของผลต่างของขีดเริ่มเปลี่ยนของความถี่ฮาร์โมนิกที่หนึ่ง  $\kappa_1(\tau)$  ในขณะเดียวกัน “**มอดูลการปรับตัวของเฟส**” (Phase Adaptation Module) จะทำการคำนวณหาเฟสเริ่มต้นที่เหมาะสมสำหรับสัญญาณไขว้ขอยด์ความถี่ฮาร์โมนิกแต่ละสัญญาณสำหรับเฟรมที่  $\tau$  ใดๆ เพื่อให้ไม่มีรอยต่อระหว่างสัญญาณไขว้ขอยด์แต่ละเฟรมโดยอาศัยสมการต่อเฟส (phase-concatenation equation) ซึ่งถูกแสดงดังนี้

$$\phi_j(\tau) = [k_{j,max}(\tau) - k_{j,max}(\tau - 1)] \cdot (\tau - 1) \cdot L + \phi_j(\tau) \quad (3.11)$$

โดยที่  $\phi_j(\tau)$  เป็นเฟสเริ่มต้นของสัญญาณไซน์ซอียดความถี่ฮาร์โมนิก ณ เฟรมที่  $\tau$  และ  $j = 1, 2, \dots, M$  ทั้งนี้ในกรณีที่มีรอยต่อ หรือรอยเลื่อนระหว่างสัญญาณไซน์ซอียดในแต่ละเฟรมที่ติดกัน จะทำให้เกิดการรั่วของสเปกตรัม (spectrum leakage) ซึ่งจะส่งผลให้เกิดความไม่ต่อเนื่องของเสียงพูดในสัญญาณขาออกที่ได้

สุดท้าย เราจำเป็นต้องจำลองสัญญาณไซน์ซอียดที่มีเฟสต่อเนื่องเพื่อป้องกันการรั่วของสเปกตรัมจากการเลื่อนของความถี่ฮาร์โมนิกของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันในทางเวลาโดยการใช้ “มอดูลจำลองสัญญาณไซน์ซอียดที่มีเฟสต่อเนื่อง” ดังนั้นสัญญาณเสียงความถี่ฮาร์โมนิกที่  $j$  ของเฟรมที่  $\tau$  หาได้ดังนี้

$$p_j(\tau) = \sin\left(2\pi f_{j,max}(\tau)t + \phi_j(\tau)\right) \quad (3.12)$$

โดย  $t = 0, \frac{1}{f_s}, \frac{2}{f_s}, \dots, \frac{(L-1)}{f_s}$  เมื่อ  $f_s$  แทนอัตราการซีกตัวอย่างของสัญญาณ  $x(\tau)$  ดังนั้นสัญญาณไซน์ซอียดความถี่ฮาร์โมนิกที่  $j$  ของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟัน  $p_j(n)$  จะถูกประมาณได้จากการนำสัญญาณไซน์ซอียดความถี่ฮาร์โมนิกที่  $j$  ของแต่ละเฟรม  $p_j(\tau)$  มาต่อกัน

ในสถานการณ์จริง ความถี่ฮาร์โมนิกของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันที่อยู่ในช่วงความถี่ 3 ถึง 8 กิโลเฮิร์ตซ์ถูกตรวจจับได้อย่างแม่นยำ ดังนั้นเราสามารถสร้างสัญญาณไซน์ซอียดความถี่ฮาร์โมนิกทั้งหมดที่อยู่ในช่วงความถี่ดังกล่าวได้ และใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงของตัวกรองปรับตัวแต่ละตัว ดังแสดงในรูปที่ 3-8 ตัวกรองปรับตัวจะทำการปรับขนาดของสัญญาณไซน์ซอียดความถี่ฮาร์โมนิกดังกล่าวและตัดออกความถี่ฮาร์โมนิกของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันจากสัญญาณเสียงพูดที่ปนเปื้อนได้

นอกจากนี้ เราได้สร้างเงื่อนไขเพิ่มเติมสำหรับ “มอดูลการตรวจจับความถี่ฮาร์โมนิก” (Harmonic-Frequency Detection Module) สำหรับช่วงสั้นที่  $\tau$  ใดๆดังต่อไปนี้

- 1) “มอดูลการตรวจจับความถี่ฮาร์โมนิก” จะทำการรับประกันว่า ช่วงของดัชนีความถี่ค่ายอดของสัญญาณเสียงฮาร์โมนิกที่ตรวจจับได้จะต้องอยู่ในช่วง 3 ถึง 8 กิโลเฮิร์ตซ์เท่านั้น ในกรณีที่ช่วงของดัชนีความถี่ค่ายอดของสัญญาณเสียงฮาร์โมนิกที่ตรวจจับได้อยู่นอกเหนือช่วงดังกล่าว มอดูลนี้จะถือว่าไม่มีองค์ประกอบความถี่ฮาร์โมนิก ดังนั้นสัญญาณเสียงความถี่ฮาร์โมนิกนั้นจะไม่ถูกสร้างต่อ ในขณะที่ค่าของดัชนีความถี่ ณ ตำแหน่งขอบของช่วงความถี่ที่พิจารณานั้นจะถูกใช้เพื่อปรับค่าช่วงของดัชนีความถี่ค่ายอดของสัญญาณเสียงฮาร์โมนิกนั้นๆ ให้ทันกาลอย่างต่อเนื่อง เพื่อใช้สร้างสัญญาณไซน์ซอียดความถี่ฮาร์โมนิกต่อในกรณีที่ สามารถตรวจจับองค์ประกอบของสัญญาณเสียงฮาร์โมนิกนั้นได้ในช่วงความถี่ 3 ถึง 8 กิโล



เฮิร์ตซ์อีกครั้ง เพื่อให้เฟสของสัญญาณไซน์ชอยด์ความถี่ฮาร์โมนิกที่สร้างมีความถูกต้องมากที่สุด

- 2) ถ้าค่ายอดของสเปกตรัมขนาดของฮาร์โมนิกนั้นๆ ไม่ถูกตรวจจับในช่วงความถี่ 3 ถึง 8 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งสถานการณ์ดังกล่าวสามารถเกิดขึ้นได้ในกรณีที่  $P_{j,max} < d_j \cdot P_{j,av}$  โดยที่  $d_j > 1$  ดังนั้น “มอดูลการตรวจจับความถี่ฮาร์โมนิก” จะยังคงสร้างสัญญาณไซน์ชอยด์ความถี่ฮาร์โมนิกต่อด้วยความถี่ค่ายอดของเฟรมก่อนหน้า  $f_{j,max}(\tau) = f_{j,max}(\tau - 1)$  จนกระทั่งในเฟรมถัดๆ ไปมีการตรวจจับค่ายอดของฮาร์โมนิกนั้นๆ ได้ใหม่ แต่ถ้าค่ายอดของสเปกตรัมขนาดของฮาร์โมนิกนั้นๆ ไม่ได้ถูกตรวจจับนานเกินกว่า 20 เฟรมขึ้นไป สัญญาณไซน์ชอยด์ความถี่ฮาร์โมนิกนั้นๆ จะถูกหยุดสร้าง ในขณะที่ดัชนีความถี่ค่ายอดยังถูกปรับให้ทันกาลอย่างต่อเนื่องด้วยค่าดัชนีความถี่ค่ายอดของเฟรมก่อนหน้า ดังนี้  $k_{j,max}(\tau) = k_{j,max}(\tau - 1)$  แต่ถ้าค่ายอดของสเปกตรัมขนาดของฮาร์โมนิกนั้นๆ ถูกตรวจจับนานต่อเนื่องเกิน 20 เฟรมขึ้นไป “มอดูลการสกัดความถี่ฮาร์โมนิก” จะทำการจำสร้างสัญญาณไซน์ชอยด์ความถี่ฮาร์โมนิกนั้นๆ ต่ออีกครั้ง

### 3.4 ความซับซ้อนในการคำนวณของเทคนิค TSDNR และ MTSDNR ที่นำเสนอ

เราทำการตรวจสอบความซับซ้อนในการคำนวณของเทคนิค TSDNR และ MTSDNR ที่นำเสนอโดยเริ่มจากการพิจารณาระบบ ANC ที่ใช้ไมโครโฟนสองตัว ในระบบดังกล่าว ตัวกรองแบบปรับตัว  $w_1(n)$  ถูกใช้เพื่อประมาณวิถีสัญญาณระหว่างเครื่องกรองฟันและไมโครโฟนตัวที่หนึ่งซึ่งเราจำลองด้วยผลตอบสนองอิมพัลส์แบบจำกัด  $h_{21}(n)$  โดยที่อันดับตัวกรองแบบปรับตัว  $N_1$  จะมีค่าขึ้นอยู่กับความยาวของวิถีสัญญาณ  $L$  ถ้า  $L$  มีค่าใหญ่ ความยาวของตัวกรองแบบปรับตัวซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับจำนวนสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการจำลองวิถีสัญญาณ  $h_{21}(n)$  จะต้องมีค่าสูงด้วย [32, 33] ทำให้ระบบมีความซับซ้อนในการคำนวณที่สูงขึ้น ในขณะที่อัตราการสุ่มเข้าของตัวกรองแบบปรับตัวมีค่าที่ต่ำลง ยิ่งไปกว่านั้น เนื่องจากเครื่องกรองฟันและทันตแพทย์อยู่ใกล้กันมาก สัญญาณอ้างอิงจะประกอบด้วยเสียงพูดจากทันตแพทย์ค่อนข้างมาก ส่งผลให้ระบบ ANC ที่ใช้ไมโครโฟนสองตัวไม่สามารถดำเนินการได้อย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยเหตุนี้ เราจึงจำเป็นต้องใช้ตัวกรองผ่านสูงเพื่อกำจัดองค์ประกอบความถี่สูงของเสียงรบกวนจากเครื่องกรองฟัน

ในทางกลับกัน เทคนิค TSDNR ที่นำเสนอตรวจสอบจับความถี่หลักของเสียงรบกวนจากเครื่องกรองฟันในขั้นตอนที่หนึ่ง ดังนั้น สัญญาณไขนุชอยด์ความถี่หลักถูกสร้าง และใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงของตัวกรองแบบปรับตัว  $w_1(n)$  ดังนั้นเราไม่จำเป็นต้องใช้ไมโครโฟนตัวที่สองอีกต่อไป ฟังก์ชันของตัวกรองปรับตัว  $w_1(n)$  จะทำการปรับทั้งขนาดและเฟสของสัญญาณไขนุชอยด์ที่ได้เพื่อตัดออกความถี่หลักของเสียงรบกวนจากเครื่องกรองฟันอย่างเหมาะสมที่สุด อันดับของตัวกรองแบบปรับตัว  $N_1$  ของเทคนิค TSDNR สามารถที่จะถูกเลือกให้ต่ำกว่าอันดับของตัวกรองแบบปรับตัวของระบบ ANC แบบทั่วไปที่ใช้ไมโครโฟนสองตัวได้ นอกจากนี้ ในขั้นตอนที่สองของเทคนิค TSDNR ตัวกรองผ่านสูงและวงจรถองแบบปรับตัว  $w_2(n)$  ควรจะถูกใช้เพื่อกำจัดองค์ประกอบความถี่สูงของเสียงรบกวนจากเครื่องกรองฟันที่เหลืออยู่ และอยู่สูงกว่าองค์ประกอบทางความถี่ของเสียงพูดส่วนใหญ่ ยิ่งไปกว่านั้น การใช้เทคนิค TSDNR ยังลดความจำเป็นของการใช้ไมโครโฟนตัวที่สองเพื่อสร้างสัญญาณอ้างอิงสำหรับระบบ ANC อีกด้วย ซึ่งเป็นการลดต้นทุนในการผลิต

นอกจากนี้ เทคนิค TSDNR ยังถูกปรับปรุง โดยการใช้ “มอดูลสกัดความถี่หลักและความถี่ฮาร์โมนิก” แทน “มอดูลสกัดความถี่หลัก” ดังนั้น ทั้งสัญญาณไขนุชอยด์ความถี่หลักและสัญญาณไขนุชอยด์ความถี่ฮาร์โมนิกถูกสร้าง และใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงของตัวกรองแบบปรับตัวของระบบ ANC แต่ละระบบ โดยจำนวนของตัวกรองแบบปรับตัวที่ใช้จะขึ้นอยู่กับจำนวนฮาร์โมนิกทั้งหมดที่ตรวจจับได้  $M$  ในช่วงขององค์ประกอบทางความถี่ของเสียงพูดส่วนใหญ่ ดังนั้น จำนวนของระบบ ANC ที่ใช้จะต้องถูกเพิ่มขึ้นมาเพื่อตัดออกความถี่ฮาร์โมนิกของเสียงรบกวนจากเครื่องกรองฟันที่ตรวจจับได้ อย่างไรก็ตาม เราพบว่าเสียงรบกวนจากเครื่องกรองฟันจากฐานข้อมูลที่น่ามาทดสอบมี

ความถี่หลักมูลและความถี่ฮาร์มอนิกรวมกันไม่เกิน 2 ฮาร์มอนิกในช่วงขององค์ประกอบทางความถี่ของเสียงพูดส่วนใหญ่เท่านั้น ดังนั้น ความซับซ้อนในการคำนวณของเทคนิค MTSDNR จะเพิ่มขึ้นมาจากเทคนิค TSDNR เพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่เราสามารถรักษาองค์ประกอบทางความถี่ของเสียงพูดไว้ได้เกือบทั้งหมด



## บทที่ 4 ผลการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์นี้ เราทำการตรวจสอบเทคนิค TSDNR และ MTSDNR ผ่านการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB ทั้งในแง่ของการทดสอบเชิงวัตถุวิสัย (objective test) และการทดสอบเชิงจิตวิสัย (subjective test) โดยจะแบ่งสัญญาณเสียงพูดที่ปนเปื้อนด้วยเสียงรบกวนจากเครื่องรบกวนที่จะใช้ทดสอบเป็นสองชุด ชุดละ 30 ไฟล์เสียง โดยอาศัยเสียงพูด 10 ไฟล์เสียงจาก IEEE Corpus database [25] และเสียงรบกวนจากเครื่องรบกวน 6 ไฟล์เสียงจาก [26-30] ที่มีอัตราการชักตัวอย่างเท่ากับ 32 กิโลเฮิรตซ์ ชุดแรกเป็นสัญญาณเสียงพูดที่ปนเปื้อนด้วยเสียงรบกวนจากเครื่องรบกวนอัตราเร็วสูงจาก [26-28] ในขณะที่ชุดที่สองเป็นสัญญาณเสียงพูดที่ปนเปื้อนด้วยเสียงรบกวนจากเครื่องรบกวนจาก [29, 30] โดยการทดสอบสัญญาณทั้งสองชุดจะถูกทำที่ระดับอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-Noise Ratio, SNR) เท่ากับ -10, -5, 0, 5, 10 เดซิเบล โดยเราเลือกอันดับของตัวกรองปรับตัวทุกตัวในทุกขั้นตอนสำหรับทั้งเทคนิค TSDNR และ MSDNR เป็น  $N_a = 127$  และอันดับของตัวกรองผ่านสูงที่ใช้เป็น  $N_h = 127$  เช่นเดียวกัน ซึ่งอันดับของตัวกรองแบบปรับตัวและตัวกรองผ่านสูงไม่จำเป็นต้องถูกเลือกให้เท่ากันก็ได้ นอกจากนี้ ความถี่ตัดของตัวกรองผ่านสูงถูกเลือกเป็น 8 กิโลเฮิรตซ์ ด้วยเหตุผลเพื่อป้องกันการก่อให้เกิดความเพี้ยนของเสียงพูดซึ่งเทคนิค TSDNR และ MSDNR ที่นำเสนอจะถูกเปรียบเทียบกับระบบ ANC แบบทั่วไปที่ใช้ไมโครโฟนสองตัว

ตัวบ่งชี้สมรรถนะที่ถูกพิจารณาในวิทยานิพนธ์นี้ได้แก่ สมรรถนะการลดทอนของเสียงรบกวน (noise attenuation performance) โดยจะถูกบ่งชี้ด้วยค่าการปรับปรุงเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่แบ่งเป็นตอน (Segmental Signal-to-Noise Ratio Improvement,  $\Delta SegSNR$ ) ซึ่งถูกนิยามว่าเป็นส่วนต่างระหว่าง  $SegSNR$  ขาออก และ  $SegSNR$  ขาเข้า หาได้ดังนี้

$$SegSNR_{O/P} (dB) = \frac{10}{I_a} \cdot \sum_{m=0}^{I_a-1} \log_{10} \left( \frac{\sum_{n=L \cdot m}^{L \cdot m + L - 1} s^2(n)}{\sum_{n=L \cdot m}^{L \cdot m + L - 1} (s(n) - \hat{s}(n))^2} \right) \quad (4.1)$$

และ

$$SegSNR_{I/P} (dB) = \frac{10}{I_a} \cdot \sum_{m=0}^{I_a-1} \log_{10} \left( \frac{\sum_{n=Lm}^{L \cdot m + L - 1} s^2(n)}{\sum_{n=L \cdot m}^{L \cdot m + L - 1} (b(n))^2} \right) \quad (4.2)$$

นอกจากนี้ ความเพี้ยนของเสียงพูดจะถูกตรวจสอบโดยใช้ค่าเฉลี่ยของลอการิทึมของระยะทางเชิงสเปกตรัม (Log-Spectral Distance, LSD) [34] ระหว่างสัญญาณเสียงพูดที่ลดเสียงรบกวนแล้วและสัญญาณเสียงพูดต้นฉบับ หาได้ดังนี้

$$\text{LSD (dB)} = \frac{1}{I_a} \cdot \sum_{m=1}^M \sqrt{\frac{1}{\frac{K}{2} + 1} \sum_{k=0}^{K/2} \left( 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{|S(k, m)|}{|\hat{S}(k, m)|} \right) \right)^2} \quad (4.3)$$

โดยที่พารามิเตอร์  $I_a$  แทนจำนวนของเฟรมที่มีเสียงพูดในโดเมนเวลา และ  $K$  แทนจำนวนของช่องความถี่

นอกจากนี้ เราจะทำการทดสอบผลการฟังด้วยการให้ผู้ทดสอบจำนวนอย่างน้อย 15 คน ทำการฟังเสียงแต่ละเสียงโดยไม่ทราบประเภทของเสียง และให้คะแนนความพึงพอใจโดยมีหลักการให้คะแนนตามตารางที่ 4-1 [35]

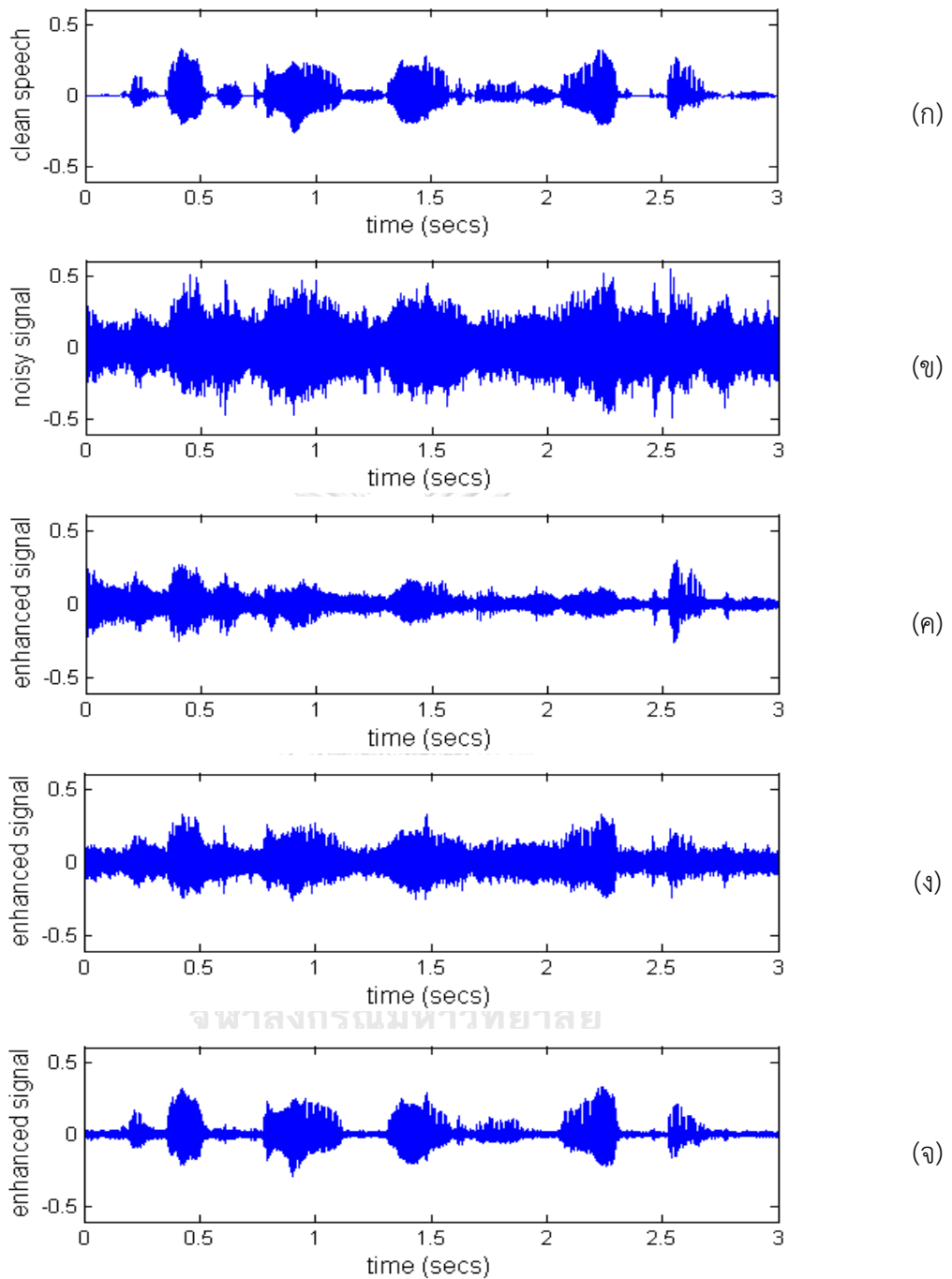
ตารางที่ 4-1 เกณฑ์การให้คะแนนสำหรับการทดสอบฟัง (MOS test)

คะแนน	คุณภาพของสัญญาณเสียงพูด	การลดทอนเสียงรบกวนจากเครื่องรอฟัน
5	ยอดเยี่ยม	ไม่สามารถรับรู้ได้
4	ดี	รับรู้ได้ แต่ไม่รำคาญ
3	ปานกลาง	รับรู้ได้ และรำคาญเล็กน้อย
2	แย่มาก	รำคาญ แต่พอนได้
1	แย่มาก	รำคาญมาก และทนไม่ได้

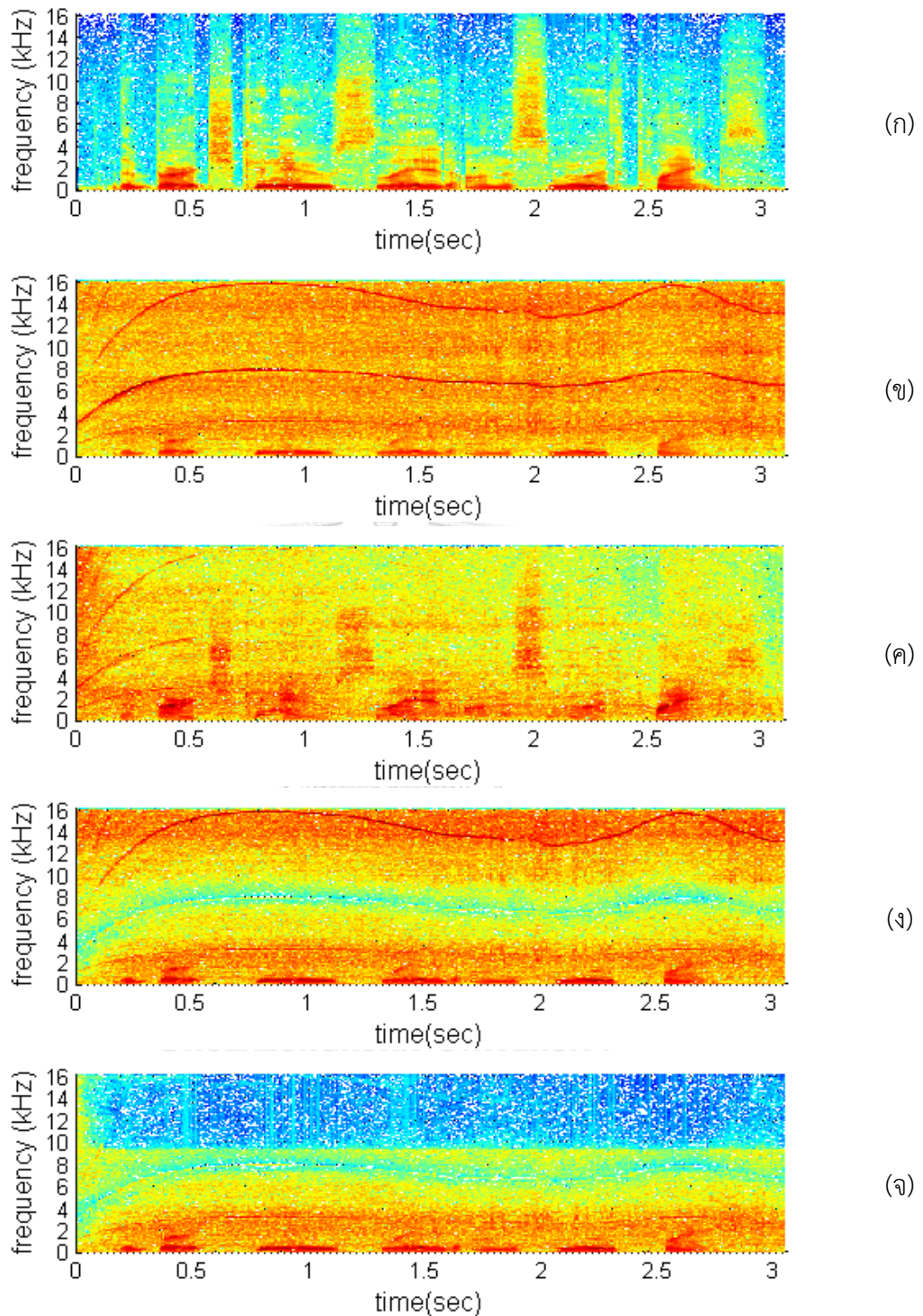
#### 4.1 การทดสอบชุดที่ 1

สำหรับการพิจารณาสัญญาณเสียงพูดที่ปนเปื้อนด้วยเสียงรบกวนจากเครื่องกรอพื้นอัตราเร็วสูงจาก [26-28] โดยที่องค์ประกอบทางความถี่ของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอพื้นดังกล่าวที่ซ้อนทับอยู่ในช่วงขององค์ประกอบทางความถี่ของเสียงพูดส่วนใหญ่ (3 ถึง 8 กิโลเฮิร์ตซ์) มีพลังงานส่วนใหญ่ปรากฏ ณ ตำแหน่งของความถี่หลักมูล (6 ถึง 8 กิโลเฮิร์ตซ์) เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 3-2 (ก) และ (ข)

จากการพิจารณาสัญญาณเสียงพูดที่ปนเปื้อนด้วยเสียงรบกวนจากเครื่องกรอพื้นอัตราเร็วสูงที่ค่า SNR ขาเข้าเป็น -10 เดซิเบล รูปที่ 4-1 (ก) และ 4-1 (ข) แสดงสัญญาณเสียงพูด และสัญญาณเสียงพูดที่ปนเปื้อนด้วยเสียงรบกวนจากเครื่องกรอพื้นตามลำดับ เราสามารถตรวจสอบได้จากรูปที่ 4-1 (ง) และ 4-1 (จ) ว่าเสียงรบกวนจากเครื่องกรอพื้นถูกลดลงอย่างมีนัยสำคัญโดยใช้ขั้นตอนแรกและทั้งสองขั้นตอนของเทคนิค TSDNR ตามลำดับ โดยเปรียบเทียบกับสัญญาณเสียงพูดที่ได้จากการลดเสียงรบกวนจากเครื่องกรอพื้นโดยอาศัยระบบ ANC แบบทั่วไปที่ใช้ไมโครโฟนสองตัวในรูปที่ 4-1 (ค) นอกจากนี้ การเปรียบเทียบดังกล่าวยังถูกแสดงผ่าน สเปกโตรแกรมพล็อตเพื่อแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าความถี่หลักมูล และองค์ประกอบทางความถี่สูงอื่นๆของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอพื้นลดลงอย่างมากด้วยการใช้เทคนิค TSDNR ขั้นตอนแรก และทั้งสองขั้นตอน ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4-2 (ง) และ (จ) ในขณะที่ระบบ ANC แบบทั่วไปที่ใช้สองไมโครโฟนไม่สามารถตัดออกความถี่หลัก รวมทั้งองค์ประกอบความถี่สูงอื่นๆของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอพื้นได้ดีเท่าที่ควร อีกทั้งยังก่อให้เกิดความเพี้ยนของเสียงพูดในสัญญาณขาออกด้วย นอกจากนี้ เรายังเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของสเปกตรัมขนาดของ 50 เฟรมติดกันของสัญญาณเสียงพูดต้นฉบับ สัญญาณเสียงพูดที่ปนเปื้อนด้วยเสียงรบกวนจากเครื่องกรอพื้น และสัญญาณเสียงพูดขาออกที่ลดเสียงรบกวนจากเครื่องกรอพื้นในรูปที่ 4-3 เพื่อแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะการลดทอนของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอพื้นของเทคนิค TSDNR ที่นำเสนอ เราสามารถเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ความถี่หลักมูลและความถี่ใกล้เคียง รวมทั้งองค์ประกอบความถี่สูงของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอพื้นลดลงอย่างเป็นที่น่าพอใจด้วยการใช้เทคนิค TSDNR ขั้นตอนแรกและขั้นตอนที่สอง

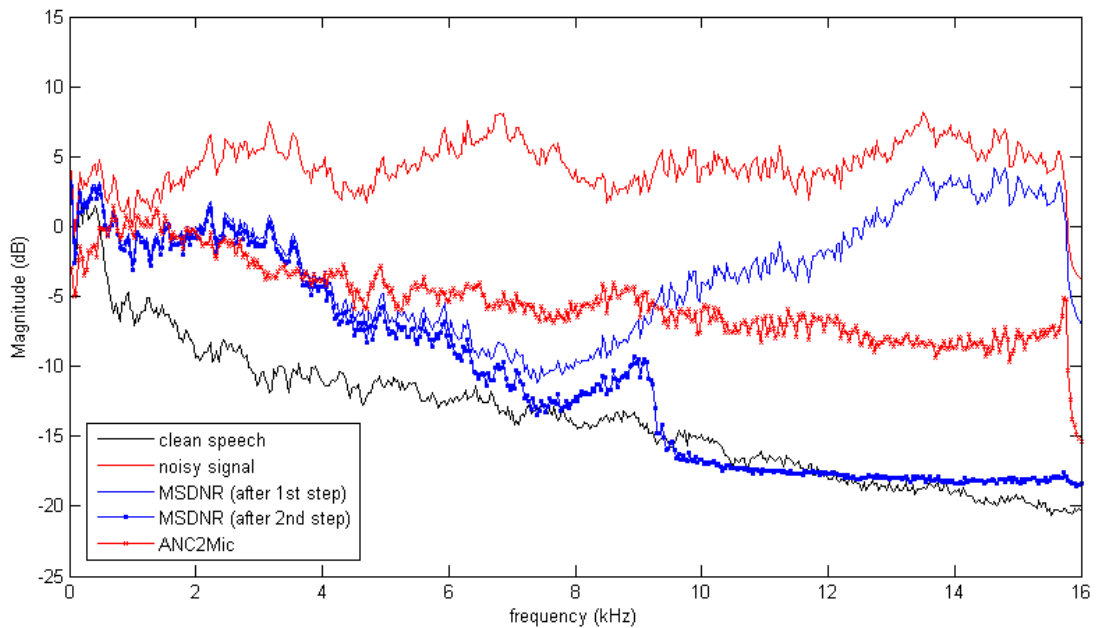


**รูปที่ 4-1** การพิจารณารูปคลื่น (waveform plot) ของ (ก) สัญญาณเสียงพูดต้นฉบับ (ข) สัญญาณเสียงพูดที่ปนเปื้อนด้วยเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันจาก [27] (SNR ขาเข้าเท่ากับ -10 เดซิเบล) (ค) สัญญาณเสียงพูดที่ได้จากการลดเสียงรบกวนโดยใช้ระบบ ANC แบบทั่วไปที่ใช้ไมโครโฟนสองตัว (ง) สัญญาณเสียงพูดที่ได้จากการลดเสียงรบกวนโดยใช้เทคนิค TSDNR ขั้นตอนแรก และ (จ) สัญญาณเสียงพูดที่ได้จากการลดเสียงรบกวนโดยใช้เทคนิค TSDNR ทั้งสองขั้นตอน



รูปที่ 4-2 สเปกโตรแกรมพล็อตของ (ก) สัญญาณเสียงพูดต้นฉบับ (ข) สัญญาณเสียงพูดที่ปนเปื้อนด้วยเสียงรบกวนจากเครื่องกรรพินจาก [27] (SNR ขาเข้าเท่ากับ -10 เดซิเบล) (ค) สัญญาณเสียงพูดที่ได้จากการลดเสียงรบกวนโดยใช้ระบบ ANC แบบทั่วไปที่ใช้ไมโครโฟนสองตัว (ง) สัญญาณเสียงพูดที่ได้จากการลดเสียงรบกวนโดยใช้เทคนิค TSDNR ขั้นตอนแรก และ (จ) สัญญาณเสียงพูดที่ได้จากการลดเสียงรบกวนโดยใช้เทคนิค TSDNR ทั้งสองขั้นตอน





**รูปที่ 4-3** การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของสเปกตรัมขนาดของ 50 เฟรมติดกันของสัญญาณเสียงพูด ต้นฉบับ สัญญาณเสียงพูดที่ปนเปื้อนสัญญาณเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันจาก [27] และ สัญญาณเสียงพูดที่ได้จากการลดเสียงรบกวนโดยใช้เทคนิคต่างๆที่พิจารณา

โดยการตรวจสอบค่าการปรับปรุง Segmental SNR โดยเฉลี่ยของเทคนิค TSDNR กับ สัญญาณเสียงพูดที่ปนเปื้อนด้วยเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันที่ค่า SNR ต่างๆดังตารางที่ 4-2 ซึ่งเห็น ได้ชัดว่าค่าการปรับปรุง SegSNR มีค่าสูงขึ้นเป็นผลมากจากการกำจัดความถี่หลักมูลและความถี่ ข้างเคียงจากการใช้เทคนิค TSDNR ขั้นตอนแรก และนอกจากนั้นเทคนิค TSDNR ในขั้นตอนที่สองยัง สามารถปรับปรุง SegSNR เพิ่มเติมด้วยการกำจัดองค์ประกอบความถี่สูงอื่นๆของเสียงรบกวนจาก เครื่องกรอฟันด้วย นอกจากนี้ ในแง่ของการปรับปรุง LSD ซึ่งถูกแสดงในตารางที่ 4-3 เราพบว่า เทคนิค TSDNR ก่อให้เกิดความเพี้ยนของเสียงพูดเล็กน้อยซึ่งต่ำกว่าการใช้ระบบ ANC แบบทั่วไปที่ใช้ ไมโครโฟนสองตัวอย่างมาก

ยิ่งไปกว่านั้น เพื่อยืนยันประสิทธิภาพของเทคนิค TSDNR ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ เสียงพูดขาออกที่ถูกลดเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันถูกนำมาทำการทดสอบฟัง (listening test) ด้วยผู้ทดสอบ 15 คน โดยใช้สัญญาณเสียงพูดที่ปนเปื้อนด้วยเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันอัตราเร็ว สูงจาก [27] ที่ระดับ SNR ขาเข้าเท่ากับ -10 เดซิเบล ผลที่ได้คือ ผู้ฟังสามารถบอกได้ว่าเสียงรบกวน จากเครื่องกรอฟันเบาลงอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณเสียงพูดที่ปนเปื้อนด้วยเสียงรบกวน จากเครื่องกรอฟันก่อนการลดเสียงรบกวน ในขณะที่ยังคงสามารถเข้าใจเสียงพูดได้ชัดเจน โดย

สามารถตรวจสอบได้จากค่า MOS ที่มีคะแนนสูงกว่าเสียงพูดที่ปนเปื้อนด้วยเสียงรบกวน ในตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-2 การปรับปรุงค่า SegSNR ของสัญญาณเสียงพูดที่ปนเปื้อนด้วยเสียงรบกวนจากเครื่องรอฟันจาก [26-28] โดยใช้เทคนิค NR ต่างๆที่พิจารณา

SegSNR ขาเข้า (dB)	$\Delta$ SegSNR (dB)		
	ระบบ ANC แบบทั่วไป ที่ใช้สองไมโครโฟน	เทคนิค TSDNR ที่นำเสนอ (หลังจากขั้นตอนแรก)	เทคนิค TSDNR ที่นำเสนอ (หลังจากทั้งสองขั้นตอน)
-10.00	9.26	8.66	13.36
-5.00	6.26	6.69	10.89
0.00	3.34	4.96	9.32
5.00	1.54	3.68	8.63
10.00	0.68	2.96	7.39

ตารางที่ 4-3 ค่า LSD ของสัญญาณเสียงพูดที่ปนเปื้อนด้วยเสียงรบกวนจากเครื่องรอฟันจาก [26-28] โดยใช้เทคนิค NR ต่างๆที่พิจารณา

SegSNR ขาเข้า (dB)	LSD (dB)		
	ระบบ ANC แบบทั่วไป ที่ใช้สองไมโครโฟน	เทคนิค TSDNR ที่นำเสนอ (หลังจากขั้นตอนแรก)	เทคนิค TSDNR ที่นำเสนอ (หลังจากทั้งสองขั้นตอน)
-10.00	3.63	3.16	1.46
-5.00	3.41	2.97	1.45
0.00	3.10	2.76	1.39
5.00	2.90	2.60	1.36
10.00	2.51	2.36	1.28

ตารางที่ 4-4 ค่า MOS ของสัญญาณเสียงต่างๆ และเสียงขาออกของแต่ละเทคนิค NR ที่พิจารณาในการทดสอบชุดที่ 1

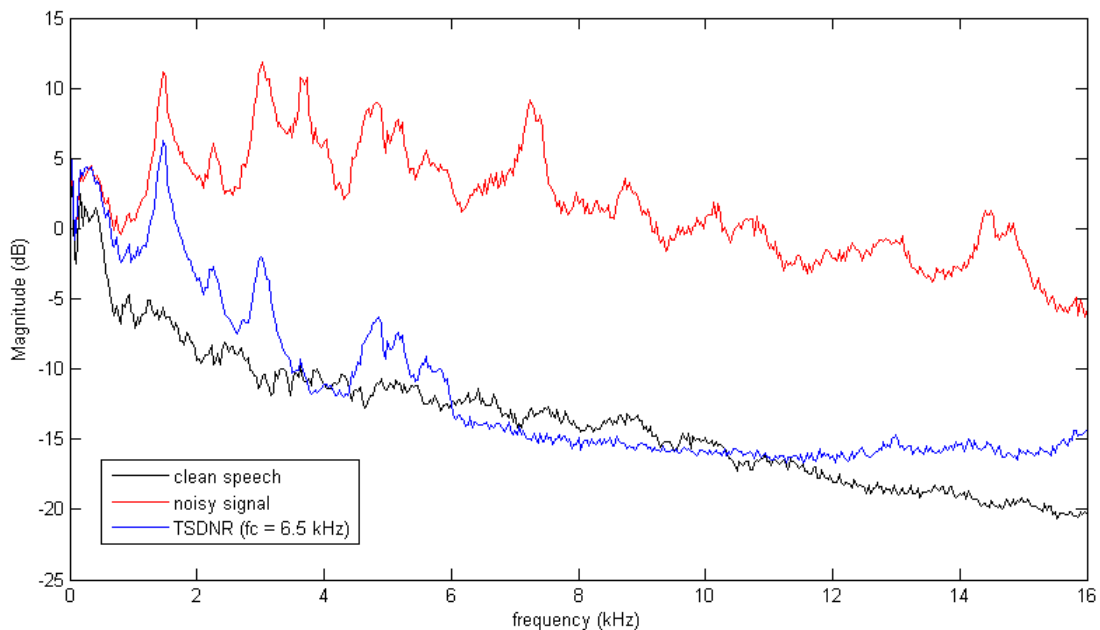
สัญญาณที่พิจารณา	ค่า MOS
สัญญาณเสียงพูดต้นฉบับ	5.0
สัญญาณเสียงพูดที่ปนเปื้อนด้วยเสียงรบกวนจากเครื่องรอฟัน จาก [26-28] (ค่า SNR ขาเข้าเท่ากับ -10 เดซิเบล)	2.1
ระบบ ANC แบบทั่วไปที่ใช้สองไมโครโฟน	2.8
เทคนิค TSDNR ที่นำเสนอ (หลังจากขั้นตอนแรก)	3.4
เทคนิค TSDNR ที่นำเสนอ (หลังจากทั้งสองขั้นตอน)	4.1



## 4.2 การทดสอบชุดที่ 2

การทดสอบชุดที่ 2 เราจะพิจารณาสัญญาณเสียงพูดที่ปนเปื้อนด้วยเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันทั่วไปจาก [29, 30] ซึ่งมีความถี่หลักมูลต่ำกว่าเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันที่ใช้ในการทดสอบชุดที่ 1 คืออยู่ในช่วง 3-4 กิโลเฮิร์ตซ์ และความถี่ฮาร์โมนิกที่สองอยู่ในช่วง 6-8 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยที่ทั้งความถี่หลักมูลและความถี่ฮาร์โมนิกดังกล่าวซ้อนทับอยู่ในช่วงขององค์ประกอบทางความถี่ของเสียงพูดส่วนใหญ่ซึ่งอยู่ในช่วง 0 ถึง 8 กิโลเฮิร์ตซ์ด้วย

รูปที่ 4-4 แสดงค่าเฉลี่ยของสเปกตรัมขนาดของ 50 เฟรมติดกันของสัญญาณเสียงพูดที่ได้จากการลดเสียงรบกวนโดยใช้เทคนิค TSNDNR โดยที่ขั้นตอนแรกจะตัดออกเพียงความถี่หลักมูลของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟัน เราสามารถสังเกตได้ว่า ความถี่หลักมูลของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันซึ่งอยู่ในช่วง 3-4 กิโลเฮิร์ตซ์ ถูกตัดออกไปโดยใช้ขั้นตอนแรกของเทคนิค TSNDNR ในขณะที่องค์ประกอบทางความถี่ของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันที่สูงกว่านี้ขึ้นไป กล่าวคือฮาร์โมนิกอื่นๆ จะถูกกำจัดในขั้นตอนที่สองโดยอาศัยตัวกรองผ่านสูงร่วมกับระบบ ANC อีกระบบหนึ่ง ทั้งนี้ เราสามารถตรวจสอบจากสเปกโตรแกรมพล็อตในรูปที่ 3-2 (ค) และ (ง) ได้ว่าเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันทั่วไปจาก [29, 30] มีความถี่ฮาร์โมนิกที่สองอยู่ในช่วง 6 ถึง 8 กิโลเฮิร์ตซ์ ดังนั้น เราจะเลือกความถี่ตัดของตัวกรองผ่านสูงที่ต่ำกว่า 6 กิโลเฮิร์ตซ์ เพื่อให้สามารถตัดออกองค์ประกอบความถี่สูงอื่นๆของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟัน รวมทั้งความถี่ฮาร์โมนิกที่สองออกไปด้วย ซึ่งผลลัพธ์จากการดำเนินการสามารถถูกตรวจสอบได้จากรูปที่ 4-4 ซึ่งไม่เพียงแต่องค์ประกอบของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันที่สูงกว่า 6 กิโลเฮิร์ตซ์ ถูกตัดออกไปเท่านั้น แต่องค์ประกอบบางส่วนของเสียงพูดถูกตัดออกไปด้วยเช่นกัน ด้วยเหตุนี้ เราจึงไม่สามารถเลือกความถี่ตัดของตัวกรองผ่านสูงที่ต่ำกว่า 8 กิโลเฮิร์ตซ์ ได้ในกรณีที่ต้องการเก็บรักษาองค์ประกอบทางความถี่ของเสียงพูดส่วนใหญ่ไว้ จึงเป็นสาเหตุที่เราพัฒนาเทคนิค MTSDNR โดยปรับปรุงจากเทคนิค TSNDNR ให้ตัดออกเพียงความถี่หลักมูล และความถี่ฮาร์โมนิกของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันเท่านั้นในขั้นตอนแรก ส่วนองค์ประกอบความถี่สูงอื่นๆของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันที่อยู่สูงกว่า 8 กิโลเฮิร์ตซ์ ขึ้นไป จะถูกตัดออกโดยอาศัยตัวกรองผ่านสูงที่มีความถี่ตัดที่เหมาะสมร่วมกับระบบ ANC อีกระบบหนึ่งในขั้นตอนที่สอง ในการทดสอบชุดที่ 2 นี้ เราจะแสดงให้เห็นว่าเทคนิค MTSDNR นี้สามารถตัดออกทั้งความถี่หลักมูลและความถี่ฮาร์โมนิกของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันที่อยู่ในช่วงขององค์ประกอบทางความถี่ของเสียงพูดส่วนใหญ่ และกำจัดองค์ประกอบความถี่สูงอื่นๆของเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันที่อยู่ นอกเหนือองค์ประกอบทางความถี่ของเสียงพูดส่วนใหญ่ด้วย ในขณะที่สามารถเก็บรักษาองค์ประกอบทางความถี่ของเสียงพูดไว้ได้



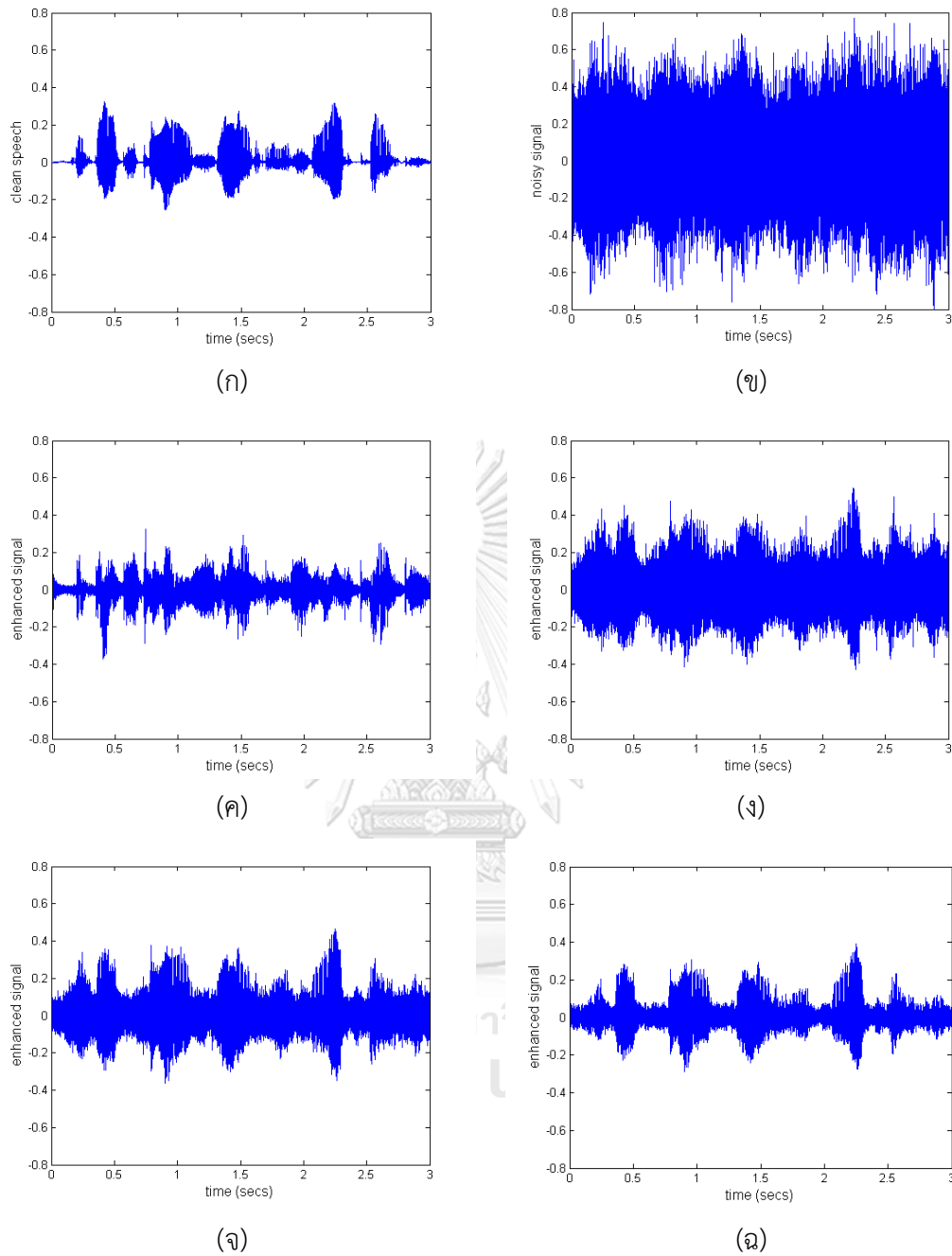
**รูปที่ 4-4** ค่าเฉลี่ยของสเปกตรัมขนาดของ 50 เฟรมติดกันของสัญญาณเสียงพูดที่ได้จากการลดเสียงรบกวนจากเครื่องกรองฟันจาก [29] โดยใช้เทคนิค TSDNR เมื่อเลือกความถี่ตัดของตัวกรองผ่านสูงเป็น 6 กิโลเฮิร์ตซ์

โดยการพิจารณาสัญญาณเสียงพูดที่ปนเปื้อนด้วยเสียงรบกวนจากเครื่องกรองฟันทั่วไปจาก [29] ที่ค่า SNR ขาเข้าเท่ากับ -10 เดซิเบล รูปที่ 4-5 (ก) และ 4-5 (ข) แสดงสัญญาณเสียงพูด และสัญญาณเสียงพูดต้นฉบับที่ปนเปื้อนด้วยเสียงรบกวนจากเครื่องกรองฟันดังกล่าว ตามลำดับ เราสามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนจากรูปที่ 4-5 (จ) และ (ฉ) ว่าเสียงรบกวนจากเครื่องกรองฟันลดลงอย่างมีนัยสำคัญโดยใช้เทคนิค MTSDNR ในขั้นตอนแรกและทั้งสองขั้นตอน โดยเปรียบเทียบกับสัญญาณเสียงพูดที่ได้จากการลดเสียงรบกวนจากเครื่องกรองฟันด้วยระบบ ANC แบบทั่วไปที่ใช้ไมโครโฟนสองตัวซึ่งถูกแสดงในรูป 4-5 (ค) นอกจากนี้ เรายังสามารถเปรียบเทียบกับผลลัพธ์จากการตัดเพียงความถี่หลักมูลของเสียงรบกวนจากเครื่องกรองฟันโดยใช้ขั้นตอนแรกของเทคนิค TSDNR ซึ่งถูกแสดงดังรูปที่ 4-5 (ง) ยิ่งไปกว่านั้น เรายังเห็นได้ชัดว่าการใช้ระบบ ANC ที่ใช้ไมโครโฟนสองตัวดังกล่าวยังก่อให้เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณเสียงพูดมากกว่าการใช้เทคนิค MTSDNR ที่นำเสนอด้วย โดยเราสามารถตรวจสอบผ่านสเปกโตรแกรมพล็อตในรูปที่ 4-6 ได้อย่างชัดเจน ในรูปที่ 4-6 (ง)-(ฉ) แสดงสเปกโตรแกรมพล็อตของสัญญาณเสียงพูดที่ถูกลดเสียงรบกวนโดยใช้เทคนิค MTSDNR ซึ่งจะเห็นได้ว่าความถี่หลักมูลและความถี่ฮาร์โมนิกของเสียงรบกวนจากเครื่องกรองฟันที่อยู่ในช่วง 3-8 กิโลเฮิร์ตซ์ ถูกตัดออกโดยใช้ขั้นตอนแรกของเทคนิค MTSDNR ดังแสดงในรูปที่ 4-6 (จ) ขณะที่องค์ประกอบความถี่สูงอื่นๆที่อยู่สูงกว่าองค์ประกอบทางความถี่ของเสียงพูดส่วนใหญ่ กล่าวคือสูงกว่า 8 กิโลเฮิร์ตซ์ขึ้นไป ถูก

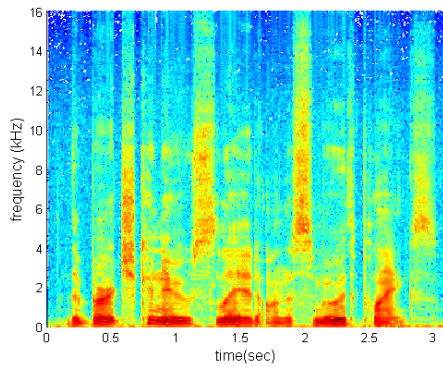
ตัดออกในขั้นตอนที่สองของเทคนิค MTSDNR ดังแสดงในรูปที่ 4-6 (ฉ) ในขณะที่ระบบ ANC ยังไม่สามารถลดผลกระทบของเสียงรบกวนจากเครื่องรอกออกไปได้ตอนช่วงลู่เข้า (transient period) ของระบบ จึงทำให้ยังคงหลงเหลือองค์ประกอบทางความถี่ของเสียงรบกวนจากเครื่องรอกพื้นเกือบทุกช่วงความถี่ในช่วงเริ่มต้นจนถึงวินาทีที่ 1.5 โดยประมาณดังแสดงในรูปที่ 4-6 (ค)

นอกจากนี้ เรายังแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าองค์ประกอบทางความถี่ของเสียงรบกวนจากเครื่องรอกพื้นลดลงอย่างมากด้วยการใช้เทคนิค MTSDNR ขั้นตอนแรก และทั้งสองขั้นตอนผ่านการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของสเปกตรัมขนาดของ 50 เฟรมติดกันของสัญญาณเสียงพูดต้นฉบับ สัญญาณเสียงพูดที่ปนเปื้อนด้วยเสียงรบกวนจากเครื่องรอกพื้น และสัญญาณเสียงพูดที่ได้จากการลดเสียงรบกวนจากเครื่องรอกพื้นในรูปที่ 4-7 เพื่อแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะการลดทอนของเสียงรบกวนของเทคนิค MTSDNR ซึ่งสามารถจัดการกับองค์ประกอบทางความถี่ของเสียงรบกวนจากเครื่องรอกพื้นได้อย่างดีเยี่ยม โดยเมื่อเปรียบเทียบกับกับค่าเฉลี่ยของสเปกตรัมขนาดเฉลี่ยของสัญญาณขาออกของระบบ ANC ที่ใช้ไมโครโฟนสองตัว

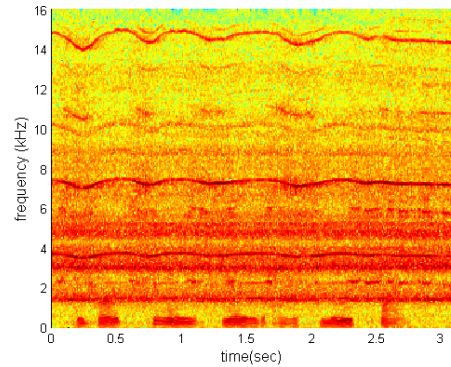




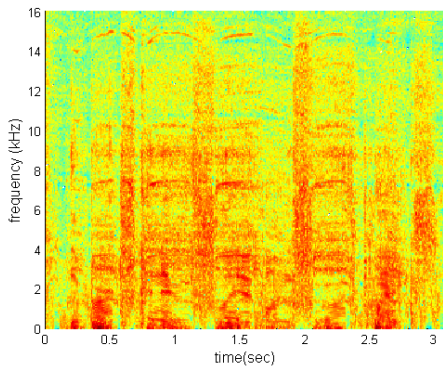
**รูปที่ 4-5** การพิจารณารูปคลื่นของ (ก) สัญญาณเสียงพูดต้นฉบับ (ข) สัญญาณเสียงพูดที่ปนเปื้อนด้วยเสียงรบกวนจากเครื่องกรรพ่นจาก [29] (SNR ขาเข้าเท่ากับ -10 เดซิเบล) (ค) สัญญาณเสียงพูดที่ได้จากการลดเสียงรบกวนโดยใช้ระบบ ANC แบบทั่วไปที่ใช้ไมโครโฟนสองตัว (ง) สัญญาณเสียงพูดที่ได้จากการลดเสียงรบกวนโดยใช้เทคนิค TSDNR ขั้นตอนแรก (จ) สัญญาณเสียงพูดที่ได้จากการลดเสียงรบกวนโดยใช้เทคนิค MTSDNR ขั้นตอนแรก และ (ฉ) สัญญาณเสียงพูดที่ได้จากการลดเสียงรบกวนโดยใช้เทคนิค MTSDNR ทั้งสองขั้นตอน



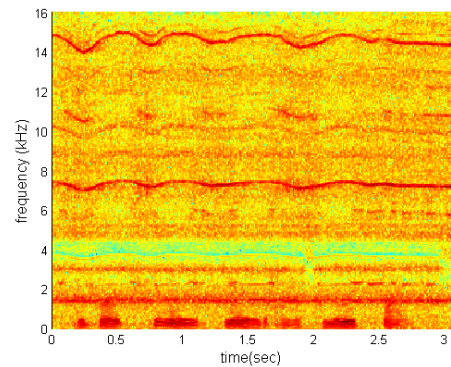
(ก)



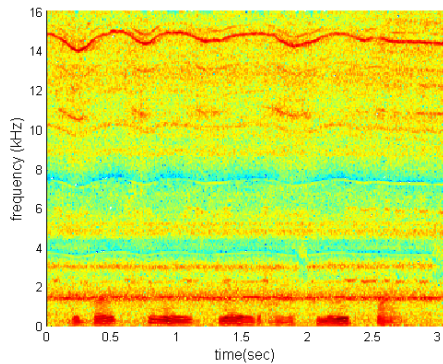
(ข)



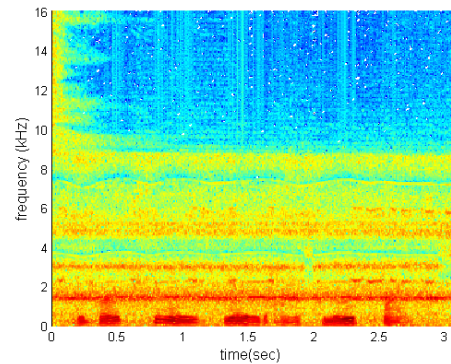
(ค)



(ง)



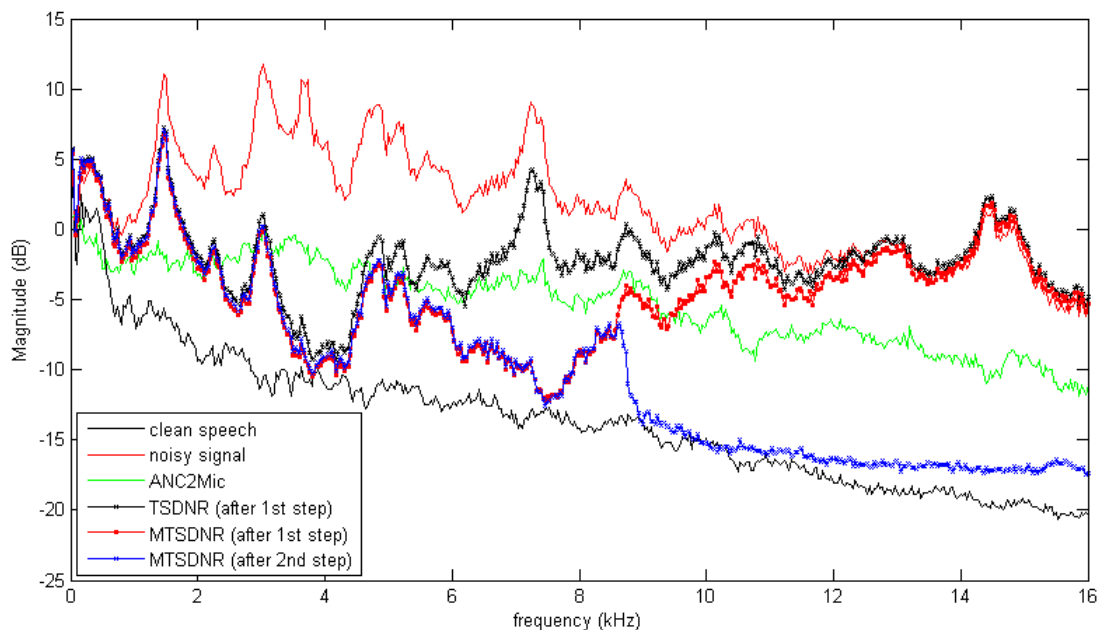
(จ)



(ฉ)

รูปที่ 4-6 สเปกโตรแกรมพล็อตของ (ก) สัญญาณเสียงพูดต้นฉบับ (ข) สัญญาณเสียงพูดที่ปนเปื้อนด้วยเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันจาก [29] (SNR ขาเข้าเท่ากับ -10 เดซิเบล) (ค) สัญญาณเสียงพูดที่ได้จากการลดเสียงรบกวนโดยใช้ระบบ ANC แบบทั่วไปที่ใช้ไมโครโฟนสองตัว (ง) สัญญาณเสียงพูดที่ได้จากการลดเสียงรบกวนโดยใช้เทคนิค TSDNR ขั้นตอนแรก (จ) สัญญาณเสียงพูดที่ได้จากการลดเสียงรบกวนโดยใช้เทคนิค MTSDNR ขั้นตอนแรก และ (ฉ) สัญญาณเสียงพูดที่ได้จากการลดเสียงรบกวนโดยใช้เทคนิค MTSDNR ทั้งสองขั้นตอน





**รูปที่ 4-7** การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของสเปกตรัมขนาดของ 50 เฟรมติดกัน ของสัญญาณเสียงพูด ต้นฉบับ สัญญาณเสียงพูดที่ปนเปื้อนสัญญาณเสียงรบกวนจากเครื่องรอฟันจาก [29] และ สัญญาณเสียงพูดที่ได้จากการลดเสียงรบกวนโดยใช้เทคนิคต่างๆที่พิจารณา

สุดท้าย เราเปรียบเทียบค่าการปรับปรุง Segmental SNR โดยทำการหาค่าเฉลี่ยของสัญญาณขาออกของเทคนิค MTSDNR กับสัญญาณเสียงพูดที่ปนเปื้อนด้วยเสียงรบกวนจากเครื่องรอฟันที่ค่า SNR ต่างๆดังแสดงในตารางที่ 4.5 จะเห็นได้ชัดว่า ค่าการปรับปรุง SegSNR ของการกำจัดเสียงความถี่หลักมูลและความถี่ฮาร์โมนิกที่สองของเสียงรบกวนจากเครื่องรอฟันโดยใช้ขั้นตอนแรก ของเทคนิค MTSDNR มีค่าสูงกว่าค่าการปรับปรุง SegSNR ของการกำจัดเพียงความถี่หลักมูลเพียงอย่างเดียวในขั้นตอนแรกของเทคนิค TSDNR และมีค่าสูงกว่าการใช้ระบบ ANC แบบทั่วไปที่ใช้สองไมโครโฟนด้วย ยิ่งไปกว่านั้น ขั้นตอนที่สองของเทคนิค MTSDNR ยังสามารถปรับปรุง SegSNR ได้เพิ่มขึ้นอีกจากการกำจัดองค์ประกอบความถี่สูงอื่นๆของเสียงรบกวนจากเครื่องรอฟัน ในแง่ของค่า LSD ซึ่งถูกแสดงในตารางที่ 4.6 การใช้เทคนิค MTSDNR ทั้งสองขั้นตอนเพื่อลดเสียงรบกวนจากเครื่องรอฟันก่อให้เกิดความเพี้ยนของเสียงพูดที่ต่ำกว่าการใช้ระบบ ANC แบบทั่วไปที่ใช้ไมโครโฟนสองตัวอย่างมาก

ตารางที่ 4-5 การปรับปรุงค่า SegSNR ของสัญญาณเสียงพูดที่ปนเปื้อนด้วยเสียงรบกวนจากเครื่องกรรพินจาก [29, 30] โดยใช้เทคนิค NR ต่างๆที่พิจารณา

SegSNR ขาเข้า (dB)	$\Delta segSNR$ (dB)			
	ระบบ ANC แบบทั่วไปที่ใช้ สองไมโครโฟน	เทคนิค TSDNR (หลังจากขั้นตอน แรก)	เทคนิค MTSDNR (หลังจากขั้นตอน แรก)	เทคนิค MTSDNR (หลังจากทั้งสอง ขั้นตอน)
-10.00	8.76	6.92	9.74	12.51
-5.00	5.99	4.45	8.01	10.24
0.00	2.84	2.80	6.21	7.99
5.00	0.85	1.90	4.30	6.01
10.00	0.33	1.27	2.97	4.54

ตารางที่ 4-6 ค่า LSD ของสัญญาณเสียงพูดที่ปนเปื้อนด้วยเสียงรบกวนจากเครื่องกรรพินจาก [29, 30] โดยใช้เทคนิค NR ต่างๆที่พิจารณา

SegSNR ขาเข้า (dB)	LSD (dB)			
	ระบบ ANC แบบทั่วไปที่ใช้ สองไมโครโฟน	เทคนิค TSDNR (หลังจากขั้นตอน แรก)	เทคนิค MTSDNR (หลังจากขั้นตอน แรก)	เทคนิค MTSDNR (หลังจากทั้งสอง ขั้นตอน)
-10.00	3.15	3.75	3.31	1.82
-5.00	3.12	3.54	3.07	1.70
0.00	3.10	3.29	2.80	1.56
5.00	3.05	2.99	2.58	1.48
10.00	2.65	2.62	2.36	1.44

นอกจากนี้ เพื่อยืนยันประสิทธิภาพของทั้งสองเทคนิคที่ออกแบบ เสียงพูดที่ถูกลดเสียงรบกวนจากเครื่องกรองฟันซึ่งเป็นผลลัพธ์จากการใช้เทคนิค MTSDNR ถูกใช้สำหรับการทดสอบฟัง (listening test) จากผู้ทดสอบ 15 คน โดยใช้สัญญาณเสียงพูดที่ปนเปื้อนด้วยเสียงรบกวนจากเครื่องกรองฟันทั่วไปจาก [29] ที่ระดับ SNR เท่ากับ -10 เดซิเบล ผลปรากฏว่า SPL ของเสียงรบกวนจากเครื่องกรองฟันหลังจากการใช้เทคนิค MTSDNR ที่นำเสนอลดลงเป็นที่น่าพึงพอใจของผู้ฟัง ในขณะที่ยังคงสามารถเข้าใจเสียงพูดได้ชัดเจน ดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4-7 ค่า MOS ของสัญญาณเสียงต่างๆ และเสียงขาออกของแต่ละเทคนิค NR ที่พิจารณาในการทดสอบชุดที่ 2

สัญญาณที่พิจารณา	ค่า MOS
สัญญาณเสียงพูดต้นฉบับ	5.0
สัญญาณเสียงพูดที่ปนเปื้อนด้วยเสียงรบกวนจากเครื่องกรองฟันจาก [29, 30] (ค่า SNR ขาเข้าเท่ากับ -10 เดซิเบล)	1.2
ระบบ ANC แบบทั่วไปที่ใช้ไมโครโฟนสองตัว	2.3
เทคนิค TSDNR ที่นำเสนอ (หลังจากขั้นตอนแรก)	2.5
เทคนิค MTSDNR ที่นำเสนอ (หลังจากขั้นตอนแรก)	3.3
เทคนิค MTSDNR ที่นำเสนอ (หลังจากทั้งสองขั้นตอน)	4.0

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอเทคนิค TSDNR สำหรับการลดเสียงรบกวนจากเครื่องรอฟัน โดยอาศัยระบบ ANC ที่ใช้ไมโครโฟนตัวเดียว 2 ระบบทำงานพร้อมๆกัน ในขั้นตอนแรก เทคนิค TSDNR ใช้ “มอดูลสกัดความถี่หลักมูล” ร่วมกับระบบ ANC เพื่อตัดออกความถี่หลักมูลของเสียงรบกวนจากเครื่องรอฟันอัตราเร็วสูงซึ่งอยู่ในช่วงขององค์ประกอบทางความถี่ของเสียงพูดส่วนใหญ่ หลังจากนั้นตัวกรองผ่านสูงที่มีความถี่ตัดที่เหมาะสมจะถูกใช้ร่วมกับระบบ ANC อีกระบบหนึ่งในขั้นตอนที่สองเพื่อกำจัดองค์ประกอบความถี่สูงที่เหลืออยู่ของเสียงรบกวนจากเครื่องรอฟัน นอกจากนี้ เรายังนำเสนอเทคนิค MTSDNR ซึ่งเป็นเวอร์ชันปรับปรุงของเทคนิค TSDNR ด้วยการดัดแปลง “มอดูลสกัดความถี่หลักมูล” เป็น “มอดูลสกัดความถี่หลักมูลและความถี่ฮาร์โมนิก” และใช้งานร่วมกับระบบ ANC ที่ใช้ไมโครโฟนตัวเดียวหลายระบบพร้อมๆกัน เพื่อตัดออกความถี่หลักมูลและความถี่ฮาร์โมนิกของเสียงรบกวนจากเครื่องรอฟันที่อยู่ในช่วงขององค์ประกอบทางความถี่ของเสียงพูดส่วนใหญ่ โดยเก็บรักษาองค์ประกอบที่สำคัญเสียงพูดไว้ ผลลัพธ์จากการทดสอบบ่งชี้ให้เห็นว่า การใช้ขั้นตอนแรกของเทคนิค MTSDNR ที่นำเสนอสามารถลดเสียงรบกวนจากเครื่องรอฟันได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อเทียบกับค่าการปรับปรุง SNR ของสัญญาณขาออกจากการใช้เทคนิค TSDNR และระบบ ANC แบบทั่วไปที่ใช้ไมโครโฟนสองตัว นอกจากนี้ ขั้นตอนที่สองของเทคนิค MTSDNR ยังสามารถปรับปรุง SNR ของสัญญาณขาออกเพิ่มเติมอีกด้วย ยิ่งไปกว่านั้น เทคนิค MTSDNR ยังก่อให้เกิดความเพี้ยนของเสียงพูดที่ต่ำกว่าการใช้ระบบ ANC แบบทั่วไปที่ใช้ไมโครโฟนสองตัวด้วย ทั้งนี้ ผลลัพธ์จากการทดสอบฟังยังถูกยืนยันจากผู้ฟัง 15 คนว่า เทคนิค MTSDNR ที่นำเสนอสามารถลดเสียงรบกวนจากเครื่องรอฟันลงได้อย่างเป็นที่น่าพึงพอใจ ในขณะที่ยังคงรักษาคุณภาพของเสียงพูดไว้ได้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

เราได้พัฒนาเทคนิคการลดเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันสำหรับหูฟังสวมศีรษะตัดออกเสียงรบกวนด้วยการประยุกต์ใช้ระบบ ANC ที่ใช้ไมโครโฟนตัวเดียวหลายระบบ ร่วมกันกับการออกแบบมอดูลสกัดความถี่หลักมูลและความถี่ฮาร์มอนิก รวมถึงตัวกรองผ่านสูงซึ่งมีความถี่ตัดที่เหมาะสม ซึ่งจากการทดสอบเชิงวัตถุประสงค์และจิตวิสัย เราพบว่า เทคนิคดังกล่าวสามารถลดเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังสามารถรักษาคุณภาพของเสียงพูดไว้ได้ ประกอบกับ จากการสำรวจ เราพบว่าหูฟังสวมศีรษะตัดออกเสียงรบกวนที่มีอยู่ในปัจจุบัน ซึ่งใช้เทคนิคการควบคุมเสียงรบกวนแบบแอคทีฟ และเทคนิคการควบคุมเสียงแบบพาสซีฟร่วมกัน ไม่มีประสิทธิภาพมากพอสำหรับการลดเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันซึ่งเป็นเสียงความถี่สูง ดังนั้น เทคนิคการลดเสียงรบกวนที่นำเสนอนี้จึงอาจเป็นทางเลือกที่ดีกว่าสำหรับการดัดแปลง และประยุกต์ใช้กับทั้งสองข้างของหูฟังสวมศีรษะตัดออกเสียงรบกวนเพื่อให้สามารถตัดออกเสียงรบกวนเครื่องกรอฟัน ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการลดความเสี่ยงสำหรับอันตรายที่อาจเกิดขึ้นกับระบบการได้ยินของทันตแพทย์ อีกทั้งยังสามารถลดความกังวลต่อคนไข้ในขณะที่ทำการรักษาฟันด้วย

## รายการอ้างอิง

- [1] H. Wong and C. Mak, "Effect of the sound of dental equipment on dental anxiety," in *International Congress on Sound and Vibration, ICSV22*, 2015.
- [2] C. Wilson, T. Vaidyanathan, W. Cinotti, S. Cohen, and S. Wang, "Hearing-damage risk and communication interference in dental practice," *Journal of Dental Research*, vol. 69, no. 2, pp. 489-493, 1990.
- [3] A. Dutta, K. Mala, and S. R. Acharya, "Sound levels in conservative dentistry and endodontics clinic," *Journal of conservative dentistry: JCD*, vol. 16, no. 2, p. 121, 2013.
- [4] N. Bali, S. Acharya, and N. Anup, "An assessment of the effect of sound produced in a dental clinic on the hearing of dentists," *Oral Health and Preventive Dentistry*, vol. 5, no. 3, p. 187, 2007.
- [5] F. Gijbels, R. Jacobs, K. Princen, O. Nackaerts, and F. Debruyne, "Potential occupational health problems for dentists in Flanders, Belgium," *Clinical oral investigations*, vol. 10, no. 1, pp. 8-16, 2006.
- [6] E. Kaymak, M. Atherton, K. Rotter, and B. Millar, "Dental drill noise reduction using a combination of active noise control, passive noise control and adaptive filtering," 2007.
- [7] K. Rotter, M. Atherton, E. Kaymak, and B. Millar, "Noise reduction of dental drill noise," 2008.
- [8] W. S. Gan and S. M. Kuo, "An integrated audio and active noise control headset," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 48, no. 2, pp. 242-247, 2002.
- [9] S. M. Kuo, S. Mitra, and W.-S. Gan, "Active noise control system for headphone applications," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 14, no. 2, pp. 331-335, 2006.
- [10] S. Boll, "Suppression of acoustic noise in speech using spectral subtraction," *IEEE Transactions on acoustics, speech, and signal processing*, vol. 27, no. 2, pp. 113-120, 1979.

- [11] T. Esch and P. Vary, "Efficient musical noise suppression for speech enhancement system," in *Acoustics, Speech and Signal Processing, 2009. ICASSP 2009. IEEE International Conference on*, 2009, pp. 4409-4412: IEEE.
- [12] H. Gustafsson, S. E. Nordholm, and I. Claesson, "Spectral subtraction using reduced delay convolution and adaptive averaging," *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, vol. 9, no. 8, pp. 799-807, 2001.
- [13] S. Kamath and P. Loizou, "A multi-band spectral subtraction method for enhancing speech corrupted by colored noise," in *ICASSP, 2002*, vol. 4, pp. 44164-44164: Citeseer.
- [14] M. Berouti, R. Schwartz, and J. Makhoul, "Enhancement of speech corrupted by acoustic noise," in *Acoustics, Speech, and Signal Processing, IEEE International Conference on ICASSP'79.*, 1979, vol. 4, pp. 208-211: IEEE.
- [15] P. Lockwood and J. Boudy, "Experiments with a nonlinear spectral subtractor (NSS), hidden Markov models and the projection, for robust speech recognition in cars," *Speech communication*, vol. 11, no. 2-3, pp. 215-228, 1992.
- [16] Y. Ephraim and D. Malah, "Speech enhancement using a minimum-mean square error short-time spectral amplitude estimator," *IEEE Transactions on acoustics, speech, and signal processing*, vol. 32, no. 6, pp. 1109-1121, 1984.
- [17] P. Scalart, "Speech enhancement based on a priori signal to noise estimation," in *Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1996. ICASSP-96. Conference Proceedings., 1996 IEEE International Conference on*, 1996, vol. 2, pp. 629-632: IEEE.
- [18] H.-G. Hirsch and C. Ehrlicher, "Noise estimation techniques for robust speech recognition," in *Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1995. ICASSP-95., 1995 International Conference on*, 1995, vol. 1, pp. 153-156: IEEE.
- [19] R. Martin, "Spectral subtraction based on minimum statistics," *power*, vol. 6, p. 8, 1994.
- [20] R. Martin, "Speech enhancement using MMSE short time spectral estimation with gamma distributed speech priors," in *Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP), 2002 IEEE International Conference on*, 2002, vol. 1, pp. I-253-I-256: IEEE.

- [21] R. Martin, "Speech enhancement based on minimum mean-square error estimation and supergaussian priors," *IEEE transactions on speech and audio processing*, vol. 13, no. 5, pp. 845-856, 2005.
- [22] C. Ris and S. Dupont, "Assessing local noise level estimation methods: Application to noise robust ASR," *Speech Communication*, vol. 34, no. 1-2, pp. 141-158, 2001.
- [23] E. Kaymak, M. Atherton, K. Rotter, and B. Millar, "Real-time adaptive filtering of dental drill noise using a digital signal processor," 2006.
- [24] S. Haykin, *Adaptive Filter Theory*, 4th ed. Prentice-Hall, 2002.
- [25] E. Rothauser, "IEEE recommended practice for speech quality measurements," *IEEE Trans. on Audio and Electroacoustics*, vol. 17, pp. 225-246, 1969.
- [26] "Recorded dental-drill sound in "A dentist drill noise reduction technique"," N. Tangsangiumvisain, Ed., ed. chulalongkorn university, 2016.
- [27] "Dentist drill sound effect [HD]," nBeats, Ed., ed, 2014.
- [28] "Dentist drill sound effect," A. Grip, Ed., ed, 2015.
- [29] "Dental drill," S. o. Changes, Ed., ed, 2014.
- [30] "DentalDrill," Acclivity, Ed., ed, 2008.
- [31] K. K. Paliwal, J. G. Lyons, and K. K. Wójcicki, "Preference for 20-40 ms window duration in speech analysis," in *Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS), 2010 4th International Conference on*, 2010, pp. 1-4: IEEE.
- [32] C. Breining *et al.*, "Acoustic echo control. An application of very-high-order adaptive filters," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 16, no. 4, pp. 42-69, 1999.
- [33] A. Kar and M. Swamy, "Tap-length optimization of adaptive filters used in stereophonic acoustic echo cancellation," *Signal Processing*, vol. 131, pp. 422-433, 2017.
- [34] I. Cohen, "Speech enhancement using super-Gaussian speech models and noncausal a priori SNR estimation," *Speech communication*, vol. 47, no. 3, pp. 336-350, 2005.
- [35] Y. Hu and P. C. Loizou, "Evaluation of objective quality measures for speech enhancement," *IEEE Transactions on audio, speech, and language processing*, vol. 16, no. 1, pp. 229-238, 2008.





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ปริญญาบัตรเรื่อง : การลดเสียงรบกวนจากเครื่องกรอฟันที่  
ขึ้นกับการตัดออกเสียงรบกวนแบบปรับตัว

สาขาวิชา : วิศวกรรมไฟฟ้า

ภาควิชา : วิศวกรรมไฟฟ้า

คณะ : วิศวกรรมศาสตร์

ชื่อ : นายจิภูณ เข้มวงศ์

ประวัติ

ผู้วิจัยเกิดวันที่ 14 ตุลาคม พ.ศ.2536 ภูมิลำเนา บ้านเลขที่ 62/334 หมู่ 5 ถนน  
เทอดพระเกียรติ ตำบลวัดชลอ อำเภอบางกรวย จังหวัดนนทบุรี 11130 โดยสำเร็จการศึกษา  
ระดับปริญญาตรีจากภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์  
มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2558

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตอบรับการตีพิมพ์

1. J. Khemwong, and N. Tangsangiumvisai, “A Two-Step Adaptive Noise Cancellation System for Dental-Drill Noise Reduction”, Engineering Journal, vol. 22, no. 4, July, 2018.