

การลดเสียงรบกวนของเครื่องเป่าลมเย็นด้วยวิธีควบคุมแบบแยกที่ฟ



นายโสพลชัย เกื้อศิริกุล

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-1261-6

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

NOISE REDUCTION OF A FAN COIL UNIT BY ACTIVE CONTROL



Mr.Sopolchai Kuersirikul

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-03-1261-6

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การลดเสียงรบกวนของเครื่องเป่าลมเย็นด้วยวิธีควบคุมแบบแอกทีฟ
โดย	นายโสพลชัย เกื้อศิริกุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ยงเจริญ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จีระศักดิ์ เมฆอัมพรพงศ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ไชยะภินันท์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ยงเจริญ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จีระศักดิ์ เมฆอัมพรพงศ์)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ)

นายโสพลชัย เกื้อศิริกุล : การลดเสียงรบกวนของเครื่องเป่าลมเย็นด้วยวิธีควบคุมแบบแอคทีฟ  
(NOISE REDUCTION OF A FAN COIL UNIT BY ACTIVE CONTROL)

อ. ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ยงเจริญ

อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จีระศักดิ์ เมฆอัมพรพงศ์

131 หน้า. ISBN 974-03-1261-6

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดลองลดเสียงรบกวนด้วยวิธีการแบบแอคทีฟ โดยมีแหล่งกำเนิดเสียงเป็นเครื่องเป่าลมเย็น ที่มีความถี่ของเสียงที่โดดเด่นในช่วง 20 ถึง 500 Hz ระบบควบคุมที่ใช้จะเป็นแบบป้อนไปข้างหน้าชนิดปรับตัวได้ โดยใช้ตัวกรองเป็นแบบ FIR และใช้อัลกอริทึมชนิด FXLMS ตัวควบคุมที่ใช้จะเป็นตัวประมวลผลสัญญาณเชิงดิจิทัล รุ่น TMS320c6701 EVM การเก็บข้อมูลนั้น จะเก็บเฉพาะบางความถี่เท่านั้น การวัดผลจะเลือกจุดวัดในห้องมา 3 จุด มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของลำโพงควบคุมทั้งหมด 3 ตำแหน่ง คือ ตำแหน่งหน้าเครื่องเป่าลมเย็น และตำแหน่งอื่นภายในห้องอีก 2 ตำแหน่ง โดยมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของไมโครโฟนรับสัญญาณความผิดพลาดทั้งสิ้น 5 ตำแหน่ง

จากผลการวิเคราะห์การลดเสียงรบกวนทั้งแบบความถี่เดียว และแบบหลายความถี่ ทั้งสองกรณีจะได้ผลลัพธ์ที่คล้ายคลึงกันคือ การลดเสียงรบกวนสามารที่จะทำได้แค่เพียงบริเวณโดยรอบของไมโครโฟนรับสัญญาณความผิดพลาด ในระยะรัศมีประมาณ 10 เซนติเมตรเท่านั้น ผลปรากฏว่าระดับความดันของเสียงรบกวน สามารถลดลงได้ประมาณ 3.9 ถึง 23 dBL

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา	วิศวกรรมเครื่องกล	ลายมือชื่อนิสิต	.....
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา	.....
ปีการศึกษา	2544	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	.....

# # 4170672421 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: ACTIVE NOISE CONTROL / ACTIVE NOISE REDUCTION / ACTIVE NOISE CANCELLATION / ADAPTIVE CONTROL / FXLMS

SOPOLCHAI KUERSIRIKUL : THESIS TITLE. (NOISE REDUCTION OF A FAN COIL UNIT BY ACTIVE CONTROL) THESIS ADVISOR : ASSOCIATE PROFESSOR WITHAYA YONGCHAREON, Ph.D., THESIS COADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR JIRASAK MEKUMPORN PONG,  
131 pp. ISBN 974-03-1261-6

The purpose of this research was to reduce the noise by using the Active method. The noise source is the fan coil unit that have a dominant frequency between 20 to 500 Hz. The control system is adaptive feedforward using FIR filter. The algorithm used for this filter was FXLMS. The controller used for this system is the Digital Signal Processor model TMS320c6701 EVM. The data was measured only specifically frequency at three locations in the room; at the fan coil outlet and the two other locations in the room. Three locations of the control speaker and five locations of the error microphone were investigated.

The result showed that the Active method can reduce noise in both single and multiple frequency at only a specific area which is about 10 centimeters radius from the error microphone. The Sound Pressure Level of the dominant frequency can be attenuated in a range 3.9 to 23 dBL.

Department	Mechanical Engineering	Student's signature .....
Field of study	Mechanical Engineering	Advisor 's signature .....
Academic year	2001	Co-advisor's signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ต้องขอขอบพระคุณ รศ.ดร.วิทยา ยงเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูง ที่ได้ให้คำปรึกษา และคำแนะนำมากมายที่เป็นประโยชน์อย่างมากในการทำวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ผศ.จีระศักดิ์ เมฆอัมพรพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำ และคอยเป็นห่วงเป็นใยอยู่เสมอ

ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่สละเวลาอันมีค่าในการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนการตรวจสอบความถูกต้องของวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.สมชาย จิตะพันธ์กุล และ รศ.กฤษดา วิชาวีรานนท์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่ให้โอกาสในการนั่งเรียนทฤษฎีเกี่ยวกับการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล และการออกแบบเชิงดิจิทัล และขอขอบพระคุณ ดร.วุฒิพงศ์ อารีกุล อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่กรุณาเอื้อเฟื้อให้ยืมใช้ซอฟต์แวร์

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา คุณปู่ และขอขอบคุณ น้องชาย น้องสาว ของผู้วิจัยที่คอยให้การช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ ตลอดจนให้กำลังใจเสมอมา

ขอขอบคุณ คุณวรรณธิตา ชัยสิทธิโรจน์ ที่คอยให้คำปรึกษา การช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ ตลอดจนให้กำลังใจเสมอมา

ขอขอบคุณบุคลากรธุรการประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่คอยอำนวยความสะดวกในด้านงานธุรการตลอดการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณ นายเอกพงษ์ แซ่ตั้ง นายพายุ คุ้มภัย นายกฤษกร เตชะวิบูลย์ และ นายพิรุณห์ พิหคณห์ เพื่อนผู้คอยช่วยเหลือ และเป็นห่วงช่วยเหลืออยู่เสมอมา

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สถานที่ซึ่งผู้วิจัยได้ฝ่าฟันมาตลอดที่จะได้ศึกษา อันเป็นอีกเหตุผลหนึ่งที่ทำให้ผู้วิจัยมีความมุ่งมั่น ความเพียรพยายามเพื่อให้สำเร็จการศึกษาประโยชน์อันใดจากงานวิจัยนี้ ขอมอบเป็นกตัญญูตราบัวแต่บิดา มารดา คุณปู่ คุณย่า อาจารย์ตั้งแต่ชั้นปฐมวัย จนถึงระดับมหาวิทยาลัย ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน รวมทั้งสถานศึกษาทุกแห่งของผู้วิจัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1-1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1-2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1-3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1-4 ขั้นตอนการทำวิจัย.....	4
1-5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ปรัชญาของนวัตกรรมการเรียนการสอน.....	5
2-1 งานวิจัยที่ผ่านมา.....	5
บทที่ 3 ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในงานวิจัย.....	9
3-1 ทฤษฎีของการควบคุมเสียงแบบแอกทีฟ .....	9
3-2 ชนิดของระบบควบคุมเสียงรบกวนแบบแอกทีฟ.....	9
3-3 ระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าชนิดปรับตัวได้สำหรับสัญญาณ ย่านความถี่กว้างเพื่อลดเสียงรบกวน.....	13
3-4 โครงสร้างตัวกรองแบบ FIR .....	13
3-5 ตัวกรองปรับค่าได้.....	14
3-5-1 อัลกอริทึมของการปรับตัว .....	16
3-5-2 วิธี Steepest Descent .....	18
3-5-3 อัลกอริทึม LMS (Least Mean Square) .....	19
3-6 อัลกอริทึมสำหรับระบบควบคุมเสียงรบกวนแบบแอกทีฟที่มีย่านความถี่ กว้างและลักษณะโครงสร้างเป็นแบบป้อนไปข้างหน้าชนิดปรับตัวได้..	20
3-6-1 ผลกระทบเนื่องจาก Secondary – Path.....	22
3-6-2 อัลกอริทึม FXLMS.....	22

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3-6-2-1 การทำ Off-Line Secondary-Path Modeling	24
3-6-2-2 อัลกอริทึม Leaky FXLMS.....	26
3-6-3 ผลกระทบของเสียงย้อนกลับและวิธีแก้ไข.....	26
3-6-3-1 การทำ Off-Line Modeling of Secondary and Feedback Paths.....	28
3-6-3-2 ขั้นตอนการใช้อัลกอริทึม FBFXLMS.....	29
บทที่4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	31
บทที่5 การจำลองระบบโดยใช้ซอฟต์แวร์ Matlab.....	41
5-1 ขั้นตอนการจำลองระบบ.....	42
5-2 ผลการทดลอง.....	44
5-3 อภิปรายผลการทดลอง.....	62
บทที่6 การทดลองลดเสียงรบกวนภายในท่อแคบ.....	64
6-1 ลักษณะของการทดลอง.....	66
6-2 ขั้นตอนและผลการทดลอง.....	68
6-3 อภิปรายผลการทดลอง.....	82
บทที่7 การทดลองลดเสียงรบกวนของเครื่องเป่าลมเย็น.....	83
7-1 ลักษณะของการทดลอง.....	84
7-2 ขั้นตอนและผลการทดลอง.....	99
7-3 อภิปรายผลการทดลอง.....	110
บทที่8 สรุปผลวิทยานิพนธ์ ประโยชน์ที่ได้รับ และข้อเสนอแนะ.....	112
8-1 สรุปผลวิทยานิพนธ์.....	112
8-2 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	112
8-3 ข้อเสนอแนะ.....	113
รายการอ้างอิง.....	114
บรรณานุกรม.....	115
ภาคผนวก ก โปรแกรมภาษา C ที่ใช้ในการควบคุมระบบ.....	116
ภาคผนวก ข หน้าต่างของซอฟต์แวร์ CCS (Code Composer Studio).....	130
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	131



สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
ตารางที่ 5-1	ข้อมูลดิบจากผลการทดลองย่อยที่ 5.1.1.....	45
ตารางที่ 5-2	ข้อมูลดิบจากผลการทดลองย่อยที่ 5.1.2.....	47
ตารางที่ 5-3	ข้อมูลดิบจากผลการทดลองย่อยที่ 5.1.3.....	49
ตารางที่ 5-4	ข้อมูลดิบจากผลการทดลองย่อยที่ 5.3.1.....	54
ตารางที่ 5-5	ข้อมูลดิบจากผลการทดลองย่อยที่ 5.3.2.....	57
ตารางที่ 5-6	ข้อมูลดิบจากผลการทดลองย่อยที่ 5.3.3.....	60
ตารางที่ 6.1	แสดงผลของการทดลองที่ 6.1 ... ..	70
ตารางที่ 6.2	การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของการทดลองที่ใช้ อัลกอริทึมชนิด FXLMS และ FBFXLMS จากผลการทดลองที่ 6.2.....	77
ตารางที่ 7.1	แสดงผลลัพธ์ของการทดลองที่ 7.1 ทำการวัดระดับเสียง ณ ตำแหน่งที่ 1.....	100
ตารางที่ 7.2	แสดงผลลัพธ์ของการทดลองที่ 7.1 ทำการวัดระดับเสียง ณ ตำแหน่งที่ 2.....	103
ตารางที่ 7.3	แสดงผลลัพธ์ของการทดลองที่ 7.1 ทำการวัดระดับเสียง ณ ตำแหน่งที่ 3.....	104
ตารางที่ 7.4	แสดงผลลัพธ์ของการทดลองที่ 7.2 ทำการวัดระดับเสียง ณ ตำแหน่งที่ 1.....	106
ตารางที่ 7.5	แสดงผลลัพธ์ของการทดลองที่ 7.2 ทำการวัดระดับเสียง ณ ตำแหน่งที่ 2.....	109

## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2-1 ระบบในงานวิจัยของ Paul Lueg .....	5
รูปที่ 2-2 แสดงถึงแผนผังการทำงานของระบบในงานวิจัยของ Dennis R.Morgan	6
รูปที่ 2-3 บล็อกไดอะแกรมแสดงโครงสร้างของระบบควบคุมในรูปที่ 2-2 ในงานวิจัยของ Dennis R. Morgan.....	7
รูปที่ 2-4 ผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยของ Dennis R. Morgan แสดงถึงผลตอบสนอง เชิงความถี่ของสัญญาณความผิดพลาดที่ได้.....	8
รูปที่ 3-1 แนวคิดของทฤษฎีการหักล้างกันของเสียง.....	9
รูปที่ 3-2 ระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าโดยใช้ไมโครโฟนเป็นตัวรับสัญญาณอ้างอิง	10
รูปที่ 3-3 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ.....	11
รูปที่ 3-4 ก ระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าชนิดปรับตัวได้ (Adaptive Feedforward Control) โดยใช้ไมโครโฟนเป็นตัวรับสัญญาณอ้างอิง.....	11
รูปที่ 3-4 ข ระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าชนิดปรับตัวได้ (Adaptive Feedforward Control) โดยไม่ใช้ไมโครโฟนเป็นตัวรับสัญญาณอ้างอิง.....	12
รูปที่ 3-4 ค ระบบควบคุมแบบป้อนกลับชนิดปรับตัวได้ (Adaptive Feedback Control)	12
รูปที่ 3-5 โครงสร้างของตัวกรองชนิด FIR.....	14
รูปที่ 3-6 ลักษณะของตัวกรองปรับค่าได้.....	15
รูปที่ 3-7 พื้นผิวของ Mean Square Error (MSE) ในกรณี $L=2$ .....	18
รูปที่ 3-8 แผนภาพแสดงระบบควบคุมเสียงรบกวนแบบแยกที่ฟ.....	21
รูปที่ 3-9 ระบบควบคุมเสียงรบกวนแบบแยกที่ฟที่รวมส่วนของ Secondary Path	21
รูปที่ 3-10 อัลกอริทึมแบบ FXLMS.....	22
รูปที่ 3-11 การทำ Off-Line Secondary-Path Modeling.....	25
รูปที่ 3-12 ระบบควบคุมที่ใช้อัลกอริทึม FFXLMS ที่มีการกำจัดผลของเสียงย้อนกลับ	27
รูปที่ 4-1 แสดงเครื่องวัดระดับเสียง (Sound Level Meter) ที่ใช้ในการทดลอง.....	32
รูปที่ 4-2 ไมโครโฟนชนิดคอนเดนเซอร์ (Condenser Microphone) ที่ใช้ในการทดลอง	32
รูปที่ 4-3 ลำโพงที่ใช้ในการทดลอง.....	33
รูปที่ 4-4 เครื่องขยายสัญญาณภาคกำลัง (Power Amplifier).....	33
รูปที่ 4-5 ก เครื่องขยายสัญญาณภาคต้น (Pre Amplifier) ของบริษัท Toshiba....	34
รูปที่ 4-5 ข เครื่องขยายสัญญาณภาคต้น (Pre Amplifier) ของบริษัท Amom.....	34

รูปที่ 4-6 เครื่องกรองความถี่แบบแอนาล็อก ที่ใช้ในการทดลอง.....	35
รูปที่ 4-7 เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Signal Generator) ของบริษัท Crotech รุ่น 4950	35
รูปที่ 4-8 ซอฟต์แวร์ที่ใช้สำหรับกำเนิดสัญญาณ ชื่อ Cool Edit Pro.....	36
รูปที่ 4-9 แสดง Oscilloscope ที่ใช้ในการทดลอง.....	36
รูปที่ 4-10 ก ออสซิลโลสโคปที่ได้จากการประยุกต์ใช้ TMS320c31 DSK.....	37
รูปที่ 4-10 ข เครื่องวิเคราะห์ความถี่ FFT ที่ได้จากการประยุกต์ใช้ TMS320c31 DSK	37
รูปที่ 4-10 ค ตัวประมวลผลสัญญาณเชิงดิจิทัลรุ่น TMS320c31 DSK.....	38
รูปที่ 4-11 ก ตัวประมวลผลสัญญาณเชิงดิจิทัล (DSP Chip) รุ่น TMS320c6701	38
รูปที่ 4-11 ข ชุดควบคุมที่ใช้ในการทดลอง รุ่น TMS320c6701 EVM ประกอบไปด้วย DSP chip ตัวแปลงสัญญาณ A/D D/A หน่วยความจำ พอร์ตเชื่อมต่อกับ คอมพิวเตอร์.....	39
รูปที่ 4-11 ค ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการควบคุม รุ่น Code Composer Studio V2.0 ประกอบด้วย ส่วนของตัวแปลภาษา (Compiler) ส่วนแสดงผล (Display) และส่วนของการแก้ไขโปรแกรม (Debugger).....	39
รูปที่ 4-11 ง แผนภาพแสดงส่วนประกอบของชุดควบคุม TMS320c6701 EVM....	40
รูปที่ 5-1 ก แผนผังแสดงการทดลองทั้งหมดในบทที่ 5.....	41
รูปที่ 5-1 ข แผนภาพการทดลองย่อยที่ 5.1 และ 5.2 โดยใช้โปรแกรมย่อย Simulink	43
รูปที่ 5-1 ค แผนภาพการทดลองย่อยที่ 5.3 โดยใช้โปรแกรมย่อย Simulink โดยได้เพิ่มส่วนของ Delay time ในการรับสัญญาณผิดพลาด.....	43
รูปที่ 5-2 ก ตัวอย่างผลลัพธ์จากการทดลองย่อยที่ 5.1.1.....	44
รูปที่ 5-2 ข กราฟจากผลการทดลองย่อยที่ 5.1.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\mu$ และจำนวนรอบคำสั่ง (Cycles) ที่ระบบควบคุม ใช้ในการทำให้สัญญาณ ความผิดพลาดเข้าสู่ค่าศูนย์ โดยในแกน X เป็นสเกล Logarithm...	45
รูปที่ 5-3 ก ตัวอย่างผลลัพธ์จากการทดลองที่ 5.1.2 .....	46
รูปที่ 5-3 ข กราฟจากผลการทดลองย่อยที่ 5.1.2 .....	47
รูปที่ 5-4 ก ตัวอย่างผลลัพธ์จากการทดลองที่ 5.1.3.....	48
รูปที่ 5-4 ข กราฟจากผลการทดลองย่อยที่ 5.1.3 .....	49
รูปที่ 5-5 กราฟจากผลการทดลองย่อยที่ 5.2.1 .....	50
รูปที่ 5-6 กราฟจากผลการทดลองย่อยที่ 5.2.2.....	51
รูปที่ 5-7 กราฟจากผลการทดลองย่อยที่ 5.2.3.....	52
รูปที่ 5-8 ก กราฟจากผลการทดลองย่อยที่ 5.3.1.....	53

รูปที่ 5-8 ก (ต่อ) กราฟจากผลการทดลองย่อยที่ 5.3.1.....	54
รูปที่ 5-8 ข กราฟจากผลการทดลองย่อยที่ 5.3.1.....	55
รูปที่ 5-9 ก กราฟจากผลการทดลองย่อยที่ 5.3.2.....	56
รูปที่ 5-9 ก (ต่อ) กราฟจากผลการทดลองย่อยที่ 5.3.2.....	57
รูปที่ 5-9 ข กราฟจากผลการทดลองย่อยที่ 5.3.2.....	58
รูปที่ 5-10 ก กราฟจากผลการทดลองย่อยที่ 5.3.3.....	59
รูปที่ 5-10 ก (ต่อ) กราฟจากผลการทดลองย่อยที่ 5.3.3.....	60
รูปที่ 5-10 ข กราฟจากผลการทดลองย่อยที่ 5.3.3.....	61
รูปที่ 6-1 ก ภาพถ่ายแสดงลักษณะของท่อที่ใช้ในการทดลอง.....	64
รูปที่ 6-1 ข แผนผังแสดงภาพรวมทั้งหมดของการทดลองในบทที่ 6.....	65
รูปที่ 6-1 ค แผนภาพแสดงรายละเอียดขนาดของท่อและระยะห่างระหว่างลำโพง และไมโครโฟน.....	65
รูปที่ 6-2 ก รูปแบบอย่างง่ายของการทดลองที่ 6.1 เป็นการรับสัญญาณเสียงโดย ตรงจาก Signal Generator.....	67
รูปที่ 6-2 ข รูปแบบอย่างง่ายของการทดลองที่ 6.2 โดยใช้ไมโครโฟนเป็นตัวรับ สัญญาณอ้างอิง.....	67
รูปที่ 6-2 ค แผนภาพแสดงระบบควบคุมที่ใช้อัลกอริทึมชนิด FXLMS.....	69
รูปที่ 6-2 ง แผนภาพแสดงระบบควบคุมที่ใช้อัลกอริทึมชนิด FBFXLMS.....	69
รูปที่ 6-3 กราฟในโดเมนความถี่ที่ได้จาก FFT Analyser.....	72
รูปที่ 6-4 กราฟในโดเมนเวลาที่ได้จาก Oscilloscope.....	73
รูปที่ 6-5 กราฟในโดเมนความถี่ที่ได้จาก FFT Analyser.....	74
รูปที่ 6-6 กราฟในโดเมนเวลาที่ได้จาก Oscilloscope.....	75
รูปที่ 6-7 สเปกตรัมของสัญญาณขณะเปิดเครื่องลดเสียงรบกวนแบบแอกทีฟ โดยอัลกอริทึมชนิด FXLMS.....	78
รูปที่ 6-8 สเปกตรัมของสัญญาณขณะเปิดเครื่องลดเสียงรบกวนแบบแอกทีฟ โดยอัลกอริทึมชนิด FXLMS.....	79
รูปที่ 6-9 สเปกตรัมของสัญญาณขณะเปิดเครื่องลดเสียงรบกวนแบบแอกทีฟ โดยอัลกอริทึมชนิด FBFXLMS.....	80
รูปที่ 6-10 สเปกตรัมของสัญญาณขณะเปิดเครื่องลดเสียงรบกวนแบบแอกทีฟ โดยอัลกอริทึมชนิด FBFXLMS.....	81
รูปที่ 7-1 ภาพตัดแสดงด้านหน้า และด้านล่างของเครื่องเป่าลมเย็นที่ใช้ในการทดลอง	85

รูปที่ 7-2 ก ภาพมุมมองด้านบน ของห้องทดลองแสดงเสียงรบกวน ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในห้อง .....	86
รูปที่ 7-2 ข สเปกตรัมของเสียงรบกวนจากแหล่งกำเนิด (Noise Source)....	87
รูปที่ 7-2 ค สเปกตรัมของเสียงรบกวนจากแหล่งกำเนิด (Noise Source)....	88
รูปที่ 7-2 ง สเปกตรัมของเสียงรบกวนจากแหล่งกำเนิด (Noise Source)....	89
รูปที่ 7-2 จ สเปกตรัมของเสียงรบกวนจากแหล่งกำเนิด (Noise Source)....	90
รูปที่ 7-2 ฉ สเปกตรัมของเสียงรบกวนจากแหล่งกำเนิด (Noise Source)....	91
รูปที่ 7-2 ช สเปกตรัมของเสียงรบกวนจากแหล่งกำเนิด (Noise Source)..... สเปกตรัมของเสียงรบกวนจากแหล่งกำเนิด (Noise Source).....	92 93
รูปที่ 7-3 ภาพมุมมองด้านข้างของห้องทดลอง แสดงตำแหน่งในการติดตั้งไมโครโฟน ในการทดลองที่ 7.1.1.....	94
รูปที่ 7-4 ภาพมุมมองด้านบนของห้องทดลอง แสดงตำแหน่งในการติดตั้งไมโครโฟน ในการทดลองที่ 7.1.1 .....	95
รูปที่ 7-5 ภาพมุมมองด้านบนของห้องทดลอง แสดงตำแหน่งในการติดตั้งไมโครโฟน ในการทดลองที่ 7.1.2 .....	96
รูปที่ 7-6 ก ลักษณะของการติดตั้งไมโครโฟนรับสัญญาณความผิดพลาด และ ไมโครโฟนของเครื่องวัดระดับเสียง.....	97
รูปที่ 7-6 ข ตำแหน่งในการติดตั้งลำโพงและไมโครโฟนในการทดลองที่ 7.1	97
รูปที่ 7-6 ค ตำแหน่งในการวางลำโพงและไมโครโฟนในการทดลองที่ 7.2...	98
รูปที่ 7-9 ตัวอย่างผลลัพธ์จากการทดลองที่ 7.1 ตารางที่ 7.1.....	101
รูปที่ 7-10 ตัวอย่างผลลัพธ์จากการทดลองที่ 7.1 ตารางที่ 7.1.....	102
รูปที่ 7-11 ตัวอย่างผลลัพธ์จากการทดลองที่ 7.2 ตารางที่ 7.4.....	107
รูปที่ 7-12 ตัวอย่างผลลัพธ์จากการทดลองที่ 7.2 ตารางที่ 7.4.....	108

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1-1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

วิธีการกำจัดเสียงรบกวน (Acoustic Noise reduction) ด้วยวิธีการติดตั้งฉนวนกันเสียงต่างๆ (Passive sound absorbers) จะไม่เป็นการสะดวกสำหรับสัญญาณเสียงที่มีความถี่ต่ำๆ (ต่ำกว่า 1000 Hz) เนื่องจากที่ความถี่ต่ำๆ นั้นคลื่นเสียงจะมีความยาวคลื่นมาก เช่น ที่ความถี่ 100 Hz นั้นเสียงจะมีความยาวคลื่นถึง 3.4 เมตร ซึ่งจำเป็นต้องใช้ฉนวนกันเสียงที่มีขนาดใหญ่และหนักมาก อีกทั้งราคาวัสดุก็ค่อนข้างสูงมาก ทำให้เกิดการศึกษาค้นคว้าแนวคิดใหม่ๆ ขึ้น โดยวิธีการที่กล่าวมานี้เรียกว่าการควบคุมเสียงรบกวนแบบแอคทีฟ หรือ มักเรียกชื่อโดยย่อว่า ANC (Active Noise Control) ซึ่งใช้หลักการการแทรกสอดแบบหักล้างกันของเสียง (Destructive Interference) ระหว่างแหล่งกำเนิดเสียงรบกวน (Primary Noise Source) และแหล่งกำเนิดเสียงควบคุม (Control Source) โดยจะใช้ลำโพงซึ่งรับสัญญาณมาจากตัวควบคุม (Controller) ทำหน้าที่ปล่อยเสียงออกมาหักล้าง การควบคุมเสียงรบกวนแบบแอคทีฟกำลังอยู่ในช่วงของการเปลี่ยนแปลงจากความฝัน สู่ความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ และจากการทดลองในห้องทดลองสู่การผลิตเชิงการค้า ถึงแม้ว่าจะใช้ระยะเวลาในการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมากก็ตาม เนื่องมาจากการใช้เวลาไปกับการพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางการประมวลผลสัญญาณ อีกส่วนหนึ่งเนื่องมาจากการขาดความรู้ ความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีทางด้านฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้อง การควบคุมเสียงรบกวนแบบแอคทีฟกลับมาได้รับความสนใจเป็นอย่างมากอีกครั้ง ในช่วงปลายคริสต์ศักราช 1970 อันเนื่องมาจากความก้าวหน้าทางด้านทฤษฎีการควบคุม ตลอดจนความก้าวหน้าทางด้านไมโครโปรเซสเซอร์ แต่ถึงกระนั้นก็ตามก็ยังมีอุปสรรคอีกหลายประการ ที่ทำให้การใช้งานไม่ได้เป็นไปอย่างกว้างขวาง บางทีอาจเนื่องมาจากข้อจำกัดของทรานสดิวเซอร์ (Transducer) ทั้งทางด้านเสถียรภาพ และการตอบสนองที่ความถี่ต่ำ รวมทั้ง

- การขาดประสบการณ์ทางด้านติดตั้ง (Installations)
- ความซับซ้อนของระบบ
- ต้นทุนของระบบค่อนข้างสูง
- ขาดศักยภาพทางด้านบุคลากร
- การประหยัดต้นทุนยังไม่เป็นที่ชัดเจนนัก
- ขาดกลยุทธ์ทางการตลาด

วิธีการและระบบที่ใช้ในการควบคุมการหักล้าง มีมากมายหลายแบบไม่ว่าจะเป็นระบบแบบดั้งเดิม เช่น ระบบแบบแอนะล็อก (Analog) หรือว่า จะเป็นระบบแบบดิจิทัล (Digital) โดยระบบแบบหลังเป็นที่นิยมกันมากในปัจจุบัน เนื่องมาจากความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีเกี่ยวกับ อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) และไมโครโปรเซสเซอร์ (Microprocessor) โดยโครงสร้างของตัวควบคุมก็สามารถจำแนกออกได้อีกเป็น แบบป้อนไปข้างหน้า (Feedforward control) ซึ่งจะใช้ไมโครโพนอย่างน้อย 2 ตัวในการควบคุม โดยไมโครโพนตัวแรกทำหน้าที่รับสัญญาณอ้างอิงของระบบ (Reference signal) ส่วนไมโครโพนอีกตัวทำหน้าที่รับสัญญาณความผิดพลาด (Error signal) โดยนำสัญญาณที่ได้ทั้งสองมาเข้าอัลกอริทึมที่ใช้ในระบบควบคุม หรือว่า จะเป็นระบบแบบป้อนกลับ (Feedback control) ซึ่งใช้ไมโครโพนเพียงตัวเดียวทำหน้าที่ทั้งสองอย่าง ข้อดีของระบบแบบป้อนกลับคือ ความมีเสถียรภาพ (Stability) และความไม่ซับซ้อนของระบบ (Simple system) แต่ก็มีข้อเสียเช่นกัน คือ สามารถลดเสียงได้เฉพาะเสียงที่มีลักษณะสัญญาณเป็นคาบเท่านั้น [1] โดยตัวกรองดิจิทัลที่ใช้ยังสามารถจำแนกตามโครงสร้างได้เป็น FIR (Finite Impulse Response) และ IIR (Infinite Impulse Response) ซึ่งทั้งสองโครงสร้างนี้ยังแบ่งได้เป็นระบบแบบปรับค่าพารามิเตอร์เองได้ (Adaptive control) และระบบแบบพารามิเตอร์คงที่ (Fixed control) ซึ่งตั้งอยู่บนข้อจำกัดที่ว่า พารามิเตอร์ของระบบไม่มีเปลี่ยนแปลง หรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ซึ่งในปัจจุบันนิยมใช้ระบบแบบปรับค่าพารามิเตอร์เองได้มากกว่า ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ก็จะใช้วิธีนี้ด้วยเช่นกัน โดยรายละเอียดจะถูกกล่าวถึงในบทที่ 3

ระบบควบคุมแบบแอกทีฟ มักนิยมใช้กับระบบที่มีย่านความถี่ไม่เกิน 500 Hz [2] เพราะการเพิ่มย่านความถี่ให้สูงขึ้น ย่อมหมายถึงความต้องการใช้อัตราการสุ่ม (Sampling rate) ที่เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลที่มีอัตราการสุ่มสูงๆ มักจะมีราคาแพง กอปรกับการควบคุมแบบพาสซีฟ (Passive control) ที่ความถี่สูงๆ มักจะราคาไม่แพง ดังนั้นระบบควบคุมเสียงที่สมบูรณณ์มักจะใช้ระบบทั้งสอง ควบคู่กันไปด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 1-2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เป็นการศึกษาเพื่อทดลองควบคุมเสียงรบกวน (Noise) ที่เกิดขึ้นจากเครื่องเป่าลมเย็น (Fan Coil Unit) ให้มีระดับความดันของเสียง (Sound Pressure Level) ลดลง ด้วยวิธีควบคุมเสียงรบกวนแบบแอคทีฟ (Active Noise Control)

## 1-3 ขอบเขตของการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการควบคุมเสียงรบกวน (Noise) ที่เกิดขึ้นจากเครื่องเป่าลมเย็น (Fan Coil Unit) ให้มีระดับความดันของเสียง (Sound Pressure Level) ลดลง อยู่ในช่่วงที่ยอมรับได้ โดยมีรายละเอียดของระบบ ดังนี้

ในงานวิจัยจะใช้แหล่งกำเนิดเสียง (Primary Noise Source) คือ เครื่องเป่าลมเย็น (Fan Coil Unit) ซึ่งจะถูกวัดสัญญาณอ้างอิง (Reference Signal) โดยไมโครโฟน (Microphone) เพื่อส่งให้กับตัวควบคุมซึ่งเป็นตัวประมวลผลสัญญาณเชิงดิจิทัล (Digital Signal Processing) หรือที่มักเรียกกันโดยย่อว่า DSP และใช้ไมโครโฟนอีกตัวในการรับสัญญาณความผิดพลาด (Error Signal) เพื่อส่งให้กับตัวควบคุมใช้ในการคำนวณ หลังจากนั้นจะได้สัญญาณควบคุม (Control Signal) ซึ่งมีเฟสต่างกัน 180 องศา กับสัญญาณเสียงรบกวนที่สนใจ เพื่อส่งต่อไปยังลำโพง (Loudspeaker) โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการวัดสัญญาณเสียงตกค้าง (Residual Noise) ซึ่งเป็นผลการทดลองของงานวิจัยนี้เพียงบางตำแหน่งในห้อง โดยจะทำการกำหนดขึ้นเอง และจะทำการควบคุมเสียงรบกวน (Noise) เพียงบางความถี่เท่านั้น

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



#### 1-4 ขั้นตอนการทำวิจัย

1. ทำการศึกษาค้นคว้าถึง หลักการทางทฤษฎีเกี่ยวกับระบบควบคุมแบบ แยกทีฟ และการประมวลผลสัญญาณเชิงดิจิทัล จากหนังสือ งานวิจัยในอดีต หรือแม้กระทั่งจาก อินเทอร์เน็ต (Internet)
2. ทำการศึกษาวิธีใช้ตัวประมวลผลสัญญาณเชิงดิจิทัล (Digital Signal Processing) จากหนังสือคู่มือ และอินเทอร์เน็ต
3. ทำการจำลองระบบควบคุมแบบแยกทีฟ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Matlab เพื่อให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของการทดลอง อีกทั้งยังช่วยเสริมความเข้าใจเกี่ยวกับ การใช้ อัลกอริทึม (Algorithm) แบบ Least Mean Square (LMS) อีกด้วย
4. ทดสอบโปรแกรมการทำงานของระบบควบคุมว่ามีความถูกต้องหรือไม่ โดยการจำลองระบบให้มีการหักล้างกันขึ้นภายในโปรแกรม
5. เพื่อจำกัดให้ระบบมีความซับซ้อนน้อยลง จึงทำการทดลองควบคุมเสียงรบกวนภายในท่อกลม (Duct) อีกทั้งยังเป็นการทดสอบ อัลกอริทึมหลายๆแบบอีกด้วย
6. ทำการทดลองกับเครื่องเป่าลมเย็น โดยทำการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งในการวางลำโพง และตำแหน่งในการวัดผล

#### 1-5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

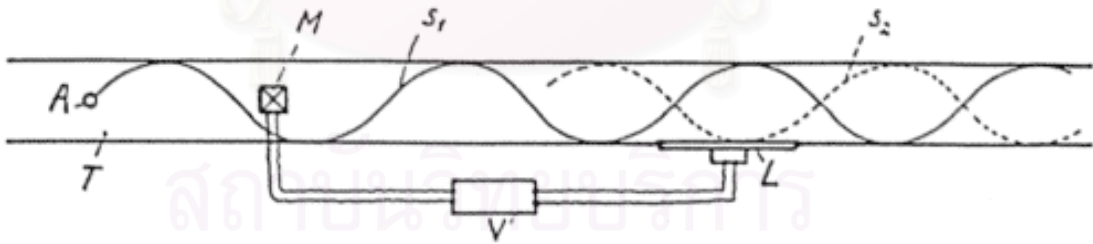
1. เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาวิจัยต่อไปภายหน้า เกี่ยวกับการควบคุมเสียงรบกวนที่มีความถี่ต่ำ ด้วยวิธีการควบคุมแบบแยกทีฟ
2. เป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้จริงกับวงการอุตสาหกรรม เพื่อลดค่าใช้จ่ายลงเมื่อเทียบกับกระบวนการวิธีแบบอื่น
3. พัฒนาบุคลากรให้ได้รับความรู้ความชำนาญในการใช้ ตัวประมวลผลสัญญาณเชิงดิจิทัล (DSP) ซึ่งในอนาคต มีแนวโน้มที่จะใช้กันอย่างแพร่หลาย
4. ได้ตัวควบคุมเสียง ซึ่งสามารถลดเสียงในท่อได้ในระดับที่ดี

## บทที่ 2

### ปริทัศน์วรรณกรรม

#### 2-1 งานวิจัยที่ผ่านมา

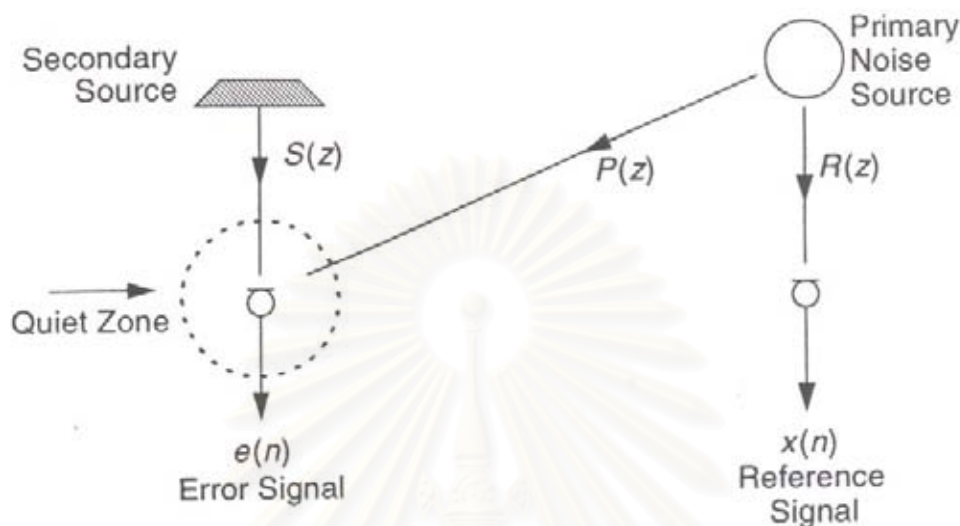
การควบคุมเสียงแบบแอกทีฟนั้นผู้ริเริ่มคือ Paul Lueg ชาวเยอรมัน ในช่วงทศวรรษที่ 1930 ซึ่งได้คิดค้นวิธีการซึ่งเป็นพื้นฐานของระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า (Feedforward Control) ซึ่งนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ดังรูปที่ 2-1 โดย Lueg ได้ทำการติดตั้งไมโครโฟน 1 ตัว เพื่อรับสัญญาณมาจากแหล่งกำเนิดเสียงรบกวน A แล้วนำสัญญาณที่ได้ไปผ่านวงจรขยายสัญญาณ (Amplifier) และตัวเลื่อนเฟส (Phase Shifter)  $V$  ซึ่งจะทำการขยายสัญญาณให้ได้ขนาดตามต้องการ แล้วทำการปรับเฟสให้มีทิศทางตรงข้ามกับสัญญาณที่ได้จากแหล่งกำเนิดเสียงรบกวน โดยสัญญาณที่ได้จะถูกส่งไปยังลำโพง L เพื่อให้เกิดกระบวนการแทรกสอดแบบหักล้าง (Destructive Interference) ซึ่งตามทฤษฎีแล้ว เสียงรบกวนจะเงียบหลังจากผ่านลำโพงแล้ว แต่ติดปัญหาทางด้านเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ในสมัยนั้นยังพัฒนาได้ไม่เพียงพอต่อระบบการควบคุมเสียงแบบแอกทีฟ ทำให้การทดลองไม่สามารถประสบความสำเร็จได้ ต่อมาภายหลังเทคโนโลยีทางด้านอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ และไมโครโปรเซสเซอร์ ได้พัฒนารุดหน้าไปเป็นอันมาก ทำให้ความเป็นไปได้ของทฤษฎีนี้มีมากขึ้น



รูปที่ 2-1 ระบบในงานวิจัยของ Paul Lueg ประกอบไปด้วยไมโครโฟน M, ลำโพง L, ตัวควบคุม V

งานวิจัยในเรื่องการควบคุมเสียงแบบแอกทีฟนั้น ได้ถูกตีพิมพ์มาแล้วเป็นจำนวนมาก โดยมีทั้งการทดลองลดเสียงภายในท่อซึ่งเป็นระบบอย่างง่าย ซึ่งการเดินทางของเสียงเป็นแบบ 1 มิติ (1 Dimensional) โดยมีแหล่งกำเนิดเสียงความถี่เดียว หรือแม้กระทั่งหลายความถี่ หรือจะเป็นการลดเสียงแบบสนามอิสระ (Free field) ซึ่งการเดินทางของเสียงเป็นแบบ 3 มิติ (3 Dimensional) ในที่นี้จะขอเสนอผลงานวิจัยบางฉบับที่น่าสนใจ เช่น ผลงานของ Dennis

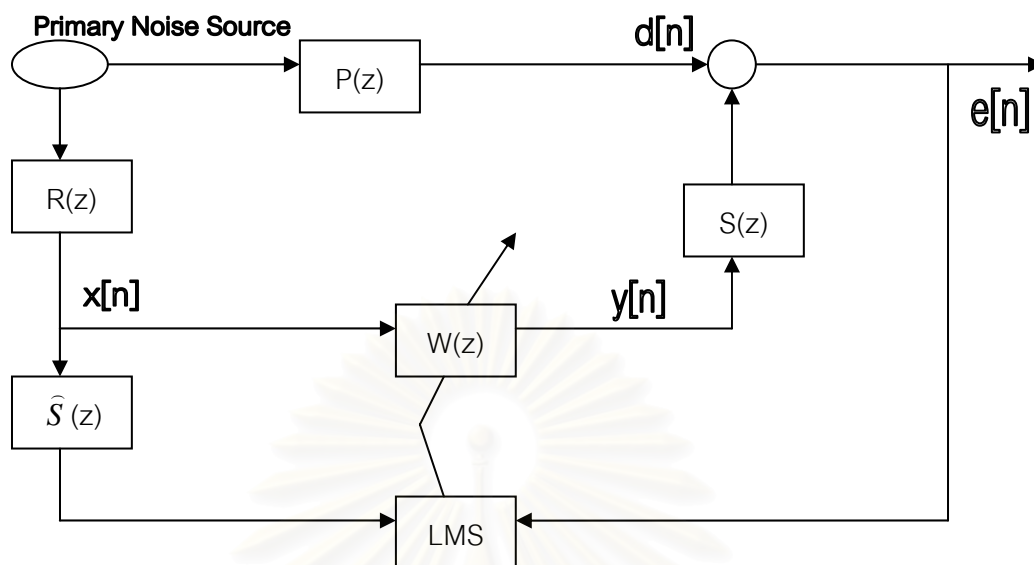
R.Morgan และ Daniel A.Quinlan เรื่อง Local Silencing of Room Acoustic Noise using Broadband Active Noise Control [4]



รูปที่ 2-2 แสดงถึงแผนผังการทำงานของระบบในงานวิจัยของ Dennis R.Morgan

ประกอบไปด้วย แหล่งกำเนิดเสียงรบกวนปฐมภูมิ แหล่งกำเนิดเสียงควบคุมทุติยภูมิ (ลำโพง) ไมโครโฟนรับสัญญาณความผิดพลาด ไมโครโฟนรับสัญญาณอ้างอิง และ บริเวณของความเงียบ

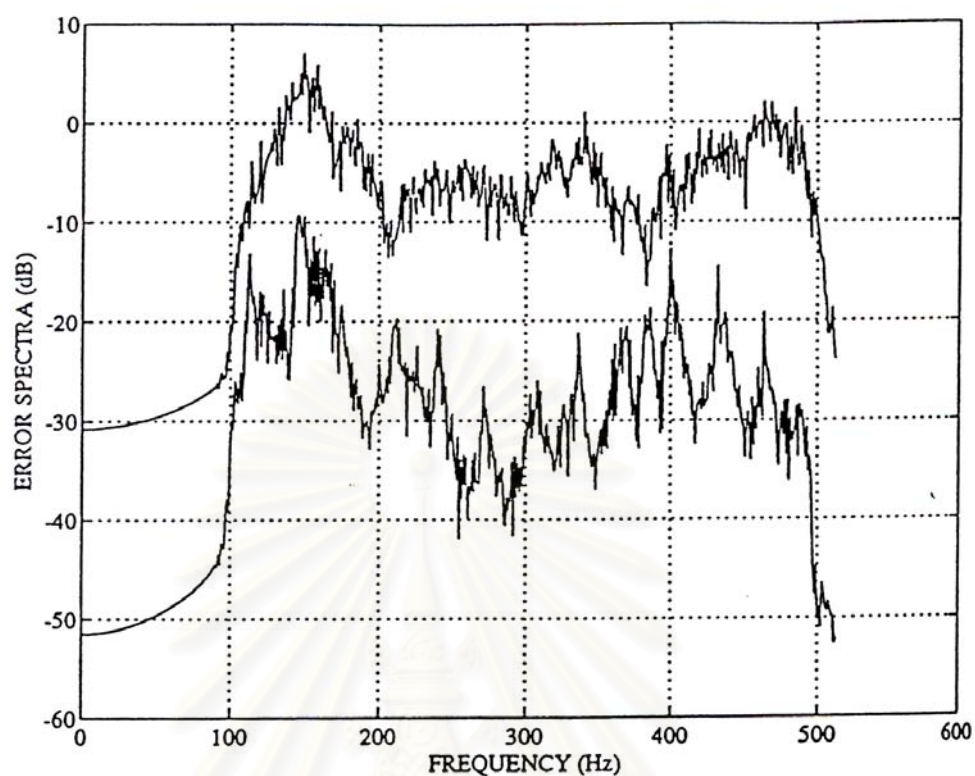
จากรูปที่ 2-2 แหล่งกำเนิดเสียงรบกวน จะอยู่ทางด้านขวาของภาพ ซึ่งจะกำเนิดเสียงที่มีความถี่อยู่ในช่วง 100 – 500 Hz โดยมีไมโครโฟนรับสัญญาณอ้างอิง (Reference Microphone) ทำหน้าที่รับสัญญาณด้านเข้าของระบบ โดยวางชิดอยู่กับแหล่งกำเนิดเสียงรบกวน ส่วนทางด้านซ้ายของภาพจะมีแหล่งกำเนิดเสียงควบคุมอยู่ การหักล้างจะเกิดขึ้นที่บริเวณ Zone of Silence โดยมีไมโครโฟนอีกตัว (Error Microphone) ทำหน้าที่รับสัญญาณความผิดพลาดของระบบ เพื่อนำไปใช้ในอัลกอริทึม โดยมีบล็อกไดอะแกรมแสดงดังรูปที่ 2-3 โดยในที่นี้จะไม่พูดถึงรายละเอียดมากนัก แต่จะอธิบายพอให้เข้าใจเบื้องต้น



รูปที่ 2-3 บล็อกไดอะแกรมแสดงโครงสร้างของระบบควบคุมในรูปที่ 2-2

ในงานวิจัยของ Dennis R. Morgan

เริ่มจากแหล่งกำเนิดเสียงรบกวน ปล่อยเสียงออกมาผ่าน  $P(z)$  ซึ่งก็คือฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) ของระบบทางเดินของเสียงระหว่างแหล่งกำเนิดเสียงรบกวน และจุดหักล้าง ได้ผลลัพธ์เป็นสัญญาณ  $d[n]$  ซึ่งก็คือ สัญญาณเสียงรบกวน ณ จุดหักล้าง ในขณะที่เดียวกันเสียงที่ถูกปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดเสียงรบกวน ก็เคลื่อนที่ผ่าน  $R(z)$  ซึ่งก็คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบทางเดินของเสียงระหว่าง แหล่งกำเนิดเสียงรบกวน และไมโครโฟนรับสัญญาณอ้างอิง ได้ผลลัพธ์เป็นสัญญาณ  $x[n]$  ซึ่งเป็นสัญญาณด้านเข้าของระบบ โดย  $W(z)$  คือ ตัวประมาณของฟังก์ชันถ่ายโอน  $P(z)$  ซึ่งจะถูกปรับค่าให้ใกล้เคียงกับ  $P(z)$  มากที่สุดด้วยอัลกอริทึมแบบ LMS (Least Mean Square) ผลลัพธ์ที่ได้จากการรวมยอดผลประสาน (Convolution) ของสัญญาณ  $x[n]$  กับ  $W(z)$  คือ  $y[n]$  เป็นสัญญาณด้านออกของระบบซึ่งก็คือเสียงที่ถูกปล่อยออกมาจากลำโพงนั่นเอง โดยในความเป็นจริง  $y[n]$  ยังต้องผ่าน  $S(z)$  ซึ่งก็คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบทางเดินของเสียงระหว่างลำโพง และไมโครโฟนตัวที่สอง ซึ่งในส่วนนี้เองมักทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้นในการทดลอง หากไม่มีการชดเชย (Compensate) ซึ่งทำได้โดย นำ  $x[n]$  มาผ่าน  $\hat{S}(z)$  ก่อนที่จะเข้าสู่อัลกอริทึม LMS ซึ่งได้ผลลัพธ์ของการทดลองดังรูปที่ 2-4



รูปที่ 2-4 ผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยของ Dennis R. Morgan แสดงถึงผลตอบสนองเชิงความถี่ของสัญญาณความผิดพลาดที่ได้ก่อนการควบคุม (เส้นบน) และหลังการควบคุม (เส้นล่าง)

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าการหักล้างเกิดขึ้นตลอดย่านความถี่ 100–500 Hz โดยมีค่าลดลงเฉลี่ยตลอดย่านความถี่ประมาณ 15 dB

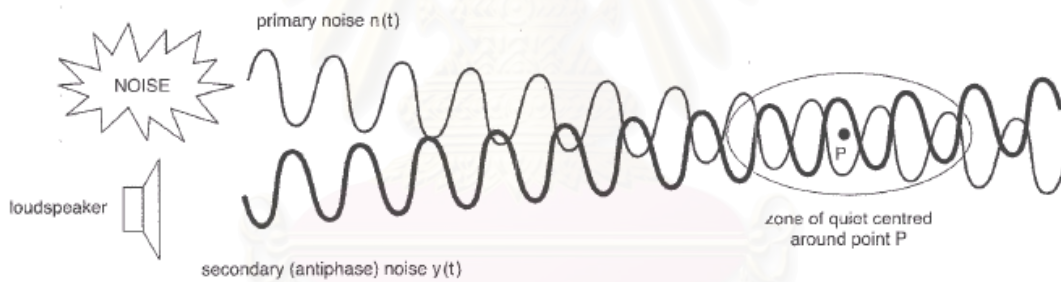
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### บทที่ 3

## ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในงานวิจัย

### 3-1 ทฤษฎีของการควบคุมเสียงแบบแอคทีฟ (Principle of active noise control)

การควบคุมเสียงแบบแอคทีฟนี้ ตั้งอยู่บนพื้นฐานของหลักการแทรกสอดแบบหักล้าง (Destructive Interference) ของคลื่นดังรูปที่ 3-1 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงภาพรวมของหลักการนี้ โดยมีแหล่งกำเนิดเสียงรบกวนปฐมภูมิ (Primary noise source) ซึ่งกำเนิดเสียงในรูปสัญญาณไซน์ชอยดอลล์ ถัดมามีแหล่งกำเนิดเสียงควบคุมทุติยภูมิ (Secondary noise source) ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดเสียงที่ถูกควบคุม ซึ่งจะทำการสร้างสัญญาณเสียงให้มีความถี่ เท่ากันกับแหล่งกำเนิดเสียงรบกวน แต่มีเฟสต่างกัน 180 องศา โดยที่มีจุด P คือ จุดที่ออกแบบมาเพื่อใช้วัดผลของการทดลอง ตามทฤษฎีแล้วการหักล้างจะสามารถทำได้โดยสมบูรณ์ เป็นบริเวณรอบๆจุด P ซึ่งบริเวณนี้จะถูกเรียกว่า บริเวณของความเงียบ (Zone of quiet)



รูปที่ 3-1 แนวคิดของทฤษฎีการหักล้างกันของเสียง

### 3-2 ชนิดของระบบควบคุมเสียงรบกวนแบบแอคทีฟ (Type of Active Noise Control)

การหักล้าง (Cancellation) สัญญาณเสียงที่มีย่านความถี่กว้าง (Broadband Noise) ระบบควบคุมจำเป็นต้องรู้จักสัญญาณเสียงรบกวน (Noise Signal) ก่อนเพื่อที่จะได้สร้างสัญญาณเสียงควบคุม (Control Signal) ขึ้นมาได้ การวัดเสียงจากแหล่งกำเนิดเสียงรบกวน (Noise Source) สามารถทำได้โดยใช้ไมโครโฟน (Microphone) เป็นตัวรับสัญญาณเสียงอ้างอิง (Reference Signal) เข้ามา โดยที่สัญญาณเสียงอ้างอิงที่ได้จากไมโครโฟนนั้นจำเป็นต้องมีความสัมพันธ์ (Correlates) กับสัญญาณเสียงจากแหล่งกำเนิดเสียง การรับสัญญาณ

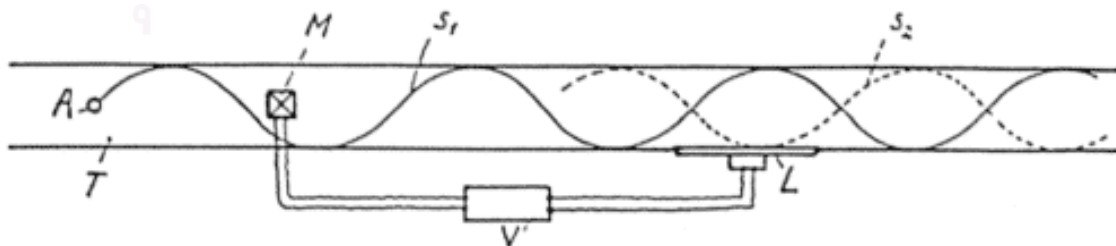
อ้างอิงกระทำที่ต้นทาง (Upstream) ของทางเดินเสียง การหักล้างจะเกิดขึ้นที่ปลายทาง (Downstream) ของทางเดินของเสียงโดยใช้ลำโพง (Loudspeaker)

สำหรับสัญญาณเสียงที่มีย่านความถี่แคบ (Narrowband Noise) เช่น สัญญาณเสียงที่เป็นคาบ (Period) ที่เกิดจากการหมุนของเครื่องจักรกล (Rotational Machinery) การหักล้างไม่จำเป็นต้องใช้ไมโครโฟนในการรับสัญญาณเสียงอ้างอิง โดยทั่วไปมักนิยมใช้ตัวตรวจรู้ (Sensor) จำพวก แทคโคมิเตอร์ (Tachometer) หรือ เอนโคดเดอร์ (Encoder) เนื่องจากสัญญาณเสียงรบกวนที่เป็นคาบมักเกิดขึ้นที่ความถี่ฮาร์โมนิก (Harmonic) ของความถี่การหมุนของเครื่องจักรที่เป็นต้นกำเนิดเสียง การควบคุมระบบในลักษณะเช่นนี้ ระบบควบคุมสามารถที่จะจำลอง (Model) ลักษณะของความถี่ของสัญญาณเสียงรบกวนได้ และสามารถที่จะสร้างเสียงสัญญาณควบคุมขึ้นมาได้

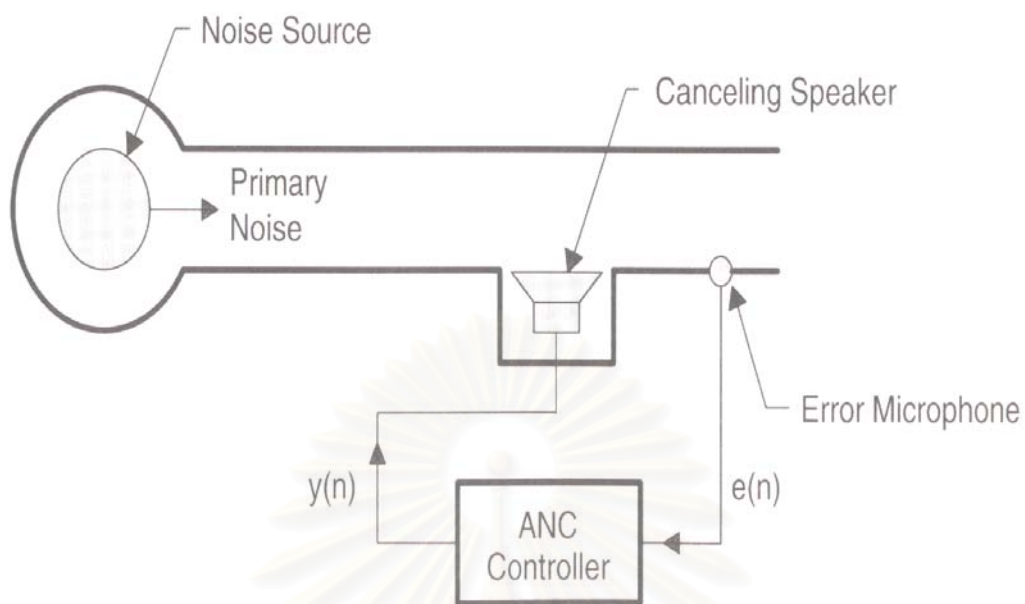
ระบบควบคุมเสียงรบกวนแบบแอกทีฟ (Active Noise Control) สามารถแบ่งตามลักษณะโครงสร้างได้ 4 ชนิด คือ

1. ระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า (Feedforward Control) ดังรูปที่ 3-2
2. ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control) ดังรูปที่ 3-3
3. ระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าชนิดปรับตัวได้ (Adaptive Feedforward Control) ดังรูปที่ 3-4 ก และ 3-4 ข
4. ระบบควบคุมแบบป้อนกลับชนิดปรับตัวได้ (Adaptive Feedback Control) ดังรูปที่ 3-4 ค

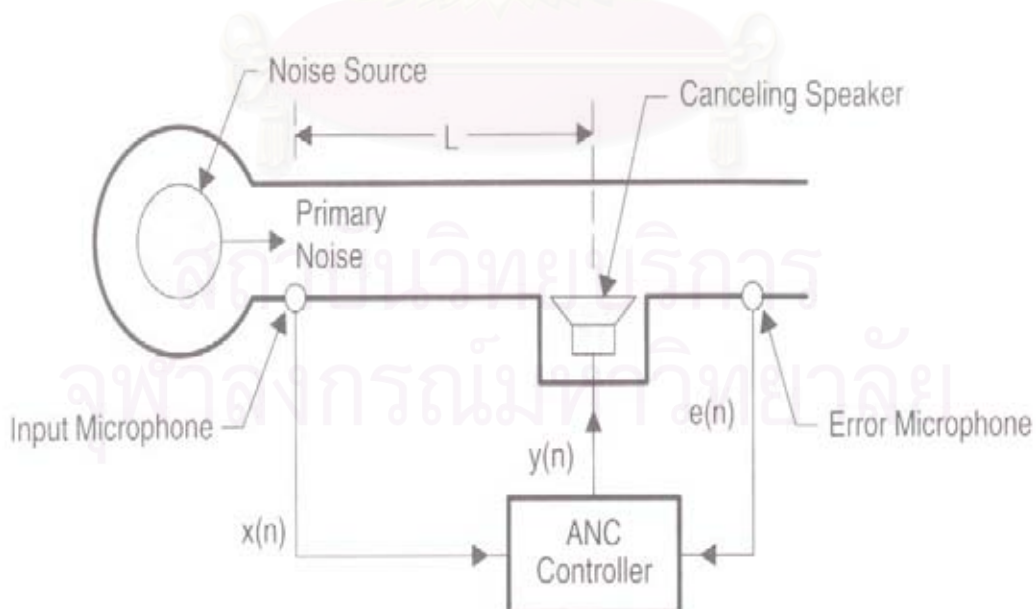
โดยปัจจุบันนิยมใช้ระบบแบบป้อนไปข้างหน้าชนิดปรับตัวได้มากกว่า เนื่องจากประสิทธิภาพในการควบคุมมีมากกว่า โดยสามารถควบคุมสัญญาณได้เกือบทุกชนิด ซึ่งในงานวิจัยฉบับนี้จะกล่าวถึงเฉพาะระบบแบบป้อนไปข้างหน้าชนิดปรับตัวได้ และใช้ไมโครโฟนเป็นตัวรับสัญญาณอ้างอิงเท่านั้น รายละเอียดเพิ่มเติมสามารถหาอ่านได้จาก [1],[2]



รูปที่ 3-2 ระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าโดยใช้ไมโครโฟนเป็นตัวรับสัญญาณอ้างอิง



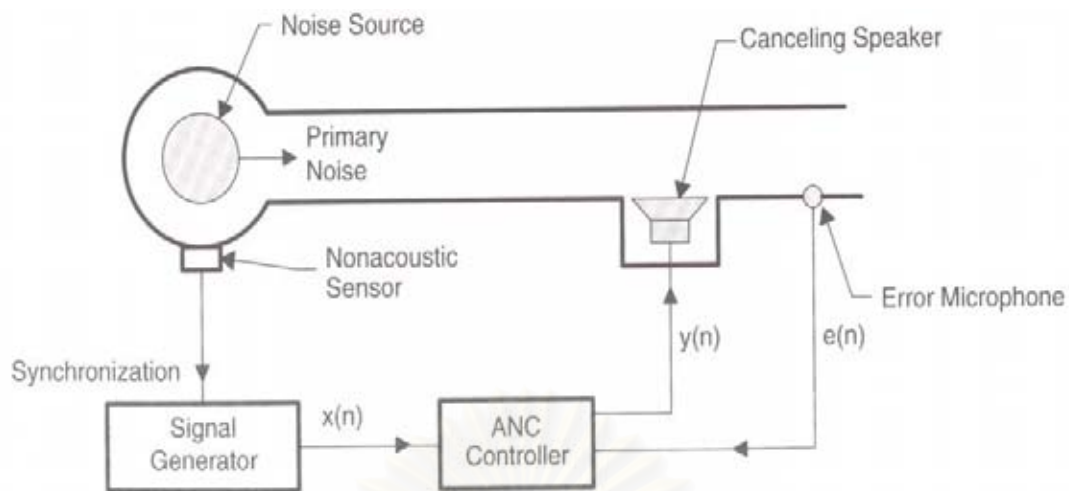
รูปที่ 3-3 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ



รูปที่ 3-4 ก ระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าชนิดปรับตัวได้ (Adaptive Feedforward Control)

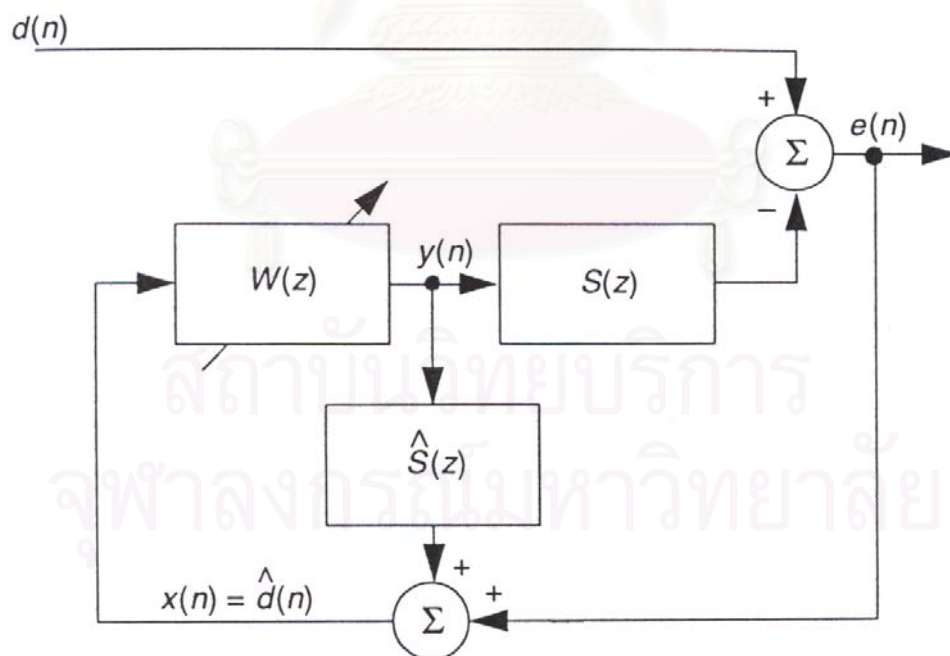
โดยใช้ไมโครโฟนเป็นตัวรับสัญญาณอ้างอิง





รูปที่ 3-4 ข ระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าชนิดปรับตัวได้ (Adaptive Feedforward Control)

โดยไม่ใช่ไมโครโฟนเป็นตัวรับสัญญาณอ้างอิง



รูปที่ 3-4 ค ระบบควบคุมแบบป้อนกลับชนิดปรับตัวได้ (Adaptive Feedback Control)

### 3-3 ระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าชนิดปรับตัวได้สำหรับสัญญาณย่านความถี่กว้าง เพื่อลดเสียงรบกวน (The Broadband Adaptive Feedforward Control System)

ระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าชนิดปรับตัวได้จะสามารถควบคุมได้ง่าย ถ้า ลักษณะทางเดินของเสียงเป็นแบบ 1 มิติ (One Dimensional) เช่นท่อที่มีลักษณะแคบและยาว ดังรูปที่ 3-4 ก และ 3-4 ข สัญญาณอ้างอิง  $x[n]$  จะถูกตรวจวัดโดยไมโครโฟนรับสัญญาณขาเข้า (Input Microphone) ซึ่งจะอยู่ใกล้กันกับแหล่งกำเนิดเสียงรบกวน (Noise Source) โดยตัวควบคุมจะใช้ประโยชน์จากสัญญาณเสียงอ้างอิง (Reference Signal) ที่รับเข้ามา หลังจากนั้นจะนำไปผ่านอัลกอริทึม (Algorithm) เพื่อให้ได้สัญญาณเสียงควบคุม (Control Signal)  $y[n]$  ออกไปที่ลำโพง โดยสัญญาณ  $y[n]$  นั้นจะมีขนาด (Magnitude) เท่ากันกับสัญญาณเสียงรบกวน แต่จะมีเฟส (Phase) ต่างกันประมาณ  $180^\circ$

ไมโครโฟนรับสัญญาณความผิดพลาด (The Error Microphone) จะถูกใช้วัดสัญญาณความผิดพลาด (Error Signal)  $e[n]$  ซึ่งจะถูกนำมาใช้ในการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรอง เพื่อให้มีค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด

### 3-4 โครงสร้างตัวกรองแบบ FIR (Finite Impulse Response)

โดยทั่วไปเราสามารถจำแนกโครงสร้างของตัวกรองออกเป็น 2 ชนิด คือ

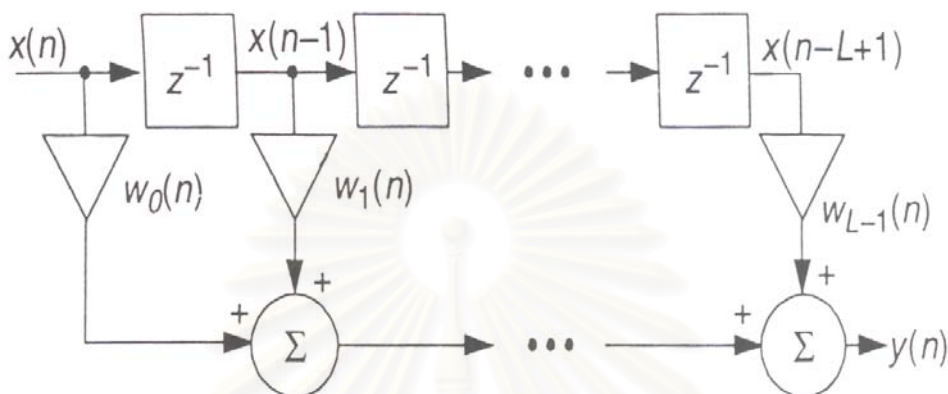
1. FIR (Finite Impulse Response)
2. IIR (Infinite Impulse Response)

ในงานวิจัยฉบับนี้จะใช้โครงสร้างของตัวกรองแบบ FIR เนื่องจากมีเสถียรภาพมากกว่า และการมีคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้น ซึ่งไม่สามารถพบได้ในตัวกรองชนิดอื่น ๆ อีกทั้งยังมีโครงสร้างที่ง่ายกว่า ซึ่งสามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) ให้อยู่ในรูปของ Z – Transform ได้ดังนี้

$$H(z) = \sum_{k=0}^N h[k]z^{-k} = \frac{Y(z)}{X(z)} \quad (3-1)$$

ในโดเมนเวลา (Time Domain) เราสามารถเขียนความสัมพันธ์ของสัญญาณขาเข้า (Input Signal) และ สัญญาณขาออก (Output Signal) ของตัวกรองแบบ FIR ได้ดังนี้

$$y[n] = \sum_{k=0}^N h[k]x[n-k] \quad (3-2)$$



รูปที่ 3-5 โครงสร้างของตัวกรองชนิด FIR

### 3-5 ตัวกรองปรับค่าได้ (Adaptive Filter)

ตัวกรองปรับค่าได้ประกอบด้วย ส่วนหลัก ๆ 2 ส่วน คือ

1. ส่วนของตัวกรองดิจิทัล (Digital Filter)
2. ส่วนของอัลกอริทึมในการปรับตัว (Adaptive Algorithm)

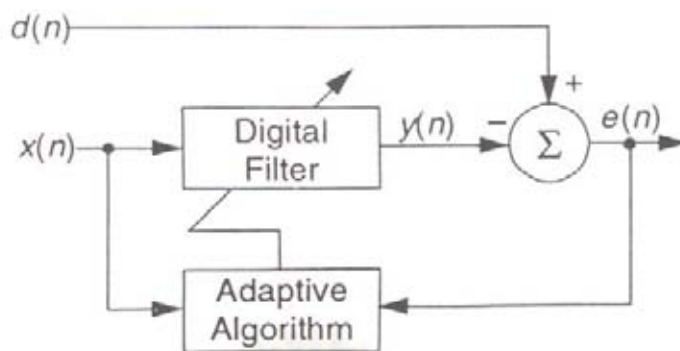
โดยที่  $d[n]$  คือ ผลตอบสนองเป้าหมาย (Desired Response)

$y[n]$  คือ สัญญาณขาออกของตัวกรองดิจิทัล

$x[n]$  คือ สัญญาณขาเข้าของตัวกรองดิจิทัล

$e[n]$  คือ ผลต่างของสัญญาณ  $d[n]$  และ  $y[n]$  หรือสัญญาณความผิดพลาด

ในส่วนของตัวกรองดิจิทัล โครงสร้างของตัวกรองสามารถเป็นได้ทั้ง FIR หรือ IIR ก็ได้ สำหรับ ส่วนของอัลกอริทึมในการปรับต่วนั้น มีหน้าที่ในการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองดิจิทัล เพื่อให้ค่าเฉลี่ยยกกำลังสอง (Mean-Square) ของ  $e[n]$  มีค่าน้อยที่สุด



รูปที่ 3-6 ลักษณะของตัวกรองปรับค่าได้

กำหนดให้

$$X[n] \equiv [x[n] \quad x[n-1] \quad \cdots \quad x[n-L+1]]^T \quad (3-3)$$

$$W[n] \equiv [w_0[n] \quad w_1[n] \quad \cdots \quad w_{L-1}[n]]^T \quad (3-4)$$

โดยที่  $X[n]$  เป็นเวกเตอร์ของสัญญาณขาเข้า ลำดับที่  $n$

$W[n]$  เป็นเวกเตอร์ของสัมประสิทธิ์ตัวกรองลำดับที่  $n$

$T$  เป็นสัญลักษณ์ หมายถึง การทรานสโพส (Transpose)

นำมาคำนวณเพื่อหาค่า  $y[n]$  จะได้

$$y[n] = W^T[n]X[n] = X^T[n]W[n] \quad (3-5)$$

จะได้สัญญาณความผิดพลาด คือ

$$\begin{aligned} e[n] &= d[n] - y[n] \\ &= d[n] - W^T[n]X[n] \end{aligned} \quad (3-6)$$

โดยมีสมมติฐาน คือ  $d[n]$  และ  $x[n]$  เป็นสัญญาณที่มีค่าทางสถิติคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Statistically Stationary)

### 3-5-1 อัลกอริทึมของการปรับตัว (Adaptive Algorithms)

จุดประสงค์ของการปรับตัวคือ เพื่อหาค่าเวกเตอร์สัมประสิทธิ์ที่ทำให้ค่าเฉลี่ยยกกำลังสองของสัญญาณความผิดพลาด (Mean-Square Error) มีค่าน้อยที่สุด

$$\xi [n] \equiv E [e^2 [n]] \quad (3-7)$$

โดยที่  $E [\bullet]$  แทนค่าคาดหวัง (Expected Value) จากสมการ (3-6) จะได้

$$\xi [n] = E[d^2[n]] - 2P^T W[n] + W^T[n] A W[n] \quad (3-8)$$

โดยที่  $P$  คือ เวกเตอร์ Desired-to-Input Cross-Correlation  
 $A$  คือ เมตริกซ์ Autocorrelation

ซึ่งมีค่าจำกัดความดังนี้

$$\begin{aligned} P &\equiv E[d[n]x[n]] \\ &= [r_{dx}[0] \quad r_{dx}[1] \quad \cdots \quad r_{dx}[L-1]]^T \end{aligned} \quad (3-9)$$

โดยที่  $r_{dx}[k] \equiv E[d[n]x[n-k]]$  คือ ฟังก์ชัน Cross-Correlation ระหว่าง  $d[n]$  และ  $x[n]$

$$A \equiv E[x[n]x^T[n]]$$

$$= \begin{bmatrix} r_{xx}[0] & r_{xx}[1] & \cdots & r_{xx}[L-1] \\ r_{xx}[1] & r_{xx}[0] & \cdots & r_{xx}[L-2] \\ \vdots & \cdots & \ddots & \vdots \\ r_{xx}[L-1] & r_{xx}[L-2] & \cdots & r_{xx}[0] \end{bmatrix} \quad (3-10)$$

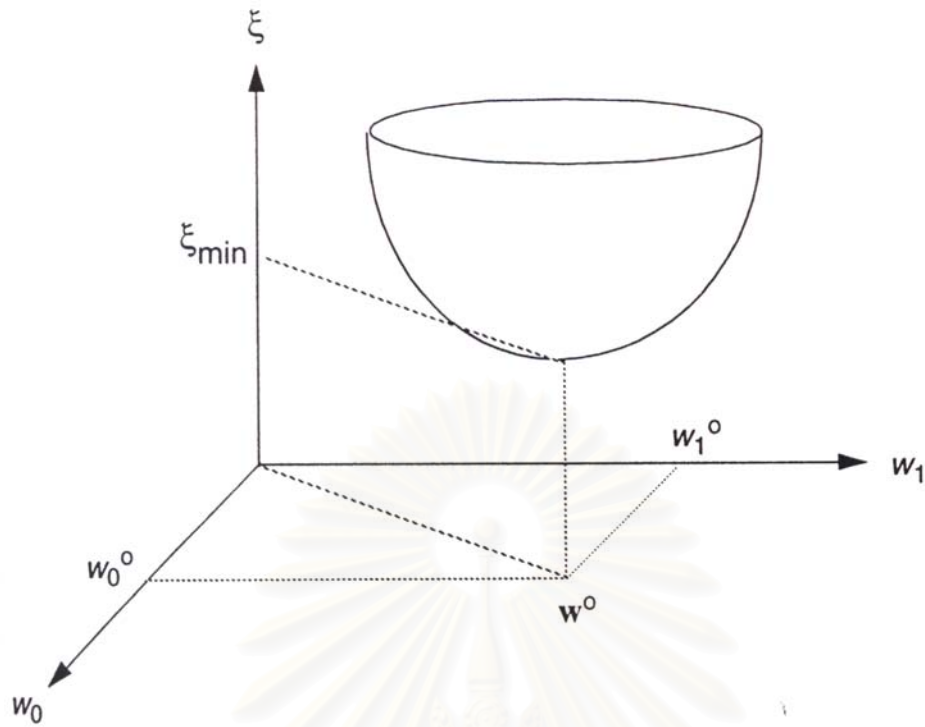
โดยที่  $r_{xx}[k] \equiv E[x[n]x[n-k]]$  คือ ฟังก์ชัน Autocorrelation ของ  $x[n]$

จะเห็นได้ว่าสมการ (3-8) เป็นสมการควอดราติก (Quadratic) ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า MSE (Mean-Square Error) และค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรอง  $w[n]$  ซึ่งจะอยู่ในรูปความสัมพันธ์แบบ  $(L+1)$  มิติ โดย  $L$  เป็นอันดับของตัวกรอง แต่เพื่อให้ง่ายต่อการอธิบายจะขอยกตัวอย่าง กรณี  $L=2$  หรือ ความสัมพันธ์แบบ 3 มิตินี้เอง จะทำให้ได้พื้นผิวดังรูปที่ (3-7) โดย  $W^\circ = [w_0^\circ \quad w_1^\circ]^T$  คือ สัมประสิทธิ์ตัวกรองที่เหมาะสม (Optimal) และ  $\zeta_{\min}$  คือ ค่าเฉลี่ยกำลังสองของสัญญาณความผิดพลาดน้อยที่สุด โดย หาได้จากการหาอนุพันธ์เทียบกับ เวกเตอร์สัมประสิทธิ์  $w[n]$  ในสมการที่ (3-8) แล้วให้เท่ากับศูนย์ จะได้

$$AW^\circ = P \quad (3-11)$$

แต่ในทางปฏิบัติ สัญญาณอาจไม่มีค่าทางสถิติคงที่ (Non stationary) หรือบางครั้ง เมตริกซ์ Autocorrelation อาจมีมิติขนาดใหญ่ ซึ่งทำให้ใช้เวลาในการคำนวณมาก ทำให้สมการ (3-11) ไม่สามารถนำมาใช้ได้จริงในทางปฏิบัติ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3-7 พื้นผิวของ Mean Square Error (MSE) ในกรณี  $L=2$

### 3-5-2 วิธี Steepest Descent

ให้  $\xi[0]$  เป็นค่า Mean Square Error (MSE) ที่เวลา  $n=0$  ซึ่งเกิดจาก  $w[0]$  จะได้จุดบนพื้นผิว คือ  $[w[0], \xi[0]]$  โดยที่ความชัน ณ จุดใด ๆ คือ  $\frac{\partial \xi[n]}{\partial w_i}$  ดังนั้นจะได้เวกเตอร์ความชันของทุกแกน คือ  $\nabla \xi[n]$  ซึ่งแนวความคิดของวิธีนี้ คือการปรับตัวในทิศทางมุ่งเข้าหาจุดต่ำสุด ในลักษณะสัมพันธ์กับจุดเดิม ดังสมการ

$$w[n+1] = w[n] - \frac{\mu}{2} \nabla \xi[n] \quad (3-12)$$

โดยที่  $\mu$  คือ พารามิเตอร์ที่มีผลต่อความเร็วในการปรับตัว และความมีเสถียรภาพ จากสมการ (3-8) จะได้

$$\nabla \xi[n] = -2P + 2Aw[n] \quad (3-13)$$

แทนค่าในสมการ (3-12) จะได้

$$w[n+1] = w[n] + \mu[P - Aw[n]] \quad (3-14)$$

โดยเมื่อ  $w[n]$  อยู่เข้าสู่ค่า  $w^\circ$  นั่นคืออยู่เข้าสู่จุดต่ำสุด จะได้  $\nabla \zeta[n] = 0$  ซึ่งหมายถึง อัลกอริทึมจะหยุดการปรับตัว

### 3-5-3 อัลกอริทึม LMS (Least Mean Square)

จากวิธีของ Steepest Descent ในทางปฏิบัติบางครั้งเราอาจไม่ทราบค่าทางสถิติของสัญญาณ  $x[n]$  และ  $d[n]$  อีกประการหนึ่งก็คือ วิธีนี้ตั้งอยู่บนสมมติฐานที่เราสามารถทราบค่าของเวกเตอร์เกรเดียนต์ (Gradient) ทุกๆรอบของการคำนวณ (Iteration) ดังนั้นจึงไม่สามารถใช้วิธี Steepest Descent ได้โดยตรง ใน ค.ศ. 1970 Widrow [2] ได้คิดค้นวิธีการประมาณค่าเกรเดียนต์ ขึ้นโดย การใช้ ค่า  $e^2[n]$  เป็นค่าประมาณของ MSE (Mean-Square Error) ดังนี้

$$\hat{\zeta}[n] = e^2[n] \quad (3-15)$$

ดังนั้นค่าประมาณของเกรเดียนต์ที่ใช้ในอัลกอริทึม LMS จะหาได้ง่ายกว่าดังนี้ คือ

$$\nabla \hat{\zeta}[n] = 2[\nabla e[n]]e[n] \quad (3-16)$$

เนื่องจาก  $e[n] = d[n] - W^T[n] X[n]$

$$\nabla e[n] = -x[n] \quad (3-17)$$

จากสมการ (3-16) จะได้

$$\nabla \hat{\zeta}[n] = -2 X[n] e[n] \quad (3-18)$$



แทนค่าประมาณของเกรเดียนต์จากสมการ (3-18) ลงในอัลกอริทึม Steepest Descent ในสมการ (3-12) จะได้อัลกอริทึมแบบ LMS (Least Mean Square) ซึ่งมีรูปแบบดังนี้คือ

$$w[n+1] = w[n] + \mu x[n]e[n] \quad (3-19)$$

### 3-6 อัลกอริทึมสำหรับระบบควบคุมเสียงรบกวนแบบแอกทีฟที่มีย่านความถี่กว้าง และ ลักษณะโครงสร้างเป็นแบบป้อนไปข้างหน้าชนิดปรับตัวได้ (Algorithms for Broadband Adaptive Feedforward ANC Systems)

อัลกอริทึมที่เรียบง่ายที่สุดและมีประสิทธิภาพค่อนข้างสูง ที่ใช้ในตัวกรองแบบปรับตัวได้ คือ อัลกอริทึมแบบ LMS (Least Mean Square) โดยงานวิจัยฉบับนี้จะกระทำอยู่บนพื้นฐานของอัลกอริทึมชนิดนี้ แต่จะมีการดัดแปลง (Modifies) เพิ่มเติมให้เหมาะสม

การควบคุมเสียงรบกวนแบบย่านความถี่กว้าง (Broadband) สามารถอธิบายได้ในลักษณะของการทำ System Identification ดังรูปที่ 3-8 ระบบควบคุมจะใช้ ตัวกรองปรับตัวได้ (Adaptive Filter)  $W(z)$  เพื่อที่จะประมาณค่าผลตอบสนอง (Response) ของทางเดินเสียงรบกวน (Acoustic Path)  $P(z)$  ซึ่งอยู่ระหว่างไมโครโฟนรับสัญญาณขาเข้า (Input Microphone) และ ไมโครโฟนรับสัญญาณความผิดพลาด (Error Microphone) สามารถแสดงค่า Z - Transform ของ  $e[n]$  ได้เป็น

$$E(z) = D(z) + Y(z) = X(z)[P(z) + W(z)] \quad (3-20)$$

โดยที่  $E(z)$  = สัญญาณความผิดพลาด  
 $X(z)$  = สัญญาณขาเข้า  
 $Y(z)$  = สัญญาณขาออกของตัวกรองแบบปรับตัวได้

หลังจากที่ตัวกรอง  $W(z)$  ลู่เข้า (Converged) จะได้

$$E(z) = 0 \quad (3-21)$$

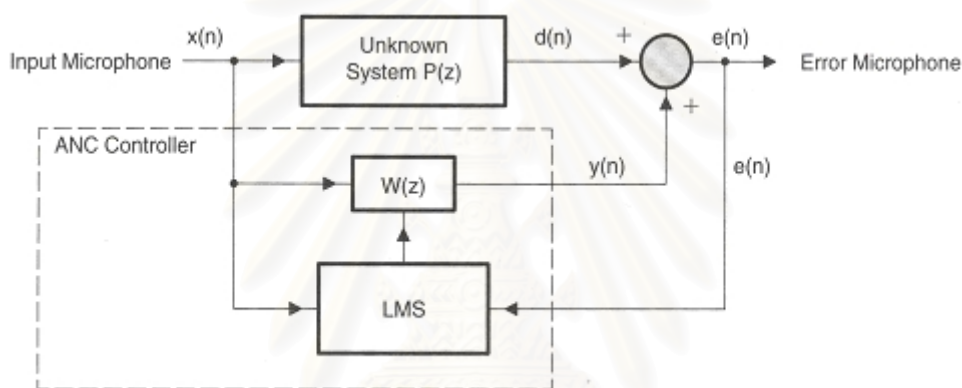
จากสมการ (3-20) จะได้

$$W(z) = -P(z) \quad (3-22)$$

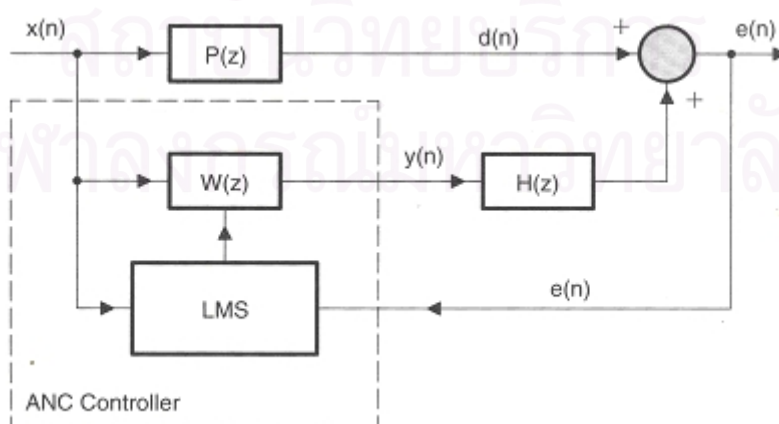
นั่นคือ

$$y[n] = -d[n] \quad (3-23)$$

ดังนั้น สัญญาณขาออกของตัวกรองปรับค่าได้  $y[n]$  จะมีแอมพลิจูด (Amplitude) เท่ากัน แต่มีเฟสต่างกัน  $180^\circ$  กับสัญญาณเสียงรบกวน  $d[n]$  เมื่อ  $d[n]$  และ  $y[n]$  แทรกสอดกัน ผลลัพธ์ คือจะได้สัญญาณความผิดพลาดมีค่าเป็นศูนย์



รูปที่ 3-8 แผนภาพแสดงระบบควบคุมเสียงรบกวนแบบแอกทีฟ



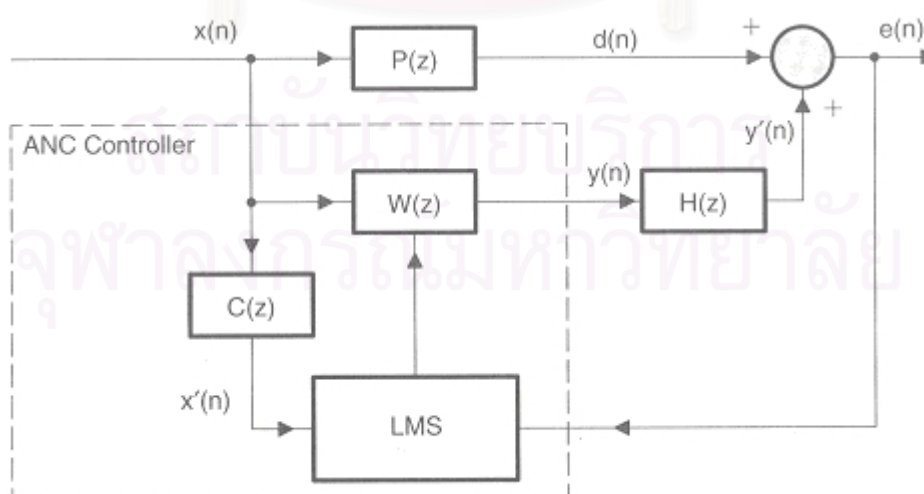
รูปที่ 3-9 ระบบควบคุมเสียงรบกวนแบบแอกทีฟที่รวมส่วนของ Secondary Path

### 3-6-1 ผลกระทบเนื่องจาก Secondary – Path

สัญญาณความผิดพลาด  $e[n]$  ถูกวัดโดยไมโครโฟนรับสัญญาณความผิดพลาด (Error Microphone) ณ ตำแหน่งปลายทาง (Downstream) จุดผลรวม (Summing Junction) ในรูปที่ 3-9 แทนค่าการรวมกันของเสียง หรือ การแทรกสอดกันของเสียงนั่นเอง หลังจากที่ได้รับสัญญาณเสียงรบกวน  $d[n]$  ได้แทรกสอดกับสัญญาณเสียงควบคุม  $y[n]$  แล้ว ตามทฤษฎีแล้ว ไมโครโฟนรับสัญญาณความผิดพลาด ควรจะรับสัญญาณที่เกิดจากการแทรกสอดนี้โดยทันที แต่ในความเป็นจริงแล้ว หลังจากเกิดการแทรกสอดเสียงยังต้องเดินทางต่อไปอีกระยะหนึ่งก่อนที่จะถึงไมโครโฟน ทำให้เกิดความผิดพลาดอันเนื่องมาจากดีเลย์ไทม์ (Delay Time) ขึ้น นอกจากนี้ยังนับรวมถึงผลกระทบอันเนื่องมาจาก ความไม่สม่ำเสมอของผลตอบสนองเชิงความถี่ (Frequency Response) ของลำโพง และไมโครโฟนรับสัญญาณความผิดพลาดอีกด้วย ความผิดพลาดทั้งหมดนี้ถูกนับรวมกันเป็นฟังก์ชันถ่ายโอน  $H(z)$  ดังรูปที่ 3-9

### 3-6-2 อัลกอริทึม FXLMS (Filtered – X Least Mean Square)

ถ้าเรานับรวมถึงผลกระทบของฟังก์ชันถ่ายโอน  $H(z)$  (Secondary-Path Transfer Function) เพื่อให้มั่นใจว่าอัลกอริทึมจะลู่เข้า (Convergence) เราจำเป็นต้องต้องดัดแปลงอัลกอริทึม LMS อีกเล็กน้อย โดยนำสัญญาณขาเข้ามาผ่านตัวกรอง  $C(z)$  (Secondary-Path Estimated Transfer Function) อัลกอริทึมที่ได้จะถูกเรียกว่า Filtered-X LMS (FXLMS) ซึ่งถูกคิดค้นโดย Morgan [3] อัลกอริทึม FXLMS นี้จะสามารถชดเชยผลกระทบ เนื่องจาก Secondary Path ได้ดังรูปที่ 3-10



รูปที่ 3-10 อัลกอริทึมแบบ FXLMS

โดยที่  $y[n]$  เกิดจาก

$$y[n] = \sum_{i=0}^{N-1} w_i[n]x[n-i] \quad (3-24)$$

โดยที่ $w_i[n]$	คือ สัมประสิทธิ์ของตัวกรองปรับค่าได้ $W(z)$ ลำดับที่ $n$
$H(z)$	คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนของ Secondary Path
$P(z)$	คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนของทางเดินเสียงระหว่างไมโครโฟนรับสัญญาณข้างอิง กับ จุดหักล้าง
$C(z)$	คือ ตัวประมาณ (Estimator) ของฟังก์ชันถ่ายโอน Secondary Path
$x[n]$	คือ สัญญาณข้างอิง $X(z)$ ลำดับที่ $n$
$N$	คือ อันดับของตัวกรอง (Order) $W(z)$
$n$	คือ ลำดับที่ของ Samples

อัลกอริทึม FXLMS สามารถคำนวณได้จาก

$$w_i[n+1] = w_i[n] - \mu e[n]x'[n-i] \quad (3-25)$$

โดยที่ $e[n]$	คือ สัญญาณความผิดพลาดลำดับที่ $n$
$x'[n]$	คือ สัญญาณข้างอิง $x[n]$ หลังจากผ่านตัวกรอง $C(z)$
$\mu$	คือ พารามิเตอร์ที่มีผลต่อความเร็วในการลู่เข้า (Step Size of the Algorithm)

$$x'[n] = \sum_{i=0}^{M-1} c_i x[n-i] \quad (3-26)$$

โดยที่ $c_i$	คือ สัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันถ่ายโอน $C(z)$ (Secondary Path Estimated Transfer Function)
$M$	คือ อันดับ (Order) ของตัวกรอง $C(z)$

พารามิเตอร์ของฟังก์ชันถ่ายโอน  $H(z)$  จะเป็นพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า (Unknown Parameter) และเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Time-Varying) เกิดจากหลาย ๆ ปัจจัย อาทิเช่น อายุของลำโพง การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ หรือแม้กระทั่งการไหลของอากาศใน Secondary Path การประมาณค่า

$H(z)$  นั้นจำเป็นต้องมีการ Training โดยวิธี Off-Line Modeling Technique หลังจากจบขั้นตอนการ Training นี้แล้วจะได้  $C(z)$  ซึ่งเป็นค่าประมาณของ ฟังก์ชันถ่ายโอน  $H(z)$  ซึ่งจะคงที่ (Fixed) ตลอดการควบคุม

### 3-6-2-1 การทำ Off-Line Secondary-Path Modeling Technique

การทดลองหาค่าฟังก์ชันถ่ายโอน  $C(z)$  นั้น จะกระทำก่อนกระบวนการควบคุมเสียงรบกวนแบบแอกทีฟ เพื่อให้ได้พารามิเตอร์ของฟังก์ชันถ่ายโอน  $C(z)$  เพื่อใช้ในการควบคุมต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 3-11 ซึ่งมีขั้นตอนต่างๆดังนี้

1. ส่งค่า Sample ของ White noise  $y[n]$  ไปที่ลำโพง และในขณะเดียวกันนี้ก็ส่งไปยังตัวกรอง  $C(z)$  และอัลกอริทึม LMS ด้วย
2. รับค่าผลตอบสนองของ Secondary-Path  $e[n]$  จากไมโครโฟนรับสัญญาณความผิดพลาด (Error Microphone)
3. คำนวณค่าผลตอบสนอง (Response) ของตัวกรองปรับค่าได้  $C(z)$  ได้

$$r[n] = \sum_{i=0}^{M-1} c_i[n]y[n-i] \quad (3-27)$$

โดยที่  $c_i[n]$  คือ สัมประสิทธิ์ตัวที่  $i$  ของตัวกรองปรับค่าได้  $C(z)$  ลำดับที่  $n$   
 $M$  คือ อันดับ (Order) ของตัวกรองปรับค่าได้

4. คำนวณค่าผลต่าง

$$e'[n] = e[n] - r[n] \quad (3-28)$$

5. ปรับค่า (Update) สัมประสิทธิ์ของตัวกรองปรับค่าได้  $C(z)$  โดยใช้อัลกอริทึม LMS

$$c_i[n+1] = c_i[n] + \mu e'[n]y[n-i] \quad (3-29)$$

โดย  $i=0,1,\dots,M-1$

โดยที่  $\mu$  คือ พารามิเตอร์ที่มีผลต่อความเร็วในการลู่เข้า (Step Size of the Algorithm)

การเลือกค่า  $\mu$  ให้เหมาะสมนั้นต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขคือ

$$0 < \mu < \frac{1}{MP_y} \quad (3-30)$$

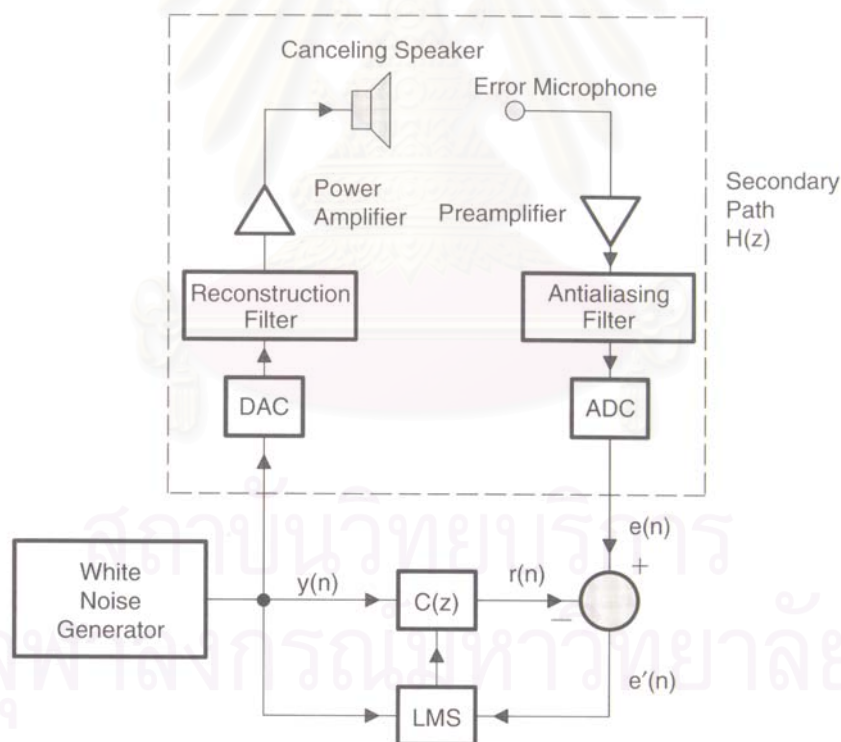
โดยที่  $P_y$  คือ กำลัง (Power) ของสัญญาณ White noise  $y[n]$

ค่า  $\mu$  นี้จะมีผลต่อความเร็วในการลู่เข้า (Convergence) และเสถียรภาพ (Stability) ของระบบ

ถ้าค่า  $\mu$  มาก ระบบจะลู่เร็ว แต่ถ้ามากเกินไปจะไม่เสถียร

ถ้าค่า  $\mu$  น้อย ระบบจะลู่ช้าลง แต่จะเสถียรมากกว่า

6. ทำการ Training ประมาณ 10 วินาที แล้วบันทึกค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองปรับค่าได้  $C(z)$  ไว้เพื่อใช้ในการควบคุมต่อไป



รูปที่ 3-11 การทำ Off-Line Secondary-Path Modeling

หมายเหตุ จากรูปที่ 3-11 กำหนดให้  $H(z)$  เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของทางเดินของเสียงระหว่างลำโพงควบคุม (Canceling Speaker ในรูปที่ 3-11) ถึง ไมโครโฟนรับสัญญาณความผิดพลาด

(Error Microphone) การทำ Off-Line Secondary-Path Modeling นั้นมีจุดประสงค์เพื่อประมาณค่า  $H(z)$  ด้วยตัวกรองปรับค่าได้  $C(z)$  หลังจากได้ค่าประมาณออกมาแล้ว ก็จะสามารถใช้ใช้ในการควบคุมเสียงรบกวนแบบแอกทีฟ ดังรูปที่ 3-10

### 3-6-2-2 อัลกอริทึม Leaky FXLMS

เมื่อตัวกรองปรับค่าได้ถูกนำไปใช้กับ ตัวประมวลผลสัญญาณที่มีจำนวนบิตของข้อมูลจำกัด (Finite Word Lengths) เช่น 16 บิต , 32 บิต การปัดเศษ (Roundoff) จะทำให้เกิดความผิดพลาดเกิดขึ้น ซึ่งมักเรียกว่า Roundoff Noise เมื่อกระบวนการเกิดขึ้นหลายรอบคำสั่ง (Instruction Cycles) จะทำให้ Roundoff Noise มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งเป็นผลให้ค่าสัมประสิทธิ์มีขนาดใหญ่ขึ้นจนเกินค่า Dynamic Range ของตัวประมวลผล ซึ่งมักเรียกกันว่า Overflow ทำให้สูญเสียประสิทธิภาพของระบบไป วิธีที่ใช้แก้ปัญหานี้สามารถทำได้โดยการ เพิ่มพารามิเตอร์  $v$  ซึ่งเป็น Small Forcing Function ซึ่งมีแนวโน้มที่จะปรับค่าสัมประสิทธิ์ ให้ลดลงในทิศทางเข้าหาค่าศูนย์ ซึ่งจะเป็นการชดเชยการเพิ่มขึ้นของ Roundoff Noise นั้นเอง

$$w_i[n+1] = vw_i[n] - \mu e[n]x'[n-i] \quad (3-31)$$

โดยที่  $i = 0, 1, \dots, N-1$

$v$  คือ Leaky Factor ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 1 เพียงเล็กน้อย เช่น 0.9999

### 3-6-3 ผลกระทบของเสียงย้อนกลับและวิธีแก้ไข (Acoustic Feedback Effects and Solutions)

จากรูปที่ 3-2 จะเห็นได้ว่าเสียงต้าน (Antinoise) จากลำโพง นอกจากจะทำหน้าที่หักล้าง (Cancel Noise) เสียงรบกวนแล้ว มันยังเคลื่อนที่กลับไปยังไมโครโฟนรับสัญญาณขาเข้า (Input Microphone) ซึ่งผลลัพธ์ทำให้สัญญาณอ้างอิง (Reference Signal)  $x[n]$  มีการปนเปื้อน (Contaminated) กับเสียงควบคุมที่ออกมาจากลำโพง นอกจากจะทำให้ได้สัญญาณอ้างอิงที่ไม่ถูกต้องแล้ว ยังส่งผลให้เกิดโพล (Poles) ขึ้นในระบบอีกด้วย ทำให้ระบบไม่มีเสถียรภาพ (Instability) วิธีแก้ไขทำได้หลายวิธี แต่ในที่นี้จะยกตัวอย่างเฉพาะวิธีที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เท่านั้น คือ การใช้สัญญาณชดเชยที่ได้จากการผ่านตัวกรองชดเชย (Compensating Filter) โดยที่สัมประสิทธิ์ของตัวกรองหาได้จากการทำ Off-Line Modeling Technique จากรูปที่ 3-12 จะเห็นได้ว่า ตัวกรอง  $D(z)$  เป็นค่าประมาณของฟังก์ชันถ่ายโอน  $F(z)$  (Feedback Path) ตัวกรอง  $D(z)$  จะทำหน้าที่ประมาณเสียงย้อนกลับ เพื่อลบออกจากสัญญาณขาเข้าที่ถูกเจือปน ผลลัพธ์ที่

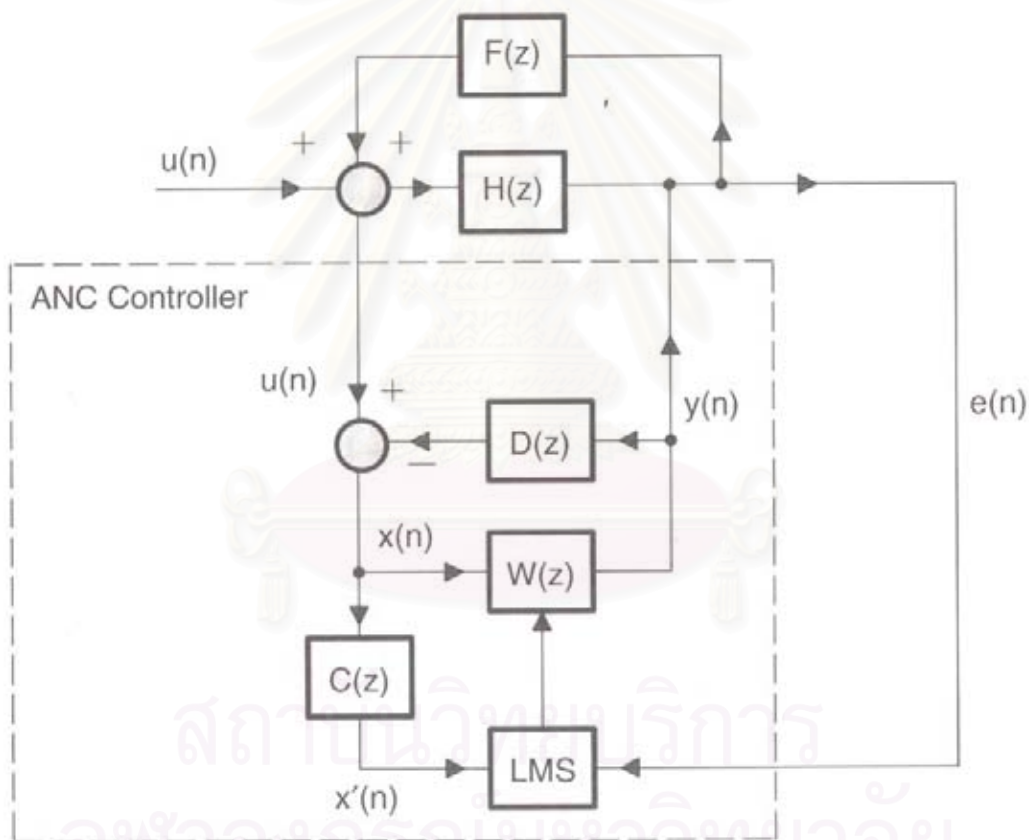
ได้ จะทำให้สัญญาณขาเข้ามีความถูกต้องมากขึ้น อัลกอริทึมของ FBFXLMS จะเหมือนกับ FXLMS เกือบทุกประการ ยกเว้นแต่มีการเพิ่มการคำนวณในส่วนของการป้อนกลับดังต่อไปนี้

$$x[n] = u[n] - \sum_{i=1}^L d_i y[n-i] \quad (3-32)$$

โดยที่  $u[n]$  คือ สัญญาณจากไมโครโฟนขาเข้า (Input Microphone)

$d_i$  คือ สัมประสิทธิ์ตัวที่  $i$  ของตัวกรอง  $D(z)$

$L$  คือ อันดับของตัวกรอง  $D(z)$



รูปที่ 3-12 ระบบควบคุมที่ใช้อัลกอริทึม FBFXLMS ที่มีการกำจัดผลของเสียงย้อนกลับ

หมายเหตุ ในกรณีที่เราสามารถประมาณค่า  $D(z)$  ได้ถูกต้องใกล้เคียง  $F(z)$  มาก เสียงย้อนกลับ (Acoustic Feedback) ก็จะถูกกำจัดไปได้มากจนเข้าใกล้ศูนย์



### 3-6-3-1 การทำ Off-Line Modeling of Secondary and Feedback

#### Paths

การทำ Training ใน FBFXLMS นี้จะคล้ายกับ FXLMS จะต่างที่เพิ่มส่วนของ Feedback Path เข้ามา ดังแสดงในรูปที่ 3-13 ซึ่งจะมีขั้นตอนดังนี้

1. สร้างสัญญาณ Whitenoise  $y[n]$  ขึ้นมาเพื่อส่งไปยังลำโพง ในขณะเดียวกันก็ส่งไปยังตัวกรอง  $C(z)$  และ  $D(z)$  ด้วย เช่นเดียวกัน  $y[n]$  ก็จะถูกส่งไปยังอัลกอริทึม LMS ด้วย เพื่อปรับค่า (Update) สัมประสิทธิ์ของตัวกรอง  $C(z)$  และ  $D(z)$

2. รับค่า  $x[n]$  จากไมโครโฟนขาเข้า (Input Microphone) พร้อมกับรับค่า  $e[n]$  จากไมโครโฟนรับสัญญาณความผิดพลาด (Error Microphone)

3. คำนวณค่า  $e'[n]$  และ  $f[n]$  ได้จาก

$$e'[n] = e[n] - \sum_{i=0}^{M-1} c_i[n]y[n-i] \quad (3-33)$$

และ

$$f[n] = x[n] - \sum_{j=0}^{L-1} d_j[n]y[n-j] \quad (3-34)$$

4. ปรับค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองปรับค่าได้  $C(z)$  และ  $D(z)$  โดยใช้อัลกอริทึม LMS

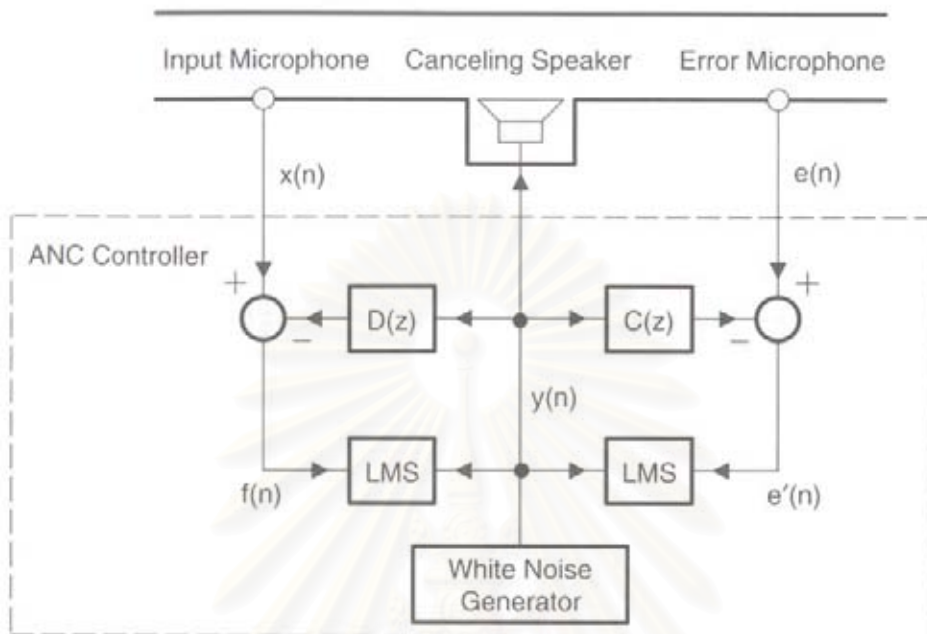
$$c_i[n+1] = c_i[n] + \mu e'[n]y[n-i] \quad (3-35)$$

โดยที่  $i=0, 1, \dots, M-1$  และ

$$d_j[n+1] = d_j[n] + \mu f[n]y[n-j] \quad (3-36)$$

โดยที่  $j=0, 1, \dots, L-1$

5. ทำการ Training ประมาณ 10วินาที แล้วบันทึกค่าของสัมประสิทธิ์ตัวกรอง  $C(z)$  และ  $D(z)$  เพื่อใช้ในอัลกอริทึม FBFXLMS ต่อไป



รูปที่ 3-13 การทำ Off-Line Modeling เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันถ่ายโอนในส่วนของ Secondary-Path และ Feedback Path

### 3-6-3-2 ขั้นตอนการใช้อัลกอริทึม FBFXLMS

1. รับค่า  $u[n]$  และ  $e[n]$  ไมโครโฟนรับสัญญาณขาเข้า (Input Microphone) และ ไมโครโฟนรับสัญญาณความผิดพลาด (Error Microphone)

2. คำนวณค่า  $x[n]$  จาก

$$x[n] = u[n] - \sum_{j=0}^{L-1} d_j y[n-j] \quad (3-37)$$

3. คำนวณค่าสัญญาณเสียงควบคุม  $y[n]$  ได้จาก

$$y[n] = \sum_{i=0}^{N-1} w_i[n]x[n-i] \quad (3-38)$$

โดยที่  $w_i[n]$  คือ สัมประสิทธิ์ของตัวกรองปรับค่าได้  $W(z)$  ลำดับที่  $n$   
 $N$  คือ อันดับ (Order) ของตัวกรอง  $W(z)$

4. ส่งค่า  $y[n]$  ไปที่ลำโพง

5. คำนวณค่า  $x'[n]$  ได้จาก

$$x'[n] = \sum_{i=0}^{M-1} c_i x[n-i] \quad (3-39)$$

6. ปรับค่า (Update) สัมประสิทธิ์ของตัวกรองปรับค่าได้  $W(z)$  โดยใช้อัลกอริทึม FMLMS

$$w_i[n+1] = w_i[n] + \mu e[n]x'[n-i] \quad (3-40)$$

โดยที่  $i = 0, 1, \dots, N-1$

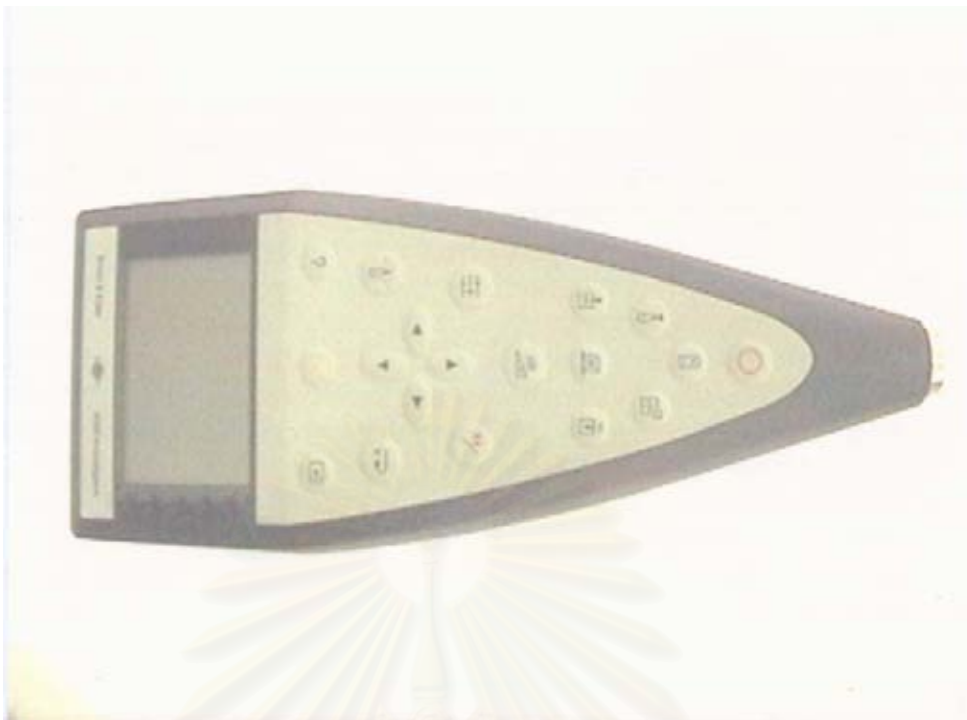
สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์ที่สำคัญที่ใช้ในการทดลองมีรายการดังต่อไปนี้

1. อุปกรณ์วัดระดับเสียง (Sound Level Meter) ของบริษัท Bruel & Kjaer รุ่น 2260 Investigator จำนวน 1 เครื่อง
2. ไมโครโฟนชนิดคอนเดนเซอร์ (Condenser Microphone) มีย่านความถี่ที่ใช้งานได้ดีในช่วง 50 – 18000 Hz จำนวน 2 ตัว
3. ลำโพงชนิดขดลวดเคลื่อนที่ (Moving coil) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว มีย่านความถี่ในช่วง 60 – 10000 Hz ของบริษัท Sony จำนวน 2 ตัว
4. อุปกรณ์ขยายสัญญาณภาคต้น (Pre-Amplifier) ของบริษัท Toshiba รุ่น TVD-926K และของบริษัท Amorn รุ่น DK-688 รวม 2 เครื่อง
5. อุปกรณ์ขยายสัญญาณภาคกำลัง (Power Amplifier) ของบริษัท Sansui รุ่น Stereo Integrated Amplifier A-2000 จำนวน 1 เครื่อง
6. อุปกรณ์กรองความถี่แบบแอนาล็อก (Analog Filter) ชนิด 2 ช่องสัญญาณ (Channels) ของบริษัท Sansui รุ่น Stereo Graphic Equalizer จำนวน 1 เครื่อง
7. ชุดควบคุมเป็นตัวประมวลผลสัญญาณแบบดิจิทัล (DSP) ของบริษัท Texas Instrument รุ่น TMS320c6701 EVM จำนวน 1 เครื่อง
8. คอมพิวเตอร์สำหรับติดตั้งตัวประมวลผลสัญญาณแบบดิจิทัล และใช้สำหรับตรวจสอบโปรแกรม (Debugger) จำนวน 2 เครื่อง
9. อุปกรณ์กำเนิดสัญญาณ (Signal Generator) ของบริษัท Crotech รุ่น 4950 จำนวน 1 เครื่อง
10. ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) ของบริษัท Tektronix รุ่น TDS 210 จำนวน 2 เครื่อง
11. อุปกรณ์วิเคราะห์ความถี่ FFT (Fast Fourier Transform Analyser) และออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) ได้จากการประยุกต์ใช้ตัวประมวลผลสัญญาณแบบดิจิทัล ของบริษัท Texas Instrument รุ่น TMS320c31 DSK จำนวน 1 เครื่อง
12. ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ใช้สำหรับกำเนิดสัญญาณ ชื่อ Cool Edit Pro
13. ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ที่ใช้ติดต่อกับชุดควบคุม ชื่อ Code Composer Studio V 2.0



รูปที่ 4-1 แสดงเครื่องวัดระดับเสียง (Sound Level Meter) ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 4-2 ไมโครโฟนชนิดคอนเดนเซอร์ (Condenser Microphone) ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 4-3 ลำโพงที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 4-4 เครื่องขยายสัญญาณภาคกำลัง (Power Amplifier)



รูปที่ 4-5 ก เครื่องขยายสัญญาณภาคต้น (Pre Amplifier) ของบริษัท Toshiba



รูปที่ 4-5 ข เครื่องขยายสัญญาณภาคต้น (Pre Amplifier) ของบริษัท Amorn

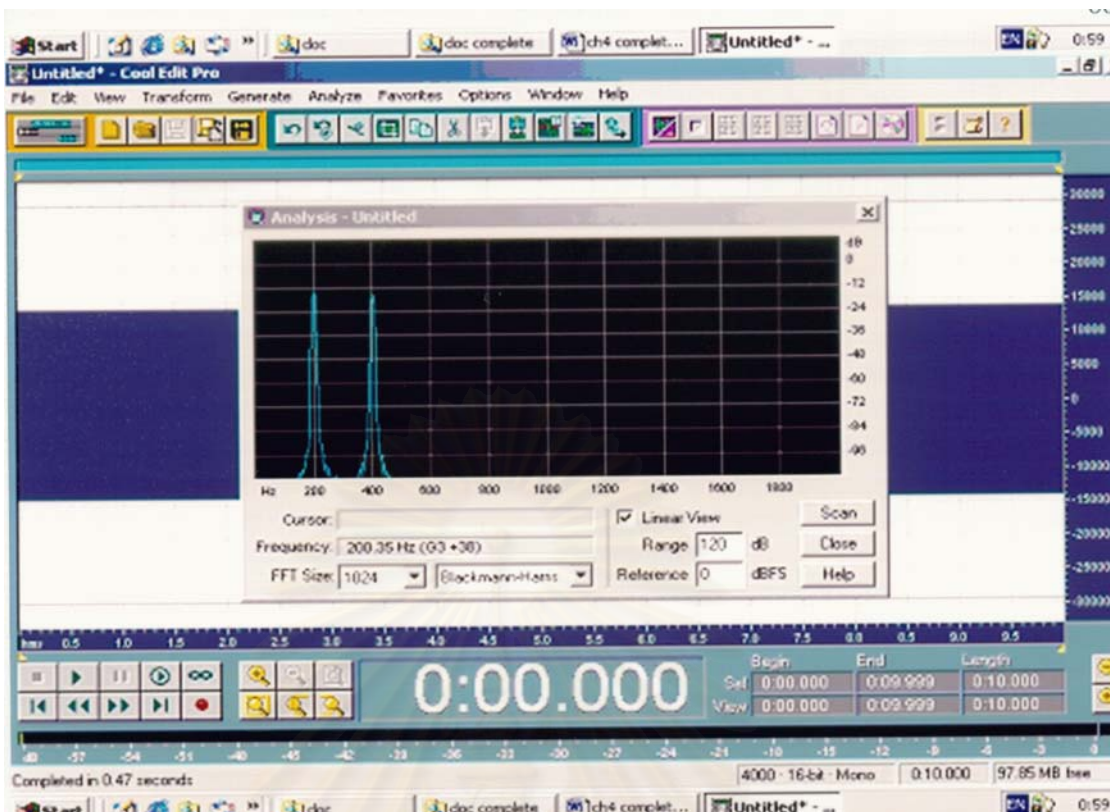


รูปที่ 4-6 เครื่องกรองความถี่แบบแอนะล็อก ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 4-7 เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Signal Generator) ของบริษัท Crotech รุ่น 4950

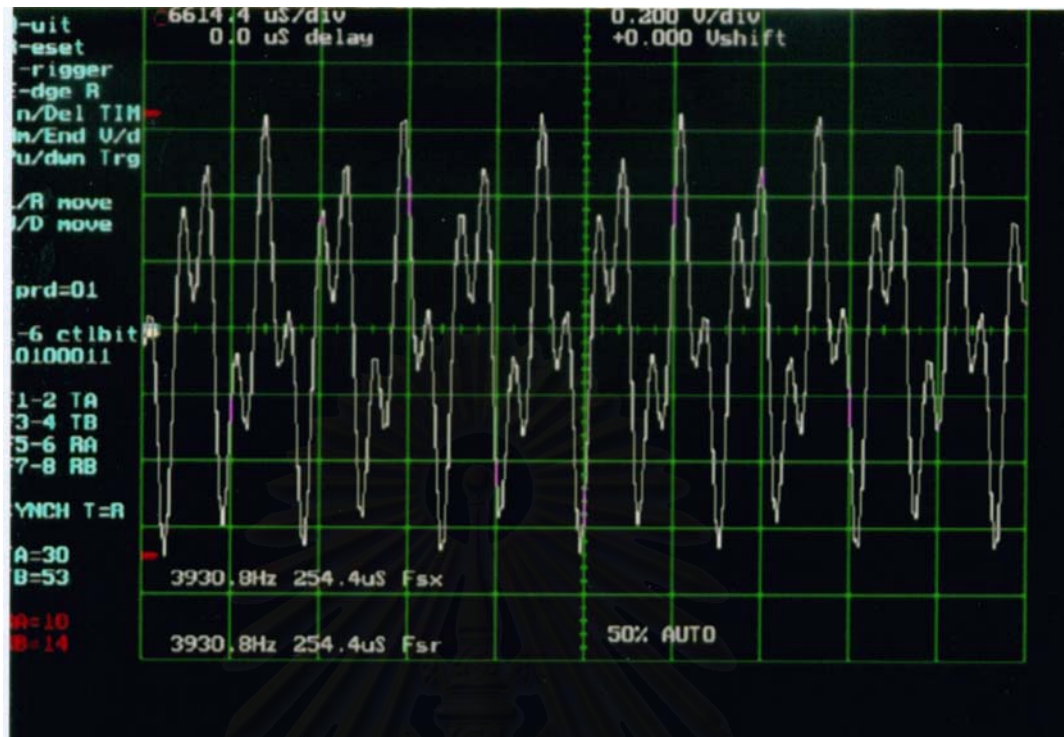




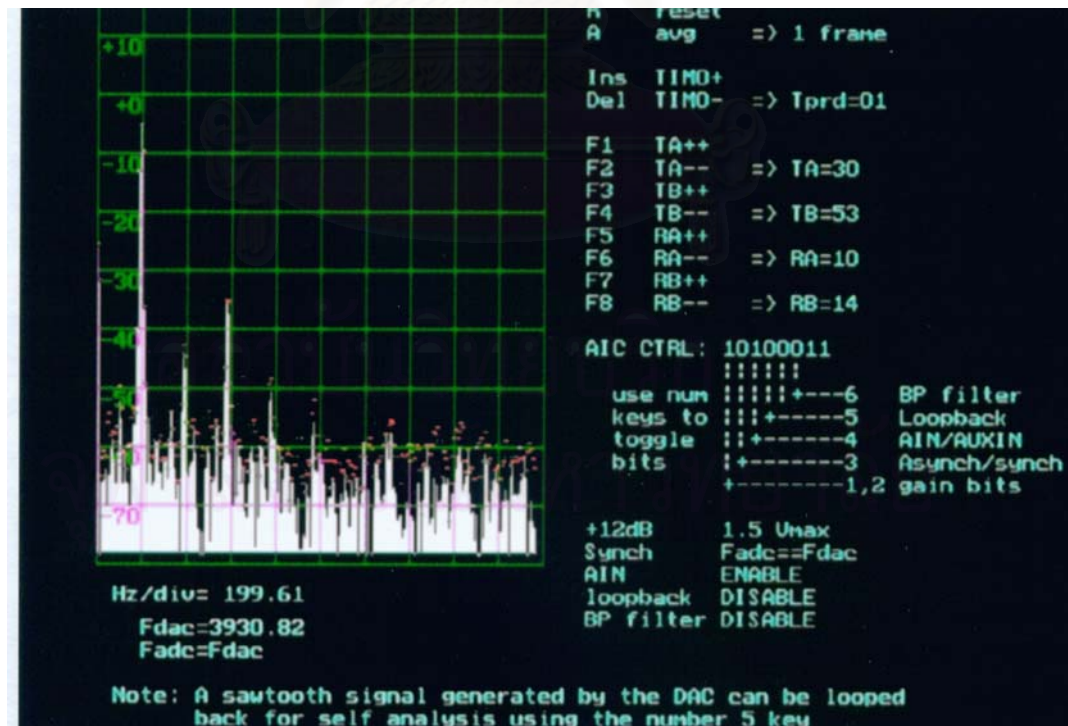
รูปที่ 4-8 ซอฟต์แวร์ที่ใช้สำหรับกำเนิดสัญญาณ ชื่อ Cool Edit Pro



รูปที่ 4-9 แสดง Oscilloscope ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 4-10 ก ออสซิลโลสโคปที่ได้จากการประยุกต์ใช้ TMS320c31 DSK



รูปที่ 4-10 ข เครื่องวิเคราะห์ความถี่ FFT ที่ได้จากการประยุกต์ใช้ TMS320c31 DSK



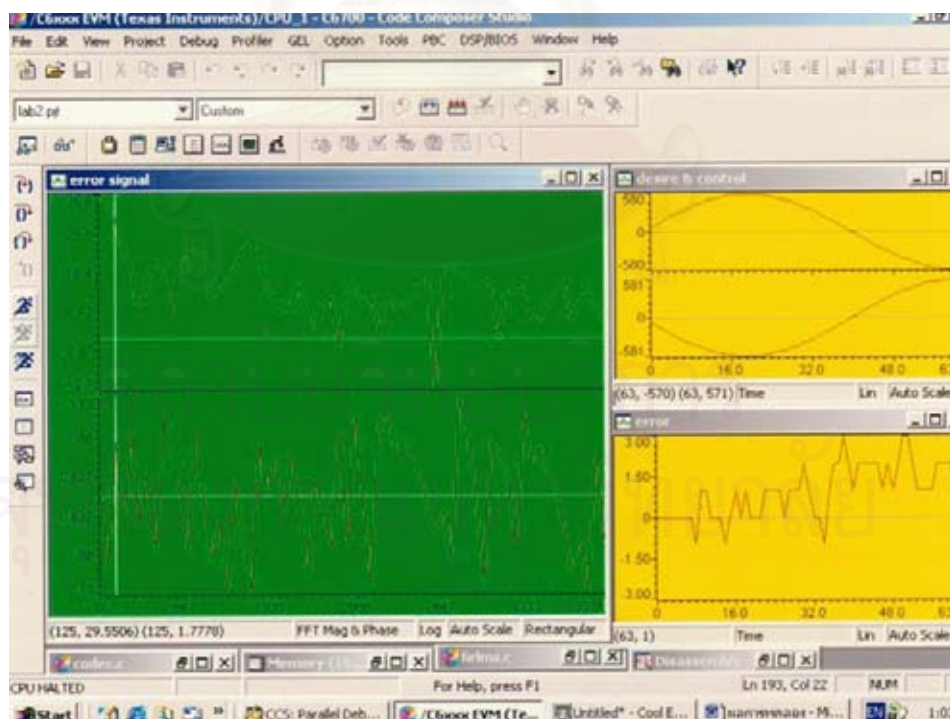
รูปที่ 4-10 ค ตัวประมวลผลสัญญาณเชิงดิจิทัลรุ่น TMS320c31 DSK



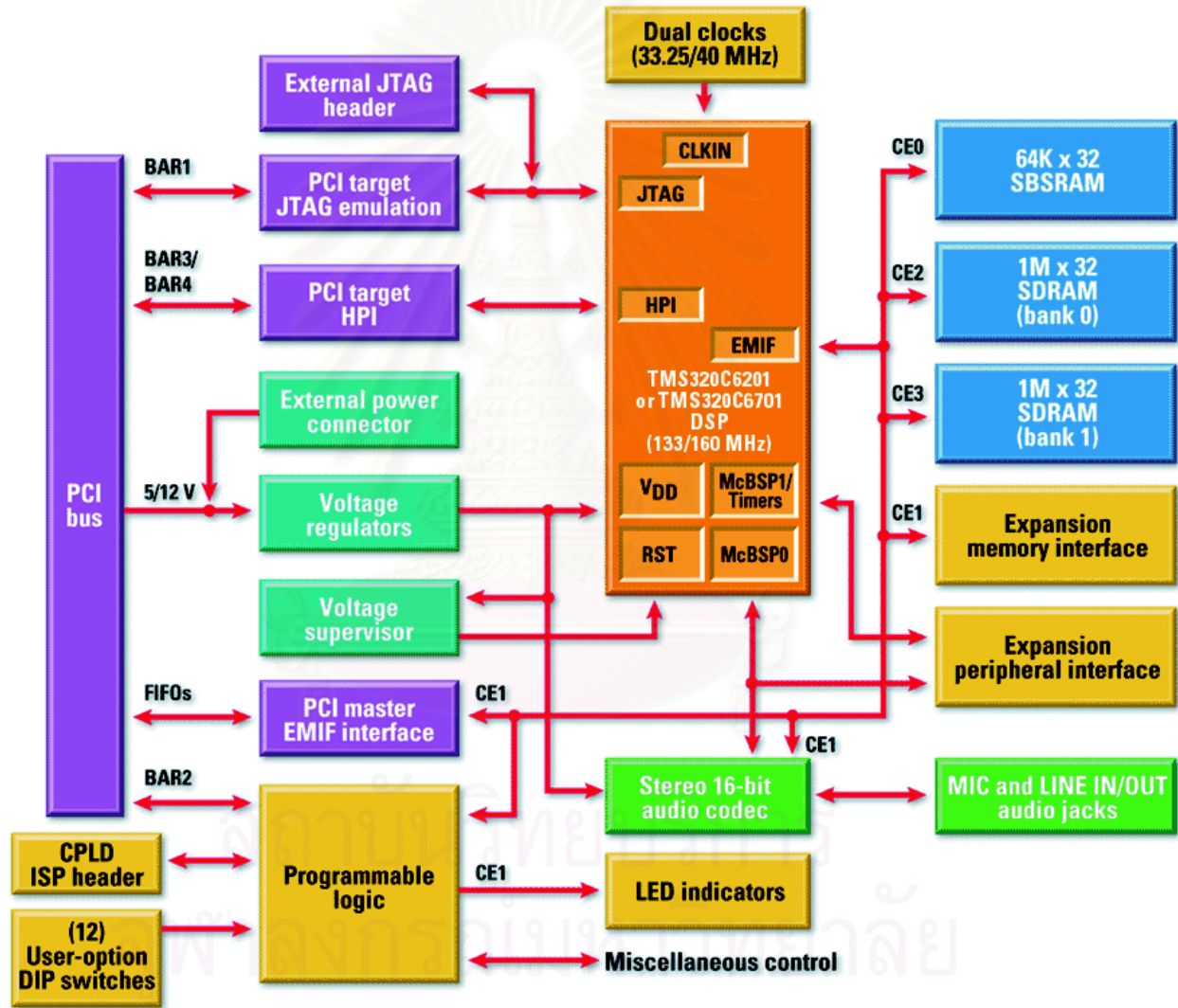
รูปที่ 4-11 ก ตัวประมวลผลสัญญาณเชิงดิจิทัล (DSP Chip) รุ่น TMS320c6701



รูปที่ 4-11 ข ชุดควบคุมที่ใช้ในการทดลอง รุ่น TMS320c6701 EVM ประกอบไปด้วย DSP chip ตัวแปลงสัญญาณ A/D D/A หน่วยความจำ พอร์ตเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์



รูปที่ 4-11 ค ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการควบคุม รุ่น Code Composer Studio V2.0 ประกอบด้วย ส่วนของตัวแปลภาษา (Compiler) ส่วนแสดงผล (Display) และแก้ไขโปรแกรม (Debugger)

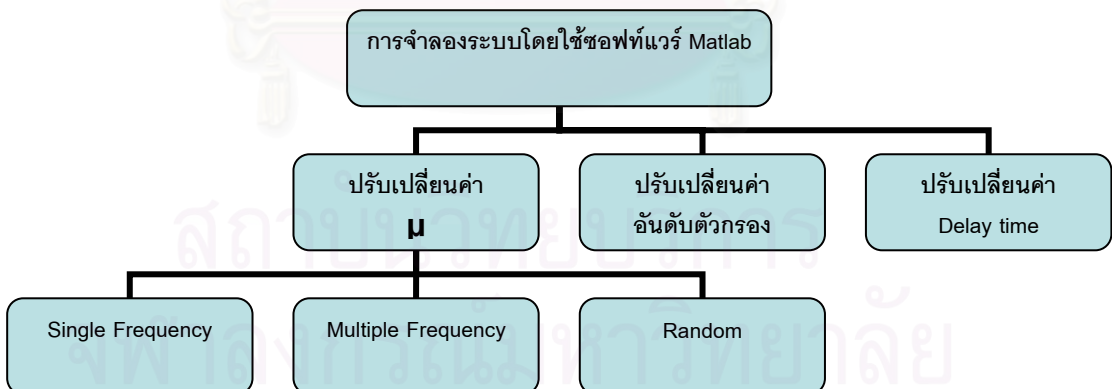


## บทที่ 5

### การจำลองระบบโดยใช้ซอฟต์แวร์ Matlab

การทดลองในบทนี้เป็นการจำลองระบบจริงโดยใช้ซอฟต์แวร์ Matlab ที่มีประสิทธิภาพสูงทำให้สามารถเข้าใจอัลกอริทึม และวิเคราะห์ผลลัพธ์ได้ดีกว่า โดยในการจำลองระบบนี้จะจำแนกการทดลองออกได้เป็น 3 การทดลองย่อย คือ

- 5.1 ทำการเปลี่ยนแปลงเสียงรบกวน (Noise Source) หลากๆแบบ ทั้งความถี่เดี่ยว (Pure Tone) หรือ หลายความถี่ไปจนกระทั่ง สัญญาณแบบแรนดอม (Random Signal) และยังมีการเปรียบเทียบถึงผลลัพธ์ในการใช้ค่า  $\mu$  (Step Size) ที่แตกต่างกันอีกด้วย
- 5.2 ทำการปรับเปลี่ยนค่าของอันดับตัวกรอง เพื่อสังเกตพฤติกรรมของระบบ
- 5.3 ทำการเพิ่มในส่วนของ Delay Time ระหว่างจุดหักล้างกันของเสียง และไม่โครโฟนรับสัญญาณความผิดพลาด เพื่อจำลองระบบให้เหมือนกับระบบจริงในทางปฏิบัติ



รูปที่ 5-1 ก แผนผังแสดงการทดลองทั้งหมดในบทที่ 5

### 5-1 ขั้นตอนการจำลองระบบ

1. ใช้โปรแกรมย่อย Simulink ใน Matlab ทำการจำลองระบบดังแสดงในรูปแบบที่ 5-1 ข และ 5-1 ค
2. ตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่นค่า  $\mu$  (Step Size) รวมถึงลักษณะของสัญญาณรบกวน (Noise Source)
3. ทำการ Run ระบบตามเวลาที่ได้ตั้งไว้
4. พล็อตกราฟเพื่อดูผลการทดลอง
5. ปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ที่สนใจดูพฤติกรรม แล้วทำซ้ำในขั้นตอนที่ 3

#### หมายเหตุ

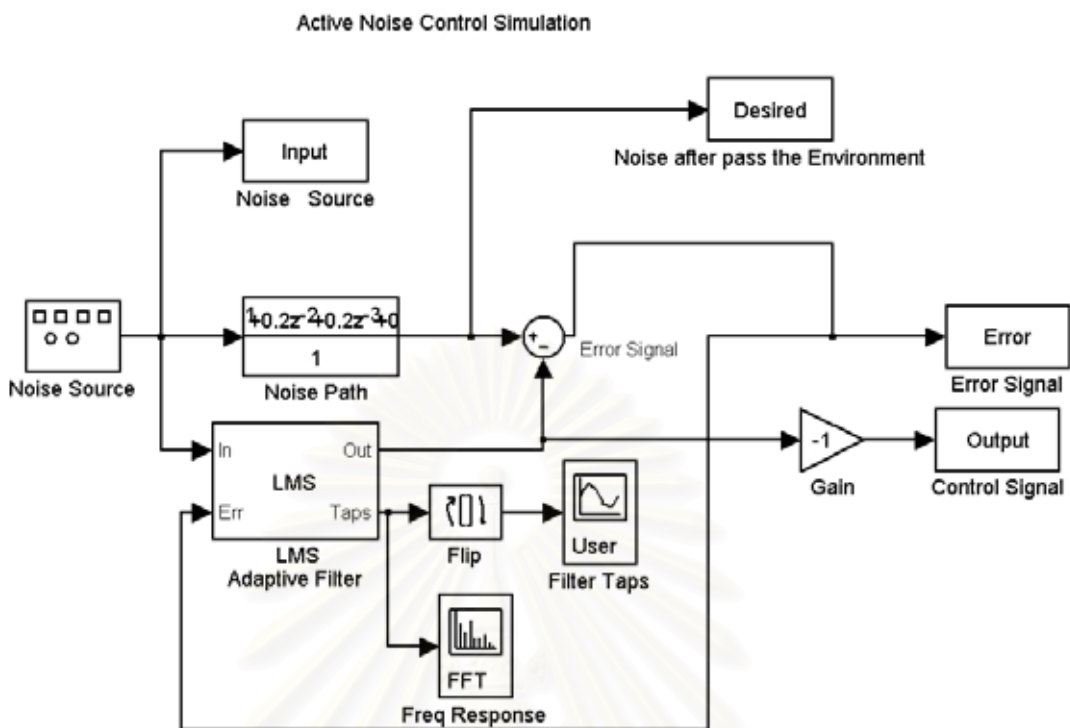
ในการทดลองต่อไปนี้จะขอใช้คำว่า

ตัวกรองปรับค่าได้ แทน LMS Adaptive Filter ในรูปที่ 5-1

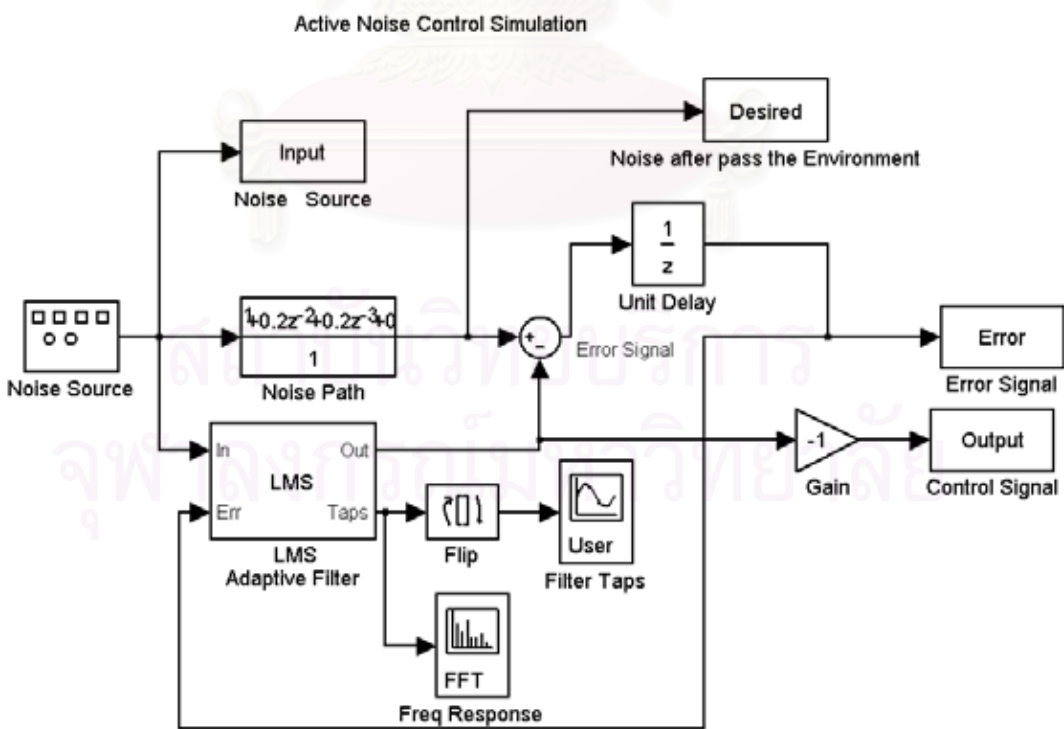
ตัวกรองจำลองทางเดินของเสียง แทน Noise Path ในรูปที่ 5-1

Noise Desired แทน Noise after pass the environment ในรูปที่ 5-1

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5-1 ข แผนภาพการทดลองย่อยที่ 5.1 โดยใช้โปรแกรมย่อย Simulink



รูปที่ 5-1 ค แผนภาพการทดลองย่อยที่ 5.3 โดยใช้โปรแกรมย่อย Simulink โดยได้เพิ่มส่วนของ Delay time ในการรับสัญญาณผิดพลาด



## 5-2 ผลการทดลอง

**การทดลองที่ 5.1** ทำการเปลี่ยนแปลงเสียงรบกวน (Noise Source) หลายๆแบบ ทั้งความถี่เดียว (Pure Tone) หรือ หลายความถี่ ไปจนกระทั่ง สัญญาณแบบแรนดอม (Random Signal) ในการทดลองย่อย ยังมีการเปรียบเทียบถึงผลลัพธ์ในการใช้ค่า  $\mu$  (Step Size) ที่แตกต่างกันด้วย

**การทดลองย่อยที่ 5.1.1** ทำการจำลองระบบจริงด้วยระบบดังรูปที่ 5-1 ข

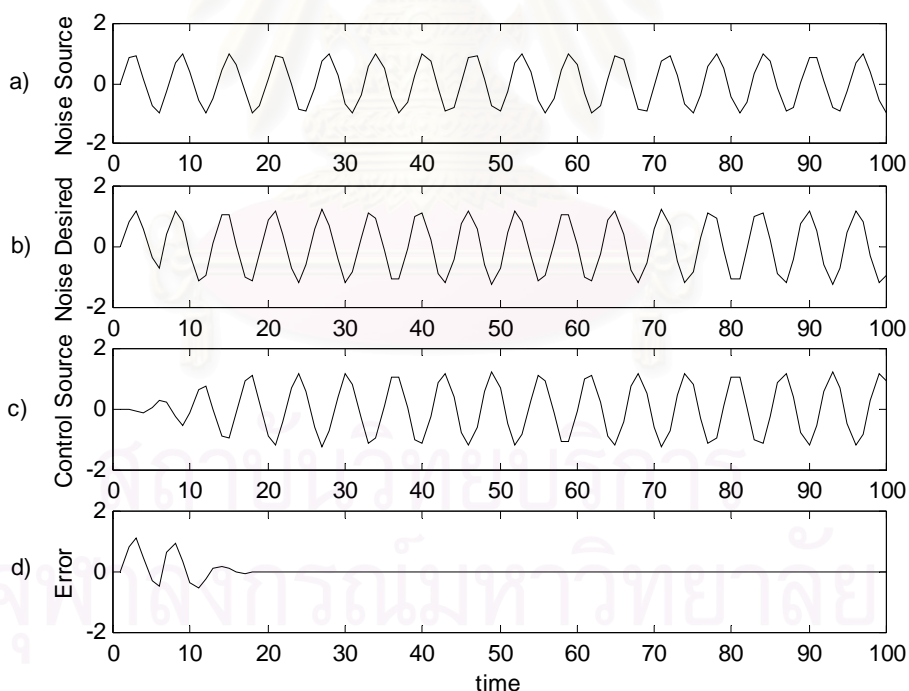
เป็นเวลา = 100 Samples

ใช้แหล่งกำเนิดเสียงรูป Sine ความถี่ 1 rad/sec

เลือกใช้อันดับ (Order) ของตัวกรองปรับค่าได้ = 31

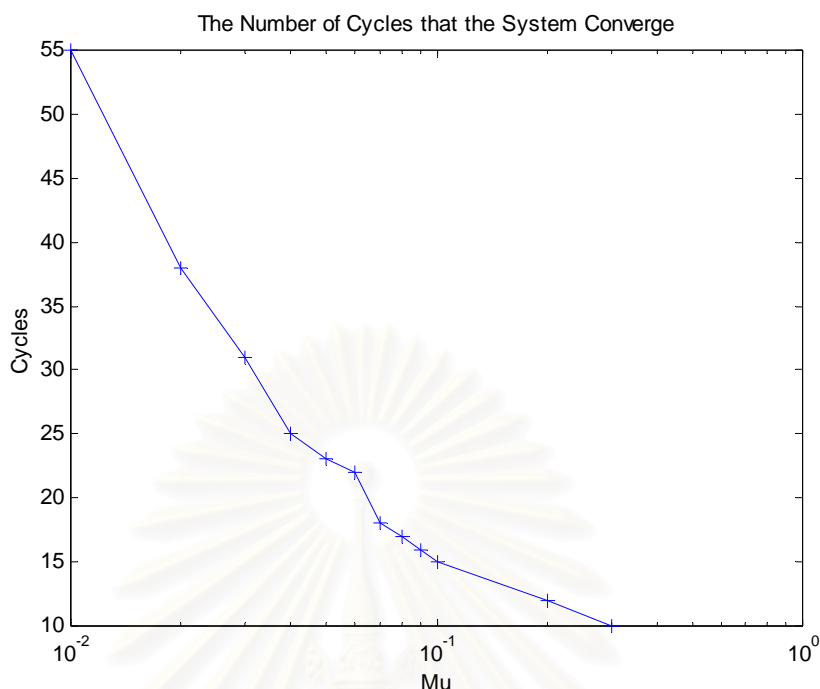
ให้อันดับของตัวกรองจำลองทางเดินของเสียง = 5

**หมายเหตุ** การเลือกใช้อันดับของตัวกรองปรับค่าได้ ในทางปฏิบัตินิยมใช้จำนวนในรูปแบบของ  $2^n - 1$  โดย  $n$  เป็นจำนวนเต็มบวกใดๆ ในการทดลองย่อยนี้จึงสุ่มใช้อันดับ = 31



รูปที่ 5-2 ก ตัวอย่างผลลัพธ์จากการทดลองย่อยที่ 5.1.1 โดยใช้  $\mu = 0.08$

- แสดงให้เห็นถึงลักษณะของสัญญาณ Sine ณ แหล่งกำเนิดเสียง
- แสดงให้เห็นถึงสัญญาณ Sine หลังจากเดินทางผ่านสิ่งแวดล้อมมายังจุดหักล้าง
- แสดงให้เห็นถึงสัญญาณควบคุม ณ จุดหักล้าง
- สัญญาณความผิดพลาด ณ จุดหักล้าง



รูปที่ 5-2 ข กราฟจากผลการทดลองย่อยที่ 5.1.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\mu$  และจำนวนรอบคำสั่ง (Cycles) ที่ระบบควบคุม ใช้ในการทำให้สัญญาณความผิดพลาดลู่เข้าสู่ค่าศูนย์ โดยในแกน X เป็นสเกล Logarithm

ตารางที่ 5-1 ข้อมูลดิบจากผลการทดลองย่อยที่ 5.1.1 แสดงจำนวนรอบคำสั่ง (Cycles) ที่ค่า  $\mu$  แต่ละตัวใช้ในการทำให้ระบบควบคุมมีสัญญาณความผิดพลาดลู่เข้าสู่ค่าศูนย์ โดยค่าที่ได้เป็นเพียงค่าประมาณเท่านั้น

ค่า $\mu$	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	0.3
Cycles	55	38	31	25	23	22	18	17	16	15	12	10

วิเคราะห์การทดลองย่อยที่ 5.1.1 การควบคุมสัญญาณ Sine ซึ่งเป็นสัญญาณความถี่เดียว นั้นระบบควบคุมสามารถทำได้ดี โดยจากการทดลองปรับเปลี่ยนค่า  $\mu$  หลายๆค่า ผลปรากฏว่าการลดค่า  $\mu$  ลงส่งผลให้สัญญาณความผิดพลาดลู่เข้าสู่ค่าศูนย์ได้ช้าลง ในทำนองกลับกัน การเพิ่มค่า  $\mu$  ให้มากขึ้นส่งผลให้สัญญาณความผิดพลาดลู่เข้าสู่ค่าศูนย์ได้รวดเร็วขึ้น โดยมีข้อจำกัดบางประการคือ การเพิ่มค่า  $\mu$  มากเกินไปจะส่งผลให้ระบบควบคุมไม่มีเสถียรภาพ (Unstable) กล่าวคือ สัญญาณความผิดพลาดจะลู่ออก

การทดลองย่อยที่ 5.1.2 ทำการจำลองระบบจริงด้วยระบบดังรูปที่ 5-1 ข

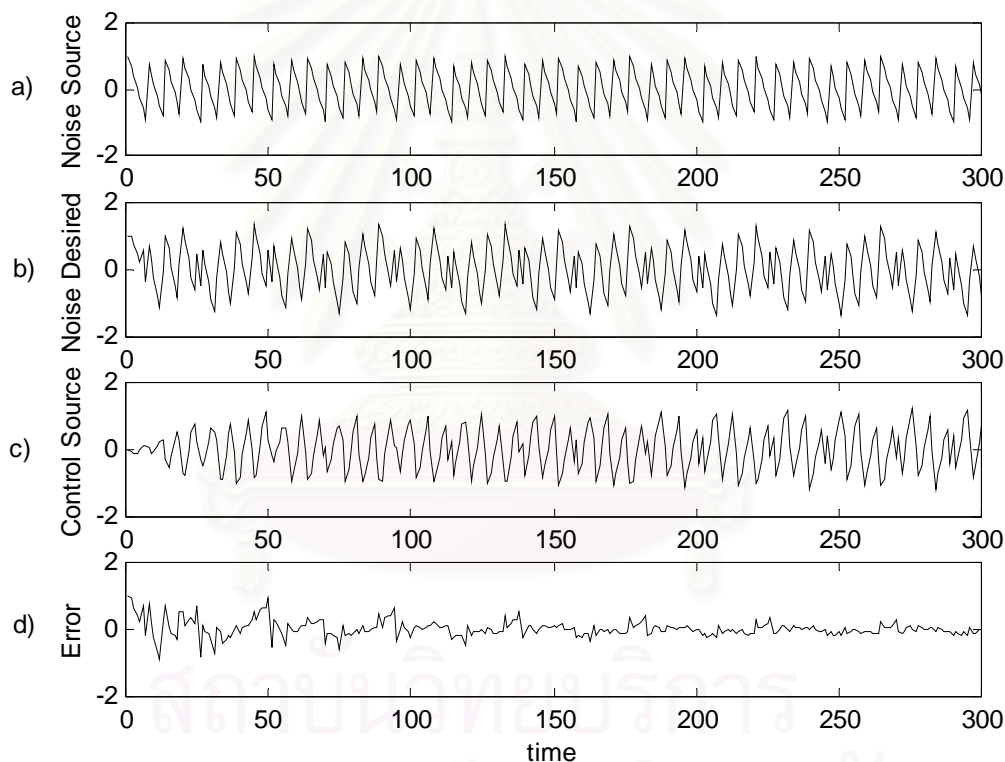
เป็นเวลา = 6000 Samples

ใช้แหล่งกำเนิดเสียงรูป Saw Tooth ความถี่มูลฐาน = 1 rad/sec

เลือกใช้อันดับ (Order) ของตัวกรองปรับค่าได้ = 31

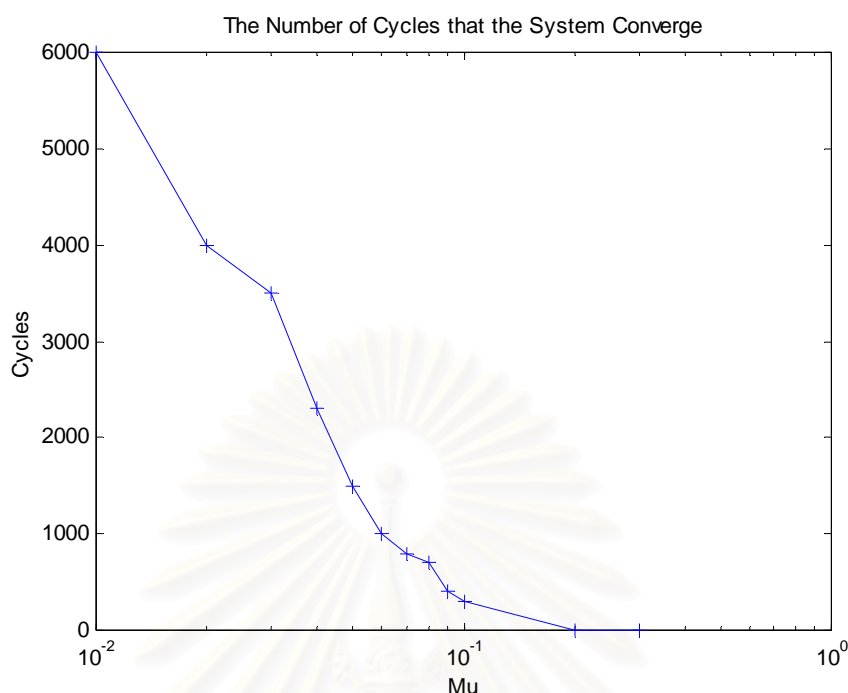
ให้อันดับของตัวกรองจำลองทางเดินของเสียง = 5

หมายเหตุ การเลือกใช้อันดับของตัวกรองปรับค่าได้ ในทางปฏิบัตินิยมใช้จำนวนในรูปแบบของ  $2^n - 1$  โดย  $n$  เป็นจำนวนเต็มบวกใดๆ ในการทดลองย่อยนี้จึงสุ่มใช้อันดับ = 31



รูปที่ 5-3 ก ตัวอย่างผลลัพธ์จากการทดลองที่ 5.1.2 โดยใช้  $\mu = 0.06$

- a) แสดงให้เห็นถึงลักษณะของสัญญาณ Sawtooth ณ แหล่งกำเนิดเสียง
- b) แสดงให้เห็นถึงสัญญาณ Sawtooth หลังจากเดินทางผ่านสิ่งแวดล้อมมายังจุดหักล้าง
- c) แสดงให้เห็นถึงสัญญาณควบคุม ณ จุดหักล้าง
- d) สัญญาณความผิดพลาด ณ จุดหักล้าง



รูปที่ 5-3 ข กราฟจากผลการทดลองย่อยที่ 5.1.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\mu$  และจำนวนรอบคำสั่ง (Cycles) ที่ระบบควบคุม ใช้ในการทำให้สัญญาณความผิดพลาดลู่เข้าสู่ค่าศูนย์ โดยในแกน X เป็นสเกล Logarithm

ตารางที่ 5-2 ข้อมูลดิบจากผลการทดลองย่อยที่ 5.1.2 แสดงจำนวนรอบคำสั่ง (Cycles) ที่ค่า  $\mu$  แต่ละตัวใช้ในการทำให้ระบบควบคุมมีสัญญาณความผิดพลาดลู่เข้าสู่ค่าศูนย์ โดยค่าที่ได้เป็นเพียงค่าประมาณเท่านั้น โดย out ในตารางหมายถึง สัญญาณความผิดพลาดลู่ออก

ค่า $\mu$	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	0.3
Cycles	6000	4000	3500	2300	1500	1000	800	700	400	300	out	out

วิเคราะห์การทดลองย่อยที่ 5.1.2 การควบคุมสัญญาณ Sawtooth ซึ่งเป็นสัญญาณหลายความถี่ นั้น ระบบควบคุมสามารถทำได้ดี โดยจากการทดลองปรับเปลี่ยนค่า  $\mu$  หลายๆค่า ผลปรากฏว่าการลดค่า  $\mu$  ลงส่งผลให้สัญญาณความผิดพลาดลู่เข้าสู่ค่าศูนย์ได้ช้าลง ในทำนองกลับกัน การเพิ่มค่า  $\mu$  ให้มากขึ้นส่งผลให้สัญญาณความผิดพลาดลู่เข้าสู่ค่าศูนย์ได้รวดเร็วขึ้น โดยมีข้อจำกัดบางประการคือ การเพิ่มค่า  $\mu$  มากเกินไปจะส่งผลให้ระบบควบคุมไม่มีเสถียรภาพ (Unstable) กล่าวคือ สัญญาณความผิดพลาดจะลู่ออก

การทดลองย่อยที่ 5.1.3 ทำการจำลองระบบจริงด้วยระบบดังรูปที่ 5-1 ข

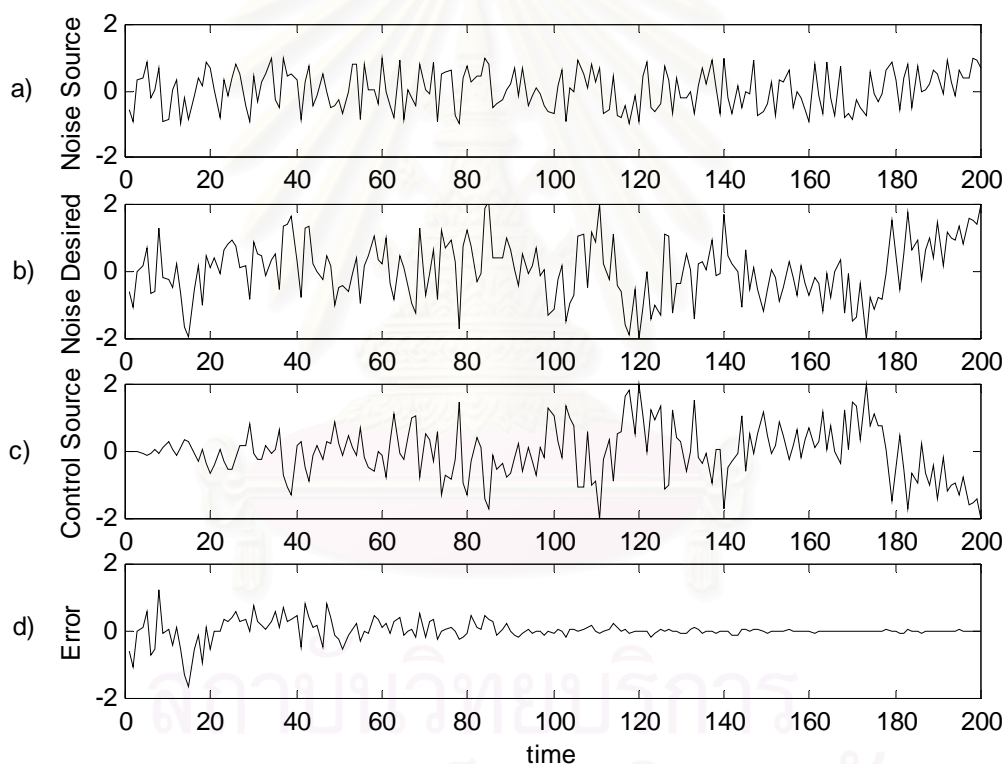
เป็นเวลา = 800 Samples

ใช้แหล่งกำเนิดเสียงแบบ Random

เลือกใช้อันดับ (Order) ของตัวกรองปรับค่าได้ = 31

ให้อันดับของตัวกรองจำลองทางเดินของเสียง = 5

หมายเหตุ การเลือกใช้อันดับของตัวกรองปรับค่าได้ ในทางปฏิบัตินิยมใช้จำนวนในรูปแบบของ  $2^n - 1$  โดย  $n$  เป็นจำนวนเต็มบวกใดๆ ในการทดลองย่อยนี้จึงสุ่มใช้อันดับ = 31



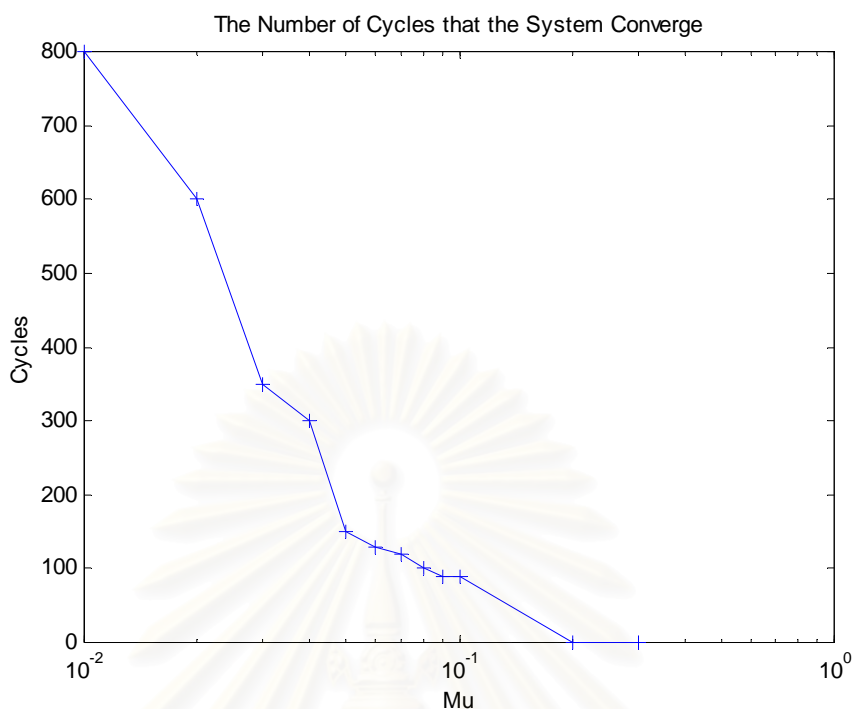
รูปที่ 5-4 ก ตัวอย่างผลลัพธ์จากการทดลองที่ 5.1.3 โดยใช้  $\mu = 0.05$

a) แสดงให้เห็นถึงลักษณะของสัญญาณ Random ณ แหล่งกำเนิดเสียง

b) แสดงให้เห็นถึงสัญญาณ Random หลังจากเดินทางผ่านสิ่งแวดล้อมมายังจุดหักล้าง

c) แสดงให้เห็นถึงสัญญาณควบคุม ณ จุดหักล้าง

d) สัญญาณความผิดพลาด ณ จุดหักล้าง



รูปที่ 5-4 ข กราฟจากผลการทดลองย่อยที่ 5.1.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\mu$  และจำนวนรอบคำสั่ง (Cycles) ที่ระบบควบคุม ใช้ในการทำให้สัญญาณความผิดพลาดลู่เข้าสู่ค่าศูนย์ โดยในแกน X เป็นสเกล Logarithm

ตารางที่ 5-3 ข้อมูลดิบจากผลการทดลองย่อยที่ 5.1.3 แสดงจำนวนรอบคำสั่ง (Cycles) ที่ค่า  $\mu$  แต่ละตัวใช้ในการทำให้ระบบควบคุมมีสัญญาณความผิดพลาดลู่เข้าสู่ค่าศูนย์ โดยค่าที่ได้เป็นเพียงค่าประมาณเท่านั้น โดย out ในตารางหมายถึง สัญญาณความผิดพลาดลู่ออก

ค่า $\mu$	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	0.3
Cycles	800	600	350	300	150	130	120	100	90	88	out	out

วิเคราะห์การทดลองย่อยที่ 5.1.3 การควบคุมสัญญาณ Random นั้น ระบบควบคุมสามารถทำได้ดี โดยจากการทดลองปรับเปลี่ยนค่า  $\mu$  หลายๆค่า ผลปรากฏว่าการลดค่า  $\mu$  ลงส่งผลให้สัญญาณความผิดพลาดลู่เข้าสู่ค่าศูนย์ได้ช้าลง ในทำนองกลับกัน การเพิ่มค่า  $\mu$  ให้มากขึ้นส่งผลให้สัญญาณความผิดพลาดลู่เข้าสู่ค่าศูนย์ได้รวดเร็วขึ้น โดยมีข้อจำกัดบางประการคือ การเพิ่มค่า  $\mu$  มากเกินไปจะส่งผลให้ระบบควบคุมไม่มีเสถียรภาพ (Unstable) กล่าวคือ สัญญาณความผิดพลาดจะลู่ออก

**การทดลองที่ 5.2** ทำการปรับเปลี่ยนค่าอันดับของตัวกรองปรับค่าได้ เพื่อสังเกตพฤติกรรมของระบบ

**การทดลองย่อยที่ 5.2.1** ทำการจำลองระบบจริงด้วยระบบดังรูปที่ 5-1 ข

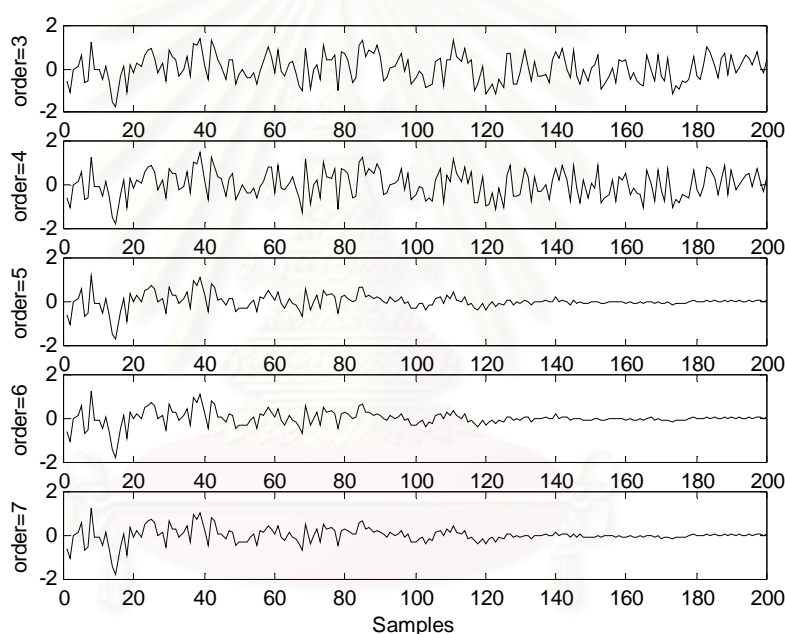
เป็นเวลา = 500 Samples

เลือกใช้แหล่งกำเนิดเสียงรูป Random

ให้อันดับของตัวกรองจำลองทางเดินของเสียง = 5

ทำการปรับเปลี่ยนค่าอันดับของตัวกรองปรับค่าได้จาก 3 ถึง 7

โดยใช้  $\mu = 0.05$



รูปที่ 5-5 กราฟจากผลการทดลองย่อยที่ 5.2.1 แสดงการเปรียบเทียบค่าสัญญาณความผิดพลาดที่มีอันดับของตัวกรองปรับค่าได้ แตกต่างกัน

**วิเคราะห์ผลการทดลองย่อยที่ 5.2.1** จากรูปที่ 5-5 จะเห็นได้ว่าเมื่อให้อันดับของตัวกรองจำลองทางเดินของเสียง = 5 การใช้อันดับของตัวกรองปรับค่าได้น้อยกว่าอันดับของตัวกรองจำลองทางเดินของเสียง จะทำให้การควบคุมเสียงรบกวนไม่สามารถกระทำได้ ตรงกันข้ามถ้าให้อันดับของตัวกรองปรับค่าได้มากกว่า หรือเท่ากับอันดับของตัวกรองจำลองทางเดินของเสียง จะทำให้การควบคุมเสียงรบกวนสามารถกระทำได้ ข้อสังเกตจะเห็นได้ว่าการให้อันดับของตัวกรองปรับค่าได้มากกว่าอันดับของตัวกรองจำลองทางเดินของเสียงจะไม่ทำให้การควบคุมเสียงรบกวนได้ผลลัพธ์ที่ดีขึ้น

การทดลองย่อยที่ 5.2.2 ทำการจำลองระบบจริงด้วยระบบดังรูปที่ 5-1 ข

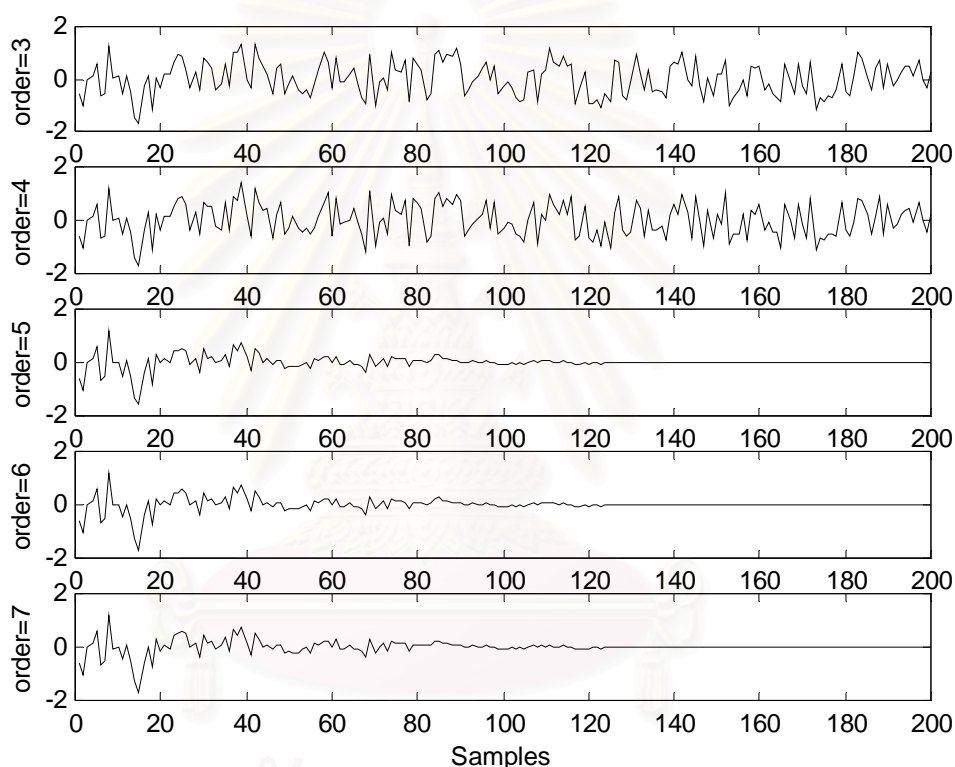
เป็นเวลา = 500 Samples

เลือกใช้แหล่งกำเนิดเสียงรูป Random

ให้อันดับของตัวกรองจำลองทางเดินของเสียง = 5

ทำการปรับเปลี่ยนค่าอันดับของตัวกรองปรับค่าได้จาก 3 ถึง 7

โดยใช้  $\mu = 0.09$



รูปที่ 5-6 กราฟจากผลการทดลองย่อยที่ 5.2.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าสัญญาณความผิดพลาดที่มีอันดับของตัวกรองปรับค่าได้ แตกต่างกัน

วิเคราะห์ผลการทดลองย่อยที่ 5.2.2 ผลลัพธ์ของการทดลองนี้ให้ผลเหมือนกันกับผลการทดลองย่อยที่ 5.2.1 โดยการทดลองนี้จะใช้ค่า  $\mu$  ที่แตกต่างจากการทดลองย่อยที่ 5.2.1 ซึ่งค่า  $\mu$  ที่แตกต่างกันนี้ส่งผลกระทบต่อเพียงความเร็วในการลู่เข้าเท่านั้น ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอันดับของตัวกรองปรับค่าได้แต่ประการใด



การทดลองย่อยที่ 5.2.3 ทำการจำลองระบบจริงด้วยระบบดังรูปที่ 5-1 ข

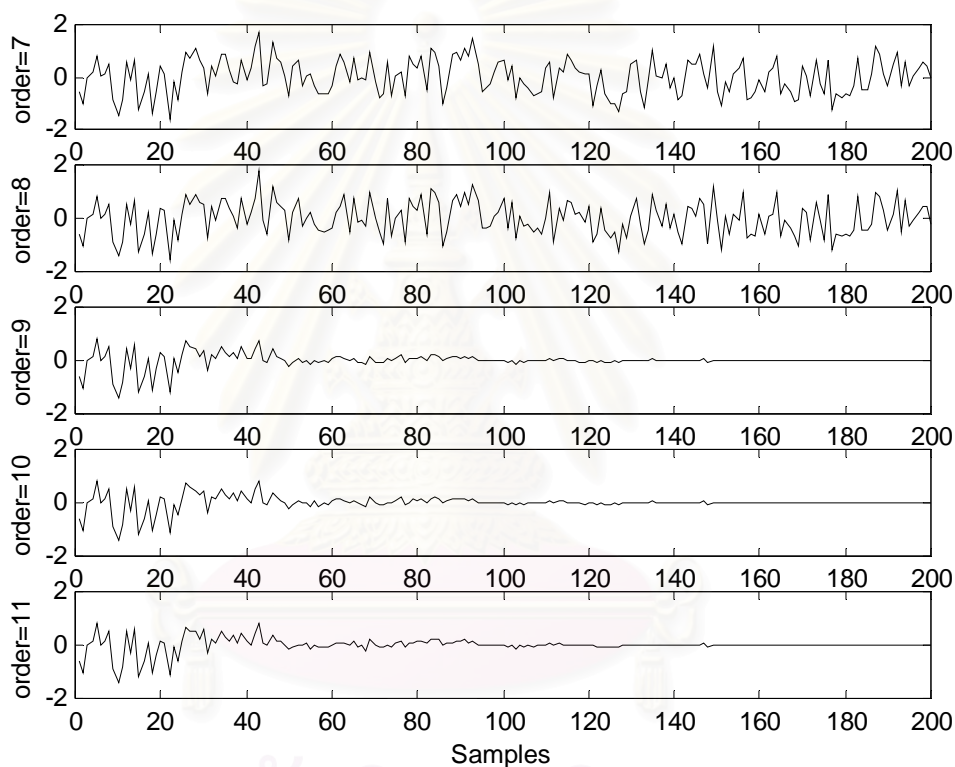
เป็นเวลา = 500 Samples

เลือกใช้แหล่งกำเนิดเสียงรูป Random

ให้อันดับของตัวกรองจำลองทางเดินของเสียง = 9

ทำการปรับเปลี่ยนค่าอันดับของตัวกรองปรับค่าได้จาก 7 ถึง 11

โดยใช้  $\mu = 0.09$



รูปที่ 5-7 กราฟจากผลการทดลองย่อยที่ 5.2.3 แสดงการเปรียบเทียบค่าสัญญาณความผิดพลาดที่มีอันดับของตัวกรองปรับค่าได้ แตกต่างกัน

วิเคราะห์ผลการทดลองย่อยที่ 5.2.3 ผลลัพธ์จากการทดลองจะให้ผลที่คล้ายกันกับการทดลองย่อยที่ 5.2.1 และ 5.2.2 โดยได้ข้อสรุปดังนี้คือ ถ้าอันดับของตัวกรองปรับค่าได้มีค่ามากกว่า หรือเท่ากันกับอันดับของตัวกรองจำลองทางเดินของเสียง การควบคุมเสียงรบกวนจะสามารถกระทำได้ โดยสัญญาณความผิดพลาดจะลู่เข้าสู่ค่าศูนย์ แต่ถ้าหากอันดับของตัวกรองปรับค่าได้มีค่าน้อยกว่าอันดับของตัวกรองจำลองทางเดินของเสียง การควบคุมเสียงรบกวนจะไม่สามารถกระทำได้ โดยสัญญาณความผิดพลาดจะไม่มีแนวโน้มที่จะลู่เข้าสู่ค่าศูนย์เลย

**การทดลองที่ 5.3** ทำการเพิ่มในส่วนของ Delay Time ระหว่างจุดหักล้างกันของเสียง และ ไมโครโฟนรับสัญญาณความผิดพลาด เพื่อจำลองระบบให้เหมือนกับ ระบบจริงในทางปฏิบัติ เพื่อให้เห็นผลกระทบของ Delay Time อย่างชัดเจน ในการทดลองนี้จะเลือกใช้เฉพาะสัญญาณ แบบ Sine เท่านั้น

**การทดลองย่อยที่ 5.3.1** ทำการจำลองระบบจริงด้วยระบบดังรูปที่ 5-1 ค

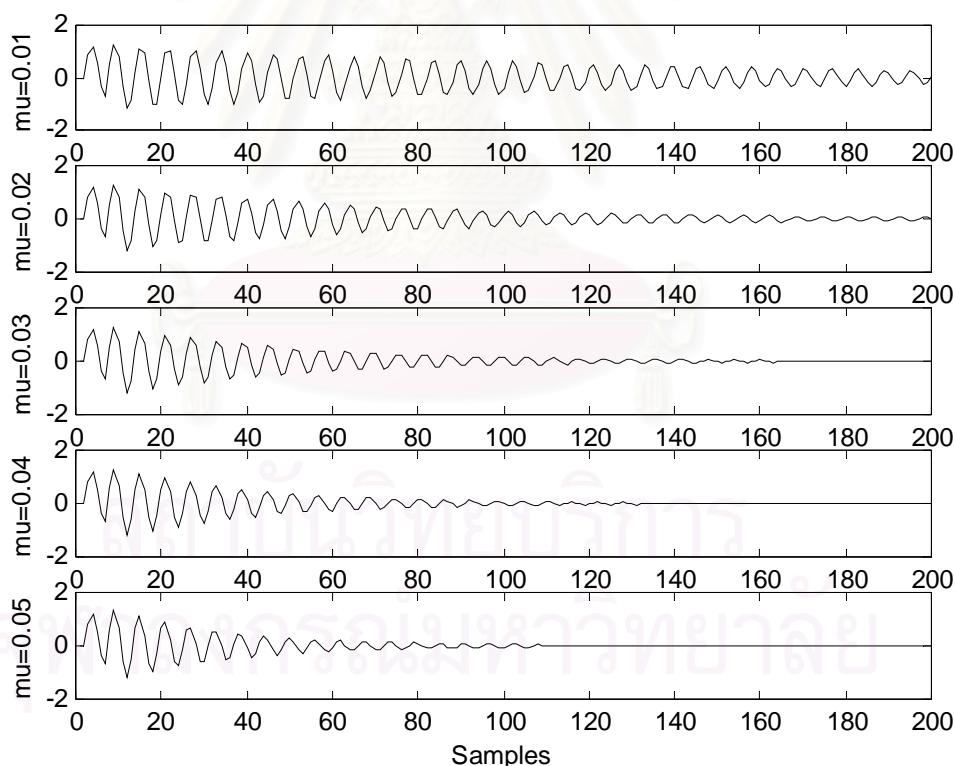
เป็นเวลา = 500 Samples

ใช้แหล่งกำเนิดเสียงรูป Sine ความถี่ 1 rad/sec

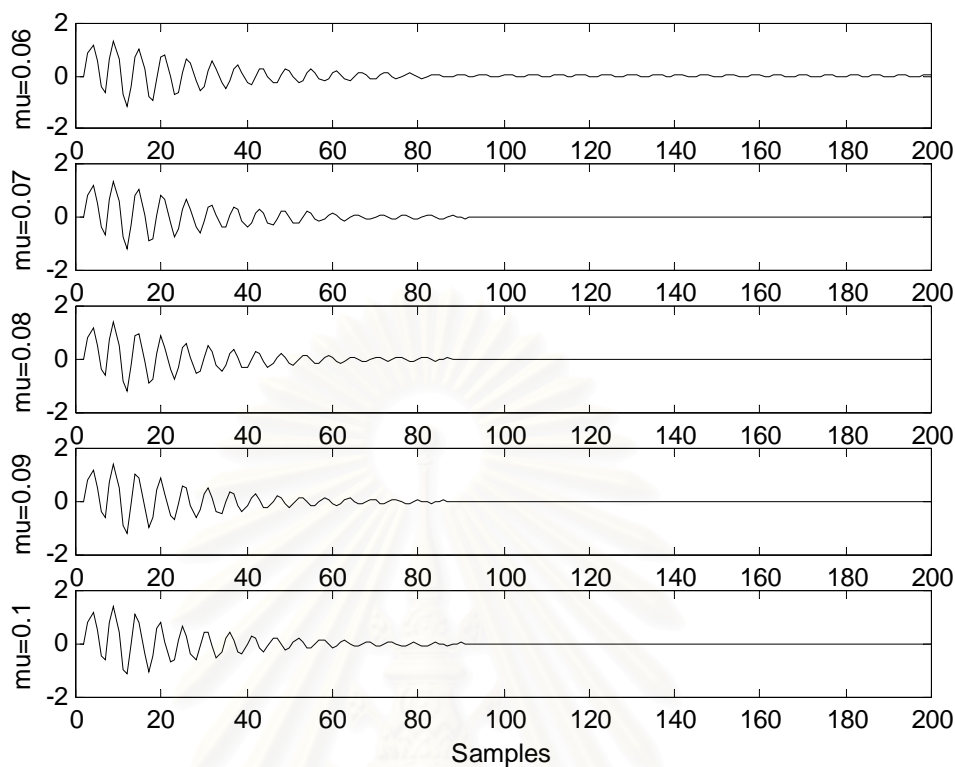
โดยเลือกใช้อันดับ (Order) ของตัวกรองปรับค่าได้ = 5

ให้อันดับของตัวกรองจำลองทางเดินของเสียง = 5

ค่า Delay Time = 1 Sample



รูปที่ 5-8 ก กราฟจากผลการทดลองย่อยที่ 5.3.1 แสดงการเปรียบเทียบค่าสัญญาณความผิดพลาด ที่ใช้ค่า  $\mu$  แตกต่างกัน โดยมี Delay Time ระหว่างลำโพงควบคุม และไมโครโฟนรับสัญญาณความผิดพลาดเท่ากับ 1 Sample และอันดับของตัวกรองปรับค่าได้เท่ากับ 5

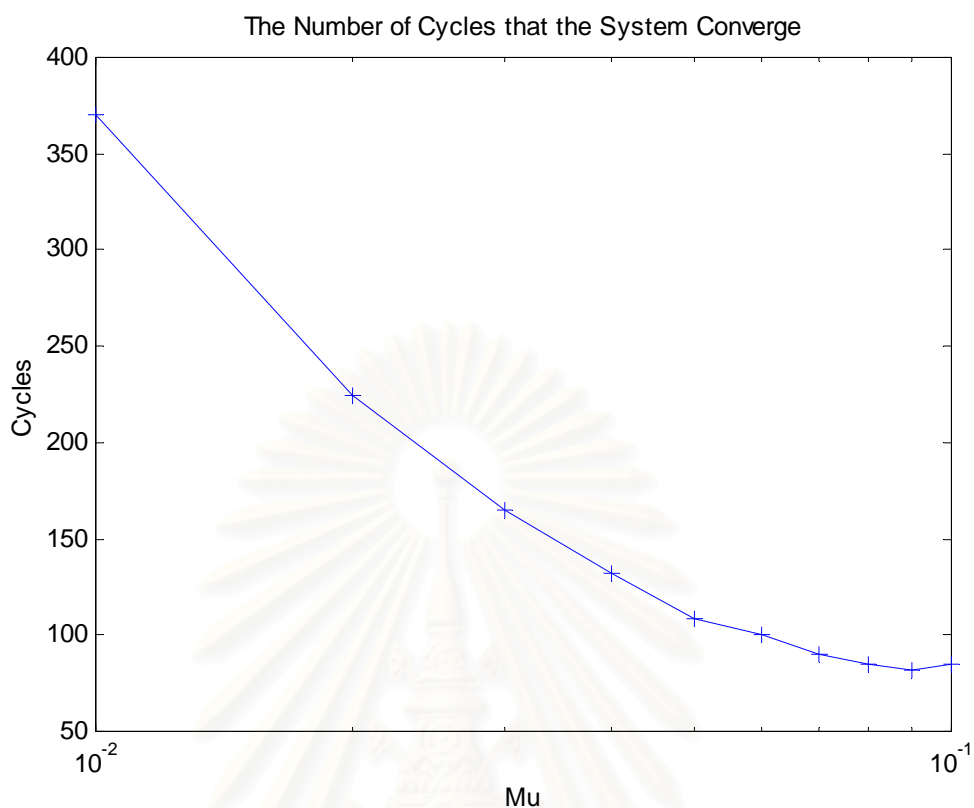


รูปที่ 5-8 ก (ต่อ) กราฟจากผลการทดลองย่อยที่ 5.3.1 แสดงการเปรียบเทียบค่าสัญญาณความผิดพลาด ที่ใช้ค่า  $\mu$  แตกต่างกัน โดยมี Delay Time ระหว่างลำโพงควบคุม และไม่โครโฟนรับสัญญาณความผิดพลาดเท่ากับ 1 Sample และอันดับของตัวกรองปรับค่าได้เท่ากับ 5

ตารางที่ 5-4 ข้อมูลดิบจากผลการทดลองย่อยที่ 5.3.1 แสดงจำนวนรอบคำสั่ง (Cycles) ที่ค่า  $\mu$  แต่ละตัวใช้ในการทำให้ระบบควบคุมมีสัญญาณความผิดพลาดเข้าสู่ค่าศูนย์ โดยค่าที่ได้เป็นเพียงค่าประมาณเท่านั้น

ค่า $\mu$	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	0.3
Cycles	370	225	165	132	109	100	90	85	82	85	out	out

หมายเหตุ out ในตาราง หมายถึง การลู่ออกของสัญญาณความผิดพลาด



รูปที่ 5-8 ข กราฟจากผลการทดลองย่อยที่ 5.3.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\mu$  และจำนวนรอบคำสั่ง (Cycles) ที่ระบบควบคุม ใช้ในการทำให้สัญญาณความผิดพลาดลู่เข้าสู่ค่าศูนย์ โดยในแกน X เป็นสเกล Logarithm

วิเคราะห์ผลการทดลองย่อยที่ 5.3.1 การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาถึงผลกระทบของ Delay Time ระหว่างลำโพงควบคุม และไมโครโฟนรับสัญญาณความผิดพลาด ซึ่งในการทดลองย่อยนี้ กำหนดให้ค่า Delay Time มีค่าเป็น 1 Sample และอันดับของตัวกรองปรับค่าได้เท่ากับ 5 จากการทดลองเปรียบเทียบโดยใช้ค่า  $\mu$  ที่แตกต่างกัน ผลปรากฏว่าสัญญาณความผิดพลาดสามารถลู่เข้าได้ทุกค่า  $\mu$  ที่ทำการทดลอง โดยค่า  $\mu$  ที่มากจะส่งผลให้การลู่เข้าทำได้เร็วขึ้นดังแสดงในรูปที่ 5-8 ข จากตารางที่ 5-4 จะเห็นได้ว่าที่ค่า  $\mu = 0.1$  สัญญาณความผิดพลาดมีแนวโน้มที่จะลู่ออก การเพิ่มค่า  $\mu$  ขึ้นอีกเป็น 0.2 , 0.3 จะทำให้สัญญาณความผิดพลาดลู่ออก (ไม่ได้แสดงไว้)

การทดลองย่อยที่ 5.3.2 ทำการจำลองระบบจริงด้วยระบบดังรูปที่ 5-1 ค

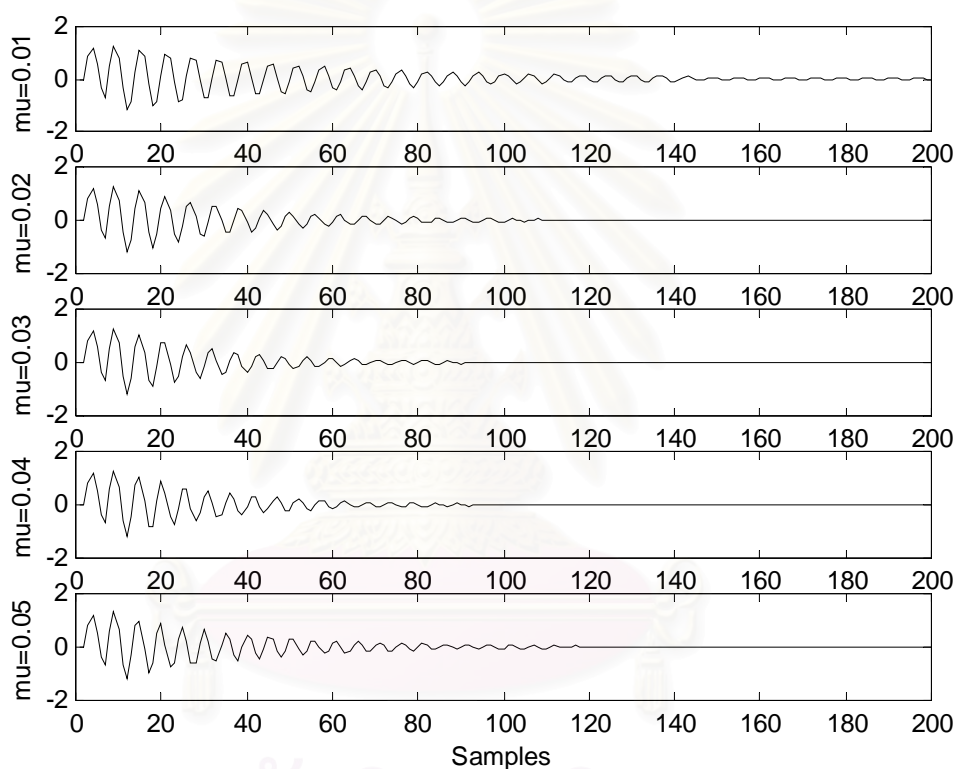
เป็นเวลา = 500 Samples

ใช้แหล่งกำเนิดเสียงรูป Sine ความถี่ 1 rad/sec

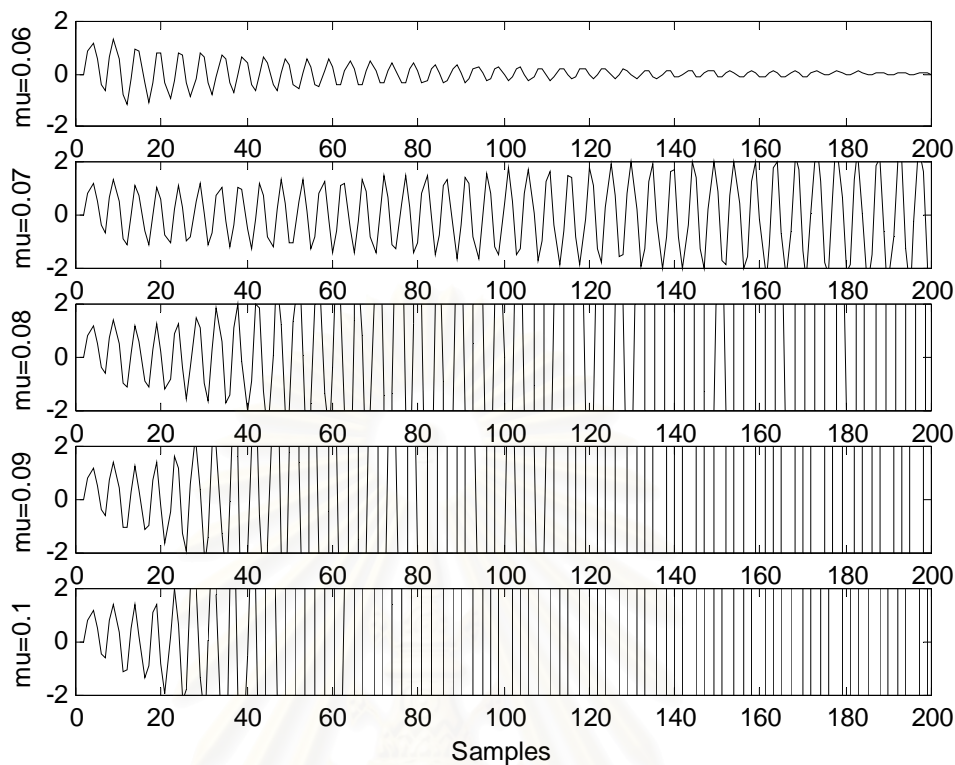
โดยเลือกใช้อันดับ (Order) ของตัวกรองปรับค่าได้ = 15

ให้อันดับของตัวกรองจำลองทางเดินของเสียง = 5

ค่า Delay Time = 1 Sample



รูปที่ 5-9 ก กราฟจากผลการทดลองย่อยที่ 5.3.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าสัญญาณความถี่ความถี่ที่ใช้ค่า  $\mu$  ต่างกัน โดยมี Delay Time ระหว่างลำโพงควบคุม และไม่โครโฟนรับสัญญาณความถี่เท่ากับ 1 Sample และอันดับของตัวกรองปรับค่าได้เท่ากับ 15

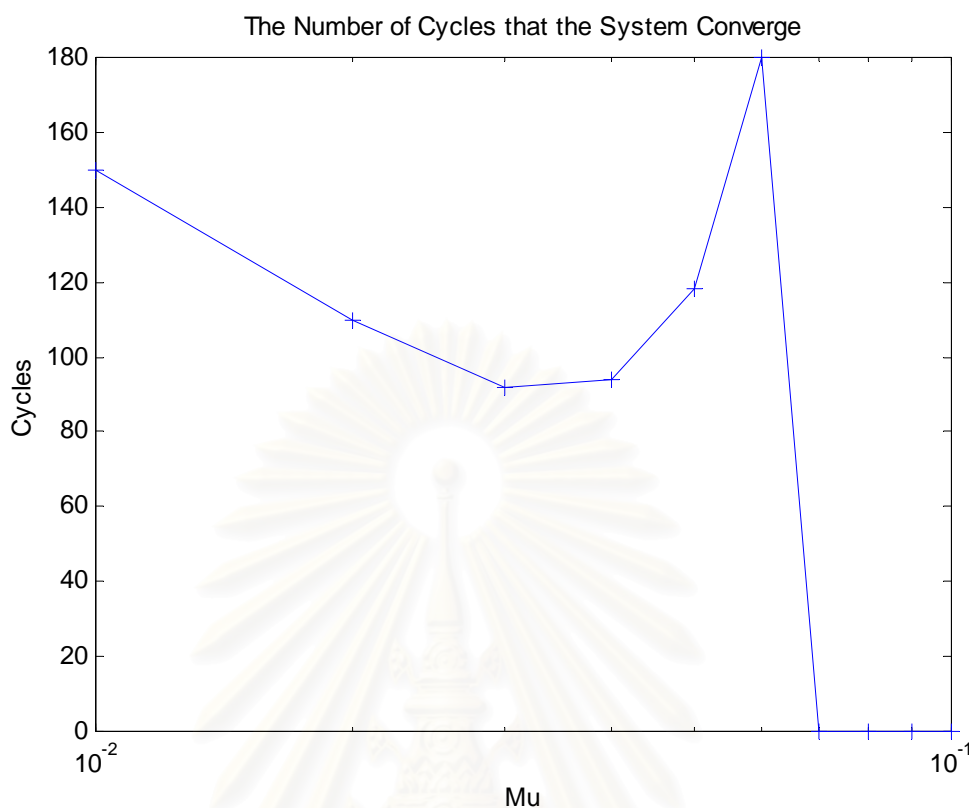


รูปที่ 5-9 ก (ต่อ) กราฟจากผลการทดลองย่อยที่ 5.3.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าสัญญาณความถี่ผิดพลาดที่ใช้ค่า  $\mu$  ต่างกัน โดยมี Delay Time ระหว่างลำโพงควบคุม และไมโครโฟนรับสัญญาณความถี่ผิดพลาดเท่ากับ 1 Sample และอันดับของตัวกรองปรับค่าได้เท่ากับ 15

ตารางที่ 5-5 ข้อมูลดิบจากผลการทดลองย่อยที่ 5.3.2 แสดงจำนวนรอบคำสั่ง (Cycles) ที่ค่า  $\mu$  แต่ละตัวใช้ในการทำให้ระบบควบคุมมีสัญญาณความถี่ผิดพลาดเข้าสู่ค่าศูนย์ โดยค่าที่ได้เป็นเพียงค่าประมาณเท่านั้น

ค่า $\mu$	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1
Cycles	150	110	92	94	118	180	OUT	OUT	OUT	OUT

หมายเหตุ OUT ในตาราง หมายถึง การลู่ออกของสัญญาณความถี่ผิดพลาด



รูปที่ 5-9 ข กราฟจากผลการทดลองย่อยที่ 5.3.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\mu$  และจำนวนรอบคำสั่ง (Cycles) ที่ระบบควบคุม ใช้ในการทำให้สัญญาณความผิดพลาดเข้าสู่ค่าศูนย์ โดยในแกน X เป็นสเกล Logarithm สำหรับสัญญาณความผิดพลาดที่ลู่ออก ในที่นี้จะแสดงเป็นค่า 0 Cycle

วิเคราะห์ผลการทดลองย่อยที่ 5.3.2 การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาถึงผลกระทบของ Delay Time ระหว่างลำโพงควบคุม และไมโครโฟนรับสัญญาณความผิดพลาด ซึ่งในการทดลองย่อยนี้ กำหนดให้ค่า Delay Time มีค่าเป็น 1 Sample และอันดับของตัวกรองปรับค่าได้เท่ากับ 15 จากการทดลองเปรียบเทียบโดยใช้ค่า  $\mu$  ที่แตกต่างกัน ผลปรากฏว่าสัญญาณความผิดพลาดสามารถลู่เข้าได้ถึงค่า  $\mu = 0.06$  โดยค่า  $\mu$  ที่มากขึ้นจะส่งผลให้การลู่เข้าทำได้เร็วขึ้นเฉพาะในช่วงค่า  $\mu$  ไม่เกิน 0.03 หลังจากเพิ่มค่า  $\mu$  ตั้งแต่ 0.04 ขึ้นไป ความเร็วในการลู่เข้าของสัญญาณความผิดพลาดกลับลดลง จนกระทั่งค่า  $\mu$  เป็น 0.07 สัญญาณความผิดพลาดเริ่มที่จะลู่ออก ดังแสดงในรูปที่ 5-9 ข และตารางที่ 5-5

การทดลองย่อยที่ 5.3.3 ทำการจำลองระบบจริงด้วยระบบดังรูปที่ 5-1 ค

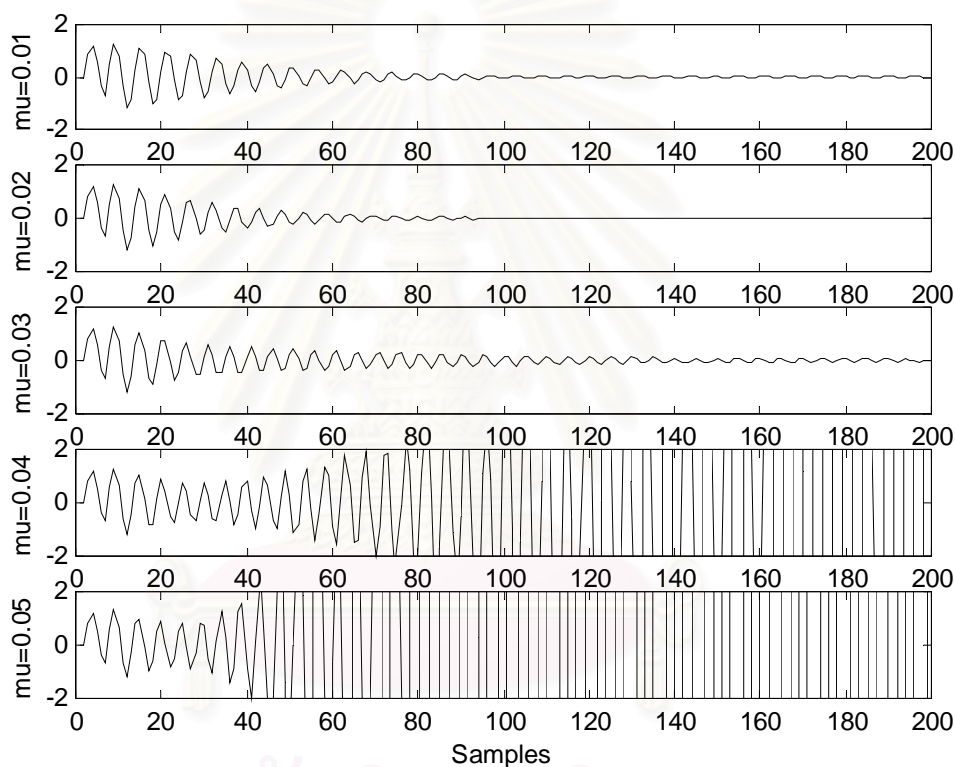
เป็นเวลา = 500 Samples

ใช้แหล่งกำเนิดเสียงรูป Sine ความถี่ 1 rad/sec

โดยเลือกใช้อันดับ (Order) ของตัวกรองปรับค่าได้ = 31

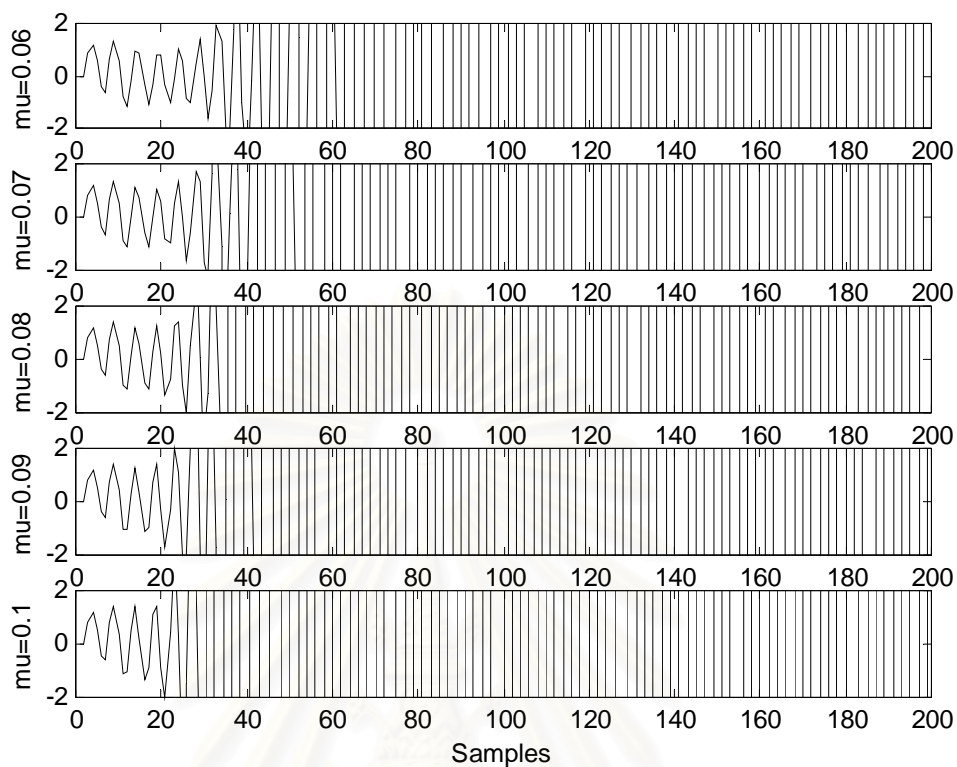
ให้อันดับของตัวกรองจำลองทางเดินของเสียง = 5

ค่า Delay Time = 1 Sample



รูปที่ 5-10 ก กราฟจากผลการทดลองย่อยที่ 5.3.3 แสดงการเปรียบเทียบค่าสัญญาณความถี่พิชผลาดที่ใช้ค่า  $\mu$  แตกต่างกัน โดยมี Delay Time ระหว่างลำโพงควบคุม และไม่โครโฟนรับสัญญาณความถี่พิชผลาดเท่ากับ 1 Sample และอันดับของตัวกรองปรับค่าได้เท่ากับ 31



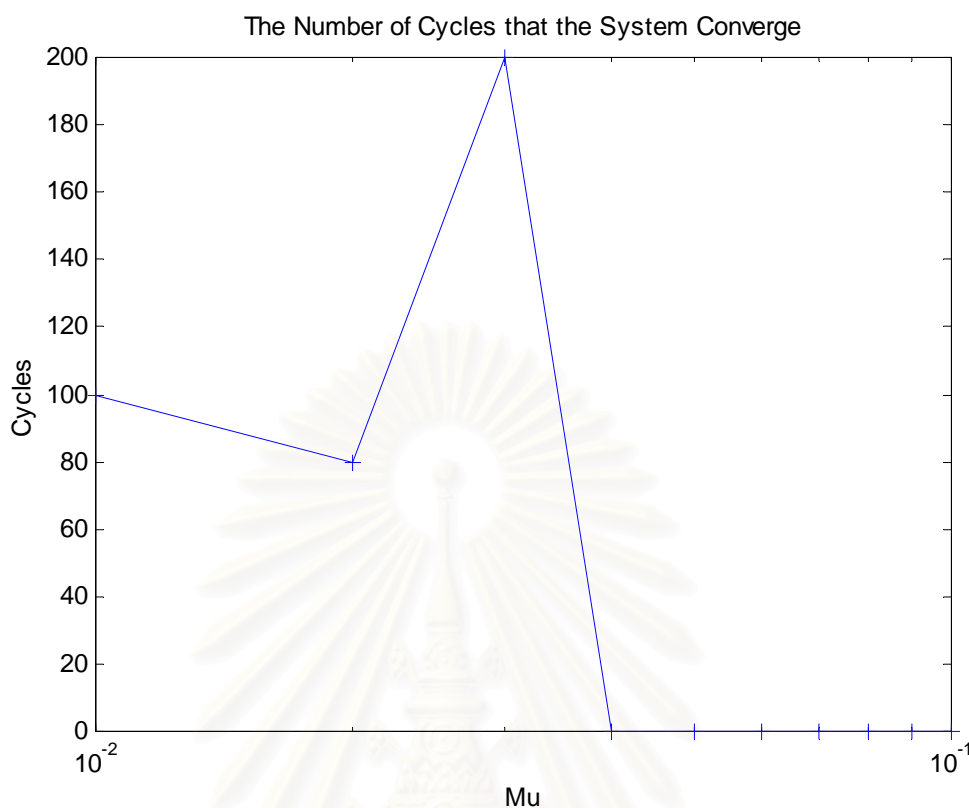


รูปที่ 5-10 ก (ต่อ) กราฟจากผลการทดลองย่อยที่ 5.3.3 แสดงการเปรียบเทียบค่าสัญญาณความผิดพลาด ที่ใช้ค่า  $\mu$  แตกต่างกัน โดยมี Delay Time ระหว่างลำโพงควบคุม และไม่โครโฟนรับ สัญญาณความผิดพลาดเท่ากับ 1 Sample และอันดับของตัวกรองปรับค่าได้เท่ากับ 31

ตารางที่ 5-6 ข้อมูลดิบจากผลการทดลองย่อยที่ 5.3.3 แสดงจำนวนรอบคำสั่ง (Cycles) ที่ค่า  $\mu$  แต่ละตัวใช้ในการทำให้ระบบควบคุมมีสัญญาณความผิดพลาดเข้าสู่ค่าศูนย์ โดยค่าที่ได้เป็นเพียงค่าประมาณเท่านั้น

ค่า $\mu$	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1
Cycles	100	80	200	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT

หมายเหตุ OUT ในตาราง หมายถึง การลู่ออกของสัญญาณความผิดพลาด



รูปที่ 5-10 ข กราฟจากผลการทดลองย่อยที่ 5.3.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\mu$  และจำนวนรอบคำสั่ง (Cycles) ที่ระบบควบคุม ใช้ในการทำให้สัญญาณความผิดพลาดเข้าสู่ค่าศูนย์ โดยในแกน X เป็นสเกล Logarithm สำหรับสัญญาณความผิดพลาดที่ลู่ออก ในที่นี้จะแสดงเป็นค่า 0 Cycle

วิเคราะห์ผลการทดลองย่อยที่ 5.3.3 การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาถึงผลกระทบของ Delay Time ระหว่างลำโพงควบคุม และไมโครโฟนรับสัญญาณความผิดพลาด ซึ่งในการทดลองย่อยนี้ กำหนดให้ค่า Delay Time มีค่าเป็น 1 Sample และอันดับของตัวกรองปรับค่าได้เท่ากับ 31 จากการทดลองเปรียบเทียบโดยใช้ค่า  $\mu$  ที่แตกต่างกัน ผลปรากฏว่าสัญญาณความผิดพลาดสามารถลู่เข้าได้ถึงค่า  $\mu = 0.03$  โดยค่า  $\mu$  ที่มากขึ้นจะส่งผลให้การลู่เข้าทำได้เร็วขึ้นเฉพาะในช่วงค่า  $\mu$  ไม่เกิน 0.02 หลังจากเพิ่มค่า  $\mu$  ขึ้นเป็น 0.03 ความเร็วในการลู่เข้าของสัญญาณความผิดพลาดกลับลดลง จนกระทั่งค่า  $\mu$  เป็น 0.04 สัญญาณความผิดพลาดเริ่มที่จะลู่ออก ดังแสดงในรูปที่ 5-10 ข และตารางที่ 5-6

การทดลองย่อยที่ 5.3.4 ทำการจำลองระบบจริงด้วยระบบดังรูปที่ 5-1 ค

เป็นเวลา = 2000 Samples

ใช้แหล่งกำเนิดเสียงรูป Sine ความถี่ 1 rad/sec

กำหนดให้อันดับของตัวกรองจำลองทางเดินของเสียง = 5

โดยเลือกให้อันดับ (Order) ของตัวกรองปรับค่าได้ตั้งแต่ 5 ถึง 31

ปรับเปลี่ยนค่า Delay Time ตั้งแต่ 2 ถึง 10 Samples

ปรับเปลี่ยนค่า  $\mu$  ตั้งแต่ 0.0001 ถึง 0.1

ผลการทดลองย่อยที่ 5.3.4 การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาถึงผลกระทบของ Delay Time ระหว่างลำโพงควบคุม และไม่โครโฟนรับสัญญาณความผิดพลาด ซึ่งในการทดลองย่อยนี้ กำหนดให้ค่า Delay Time มีค่าเป็น 2 Samples กำหนดให้อันดับของตัวกรองจำลองทางเดินของเสียงมีค่าเท่ากับ 5 และให้อันดับของตัวกรองปรับค่าได้เป็น 5 ทำทดลองเปรียบเทียบโดยใช้ค่า  $\mu$  ที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ 0.0001 ถึง 0.1 ผลปรากฏว่าสัญญาณความผิดพลาดลู่ออกทุกๆค่า  $\mu$  หลังจากนั้นทดลองปรับเปลี่ยนค่าอันดับของตัวกรองปรับค่าได้เป็น 6,7,8,..., จนถึง 31 ตามลำดับ โดยที่ปรับเปลี่ยนค่า  $\mu$  ตั้งแต่ 0.0001 ถึง 0.1 ผลลัพธ์ยังคงออกมาเช่นเดิมคือ สัญญาณความผิดพลาดยังคงลู่ออกทุกๆค่า  $\mu$  ทำซ้ำแบบเดิมโดยปรับค่า Delay Time ให้เพิ่มขึ้นเป็น 3,4,5,..., จนถึง 10 ผลลัพธ์ก็ยังคงออกมาเช่นเดิม ดังนั้นจากการทดลองนี้สามารถสรุปได้ว่า ค่า Delay Time ยิ่งมากความเป็นไปได้ที่สัญญาณความผิดพลาดจะสามารถลู่เข้าสู่ค่าศูนย์แทบจะเป็นไปไม่ได้เลย

### 5-3 อภิปรายผลการทดลอง

1. การทดลองที่ 5.1.1 ถึง 5.1.3 นั้น เป็นการทดลองโดยปรับเปลี่ยนค่าของแหล่งกำเนิดเสียงทั้งแบบ ความถี่เดี่ยว (Pure Tone) หลายความถี่ (Multiple Frequency) หรือแม้กระทั่งสัญญาณแบบแรนดอม (Random Signal) จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ระบบควบคุมจะทำการปรับตัวให้มีขนาดเท่ากับ สัญญาณรบกวน แต่มีเฟสต่างกันอยู่ 180 องศา โดยระบบควบคุมจะทำหน้าที่จำลองในส่วนของ Delay time ของระบบให้ด้วย จะเห็นได้ว่าการหากล้างสามารถทำได้ดี ไม่ว่าจะสัญญาณเสียงรบกวนจะเป็นชนิดใด ส่วนผลของค่า  $\mu$  (Step Size) นั้น ได้ทำการทดลองปรับเปลี่ยนค่า  $\mu$  ตั้งแต่ 0.01 ถึง 0.3 ผลปรากฏว่าการเพิ่มค่า  $\mu$  ให้มากขึ้น จะทำให้สัญญาณความผิดพลาดลู่เข้า (Converged) ได้เร็วขึ้น แต่มีข้อจำกัดบางประการคือ

การเพิ่มค่า  $\mu$  มากเกินไปจะส่งผลให้สัญญาณความผิดพลาดลู่ออกได้ ทำให้ระบบควบคุมขาดเสถียรภาพได้

2. การทดลองที่ 5.2.1 ถึง 5.2.3 นั้น เป็นการทดลองเกี่ยวกับผลของอันดับของตัวกรองปรับค่าได้ต่อประสิทธิภาพในการลู่เข้าของสัญญาณความผิดพลาด จากผลการทดลองสามารถสรุปผลได้ดังนี้ คือ การใช้อันดับของตัวกรองปรับค่าได้ที่น้อยกว่าอันดับของตัวกรองจำลองทางเดินของเสียง จะทำให้การควบคุมเสียงรบกวนไม่สามารถกระทำได้ ตรงกันข้ามถ้าใช้อันดับของตัวกรองปรับค่าได้มากกว่า หรือเท่ากับอันดับของตัวกรองจำลองทางเดินของเสียง จะทำให้การควบคุมเสียงรบกวนสามารถกระทำได้ ข้อสังเกตจะเห็นได้ว่าการใช้อันดับของตัวกรองปรับค่าได้ที่มากกว่าอันดับของตัวกรองจำลองทางเดินของเสียง จะไม่ทำให้การควบคุมเสียงรบกวนได้ผลลัพธ์ที่ดีขึ้น แต่ในทางปฏิบัติเราไม่สามารถรู้อันดับของตัวกรองจำลองทางเดินของเสียงได้ ดังนั้นจึงต้องมีการเลือกใช้ตัวกรองปรับค่าได้ที่มีอันดับสูงๆไว้ก่อน แต่นั่นย่อมหมายถึงการที่จะต้องสิ้นเปลืองหน่วยความจำ (Memory) และเวลาในการประมวลผลที่มากขึ้นตามไปด้วย

3. ระบบจริงในทางปฏิบัตินั้น ไมโครโฟนรับสัญญาณความผิดพลาดไม่สามารถรับสัญญาณ ณ ตำแหน่งที่มีการหักล้างกันได้ตามทฤษฎี ผลดังกล่าวจะทำให้ระบบจริงมี Delay Time เกิดขึ้น ดังนั้นในการทดลองที่ 5.3.1 ถึง 5.3.4 จึงได้ทำการจำลองระบบโดยได้เพิ่มในส่วนของ Delay Time ระหว่างจุดหักล้าง และ ไมโครโฟนรับสัญญาณความผิดพลาด จากผลการทดลองที่ 5.3.1 ถึง 5.3.3 ซึ่งเป็นการจำลองระบบโดยใช้ Delay Time = 1 Sample จากการทดลองเปรียบเทียบโดยใช้ค่า  $\mu$  ที่แตกต่างกัน ผลปรากฏว่าสัญญาณความผิดพลาดสามารถลู่เข้าได้ การเพิ่มค่า  $\mu$  ให้มากขึ้นส่งผลให้สัญญาณความผิดพลาดลู่เข้าสู่ศูนย์ได้เร็วขึ้นในช่วงแรก หลังจากเพิ่มค่า  $\mu$  ถึงจุดหนึ่งสัญญาณความผิดพลาดกลับลู่ช้าลงในขณะที่เพิ่มค่า  $\mu$  ให้มากขึ้น หลังจากนั้นถ้าหากยังคงเพิ่มค่า  $\mu$  อีกต่อไปเรื่อยๆจะทำให้สัญญาณความผิดพลาดเกิดการลู่ออกได้ นอกจากนั้นแล้วปัจจัยที่เกิดจากการใช้อันดับของตัวกรองปรับค่าได้ที่มากเกินไปจะส่งผลให้ช่วงในการลู่เข้าของค่า  $\mu$  แคบลง

4. ส่วนการทดลองย่อยที่ 5.3.4 นั้น ได้เพิ่มขนาดของ Delay Time เป็น 2 ถึง 10 Samples โดยปรับเปลี่ยนค่า  $\mu$  ในช่วงที่กว้างขึ้นคือ 0.0001 ถึง 0.1 ในขณะเดียวกันก็ใช้อันดับของตัวกรองปรับค่าได้ตั้งแต่ 5 ถึง 31 ผลปรากฏว่าสัญญาณความผิดพลาดลู่ออกตลอดการทดลอง สรุปก็คือ Delay Time ระหว่างจุดหักล้าง และ ไมโครโฟนรับสัญญาณความผิดพลาดมีผลกระทบอย่างมาก ต่อความสามารถในการลดเสียงรบกวนของระบบควบคุม และเสถียรภาพของระบบ ดังนั้นจำเป็นต้องมีการชดเชยในส่วนนี้ขึ้น นั่นก็คือที่มาของอัลกอริทึมแบบ FX-LMS นั่นเอง

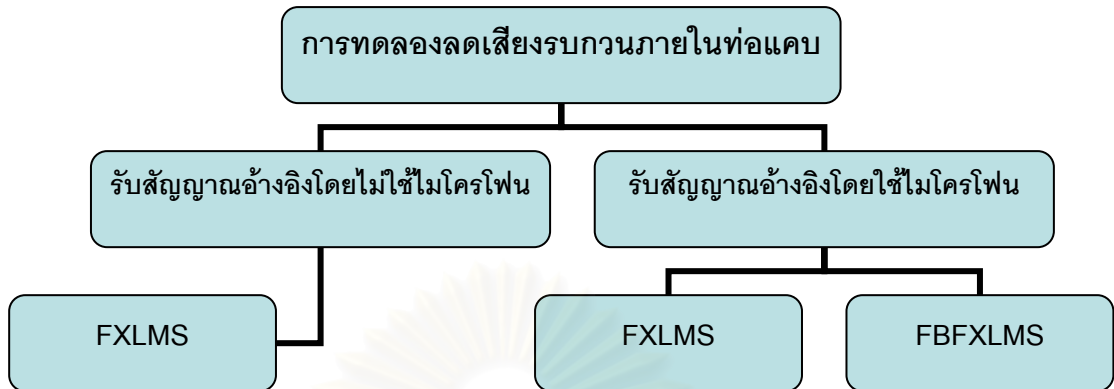
## บทที่ 6

### การทดลองลดเสียงรบกวนภายในท่อแคบ

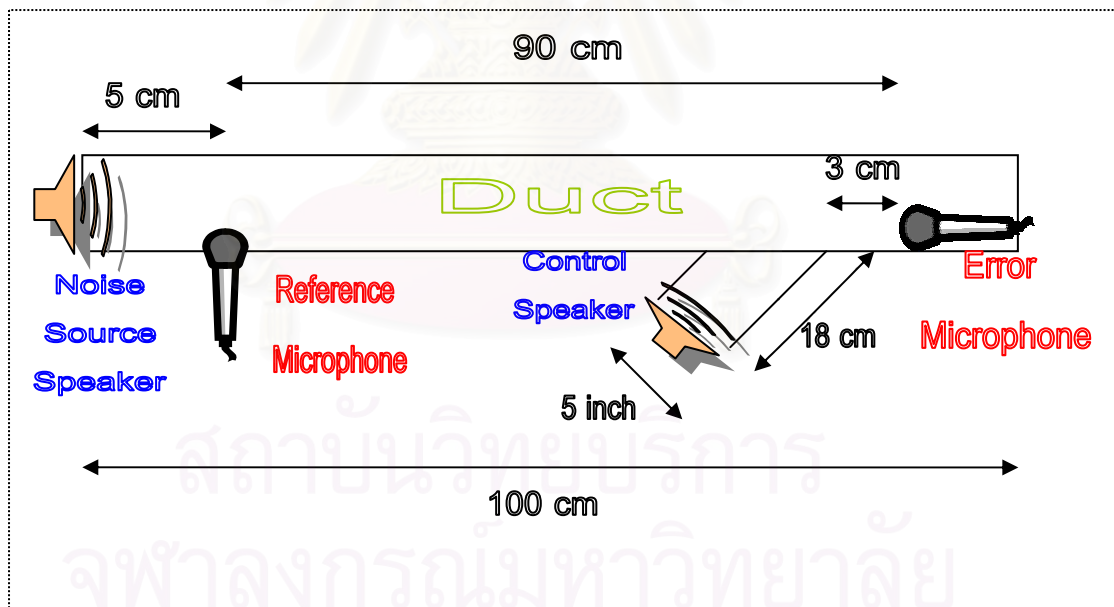
การทดลองนี้จะทำการทดลองลดเสียงรบกวนภายในท่อแคบ (Narrow Duct) เพื่อจำกัดขอบเขตของทางเดินของเสียงให้อยู่ในรูป 1 มิติ เพื่อให้ง่ายต่อการควบคุม อีกทั้งเพื่อให้เป็นแนวทางในการควบคุมระบบที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น (Higher Order Mode) นอกจากนี้ยังเป็นการตรวจสอบโปรแกรม และ อัลกอริทึม (Algorithm) ของระบบว่ามีความถูกต้องหรือไม่ โดยโครงสร้างของระบบควบคุมที่ใช้จะเป็นแบบป้อนไปข้างหน้าชนิดปรับตัวได้ (Adaptive Feedforward Control) ชนิดของตัวกรองเป็นแบบ FIR (Finite Impulse Response) โดยจะใช้ อัลกอริทึมในการปรับตัวบนพื้นฐานของ LMS (Least Mean Square)



รูปที่ 6-1 ก ภาพถ่ายแสดงลักษณะของท่อที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 6-1 ข แผนผังแสดงภาพรวมทั้งหมดของการทดลองในบทที่ 6



รูปที่ 6-1 ค แผนภาพแสดงรายละเอียดขนาดของท่อและระยะห่างระหว่างลำโพงและไมโครโฟน

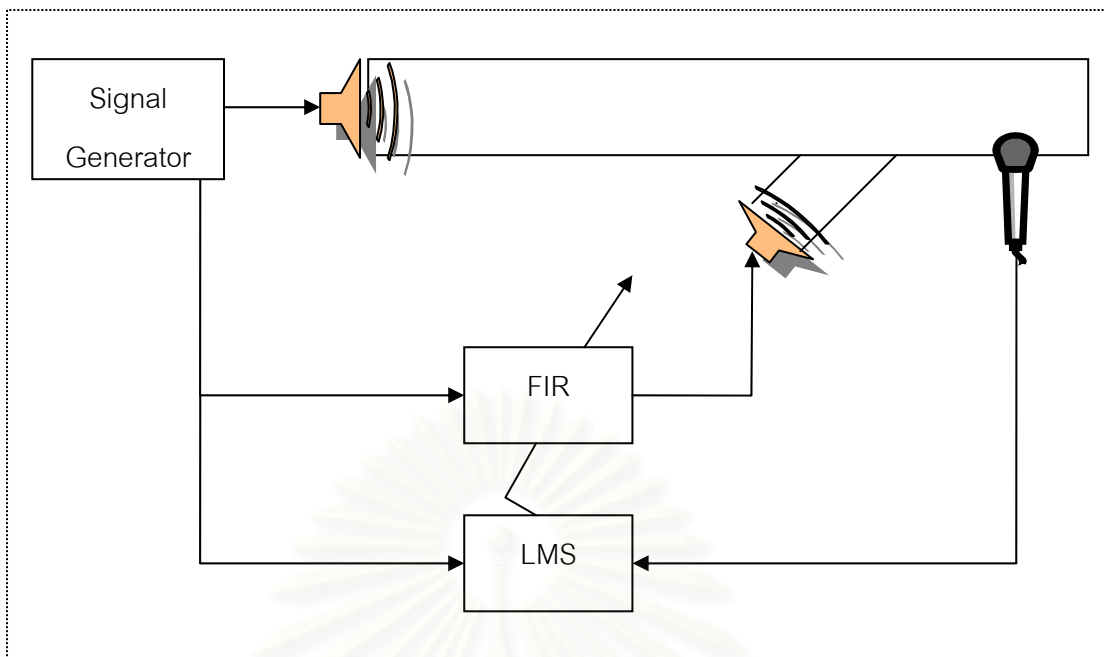
## 6-1 ลักษณะของการทดลอง

### 6.1 ทดลองลดเสียงรบกวนแบบรับสัญญาณอ้างอิง (Reference Signal) โดยใช้ไมโครโฟน อัลกอริทึมที่ใช้เป็นชนิด FXLMS

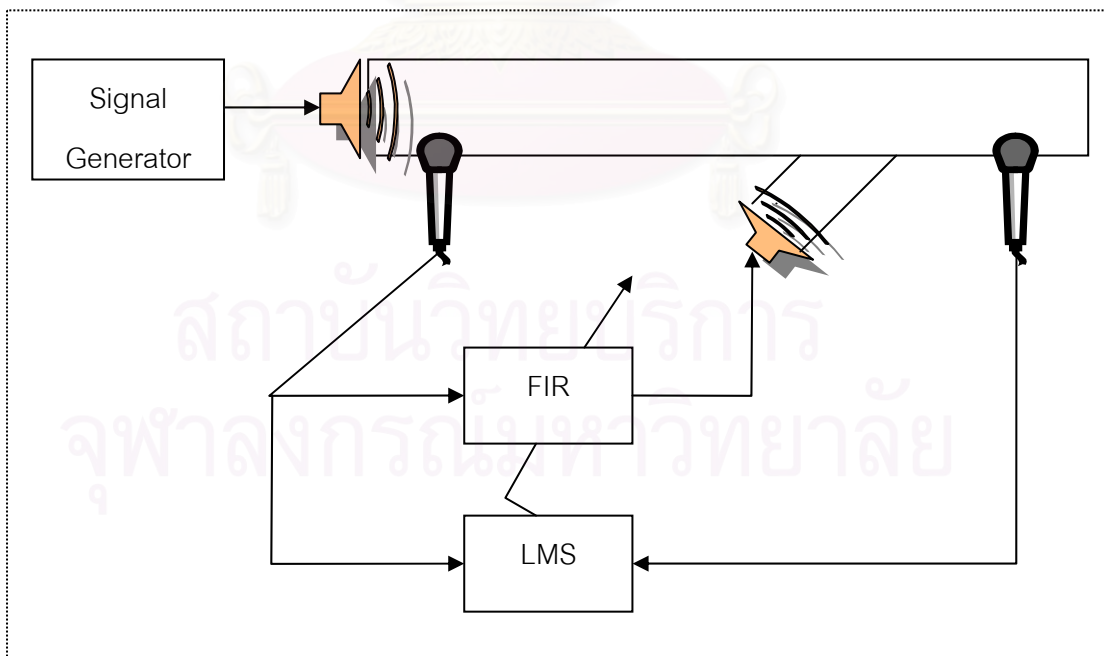
การทดลองนี้จะทำการรับสัญญาณอ้างอิงโดยตรงจากเครื่องกำเนิดสัญญาณ (Signal Generator) เพื่อลดความซับซ้อนของระบบลง อาทิเช่น ปัญหาเนื่องจากเสียงย้อนกลับ (Acoustic Feedback) จากลำโพงควบคุมไปสู่อัลกอริทึมรับสัญญาณอ้างอิง ซึ่งจะทำให้เกิดโพล (Poles) ขึ้นในระบบทำให้ระบบไม่มีเสถียรภาพ (Stability) อีกทั้งปัญหาของตำแหน่งในการติดตั้งไมโครโฟนรับสัญญาณอ้างอิง เพราะหากติดตั้งในตำแหน่งที่ไม่เหมาะสม เช่น ตำแหน่งโนด (Nodes) ของความถี่ที่จะควบคุม จะส่งผลให้การควบคุมทำได้ไม่ดี หรืออาจไม่ได้เลย อันเป็นผลเนื่องมาจากระบบควบคุมไม่ได้รับสัญญาณอ้างอิงที่ถูกต้องเพียงพอ รูปแบบของการทดลองเป็นดังรูปที่ 6-2 ก

### 6.2 ทดลองลดเสียงรบกวนแบบรับสัญญาณอ้างอิง (Reference Signal) โดยใช้ไมโครโฟน อัลกอริทึมที่ใช้เป็นชนิด FXLMS และ FBFXLMS

การทดลองนี้จะทำการรับสัญญาณอ้างอิงโดยใช้ไมโครโฟน เนื่องจากในทางปฏิบัติแหล่งกำเนิดเสียง (Noise Source) ไม่ได้อยู่ในรูปของสัญญาณไฟฟ้า ทำให้เราไม่สามารถรับสัญญาณโดยตรงได้เหมือนกับที่ได้จากเครื่องกำเนิดสัญญาณ (Signal Generator) ดังนั้นการทดลองนี้จึงเลือกใช้ไมโครโฟนเป็นตัวรับสัญญาณเสียงจากแหล่งกำเนิดเสียง เพื่อเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของสัญญาณไฟฟ้าเพื่อส่งให้ตัวควบคุมต่อไปโดยจะมีการเปรียบเทียบระหว่างการใช้อัลกอริทึมเดิมคือ FXLMS และอัลกอริทึม FBFXLMS ซึ่งได้ลดผลกระทบเนื่องจากสัญญาณเสียงย้อนกลับแล้ว รูปแบบของการทดลองเป็นดังรูปที่ 6-2 ข



รูปที่ 6-2 ก รูปแบบอย่างง่ายของการทดลองที่ 6.1  
เป็นการรับสัญญาณเสียงโดยตรงจาก Signal Generator



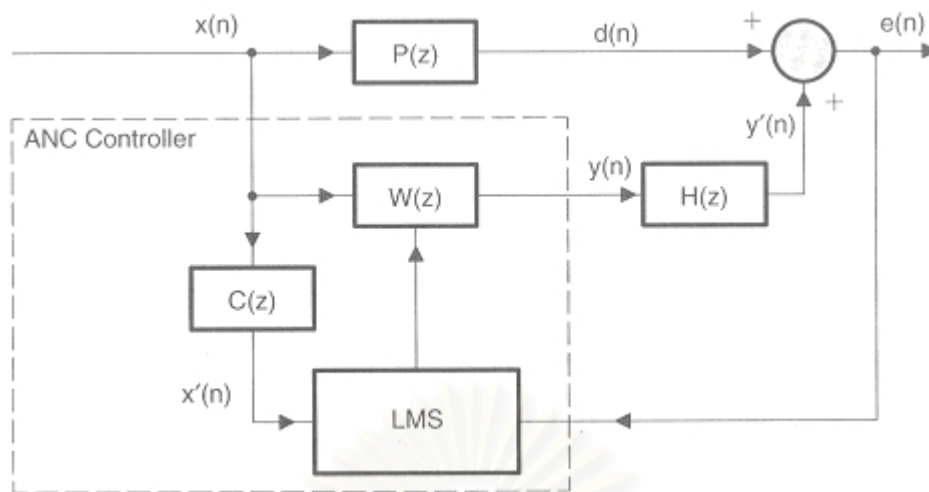
รูปที่ 6-2 ข รูปแบบอย่างง่ายของการทดลองที่ 6.2  
โดยใช้ไมโครโฟนเป็นตัวรับสัญญาณอ้างอิง



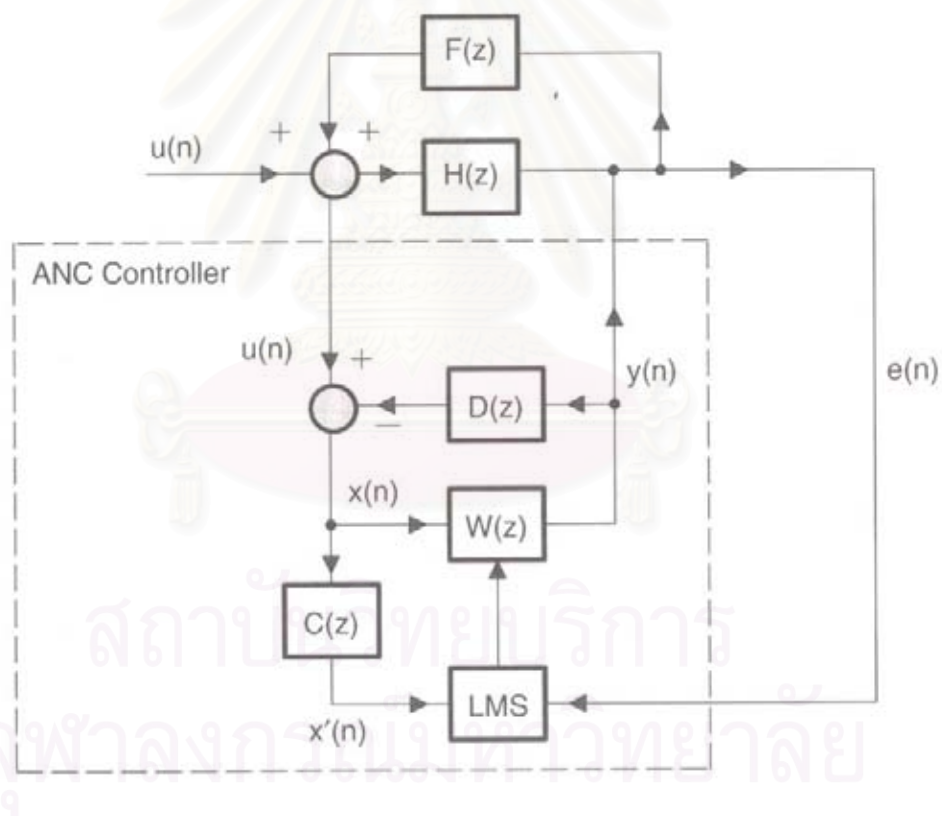
## 6-2 ขั้นตอนและผลการทดลอง

การทดลองที่ 6.1 ทดลองลดเสียงรบกวนโดยรับสัญญาณอ้างอิง (Reference Signal) โดยตรงจากเครื่องกำเนิดสัญญาณ (Signal Generator) โดยไม่ใช่ไมโครโฟน โครงสร้างของระบบควบคุมเป็นแบบป้อนไปข้างหน้าชนิดปรับตัวได้ (Adaptive Feedforward Control) ดังแสดงในรูปที่ 6-2 ก สำหรับความถี่ของสัญญาณที่จะทำการลดนั้นในที่นี้จะขอเลือกทดลองเฉพาะบางความถี่เท่านั้น ดังตารางที่ 6.1 โดยอัลกอริทึมที่ใช้จะเป็นชนิด FXLMS (Filtered-X Least Mean Square) จากรูปที่ 6-2 ค ประกอบ ซึ่งมีอันดับ (Order) ของตัวกรองของระบบควบคุม  $W(z)$  เท่ากับ 127 และอันดับของตัวกรองชดเชย  $C(z)$  เท่ากับ 63 โดยมีขั้นตอนต่างๆดังนี้

1. ใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณเป็นแหล่งกำเนิดเสียงรบกวน ส่งสัญญาณไฟฟ้าความถี่ต่างๆไปยังลำโพง ซึ่งในที่นี้จะขอเรียกลำโพงกำเนิดสัญญาณเสียงรบกวน โดยทำการติดตั้งไว้ที่ปลายท่อด้านหนึ่ง และควรทำกล่องหุ้มลำโพงไว้เพื่อป้องกันไม่ให้เสียงเดินทางไปยังผู้สังเกต (Observer) ได้ เนื่องจากผู้วิจัยต้องการให้ผู้สังเกตได้ยินเสียงที่เดินทางผ่านท่อเท่านั้น
2. รับสัญญาณอ้างอิงโดยตรงจากเครื่องกำเนิดสัญญาณพร้อมกับรับสัญญาณความผิดพลาด (Error Signal) จากไมโครโฟนรับสัญญาณความผิดพลาด (Error Microphone) ซึ่งติดตั้งอยู่ที่ปลายท่ออีกด้านหนึ่ง เหตุผลที่รับทั้ง 2 สัญญาณพร้อมกันเนื่องมาจากข้อจำกัดทางด้านฮาร์ดแวร์ (Hardware) ของระบบควบคุม
3. นำทั้ง 2 สัญญาณที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 ไปเข้าระบบควบคุม โดยสัญญาณทั้งสองนั้นควรปรับให้มีขนาดน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ โดยไม่ทำให้สัญญาณเกิดการบิดเบี้ยว (Distortion) ไป เนื่องจากขนาดของสัญญาณที่มากเกินไปจะส่งผลให้ระบบควบคุมเกิดการ Overflow ขึ้น ทำให้ระบบควบคุมไม่มีเสถียรภาพได้ การประมวลผลสัญญาณนั้นจะกระทำโดยใช้อัลกอริทึมชนิด FXLMS ทดลองปรับค่า  $\mu$  ไปเรื่อยๆ จนได้ค่าที่เหมาะสมออกมา ผลลัพธ์จะได้ออกมาเป็นสัญญาณควบคุม เพื่อส่งไปยังลำโพงควบคุม (Control Source)
4. สัญญาณที่ส่งไปยังลำโพงควบคุมนี้ จะมีเฟสต่างกับกับเสียงที่เดินทางผ่านท่อมายังจุดหักล้างอยู่ประมาณ 180 องศา หลังจากทำการหักล้างแล้ว ก็ให้ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 2 คือจะรับสัญญาณเสียงความผิดพลาดอีก ทำเช่นนี้ไปเรื่อยๆ



รูปที่ 6-2 ค แผนภาพแสดงระบบควบคุมที่ใช้อัลกอริทึมชนิด FXLMS



รูปที่ 6-2 ง แผนภาพแสดงระบบควบคุมที่ใช้อัลกอริทึมชนิด FBFXLMS

หมายเหตุ ไมโครโฟนรับสัญญาณความผิดพลาด นอกจากจะนำสัญญาณที่ได้ไปเข้าระบบควบคุมเพื่อสร้างสัญญาณควบคุมแล้ว ยังสามารถที่จะนำสัญญาณที่ได้นั้นไปเข้าเครื่องวิเคราะห์สัญญาณเชิงความถี่ (FFT Analyser) หรือ ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) ก็ได้

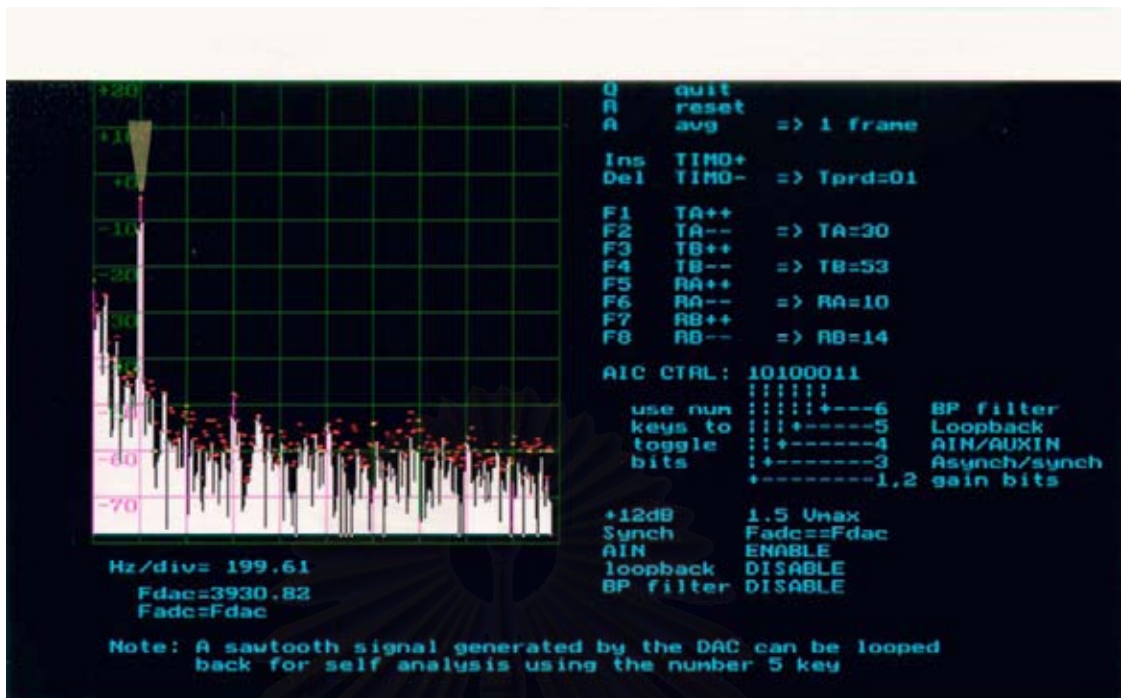
ตารางที่ 6.1 แสดงผลลัพธ์ของการทดลองที่ 6.1 เป็นการลดเสียงรบกวนภายในท่อ แบบรับสัญญาณอ้างอิงโดยตรงจากเครื่องกำเนิดสัญญาณ ใช้อัลกอริทึมชนิด FXLMS มีอันดับ (Order) ของตัวกรองของระบบควบคุม  $W(z)$  เท่ากับ 127 และอันดับของตัวกรองชดเชย  $C(z)$  เท่ากับ 63

ความถี่ของเสียงรบกวน	การลดทอนเฉลี่ย (dBV)
100	19
200	20
500	23.5
100+200	23
200+500	22

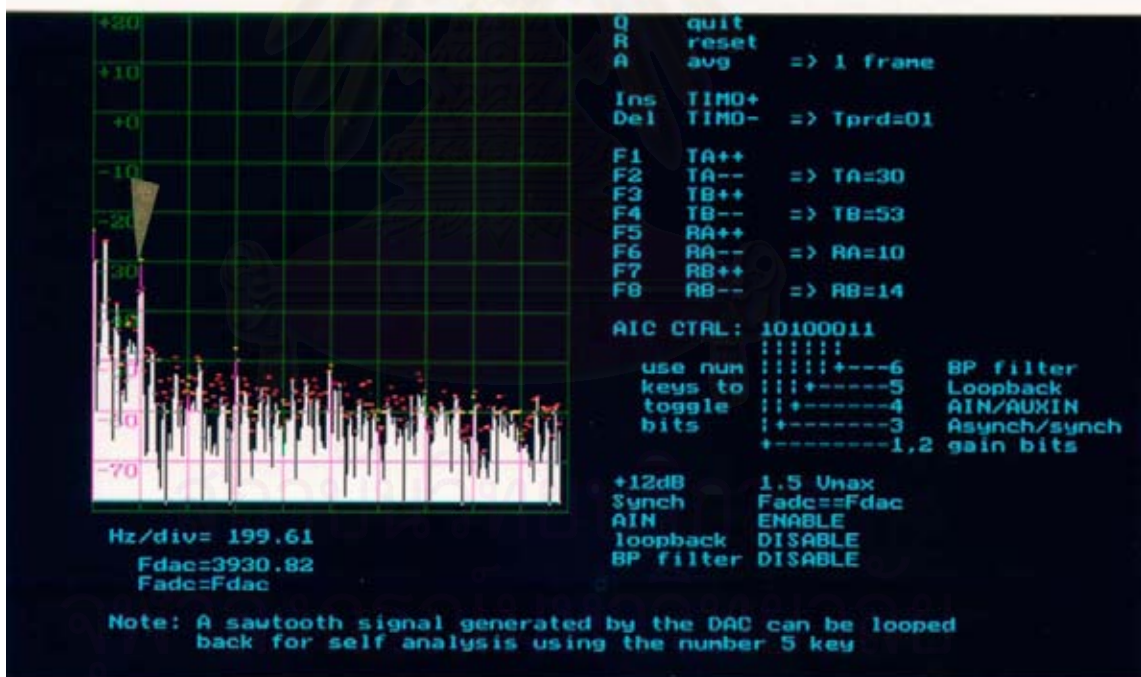
หมายเหตุ ในการทดลองที่ 6.1 นั้นการวัดผลจะใช้เพียงเครื่องวิเคราะห์สัญญาณเชิงความถี่ (FFT Analyser) หรือ ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) เท่านั้น เนื่องจากในขณะทำการทดลองนั้น เครื่องวัดระดับเสียง (Sound Level Meter) ยังอยู่ในขั้นตอนของการสั่งซื้อและทำการขนส่งสินค้า โดยค่า dBV หมายถึง ค่าความสัมพันธ์เชิงลอการิทึม (Logarithm) ของอัตราส่วนระหว่างขนาดของสัญญาณไฟฟ้า  $V_{rms}$  หน่วยเป็นโวลต์ (Volt) เทียบกับแรงดันอ้างอิง 1 โวลต์ ซึ่งมีสมการความสัมพันธ์ดังนี้คือ 
$$dBV = 10 \log \frac{V_{rms}}{1 \text{ volt}}$$
 เช่น การลดทอนเฉลี่ย 20 dBV หมายถึง สัญญาณความผิดพลาดขณะเปิดเครื่องลดเสียงรบกวนแบบแอกทีฟ มีขนาดน้อยกว่าสัญญาณความผิดพลาดขณะปิดเครื่องลดเสียงรบกวนแบบแอกทีฟ 100 เท่า สำหรับเหตุผลในการเลือกใช้อันดับของตัวกรองของระบบควบคุม  $W(z)$  เท่ากับ 127 และอันดับของตัวกรองชดเชย  $C(z)$  เท่ากับ 63 เนื่องจากในทางปฏิบัตินิยมใช้จำนวนอันดับในรูปแบบของ  $2^n - 1$  โดย  $n$  เป็นจำนวนเต็มบวกใดๆ ในการทดลองนี้จึงเลือกใช้ค่า 127 และ 63 ซึ่งให้ผลการทดลองออกมาดี จึงไม่ได้ทำการพิจารณาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงอันดับของตัวกรองแต่อย่างใด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิเคราะห์ผลการทดลองที่ 6.1 ค่าการลดทอน (Attenuation) ที่ได้จากรางข้างบนนี้ เป็นเพียงค่าประมาณเท่านั้น เนื่องจากการลดทอนที่ได้ จะทำได้มากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับค่าปรับพารามิเตอร์  $\mu$  และการปรับขนาด (Scaling) ของทั้งสัญญาณอ้างอิง และสัญญาณความผิดพลาดด้วย ถ้าปรับพารามิเตอร์ได้ดี การลดทอนสามารถที่จะทำได้มากกว่านี้ ส่วนค่า  $\mu$  ที่เหมาะสมนั้น ตามทฤษฎียังไม่พบวิธีการใดที่จะหาค่าที่เหมาะสมได้ ดังนั้นการทดลองนี้จึงทำการใช้ค่า  $\mu$  เริ่มต้นด้วยค่าน้อยๆ และทำการสังเกตขนาดของสัญญาณความผิดพลาดจากออสซิลโลสโคป ถ้ายังไม่เป็นศูนย์ ก็ทำการเพิ่มค่า  $\mu$  ให้มากขึ้นอีก (การเพิ่มค่า  $\mu$  จะทำในระหว่างที่ตัวควบคุมทำงานอยู่ (Real Time) โดยไม่มีผลกระทบต่อการทำงานแต่ประการใด เนื่องจากประสิทธิภาพของซอฟต์แวร์ Code Composer Studio V 2.0 ซึ่งสามารถทำการถ่ายโอนข้อมูลจากเครื่องคอมพิวเตอร์ไปยังตัวควบคุมได้โดยไม่กระทบต่อการทำงานของตัวควบคุม) ในตอนแรกการเพิ่มค่า  $\mu$  นี้จะทำให้การลดทอนเพิ่มมากขึ้น ทำเช่นนี้ไปเรื่อยๆจนกระทั่งค่า  $\mu$  ที่เพิ่มขึ้นมานั้น ทำให้การลดทอนมีประสิทธิภาพลดลงจึงหยุดการเพิ่มค่า  $\mu$  ถ้าหากยังคงเพิ่มค่า  $\mu$  ต่อกันต่อไปอีกจะส่งผลให้ระบบควบคุมไม่มีเสถียรภาพได้

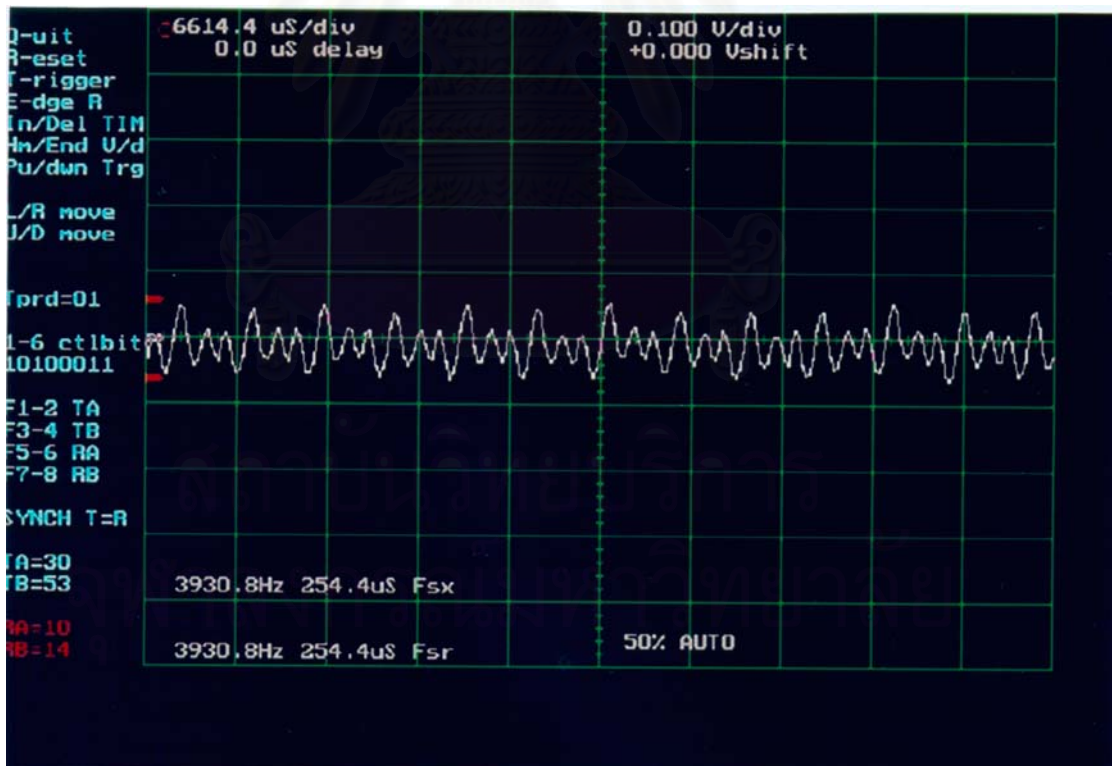
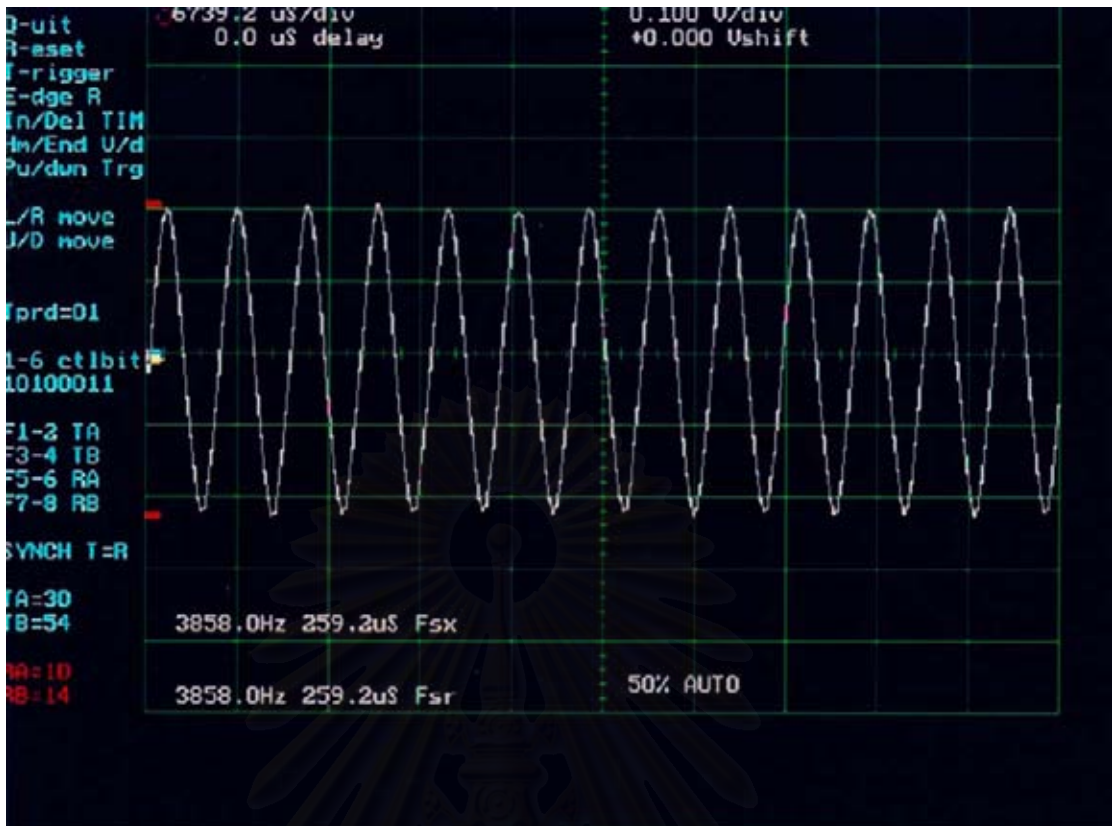


01



02

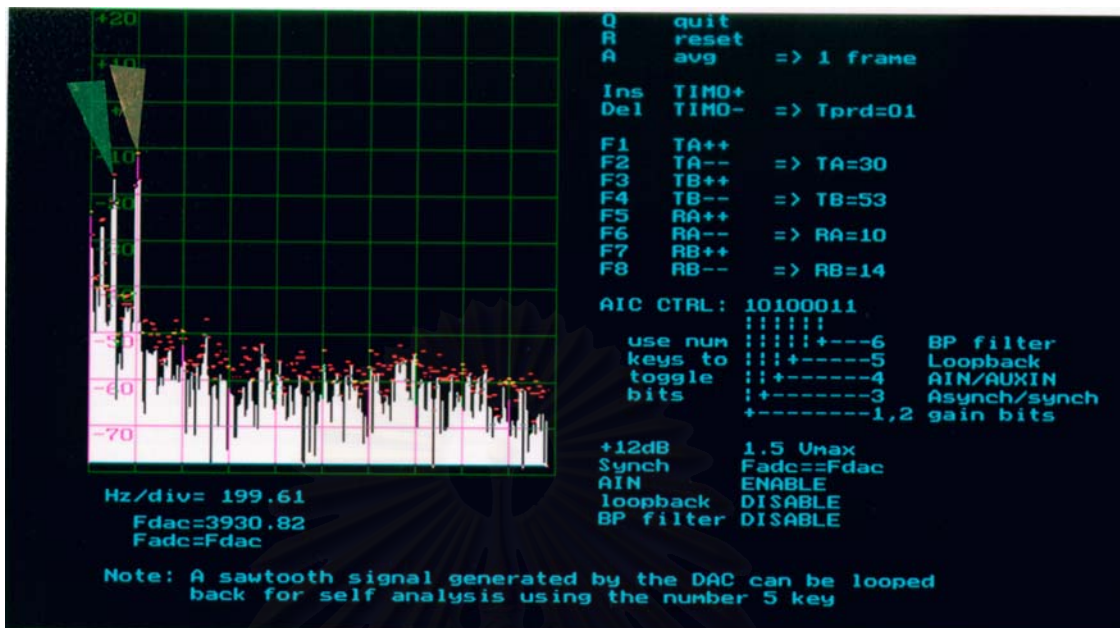
รูปที่ 6-3 กราฟในโดเมนความถี่ที่ได้จาก FFT Analyser  
บน) แสดงความถี่ 200 Hz (ทำเครื่องหมายไว้) ขณะเปิดเครื่องลดเสียงรบกวนแบบแอกทีฟ  
ล่าง) แสดงความถี่ 200 Hz (ทำเครื่องหมายไว้) ขณะเปิดเครื่องลดเสียงรบกวนแบบแอกทีฟ



รูปที่ 6-4 กราฟในโดเมนเวลาที่ได้จาก Oscilloscope

บน) แสดงความถี่ 200 Hz ขณะปิดเครื่องลดเสียงรบกวนแบบแอกทีฟ

หนึ่ง) แสดงความถี่ 200 Hz ขณะเปิดเครื่องลดเสียงรบกวนแบบแอกทีฟ

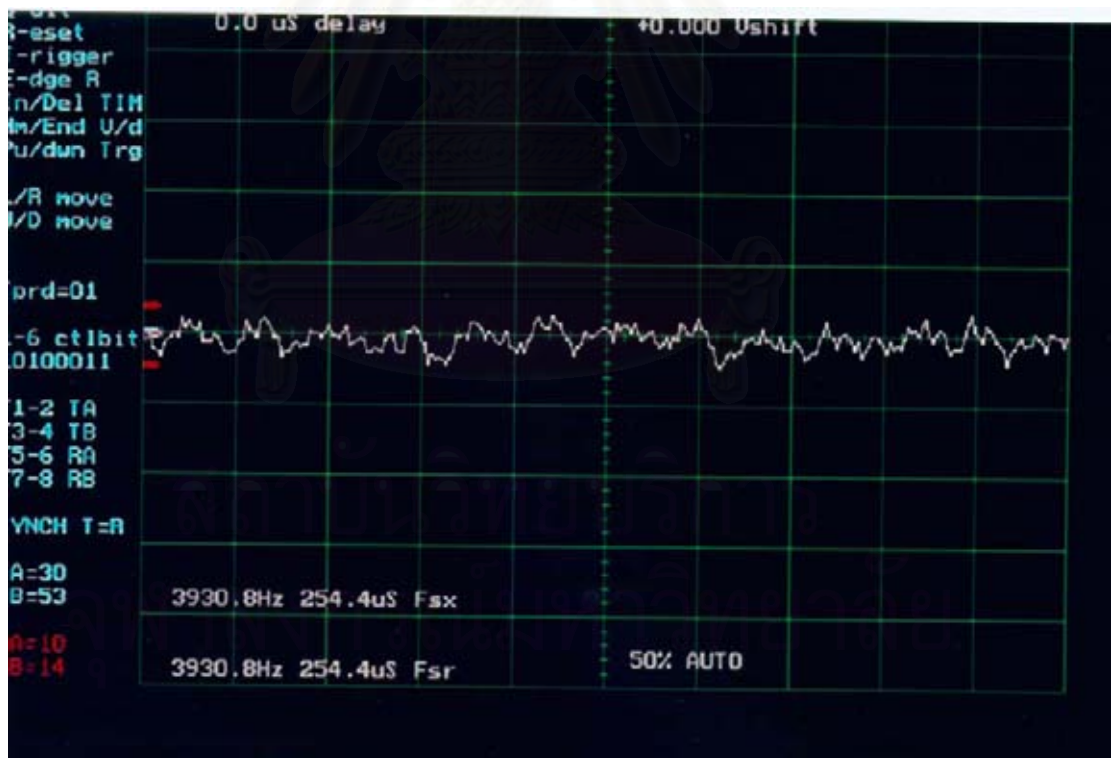
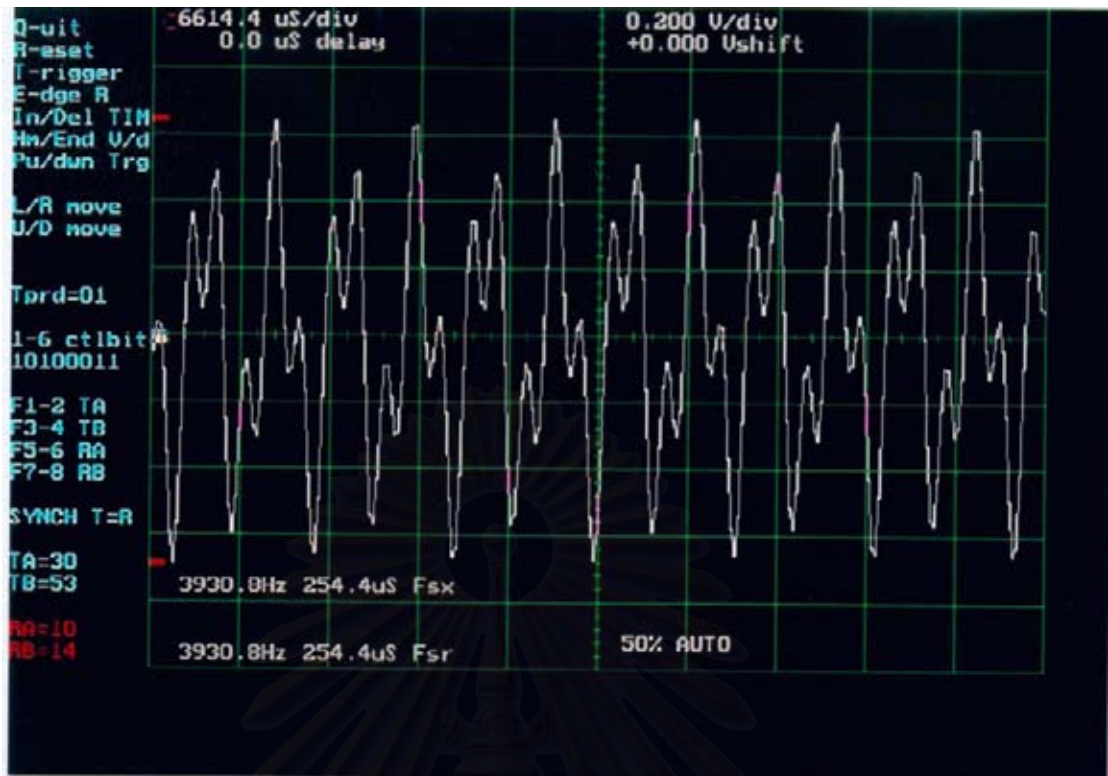


04



4

รูปที่ 6-5 กราฟในโดเมนความถี่ที่ได้จาก FFT Analyser บน แสดงความถี่ 100+200 Hz (ทำเครื่องหมายไว้) ขณะเปิดเครื่องลดเสียงรบกวนแบบแอกทีฟล่าง แสดงความถี่ 100+200 Hz (ทำเครื่องหมายไว้) ขณะเปิดเครื่องลดเสียงรบกวนแบบแอกทีฟ



รูปที่ 6-6 กราฟในโดเมนเวลาที่ได้จาก Oscilloscope

บน) แสดงความถี่  $100+200$  Hz ขณะปิดเครื่องลดเสียงรบกวนแบบแอกทีฟ  
 ล่าง) แสดงความถี่  $100+200$  Hz ขณะเปิดเครื่องลดเสียงรบกวนแบบแอกทีฟ



การทดลองที่ 6.2 ทดลองลดเสียงรบกวนโดยรับสัญญาณอ้างอิง (Reference Signal) จากไมโครโฟน โครงสร้างของระบบควบคุมเป็นแบบป้อนไปข้างหน้าชนิดปรับตัวได้ (Adaptive Feedforward Control) ดังแสดงในรูปที่ 6-2 ข สำหรับความถี่ของสัญญาณที่จะทำการลดเสียงรบกวนในที่นี้จะขอเลือกทดลองเฉพาะบางความถี่เท่านั้น ดังตารางที่ 6.2 โดยอัลกอริทึมที่ใช้จะเป็นชนิด FXLMS (Filtered-X Least Mean Square) และชนิด FBFXLS (Feedback FXLMS) จากรูปที่ 6-2 ค และ รูปที่ 6-2 ง ประกอบ ซึ่งมีอันดับ (Order) ของตัวกรองของระบบควบคุม  $W(z)$  เท่ากับ 127 อันดับของตัวกรองชดเชย  $C(z)$  เท่ากับ 63 และอันดับของตัวกรองชดเชย  $D(z)$  เท่ากับ 63 โดยมีขั้นตอนต่างๆดังนี้

1. ใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณเป็นแหล่งกำเนิดเสียงรบกวน ส่งสัญญาณไฟฟ้าความถี่ต่างๆไปยังลำโพงกำเนิดสัญญาณเสียงรบกวน โดยทำการติดตั้งไว้ที่ปลายท่อด้านหนึ่ง และควรทำกล่องหุ้มลำโพงไว้เพื่อป้องกันไม่ให้เสียงเดินทางไปยังผู้สังเกต (Observer) ได้ เนื่องจากผู้วิจัยต้องการให้ผู้สังเกตได้ยินเสียงที่เดินทางผ่านท่อเท่านั้น
2. ทำการรับสัญญาณอ้างอิงจากไมโครโฟนรับสัญญาณอ้างอิง (Reference Microphone) ซึ่งติดตั้งอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้กับลำโพงกำเนิดเสียงรบกวน เพื่อให้ได้สัญญาณอ้างอิงที่มีคุณภาพ ในขณะที่เดียวกันก็รับสัญญาณความผิดพลาด (Error Signal) จากไมโครโฟนรับสัญญาณความผิดพลาด (Error Microphone) ซึ่งติดตั้งอยู่ที่ปลายท่ออีกด้านหนึ่ง เหตุผลที่รับทั้ง 2 สัญญาณพร้อมกันเนื่องมาจากข้อจำกัดทางด้านฮาร์ดแวร์ (Hardware) ของระบบควบคุม
3. นำทั้ง 2 สัญญาณที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 ไปเข้าระบบควบคุม โดยสัญญาณทั้งสองนั้นควรปรับให้มีขนาดน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ โดยไม่ทำให้สัญญาณเกิดการบิดเบี้ยว (Distortion) ไป เนื่องจากขนาดของสัญญาณที่มากเกินไปจะส่งผลให้ระบบควบคุมเกิดการ Overflow ขึ้น ทำให้ระบบควบคุมไม่มีเสถียรภาพได้ การประมวลผลสัญญาณนั้นจะกระทำโดยใช้อัลกอริทึมชนิด FXLMS ทดลองปรับค่า  $\mu$  ไปเรื่อยๆ จนได้ค่าที่เหมาะสมออกมา ผลลัพธ์จะได้ออกมาเป็นสัญญาณควบคุม เพื่อส่งไปยังลำโพงควบคุม (Control Source)
4. สัญญาณที่ส่งไปยังลำโพงควบคุมนี้ จะมีเฟสต่างกับเสียงที่เดินทางผ่านท่อมายังจุดหักล้างอยู่ประมาณ 180 องศา หลังจากทำการหักล้างแล้ว ก็ให้ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 2 คือจะรับสัญญาณเสียงความผิดพลาดอีก ทำเช่นนี้ไปเรื่อยๆ

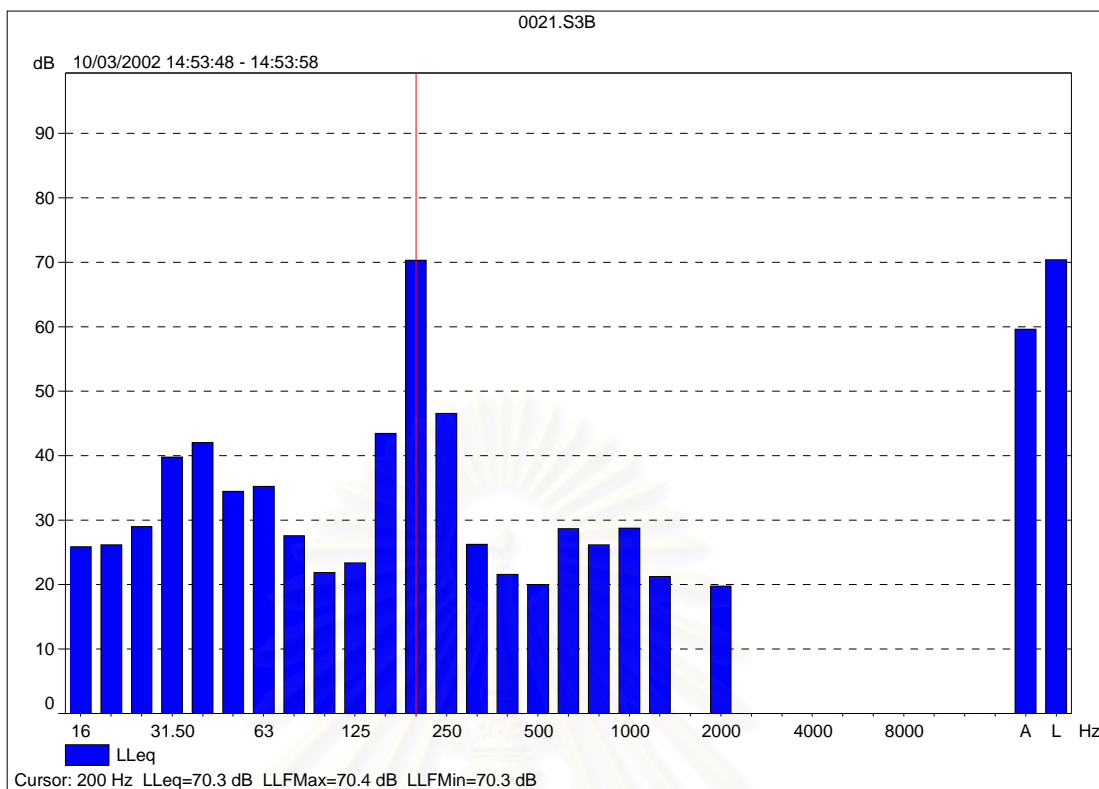
ตารางที่ 6.2 แสดงการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของการทดลองที่ใช้อัลกอริทึมชนิด FXLMS และ FBFXLMS จากการทดลองที่ 6.2 เป็นการลดเสียงรบกวนภายในท่อ แบบรับสัญญาณอ้างอิงจากไมโครโฟน มีอันดับ (Order) ของตัวกรองของระบบควบคุม  $W(z)$  เท่ากับ 127 อันดับของตัวกรองชดเชย  $C(z)$  เท่ากับ 63 และอันดับของตัวกรองชดเชย  $D(z)$  เท่ากับ 63

ความถี่ของแหล่งกำเนิดเสียงรบกวน	การลดทอนเฉลี่ยเฉพาะความถี่ที่พิจารณา (Leq) Weighting L หน่วยเป็น dB อัลกอริทึมแบบ FXLMS	การลดทอนเฉลี่ยเฉพาะความถี่ที่พิจารณา (Leq) Weighting L หน่วยเป็น dB อัลกอริทึมแบบ FBFXLMS
100	1.4	5.6
150	8.8	10.5
160	7.3	12.8
170	6.4	10
180	4.7	15.3
190	2.8	5.7
200	3.7	19.9
210	2.1	25.3
220	2.6	25.3
230	7.8	11.3
240	5.4	10.7
250	1.9	5.4
300	1.7	10.1
350	1.1	21.3
400	0.4	3.9
450	1.2	8.3
500	1.9	15.3

หมายเหตุ Weighting L หมายถึง การวัดระดับเสียงโดยไม่ผ่านตัวกรองใดๆ

Weighting A หมายถึง การวัดระดับเสียงโดยผ่านตัวกรองแบบผ่านความถี่ (Band Pass Filter)

เพื่อให้สัญญาณขาออกมีการลดทอนในแต่ละความถี่คล้ายกับธรรมชาติการได้ยินของมนุษย์ [4]



รูปที่ 6-7 สเปกตรัมของสัญญาณขณะปิดเครื่องลดเสียงรบกวนแบบแอคทีฟ

โดยอัลกอริทึมชนิด FXLMS

แสดงความถี่ที่โดดเด่นคือ 200 Hz (เส้นสีแดงลากผ่าน)

ส่วนความถี่อื่นๆคือ เสียงรบกวนจากสิ่งแวดล้อม (Background Noise) ขณะทำการทดลอง

ทำการวัดสัญญาณโดยใช้เครื่องวัดระดับเสียง (Sound Level Meter)

ทำการบันทึกเป็นเวลา 10 วินาที

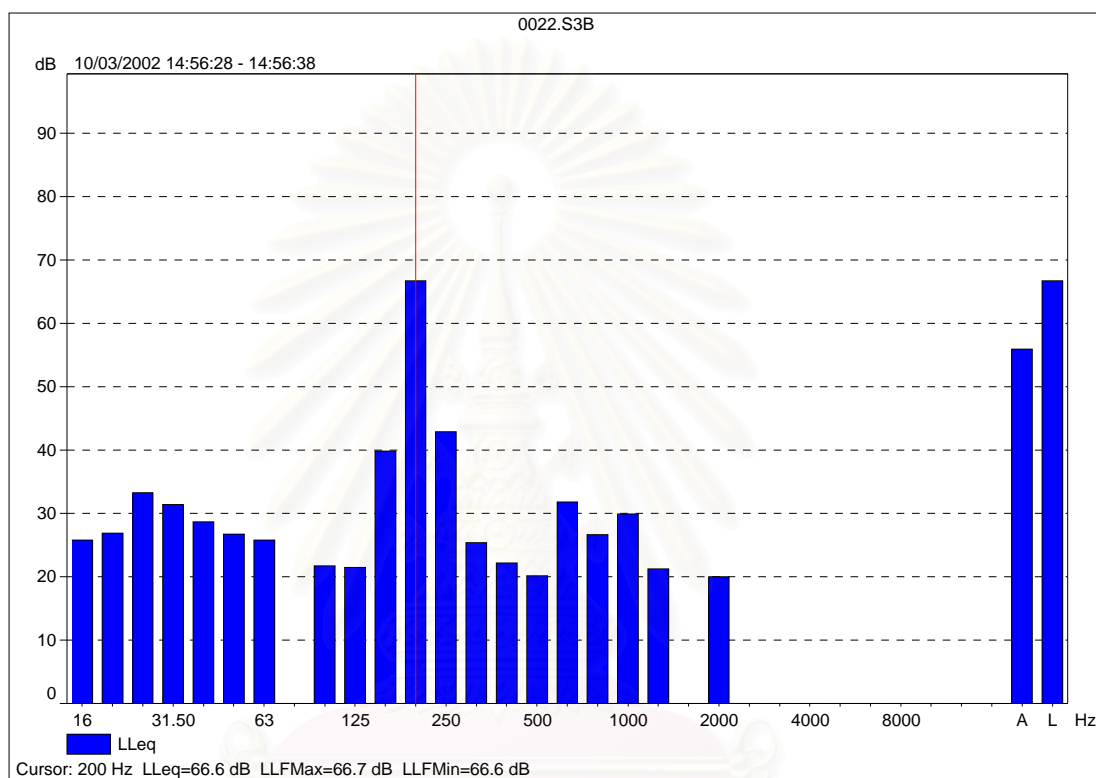
หมายเหตุ จากรูปที่ 6-7 แกน Y แสดงขนาดของระดับความดันเสียง (Sound Pressure Level)

หน่วยเป็น dB สำหรับแกน X แสดงความถี่ต่างๆ แบบ 1/3 Octave สำหรับ 2 แห่งขาสุด

A หมายถึง ระดับความดันเสียงโดยเฉลี่ยรวมทุกๆความถี่ หลังจากผ่านวงจรรองแบบผ่านความถี่ (Band Pass Filter) ที่มีความถี่ตัด (Cut-Off Frequency) ด้านต่ำเป็น 1 KHz และด้านสูงเป็น 6 KHz เพื่อให้สัญญาณขาออกมีการลดทอนในแต่ละความถี่คล้ายกับธรรมชาติการได้ยินของมนุษย์ (เทียบกับ Curve A) [4]

L หมายถึง ระดับความดันเสียงโดยเฉลี่ยรวมทุกๆความถี่ โดยไม่ต้องผ่านตัวกรองใดๆ ด้านบนของกราฟเป็น ตัวเลขแสดงวันเดือนปี เวลาที่เริ่มและหยุดบันทึกผลการทดลองที่ความถี่ 200 Hz ส่วนด้านล่างของกราฟ LLeq = ค่าระดับความดันเสียงเฉลี่ย ณ ความถี่ที่ Cursor อยู่ (200 Hz) โดย LL หมายถึง การไม่ต้องผ่านตัวกรองใดๆ ทั้งในโดเมนเวลา

และโดเมนความถี่ ทำนองเดียวกัน LLFmax , LLFmin หมายถึงค่าระดับความดันเสียงมากที่สุด และน้อยสุดของความถี่ที่ Cursor อยู่ในเวลาที่บันทึกผล ตามลำดับ



รูปที่ 6-8 สเปกตรัมของสัญญาณขณะเปิดเครื่องลดเสียงรบกวนแบบแอกทีฟ

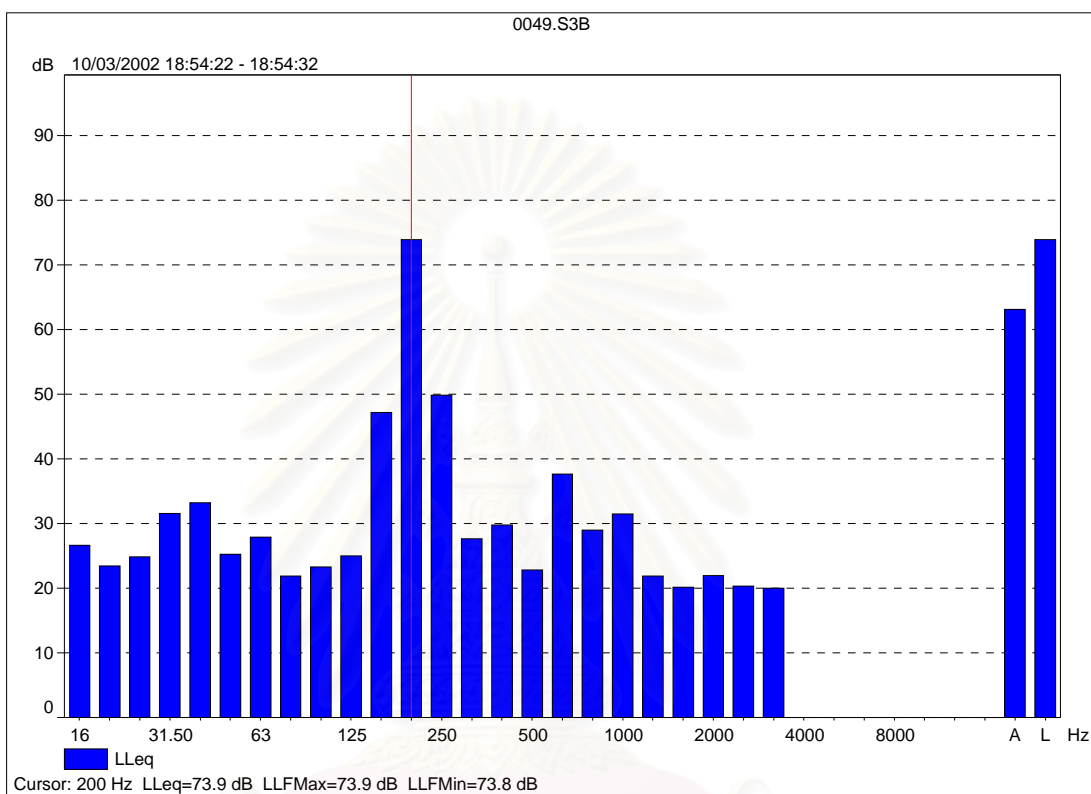
โดยอัลกอริทึมชนิด FXLMS

แสดงความถี่ที่โดดเด่นคือ 200 Hz (เส้นสีแดงลากผ่าน)

ส่วนความถี่อื่นๆคือ เสียงรบกวนจากสิ่งแวดล้อม (Background Noise) ขณะทำการทดลอง

ทำการวัดสัญญาณโดยใช้เครื่องวัดระดับเสียง (Sound Level Meter)

ทำการบันทึกเป็นเวลา 10 วินาที



รูปที่ 6-9 สเปกตรัมของสัญญาณขณะเปิดเครื่องลดเสียงรบกวนแบบแอกทีฟ

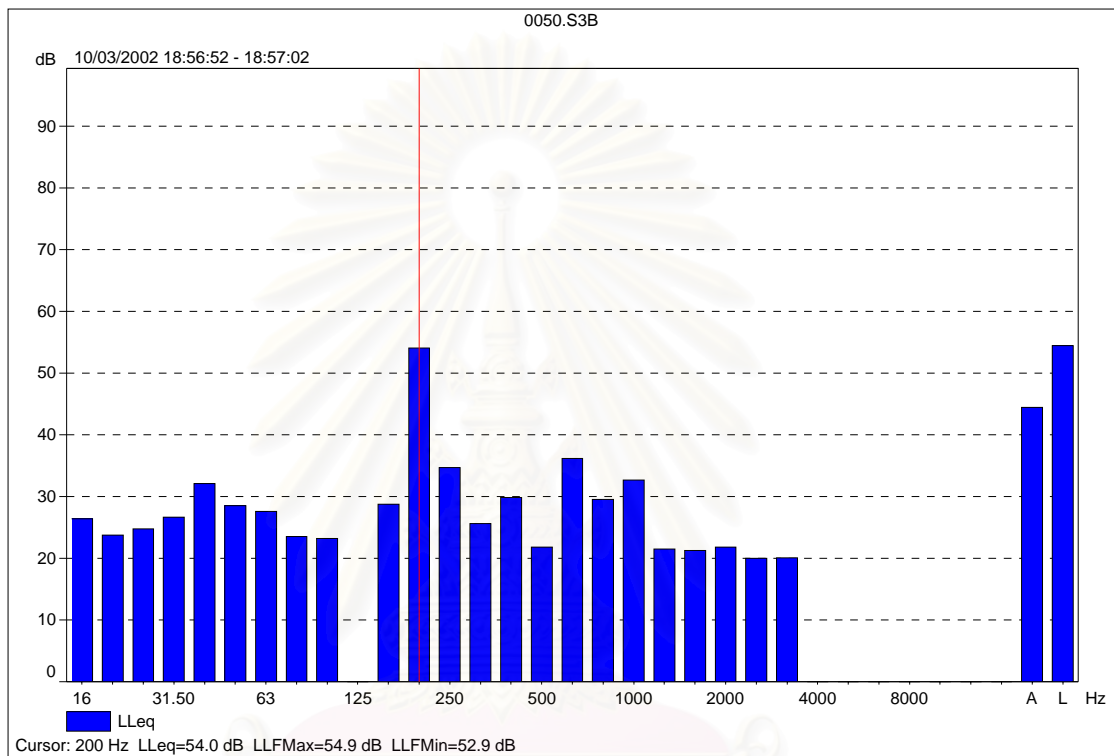
โดยอัลกอริทึมชนิด FBFXLMS

แสดงความถี่ที่โดดเด่นคือ 200 Hz (เส้นสีแดงลากผ่าน)

ส่วนความถี่อื่นๆคือ เสียงรบกวนจากสิ่งแวดล้อม (Background Noise) ขณะทำการทดลอง

ทำการวัดสัญญาณโดยใช้เครื่องวัดระดับเสียง (Sound Level Meter)

ทำการบันทึกเป็นเวลา 10 วินาที



รูปที่ 6-10 สเปกตรัมของสัญญาณขณะเปิดเครื่องลดเสียงรบกวนแบบแอกทีฟ

โดยอัลกอริทึมชนิด FBFXLMS

แสดงความถี่ที่โดดเด่นคือ 200 Hz (เส้นสีแดงลากผ่าน)

ส่วนความถี่อื่นๆคือ เสียงรบกวนจากสิ่งแวดล้อม (Background Noise) ขณะทำการทดลอง

ทำการวัดสัญญาณโดยใช้เครื่องวัดระดับเสียง (Sound Level Meter)

ทำการบันทึกเป็นเวลา 10 วินาที

### 6-3 อภิปรายผลการทดลอง

1. จากผลการทดลองที่ 6.1 ซึ่งเป็นการทดลองลดเสียงรบกวนโดยรับสัญญาณโดยตรงจากเครื่องกำเนิดสัญญาณ (Signal Generator) เพื่อลดผลกระทบเนื่องจากเสียงย้อนกลับ (Acoustic Feedback) จากลำโพงควบคุม และปัญหาของตำแหน่งในการติดตั้งไมโครโฟนรับสัญญาณอ้างอิง อัลกอริทึมที่ใช้จะเป็นชนิด FXLMS (Filtered-X LMS) จากตารางที่ 6.1 จะเห็นได้ว่าการลดเสียงรบกวนสามารถทำได้ดีมาก บางความถี่สามารถลดทอนได้ถึง 23.5 dBV โดยการวัดสัญญาณในโดเมนความถี่ และ ในโดเมนเวลา ทำโดยการประยุกต์ใช้ชุดประมวลผลสัญญาณเชิงดิจิทัล ของบริษัท Texas Instruments จำกัด รุ่น TMS320c31 DSK
2. จากผลการทดลองที่ 6.2 เป็นการทดลองลดเสียงรบกวนโดยใช้ไมโครโฟนในการรับสัญญาณอ้างอิง อัลกอริทึมที่ใช้จะเป็นชนิด FXLMS (Filtered-X LMS) ซึ่งจะมีผลอย่างมาก ถ้าทำการติดตั้งในตำแหน่งที่รับสัญญาณได้ไม่ดี เช่น เป็นโนด (Node) ของระบบ อีกทั้งยังมีผลกระทบอันเนื่องมาจากการเดินทางของเสียงย้อนกลับ (Acoustic Feedback) จากลำโพงควบคุม ซึ่งจะมีผลต่อเสถียรภาพของระบบอย่างมาก เนื่องมาจากการก่อให้เกิดโพล (Pole) ขึ้นในระบบ ดังนั้นในการทดลองนี้ จึงได้มีการทดลองใช้อัลกอริทึมแบบ FBFXLMS (Feedback FXLMS) ซึ่งได้ชดเชยในส่วนของเสียงย้อนกลับแล้ว โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมทั้งสองไว้ในตารางที่ 6.2 จะเห็นได้ว่าการใช้อัลกอริทึม FBFXLMS ได้ผลดีกว่าการใช้อัลกอริทึม FXLMS เนื่องจากได้ทำการชดเชยในส่วนของเสียงย้อนกลับแล้ว ทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น อีกทั้งสัญญาณอ้างอิงที่ได้ก็มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น สรุปคือ การใช้อัลกอริทึมแบบ FBFXLMS จะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า อัลกอริทึม FXLMS ในกรณีที่ ระบบที่จะทำการลดเสียงรบกวนจำเป็นที่จะต้องติดตั้งลำโพงควบคุม ไว้ในตำแหน่งที่ใกล้กันกับไมโครโฟนรับสัญญาณอ้างอิง การหลีกเลี่ยงเสียงย้อนกลับย่อมทำได้ยาก เช่น ท่อที่มีความยาวน้อยๆ ส่วนในกรณีที่เสียงย้อนกลับมีค่าน้อยมากๆ การใช้อัลกอริทึมชนิด FXLMS ก็จะให้ประสิทธิภาพที่ดีไม่แตกต่างจาก FBFXLMS

## บทที่ 7

### การทดลองลดเสียงรบกวนของเครื่องเป่าลมเย็น

การทดลองนี้จะทำการลดเสียงรบกวนโดยมีแหล่งกำเนิดเสียงเป็นเครื่องเป่าลมเย็น ซึ่งจะเป็นระบบที่มีทางเดินของเสียงเป็นแบบ 3 มิติ อีกทั้งขนาดของแหล่งกำเนิดเสียงก็มีขนาดใหญ่มาก นอกจากนั้น ห้องที่ใช้ทดลองยังเป็นห้องธรรมดาทั่วไป ที่ใช้ในการเรียนการสอนซึ่งไม่ได้สร้างระบบป้องกันเสียงสะท้อนจากแหล่งกำเนิดเสียงรบกวน จึงเป็นปัญหาที่ซับซ้อนกว่าในระบบแบบท่อมากพอสมควร ดังนั้นการที่จะควบคุมเสียงให้มีขนาดลดลงได้แบบบริเวณกว้าง (Global Zone) นั้นคงจะเป็นไปได้ยาก หรือมีความเป็นไปได้ว่าจะต้องใช้ระบบควบคุมที่ซับซ้อนมากกว่านี้ เช่น ระบบควบคุมหลายช่องสัญญาณ (Multi-Channel) ซึ่งประกอบไปด้วยไมโครโฟน เครื่องขยายสัญญาณ และลำโพงจำนวนมาก รวมไปถึงการที่ต้องใช้ตัวประมวลผลสัญญาณจำนวนมากด้วย ทำให้มีค่าใช้จ่ายที่เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงขอทำการทดลองลดเสียงรบกวนแบบบริเวณจำกัด (Local Zone) โดยจะใช้ชุดทดลองชุดเดียวกันกับที่ใช้ในการทดลองที่ 6 ระบบควบคุมที่ใช้จะเป็นแบบป้อนไปข้างหน้าชนิดปรับตัวได้ (Adaptive Feedforward Control) ชนิดของตัวกรองเป็นแบบ FIR (Finite Impulse Response) โดยจะใช้อัลกอริทึมในการปรับตัวแบบ FXLMS (Filtered-X Least Mean Square) เนื่องจากมีผลกระทบของเสียงย้อนกลับ (Acoustic Feedback) จากลำโพงควบคุมไปสู่ไมโครโฟนรับสัญญาณอ้างอิงน้อยมาก เนื่องจากข้อจำกัดของระบบควบคุมซึ่งไม่สามารถควบคุมเสียงรบกวนแบบแรนดอม (Random Noise) ได้ จากการวัดระดับเสียงของเครื่องเป่าลมเย็นพบว่า ตัวเครื่องเป่าลมเย็นเดิมนั้นไม่มีความถี่ใดๆเลยที่มีความถี่โดดเด่น โดยมีลักษณะของสัญญาณเป็นแบบแรนดอม (Random Signal) ทำให้การควบคุมไม่สามารถทำได้จากข้อจำกัดดังกล่าวมา ดังแสดงในรูปที่ 7-2 ข ดังนั้นในการทดลองนี้จึงจำเป็นต้องสร้างความถี่ที่โดดเด่นให้กับเครื่องเป่าลมเย็น โดยทำการติดตั้งลำโพงกำเนิดเสียงโดดเด่นไว้ในตัวเครื่องเป่าลมเย็น ซึ่งกำเนิดเสียงรบกวนที่มีความถี่โดดเด่นทั้งแบบ ความถี่เดียว และหลายความถี่ผสมกัน เสมือนกับเป็นการจำลองปัญหาที่อาจเกิดขึ้นได้กับเครื่องเป่าลมเย็น เช่น ปัญหาเสียงรบกวนอันเนื่องมาจากแบรริง (Bearing) ชำรุด หรืออาจจะเป็นปัญหาจากความไม่สมดุล (Unbalance) ของการหมุน สาเหตุเหล่านี้ อาจก่อให้เกิดเสียงรบกวนที่มีความถี่ที่โดดเด่นได้ โดยขณะทำการทดลองได้ทำการทดลองทั้งแบบเปิดและปิดเครื่องเป่าลมเย็น สำหรับตำแหน่งของการติดตั้งลำโพงได้แสดงไว้ในรูปที่ 7-1



## 7-1 ลักษณะของการทดลอง

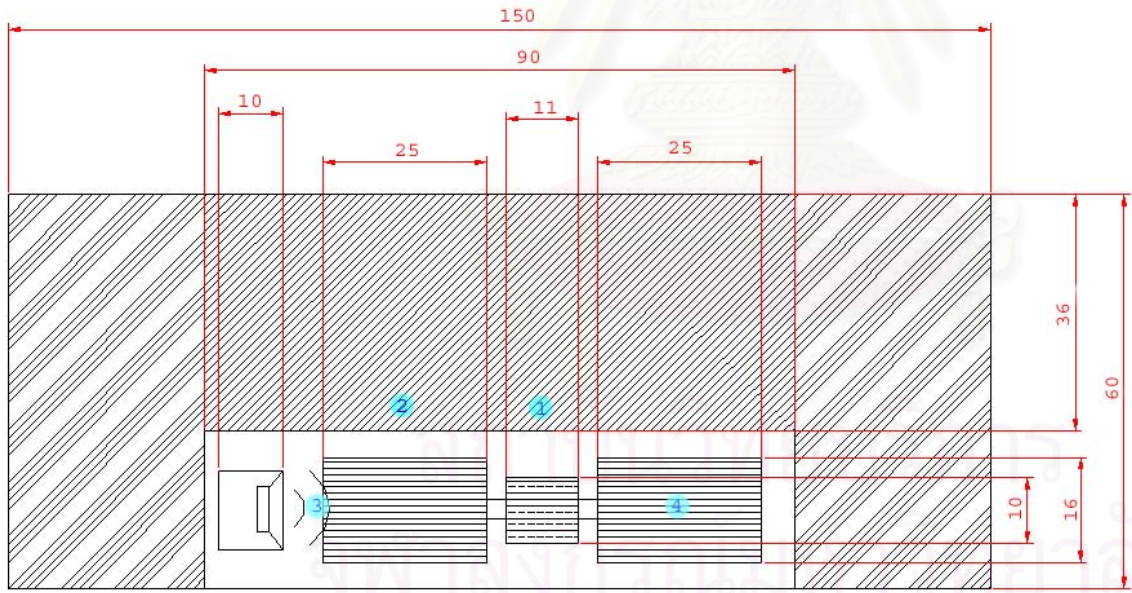
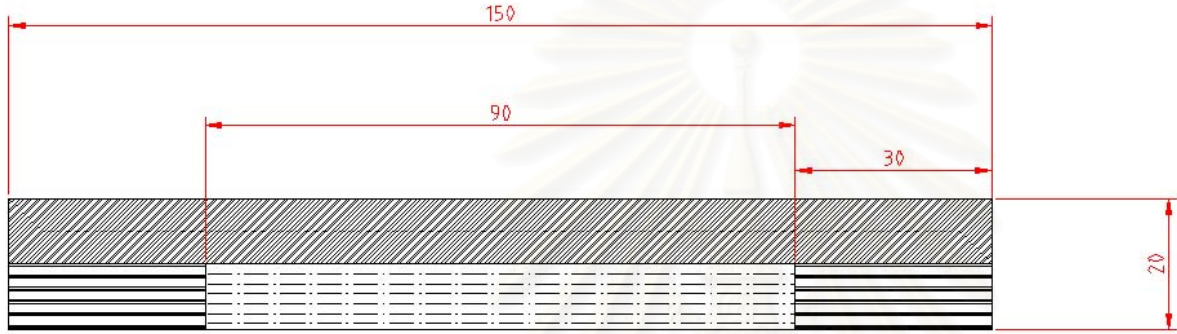
### 7.1 การทดลองโดยติดตั้งลำโพงควบคุมไว้ในตำแหน่งทางออกของช่องลม

การทดลองนี้จะทำการติดตั้งลำโพงควบคุมไว้ในตำแหน่งทางออกของช่องลม โดยจะทำการวัดผลทั้งหมด 3 ตำแหน่งภายในห้องทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 7-3 และ 7-4 โดยไมโครโฟนรับสัญญาณความผิดพลาดจะถูกติดตั้งไว้ในตำแหน่งที่ 1 ในรูปที่ 7-3 และ 7-4 ตลอดการทดลองที่ 7.1 ส่วนไมโครโฟนของเครื่องวัดระดับเสียง (Sound Level Meter) จะติดตั้งทั้งหมด 3 ตำแหน่งดังแสดงในรูปที่ 7-3 และ 7-4 เพื่อใช้ในการวัดผลที่ตำแหน่งดังกล่าว

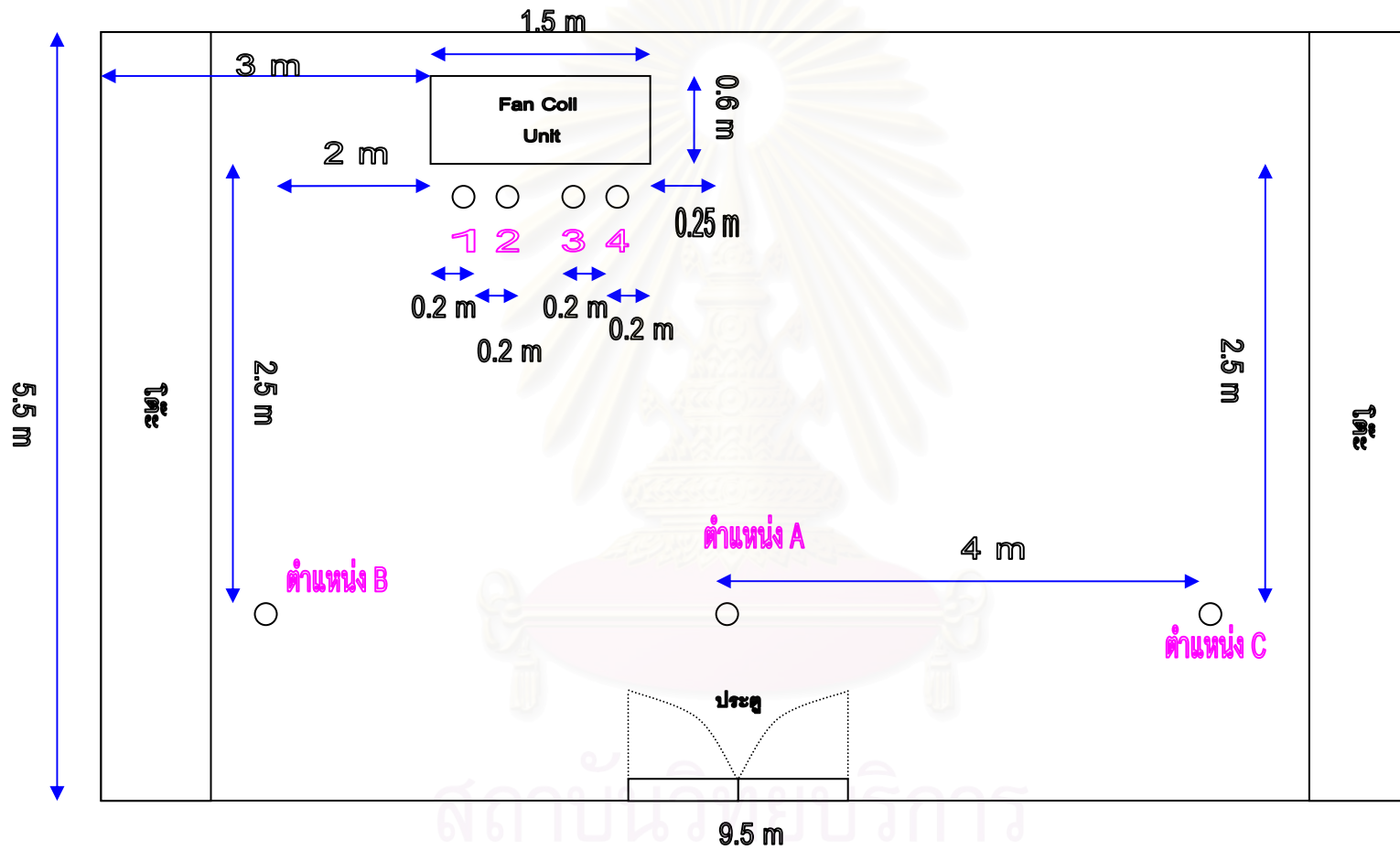
### 7.2 การทดลองโดยติดตั้งลำโพงควบคุมไว้ในตำแหน่งใกล้หูของผู้สังเกต (Observer)

การทดลองนี้จะทำการติดตั้งลำโพงควบคุม ไว้ที่ตำแหน่งใดๆในห้องที่เลือกมา โดยการทดลองนี้ได้เลือกตำแหน่งในการติดตั้งลำโพงทั้งสิ้น 2 ตำแหน่งด้วยกัน คือตำแหน่งที่ 1 และ 2 ในรูปที่ 7-5 สำหรับไมโครโฟนรับสัญญาณความผิดพลาดนั้นจะถูกติดตั้งในตำแหน่งเดียวกัน กับไมโครโฟนของเครื่องวัดระดับเสียง สำหรับการติดตั้งลำโพงในตำแหน่งที่ 1 นั้น จะมีการเปลี่ยนแปลงการติดตั้งไมโครโฟนทั้งสิ้น 3 แบบ คือ ตำแหน่ง ก ข และ ค ดังรูปที่ 7-5

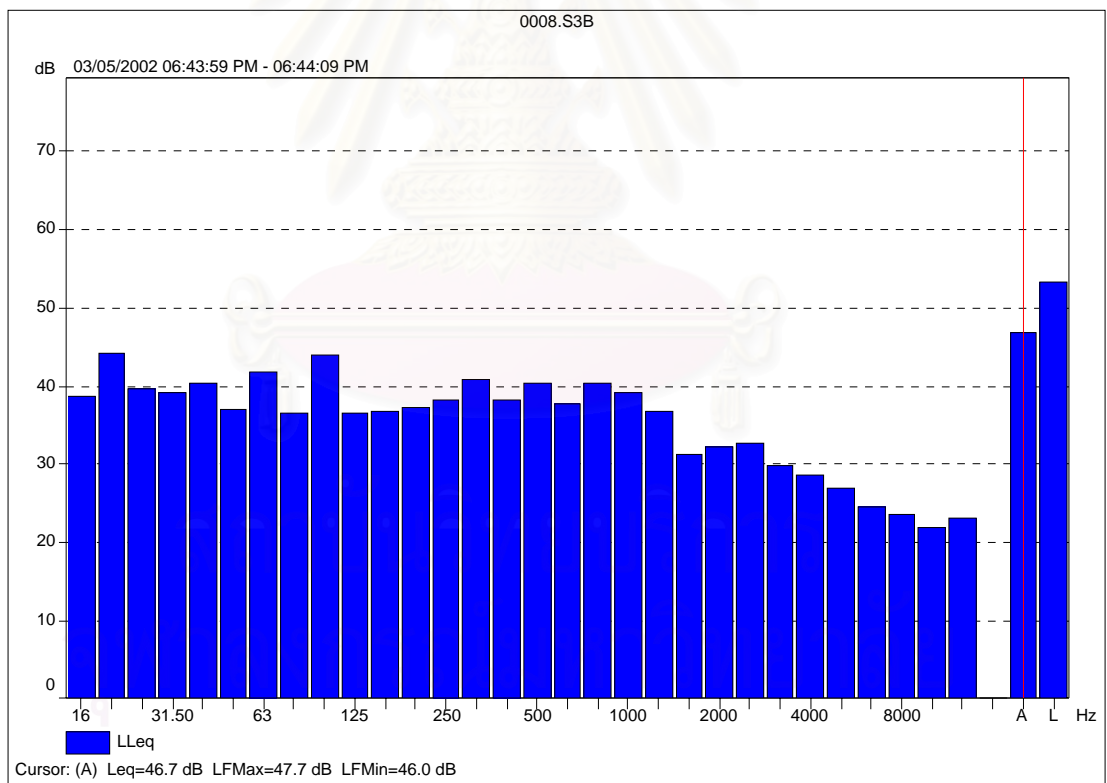
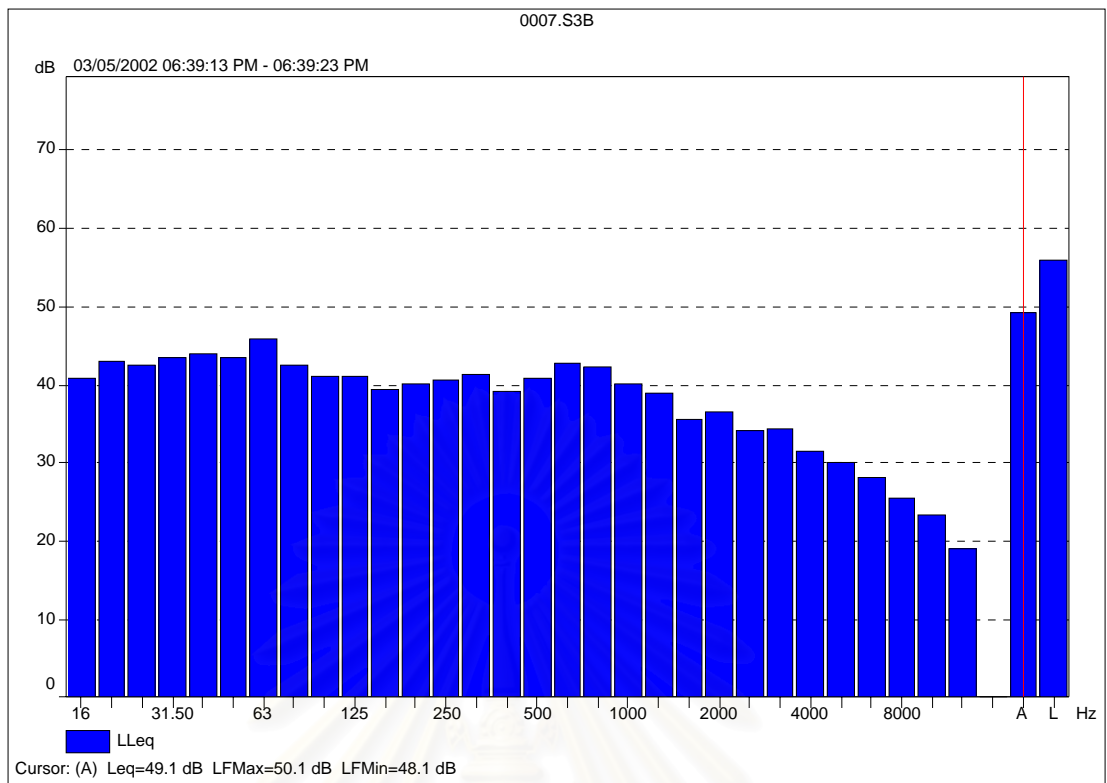
កម្រិតបញ្ជាក់ប្រព័ន្ធបណ្តាញប្រើប្រាស់ប្រព័ន្ធបណ្តាញប្រើប្រាស់ប្រព័ន្ធបណ្តាញប្រើប្រាស់ 1-7 គ្រឿង



<b>FAN COIL UNIT</b> <b>220 V / 1 PHASE / 50 Hz</b>
<b>21000 BTU / HRS</b> <b>6160 WATTS</b>
<b>WEIGHTS 41 Kgs</b>
<b>SERIAL NO. 9411000448</b>



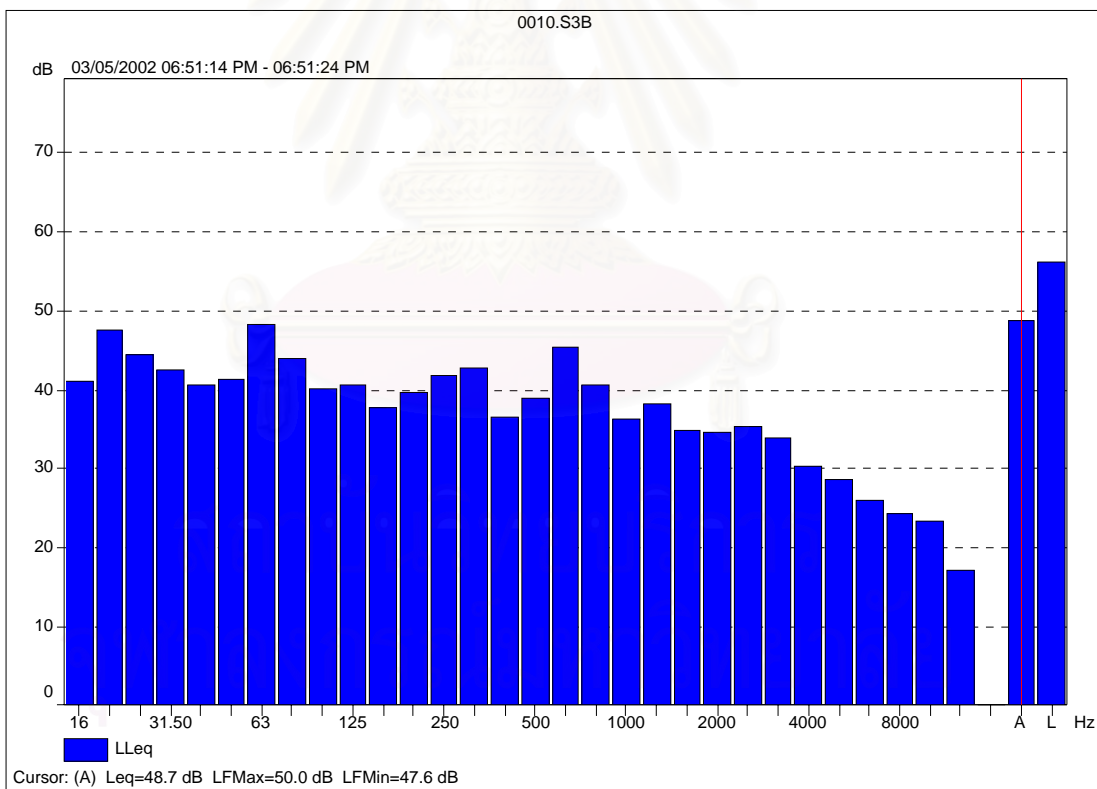
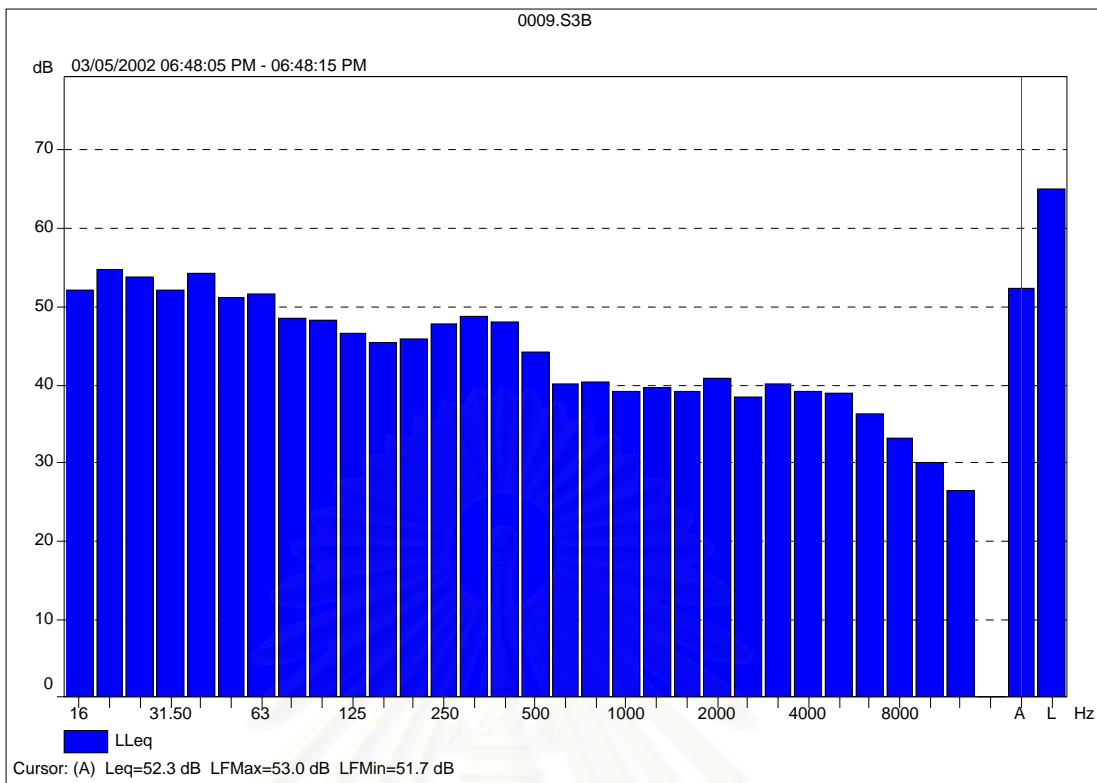
รูปที่ 7-2 ก ภาพมุมมองด้านบน ของห้องทดลอง  
แสดงเสียงรบกวน ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในห้อง



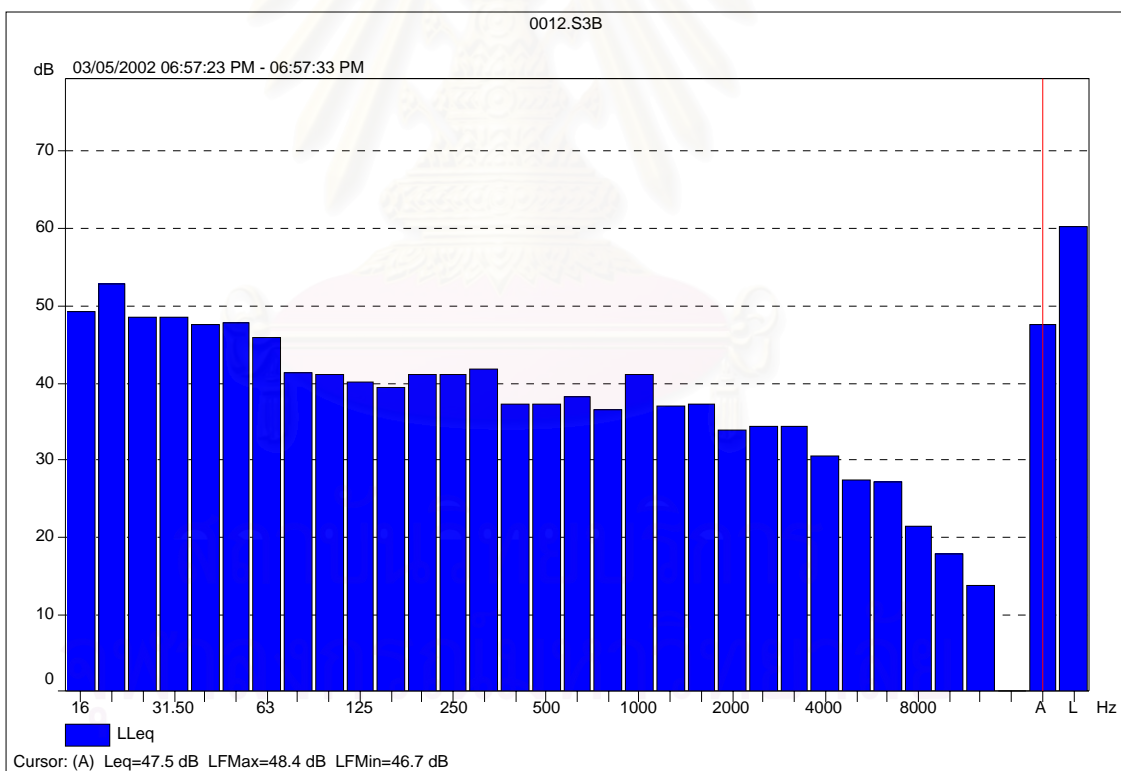
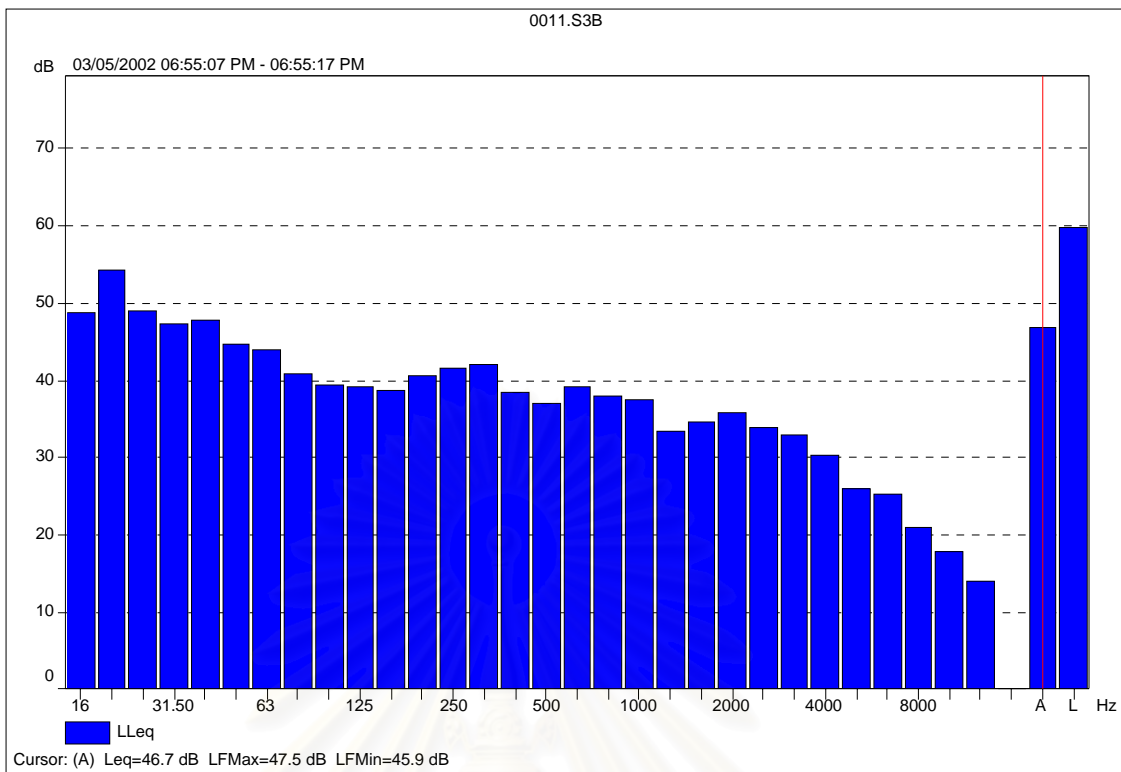
รูปที่ 7-2 ข สเปกตรัมของเสียงรบกวนจากแหล่งกำเนิด (Noise Source) ที่วัดได้จาก

บน) มอเตอร์ที่ระยะห่าง 5 cm ณ ตำแหน่งที่ 1 ของรูปที่ 7-1

ล่าง) พัดลมที่ระยะห่าง 5 cm ณ ตำแหน่งที่ 2 ของรูปที่ 7-1



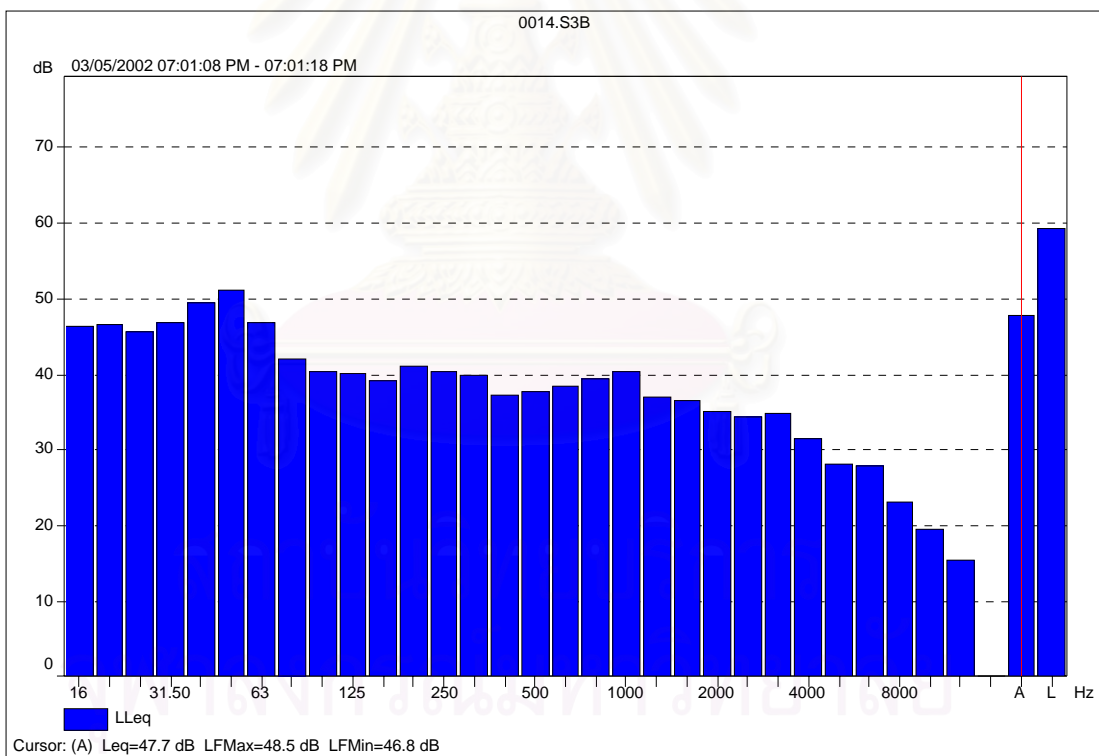
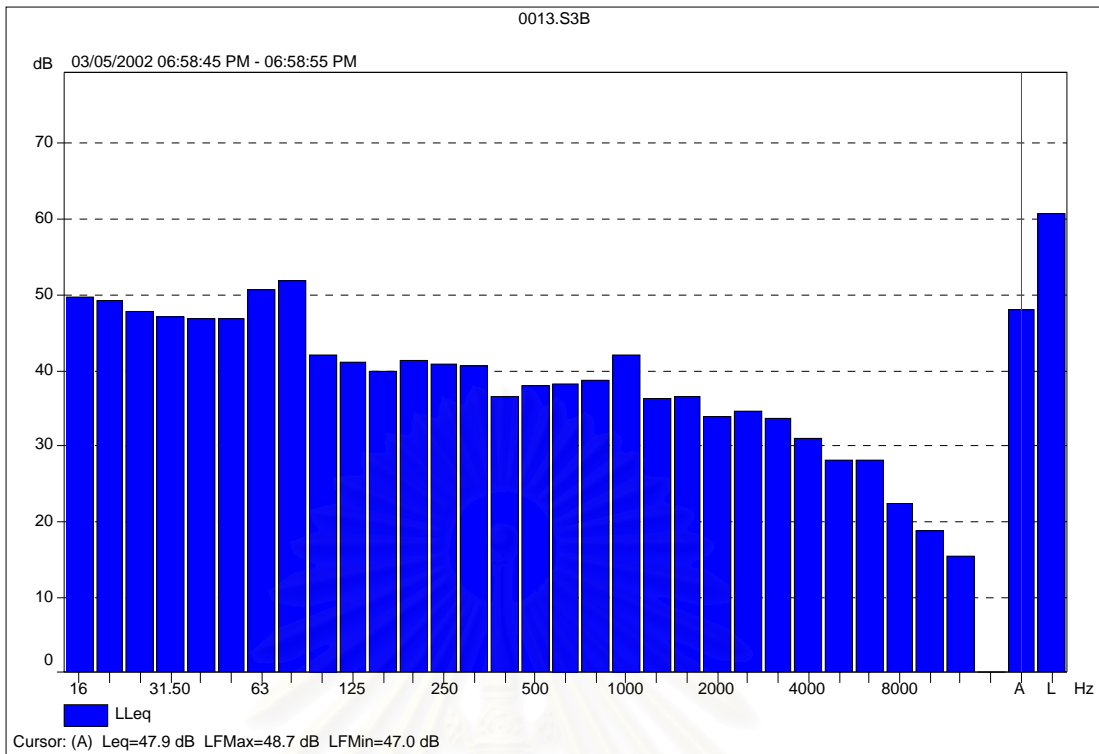
รูปที่ 7-2 ค สเปกตรัมของเสียงรบกวนจากแหล่งกำเนิด (Noise Source) ที่วัดได้จาก  
 บน) พัดลมที่ระยะห่าง 5 cm ณ ตำแหน่งที่ 3 ของรูปที่ 7-1  
 ล่าง) พัดลมที่ระยะห่าง 5 cm ณ ตำแหน่งที่ 4 ของรูปที่ 7-1



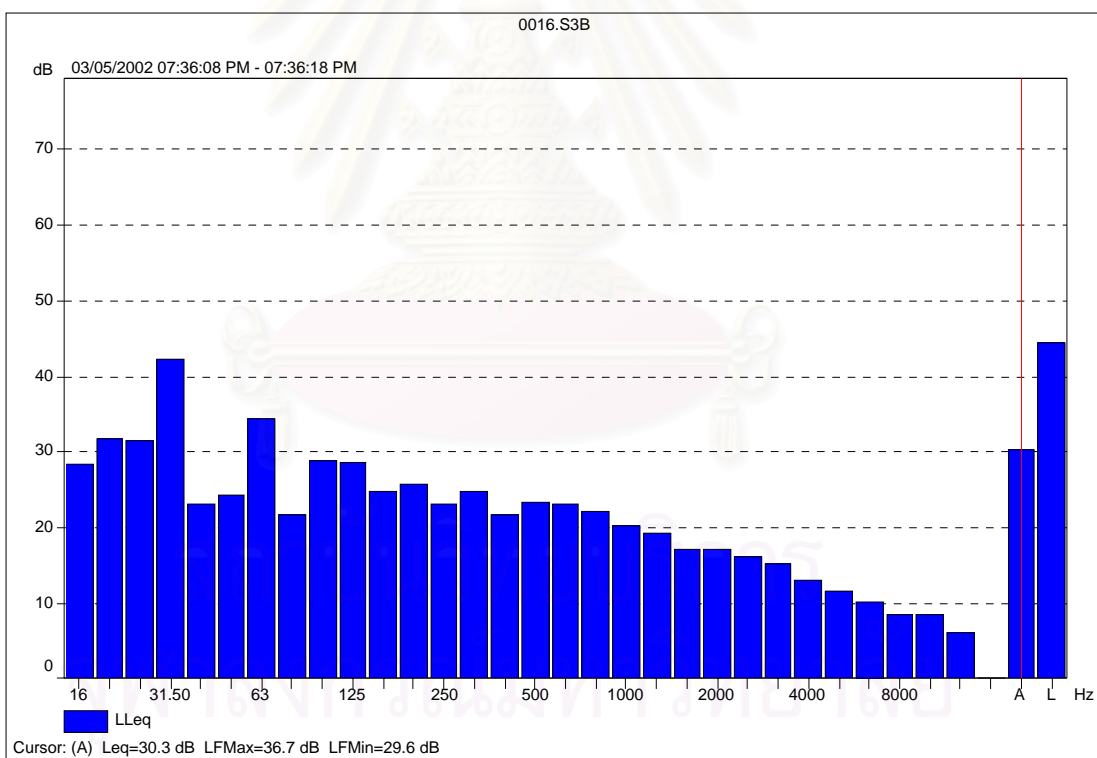
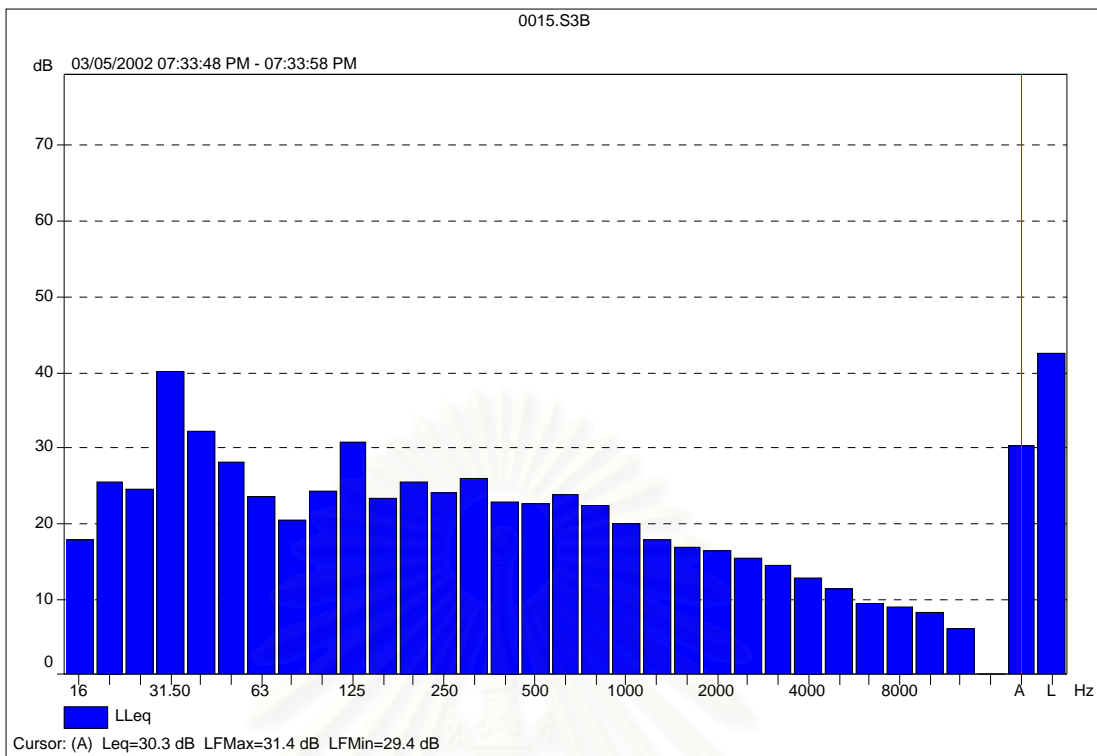
รูปที่ 7-2 ง สเปกตรัมของเสียงรบกวนจากแหล่งกำเนิด (Noise Source) วัด ณ ตำแหน่ง

บน) ตำแหน่งที่ 1 ของรูปที่ 7-2 ก

ล่าง) ตำแหน่งที่ 2 ของรูปที่ 7-2 ก

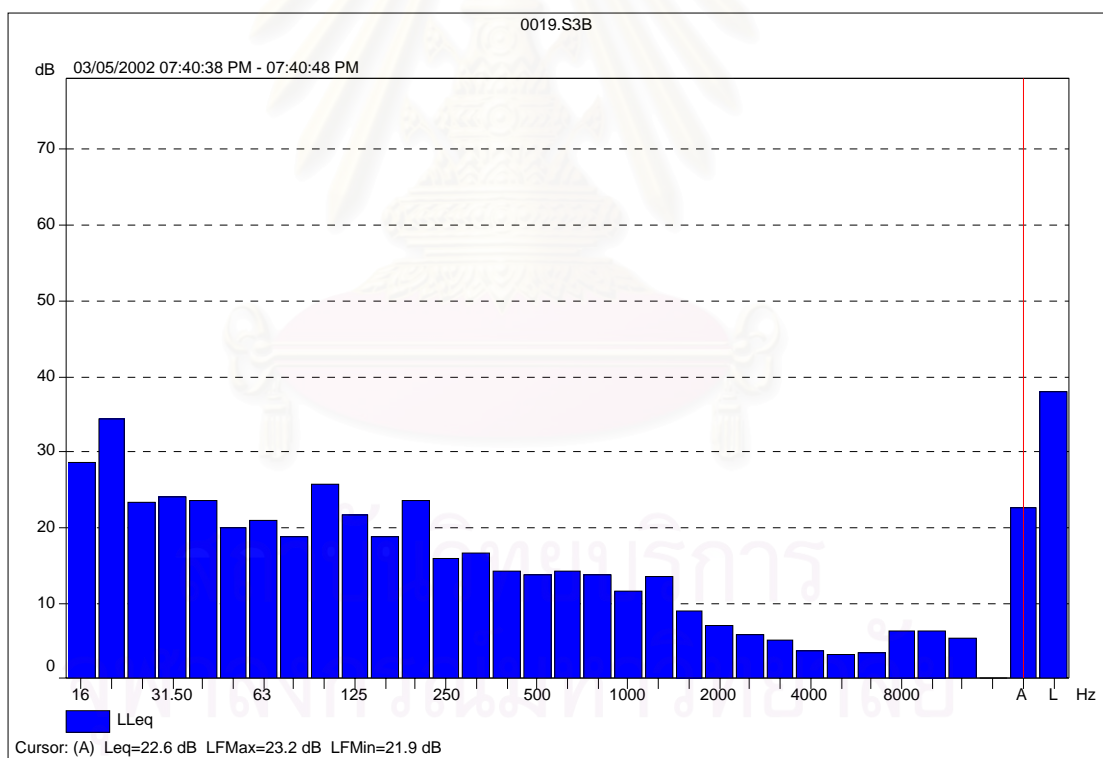
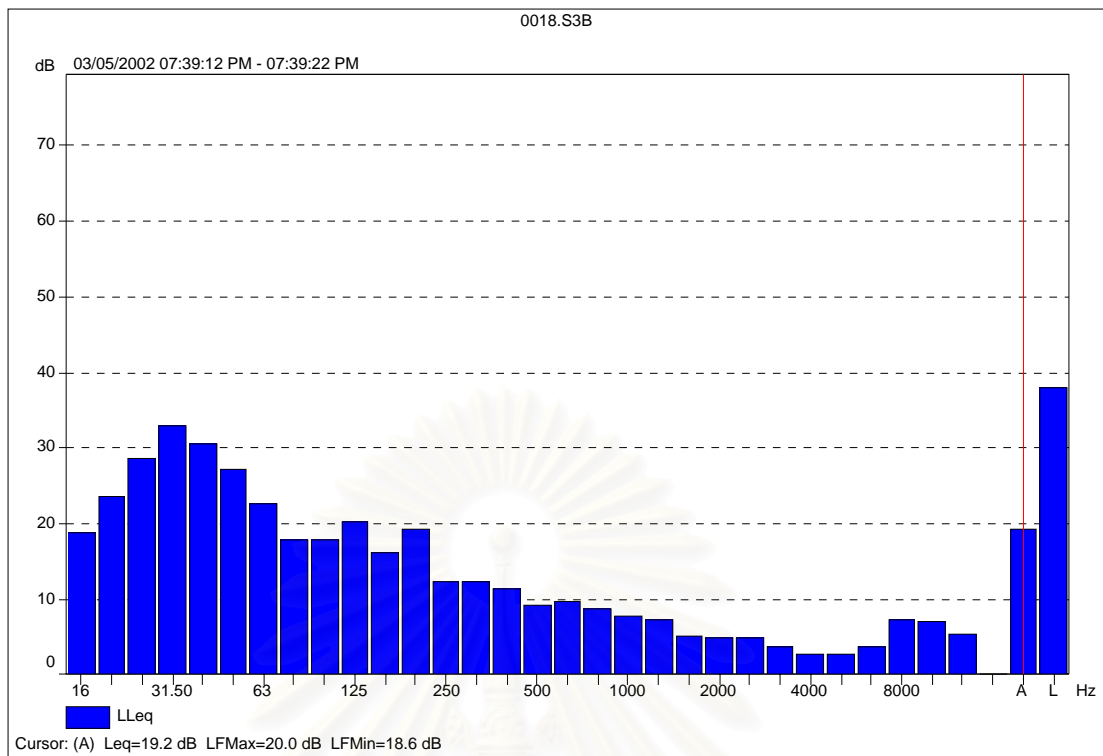


รูปที่ 7-2 จ สเปกตรัมของเสียงรบกวนจากแหล่งกำเนิด (Noise Source) วัด ณ ตำแหน่ง  
บน) ตำแหน่งที่ 3 ของรูปที่ 7-2 ก  
ล่าง) ตำแหน่งที่ 4 ของรูปที่ 7-2 ก

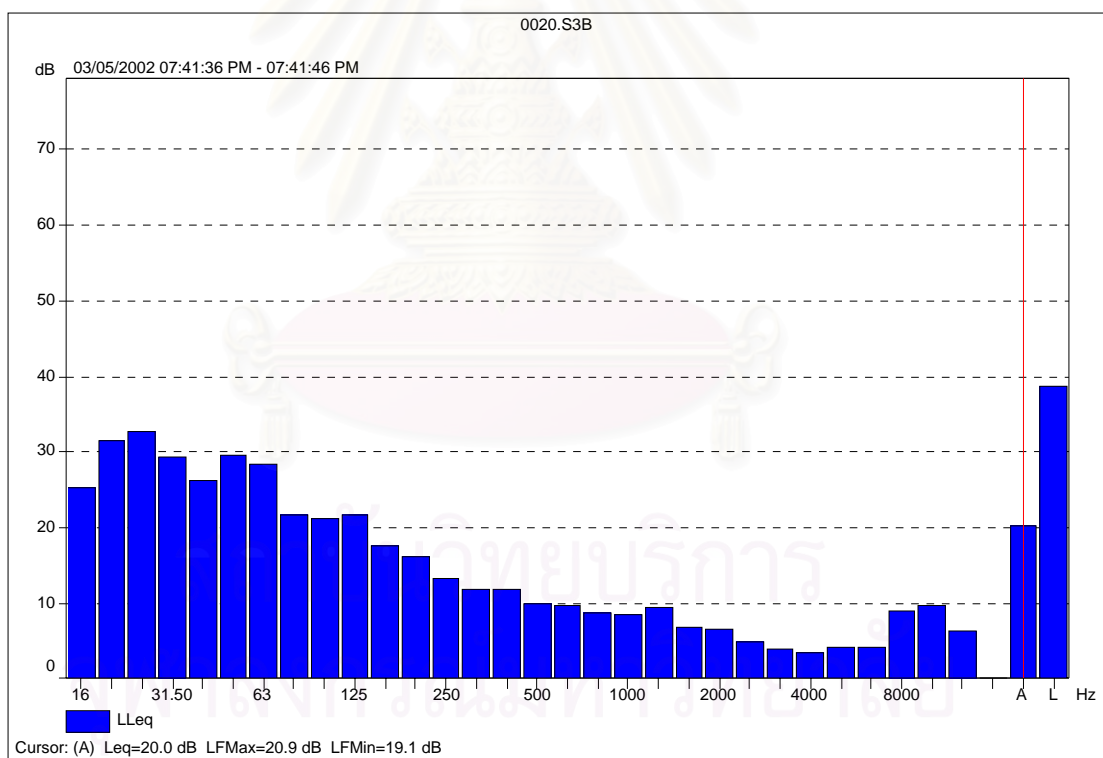
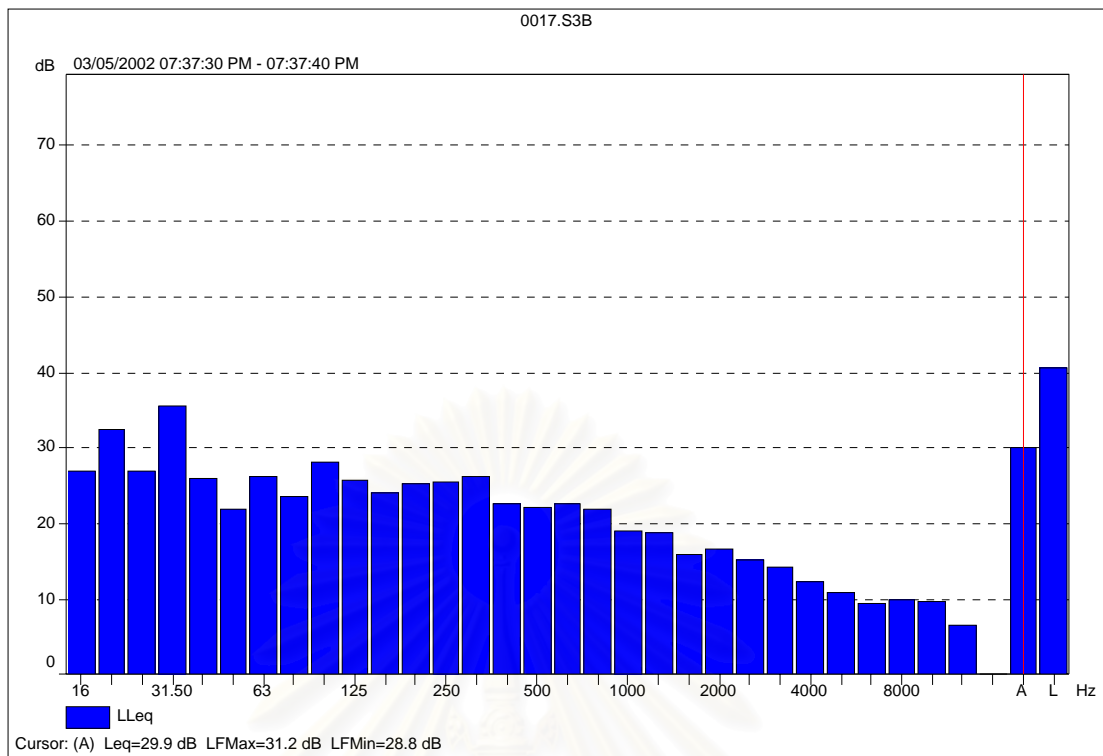


รูปที่ 7-2 ฉ สเปกตรัมของเสียงรบกวนจากแหล่งกำเนิด (Noise Source) วัด ณ ตำแหน่ง  
 บน) ตำแหน่ง A ของรูปที่ 7-2 ก ขณะเปิดเครื่องเป่าลมเย็น  
 ล่าง) ตำแหน่ง B ของรูปที่ 7-2 ก ขณะเปิดเครื่องเป่าลมเย็น

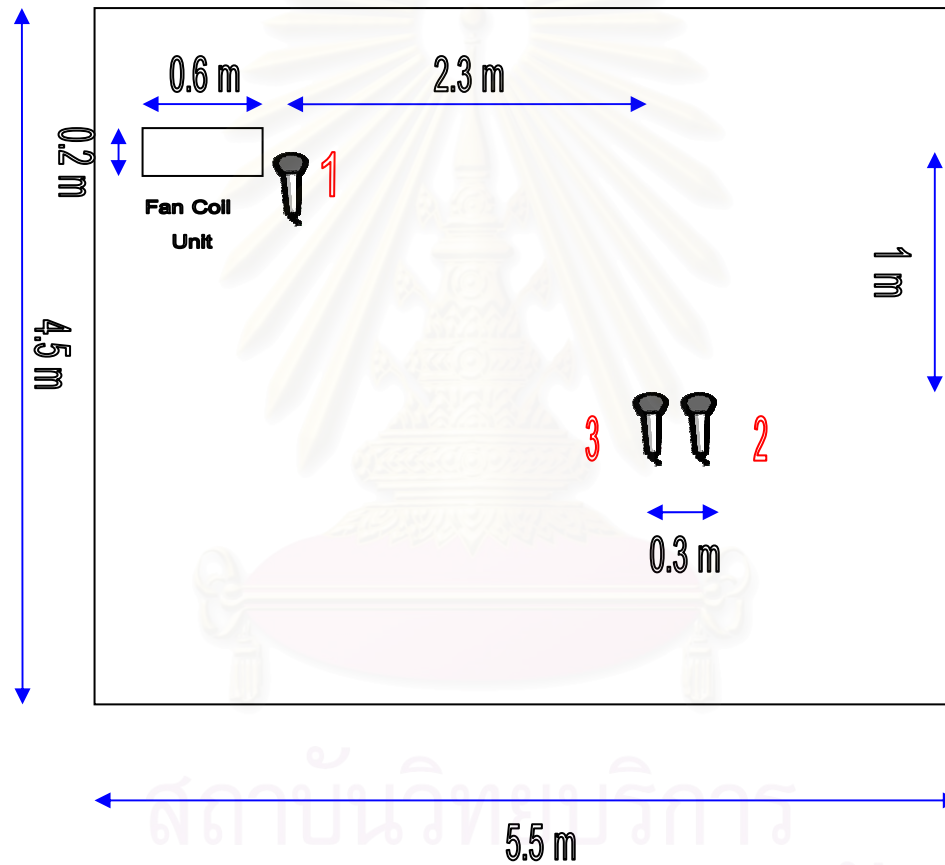




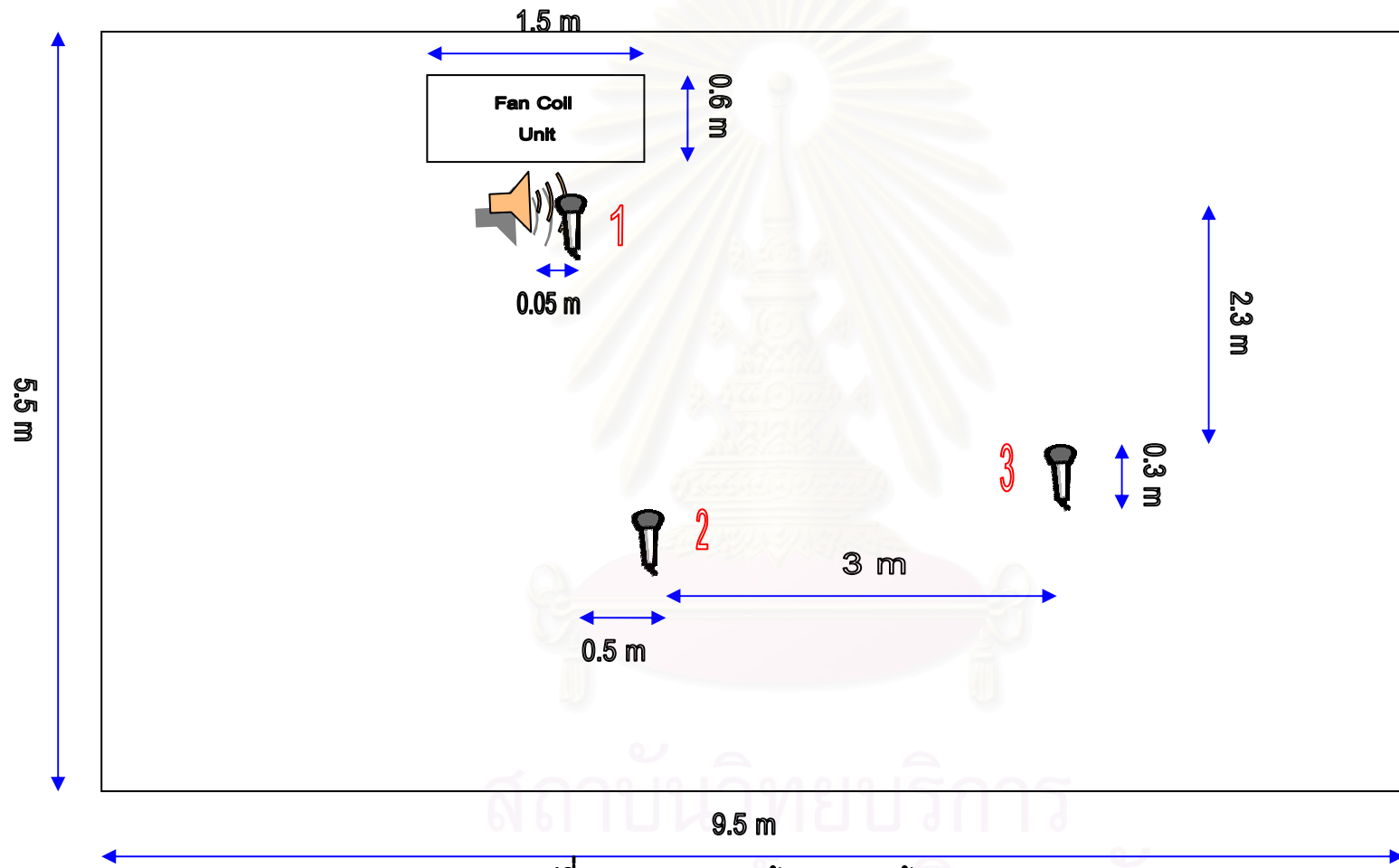
รูปที่ 7-2 ข สเปกตรัมของเสียงรบกวนจากแหล่งกำเนิด (Noise Source) วัด ณ ตำแหน่ง  
 บน) ตำแหน่ง A ของรูปที่ 7-2 ก ขณะปิดเครื่องเป่าลมเย็น  
 ล่าง) ตำแหน่ง B ของรูปที่ 7-2 ก ขณะปิดเครื่องเป่าลมเย็น



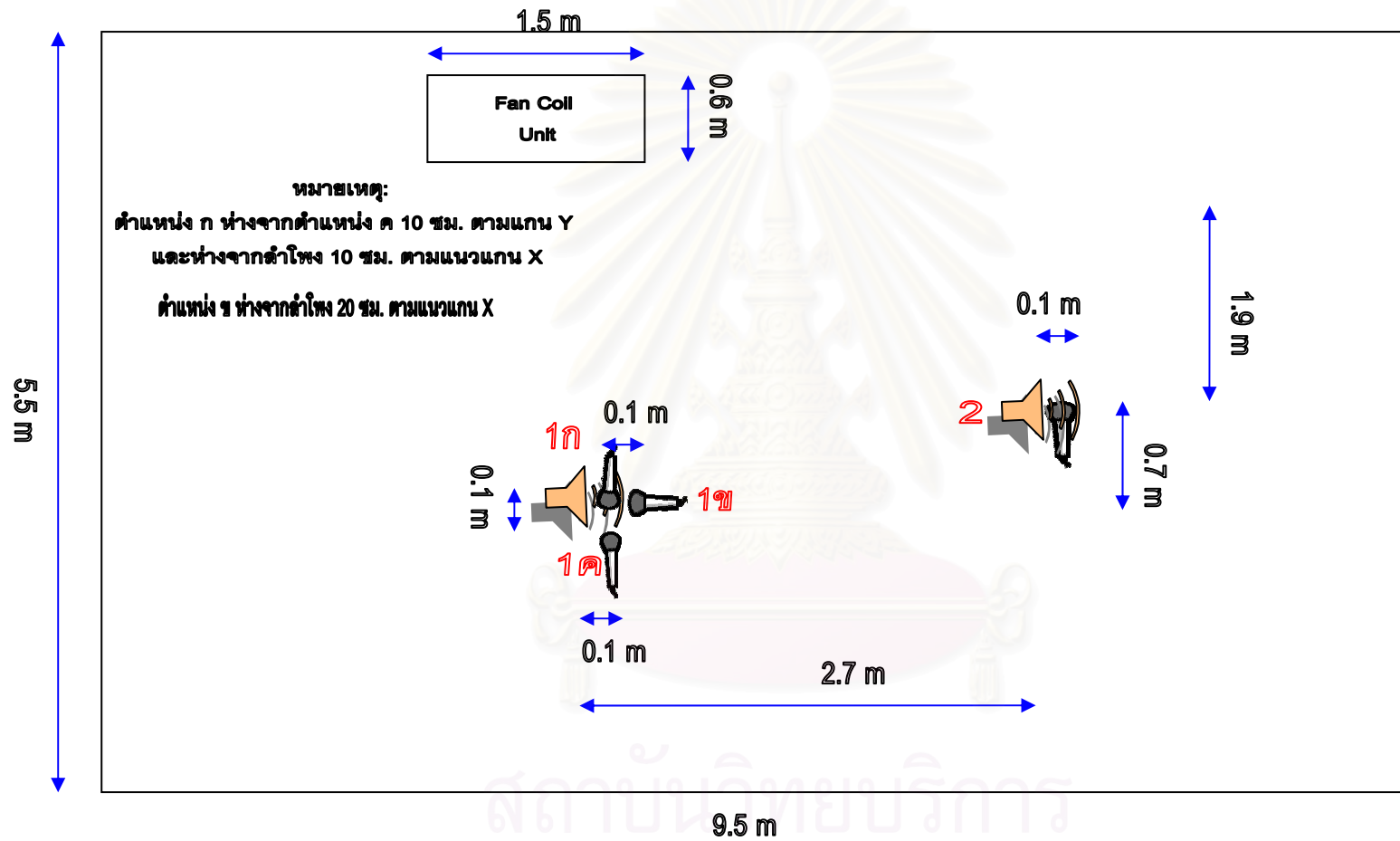
รูปที่ 7-2 ซ สเปกตรัมของเสียงรบกวนจากแหล่งกำเนิด (Noise Source) วัด ณ ตำแหน่ง  
 บน) ตำแหน่ง C ของรูปที่ 7-2 ก ขณะเปิดเครื่องเป่าลมเย็น  
 ล่าง) ตำแหน่ง C ของรูปที่ 7-2 ก ขณะ ปิดเครื่องเป่าลมเย็น



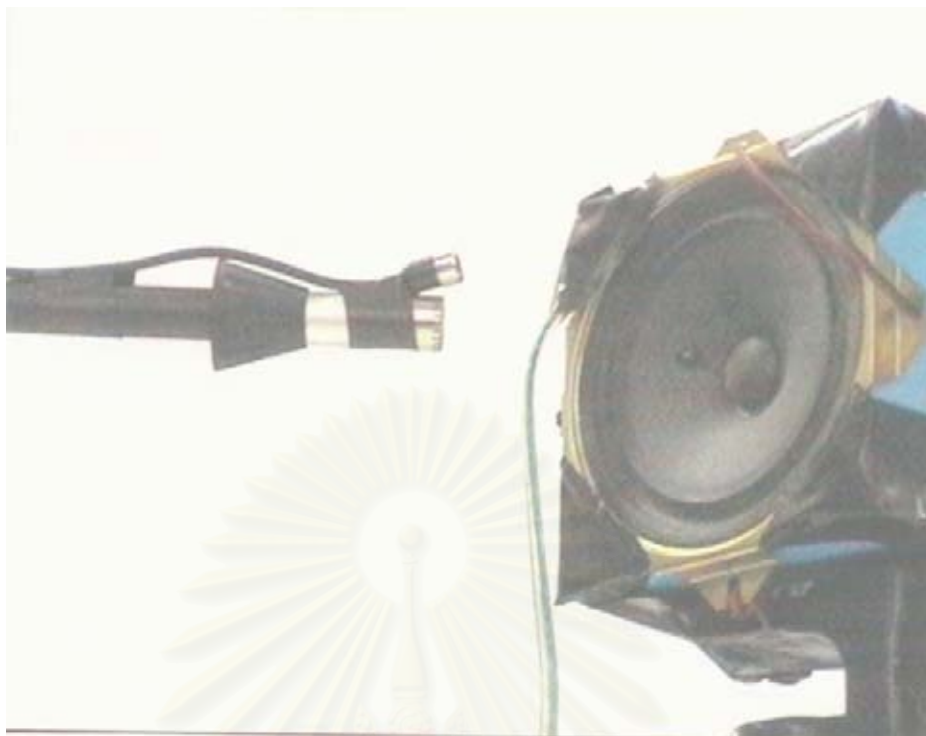
รูปที่ 7-3 ภาพมุมมองด้านข้าง ของห้องทดลอง แสดงตำแหน่งในการติดตั้งไมโครโฟน ในการทดลองที่ 7.1.1



รูปที่ 7-4 ภาพมุมมองด้านบน ของห้องทดลอง  
แสดงตำแหน่งในการติดตั้งลำโพง และไมโครโฟน ในการทดลองที่ 7.1.1



รูปที่ 7-5 ภาพมุมมองด้านบน ของห้องทดลอง  
 แสดงตำแหน่งในการติดตั้งลำโพง และไมโครโฟน ในการทดลองที่ 7.1.2



รูปที่ 7-6 ก ลักษณะของการติดตั้งไมโครโฟนรับสัญญาณความถี่พลาต  
และ ไมโครโฟนของเครื่องวัดระดับเสียง



รูปที่ 7-6 ข ตำแหน่งในการติดตั้งลำโพงและไมโครโฟนในการทดลองที่ 7.1



รูปที่ 7-6 ค ตำแหน่งในการวางลำโพงและไมโครโฟนในการทดลองที่ 7.2

## 7.2 ขั้นตอนและผลการทดลอง

การทดลองที่ 7.1 การทดลองนี้จะทำการติดตั้งลำโพงควบคุม (Control Source) ไว้ที่ตำแหน่งทางออกของช่องลม โดยมีไมโครโฟนรับสัญญาณอ้างอิง (Reference Microphone) ติดตั้งอยู่ในตำแหน่งที่รับสัญญาณอ้างอิงได้ดี โดยในงานวิจัยนี้จะไม่ขอลำโพงถึงตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดใน การติดตั้งสัญญาณอ้างอิง ส่วนไมโครโฟนรับสัญญาณความผิดพลาดนั้น จะถูกติดตั้งอยู่ในตำแหน่งที่คาดว่าจะเกิดการหักล้างกันขึ้น (ใกล้กับลำโพงควบคุม) สำหรับการวัดระดับเสียงนั้น จะทำการวัดด้วยกันทั้งหมด 3 ตำแหน่ง ตำแหน่งแรกจะเป็นตำแหน่งเดียวกันกับไมโครโฟนรับสัญญาณความผิดพลาด ส่วนอีกสองตำแหน่งที่เหลือได้จากการเลือกตำแหน่งสองตำแหน่งในห้องมาทำการวัด ดังแสดงในรูปที่ 7-4 สำหรับโครงสร้างของระบบควบคุมเป็นแบบป้อนไปข้างหน้าชนิดปรับตัวได้ (Adaptive Feedforward Control) สำหรับความถี่ของสัญญาณที่จะทำการลดเสียงรบกวนนั้นในที่นี้จะขอเลือกทดลองเฉพาะบางความถี่เท่านั้น ดังแสดงในตารางที่ 7.1 ซึ่งมีขั้นตอนต่างๆดังนี้

1. เปิดเครื่องเป่าลมเย็นและใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Signal Generator) เพื่อให้กำเนิดความถี่ที่โดดเด่น (Dominant Frequency) ส่งสัญญาณไฟฟ้าไปยังลำโพงกำเนิดสัญญาณเสียงรบกวน โดยได้ทำการติดตั้งลำโพงนี้ไว้ภายในเครื่องเป่าลมเย็น ใกล้กับตำแหน่งของพัดลม (Blower)
2. ทำการรับสัญญาณอ้างอิงจากไมโครโฟนรับสัญญาณอ้างอิง (Reference Microphone) ซึ่งติดตั้งอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้กับลำโพงกำเนิดสัญญาณเสียงรบกวน ในขณะที่เดียวกันก็รับสัญญาณความผิดพลาดจากไมโครโฟนรับสัญญาณความผิดพลาด (Error Microphone) ซึ่งถูกติดตั้งอยู่ในตำแหน่งใกล้กับลำโพงควบคุมดังรูปที่ 7-4 เหตุผลที่รับทั้ง 2 สัญญาณพร้อมกัน เนื่องมาจากข้อจำกัดทางด้านฮาร์ดแวร์ (Hardware) ของระบบควบคุม
3. นำทั้ง 2 สัญญาณที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 ไปเข้าระบบควบคุม ซึ่งจะทำการประมวลผลสัญญาณโดยใช้อัลกอริทึม FXLMS จะได้ผลลัพธ์ออกมาเป็นสัญญาณควบคุม เพื่อส่งไปยังลำโพงควบคุม (Control Source)
4. สัญญาณที่ส่งไปยังลำโพงควบคุมนี้ จะมีเฟสต่างกันกับเสียงที่เดินทางมายังจุดหักล้างอยู่ประมาณ 180 องศา หลังจากทำการหักล้างแล้ว ก็ให้ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 2 คือจะรับสัญญาณเสียงความผิดพลาดอีก ทำเช่นนี้ไปเรื่อยๆ

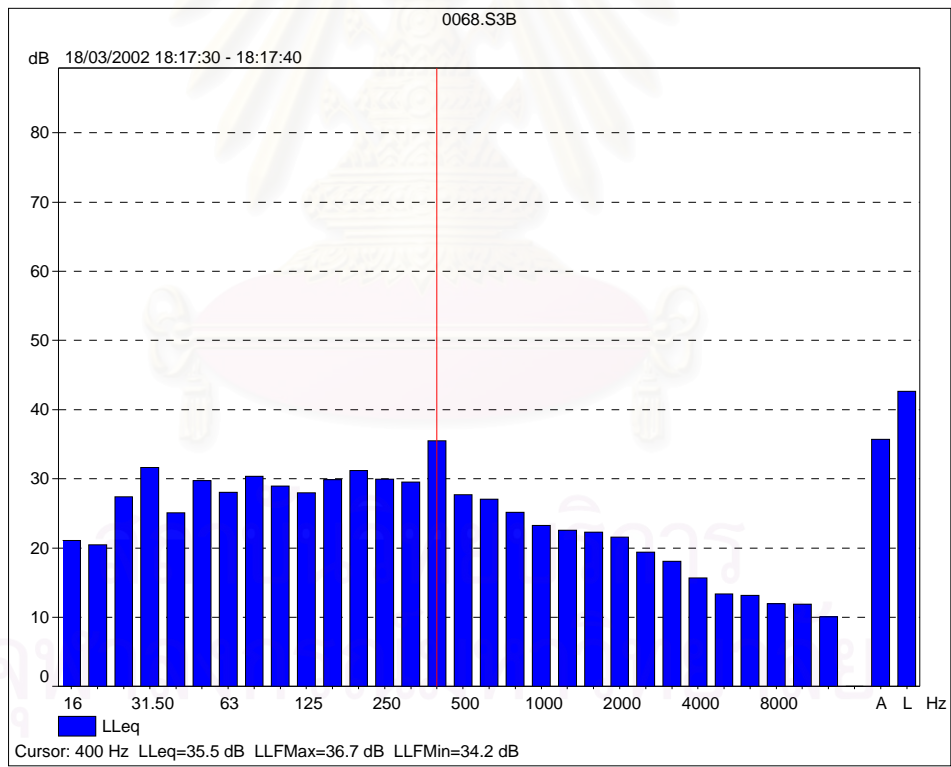
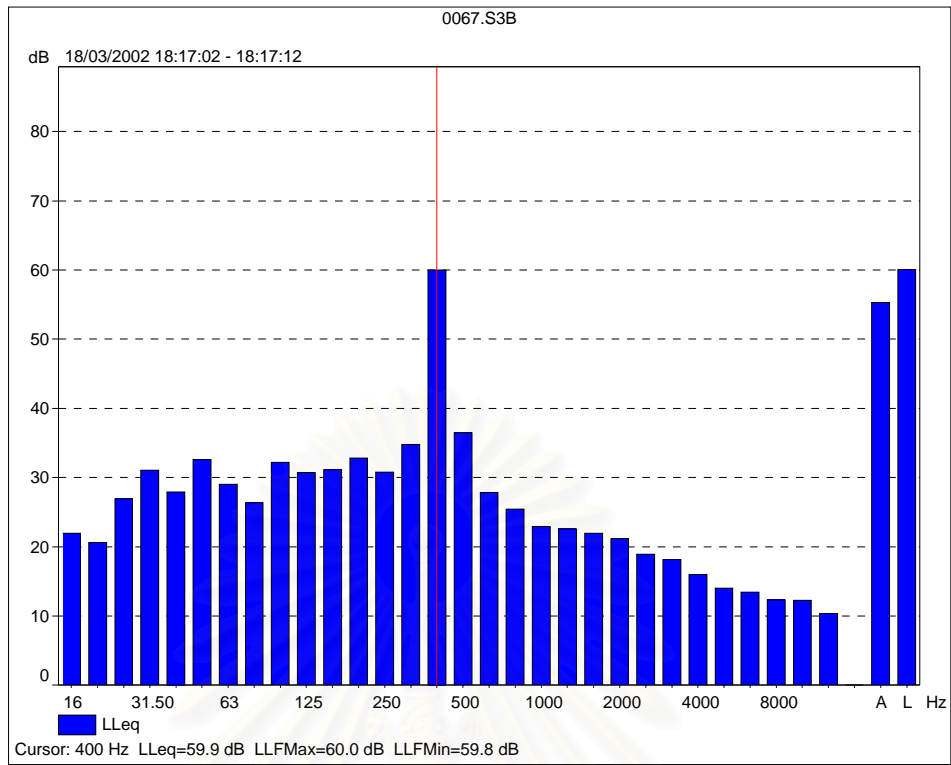


ตารางที่ 7.1 แสดงผลลัพธ์ของการทดลองที่ 7.1 เป็นการลดเสียงรบกวนของเครื่องเป่าลมเย็นที่มีการสร้างเสียงที่มีความถี่โดดเด่น โดยติดตั้งลำโพงควบคุมไว้ในตำแหน่งทางออกของช่องลม ทำการวัดระดับเสียง ณ ตำแหน่งที่ 1 ของรูปที่ 7-4 ใช้อัลกอริทึมชนิด FXLMS มีอันดับ (Order) ของตัวกรองของระบบควบคุม  $W(z)$  เท่ากับ 127 และอันดับของตัวกรองชดเชย  $C(z)$  เท่ากับ 63

ความถี่โดดเด่น ที่สร้างขึ้น	การลดทอนเฉลี่ย เฉพาะความถี่โดดเด่น Leq (dB) Weighting L ใช้อัลกอริทึม FXLMS ปิดเครื่องเป่าลมเย็น	การลดทอนเฉลี่ย เฉพาะความถี่โดดเด่น Leq (dB) Weighting L ใช้อัลกอริทึม FXLMS เปิดเครื่องเป่าลมเย็น
200	23.3	11.7
300	20.6	19.9
350	16.5	6.3
400	24.4	8.9
450	16.9	7.8
550	16.8	5.2
200+300	17.5	14.5
200+400	17.2	7.2
300+400	27.2	16.1
200+300+400	17.2	9.5

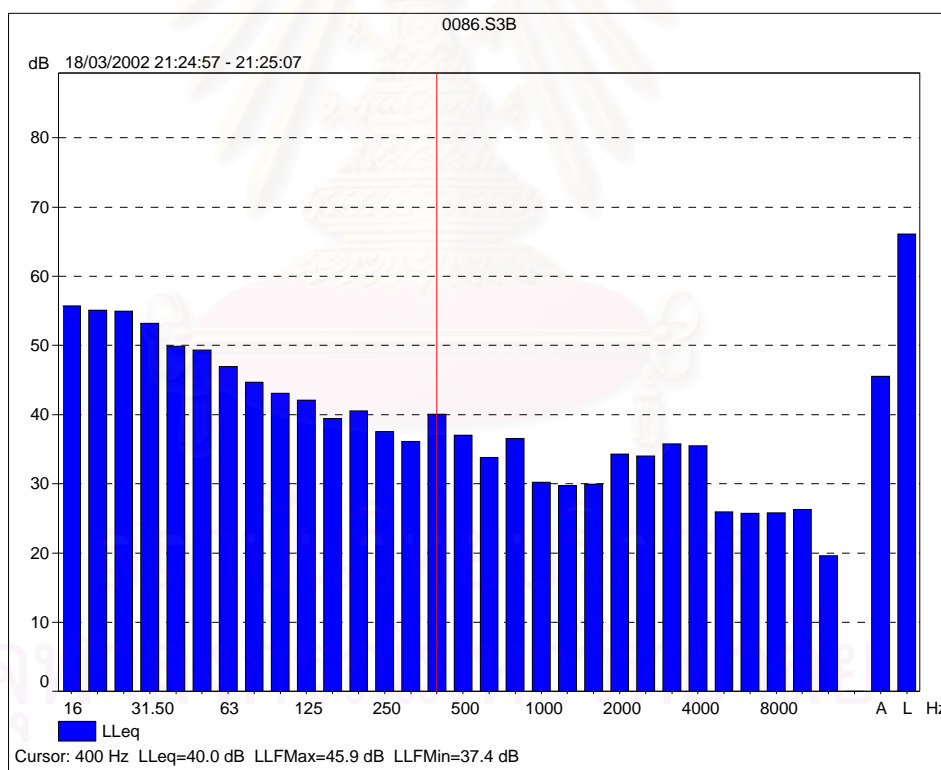
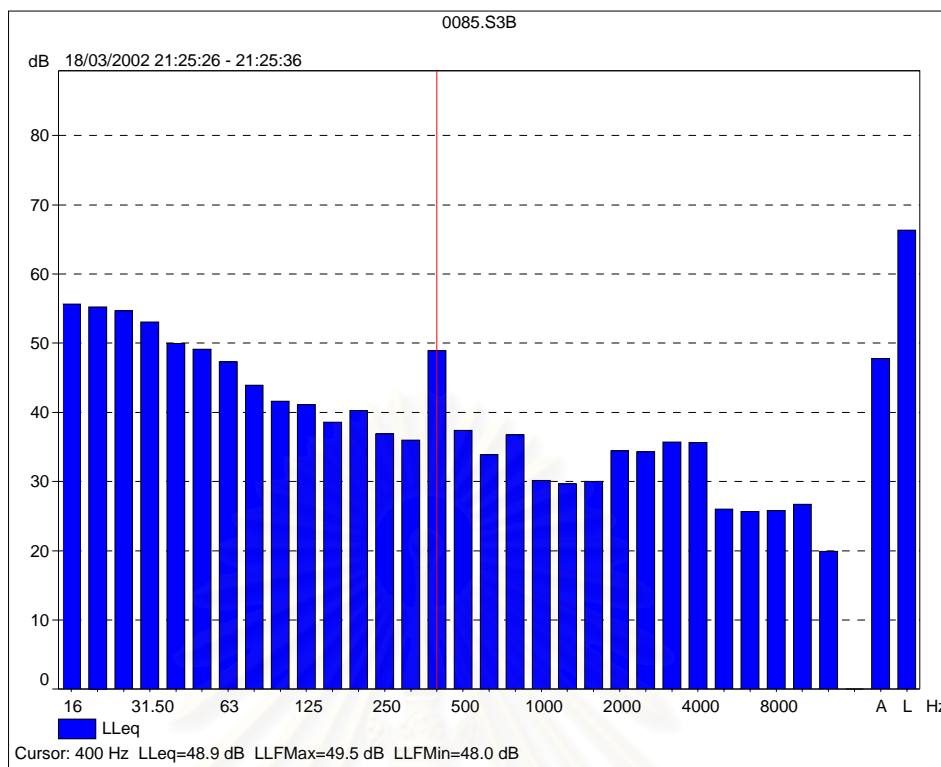
หมายเหตุ Weighting L หมายถึง การวัดระดับเสียงโดยไม่ผ่านตัวกรองใดๆ

Weighting A หมายถึง การวัดระดับเสียงโดยผ่านตัวกรองแบบผ่านความถี่ (Band Pass Filter) เพื่อให้สัญญาณขาออกมีการลดทอนในแต่ละความถี่ คล้ายกับธรรมชาติการได้ยินของมนุษย์ (เทียบกับ Curve A) [4] การเลือกใช้จำนวนอันดับของตัวกรองเท่ากับ 127 เป็นการสุ่มเลือกค่าขึ้นมาไม่ใช่เป็นค่าของอันดับตัวกรองที่เหมาะสมที่สุดแต่อย่างใด



รูปที่ 7-9 ตัวอย่างผลลัพธ์จากการทดลองที่ 7.1 ตารางที่ 7.1

สเปกตรัมของเสียงรบกวนความถี่ 400 Hz (เส้นสีแดงลากผ่าน) และเสียงจากสิ่งแวดล้อม (Background Noise) ขณะทำการทดลอง (กราฟแท่งอื่นๆ) ทดลองขณะปิดเครื่องเป่าลมเย็นบน) ขณะเปิดเครื่องลดเสียงรบกวนแบบแอคทีฟ (ล่าง) ขณะเปิดเครื่องลดเสียงรบกวนแบบแอคทีฟ



รูปที่ 7-10 ตัวอย่างผลลัพธ์จากการทดลองที่ 7.1 ตารางที่ 7.1

สเปกตรัมของเสียงรบกวนความถี่ 400 Hz (เส้นสีแดงลากผ่าน) และเสียงจากสิ่งแวดล้อม (Background Noise) ขณะทำการทดลอง (กราฟแท่งอื่นๆ) ทดลองขณะเปิดเครื่องเป่าลมเย็นบน) ขณะเปิดเครื่องลดเสียงรบกวนแบบแอคทีฟ (ล่าง) ขณะเปิดเครื่องลดเสียงรบกวนแบบแอคทีฟ

ตารางที่ 7.2 แสดงผลลัพธ์ของการทดลองที่ 7.1 เป็นการลดเสียงรบกวนของเครื่องเป่าลมเย็นที่มีการสร้างเสียงที่มีความถี่โดดเด่น โดยติดตั้งลำโพงควบคุมไว้ในตำแหน่งทางออกของช่องลม ทำการวัดระดับเสียง ณ ตำแหน่งที่ 2 ของรูปที่ 7-4 ใช้อัลกอริทึมชนิด FXLMS มีอันดับ (Order) ของตัวกรองของระบบควบคุม  $W(z)$  เท่ากับ 127 และอันดับของตัวกรองชดเชย  $C(z)$  เท่ากับ 63

ความถี่โดดเด่น ที่สร้างขึ้น	การลดทอนเฉลี่ย เฉพาะความถี่โดดเด่น Leq (dB) Weighting L ใช้อัลกอริทึม FXLMS ปิดเครื่องเป่าลมเย็น	การลดทอนเฉลี่ย เฉพาะความถี่โดดเด่น Leq (dB) Weighting L ใช้อัลกอริทึม FXLMS เปิดเครื่องเป่าลมเย็น
200	-0.6	-0.5
300	0.2	0.7
400	0.7	0.5
200+300+400	0	1.1

หมายเหตุ ขนาดของการลดทอนเฉลี่ยที่มีเครื่องหมายเป็นลบ หมายถึง ความล้มเหลวในการหักล้างกันของเสียง ก่อให้เกิดการเพิ่มขึ้นของเสียงรบกวนอันเนื่องมาจากการแทรกสอดแบบเสริมกันนั่นเอง โดย Weighting L หมายถึง การวัดระดับเสียงโดยไม่ผ่านตัวกรองใดๆ

Weighting A หมายถึง การวัดระดับเสียงโดยผ่านตัวกรองแบบผ่านความถี่ (Band Pass Filter) เพื่อให้สัญญาณขาออกมีการลดทอนในแต่ละความถี่ คล้ายกับธรรมชาติการได้ยินของมนุษย์ (เทียบกับ Curve A) [4] การเลือกใช้อันดับของตัวกรองเท่ากับ 127 เป็นการสุ่มเลือกค่าขึ้นมาไม่ใช่เป็นค่าของอันดับตัวกรองที่เหมาะสมที่สุดแต่อย่างใด

ตารางที่ 7.3 แสดงผลลัพธ์ของการทดลองที่ 7.1 เป็นการลดเสียงรบกวนของเครื่องเป่าลมเย็นที่มี การสร้างเสียงที่มีความถี่โดดเด่น โดยติดตั้งลำโพงควบคุมไว้ในตำแหน่งทางออกของช่องลม ทำ การวัดระดับเสียง ณ ตำแหน่งที่ 3 ของรูปที่ 7-4 ใช้อัลกอริทึมชนิด FXLMS มีอันดับ (Order) ของ ตัวกรองของระบบควบคุม  $W(z)$  เท่ากับ 127 และอันดับของตัวกรองชดเชย  $C(z)$  เท่ากับ 63

ความถี่โดดเด่น ที่สร้างขึ้น	การลดทอนเฉลี่ย เฉพาะความถี่โดดเด่น Leq (dB) Weighting L ใช้อัลกอริทึม FXLMS ปิดเครื่องเป่าลมเย็น	การลดทอนเฉลี่ย เฉพาะความถี่โดดเด่น Leq (dB) Weighting L ใช้อัลกอริทึม FXLMS เปิดเครื่องเป่าลมเย็น
200	-6.9	-3.6
300	10.9	6.1
400	-0.5	-0.1
200+300+400	0.9	0.5

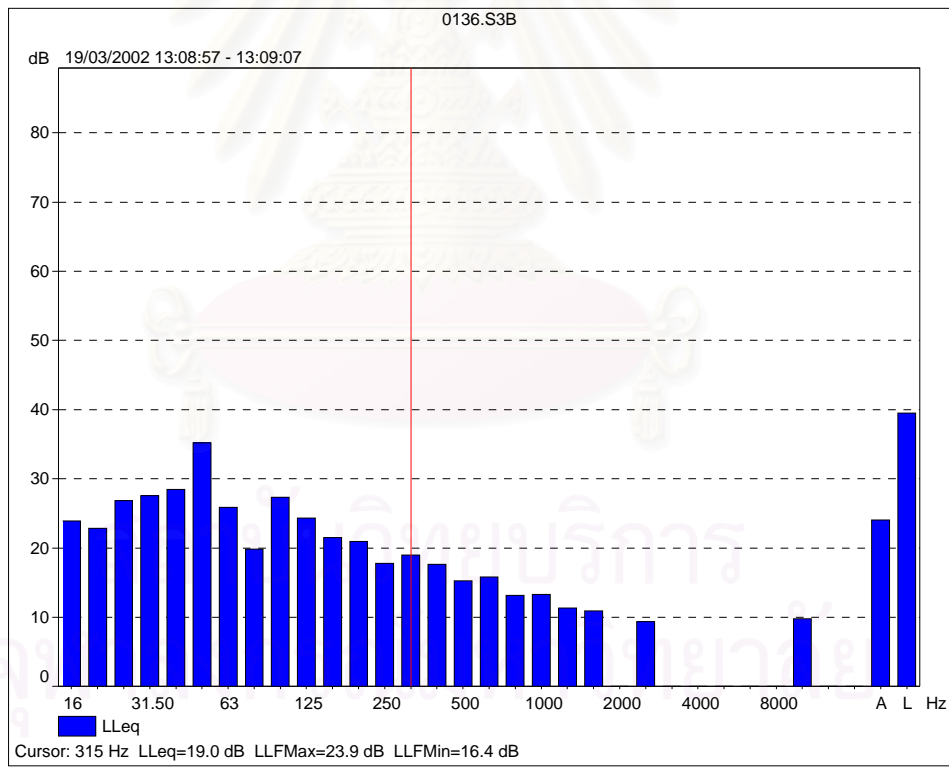
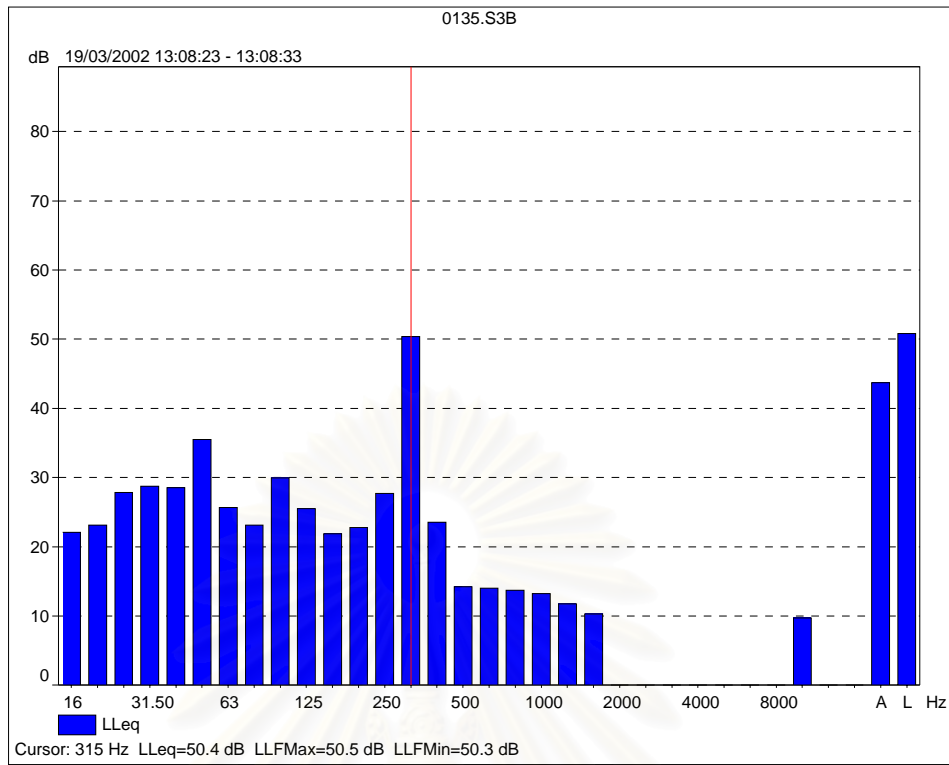
หมายเหตุ ขนาดของการลดทอนเฉลี่ยที่มีเครื่องหมายเป็นลบ หมายถึง ความล้มเหลวในการ หักล้างกันของเสียง ก่อให้เกิดการเพิ่มขึ้นของเสียงรบกวนอันเนื่องมาจากการแทรกสอดแบบเสริม กันนั่นเอง โดย Weighting L หมายถึง การวัดระดับเสียงโดยไม่ผ่านตัวกรองใดๆ Weighting A หมายถึง การวัดระดับเสียงโดยผ่านตัวกรองแบบผ่านความถี่ (Band Pass Filter) เพื่อให้สัญญาณขาออกมีการลดทอนในแต่ละความถี่คล้ายกับธรรมชาติการได้ยินของมนุษย์ [4] (เทียบกับ Curve A) การเลือกใช้จำนวนอันดับของตัวกรองเท่ากับ 127 เป็นการสุ่มเลือกค่าขึ้นมา ไม่ใช่เป็นค่าของอันดับตัวกรองที่เหมาะสมที่สุดแต่อย่างใด

การทดลองที่ 7.2 การทดลองนี้จะทำการติดตั้งลำโพงควบคุม (Control Source) ไว้ในห้องรวม ทั้งสิ้น 2 ตำแหน่งด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 7-5 โดยมีไมโครโฟนรับสัญญาณอ้างอิง (Reference Microphone) ติดตั้งอยู่ในตำแหน่งที่รับสัญญาณอ้างอิงได้ดี โดยในงานวิจัยนี้จะไม่ขอกกล่าวถึง ตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดในการติดตั้งสัญญาณอ้างอิง ส่วนไมโครโฟนรับสัญญาณความผิดพลาด นั้น จะถูกติดตั้งอยู่ในตำแหน่งที่ 1ก, 1ข, 1ค และ 2 ดังแสดงในรูปที่ 7-5 สำหรับการวัดระดับเสียง นั้น ไมโครโฟนของเครื่องวัดระดับเสียงจะถูกติดตั้งไว้ที่ตำแหน่งเดียวกันกับ ไมโครโฟนรับสัญญาณ ความผิดพลาด เนื่องจากจุดประสงค์ของการทดลองนี้ ต้องการที่จะสร้างบริเวณที่มีการหักล้างกัน ของเสียงขึ้น หรือที่เรียกกันว่าบริเวณเงียบ (Zone of Silence) ดังนั้นจำเป็นที่ไมโครโฟนวัดระดับ เสียงจะต้องติดตั้งอยู่ในตำแหน่งเดียวกันกับไมโครโฟนรับสัญญาณความผิดพลาด สำหรับระบบ ควบคุมที่ใช้เป็นแบบป้อนไปข้างหน้าชนิดปรับตัวได้ (Adaptive Feedforward Control) สำหรับ ความถี่ของสัญญาณที่จะควบคุมนั้นในที่นี้จะขอเลือกทดลองเฉพาะบางความถี่เท่านั้น ดังแสดงใน ตารางที่ 7.4 ซึ่งมีขั้นตอนต่างๆดังนี้

1. เปิดเครื่องเป่าลมเย็นและใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Signal Generator) เพื่อให้กำเนิดความถี่ที่โดดเด่น (Dominant Frequency) ส่งสัญญาณไฟฟ้า ไปยังลำโพงกำเนิดสัญญาณเสียงรบกวน โดยได้ทำการติดตั้งลำโพงนี้ไว้ ภายในเครื่องเป่าลมเย็น ใกล้กับตำแหน่งของพัดลม (Blower)
2. ทำการรับสัญญาณอ้างอิงจากไมโครโฟนรับสัญญาณอ้างอิง (Reference Microphone) ซึ่งติดตั้งอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้กับลำโพงกำเนิดสัญญาณเสียงรบกวน ในขณะที่เดียวกันก็รับสัญญาณความผิดพลาดจากไมโครโฟนรับ สัญญาณความผิดพลาด (Error Microphone) ซึ่งถูกติดตั้งอยู่ในตำแหน่งดัง แสดงในรูปที่ 7-5 เหตุผลที่รับทั้ง 2 สัญญาณพร้อมกันเนื่องมาจากข้อจำกัด ทางด้านฮาร์ดแวร์ (Hardware) ของระบบควบคุม
3. นำทั้ง 2 สัญญาณที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 ไปเข้าระบบควบคุม ซึ่งจะทำการ ประมวลผลสัญญาณโดยใช้อัลกอริทึม FXLMS จะได้ผลลัพธ์ออกมาเป็น สัญญาณควบคุม เพื่อส่งไปยังลำโพงควบคุม (Control Source)
4. สัญญาณที่ส่งไปยังลำโพงควบคุมนี้ จะมีเฟสต่างกันกับเสียงที่เดินทางมายัง จุดหักล้างอยู่ประมาณ 180 องศา หลังจากทำการหักล้างแล้ว ก็ให้ทำซ้ำใน ขั้นตอนที่ 2 คือจะรับสัญญาณเสียงความผิดพลาดอีก ทำเช่นนี้ไปเรื่อยๆ

ตารางที่ 7.4 แสดงผลลัพธ์ของการทดลองที่ 7.2 เป็นการลดเสียงรบกวนของเครื่องเป่าลมเย็นที่มีการสร้างเสียงที่มีความถี่โดดเด่น โดยติดตั้งลำโพงควบคุม ณ ตำแหน่งที่ 1 ของรูปที่ 7-5 สำหรับไมโครโฟนรับสัญญาณความผิดพลาดนั้น จะถูกติดตั้งในตำแหน่งเดียวกันกับไมโครโฟนของเครื่องวัดระดับเสียง ณ ตำแหน่งที่ 1ก 1ข และ 1ค ของรูปที่ 7-5 โดยใช้อัลกอริทึมชนิด FXLMS มีอันดับ (Order) ของตัวกรองของระบบควบคุม  $W(z)$  เท่ากับ 127 และอันดับของตัวกรองชดเชย  $C(z)$  เท่ากับ 63

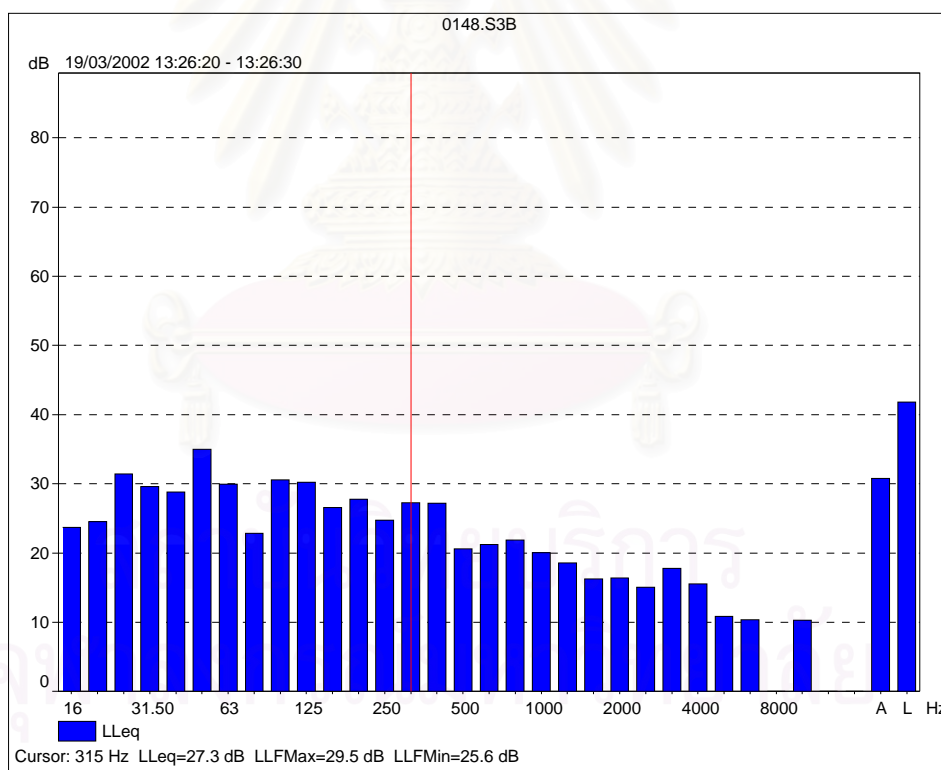
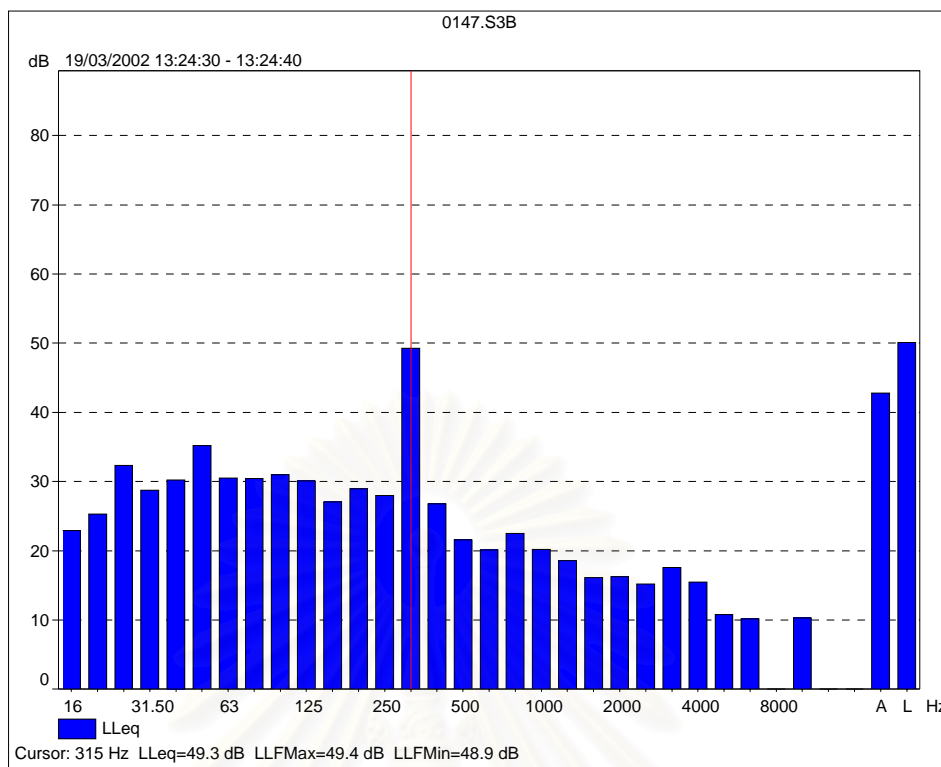
ความถี่โดดเด่น ที่สร้างขึ้น	การลดทอนเฉลี่ย เฉพาะความถี่โดดเด่น Leq (dB) Weighting L ใช้อัลกอริทึม FXLMS ไมโครโฟนรับสัญญาณ ความผิดพลาดอยู่ ณ ตำแหน่ง ก		การลดทอนเฉลี่ย เฉพาะความถี่โดดเด่น Leq (dB) Weighting L ใช้อัลกอริทึม FXLMS ไมโครโฟนรับสัญญาณ ความผิดพลาดอยู่ ณ ตำแหน่ง ข		การลดทอนเฉลี่ย เฉพาะความถี่โดดเด่น Leq (dB) Weighting L ใช้อัลกอริทึม FXLMS ไมโครโฟนรับสัญญาณ ความผิดพลาดอยู่ ณ ตำแหน่ง ค	
	ปิด เครื่องเป่า ลมเย็น	เปิด เครื่องเป่า ลมเย็น	ปิด เครื่องเป่า ลมเย็น	เปิด เครื่องเป่า ลมเย็น	ปิด เครื่องเป่า ลมเย็น	เปิด เครื่องเป่า ลมเย็น
	200	3.1	3.9	6.9	6.2	7.7
300	31.4	22	24.8	17.8	26.7	23
400	14.6	12.7	18.9	17.6	19.1	17.8
200+300+400	7.6	5.6	10	7.8	15.1	10.5



รูปที่ 7-11 ตัวอย่างผลลัพธ์จากการทดลองที่ 7.2 ตารางที่ 7.4

สเปกตรัมของเสียงรบกวนความถี่ 300 Hz (เส้นสีแดงลากผ่าน) และเสียงจากสิ่งแวดล้อม (Background Noise) ขณะทำการทดลอง (กราฟแท่งอื่นๆ) ทดลองขณะปิดเครื่องเป่าลมเย็นบน) ขณะเปิดเครื่องลดเสียงรบกวนแบบแอคทีฟ (ล่าง) ขณะเปิดเครื่องลดเสียงรบกวนแบบแอคทีฟ





รูปที่ 7-12 ตัวอย่างผลลัพธ์จากการทดลองที่ 7.2 ตารางที่ 7.4

สเปกตรัมของเสียงรบกวนความถี่ 300 Hz (เส้นสีแดงลากผ่าน) และเสียงจากสิ่งแวดล้อม (Background Noise) ขณะทำการทดลอง (กราฟแท่งอื่นๆ) ทดลองขณะเปิดเครื่องเป่าลมเย็นบน) ขณะเปิดเครื่องลดเสียงรบกวนแบบแอคทีฟ (ล่าง) ขณะเปิดเครื่องลดเสียงรบกวนแบบแอคทีฟ

ตารางที่ 7.5 แสดงผลลัพธ์ของการทดลองที่ 7.1.2 เป็นการลดเสียงรบกวนของเครื่องเป่าลมเย็นที่มีการสร้างเสียงที่มีความถี่โดดเด่น โดยติดตั้งลำโพงควบคุม ณ ตำแหน่งที่ 2 ของรูปที่ 7-5 สำหรับไมโครโฟนรับสัญญาณความผิดพลาดนั้น จะถูกติดตั้งในตำแหน่งเดียวกันกับไมโครโฟนของเครื่องวัดระดับเสียง ณ ตำแหน่งที่ 2 ของรูปที่ 7-5 โดยใช้อัลกอริทึมชนิด FXLMS มีอันดับ (Order) ของตัวกรองของระบบควบคุม  $W(z)$  เท่ากับ 127 และอันดับของตัวกรองชดเชย  $C(z)$  เท่ากับ 63

ความถี่โดดเด่น ที่สร้างขึ้น	การลดทอนเฉลี่ย เฉพาะความถี่โดดเด่น Leq (dB) Weighting L ใช้อัลกอริทึม FXLMS ปิดเครื่องเป่าลมเย็น	การลดทอนเฉลี่ย เฉพาะความถี่โดดเด่น Leq (dB) Weighting L ใช้อัลกอริทึม FXLMS เปิดเครื่องเป่าลมเย็น
200	13.6	11
300	20	17.8
400	11.1	6.8
200+300+400	10	7.9

### 7.3 อภิปรายผลการทดลอง

1. จากผลการทดลองที่ 7.1 ซึ่งเป็นการปรับเปลี่ยนตำแหน่งของไมโครโฟนของเครื่องวัดระดับเสียง (Sound Level Meter) เท่านั้น โดยที่ตำแหน่งของลำโพง และไมโครโฟนรับสัญญาณความผิดพลาดไม่ได้เปลี่ยนแปลงแต่ประการใด จากตารางที่ 7.1 เป็นการทดลองโดยปิดและเปิดเครื่องเป่าลมเย็น โดยที่ไมโครโฟนของเครื่องวัดระดับเสียงอยู่ในตำแหน่งเดียวกันกับไมโครโฟนรับสัญญาณความผิดพลาด จะเห็นได้ว่าการลดเสียงรบกวนสามารถทำได้ดี ไม่ว่าจะเป็นความถี่เดียว หรือ การผสมกันหลายความถี่ ถึงแม้ว่าการลดเสียงรบกวนขณะเปิดเครื่องเป่าลมเย็นจะมีประสิทธิภาพด้อยกว่าตอนปิดเครื่องก็ตาม อันเป็นผลเนื่องมาจากการที่ไมโครโฟนรับสัญญาณอ้างอิง มีการปนเปื้อน (Contaminated) จากเสียงรบกวนความถี่อื่นๆ ทำให้ประสิทธิภาพในการลดเสียงรบกวนลดลง แต่กระนั้นก็ตามการลดเสียงรบกวนในทางปฏิบัติไม่สามารถที่จะหลีกเลี่ยงการเจือปนของสัญญาณเสียงความถี่อื่นๆ ได้ โดยผลลัพธ์จากการทดลองนี้ให้ผลในระดับที่น่าพอใจ โดยสามารถลดเสียงรบกวนในขณะที่เปิดเครื่องเป่าลมเย็นให้ลดลงได้มากที่สุดถึงเกือบ 20 dB weighting L

2. จากตารางที่ 7.2 และ 7.3 เป็นการเปลี่ยนตำแหน่งของไมโครโฟนวัดระดับเสียง เป็นตำแหน่งที่ 2 และ 3 ดังแสดงในรูปที่ 7-4 จะเห็นได้ว่าการลดเสียงรบกวนไม่สามารถทำได้เลย บางความถี่เสียงกลับดังขึ้นด้วยซ้ำ (สังเกตได้จากเครื่องหมายลบในตาราง) อันเป็นผลเนื่องมาจากข้อจำกัดของการหักล้างกันของเสียงในระบบแบบ 3 มิติ ที่มีการใช้ชุดควบคุมเพียงชุดเดียวเท่านั้น โดยผลของการควบคุมเสียงรบกวนจะสามารถทำได้แค่เพียงในบริเวณจำกัด หรือที่เรียกกันว่าบริเวณเงียบเท่านั้น (Local Zone of Silence) ไม่สามารถทำได้เป็นบริเวณกว้าง (Global Zone of Silence) ดังนั้น ณ ตำแหน่งที่ 2 และ 3 ในรูปที่ 7-4 จึงไม่สามารถควบคุมเสียงรบกวนได้ด้วยเหตุผลดังกล่าวมาแล้ว แต่จากตารางที่ 7.3 ณ ตำแหน่งที่ 3 ความถี่ 300 Hz กลับสามารถลดเสียงรบกวนได้ คาดว่าน่าจะเป็นสาเหตุเนื่องมาจาก ที่ตำแหน่งดังกล่าวเป็นตำแหน่งโนด (Node) ของความถี่ 300 Hz อันเป็นผลเนื่องมาจากการที่แหล่งกำเนิดเสียงรบกวน และลำโพงควบคุมอยู่ห่างกันเกินไป [1] ทำให้เกิดบริเวณ โนด และ แอนติโนด (Anti-Node) สลับกันทั่วบริเวณห้อง

3. จากตารางที่ 7.4 เป็นการวางตำแหน่งลำโพง ณ ตำแหน่งที่ 1 ในรูปที่ 7-5 โดยจะทำการปรับเปลี่ยนตำแหน่งของไมโครโฟนรับสัญญาณความผิดพลาด รวมทั้งสิ้น 3 ตำแหน่ง โดยที่ไมโครโฟนของเครื่องวัดระดับเสียงจะอยู่ในตำแหน่งเดียวกันกับไมโครโฟนรับสัญญาณความผิดพลาด จุดประสงค์ของการทดลองนี้น่าสนใจมาก คือ การทดลองเปลี่ยนตำแหน่งของบริเวณเงียบ (Zone of Silence) ให้ไปอยู่ ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในห้อง ซึ่งถ้าทำสำเร็จก็เท่ากับว่า เราสามารถเจาะจงบริเวณที่ต้องการลดเสียงรบกวนได้ เช่น บริเวณศีรษะของผู้

ทำงานภายในห้อง หรือจะประยุกต์ไปสู่ผู้ขับขี่ยานพาหนะก็ได้ จากผลการทดลองในตารางที่ 7.4 จะเห็นได้ว่าการลดเสียงรบกวนในขณะที่เปิดเครื่องเป่าลมเย็นสามารถลดเสียงที่มีความถี่โดดเด่น (Dominant Frequency) ลงได้มากที่สุดถึง 23 dB จะมีก็แต่เพียงความถี่ 200 Hz เท่านั้นที่ไม่สามารถลดลงได้มากนัก คาดว่าน่าจะมีสาเหตุมาจาก ที่ตำแหน่งดังกล่าวเป็นตำแหน่ง แอนติโนด (Anti-Node) ของความถี่ 200 Hz ทำให้การควบคุมเสียงความถี่ 200 Hz ณ ตำแหน่งดังกล่าว ไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร อันเป็นผลเนื่องมาจากการที่แหล่งกำเนิดเสียงรบกวน และลำโพงควบคุม อยู่ห่างกันเกินไป [1] ทำให้เกิดบริเวณ โหนด และ แอนติโนด สลับกันทั่วบริเวณห้อง

4. สำหรับตารางที่ 7.5 ได้ทำการเปลี่ยนตำแหน่งของลำโพง และ ไมโครโฟนรับสัญญาณความผิดพลาด รวมทั้งไมโครโฟนวัดระดับเสียง ไปไว้ ณ ตำแหน่งที่ 2 ในรูปที่ 7-5 โดยที่ไมโครโฟนของเครื่องวัดระดับเสียงจะอยู่ในตำแหน่งเดียวกันกับไมโครโฟนรับสัญญาณความผิดพลาด จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพของการลดเสียงรบกวนนั้น อยู่ในระดับที่น่าพึงพอใจ คือขณะเปิดเครื่องเป่าลมเย็นบางความถี่สามารถลดเสียงรบกวนได้ลดลงถึง 17.8 dB weighting L จะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่งนี้การลดเสียงความถี่ 200 Hz สามารถทำได้มากกว่าในตำแหน่งที่ 1 (ซึ่งคาดว่าตำแหน่งที่ 1 เป็นตำแหน่งแอนติโนดของความถี่ 200 Hz) โดย ณ ตำแหน่งที่ 2 นี้ ประสิทธิภาพในการลดเสียงในแต่ละความถี่ที่ได้ทำการทดลอง จะเห็นได้ว่า ที่ความถี่ 300 Hz จะมีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยความถี่อื่นๆ มีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกัน

## บทที่ 8

### สรุปผลวิทยานิพนธ์ ประโยชน์ที่ได้รับ และข้อเสนอแนะ

#### 8-1 สรุปผลวิทยานิพนธ์

จากการทดลองที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่า สำหรับการลดเสียงภายในท่อแคบนั้น สามารถทำได้โดยมีประสิทธิภาพ โดยใช้ชุดควบคุมเพียงชุดเดียวก็เพียงพอแล้ว เนื่องจากการเดินทางของเสียงถูกบังคับให้เดินทางแบบ 1 มิติ ทำให้ง่ายต่อการลดเสียงรบกวน โดยผลของการลดเสียงรบกวนนั้นผู้ฟังสามารถได้ยินการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนมาก ทำให้ระบบแบบนี้เริ่มใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติแล้ว สำหรับอัลกอริทึมที่เลือกใช้นั้น จากผลการทดลองสรุปได้ว่า ถ้าระบบไม่มีการปนเปื้อน (Contaminated) เนื่องจากเสียงควบคุมย้อนกลับ (Acoustic Feedback) จากลำโพง อัลกอริทึมแบบ FXLMS น่าจะเป็นตัวเลือกที่เหมาะสมกว่าเพราะเป็นอัลกอริทึมที่ใช้งานได้ง่ายกว่า และมีประสิทธิภาพที่ดีเพียงพอแล้ว แต่ถ้าเสียงควบคุมย้อนกลับมีปริมาณที่มาก จะกระทบต่อเสถียรภาพของระบบ อัลกอริทึมแบบ FBFXLMS จะให้ผลลัพธ์ในการลดเสียงรบกวนที่ดีกว่า สำหรับการทดลองลดเสียงรบกวนของเครื่องเป่าลมเย็นนั้น จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า เสียงรบกวนจากความถี่โดดเด่น (Dominant Frequency) มีขนาดลดลงมากที่สุดได้ถึง 23 dB แต่เป็นแค่เพียงในบริเวณแคบๆ (Local Zone of Silence) เท่านั้น คือประมาณรัศมี 10 เซนติเมตร รอบไมโครโฟนรับสัญญาณความผิดพลาด การเปลี่ยนตำแหน่งของไมโครโฟนเพียงเล็กน้อยไม่ค่อยมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการลดเสียงรบกวนเท่าไรนัก ส่วนอัลกอริทึมที่ใช้นั้นจะเป็นแบบ FXLMS เนื่องจากระบบค่อนข้างมีผลกระทบจากเสียงควบคุมย้อนกลับน้อยมาก

#### 8-2 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า เราสามารถลดเสียงรบกวนในลักษณะทิศทางเดียว คือ ท่อแคบ ได้ผลลัพธ์อยู่ในเกณฑ์ค่อนข้างดี ซึ่งจะมีผลดีต่อแวดวงอุตสาหกรรมที่บางแห่งมีเสียงดังค่อนข้างมาก โดยเราสามารถนำผลลัพธ์ที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับสถานการณ์อื่นๆที่มีลักษณะใกล้เคียงกันได้ สำหรับการลดเสียงรบกวนของเครื่องเป่าลมเย็นนั้น ถึงแม้ว่าประโยชน์ที่ได้รับจะดูไม่ชัดเจนเป็นรูปธรรมนัก แต่ถ้าพิจารณาให้ดีจะเห็นถึงพื้นฐานที่นำไปสู่การลดเสียงรบกวนในบริเวณแคบๆ เช่น หูของผู้ฟังในห้องโดยสารเครื่องบิน รถยนต์ หรือแม้กระทั่ง ในห้องทำงานที่มีเสียงดังอีกทีก็ได้ นอกจากนี้ยังเป็นพื้นฐานให้กับผู้วิจัยรายต่อไปได้ศึกษาค้นคว้าได้ง่ายขึ้น

เนื่องจากงานวิจัยเกี่ยวกับเรื่องนี้สำหรับประเทศไทยแล้วค่อนข้างใหม่พอควร โดยสามารถลดเวลาการค้นคว้าให้น้อยลงได้ ซึ่งผู้วิจัยได้ใช้เวลาในส่วนนี้ค่อนข้างมาก

### 8-3 ข้อเสนอแนะ

1. ควรทดลองใช้ชุดควบคุมจำนวนหลายๆชุด โดยทำการติดตั้งลำโพงให้ล้อมรอบแหล่งกำเนิดเสียงซึ่งมีขนาดค่อนข้างใหญ่
2. ศึกษาถึงวิธีการ ตลอดจนอัลกอริทึมแบบอื่นๆ ในการลดเสียงรบกวนแบบแอกทีฟ
3. สร้างห้องปฏิบัติการสำหรับลดเสียงรบกวนโดยเฉพาะ เนื่องจากในระหว่างการทดลองเกี่ยวกับเรื่องเสียงนั้น ไม่ควรมีผลกระทบเนื่องจากปัจจัยอื่นๆเข้ามา ซึ่งผลการทดลองอาจจะผิดเพี้ยนไปได้
4. หากลำโพง หรือ ไมโครโฟน พร้อมชุดขยายเสียงที่มีคุณภาพสูงกว่า อาจทำให้ผลการทดลองดีขึ้นได้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

1. Sen M. Kuo and Dennis R. Morgan. Active Noise Control Systems: Algorithms and DSP Implementations. พิมพ์ครั้งที่ 1. John Wiley & Sons, Inc, 1996.
2. Colin H. Hansen and Scott D. Snyder. Active Control of Noise and Vibration. พิมพ์ครั้งที่ 1. Cambridge University Press : Chapman & Hall, 1997.
3. Sen M. Kuo. Design of Active Noise Control Systems With the TMS320 Family. พิมพ์ครั้งที่ 1. Texas Instruments Incorporated, 1996.
4. John E.K. Foreman. Sound Analysis and Noise Control. พิมพ์ครั้งที่ 1. Van Nostrand Reinhold, 1990.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บรรณานุกรม

1. P.A. Nelson and S.J. Elliott. Active Control of Sound. พิมพ์ครั้งที่ 1. Academic Press Limited, 1992.
2. Bernard Widrow and Samuel D. Stearns. Adaptive Signal Processing. พิมพ์ครั้งที่ 1. Prentice Hall, 1985.
3. Sanjit K. Mitra. Digital Signal Processing A Computer-Based Approach. พิมพ์ครั้งที่ 2. McGraw-Hill, 2001.
4. อรรถสิทธิ์ หล้าสกุล. Digital Signal Processing (DSP) Fundamentals. พิมพ์ครั้งที่ 1. แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2543.
5. ดร.กิตติพัฒน์ ตันตระรุ่งโรจน์. สัญญาณและระบบเวลาเต็มหน่วย. พิมพ์ครั้งที่ 1. บริษัทพิมพ์ดี จำกัด : บริษัทวิทยพัฒน์ จำกัด, 2540.
6. Alan V. Oppenheim and Ronald W. Schaffer with John R. Buck. Discrete-Time Signal Processing. 2 nd Edition. Prentice Hall Signal Processing Series. Prentice-Hall, Inc., 1999.
7. Steven W. Smith. The Scientist and Engineer 's Guide to Digital Signal Processing.
8. พรชัย ภววงษ์ศักดิ์. การประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 1.
9. Mikio Tohyama and Tsunehiko Koike. Fundamentals of Acoustic Signal Processing. พิมพ์ครั้งที่ 1 . Academic Press Limited, 1998.
10. Naim Dahnoun. Digital Signal Processing Implementation using the TMS320c6000 DSP Platform. พิมพ์ครั้งที่ 1. Pearson Education, 2000.
11. David M. Lipscomb and Arthur C. Taylor. Noise Control Handbook of Principle and Practices. พิมพ์ครั้งที่ 1. Van Nostrand Reinhold Company, 1978.
12. Nasser Kehtarnavaz and Mansour Keramat. DSP System Design using the TMS320c6000. พิมพ์ครั้งที่ 1. Prentice Hall, 2001.
13. M.O. Tokhi and R.R. Leitch. Active Noise Control. Clarendon Press : Oxford, 1992.
14. David A. Bies and Colin Hansen. Engineering Noise Control. พิมพ์ครั้งที่ 2. Chapman & Hall, 1996.





## ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## โปรแกรมภาษา C ที่ใช้ในการควบคุมระบบ

โปรแกรมนี้อ้างอิงสำหรับบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320c6701 EVM ซึ่งมีประสิทธิภาพในการคำนวณสูง โดยมีข้อมูลดังนี้

ตัวโปรแกรมถูกแบ่งแยกออกเป็น Module ย่อยๆ ดังนี้

1. ANC.C
2. FIRFXLMS.C
3. FIR2.C
4. DSS\_EVM67.C

### ชื่อโปรแกรม ANC.C

เป็นโปรแกรมหลักใช้สำหรับควบคุมเสียงรบกวนแบบแอดทีฟ โดยจะเป็นส่วนหลักที่ใช้ในการเรียกโปรแกรมย่อยต่างๆ

```
/******
```

```
/* This program was written by S. Kuersirikul */
```

```
/* 15 Jan 2002 */
```

```
/* Filename: ANC.c */
```

```
/* This program was used with c6701 EVM */
```

```
/* included: FBFXLMS algorithm */
```

```
/* This is main program for Control Noise */
```

```
/******
```

```
/****** DSP/BIOS Dependencies *****/
```

```
#include <std.h>
```

```
#include <log.h>
```

```
#include <sts.h>
```

```
#include <trc.h>
```

```
/****** File Dependencies *****/
```

```
#include <mcbsp.h>
```

```
// selected order
```

```
#define order 128
```

```
/****** DSP/BIOS Object *****/
```

```
extern far LOG_Obj trace;
```

```
extern far LOG_Obj trace2;
```

```
extern far STS_Obj stsISR;
```

```
extern far STS_Obj stsFIR;
```

```
extern far STS_Obj stsLMS;
```

```
/****** Function Prototypes *****/
```

```
interrupt void serialPortRcvISR(void);
```

```
/****** Global Variables *****/
```

```
volatile long longxp;
```

```
volatile long longy;
```

```
volatile long longyp;
```

```
volatile short mu;
```

```
volatile int input;
```

```
volatile int output;
```

```
volatile short e[order];
```

```
volatile short x[order];
```

```
volatile short xp[order];
```

```
volatile short y[order];
```

```
volatile short yp[order];
```

```
volatile short u[order];
```

```
volatile short c[order];
```

```
volatile short d[order];
```

```
volatile short w[order];
```

```
/****** Main Function *****/
```

```
void main()
```

```
{
```

```
    int i;
```

```
    for(i=0;i<order;i++)
```

```
    {
```

```
        w[i]=0;
```

```
        // FBFXLMS please comment the following statements
```

```
        d[i]=0;
```

```
        e[i] = 0;
```

```
        x[i] = 0;
```

```
        xp[i] = 0;
```

```
        y[i] = 0;
```

```
        yp[i] = 0;
```

```
        u[i] = 0;
```

```
    }
```

```
    /* Initialize Codec & McBSP0 .. dss_evm62.c */
```

```
    DSS_init();
```

```
    /* Fall into BIOS idle loop*/
```

```
    return;
```

```
}
```

```

/***** Interrupt Service Routine *****/
#pragma CODE_SECTION(serialPortRcvISR, ".intrprog")
interrupt void serialPortRcvISR(void)
{
    int i;
    short mue;

    /* Monitor the number of instruction cycles */
    STS_set(&stsISR, CLK_gethetime());

    // Received Input Samples
    input = MCBSP_READ(0);
    u[order-1] = (short)(input >> 16); // CH_Left
    e[order-1] = (short)input; // CH_Right

    // Output Section
    output = (int)(y[order-1] << 16) + y[order-1];
    MCBSP_WRITE(0, 1 * output);

    LOG_printf(&trace, " error signal is %d \n", e[order-1]);
    LOG_printf(&trace2, " control signal is %d \n", y[order-1]);

    // Feedback Section
    longyp = fir2(d, y, order);
    yp[order-1] = (short)(longyp >> 15); // y'[n]
    x[order-1] = u[order-1] - yp[order-1];

    /* Input signal propagated along the environment */
    STS_set(&stsFIR, CLK_gethetime());

```

```

longxp = fir2(c,x,order);
xp[order-1] = (short)(longxp>>15); // x'[n]
STS_delta(&stsFIR,CLK_geththime());

/* FIR LMS algorithm */
STS_set(&stsLMS,CLK_geththime());
mue=(short)((_mpy(mu,e[order-1]))>>15);
longy = firxLms2(w,x,xp,mue,order);
y[order-1] = (short)(longy>>15);
//output_R[order-1] = -1*output_R[order-1]; // output_R = y[n]
STS_delta(&stsLMS,CLK_geththime());

// Output Section
//output= (int)(output_R[order-1]<<16)+ output_R[order-1] ;
// MCBSP_WRITE(0, 1*output);

for(i=0;i<(order-1);i++)
{
    e[i] = e[i+1];
    x[i] = x[i+1];
    xp[i] = xp[i+1];
    y[i] = y[i+1];
    yp[i] = yp[i+1];
    u[i] = u[i+1];
}
STS_delta(&stsISR,CLK_geththime());
}

```

### ชื่อโปรแกรม FIRXLMS.C

เป็นโปรแกรมย่อยในส่วนของ การคำนวณค่า Output ,การปรับค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรอง รวมถึงในส่วนของ Leaky ด้วย

```
/****** FIRXLMS.C*****
```

```
long firxLms2(short h[],short x[],short xp[],short b,int N);
```

```
#pragma CODE_SECTION(firxLms2, ".iprogram")
```

```
long firxLms2(short h[],short x[],short xp[],short b,int N)
```

```
{
```

```
    int i;
```

```
    long y=0;
```

```
    short leaky=32765; //32767=1,32766=0.999969,32765=0.999938
```

```
    for(i=0;i<N;i++)
```

```
    {
```

```
        y+=(_mpy(x[i],h[i]));
```

```
        h[i]-=_mpy(xp[i],b)>>15);
```

```
        h[i] = (_mpy(h[i],leaky)>>15);
```

```
    }
```

```
    return y;
```

```
}
```

## ชื่อโปรแกรม FIR2.C

เป็นโปรแกรมย่อยที่ใช้ในการคำนวณค่าคอนโวลูชัน (Convolution)

```
/******
```

```
long fir2(short h[],short x[],int N);
```

```
#pragma CODE_SECTION(fir2, ".iprogram")
```

```
long fir2(short h[],short x[],int N)
```

```
{
```

```
    int i;
```

```
    long y=0;
```

```
    for(i=0;i<N;i++)
```

```
    {
```

```
        y+=(_lmpy(x[i],h[i]));
```

```
    }
```

```
    return y;
```

```
}
```

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ชื่อโปรแกรม DSS\_EVM67.C

เป็นโปรแกรมย่อยที่ใช้ในการติดต่อกับ Hardware ต่างๆ ของตัวบอร์ดประมวลผล TMS320c6701 EVM

```
/****** DSS_EVM67.C *****/
```

```
/* McBSP 0 Memory Mapped Registers */
```

```
#define DRR (*(volatile unsigned int *)0x018c0000) /* Data Receive Reg */
```

```
#define DXR (*(volatile unsigned int *)0x018c0004) /* Data Transmit Reg */
```

```
#define SPCR (*(volatile unsigned int *)0x018c0008) /* Serial Port Cont Reg */
```

```
#define RCR (*(volatile unsigned int *)0x018c000c) /* Receive Control Reg */
```

```
#define XCR (*(volatile unsigned int *)0x018c0010) /* Transmit Control Reg */
```

```
#define MCR (*(volatile unsigned int *)0x018c0018) /* Multichannel Reg */
```

```
#define PCR (*(volatile unsigned int *)0x018c0024) /* Pin Control Reg */
```

```
/* CPLD (Complex Programmable Logic Device) Memory Mapped Register */
```

```
#define CPLD (*(volatile unsigned int *)0x01780000)
```

```
/* Codec Memory Mapped Registers */
```

```
#define IAR (*(volatile unsigned int *)0x01720000) /* Index Address Reg */
```

```
#define IDR (*(volatile unsigned int *)0x01720004) /* Indexed Data Reg */
```

```
#define SR (*(volatile unsigned int *)0x01720008) /* Status Reg */
```

```
#define PIO (*(volatile unsigned int *)0x0172000c) /* PIO Data Reg */
```

```
/* Codec Indirect Mapped Registers */
```

```
#define ADC_LEFT_CNTL 0x00 /* I0 - Left ADC Input Control */
```

```
#define ADC_RIGHT_CNTL 0x01 /* I1 - Right ADC Input Control */
```

```
#define DAC_LEFT_CNTL 0x06 /* I6 - Left DAC Output Control */
```

```
#define DAC_RIGHT_CNTL 0x07 /* I7 - Right DAC Output Control */
```

```
#define FS_PDF_CNTL 0x48 /* I8 - FS & Playback Data Control (MCE set) */
```

```

#define PIO_CNTL      0x49 /* I9 - Interface Control (MCE set) */
#define MODE_CNTL     0x0c /* I12 - Mode and ID Control */
#define SP_CNTL       0x50 /* I16 - Alternate Feature enable 1 (MCE set) */
#define LINE_LEFT_CNTL 0x12 /* I18 - Left Line Input Control */
#define LINE_RIGHT_CNTL 0x13 /* I19 - Right Line Input Control */
#define CDF_CNTL      0x5c /* I28 - Capture Data Format (MCE set)*/

/* Codec Commands */
#define LINE_SEL_0G  0x00 /* Line selected gain = 0 */
#define LINE_SEL_3G  0x02 /* Line selected gain = 3 */
#define LINE_SEL_18G 0x0c /* Line selected gain = 18 */
#define LINE_SEL_22G 0x0f /* Line selected gain = 22 */
#define MIC_SEL_0G   0x80 /* Mic selected gain = 0 */
#define MIC_SEL_3G   0x82 /* Mic selected gain = 3 */
#define MIC_SEL_18G  0x8c /* Mic selected gain = 18 */
#define MIC_SEL_22G  0x8f /* Mic selected gain = 22 */
#define MIC_SEL_0G_MicGain 0xA0 /* Mic selected gain = 0 plus micgain*/
#define MIC_SEL_3G_MicGain      0xA2 /* Mic selected gain = 3 plus micgain*/
#define MIC_SEL_18G_MicGain 0xAc /* Mic selected gain = 18 plus micgain*/
#define MIC_SEL_22G_MicGain 0xAf /* Mic selected gain = 22 plus micgain*/
#define DAC_UNMUTE  0x00 /* Unmute DAC-to-mixer */
#define MODE2_ENABLE 0x40 /* Enable MODE 2 */
#define INIT_DONE    0x80 /* Initialization bit */
#define SP_32_ENABLE 0x0a /* Serial Port (32 bits) */
#define CDF_S_L16   0x50 /* CDF; Stereo, linear, 16-bit */
#define FS8_S_L16   0x50 /* FS: 8kHz, PDF; Stereo, linear, 16-bit */
#define FS48_S_L16  0x5c /* FS: 48kHz, PDF; Stereo, linear, 16-bit */
#define PIO_ENABLE  0xc3 /* Enable PIO (capture and playback) */

```

```

#define MCE_RESET    0xbf /* Reset Mode Control Bit (MCE) */

/* CPLD Commands */
#define CODEC_DISABLE 0xf8
#define CODEC_ENABLE 0x04

/* McBSP 0 commands */
#define SPCR_DISABLE 0x00 /* Disable serial port */
#define SPCR_STANDBY 0x00200020 /* Wait for frame synch, enable RX int */
#define SPCR_ENABLE 0x00010001 /* enable serial port */
#define PCR_SET      0x00 /* external RX/TX clock and frame synch */
#define CR_32_SET    0x000000a0 /* 32 bit word, 1 w/frame, single phase */
#define MCR_SET      0x00 /* enable TX and RX channels */
#define MCSP_RXINT_BIT 0x0800 /* assume serial RX interrupt on INT 11 */

/* Macros */
#define SETBITMASKCODEC(i,n) IAR=(i); IDR|=(n);
#define SETREGCODEC(i,n) IAR=(i); IDR=(n);

static void enableCodec(void); /* Configure Codec */
static void enableMcBSP0(void); /* Configure McBSP 0 */

extern cregister volatile unsigned int IFR;
extern cregister volatile unsigned int ICR;
extern cregister volatile unsigned int IER;

```

```
/*  
 * ===== DSS_init =====  
 */  
void DSS_init(void)  
{  
  
    /* Configure codec */  
    enableCodec();  
  
    /* Configure McBSP 0 */  
    enableMcBSP0();  
  
    /* Unmute left and right DAC-to-mixer */  
    SETREGCODEC(DAC_LEFT_CNTL, DAC_UNMUTE);  
    SETREGCODEC(DAC_RIGHT_CNTL, DAC_UNMUTE);  
  
}
```

```
/*  
 * ===== enableCodec =====  
 */  
static void enableCodec(void)  
{
```

```
    /* Reset and enable codec */  
    CPLD &= CODEC_DISABLE;
```

```

CPLD |= CODEC_ENABLE;

/* wait for codec to finish initialization */
while(IAR & INIT_DONE);

/* Enable mode 2 */
SETBITMASKCODEC(MODE_CNTL, MODE2_ENABLE);

/* Set codec Serial port format */
SETREGCODEC(SP_CNTL, SP_32_ENABLE);

/* Set capture format */
SETREGCODEC(CDF_CNTL, CDF_S_L16);

/* Set playback format and sampling rate */
SETREGCODEC(FS_PDF_CNTL, FS8_S_L16);

/* Enable bits in PIO (programmed I/O) */
SETREGCODEC(PIO_CNTL, PIO_ENABLE);

/* Selected Mic with gain+=22 no bias */
// SETREGCODEC(ADC_LEFT_CNTL , MIC_SEL_22G);
// SETREGCODEC(ADC_RIGHT_CNTL , MIC_SEL_22G);

/* Electreted Microphone use this routines */
/* MIC_SEL_0G_MicGain = Selected Mic with gain+=0 with bias */
/* MIC_SEL_3G_MicGain = Selected Mic with gain+=3 with bias */
/* MIC_SEL_22G_MicGain = Selected Mic with gain+=22 with bias */
/* You should not use with gain+=22 it 's out of range */
/* When you use this routine you don't need the bias module of mic */
// SETREGCODEC(ADC_LEFT_CNTL , MIC_SEL_0G_MicGain);

```

```

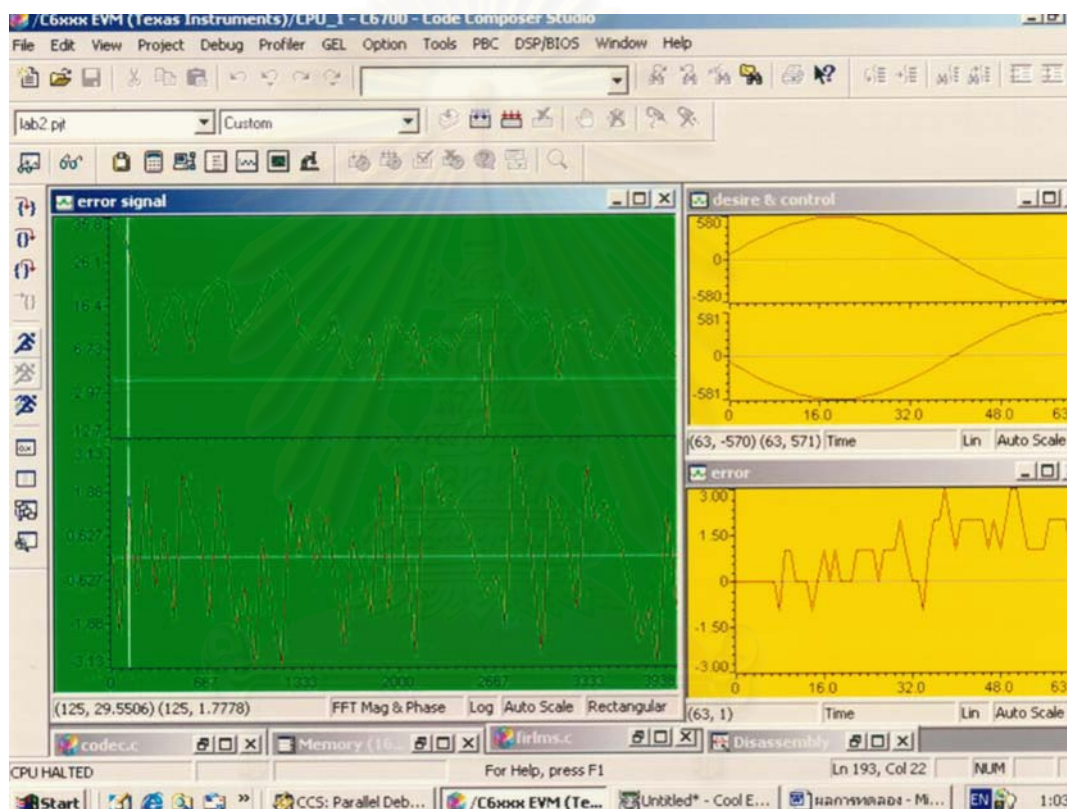
// SETREGCODEC(ADC_RIGHT_CNTL , MIC_SEL_0G_MicGain);

/* Reset Mode Control Bit (MCE) */
IAR &= MCE_RESET;
}
/*
* ===== enableMcBSP0 =====
*/
static void enableMcBSP0(void)
{
/* Disable serial port */
SPCR = SPCR_DISABLE;
/* Configure pin control register */
PCR = PCR_SET;
/* Configure receive control register */
RCR = CR_32_SET;
/* Configure transmit control register */
XCR = CR_32_SET;
/* Enable transmit and receive channels */
MCR = MCR_SET;
/* Put serial port in 'standby' and wait for frame synch */
SPCR = SPCR_STANDBY;
while(!(IFR & MCSP_RXINT_BIT));
/* Clear the frame synch interrupt */
ICR = MCSP_RXINT_BIT;
/* Enable serial port */
SPCR = SPCR_ENABLE;
/* Enable INT 11 */
IER |= MCSP_RXINT_BIT;
}

```

## ภาคผนวก ข

## หน้าต่างของซอฟต์แวร์ CCS (Code Composer Studio)



จากรูป แสดงให้เห็นถึงรายละเอียดของซอฟต์แวร์  
 หน้าต่างใหญ่สี่เหลี่ยมทางซ้าย) แสดงถึงกราฟเชิงความถี่ โดยรูปบนเป็นขนาด ส่วนรูปล่างเป็นเฟส  
 หน้าต่างสี่เหลี่ยมบน) แสดงสัญญาณทั้งสองที่จะทำการหักล้างกัน  
 หน้าต่างสี่เหลี่ยมล่าง) แสดงให้เห็นถึงสัญญาณความผิดพลาดหลังจากทำการหักล้างแล้ว

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายโสพลชัย เกื้อศิริกุล เกิดเมื่อวันที่ 15 มกราคม พ.ศ. 2520 ศึกษาชั้นประถมศึกษา และมัธยมศึกษาที่โรงเรียนอัสสัมชัญ กรุงเทพฯ จากนั้นเข้าศึกษาในคณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปีการศึกษา 2537 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลในปีการศึกษา 2540 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2541



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย