



การตรวจจับแบบปรับตัวได้สำหรับการติดตามและชดเชยการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นใน  
ระบบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยใช้ตัวขับเคลื่อน PZT แบบรับรู้ด้วยตนเอง  
Adaptive Sensing for Active Vibration Tracking and Compensation in  
HDD Systems Using a Self-Sensing PZT Actuator

เกียรติศักดิ์ เสงฆ์ช่วย  
Kiattisak Sengchuai

วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษิตตามหลักสูตรปริญญา  
ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering  
Prince of Songkla University

2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การตรวจจับแบบปรับตัวได้สำหรับการติดตามและชดเชยการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นใน  
ระบบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยใช้ตัวขับเคลื่อน PZT แบบรับรู้ด้วยตนเอง  
Adaptive Sensing for Active Vibration Tracking and Compensation in  
HDD Systems Using a Self-Sensing PZT Actuator

เกียรติศักดิ์ เสงฆ์ช่วย

Kiattisak Sengchuai

วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษิตามหลักสูตรปริญญา

ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering

Prince of Songkla University

2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐภา จินดาเพชร)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นายเกียรติศักดิ์ เส็งช่วย)

นักศึกษา

(4)

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ  
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายเกียรติศักดิ์ เส็งช่วย)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การตรวจจับแบบปรับตัวได้สำหรับการติดตามและชดเชยการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในระบบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยใช้ตัวขับเคลื่อน PZT แบบปรับรูปร่างด้วยตนเอง
ผู้เขียน	นายเกียรติศักดิ์ เส่งช่วย
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา	2560

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองสำหรับการประยุกต์ใช้งานตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นทั้งตัวขับเคลื่อนและตัวตรวจจับไปพร้อมๆ กัน เพื่อตรวจจับสัญญาณการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นที่หัวอ่าน/เขียน การออกแบบวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการออกแบบวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง เพื่อใช้สำหรับการตรวจจับสัญญาณที่ตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กสร้างออกมาขณะถูกขับเคลื่อนด้วยสัญญาณควบคุม วงจรที่ออกแบบเป็นวงจรที่ใช้อุปกรณ์ในวงจรลดลงและมีเงื่อนไขการออกแบบวงจรให้เกิดความสมดุลเพียงเงื่อนไขเดียวทำให้ง่ายสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งาน ส่วนที่สองเป็นการออกแบบวิธีการแบบปรับตัวได้โดยการประยุกต์ใช้วิธีการกำลังสองเฉลี่ยต่ำสุด เพื่อชดเชยความผิดพลาดของสัญญาณตรวจจับที่ได้จากวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขณะใช้งาน สำหรับการทดลองวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบถูกนำไปประยุกต์ใช้งานกับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จริงในอุตสาหกรรม จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบมีคุณสมบัติและการตอบสนองที่ความเหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานกับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อความถูกต้องตำแหน่งของหัวอ่าน/เขียน และวิธีการแบบปรับตัวได้ที่ออกแบบสามารถชดเชยความผิดพลาดและเพิ่มความถูกต้องของสัญญาณตรวจจับได้ นอกจากนี้วิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบสามารถตรวจจับสัญญาณการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นที่หัวอ่าน/เขียนได้ค่อนข้างมีความถูกต้องเมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับการสั่นสะเทือน ดังนั้นวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่นำเสนอสามารถนำไปประยุกต์ใช้แทนตรวจจับการสั่นสะเทือนที่อยู่บนบอร์ดวงจรของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เพื่อลดต้นทุนในการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในอุตสาหกรรม

**คำสำคัญ** วิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง วงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง วิธีการปรับตัวแบบค่ากำลังสองเฉลี่ยต่ำสุด ตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็ก ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

<b>Thesis Title</b>	Adaptive Sensing for Active Vibration Tracking and Compensation in HDD Systems Using a Self-Sensing PZT Actuator
<b>Author</b>	Mr. Kiattisak Sengchuai
<b>Major Program</b>	Electrical Engineering
<b>Academic Year</b>	2017

## ABSTRACT

This thesis presents a self-sensing actuation (SSA) technique for using the piezoelectric (PZT) micro-actuator as both an actuator and a sensor simultaneously. The proposed SSA detects a vibration on a read/write (R/W) head of a hard disk drive (HDD). The SSA design consists of a SSA circuit and an adaptive SSA. The SSA circuit senses the voltage signal generated by the PZT micro-actuator while the control voltage is applied to the same PZT micro-actuator. The components of the proposed SSA circuit are minimized to allow easy balancing and implementation. The proposed adaptive SSA compensates the error of the sensing signal from the SSA circuit due to a temperature change. The least mean square (LMS) algorithm was employed to adjust the adaptive gain of the adaptive SSA. In experiments, the proposed SSA technique was tested with a commercial HDD. The results show that the characteristic and the response of the proposed SSA circuit is suitable for a commercial HDD. The proposed SSA circuit does not affect the conventional R/W head positioning control system. The proposed adaptive SSA can compensate the sensing signal error of the SSA circuit. Moreover, the proposed SSA technique can detect a vibration on an R/W head of a HDD accurately when it was compared to the sensing signal of the vibration sensor on a commercial HDD. Therefore, the proposed SSA technique can replace a vibration sensor on a printed circuit board (PCB) of HDDs to reduce the HDD production cost in the industry.

**Keyword** Self-sensing actuation, SSA circuit, adaptive LMS algorithm, PZT micro-actuator, hard disk drive

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐชา จินดาเพ็ชร ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาอุทิศเวลาให้คำปรึกษา แนะนำเอกสาร และข้อมูลต่างๆในการทำวิจัย รวมถึงการช่วยเหลือแก้ไขปัญหาและอุปสรรคต่างๆ ในการทำวิจัย ตลอดจนตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนันต์ เครือทรัพย์ถาวร ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และผู้ทรงคุณวุฒิจากภายนอก ที่ได้กรุณาอุทิศเวลาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์และวิจารณ์ผลงานวิจัย รวมถึงการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ดร.รักกฤตว์ ดวงสร้อยทอง รองศาสตราจารย์ คนดีถิ ชาญพัฒนานนท์ และดร. วฤทธิ วิชกุล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการทำวิจัย รวมถึงการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย โครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม และบริษัท เวสเทิร์น ดิจิตอล (ประเทศไทย) จำกัด ที่กรุณาสนับสนุนทุนการศึกษาและการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนในการทำวิจัยและให้ความช่วยเหลือด้านการประสานงานต่างๆ

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ บุคลากร นักศึกษาปริญญาโทและปริญญาเอกภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกคน รวมถึงเพื่อน พี่ น้อง ในภาควิชา ที่ให้ความช่วยเหลือและกำลังใจในการทำวิจัยมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอโน้มรำลึกถึงพระคุณของบิดามารดาและครอบครัว ที่ส่งเสริมสนับสนุน ให้กำลังใจ และทุ่มทรัพย์แก่ข้าพเจ้าตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา

เกียรติศักดิ์ แสงช่วย



## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(11)
รายการภาพประกอบ	(12)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.4 การทบทวนวรรณกรรมบทความ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
1.5 ขอบเขตของการวิจัย	12
1.6 ระเบียบวิธีการวิจัย และขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	13
1.6.1 การออกแบบวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง	13
1.6.2 การออกแบบวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้	13
1.6.3 การประยุกต์ใช้งานกับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในอุตสาหกรรม	14
1.6.4 การทดลอง และการประเมินประสิทธิภาพของวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง	14
1.7 แผนการดำเนินการวิจัย	16
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	17
2.1 ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์	17
2.1.1 ส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ [1]	17
2.1.2 การควบคุมหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ [2]	18
2.2 ตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริก	20
2.2.1 คุณสมบัติของตัวเพียโซอิเล็กทริก [3]	20
2.2.2 วงจรสมมูลของตัวเพียโซอิเล็กทริก	22
2.2.3 การขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองของตัวเพียโซอิเล็กทริก [16]	23
2.3 วงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง	24
2.3.1 วงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบบริดจ์	24
2.3.2 วงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบขับเคลื่อนทางอ้อม	26

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 วิธีการปรับตัวแบบค่ากำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด	29
2.5 การประยุกต์ใช้วิธีการปรับตัวแบบค่ากำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด	31
2.5.1 ระบบการทำนายเชิงเส้น	31
2.5.2 ระบบการระบุเอกลักษณ์	31
2.5.3 ระบบการระบุเอกลักษณ์แบบผกผัน	32
2.5.4 ระบบการกำจัดสัญญาณรบกวน	33
บทที่ 3 การออกแบบวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง	34
3.1 วงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง	34
3.1.1 โครงสร้างของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง	35
3.1.2 สมการของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง	36
3.1.3 วิเคราะห์การตอบสนองของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง	37
3.1.4 วิเคราะห์ความไม่สมดุลของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง	39
3.2 การจำลองการทำงานของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง	41
3.2.1 การจำลองการตอบสนองของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง	41
3.2.2 การจำลองการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุอิเล็กโทรลิติก	43
3.3 การออกแบบการทดลอง	47
3.4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	50
3.4.1 ศึกษาผลกระทบของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองต่อระบบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์	50
3.4.2 ศึกษาประสิทธิภาพของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง	53
3.4.3 ศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง	55
3.5 สรุปผลการทดลอง	60
บทที่ 4 การออกแบบวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้	61
4.1 วิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้	61
4.1.1 การออกแบบวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้	61
4.1.2 การประยุกต์ใช้วิธีการกำลังสองเฉลี่ยต่ำสุด	64

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 การออกแบบการทดลอง	65
4.3 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	68
4.3.1 ประสิทธิภาพของวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้	68
4.3.2 การประยุกต์ใช้งานวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้	77
4.3.3 การตรวจสอบความถูกต้องของวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้	88
4.4 สรุปผลการทดลอง	100
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย ปัญหาและข้อเสนอแนะ	101
5.1 สรุปผลการวิจัย	101
5.2 ปัญหา	103
5.3 ข้อเสนอแนะ	103
บรรณานุกรม	104
ประวัติผู้เขียน	111

## รายการตาราง

		หน้า
ตารางที่ 1-1	สรุปวัตถุประสงค์ ข้อดีและข้อเสียของวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง	8
ตารางที่ 1-2	เปรียบเทียบวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง	11
ตารางที่ 1-3	แผนการดำเนินการวิจัย	16
ตารางที่ 3-1	ค่าพารามิเตอร์ของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ใช้ในการจำลองการทำงาน	42
ตารางที่ 3-2	ค่าพารามิเตอร์ของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ใช้ในการทดลอง	49
ตารางที่ 3-3	ค่า 3 $\sigma$ ของสัญญาณความผิดพลาดของตำแหน่งของแต่ละหัวอ่าน/เขียน	52
ตารางที่ 4-1	ค่าพารามิเตอร์ของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ใช้ในการทดลอง	68
ตารางที่ 4-2	ค่าพารามิเตอร์ของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองของแต่ละอุณหภูมิ	81
ตารางที่ 4-3	ค่า 3 $\sigma$ ของสัญญาณความผิดพลาดของตำแหน่งของแต่ละหัวอ่าน/เขียน	83
ตารางที่ 4-4	ค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณตรวจจับของแต่ละอุณหภูมิ	85
ตารางที่ 4-5	ค่าอัตราขยายปรับตัวได้ของแต่ละอุณหภูมิ	87
ตารางที่ 4-6	ค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณตรวจจับของแต่ละอุณหภูมิ	92
ตารางที่ 4-7	ค่า 3 $\sigma$ ของสัญญาณความผิดพลาดของตำแหน่งของแต่ละหัวอ่าน/เขียน	92
ตารางที่ 4-8	ค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณตรวจจับของแต่ละอุณหภูมิ	98
ตารางที่ 4-9	ค่าพารามิเตอร์ของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองของแต่ละอุณหภูมิ	99
ตารางที่ 4-10	ค่าอัตราขยายปรับตัวได้ของแต่ละอุณหภูมิ	99

## รายการภาพประกอบ

		หน้า
ภาพประกอบ 1-1	วิธีการตรวจจับการรบกวนที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์	4
ภาพประกอบ 1-2	ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	15
ภาพประกอบ 2-1	ส่วนประกอบภายในของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์	18
ภาพประกอบ 2-2	ระบบการควบคุมหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ [2]	19
ภาพประกอบ 2-3	ตัวขับเคลื่อนแบบสองขั้นตอน	19
ภาพประกอบ 2-4	แถบข้อมูลและจุดบอกตำแหน่งบนแผ่นดิสก์ [2]	20
ภาพประกอบ 2-5	คุณสมบัติของตัวเพียโซอิเล็กทริก [3]	21
ภาพประกอบ 2-6	วงจรมุมของตัวเพียโซอิเล็กทริก [57]	23
ภาพประกอบ 2-7	วงจรมุมของตัวเพียโซอิเล็กทริกทางด้านไฟฟ้า [16]	23
ภาพประกอบ 2-8	วงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบบริดจ์ [16]	25
ภาพประกอบ 2-9	วงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบขับเคลื่อนทางอ้อม [30]	27
ภาพประกอบ 2-10	โครงสร้างของวิธีการปรับตัวแบบค่ากำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด	29
ภาพประกอบ 2-11	โครงสร้างของระบบการทำนายเชิงเส้น	31
ภาพประกอบ 2-12	โครงสร้างของระบบการระบุเอกลักษณ์	32
ภาพประกอบ 2-13	โครงสร้างของระบบการระบุเอกลักษณ์แบบผกผัน	32
ภาพประกอบ 2-14	โครงสร้างของระบบการกำจัดสัญญาณรบกวน	33
ภาพประกอบ 3-1	วงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตัวตนเองที่ออกแบบ	35
ภาพประกอบ 3-2	การตอบสนองเชิงความถี่ระหว่างสัญญาณ $V_c$ และสัญญาณ $V_s$	38
ภาพประกอบ 3-3	การตอบสนองเชิงความถี่ของความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ $V_c$ และสัญญาณ $V_s$	43
ภาพประกอบ 3-4	การตอบสนองเชิงความถี่ของความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ $V_p$ และสัญญาณ $V_s$	43
ภาพประกอบ 3-5	การตอบสนองเชิงความถี่ของของความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ $V_c$ และสัญญาณ $V_s$ เมื่อค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกเปลี่ยนแปลง	44
ภาพประกอบ 3-6	การตอบสนองเชิงความถี่ของของความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ $V_p$ และสัญญาณ $V_s$ เมื่อค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกเปลี่ยนแปลง	45

### รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า	
ภาพประกอบ 3-7	ค่าอัตราขยายของการตอบสนองของวงจรถับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง	47
ภาพประกอบ 3-8	บล็อกไดอะแกรมของระบบที่ใช้ในการทดลอง	48
ภาพประกอบ 3-9	การทดลองที่บริษัทเวสเทิร์นดิจิตอล	49
ภาพประกอบ 3-10	การตอบสนองของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียน	51
ภาพประกอบ 3-11	สัญญาณความผิดพลาดของตำแหน่งของหัวอ่าน/เขียนในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์	52
ภาพประกอบ 3-12	การตอบสนองของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็ก	54
ภาพประกอบ 3-13	สัญญาณตรวจจับของวงจรถับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบ	54
ภาพประกอบ 3-14	ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่อุณหภูมิต่างๆ	56
ภาพประกอบ 3-15	การตอบสนองของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่อุณหภูมิต่างๆ	57
ภาพประกอบ 3-16	การตอบสนองของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่วัดด้วยวงจรถับเคลื่อนที่อุณหภูมิต่างๆ	59
ภาพประกอบ 3-17	สัญญาณตรวจจับของวงจรถับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบที่อุณหภูมิต่างๆ	59
ภาพประกอบ 3-18	ค่าอัตราขยายของวงจรถับเคลื่อนและค่ารากที่สองกำลังสองของสัญญาณตรวจจับของวงจรถับเคลื่อนที่อุณหภูมิต่างๆ	59
ภาพประกอบ 4-1	บล็อกไดอะแกรมของวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้	62
ภาพประกอบ 4-2	บล็อกไดอะแกรมของระบบที่ใช้ในการทดลอง	66
ภาพประกอบ 4-3	การทดลองที่บริษัทเวสเทิร์นดิจิตอล	67
ภาพประกอบ 4-4	บล็อกไดอะแกรมของวิธีการแบบปรับตัวได้ในโปรแกรม MATLAB Simulink	69
ภาพประกอบ 4-5	สัญญาณตรวจจับของวงจรถับเคลื่อนที่อุณหภูมิต่างๆ	70

### รายการภาพประกอบ (ต่อ)

		หน้า
ภาพประกอบ 4-6	ค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณตรวจจับของแต่ละอุณหภูมิ	71
ภาพประกอบ 4-7	ค่าอัตราขยายปรับตัวได้ของแต่ละอุณหภูมิ	71
ภาพประกอบ 4-8	ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยที่อัตราการปรับตัวต่างๆ ของแต่ละอุณหภูมิ	73
ภาพประกอบ 4-9	ค่าอัตราขยายปรับตัวได้ที่อุณหภูมิต่างๆ ของแต่ละอัตราการปรับตัว	75
ภาพประกอบ 4-10	ค่าเวลาที่ใช้ในการลู่เข้าและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าอัตราขยายปรับตัวได้ที่อุณหภูมิต่างๆ	76
ภาพประกอบ 4-11	บล็อกไดอะแกรมของวิธีการแบบปรับตัวได้ของตัวประมวลผล STM32	78
ภาพประกอบ 4-12	สัญญาณตรวจจับของวงจรที่อุณหภูมิต่างๆ	79
ภาพประกอบ 4-13	ค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณตรวจจับที่อุณหภูมิต่างๆ	80
ภาพประกอบ 4-14	ค่าอัตราขยายปรับตัวได้ที่อุณหภูมิต่างๆ	80
ภาพประกอบ 4-15	สัญญาณความผิดพลาดของตำแหน่งของหัวอ่าน/เขียนในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ	82
ภาพประกอบ 4-16	สัญญาณตรวจจับของวงจรที่อุณหภูมิต่างๆ กรณีมีการสั่นสะเทือนจากภายนอก	84
ภาพประกอบ 4-17	ค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณตรวจจับที่อุณหภูมิต่างๆ กรณีมีการสั่นสะเทือนจากภายนอก	86
ภาพประกอบ 4-18	ค่าอัตราขยายปรับตัวได้ที่อุณหภูมิต่างๆ กรณีมีการสั่นสะเทือนจากภายนอก	87
ภาพประกอบ 4-19	สัญญาณตรวจจับของวงจรที่อุณหภูมิต่างๆ กรณีมีสัญญาณควบคุม	89
ภาพประกอบ 4-20	สัญญาณตรวจจับของวงจรที่อุณหภูมิต่างๆ กรณีไม่มีสัญญาณควบคุม	90
ภาพประกอบ 4-21	ค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณตรวจจับที่อุณหภูมิต่างๆ	91
ภาพประกอบ 4-22	สัญญาณความผิดพลาดของตำแหน่งของหัวอ่าน/เขียนในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ	93

**รายการภาพประกอบ (ต่อ)**

	<b>หน้า</b>
ภาพประกอบ 4-23 สัญญาณตรวจจับของวงจรที่อุณหภูมิต่างๆ กรณีมีสัญญาณควบคุม และมีการสั้นสะเทือนจากภายนอก	95
ภาพประกอบ 4-24 สัญญาณตรวจจับของวงจรที่อุณหภูมิต่างๆ กรณีไม่มีสัญญาณ ควบคุมและมีการสั้นสะเทือนจากภายนอก	96
ภาพประกอบ 4-25 ค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณตรวจจับที่อุณหภูมิต่างๆ กรณีมีการสั้นสะเทือนจากภายนอก	97
ภาพประกอบ 4-26 ค่าอัตราขยายปรับตัวได้ที่อุณหภูมิต่างๆ	99



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

เทคโนโลยีทางด้านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard Disk Drive: HDD) ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านความจุที่ใช้ในการเก็บข้อมูล ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ส่งผลให้ความสามารถในการอ่านหรือเขียนข้อมูลบนแผ่นดิสก์ต้องการประสิทธิภาพที่สูงขึ้นด้วย การเพิ่มความจุในการเก็บข้อมูลสามารถทำได้โดยการเพิ่มความหนาแน่นของข้อมูลต่อพื้นที่ (Track Per Inch: TPI) บนแผ่นดิสก์ให้มากขึ้น แต่ในขณะเดียวกันต้องการให้ขนาดของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีขนาดเท่าเดิมหรือเล็กลง ดังนั้นจึงทำให้ความกว้างของแถบข้อมูล (Track Width) ต้องมีขนาดเล็กลงด้วย และจะส่งผลให้การควบคุมตำแหน่งของหัวอ่าน/เขียน (RW Head Position) ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในระหว่างการอ่านหรือเขียนข้อมูลบนแผ่นดิสก์ต้องการความแม่นยำมากขึ้น การอ่านหรือเขียนข้อมูลบนแผ่นดิสก์เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวขับเคลื่อน (Actuator) ในการขับเคลื่อนให้หัวอ่าน/เขียนเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งต่างๆ ที่ต้องการอ่านหรือเขียนข้อมูลบนแผ่นดิสก์ ซึ่งประกอบด้วยตัวขับเคลื่อนสองตัว (Dual-Stage Actuator: DSA) ตัวแรกเป็นมอเตอร์ขดลวดเสียง (Voice Coil Motor: VCM) เป็นตัวขับเคลื่อนหลักใช้ในการควบคุมหัวอ่าน/เขียนให้เคลื่อนที่จากแถบข้อมูล (Data Track) หนึ่งไปยังอีกแถบข้อมูลหนึ่งบนแผ่นดิสก์ ตัวที่สองเป็นตัวขับเคลื่อนขนาดเล็ก (Micro-actuator) ทำมาจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) ใช้ในการควบคุมหัวอ่าน/เขียนให้เคลื่อนที่ไปตามแถบข้อมูลในระหว่างการอ่านหรือเขียนข้อมูลได้อย่างละเอียดและแม่นยำมากขึ้น สำหรับการควบคุมตัวขับเคลื่อนทั้งสองตัวเรียกว่าการควบคุมแบบสองขั้นตอน (Dual-Stage Control) เป็นการควบคุมตัวขับเคลื่อนทั้งสองให้ทำงานสอดคล้องกัน โดยวิธีการควบคุมได้มีการออกแบบให้เหมาะสมกับการควบคุมตำแหน่งของหัวอ่าน/เขียนบนแผ่นดิสก์ที่ความกว้างของแถบข้อมูลมีขนาดเล็กมาก [1] [2] เพื่อให้มีความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น

การรบกวน (Disturbance) ต่างๆ ที่ส่งผลต่อการควบคุมตำแหน่งของหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ทำให้ประสิทธิภาพในการอ่านหรือเขียนข้อมูลบนแผ่นดิสก์ลดลง เนื่องจากความกว้างของแถบข้อมูลที่มีขนาดเล็กมาก เมื่อมีการรบกวนเกิดขึ้นในระบบทำให้เกิดความผิดพลาดของตำแหน่ง (Position Error Signal: PES) หัวอ่าน/เขียนมากเกินกว่าที่กำหนด ซึ่งค่า  $3\sigma$  ของความผิดพลาดของตำแหน่งที่ยอมรับได้ต้องไม่เกิน 10 % ของความกว้างแถบข้อมูล และทำให้การอ่านหรือเขียนข้อมูลบนแผ่นดิสก์มีความผิดพลาดหรือไม่สามารถอ่านหรือเขียนข้อมูล การรบกวนที่เกิดขึ้นในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เกิดจากปัจจัยต่างๆ เช่น การหมุนของมอเตอร์สปินเดิล (Spindle Motor) การสั่น

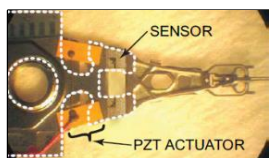
พ้องทางกล (Mechanical Resonance) การไหลของอากาศ (Airflow-Induced) บนแผ่นดิสก์ [4] ระยะบินต่ำ (Low Fly-Height) ของหัวอ่าน/เขียน [5] การสัมผัสระหว่างหัวอ่าน/เขียนกับแผ่นดิสก์ (Contact-Induced) [6] และการรบกวนจากภายนอก (External Disturbance) เป็นต้น จากการรบกวนดังกล่าวทำให้มีการทำวิจัยเพื่อแก้ปัญหา โดยมีการนำเสนอวิธีการชดเชยการรบกวนด้วยวิธีต่างๆ [7]-[10] เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการอ่านหรือเขียนข้อมูลบนแผ่นดิสก์ และเพิ่มความแม่นยำให้แก่ตำแหน่งของหัวอ่าน/เขียนในระหว่างการอ่านหรือเขียนข้อมูลบนแถบข้อมูล

การควบคุมตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนให้เคลื่อนที่บนแผ่นดิสก์ยังมีข้อจำกัดหลายๆ อย่างที่จะทำให้เกิดความผิดพลาดของตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนได้ เช่น ช่วงแถบความถี่ (Bandwidth) ของระบบ ความถี่ในการซัดตัวอย่าง (Sampling Frequency) เป็นต้น สำหรับช่วงแถบความถี่ ระบบควบคุมตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนต้องการช่วงแถบความถี่ที่กว้างขึ้น เนื่องจากตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็ก (PZT micro-actuator) มีการตอบสนองที่ความถี่สูง (10-40 kHz) [21] ส่วนความถี่ในการซัดตัวอย่างของระบบควบคุมตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนถูกจำกัดด้วยจำนวนของจุดบอกตำแหน่ง (Servo Sector) ในแถบข้อมูลบนแผ่นดิสก์ และความเร็วในการหมุนของแผ่นดิสก์ เนื่องจากค่าความผิดพลาดของตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนที่ป้อนกลับไปยังระบบควบคุมถูกอ่านจากจุดบอกตำแหน่งด้วยหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ แต่ในระบบควบคุมตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนมีตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่มีการตอบสนองต่อความถี่สูง เมื่อเกิดการรบกวนที่ความถี่สูงทำให้ระบบควบคุมไม่สามารถรับรู้การรบกวนที่เกิดขึ้นได้ และถ้าการรบกวนมีความถี่ตรงกับความถี่สั่นพ้อง (Resonance Frequency) ของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กจะส่งผลให้ตำแหน่งของหัวอ่าน/เขียนเกิดความผิดพลาดมากขึ้นที่ความถี่นั้น จึงทำให้ระบบควบคุมต้องการความถี่ในการซัดตัวอย่างที่สูงพอสำหรับตรวจจับการรบกวนที่ความถี่สูงได้ ดังนั้นจึงมีการทำวิจัยและพัฒนาเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวโดยการเพิ่มตัวตรวจจับ (Sensor) เข้าไปที่ตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็ก [11]-[13] โดยการติดตั้งตัวตรวจจับชนิดฟิล์มบาง เข้าไปบริเวณตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กดังแสดงในภาพประกอบ 1-1 (ก) เพื่อใช้ในการตรวจจับการรบกวนที่เกิดขึ้นที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับสามารถป้อนกลับไปยังระบบควบคุมได้โดยตรงและไม่มีข้อจำกัดของความถี่ในการซัดตัวอย่าง จึงทำให้สามารถตรวจจับการรบกวนที่ความถี่สูงได้ แต่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการเพิ่มตัวตรวจจับและขั้นตอนการติดตั้งตัวตรวจจับเข้าไปที่บริเวณตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กของหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เนื่องจากมีขนาดเล็ก

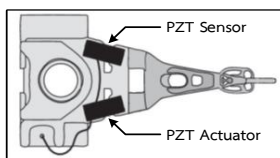
ตัวขับเคลื่อนขนาดเล็กเป็นตัวขับเคลื่อนที่ทำจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ซึ่งมีคุณสมบัติที่สามารถทำหน้าที่เป็นได้ทั้งตัวขับเคลื่อน (ใช้งานในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์รุ่นปัจจุบัน) และตัวตรวจจับ จากคุณสมบัติดังกล่าวจึงได้มีงานวิจัย [14] [15] ที่นำตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กในฮาร์ดดิสก์

ไทรฟ์มาทำหน้าที่เป็นตัวขับเคลื่อนและตัวตรวจจับ เนื่องจากตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่ใช้ในฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์ประกอบด้วยตัวเพียโซอิเล็กทริกสองตัว โดยให้ตัวเพียโซอิเล็กทริกข้างหนึ่งทำหน้าที่เป็นตัวขับเคลื่อนและอีกตัวหนึ่งเป็นตัวตรวจจับดังแสดงในภาพประกอบ 1-1 (ข) ซึ่งจะลดค่าใช้จ่ายในการเพิ่มตัวตรวจจับเข้าไปและไม่ต้องติดตั้งตัวตรวจจับเพิ่มเข้าไป แต่การใช้ตัวเพียโซอิเล็กทริกตัวหนึ่งเป็นตัวตรวจจับจะส่งผลให้การเคลื่อนที่ของหัวอ่าน/เขียนมีประสิทธิภาพลดลง จึงได้มีงานวิจัย [16] นำเสนอวิธีการที่เรียกว่า การขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง (Self-Sensing Actuation: SSA) เป็นวิธีการที่ใช้ตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกมาทำหน้าที่เป็นทั้งตัวขับเคลื่อนและตัวตรวจจับในตัวเดียวกันและใช้ในเวลาเดียวกันดังแสดงในภาพประกอบ 1-1 (ค) โดยใช้หลักการทำงานของวงจรบริดจ์สมดุล (Bridge Balance Circuit) ในการแยกสัญญาณที่ได้จากการตรวจจับออกจากสัญญาณควบคุม และใช้สัญญาณที่ได้จากการตรวจจับป้อนกลับไปยังระบบควบคุมเพื่อควบคุมการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในระบบ จากงานวิจัย [20]-[24] ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้วิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองสำหรับการควบคุมการรบกวนที่เกิดจากการสั่นสะเทือนที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์ วิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองโดยใช้หลักการของวงจรบริดจ์สมดุลยังมีข้อจำกัดเกี่ยวกับค่าพารามิเตอร์ (ตัวเก็บประจุและตัวต้านทาน) ที่ใช้ในวงจรบริดจ์เนื่องจากตัวเพียโซอิเล็กทริก มีวงจรสมมูลเป็นตัวเก็บประจุ ทำให้มีพารามิเตอร์ตัวหนึ่งในวงจรบริดจ์ที่เป็นค่าความจุไฟฟ้าสมมูลของตัวเพียโซอิเล็กทริกซึ่งต้องมีค่าใกล้เคียงกับค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกจึงจะทำให้วงจรบริดจ์สมดุล แต่ในทางปฏิบัติค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกมีการเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิที่ใช้งาน [25] [58] [59] ค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปอาจทำให้วงจรบริดจ์เกิดความไม่สมดุลและไม่สามารถแยกสัญญาณที่ได้จากการตรวจจับออกจากสัญญาณควบคุมได้ ข้อจำกัดอีกอย่างหนึ่งของวงจรบริดจ์ คือ สัญญาณควบคุมของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกจะถูกลดทอนไปตามสัดส่วนของค่าพารามิเตอร์ในวงจรบริดจ์ จากข้อจำกัดดังกล่าวของการใช้วงจรบริดจ์ในวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองทำให้ยังมีประเด็นวิจัยเกี่ยวกับวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง และจะต้องมีการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่วิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง

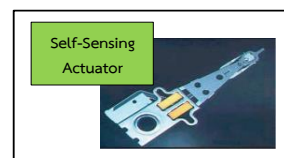
จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะนำเสนอและพัฒนาวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองสำหรับการควบคุมการรบกวนที่เกิดขึ้นที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์ โดยการออกแบบวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองให้เหมาะสมกับการใช้งานร่วมกับการควบคุมการรบกวนของฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์ในปัจจุบัน ไม่ส่งผลกระทบต่อระบบการควบคุมเดิมที่ใช้อยู่ และสามารถใช้งานได้ตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการอ่านและเขียนข้อมูลบนแผ่นดิสก์ ลดค่าความผิดพลาดของตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์ ลดค่าใช้จ่ายในการเพิ่มตัวตรวจจับเข้าไป และสามารถนำไปใช้งานได้จริงในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์ในปัจจุบัน



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพประกอบ 1-1 วิธีการตรวจจับการรบกวนที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการทำงานของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ และการประยุกต์ใช้ตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กเป็นทั้งตัวขับเคลื่อนและตัวตรวจจับในตัวเดียวกัน

1.2.2 เพื่อออกแบบและพัฒนาวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้กับตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

1.2.3 เพื่อออกแบบและพัฒนาวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้ สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้กับตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เมื่ออุณหภูมิที่ใช้งานเปลี่ยนแปลงไป

1.2.4 เพื่อวิเคราะห์ และประเมินประสิทธิภาพของวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง เมื่อนำไปประยุกต์ใช้กับระบบควบคุมหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

## 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.3.1 ได้วิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่สามารถเพิ่มเข้าไปในระบบควบคุมตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อระบบควบคุมเดิม สามารถตรวจจับการรบกวนที่เกิดขึ้นที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จากการสั่นสะเทือนจากภายนอก และสามารถป้อนกลับสัญญาณที่ตรวจจับได้เข้าไปในระบบควบคุมเพื่อควบคุมตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนให้มีความแม่นยำมากขึ้น

1.3.2 ได้วิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้สำหรับระบบควบคุมหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เมื่อสภาพแวดล้อมที่ใช้งานเปลี่ยนแปลงไป โดยไม่ส่งผลต่อวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองและไม่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบ

1.3.3 ลดค่าใช้จ่ายสำหรับการเพิ่มตัวตรวจจับเข้าไปในระบบควบคุมตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

#### 1.4 การทบทวนวรรณกรรมบทความ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การทบทวนวรรณกรรมบทความ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จะมุ่งเน้นไปที่วิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้กับวัสดุเพียโซอิเล็กทริก พบว่ามีการนำเสนอวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานต่างๆ เช่น การควบคุมการสั่นสะเทือนที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ การควบคุมการสั่นสะเทือนของคานอลูมิเนียม (Aluminum beam) การควบคุมตำแหน่งของคานเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Cantilever) การประมาณมวล (Mass) บนคานอลูมิเนียมและคานเพียโซอิเล็กทริก เป็นต้น ซึ่งได้มีการออกแบบวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งาน และแก้ปัญหาต่างๆ ของวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง เช่น ปัญหาการถูกลดทอนของสัญญาณควบคุมที่อ่อนไปยังตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริก และปัญหาการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริก เนื่องจากสภาพแวดล้อมที่ใช้งาน เป็นต้น ดังนั้นจากการทบทวนวรรณกรรมงานวิจัยทั้งหมดสามารถจำแนกวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองได้ 7 วิธีการ คือ การขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองโดยใช้วงจรบริดจ์ (BCSSA) การขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองโดยใช้การขับเคลื่อนทางอ้อม (IDSSA) การขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองโดยใช้การวัดประจุไฟฟ้า (CMSSA) การขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองโดยใช้วิธีการปรับตัวได้ (ASSA) การขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองโดยใช้วิธีการแบ่งเวลา (TSSSA) การขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองโดยใช้การวัดค่าความจุไฟฟ้า (OCSSA) การขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองโดยใช้การวัดค่าสภาพยอม (PDSSA) และจากวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองทั้งหมดสามารถสรุปเป็นประเด็นต่างๆ ได้ดังนี้ คือ วัตถุประสงค์ในการนำเสนอ ข้อดีและข้อเสีย การนำไปประยุกต์ใช้งาน และการควบคุมระบบของแต่ละวิธีการ ซึ่งสรุปเป็นตารางได้ดังตารางที่ 1-1 และตารางที่ 1-2

ตารางที่ 1-1 แสดงบทสรุปวัตถุประสงค์ ข้อดีและข้อเสียของแต่ละวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองจากการทบทวนวรรณกรรมข้างต้น ซึ่งวัตถุประสงค์ของแต่ละวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองจะเป็นการบ่งบอกถึงการนำไปประยุกต์ใช้งานและใช้แก้ปัญหาต่างๆ ของแต่ละวิธีการ เช่น เพื่อแก้ปัญหาการถูกลดทอนของสัญญาณควบคุม เพื่อแก้ปัญหาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริก เพื่อใช้ในการตรวจจับและควบคุมการสั่นสะเทือนในระบบ หรือเพื่อประมาณระยะหรือตำแหน่งการเคลื่อนที่ของตัวเพียโซอิเล็กทริก เป็นต้น ส่วนข้อดีและข้อเสียของแต่ละวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองจะเป็นการบ่งบอกถึงปัญหา จุดอ่อน จุดแข็งหรือข้อจำกัดของแต่ละวิธีการ เช่น การถูกลดทอนของสัญญาณควบคุม ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริก ความซับซ้อน

เป็นต้น จากข้อมูลในตารางนี้ทำให้สามารถวิเคราะห์ความเหมาะสมหรือไม่เหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ตารางที่ 1-2 แสดงการเปรียบเทียบแต่ละวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง ซึ่งประกอบด้วย การพิจารณาการลดทอนของสัญญาณควบคุม พิจารณาผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริก พิจารณาสัญญาณเอาต์พุตของวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง และพิจารณาความต้องการของวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง ซึ่งการลดทอนของสัญญาณควบคุม จะบ่งบอกถึงการส่งผลกระทบต่อสัญญาณควบคุมของแต่ละวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง ซึ่งการนำวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองไปประยุกต์ใช้งานในระบบควบคุมหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะต้องไม่ส่งผลกระทบต่อสัญญาณควบคุม ส่วนผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริก จะบ่งบอกถึงความผิดพลาดในการตรวจจับของแต่ละวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง ซึ่งการนำวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองไปประยุกต์ใช้งานในระบบควบคุมหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะต้องชดเชยค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกที่เปลี่ยนแปลงไปได้ เพื่อลดความผิดพลาดในการตรวจจับและไม่ส่งผลกระทบต่อระบบควบคุมหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ส่วนสัญญาณเอาต์พุตของวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง จะบ่งบอกถึงสัญญาณที่ใช้ในการป้อนกลับเข้าไปในระบบสำหรับการควบคุมการสั่นสะเทือนของระบบหรือใช้ในการประมาณมวลสำหรับการประยุกต์ใช้ในการตรวจจับมวล ซึ่งการนำวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองไปประยุกต์ใช้งานในระบบควบคุมหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ สัญญาณเอาต์พุตของวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ระบบต้องการ คือ สัญญาณแรงดันของการสั่นสะเทือนที่หัวอ่าน/เขียน และในส่วนความต้องการของวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง บ่งบอกถึงวงจรหรือสัญญาณต่างๆ ที่จำเป็นของวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองสำหรับการสร้างสัญญาณเอาต์พุตให้ได้ตามต้องการ และจะบ่งบอกถึงความซับซ้อนของแต่ละวิธีการด้วย ซึ่งการนำวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองไปประยุกต์ใช้งานในระบบควบคุมหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จำเป็นต้องให้วิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองมีความซับซ้อนน้อยสุดและใช้สัญญาณหรือวงจรให้น้อยที่สุดเพื่อให้ได้สัญญาณเอาต์พุตตามที่ต้องการ

จากตารางที่ 1-1 และตารางที่ 1-2 สามารถสรุปเป็นประเด็นวิจัย ความเป็นไปได้ และความเหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจจับการรบกวนจากการสั่นสะเทือนจากภายนอกสำหรับการควบคุมตำแหน่งของหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ได้ 3 ประเด็น คือ ประเด็นการลดทอนของสัญญาณควบคุม ซึ่งจะเห็นได้ว่าวิธีการ BCSSA TSSSA และ ASSA เป็นวิธีการที่สัญญาณควบคุมจะถูกลดทอนไปตามพารามิเตอร์ของแต่ละวิธีการ (วิธี ASSA สัญญาณควบคุมจะถูก

ลดทอนในกรณีที่ใช้ร่วมกับวงจรบริดจ์) ซึ่งจะไม่เหมาะกับการนำไปใช้งานในการควบคุมตำแหน่งของหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ประเด็นการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริก วิธีการ BCSSA IDSSA และ CMSSA เป็นวิธีการที่การเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกส่งผลต่อสัญญาณการตรวจจับที่วัดมาได้จากวงจรของแต่ละวิธีการ ประเด็นความซับซ้อน วิธีการ OCSSA และ PDSSA เป็นวิธีการที่จะต้องวัดสัญญาณแรงดัน ประจุไฟฟ้าและสัญญาณกระแสจากตัวเพียโซอิเล็กทริกสำหรับการประมาณค่าความจุไฟฟ้าและการประมาณระยะเวลาการเคลื่อนที่ และต้องใช้เครื่องมือวัดที่มีคุณภาพสูง ซึ่งเป็นวิธีการที่ไม่เหมาะกับการนำไปใช้งานในการควบคุมตำแหน่งของหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ จากเหตุผลทั้งหมดที่ได้กล่าวมาข้างต้นจึงสามารถสรุปเป็นประเด็นวิจัยได้ว่าวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองไปประยุกต์ใช้งานในระบบควบคุมหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ จำเป็นต้องออกแบบวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองโดยไม่ส่งผลกระทบต่อสัญญาณควบคุม ไม่มีผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกตามอุณหภูมิที่ใช้งาน และไม่มีค่าความซับซ้อนมากเกินไปจนทำให้ไม่สามารถนำไปใช้งานจริงได้

ดังนั้นวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่น่าเสนอในงานวิจัยนี้ เป็นวิธีการที่ไม่ส่งผลกระทบต่อสัญญาณควบคุม ไม่มีผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกตามอุณหภูมิที่ใช้งาน ซึ่งวิธีการที่น่าเสนอประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง ซึ่งทำหน้าที่ตรวจจับสัญญาณที่สร้างมาจากตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกในขณะที่ขับเคลื่อนให้ตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกทำงาน โดยที่สัญญาณควบคุมไม่ถูกลดทอนและวงจรไม่มีความซับซ้อนมากสามารถประยุกต์ใช้งานกับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์รุ่นต่างๆ ได้ ส่วนที่สองเป็นวิธีการแบบปรับตัวได้ ทำหน้าที่ชดเชยความผิดพลาดของสัญญาณตรวจจับที่ได้จากวงจรที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ใช้งาน โดยวิธีการแบบปรับตัวได้จะประมาณสัญญาณความผิดพลาดแล้วไปหักล้างกับสัญญาณตรวจจับที่ได้จากวงจรจนทำให้สัญญาณตรวจจับมีความถูกต้อง

ตารางที่ 1-1 สรุปวัตถุประสงค์ ข้อดีและข้อเสียของวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง

วิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง	วัตถุประสงค์	ข้อดี	ข้อเสีย
BCSSA [16]-[25]	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เพื่อแยกสัญญาณตรวจจับออกจากสัญญาณควบคุม</li> <li>- เพื่อควบคุมและลดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในระบบ</li> <li>- เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการเพิ่มตัวตรวจจับจากภายนอกเข้าไปในระบบ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- วงจรบริดจ์เป็นวงจรที่ง่ายต่อการออกแบบ</li> <li>- วงจรบริดจ์ใช้อุปกรณ์พื้นฐาน (ตัวเก็บประจุและตัวต้านทาน) ในการออกแบบ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- วงจรบริดจ์ยากต่อการทำให้วงจรเกิดความสมดุลเนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่ใช้ทำงาน</li> <li>- วงจรบริดจ์สัญญาณควบคุมที่ป้อนไปยังตัวเพียโซอิเล็กทริกจะถูกลดทอน</li> </ul>
IDSSA [26]-[31]	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เพื่อแก้ปัญหาการถูกลดทอนของสัญญาณควบคุมที่ป้อนไปยังตัวเพียโซอิเล็กทริก</li> <li>- เพื่อควบคุมและลดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์</li> <li>- เพื่อเพิ่มช่วงแถบความถี่ในการตรวจจับเพื่อให้สามารถตรวจจับสัญญาณที่มีความถี่สูงได้</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- สัญญาณควบคุมที่ป้อนไปยังตัวเพียโซอิเล็กทริกจะไม่ถูกลดทอนเนื่องจากการออกแบบวงจรใหม่โดยพัฒนาจากวงจรบริดจ์</li> <li>- เป็นวิธีการที่สัญญาณการตรวจจับมีการรบกวนจากสัญญาณรบกวนน้อย</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- วงจรมีความซับซ้อนเพิ่มขึ้นเนื่องจากการออกแบบวงจรใหม่โดยการเพิ่มตัวออปแอมป์เข้าไปในวงจร</li> <li>- วงจรมีความยากต่อการทำให้วงจรเกิดความสมดุลเนื่องจากการใช้หลักการเดียวกับวงจรบริดจ์และค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่ใช้ทำงาน</li> </ul>
CMSSA [32]-[36]	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เพื่อประมาณระยะเวลาการเคลื่อนที่ของคานตัวเพียโซอิเล็กทริกจากประจุไฟฟ้าที่วัดได้เนื่องจากระยะการยืด-หดของตัวเพียโซอิเล็กทริกมีความสัมพันธ์โดยตรงกับประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ตัวเพียโซอิเล็กทริก [32]-[35]</li> <li>- เพื่อควบคุมและลดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในระบบโดยการป้อนประจุไฟฟ้าที่วัดได้กลับเข้าไปในระบบ [36]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- สัญญาณควบคุมที่ป้อนไปยังตัวเพียโซอิเล็กทริกจะไม่ถูกลดทอน</li> <li>- ประจุไฟฟ้าที่วัดได้จากตัวเพียโซอิเล็กทริกมีความสัมพันธ์โดยตรงกับระยะเวลาการเคลื่อนที่ของตัวเพียโซอิเล็กทริก</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- วงจรมีความซับซ้อนเมื่อเทียบกับวงจรบริดจ์</li> <li>- การเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกมีผลต่อประจุไฟฟ้าที่วัดได้จากตัวเพียโซอิเล็กทริก</li> <li>- แบบจำลองที่ใช้ในการประมาณระยะเวลาการเคลื่อนที่ของตัวเพียโซอิเล็กทริกจากประจุไฟฟ้าที่วัดได้จะต้องมีความถูกต้องและแม่นยำ</li> </ul>



วิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง	วัตถุประสงค์	ข้อดี	ข้อเสีย
<p style="text-align: center;">ASSA [37]-[45]</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เพื่อแก้ปัญหาค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกตามอุณหภูมิที่ใช้ในงาน</li> <li>- เพื่อควบคุมและลดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในระบบคานอลูมิเนียม [37]-[40]</li> <li>- เพื่อประมาณมวลบนคานเพียโซอิเล็กทริก [41] [42]</li> <li>- เพื่อควบคุมและลดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในระบบควบคุมหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ [43]-[45]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- การเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกตามอุณหภูมิที่ใช้งานไม่มีผลต่อสัญญาณการตรวจจับ</li> <li>- ถ้าใช้งานร่วมกับวงจรบริดจ์จะง่ายต่อการทำให้วงจรเกิดความสมดุล</li> <li>- ถ้าใช้งานร่วมกับวงจรขยายประจุไฟฟ้าสัญญาณควบคุมที่ป้อนไปยังตัวเพียโซอิเล็กทริกจะไม่ถูกลดทอน</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- การออกแบบวิธีการปรับตัวได้ในการปรับค่าความจุไฟฟ้าให้ใกล้เคียงกับค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกจะต้องใช้ความรู้เรื่องการประมวลผลสัญญาณเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย</li> <li>- การใช้วิธีการการปรับตัวได้จะต้องคำนึงถึงอัตราการใช้ของสารปรับตัว</li> <li>- ถ้าใช้งานร่วมกับวงจรบริดจ์สัญญาณควบคุมที่ป้อนไปยังตัวเพียโซอิเล็กทริกจะถูกลดทอน</li> </ul>
<p style="text-align: center;">TSSSA [46]-[49]</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เพื่อแก้ปัญหาค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกตามอุณหภูมิที่ใช้งานโดยใช้การแบ่งช่วงเวลาให้ตัวเพียโซอิเล็กทริกในการทำหน้าที่เป็นตัวขับเคลื่อนสลับกับการทำหน้าที่เป็นตัวตรวจจับ</li> <li>- เพื่อควบคุมและลดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในระบบคานอลูมิเนียม [46]-[48]</li> <li>- เพื่อประมาณมวลบนคานเพียโซอิเล็กทริก [49]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- การเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกตามอุณหภูมิที่ใช้งานไม่มีผลต่อสัญญาณการตรวจจับเนื่องจากวัดสัญญาณการตรวจจับโดยตรงจากตัวเพียโซอิเล็กทริก</li> <li>- สามารถวัดสัญญาณการตรวจจับได้โดยตรงจากตัวเพียโซอิเล็กทริกในช่วงเวลาที่ทำหน้าที่เป็นตัวตรวจจับ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- การแบ่งช่วงเวลาในการทำหน้าที่เป็นตัวขับเคลื่อนสลับกับการทำหน้าที่เป็นตัวตรวจจับของตัวเพียโซอิเล็กทริกจะต้องใช้สวิตช์ที่มีคุณภาพสูงและสามารถทำงานได้ที่ความถี่สูงกว่าความถี่ตอบสนองของระบบ</li> <li>- วิธีการเหมาะสมกับระบบที่มีการตอบสนองที่ความถี่ต่ำ</li> <li>- สัญญาณควบคุมที่ป้อนไปยังตัวเพียโซอิเล็กทริกจะถูกลดทอนตามสัดส่วนของช่วงเวลาในการทำหน้าที่เป็นตัวขับเคลื่อนสลับกับการทำหน้าที่เป็นตัวตรวจจับ</li> </ul>

วิธีการขับเคลื่อนและตรวจจ็ับ ด้วยตนเอง	วัตถุประสงค์	ข้อดี	ข้อเสีย
<p style="text-align: center;">OCSSA [50]-[52]</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เพื่อแก้ปัญหการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกตามอุณหภูมิที่ใช้ในงานโดยการวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกโดยตรงจากสัญญาณแรงดันและประจุที่ตัวเพียโซอิเล็กทริก</li> <li>- เพื่อควบคุมระยะตำแหน่งของระบบเพื่อให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการ [50] [51]</li> <li>- เพื่อควบคุมและลดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในระบบคานอลูมิเนียม [52]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- การเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกตามอุณหภูมิที่ใช้งานไม่มีผลต่อสัญญาณการตรวจจ็ับเนื่องจากการวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกโดยตรงแล้วประมาณเป็นสัญญาณการตรวจจ็ับ</li> <li>- สัญญาณควบคุมที่ป้อนไปยังตัวเพียโซอิเล็กทริกจะไม่ถูกลดทอนเนื่องสัญญาณควบคุมถูกป้อนไปยังตัวเพียโซอิเล็กทริกได้โดยตรง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- การวัดสัญญาณแรงดันและประจุที่ตัวเพียโซอิเล็กทริกจะต้องมีการเพิ่มวงจรที่ใช้ในการวัดเข้าไปในระบบและยากต่อการวัดสัญญาณกระแสที่ตัวเพียโซอิเล็กทริก</li> <li>- แบบจำลองที่ใช้ในการประมาณตำแหน่งและค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกจากสัญญาณแรงดันและประจุจะต้องมีความถูกต้องและแม่นยำ</li> </ul>
<p style="text-align: center;">PDSSA [53]-[56]</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เพื่อประมาณระยะการเคลื่อนที่ของคานตัวเพียโซอิเล็กทริกจากการเปลี่ยนแปลงของค่าสภาพยอมโดยการวัดสัญญาณกระแสที่ตัวเพียโซอิเล็กทริกแล้วแปลงเป็นค่าสภาพยอมเนื่องจากค่าสภาพยอมมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับระยะการเคลื่อนที่ของตัวเพียโซอิเล็กทริก</li> <li>- เพื่อควบคุมระยะตำแหน่งของระบบเพื่อให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- การเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกตามอุณหภูมิที่ใช้งานไม่มีผลต่อประมาณระยะการเคลื่อนที่ของตัวเพียโซอิเล็กทริก</li> <li>- สัญญาณควบคุมที่ป้อนไปยังตัวเพียโซอิเล็กทริกจะไม่ถูกลดทอนเนื่องสัญญาณควบคุมถูกป้อนไปยังตัวเพียโซอิเล็กทริกได้โดยตรง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- การแปลงสัญญาณกระแสที่วัดได้จากตัวเพียโซอิเล็กทริกเป็นค่าสภาพยอมจะต้องใช้เครื่องมือวัดที่มีคุณภาพในการตรวจจ็ับขนาดของสัญญาณกระแสที่มีซึ่งความสัมพันธ์กับค่าสภาพยอม</li> <li>- การประมาณระยะการเคลื่อนที่ของคานตัวเพียโซอิเล็กทริกจะต้องรู้ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของค่าสภาพยอมกับระยะการเคลื่อนที่ของคานตัวเพียโซอิเล็กทริก</li> </ul>

ตารางที่ 1-2 เปรียบเทียบวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง

วิธีการขับเคลื่อน และตรวจจับด้วย ตนเอง	บทความ	การไม่ลดทอน ของสัญญาณ ควบคุม	ไม่มีผลกระทบจาก การเปลี่ยนแปลง ค่าความจุไฟฟ้าของ ตัวเพียโซอิเล็กทริก	สัญญาณเอาต์พุตของวิธีการ SSA					ความต้องการของวิธีการ SSA					
				ระยะการจัด	แรงดัน	ประจุไฟฟ้า	ค่าความจุไฟฟ้า	ค่าสภาพยอม	วงจรบริดจ์	วงจร IDSSA	การวัดแรงดัน	การวัดประจุไฟฟ้า	การวัดกระแส	อุปกรณ์คุณภาพสูง
BCSSA	[16], [18]-[22]				✓				✓		✓			
	[17], [23]-[25]			✓					✓		✓			
IDSSA	[26]- [31]	✓		✓						✓	✓			
CMSSA	[32]-[35]	✓		✓							✓	✓		
	[36]	✓				✓					✓	✓		
ASSA	[37]	✓	✓		✓						✓			
	[38]-[45]		✓		✓				✓		✓			
TSSSA	[46]-[49]		✓		✓						✓			✓
OCSSA	[50] [51]	✓	✓	✓			✓				✓		✓	
	[52]	✓	✓				✓				✓	✓		
PDSSA	[53]-[56]	✓	✓	✓				✓			✓		✓	✓

## 1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1.5.1 ศึกษาวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้กับตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

1.5.2 ออกแบบวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง สำหรับตรวจจับการรบกวนที่เกิดจากการสั่นสะเทือนจากภายนอกที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ และควบคุมตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนเมื่อมีการรบกวนเกิดขึ้นที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

1.5.3 ออกแบบวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง สำหรับการแก้ปัญหาการถูกลดทอนของสัญญาณควบคุมที่ป้อนไปยังตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริก และสามารถนำไปใช้งานกับตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้

1.5.4 ออกแบบวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้ สำหรับแก้ปัญหาการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกที่มีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่ใช้งาน และสามารถนำไปใช้งานกับตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้

1.5.5 การออกแบบและพัฒนาวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองจะทดลองกับระบบที่จำลองขึ้นเอง และระบบควบคุมตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ใช้งานอยู่ในอุตสาหกรรม

1.5.6 ระบบควบคุมตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ใช้ระบบควบคุมหลักที่ใช้งานอยู่ในอุตสาหกรรม และสามารถเพิ่มวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบเข้าไปใช้งานกับระบบควบคุมเดิมได้ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อระบบควบคุมหลักที่ใช้งานอยู่ในอุตสาหกรรม

1.5.7 การรบกวนเกิดขึ้นที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะจำลองการรบกวนที่เกิดจากการสั่นสะเทือนภายนอก

1.5.8 การทดสอบกับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในอุตสาหกรรมจริง จะทำการทดสอบกับรุ่นของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความเร็วรอบ 5400 รอบต่อนาที (rpm) ขนาด 3.5 นิ้ว

1.5.9 ศึกษา ออกแบบ พัฒนา และจำลองการทำงานของวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองด้วยคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink และโปรแกรม LabVIEW สำหรับการเก็บข้อมูลมาวิเคราะห์

## 1.6 ระเบียบวิธีการวิจัย และขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

จากการศึกษางานวิจัยต่างๆ เกี่ยวกับวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง และจากวัตถุประสงค์ ขอบเขตการวิจัยที่ได้กล่าวไปแล้วในข้างต้น สามารถสรุปเป็นขั้นตอนการดำเนินการวิจัยดังแสดงในภาพประกอบ 1-2 และรายละเอียดของระเบียบการวิจัยของงานวิจัยได้ดังต่อไปนี้

### 1.6.1 การออกแบบวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง

การออกแบบวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองจะต้องคำนึงถึงการนำไปใช้งานร่วมกับตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งจะต้องไม่ส่งผลกระทบต่อสัญญาณควบคุมที่ป้อนไปยังตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กของระบบควบคุมเดิมที่ใช้งานอยู่ในอุตสาหกรรม โดยการออกแบบวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง ซึ่งเป็นวงจรที่ใช้ในการแยกสัญญาณที่สร้างมาจากตัวเพียโซอิเล็กทริกออกจากสัญญาณควบคุม การออกแบบวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองในงานวิจัยนี้ได้มีแนวคิดมาจากวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองโดยขับเคลื่อนทางอ้อม (IDSSA circuit) [30] [31] ซึ่งเป็นวงจรที่สามารถแก้ปัญหาการถูกลดทอนของสัญญาณควบคุมได้ แต่ยังมีปัญหาการปรับค่าพารามิเตอร์ (ตัวเก็บประจุ และตัวต้านทาน) ในวงจรเพื่อทำให้วงจรมีความสมดุล ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะออกแบบวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง โดยการพัฒนาต่อยอดจากวงจร IDSSA เพื่อให้มีพารามิเตอร์ในวงจรลดลง และง่ายต่อการปรับค่าพารามิเตอร์ในวงจรเพื่อทำให้วงจรมีความสมดุล

### 1.6.2 การออกแบบวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้

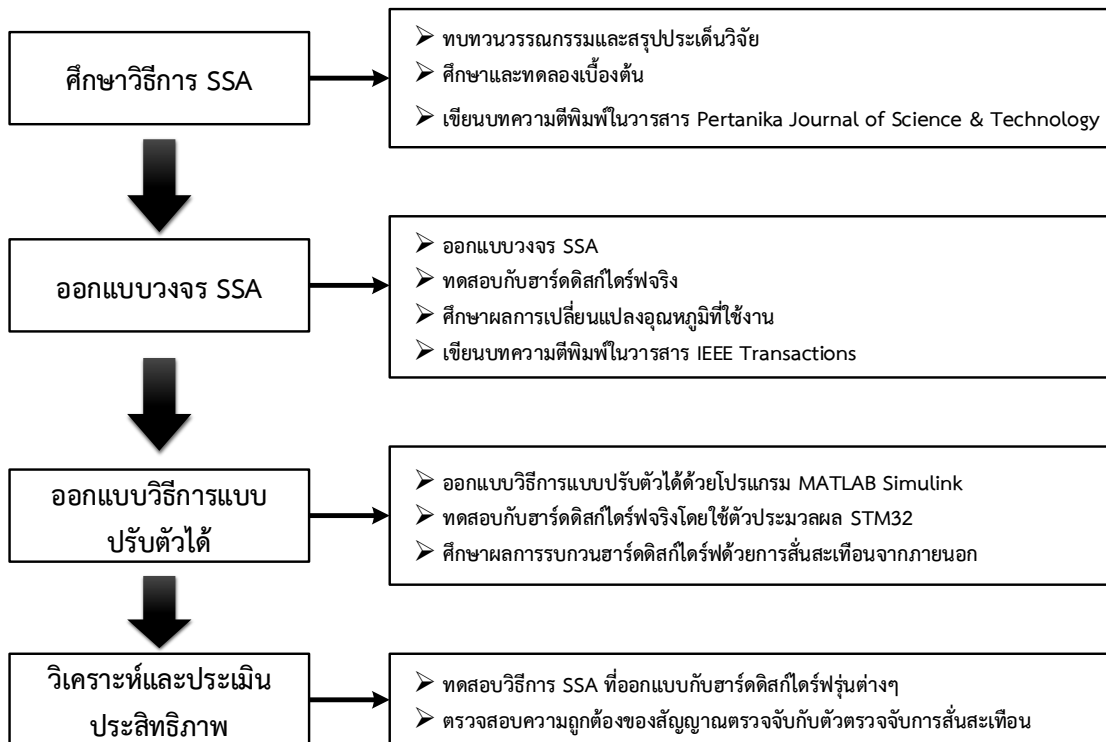
การออกแบบวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้ เพื่อแก้ปัญหาการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้วงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองเกิดความไม่สมดุล และทำให้สัญญาณที่วัดได้จากวงจรเกิดความผิดพลาด วิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้เป็นการประยุกต์ใช้วงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองร่วมกับวิธีการปรับตัวได้ เพื่อประมาณสัญญาณที่ทำให้เกิดความผิดพลาด แล้วนำไปชดเชยความผิดพลาดของสัญญาณตรวจจับที่วัดได้จากวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกในวงจร

### 1.6.3 การประยุกต์ใช้งานกับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในอุตสาหกรรม

การประยุกต์ใช้งานกับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในอุตสาหกรรมจะเป็นการนำวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบไปใช้งานจริงสำหรับตรวจจับการสั่นสะเทือนที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยการจำลองการสั่นสะเทือนไปรบกวนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ นอกจากนี้การนำวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบไปใช้งานกับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์รุ่นต่างๆ เพื่อประเมินประสิทธิภาพของวิธีการที่ออกแบบ

### 1.6.4 การทดลอง และการประเมินประสิทธิภาพของวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง

สำหรับการทดลองเพื่อทดสอบวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ได้ ออกแบบ โดยทดลองกับระบบเพียโซอิเล็กทริกที่จำลองขึ้นเอง และนำไปทดลองกับตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนในระบบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จริง เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแนวคิดที่การออกแบบ ส่วนการประเมินประสิทธิภาพของวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ ออกแบบจะมีประเด็นดังต่อไปนี้ คือ วิเคราะห์ความถูกต้องของสัญญาณการตรวจจับที่วัดได้จาก วิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง โดยการเปรียบเทียบกับสัญญาณตรวจจับของตัวตรวจจับที่ ติดตั้งอยู่บนตัวฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ วิเคราะห์ช่วงความถี่ในการทำงานของวงจรถักขับเคลื่อนและตรวจจับ ด้วยตนเอง โดยการพิจารณาช่วงความถี่ให้เหมาะสมกับช่วงความถี่การทำงานของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ วิเคราะห์ผลกระทบของวิธีการขับเคลื่อนและ ตรวจจับด้วยตนเองเข้าไปในระบบควบคุม โดยการพิจารณาผลตอบสนองของระบบ ทั้งการตอบสนอง ในโดเมนเวลาและการตอบสนองในโดเมนความถี่ วิเคราะห์ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าความจุ ไฟฟ้าของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็ก โดยการทดสอบที่ช่วงอุณหภูมิการใช้งานฮาร์ดดิสก์ ไดรฟ์ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/ เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ วิเคราะห์การลู่เข้าของอัตราขยายปรับตัวได้ของวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับ ด้วยตนเองแบบปรับตัวได้ โดยการหาอัตราการปรับตัวที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการนำไปใช้งานตัว ขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ และวิเคราะห์การประยุกต์ใช้ วิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองกับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์กรณีฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ใช้งานปกติและกรณี มีการรบกวนจากการสั่นสะเทือนจากภายนอก



ภาพประกอบ 1-2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

ภาพประกอบ 1-2 แสดงขั้นตอนการวิจัย ซึ่งประกอบด้วย 4 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกการศึกษาวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง โดยการทบทวนวรรณกรรมบทความที่เกี่ยวข้องแล้วสรุปเป็นประเด็นวิจัย การศึกษาและทดลองวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองเบื้องต้นแล้วเขียนบทความตีพิมพ์ในวารสาร Pertanika Journal of Science & Technology ขั้นตอนที่สองการออกแบบวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองซึ่งได้กล่าวในบทที่ 3 เป็นการออกแบบวงจรและทดสอบกับฮาร์ดดิסק์ไทรฟ์จริง และมีการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในฮาร์ดดิסק์ไทรฟ์แล้วเขียนบทความตีพิมพ์ในวารสาร IEEE Transactions ขั้นตอนที่สามการออกแบบวิธีการแบบปรับตัวได้ โดยการออกแบบด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink และทดสอบกับฮาร์ดดิסק์ไทรฟ์จริงโดยใช้ตัวประมวลผล STM32 และมีการศึกษาผลของการรบกวนฮาร์ดดิסק์ไทรฟ์ด้วยการสั่นสะเทือนจากภายนอก ขั้นตอนที่สี่การวิเคราะห์และประเมินประสิทธิภาพของวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบ เป็นการทดสอบวิธีการที่ออกแบบกับฮาร์ดดิסק์ไทรฟ์รุ่นต่างๆ และตรวจสอบความถูกต้องของสัญญาณตรวจจับกับสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับการสั่นสะเทือน ซึ่งขั้นตอนที่สามและสี่ได้กล่าวในบทที่ 4

## 1.7 แผนการดำเนินการวิจัย

แผนการดำเนินการวิจัยสามารถสรุปเป็นขั้นตอนการดำเนินงาน และรายละเอียดในการดำเนินงานได้ดังแสดงในตารางที่ 1-3

ตารางที่ 1-3 แผนการดำเนินการวิจัย

แผนการดำเนินงานวิจัย	ส.ค. 57 – ม.ค. 58	ก.พ. 58 – ก.ค. 58	ส.ค. 58 – ม.ค. 59	ก.พ. 59 – ก.ค. 59	ส.ค. 59 – ม.ค. 60	ก.พ. 60 – ก.ค. 60	ส.ค. 60 – ม.ค. 61
1. ศึกษาและทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง							
2. ออกแบบและพัฒนางจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง และนำไปทดลองกับตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์							
3. เขียนบทความตีพิมพ์							
4. ออกแบบและพัฒนาวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้ และนำไปทดลองกับตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์							
5. ทดสอบวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบสำหรับควบคุมการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จริงในอุตสาหกรรม							
6. วิเคราะห์ และสรุปผลการทดลอง							
7. เขียนบทความตีพิมพ์ และเขียนรายงานฉบับสมบูรณ์							



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

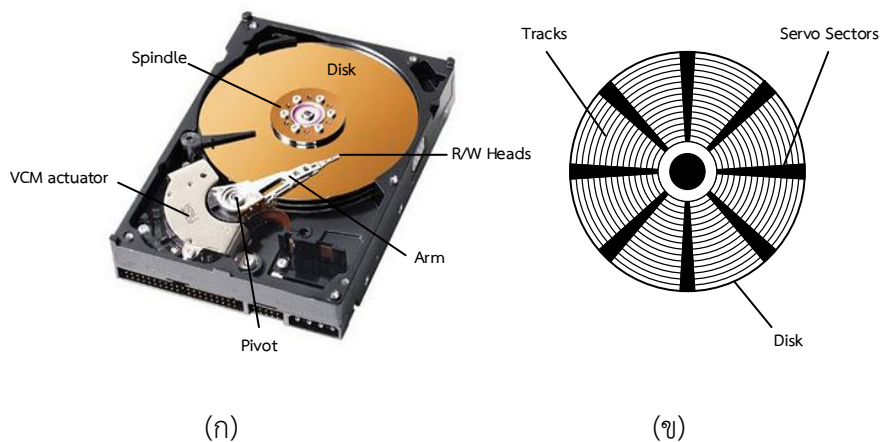
บทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ประกอบด้วยฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ อธิบายถึงส่วนประกอบและการควบคุมหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ตัวเพียโซอิเล็กทริกเป็นตัวขับเคลื่อนขนาดเล็กที่ใช้ในการควบคุมหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ วงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง อธิบายถึงแนวคิดการใช้ตัวเพียโซอิเล็กทริกเป็นทั้งตัวขับเคลื่อนและตัวตรวจจับไปพร้อมๆ กัน วิธีการปรับตัวแบบค่ากำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด อธิบายถึงหลักการทำงานของวิธีการค่ากำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด และการประยุกต์ใช้วิธีการปรับตัวแบบค่ากำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด

#### 2.1 ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

เทคโนโลยีของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard Disk Drive: HDD) ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยจะมุ่งเน้นความสำคัญมากในเรื่องการเพิ่มความจุของข้อมูล การลดขนาดของอุปกรณ์ การเพิ่มความน่าเชื่อถือในการบันทึกข้อมูล การอ่านและเขียนข้อมูลที่เร็ว และใช้พลังงานน้อย การเพิ่มความจุของข้อมูลสามารถทำได้โดยการเพิ่มความหนาแน่นต่อหน่วยพื้นที่ (Areal density) ซึ่งเป็นจำนวนที่ใช้เก็บข้อมูลบนแผ่นดิสก์ในขนาด 1 ตารางนิ้ว การปรับปรุงเพื่อเพิ่มความหนาแน่นในการเก็บข้อมูลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จากความหนาแน่นข้อมูล 100 Gbit/in<sup>2</sup> จนถึงความหนาแน่นข้อมูลถึง 10 Tbit/in<sup>2</sup>

##### 2.1.1 ส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ [1]

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นอุปกรณ์อย่างหนึ่งที่อยู่ในคอมพิวเตอร์ ซึ่งทำหน้าที่ในการเก็บบันทึกข้อมูลต่างๆ โดยภายในจะประกอบไปด้วยแผ่นดิสก์ (Disk) เป็นส่วนที่เก็บข้อมูล หัวอ่าน/เขียน (Read/Write heads) จะทำหน้าที่ในการอ่านและเขียนข้อมูลบนแผ่นดิสก์ แขนของหัวอ่าน/เขียน (Arm) เป็นส่วนที่ยึดหัวอ่าน/เขียนให้ลอยอยู่บนแผ่นดิสก์ ตัวขับเคลื่อนมอเตอร์ขดลวดเสียง (Voice Coil Motor: VCM) ทำหน้าที่ในการขับเคลื่อนหลักทำให้หัวอ่าน/เขียนเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการ และมอเตอร์ Spindle เป็นมอเตอร์ที่ขับเคลื่อนให้แผ่นดิสก์หมุน ดังแสดงในภาพประกอบ 2-1 (ก) สำหรับแผ่นดิสก์แต่ละแผ่นภายในพื้นผิวของจานดิสก์จะถูกแบ่งออกเป็นวงๆ เรียกว่าแนวข้อมูล (Data Track) และในแต่ละแนวข้อมูลจะถูกแบ่งออกเป็น Sectors เพื่อใช้ในการเก็บข้อมูล และบอกตำแหน่งให้กับหัวอ่าน/เขียน ดังแสดงในภาพประกอบ 2-1 (ข)

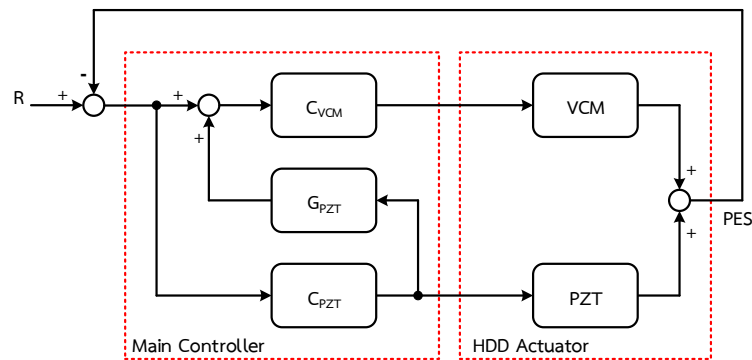


ภาพประกอบ 2-1 ส่วนประกอบภายในของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ปัจจุบันเทคโนโลยีฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้ถูกพัฒนาอย่างรวดเร็วเพื่อตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้ โดยเฉพาะความจุข้อมูลที่เพิ่มมากขึ้นและขนาดที่ลดลง สำหรับการเพิ่มความจุของฮาร์ดดิสก์ทำได้โดยการเพิ่มความหนาแน่นของจำนวนแนวข้อมูล (Track per Inch: TPI) ในการบันทึกข้อมูลของแผ่นดิสก์ นั่นคือทำให้ความกว้างของแนวข้อมูล (Track width) มีขนาดลดลง และในกระบวนการอ่าน/เขียนข้อมูลจะต้องใช้หัวอ่าน/เขียนที่มีขนาดเล็กลงไปด้วย จึงทำให้จำเป็นต้องเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ให้มีความแม่นยำมากขึ้น

### 2.1.2 การควบคุมหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ [2]

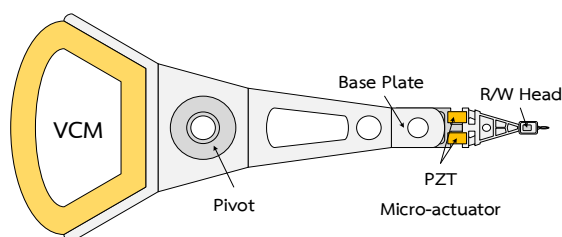
การควบคุมหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เป็นการควบคุมให้หัวอ่าน/เขียนเคลื่อนที่ไปบนแผ่นดิสก์ที่ใช้เก็บข้อมูล เพื่อไปยังตำแหน่งที่ต้องการอ่านหรือเขียนข้อมูลอย่างถูกต้องและแม่นยำ ระบบการควบคุมตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ดังแสดงในภาพประกอบ 2-2 ซึ่งประกอบด้วยตัวขับเคลื่อนสองตัว คือ ตัวขับเคลื่อน VCM และตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็ก (PZT Micro-actuator) ตัวควบคุมสองตัวสำหรับควบคุมตัวขับเคลื่อน VCM และตัวขับเคลื่อนขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็ก และเอาต์พุตของระบบจะเป็นค่าความผิดพลาดของตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนหรือเรียกว่า สัญญาณค่าความผิดพลาดของตำแหน่ง (Position Error Signal: PES) เป็นสัญญาณที่ใช้ป้อนกลับไปเปรียบเทียบกับตำแหน่งที่ต้องการ แล้วนำผลต่างที่ได้ป้อนกลับเข้าไปให้กับตัวควบคุมทั้งสองตัว



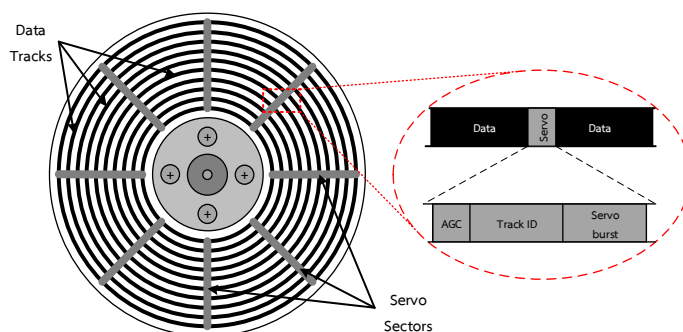
ภาพประกอบ 2-2 ระบบการควบคุมหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ [2]

สำหรับการทำงานของระบบการควบคุมตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ จะใช้ตัวขับเคลื่อนแบบสองขั้นตอน (Dual-Stage Actuator) ดังแสดงในภาพประกอบ 2-3 ซึ่งประกอบด้วยตัวขับเคลื่อน VCM และตัวขับเคลื่อนขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็ก ตัวขับเคลื่อน VCM จะทำหน้าที่เป็นตัวขับเคลื่อนหลักในการควบคุมให้หัวอ่าน/เขียนเคลื่อนที่ไปยังแถบข้อมูลที่ต้องการ และจะใช้ตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กเป็นตัวขับเคลื่อนรองสำหรับการควบคุมตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนให้เคลื่อนที่ได้อย่างละเอียดมากขึ้นขณะที่หัวอ่าน/เขียนกำลังอ่านหรือเขียนข้อมูลบนแถบข้อมูลที่ต้องการเพื่อเพิ่มความแม่นยำและความถูกต้อง

สัญญาณค่าความผิดพลาดของตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เป็นสัญญาณที่สำคัญสำหรับการควบคุมตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนเนื่องจากเป็นสัญญาณที่บอกตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนบนแผ่นดิสก์และเป็นสัญญาณป้อนกลับให้กับระบบควบคุม ซึ่งสัญญาณ PES ได้มาจากการอ่านค่าจากจุดที่บอกตำแหน่ง (Servo Sector) บนแผ่นดิสก์ด้วยหัวอ่านดังแสดงในภาพประกอบ 2-4 ซึ่งจะเห็นว่าจุดบอกตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนจะอยู่บนแถบข้อมูลและอยู่ระหว่างส่วนที่ใช้เก็บข้อมูล โดยในส่วนของจุดบอกตำแหน่งจะประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 3 ส่วน คือ ส่วนที่บอกอัตราขยายของการควบคุม (Automatic Gain Control: AGC) ส่วนที่ระบุเลขของแถบข้อมูล (Track ID) และส่วนที่บอกตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนขณะอยู่บนแถบข้อมูลเรียกว่า Servo Burst ซึ่งสัญญาณ PES จะถูกอ่านมาจากส่วน Servo burst



ภาพประกอบ 2-3 ตัวขับเคลื่อนแบบสองขั้นตอน



ภาพประกอบ 2-4 แถบข้อมูลและจุดบอกตำแหน่งบนแผ่นดิสก์ [2]

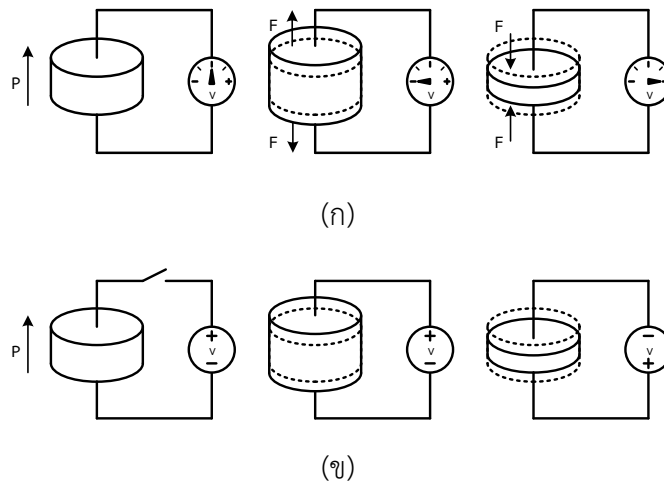
จากภาพประกอบ 2-4 แสดงแถบข้อมูลและจุดบอกตำแหน่งบนแผ่นดิสก์ จะเห็นได้ว่าในหนึ่งรอบของแถบเก็บข้อมูลจะมีจุดที่บอกตำแหน่งอยู่จำกัด ทำให้ส่งผลต่อความถี่ในการชักตัวอย่างของสัญญาณ PES และในระหว่างที่มีการอ่านหรือเขียนข้อมูลลงบนแผ่นดิสก์จะทำให้หัวอ่าน/เขียนไม่สามารถรับรู้ตำแหน่งของตัวเองได้ ถ้าหัวอ่าน/เขียนถูกการรบกวนที่รุนแรงมากในขณะที่มีการอ่านหรือเขียนข้อมูลก็จะทำให้ประสิทธิภาพในการอ่านและเขียนข้อมูลลดลงได้ ดังนั้นเพื่อให้สามารถตรวจจับการรบกวนหรือการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นที่หัวอ่าน/เขียนได้ขณะที่มีการอ่านหรือเขียนข้อมูลบนแผ่นดิสก์ จึงมีแนวคิดที่จะนำตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนมาใช้ประโยชน์ให้ทำหน้าที่เป็นทั้งตัวขับเคลื่อนและตัวตรวจจับพร้อมๆ กัน

## 2.2 ตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริก

วัสดุเพียโซอิเล็กทริกเป็นวัสดุที่ใช้เป็นตัวขับเคลื่อนขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไตร์ฟสำหรับขับเคลื่อนให้หัวอ่าน/เขียนเคลื่อนที่ไปบนแถบข้อมูลได้ละเอียดมากขึ้น ซึ่งในหัวข้อนี้ได้กล่าวรายละเอียดต่างๆ เกี่ยวกับคุณสมบัติของตัวเพียโซอิเล็กทริก วงจรสมมูลของตัวเพียโซอิเล็กทริก และการประยุกต์ใช้ตัวเพียโซอิเล็กทริกเป็นตัวขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง

### 2.2.1 คุณสมบัติของตัวเพียโซอิเล็กทริก [3]

คุณสมบัติของเพียโซอิเล็กทริกจะมีความเกี่ยวข้องกันระหว่างคุณสมบัติทางไฟฟ้าและคุณสมบัติทางกล เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางกล (Mechanical Deformation) ในลักษณะที่ตัวเพียโซอิเล็กทริกได้รับแรงกระทำโดยการกด บีบหรือดึง ทำให้มีการกระจัดทางไฟฟ้า (Electrical Displacement) ของประจุไฟฟ้า ดังแสดงในภาพประกอบ 2-5 (ก) เรียกปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ว่าปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกแบบตรง (Direct Piezoelectric Effect) และในทางกลับกันเมื่อตัวเพียโซอิเล็กทริกได้รับความต่างศักย์ไฟฟ้า ทำให้วัสดุมีการยืด (Extension) หรือหด (Contraction) ตามทิศทางของสนามไฟฟ้า (Electric Field) ดังแสดงในภาพประกอบ 2-5 (ข) เรียกปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ว่า ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกแบบย้อนกลับ (Converse Piezoelectric Effect)



ภาพประกอบ 2-5 คุณสมบัติของตัวเพียโซอิเล็กทริก [3]

สมการอย่างง่ายที่อธิบายปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกทั้ง 2 แบบ คือ ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกแบบตรงแสดงในสมการ (2-1) และปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกแบบย้อนกลับแสดงในสมการ (2-2)

$$D = dT \quad (2-1)$$

$$S = dE \quad (2-2)$$

เมื่อ  $D$  คือ การกระจัดทางไฟฟ้า มีหน่วยเป็น  $C/m^2$ ,

$T$  คือ ความเค้น มีหน่วยเป็น  $N/m^2$ ,

$S$  คือ ความเครียด,

$E$  คือ สนามไฟฟ้า มีหน่วยเป็น  $V/m$ ,

$d$  คือ ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Constant) มีหน่วยเป็น  $C/N$

จากสมการ (2-1) และ (2-2) จะเห็นได้ว่าการกระจัดทางไฟฟ้า ( $D$ ) จะเกิดจากแรงที่กระทำต่อตัวเพียโซอิเล็กทริกแล้วทำให้เกิดความเค้น ( $T$ ) เพียงอย่างเดียว และความเครียด ( $S$ ) จะเกิดสนามไฟฟ้า ( $E$ ) ที่ป้อนให้กับตัวเพียโซอิเล็กทริกเพียงอย่างเดียว แต่ในความเป็นจริงแล้วปริมาณทางไฟฟ้าสามารถเกิดจากปริมาณทางกลและปริมาณทางไฟฟ้าด้วยตัวเองได้ และในทำนองเดียวกันปริมาณทางกลก็สามารถเกิดจากปริมาณไฟฟ้าและปริมาณทางกลด้วยตัวเองได้เหมือนกัน ซึ่งสามารถอธิบายได้ตั้งสมการ (2-3) ถึง (2-6) โดยสมการ (2-3) ถึง (2-6) เกิดจากการนำสมการ (2-1) และ (2-2) มารวมกัน แล้วสามารถสร้างสมการใหม่ในรูปแบบความเครียดและประจุ (Strain-Charge Form) ได้ตั้งสมการ (2-3) และ (2-4) และรูปแบบความเค้นและประจุ (Stress-Charge Form) ได้ตั้งสมการ (2-5) และ (2-6) ดังนี้

$$S = s^E T + dE \quad (2-3)$$

$$D = dT + \varepsilon^T E \quad (2-4)$$

$$T = c^E S - eE \quad (2-5)$$

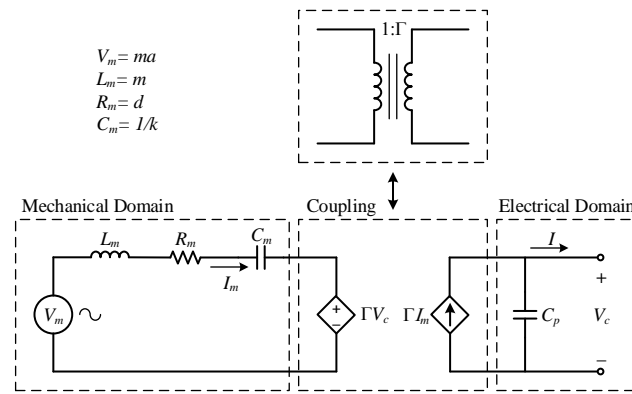
$$D = eS + \varepsilon^S E \quad (2-6)$$

เมื่อ  $e$  คือ ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริกความเค้น (Piezoelectric Stress Constant),  
 $s^E$  คือ ค่าคงที่ความยืดหยุ่น (Elastic Compliance Constant) มีหน่วยเป็น  $m^2/N$ ,  
 $c^E$  คือ ค่าคงที่ความแข็งตึง (Stiffness Constant) มีหน่วยเป็น  $N/m^2$ ,  
 $\varepsilon^T$  คือ ค่าสภาพยอม (Permittivity) ที่ความเค้นคงที่ มีหน่วยเป็น  $F/m$ ,  
 $\varepsilon^S$  คือ ค่าสภาพยอมที่ความเครียดคงที่

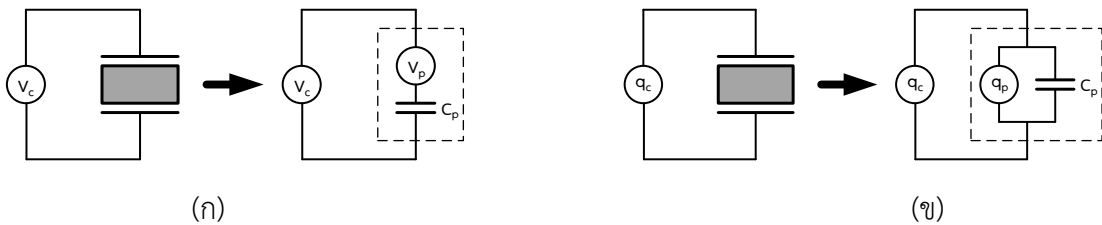
เมื่อพิจารณาในรูปแบบความเครียดและประจุ ความเครียดดั่งสมการ (2-3) และการกระจัดทางไฟฟ้าดั่งสมการ (2-4) เกิดจากการป้อนแรงกระทำให้เกิดความเค้นและป้อนสนามไฟฟ้าไปยังตัวเพียโซอิเล็กทริกพร้อมกัน ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาในรูปแบบความเค้นและประจุ ความเค้นดั่งสมการ (2-5) และกระจัดทางไฟฟ้าดั่งสมการ (2-6) เกิดจากการกระทำให้เกิดความเครียดและป้อนสนามไฟฟ้าไปยังตัวเพียโซอิเล็กทริกพร้อมกัน ในความเป็นจริงสมการ (2-3) ถึง (2-6) เกิดจากความสัมพันธ์เดียวกัน ขึ้นอยู่กับการพิจารณาและการประยุกต์ใช้งาน

## 2.2.2 วงจรสมมูลของตัวเพียโซอิเล็กทริก

วงจรสมมูลของตัวเพียโซอิเล็กทริกสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ วงจรสมมูลทางด้านกล (Mechanical Domain) และวงจรสมมูลทางด้านไฟฟ้า (Electrical Domain) โดยมีการแปลงพลังงานระหว่างทางกลกับไฟฟ้าผ่านค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบไฟฟ้า-กล (Electromechanical Coupling Coefficient,  $\Gamma$ ) ดังแสดงในภาพประกอบ 2-6 โดยวงจรสมมูลทางด้านกลจะอธิบายปริมาณทางกล เช่น แรง ความเร็ว ความเร่ง ระยะเวลาเคลื่อนที่ และการสั่นพ้อง (Resonant) ของตัวเพียโซอิเล็กทริก เป็นต้น ส่วนวงจรสมมูลทางด้านไฟฟ้าจะอธิบายปริมาณทางไฟฟ้า เช่น แรงดัน กระแส ค่าความจุไฟฟ้า และค่าความต้านทานของตัวเพียโซอิเล็กทริก เป็นต้น วงจรสมมูลของตัวเพียโซอิเล็กทริกอธิบายการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า และการแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลด้วยวงจรสมมูลทางไฟฟ้า เมื่อ  $V_m$  เสมือนแรงที่กระทำต่อตัวเพียโซอิเล็กทริก,  $L_m$  เสมือนมวล (Mass) ของตัวเพียโซอิเล็กทริก,  $R_m$  เสมือนค่าการหน่วง (Damping) ของตัวเพียโซอิเล็กทริก,  $C_m$  เสมือนส่วนกลับของค่าความแข็ง (Stiffness) ของตัวเพียโซอิเล็กทริก,  $C_p$  คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริก, และ  $V_c$  คือ แรงดันที่ป้อนไปกระตุ้นตัวเพียโซอิเล็กทริก



ภาพประกอบ 2-6 วงจรสมมูลของตัวเพียโซอิเล็กทริก [57]



ภาพประกอบ 2-7 วงจรสมมูลของตัวเพียโซอิเล็กทริกทางด้านไฟฟ้า [16]

สำหรับวงจรสมมูลของตัวเพียโซอิเล็กทริกที่ใช้ในการศึกษาและวิเคราะห์เกี่ยวกับการขับเคลื่อนและตรวจจ็ับด้วยตนเองในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะวงจรสมมูลทางด้านไฟฟ้า เนื่องจากต้องการศึกษาและวิเคราะห์สัญญาณทางปริมาณไฟฟ้า โดยวงจรสมมูลของตัวเพียโซอิเล็กทริกทางด้านไฟฟ้าสามารถพิจารณาได้ 2 แบบ คือ แบบแรกวงจรสมมูลจะประกอบด้วยตัวเก็บประจุต่ออนุกรมอยู่กับแหล่งจ่ายแรงดันที่ถูกสร้างขึ้นเมื่อป้อนแรงดันให้กับตัวเพียโซอิเล็กทริกดังแสดงในภาพประกอบ 2-7 (ก) และแบบที่สองวงจรสมมูลจะประกอบด้วยตัวเก็บประจุต่อขนานอยู่กับแหล่งกำเนิดประจุเมื่อป้อนประจุให้กับตัวเพียโซอิเล็กทริกดังแสดงในภาพประกอบ 2-7 (ข) เมื่อ  $V_p$  คือ แรงดันที่ถูกสร้างขึ้นมาจากตัวเพียโซอิเล็กทริก,  $q_c$  คือ ประจุที่ป้อนให้กับตัวเพียโซอิเล็กทริก, และ  $q_p$  คือ ประจุที่ถูกสร้างขึ้นมาจากตัวเพียโซอิเล็กทริก

### 2.2.3 การขับเคลื่อนและตรวจจ็ับด้วยตนเองของตัวเพียโซอิเล็กทริก [16]

การขับเคลื่อนและตรวจจ็ับด้วยตนเองของตัวเพียโซอิเล็กทริกเป็นการประยุกต์ใช้งานตัวเพียโซอิเล็กทริกให้เป็นทั้งตัวขับเคลื่อนและตัวตรวจจ็ับในตัวเดียวกันและในเวลาเดียวกันได้ โดยสามารถพิสูจน์ได้ว่าแรงดันที่วัดได้จากตัวเพียโซอิเล็กทริกเกิดจากการรวมกันระหว่างแรงดันที่ป้อนให้กับตัวเพียโซอิเล็กทริกกับแรงดันที่ตัวเพียโซอิเล็กทริกสร้างออกมา จากสมการ (2-6) สามารถจัดสมการให้อยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้าได้ดังแสดงในสมการ (2-7) โดยการแทน  $D = Q/A$ ,  $eS = q_p/A$ , และ  $E = V_c/t$  ในสมการ (2-6)

$$Q = q_p + \frac{\epsilon^S A}{t} V_c \quad (2-7)$$

เมื่อ  $A$  พื้นที่หน้าตัดตามทิศทางการโพลาริซชันของตัวเพียโซอิเล็กทริก,  $t$  คือ ความหนาของตัวเพียโซอิเล็กทริก, และ  $Q$  คือ ประจุไฟฟ้าบนพื้นผิวของตัวเพียโซอิเล็กทริก และเมื่อแทน  $Q = C_p V$  และ  $C_p = \epsilon^S A/t$  ในสมการ (2-7) จะได้

$$V = \frac{q_p}{C_p} + V_c \quad (2-8)$$

หรือ

$$V = V_p + V_c \quad (2-9)$$

จากสมการ (2-8) และ (2-9) จะเห็นได้ว่าแรงดัน  $V$  คือ แรงดันที่ตกคร่อมตัวเพียโซอิเล็กทริกจะประกอบด้วยสององค์ประกอบ คือ แรงดันที่ถูกสร้างมาจากตัวเพียโซอิเล็กทริก ( $V_p$ ) และแรงดันที่ป้อนให้กับตัวเพียโซอิเล็กทริก ( $V_c$ ) ดังนั้นในการใช้งานตัวเพียโซอิเล็กทริกเป็นทั้งตัวขับเคลื่อนและตัวตรวจจับ จำเป็นต้องหาวิธีการสำหรับแยกแรงดันที่ถูกสร้างมาจากตัวเพียโซอิเล็กทริกออกจากแรงดันที่ป้อนให้กับตัวเพียโซอิเล็กทริก ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

## 2.3 วงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง

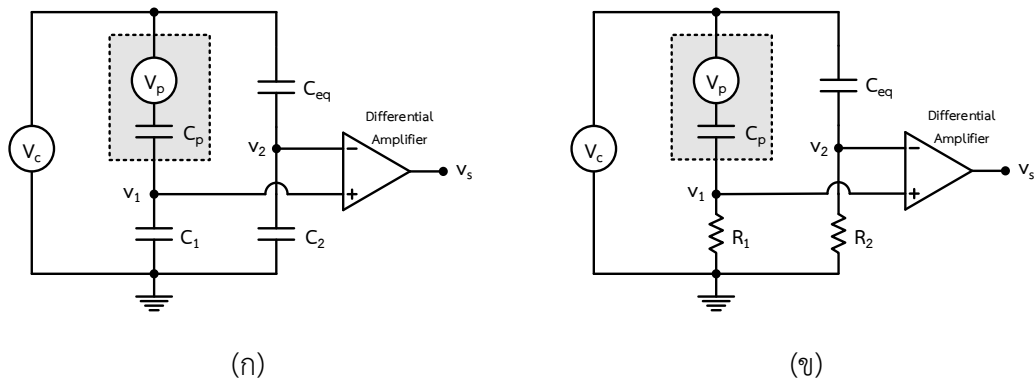
วงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้สำหรับแยกแรงดันที่ถูกสร้างมาจากตัวเพียโซอิเล็กทริกออกจากแรงดันที่ป้อนให้กับตัวเพียโซอิเล็กทริก ซึ่งถูกนำเสนอครั้งแรกในบทความ [16] สำหรับในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบบริดจ์สมดุล ซึ่งเป็นวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบดั้งเดิม และวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบขับเคลื่อนทางอ้อม ซึ่งเป็นวงจรที่พัฒนามาจากวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบบริดจ์เพื่อแก้ปัญหาการถูกลดทอนของสัญญาณควบคุม มีรายละเอียดต่างๆ ดังต่อไปนี้

### 2.3.1 วงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบบริดจ์

วงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบบริดจ์เป็นวงจรที่ใช้หลักการทำงานของวงจรบริดจ์สมดุล โดยในวงจรบริดจ์จะประกอบด้วยตัวเพียโซอิเล็กทริกต่ออนุกรมอยู่กับตัวต้านทาน ดังแสดงในภาพประกอบ 2-8 (ก) หรือตัวเพียโซอิเล็กทริกต่ออนุกรมอยู่กับตัวเก็บประจุภาพประกอบ 2-8 (ข) สำหรับการทำให้วงจรบริดจ์สมดุลจะต้องออกแบบให้ตัวเก็บประจุสมมูล ( $C_{eq}$ ) มีค่าใกล้เคียงกับค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริก ( $C_p$ ) สัญญาณแรงดัน  $V_1$  เป็นสัญญาณที่ประกอบด้วยสัญญาณจากสองแหล่งกำเนิด คือ สัญญาณควบคุมจากตัวควบคุมและสัญญาณแรงดันจากตัวเพียโซอิเล็กทริก ส่วนสัญญาณแรงดัน  $V_2$  เป็นสัญญาณที่ประกอบด้วยสัญญาณควบคุมเพียงสัญญาณเดียว



เมื่อนำสัญญาณแรงดัน  $V_1$  ลบกับสัญญาณแรงดัน  $V_2$  โดยใช้วงจรขยายผลต่าง (Differential Amplifier) ก็จะทำให้พจน์ของสัญญาณควบคุมหักลบกันหมดภายใต้เงื่อนไขการสมมูลของวงจรบริดจ์ ( $C_{eq} = C_p, C_1 = C_2, R_1 = R_2$ ) ดังนั้นสัญญาณแรงดันเอาต์พุต  $V_s$  หรือสัญญาณตรวจจับก็จะเหลือเฉพาะสัญญาณแรงดันที่ถูกสร้างมาจากตัวเพียโซอิเล็กทริกตามที่ต้องการ



ภาพประกอบ 2-8 วงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบบริดจ์ [16]

จากวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบบริดจ์ในภาพประกอบ 2-8 (ก) สามารถเขียนสมการสัญญาณแรงดัน  $V_1$  และ  $V_2$  ให้อยู่ในรูปของการแปลงลาปลาซดังแสดงในสมการ (2-10) และ (2-11)

$$V_1(s) = \left( \frac{C_p}{C_p + C_1} \right) V_c(s) + \left( \frac{C_p}{C_p + C_1} \right) V_p(s) \tag{2-10}$$

$$V_2(s) = \left( \frac{C_{eq}}{C_{eq} + C_2} \right) V_c(s) \tag{2-11}$$

ผลต่างระหว่างสัญญาณแรงดัน  $V_1$  และ  $V_2$  คือ สัญญาณการตรวจจับ  $V_s$  ดังแสดงในสมการ (2-12)

$$V_s(s) = \left( \frac{C_p}{C_p + C_1} - \frac{C_{eq}}{C_{eq} + C_2} \right) V_c(s) + \left( \frac{C_p}{C_p + C_1} \right) V_p(s) \tag{2-12}$$

เมื่อ  $C_{eq} = C_p$  และ  $C_1 = C_2$  จะได้

$$V_s(s) = \left( \frac{C_p}{C_p + C_1} \right) V_p(s) \tag{2-13}$$

และในทำนองเดียวกัน จากภาพประกอบ 2-8 (ข) สามารถเขียนสมการสัญญาณแรงดัน  $V_1$  และ  $V_2$  ให้อยู่ในรูปของการแปลงลาปลาซดังแสดงในสมการ (2-14) และ(2-15)

$$V_1(s) = \left( \frac{R_1 C_p s}{R_1 C_p s + 1} \right) V_c(s) + \left( \frac{R_1 C_p s}{R_1 C_p s + 1} \right) V_p(s) \tag{2-14}$$

$$V_2(s) = \left( \frac{R_2 C_{eq} s}{R_2 C_{eq} s + 1} \right) V_c(s) \quad (2-15)$$

ผลต่างระหว่างสัญญาณแรงดัน  $V_1$  และ  $V_2$  คือ สัญญาณการตรวจจับ  $V_s$  ดังแสดงในสมการ (2-16)

$$V_s(s) = \left( \frac{R_1 C_p s}{R_1 C_p s + 1} - \frac{R_2 C_{eq} s}{R_2 C_{eq} s + 1} \right) V_c(s) + \left( \frac{R_1 C_p s}{R_1 C_p s + 1} \right) V_p(s) \quad (2-16)$$

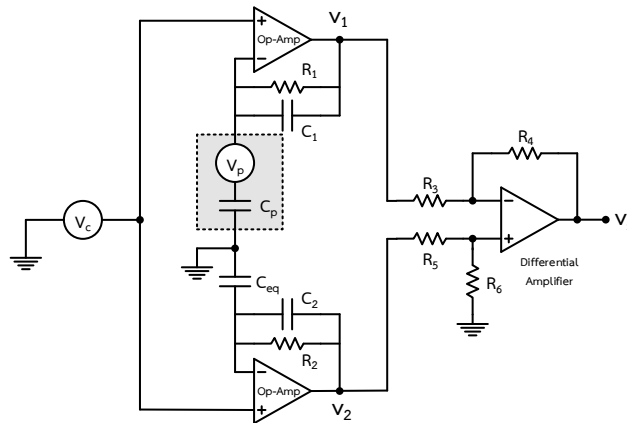
เมื่อ  $C_{eq} = C_p$  และ  $R_1 = R_2$  จะได้

$$V_s(s) = \left( \frac{R_1 C_p s}{R_1 C_p s + 1} \right) V_p(s) \quad (2-17)$$

จากสมการ (2-13) และ(2-17) จะเห็นได้ว่าสัญญาณตรวจจับ  $V_s$  เหลือเฉพาะสัญญาณแรงดันที่สร้างจากตัวเพียโซอิเล็กทริก ( $V_p$ ) ภายใต้การออกแบบพารามิเตอร์ในวงจรตามเงื่อนไขการสมดุลของวงจรบริดจ์ จะเห็นได้ว่าสัญญาณแรงดันที่สร้างจากตัวเพียโซอิเล็กทริกถูกลดทอนด้วยสัดส่วนของพารามิเตอร์ในวงจรด้วย ซึ่งส่งผลให้สัญญาณตรวจจับที่ได้จะมีขนาดเล็กลง นอกจากนี้การใช่วงจรนี้ยังส่งผลต่อสัญญาณควบคุมที่ป้อนให้กับตัวเพียโซอิเล็กทริก โดยสัญญาณควบคุมจะถูกลดทอนให้มีขนาดเล็กลงด้วยสัดส่วนของพารามิเตอร์ในวงจร ดังนั้นแนวคิดการใช่วงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบบริดจ์สมดุลสำหรับแยกแรงดันที่ถูกสร้างมาจากตัวเพียโซอิเล็กทริกออกจากแรงดันที่ป้อนให้กับตัวเพียโซอิเล็กทริกสามารถใช้งานได้แต่ยังมีข้อจำกัดอยู่

### 2.3.2 วงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบขับเคลื่อนทางอ้อม

วงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบขับเคลื่อนทางอ้อม (Indirect-Driven Self-Sensing Actuation: IDSSA) เป็นวิธีการที่พัฒนาต่อจากวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบบริดจ์ โดยเป็นการแก้ปัญหาการถูกลดทอนของสัญญาณควบคุมที่ป้อนให้แก่ตัวเพียโซอิเล็กทริก แต่ยังสามารถใช้หลักการวงจรบริดจ์สมดุลในการแยกสัญญาณแรงดันที่ถูกสร้างมาจากตัวเพียโซอิเล็กทริก ( $V_p$ ) ออกจากสัญญาณแรงดันควบคุมที่ป้อนให้แก่ตัวเพียโซอิเล็กทริก ( $V_c$ ) ได้เหมือนเดิม วงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบขับเคลื่อนทางอ้อมถูกนำเสนอแนวคิดในงานวิจัย [30] [31] เป็นการประยุกต์ใช่วงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบขับเคลื่อนทางอ้อมกับตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เพื่อใช้ตรวจจับการสั่นสะเทือนที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ วงจรดังกล่าวแสดงในภาพประกอบ 2-9 ซึ่งประกอบด้วยตัวเพียโซอิเล็กทริก (วงจรสมมูลของตัวเพียโซอิเล็กทริก) ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และตัวออปแอมป์ (Operation Amplifier: Op-Amp)



ภาพประกอบ 2-9 วงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบขับเคลื่อนทางอ้อม [30]

วงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบขับเคลื่อนทางอ้อมมีหลักการทำงานเหมือนกับวงจรบริดจ์แต่แตกต่างกันที่มีการใช้ตัวออปแอมป์เพิ่มเข้าไปในวงจรทำให้สัญญาณควบคุมที่ป้อนไปยังตัวเพียโซอิเล็กทริกไม่ถูกลดทอน เนื่องจากสัญญาณขาลบของตัวออปแอมป์ที่ป้อนไปยังตัวเพียโซอิเล็กทริกจะมีลักษณะเหมือนกับสัญญาณควบคุมที่ป้อนไปยังขาบวกตัวออปแอมป์ จึงเรียกวิธีการนี้ว่า การขับเคลื่อนทางอ้อม (Indirect-Driven) โดยสัญญาณเอาต์พุต  $V_1$  เป็นสัญญาณที่ประกอบด้วยสัญญาณควบคุมและสัญญาณแรงดันที่สร้างมาจากตัวเพียโซอิเล็กทริก ส่วนสัญญาณ  $V_2$  เป็นสัญญาณที่มีเฉพาะสัญญาณควบคุม ทั้งสัญญาณ  $V_1$  และ  $V_2$  จะประกอบด้วยสัญญาณควบคุม ดังนั้นเมื่อวงจรเกิดความสมดุล ( $C_{eq} = C_p, C_1 = C_2, R_1 = R_2, R_3 = R_5, R_4 = R_6$ ) จะทำให้สัญญาณควบคุมในสัญญาณ  $V_1$  และ  $V_2$  มีขนาดเท่ากัน เมื่อนำสัญญาณ  $V_2$  ลบกับสัญญาณ  $V_1$  โดยใช้วงจรขยายผลต่าง ก็จะทำให้เทอมของสัญญาณควบคุมหักลบกันหมดเหลือเฉพาะสัญญาณแรงดันที่ถูกสร้างมาจากเพียโซอิเล็กทริกเป็นสัญญาณตรวจจับเอาต์พุต  $V_s$  ของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบขับเคลื่อนทางอ้อม

จากวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบขับเคลื่อนทางอ้อมในภาพประกอบ 2-9 สามารถเขียนสมการของสัญญาณแรงดัน  $V_1$  และ  $V_2$  ให้อยู่ในรูปของการแปลงลาปลาซได้ดังสมการ (2-18) และ (2-19)

$$V_1(s) = \left(1 + \frac{R_1 C_p s}{R_1 C_1 s + 1}\right) V_c(s) - \left(\frac{R_1 C_p s}{R_1 C_1 s + 1}\right) V_p(s) \quad (2-18)$$

$$V_2(s) = \left(1 + \frac{R_2 C_{eq} s}{R_2 C_2 s + 1}\right) V_c(s) \quad (2-19)$$

และสามารถเขียนสมการของสัญญาณตรวจจับ  $V_s$  ได้ดังสมการ (2-20)

$$V_s(s) = \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) \left(\frac{R_6}{R_5 + R_6}\right) V_2(s) - \left(\frac{R_4}{R_3}\right) V_1(s) \quad (2-20)$$

ถ้าวงจรขยายผลต่างเป็นวงจรในอุดมคติ ( $R_3 = R_4 = R_5 = R_6$ ) ทำให้สามารถลดรูปสมการ (2-20) ได้ดังสมการ (2-21)

$$V_s(s) = V_2(s) - V_1(s) \quad (2-21)$$

เมื่อแทนสมการ (2-18) และ (2-19) ในสมการ (2-21) จะได้

$$V_s(s) = \left( \frac{R_2 C_{eq} s}{R_2 C_2 s + 1} - \frac{R_1 C_p s}{R_1 C_1 s + 1} \right) V_c(s) + \left( \frac{R_1 C_p s}{R_1 C_1 s + 1} \right) V_p(s) \quad (2-22)$$

จากสมการ (2-22) จะเห็นได้ว่าการตอบสนองของวงจรจะขึ้นอยู่กับ  $R_1 C_1$  และ  $R_2 C_2$  โดยความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ  $V_s$  กับสัญญาณ  $V_c$  และความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ  $V_s$  กับสัญญาณ  $V_p$  เป็นการตอบสนองแบบวงจรกรองความถี่สูงผ่าน (High Pass Filter: HPF) ดังนั้นถ้าออกแบบให้เทอมของ  $R_1 C_1 s \gg 1$  และ  $R_2 C_2 \gg 1$  ทำให้สามารถเขียนสมการ (2-22) ใหม่ให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้ดังแสดงในสมการ (2-23)

$$V_s(s) = \left( \frac{C_{eq}}{C_2} - \frac{C_p}{C_1} \right) V_c(s) + \left( \frac{C_p}{C_1} \right) V_p(s) \quad (2-23)$$

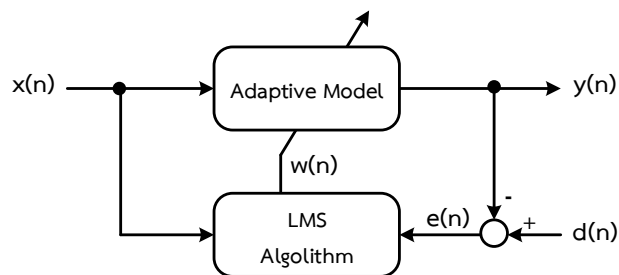
จากสมการ (2-23) จะเห็นได้ว่าสัญญาณตรวจจับ  $V_s$  ประกอบด้วยเทอมของสัญญาณ  $V_c$  และสัญญาณ  $V_p$  แต่วงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองทำหน้าที่ในการตรวจวัดสัญญาณ  $V_p$  ที่ถูกสร้างมาจากตัวเพียโซอิเล็กทริก ดังนั้นในการกำจัดสัญญาณ  $V_c$  สามารถทำได้โดยการออกแบบให้เทอม  $C_{eq} = C_p$  และ  $C_1 = C_2$  เพื่อให้เทอมของสัญญาณ  $V_c$  มีค่าเป็นศูนย์ และจะทำให้สัญญาณตรวจจับ  $V_s$  มีเฉพาะเทอมของสัญญาณที่ถูกสร้างจากตัวเพียโซอิเล็กทริกเท่านั้น ดังแสดงในสมการ (2-24) ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณ  $V_p$  ที่ตรวจวัดได้จะถูกลดทอนด้วยสัดส่วนของ  $C_p/C_1$  ทำให้สัญญาณที่ตรวจวัดได้มีขนาดเล็กลง

$$V_s(s) = \left( \frac{C_p}{C_1} \right) V_p(s) \quad (2-24)$$

จากสมการของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบขับเคลื่อนทางอ้อมข้างต้น สามารถสรุปเงื่อนไขการออกแบบให้วงจรเกิดความสมดุลได้ดังนี้ คือ  $C_{eq} = C_p$ ,  $C_1 = C_2$ ,  $R_1 = R_2$ ,  $R_3 = R_5$ , และ  $R_4 = R_6$  ซึ่งจะเห็นได้ว่าต้องใช้อย่างน้อย 5 เงื่อนไข ในทางปฏิบัติยากที่จะออกแบบให้ทุกเงื่อนไขเป็นจริงได้ เนื่องจากค่าความต้านทานและค่าของตัวเก็บประจุจะมีค่าความผิดพลาดอยู่ ยังมีหลายเงื่อนไขก็จะทำให้เกิดค่าความผิดพลาดสะสมจากแต่ละเงื่อนไขได้และอาจทำให้วงจรเกิดความไม่สมดุลได้ง่าย ดังนั้นการนำวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบขับเคลื่อนทางอ้อมไปประยุกต์ใช้งานก็ยังคงมีข้อจำกัดเรื่องเงื่อนไขการทำให้วงจรเกิดความสมดุลอยู่

## 2.4 วิธีการปรับตัวแบบค่ากำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด

วิธีการปรับตัวแบบค่ากำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด (Least Mean Square: LMS) เป็นวิธีการที่นิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นวิธีการที่มีความง่ายในการออกแบบและการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง วิธีการ LMS เป็นวิธีการที่ใช้สำหรับปรับค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficient) ของแบบจำลองปรับตัวได้ (Adaptive Model) เพื่อให้ได้สัญญาณเอาต์พุตของแบบจำลองมีความสอดคล้องกับสัญญาณที่ต้องการหรือสัญญาณอ้างอิงมากที่สุด โครงสร้างของวิธีการปรับตัวแบบ LMS แสดงในภาพประกอบ 2-10 ซึ่งประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นแบบจำลองปรับตัวได้ที่มีสัมประสิทธิ์ปรับค่าได้ ( $w(n)$ ) เพื่อใช้ประมาณสัญญาณเอาต์พุตจากสัญญาณอินพุต ( $x(n)$ ) ส่วนที่สองเป็นวิธีการปรับตัวแบบค่ากำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด เพื่อใช้ในการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองปรับตัวได้จนทำให้ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งค่าความผิดพลาด ( $e(n)$ ) หาได้จากผลต่างระหว่างสัญญาณเอาต์พุต ( $y(n)$ ) ของแบบจำลองปรับตัวกับสัญญาณอ้างอิง ( $d(n)$ )



ภาพประกอบ 2-10 โครงสร้างของวิธีการปรับตัวแบบค่ากำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด

จากภาพประกอบ 2-10 แสดงให้เห็นว่า จะต้องประมาณสัญญาณเอาต์พุตจากสัญญาณอินพุตโดยใช้แบบจำลองปรับตัวได้ แล้วนำสัญญาณเอาต์พุตไปเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิง และนำค่าความผิดพลาดที่ได้ไปใช้ในการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองปรับตัวได้โดยใช้วิธีการปรับตัวแบบค่ากำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด จนทำให้สัญญาณเอาต์พุตมีค่าใกล้เคียงกับสัญญาณอ้างอิง และทำให้ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด สำหรับกรณีนี้สมมติให้แบบจำลองปรับตัวได้เป็นโครงสร้างของตัวกรองแบบผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนจำกัด (Finite Impulse Response: FIR) ซึ่งมีความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตดังแสดงในสมการ (2-25)

$$y(n) = \sum_{k=0}^p w_n(k)x(n-k) \quad (2-25)$$

ค่าความผิดพลาดระหว่างสัญญาณเอาต์พุตกับสัญญาณอ้างอิงสามารถเขียนได้ดังสมการ (2-26)

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (2-26)$$

ค่าความผิดพลาดนี้จะถูกนำมาสร้างเป็นฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective Function) ที่เป็นค่าเฉลี่ยของผลรวมค่าผิดพลาดกำลังสอง ดังแสดงในสมการ (2-27)

$$J(n) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} e^2(n) \approx e^2(n) \quad (2-27)$$

สำหรับการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองปรับตัวจะใช้วิธีการ Steepest Descent ซึ่งเป็นวิธีการปรับค่าสัมประสิทธิ์ที่ทำให้ฟังก์ชันเป้าหมายมีค่าน้อยที่สุด โดยสามารถเขียนได้ดังสมการ (2-28)

$$w(n) = w(n-1) - \mu \nabla J(n) \quad (2-28)$$

เมื่อ  $\mu$  คือ อัตราการปรับตัว (Adaptive Rate หรือ Step-Size) และ  $\nabla J(n)$  คือ การหาค่าอนุพันธ์ย่อยของฟังก์ชันเป้าหมายเทียบกับ  $w$  ดังแสดงในสมการ (2-29) และเรียกวิธีการที่ใช้ปรับค่าสัมประสิทธิ์จนทำให้ฟังก์ชันเป้าหมายมีค่าน้อยสุดว่าวิธีการปรับตัวแบบค่ากำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด

$$\begin{aligned} \nabla J(n) &= \frac{\partial e^2(n)}{\partial w} \\ &= 2e(n) \frac{\partial e(n)}{\partial w} \\ &= 2e(n) \frac{\partial (d(n) - y(n))}{\partial w} \\ &= -2e(n) \frac{\partial y(n)}{\partial w} \\ &= -2e(n)x(n) \end{aligned} \quad (2-29)$$

ดังนั้นจะได้สมการปรับค่าสัมประสิทธิ์ดังแสดงในสมการ (2-30)

$$w(n) = w(n-1) + 2\mu e(n)x(n) \quad (2-30)$$

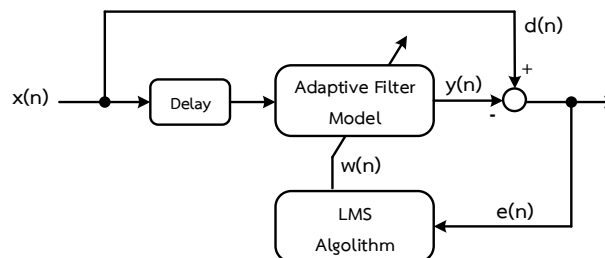
จากสมการ (2-30) จะเห็นได้ว่าปรับค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองปรับตัวได้จะต้องใช้ค่าสัมประสิทธิ์ในอดีต ค่าความผิดพลาด และสัญญาณอินพุต โดยความเร็วในการปรับค่าสัมประสิทธิ์เพื่อให้สัญญาณเอาต์พุตลู่เข้าค่าที่ต้องการหรือค่าความผิดพลาดมีค่าน้อยสุดจะขึ้นอยู่กับ การกำหนดค่าอัตราการปรับตัว และจะเห็นได้ว่าวิธีการปรับตัวแบบค่ากำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดเป็นวิธีการที่มีการออกแบบและการคำนวณที่ไม่ซับซ้อนสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริง ดังนั้นจึงได้มีการนำวิธีการดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ มากมายดังรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

## 2.5 การประยุกต์ใช้วิธีการปรับตัวแบบค่ากำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด

การประยุกต์ใช้งานวิธีการปรับตัวแบบ LMS โดยส่วนมากสามารถแบ่งออกเป็น 4 ระบบ คือ ระบบการทำนายเชิงเส้น (Linear Prediction) ระบบการระบุเอกลักษณ์ (System Identification) ระบบการระบุเอกลักษณ์แบบผกผัน (Inverse System Identification) และระบบการกำจัดสัญญาณรบกวน (Noise Cancellation) ซึ่งรายละเอียดของการประยุกต์ใช้งานวิธีการปรับตัวแบบ LMS ทั้ง 4 ระบบมีดังต่อไปนี้

### 2.5.1 ระบบการทำนายเชิงเส้น

การประยุกต์ใช้งานวิธีการปรับตัวแบบ LMS กับระบบการทำนายเชิงเส้นแสดงในภาพประกอบ 2-11 ซึ่งเป็นการทำนายสัญญาณเอาต์พุตจากสัญญาณอินพุตในอดีต โดยใช้แบบจำลองวงจรรองปรับตัวได้ (Adaptive Filter Model) และใช้สัญญาณอินพุตปัจจุบันเป็นสัญญาณอ้างอิง แสดงว่าสัญญาณเอาต์พุตที่ได้ก็จะเป็นสัญญาณที่ถูกทำนายจากจากสัญญาณอินพุตในอดีต ซึ่งจะเหมาะสมกับสัญญาณที่มีมีเสถียรภาพและมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาเล็กน้อยหรือเปลี่ยนแปลงช้าๆ แบบมีคาบ โดยมีการนำระบบนี้ไปประยุกต์ใช้กับงานทางด้านการประมวลผลเสียงพูด เช่น การเข้ารหัสเสียงพูด (Speech Coding) การรู้จำเสียงพูด (Speech Recognition) เป็นต้น

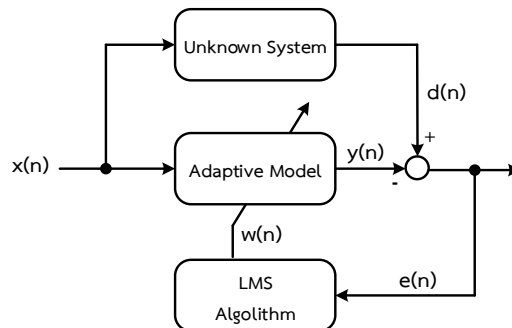


ภาพประกอบ 2-11 โครงสร้างของระบบการทำนายเชิงเส้น

### 2.5.2 ระบบการระบุเอกลักษณ์

การประยุกต์ใช้งานวิธีการปรับตัวแบบ LMS กับระบบการระบุเอกลักษณ์แสดงในภาพประกอบ 2-12 เป็นระบบที่ใช้สำหรับสร้างแบบจำลองของระบบที่ไม่ทราบ (Unknown System) เช่น การประมาณช่องสัญญาณ การระบุระบบที่ต้องการควบคุม (Plant) และการกำจัดเสียงสะท้อน (Echo) เป็นต้น โดยระบบที่ต้องการสร้างแบบจำลองจะถูกวางขนานกับวิธีการระบุเอกลักษณ์ และใช้แบบจำลองวงจรรองปรับตัวได้สำหรับสร้างแบบจำลองที่ต้องการ สัญญาณอินพุตของแบบจำลองวงจรรองปรับตัวได้จะเป็นสัญญาณเดียวกับที่ป้อนให้กับระบบที่ไม่ทราบ แล้ววิธีการปรับตัวแบบ LMS ก็จะปรับค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองวงจรรองจนได้สัญญาณเอาต์พุตที่ใกล้เคียงกับเอาต์พุต

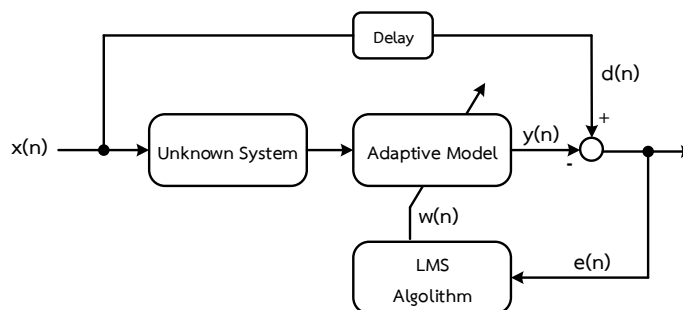
ของระบบที่ไม่ทราบหรือจนกว่าค่าความผิดพลาดมีค่าน้อยที่สุด ดังนั้นแบบจำลองวงจรรองจึงทำตัวเสมือนระบบที่ไม่ทราบ



ภาพประกอบ 2-12 โครงสร้างของระบบการระบุเอกลักษณ์

### 2.5.3 ระบบการระบุเอกลักษณ์แบบผกผัน

การประยุกต์ใช้งานวิธีการปรับตัวแบบ LMS กับระบบการระบุเอกลักษณ์แบบผกผัน แสดงในภาพประกอบ 2-13 เป็นระบบที่ใช้สำหรับสร้างแบบจำลองผกผันของระบบที่ไม่ทราบ โดยระบบที่ต้องการสร้างแบบจำลองจะถูกวางอนุกรมกับวิธีการระบุเอกลักษณ์แบบผกผัน และใช้แบบจำลองวงจรรองปรับตัวได้สำหรับสร้างแบบจำลองผกผันที่ต้องการ สำหรับในระบบนี้จะแตกต่างจากระบบการระบุเอกลักษณ์แบบปกติ คือ สัญญาณเอาต์พุตของระบบที่ไม่ทราบจะเป็นสัญญาณอินพุตของแบบจำลองวงจรรองปรับตัวได้ และสัญญาณอ้างอิงเป็นสัญญาณอินพุตในอดีตของระบบที่ไม่ทราบ และเมื่อวิธีการปรับตัวแบบ LMS ปรับค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองวงจรรองจนได้สัญญาณเอาต์พุตที่ใกล้เคียงกับสัญญาณอ้างอิงหรือจนกว่าค่าความผิดพลาดมีค่าน้อยที่สุด ก็จะได้แบบจำลองผกผันของระบบที่ไม่ทราบเพื่อใช้สำหรับการประมาณสัญญาณอินพุตของระบบที่ไม่ทราบ โดยวิธีการนี้เหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านการส่งข้อมูลหรือเสียงผ่านระบบโทรศัพท์ เช่น การลดและชดเชยความผิดปกติของช่องสัญญาณ เป็นต้น

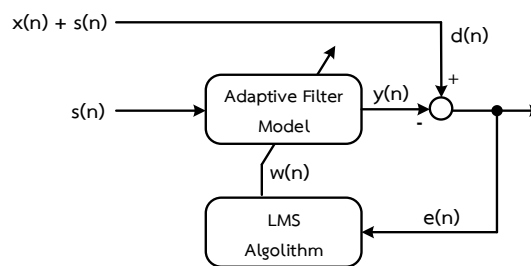


ภาพประกอบ 2-13 โครงสร้างของระบบการระบุเอกลักษณ์แบบผกผัน



#### 2.5.4 ระบบการกำจัดสัญญาณรบกวน

การประยุกต์ใช้งานวิธีการปรับตัวแบบ LMS กับระบบการกำจัดสัญญาณรบกวน แสดงในภาพประกอบ 2-14 เป็นระบบที่ใช้สำหรับการกำจัดสัญญาณรบกวน ( $s(n)$ ) ที่รวมอยู่กับสัญญาณข้อมูลที่ต้องการ โดยแบบจำลองวงจรกรองแบบปรับตัวได้จะหน้าที่ในการประมาณสัญญาณรบกวน และสัญญาณข้อมูลที่ต้องการที่รวมอยู่กับสัญญาณรบกวนจะทำหน้าที่เป็นสัญญาณอ้างอิงให้กับแบบจำลองวงจรกรองแบบปรับตัวได้ สัญญาณเอาต์พุตของแบบจำลองวงจรกรองจะถูกนำไปลบกับสัญญาณอ้างอิงเพื่อหากล้างสัญญาณรบกวนที่รวมอยู่กับสัญญาณข้อมูลที่ต้องการ เมื่อวิธีการปรับตัวแบบ LMS ปรับค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองวงจรกรองจนกำจัดสัญญาณรบกวนหมดหรือจนกว่าค่าความผิดพลาดมีค่าน้อยที่สุด สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวิธีการนี้ก็จะเหลือเฉพาะสัญญาณข้อมูลที่ต้องการ วิธีการนี้เหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานทางการแพทย์ เช่น การกำจัดสัญญาณรบกวนในสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจและคลื่นไฟฟ้ากล้ามเนื้อ เป็นต้น



ภาพประกอบ 2-14 โครงสร้างของระบบการกำจัดสัญญาณรบกวน

### บทที่ 3

#### การออกแบบวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง

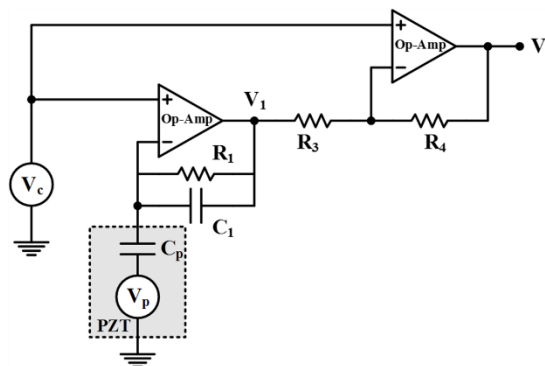
บทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยด้วยตนเอง เพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งานกับตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ สำหรับการตรวจจับการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขณะที่ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทำงานตามปกติ โดยในบทนี้จะอธิบายการทำงานของวงจร ข้อดี-ข้อเสียของวงจรหลักการออกแบบค่าพารามิเตอร์ในวงจร ศึกษาการทำงานของวงจรจากการจำลองการทำงานและจากการทดลองกับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จริง และศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ต่อการทำงานของวงจรที่ออกแบบ

#### 3.1 วงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง

วงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยด้วยตนเอง คือ วงจรที่ใช้สำหรับขับเคลื่อนตัวเพียโซอิเล็กทริกและตรวจจับการสั่นสะเทือนของตัวเพียโซอิเล็กทริกไปพร้อมๆ กัน การออกแบบวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยด้วยตนเองจะต้องคำนึงถึงการนำไปประยุกต์ใช้งานกับตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งจากการทบทวนวรรณกรรมและศึกษาการนำไปประยุกต์ใช้วงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองกับตัวเพียโซอิเล็กทริก พบว่าวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่เคยนำเสนอมาเจอปัญหาต่างๆ ที่ส่งผลต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานกับตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริก คือ ปัญหาการถูกลดทอนของสัญญาณควบคุม ซึ่งเป็นสัญญาณที่ถูกป้อนไปขับเคลื่อนให้ตัวเพียโซอิเล็กทริกทำงาน ปัญหานี้ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของตัวเพียโซอิเล็กทริกลดลง ปัญหาการออกแบบค่าพารามิเตอร์ในวงจรเพื่อให้เกิดความสมดุล เนื่องจากประสิทธิภาพการตรวจจับของวงจรขึ้นอยู่กับ การออกแบบให้วงจรเกิดความสมดุล ซึ่งปัญหานี้เกิดจากการที่ในวงจรมีพารามิเตอร์ที่ต้องออกแบบและเงื่อนไขการออกแบบเพื่อให้วงจรเกิดความสมดุลมีมากเกินไป และนอกจากนี้ปัญหาความซับซ้อนของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองก็เป็นปัญหาหนึ่งที่ทำให้ยากต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานกับตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ดังนั้นจากปัญหาข้างต้นจึงได้มีแนวคิดที่จะพัฒนางจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองเพื่อให้เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานกับตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งมีรายละเอียดต่างๆ ดังต่อไปนี้

### 3.1.1 โครงสร้างของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง

วงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยด้วยตนเองที่นำเสนอในงานวิจัยนี้เป็นวงจรที่ถูกออกแบบและพัฒนาต่อยอดมาจากวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบขับเคลื่อนทางอ้อม (IDSSA circuit) ที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 ซึ่งเป็นวงจรที่สามารถแก้ปัญหาการถูกลดทอนของสัญญาณควบคุมได้ แต่ยังมีปัญหาการออกแบบค่าพารามิเตอร์ในวงจร (ตัวเก็บประจุ และตัวต้านทาน) และเงื่อนไขการออกแบบเพื่อให้วงจรเกิดความสมดุล งานวิจัยนี้ได้ออกแบบวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยด้วยตนเองเพื่อลดพารามิเตอร์ในวงจร ลดเงื่อนไขของการทำให้วงจรเกิดความสมดุล และง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานกับตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์ ซึ่งมีโครงสร้างของวงจรที่ออกแบบดังแสดงในภาพประกอบ 3-1 ประกอบด้วยออปแอมป์ (Operation Amplifier: Op-Amp) ตัวต้านทาน (Resistor) ตัวเก็บประจุ (Capacitor) และตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็ก (PZT) สัญญาณควบคุม ( $V_c$ ) ถูกป้อนผ่านออปแอมป์ตัวที่ 1 ไปขับเคลื่อนให้ตัวเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กทำงาน ซึ่งการขับเคลื่อนแบบนี้เรียกว่า การขับเคลื่อนทางอ้อม เป็นการขับเคลื่อนที่ไม่ส่งผลต่อสัญญาณควบคุมและไม่ลดทอนสัญญาณควบคุม สัญญาณ  $V_1$  เป็นสัญญาณเอาต์พุตของออปแอมป์ตัวที่ 1 ซึ่งจะประกอบด้วยสัญญาณควบคุมและสัญญาณที่ตัวเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กสร้างออกมา ( $V_p$ ) ออปแอมป์ตัวที่ 2 ทำหน้าที่ในการหักล้างสัญญาณควบคุมที่รวมอยู่ในสัญญาณ  $V_1$  โดยการป้อนสัญญาณควบคุมไปที่ขาบวกออปแอมป์ตัวที่ 2 ดังนั้นทำให้สัญญาณเอาต์พุตของออปแอมป์ตัวที่ 2 เหลือเฉพาะสัญญาณที่ตัวเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กสร้างออกมา และเรียกสัญญาณนี้ว่า สัญญาณตรวจจับ (Sensing Signal,  $V_s$ ) จากวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยด้วยตนเองที่นำเสนอจะเห็นได้ว่าจำนวนอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรลดลงเมื่อเทียบกับกับวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยด้วยตนเองแบบขับเคลื่อนทางอ้อม แต่สามารถวัดสัญญาณที่ตัวเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กสร้างออกมาได้เหมือนกัน



ภาพประกอบ 3-1 วงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยด้วยตนเองที่ออกแบบ

### 3.1.2 สมการของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง

จากโครงสร้างของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบสามารถอธิบายการทำงานของวงจรได้ด้วยสมการ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การตอบสนองของวงจรและอธิบายเงื่อนไขการทำให้วงจรเกิดความสมดุล จากภาพประกอบ 3-1 สามารถเขียนสมการของสัญญาณ  $V_1$  และ  $V_s$  ให้อยู่ในรูปของการแปลงลาปลาซได้ดังแสดงในสมการ (3-1) และ (3-2) ตามลำดับ

$$V_1(s) = \left(1 + \frac{R_1 C_p s}{R_1 C_1 s + 1}\right) V_c(s) - \left(\frac{R_1 C_p s}{R_1 C_1 s + 1}\right) V_p(s) \quad (3-1)$$

$$V_s(s) = \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) V_c(s) - \left(\frac{R_4}{R_3}\right) V_1(s) \quad (3-2)$$

แทน  $V_1$  ในสมการ (3-1) ลงในสมการ (3-2) จะได้

$$V_s(s) = \left(1 - \left(\frac{R_4 C_p}{R_3 C_1}\right) \left(\frac{R_1 C_1 s}{R_1 C_1 s + 1}\right)\right) V_c(s) + \left(\frac{R_4 C_p}{R_3 C_1}\right) \left(\frac{R_1 C_1 s}{R_1 C_1 s + 1}\right) V_p(s) \quad (3-3)$$

จากสมการ (3-3) จะเห็นได้ว่าการตอบสนองของวงจรจะขึ้นอยู่กับ  $R_1 C_1$  โดยความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ  $V_s$  กับสัญญาณ  $V_c$  จะเป็นการตอบสนองแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter: LPF) และความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ  $V_s$  กับสัญญาณ  $V_p$  จะเป็นการตอบสนองแบบวงจรกรองความถี่สูงผ่าน (High Pass Filter: HPF) ดังนั้นถ้าออกแบบให้เทอมของ  $R_1 C_1 s \gg 1$  ทำให้สามารถเขียนสมการ (3-3) ใหม่ให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้ดังแสดงในสมการ (3-4)

$$V_s(s) = \left(1 - \frac{R_4 C_p}{R_3 C_1}\right) V_c(s) + \left(\frac{R_4 C_p}{R_3 C_1}\right) V_p(s) \quad (3-4)$$

จากสมการ (3-4) จะเห็นได้ว่าสัญญาณตรวจจับ  $V_s$  ประกอบด้วยเทอมของสัญญาณ  $V_c$  และสัญญาณ  $V_p$  แต่วัตถุประสงค์ของการออกแบบวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง คือ เพื่อตรวจวัดสัญญาณ  $V_p$  ที่ถูกสร้างมาจากตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็ก ดังนั้นในการกำจัดสัญญาณ  $V_c$  สามารถทำได้โดยการออกแบบให้เทอม  $R_4 C_p / R_3 C_1 = 1$  เพื่อให้เทอมของสัญญาณ  $V_c$  เป็นศูนย์ ซึ่งเรียกรูปแบบเทอมดังกล่าวว่า เงื่อนไขการทำให้วงจรเกิดความสมดุล ดังแสดงในสมการ (3-5)

$$\frac{R_4 C_p}{R_3 C_1} = 1 \quad (3-5)$$

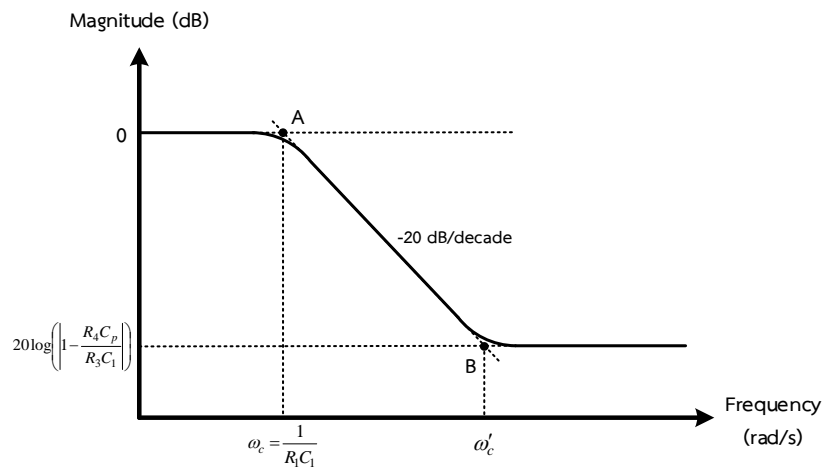
ดังนั้นการนำวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบไปประยุกต์ใช้งานแล้วสามารถออกแบบให้สัดส่วนของ  $R_4C_p$  และ  $R_3C_1$  มีค่าเท่ากับ 1 ได้ จะทำให้สัญญาณตรวจจับ  $V_s$  มีเฉพาะเทอมของสัญญาณที่ถูกสร้างจากตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กเท่านั้น ดังแสดงในสมการ (3-6)

$$V_s(s) \approx V_p(s) \quad (3-6)$$

จากการอธิบายการทำงานของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบด้วยสมการข้างต้น จะเห็นได้ว่าวงจรที่ออกแบบสามารถตรวจวัดสัญญาณที่ถูกสร้างจากตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็ก ภายใต้เงื่อนไขการออกแบบค่าพารามิเตอร์ในวงจรเพื่อให้วงจรเกิดความสมดุลเพียงเงื่อนไขเดียว เมื่อเทียบกับวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบขับเคลื่อนทางอ้อมที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 2

### 3.1.3 วิเคราะห์การตอบสนองของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง

การวิเคราะห์การตอบสนองของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบมีความสำคัญต่อการออกแบบค่าพารามิเตอร์ในวงจรให้เหมาะสมกับช่วงความถี่ของการนำไปประยุกต์ใช้งาน จากสมการของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบข้างต้นจะเห็นได้ว่าวงจรมีการตอบสนองเป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านสำหรับสัญญาณควบคุมที่ไปออกที่สัญญาณตรวจจับ และวงจรมีการตอบสนองเป็นวงจรกรองความถี่สูงผ่านสำหรับสัญญาณที่ถูกสร้างจากตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่ไปออกที่สัญญาณตรวจจับ โดยทั้งสองการตอบสนองจะมีช่วงความถี่ตัด (Cutoff Frequency) ที่ความถี่เดียวกัน แต่เนื่องจากวัตถุประสงค์ของการออกแบบวงจรนี้คือ ไม่ต้องการให้สัญญาณควบคุมไปออกที่สัญญาณตรวจจับของวงจร ดังนั้นการออกแบบค่าพารามิเตอร์ในวงจรจึงต้องคำนึงถึงการตอบสนองของวงจรสำหรับสัญญาณควบคุมที่ไปออกที่สัญญาณตรวจจับ ซึ่งจะมีการวิเคราะห์การตอบสนองดังกล่าวเพื่อหาสมการที่ทำให้การออกแบบค่าพารามิเตอร์ในวงจรง่ายขึ้น การตอบสนองเชิงความถี่ของการตอบสนองดังกล่าวแสดงในภาพประกอบ 3-2 จะเห็นได้ว่าในการออกแบบช่วงความถี่ตัดที่ตำแหน่งเดิม (ตำแหน่ง A) จะต้องเพิ่มความถี่ให้ต่ำกว่าช่วงความถี่ที่จะนำวงจรไปประยุกต์ใช้งาน เพื่อให้สัญญาณควบคุมถูกลดทอนหรือถูกกำจัดไปให้มากที่สุด ดังนั้นจึงมีการวิเคราะห์เพื่อหาสมการสำหรับการออกแบบช่วงความถี่ตัดที่ตำแหน่งใหม่ (ตำแหน่ง B) โดยให้มีความสัมพันธ์กับค่าพารามิเตอร์ในวงจร และสอดคล้องกับเงื่อนไขการออกแบบวงจรให้เกิดความสมดุล



ภาพประกอบ 3-2 การตอบสนองเชิงความถี่ระหว่างสัญญาณ  $v_c$  และสัญญาณ  $v_s$

จากภาพประกอบ 3-2 สามารถสร้างสมการเพื่อหาความถี่ตัดที่ตำแหน่งใหม่ ( $\omega'_c$ ) โดยใช้สมการของสมการเส้นตรงที่มีความชันเป็น  $-20 \text{ dB/decade}$  ซึ่งสามารถเขียนได้ดังแสดงในสมการ (3-7)

$$-20 \log \left( 1 - \frac{R_4 C_p}{R_3 C_1} \right) = -20 (\log \omega_c - \log \omega'_c) \quad (3-7)$$

จัดรูปสมการ (3-7) ใหม่ให้อยู่ในรูปของ  $\omega'_c$  จะได้

$$\begin{aligned} \log \omega'_c &= \log \omega_c - \log \left( 1 - \frac{R_4 C_p}{R_3 C_1} \right) \\ &= \log \left( \left( \frac{R_3 C_1}{R_3 C_1 - R_4 C_p} \right) \omega_c \right) \end{aligned} \quad (3-8)$$

ดังนั้นสามารถแก้สมการ (3-8) และได้สมการสำหรับหาความถี่ตัดที่ตำแหน่งใหม่ดังแสดงในสมการ (3-9)

$$\omega'_c = \left( \frac{R_3 C_1}{R_3 C_1 - R_4 C_p} \right) \omega_c \quad (3-9)$$

จากสมการ (3-9) จะเห็นได้ว่าความถี่ตัด  $\omega'_c$  เป็นสัดส่วนกับความถี่ตัด  $\omega_c$  ตามขนาดของค่าพารามิเตอร์ในวงจรถัดไป ถ้าสามารถออกแบบให้เทอมของ  $|R_3 C_1 - R_4 C_p|$  มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งหมายถึงสามารถออกแบบให้วงจรเกิดความสมดุลได้มากที่สุด และจะทำให้ความถี่ตัด  $\omega'_c$  มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นควรออกแบบค่าพารามิเตอร์ในวงจรถัดไปให้เหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งาน

### 3.1.4 วิเคราะห์ความไม่สมดุลของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง

วงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองสามารถเกิดความไม่สมดุลได้จากการเปลี่ยนแปลงของค่าของพารามิเตอร์ในวงจร ซึ่งได้แก่ค่าความจุไฟฟ้าของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็ก ( $C_p$ ) เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กมีการเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิที่ใช้งาน ซึ่งในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์อุณหภูมิไม่ได้คงที่ตลอดเวลา มีการเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพแวดล้อมที่ใช้งาน ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงได้ทำการวิเคราะห์ความไม่สมดุลของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับวงจรและสัญญาณตรวจจับที่วัดมาได้

การเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กได้กำหนดให้เป็นไปตามสมการ (3-10) โดยกำหนดให้  $C_p$  คือค่าความจุไฟฟ้าของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่อุณหภูมิใดๆ,  $C_{p0}$  คือค่าความจุไฟฟ้าของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่อุณหภูมิเริ่มต้น (วงจรเกิดความสมดุล), และ  $\Delta C_p$  คือค่าความจุไฟฟ้าของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่เปลี่ยนไป

$$C_p = C_{p0} + \Delta C_p \quad (3-10)$$

แทน  $C_p$  ในสมการ (3-10) ลงในสมการ (3-4) ที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้นและจัดรูปสมการใหม่จะได้ดังสมการ (3-11)

$$V_s(s) = \left(1 - \frac{R_4 C_{p0}}{R_3 C_1}\right) V_c(s) - \left(\frac{R_4 \Delta C_p}{R_3 C_1}\right) V_c(s) + \left(\frac{R_4 C_{p0} + R_4 \Delta C_p}{R_3 C_1}\right) V_p(s) \quad (3-11)$$

ถ้าที่อุณหภูมิเริ่มต้นทำให้วงจรเกิดความสมดุลโดยการออกแบบให้  $R_4 C_{p0} / R_3 C_1 = 1$  จะได้

$$V_s(s) = -\left(\frac{R_4 \Delta C_p}{R_3 C_1}\right) V_c(s) + \left(1 + \frac{R_4 \Delta C_p}{R_3 C_1}\right) V_p(s) \quad (3-12)$$

จากสมการ (3-12) จะเห็นได้ว่าเมื่อค่าความจุไฟฟ้าของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงไป สัญญาณตรวจจับ  $V_s$  ที่วัดได้จากวงจรตัวขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองจะมีสัญญาณในเทอมของสัญญาณควบคุม  $V_c$  เหลืออยู่ ดังนั้นจึงได้ทำการวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กต่อสัญญาณตรวจจับ  $V_s$  โดยแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ ตอนที่อุณหภูมิลดลงและตอนที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น

### กรณีที่ 1 : อุณหภูมิลดลง

เมื่ออุณหภูมิลดลงจะทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กมีค่าลดลงตามไปด้วย ดังนั้นจะทำให้  $\Delta C_p$  มีค่าติดลบเนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กมีค่าน้อยกว่าค่าความจุไฟฟ้าของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่อุณหภูมิเริ่มต้น เมื่อพิจารณาสมการ (3-12) จะได้

$$V_s(s) = \left( \frac{R_4 |\Delta C_p|}{R_3 C_1} \right) V_c(s) + \left( 1 - \frac{R_4 |\Delta C_p|}{R_3 C_1} \right) V_p(s) \quad (3-13)$$

จากสมการ (3-13) จะเห็นได้ว่าในเทอมของสัญญาณควบคุม  $V_c$  จะมีค่าเป็นบวกและในเทอมของสัญญาณ  $V_p$  ก็จะมีขนาดเล็กลงตามค่าความจุไฟฟ้าของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่ลดลง และถ้าขนาดของสัญญาณ  $V_c$  ใหญ่กว่าสัญญาณ  $V_p$  ก็จะทำให้สัญญาณตรวจจับ  $V_s$  ที่วัดได้ส่วนใหญ่จะเป็นสัญญาณ  $V_c$  และมีเฟสเดียวกับสัญญาณควบคุม  $V_c$

### กรณีที่ 2 : อุณหภูมิเพิ่มขึ้น

เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นจะทำให้  $\Delta C_p$  มีค่าเป็นบวกเนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กมีค่ามากกว่าค่าความจุไฟฟ้าของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่อุณหภูมิเริ่มต้น เมื่อพิจารณาสมการ (3-12) จะได้

$$V_s(s) = - \left( \frac{R_4 |\Delta C_p|}{R_3 C_1} \right) V_c(s) + \left( 1 + \frac{R_4 |\Delta C_p|}{R_3 C_1} \right) V_p(s) \quad (3-14)$$

จากสมการ (3-14) จะเห็นได้ว่าในเทอมของสัญญาณควบคุม  $V_c$  จะมีค่าเป็นลบและในเทอมของสัญญาณ  $V_p$  ก็จะมีขนาดเพิ่มขึ้นตามค่าความจุไฟฟ้าของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่เพิ่มขึ้น และถ้าขนาดของสัญญาณ  $V_c$  ใหญ่กว่าสัญญาณ  $V_p$  ก็จะทำให้สัญญาณตรวจจับ  $V_s$  ที่วัดได้ส่วนใหญ่จะเป็นสัญญาณ  $V_c$  และมีเฟสตรงกันข้ามกับสัญญาณควบคุม  $V_c$

จากสองกรณีข้างต้นจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีผลกระทบต่อสัญญาณตรวจจับที่วัดได้จากวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองทั้งขนาดและเฟสซึ่งทำให้สัญญาณตรวจจับที่วัดได้เกิดความผิดพลาดและส่งผลต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานต่อไปในอนาคต



### 3.2 การจำลองการทำงานของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง

สำหรับการจำลองการทำงานของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองเป็นการศึกษาการตอบสนองของวงจรที่ออกแบบ และศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บขั้วอิเล็กทรอนิกส์ต่อการตอบสนองของวงจร โดยการสร้างแบบจำลองของวงจรจากสมการที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้นด้วยโปรแกรม MATLAB ซึ่งได้ทำการศึกษาการตอบสนองเชิงความถี่ระหว่างความสัมพันธ์ของสัญญาณควบคุม  $V_c$  และสัญญาณตรวจจับ  $V_s$  และการตอบสนองเชิงความถี่ระหว่างความสัมพันธ์ของสัญญาณ  $V_p$  และสัญญาณตรวจจับ  $V_s$

#### 3.2.1 การจำลองการตอบสนองของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง

การจำลองการตอบสนองของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองในหัวข้อนี้จะเป็นการเปรียบเทียบการตอบสนองของวงจรที่ออกแบบกับวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบขับเคลื่อนทางอ้อม โดยการสร้างแบบจำลองของวงจรที่ออกแบบจากสมการ (3-3) และสร้างแบบจำลองของวงจร IDSSA จากสมการ (2-22) ซึ่งการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของทั้งสองวงจรถูกออกแบบภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน คือ ความถี่ตัดของวงจรมีน้อยกว่า 100 Hz และสามารถลดทอนสัญญาณควบคุมได้มากกว่า 40 dB (100 เท่า) ค่าพารามิเตอร์ของทั้งสองวงจรที่ใช้ในการจำลองการทำงานแสดงในตารางที่ 3-1 จะเห็นได้ว่าวงจรทั้งสองถูกออกแบบให้เกิดความไม่สมดุลเล็กน้อยเพื่อพิจารณาการตอบสนองของสัญญาณควบคุมต่อสัญญาณตรวจจับ โดยกำหนดให้  $R_3$  ให้มีค่าเท่ากับ 25.1 k $\Omega$  สำหรับวงจรที่ออกแบบ และกำหนดให้  $C_{eq}$  ให้มีค่าเท่ากับ 2.51 nF สำหรับวงจร IDSSA นอกจากนี้ในการจำลองการตอบสนองของทั้งสองวงจรจะพิจารณาในช่วงความถี่ 0 Hz ถึง 30 kHz เนื่องจากเป็นช่วงที่ตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ใช้งาน ผลการจำลองการทำงานของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแสดงในภาพประกอบ 3-3 และภาพประกอบ 3-4

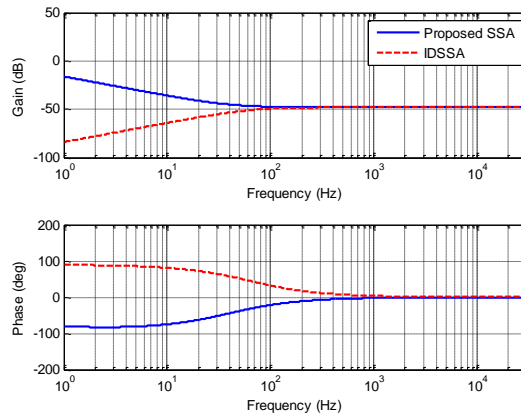
ภาพประกอบ 3-3 แสดงการตอบสนองเชิงความถี่ของความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณตรวจจับและสัญญาณควบคุม จากผลการจำลองการตอบสนองทั้งสองวงจรจะเห็นว่าในช่วงความถี่ที่สูงกว่า 100 Hz วงจรที่ออกแบบและวงจร IDSSA สามารถกำจัดสัญญาณควบคุมได้ 48 dB หรือลดทอนได้ 100 เท่าภายใต้เงื่อนไขการออกแบบเดียวกัน แต่ความแตกต่างกันระหว่างสองวงจร คือ วงจรที่ออกแบบมีการตอบสนองแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ส่วนวงจร IDSSA มีการตอบสนองแบบวงจรกรองความถี่สูงผ่าน ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วยสมการที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น เมื่อพิจารณาเฟสของทั้งสองวงจรพบว่า ในช่วงความถี่ที่สูงกว่า 100 Hz ทั้งสองวงจรมีเฟสเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งไม่ได้มีความสำคัญต่อการนำวงจรไปประยุกต์ใช้งาน

ตารางที่ 3-1 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ใช้ในการจำลองการทำงาน

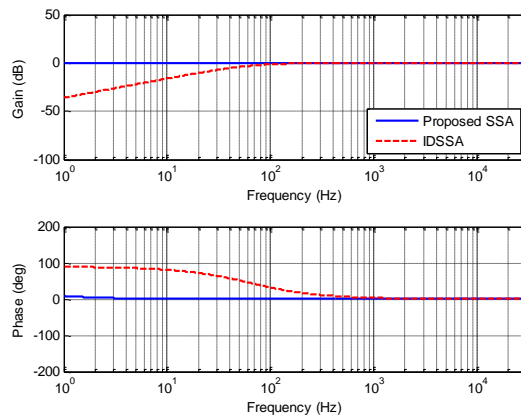
พารามิเตอร์	วงจร SSA ที่ออกแบบ	วงจร IDSSA
$C_p$	2.5 nF	2.5 nF
$C_{eq}$	-	2.51 nF
$C_1$	10 nF	2.5 nF
$C_2$	-	2.5 nF
$R_1$	100 M $\Omega$	1 M $\Omega$
$R_2$	-	1 M $\Omega$
$R_3$	25.1 k $\Omega$	10 k $\Omega$
$R_4$	100 k $\Omega$	10 k $\Omega$
$R_5$	-	10 k $\Omega$
$R_6$	-	10 k $\Omega$

ภาพประกอบ 3-4 แสดงการตอบสนองเชิงความถี่ของความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณตรวจจับและสัญญาณที่ถูกสร้างมาจากตัวเพียโซอิเล็กทริก จากผลการจำลองการตอบสนองของวงจรทั้งสองจะเห็นได้ว่า ในช่วงความถี่ที่สูงกว่า 100 Hz วงจรที่ออกแบบและวงจร IDSSA สามารถตรวจวัดสัญญาณที่ถูกสร้างมาจากตัวเพียโซอิเล็กทริกได้ และทั้งสองวงจรมีอัตราขยายเป็น 1 เท่า (0 dB) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสัญญาณที่ถูกสร้างมาจากตัวเพียโซอิเล็กทริกไม่ถูกลดทอน แต่จะเห็นได้ว่าวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบสามารถตรวจวัดได้ในช่วงความถี่ที่กว้างกว่าวงจร IDSSA เนื่องจากวงจรที่ออกแบบมีความถี่ตัดที่ต่ำกว่าวงจร IDSSA เมื่อพิจารณาเฟสของทั้งสองวงจรพบว่า ในช่วงความถี่ที่สูงกว่า 100 Hz ทั้งสองวงจรมีเฟสเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งทำให้การตรวจวัดสัญญาณที่ถูกสร้างมาจากตัวเพียโซอิเล็กทริกมีความถูกต้อง และสามารถนำวงจรไปประยุกต์ใช้งานจริงได้

จากผลการจำลองผลตอบสนองทั้งสองวงจรพบว่าการตอบสนองเชิงความถี่เชิงความถี่ระหว่างสัญญาณตรวจจับกับสัญญาณควบคุม และระหว่างสัญญาณตรวจจับกับสัญญาณที่ถูกสร้างมาจากตัวเพียโซอิเล็กทริก มีการตอบสนองในลักษณะที่คล้ายคลึงกันในช่วงความถี่ที่สูงกว่า 100 Hz ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบมีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานภายใต้จำนวนอุปกรณ์ในวงจรและเงื่อนไขการออกแบบวงจรให้เกิดความสมดุคที่น้อยกว่าวงจร IDSSA



ภาพประกอบ 3-3 การตอบสนองเชิงความถี่ของความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ  $V_c$  และสัญญาณ  $V_s$

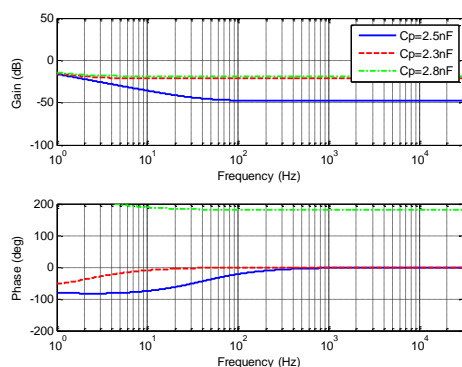


ภาพประกอบ 3-4 การตอบสนองเชิงความถี่ของความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ  $V_p$  และสัญญาณ  $V_s$

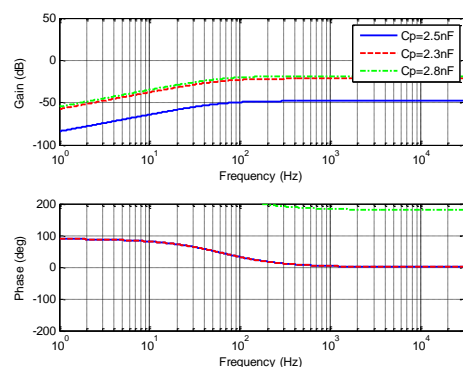
### 3.2.2 การจำลองการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริก

การจำลองการตอบสนองของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองในหัวข้อนี้จะเป็นการจำลองการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริก เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับการตอบสนองของวงจร เนื่องจากการนำวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองไปประยุกต์ใช้งานจริง ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิที่ใช้งาน ผลการจำลองการทำงานจะเปรียบเทียบการตอบสนองของวงจรที่ออกแบบกับวงจร IDSSA โดยจำลองให้ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกเปลี่ยนแปลงจาก 2.3 nF ถึง 2.8 nF เพื่อขึ้นครั้งละ 0.1 nF เนื่องจากเป็นช่วงที่ค่าความจุไฟฟ้าของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ได้ร้อมมีการเปลี่ยนแปลง และวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองทั้งสองวงจรถูกออกแบบให้เกิดความสมดุลที่ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกมีค่าเท่ากับ 2.5 nF ผลการจำลองการทำงานแสดงในภาพประกอบ 3-5 ถึงภาพประกอบ 3-7

ภาพประกอบ 3-5 แสดงการตอบสนองเชิงความถี่ของความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณตรวจจับและสัญญาณควบคุม เมื่อจำลองการการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริก โดยภาพประกอบ 3-5 (ก) เป็นผลตอบสนองของวงจรที่ออกแบบและภาพประกอบ 3-5 (ข) เป็นผลตอบสนองของวงจร IDSSA จากผลการจำลองการตอบสนองทั้งสองวงจรจะเห็นได้ว่า การการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกส่งผลต่อการตอบสนองของวงจรอย่างมีนัยสำคัญ ทำให้สัญญาณควบคุมถูกลดทอนน้อยลงและส่งผลให้สัญญาณตรวจจับที่วัดได้มีความผิดพลาดมากขึ้น ในช่วงความถี่ที่สูงกว่า 100 Hz เนื่องจากสัญญาณตรวจจับที่วัดได้จะมีสัญญาณควบคุมรวมอยู่ด้วย เมื่อค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกเปลี่ยนแปลงเป็น 2.3 nF วงจรที่ออกแบบและวงจร IDSSA สามารถลดทอนสัญญาณควบคุมได้เพียง 21 dB หรือลดทอนได้ 11 เท่า และ 19 dB หรือลดทอนได้ 9 เท่า ตามลำดับ เมื่อค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกเปลี่ยนแปลงเป็น 2.8 nF วงจรที่ออกแบบและวงจร IDSSA สามารถลดทอนสัญญาณควบคุมได้เพียง 19 dB หรือลดทอนได้ 9 เท่า และ 18 dB หรือลดทอนได้ 8 เท่า ตามลำดับ ทั้งกรณีที่ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกเปลี่ยนแปลงลดลงและเพิ่มขึ้นจาก 2.5 nF จะเห็นได้ว่าสัญญาณควบคุมถูกลดทอนน้อยลงเหมือนกัน แต่แตกต่างกันที่มุมเฟสของสัญญาณควบคุมที่จะวัดได้ที่สัญญาณตรวจจับ เมื่อค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกเปลี่ยนแปลงลดลงสัญญาณตรวจจับที่วัดได้จะมีเฟสเดียวกับสัญญาณควบคุมหรือมีมุมเฟสเท่ากับ 0 องศา และเมื่อค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นสัญญาณตรวจจับที่วัดได้จะมีเฟสตรงกันข้ามกับสัญญาณควบคุมหรือมีมุมเฟสเท่ากับ 180 องศา ซึ่งสามารถสังเกตได้จากมุมเฟสของผลการตอบสนองทั้งสองวงจร

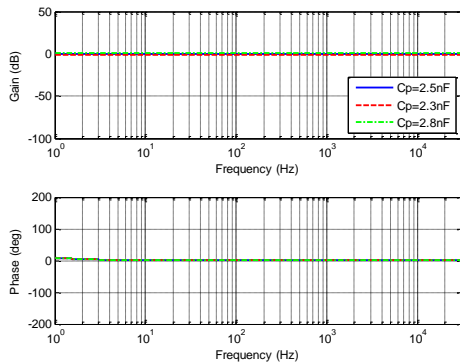


(ก) วงจรที่นำเสนอ

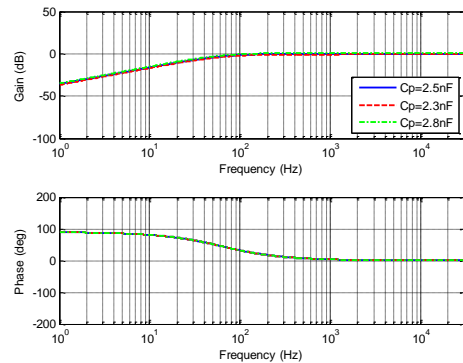


(ข) วงจร IDSSA

ภาพประกอบ 3-5 การตอบสนองเชิงความถี่ของความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ  $V_c$  และสัญญาณ  $V_s$  เมื่อค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกเปลี่ยนแปลง



(ก) วงจรที่นำเสนอสอน



(ข) วงจร IDSSA

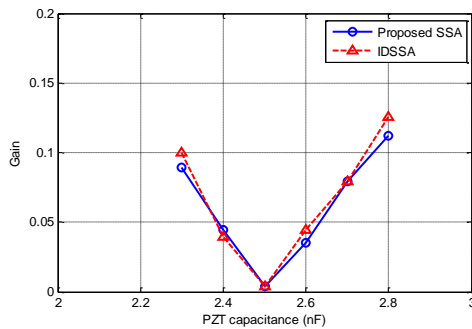
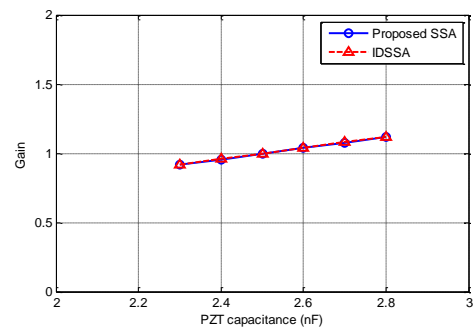
ภาพประกอบ 3-6 การตอบสนองเชิงความถี่ของของความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ  $V_p$  และสัญญาณ  $V_s$  เมื่อค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกเปลี่ยนแปลง

ภาพประกอบ 3-6 แสดงผลการตอบสนองเชิงความถี่ของความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณตรวจจับและสัญญาณที่ถูกสร้างมาจากตัวเพียโซอิเล็กทริก เมื่อจำลองการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริก โดยภาพประกอบ 3-6 (ก) เป็นผลตอบสนองของวงจรที่ออกแบบและภาพประกอบ 3-6 (ข) เป็นผลตอบสนองของวงจร IDSSA จากผลการจำลองการตอบสนองทั้งสองวงจรจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกส่งผลกระทบต่อตอบสนองของวงจรเพียงเล็กน้อยในช่วงความถี่ที่สูงกว่า 100 Hz เมื่อค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกเปลี่ยนแปลงเป็น 2.3 nF วงจรที่ออกแบบและวงจร IDSSA ทำให้สัญญาณที่ถูกสร้างมาจากตัวเพียโซอิเล็กทริกถูกลดทอนไป 0.76 dB และ 0.72 dB ตามลำดับ เมื่อค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกเปลี่ยนแปลงเป็น 2.8 nF วงจรที่ออกแบบและวงจร IDSSA ทำให้สัญญาณที่ถูกสร้างมาจากตัวเพียโซอิเล็กทริกถูกขยายไป 0.95 dB และ 0.98 dB ตามลำดับ ทั้งกรณีที่ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกเปลี่ยนแปลงลดลงและเพิ่มขึ้นจาก 2.5 nF จะเห็นได้ว่าสัญญาณที่ถูกสร้างมาจากตัวเพียโซอิเล็กทริกถูกลดทอนและขยายไปจากเดิมเพียงเล็กน้อย ซึ่งจะไม่ส่งผลกระทบต่อมุมเฟสของสัญญาณที่ถูกสร้างมาจากตัวเพียโซอิเล็กทริกหรือมีมุมเฟสเท่ากับ 0 องศา ซึ่งสามารถสังเกตได้จากมุมเฟสของผลการตอบสนองทั้งสองวงจร

ภาพประกอบ 3-7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราขยายและค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกที่เปลี่ยนแปลง ภาพประกอบ 3-7 (ก) เป็นค่าอัตราขยายของความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณตรวจจับและสัญญาณควบคุม จะเห็นได้ว่าเมื่อค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกมีการเปลี่ยนแปลงลดลงจาก 2.5 nF ค่าอัตราขยายของวงจรที่ออกแบบและวงจร IDSSA มีค่า

เพิ่มขึ้นด้วยอัตรา 0.43 เท่า/nF และ 0.48 เท่า/nF ตามลำดับ เมื่อค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจาก 2.5 nF ค่าอัตราขยายของวงจรถูกออกแบบและวงจรถูกปรับ IDSSA มีค่าเพิ่มขึ้นด้วยอัตรา 0.36 เท่า/nF และ 0.41 เท่า/nF ตามลำดับ ทั้งกรณีที่ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกเปลี่ยนแปลงลดลงและเพิ่มขึ้นจาก 2.5 nF พบว่าค่าอัตราขยายของวงจรถูกปรับเพิ่มขึ้น ซึ่งหมายความว่าสัญญาณควบคุมจะถูกขยายมากขึ้น และทำให้สัญญาณตรวจจับที่วัดได้จะมีสัญญาณควบคุมรวมอยู่ด้วยมากขึ้นตามไปด้วย ภาพประกอบ 3-7 (ข) เป็นค่าอัตราขยายของความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณตรวจจับและสัญญาณที่ถูกสร้างมาจากตัวเพียโซอิเล็กทริก จะเห็นได้ว่าเมื่อค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น ค่าอัตราขยายของวงจรถูกออกแบบและวงจรถูกปรับ IDSSA มีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย จากผลการจำลองการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกพบว่า มีผลต่ออัตราขยายของการตอบสนองของความสัมพัทธ์ระหว่างสัญญาณตรวจจับและสัญญาณควบคุมทั้งวงจรถูกออกแบบและวงจรถูกปรับ IDSSA อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกเป็นตัวแปรสำคัญในเงื่อนไขการออกแบบวงจรถูกปรับให้เกิดความสมดุล

จากการจำลองการทำงานของวงจรถูกปรับและตรวจจับด้วยตนเองในหัวข้อที่ 3.2.1 พบว่าวงจรถูกปรับและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบมีผลการตอบสนองที่ใกล้เคียงกับวงจรถูกปรับ IDSSA ในช่วงความถี่ที่ใช้งานหรือช่วงความถี่ที่สูงกว่า 100 Hz แต่สิ่งที่แตกต่างกันคือ วงจรถูกปรับและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบใช้อุปกรณ์ในวงจรถูกปรับที่น้อยกว่าวงจรถูกปรับ IDSSA และเงื่อนไขการออกแบบวงจรถูกปรับให้เกิดความสมดุลของวงจรถูกปรับมีเพียงเงื่อนไขเดียว ทำให้การออกแบบวงจรถูกปรับให้เกิดความสมดุลของวงจรถูกปรับสามารถออกแบบได้ง่ายกว่าวงจรถูกปรับ IDSSA แต่อย่างไรก็ตามทั้งสองวงจรถูกปรับก็ยังมีจุดด้อยเกี่ยวกับความไม่สมดุลของวงจรถูกปรับเมื่อค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกเปลี่ยนแปลงไป สามารถสังเกตได้จากการจำลองการทำงานของวงจรถูกปรับและตรวจจับด้วยตนเองในหัวข้อที่ 3.2.2 โดยการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกส่งผลกระทบต่อ การตอบสนองของความสัมพัทธ์ระหว่างสัญญาณตรวจจับและสัญญาณควบคุมทำให้สัญญาณตรวจจับที่วัดได้มีความผิดพลาดไปจากตอนที่วงจรถูกปรับเกิดความสมดุล ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าวงจรถูกปรับและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบ สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานแทนวงจรถูกปรับ IDSSA ได้และสามารถออกแบบค่าพารามิเตอร์ในวงจรถูกปรับได้ง่ายกว่าวงจรถูกปรับ IDSSA ภายใต้เงื่อนไขการออกแบบวงจรถูกปรับให้เกิดความสมดุลเพียงเงื่อนไขเดียว รายละเอียดการนำวงจรถูกปรับและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบไปประยุกต์ใช้งานจริงกับตัวซัพเคิลเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะกล่าวในหัวข้อถัดไป

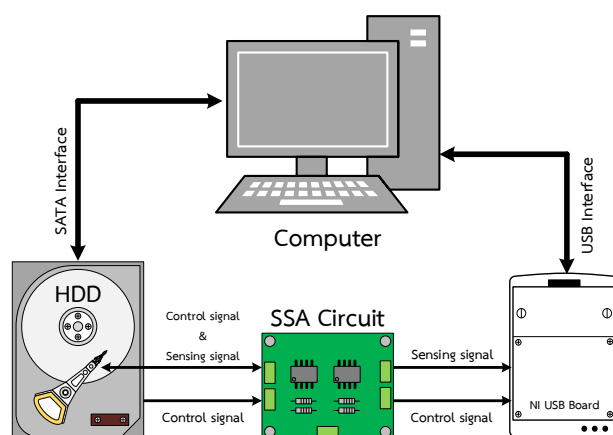
(ก)  $V_c$  กับ  $V_s$ (ข)  $V_p$  กับ  $V_s$ 

ภาพประกอบ 3-7 ค่าอัตราขยายของการตอบสนองของวงจรถับคลื่นและตรวจจับด้วยตนเอง

### 3.3 การออกแบบการทดลอง

การประยุกต์ใช้งานวงจรถับคลื่นและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบกับฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟจริงในอุตสาหกรรม เป็นการนำวงจรถับคลื่นและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบเพิ่มเข้าไปในระบบการควบคุมหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ เพื่อประยุกต์ใช้ตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนให้ทำหน้าที่เป็นทั้งตัวขับเคลื่อนและตัวตรวจจับไปพร้อมๆ กัน โดยในการทำหน้าที่ตรวจจับเพื่อใช้ในการตรวจจับการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ การทดลองในหัวข้อนี้จะใช้ในการศึกษาผลกระทบของวงจรถับคลื่นและตรวจจับด้วยตนเองต่อระบบฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ ศึกษาประสิทธิภาพของวงจรถับคลื่นและตรวจจับด้วยตนเอง และศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อวงจรถับคลื่นและตรวจจับด้วยตนเอง

ภาพประกอบ 3-8 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบที่ออกแบบสำหรับการทดลอง ประกอบด้วยฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ วงจรถับคลื่นและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบ บอร์ดเก็บข้อมูล (NI USB 6251) และคอมพิวเตอร์ วงจรถับคลื่นและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบถูกต่อกับตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ เพื่อใช้สำหรับป้อนสัญญาณควบคุมไปยังตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็ก โดยสัญญาณควบคุมจากตัวควบคุมหลักของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟจะถูกป้อนผ่านวงจรถับคลื่นและตรวจจับด้วยตนเอง และในขณะเดียวกันก็ตรวจจับสัญญาณที่ถูกสร้างมาจากตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็ก สัญญาณตรวจจับที่ได้จากวงจรและสัญญาณควบคุมถูกบันทึกเป็นข้อมูลสำหรับนำไปวิเคราะห์โดยใช้บอร์ดเก็บข้อมูล ซึ่งบอร์ดเก็บข้อมูลถูกต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านการเชื่อมต่อแบบ USB และใช้โปรแกรม LabVIEW บันทึกสัญญาณต่างๆ ด้วยความถี่ในการซิกตัวอย่าง (Sampling Rate) 100 kHz นอกจากนี้ฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟถูกต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านการเชื่อมต่อแบบ SATA เพื่อใช้สำหรับควบคุมการทำงานของฮาร์ดดิสก์ที่ใช้ในการทดลอง

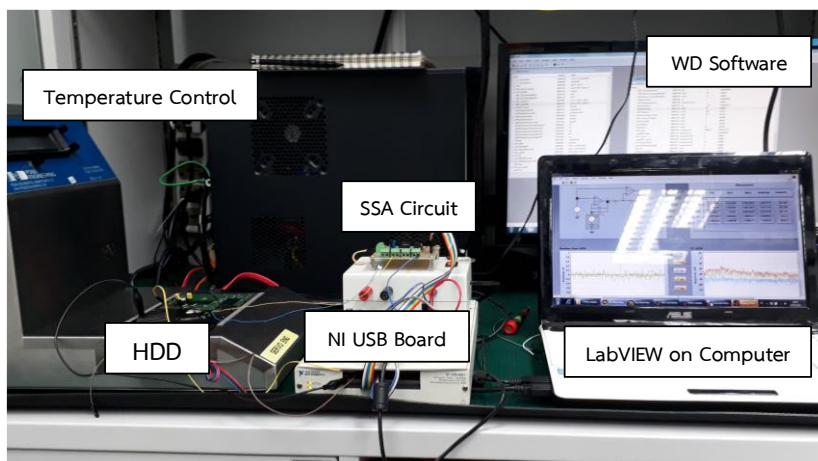


ภาพประกอบ 3-8 บล็อกไดอะแกรมของระบบที่ใช้ในการทดลอง

ภาพประกอบ 3-9 แสดงการทดลองการประยุกต์ใช้งานวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบกับตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่บริษัทเวสเทิร์นดิจิตอล (ประเทศไทย) ซึ่งประกอบด้วยฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ วงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบ บอร์ดเก็บข้อมูล (NI USB Board) โปรแกรม LabVIEW สำหรับบันทึกข้อมูล โปรแกรมของบริษัทเวสเทิร์นดิจิตอล (WD software) สำหรับควบคุมการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ และใช้บันทึกข้อมูลการตอบสนองของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กและสัญญาณความผิดพลาดของตำแหน่ง (PES) ของหัวอ่าน/เขียนในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ และเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature control) สำหรับควบคุมอุณหภูมิภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งสามารถปรับอุณหภูมิได้ตั้งแต่  $-5^{\circ}\text{C}$  ถึง  $70^{\circ}\text{C}$

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ใช้ในการทดลองเป็นฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขนาด 3.5 นิ้ว ความจุขนาด 4 TB ประกอบด้วยแผ่นดิสก์จำนวน 4 แผ่น และหัวอ่าน/เขียนจำนวน 8 หัว แผ่นดิสก์หมุนด้วยความเร็ว 5400 rpm สัญญาณควบคุมที่ป้อนไปยังตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนจะถูกป้อนไปยังหัวอ่าน/เขียนทั้ง 8 หัวพร้อมกัน ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชุด โดยชุดแรกสัญญาณควบคุมถูกป้อนไปยังตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนหัวที่ 1 ถึง 4 และชุดที่สองสัญญาณควบคุมถูกป้อนไปยังหัวอ่าน/เขียนที่ 5 ถึง 8 สำหรับการทดลองวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบถูกเพิ่มเข้าไปที่หัวอ่าน/เขียนที่ 5 ถึง 8 ส่วนหัวอ่าน/เขียนที่ 1 ถึง 4 ยังคงอยู่เหมือนเดิมเพื่อป้องกันความผิดพลาดที่เกิดจากการทดลองไม่ให้ส่งผลเสียหายต่อฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ในขณะที่ทำการทดลอง นอกจากนี้ตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนหนึ่งหัวมีความจุไฟฟ้าประมาณ 0.6 nF ดังนั้นในการทดลองใช้งานทั้งหมด 4 หัว ซึ่งต่อขนานกันอยู่ทำให้มีความจุไฟฟ้ารวมประมาณ 2.4 nF





ภาพประกอบ 3-9 การทดลองที่บริษัทเวสเทิร์นดิจิตอล

สำหรับในการทดลองวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบถูกออกแบบให้เกิดความสมดุลที่อุณหภูมิภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็น  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  โดยการปรับค่าความต้านทาน  $R_3$  จนวงจรเกิดความสมดุล ส่วนตัวบอร์ตรวจขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองถูกวางไว้บริเวณข้างนอกเครื่องควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งทำให้อุณหภูมิบริเวณบอร์ตรวจเป็นอุณหภูมิห้องประมาณ  $27\text{ }^{\circ}\text{C}$  ดังนั้นแสดงว่าพารามิเตอร์ทุกตัวในวงจรจะมีอุณหภูมิที่ค่อนข้างคงที่ ยกเว้นค่าความจุไฟฟ้าของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ พารามิเตอร์ของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
$C_p$	2.4 nF
$C_1$	10 nF
$R_1$	10 M $\Omega$
$R_3$	24 k $\Omega$
$R_4$	100 k $\Omega$

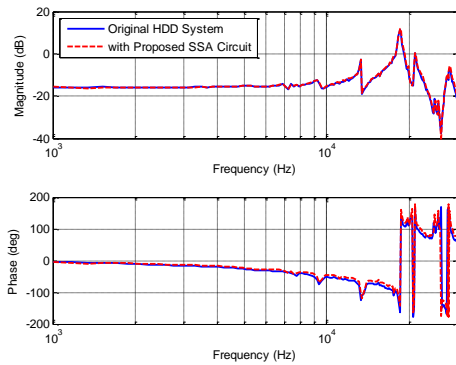
### 3.4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

สำหรับผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองจะแบ่งออกเป็น 3 การทดลอง คือ การศึกษาผลกระทบของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองต่อระบบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ การศึกษาประสิทธิภาพของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง และการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง ซึ่งรายละเอียดต่างๆ มีดังต่อไปนี้

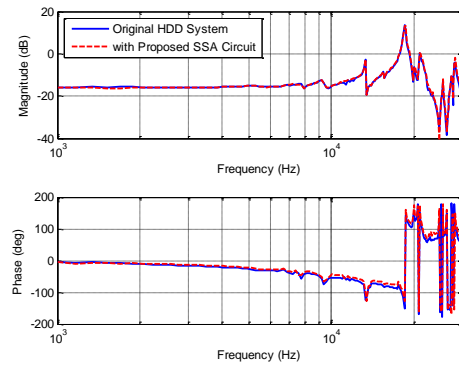
#### 3.4.1 ศึกษาผลกระทบของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองต่อระบบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

การศึกษาผลกระทบของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองต่อระบบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เป็นการศึกษาการทำงานของระบบควบคุมตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนเมื่อเพิ่มวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบเข้าไปในระบบ เนื่องจากวงจรถูกออกแบบมาโดยคำนึงถึงผลกระทบต่อระบบควบคุมตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนเดิม ดังนั้นการทดลองนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบควบคุมตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนเดิม โดยพิจารณาจากการตอบสนองของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนหัว และพิจารณาสัญญาณความผิดพลาดของตำแหน่ง (PES) ของหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ สำหรับการเก็บผลการทดลองจะใช้โปรแกรมของบริษัทเวสเทิร์นดิจิตอล สำหรับการทดลองจะพิจารณาหัวอ่าน/เขียนหัวที่ 5 ถึง 8 เนื่องจากเป็นชุดหัวอ่าน/เขียนที่เพิ่มวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบเข้าไป โดยผลการทดลองการตอบสนองของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กแสดงในภาพประกอบ 3-10 และผลการทดลองสัญญาณความผิดพลาดของตำแหน่ง (PES) ของหัวอ่าน/เขียนแสดงในภาพประกอบ 3-11

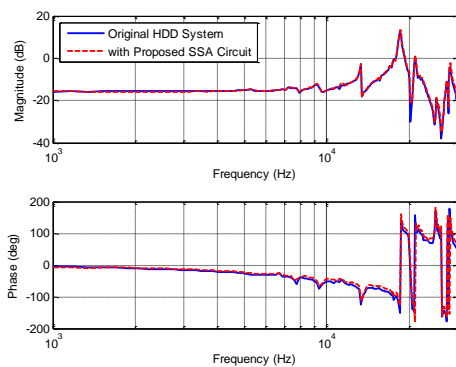
ภาพประกอบ 3-10 แสดงการเปรียบเทียบการตอบสนองของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนหัวที่ 5 ถึง 8 ระหว่างการตอบสนองที่ไม่มีวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองหรือระบบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์แบบดั้งเดิม (Original HDD System) กับการตอบสนองเมื่อมีวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองเพิ่มเข้าไปในระบบ (with Proposed SSA Circuit) จากผลการตอบสนองของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กจะเห็นได้ว่าทั้งสองกรณีตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนหัวที่ 5 ถึง 8 มีการตอบสนองที่ใกล้เคียงกันมาก แสดงให้เห็นว่าสัญญาณควบคุมที่ป้อนไปยังตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กสามารถป้อนผ่านวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบได้ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อตอบสนองของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียน



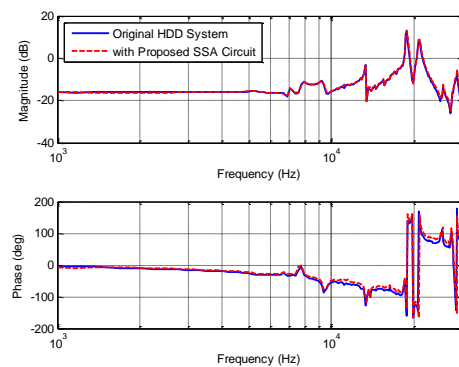
(ก) หัวอ่าน/เขียนที่ 5



(ข) หัวอ่าน/เขียนที่ 6



(ค) หัวอ่าน/เขียนที่ 7



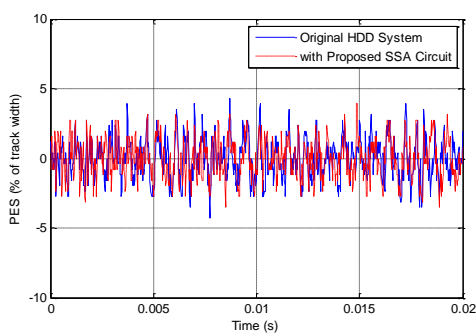
(ง) หัวอ่าน/เขียนที่ 8

ภาพประกอบ 3-10 การตอบสนองของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียน

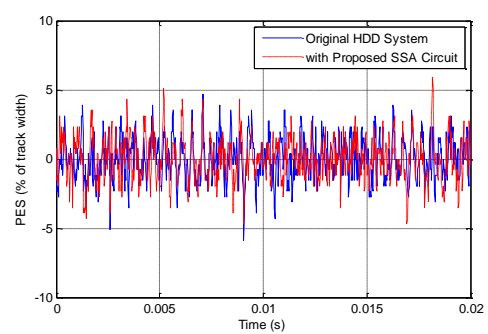
ภาพประกอบ 3-11 แสดงการเปรียบเทียบสัญญาณความผิดพลาดของตำแหน่งของหัวอ่าน/เขียนหัวที่ 5 ถึง 8 ระหว่างการตอบสนองที่ไม่มีวงจรถักเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองหรือระบบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์แบบดั้งเดิม (Original HDD System) กับการตอบสนองเมื่อมีวงจรถักเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองเพิ่มเข้าไปในระบบ (with Proposed SSA Circuit) จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าสัญญาณความผิดพลาดของตำแหน่งของหัวอ่าน/เขียนที่ 5 ถึง 8 ทั้งสองกรณีมีลักษณะที่ใกล้เคียงกันมาก และเมื่อพิจารณาค่า  $3\sigma$  ของสัญญาณความผิดพลาดของตำแหน่งดังแสดงในตารางที่ 3-3 จะเห็นได้ว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มวงจรถักเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบไม่ส่งผลต่อการควบคุมตำแหน่งหัวอ่าน/เขียน และหัวอ่าน/เขียนสามารถเคลื่อนที่ไปบนแผ่นดิสก์ได้ตามปกติ

ตารางที่ 3-3 ค่า  $3\sigma$  ของสัญญาณความผิดพลาดของตำแหน่งของแต่ละหัวอ่าน/เขียน

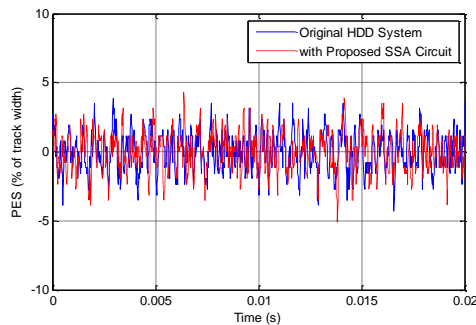
Case Study	$3\sigma$ ของ PES (% of track width)				
	Head 5	Head 6	Head 7	Head 8	Average
Original HDD System	4.11	4.49	4.04	4.50	4.29
with Proposed SSA Circuit	3.90	4.38	4.17	4.03	4.12



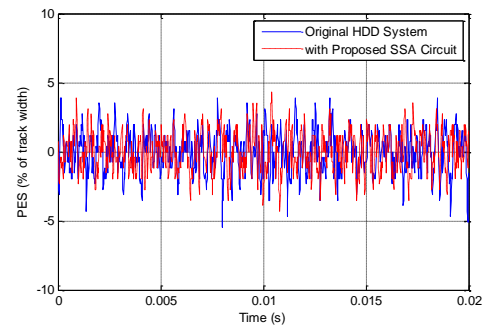
(ก) หัวอ่าน/เขียนที่ 5



(ข) หัวอ่าน/เขียนที่ 6



(ค) หัวอ่าน/เขียนที่ 7



(ง) หัวอ่าน/เขียนที่ 8

ภาพประกอบ 3-11 สัญญาณความผิดพลาดของตำแหน่งของหัวอ่าน/เขียนในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

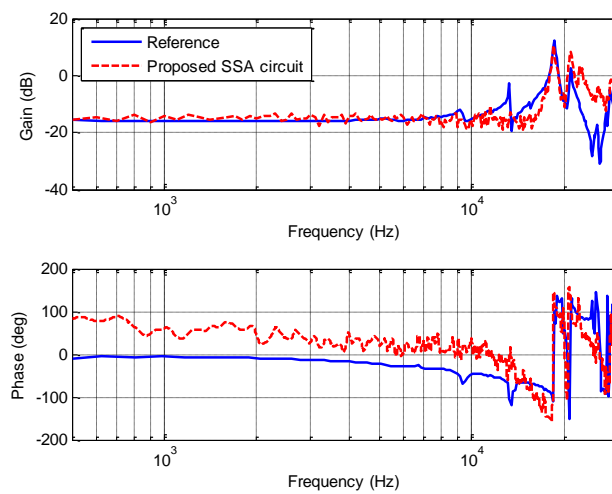
จากผลการทดลองของการศึกษาผลกระทบของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองต่อระบบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ แสดงให้เห็นว่าวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบสามารถประยุกต์ใช้งานกับระบบควบคุมหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียน และสามารถควบคุมหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ให้ทำงานได้อย่างปกติ

### 3.4.2 ศึกษาประสิทธิภาพของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง

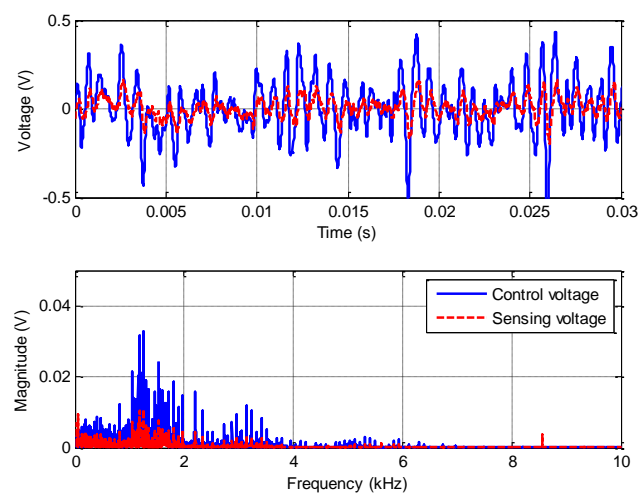
การศึกษาศักยภาพของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบ เป็นการนำวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบไปประยุกต์ใช้กับตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เพื่อตรวจจับการเคลื่อนที่ของหัวอ่าน/เขียนหรือการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นที่หัวอ่าน/เขียนในขณะที่ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ใช้งานตามปกติ ซึ่งการทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของสัญญาณตรวจจับของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบที่อุณหภูมิ 30 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่วงจรถูกออกแบบให้เกิดความสมดุล โดยพิจารณาผลการตอบสนองของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็ก เปรียบเทียบผลการวัดการตอบสนองระหว่างการใช่วงจรที่ออกแบบกับผลการตอบสนองอ้างอิงที่วัดโดยใช้โปรแกรมของบริษัทเวสเทิร์น ดิจิตอลดังแสดงในภาพประกอบ 3-12 นอกจากนี้ยังพิจารณาสัญญาณตรวจจับที่ได้จากวงจรเมื่อสัญญาณควบคุมจากตัวควบคุมหลักป้อนไปยังตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กดังแสดงในภาพประกอบ 3-13

ภาพประกอบ 3-12 แสดงผลการตอบสนองของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยเปรียบเทียบกันระหว่างผลการตอบสนองที่วัดด้วยวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบ (เส้นประสีแดง) กับผลการตอบสนองอ้างอิง (เส้นสีน้ำเงิน) ผลการตอบสนองที่วัดด้วยวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองสามารถทำการทดลองโดยการป้อนสัญญาณควบคุมที่เป็นสัญญาณไซน์ตั้งแต่ความถี่ 100 Hz ถึง 30 kHz ไปยังตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กผ่านวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบ ซึ่งสัญญาณควบคุมดังกล่าวถูกสร้างมาจากโปรแกรม LabVIEW แล้ววัดสัญญาณตรวจจับที่เอาต์พุตของวงจรและบันทึกสัญญาณ หลังจากนั้นนำสัญญาณที่บันทึกได้ไปวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อหาขนาดและมุมของการตอบสนองของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็ก จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าการตอบสนองของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่วัดด้วยวงจรที่ออกแบบมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับผลการตอบสนองอ้างอิง โดยเฉพาะที่ความถี่ประมาณ 18 kHz ซึ่งเป็นความถี่สั่นพ้องของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็ก และในช่วงความถี่ 100 Hz ถึง 10 kHz แต่ที่บางช่วงความถี่ (12 kHz) วงจรที่ออกแบบไม่สามารถวัดได้ เนื่องจากช่วงความถี่นี้เป็นช่วงความถี่ที่ตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กมีการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง ซึ่งวงจรที่ออกแบบสามารถตรวจจับการเคลื่อนที่ของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กได้ในแนวราบเท่านั้น เมื่อพิจารณามุมเฟสของการตอบสนองจะเห็นได้ว่าการตอบสนองที่วัดด้วยวงจรที่ออกแบบมีมุมเฟสแตกต่างไปจากการตอบสนองอ้างอิงประมาณ 90 องศาในช่วงความถี่ 100 Hz ถึง 10 kHz

ภาพประกอบ 3-13 แสดงสัญญาณตรวจจับของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบ (เส้นประสีแดง) เมื่อป้อนสัญญาณควบคุม (เส้นสีน้ำเงิน) จากตัวควบคุมหลักฮาร์ดดิสก์ไทร์ไฟไปยังตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็ก จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าสัญญาณตรวจจับที่วัดได้จากวงจรเป็นสัญญาณที่ถูกสร้างมาจากตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กเมื่อถูกกระตุ้นด้วยสัญญาณควบคุม นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กทำงานในช่วงความถี่ประมาณ 100 Hz ถึง 5 kHz ซึ่งสามารถสังเกตได้จากสเปกตรัมของสัญญาณควบคุม



ภาพประกอบ 3-12 การตอบสนองของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็ก

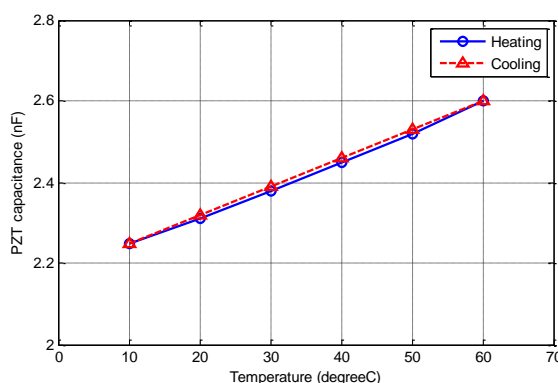


ภาพประกอบ 3-13 สัญญาณตรวจจับของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบ

จากผลการทดลองของการศึกษาประสิทธิภาพของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบ แสดงให้เห็นว่าวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบสามารถใช้ตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นทั้งตัวขับเคลื่อนและตัวตรวจจับได้ในเวลาเดียวกันและพร้อมๆ กัน โดยวงจรที่ออกแบบสามารถขับเคลื่อนให้หัวอ่าน/เขียนเคลื่อนที่ได้ตามปกติ และในขณะเดียวกันก็สามารถตรวจจับสัญญาณที่ถูกสร้างมาจากตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กได้ ซึ่งสัญญาณที่ตรวจจับได้จะเป็นสัญญาณที่สอดคล้องกับตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนที่เคลื่อนที่ไปตามสัญญาณควบคุมที่ป้อนไปยังตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็ก

### 3.4.3 ศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง

การศึกษผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง เป็นการประยุกต์ใช้งานวงจรที่ออกแบบกับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เมื่อฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ถูกใช้งานที่อุณหภูมิต่างๆ โดยการปรับให้อุณหภูมิภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีการเปลี่ยนแปลงด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิของบริษัทเวสเทิร์นดิจิตอล ซึ่งการทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ต่อสัญญาณตรวจจับของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบ จากการศึกษาพบว่าค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกมีการเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ [25] [58] [59] การเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกจะส่งผลต่อความไม่สมดุลของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกเป็นพารามิเตอร์ตัวหนึ่งในเงื่อนไขการออกแบบความสมดุลของวงจร ซึ่งสามารถสังเกตได้จากผลการจำลองการทำงานที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 3.2.2 ดังนั้นในการทดลองนี้จะศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ตั้งแต่ 10 °C ถึง 60 °C แล้วพิจารณาสัญญาณตรวจจับของวงจร ผลการทดลองประกอบด้วยการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ดังแสดงในภาพประกอบ 3-14 ผลการตอบสนองของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกที่อุณหภูมิต่างๆ ดังแสดงในภาพประกอบ 3-15 และภาพประกอบ 3-16 ผลของสัญญาณตรวจจับของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่อุณหภูมิต่างๆ ดังแสดงในภาพประกอบ 3-17 และสุดท้ายเป็นค่าอัตราขยายของวงจรและค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square: RMS) ของสัญญาณตรวจจับของวงจรที่อุณหภูมิต่างๆ ดังแสดงในภาพประกอบ 3-18

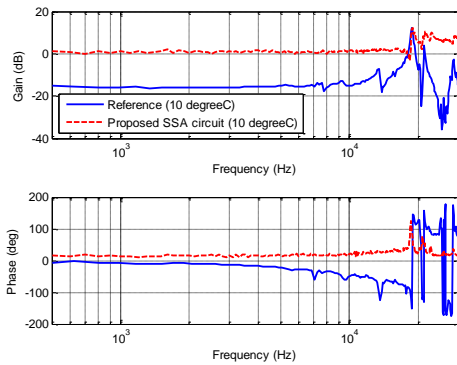


ภาพประกอบ 3-14 ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่อุณหภูมิต่างๆ

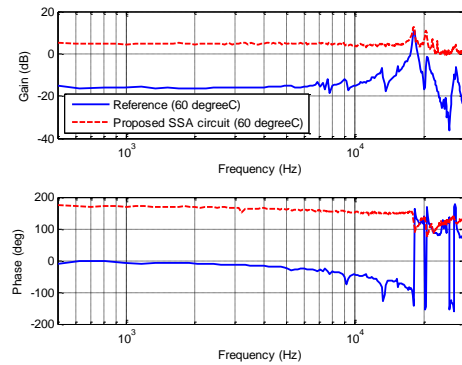
ภาพประกอบ 3-14 แสดงค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เพิ่มขึ้น ทั้งในกรณีที่เพิ่มอุณหภูมิจากน้อยไปมาก (Heating) และลดอุณหภูมิจากมากไปน้อย (Cooling) ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กจะส่งผลต่อความไม่สมดุลของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบ

ภาพประกอบ 3-15 แสดงผลการตอบสนองของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยเปรียบเทียบกันระหว่างผลการตอบสนองที่วัดด้วยวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบ (เส้นประสีแดง) กับผลการตอบสนองอ้างอิง (เส้นสีน้ำเงิน) ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยภาพประกอบ 3-15 (ก) แสดงผลการตอบสนองที่อุณหภูมิ 10 °C และภาพประกอบ 3-15 (ข) แสดงผลการตอบสนองที่อุณหภูมิ 60 °C จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าการตอบสนองอ้างอิงของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กในช่วงความถี่ 100 Hz ถึง 10 kHz ทั้งที่อุณหภูมิ 10 °C และ 60 °C มีการตอบสนองที่ใกล้เคียงกับการตอบสนองอ้างอิงที่อุณหภูมิ 30 °C ดังแสดงในภาพประกอบ 3-12 แต่การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีผลต่อการตอบสนองของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่ความถี่สั่นพ้อง โดยการตอบสนองที่อุณหภูมิ 10 °C ความถี่สั่นพ้องเลื่อนเพิ่มขึ้นไปเป็น 18.4 kHz และการตอบสนองที่อุณหภูมิ 60 °C ความถี่สั่นพ้องเลื่อนลดลงไปเป็น 17.6 kHz เมื่อพิจารณาผลการตอบสนองที่วัดด้วยวงจรที่ออกแบบจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีผลต่อวงจรที่ออกแบบทั้งในช่วงความถี่ 100 Hz ถึง 10 kHz และที่ความถี่สั่นพ้อง โดยในช่วงความถี่ 100 Hz ถึง 10 kHz อัตราขยายของการตอบสนองเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราขยายของการตอบสนองอ้างอิงทั้งที่อุณหภูมิ 10 °C และ 60 °C ส่วนที่ความถี่สั่นพ้องมีการเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะเดียวกับการตอบสนองอ้างอิงทั้งที่อุณหภูมิ 10 °C และ 60 °C





(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 3-15 การตอบสนองของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่อุณหภูมิต่างๆ

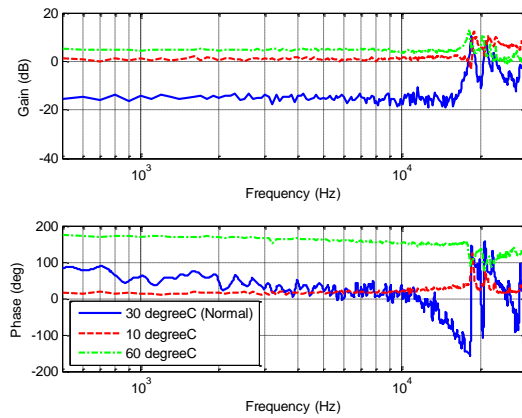
ภาพประกอบ 3-16 แสดงผลการตอบสนองของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่วัดด้วยวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบที่อุณหภูมิต่างๆ จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีผลต่อวงจรที่ออกแบบ เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปจาก  $30^{\circ}\text{C}$  ทำให้อัตราขยายของการตอบสนองเพิ่มขึ้น ซึ่งเห็นได้ชัดเจนในช่วงความถี่ 100 Hz ถึง 10 kHz เนื่องจากวงจรเกิดความไม่สมดุล เป็นผลมาจากค่าความจุไฟฟ้าของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่เปลี่ยนแปลงไป ทำให้เงื่อนไขการออกแบบให้วงจรเกิดความสมดุลไม่เป็นจริง แล้วส่งผลให้สัญญาณควบคุมที่ป้อนไปยังตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กไปปรากฏที่สัญญาณตรวจจับด้วย ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ความไม่สมดุลของวงจรในหัวข้อ 3.1.4 เมื่อพิจารณาอัตราขยายของการตอบสนองจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิ  $10^{\circ}\text{C}$  อัตราขยายเพิ่มขึ้นประมาณ 15 dB และที่อุณหภูมิ  $60^{\circ}\text{C}$  อัตราขยายเพิ่มขึ้น 20 dB เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราขยายที่อุณหภูมิ  $30^{\circ}\text{C}$  (-15 dB) และเมื่อพิจารณามุมเฟสของการตอบสนองพบว่ามุมเฟสมีการเปลี่ยนแปลงไปเป็น 0 องศา และ 180 องศา ที่อุณหภูมิ  $10^{\circ}\text{C}$  และอุณหภูมิ  $60^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ โดยมุมเฟสของการตอบสนองขึ้นอยู่กับเงื่อนไขความสมดุลของวงจร ถ้าเงื่อนไขความสมดุลของวงจรมีค่าน้อยกว่า 1 จะทำให้มุมเฟสของการตอบสนองเข้าใกล้ 0 องศา และถ้าเงื่อนไขความสมดุลของวงจรมีค่ามากกว่า 1 จะทำให้มุมเฟสของการตอบสนองเข้าใกล้ 180 องศา

ภาพประกอบ 3-17 แสดงสัญญาณตรวจจับของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบที่อุณหภูมิต่างๆ จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีผลต่อสัญญาณตรวจจับของวงจรที่ออกแบบ โดยแอมพลิจูดของสัญญาณตรวจจับมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปจาก  $30^{\circ}\text{C}$  ซึ่งเป็นผลมาจากสัญญาณควบคุมที่ปรากฏที่

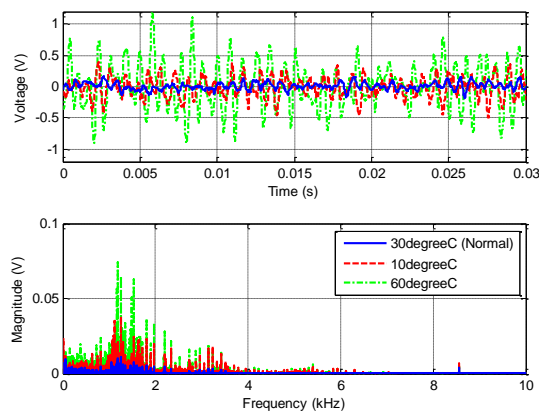
สัญญาณตรวจจับ โดยที่อุณหภูมิ 10 °C แอมพลิจูดของสัญญาณตรวจจับมีขนาดใหญ่ขึ้นประมาณ 5.6 เท่า และที่อุณหภูมิ 60 °C แอมพลิจูดของสัญญาณตรวจจับมีขนาดใหญ่ขึ้นประมาณ 10 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับแอมพลิจูดของสัญญาณตรวจจับที่อุณหภูมิ 30 °C

ภาพประกอบ 3-18 แสดงค่าอัตราขยายของวงจรรวมและค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณตรวจจับของวงจรรวมที่อุณหภูมิต่างๆ โดยภาพประกอบ 3-18 (ก) เป็นค่าอัตราขยายของวงจรรวมเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งคำนวณมาจากค่าเฉลี่ยของค่าอัตราขยายในช่วงความถี่ 100 Hz ถึง 10 kHz ของการตอบสนองที่แสดงในภาพประกอบ 3-16 จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นและลดลงไปจาก 30 °C ค่าอัตราขยายของวงจรรวมที่เพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้น โดยเมื่ออุณหภูมิลดลงและเพิ่มขึ้นค่าอัตราขยายของวงจรรวมที่เพิ่มขึ้นด้วยอัตรา 0.044 เท่า/°C และ 0.052 เท่า/°C ตามลำดับ และในภาพประกอบ 3-18 (ข) เป็นค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณตรวจจับของวงจรรวมเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งคำนวณมาจากสัญญาณตรวจจับของวงจรรวมที่แสดงในภาพประกอบ 3-17 จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณตรวจจับมีขนาดเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นและลดลงจาก 30 °C โดยเมื่ออุณหภูมิลดลงและเพิ่มขึ้นค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยมีขนาดเพิ่มขึ้นด้วยอัตรา 0.0071 V/°C และ 0.009 V/°C ตามลำดับ ซึ่งมีลักษณะเป็นเชิงเส้นเช่นเดียวกับค่าอัตราขยายของวงจรรวม การเพิ่มขึ้นของอัตราขยายของวงจรรวม และแอมพลิจูดของสัญญาณตรวจจับเป็นผลมาจากสัญญาณควบคุมที่รวมอยู่กับสัญญาณที่ถูกสร้างมาจากตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็ก เนื่องจากความไม่สมดุลของวงจรรวมที่เกิดจากผลของอุณหภูมิทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสัญญาณควบคุมลดลง ส่งผลให้สัญญาณตรวจจับที่ได้ส่วนใหญ่จะเป็นสัญญาณควบคุม ดังนั้นความไม่สมดุลของวงจรรวมที่เกิดจากผลของอุณหภูมิส่งผลให้สัญญาณตรวจจับของวงจรรวมมีความผิดพลาด

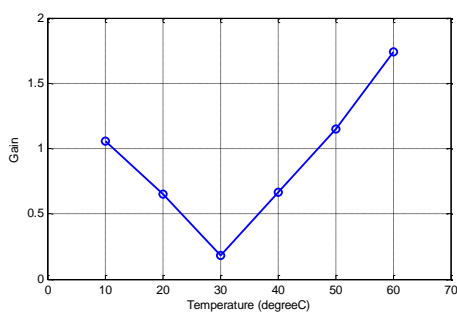
จากผลการทดลองของการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อวงจรรวมขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง แสดงให้เห็นว่าวงจรรวมขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิส่งผลให้ความจุไฟฟ้าของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เปลี่ยนแปลงไปด้วย ทำให้วงจรรวมที่ออกแบบเกิดความไม่สมดุลและทำให้สัญญาณตรวจจับของวงจรรวมเกิดความผิดพลาด



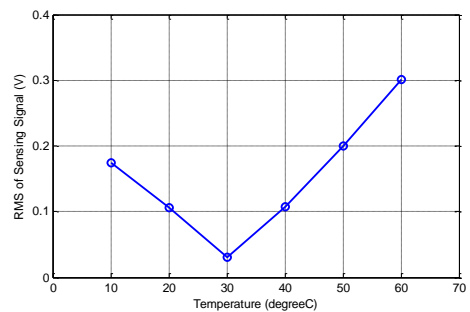
ภาพประกอบ 3-16 การตอบสนองของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่วัดด้วยวงจรถูก  
ออกแบบที่อุณหภูมิต่างๆ



ภาพประกอบ 3-17 สัญญาณตรวจจับของวงจรถักเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบที่  
อุณหภูมิต่างๆ



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 3-18 ค่าอัตราขยายของวงจรถักเคลื่อนและค่าการก่อกำล้างสองของสัญญาณตรวจจับของวงจรถูก  
ที่อุณหภูมิต่างๆ

### 3.5 สรุปผลการทดลอง

การออกแบบวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองในบทนี้ เป็นการพัฒนาและศึกษาการประยุกต์ใช้งานวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองกับตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เพื่อใช้งานตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กเป็นทั้งตัวขับเคลื่อนและตัวตรวจจับไปพร้อมๆ กัน การออกแบบวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองได้คำนึงความเหมาะสมของการนำไปประยุกต์ใช้งานกับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบเป็นวงจรที่ใช้อุปกรณ์ในวงจรลดลงและมีเงื่อนไขการออกแบบวงจรให้เกิดความสมดุลเพียงเงื่อนไขเดียว ทำให้เหมาะสมและง่ายสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งาน จากการศึกษาทั้งการจำลองการทำงานและการทดลองวงจรที่ออกแบบที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้นแสดงให้เห็นว่าวงจรที่ออกแบบมีคุณสมบัติและการตอบสนองที่ความเหมาะสมของการนำไปประยุกต์ใช้งานกับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยวงจรที่ออกแบบไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียน และสามารถควบคุมหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ให้ทำงานได้อย่างปกติ และวงจรที่ออกแบบสามารถตรวจจับสัญญาณที่ถูกสร้างมาจากตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กได้ในขณะที่สัญญาณควบคุมถูกป้อนไปยังตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็ก ซึ่งสัญญาณที่ตรวจจับได้เป็นสัญญาณที่สอดคล้องกับตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนที่เคลื่อนที่ไป แต่อย่างไรก็ตามวงจรที่ออกแบบก็ยังมีปัญหาเกี่ยวกับความไม่สมดุลของวงจร ซึ่งความไม่สมดุลของวงจรเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ทำให้สัญญาณตรวจจับของวงจรเกิดความผิดพลาด ดังนั้นเพื่อไม่ให้ส่งผลต่อการนำวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบไปประยุกต์ใช้งาน งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีการที่ใช้ในการชดเชยความผิดพลาดของสัญญาณตรวจจับ ซึ่งรายละเอียดต่างๆ จะกล่าวในบทที่ 4

## บทที่ 4

### การออกแบบวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้

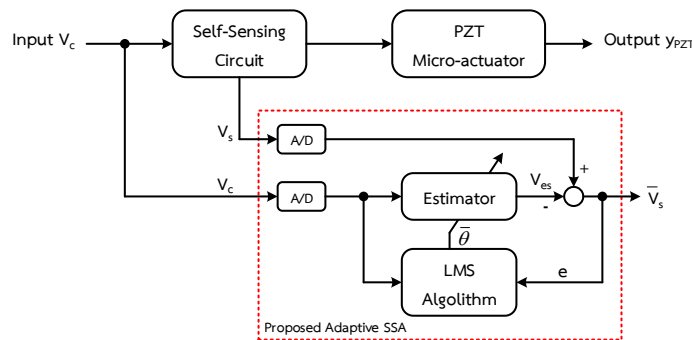
บทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้ เพื่อแก้ปัญหาค่าความผิดพลาดของสัญญาณตรวจจับของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบในบทที่ 3 เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยในบทนี้จะอธิบายการออกแบบวิธีการแบบปรับตัวได้สำหรับชดเชยความผิดพลาดของสัญญาณตรวจจับ อธิบายการทำงานของวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้ ประเมินประสิทธิภาพของวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้ ผลการประยุกต์ใช้งานวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้สำหรับการตรวจจับการสั่นสะเทือนจากภายนอก และตรวจสอบความถูกต้องของสัญญาณตรวจจับที่ได้จากวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้

#### 4.1 วิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้

วิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้เป็นวิธีการที่ถูกออกแบบและนำเสนอเพื่อลดความผิดพลาดของสัญญาณตรวจจับที่เกิดจากความไม่สมดุลของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบ ซึ่งประกอบด้วยวิธีการออกแบบวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้ และวิธีการกำลังสองเฉลี่ยต่ำสุด มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

##### 4.1.1 การออกแบบวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้

จากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้าของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนมีการเปลี่ยนแปลงไป ทำให้เกิดความไม่สมดุลของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบ และส่งผลให้สัญญาณที่ตรวจจับได้จากวงจรเกิดความผิดพลาด ดังนั้นจึงได้มีแนวคิดที่จะออกแบบวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้ เพื่อชดเชยความผิดพลาดของสัญญาณตรวจจับของวงจร โดยการประยุกต์ใช้วิธีการแบบปรับตัวได้ร่วมกับวงจรตัวขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบ วิธีการแบบปรับตัวได้ทำหน้าที่ในการประมาณสัญญาณในเทอมของสัญญาณควบคุม ซึ่งเป็นสัญญาณที่ทำให้สัญญาณตรวจจับเกิดความผิดพลาด สัญญาณที่ประมาณได้จากวิธีการแบบปรับตัวได้จะถูกใช้สำหรับชดเชยหรือหักล้างกับสัญญาณควบคุมที่รวมอยู่กับสัญญาณตรวจจับของวงจร บล็อกไดอะแกรมของวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้ที่ออกแบบแสดงในภาพประกอบ 4-1



ภาพประกอบ 4-1 บล็อกไดอะแกรมของวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้

ภาพประกอบ 4-1 แสดงบล็อกไดอะแกรมของวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้ ประกอบด้วย 2 ส่วนหลักๆ คือ ตัวประมาณสัญญาณ (Estimator) และวิธีการที่ใช้ในการปรับตัว (Adaptive algorithm) ตัวประมาณสัญญาณทำหน้าที่ในการประมาณสัญญาณควบคุม ( $V_{es}$ ) ที่คาดว่าจะรวมอยู่ในสัญญาณตรวจจับ โดยการนำสัญญาณควบคุม ( $V_c$ ) ที่ป้อนไปยังตัวขับเคลื่อนเพียงโซ่อิเล็กทริกขนาดเล็กไปคูณกับค่าอัตราขยายปรับตัวได้ (Adaptive Gain,  $\bar{\theta}$ ) ซึ่งเป็นค่าอัตราขยายที่สามารถปรับตัวได้ตามความผิดพลาดของสัญญาณตรวจจับ วิธีการที่ใช้ในการปรับตัวทำหน้าที่ปรับค่าอัตราขยายปรับตัวได้ โดยใช้สัญญาณควบคุมและสัญญาณความผิดพลาด ( $e$ ) ในการคำนวณค่าอัตราขยายปรับตัวได้ สัญญาณในเทอมของสัญญาณควบคุมที่ประมาณด้วยตัวประมาณถูกนำไปลบกับสัญญาณตรวจจับของวงจร เพื่อหาค่าสัญญาณควบคุมที่รวมอยู่ในสัญญาณตรวจจับ ค่าอัตราขยายปรับตัวได้จะถูกปรับไปเรื่อยๆ จนทำให้สัญญาณความผิดพลาดหรือสัญญาณตรวจจับที่ประมาณได้ ( $\bar{V}_s$ ) มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งหมายความว่าสัญญาณควบคุมที่รวมอยู่ในสัญญาณตรวจจับถูกกำจัดจนหมด จนทำให้สัญญาณตรวจจับที่ได้มีเฉพาะสัญญาณที่ถูกสร้างมาจากตัวขับเคลื่อนเพียงโซ่อิเล็กทริกขนาดเล็ก ( $V_p$ )

วิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้ที่ออกแบบสามารถวิเคราะห์ด้วยสมการได้ดังนี้ โดยพิจารณาจากสมการ (3-4) ในบทที่ 3 จะเห็นได้ว่าสัญญาณตรวจจับของวงจรจะประกอบด้วยสัญญาณในเทอมของสัญญาณควบคุมและสัญญาณที่ถูกสร้างมาจากตัวขับเคลื่อนเพียงโซ่อิเล็กทริกขนาดเล็ก ดังนั้นเพื่อให้ง่ายสำหรับการวิเคราะห์จึงกำหนดให้

$$\theta = 1 - \frac{R_4 C_p}{R_3 C_1} \quad (4-1)$$

เมื่อ  $\theta$  คือ อัตราขยายของสัญญาณในเทอมของสัญญาณควบคุม และเมื่อแทนสมการ (4-1) ลงในสมการ (3-4) ก็จะได้

$$V_s(s) = \theta V_c(s) + (1-\theta)V_p(s) \quad (4-2)$$

ดังนั้นเพื่อกำจัดสัญญาณในเทอมของสัญญาณควบคุม ตัวประมาณของวิธีการปรับตัวได้จะต้องประมาณสัญญาณในเทอมของสัญญาณควบคุมให้ใกล้เคียงกับสัญญาณควบคุมที่รวมอยู่ในสัญญาณตรวจจับ โดยการกำหนดให้  $\bar{\theta}$  เป็นอัตราขยายปรับตัวได้ที่ใช้สำหรับประมาณสัญญาณในเทอมของสัญญาณควบคุม ซึ่งถูกปรับโดยใช้วิธีการแบบปรับตัวได้ สำหรับสัญญาณที่ประมาณให้อยู่ในเทอมของสัญญาณควบคุมแสดงดังสมการ (4-3)

$$V_{es}(s) = \bar{\theta} V_c(s) \quad (4-3)$$

และเมื่อนำสัญญาณตรวจจับที่ได้จากวงจรในสมการ (4-2) ลบกับสัญญาณที่ประมาณด้วยตัวประมาณในสมการ (4-3) จะได้

$$\bar{V}_s(s) = V_s(s) - V_{es}(s) = \theta V_c(s) + (1-\theta)V_p(s) - \bar{\theta} V_c(s) \quad (4-4)$$

ถ้าวิธีการแบบปรับตัวได้สามารถปรับค่า  $\bar{\theta} \approx \theta$  จะได้

$$\bar{V}_s(s) = (1-\theta)V_p(s) \quad (4-5)$$

จากสมการ (4-5) จะเห็นได้ว่าสัญญาณตรวจจับที่ได้จากวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้มีเฉพาะสัญญาณที่ถูกสร้างมาจากตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กภายใต้เงื่อนไข  $\bar{\theta} \approx \theta$  แต่อย่างไรก็ตามขนาดของสัญญาณที่ถูกสร้างมาจากตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่ตรวจจับได้จะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าความจุไฟฟ้าของตัวขับเคลื่อนขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็ก ดังนั้นเพื่อให้ได้สัญญาณตรวจจับมีความถูกต้องที่สุดสามารถทำได้โดยการนำสัญญาณตรวจจับที่ประมาณได้ไปคูณกับเทอมของ  $1/(1-\bar{\theta})$  เพื่อหักล้างกับอัตราขยาย  $1-\bar{\theta}$  ที่คูณอยู่กับสัญญาณที่ถูกสร้างมาจากตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็ก ทำให้ได้สัญญาณตรวจจับที่มีความถูกต้องมากที่สุดภายใต้เงื่อนไข  $\bar{\theta} \approx \theta$  ดังแสดงในสมการ (4-6)

$$\bar{V}_s(s) \approx V_p(s) \quad (4-6)$$

จากสมการ (4-6) จะเห็นได้ว่าเมื่อวิธีการแบบปรับตัวได้สามารถปรับอัตราขยายปรับตัวได้ให้มีค่าใกล้เคียงกับอัตราขยายในเทอมของสัญญาณควบคุมของวงจร ทำให้สามารถชดเชยหรือหักล้างสัญญาณในเทอมของสัญญาณควบคุมได้ และทำให้สัญญาณตรวจจับที่ประมาณได้จากวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้มีเฉพาะสัญญาณในเทอมของสัญญาณที่ถูกสร้างจากตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กและเป็นสัญญาณที่ต้องการ

#### 4.1.2 การประยุกต์ใช้วิธีการกำลังสองเฉลี่ยต่ำสุด

วิธีการแบบปรับตัวได้สำหรับปรับค่าอัตราขยายปรับตัวได้ในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการที่เรียกว่า วิธีการกำลังสองเฉลี่ยต่ำสุด (Least Mean Square: LMS) เนื่องจากเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อนมาก และเหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง วิธีการกำลังสองเฉลี่ยต่ำสุดเป็นวิธีการที่พิจารณาค่ากำลังสองเฉลี่ยต่ำสุดของสัญญาณความผิดพลาด ซึ่งเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้สำหรับลดความผิดพลาดของสัญญาณตรวจจับ เนื่องจากสัญญาณตรวจจับจะมีค่าต่ำสุดเมื่อวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองเกิดความสมดุล ดังนั้นถ้าวิธีการกำลังสองเฉลี่ยต่ำสุดสามารถปรับค่าอัตราขยายปรับตัวได้จนทำให้สัญญาณตรวจจับมีค่าต่ำสุด แสดงว่าสัญญาณตรวจจับที่ประมาณได้จากวิธีการดังกล่าวจะเป็นสัญญาณที่ใกล้เคียงสัญญาณตรวจจับของวงจรเมื่อวงจรเกิดความสมดุล สำหรับวิธีการกำลังสองเฉลี่ยต่ำสุด ประกอบด้วยส่วนสำคัญหลักๆ ดังนี้ คือ ค่าความผิดพลาด ( $e$ ) และสมการฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective Function) จากสมการ (4-3) สามารถแปลงให้อยู่ในรูปของสัญญาณไม่ต่อเนื่องดังแสดงในสมการ (4-7)

$$V_{es}(n) = \bar{\theta}V_c(n) \quad (4-7)$$

และค่าความผิดพลาด ซึ่งเป็นผลต่างระหว่างสัญญาณตรวจจับกับสัญญาณประมาณ  $V_{es}$  ดังแสดงในสมการ (4-8)

$$e(n) = V_s(n) - V_{es}(n) \quad (4-8)$$

และกำหนดให้สมการฟังก์ชันเป้าหมาย ซึ่งเป็นการหาค่ากำลังสองเฉลี่ยของค่าความผิดพลาดดังแสดงในสมการ (4-9) เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณจึงสามารถประมาณให้ฟังก์ชันเป้าหมายมีค่าเท่ากับ  $e^2(n)$

$$J(n) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N e^2(n) \approx e^2(n) \Big|_{n \rightarrow \infty} \quad (4-9)$$

สำหรับสมการที่ใช้ในการปรับตัวของอัตราขยายปรับตัวได้ ( $\bar{\theta}$ ) จะใช้สมการของวิธีการ steepest descent ดังแสดงในสมการ (4-10) ซึ่งเป็นการหาค่าอัตราขยายปรับตัวได้ในปัจจุบัน ( $\bar{\theta}(n)$ ) โดยใช้ค่าในอัตราขยายปรับตัวได้ในอดีต ( $\bar{\theta}(n-1)$ ) ลบกับค่าอัตราการปรับตัว (Step Size,  $\mu$ ) คูณกับค่า gradient ของฟังก์ชันเป้าหมาย

$$\bar{\theta}(n) = \bar{\theta}(n-1) - \frac{1}{2} \mu [\nabla J(n)] \quad (4-10)$$



การหาค่า gradient ของฟังก์ชันเป้าหมายเป็นการหาค่ากำลังสองเฉลี่ยของค่าความผิดพลาดต่ำที่สุด โดยการหาค่าอนุพันธ์ (Differential) ของฟังก์ชันเป้าหมายเทียบกับค่าอัตราขยายปรับตัวได้ ( $\bar{\theta}$ ) ที่ต้องการปรับค่า ซึ่งแสดงในสมการ (4-11)

$$\begin{aligned}\nabla J(n) &= \frac{\partial J(n)}{\partial \theta} = \frac{\partial e^2(n)}{\partial \theta} = 2e(n) \frac{\partial e(n)}{\partial \theta} \\ &= 2e(n) \frac{\partial [V_s(n) - V_{es}(n)]}{\partial \theta} \\ &= -2e(n) \frac{\partial V_{es}(n)}{\partial \theta} \\ &= -2e(n) \frac{\partial (\bar{\theta}(n)V_c(n))}{\partial \theta} \\ &= -2e(n)V_c(n)\end{aligned}\tag{4-11}$$

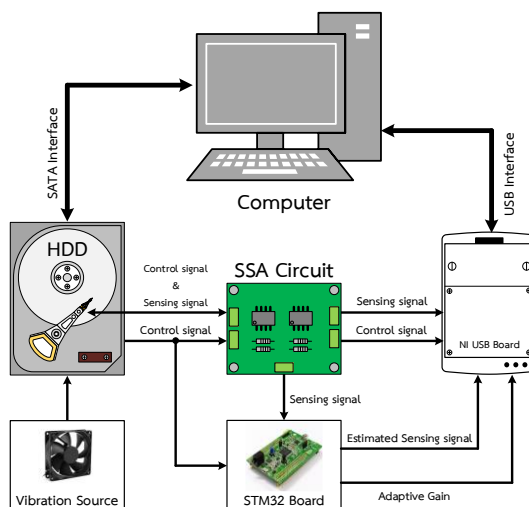
และเมื่อแทนสมการ (4-11) ลงในสมการ (4-10) จะได้สมการที่ใช้ในการปรับตัวของค่าอัตราขยายปรับตัวได้โดยใช้วิธีการกำลังสองเฉลี่ยต่ำสุดดังแสดงในสมการ (4-12)

$$\bar{\theta}(n) = \bar{\theta}(n-1) + \mu e(n)V_c(n)\tag{4-12}$$

จากสมการ (4-12) จะเห็นได้ว่าการปรับตัวของค่าอัตราขยายปรับตัวได้ประกอบไปด้วยค่าอัตราขยายปรับตัวได้ในอดีต ค่าอัตราการปรับตัว ค่าความผิดพลาด และสัญญาณควบคุม ดังนั้นในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงจะใช้สมการ (4-7) ในการประมาณสัญญาณในเทอมของสัญญาณควบคุม ใช้สมการ (4-8) ในการหาค่าความผิดพลาด และใช้สมการ (4-12) ในการปรับค่าอัตราขยายปรับตัวได้ นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าการหาค่าความผิดพลาดของวิธีการกำลังสองเฉลี่ยต่ำสุด คือ ค่าเดียวกับสัญญาณตรวจจับที่ประมาณได้ ซึ่งจะเป็นค่าที่ต่ำที่สุดที่ได้จากการใช้วิธีการแบบปรับตัวได้ และสอดคล้องกับสัญญาณตรวจจับของวงจรเมื่อวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองเกิดความสมดุล

## 4.2 การออกแบบการทดลอง

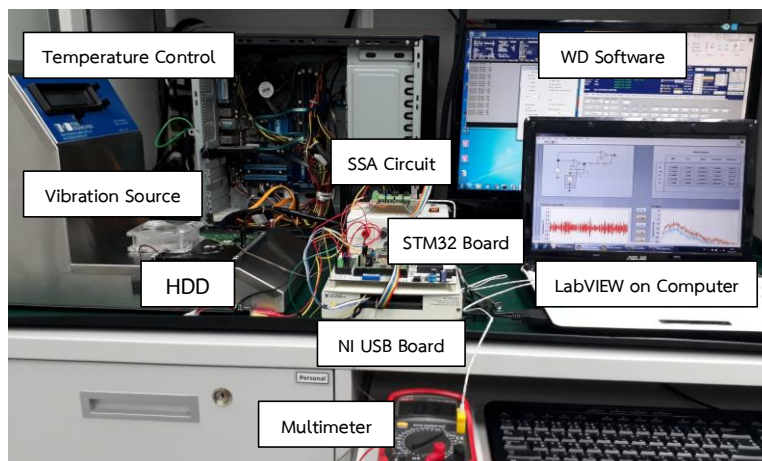
การประยุกต์ใช้งานวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้ที่ออกแบบกับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จริงในอุตสาหกรรม เป็นการนำวิธีการแบบปรับตัวได้ไปใช้งานร่วมกับวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบและตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เพื่อชดเชยความผิดพลาดของสัญญาณตรวจจับที่ได้จากวงจรที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เพื่อให้สัญญาณตรวจจับมีความถูกต้องมากขึ้น การทดลองในหัวข้อนี้จะใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพและหาค่าอัตราการปรับตัวที่เหมาะสมที่สุดของวิธีการแบบปรับตัวได้ ศึกษาการประยุกต์ใช้งานจริงของวิธีการแบบปรับตัวได้ และศึกษาความถูกต้องของวิธีการแบบปรับตัวได้



ภาพประกอบ 4-2 บล็อกไดอะแกรมของระบบที่ใช้ในการทดลอง

ภาพประกอบ 4-2 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบที่ออกแบบสำหรับการประยุกต์ใช้งานวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้กับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งมีลักษณะเหมือนกับการออกแบบทดลองในบทที่ 3 แต่มีส่วนของบอร์ดประมวลผล STM32 และแหล่งกำเนิดการสั่นสะเทือน (Vibration Source) เพิ่มเข้ามา บอร์ดประมวลผล STM32 ใช้สำหรับการดำเนินการวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้ โดยสัญญาณควบคุมและสัญญาณตรวจจับถูกป้อนไปยังบอร์ดประมวลผล STM32 ด้วยความถี่ในการซีกตัวอย่าง 50 kHz เพื่อใช้สำหรับชดเชยความผิดพลาดของสัญญาณตรวจจับด้วยวิธีการแบบปรับตัวได้ สัญญาณตรวจจับประมาณ (Estimated Sensing Signal) และค่าอัตราขยายแบบปรับตัวได้จากวิธีการแบบปรับตัวได้ ถูกบันทึกเป็นข้อมูลสำหรับนำไปวิเคราะห์โดยใช้บอร์ดเก็บข้อมูล โดยสัญญาณดังกล่าวถูกบันทึกด้วยความถี่ในการซีกตัวอย่าง 50 kHz ส่วนแหล่งกำเนิดการสั่นสะเทือนทำหน้าที่สร้างการสั่นสะเทือนไปรบกวนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขณะทำการทดลอง

ภาพประกอบ 4-3 แสดงการทดลองการประยุกต์ใช้งานวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้กับตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่บริษัทเวสเทิร์นดิจิตอล (ประเทศไทย) ซึ่งประกอบด้วยฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ วงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบ บอร์ดเก็บข้อมูล โปรแกรม LabVIEW บอร์ดประมวลผล STM32 โปรแกรมของบริษัทเวสเทิร์นดิจิตอล เครื่องควบคุมอุณหภูมิ และแหล่งกำเนิดการสั่นสะเทือน ซึ่งใช้พัดลมระบายอากาศ (Ventilation Fan)



ภาพประกอบ 4-3 การทดลองที่บริษัทเวสเทิร์นดิจิตอล

สำหรับการทดลองในบทนี้ใช้ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ 2 รุ่น โดยรุ่นแรกเป็นฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ชนิดเดียวกับที่ใช้ในบทที่ 3 และรุ่นที่สองเป็นฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขนาด 3.5 นิ้ว ความจุขนาด 6 TB ประกอบด้วยแผ่นดิสก์จำนวน 5 แผ่น และหัวอ่าน/เขียนจำนวน 10 หัว แผ่นดิสก์หมุนด้วยความเร็ว 5400 rpm สัญญาณควบคุมถูกป้อนไปยังตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนทั้ง 10 หัวพร้อมกัน ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชุด โดยชุดแรกสัญญาณควบคุมถูกป้อนไปยังตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนหัวที่ 1 ถึง 5 และชุดที่สองสัญญาณควบคุมถูกป้อนไปยังหัวอ่าน/เขียนที่ 6 ถึง 10 สำหรับการทดลองวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบถูกเพิ่มเข้าไปที่หัวอ่าน/เขียนที่ 6 ถึง 10 ส่วนหัวอ่าน/เขียนที่ 1 ถึง 5 ยังคงอยู่เหมือนเดิมเพื่อป้องกันความผิดพลาดที่เกิดจากการทดลองไม่ให้ส่งผลเสียหายต่อฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในขณะทำการทดลอง นอกจากนี้ตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนหนึ่งหัวมีค่าความจุไฟฟ้าประมาณ 0.6 nF ดังนั้นในการทดลองใช้งานทั้งหมด 5 หัว ซึ่งต่อขนานกันอยู่ทำให้มีค่าความจุไฟฟ้ารวมประมาณ 3 nF

สำหรับในการทดลองวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบถูกออกแบบให้เกิดความสมดุลที่อุณหภูมิภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็น 30 °C โดยการปรับค่าความต้านทานในวงจรจนวงจรเกิดความสมดุล ส่วนตัวบอร์ดวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองถูกวางไว้บริเวณข้างนอกเครื่องควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งทำให้อุณหภูมิบริเวณบอร์ดวงจรเป็นอุณหภูมิห้องประมาณ 27 °C ดังนั้นแสดงว่าพารามิเตอร์ทุกตัวในวงจรจะมีอุณหภูมิที่ค่อนข้างคงที่ ยกเว้นค่าความจุไฟฟ้าของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ พารามิเตอร์ของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบที่ใช้ในการทดลองสำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์รุ่น 4 TB แสดงในตารางที่ 3-2 และสำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์รุ่น 6 TB แสดงในตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ใช้ในการทดลอง

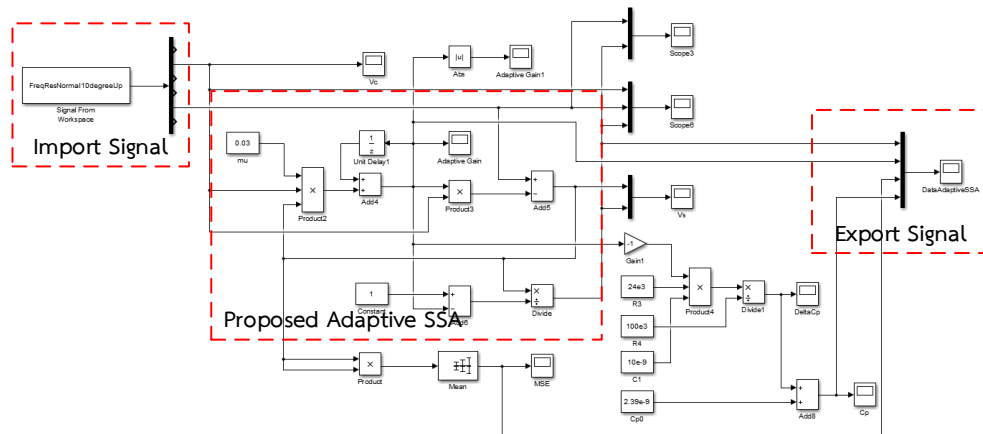
พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
$C_p$	3 nF
$C_1$	10 nF
$R_1$	10 M $\Omega$
$R_3$	30 k $\Omega$
$R_4$	100 k $\Omega$

#### 4.3 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

สำหรับผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองจะแบ่งออกเป็น 3 การทดลอง คือ การประเมินประสิทธิภาพของวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้ การประยุกต์ใช้งานวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้ และการตรวจสอบความถูกต้องของวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้ ซึ่งรายละเอียดต่างๆ มีดังต่อไปนี้

##### 4.3.1 ประสิทธิภาพของวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้

การประเมินประสิทธิภาพของวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้ที่ออกแบบทำได้โดยการประยุกต์ใช้วิธีการแบบปรับตัวได้กับสัญญาณตรวจจับและสัญญาณควบคุมที่บันทึกมาจากวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบ เพื่อทดสอบแนวคิดการออกแบบและสมการของวิธีการแบบปรับตัวได้ การประยุกต์ใช้วิธีการแบบปรับตัวได้เพื่อชดเชยความผิดพลาดของสัญญาณตรวจจับที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ได้ใช้โปรแกรม MATLAB Simulink โดยการนำสมการของวิธีการแบบปรับตัวได้ที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้นเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมดังแสดงในภาพประกอบ 4-4 ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ส่วนการนำเข้าสัญญาณตรวจจับและสัญญาณควบคุมที่บันทึกมาจากการทดลองการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ส่วนการประมาณสัญญาณตรวจจับและการปรับค่าอัตราขยายด้วยวิธีการแบบปรับตัวได้แบบกำลังสองเฉลี่ยต่ำสุด และส่วนการบันทึกข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์

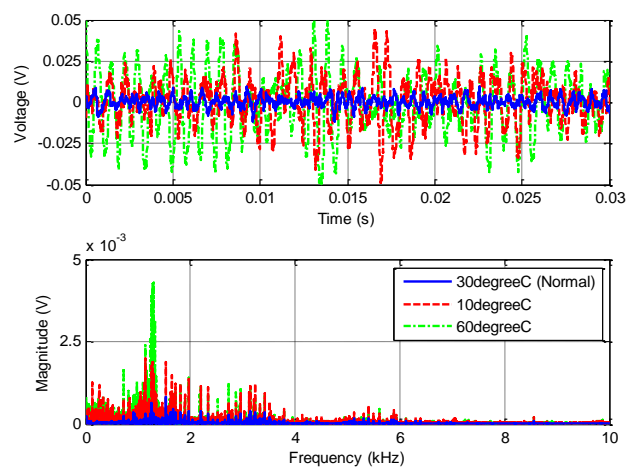


ภาพประกอบ 4-4 บล็อกไดอะแกรมของวิธีการแบบปรับตัวได้ในโปรแกรม MATLAB Simulink

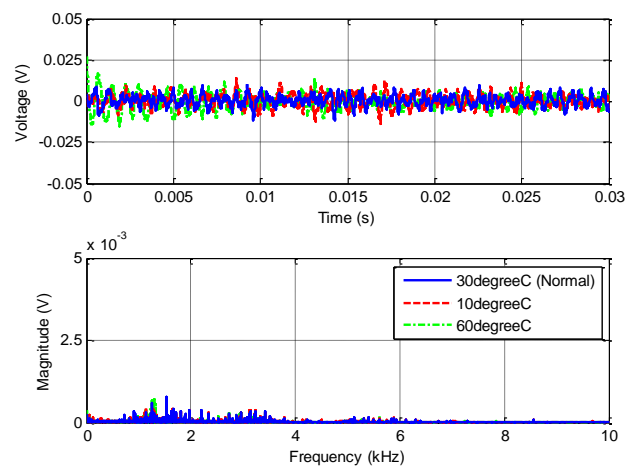
สำหรับผลการทดลองจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ผลของการศึกษาการชดเชยความผิดพลาดของสัญญาณตรวจจับที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิด้วยวิธีการแบบปรับตัว โดยการนำสัญญาณตรวจจับและสัญญาณควบคุมที่บันทึกมาจากการทดลองเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟรุ่นขนาด 4 TB ตั้งแต่ 10 °C ถึง 60 °C เพิ่มทีละ 10 °C ไปใช้กับวิธีการแบบปรับตัวได้ในโปรแกรม MATLAB Simulink แล้วเปรียบเทียบผลที่ได้ระหว่างก่อนและหลังใช้วิธีการแบบปรับตัวของแต่ละอุณหภูมิดังแสดงในภาพประกอบ 4-5 และภาพประกอบ 4-6 และพิจารณาค่าอัตราขยายแบบปรับตัวที่ได้จากวิธีการแบบปรับตัวเปรียบเทียบกับค่าอัตราขยายที่ได้จากการคำนวณของแต่ละอุณหภูมิดังแสดงในภาพประกอบ 4-7 ส่วนที่สองเป็นผลของการศึกษาประสิทธิภาพของวิธีการแบบปรับตัวแบบกำลังสองเฉลี่ยต่ำสุด โดยการศึกษาผลของการเปลี่ยนค่าอัตราการปรับตัวและการหาค่าอัตราการปรับตัวที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละอุณหภูมิสำหรับการนำไปใช้งานจริงในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ

ภาพประกอบ 4-5 แสดงสัญญาณตรวจจับของแต่ละอุณหภูมิก่อนและหลังใช้วิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้ โดยในภาพประกอบ 4-5 (ก) เป็นสัญญาณตรวจจับที่ไม่ใช้วิธีการแบบปรับตัวได้ ซึ่งเป็นสัญญาณที่วัดมาจากวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองโดยตรง จะเห็นได้ว่าขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณตรวจจับที่วัดได้จากวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองจะมีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิภายในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟลดลงไปที่ 10 °C และเพิ่มขึ้นไปที่ 60 °C จากอุณหภูมิเดิม 30 °C ทั้งนี้ก็เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ทำให้วงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองเกิดความไม่สมดุลและทำให้สัญญาณควบคุมรวมอยู่ในสัญญาณตรวจจับ ดังนั้นทำให้สัญญาณตรวจจับที่วัดมาได้เกิดความผิดพลาดและไม่ถูกต้อง และในภาพประกอบ 4-5 (ข) แสดง

สัญญาณตรวจจับประมาณที่ชดเชยด้วยวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้ จะเห็นว่าสัญญาณตรวจจับประมาณที่ได้จากวิธีการแบบปรับตัวได้ที่อุณหภูมิ 10 °C และ 60 °C มีขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณตรวจจับลดลงเกือบใกล้เคียงกับขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณตรวจจับที่อุณหภูมิ 30 °C ซึ่งหมายความว่าวิธีการแบบปรับตัวได้ออกแบบสามารถใช้ในการประมาณสัญญาณควบคุมที่รวมอยู่กับสัญญาณตรวจจับและสามารถชดเชยความผิดพลาดของสัญญาณตรวจจับจากวงจรได้จนทำให้สัญญาณตรวจจับมีความถูกต้อง ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดการออกแบบวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้ที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น



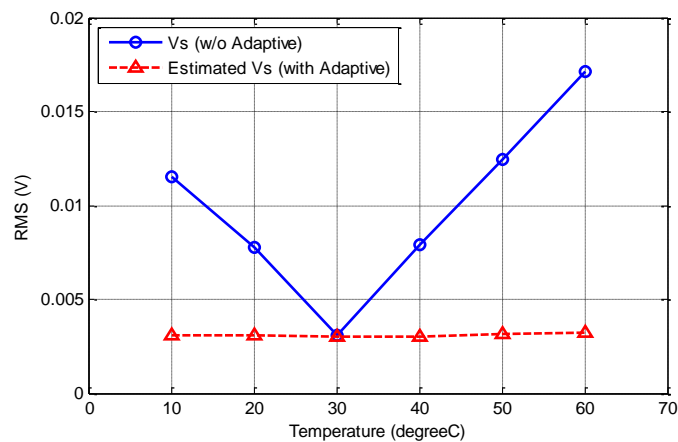
(ก) ไม่ใช้การชดเชยแบบปรับตัวได้



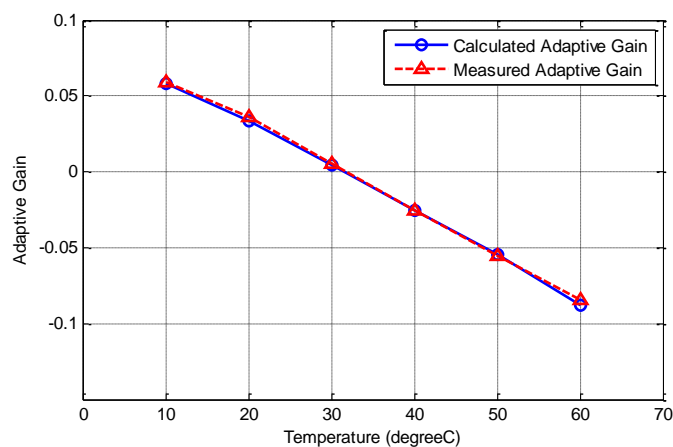
(ก) ใช้การชดเชยแบบปรับตัวได้

ภาพประกอบ 4-5 สัญญาณตรวจจับของวงจรที่อุณหภูมิต่างๆ

ภาพประกอบ 4-6 แสดงค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณตรวจจับก่อนและหลังใช้วิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้ที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งคำนวณมาจากสัญญาณตรวจจับที่แสดงในภาพประกอบ 4-5 จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณตรวจจับก่อนใช้วิธีการแบบปรับตัวได้มีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปจาก 30 °C เนื่องจากความไม่สมดุลของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง และค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณตรวจจับหลังใช้วิธีการแบบปรับตัวได้มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณตรวจจับที่ไม่ใช้วิธีการแบบปรับตัวได้ และลดลงจนมีค่าใกล้เคียงกับค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณตรวจจับที่อุณหภูมิ 30 °C เนื่องจากวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้ที่นำเสนอสามารถชดเชยความผิดพลาดและเพิ่มความถูกต้องของสัญญาณตรวจจับของวงจรเมื่ออุณหภูมิภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เปลี่ยนแปลงไป



ภาพประกอบ 4-6 ค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณตรวจจับของแต่ละอุณหภูมิ

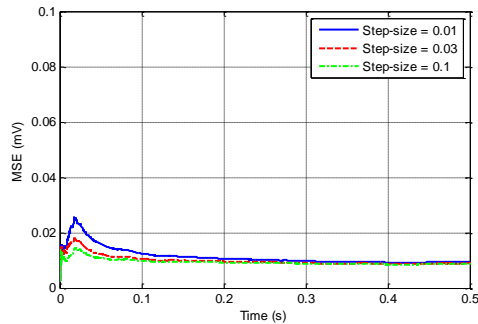


ภาพประกอบ 4-7 ค่าอัตราขยายปรับตัวได้ของแต่ละอุณหภูมิ

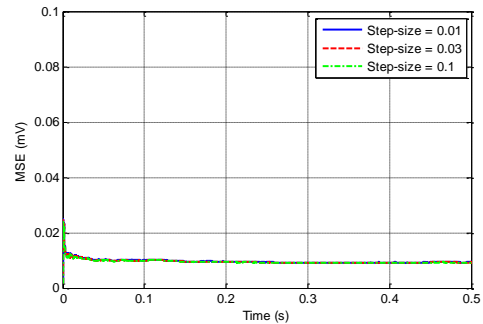
ภาพประกอบ 4-7 แสดงค่าอัตราขยายปรับตัวได้ของแต่ละอุณหภูมิ จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าอัตราขยายปรับตัวได้มีค่าลดลง โดยที่ค่าอัตราขยายปรับตัวได้มีค่าเป็นบวกในช่วงอุณหภูมิ 10 °C และ 20 °C ซึ่งน้อยกว่าอุณหภูมิที่ทำให้วงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองเกิดความสมดุล เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กในวงจรมีค่าลดลงทำให้อัตราขยายในเทอมของสัญญาณควบคุมมีค่าเป็นบวก ส่วนในช่วงอุณหภูมิ 40 °C ถึง 60 °C ซึ่งมากกว่าอุณหภูมิที่ทำให้วงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองเกิดความสมดุล ค่าอัตราขยายปรับตัวได้มีค่าเป็นลบ เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กในวงจรมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้อัตราขยายในเทอมของสัญญาณควบคุมมีค่าเป็นลบ จากทั้งสองกรณีมีความสอดคล้องกับการวิเคราะห์ความไม่สมดุลของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 3 นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบค่าอัตราขยายปรับตัวได้ระหว่างค่าอัตราขยายปรับตัวได้ที่ได้จากวิธีการแบบปรับตัวได้และค่าอัตราขยายปรับตัวได้ที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งคำนวณมาจากค่าพารามิเตอร์ในวงจรและค่าความจุไฟฟ้าของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กของแต่ละอุณหภูมิที่วัดมาขณะทำการทดลอง จะเห็นได้ว่าค่าอัตราขยายปรับตัวได้ที่ได้จากวิธีการแบบปรับตัวได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าอัตราขยายปรับตัวได้ที่ได้จากการคำนวณมาก แสดงว่าวิธีการแบบปรับตัวได้ที่ออกแบบสามารถประมาณอัตราขยายในเทอมของสัญญาณควบคุมได้ และสามารถประมาณสัญญาณความผิดพลาดในเทอมของสัญญาณควบคุมเพื่อไปหักล้างในสัญญาณตรวจจับได้ จากการที่ค่าอัตราขยายปรับตัวได้ที่ได้จากวิธีการแบบปรับตัวได้และจากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกัน ยังบ่งบอกได้ว่าความผิดพลาดของสัญญาณตรวจจับเกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กเป็นสาเหตุหลัก และพารามิเตอร์ตัวอื่นๆ ในวงจรไม่มีผลต่อความผิดพลาดของสัญญาณตรวจจับ

สำหรับผลการทดลองในส่วนที่สองเป็นผลของการศึกษาประสิทธิภาพของวิธีการแบบปรับตัวได้แบบกำลังสองเฉลี่ยต่ำสุด โดยการศึกษาผลของการเปลี่ยนค่าอัตราการปรับตัวได้และการหาค่าอัตราการปรับตัวที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละอุณหภูมิ อัตราการปรับตัวที่ใช้ในการทดลองมีการศึกษาการเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0.01 ถึง 0.1 แล้วพิจารณาค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (Mean Square Error: MSE) ดังแสดงในภาพประกอบ 4-8 และการปรับตัวของค่าอัตราขยายดังแสดงในภาพประกอบ 4-9 นอกจากนี้ได้พิจารณาเวลาที่ใช้ในการลู่เข้า (Convergence Time) ของการปรับตัวค่าอัตราขยายปรับตัวได้ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ของค่าอัตราขยายปรับตัวได้ในช่วงภาวะคงที่ (Steady State) เพื่อหาค่าอัตราการปรับตัวที่เหมาะสมที่สุด (Optimum) เวลาที่ใช้ในการลู่เข้าและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าอัตราขยายปรับตัวได้แสดงในภาพประกอบ 4-10

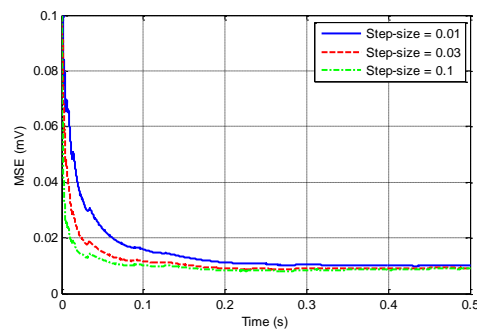




(ก)



(ข)



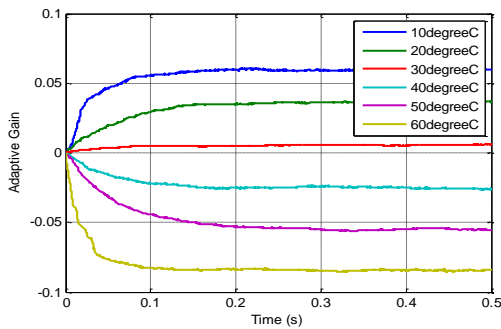
(ค)

ภาพประกอบ 4-8 ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยที่อัตราการปรับตัวต่างๆ ของแต่ละอุณหภูมิ

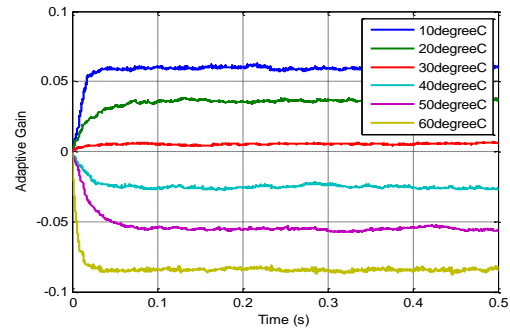
ภาพประกอบ 4-8 แสดงการลู่เข้าของค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยของวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยแต่ละอุณหภูมิมีการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยของค่าอัตราการปรับตัว 0.01 0.03 และ 0.1 จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยที่อุณหภูมิ 30 °C ของแต่ละค่าอัตราการปรับตัวมีลักษณะที่ใกล้เคียงกันดังแสดงในภาพประกอบ 4-8 (ข) เนื่องจากที่อุณหภูมิ 30 °C วงจรเกิดความสมดุลทำให้สัญญาณตรวจจับไม่เกิดความผิดพลาด และทำให้ค่าความผิดพลาดของวิธีการแบบปรับตัวได้มีค่าต่ำที่สุด ซึ่งค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยต่ำสุดมีค่าประมาณ 0.0093 mV ภาพประกอบ 4-8 (ก) แสดงค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยที่อุณหภูมิ 10 °C ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยของแต่ละค่าอัตราการปรับตัวมีลักษณะการลู่เข้าที่แตกต่างกัน โดยค่าอัตราการปรับตัวมีค่ามากจะทำให้มีการลู่เข้าที่เร็วกว่าค่าอัตราการปรับตัวมีค่าน้อย เนื่องจากค่าอัตราการปรับตัวที่มีค่ามากจะทำให้วิธีการแบบปรับตัวได้มีการปรับค่าอัตราขยายได้อย่างรวดเร็ว แต่เมื่อค่าอัตราการปรับตัวมีค่าน้อยทำให้วิธีการแบบปรับตัวได้มีการปรับค่าอัตราขยายไปเรื่อยๆ อย่างช้าๆ และเมื่อพิจารณาค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยที่อุณหภูมิ 60 °C ดังแสดงในภาพประกอบ 4-8 (ค) จะเห็นได้ว่าค่า

ความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยของวิธีการแบบปรับตัวได้มีการลู่ออกในลักษณะเดียวกับที่อุณหภูมิ 10 °C แต่เมื่อพิจารณาที่ค่าอัตราการปรับตัวที่ค่าเดียวกันจะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ 60 °C มีการลู่ออกที่ช้ากว่าที่อุณหภูมิ 10 °C เนื่องจากสัญญาณตรวจจับที่เกิดความผิดพลาดที่อุณหภูมิ 60 °C มีแอมพลิจูดที่สูงกว่าที่อุณหภูมิ 10 °C ทำให้วิธีการแบบปรับตัวได้ต้องใช้เวลาในการชดเชยความผิดพลาดของสัญญาณตรวจจับนานกว่า นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยที่อุณหภูมิ 10 °C และ 60 °C มีการลู่ออกไปยังค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยที่ต่ำที่สุดค่าเดียวกัน ซึ่งหมายความว่าวิธีการแบบปรับตัวได้ออกแบบสามารถชดเชยความผิดพลาดของสัญญาณตรวจจับจนมีความผิดพลาดต่ำที่สุดได้

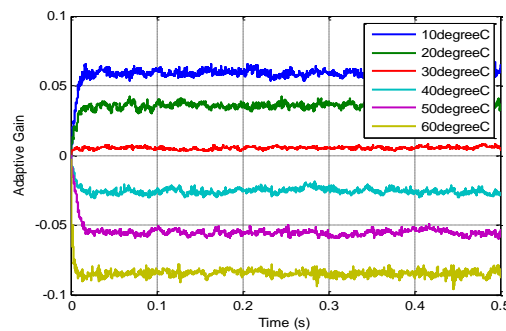
ภาพประกอบ 4-9 แสดงการปรับค่าอัตราขยายปรับตัวได้ที่อุณหภูมิต่างๆ ของแต่ละอัตราการปรับตัว โดยการปรับค่าอัตราขยายปรับตัวได้ของอัตราการปรับตัว 0.01 0.03 และ 0.1 แสดงในภาพประกอบ 4-9 (ก) ภาพประกอบ 4-9 (ข) และภาพประกอบ 4-9 (ค) ตามลำดับ จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าค่าอัตราขยายปรับตัวได้มีการปรับตัวลู่ออกค่าๆ หนึ่งของแต่ละอุณหภูมิ โดยที่อุณหภูมิเดียวกันจะลู่ออกค่าเดียวกัน ซึ่งค่าอัตราขยายปรับตัวได้นี้มีความสอดคล้องกับค่าอัตราขยายในเทอมของสัญญาณควบคุมและสอดคล้องกับค่าอัตราขยายปรับตัวได้ที่อุณหภูมิต่างๆ ในภาพประกอบ 4-7 และเมื่อพิจารณาที่ค่าอัตราการปรับตัวจะเห็นได้ว่าเมื่อค่าอัตราการปรับตัวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การปรับตัวค่าอัตราขยายปรับตัวได้มีการลู่ออกค่าๆ หนึ่งของแต่ละอุณหภูมิเร็วขึ้น ถ้ามีการกำหนดค่าอัตราการปรับตัวน้อยเกินไปจะทำให้การปรับตัวของค่าอัตราขยายปรับตัวได้ใช้เวลานานในการลู่ออก แต่เมื่อลู่ออกแล้วค่าอัตราขยายปรับตัวได้ค่อนข้างจะมีค่าคงที่ เนื่องจากค่าอัตราขยายปรับตัวได้จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆ จนลู่ออกค่าๆ หนึ่งดังแสดงในภาพประกอบ 4-9 (ก) และในทางกลับกันถ้ามีการกำหนดค่าอัตราการปรับตัวมากเกินไปจะทำให้การปรับตัวค่าอัตราขยายปรับตัวได้มีการลู่ออกที่เร็ว แต่เมื่อลู่ออกแล้วค่าอัตราขยายปรับตัวได้ค่อนข้างจะมีการแกว่งไม่คงที่ เนื่องจากค่าอัตราการปรับตัวทำให้ค่าอัตราขยายปรับตัวได้มีการเปลี่ยนแปลงไปมากจนทำให้มีค่าแกว่งไปแกว่งมาแม้จะลู่ออกค่าๆ หนึ่งแล้วดังแสดงในภาพประกอบ 4-9 (ค) ดังนั้นในการประยุกต์ใช้งานวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้ควรกำหนดค่าอัตราการปรับตัวที่เหมาะสมและไม่ทำให้การปรับตัวของค่าอัตราขยายปรับตัวได้มีการลู่ออก (Unstable)



(ก)



(ข)

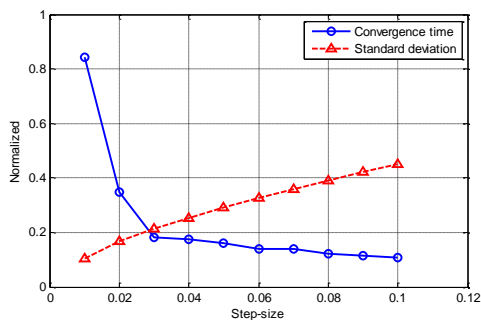


(ค)

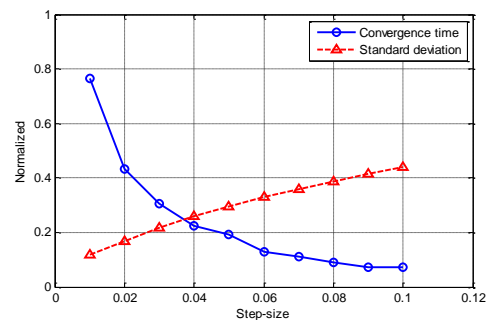
ภาพประกอบ 4-9 ค่าอัตราขยายปรับตัวได้ที่อุณหภูมิต่างๆ ของแต่ละอัตราการปรับตัว

จากผลการทดลองข้างต้นพบว่ากำหนดค่าอัตราการปรับตัวมีผลต่อการลู่เข้าและการแกว่งของค่าอัตราขยายปรับตัวได้ ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาค่าดังกล่าวเพื่อหาค่าอัตราการปรับตัวที่เหมาะสมที่สุด โดยการนำค่าอัตราขยายปรับตัวได้ที่อุณหภูมิต่างๆ ของแต่ละอัตราการปรับตัวในภาพประกอบ 4-9 มาหาเวลาที่ใช้ในการลู่เข้าและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งพบว่าแต่ละอุณหภูมิจะใช้เวลาในการลู่เข้าของการปรับตัวค่าอัตราขยายปรับตัวได้ที่แตกต่างกันแม้ว่าจะกำหนดค่าอัตราการปรับตัวเดียวกัน เนื่องจากขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณควบคุมที่รวมอยู่กับสัญญาณตรวจจบบีขนาดไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับความผิดพลาดของสัญญาณตรวจจบบีที่เกิดขึ้น ส่วนค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าอัตราขยายปรับตัวได้พบว่าเมื่อค่าอัตราขยายปรับตัวได้ลู่เข้าจนมีค่าคงที่ ในแต่ละอุณหภูมิจะมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าอัตราขยายปรับตัวได้ที่ใกล้เคียงกันสำหรับค่าอัตราการปรับตัวเดียวกัน จากผลการทดลองทั้งสองพบว่าเวลาที่ใช้ในการลู่เข้าของการปรับตัวค่าอัตราขยายปรับตัวได้แปรผกผันกับค่าอัตราการปรับตัวและในทางกลับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าอัตราขยายปรับตัวได้ที่ภาวะคงตัวแปรผันตรงกับค่าอัตราการปรับตัว ดังนั้นถ้าพิจารณาจากค่าทั้งสองดังกล่าวจะทำให้ทราบว่าจุดที่เหมาะสมที่สุดของค่าอัตราการปรับตัว โดยการพล็อตค่าเวลาที่ใช้ในการลู่เข้าและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าอัตราขยายปรับตัวได้ในกราฟเดียวกัน ซึ่งค่าทั้งสองถูกปรับค่า (Normalization) ให้

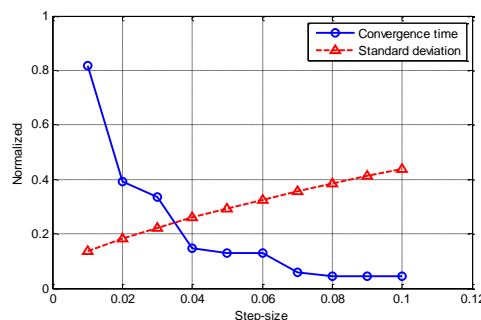
อยู่ในช่วงเดียวกันดังแสดงในภาพประกอบ 4-10 ซึ่งจะเห็นได้ว่าในแต่ละอุณหภูมิจะเกิดตัดกันระหว่างเวลาที่ใช้ในการลู่เข้าและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่จุดๆ หนึ่ง ซึ่งทั้ง 6 อุณหภูมิตัดกันในช่วงของค่าอัตราการปรับตัวระหว่าง 0.02 และ 0.04 แสดงให้เห็นว่าค่าอัตราการปรับตัวในช่วงดังกล่าวน่าจะเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการประยุกต์ใช้งานวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้กับตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์



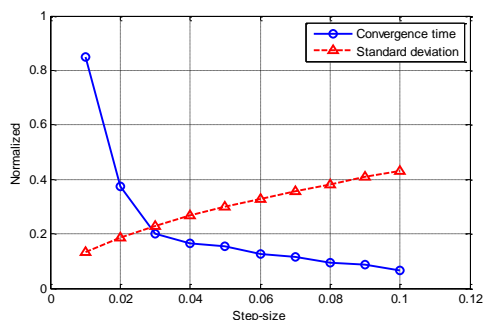
(ก) อุณหภูมิ 10 °C



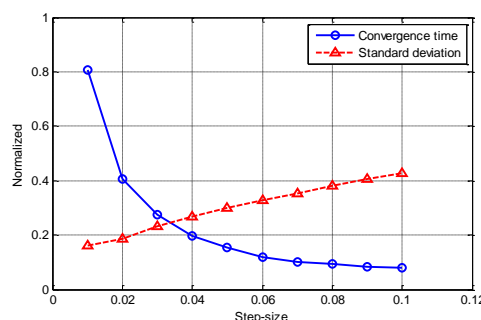
(ข) อุณหภูมิ 20 °C



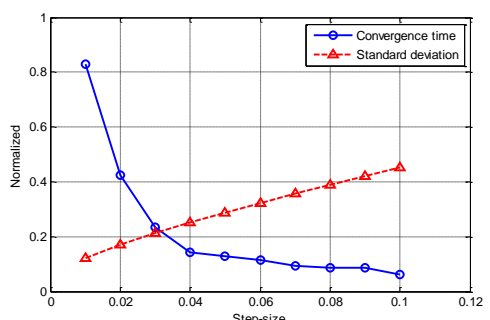
(ค) อุณหภูมิ 30 °C



(ง) อุณหภูมิ 40 °C



(จ) อุณหภูมิ 50 °C



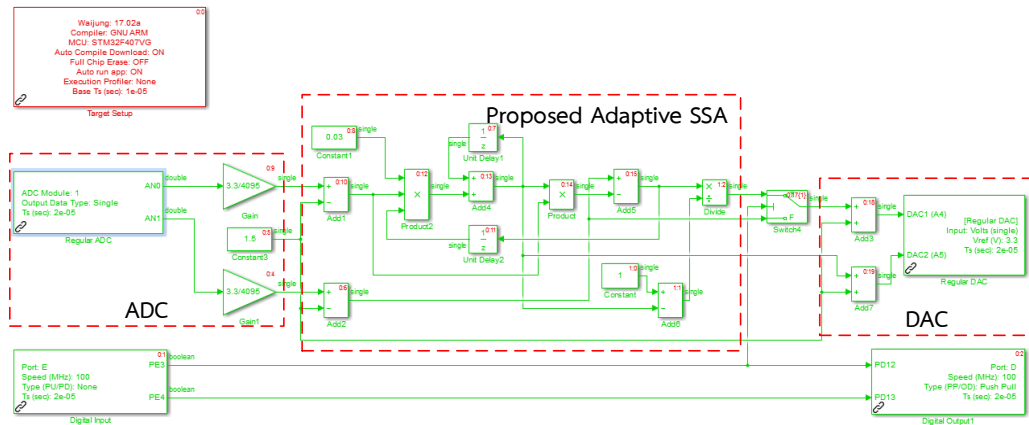
(ฉ) อุณหภูมิ 60 °C

ภาพประกอบ 4-10 ค่าเวลาที่ใช้ในการลู่เข้าและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าอัตราขยายปรับตัวได้ที่อุณหภูมิต่างๆ

จากผลการประเมินประสิทธิภาพของวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้ที่ออกแบบ แสดงให้เห็นว่าวิธีการแบบปรับตัวได้ที่ออกแบบสามารถชดเชยความผิดพลาดของสัญญาณตรวจจับที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้และช่วยเพิ่มความถูกต้องให้กับสัญญาณตรวจจับ และจากผลการศึกษาค่าอัตราขยายปรับตัวได้สามารถยืนยันได้ว่าวิธีการแบบปรับตัวได้สามารถประมาณค่าอัตราขยายในเทอมของสัญญาณควบคุมได้สอดคล้องกับค่าอัตราขยายที่ได้จากการคำนวณ นอกจากนี้ยังพบว่าค่าอัตราการปรับตัวที่เหมาะสมที่สุดอยู่ในช่วง 0.02 ถึง 0.04 สำหรับการประยุกต์ใช้งานวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้กับตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

#### 4.3.2 การประยุกต์ใช้งานวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้

การประยุกต์ใช้งานวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้ที่ออกแบบกับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จริงในอุตสาหกรรมทำได้โดยการนำวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้ที่ออกแบบไปประมวลผลด้วยตัวประมวลผล STM32 เพื่อชดเชยความผิดพลาดของสัญญาณตรวจจับที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนในขณะฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทำงาน สัญญาณตรวจจับจากวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองและสัญญาณควบคุมถูกป้อนไปยังตัวประมวลผล STM32 เพื่อใช้ในการประมาณสัญญาณความผิดพลาดและชดเชยความผิดพลาดของสัญญาณตรวจจับ สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากตัวประมวลผล STM32 จะเป็นสัญญาณตรวจจับประมาณและค่าอัตราขยายปรับตัวได้ ซึ่งสัญญาณทั้งสองถูกบันทึกเป็นข้อมูลด้วยบอร์ดเก็บข้อมูลเพื่อใช้สำหรับวิเคราะห์ผล การนำวิธีการแบบปรับตัวได้ไปประมวลผลบนตัวประมวลผล STM32 สามารถทำได้โดยการนำสมการของวิธีการแบบปรับตัวได้ที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้นเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมในโปรแกรม MATLAB Simulink ดังแสดงในภาพประกอบ 4-11 แล้วโปรแกรมไปยังบอร์ดประมวลผล STM32 ภาพประกอบ 4-11 ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ส่วนการอ่านสัญญาณตรวจจับและสัญญาณควบคุมด้วยความถี่ซิกตัวอย่าง 50 kHz ส่วนการประมาณสัญญาณตรวจจับและการปรับค่าอัตราขยายด้วยวิธีการแบบปรับตัวได้แบบกำลังสองเฉลี่ยต่ำสุด ซึ่งกำหนดค่าอัตราการปรับตัวเป็น 0.03 เนื่องจากเป็นค่าที่อยู่ในช่วงที่เหมาะสมที่สุดที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 4.3.1 และส่วนการส่งสัญญาณออก

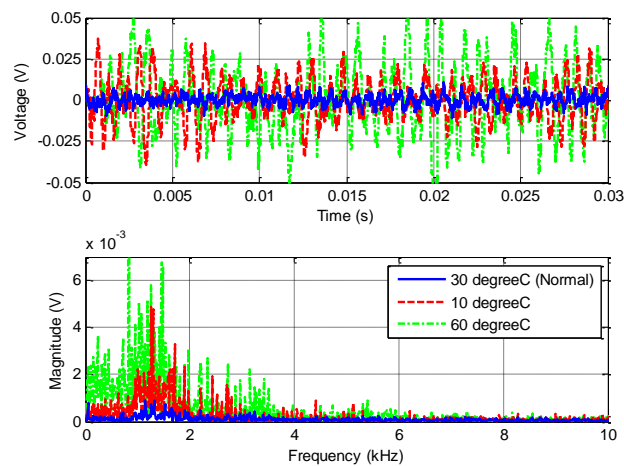


ภาพประกอบ 4-11 บล็อกไดอะแกรมของวิธีการแบบปรับตัวได้ของตัวประมวลผล STM32

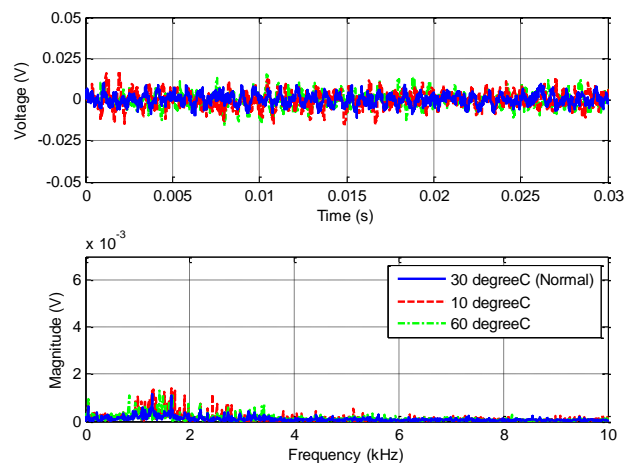
สำหรับผลการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกจะเป็นผลของการชดเชยความผิดพลาดของสัญญาณตรวจจับด้วยวิธีการแบบปรับตัวได้ที่ประมวลผลด้วยตัวประมวลผล STM32 โดยการนำสัญญาณตรวจจับและสัญญาณควบคุมจากการทดลองเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในฮาร์ดดิสก์ไคร์ฟรุ่นขนาด 4 TB ตั้งแต่  $10^{\circ}\text{C}$  ถึง  $60^{\circ}\text{C}$  เพิ่มขึ้นทีละ  $10^{\circ}\text{C}$  ไปใช้กับวิธีการแบบปรับตัวได้บนตัวประมวลผล STM32 แล้วเปรียบเทียบผลที่ได้ระหว่างก่อนและหลังใช้วิธีการแบบปรับตัวได้ของแต่ละอุณหภูมิดังแสดงในภาพประกอบ 4-12 และภาพประกอบ 4-13 และพิจารณาค่าอัตราขยายแบบปรับตัวได้ที่ได้จากวิธีการแบบปรับตัวเปรียบเทียบกับค่าอัตราขยายที่ได้จากการคำนวณของแต่ละอุณหภูมิดังแสดงในภาพประกอบ 4-14 ส่วนที่สองเป็นผลของการชดเชยความผิดพลาดของสัญญาณตรวจจับด้วยวิธีการแบบปรับตัวได้ที่ประมวลผลด้วยตัวประมวลผล STM32 เมื่อฮาร์ดดิสก์ไคร์ฟถูกรบกวนจากการสั่นสะเทือนจากภายนอก (External Vibration) แล้วพิจารณาประสิทธิภาพการชดเชยของวิธีการแบบปรับตัวได้และค่าอัตราขยายแบบปรับตัวได้

ภาพประกอบ 4-12 แสดงสัญญาณตรวจจับของแต่ละอุณหภูมิก่อนและหลังใช้วิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้ เมื่อวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้ถูกประมวลผลด้วยตัวประมวลผล STM32 โดยในภาพประกอบ 4-12 (ก) เป็นสัญญาณตรวจจับที่ไม่ใช้วิธีการแบบปรับตัวได้ ซึ่งเป็นสัญญาณที่วัดมาจากวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองโดยตรง จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิภายในฮาร์ดดิสก์ไคร์ฟลดลงไปที่  $10^{\circ}\text{C}$  และเพิ่มขึ้นไปที่  $60^{\circ}\text{C}$  จากอุณหภูมิเดิม  $30^{\circ}\text{C}$  ขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณตรวจจับที่วัดได้จากวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองจะมีขนาดเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ก็เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ทำให้วงจรเกิดความไม่สมดุลและทำให้สัญญาณควบคุมรวมอยู่ในสัญญาณตรวจจับ ดังนั้นทำให้สัญญาณตรวจจับที่วัดมาได้

เกิดความผิดพลาดและไม่ถูกต้อง และในภาพประกอบ 4-12 (ข) แสดงสัญญาณตรวจจับประมาณที่ชดเชยด้วยวิธีการแบบปรับตัวได้ จะเห็นได้ว่าสัญญาณตรวจจับประมาณที่ได้จากวิธีการแบบปรับตัวได้ที่อุณหภูมิ 10 °C และ 60 °C มีขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณตรวจจับลดลงเกือบใกล้เคียงกับขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณตรวจจับที่อุณหภูมิ 30 °C ซึ่งหมายความว่าวิธีการแบบปรับตัวได้ที่ถูกประมวลผลด้วยตัวประมวลผล STM32 สามารถประมาณสัญญาณควบคุมที่รวมอยู่กับสัญญาณตรวจจับและสามารถชดเชยความผิดพลาดของสัญญาณตรวจจับจากวงจรได้จนทำให้สัญญาณตรวจจับมีความถูกต้อง ซึ่งสอดคล้องกับการชดเชยความผิดพลาดของสัญญาณตรวจจับด้วยวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้ที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 4.3.1



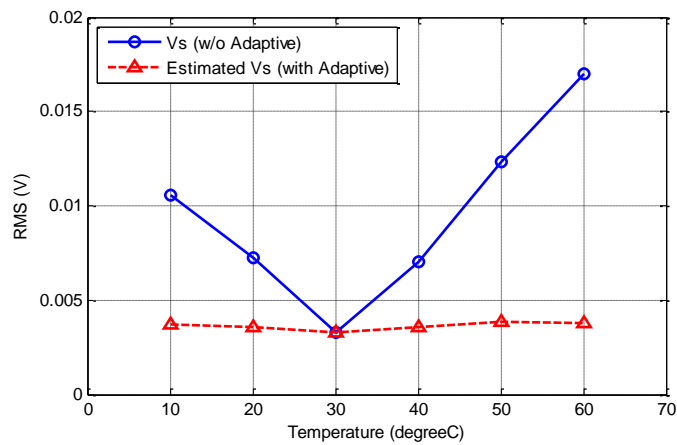
(ก) ไม่ใช้การชดเชยแบบปรับตัวได้



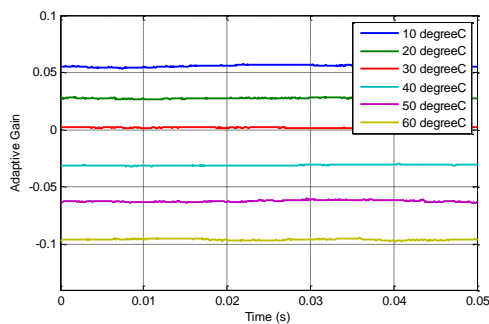
(ข) ใช้การชดเชยแบบปรับตัวได้

ภาพประกอบ 4-12 สัญญาณตรวจจับของวงจรที่อุณหภูมิต่างๆ

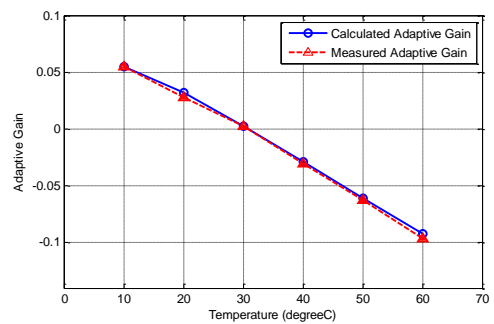
ภาพประกอบ 4-13 แสดงค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณตรวจจับก่อนและหลังใช้วิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้ที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งคำนวณมาจากสัญญาณตรวจจับที่แสดงในภาพประกอบ 4-12 จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณตรวจจับหลังใช้วิธีการแบบปรับตัวได้มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณตรวจจับที่ไม่ใช้วิธีการแบบปรับตัวได้ และลดลงจนมีค่าใกล้เคียงกับค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณตรวจจับที่อุณหภูมิ 30 °C แสดงว่าวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้ที่ถูกประมวลผลด้วยตัวประมวลผล STM32 สามารถชดเชยความผิดพลาดของสัญญาณตรวจจับและช่วยเพิ่มความถูกต้องของสัญญาณตรวจจับเมื่ออุณหภูมิภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เปลี่ยนแปลงไป



ภาพประกอบ 4-13 ค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณตรวจจับที่อุณหภูมิต่างๆ



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 4-14 ค่าอัตราขยายปรับตัวได้ที่อุณหภูมิต่างๆ

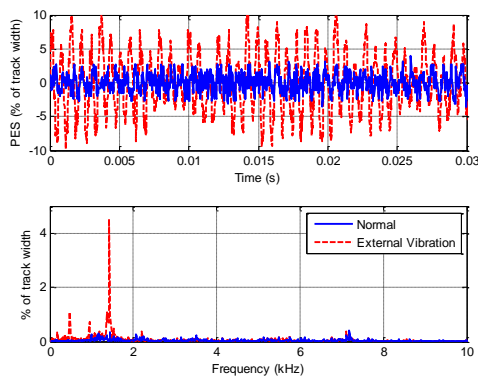


ภาพประกอบ 4-14 แสดงค่าอัตราขยายปรับตัวได้ของแต่ละอุณหภูมิ จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าอัตราขยายปรับตัวได้มีค่าลดลง โดยที่ค่าอัตราขยายปรับตัวได้มีค่ามากกว่าศูนย์ในช่วงอุณหภูมิ 10 °C และ 20 °C เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กในวงจรมีค่าลดลงทำให้อัตราขยายในเทอมของสัญญาณควบคุมมีค่ามากกว่าศูนย์ ส่วนในช่วงอุณหภูมิ 40 °C ถึง 60 °C ค่าอัตราขยายปรับตัวได้มีค่าน้อยกว่าศูนย์ เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กในวงจรมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้อัตราขยายในเทอมของสัญญาณควบคุมมีค่าน้อยกว่าศูนย์ ในภาพประกอบ 4-14 (ก) แสดงค่าอัตราขยายปรับตัวได้ในโดเมนเวลา ซึ่งได้จากวิธีการแบบปรับตัวได้ที่ถูกประมวลผลด้วยตัวประมวลผล STM32 มีการกำหนดค่าอัตราการปรับตัวเท่า 0.03 จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าค่าอัตราขยายปรับตัวได้มีการเปลี่ยนแปลงไปตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ และค่าอัตราขยายปรับตัวได้มีการแกว่งเพียงเล็กน้อย เนื่องจากใช้ค่าอัตราการปรับตัวที่เหมาะสมที่สุด ส่วนในภาพประกอบ 4-14 (ข) แสดงการเปรียบเทียบของค่าอัตราขยายปรับตัวได้ระหว่างค่าอัตราขยายปรับตัวได้ที่ได้จากวิธีการแบบปรับตัวได้ที่ถูกประมวลผลด้วยตัวประมวลผล STM32 ซึ่งถูกเฉลี่ยมาจากค่าอัตราขยายปรับตัวได้ที่แสดงในภาพประกอบ 4-14 (ก) และค่าอัตราขยายปรับตัวได้ที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งคำนวณมาจากค่าพารามิเตอร์ในวงจรและค่าความจุไฟฟ้าของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กของแต่ละอุณหภูมิที่วัดมาขณะทำการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4-2 จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าค่าอัตราขยายปรับตัวได้ที่ได้จากวิธีการแบบปรับตัวได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าอัตราขยายปรับตัวได้ที่ได้จากการคำนวณมาก แสดงว่าวิธีการแบบปรับตัวได้ที่ถูกประมวลผลด้วยตัวประมวลผล STM32 สามารถประมาณค่าอัตราขยายในเทอมของสัญญาณควบคุมได้ และสามารถชดเชยความผิดพลาดของสัญญาณตรวจจับได้จนทำให้สัญญาณตรวจจับมีความถูกต้องมากขึ้น

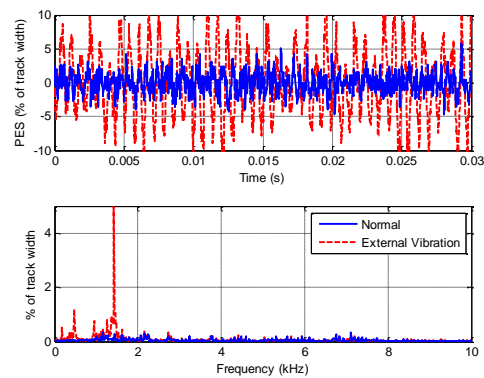
ตารางที่ 4-2 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองของแต่ละอุณหภูมิ

อุณหภูมิภายใน HDD (°C)	อุณหภูมিবนวงจร SSA (°C)	$C_p$ (nF)	$C_1$ (nF)	$R_3$ (k $\Omega$ )	$R_4$ (k $\Omega$ )
10	29	2.25	9.95	24.1	100.7
20	30	2.31	9.96	24.1	100.6
30	31	2.39	9.96	24.1	100.6
40	31	2.45	9.95	24.1	100.7
50	30	2.53	9.96	24.1	100.7
60	30	2.60	9.95	24.1	100.7

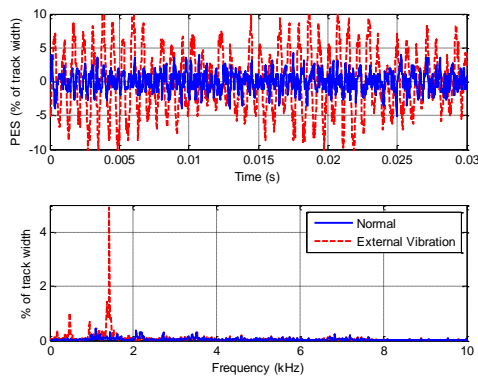
สำหรับผลการทดลองในส่วนที่สองเป็นผลของการชดเชยความผิดพลาดของสัญญาณตรวจจับด้วยวิธีการแบบปรับตัวได้ที่ประมวลผลด้วยตัวประมวลผล STM32 เมื่อฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ถูกรบกวนจากการสั่นสะเทือนจากภายนอก ซึ่งถูกสร้างมาจากพัลลภระบายนอกที่ถูกทำให้เกิดความไม่สมดุลเพื่อให้เกิดการสั่นสะเทือนไปรบกวนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยความถี่ของการสั่นสะเทือนสามารถปรับได้ด้วยการเพิ่มและลดความเร็วในการหมุนของพัลลภระบายนอก ความถี่ของการสั่นสะเทือนที่รบกวนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะถูกปรับจนทำให้สัญญาณความผิดพลาดของตำแหน่งหัวอ่าน/เขียน (PES) มีค่ามากกว่าค่าที่กำหนดไว้ (ค่า  $3\sigma$  ของสัญญาณความผิดพลาดของตำแหน่งมีค่ามากกว่า 10 % ของความกว้างแถบข้อมูล) ดังแสดงในภาพประกอบ 4-15 และตารางที่ 4-3 แล้วพิจารณาประสิทธิภาพการชดเชยของวิธีการแบบปรับตัวดังแสดงในภาพประกอบ 4-16 และภาพประกอบ 4-17 และค่าอัตราขยายแบบปรับตัวดังแสดงในภาพประกอบ 4-18



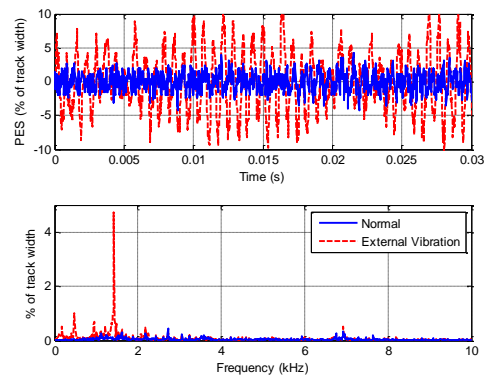
(ก) หัวอ่าน/เขียนที่ 5



(ข) หัวอ่าน/เขียนที่ 6



(ก) หัวอ่าน/เขียนที่ 7



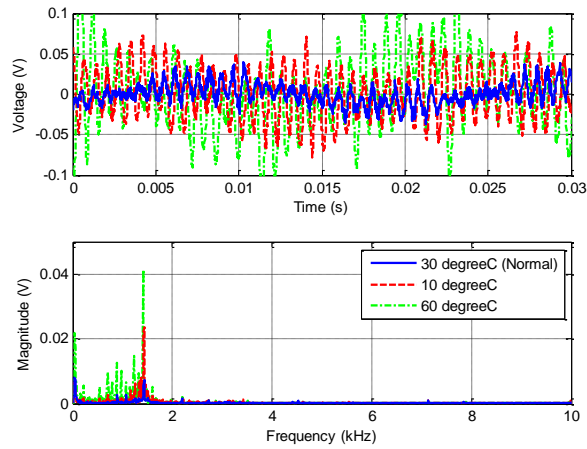
(ข) หัวอ่าน/เขียนที่ 8

ภาพประกอบ 4-15 สัญญาณความผิดพลาดของตำแหน่งของหัวอ่าน/เขียนในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

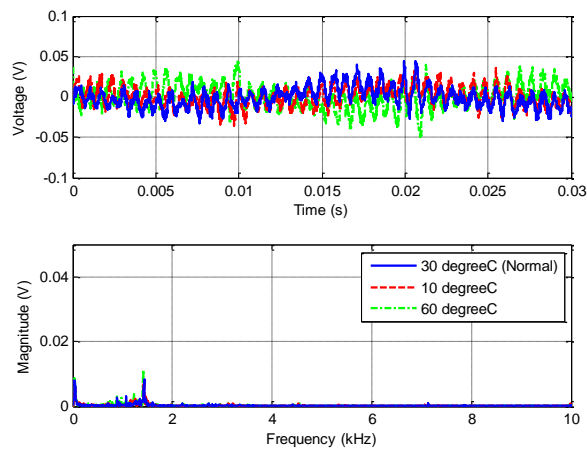
ภาพประกอบ 4-15 แสดงการเปรียบเทียบสัญญาณความผิดพลาดของตำแหน่งของหัวอ่าน/เขียนหัวที่ 5 ถึง 8 ระหว่างการใช้งานฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์แบบปกติ (Normal) กับการใช้งานฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์เมื่อมีการรบกวนจากการสั่นสะเทือนจากภายนอก สัญญาณความผิดพลาดของตำแหน่งของหัวอ่าน/เขียนเป็นสัญญาณที่ใช้งบออกพฤติกรรมเคลื่อนที่ของหัวอ่าน/เขียนไปบนแถบข้อมูล จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าสัญญาณความผิดพลาดของตำแหน่งของหัวอ่าน/เขียนที่ 5 ถึง 8 ของการใช้งานฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์แบบปกติค่อนข้างแกว่งอยู่ใกล้ๆ ศูนย์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหัวอ่าน/เขียนที่ 5 ถึง 8 เคลื่อนที่ไปบนแถบข้อมูลได้อย่างแม่นยำ แต่ในทางกลับกันเมื่อมีการรบกวนฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์ด้วยการสั่นสะเทือนจากภายนอกสัญญาณความผิดพลาดของตำแหน่งของหัวอ่าน/เขียนที่ 5 ถึง 8 มีการแกว่งออกจากศูนย์ค่อนข้างมาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหัวอ่าน/เขียนที่ 5 ถึง 8 เคลื่อนที่ออกจากกึ่งกลางแถบข้อมูลไปมากทำให้ความแม่นยำในการอ่านหรือเขียนข้อมูลลดลง นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าการสั่นสะเทือนจากภายนอกที่เกิดขึ้นมีความถี่ประมาณ 1.4 kHz สามารถสังเกตได้จากสเปกตรัมของสัญญาณความผิดพลาดของตำแหน่งของหัวอ่าน/เขียนที่ 5 ถึง 8 เมื่อพิจารณาตารางที่ 4-3 จะเห็นได้ว่าค่า  $3\sigma$  ของสัญญาณความผิดพลาดของตำแหน่งของหัวอ่าน/เขียนที่ 5 ถึง 8 ของการใช้งานฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์แบบปกติมีค่าน้อยกว่า 10 % ของความกว้างแถบข้อมูลซึ่งอยู่ในมาตรฐานที่กำหนดไว้ แต่เมื่อมีการรบกวนฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์ด้วยการสั่นสะเทือนจากภายนอกทำให้ค่า  $3\sigma$  ของสัญญาณความผิดพลาดของตำแหน่งของหัวอ่าน/เขียนที่ 5 ถึง 8 มีค่าสูงขึ้นและสูงกว่า 10 % ของความกว้างแถบข้อมูลซึ่งสูงกว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ จากผลการทดลองข้างต้นจะเห็นได้ว่าการรบกวนฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์ด้วยการสั่นสะเทือนจากภายนอกมีผลกระทบต่อตำแหน่งของหัวอ่าน/เขียนและทำให้ประสิทธิภาพในการอ่านหรือเขียนข้อมูลลดลง ดังนั้นจึงต้องมีการตรวจจับสัญญาณการสั่นสะเทือนดังกล่าวเพื่อใช้สำหรับชดเชยและควบคุมการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบตรวจจับการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์ การตรวจจับการสั่นสะเทือนที่หัวอ่าน/เขียนด้วยวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4-3 ค่า  $3\sigma$  ของสัญญาณความผิดพลาดของตำแหน่งของแต่ละหัวอ่าน/เขียน

Case Study	$3\sigma$ ของ PES (% of track width)				
	Head 5	Head 6	Head 7	Head 8	Average
Normal	3.90	4.38	4.17	4.04	4.12
External Vibration	13.51	15.04	13.94	13.51	14.01



(ก) ไม่ใช้การชดเชยแบบปรับตัวได้



(ข) ใช้การชดเชยแบบปรับตัวได้

ภาพประกอบ 4-16 สัญญาณตรวจจับของวงจรที่อุณหภูมิต่างๆ กรณีมีการสิ้นสعهเทือนจากภายนอก

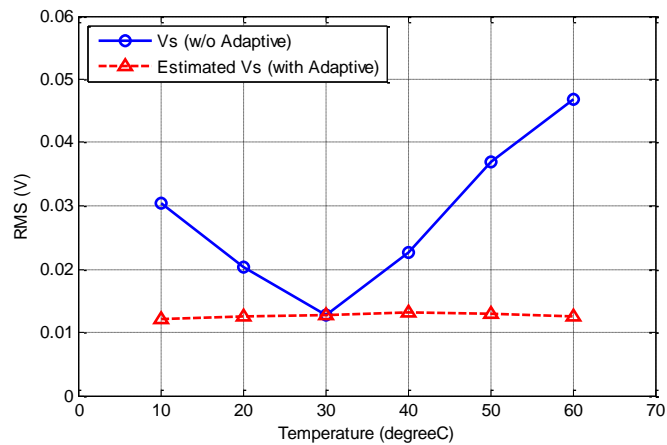
ภาพประกอบ 4-16 แสดงสัญญาณตรวจจับของแต่ละอุณหภูมิก่อนและหลังใช้วิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้ที่ประมวลผลด้วยตัวประมวลผล STM32 เมื่อฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ถูกรบกวนจากการสิ้นสعهเทือนจากภายนอก จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบสามารถตรวจจับการสิ้นสعهเทือนที่เกิดขึ้นที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้ การสิ้นสعهเทือนที่ตรวจจับได้มีความถี่ประมาณ 1.4 kHz ซึ่งสอดคล้องกับสัญญาณความผิดพลาดของตำแหน่งของหัวอ่าน/เขียน แต่เมื่ออุณหภูมิภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ลดลงไปที่ 10 °C และเพิ่มขึ้นไปที่ 60 °C จากอุณหภูมิเดิม 30 °C ขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณตรวจจับที่วัดได้จากวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองจะมีขนาดเพิ่มขึ้นทำให้สัญญาณตรวจจับที่วัดมาได้เกิดความผิดพลาดและไม่ถูกต้องดังแสดงในภาพประกอบ 4-12 (ก) และเมื่อพิจารณาภาพประกอบ

4-12 (ข) จะเห็นได้ว่าสัญญาณตรวจจับประมาณที่ได้จากวิธีการแบบปรับตัวได้ที่อุณหภูมิ 10 °C และ 60 °C มีขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณตรวจจับลดลงเกือบใกล้เคียงกับขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณตรวจจับที่อุณหภูมิ 30 °C จากผลการทดลองข้างต้นแสดงให้เห็นว่าในกรณีที่ฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟถูกรบกวนจากการสั่นสะเทือนจากภายนอกวิธีการแบบปรับตัวได้ออกแบบสามารถชดเชยความผิดพลาดของสัญญาณตรวจจับจากวงจรได้จนทำให้สัญญาณตรวจจับมีความถูกต้อง สัญญาณตรวจจับประมาณที่ได้จากวิธีการแบบปรับตัวได้ในภาพประกอบ 4-12 (ข) ของแต่ละอุณหภูมิจะประกอบด้วยสองสัญญาณ คือ สัญญาณที่เกิดจากการป้อนสัญญาณควบคุมไปยังตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดและสัญญาณที่เกิดจากการสั่นสะเทือนจากภายนอก

ภาพประกอบ 4-17 แสดงค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณตรวจจับก่อนและหลังใช้วิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้ที่อุณหภูมิต่างๆ เมื่อฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟถูกรบกวนจากการสั่นสะเทือนจากภายนอก ซึ่งคำนวณมาจากสัญญาณตรวจจับที่แสดงในภาพประกอบ 4-16 จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณตรวจจับหลังใช้วิธีการแบบปรับตัวได้มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณตรวจจับที่ไม่ใช้วิธีการแบบปรับตัวได้ และลดลงจนมีค่าใกล้เคียงกับค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณตรวจจับที่อุณหภูมิ 30 °C นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าเมื่อฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟถูกรบกวนจากการสั่นสะเทือนจากภายนอก ค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณตรวจจับก่อนและหลังใช้แบบปรับตัวได้ที่อุณหภูมิต่างๆ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีปกติดังแสดงในตารางที่ 4-4 ซึ่งค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณตรวจจับกรณีมีการสั่นสะเทือนเพิ่มขึ้นประมาณ 3.5 เท่าจากกรณีปกติ และยังคงคล้อยกับค่า 3σ สัญญาณความผิดพลาดของตำแหน่งของหัวอ่าน/เขียนในตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-4 ค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณตรวจจับของแต่ละอุณหภูมิ

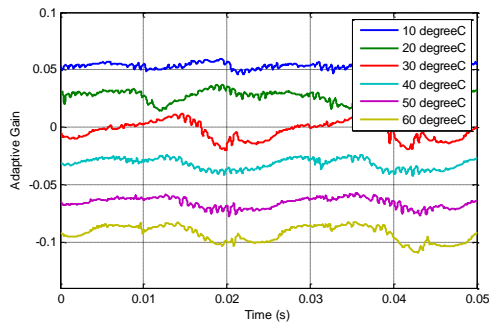
อุณหภูมิ (°C)	ค่า RMS ของกรณีปกติ		ค่า RMS ของกรณีมีการสั่นสะเทือน	
	w/o Adaptive	with Adaptive	w/o Adaptive	with Adaptive
10	0.0106	0.0037	0.0304	0.0120
20	0.0073	0.0036	0.0203	0.0124
30	0.0033	0.0033	0.0128	0.0128
40	0.0070	0.0036	0.0227	0.0132
50	0.0123	0.0038	0.0370	0.0131
60	0.0170	0.0038	0.0468	0.0126



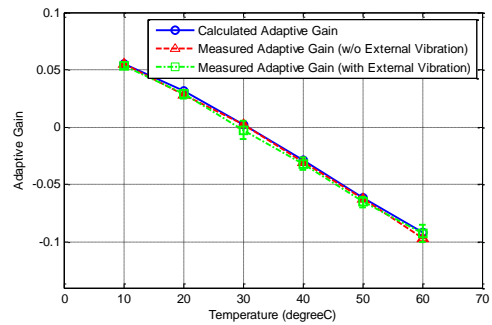
ภาพประกอบ 4-17 ค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณตรวจจับที่อุณหภูมิต่างๆ กรณีมีการ  
สั่นสะเทือนจากภายนอก

ภาพประกอบ 4-18 แสดงค่าอัตราขยายปรับตัวได้ของแต่ละอุณหภูมิ เมื่อฮาร์ดดิสก์  
ไดรฟ์ถูกรบกวนจากการสั่นสะเทือนจากภายนอก จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น  
ค่าอัตราขยายปรับตัวได้มีค่าลดลง โดยที่ค่าอัตราขยายปรับตัวได้มีค่ามากกว่าศูนย์ในช่วงอุณหภูมिन้อย  
กว่า 30 °C และค่าอัตราขยายปรับตัวได้มีค่าน้อยกว่าศูนย์ในช่วงอุณหภูมิมากกว่า 30 °C ซึ่งทั้งสอง  
กรณีเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวขั้วเคลือบเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็ก  
เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ทำให้อัตราขยายในเทอมของสัญญาณ  
ควบคุมมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นและลดลง ในภาพประกอบ 4-14 (ก) แสดงค่าอัตราขยายปรับตัวได้  
ในโดเมนเวลา ซึ่งได้จากวิธีการแบบปรับตัวได้ที่ถูกประมวลผลด้วยตัวประมวลผล STM32 มีการ  
กำหนดค่าอัตราการปรับตัวเท่า 0.03 จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าค่าอัตราขยายปรับตัวได้มีการ  
เปลี่ยนแปลงไปตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ และค่าอัตราขยายปรับตัวได้มีการแกว่งมากกว่า  
กรณีปกติ ซึ่งเป็นผลมากจากการสั่นสะเทือนจากภายนอก ส่วนในภาพประกอบ 4-18 (ข) แสดงค่า  
อัตราขยายปรับตัวได้ที่ได้จากวิธีการแบบปรับตัวได้ที่ถูกประมวลผลด้วยตัวประมวลผล STM32 เมื่อ  
ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ถูกรบกวนจากการสั่นสะเทือนจากภายนอกเปรียบเทียบกับค่าอัตราขยายปรับตัวได้ใน  
กรณีปกติและค่าอัตราขยายปรับตัวได้ที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งค่าอัตราขยายปรับตัวได้กรณีมีการ  
สั่นสะเทือนถูกเฉลี่ยมาจากค่าอัตราขยายปรับตัวได้ที่แสดงในภาพประกอบ 4-18 (ก) และค่า  
อัตราขยายปรับตัวได้ที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งคำนวณมาจากค่าพารามิเตอร์ในวงจรและค่าความจุ  
ไฟฟ้าของตัวขั้วเคลือบเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กของแต่ละอุณหภูมิที่วัดมาขณะทำการทดลองดัง  
แสดงในตารางที่ 4-2 จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าค่าอัตราขยายปรับตัวได้ที่ได้จากวิธีการแบบ  
ปรับตัวได้กรณีมีการสั่นสะเทือนมีค่าใกล้เคียงกับค่าอัตราขยายปรับตัวได้กรณีปกติและค่าอัตราขยาย

ปรับตัวได้ที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งสามารถสังเกตได้จากตารางที่ 4-5 แสดงว่าการสั่นสะเทือนจากภายนอกที่รบกวนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขณะใช้งานไม่มีผลต่อการประมาณค่าอัตราขยายปรับตัวได้ของวิธีการแบบปรับตัวได้ออกแบบ และยังสามารถชดเชยความผิดพลาดของสัญญาณตรวจจับได้จนทำให้สัญญาณตรวจจับมีความถูกต้องมากขึ้นได้เหมือนเดิม



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 4-18 ค่าอัตราขยายปรับตัวได้ที่อุณหภูมิต่างๆ กรณีมีการสั่นสะเทือนจากภายนอก

ตารางที่ 4-5 ค่าอัตราขยายปรับตัวได้ของแต่ละอุณหภูมิ

อุณหภูมิ (°C)	ค่าอัตราขยายปรับตัวได้		
	คำนวณ	กรณีปกติ	กรณีมีการสั่นสะเทือน
10	0.0551	0.0550	0.0538
20	0.0319	0.0279	0.0287
30	0.0025	0.0021	-0.0024
40	-0.0289	-0.0308	-0.0319
50	-0.0614	-0.0624	-0.0653
60	-0.0918	-0.0964	-0.0926

จากผลการประยุกต์ใช้งานวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้ แสดงให้เห็นว่าวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้ออกแบบสามารถชดเชยความผิดพลาดของสัญญาณตรวจจับที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวขับเคลื่อนเพียงโซลิดสเตทขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิโดยใช้ตัวประมวลผล STM32 ได้ ทั้งกรณีที่ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทำงานปกติและกรณีที่ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ถูกรบกวนจากการสั่นสะเทือนจากภายนอก นอกจากนี้วิธีการแบบปรับตัวได้ยังประมาณค่าอัตราขยายปรับตัวได้ได้อย่างถูกต้องจนทำให้สัญญาณตรวจจับมีความถูกต้องมากขึ้น

#### 4.3.3 การตรวจสอบความถูกต้องของวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้

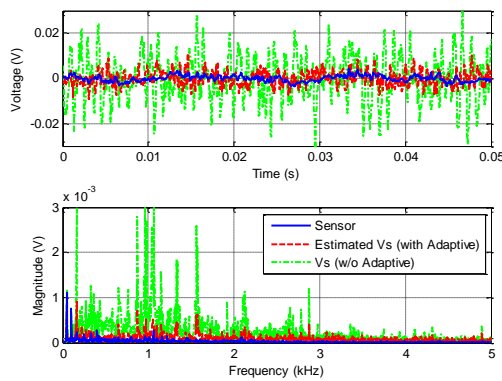
การตรวจสอบความถูกต้องของวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้ เป็นการตรวจสอบความถูกต้องของสัญญาณตรวจจับที่ได้จากวิธีการแบบปรับตัวได้ที่ออกแบบ โดยการนำสัญญาณตรวจจับที่ได้จากวิธีการแบบปรับตัวได้ที่ประมวลผลด้วยตัวประมวลผล STM32 ไปเปรียบเทียบกับสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับการสั่นสะเทือน (Vibration Sensor) ที่อยู่บนบอร์ดวงจร (Circuit Board) ของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ สัญญาณตรวจจับประมาณและค่าอัตราขยายปรับตัวได้ที่ได้จากวิธีการปรับตัวได้ และสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับที่อยู่บนบอร์ดวงจรถูกบันทึกเป็นข้อมูลด้วยบอร์ดเก็บข้อมูลเพื่อใช้สำหรับวิเคราะห์ผล

สำหรับผลการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกจะเป็นผลของการชดเชยความผิดพลาดของสัญญาณตรวจจับด้วยวิธีการแบบปรับตัวได้เปรียบเทียบกับสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับการสั่นสะเทือนที่อยู่บนบอร์ดวงจรเมื่อฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทำงานปกติ โดยการประยุกต์ใช้วงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองและวิธีการแบบปรับตัวได้กับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์รุ่นขนาด 6 TB ซึ่งรายละเอียดได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 4.2 เป็นฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์รุ่นที่มีตัวตรวจจับการสั่นสะเทือนอยู่บนบอร์ดวงจร ตัวตรวจจับสั่นสะเทือนเป็นรุ่น PKGS-00LD2P1-R ซึ่งเป็นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มีค่าความจุไฟฟ้า 770 pF มีการสั่นพ้อง (Resonance) ที่ความถี่ 20 kHz ทำงานในช่วงอุณหภูมิ -40 °C ถึง 85 °C ผลการทดลองประกอบด้วยผลการชดเชยความผิดพลาดของสัญญาณตรวจจับด้วยวิธีการแบบปรับตัวได้เปรียบเทียบกับสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับการสั่นสะเทือนกรณีมีสัญญาณควบคุม ( $V_c \neq 0$ ) ดังแสดงในภาพประกอบ 4-19 และกรณีไม่มีสัญญาณควบคุม ( $V_c = 0$ ) ดังแสดงในภาพประกอบ 4-20 ส่วนที่สองเป็นผลการชดเชยความผิดพลาดของสัญญาณตรวจจับด้วยวิธีการแบบปรับตัวได้เปรียบเทียบกับสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับการสั่นสะเทือนเมื่อฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ถูกรบกวนจากการสั่นสะเทือนจากภายนอกทั้งในกรณีมีสัญญาณควบคุมและไม่มีสัญญาณควบคุม

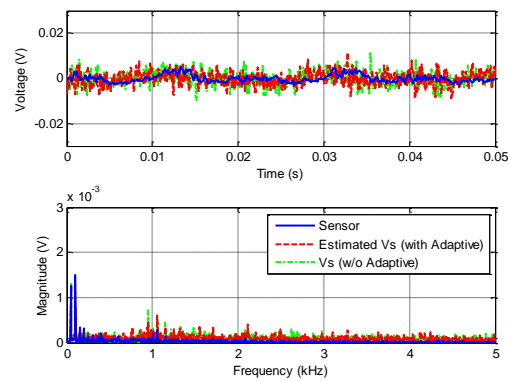
ภาพประกอบ 4-19 แสดงสัญญาณตรวจจับของแต่ละอุณหภูมิก่อนและหลังใช้วิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้เปรียบเทียบกับสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับการสั่นสะเทือนกรณีมีสัญญาณควบคุม จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ 30 °C สัญญาณตรวจจับก่อนและหลังใช้วิธีการแบบปรับตัวได้มีลักษณะที่ใกล้เคียงกันเนื่องจากวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองถูกออกแบบให้เกิดความสมดุล และเมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับการสั่นสะเทือนจะเห็นได้ว่าสัญญาณตรวจจับจากวิธีการแบบปรับตัวได้มีลักษณะที่ใกล้เคียงกันในช่วงความถี่ 0 ถึง 500 Hz ซึ่งเป็นช่วงความถี่ของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการหมุนของแผ่นดิสก์ แต่ที่แตกต่างกันคือสัญญาณตรวจจับจากวิธีการแบบปรับตัวได้จะมีสัญญาณในช่วงความถี่ 100 Hz



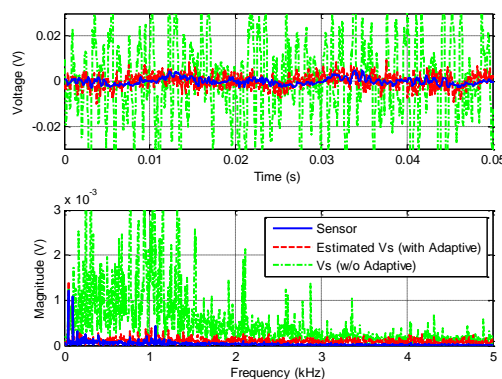
ถึง 5 kHz รวมอยู่ด้วย ซึ่งเป็นผลมาจากสัญญาณควบคุมที่ป้อนไปยังตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์ เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ 10 °C และ 60 °C จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์ยังส่งผลต่อสัญญาณตรวจจับที่ได้จากวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง ทำให้ขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณตรวจจับเพิ่มขึ้นและทำให้สัญญาณตรวจจับเกิดความผิดพลาด แต่การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดังกล่าวไม่ส่งผลต่อสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับการสั่นสะเทือน และจะสังเกตเห็นได้ว่าสัญญาณตรวจจับที่ถูกขจัดด้วยวิธีการแบบปรับตัวได้มีลักษณะที่ใกล้เคียงกับสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับการสั่นสะเทือนในช่วงความถี่ 0 ถึง 500 Hz เหมือนกับอุณหภูมิ 30 °C และสัญญาณตรวจจับดังกล่าวก็มีลักษณะใกล้เคียงกับสัญญาณตรวจจับที่อุณหภูมิ 30 °C ในช่วงความถี่ 100 Hz ถึง 5 kHz



(ก) อุณหภูมิ 10 °C



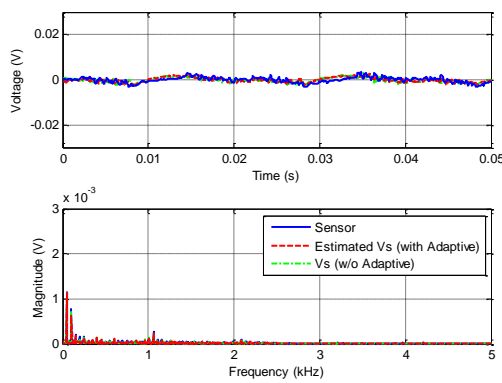
อุณหภูมิ 30 °C



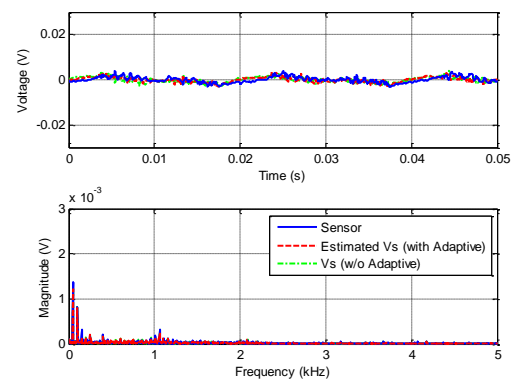
(ค) อุณหภูมิ 60 °C

ภาพประกอบ 4-19 สัญญาณตรวจจับของวงจรที่อุณหภูมิต่างๆ กรณีมีสัญญาณควบคุม

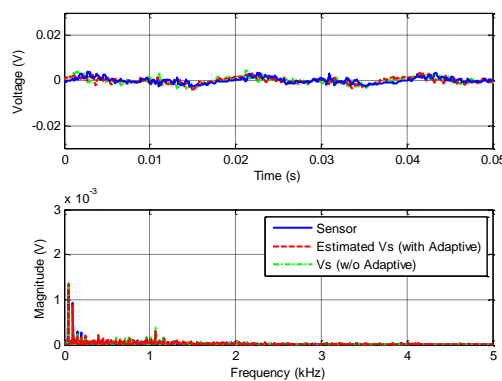
ภาพประกอบ 4-20 แสดงสัญญาณตรวจจับของแต่ละอุณหภูมิก่อนและหลังใช้วิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้เปรียบเทียบกับสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับการสั่นสะเทือนกรณีไม่มีสัญญาณควบคุม จากผลการทดลองจะเห็นว่าสัญญาณตรวจจับก่อนและหลังใช้วิธีการแบบปรับตัวได้ที่อุณหภูมิ 10 °C 30 °C และ 60 °C มีลักษณะเหมือนกัน และการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์กรณีไม่มีสัญญาณควบคุมไม่ส่งผลต่อสัญญาณตรวจจับที่ได้จากวงจรถึงแม้ว่าวงจรจะเกิดความไม่สมดุล เนื่องจากสัญญาณควบคุมมีค่าเป็นศูนย์ทำให้สัญญาณตรวจจับที่ได้มีเฉพาะเทอมของสัญญาณที่ถูกสร้างมาจากตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็ก เมื่อเปรียบเทียบสัญญาณตรวจจับที่ได้จากวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองกับสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับการสั่นสะเทือนจะเห็นว่ามีความใกล้เคียงกันทุกช่วงความถี่ เนื่องจากกรณีนี้สัญญาณตรวจจับไม่มีผลจากสัญญาณควบคุม



(ก) อุณหภูมิ 10 °C



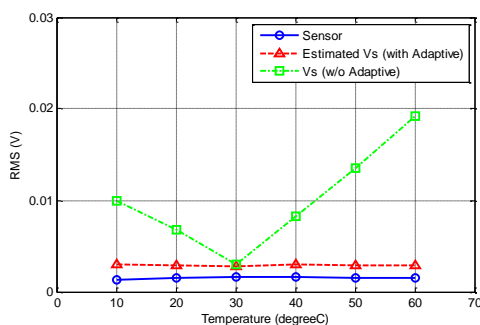
อุณหภูมิ 30 °C



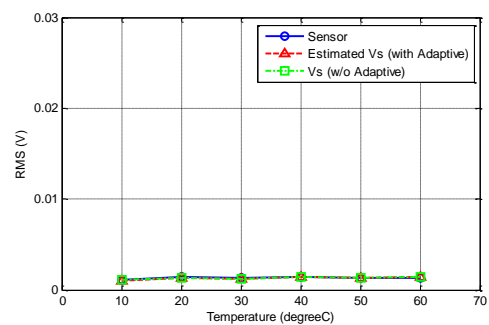
(ค) อุณหภูมิ 60 °C

ภาพประกอบ 4-20 สัญญาณตรวจจับของวงจรที่อุณหภูมิต่างๆ กรณีไม่มีสัญญาณควบคุม

ภาพประกอบ 4-21 แสดงค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณตรวจจับก่อนและหลังใช้วิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้ที่อุณหภูมิต่างๆ เปรียบเทียบกับค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับการสั่นสะเทือนเมื่อฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ใช้งานปกติ โดยในภาพประกอบ 4-21 (ก) แสดงค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณตรวจจับก่อนและหลังใช้วิธีการแบบปรับตัวได้และสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับการสั่นสะเทือนกรณีมีสัญญาณควบคุมซึ่งคำนวณมาจากสัญญาณที่แสดงในภาพประกอบ 4-19 จะเห็นได้ว่าค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณตรวจจับหลังใช้วิธีการแบบปรับตัวได้มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณตรวจจับที่ไม่ใช้วิธีการแบบปรับตัวได้ และลดลงจนมีค่าใกล้เคียงกับค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณตรวจจับที่อุณหภูมิ 30 °C แต่เมื่อเปรียบเทียบกับค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับการสั่นสะเทือนจะเห็นได้ว่ามีความแตกต่างกันอยู่ประมาณ 2 เท่า เนื่องจากสัญญาณตรวจจับที่ได้จากวิธีการแบบปรับตัวได้จะมีส่วนของสัญญาณที่เป็นผลมาจากสัญญาณควบคุมรวมอยู่ด้วย และในภาพประกอบ 4-21 (ข) แสดงค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณตรวจจับก่อนและหลังใช้วิธีการแบบปรับตัวได้และสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับการสั่นสะเทือนกรณีไม่มีสัญญาณควบคุม ซึ่งคำนวณมาจากสัญญาณที่แสดงในภาพประกอบ 4-20 จะเห็นได้ว่าค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณตรวจจับที่ใช้และไม่ใช้วิธีการแบบปรับตัวได้ และค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับการสั่นสะเทือนมีค่าใกล้เคียงกันมากในทุกๆ อุณหภูมิดังแสดงในตารางที่ 4-6 เนื่องจากสัญญาณตรวจจับที่ได้จากวิธีการแบบปรับตัวได้ไม่มีส่วนของสัญญาณที่เกิดจากสัญญาณควบคุม ดังนั้นสัญญาณตรวจจับของวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบมีความถูกต้อง สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานแทนตัวตรวจจับการสั่นสะเทือนได้



(ก) กรณีมีสัญญาณควบคุม



(ข) กรณีไม่มีสัญญาณควบคุม

ภาพประกอบ 4-21 ค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณตรวจจับที่อุณหภูมิต่างๆ

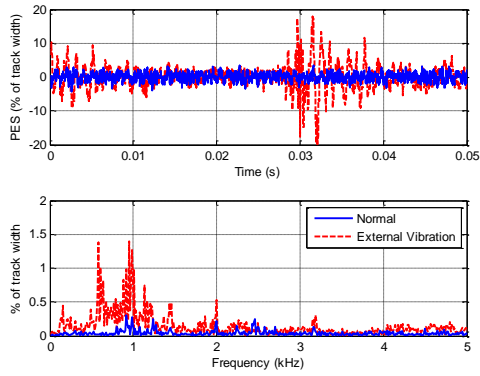
ตารางที่ 4-6 ค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณตรวจจับของแต่ละอุณหภูมิ

อุณหภูมิ (°C)	ค่า RMS กรณีมีสัญญาณควบคุม			ค่า RMS กรณีไม่มีสัญญาณควบคุม		
	Sensor	w/o Adaptive	with Adaptive	Sensor	w/o Adaptive	with Adaptive
10	0.0013	0.0099	0.0030	0.0012	0.0011	0.0011
20	0.0015	0.0068	0.0029	0.0014	0.0013	0.0013
30	0.0016	0.0029	0.0028	0.0013	0.0012	0.0012
40	0.0016	0.0083	0.0030	0.0015	0.0015	0.0014
50	0.0015	0.0135	0.0029	0.0013	0.0013	0.0013
60	0.0015	0.0192	0.0029	0.0013	0.0014	0.0014

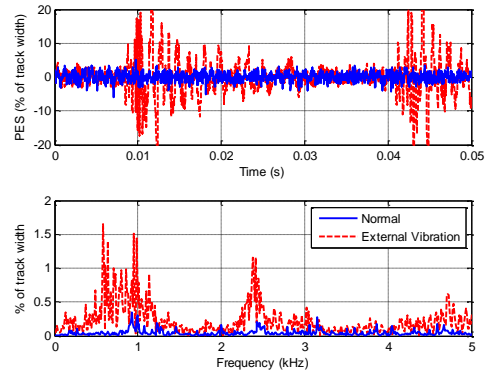
สำหรับผลการทดลองในส่วนที่สองเป็นผลการชดเชยความผิดพลาดของสัญญาณตรวจจับด้วยวิธีการแบบปรับตัวได้เปรียบเทียบกับสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับการสั่นสะเทือนเมื่อฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟถูกรบกวนจากการสั่นสะเทือนจากภายนอกทั้งในกรณีมีสัญญาณควบคุมและไม่มีสัญญาณควบคุม การสั่นสะเทือนจากภายนอกถูกสร้างมาจากพัดลมระบายอากาศที่ถูกทำให้เกิดความไม่สมดุลเพื่อให้เกิดการสั่นสะเทือนและปรับความเร็วในการหมุนของพัดลมระบายอากาศจนทำให้ค่า  $3\sigma$  ของสัญญาณความผิดพลาดของตำแหน่งหัวอ่าน/เขียน (PES) มีค่ามากกว่า 10 % ของความกว้างแถบข้อมูลดังแสดงในภาพประกอบ 4-22 และตารางที่ 4-7 แล้วพิจารณาประสิทธิภาพการชดเชยความผิดพลาดของสัญญาณตรวจจับด้วยวิธีการแบบปรับตัวได้เปรียบเทียบกับสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับการสั่นสะเทือนทั้งในกรณีมีสัญญาณควบคุมและไม่มีสัญญาณควบคุมดังแสดงในภาพประกอบ 4-23 และภาพประกอบ 4-24 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพิจารณาค่าอัตราขยายปรับตัวได้ทั้งกรณีที่ฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟใช้งานปกติและกรณีที่ถูกรบกวนจากการสั่นสะเทือนจากภายนอกดังแสดงในภาพประกอบ 4-26

ตารางที่ 4-7 ค่า  $3\sigma$  ของสัญญาณความผิดพลาดของตำแหน่งของแต่ละหัวอ่าน/เขียน

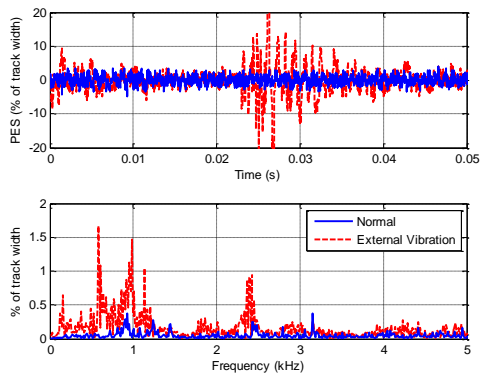
Case Study	$3\sigma$ ของ PES (% of track width)					
	Head 6	Head 7	Head 8	Head 9	Head 10	Average
Normal	3.36	3.66	3.94	3.91	3.66	3.71
External Vibration	10.83	15.37	12.32	11.79	14.38	12.94



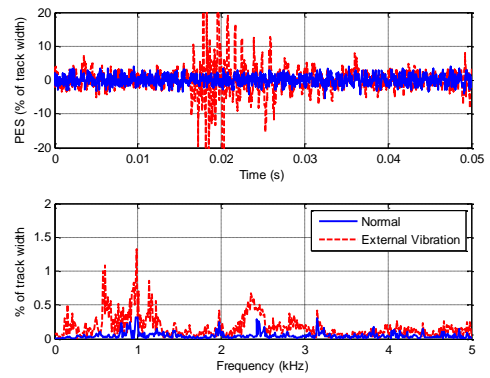
(ก) หัวอ่าน/เขียนที่ 6



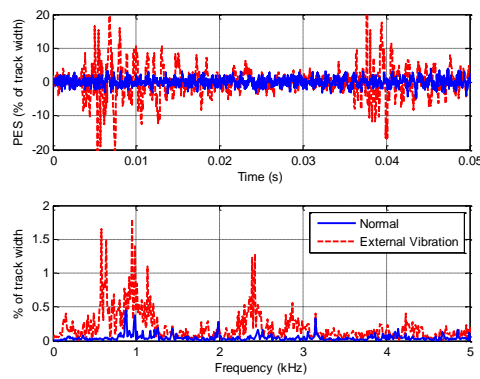
(ข) หัวอ่าน/เขียนที่ 7



(ค) หัวอ่าน/เขียนที่ 8



(ง) หัวอ่าน/เขียนที่ 9



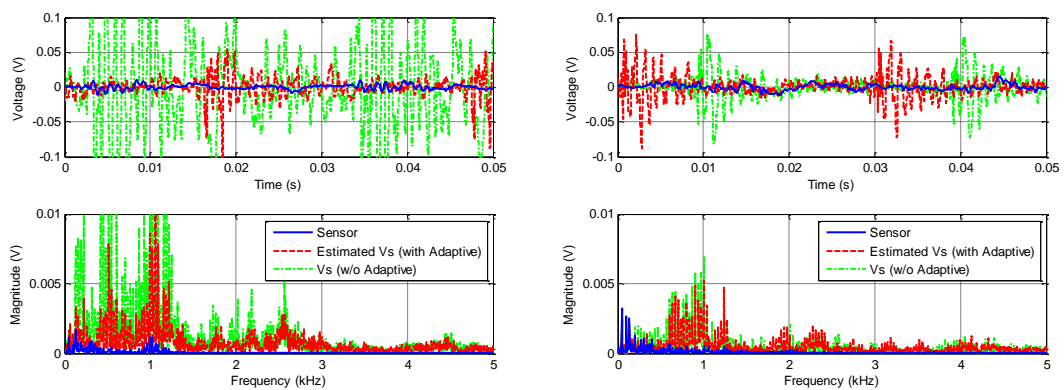
(จ) หัวอ่าน/เขียนที่ 10

ภาพประกอบ 4-22 สัญญาณความผิดพลาดของตำแหน่งของหัวอ่าน/เขียนในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ

ภาพประกอบ 4-22 แสดงการเปรียบเทียบสัญญาณความผิดพลาดของตำแหน่งของหัวอ่าน/เขียนหัวที่ 6 ถึง 10 ระหว่างการใช้งานฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์แบบปกติ กับการใช้งานฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เมื่อมีการรบกวนจากการสั่นสะเทือนจากภายนอก สัญญาณความผิดพลาดของตำแหน่งของหัวอ่าน/เขียนเป็นสัญญาณที่ใช้บ่งบอกพฤติกรรมที่ผิดปกติของหัวอ่าน/เขียนไปบนแถบข้อมูล จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าสัญญาณความผิดพลาดของตำแหน่งของหัวอ่าน/เขียนที่ 6 ถึง 10 ของการใช้งานฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์แบบปกติค่อนข้างกว้างอยู่ใกล้ๆ ศูนย์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหัวอ่าน/เขียนเคลื่อนที่ไปบนแถบข้อมูลได้อย่างแม่นยำ แต่ในทางกลับกันเมื่อมีการรบกวนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ด้วยการสั่นสะเทือนจากภายนอกสัญญาณความผิดพลาดของตำแหน่งของหัวอ่าน/เขียนที่ 6 ถึง 10 มีการแกว่งออกจากศูนย์ค่อนข้างมาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหัวอ่าน/เขียนเคลื่อนที่ออกจากกึ่งกลางแถบข้อมูลไปมากทำให้ความแม่นยำในการอ่านหรือเขียนข้อมูลลดลง นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าการสั่นสะเทือนจากภายนอกที่เกิดขึ้นมีการเกิดขึ้นเป็นช่วงๆ และมีความถี่อยู่ในช่วง 100 Hz ถึง 5 kHz สามารถสังเกตได้จากสเปกตรัมของสัญญาณความผิดพลาดของตำแหน่งของหัวอ่าน/เขียน เมื่อพิจารณาตารางที่ 4-7 จะเห็นได้ว่าค่า  $3\sigma$  ของสัญญาณความผิดพลาดของตำแหน่งของหัวอ่าน/เขียนที่ 6 ถึง 10 ของการใช้งานฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์แบบปกติมีค่าน้อยกว่า 10 % ของความกว้างแถบข้อมูลซึ่งอยู่ในมาตรฐานที่กำหนดไว้ แต่เมื่อมีการรบกวนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ด้วยการสั่นสะเทือนจากภายนอกทำให้ค่า  $3\sigma$  ของสัญญาณความผิดพลาดของตำแหน่งของหัวอ่าน/เขียนที่ 6 ถึง 10 มีค่าสูงขึ้นและสูงกว่า 10 % ของความกว้างแถบข้อมูลซึ่งสูงกว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ ทำให้ประสิทธิภาพในการอ่านหรือเขียนข้อมูลลดลง

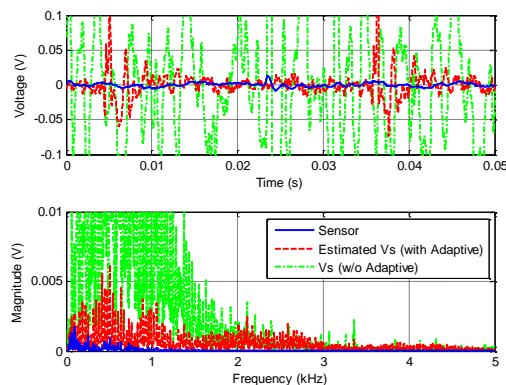
ภาพประกอบ 4-23 แสดงสัญญาณตรวจจับของแต่ละอุณหภูมิก่อนและหลังใช้วิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้เปรียบเทียบกับสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับการสั่นสะเทือนกรณีมีสัญญาณควบคุมและฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ถูกรบกวนจากการสั่นสะเทือนจากภายนอก จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ 30 °C สัญญาณตรวจจับก่อนและหลังใช้วิธีการแบบปรับตัวได้มีลักษณะที่ใกล้เคียงกันเนื่องจากวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองถูกออกแบบให้เกิดความสมดุล และเมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับการสั่นสะเทือนจะเห็นได้ว่าสัญญาณตรวจจับจากวิธีการแบบปรับตัวได้มีลักษณะที่ใกล้เคียงกันในช่วงความถี่ 0 ถึง 500 Hz แต่ในช่วงความถี่ 100 Hz ถึง 5 kHz สัญญาณตรวจจับจากวิธีการแบบปรับตัวได้จะมีสัญญาณมีลักษณะใกล้เคียงกับสัญญาณความผิดพลาดของตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนดังแสดงในภาพประกอบ 4-22 เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ 10 °C และ 60 °C จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ยังส่งผลต่อสัญญาณตรวจจับที่ได้จากวงจรทำให้ขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณตรวจจับเพิ่มขึ้น และทำให้สัญญาณตรวจจับเกิดความผิดพลาด แต่การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดังกล่าวไม่ส่งผลต่อ

สัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับการสั่นสะเทือน และจะสังเกตเห็นได้ว่าสัญญาณตรวจจับที่ถูกชดเชยด้วยวิธีการแบบปรับตัวได้มีลักษณะที่ใกล้เคียงกับสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับการสั่นสะเทือนในช่วงความถี่ 0 ถึง 500 Hz เหมือนกับอุณหภูมิ 30 °C แต่ในช่วงความถี่ 100 Hz ถึง 5 kHz สัญญาณตรวจจับที่ถูกชดเชยด้วยวิธีการแบบปรับตัวได้ที่อุณหภูมิ 10 °C และ 60 °C มีความแตกต่างจากสัญญาณตรวจจับที่อุณหภูมิ 30 °C เนื่องจากในการทดลองแต่ละอุณหภูมิไม่สามารถสร้างสัญญาณการสั่นสะเทือนไปรบกวนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้เหมือนเดิมทุกครั้ง ทำให้สัญญาณตรวจจับที่ได้จากวิธีการแบบปรับตัวได้มีความแตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับความรุนแรงของการสั่นสะเทือนที่สร้างไปรบกวนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ แต่อย่างไรก็ตามวิธีการแบบปรับตัวได้ก็ยังสามารถชดเชยความผิดพลาดของสัญญาณตรวจจับที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้และทำให้สัญญาณตรวจจับมีความถูกต้องมากขึ้น



(ก) อุณหภูมิ 10 °C

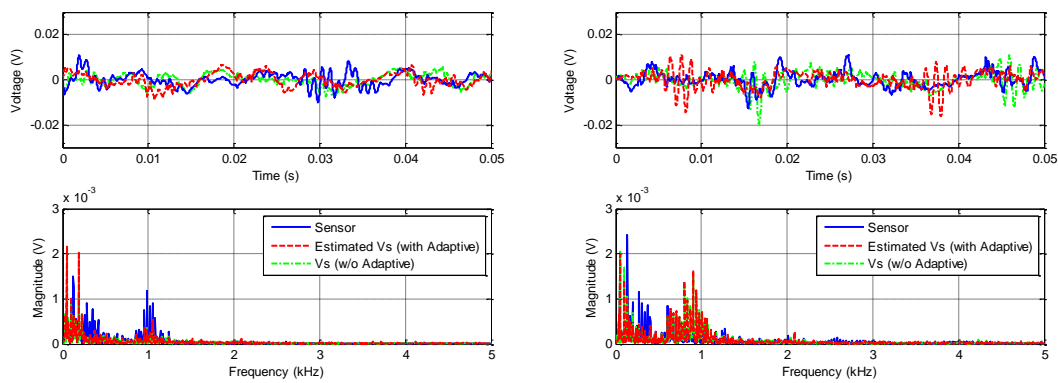
อุณหภูมิ 30 °C



(ค) อุณหภูมิ 60 °C

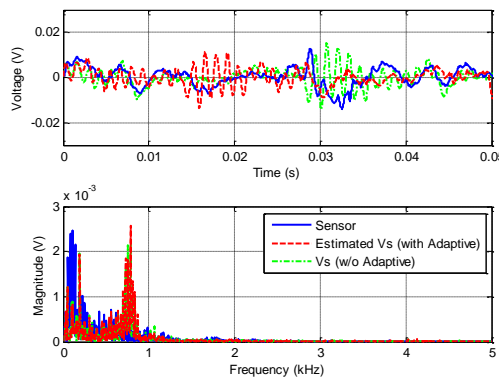
ภาพประกอบ 4-23 สัญญาณตรวจจับของวงจรถืออุณหภูมิต่างๆ กรณีมีสัญญาณควบคุมและมีการสั่นสะเทือนจากภายนอก

ภาพประกอบ 4-24 แสดงสัญญาณตรวจจับของแต่ละอุณหภูมิก่อนและหลังใช้วิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้เปรียบเทียบกับสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับการสั่นสะเทือนกรณีไม่มีสัญญาณควบคุมและฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟถูกรบกวนจากการสั่นสะเทือนจากภายนอก จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าสัญญาณตรวจจับก่อนและหลังใช้วิธีการแบบปรับตัวได้ที่อุณหภูมิ 10 °C 30 °C และ 60 °C มีลักษณะใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบสัญญาณตรวจจับที่ได้จากวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองกับสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับการสั่นสะเทือนจะเห็นได้ว่ามีลักษณะใกล้เคียงกันทุกช่วงความถี่ เนื่องจากกรณีนี้สัญญาณตรวจจับไม่มีผลจากสัญญาณควบคุม นอกจากนี้ยังเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟกรณีไม่มีสัญญาณควบคุมไม่ส่งผลต่อสัญญาณตรวจจับที่ได้จากวงจร เนื่องจากสัญญาณควบคุมมีค่าเป็นศูนย์ทำให้สัญญาณตรวจจับที่ได้มีเฉพาะสัญญาณที่ถูกสร้างมาจากตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็ก



(ก) อุณหภูมิ 10 °C

อุณหภูมิ 30 °C

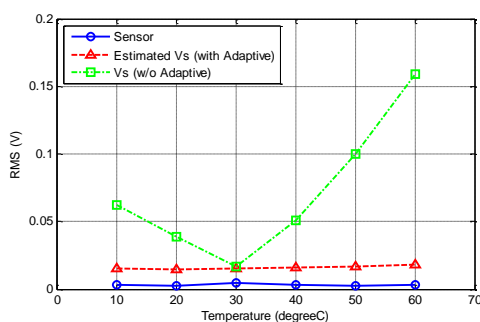


(ค) อุณหภูมิ 60 °C

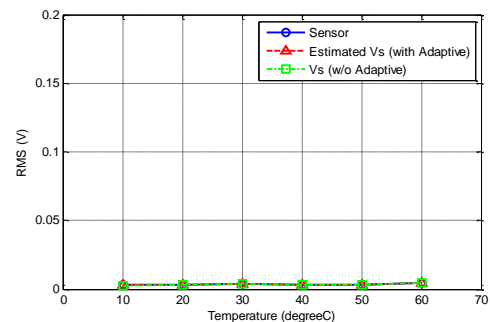
ภาพประกอบ 4-24 สัญญาณตรวจจับของวงจรที่อุณหภูมิต่างๆ กรณีไม่มีสัญญาณควบคุมและมีการสั่นสะเทือนจากภายนอก



ภาพประกอบ 4-25 แสดงค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณตรวจจับก่อนและหลังใช้วิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้ที่อุณหภูมิต่างๆ เปรียบเทียบกับค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับการสั่นสะเทือนเมื่อฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ถูกรบกวนจากการสั่นสะเทือนจากภายนอก โดยในภาพประกอบ 4-25 (ก) แสดงค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณตรวจจับก่อนและหลังใช้วิธีการแบบปรับตัวได้และสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับการสั่นสะเทือนกรณีมีสัญญาณควบคุม ซึ่งคำนวณมาจากสัญญาณที่แสดงในภาพประกอบ 4-23 จะเห็นได้ว่าค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณตรวจจับหลังใช้วิธีการแบบปรับตัวได้มีค่าใกล้เคียงค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับการสั่นสะเทือนมากกว่าค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณตรวจจับที่ไม่ใช้วิธีการแบบปรับตัวได้ แต่อย่างไรก็ตามก็ยังมีค่าแตกต่างจากค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับการสั่นสะเทือน เนื่องจากสัญญาณตรวจจับที่ได้จากวิธีการแบบปรับตัวได้จะมีส่วนของสัญญาณที่เป็นผลมาจากสัญญาณควบคุมรวมอยู่ด้วย และในภาพประกอบ 4-25 (ข) แสดงค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณตรวจจับก่อนและหลังใช้วิธีการแบบปรับตัวได้และสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับการสั่นสะเทือนกรณีไม่มีสัญญาณควบคุม ซึ่งคำนวณมาจากสัญญาณที่แสดงในภาพประกอบ 4-24 จะเห็นได้ว่าค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณตรวจจับที่ใช้และไม่ใช้วิธีการแบบปรับตัวได้ และค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับการสั่นสะเทือนมีค่าใกล้เคียงกันที่อุณหภูมิเดียวกันดังแสดงในตารางที่ 4-8 แต่ในแต่ละอุณหภูมิจะมีค่าแตกต่างกัน เนื่องจากค่าดังกล่าวขึ้นอยู่กับความรุนแรงของการสั่นสะเทือนที่สร้างไปรบกวนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์



(ก) กรณีมีสัญญาณควบคุม



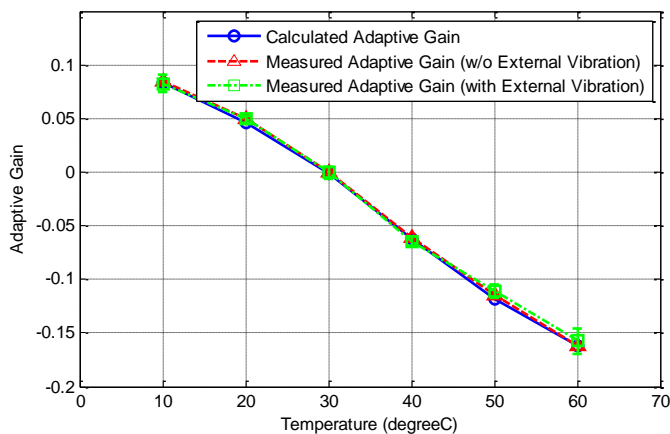
(ข) กรณีไม่มีสัญญาณควบคุม

ภาพประกอบ 4-25 ค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณตรวจจับที่อุณหภูมิต่างๆ กรณีมีการสั่นสะเทือนจากภายนอก

ตารางที่ 4-8 ค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณตรวจจับของแต่ละอุณหภูมิ

อุณหภูมิ (°C)	ค่า RMS กรณีมีสัญญาณควบคุม			ค่า RMS กรณีไม่มีสัญญาณควบคุม		
	Sensor	w/o Adaptive	with Adaptive	Sensor	w/o Adaptive	with Adaptive
10	0.0033	0.0622	0.0152	0.0031	0.0027	0.0029
20	0.0028	0.0388	0.0145	0.0030	0.0029	0.0029
30	0.0046	0.0166	0.0153	0.0035	0.0037	0.0037
40	0.0034	0.0512	0.0157	0.0034	0.0032	0.0032
50	0.0026	0.1002	0.0170	0.0032	0.0029	0.0030
60	0.0032	0.1591	0.0182	0.0045	0.0043	0.0045

นอกจากนี้ยังพิจารณาค่าอัตราขยายปรับตัวได้ทั้งกรณีฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ใช้งานปกติ และกรณีที่ถูกรบกวนจากการสั่นสะเทือนจากภายนอกเปรียบเทียบกับค่าอัตราขยายปรับตัวที่ได้จากการคำนวณดังแสดงในภาพประกอบ 4-26 เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้ออกแบบเมื่อประยุกต์ใช้งานกับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์รุ่น 6 TB จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าค่าอัตราขยายปรับตัวได้มีค่ามากกว่าศูนย์เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปน้อยกว่า 30 °C และค่าอัตราขยายปรับตัวได้มีค่าน้อยกว่าศูนย์เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปมากกว่า 30 °C เนื่องการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ทำให้อัตราขยายในเทอมของสัญญาณควบคุมมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นและลดลง ซึ่งสอดคล้องกับอัตราขยายปรับตัวได้ของวิธีการแบบปรับตัวได้เมื่อประยุกต์ใช้งานกับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์รุ่น 4 TB ที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 4.3.2 นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าค่าอัตราขยายปรับตัวได้ที่ได้จากวิธีการแบบปรับตัวได้กรณีฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ใช้งานปกติและกรณีถูกรบกวนจากการสั่นสะเทือนจากภายนอกมีค่าใกล้เคียงกับค่าอัตราขยายปรับตัวได้ที่ได้จากการคำนวณซึ่งสามารถสังเกตได้จากตารางที่ 4-10 แสดงว่าค่าอัตราขยายปรับตัวได้ที่ได้จากวิธีการแบบปรับตัวได้มีความถูกต้อง ค่าอัตราขยายปรับตัวได้ที่ได้จากการคำนวณถูกคำนวณมาจากค่าพารามิเตอร์ในวงจร และค่าความจุไฟฟ้าของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กของแต่ละอุณหภูมิที่วัดมาขณะทำการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4-9



ภาพประกอบ 4-26 ค่าอัตราขยายปรับตัวได้ที่อุณหภูมิต่างๆ

ตารางที่ 4-9 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองของแต่ละอุณหภูมิ

อุณหภูมิภายใน HDD (°C)	อุณหภูมিবนวงจร SSA (°C)	$C_p$ (nF)	$C_1$ (nF)	$R_3$ (k $\Omega$ )	$R_4$ (k $\Omega$ )
10	30	2.73	9.95	30.1	100.6
20	31	2.84	9.96	30.1	100.7
30	31	3.00	9.98	30.1	100.6
40	31	3.18	9.97	30.1	100.6
50	32	3.34	9.98	30.1	100.6
60	32	3.47	9.98	30.1	100.6

ตารางที่ 4-10 ค่าอัตราขยายปรับตัวได้ของแต่ละอุณหภูมิ

อุณหภูมิ (°C)	ค่าอัตราขยายปรับตัวได้		
	คำนวณ	กรณีปกติ	กรณีมีการสั่นสะเทือน
10	0.0830	0.0850	0.0822
20	0.0461	0.0498	0.0492
30	-0.0013	-0.0006	-0.0005
40	-0.0625	-0.0616	-0.0643
50	-0.1185	-0.1150	-0.1109
60	-0.1621	-0.1616	-0.1576

จากการตรวจสอบความถูกต้องของวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้ แสดงให้เห็นว่าวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองและวิธีการปรับตัวได้ออกแบบสามารถประยุกต์ใช้งานกับตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟรุ่นต่างๆ ได้ สัญญาณตรวจจับที่ได้จากวิธีการแบบปรับตัวได้ค่อนข้างมีความถูกต้องเมื่อเปรียบเทียบกับตัวตรวจจับการสั่นสะเทือน และสามารถตรวจจับสัญญาณที่สร้างมาจากตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กได้ทั้งกรณีที่เป็นผลมาจากสัญญาณควบคุมและกรณีที่มีการสั่นสะเทือนจากภายนอก นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าความผิดพลาดของสัญญาณตรวจจับที่ได้จากวงจรเป็นผลมาจากสัญญาณควบคุมที่ป้อนไปยังตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็ก

#### 4.4 สรุปผลการทดลอง

การออกแบบวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้ในบนี้ เป็นการพัฒนาและการประยุกต์ใช้งานวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้กับตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ เพื่อชดเชย ความผิดพลาดของสัญญาณตรวจจับที่ได้จากวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟขณะใช้งาน วิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้ถูกออกแบบโดยการประยุกต์ใช้วิธีการกำลังสองเฉลี่ยต่ำสุด การประเมินประสิทธิภาพของวิธีการแบบปรับตัวได้ออกแบบทำได้โดยการประยุกต์ใช้กับตัวประมวลผล STM32 และทดลองกับฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟรุ่นต่างๆ ทั้งในกรณีที่ฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟใช้งานปกติและกรณีที่มีการรบกวนจากการสั่นสะเทือนจากภายนอก จากการศึกษาที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้นแสดงให้เห็นว่าวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้ออกแบบสามารถชดเชยความผิดพลาดและเพิ่มความถูกต้องของสัญญาณตรวจจับได้ และสามารถประมาณค่าอัตราขยายในเทอมของสัญญาณควบคุมได้สอดคล้องกับค่าอัตราขยายที่ได้จากการคำนวณและค่าอัตราการปรับตัวที่เหมาะสมที่สุดอยู่ในช่วง 0.02 ถึง 0.04 วิธีการแบบปรับตัวได้สามารถประยุกต์ใช้กับตัวประมวลผล STM32 และฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟรุ่นต่างๆ ได้ และสามารถเพิ่มความถูกต้องของสัญญาณตรวจจับได้ทั้งกรณีที่ฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟใช้งานปกติและกรณีที่มีการรบกวนจากการสั่นสะเทือนจากภายนอก นอกจากนี้สัญญาณตรวจจับที่ได้จากวิธีการแบบปรับตัวได้ค่อนข้างมีความถูกต้องเมื่อเปรียบเทียบกับตัวตรวจจับการสั่นสะเทือน และสามารถตรวจจับสัญญาณการสั่นสะเทือนที่เป็นผลมาจากสัญญาณควบคุมและการสั่นสะเทือนจากภายนอก ดังนั้นวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้ออกแบบสามารถประยุกต์ใช้กับตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กและสามารถตรวจจับการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟได้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย ปัญหาและข้อเสนอแนะ

บทนี้จะกล่าวถึงการสรุปผลการวิจัย ปัญหาและข้อเสนอแนะของงานวิจัย งานวิจัยนี้ได้ศึกษาวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง แล้วได้ออกแบบวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่เหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งานกับตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เพื่อตรวจจับสัญญาณการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

วิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง เป็นวิธีการที่ใช้สำหรับการประยุกต์ใช้ตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นทั้งตัวขับเคลื่อนและตัวตรวจจับไปพร้อมๆ กัน เพื่อตรวจจับสัญญาณการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นที่หัวอ่าน/เขียนในขณะที่มีการขับเคลื่อนให้ตัวเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนทำงานปกติ สำหรับการออกแบบวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองในงานวิจัยนี้ได้คำนึงถึงความเหมาะสมของการนำไปประยุกต์ใช้งานกับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จริงในอุตสาหกรรม ซึ่งวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบประกอบด้วย 2 ส่วน คือ การออกแบบวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองและการออกแบบวิธีการแบบปรับตัวได้ สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

การออกแบบวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเอง เป็นการพัฒนาและศึกษาการประยุกต์ใช้งานวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองกับตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่ออกแบบเป็นวงจรที่ใช้อุปกรณ์ในวงจรลดลงและมีเงื่อนไขการออกแบบวงจรให้เกิดความสมดุลเพียงเงื่อนไขเดียว ทำให้เหมาะสมและง่ายสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งาน จากผลการศึกษาในบทที่ 3 แสดงให้เห็นว่าวงจรที่ออกแบบมีคุณสมบัติและการตอบสนองที่ความเหมาะสมของการนำไปประยุกต์ใช้งานกับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยวงจรที่ออกแบบไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียน และสามารถควบคุมหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ให้ทำงานได้อย่างปกติ และวงจรที่ออกแบบสามารถตรวจจับสัญญาณที่ถูกสร้างมาจากตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กได้ในขณะที่สัญญาณควบคุมถูกป้อนไปยังตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็ก ซึ่งสัญญาณที่ตรวจจับได้เป็นสัญญาณที่สอดคล้องกับตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนที่เคลื่อนที่ไป แต่อย่างไรก็ตามวงจรที่ออกแบบก็ยังมีปัญหาเกี่ยวกับความไม่สมดุลของวงจร ซึ่งความไม่สมดุลของวงจรเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ทำให้สัญญาณตรวจจับของวงจรเกิดความผิดพลาด

การออกแบบวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้ เป็นการพัฒนาและการประยุกต์ใช้งานวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้กับตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เพื่อชดเชยความผิดพลาดของสัญญาณตรวจจับที่ได้จากวงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขณะใช้งาน วิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้ถูกออกแบบโดยการประยุกต์ใช้วิธีการกำลังสองเฉลี่ยต่ำสุด การประเมินประสิทธิภาพของวิธีการแบบปรับตัวได้ที่ออกแบบทำได้โดยการประยุกต์ใช้กับตัวประมวลผล STM32 และทดลองกับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์รุ่นต่างๆ ทั้งในกรณีที่ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ใช้งานปกติและกรณีที่มีการรบกวนจากการสั่นสะเทือนจากภายนอก และอุณหภูมิภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีการเปลี่ยนแปลงในช่วง  $10^{\circ}\text{C}$  ถึง  $60^{\circ}\text{C}$  ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ จากผลการศึกษาในบทที่ 4 แสดงให้เห็นว่าวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองแบบปรับตัวได้ที่ออกแบบสามารถชดเชยความผิดพลาดและเพิ่มความถูกต้องของสัญญาณตรวจจับได้ และสามารถประมาณค่าอัตราขยายในเทอมของสัญญาณควบคุมได้สอดคล้องกับค่าอัตราขยายที่ได้จากการคำนวณและค่าอัตราการปรับตัวที่เหมาะสมที่สุดอยู่ในช่วง 0.02 ถึง 0.04 วิธีการแบบปรับตัวได้สามารถประยุกต์ใช้กับตัวประมวลผล STM32 และฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์รุ่นต่างๆ ได้ และสามารถเพิ่มความถูกต้องของสัญญาณตรวจจับได้ทั้งกรณีที่ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ใช้งานปกติและกรณีที่มีการรบกวนจากการสั่นสะเทือนจากภายนอก นอกจากนี้สัญญาณตรวจจับที่ได้จากวิธีการแบบปรับตัวได้ค่อนข้างมีความถูกต้องเมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับการสั่นสะเทือน และสามารถตรวจจับสัญญาณการสั่นสะเทือนที่เป็นผลมาจากสัญญาณควบคุมและการสั่นสะเทือนจากภายนอก

ดังนั้นวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่นำเสนอในงานวิจัยนี้มีความเหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้กับตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์รุ่นต่างๆ ได้ เพื่อตรวจจับการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นที่หัวอ่าน/เขียนเมื่อฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ถูกรบกวนจากการสั่นสะเทือนจากภายนอก โดยสัญญาณตรวจจับที่ได้จากวิธีการนี้มีความถูกต้อง และไม่ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็ก เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ นอกจากนี้วิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่นำเสนอสามารถนำไปประยุกต์ใช้แทนตรวจจับการสั่นสะเทือนที่อยู่บนบอร์ดวงจรของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เพื่อลดต้นทุนในการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในอุตสาหกรรม

## 5.2 ปัญหา

5.2.1 ค่าความจุไฟฟ้าของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ค่อนข้างมีค่าต่ำ และมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ทำให้การทดลองในแต่ละครั้งได้ผลการทดลองที่แตกต่างกันเล็กน้อย

5.2.2 การควบคุมอุณหภูมิที่ตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ค่อนข้างจะควบคุมได้ยาก เนื่องจากอุณหภูมิจะมีการเปลี่ยนแปลงเรื่อยๆ ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดได้ บางครั้งตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กมีความร้อนสะสม ทำให้อุณหภูมิที่วัดได้อาจจะไม่ใช่อุณหภูมิที่ตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กจริงๆ และส่งผลการวัดผลการทดลองเกิดความผิดพลาดได้

5.2.3 สัญญาณตรวจจับที่ได้จากวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่นำเสนออาจมีความแตกต่างจากสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับการสั่นสะเทือนที่อยู่บนบอร์ดวงจรของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เนื่องจากตัวตรวจจับการสั่นสะเทือนกับตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กวางที่ตำแหน่งแตกต่างกัน เมื่อฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ถูกรบกวนจากการสั่นสะเทือนจากภายนอกการสั่นสะเทือนที่ตำแหน่งต่างๆ ของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เกิดการสั่นสะเทือนที่แตกต่างกัน

## 5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 วงจรขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่นำเสนอสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดเพื่อปรับปรุงให้วงจรมีการตอบสนองตลอดช่วงความถี่ โดยไม่มีผลจากพารามิเตอร์ในวงจรและวงจรสามารถทำงานได้เหมือนเดิม

5.3.2 สัญญาณตรวจจับที่ได้จากวิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่นำเสนอสามารถนำไปใช้แทนสัญญาณที่ได้จากตรวจจับการสั่นสะเทือน เพื่อป้อนกลับไปยังตัวควบคุมสำหรับควบคุมและลดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

5.3.3 วิธีการขับเคลื่อนและตรวจจับด้วยตนเองที่นำเสนอสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดเพื่อประยุกต์ใช้สำหรับการตรวจจับความเสียหายของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กที่หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เช่น การแตกหักของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็ก ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้การตอบสนองของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกขนาดเล็กมีการเปลี่ยนแปลงไป

### บรรณานุกรม

- [1] A. A. Mamun, G. Guo, and C. Bi, *Hard Disk Drive Mechatronics and Control*, USA: CRC Press Taylor & Francis Group, 2006.
- [2] B. M. Chen, T. H. Lee, K. Peng, and V. Venkataramanan, *Hard Disk Drive Servo Systems*, New York: Springer-Verlag, 2nd ed., 2006.
- [3] *IEEE Standard on Piezoelectricity*, ANSI/IEEE Std., 176-1987, Jan. 1988.
- [4] C. Du, L. Xie, J. Zhang, and G. Guo, "Disturbance Rejection for A Data Storage System Via Sensitivity Loop Shaping and Adaptive Nonlinear Compensation," *IEEE/ASME Trans. Mechatronic.*, vol. 13, no. 5, pp. 493–501, Oct. 2008.
- [5] D. Huang, J. X. Xu, V. Venkataramanan, W. Lim, C. L. E. Chow, and T. C. T. Huynh, "Modeling and Compensation of Low Fly-Height Vibrations in High Density Hard Disk Drive Servo Systems," in *Proc. 36<sup>th</sup> Annu. Conf. on IEEE Ind. Electron. Soc.*, 2010, pp. 900–905.
- [6] J. X. Xu, D. Huang, V. Venkataramanan, and T. C. T. Huynh, "Adaptive Compensation of Contact-Induced Vibration in High Density HDD Servo Systems Using Phase Lead Peak Filter Method," *Asian Journal of Control*, vol. 15, no. 6, pp. 1638–1647, Nov. 2013.
- [7] J. N. Teoh, C. Du, G. Guo, and L. Xie, "Rejecting High Frequency Disturbances With Disturbance Observer and Phase Stabilized Control," *Mechatronics*, vol. 18, pp. 53–60, 2008.
- [8] Q. W. Jia, "Disturbance Rejection Through Disturbance Observer With Adaptive Frequency Estimation," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 45, no. 6, pp. 2675–2678, Jun. 2009.
- [9] F. Honga and C. K. Pang, "A Peak Filtering Method With Improved Transient Response for Narrow Band Disturbance Rejection in Hard Disk Drives," *International Journal of Systems Science*, vol. 45, no. 2, pp 109–119, 2014.



- [10] D. Huang, V. Venkataramanan, J. X. Xu, and T. C. T. Huynh, "Contact-Induced Vibration in Dual-Stage Hard Disk Drive Servo Systems and Its Compensator Design," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 8, pp. 4052–4059, Aug. 2014.
- [11] S. Felix, J. Nie, and R. Horowitz, "Enhanced Vibration Suppression in Hard Disk Drives Using Instrumented Suspensions," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 45, no. 11, pp. 5118–5122, Nov. 2009.
- [12] S. Felix, J. Nie, and R. Horowitz, "Integration of Thin-Film ZnO Strain Sensors Into Hard Disk Drives," in *Proc. IEEE Sensors Conference*, 2010, pp. 2319–2324.
- [13] S. Felix and R. Horowitz, "Integration of Thin Film Strain Sensors Into Hard Drives for Active Feedback Vibration Suppression," *IEEE Sensors J.*, vol. 13, no. 5, pp. 1708–1715, May. 2013.
- [14] Y. Li, F. Marcassa, R. Horowitz, R. Oboe, and R. Evans, "Track-Following Control With Active Vibration Damping of A PZT-Actuated Suspension Dual-Stage Servo System," in *Proc. of the American Control Conference*, 2003, pp. 2553–2559.
- [15] Y. Li, R. Horowitz, and R. Evans, "Vibration Control of A PZT Actuated Suspension Dual-Stage Servo System Using a PZT Sensor," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 39, no. 2, pp. 932–937, Mar. 2003.
- [16] J. J. Dosch, D. J. Inman, and E. Garcla, "A Self-Sensing Piezoelectric Actuator for Collocated Control," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 3, no. 1, pp. 166-185, 1992.
- [17] H. L. Ji, J. H. Qiu, Y. P. Wu, J. Cheng, and M. N. Ichchou, "Novel Approach of Self-Sensing Actuation for Active Vibration Control," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 22, no. 5, pp. 449-459, Mar. 2011.
- [18] K. Seki, and M. Iwasaki, "Improvement of Bending Vibration Suppression Performance for Galvano Mirror by Self-Sensing Actuation," *IEEJ Journal of Industry Applications*, vol. 3, no. 1, pp. 10–17, 2014.

- [19] K. Seki, and M. Iwasaki, "Application of Self-sensing Technique for Position Control Considering Vibration Suppression in Piezo-Driven Stage," in *Proc. IEEE International Conference on Mechatronics (ICM)*, 2015, pp. 278-289.
- [20] M. Sasaki, and S. Ito, "Vibration Control of A Micro-Actuator for the Hard Disk Drive Using Self-Sensing Actuation," in *Proc. International Conference on Control, Automation and Systems*, 2008, pp. 2855-2860.
- [21] H. Yamada, M. Sasaki, and Y. Nam, "Active Vibration Control of A Micro-Actuator for Hard Disk Drives Using Self-Sensing Actuator," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 19, pp. 113-123, 2008.
- [22] M. Sasaki, Y. Inoue, and H. Yamada, "Active Vibration Control of A Microactuator for Hard Disk Drive Using Self-Sensing Actuation," *Smart Mater. Struct.*, 2012.
- [23] C. K. Pang, G. Guo, B. M. Chen, and T. H. Lee, "Vibration Control of A Micro-Actuator for Hard Disk Drive Using Self-Sensing Actuation," in *Proc. of IEEE International Conference on Control Applications*, 2004, pp. 551-556.
- [24] C. K. Pang, G. Guo, B. M. Chen, and T. H. Lee, "Self-Sensing Actuation for Nanopositioning and Active-Mode Damping in Dual-Stage HDDs," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 11, no. 3, pp. 328-338, Jun. 2006.
- [25] U. Boettcher, L. Matthes, B. Knigge, R. A. Callafon, and F. E. Talke, "Suppression of Cross-Track Vibrations Using A Self-Sensing Micro-Actuator in Hard Disk Drives," *Microsyst. Technol.*, vol. 18, pp. 1309-1317, Jun. 2012.
- [26] F. Hong, A.M. Memon, W.E. Wong, and C.K. Pang, "Indirect-Driven Self-Sensing Actuation for Dual-Stage HDDs with Improved Robustness," in *Proc. ASME Information Storage and Processing Systems Conference*, 2010, pp. 141-143.
- [27] C.K. Pang, F. Hong, W.E. Wong, and T.H. Lee, "Self-Sensing Actuation for Piezoelectric and MEMS Devices in Data Storage Applications," in *Proc. International Data Storage Technology Conference (DST-CON)*, 2010, pp. 23-26.

- [28] C.K. Pang, G. Dai, T.H. Lee, and M. Nagashima, "Adaptive Non-Model-Based Vibration Control of Critical Flexible Modes in Mechatronic Systems," in *Proc. of the 18<sup>th</sup> IFAC World Congress*, 2011, pp. 5297-5302.
- [29] F. Hong, and C.K. Pang, "Robust Vibration Control at Critical Resonant Modes Using Indirect-Driven Self-Sensing Actuation in Mechatronic Systems," *ISA Transactions*, vol. 51, pp. 834–840, Jul. 2012.
- [30] B. Hu, J. Wan, C. K. Pang, F. Hong, and J. K. Tan, "Enhanced Indirect-Driven Self-Sensing Actuation for Piezoelectric Structures," in *Proc. ASME Information Storage and Processing Systems Conference*, 2016, pp. 1–3.
- [31] B. Hu, J. Wan, and C. K. Pang, "Self-Sensing Actuation for Improved Audio-Induced Vibration Rejection in Dual-Stage Hard Disk Drives," *Microsyst. Technol.*, pp. 1–8, Nov. 2016.
- [32] M. Rakotondrabe, "Combining Self-Sensing With An Unknown-Input-Observer to Estimate the Displacement, the Force and the State in Piezoelectric Cantilevered Actuators," in *Proc. American Control Conference (ACC)*, 2013, pp. 4516-4523.
- [33] M. Rakotondrabe, I.A. Ivan, S. Khadraoui, P. Lutz, and N. Chaillet, "Simultaneous Displacement/Force Self-Sensing in Piezoelectric Actuators and Applications to Robust Control," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 20, no. 2, pp. 519–531, Apr. 2015.
- [34] T. McPherson, and J. Ueda, "A Force and Displacement Self-Sensing Piezoelectric MRI-Compatible Tweezer End Effector With an On-Site Calibration Procedure," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 19, no. 2, pp. 755–764, Apr. 2014.
- [35] Z. Zhang, G. Cheng, J. Kan, Y. Jiang, J. Wen, and X. Yu, "Experimental Study on Displacement Self-Sensing Method Based on Multiple Piezoelectric Effects for Microactuators," *Advances in Information Sciences and Service Sciences (AISS)*, vol. 4, no. 6, pp. 84–92, Apr. 2012.

- [36] E. Grasso, N. Totaro, H. Janocha, and D. Naso, "Piezoelectric Self Sensing Actuators for High Voltage Excitation," *Smart Mater. Struct.*, 2013.
- [37] J. S. Viperman, and R. L. Clark, "Implementation of An Adaptive Piezoelectric Sensoriactuator," *AIAA Journal*, vol. 34, no. 10, pp. 2102-2109, Oct. 1996.
- [38] H. Hongsheng, Q. Suxiang, and Q. Linfang, "Self-sensing Piezoelectric Actuator for Active Vibration Control Based on Adaptive Filter," in *Proc. of International Conference on Mechatronics and Automation*, 2007, pp. 2564-2569.
- [39] S. Kuipera, and G. Schitter, "Self-Sensing Actuation and Damping of a Piezoelectric Tube Scanner for Atomic Force Microscopy," in *Proc. of the European Control Conference*, 2009, pp. 3887-3891.
- [40] S. Kuipera, and G. Schitter, "Active Damping of A Piezoelectric Tube Scanner Using Self-Sensing Piezo Actuation," *Mechatronics*, vol. 20, no. 6, pp. 656-666, Sep. 2010.
- [41] M. Gurjar, and N. Jalili, "Toward Ultrasmall Mass Detection Using Adaptive Self-Sensing Piezoelectrically Driven Microcantilevers," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 12, no. 6, pp. 680-688, Dec. 2007.
- [42] S. Faegh, N. Jalili, and S. Sridhar, "A Self-Sensing Piezoelectric MicroCantilever Biosensor for Detection of Ultrasmall Adsorbed Masses: Theory and Experiments," *Sensors*, vol. 13, no. 5, pp. 6089-6108, May. 2013.
- [43] W.W Law, W.H Liao, and J. Huang, "Vibration Control of Structures With Self-Sensing Piezoelectric Actuators Incorporating Adaptive Mechanisms," *Smart Mater. Struct.*, vol. 12, no 5, pp. 720-730, 2003.
- [44] K.W. Chan, and W.H. Liao, "Self-Sensing Actuators for Adaptive Vibration Control of Hard Disk Drives," in *Proc. International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 2008, pp. 665-670.

- [45] K.W. Chan, and W.H. Liao, "Self-Sensing Actuators With Passive Damping for Adaptive Vibration Control of Hard Disk Drives," *Microsyst. Technol.*, vol. 15, pp. 355–366, 2009.
- [46] T. Das, R. Mukherjee, S. Nudehi, and A. Chatterjee, "Design of Switching Laws for Shared-Sensing and Control by Reversible Transducers," in *Proc. of American Control Conference*, 2007, pp. 1395-1400.
- [47] T. Das, and R. Mukherjee, "Shared-Sensing and Control Using Reversible Transducers," *IEEE Trans. Contr. Syst. Technol.*, vol. 17, no. 1, pp. 242-248, Jan. 2009.
- [48] B. Wang, and R. Wang, "Piezoelectric Self-Sensing Actuator for Vibration Suppression Based on Time-Sharing Method," in *Proc. of the 8<sup>th</sup> IEEE International Conference on Control and Automation*, 2010, pp. 1403-1408.
- [49] M. Azadmehr, B.K. Khajeh, and Y. Berg, "A New Self-Sensing Approach for Actuation and Readout of Piezoelectric Resonating Sensor," in *Proc. of IEEE 12<sup>th</sup> International Conference on Networking, Sensing and Control*, 2015, pp. 232-235.
- [50] M.N. Islam, and R.J. Seethaler, "Self-Sensing Tracking Control for Piezoelectric Actuators Based on Sensor Fusion," in *Proc. of SPIE*, 2012.
- [51] M.N. Islam, and R.J. Seethaler, "Sensorless Position Control for Piezoelectric Actuators Using A Hybrid Position Observer," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 19, no. 2, pp. 667–675, Apr. 2014.
- [52] M. Asghari, S.M. Rezaei, A.H. Rezaie, M. Zareinejad, and H. Ghafarirad, "Self-Sensing Actuation Using Online Capacitance Measurement With Application to Active Vibration Control," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, pp. 1-15, 2014.
- [53] A. Kawamata, Y. Kadota, H. Hosaka, and T. Morita, "Self-Sensing Piezoelectric Actuator Using Permittivity Detection," *Journal of Ferroelectrics*, vol. 368, pp. 194–201, 2008.

- [54] Y. Ishikiriya, and T. Morita, "Improvement of Self-Sensing Piezoelectric Actuator Control Using Permittivity Change Detection," *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing (JSME)*, vol. 4, no. 1, pp. 143–149, 2010.
- [55] H. Ikeda, and T. Morita, "High-Precision Positioning Using A Self-Sensing Piezoelectric Actuator Control With A Differential Detection Method," *Sensors and Actuators A: Physical*, pp. 147-155, Feb. 2011.
- [56] K. Saigusa, and T. Morita, "Self-Sensing Control of Piezoelectric Positioning Stage by Detecting Permittivity," *Sensors and Actuators A: Physical*, pp. 76-80, Feb. 2015.
- [57] N. Kong, D.S. Ha, A. Erturk, and D.J. Inman, "Resistive Impedance Matching Circuit for Piezoelectric Energy Harvesting," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, pp. 1293–1302, 2010.
- [58] G. E. Simmers Jr., J. R. Hodgkins, D. D. Mascarenas, G. Park, and H. Sohn, "Improved Piezoelectric Self-sensing Actuation," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 15, pp. 941-953, Dec. 2004.
- [59] S. J. Lee, H. Sohn, J-W. Hong, "Time Reversal Based Piezoelectric Transducer Self-diagnosis Under Varying Temperature," *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol. 29, pp. 75-91, 2010.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายเกียรติศักดิ์ เส็งช่วย

รหัสประจำตัวนักศึกษา 5710130008

### วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2553
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2555

### ทุนการศึกษา

ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์  
ทุนสนับสนุนการศึกษาและการวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย โครงการพัฒนา  
นักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม และบริษัท เวสเทิร์น ดิจิตอล (ประเทศไทย) จำกัด

### การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

- K. Sengchuai, B. Panyavoravaj, and N. Jindapetch, "Unbalanced Self-Sensing Actuation Circuit Effects on Vibration Control in Piezoelectric Systems," *Pertanika Journal of Science and Technology*, vol. 25(S), pp. 149-158, Jan. 2017.
- K. Sengchuai, B. Panyavoravaj, and N. Jindapetch, "Unbalanced Self-Sensing Actuation Circuit Effects on Vibration Control in Piezoelectric Systems", *International Conference on Electrical & Electronic Technology (ICEETech)*, pp. 1-6, 2016.