

ศึกษาและวิเคราะห์ผลการตอบสนองทางพลวัตของแขนจับหุ่นยนต์ใน  
กระบวนการหยิบออก-ใส่เข้า ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาแมคคาทรอนิกส์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2555

**STUDY AND ANALYSIS DYNAMIC RESPONSE OF  
ROBOT ARM IN HDD LOADING PROCESS**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Mechatronic  
Suranaree University of Technology  
Academic Year 2012**

ศึกษาและวิเคราะห์ผลการตอบสนองทางพลวัตของแขนจับหุ่นยนต์ในกระบวนการ  
หยิบออก-ใส่เข้า ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผศ. ดร. กীরติ สุถักษณ์)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร. จิระพล ศรีเสรีสุผล)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



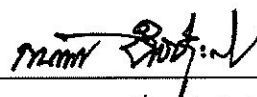
(ผศ. ดร. เพ็ชจ เป่าละออ)

กรรมการ



(ศ. ดร. ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ



(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ไกรลาศ บุตรบุญชู : ศึกษาและวิเคราะห์ผลการตอบสนองทางพลวัตของแขนจับหุ่นยนต์  
ในกระบวนการหยิบออก-ใส่เข้า ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (STUDY AND ANALYSIS DYNAMIC  
RESPONSE OF ROBOT ARM IN HDD LOADING PROCESS) อาจารย์ที่ปรึกษา :  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล, 122 หน้า.

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลการตอบสนองทางพลวัต ในกระบวนการหยิบออก-ใส่เข้าฮาร์ดดิสก์  
ไดรฟ์ เข้าสู่ห้องทดสอบของแขนจับหุ่นยนต์ ตามสภาพการใช้งานจริง เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง  
ความเร็วจากการเพิ่มแรงดันลมที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ กับค่าแอมพลิจูดของการสั่นที่  
เกิดขึ้น จากการชนกันระหว่างแขนจับหุ่นยนต์กับตัวดูดซับแรงกระแทก (Shock absorber) ที่แรงดัน  
ลม 4, 5, 6, 7 และ 8 บาร์ ผลการวิเคราะห์พบว่า ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จะแปรผันตรง  
กับแอมพลิจูดของการสั่นตามแรงดันลมที่เพิ่มขึ้น และได้ออกแบบวงจรควบคุมการสั่นของแขนจับ  
หุ่นยนต์แบบอัตโนมัติ เพื่อควบคุมแอมพลิจูดของการสั่นเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันลม



สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล  
ปีการศึกษา 2555

ลายมือชื่อนักศึกษา ไกรลาศ บุตรบุญชู  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

KRAILAS BUTBUNCHOO : STUDY AND ANALYSIS DYNAMIC  
RESPONSE OF ROBOT ARM IN HDD LOADING PROCESS. THESIS  
ADVISOR : ASST. PROF. JIRAPHON SRISERTPHOL, Ph.D., 122 PP.

AMPLITUDE OF VIBRATION/ PNEUMATIC PRESSURE/ DYNAMIC  
RESPONSE/ VELOCITY OF ROBOT/ SHOCK ABSORBER

The research studied dynamic response of robot in harddisk loading process into test slots which base on operating situation to find the relation between velocity from increased the pneumatic pressure that it used to robot movement and amplitude of vibration from robot arm bumped with shock absorber at the pneumatic pressure 4, 5, 6, 7 and 8 bar, The analysis result showed that velocity of robot is directly proportional to amplitude of vibration which according to the increase of the pneumatic pressure and design automatic circuit control amplitude of vibration when the pneumatic pressure changed.

School of Mechanical Engineering

Academic Year 2012

Student's Signature ทศพร ยงยง

Advisor's Signature สุภาพ ส.

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคลต่อไปนี้ ที่กรุณาให้คำแนะนำและช่วยเหลืออย่างดียิ่ง จนทำให้งานวิจัยในครั้งนี้ประสบผลสำเร็จไปด้วยดี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำชี้แนะ และคำปรึกษาตลอดจน ให้คำแนะนำในการเขียน และตรวจแก้ไข วิทยานิพนธ์ครั้งนี้ จนเสร็จสมบูรณ์

นายกิตติศักดิ์ โพธิ์แสง และ นายพีรวิทย์ ไม้น้อย ที่ให้ความร่วมมือในติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง และให้ความรู้เรื่องการทำงานของหุ่นยนต์อัตโนมัติ

ขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี บริษัทซีเกทประเทศไทยจำกัด และสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช) ที่ให้ทุนในการวิจัยในครั้งนี้

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การอุปการะ และเลี้ยงดู ตลอดจนให้การศึกษา และเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา อีกทั้งขอขอบคุณพี่ๆ และเพื่อนๆ ที่ทำงานที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้สำเร็จ

ไกรลาศ บุตรบุญชู

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ญ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของเบื้องต้น.....	4
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.6 วิธีดำเนินการวิจัย.....	4
1.7 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	5
<b>2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>6</b>
2.1 การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน (Vibration Analysis).....	8
2.1.1 รูปแบบของการสั่นสะเทือน (Vibration Type).....	9
2.1.2 องค์ประกอบที่ใช้ในการอธิบายการเคลื่อนที่แบบสั่น.....	10
2.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ ระยะทาง ความเร็วและอัตราเร่งใน การวัดการสั่น.....	15
2.2 การวัดการสั่นสะเทือนของเครื่องจักร.....	17
2.2.1 จุดที่จะวัดการสั่นสะเทือนของเครื่องจักร.....	17
2.2.2 ตำแหน่งการติดตั้งหรือวางหัววัด (Sensor).....	19

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.3	วิธีการวัดความสั่นสะเทือน (Vibration Measurements methods).....	20
2.2.4	ชนิดของตัววัดการสั่นสะเทือน .....	21
2.2.5	การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดกับเวลา (Time Waveform Analysis) .....	23
2.2.6	การวิเคราะห์แถบคลื่นความถี่ (FFT Spectrum Analysis) .....	23
2.2.7	ค่ามาตรฐานและเกณฑ์ในการพิจารณาค่าการสั่นสะเทือน (Standard and Judgment) .....	25
2.3	ทฤษฎีการสั่นสะเทือน (Vibration Theory) .....	26
2.3.1	การสั่นแบบอิสระ (Free vibration) .....	27
2.3.2	การสั่นแบบไม่มีความหน่วง (Undamped vibration) .....	27
2.3.3	การสั่นแบบมีความหน่วง (Damped vibration) .....	27
2.3.4	การสั่นสะเทือนแบบบังคับ .....	32
2.4	ระบบนิวแมติกส์ .....	36
2.4.1	สัญลักษณ์และการเรียกชื่อวาล์ว .....	37
2.4.2	การเลื่อนวาล์วควบคุม .....	41
2.4.3	การกำหนดหรือให้อุปกรณ์หรือวิธีแสดงขั้นตอนการทำงานใน วงจรนิวแมติกส์ .....	43
2.4.4	โซลินอยด์วาล์ว (Solenoid valve) .....	44
2.5	ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) .....	46
2.5.1	ส่วนประกอบทั่วไปของไมโครคอนโทรลเลอร์ .....	46
2.5.2	โมดูลการเปรียบเทียบ (Comparator Module) .....	47
2.6	ออปแอมป์ (Op-Amp) .....	49
2.6.1	OP-Amp ในทางอุดมคติ (Ideal OP-Amp) .....	49
2.7	ปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง .....	51
2.8	สรุป .....	52



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3 วิธีดำเนินงานวิจัย .....	53
3.1 เครื่องทดสอบฮาร์ดิสก์ไครฟ์และแขนจับหุ่นยนต์.....	55
3.2 การเคลื่อนที่แบบหมุนของแขนจับหุ่นยนต์.....	57
3.3 ขั้นตอนการออกแบบงานวิจัย.....	60
3.3.1 ติดตั้งชุดจำลองการเคลื่อนที่ของแขนจับหุ่นยนต์ และเครื่องวัดการสั่น.....	60
3.3.2 การกำหนดแรงดันลมเพื่อลดความเร็วในการหมุน .....	62
3.3.3 ออกแบบวงจรควบคุมการปล่อยลมและทดสอบการทำงานของวงจร	63
4 วิเคราะห์การสั่นก่อนและหลังควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่ของแขนจับหุ่นยนต์.....	71
4.1 วิเคราะห์ผลการตอบสนองทางพลวัตโดยการลดความเร็วในการเคลื่อนที่.....	71
4.2 วัดขนาดของการสั่นก่อนติดตั้งชุดควบคุมความเร็วของแขนจับหุ่นยนต์.....	72
4.3 ค่าความสัมพันธ์ของผลต่างเวลากับขนาดของการสั่น .....	74
4.4 วัดขนาดของการสั่นหลังจากติดตั้งชุดควบคุมความเร็วของแขนจับหุ่นยนต์ .....	76
4.5 เปรียบเทียบก่อนและหลังติดตั้งชุดควบคุมความเร็วและสมการการเคลื่อนที่ .....	78
5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	80
5.1 สรุปผลงานวิจัย.....	80
5.2 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยต่อไป .....	81
รายการอ้างอิง.....	82
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. โปรแกรมควบคุมการเปิด-ปิดวาล์วลม .....	83
ภาคผนวก ข. แผนภาพของจรควบคุมวาล์วลม วงจรเซ็นเซอร์วัดการสั่น และอุปกรณ์ในการประกอบวงจร .....	105
ภาคผนวก ค. รายละเอียดต่างๆ ของชุดอุปกรณ์วัดการสั่นสะเทือน.....	108
ภาคผนวก ง. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา .....	113
ประวัติผู้เขียน.....	122

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	แสดงความสัมพันธ์ของการหาค่าแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนแบบต่าง ๆ ..... 15
2.2	ระดับความรุนแรงของการสั่นตามขนาดของเครื่องจักรตามมาตรฐาน ISO2372-1974E..... 26
2.3	สัญลักษณ์ที่ใช้แทนตำแหน่งการทำงานของวาล์ว..... 37
2.4	การกำหนดรหัสทางต่อลมของวาล์วควบคุมทิศทาง..... 38
2.5	สัญลักษณ์ของวาล์ว..... 39
2.6	การกำหนดแสดงทิศทาง ..... 40
2.7	การเลื่อนวาล์วควบคุม โดยใช้กล้านเนื้อ..... 41
2.8	การเลื่อนวาล์วควบคุม โดยใช้กลไก..... 41
2.9	การเลื่อนวาล์วควบคุม โดยใช้ลมควบคุม..... 42
2.10	การเลื่อนวาล์วควบคุม โดยใช้ไฟฟ้า..... 42
2.11	การเลื่อนวาล์วควบคุม โดยใช้วิธีแบบผสม ..... 43
2.12	ความสัมพันธ์ของบิต VRR กับแรงดันที่แหล่งจ่ายไฟ ( $V_{ad}$ ) 5 โวลต์..... 48
3.1	ตารางการบันทึกผลการทดลอง ..... 70
4.1	แอมพลิจูดการสั่นเมื่อลดความเร็วในการเคลื่อนที่ ..... 71
4.2	ค่าสัมประสิทธิ์ของระบบที่ได้จากการคำนวณ ..... 72
4.3	ความเร็วก่อนชนและเวลาในการหมุน 1 รอบ ..... 73
4.4	ผลต่างของเวลากับขนาดของการสั่น..... 74
4.5	ค่าสัมประสิทธิ์ของระบบที่ได้จากการคำนวณ ..... 76
4.6	ความเร็วก่อนชนและเวลาในการหมุน 1 รอบ ..... 77
4.7	เปรียบเทียบก่อนและหลังควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่ของแขนจับหุ่นยนต์..... 78

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	เครื่องทดสอบฮาร์คิสก์ไครฟ์.....	2
1.2	การปรับสมดุลของหุ่นยนต์ที่เกิดจากการเสียสมดุลของหุ่นยนต์จากการสั่น .....	3
1.3	การเสื่อมสภาพของตัวคู้รับแรงเนื่องจากการปรับแรงค้ำลมไม่เหมาะสม.....	3
2.1	การสั่นสะเทือนโดยอิสระ (Free Body Vibration) ของชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเครื่องจักร .	9
2.2	การสั่นสะเทือนแบบชนกันหรือเคลื่อนที่ผ่าน .....	10
2.3	การสั่นสะเทือนจากแรงเสียดทาน .....	10
2.4	ลักษณะองค์ประกอบของการสั่นสะเทือน.....	11
2.5	รอบการหมุนของเพลลา .....	11
2.6	การแกว่งของสปริงแผ่น .....	12
2.7	ประเภทของแอมพลิจูด.....	13
2.8	ค่า RMS ของคลื่นที่ไม่สม่ำเสมอ.....	14
2.9	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการวัดระยะทาง ความเร็วและอัตราเร่งในการเคลื่อนที่ในรูปคลื่นไซน์ของการสั่นสะเทือน .....	15
2.10	การเคลื่อนที่แบบ Simple Harmonics .....	16
2.11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าต่าง ๆ ของการสั่นสะเทือน .....	17
2.12	แนวของจุดที่วัดการสั่นสะเทือน .....	18
2.13	จุดวัดการสั่นของเครื่องจักร ตัวมอเตอร์และชุดแบร์ริง (Bearing Unit) .....	19
2.14	การวัดการเคลื่อนที่ของสปริงในรอบของระยะเวลาหนึ่ง .....	20
2.15	Displacement Probe .....	21
2.16	หัววัดความเร่ง (Accelerometer) .....	22
2.17	ตัวอย่างการวัดแบบ Time Waveform .....	23
2.18	การสั่นสะเทือนของเครื่องจักรแสดงบน โดเมนเวลา (t) และ โดเมนความถี่ (f).....	24
2.19	การสั่นสะเทือนของเครื่องจักรแสดงในรูปของแถบคลื่นความถี่ FFT Spectrum .....	25
2.20	แบบจำลองของระบบเชิงกลที่มีการสั่นสะเทือน .....	28
2.21	การสั่นแบบหน่วงเกิน .....	29
2.22	การสั่นแบบหน่วงวิกฤต .....	30

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.23	ความหน่วงต่ำกว่าปกติ ..... 30
2.24	แบบจำลองของระบบที่มีการสั่นอันเนื่องมาจากแรงกระทำภายนอกระบบ ..... 32
2.25	แรงกระทำแบบความชัน..... 33
2.26	แรงกระทำแบบขั้นบันได ..... 33
2.27	แรงกระทำแบบคาบเวลา ..... 34
2.28	แรงคด..... 34
2.29	สัญลักษณ์ที่ใช้แทนตำแหน่งการทำงานของวาล์ว ..... 38
2.30	แสดงโซลินอยด์วาล์วควบคุม 3 ทิศทาง 2 ตำแหน่ง..... 44
2.31	โซลินอยด์วาล์วควบคุม 5 ทิศทาง 2 ตำแหน่ง..... 45
2.32	วงจรและฟังก์ชันการทำงานของ โมดูลการเปรียบเทียบของ PIC16F628 ..... 47
2.33	Op-Amp ในอุดมคติ..... 49
2.34	วงจรขยายสัญญาณ OP-Amp แบบ Open Loop..... 49
2.35	วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส ( Inverting Amplifier ) ..... 50
2.36	วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส ( Non-inverting Amplifier)..... 50
3.1	การหาค่าความเร่ง..... 54
3.2	เครื่องทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์..... 56
3.3	แขนจับหุ่นยนต์อัตโนมัติ..... 57
3.4	ส่วนประกอบในการหมุนของแขนจับหุ่นยนต์..... 58
3.5	แสดงการเคลื่อนที่แบบหมุนของแขนจับหุ่นยนต์..... 58
3.6	การหมุนของแขนจับหุ่นยนต์ ..... 59
3.7	แรงที่กระทำต่อตัวดูดซับแรงกระแทก..... 59
3.8	การติดตั้งแขนจับหุ่นยนต์บน Vibration Table ..... 61
3.9	Dynamic signal analyzer ..... 61
3.10	หัวข้อการสั่นแบบ..... 62
3.11	โซลินอยด์วาล์วและการกำหนดระยะปล่อยลม ..... 62
3.12	วาล์วปรับแรงดันลม ..... 63

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.13	แผนภาพของวงจรควบคุมการปล่อยลม .....	64
3.14	หน้าที่และคุณสมบัติของส่วนประกอบวงจรควบคุมการเปิด-ปิดวาล์วลม.....	65
3.15	การแปลงสัญญาณการสั่งเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า .....	65
3.16	วงจรเซ็นเซอร์ตรวจวัดการสั่งขนาดเล็ก.....	66
3.17	Flow Chart การทำงานโดยรวมของโปรแกรม .....	67
3.18	หลังการเลื่อนเวลา .....	68
3.19	การติดตั้งชุดควบคุมการเปิด-ปิดวาล์วลม .....	69
4.1	แอมพลิจูดการสั่ง โดยไม่ลดความเร็วในการเคลื่อนที่ของแขนจับหุ่นยนต์ .....	72
4.2	ความเร็วก่อนชนกับเวลาในการหมุน 1 รอบ .....	73
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างเวลากับแอมพลิจูดการสั่ง .....	75
4.4	แอมพลิจูดการสั่ง โดยปรับความเร็วในการเคลื่อนที่ของแขนจับหุ่นยนต์ .....	77
4.5	ความเร็วก่อนชนกับเวลาในการหมุน 1 รอบ .....	77
4.6	เปรียบเทียบเวลาในการเคลื่อนที่ 1 รอบ .....	78

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$\omega_d$	=	ความถี่ของการสั่น
$\omega_n$	=	ความถี่ธรรมชาติ
$X$	=	แนวตั้ง
$Y$	=	แนวระดับ
$Z$	=	แนวตั้ง
$v_0$	=	ความเร็วเริ่มต้น
$\delta$	=	การลดทอนแบบลอการิทึม
$F$	=	แรงกระทำ
$C$	=	ความหน่วง
$K$	=	ค่าความแข็งสปริง
$A$	=	แอมพลิจูด
$X$	=	การขจัด
$L$	=	ความยาว
$M$	=	มวลของระบบ
$\zeta$	=	Damping ratio
mm	=	มิลลิเมตร
ms	=	มิลลิวินาที



# บทที่ 1

## บทนำ

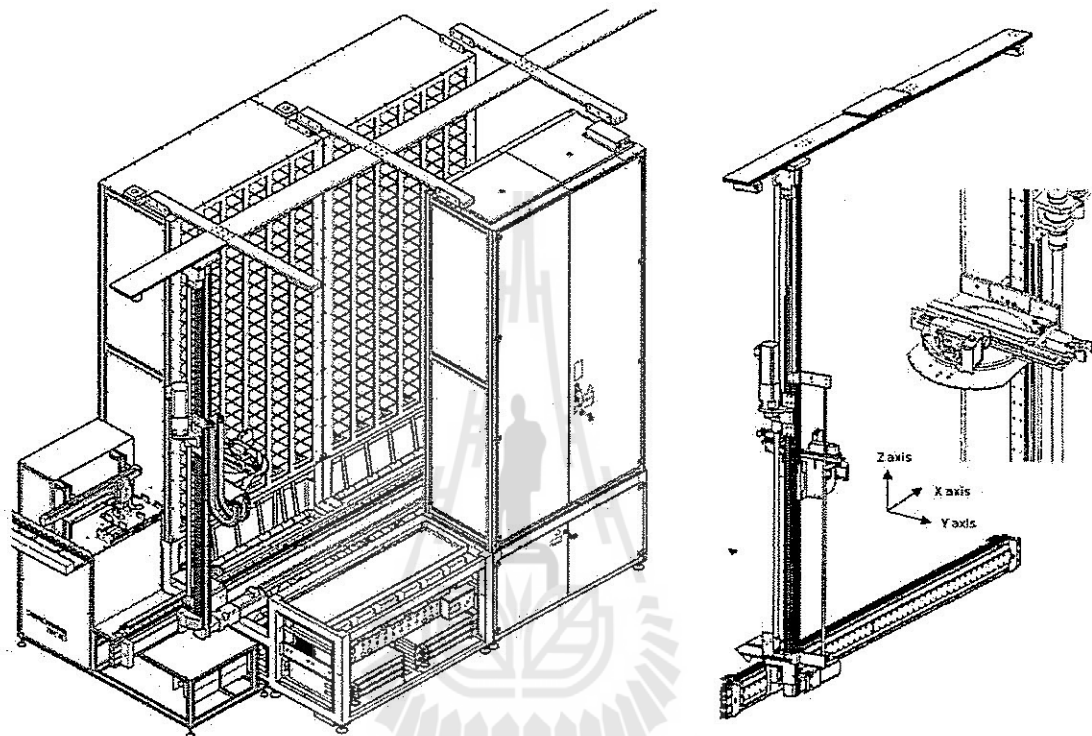
### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สำหรับบันทึกข้อมูลแบบดิจิทัล ซึ่งมีใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากในภาคอุตสาหกรรมการผลิตฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ มีการแข่งขันที่สูงขึ้น ดังนั้นจึงทำให้บริษัทผู้ผลิตได้มีการนำเอาระบบอัตโนมัติต่างๆ มาใช้ในการผลิตเพื่อเป็นการเพิ่มปริมาณการผลิต และให้การทำงานเป็นไปอย่างต่อเนื่อง ในกระบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานเป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่มีความสำคัญ ที่จะต้องมีการทดสอบฟังก์ชันการทำงานต่างๆ เช่น การบันทึกข้อมูล การอ่านข้อมูล และการลบข้อมูล เป็นต้น ก่อนที่จะส่งออกสู่ตลาด ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มปริมาณการผลิตฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ บริษัทผู้ผลิตจึงต้องใช้เครื่องทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ที่มีช่องทดสอบหลายช่องในเครื่องเดียว และใช้หุ่นยนต์ในกระบวนการหยิบออก-ใส่เข้าฮาร์ดดิสก์ไครฟ์เข้าช่องทดสอบ การเคลื่อนที่ของแขนจับหุ่นยนต์ในการหมุนตัว และหยิบจับฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ที่ใช้ระบบนิวเมติกส์ จะมีโซลินอยด์วาล์วแบบควบคุมทิศทางเป็นตัวกำหนดทิศทางลม การเพิ่มความเร็วในการเคลื่อนที่แบบหมุนของหุ่นยนต์ สามารถทำได้โดยการปรับแรงดันลมให้เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นอีกหนึ่งวิธีในการเพิ่มปริมาณของการหยิบออก-ใส่เข้าฮาร์ดดิสก์ไครฟ์เข้าช่องทดสอบ แต่การเพิ่มความเร็วนี้จะทำให้เกิดการสั่นจากการชนกันระหว่างแขนจับของหุ่นยนต์กับฉนวนการสั่นเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งการสั่นนี้จะทำให้เกิดข้อผิดพลาดขึ้นในการจับภาพตำแหน่งช่องทดสอบของแขนจับหุ่นยนต์ในขณะที่ทำการหยิบออก-ใส่เข้าฮาร์ดดิสก์ไครฟ์เข้าช่องทดสอบ และจะทำให้หุ่นยนต์หยุดทำงานทันที ซึ่งจะทำให้สูญเสียเวลาในการซ่อมบำรุงและโอกาสในการหยิบออก-ใส่เข้าฮาร์ดดิสก์ไครฟ์เข้าช่องทดสอบ

นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อการตรวจจับตำแหน่งช่องทดสอบของแขนจับหุ่นยนต์ในเครื่องทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ เช่น การปรับขนาดของแรงดันลมที่ใช้ในการเคลื่อนที่ที่ไม่เหมาะสม แรงดันลมที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของแขนจับหุ่นยนต์ไม่คงที่ และการเสื่อมสภาพของฉนวนการสั่น เป็นต้น ดังนั้นจึงทำให้เป็นเรื่องที่ยากต่อการตรวจสอบสภาพของเครื่องจักรว่าเกิดการชำรุดเสียหายหรือไม่ จนกว่าเครื่องจักรจะหยุดทำงาน ซึ่งจะทำให้เครื่องจักรเกิดการชำรุดเสียหายเพิ่มมากขึ้นจากเดิม การดูแลรักษาเครื่องจักรที่มีจำนวนมาก ๆ จึงเป็นที่จะต้องมีระบบตรวจสอบการทำงาน

ตลอดเวลา และสามารถปรับปรุงการทำงานแบบอัตโนมัติเบื้องต้นได้เมื่อเครื่องจักรเกิดปัญหาการขัดข้องในเบื้องต้น

เครื่องทดสอบที่ใช้ในการทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ที่มีช่องทดสอบหลายช่องและใช้หุ่นยนต์เป็นตัวหยิบออก-ใส่เข้าฮาร์ดดิสก์ไครฟ์และสามารถเคลื่อนที่ได้ 3 แกน X, Y และ Z



รูปที่ 1.1 เครื่องทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

จากรูปที่ 1.1 เครื่องทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์จะใช้กล้องในการจับภาพตำแหน่งช่องทดสอบเพื่อคำนวณหาระยะช่องทดสอบ โดยกระบวนการหยิบออก-ใส่เข้าฮาร์ดดิสก์ไครฟ์จะมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

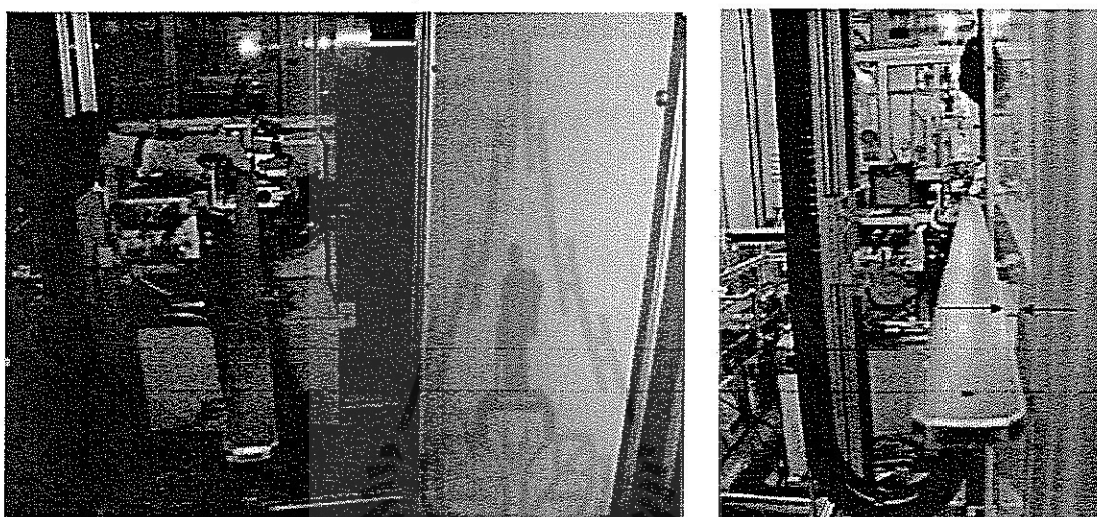
- 1.1 หุ่นยนต์หยิบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์เพื่อออกมาจากช่องทดสอบโดยใช้แขนจับหุ่นยนต์
- 1.2 หุ่นยนต์เคลื่อนที่จากซ้ายไปขวาหรือขึ้นลงในแนวดิ่งเมื่อมีการย้ายตำแหน่งทดสอบ
- 1.3 หุ่นยนต์หยิบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์เข้าช่องทดสอบ

เนื่องจากการเคลื่อนที่ของแขนจับหุ่นยนต์ใช้ระบบนิวเมติกส์ซึ่งจะไม่สามารถลดความเร็วก่อนหยุดนิ่งได้จึงต้องมีการใช้ฉนวนการสั่นเพื่อเป็นตัวหน่วงในการลดความเร็วและการสั่นที่

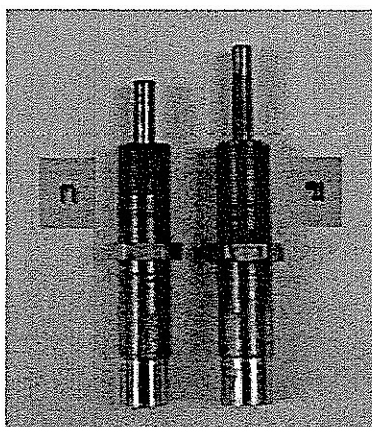


เกิดขึ้น ซึ่งการเพิ่มความเร็วในการหมุนของแกนจับหุ่นยนต์มีข้อจำกัดในเรื่องแอมพลิจูดการสั่นที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นแรงลมที่ใช้ในการเคลื่อนที่ในปัจจุบันจึงใช้ได้แค่ 3 บาร์

การปรับแรงดันลมที่ใช้ในการเคลื่อนที่ ๆ ไม่เหมาะสมจะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนซึ่งจะส่งผลกระทบต่อการทำงานของจับตำแหน่งภาพของหุ่นยนต์โดยที่การสั่นดังกล่าวอาจจะทำให้หุ่นยนต์เกิดความไม่สมดุล หรือ ทำให้ชิ้นส่วนของหุ่นยนต์บางชิ้นเกิดชำรุดหรือเสียหาย จนทำให้หุ่นยนต์หยุดทำงานและเสียเวลาในการซ่อมบำรุง ดังแสดงในรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 การปรับสมดุลของหุ่นยนต์ที่เกิดจากการเสียสมดุลจากการสั่น



รูปที่ 1.3 การเสื่อมสภาพของฉนวนการสั่นเนื่องจากการปรับแรงดันลมไม่เหมาะสม

จากรูปที่ 1.3 ก เป็นฉนวนการสั่นที่ระยะการเคลื่อนที่ของแกนสั้นลง เนื่องจากการรับแรงกระทำที่มากขึ้นไปเมื่อเทียบกับ ข ซึ่งเป็นฉนวนการสั่นที่ใช้งานได้ปกติ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ ปัจจัยที่มีผลต่อการตอบสนองทางพลวัตของการเคลื่อนที่ของแขนจับหุ่นยนต์ในขณะที่หยิบออก-ใส่เข้าฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

## 1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1. วิเคราะห์แรงดันลม และ เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของแขนจับหุ่นยนต์ที่มีผลต่อการตอบสนองทางพลวัต
2. วิเคราะห์ค่าแอมพลิจูดการสั่น ค่าความถี่ของการสั่น ค่าความถี่ธรรมชาติ อัตราส่วนความหน่วง และออกแบบวงจรควบคุมการสั่น

## 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. วิเคราะห์การตอบสนองทางพลวัตของการเคลื่อนที่ของแขนจับหุ่นยนต์ในการหยิบออก-ใส่เข้าฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ขนาด 3.5 นิ้ว
2. พิจารณาความดันลมในช่วง 4 - 8 บาร์ และออกแบบวงจรควบคุมการสั่นโดยค่าแอมพลิจูดการสั่นจะต้องไม่เกินแรงดันลมที่ใช้ในปัจจุบันคือ 3บาร์ ที่ 0.09 mm และเวลาในการเคลื่อนที่ 1 รอบต้องไม่เกิน 2200 ms

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. จะได้ความสัมพันธ์ของแรงดันลม เวลาในการเคลื่อนที่ กับการตอบสนองทางพลวัตของหุ่นยนต์ขณะที่หยิบออก-ใส่เข้าฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ เพื่อใช้ในการปรับแรงดันลมให้เหมาะสม
2. เพิ่มปริมาณการหยิบออก-ใส่เข้าฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ โดยสามารถควบคุมการสั่นได้

## 1.6 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาปริทัศน์และวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง
2. สร้างชุดทดสอบในการหยิบ-จับของแขนหุ่นยนต์ และเครื่องวัดการสั่น
3. วัดค่าการสั่นของหุ่นยนต์ที่แรงดันลม 4 - 8 บาร์
4. วิเคราะห์ผลการวัดและออกแบบวงจรควบคุมการสั่น

5. ออกแบบโปรแกรมควบคุมการสั่งแบบอัตโนมัติ
6. ทดสอบการใช้งานของวงจรและวัดค่าการสั่งของหุ่นยนต์
7. สรุปผลและตีพิมพ์เอกสารงานวิจัย

### 1.7 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ประกอบไปด้วย 5 บทและ 3 ภาคผนวกซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำซึ่งจะกล่าวถึงความสำคัญและปัญหาเบื้องต้น และขอบเขตงานวิจัยพร้อมทั้งประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

บทที่ 2 ปรัชญาวัฒนธรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จะอธิบายถึงทฤษฎีการสั่งเบื้องต้นและครอบคลุมไปถึงบนความและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์นี้

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย จะอธิบายถึงการทำงานของหุ่นยนต์ วิธีการวัดและการออกแบบวงจรควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่ของแขนจับหุ่นยนต์

บทที่ 4 วิเคราะห์การสั่งก่อน และหลังควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่ของแขนจับหุ่นยนต์

บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ



## บทที่ 2

### ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันเนื่องจากในสถานการณ์ผลิตสินค้าและบริการมีการแข่งขันกันอยู่ตลอดเวลา ซึ่งเป้าหมายหลักคือให้มีต้นทุนการผลิตที่ต่ำ พร้อมทั้งการส่งมอบสินค้าได้ทันตามเวลาที่ลูกค้ากำหนด ซึ่งปัจจัยสำคัญในกระบวนการผลิตโดยทั่วไปประกอบไปด้วย วัตถุดิบ แรงงาน และเครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการผลิต การผลิตที่ได้ทั้งปริมาณและคุณภาพที่ดีนั้น จำเป็นจะต้องมีเครื่องจักรที่ดีมีคุณภาพ โดยที่เครื่องจักรสามารถทำงานได้เต็มกำลังตามที่ออกแบบไว้ และมีระยะเวลาการทำงานที่ยาวนานตามที่ผู้ผลิตเครื่องจักรกำหนดไว้ ซึ่งเมื่อเครื่องจักรมีการทำงานแบบต่อเนื่องเป็นเวลานานย่อมมีการเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งาน เช่น เกิดการชำรุด สึกหรอ ชัดข้อง เป็นต้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการบำรุงรักษาเครื่องจักร เพื่อที่จะสามารถควบคุมการทำงานของเครื่องจักรได้ดีและมีประสิทธิภาพ และเกิดประโยชน์สูงสุดในกระบวนการผลิต

การบำรุงรักษา (Maintenance) เป็นการพยายามรักษาของเครื่องจักรและอุปกรณ์ให้มีความพร้อมในการทำงานอยู่ตลอดเวลา การบำรุงรักษานั้นจะครอบคลุมไปถึงการซ่อมบำรุง (Repair) เครื่องจักรและอุปกรณ์ด้วย ซึ่งการบำรุงรักษานั้นจะวิเคราะห์ตามสภาพการทำงานของเครื่องจักรโดยมีวิธีการตรวจสอบสภาพการทำงานของเครื่องจักรดังนี้

1. การตรวจสอบความร้อน (Thermal Monitoring) คือการวัดสภาพความร้อนของเครื่องจักรเมื่อเครื่องจักรทำงานเทียบกับความร้อนที่เกิดขึ้นในขณะที่เครื่องจักรทำงานปกติ ซึ่งถ้าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ก็หมายความว่าเกิดความผิดปกติขึ้น โดยที่จุดที่วัดจะต้องเป็นจุดที่มีการเสียดสีกัน หรือตัวฉนวนกันความร้อน เป็นต้น

2. การวิเคราะห์น้ำมัน (Oil Analysis) เป็นการนำตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วไปวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบหาสิ่งผิดปกติที่เกิดขึ้นกับเครื่องจักร เช่น การตรวจสอบสภาพการสึกหรอของชิ้นส่วนเครื่องจักร ในการตรวจสอบสารหล่อลื่นที่ใช้แล้ว เพื่อเป็นการตรวจสอบความหนืด จุดวาบไฟ ปริมาณเศษโลหะ เช่น เหล็ก ตะกั่ว ทองแดง เป็นต้น ว่าเป็นของชิ้นส่วนใดที่หลุดออกมา

3. การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน (Vibration Analysis) เป็นการวัดการสั่นสะเทือนที่เกิดจากเครื่องจักรที่แสดงผลออกมาให้เห็นทางกล ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการสูญเสียพลังงานและสมรรถนะการทำงานของเครื่องจักรลดลงด้วย

4. การตรวจสอบโดยไม่ทำลาย (Non-destructive Test) เป็นการตรวจสอบโครงสร้างภายในของชิ้นส่วนคลหะ เพื่อหารอยร้าวและความบกพร่องของชิ้นส่วนต่างๆ เช่น การวัดความหนาแน่นท่อไอน้ำ (Boiler) ของโรงไฟฟ้าพลังไอน้ำ

5. การตรวจสอบรอยร้าว (Leak Test) เป็นการตรวจสอบรอยร้าวของชิ้นงานที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตา เช่นการรั่วของแก๊สจากถัง การชำรุดของสายไฟฟ้า เป็นต้น

6. การตรวจสอบการกัดกร่อน (Corrosion and Erosion Analysis) เป็นการตรวจสอบการกัดกร่อนของชิ้นส่วนต่างๆ ของเครื่องจักร โดยเทียบกับชิ้นส่วนเดิมก่อนการใช้งาน

7. การวิเคราะห์การไหล (Flow Analysis) คือการวัดอัตราการไหลที่มีอยู่ในระบบทั้งหมดเพื่อที่จะสามารถประเมินสมรรถนะและข้อบกพร่องของทั้งระบบได้ เช่น สมรรถนะการทำงานของเครื่องสูบล การรั่วไหล การอุดตันของท่อต่างๆ เป็นต้น

8. การวิเคราะห์ความเค้น (Stress Analysis) เป็นการวิเคราะห์ความเค้นของชิ้นส่วนของเครื่องจักร โดยใช้อุปกรณ์วัดความเค้น เช่น Strain Gauge ไปติดกับส่วนที่รับแรงเพื่อวิเคราะห์สภาพของเครื่องจักร

9. การวิเคราะห์คลื่นเสียง (Sound Analysis) เป็นการใช้คลื่นเสียงตรวจวัดสิ่งผิดปกติในชิ้นส่วนหรือระบบต่างๆ

10. การตรวจวัดรังสีความร้อนด้วยแสงอินฟราเรด (Thermal Infrared Testing) เป็นการตรวจวัดการแผ่รังสีความร้อนด้วยการถ่ายภาพด้วยรังสีอินฟราเรด โดยที่จะเป็นการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของภาชนะหรือชิ้นส่วนต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบว่าสภาพของเครื่องจักรมีการเปลี่ยนแปลงไปมากน้อยแค่ไหน โดยทั่วไปจะใช้กับอุปกรณ์ทางไฟฟ้า เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า ระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงอุปกรณ์ทางภาชนะความดัน เป็นต้น

ปัจจุบันเทคโนโลยีในการตรวจสอบสภาพเครื่องจักรหมุน (Rotary Machine) ที่ได้รับการยอมรับ มีมาตรฐานรองรับในระดับสากล และมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายทั้งต่างประเทศและโรงงานชั้นนำภายในประเทศ คือการใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความสั่นสะเทือน (Vibration Analysis) เพื่อเป็นแนวทางในการวางแผนการบำรุงรักษาตามสภาพ (Condition Based Maintenance) หรือเรียกอีกความหมายหนึ่งว่า การบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์ (Predictive Maintenance) กล่าวคือ การนำเอาเครื่องมือหรือวิธีการต่างๆเข้ามาตรวจวัด เพื่อประเมินถึงสภาพภายในของเครื่องจักรว่ายังอยู่ในสภาพดี หรือกำลังทำงานภายใต้ความผิดปกติใดๆ อยู่ หากตรวจพบก็จะได้ทำการวางแผน เตรียมเครื่องมือชิ้นส่วนอะไหล่ และเวลาในการเข้าทำการตรวจสอบหรือเปลี่ยนชิ้นส่วนให้เครื่องจักรกลับมาทำงานในสภาพสมบูรณ์อีกครั้ง

## 2.1 การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน (Vibration Analysis)

การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนไม่ได้ถูกนำไปใช้ในเฉพาะในงานบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์เท่านั้น และยังสามารถนำไปใช้ได้ในการวิจัยเพื่อหาสาเหตุความผิดปกติของเครื่องจักรด้วย เช่น การประเมินคุณภาพและลักษณะการไหลของของไหลภายในท่อหรือภาชนะความดันผนังบาง การตรวจสอบการรั่ว รวมถึงการทดสอบแบบไม่ทำลายอื่นๆ เพื่อปรับปรุงความเชื่อมั่นและสมรรถนะของระบบที่สำคัญของโรงงาน ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องเข้าใจถึงหลักการและทฤษฎีการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น

### • การสั่นสะเทือน (Vibration)

การสั่นหรือการแกว่งของวัตถุหรือชิ้นส่วนต่าง ๆ เมื่อเปรียบเทียบกับจุดที่ใช้อ้างอิง เช่น การสั่นสะเทือนของเครื่องจักรเมื่อเปรียบเทียบกับฐานของเครื่อง หรือการสั่นสะเทือนของคัลบ์ลูกปืน (Bearing) เมื่อเทียบกับตัวเรือน (Cage or Housing) การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นอย่างรุนแรงจะสามารถทำให้เครื่องจักรเกิดความเสียหายได้โดยการแตกหักหรือล้าตัวซึ่งความเสียหายที่เกิดขึ้นจะมากน้อย เร็วหรือช้าก็จะขึ้นอยู่กับขนาดและทิศทางของแรงที่เกิดจากการสั่นสะเทือนเมื่อเทียบกับขนาด โครงสร้าง และคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของวัสดุนั้น ๆ

### • ที่มาของการสั่นสะเทือน (Vibration Source)

โดยปกติแล้วการทำงานของชิ้นส่วนของเครื่องจักรหรือเครื่องจักรนั้นย่อมมีการสั่นสะเทือนเป็นธรรมชาติของมันอยู่แล้ว ถ้าระดับการสั่นสะเทือนนั้นไม่มากหรืออยู่ในเกณฑ์ปกติก็ถือว่าเป็นเรื่องธรรมดา แต่ถ้าการสั่นสะเทือนมากเกินไปก็อาจส่งผลให้ชิ้นส่วนตลอดจนเครื่องจักรนั้น ๆ มีอายุการใช้งานที่สั้นลง เราจึงต้องหาสาเหตุและที่มาของการสั่นสะเทือนนั้นเพื่อทำการแก้ไขให้การสั่นสะเทือนนั้นอยู่ในระดับปกติ ซึ่งการสั่นสะเทือนนั้นมาจากหลายสาเหตุ เช่น

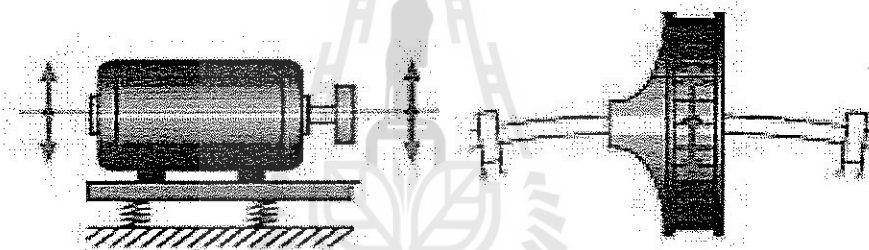
1. ความไม่สมดุลในการหมุน (Unbalance) จะเกิดขึ้นเมื่อจุดศูนย์กลางของการหมุน และจุดศูนย์กลางของมวลไม่อยู่ในจุด ๆ เดียวกัน เช่น การไม่สมดุลหรือการแกว่งของเพลลาที่คดงอหรือชำรุด การไม่สมดุลของใบพัด ล้อช่วยแรง ชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ในแนวรัศมีหรือในรูปร่างกลม
2. ความไม่ได้ศูนย์ (Misalignment) ของเครื่องจักรที่มีการหมุน
3. การหลวมหลวม (Looseness) ของชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเครื่องจักร
4. แบร์ริง (Bearing Defect) เกิดการชำรุดสึกหรอ หรือขาดการหล่อลื่น
5. แท่นจับยึดของเครื่องจักรไม่แน่นทำให้เกิดความถี่ของการสั่นพ้อง (Resonance)
6. การผิดปกติของสายพาน (Belt Defect)

7. สภาพการหล่อลื่น (Lubrication Condition)
8. ระบบไฟฟ้ามีความบกพร่อง (Electric Fault)
9. ความเสียหายในชุดเกียร์ (Gear Defect)

### 2.1.1 รูปแบบของการสั่นสะเทือน (Vibration Type)

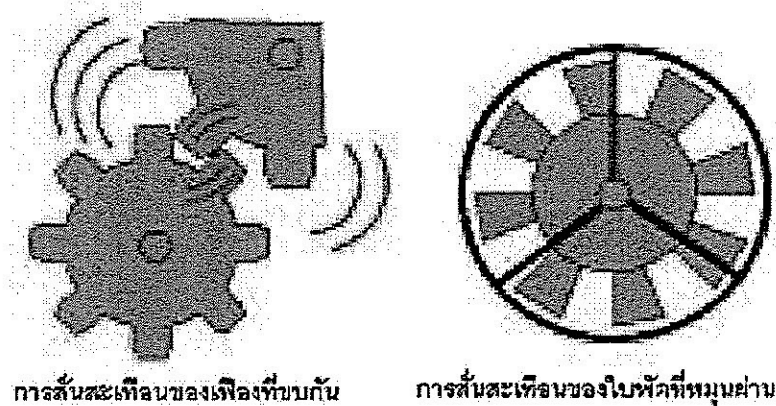
การสั่นสะเทือนแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบด้วยกันตามลักษณะและองค์ประกอบ คือ

1. การสั่นสะเทือนโดยอิสระ (Free Body Vibration) คือการสั่นสะเทือนที่ทิศทางของการสั่นสะเทือนเป็นไปได้อย่างอิสระตามทิศทางของแรงที่เกิดขึ้นจากการสั่นสะเทือน โดยไม่มีส่วนที่เป็นวัตถุแข็งเกร็งมาขัดขวางทิศทางของชิ้นส่วนที่สั่นสะเทือนนั้น ๆ เช่น เครื่องจักรหรือมอเตอร์ที่วางอยู่บนฐานรองรับที่มีความยืดหยุ่นและฐานที่มีความเป็นสปริง หรือ ใบพัดที่หมุนอยู่บนเพลายาวดังแสดงในรูปที่ 2.1



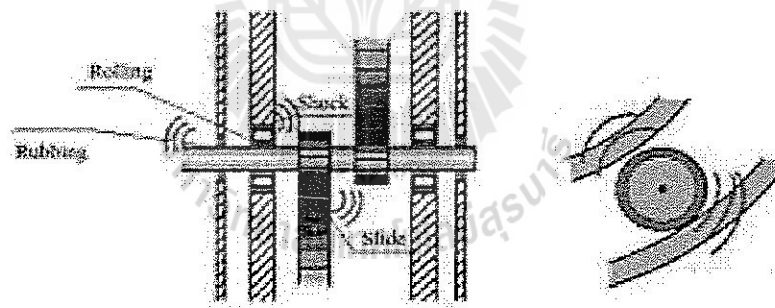
รูปที่ 2.1 การสั่นสะเทือนโดยอิสระ (Free Body Vibration) ของชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเครื่องจักร

2. การสั่นสะเทือนแบบขบกันหรือเคลื่อนที่ผ่าน (Meshing or Passing Vibration) คือการสั่นสะเทือนของชิ้นส่วนของเครื่องจักรที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อเปรียบเทียบกับจุดอ้างอิงจุดใดจุดหนึ่งของชิ้นส่วนที่ได้ทำการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนแบบหมุนหรือเคลื่อนที่ผ่าน เช่น การสั่นสะเทือนของเฟืองที่ขบกันและหมุนไปเรื่อย ๆ โดยในตอนที่ฟันแต่ละฟันขบและจากกันก็จะมี การสั่นสะเทือนเกิดขึ้น หรือการสั่นสะเทือนของ ใบพัดของพัดลมดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การสั่นสะเทือนแบบชนกันหรือเคลื่อนที่ผ่าน

3. การสั่นสะเทือนจากแรงเสียดทาน (Frictional Vibration) คือการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากแรงเสียดทานในการหมุนหรือเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเครื่องจักร เช่นการหมุนหรือเคลื่อนที่ของเม็ดลูกปืนหรือดัลลลูกปืน การเคลื่อนที่และไถล (Slide) ของบุชที่รองรับการหมุนของชิ้นส่วนเครื่องจักรดังแสดงในรูปที่ 2.3



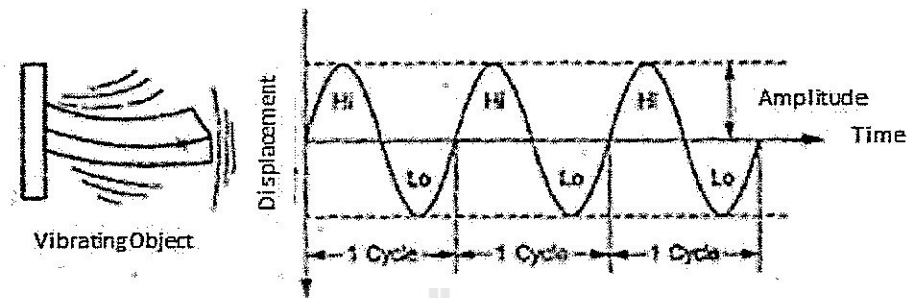
รูปที่ 2.3 การสั่นสะเทือนจากแรงเสียดทาน

### 2.1.2 องค์ประกอบที่ใช้ในการอธิบายการเคลื่อนที่แบบสั่น

ถ้าเราสามารถมองเห็นการเคลื่อนที่แบบสั่นในลักษณะที่ช้าลงมากๆ ได้ เราจะพบรูปแบบการเคลื่อนที่ในทิศทางที่แตกต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับความห่างไกลหรือความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัตถุรอบตำแหน่งสมดุลหนึ่ง ซึ่งจะทำให้เราเห็นลักษณะรูปแบบเฉพาะของการเคลื่อนที่แบบสั่นได้

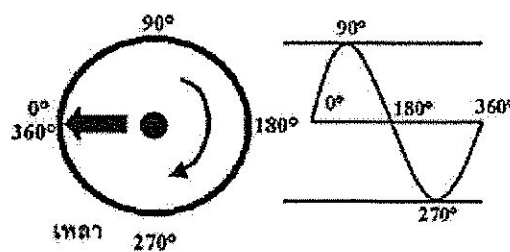


ดังแสดงในรูปที่ 2.4 องค์ประกอบที่ใช้ในการอธิบายการเคลื่อนที่แบบสั่นนี้ ได้แก่ ความถี่ (Frequency) แอมพลิจูด (Amplitude) และความเร่ง (Acceleration)



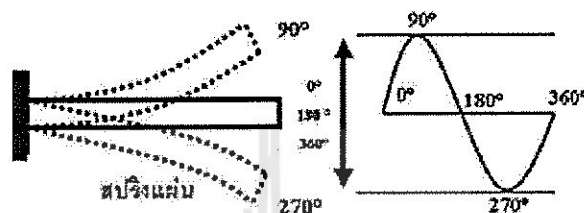
รูปที่ 2.4 ลักษณะองค์ประกอบของการสั่นสะเทือน

• ความถี่ (Frequency) วัตถุที่มีการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาผ่านตำแหน่งคงที่หนึ่ง เมื่อเคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งสูงสุดค่าหนึ่งและกลับมาผ่านตำแหน่งสูงสุดอีกค่าหนึ่ง และย้อนกลับมายังตำแหน่งคงที่เดิมถือว่าการเคลื่อนที่ครบ 1 รอบ (1 Cycle) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 จำนวนรอบในการสั่นของวัตถุในช่วงเวลา 1 วินาที จะเรียกว่า ความถี่ ซึ่งมีหน่วยเป็น เฮิรตซ์ (Hertz; Hz) หรือ 1 เฮิรตซ์จะมีค่าเท่ากับการเคลื่อนที่กลับไปกลับมา 1 รอบในเวลา 1 วินาที ในการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่มีการเคลื่อนที่ในแนวรัศมีและแบบกลับไปกลับมาซึ่งการเคลื่อนที่จะเริ่มจากจุดเริ่มต้นและสิ้นสุดที่ตำแหน่งเดิม เราเรียกว่า 1 รอบของการเคลื่อนที่ (Cycle) หรืออาจเรียกว่าคาบ (Period) เช่นตัวอย่างการหมุนของเพลาและการแกว่งของสปริงแผ่น เช่น การหมุนของเพลา เมื่อเพลาหมุน 1 รอบ หรือ 360 องศา ซึ่งการเคลื่อนที่แต่ละช่วงจะแบ่งออกเป็นควอเตอร์ ๆ ละ 90 องศา จะเห็นว่าเมื่อถ่ายทอดมุมของการเคลื่อนที่ของเพลาอยู่ในรูปของแอมพลิจูดแล้ว มุมที่เป็นส่วนยอดของแอมพลิจูดด้านบนคือมุม 90 องศา มุมที่เป็นส่วนยอดในด้านล่างคือมุม 270 องศา ส่วนมุม 0 องศาจะอยู่ในระนาบเดียวกับ 180 และ 360 องศา ดังแสดงในรูปที่ 2.5



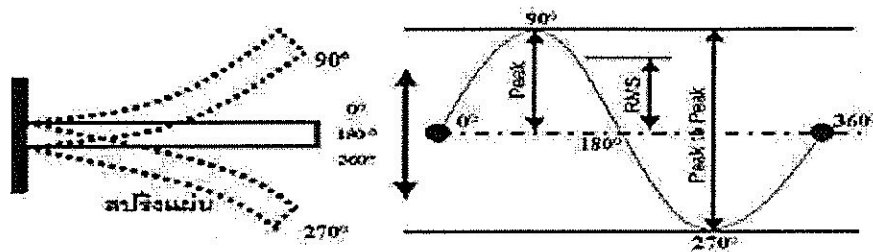
รูปที่ 2.5 รอบการหมุนของเพลา

การแกว่งของสปริงแผ่น ในการเคลื่อนที่โดยการแกว่งครบ 1 รอบนั้น จะเริ่มต้นจากจุดเริ่มต้นที่ 0 องศา คือจุดที่สปริงอยู่ในลักษณะตรง จากนั้นก็เคลื่อนที่ขึ้นไปยังจุดบนสุดซึ่งก็คือมุม 90 องศา และเคลื่อนที่ผ่านมายังจุดแรก ที่ตำแหน่ง 180 องศา จากนั้นก็เคลื่อนที่เลยลงไปยังจุดต่ำสุดที่ 270 องศาและสุดท้ายเคลื่อนที่มาครบรอบที่จุดเดิมคือ 360 องศา ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การแกว่งของสปริงแผ่น

- ความเร็ว (Velocity) วัตถุที่มีการเคลื่อนที่แบบสั่นจะมีการขจัด (Displacement) ที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลาในการเคลื่อนที่ จะเรียกว่า ความเร็ว ซึ่งมีหน่วยเป็น มิลลิเมตรต่อวินาที ( $mm/sec$ ) หรือ นิ้วต่อวินาที ( $in/sec$ )
- ความเร่ง (Acceleration) ความเร็วในการสั่นของวัตถุจากค่า 0 ถึงค่าสูงสุดระหว่างการสั่นแต่ละรอบค่าการเปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลาจะเรียกว่า ความเร่ง ซึ่งถูกวัดเพื่อให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของความเร็วเทียบกับเวลา ดังนั้นหน่วยของความเร่งจึงแสดงได้ด้วยค่ามิลลิเมตรหรือนิ้วต่อวินาทียกกำลังสอง ( $mm/sec^2$ )
- แอมพลิจูด (Amplitude) วัตถุที่มีการเคลื่อนที่แบบสั่นจะมีการขจัด (Displacement) มากที่สุดในแต่ละข้างของตำแหน่งคงที่หนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งค่าของการขจัดดังกล่าวเรียกว่า แอมพลิจูด ซึ่งมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (Millimeter) หรือนิ้ว (Inches) ซึ่งขนาดความรุนแรงของการสั่นจะขึ้นกับค่าแอมพลิจูดนี้ เช่นการเคลื่อนที่ของแผ่นสปริงที่ใน 1 รอบของการเคลื่อนที่จะมีค่าเท่ากับ 360 องศา โดยจุดที่สูงสุดและต่ำสุดของการเคลื่อนที่จะเท่ากับที่ 90 องศาและ 270 องศา ตามลำดับ ส่วนขนาดความสูงจากจุดสูงสุดที่ 90 องศา มาถึงจุดต่ำสุดที่ 270 องศา นั้น เรียกว่าขนาดของแอมพลิจูด ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งมีขนาดเป็นหน่วยระยะทางอาจเป็นมิลลิเมตรหรือนิ้วหรืออื่นๆ ในหน่วยของระยะทางซึ่งก็แล้วแต่ว่าจะนำมาเป็นหน่วยวัด ในงานวัดความสั่นสะเทือนนั้นสามารถแบ่งขนาดความสูงของแอมพลิจูดออกเป็น 3 ประเภท



รูปที่ 2.7 ประเภทของแอมป์ลิจูด

1. แบบเต็มคลื่น (Peak to Peak) เป็นการวัดขนาดของแอมป์ลิจูดจากยอดคลื่นสูงสุดที่ 90 องศาถึงยอดคลื่นต่ำสุดที่ 270 องศา ถ้าพิจารณาจากรูปที่ 2.7 จะเห็นว่าเป็นการวัดขนาดของการขึ้นสุดและลงสุดของการสั่นสะเทือนซึ่งจะมีค่าเท่ากับระยะการสั่นสะเทือนทั้งหมดของวัตถุ การวัดขนาดการสั่นสะเทือนแบบเต็มคลื่น (Peak to Peak) นั้นจะใช้กับการวัดการสั่นสะเทือนในหน่วยการวัดแบบการวัดระยะทาง (Displacement) ของเครื่องจักรที่มีรอบของการสั่นสะเทือนต่ำ ๆ เช่นเพลลาที่หมุนด้วยความเร็วที่ไม่เกิน 600 รอบ/นาที

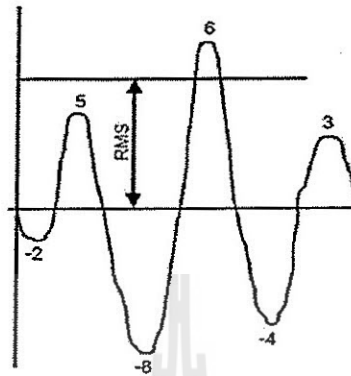
2. แบบครึ่งคลื่น (Peak หรือ Zero to Peak) เป็นการวัดขนาดของการเคลื่อนที่หรือการสั่นสะเทือนโดยจะวัดระยะจากจุดเริ่มต้นที่ 0 องศาของแอมป์ลิจูดไปถึงจุดสูงสุดที่ 90 องศาหรือจาก 180 องศาไปยัง 270 องศา หรือค่าครึ่งหนึ่งของขนาดแอมป์ลิจูดของการสั่นสะเทือน

3. แบบ Root Mean Square, RMS หรือค่ามาตรฐานความเบี่ยงเบน (Standard Deviation) ของขนาดแอมป์ลิจูดในกรณีที่วัดค่าแอมป์ลิจูดที่ไม่มีความสม่ำเสมอค่า Root Mean Square นี้จะไม่ใช้ค่าเฉลี่ย การหาค่า RMS ทำได้โดยเอากำลังสองของระยะแอมป์ลิจูดมารวมกันแล้วถอดรากที่สองออกมาโดยจะอยู่ในรูปสมการ 1 โดยที่  $V_{peak}$  ค่าของแอมป์ลิจูดสูงสุดหรือต่ำสุด

$$RMS = \frac{1}{\sqrt{2}} V_{peak} \quad (2.1)$$

การหาค่า RMS ดังสมการที่ 2.1 จะใช้สำหรับการหาค่า RMS ที่ขนาดแอมป์ลิจูดเท่าๆ กันทุกคลื่น แต่ในทางปฏิบัติแล้วในการวัดการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรนั้นขนาดของแอมป์ลิจูด

อาจจะไม่เท่ากัน โดยตลอดแต่จะเป็นลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าของแอมพลิจูดการสั่นสะเทือนแบบไม่สม่ำเสมอได้ดังนี้



รูปที่ 2.8 ค่า RMS ของคลื่นที่ไม่สม่ำเสมอ

1. ยกกำลังสองค่าทุกค่าทั้งหมดแล้วบวกกัน

$$(2^2 + 5^2 + 8^2 + 9^2 + 4^2 + 3^2) = 199$$

2. บวกผลลัพธ์ของกำลังสองที่ได้แล้วหาค่าเฉลี่ย

$$\frac{199}{6} = 33.17$$

3. ถอดรากที่สองของค่าเฉลี่ยจะได้ออกมาเป็นค่า RMS

$$\sqrt{33.17} = 6.16$$

ซึ่งจะเห็นว่าค่าเฉลี่ยของแอมพลิจูดตามตัวอย่างจะเท่ากับ 5.16 ในขณะที่ค่า RMS จะมีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ยคือมีค่าเท่ากับ 6.16 จากตัวอย่างจะทำให้สามารถมองภาพของความหมายของคำว่า Root Mean Square หรือ RMS ในงานวัดการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรออก สำหรับรายละเอียดของความสัมพันธ์ของขนาดการสั่นสะเทือนแบบต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 2.1

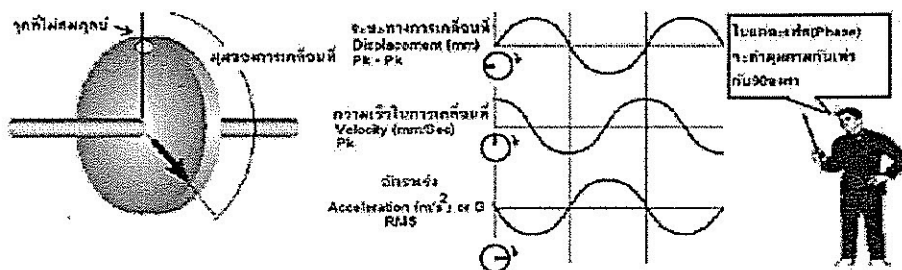
ตารางที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ของการหาค่าแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนแบบต่าง ๆ

Peak to Peak Vibration = 2 x Peak vibration	Peak to Peak vibration = 2.829 x RMS. Vibration
Peak Vibration = 0.5 x Peak to Peak Vibration	Peak Vibration = 1.414 x RMS. Vibration
RMS. Vibration=(Peak to Peak Vibration/2.829)	RMS. Vibration = 0.707 x Peak Vibration

การเลือกใช้ค่าการวัดแรงสั่นสะเทือนหรือแอมพลิจูดการสั่นนั้นสามารถเลือกได้หลายแบบทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในการวัดเช่น ชนิดเครื่องจักร สภาวะแวดล้อมในการวัดการสั่นสะเทือน และเครื่องวัดการสั่นสะเทือน เป็นต้น

2.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ ระยะทาง ความเร็วและอัตราเร่งในการวัดการสั่น

การแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง ความเร็วและอัตราเร่งในการเคลื่อนที่ของการสั่นสะเทือนนั้นเราจะเห็นว่ามุมในการเคลื่อนที่นั้นจะเริ่มตั้งแต่มุม 0 องศาจนถึงมุม 90 องศาซึ่งจุดนี้จะเป็นจุดที่ระยะการเคลื่อนที่มากที่สุด แต่เมื่อการเคลื่อนที่เลย 90 องศาไปความเร็วในการเคลื่อนที่จะเริ่มเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ดังนั้นที่มุม 90 องศาคือจุดเริ่มต้นที่ความเร็วในการเคลื่อนที่จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น จนไปถึงมุม 180 องศาจะเป็นจุดที่ความเร็วในการเคลื่อนที่สูงที่สุดและหลังจากนั้นความเร็วในการเคลื่อนที่จะค่อย ๆ ลดลงจนเป็นศูนย์ที่มุม 270 องศา ในส่วนของอัตราเร่งเราจะเห็นว่าที่มุม 180 องศาความเร็วในการเคลื่อนที่สูงที่สุดและค่อย ๆ ลดลงหลังจากนั้น ดังนั้นอัตราเร่งจะเป็นศูนย์ที่มุมดังกล่าวและจะเปลี่ยนแปลงมากขึ้นหลังจากนั้นจนอัตราเร่งมากที่สุดเมื่อการเคลื่อนที่เลยจากจุดนั้น ไปอีก 90 องศา ดังนั้นเราจะเห็นว่ามุมในการเคลื่อนที่ของแต่ละเฟส (Phase) ระหว่างระยะทาง ความเร็วและอัตราเร่งจะต่างกันอยู่ 90 องศา ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการวัดระยะทาง ความเร็วและอัตราเร่งในการเคลื่อนที่ในรูปแบบคลื่นไซน์ของการสั่นสะเทือน

สำหรับความสัมพันธ์ในรูปของสมการระหว่างระยะทาง ความเร็วและอัตราเร่งในการเคลื่อนที่นั้นให้เราพิจารณาจากการเคลื่อนที่แบบ Simple Harmonics ดังแสดงในรูปที่ 2.10 เป็นการเปลี่ยนการสั่นสะเทือนของวัตถุตั้งรูปเป็นคลื่นไซน์แกน X เป็นเวลาและแกน Y เป็นระยะทางของการเคลื่อนที่หรือระยะของการสั่นสะเทือน จากรูปดังกล่าวเมื่อเขียนความสัมพันธ์จะได้สมการดังนี้

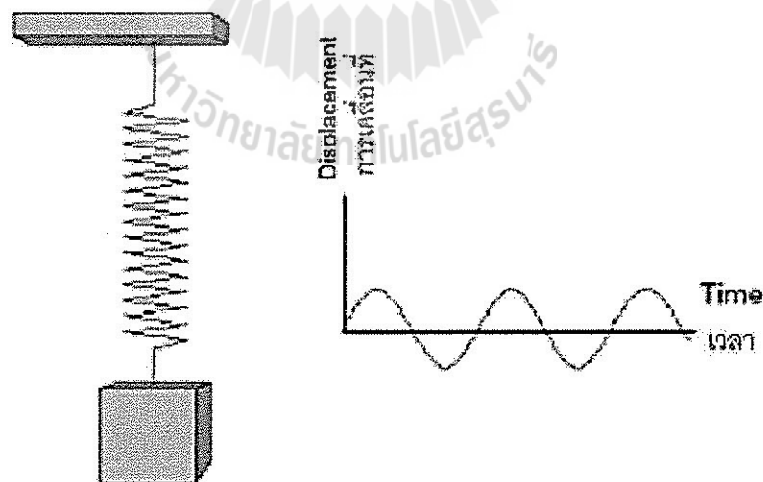
$$\text{สมการการเคลื่อนที่ } d = D \sin(\omega t) \quad (2.2)$$

$$\text{สมการของความเร็ว } v = \frac{dD}{dt} \omega D \cos(\omega t) \quad (2.3)$$

$$\text{สมการความเร่ง } a = \frac{dv}{dt} = \frac{dD^2}{t^2} - \omega^2 \sin(\omega t) \quad (2.4)$$

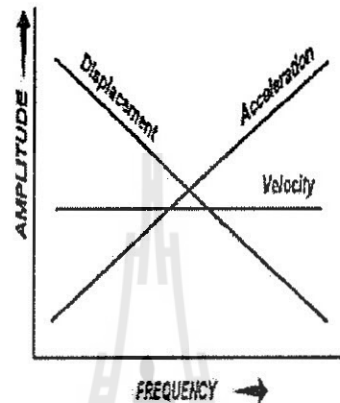
โดยที่

- $d$  คือ ระยะทางการเคลื่อนที่ทั้งหมด
- $D$  คือ ระยะการเคลื่อนที่สูงสุด, Peak
- $\omega$  คือ ความถี่ในการเคลื่อนที่เชิงมุม ( $2\pi f$ )
- $t$  คือ เวลา (วินาที,s)
- $v$  คือ ความเร็วในการเคลื่อนที่ (m/s)
- $a$  คือ อัตราเร่ง (m/s<sup>2</sup>)



รูปที่ 2.10 การเคลื่อนที่แบบ Simple Harmonics

จุดการสั่นสะเทือนจุดเดียวกันที่ความเร็วรอบหรือความถี่ในการเคลื่อนที่หรือหมุนที่รอบต่ำเราจะเห็นว่าระยะทางการเคลื่อนที่จะมีมาก แต่ที่ความถี่ในการสั่นสะเทือนสูงขึ้นไประยะทางการเคลื่อนที่จะลดลงแต่ค่าความเร่งจะสูงขึ้น ส่วนความเร็วนั้นสามารถเห็นได้ทุกย่านความถี่การสั่นสะเทือนดังกราฟแสดงความสัมพันธ์ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าต่าง ๆ ของการสั่นสะเทือน

## 2.2 การวัดการสั่นสะเทือนของเครื่องจักร

การวัดและวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของเครื่องจักร โดยใช้เครื่องมือวัดการสั่นสะเทือนนั้น มีรายละเอียดในการวัดและพิจารณาในส่วนต่างๆ ดังต่อไปนี้คือ

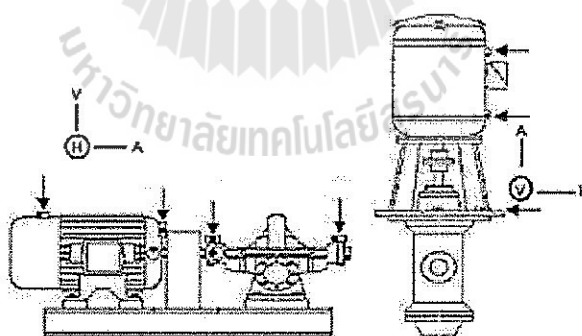
### 2.2.1 จุดที่จะวัดการสั่นสะเทือนของเครื่องจักร

ในการวัดการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรนั้นนอกจากมีเครื่องวัดการสั่นสะเทือนแล้ว สิ่งหนึ่งที่เราต้องรู้ก็คือจุดที่เราจะต้องเอาเครื่องมือไปวัดว่าจะต้องวัดที่จุดไหนบ้าง เราได้รู้จากข้างต้นแล้วว่า “การสั่นสะเทือนคือการแกว่งหรือการสั่นของวัตถุเมื่อเปรียบเทียบกับจุดอ้างอิง” ดังนั้นในการวัดการสั่นสะเทือนของวัตถุหรือชิ้นส่วนต่างๆของเครื่องจักรเราจึงต้องวัดในจุดที่เป็นจุดต่อของจุดที่หมุนหรือเคลื่อนที่กับจุดที่อยู่กับที่ซึ่งก็คือจุดที่รองรับการหมุนหรือการเคลื่อนที่ในการหมุนที่เป็นแบร์ริง (Bearing) หรือชุดแบร์ริง (Bearing Unit) ในการวัดความสั่นสะเทือนนั้น โดยปกติแล้วจะทำการวัดใน 2 แนววัด โดยแยกเป็น 3 จุดวัดดังแสดงในรูปที่ 2.12 คือ

1. แนวแกน (Axial, A) คือจุดวัดที่อยู่ในแนวขนานกับเพลลาของเครื่องจักรที่ต้องการวัด ในการวัดนั้นเราต้องวัดในจุดที่อยู่ใกล้กับเพลลาให้มากที่สุด การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นมากผิดปกติหรือเกิดขึ้นอย่างรุนแรงในแนวนี้มีสาเหตุมาจากการชำรุดของเพลลา การคดงอของเพลลา และการ Misalignment ระหว่างต้นกำลังกับตัวตามไม่ดีเช่นการ Misalignment ระหว่างมอเตอร์กับปั๊มของชุดปั๊มน้ำ

2. แนวรัศมีในแนวนอน (Radius Horizontal, H) คือจุดวัดที่อยู่ในแนวนอนหรือแนวขนานกับพื้น หรือตั้งฉากกับจุดยึดของฐานมอเตอร์หรือเครื่องจักร ซึ่งจะวัดทางด้านขวาหรือด้านซ้ายของชิ้นส่วนหรือเครื่องจักรที่ต้องการวัดก็ได้แต่มุมการวัดต้องได้ 90 องศาหรือใกล้เคียงกับจุดวัดที่เป็นแนวตั้ง (Vertical, V) การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นมากผิดปกติหรือเกิดขึ้นอย่างรุนแรงในแนวนี้มีสาเหตุมาจากความสมดุล (Balance) ของเพลลา ใบพัด ล้อช่วยแรง ชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่เป็นวงกลม หรือการแกว่งของเพลลา ของเครื่องจักรนั้น ๆ

3. แนวรัศมีในแนวตั้งฉากหรือแนวตั้ง (Radius Vertical, V) คือจุดวัดที่อยู่ในแนวตั้งฉากกับกับพื้นหรือด้านที่อยู่ตรงกันข้ามกับจุดจับยึดมอเตอร์หรือเครื่องจักร โดยทั่วไปแล้ว จุดที่ทำการวัดคือจุดวัดที่อยู่ด้านบนของเครื่องจักรที่ต้องการจะวัด เช่นด้านบนของมอเตอร์หรือปั๊ม โดยจุดที่วัดจะต้องมีมุมขนาน 90 องศา หรือใกล้เคียงกับจุดวัดในแนวนอน

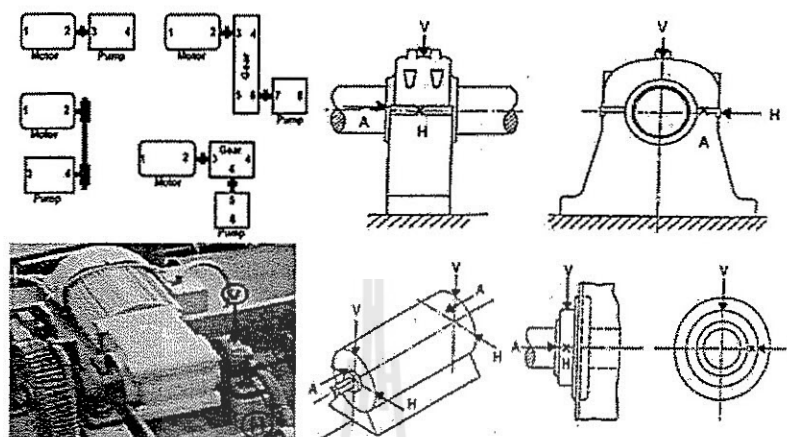


รูปที่ 2.12 แนวของจุดที่วัดการสั่นสะเทือน

ในการวัดนั้นจุดที่วัดจะต้องเป็นจุดที่เป็นตัวเรือนเครื่องจักรหรือตัวเรือนของมอเตอร์ ไม่แนะนำให้วัดบนฝาครอบหรือชิ้นส่วนอื่น ๆ เพราะจะทำให้ค่าที่ได้จากการวัดผิดเพี้ยนไปจากความ เป็นจริงและในการวัดนั้นแรงกดของทุกครั้งที่วัดของทุกจุดจะต้องเท่ากัน ในกรณีที่ต้องใช้คนหลายคน



ในการทำการวัดนั้นจะต้องมาฝึกวัดการสั่นสะเทือนของจุดใดจุดหนึ่งแล้ววัดให้ค่าที่วัดได้ของทุกคนเท่ากันก่อนเพื่อจะได้รู้จังหวัดการวัดและแรงกดที่ใช้การกดหัววัดการสั่นสะเทือนดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 จุดวัดการสั่นของเครื่องจักร ตัวมอเตอร์และชุดแบร์ริง (Bearing Unit)

### 2.2.2 ตำแหน่งการติดตั้งหรือวางหัววัด (Sensor)

การเลือกตำแหน่งในการวัดเครื่องจักร มีความสำคัญอย่างมากในการเก็บข้อมูลของความสั่นสะเทือนของเครื่องจักร ควรหลีกเลี่ยงพื้นที่ที่มีการทาสี, ตำแหน่งที่ตลับลูกปืนไม่ได้รับแรงหรือน้ำหนัก (Unload bearing zone), รอยต่อของเปลือกตลับลูกปืน (Housing splits) และโครงสร้างที่โปร่ง (Structural gaps) บริเวณเหล่านี้ทำให้ค่าที่ได้จากการวัดไม่ดี ไม่ถูกต้องและข้อมูลไม่แน่นอนเมื่อมีการวัดความสั่นสะเทือนด้วยหัววัดแบบมือจับ (hand-held sensor) จะต้องคำนึงถึงตำแหน่งของการวัดที่ถูกต้อง, มุมของการวัด และ แรงกด ให้มีความใกล้เคียงและเหมือนเดิมกับการวัดครั้งก่อนเสมอถ้าเป็นไปได้การวัดความสั่นสะเทือนควรทำการวัดทั้งสามแนวแกน (Orthogonal matrix) คือ

- แนวแกน The axial direction
- แนวนอน The horizontal direction
- แนวตั้ง The vertical direction

การวัดในแนวนอน (Vertical Direction) โดยทั่วไปจะแสดงถึงค่าการสั่นสะเทือนทั้งตัวของเครื่องจักรนอกจากนั้น คือ ความไม่สมดุล (Imbalance) ซึ่งเป็นปัญหาส่วนใหญ่ของเครื่องจักร

และ ยังแสดงให้เห็นผลในแนวรัศมี (Radial) ทั้งในแนวตั้งและแนวนอน (Vertical and Horizontal) ดังนั้น การวัดค่าความสั่นสะเทือนในแนวนอนจึงเหมาะสมในการดูปัญหาความไม่สมดุลของเครื่องจักร (Imbalance)

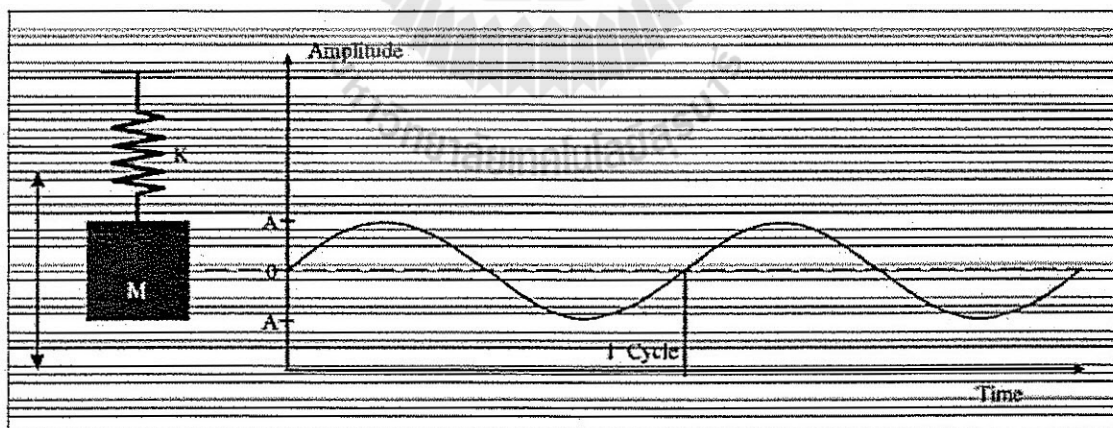
การวัดในแนวตั้ง (Horizontal Direction) โดยทั่วไปจะแสดงค่าความสั่นสะเทือนน้อยกว่าแนวนอน เพราะเครื่องจักรมีการเกาะยึดที่แข็งแรง

การวัดในแนวแกน (Axial Direction) การสั่นสะเทือนในแนวแกนจะมีค่าน้อยมาก เพราะแรงจะกระทำในแนวตั้งฉากกับเพลลาเสมอ แต่อย่างไรก็ตาม ปัญหาของการเอียงศูนย์ (Misalignment) และปัญหาเพลลาคด (Bent shaft) จะแสดงในแนวแกน

ดังนั้นการอ่านค่าความสั่นสะเทือนต้องอ่านทั้ง 3 แกน จึงจะทำให้มีความเข้าใจลึกซึ้ง และถูกต้อง เช่นการวัดความสั่นสะเทือนของเครื่องจักรหมุนควรจะให้หัววัดอยู่ใกล้กับตำแหน่งของ คลับดุกปืนมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้และหลีกเลี่ยงการวัดที่เสื่อนอกเครื่องจักร (Case) เพราะที่เสื่อนอก อาจจะมีการสั่นเนื่องจากความถี่ธรรมชาติ (Resonance) หรือการหลวมคลอน (Looseness) ได้

### 2.2.3 วิธีการวัดความสั่นสะเทือน (Vibration Measurements methods)

การวัดค่าความสั่นสะเทือน คือ การวัดการเคลื่อนที่ในรอบของระยะเวลาหนึ่ง ความสั่นสะเทือนสามารถแสดงในรูปของสปริงผูกติดกับมวลดังแสดงในรูปที่ 2.14



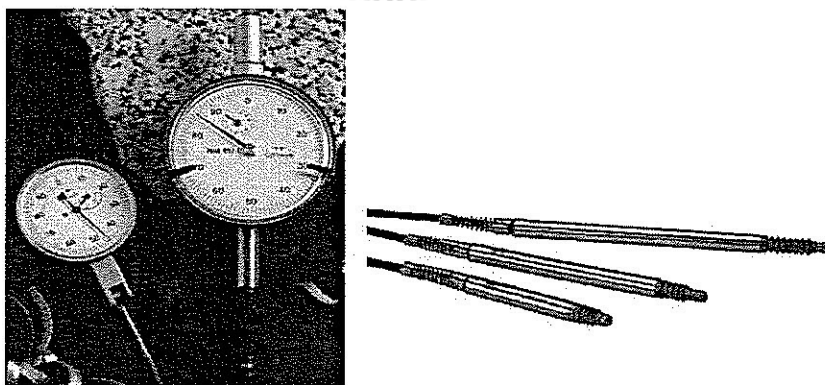
รูปที่ 2.14 การวัดการเคลื่อนที่ของสปริงในรอบของระยะเวลาหนึ่ง

เมื่อมีการเคลื่อนที่ มวลจะแกว่งไปมาบนสปริง การแกว่งไปมาจะทำให้ตำแหน่งของมวลเปลี่ยนไปทำให้เห็นเป็นรูปคลื่น (Sine wave) จุดเริ่มต้นคือจุดที่มวลอยู่นิ่งกับที่ คือ ที่ตำแหน่งศูนย์ การเคลื่อนที่ขึ้นลงหนึ่งรอบของมวลจะแสดงให้เห็นค่าบวกและค่าลบเมื่อเทียบกับจุดเริ่มต้นปล่อยมวล (ที่จุดศูนย์) ระยะการขจัด คือ การเปลี่ยนแปลงระยะทางหรือตำแหน่งของวัตถุเทียบกับจุดอ้างอิง ขนาดของการเคลื่อนที่ของระยะการขจัดวัดด้วยแอมพลิจูด

#### 2.2.4 ชนิดของตัววัดการสั่นสะเทือน

การวัดความสั่นสะเทือนมีการวัดอยู่ 3 แบบคือ การขจัด (Displacement), ความเร็ว (Velocity) และ ความเร่ง (Acceleration) ซึ่งการวัดทั้งสามแบบนี้จะสัมพันธ์กันทางคณิตศาสตร์ ทั้งสามแบบจะมีคุณลักษณะที่แตกต่างกัน ซึ่งมีความจำเป็นมากที่จะต้องเลือกลักษณะของการวัดและหัววัด ให้เหมาะสมกับสัญญาณของการสั่นสะเทือนที่บอกถึงความเสียหายของเครื่องจักรแต่ละแบบ

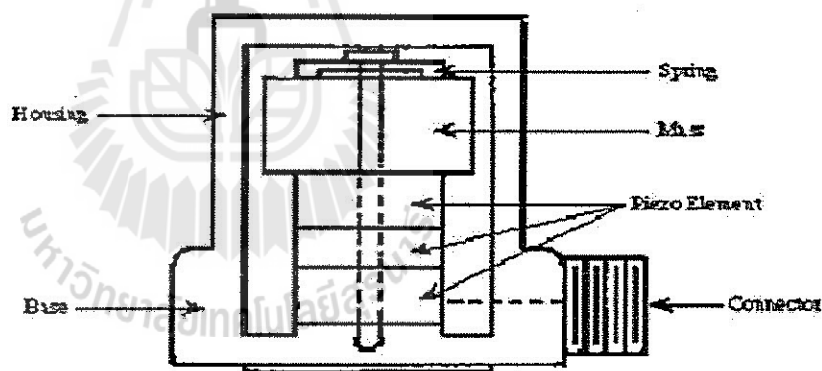
- การวัดการขจัด จะใช้ Displacement Probe หรือ Eddy Probe ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ซึ่งหัวของ Displacement Probe นี้จะเป็นแบบไม่สัมผัส (non-contact) โดยจะใช้วัดความสัมพันธ์ของระยะระหว่างผิววัตถุ 2 ชิ้น ซึ่งจะนิยมใช้วัดการสั่นสะเทือนของ Shaft และเครื่องจักรที่ใช้ตลับลูกปืนแบบ Fluid film โดยที่ Displacement Probe ยังสามารถใช้วัดค่าการเคลื่อนที่ของ Shaft ได้ด้วย Shaft Phase คือ ระยะของมุมที่เกิดขึ้น ระหว่างจุดที่ Mark ไว้บน Shaft กับ สัญญาณการสั่นสะเทือน ซึ่งความสัมพันธ์นี้ใช้สำหรับการถ่วงสมดุลของเครื่องจักร (Balancing) และใช้วิเคราะห์การเคลื่อนที่ของเพลา (Shaft Orbital Analysis)



รูปที่ 2.15 Displacement Probe

- การวัดความเร็ว ในอดีตหัววัดแบบแรกที่ใช้เป็นหัววัดทางไฟฟ้าในการวัดสภาพเครื่องจักร เนื่องจาก ผลของการวัดมีค่าเท่ากับการเคลื่อนที่ ซึ่งการวัดแบบความเร็วนี้จะมีค่าคงที่โดยไม่คำนึงถึงย่านความถี่ แต่อย่างไรก็ตามความถี่ที่ต่ำๆ (ต่ำกว่า 10 Hz) หรือความถี่สูง (สูงกว่า 2kHz) หัววัดแบบความเร็ว จะไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในต้นแบบหัววัดแบบความเร็ว จะมี Coil ขดอยู่ในสนามแม่เหล็ก เพื่อผลิตความต่างศักย์(Voltage) ที่เหมาะสมกับความเร็วที่พื้นผิวของเครื่องจักร ปัจจุบันนี้ได้มีหัววัดแบบที่มีต้นทุนต่ำและมีความสามารถวัดเป็นความเร่ง ซึ่งค่าของ ความเร็ว จะได้จากการแปลงสัญญาณจาก ความเร่ง มาเป็น ความเร็ว

- การวัดค่าความเร่ง จะใช้การวัดด้วยหัววัดแบบความเร่ง (Accelerometer) ซึ่งหัววัดแบบความเร่งนี้ ปกติจะบรรจุ Piezoelectric Crystal ประมาณ 1ชิ้นหรือมากกว่าและมีมวลอยู่ด้วย ซึ่งเมื่อ Piezoelectric crystal ถูกกดมันจะผลิตกระแสไฟฟ้าออกมาในปริมาณที่เหมาะสมถึงระดับความเร่ง (Acceleration) ซึ่งเมื่อวัตถุสั่นจะทำให้มวลเคลื่อนที่ไปกด Crystal ทำให้มวลกับ Crystal เคลื่อนที่ไปด้วยกันดังรูปที่ 2.16



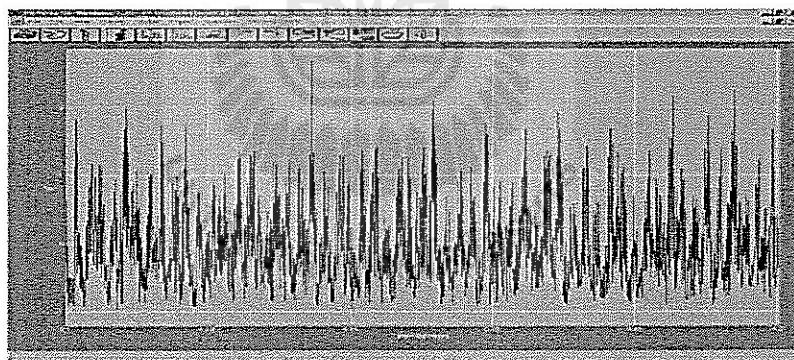
รูปที่ 2.16 หัววัดความเร่ง (Accelerometer)

หัววัดความเร่ง (Accelerometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดความสั่นสะเทือนที่มีความถี่ในช่วงกว้าง (ตั้งแต่ 0 – 400 kHz)ความสามารถนี้ใช้ตรวจสอบในความถี่ช่วงกว้างซึ่งเป็นจุดแข็งของการวัดโดยใช้หัววัดความเร่ง อย่างไรก็ตามสัญญาณของความถี่ เป็นสัญญาณที่นิยมใช้กันเป็นจำนวนมากในการตรวจสอบเครื่องจักร ปกติจะวัดแบบความเร่งเพื่อให้ได้สัญญาณความถี่ หน่วยวัดความเร่งคือ G's, in/sec<sup>2</sup>, m/sec<sup>2</sup> เราสามารถวัดค่าความสั่นสะเทือนแบบความเร่ง และความเร็ว จากหัววัดความเร่งที่

จุดวัดบนเครื่องจักรที่ตำแหน่งตลับลูกปืนได้การวัดการสั่นสะเทือนนี้จะถูกบันทึก, วิเคราะห์, และถูกแสดงด้วย ตารางและ นำมา Plot บนกราฟ เพื่อดูความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดและเวลา ซึ่งเรียกว่า Time Waveform

### 2.2.5 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดกับเวลา (Time Waveform Analysis)

จากรูปที่ 2.17 แสดงสัญญาณจากหัววัด Accelerometer หรือ หัววัด Velocity โดยให้ในแกน Y ของกราฟเป็นแอมพลิจูด และในแกน X เป็น เวลา โดยที่ค่าของ Time Waveform จะเป็นตัวบ่งบอกถึงการเกิดความผิดปกติในระบบ หรือ เครื่องจักรในช่วงเวลานั้นๆ ยกตัวอย่าง เช่น ในเครื่องวัดแผ่นดินไหวก็จะบันทึกว่ามีความสั่นสะเทือนมากเท่าไรในช่วงเวลาที่เกิด ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับ การบันทึกความสั่นสะเทือนแบบ Time Waveform โดยที่ค่าของ Time Waveform จะแสดงตัวอย่างในช่วงเวลาสั้น ๆ ของข้อมูลดิบของค่าความสั่นสะเทือน ถึงแม้ว่า จะไม่เป็นประโยชน์ต่อการใช้ในการวิเคราะห์อื่น ๆ แต่ Time Waveform สามารถดูปัญหาของสภาพเครื่องจักรที่บางครั้งไม่สามารถเห็นได้ในการวิเคราะห์แบบความถี่ (Frequency Spectrum) ดังนั้น Time Waveform จึงต้องใช้เป็นส่วนหนึ่งของการวิเคราะห์ปัญหาด้วย

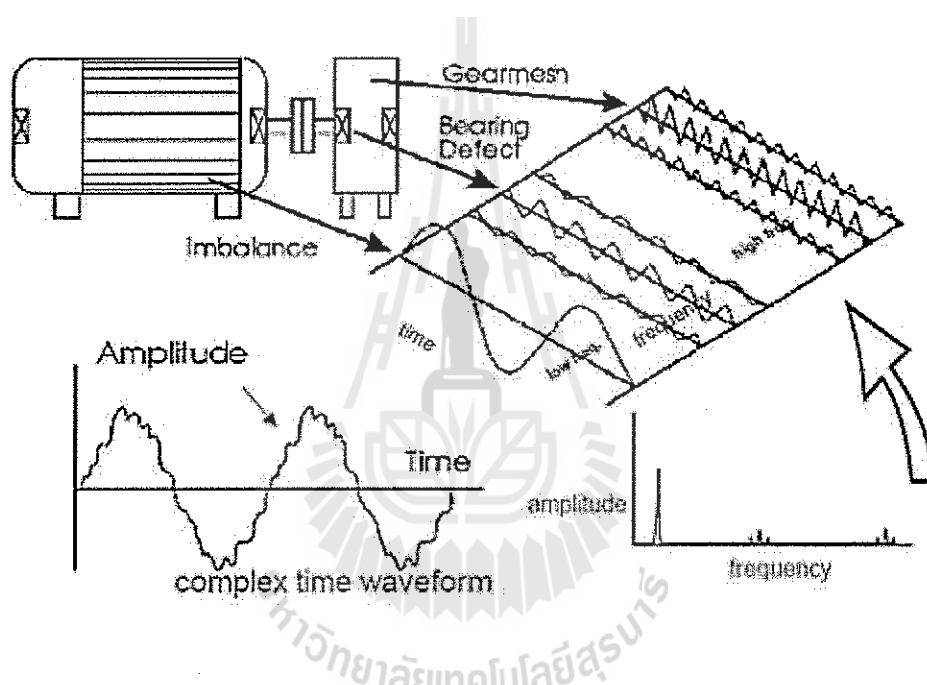


รูปที่ 2.17 ตัวอย่างการวัดแบบ Time Waveform

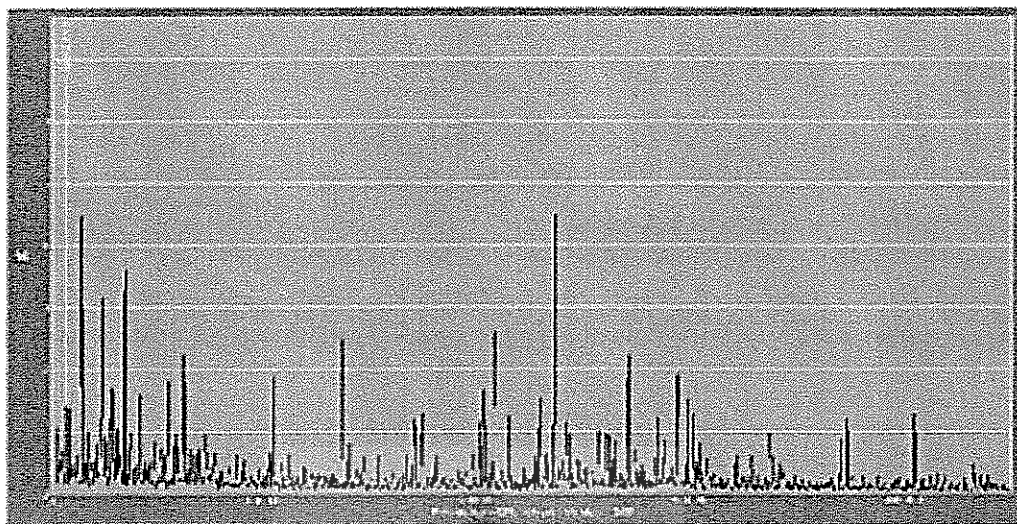
### 2.2.6 การวิเคราะห์แถบคลื่นความถี่ (FFT Spectrum Analysis)

ในการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของเครื่องจักรนั้น วิธีการวิเคราะห์โดยใช้การแปลงแบบฟูเรียร์ หรือ Fast Fourier Transformation (FFT) ก็เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน หลักการของ FFT ก็คือการแปลงค่าสัญญาณความสั่นสะเทือนในรูปของคาบ (t) ไปเป็นความถี่ (f) ซึ่งจะทำให้สามารถวินิจฉัย ความสั่นสะเทือนได้ละเอียดขึ้นถึงต้นเหตุของการชำรุดของเครื่องจักร

ได้ เมื่อทำการวิเคราะห์สัญญาณความสั่นสะเทือนที่แสดงบนโดเมนความถี่ (Frequency Domain) หรือเรียกอีกอย่างว่าการวิเคราะห์แบบสเปกตรัม (Spectrum Analysis) มาใช้กับสัญญาณการสั่นสะเทือนที่วัดได้ จากเครื่องจักร ก็จะทำได้ข้อมูลในการบอกขนาดของการสั่นสะเทือนซึ่งถูกแสดงในรูปแบบของค่ารวม (Overall Vibration) โดยมีค่าเป็นตัวเลขค่าหนึ่งนั้นจริงๆ แล้วจะประกอบด้วยสัญญาณการสั่นสะเทือนที่มีขนาดต่าง ๆ กัน อยู่ที่แต่ละความถี่ ซึ่งที่บางความถี่ขนาดของสัญญาณการสั่นสะเทือนจะมีค่ามาก ที่บางความถี่ขนาดของสัญญาณ การสั่นสะเทือนก็มีค่าน้อย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของชิ้นส่วนนั้นๆ ของเครื่องจักรดังแสดงในรูปที่ 2.18 และรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.18 การสั่นสะเทือนของเครื่องจักรแสดงบน โดเมนเวลา (t) และ โดเมนความถี่ (f)



รูปที่ 2.19 การสั่นสะเทือนของเครื่องจักรแสดงในรูปของแถบคลื่นความถี่ FFT Spectrum

### 2.2.7 ค่ามาตรฐานและเกณฑ์ในการพิจารณาค่าการสั่นสะเทือน (Standard and Judgment)

เมื่อเราได้ค่าการสั่นสะเทือนที่วัดตามจุดต่าง ๆ แล้วขั้นตอนต่อไปคือการเอาค่าการสั่นสะเทือนที่ได้จากการวัดนั้นมาทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานว่าค่าการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับจุดต่าง ๆ ที่ทำการวัดนั้นมีค่ามากน้อยเพียงใด ซึ่งในการพิจารณานั้นเราจะพิจารณาจากขนาดของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น เปรียบเทียบกับขนาดของเครื่องจักร ลักษณะของเครื่องจักร ความเร็วรอบของเครื่องจักร สำหรับเครื่องจักรโดยทั่วไปเราจะใช้มาตรฐาน ISO 2372-1974E ซึ่งจะแบ่งการสั่นสะเทือนตามขนาดของเครื่องจักรและขนาดของการสั่นสะเทือนที่วัดได้ดังตารางที่ 2.2 สำหรับรายละเอียดในการเปรียบเทียบขนาดของการสั่นสะเทือนที่วัดได้ตามจุดต่าง ๆ กับตาราง ISO ของการสั่นสะเทือนนั้น อันดับแรกให้หาขนาดของเครื่องจักรว่าเครื่องจักรมีกำลังเท่าไรตรงกับช่องไหนของตาราง จากนั้นให้เราเอาค่าการสั่นสะเทือนที่วัดได้ในหน่วยเดียวกับตารางคือหน่วยที่มีขนาดการสั่นสะเทือนเป็น RMS มาทำการเปรียบเทียบกับในตารางว่าความรุนแรงของการสั่นสะเทือนอยู่ในระดับไหน

ตารางที่ 2.2 ระดับความรุนแรงของการสั่นตามขนาดของเครื่องจักรตามมาตรฐาน ISO2372-1974E

Velocity mm/s [RMS]	45.0	หยุดเพื่อ ตรวจ ซ่อม	หยุดเพื่อ ตรวจ ซ่อม	หยุดเพื่อ ตรวจ ซ่อม	หยุดเพื่อ ตรวจ ซ่อม
	28.0				
	18.0	เฝ้าระวัง	เฝ้าระวัง	เฝ้าระวัง	เฝ้าระวัง
	11.2				
	7.10	พอลิไซ	พอลิไซ	พอลิไซ	พอลิไซ
	4.5				
	2.80	ดี	ดี	ดี	ดี
1.80					
1.12	เครื่องจักรขนาด ใหญ่ที่มักตั้งอยู่ บนฐานแข็งแรง และความเร็วรอบ ต่ำจนต่ำกว่าความถี่ ธรรมชาติ	เครื่องจักรขนาดใหญ่ที่ มักตั้งอยู่บนฐานแข็ง เกร็ง และความเร็วรอบ ต่ำจนสูงกว่าความถี่ ธรรมชาติ	เครื่องจักรขนาด ใหญ่ที่มักตั้งอยู่ บนฐานแข็งแรง และความเร็วรอบ ต่ำจนต่ำกว่า ความถี่ธรรมชาติ		
0.71	เครื่องจักรขนาด เล็กที่มีกำลังต่ำกว่า 15kW	เครื่องจักรขนาดกลางที่ มีกำลังเกิน 15kW ถึง 75kW หรือขนาด 75kW ถึง 300kW ที่มักตั้งอยู่บน ฐานแบบพิเศษ	เครื่องจักรขนาด ใหญ่ที่มักตั้งอยู่ บนฐานแข็งแรง และความเร็วรอบ ต่ำจนต่ำกว่า ความถี่ธรรมชาติ		
0.45					
0.28					

ความหมายของการแยกระดับความรุนแรงของการสั่น

ดี คือค่าระดับการสั่นสะเทือนอยู่ในเกณฑ์น้อยเมื่อเทียบกับขนาดของเครื่องจักร

พอลิไซ คือค่าระดับการสั่นสะเทือนไม่มากและเครื่องจักรยังสามารถทำงานได้ตามปกติ

เฝ้าระวัง คือระดับการสั่นสะเทือนเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องจักรอยู่ในเกณฑ์สูง ให้หาสาเหตุการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรว่ามาจากสาเหตุใดเพื่อที่จะเตรียมตัวทำการแก้ไข และในกรณีที่เครื่องจักรเครื่องนั้นทำงานตลอดเวลาให้เตรียมการสำหรับการหยุดตรวจสอบและซ่อมบำรุง

หยุดเพื่อตรวจสอบ คือระดับการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของเครื่องจักรสูงมาก ให้ทำการหยุดทำการตรวจสอบหาสาเหตุและทำการแก้ไขโดยด่วนเพราะไม่เช่นนั้นแล้วอาจทำให้เครื่องจักรดังกล่าวชำรุดเสียหายได้

### 2.3 ทฤษฎีการสั่นสะเทือน (Vibration Theory)

การเคลื่อนที่ไปมาของวัตถุรอบจุดสมดุลในช่วงหนึ่ง ไม่ว่าจะการเคลื่อนที่นั้นจะเกิดขึ้นในแบบซ้ำตัวเองหรือไม่ก็ตาม เราเรียกการเคลื่อนที่นี้ว่า การสั่น (Vibration) หรือการแกว่ง (Oscillation) เช่น การแกว่ง ไป-มาของชิงช้า หรือลูกตุ้มนาฬิกา การเคลื่อนที่ของลูกสูบในเครื่องยนต์ เป็นต้น การสั่นของวัตถุต่างๆ ที่เกิดขึ้น มีทั้งที่ก่อให้เกิดประโยชน์และที่ทำให้เกิดโทษ ดังนั้นการศึกษาเรื่องการสั่นทางวิศวกรรมเป็นการศึกษาเพื่อให้วิศวกรมีความเข้าใจถึงการสั่นที่เกิดขึ้นว่ามีลักษณะเฉพาะอย่างไรมีวิธีการหลีกเลี่ยงป้องกันรวมถึงการวัดและควบคุมการสั่นที่เกิดขึ้นได้อย่างไรบ้าง



โดยทั่วไปการแบ่งประเภทของการสั่นจะทำให้เราสามารถวิเคราะห์และศึกษาการสั่นทางกลได้อย่างมีระบบ ซึ่งจะแบ่งตามลักษณะการตอบสนองทางพลวัต ลักษณะเงื่อนไขเริ่มต้น แรงจากภายนอกที่กระทำต่อระบบการสั่นที่สนใจ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายประเภทดังนี้

### 2.3.1 การสั่นแบบอิสระ (Free vibration)

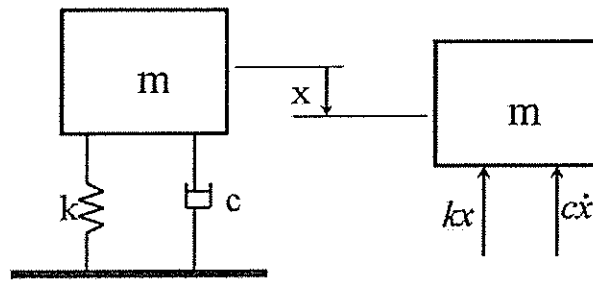
ปรากฏการณ์การสั่นสะเทือนจะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนรูปไปมาระหว่างพลังงานสำหรับระบบที่มีการสั่นสะเทือนนั้นจะมีองค์ประกอบสำคัญ คือ องค์ประกอบที่สะสมพลังงานศักย์ องค์ประกอบที่สะสมพลังงานจลน์ และองค์ประกอบที่หน่วงให้พลังงานของระบบลดลง ซึ่งการเปลี่ยนรูปไปมาของพลังงาน จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่และการเคลื่อนที่นี้จะก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนขึ้น กล่าวคือ เมื่อมีการสะสมพลังงานศักย์ขึ้นในระบบ พลังงานนี้ จะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์ ซึ่งอยู่ในลักษณะการเคลื่อนที่ของมวลในระบบ และการเคลื่อนที่นี้จะก่อให้เกิดการสะสมพลังงานศักย์ขึ้นอีกเป็นเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ ส่วนองค์ประกอบที่หน่วงพลังงาน ของระบบนั้น ก็จะเปลี่ยนพลังงานศักย์และพลังงานจลน์ของระบบให้อยู่ในรูปอื่น เช่น เสียง หรือความร้อน เป็นต้น จนในที่สุดพลังงานของระบบหมดไป นอกเสียจากว่ามีสิ่งใดสิ่งหนึ่งมากระทำ หรือกระตุ้นให้การสั่นสะเทือนยังคงมีอยู่

### 2.3.2 การสั่นแบบไม่มีความหน่วง (Undamped vibration)

เป็นการสั่นที่ไม่มีการสูญเสียพลังงานให้กับสิ่งแวดล้อมของระบบ ไม่ว่าจะอยู่ในรูปแรงเสียดทานหรือแรงด้านอื่น ๆ การสั่นแบบไม่มีความหน่วงในความเป็นจริงจะเกิดขึ้นได้ในเฉพาะอวกาศเท่านั้น เพราะวัตถุที่เกิดการเคลื่อนที่โดยทั่วไปจะเกิดการสูญเสียพลังงาน เช่น แรงเสียดทานกับอากาศ เป็นต้น สำหรับระบบที่เกิดการสั่นแบบอิสระและไม่มีความหน่วง จะได้ความถี่ของการสั่นของระบบคือ ความถี่ธรรมชาติ

### 2.3.3 การสั่นแบบมีความหน่วง (Damped vibration)

เป็นการสั่นที่เกิดการสูญเสียพลังงานในระหว่างเกิดการเคลื่อนที่ของระบบ ซึ่งจะทำให้พลังงานรวมของระบบมีค่าลดลง โดยทั่วไปแล้วการสั่นตามสภาพความเป็นจริงนั้นจะเป็นการสั่นแบบมีความหน่วงโดยทั้งสิ้น สำหรับระบบที่มีการสั่นแบบอิสระและมีความหน่วง เราจะได้ความถี่ของการสั่นของระบบคือ ความถี่หน่วงธรรมชาติ (Damped natural frequency) ดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 แบบจำลองของระบบเชิงกลที่มีการสั่นสะเทือน

จากรูปที่ 2.20 สามารถเขียนเป็นสมการเคลื่อนที่ (Equation of Motion) ได้

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (2.5)$$

ความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency,  $\omega_n$ ) ของระบบที่มีการสั่นอิสระ มีค่า

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.6)$$

และนิยามให้ อัตราส่วนความหน่วง (Damping Ratio,  $\zeta$ ) เป็น

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{mk}} = \frac{c}{c_c} \quad (2.7)$$

สมการการเคลื่อนที่ที่มีผลเฉลยของสมการในรูป  $x(t) = Ce^{st}$  ดังนั้นสมการที่ (2.1) สามารถเขียนใหม่ได้ คือ

$$(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)Ce^{st} = 0 \quad (2.8)$$

ดังนั้นผลเฉลยของสมการการเคลื่อนที่ จะอยู่ในรูป

$$x(t) = C_1 e^{(-\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n t} + C_2 e^{(-\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n t} \quad (2.9)$$

ลักษณะการสั่นของระบบจะขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วนความหน่วงหรือเรียกว่าอีกอย่างหนึ่งว่า อัตราส่วนความหน่วง( $\zeta$ ) โดยจะแบ่งการสั่นออกได้เป็น 3 แบบดังนี้

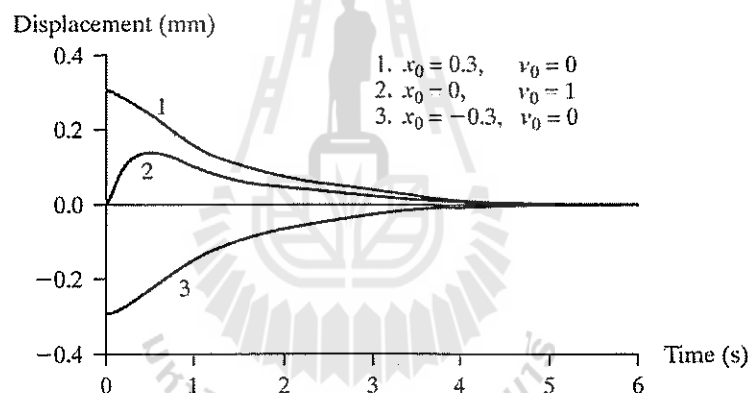
1. ความหน่วงมากเกินไป (Overdamped motion) คือระบบภายใต้สภาวะหน่วงเกินนี้จะไม่มีการสั่นไปมาเมื่อระบบนั้นมีการขจัดออกจากตำแหน่งสมดุล และเมื่อเวลาผ่านไปนานมาก ๆ (ระยะเวลาอนันต์) ระบบจะกลับมาสู่ตำแหน่งสมดุลนั้น ซึ่งในกรณีนี้จะพิจารณาภายใต้เงื่อนไข  $\zeta > 1$  หรือ  $\frac{C^2}{4m^2} > \frac{k}{m}$  จะได้สมการดังนี้

$$x(t) = C_1 e^{(-\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n t} + C_2 e^{(-\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n t} \quad (2.10)$$

หรือ

$$x(t) = e^{-\zeta\omega_n t} (C_1 e^{-\omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1}t} + C_2 e^{+\omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1}t}) \quad (2.11)$$

เมื่อกำหนดให้ค่าของ  $C_1$  และ  $C_2$  เป็นค่าเริ่มต้นของระบบ โดยมีการสั่นดังแสดงในรูปที่ 2.21

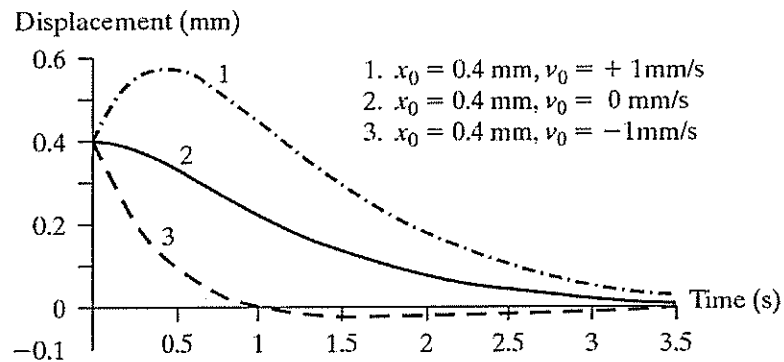


รูปที่ 2.21 การสั่นแบบหน่วงเกิน

2. ความหน่วงวิกฤต (Critical damped motion) คือระบบที่ไม่มีการสั่นไปมาเมื่อระบบมีการขจัดออกจากตำแหน่งสมดุลระบบจะกลับสู่ตำแหน่งสมดุลนั้นในช่วงเวลาสั้นที่สุด ซึ่งในกรณีนี้จะพิจารณาภายใต้เงื่อนไข  $\zeta = 1$  หรือ  $\frac{C^2}{4m^2} = \frac{k}{m}$  ซึ่งจะได้สมการในการสั่นของระบบดังนี้

$$x(t) = (C_1 + C_2 t)e^{-\omega_n t} \quad (2.12)$$

เมื่อกำหนดให้ค่าของ  $C_1$  และ  $C_2$  เป็นค่าเริ่มต้นของระบบ โดยมีการสั่นดังแสดงในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 การสั่นแบบหน่วงวิกฤต

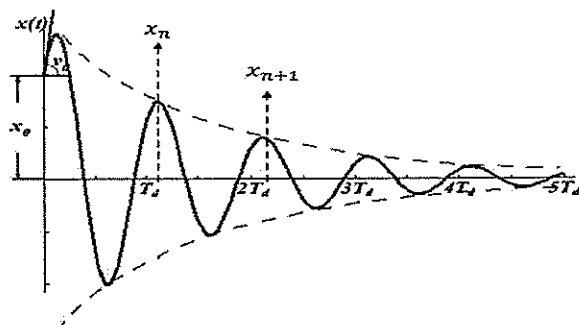
3. ความหน่วงต่ำกว่าปกติ (Underdamped Motion) คือการสั่นไปมาของระบบที่มีการหน่วงรอบตำแหน่งสมดุลสถิตโดยแอมพลิจูดของการสั่นจะลดลงกับเวลาและเป็นศูนย์ในที่สุด ซึ่งในกรณีนี้จะพิจารณาภายใต้เงื่อนไข  $0 < \zeta < 1$  หรือ  $\frac{C^2}{4m^2} = \frac{k}{m}$  ซึ่งจะได้สมการในการสั่นของระบบดังนี้

$$x(t) = C_1 e^{(-\zeta + i\sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n t} + C_2 e^{(-\zeta - i\sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n t} \quad (2.13)$$

หรือ

$$x(t) = X e^{-\zeta \omega_n t} \sin(\omega_d t + \phi) \quad (2.14)$$

เมื่อกำหนดให้ค่าของ  $C_1$  และ  $C_2$  เป็นค่าเริ่มต้นของระบบ โดยมีการสั่นดังแสดงในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 ความหน่วงต่ำกว่าปกติ

จากรูปที่ 2.23 เมื่อระบบมีการเคลื่อนที่แบบมีความหน่วงเหมาะสม โดยที่ค่าของ  $0 < \zeta < 1$  ซึ่งความถี่ของการสั่นจะเป็นความถี่ของการสั่นหน่วง (Frequency of Damped Oscillation) ซึ่งจะได้สมการในการหาค่าความถี่ได้ดังนี้

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (2.15)$$

ค่าคงที่ความหน่วงหรืออัตราส่วนความหน่วงของตัวหน่วงในระบบที่มีการสั่นไปมาแบบอิสระที่มีการหน่วงต่ำ อัตราการลดลงของแอมพลิจูดของการสั่นจะพิจารณาในพจน์ของการลดลงแบบลอการิทึม (logarithmic decrement,  $\delta$ ) ซึ่งการลดทอนแบบลอการิทึมหมายถึง ลอการิทึมธรรมชาติของอัตราส่วนระหว่างแอมพลิจูดสองค่าที่มีรอบต่อเนื่องกัน ซึ่งการตอบสนองการสั่นแบบอิสระดังแสดงในรูปที่ 2.22 ในทางปฏิบัติการวัดขนาดของการขจัดที่เกิดจากการตอบสนองของการสั่นอิสระสำหรับระบบที่มีลำดับชั้นความอิสระเท่ากับหนึ่งและมีความหน่วงแบบหนืด เพื่อหาอัตราส่วนความหน่วงนั้นทำได้ยาก ดังนั้นเราอาจจะพิจารณาสัดส่วนการสั่นได้ดังนี้

$$\delta = \frac{1}{n} \ln\left(\frac{x_n}{x_{n+1}}\right) \quad (2.16)$$

จากสมการที่ 2.15 สามารถหาค่าของอัตราส่วนความหน่วง( $\zeta$ ) ได้ดังนี้

$$\zeta = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi}{\delta}\right)^2}} \quad (2.17)$$

ถ้าอัตราส่วนของความหน่วงมีค่าน้อย ค่าลดลงอย่างลอการิทึมก็จะมีค่านี้น้อยเช่นกัน ดังนั้นสามารถประมาณค่าอัตราส่วนของความหน่วงในกรณีที่มีค่าน้อยได้ดังนี้

$$\zeta \approx \frac{\delta}{2\pi} \quad (2.18)$$

จากรูปที่ 2.22 การสั่นของระบบแบบมีความหน่วงสามารถหได้จากสมการดังต่อไปนี้

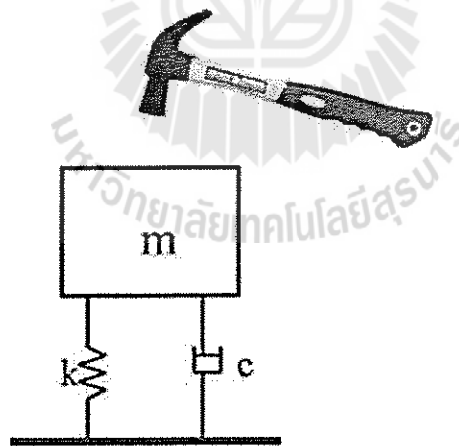
$$\omega_d = \frac{2\pi}{T} \quad (2.19)$$

จากสมการที่ 2.17 และ 2.18 จะสามารถหาค่าความถี่ธรรมชาติได้ดังนี้

$$\omega_n = \frac{\omega_d}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (2.20)$$

#### 2.3.4 การสั่นสะเทือนแบบบังคับ

ระบบที่มีการสั่นสะเทือน โดยทั่วไปจะมีแรงกระทำ แรงเหล่านี้มักจะเป็นฟังก์ชันกับเวลา ซึ่งอาจจะอยู่ในระบบต่าง ๆ เช่น แรงกระแทก (Impact) แรงแบบสุ่ม (Random) หรือ แรงแบบฮาร์โมนิก เป็นต้น สำหรับแรงแบบฮาร์โมนิกนี้ถือว่าเป็นแรงพลวัตที่พบเห็นได้มาก ซึ่งมักจะพบ ลักษณะนี้ในเครื่องจักร หรือกลไกที่มีการหมุน โดยปกติแล้ว การตอบสนองของระบบ จะประกอบไปด้วย สองส่วน คือ การตอบสนองชั่วคราว (Transient Response) และการตอบสนองในสภาวะคงตัว (Steady-State Response) ซึ่งจะคง อยู่ตลอดเท่าที่มีแรงกระทำ เนื่องจากการตอบสนองชั่วคราวจะหายไปเมื่อเวลาผ่านไปพอสมควร การตอบสนองจะคงอยู่เพียงการตอบสนองในสภาวะคงตัวของระบบดังแสดงในรูปที่ 2.24 ซึ่งจะได้สการ 2.20 โดยสามารถจำแนกแรงที่กระทำได้ดังนี้

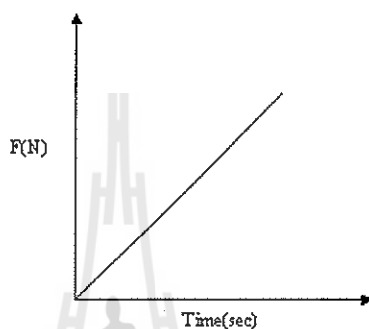


รูปที่ 2.24 แบบจำลองของระบบที่มีการสั่นอันเนื่องมาจากแรงกระทำภายนอกในระบบ

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t) \quad (2.21)$$

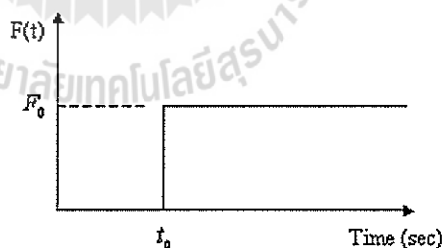
แรงที่กระทำต่อระบบ สามารถจำแนกได้หลายแบบ แรงดล (Impulse force) ซึ่งเป็นแรงที่กระทำต่อการหมุนของหุ่นยนต์อัตโนมัติ ตัวอย่างของแรงที่กระทำให้เกิดการสั่น

- **แรงแบบความชัน (Ramp Force)** คือการเปลี่ยนแปลงของแรงที่กระทำต่อเวลาจากรูปที่ 2.25 ขนาดของแรงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้น



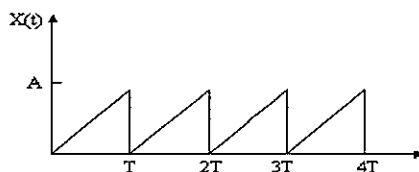
รูปที่ 2.25 แรงกระทำแบบความชัน

- **แรงแบบขั้นบันได (Step force)** คือขนาดของแรงมีการเปลี่ยนไปแบบขั้นบันไดจากรูปที่ 2.26 จะเห็นได้ว่าขนาดของแรงกระทำเริ่มต้นมีค่าเป็น 0 เมื่อถึงเวลา  $t_0$  ขนาดของแรงมีค่าเป็น  $F_0$



รูปที่ 2.26 แรงกระทำแบบขั้นบันได

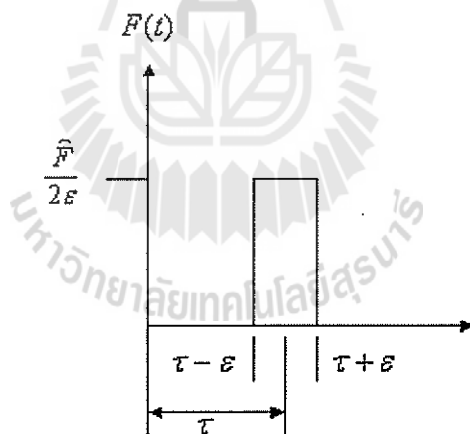
- **แรงแบบคาบ (Periodic force)** คือลักษณะของแรงกระทำที่เป็นแบบคาบของเวลาจากรูปที่ 2.27 ขนาดของแรงที่กระทำจะเป็นลูกคลื่นที่เท่ากันสม่ำเสมอ และช่วงของ คาบเวลาจะมีขนาดที่เท่ากันด้วย



รูปที่ 2.27 แรงกระทำแบบคาบเวลา

• **แรงดล (Impulse force)** คือแรงที่มากระทำต่อวัตถุในช่วงเวลาสั้นๆ หรืออัตรา การเปลี่ยนแปลง โมเมนตัมที่เปลี่ยนไปในช่วงหนึ่งหน่วยเวลา ( $\Delta t$ ) แรงดลมีหน่วยเป็นนิวตัน ( $N$ ) การ ดลและแรงดล เป็นปริมาณเวกเตอร์ จึงต้องมีการกำหนดเครื่องหมายบวกลบ โดยมีหลักการดังนี้

- ทิศทางของความเร็วต้น มีเครื่องหมายเป็นบวกเสมอ
- ทิศทางของความเร็วปลาย ถ้ามีทิศทางเดียวกับความเร็วต้นเป็นบวก ตรงข้ามเป็นลบ
- ถ้าผลลัพธ์เป็นบวก มีทิศทางเดียวกับความเร็วต้น ถ้าเป็นลบมีทิศตรงกันข้าม
- $\Delta t$  เป็นปริมาณสเกลาร์ เป็นบวกเสมอ



รูปที่ 2.28 แรงดล

เมื่อพิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแรงดล ดังแสดงในรูปที่ 2.25 แรงดลมี ลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยม ในแนวตั้งมีขนาดความสูงมากและด้านกว้างมีขนาดเล็กมาก ซึ่งสามารถเขียน สมการอธิบายแรงดลได้



$$F(t) = \begin{cases} 0 & t < \tau - \varepsilon \\ \frac{\hat{F}}{2\varepsilon} & \tau - \varepsilon < t < \tau + \varepsilon \\ 0 & t > \tau + \varepsilon \end{cases} \quad (2.22)$$

โดยที่  $\varepsilon$  ค่าบวกที่มีค่าน้อยๆ แรงคลเขียนสมการได้ดังรูปของการอินทิเกรท  $I(\varepsilon)$  ได้

$$I(\varepsilon) = \int_{\tau - \varepsilon}^{\tau + \varepsilon} F(t) dt \quad (2.23)$$

ขณะที่แรง  $F(t)$  มีค่าเท่ากับศูนย์ นอกช่วงเวลา  $\tau + \varepsilon$  ถึง  $\tau - \varepsilon$  ดังนั้นเราสามารถขยายเวลาในช่วงอินทิเกรทได้

$$I(\varepsilon) = \int_{-\infty}^{\infty} F(t) dt = \frac{\hat{F}}{2\varepsilon} 2\varepsilon = \hat{F} \quad (2.24)$$

ลิมิตของ  $\varepsilon \rightarrow 0$  (แต่  $\varepsilon \neq 0$ ) ซึ่งอินทิเกรทได้ค่า  $I(\varepsilon) = \hat{F}$  เมื่อใช้ฟังก์ชันการคล (Impulse function) กับสองคุณสมบัติ

$$F(t - \tau) = 0 \quad t \neq \tau \quad (2.25)$$

และ

$$\int_{-\infty}^{\infty} F(t - \tau) dt = \hat{F} \quad (2.26)$$

ถ้าขนาดของแรง  $\hat{F}$  มีค่าเท่ากับหนึ่ง เราจะเรียกฟังก์ชันคลหนึ่งหน่วย (Unit impulse function,  $\delta(t)$ ) หรือเรียกว่า Dirac delta function การตอบสนองของระบบที่มีลำดับชั้นความอิสระเท่ากับหนึ่งและมีความหน่วงต่อแรงคล ขณะที่ระบบหยุดนิ่ง (เงื่อนไขเริ่มต้นเท่ากับศูนย์) โดยพิจารณาแรงคลต่อการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม ที่  $\tau = 0$  จะพิจารณามวลก่อนที่จะมีแรงคลมากระทำ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมขณะแรงคลกระทำ

$$m[v(t_0^+) - v(t_0^-)] = mv_0 \quad (2.27)$$

จะได้

$$\hat{F} = F\Delta t = mv_0 \quad (2.28)$$

ขณะที่มีการจัดตั้งเท่ากับศูนย์ ด้วยเหตุนี้แรงคลที่กระทำต่อระบบที่มีลำดับชั้นความอิสระเท่ากับหนึ่ง และความหน่วง จะเท่ากับความเร็วต้นแก่ระบบคือ

$$v_0 = \frac{F\Delta t}{m} \quad (2.29)$$

การตอบสนองของระบบจึงเป็นการสั่นที่มีการระจัดเท่ากับศูนย์และความเร็วต้น  $v_0 = F\Delta t/m$  สำหรับระบบความหน่วงต่ำ ( $0 < \zeta < 1$ ) เราจะได้ผลเฉลย คือ

$$x(t) = \frac{\hat{F}}{m\omega_d} e^{-\zeta\omega_n t} \sin \omega_d t \quad (2.30)$$

นอกจากนี้การตอบสนองต่อแรงที่มีลักษณะเป็นคาบสามารถประยุกต์ใช้วิธีการตอบสนองของแรงคล โดยการแบ่งแรงที่กระทำแรงที่กระทำออกเป็นแรงคลย่อย ๆ แล้วคำนวณหาแรงคลนั้น

## 2.4 ระบบนิวแมติกส์

ระบบนิวแมติกส์เป็นระบบที่อาศัยแรงดันลมขับเคลื่อนเคลื่อนเครื่องจักรให้ทำงาน ซึ่ง ส่วนประกอบในการทำงานของระบบนิวแมติกส์จะประกอบไปด้วย ชุดต้นกำลังซึ่งทำหน้าที่ส่งลมอัดให้กับอุปกรณ์ทั้งหมด อุปกรณ์ให้สัญญาณ อุปกรณ์ควบคุม และอุปกรณ์ทำงาน การที่อุปกรณ์ทำงาน เช่น กระบอกลูกสูบ จะเคลื่อนที่เข้าออกได้ตามความต้องการก็ต้องอาศัยอุปกรณ์ให้สัญญาณและอุปกรณ์ควบคุม ซึ่งได้แก่วาล์วต่างๆ นั่นเอง วาล์วมีอยู่หลายชนิดด้วยกันแต่ละชนิดก็มีหน้าที่แตกต่างกันออกไป เช่น ควบคุมการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ทำงาน ควบคุมปริมาณการไหลของลมอัด ควบคุมความดันที่ใช้ควบคุมการเริ่มและหยุดการทำงานของวงจรนิวแมติกส์ เป็นต้น วาล์วในระบบนิวแมติกส์สามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ประเภทด้วยกันตามลักษณะหน้าที่และการใช้งาน

- วาล์วควบคุมทิศทาง (Directional Control Valve)
- วาล์วชนิดลมไหลทางเดียว (Non-return Valve)

- วาล์วควบคุมความดัน (Pressure control Valve)
- วาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow control Valve)
- วาล์วเปิด-ปิดและวาล์วผสม (Shut-off Valve and Valve combination)

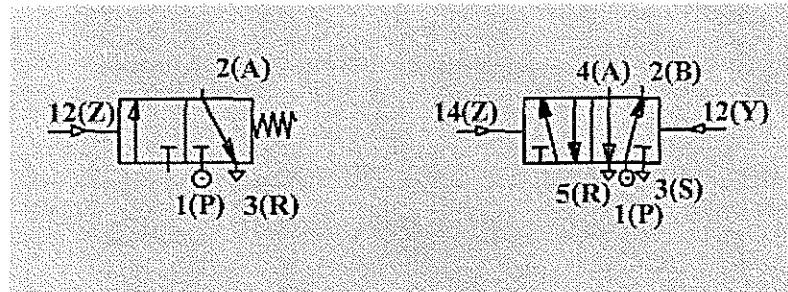
#### 2.4.1 สัญลักษณ์และการเรียกชื่อวาล์ว

ในงานอุตสาหกรรมนิยมใช้สัญลักษณ์เพื่อความสะดวกรวดเร็วและง่ายต่อการทำความเข้าใจ การทำงานของเครื่องจักรที่ใช้ระบบนิวแมติกส์ก็เช่นเดียวกันมีสัญลักษณ์ที่ใช้อยู่หลายระบบด้วยกัน เช่น ASA (American Standard Association) ISO (International Standard Organization) JIS (Japanese Industry Standard) JIC (Joint Industry Conference) DIN (Deutsche Industry Norm) ซึ่งแต่ละระบบจะมีความแตกต่างกันไม่มากนัก หากเข้าใจถึงสัญลักษณ์ของระบบใดระบบหนึ่งแล้วในระบบอื่นก็สามารถทำได้ไม่ยากนัก ตำแหน่งการทำงานของวาล์ว จะใช้ สัญลักษณ์ที่ใช้แทนตำแหน่งการทำงานของวาล์วจะแทนด้วยรูปสี่เหลี่ยมดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.3 สัญลักษณ์ที่ใช้แทนตำแหน่งการทำงานของวาล์ว

สัญลักษณ์	ความหมาย
	วาล์ว 1 ตำแหน่ง
	วาล์ว 2 ตำแหน่ง
	วาล์ว 3 ตำแหน่ง
	วาล์ว 4 ตำแหน่ง

การเขียนสัญลักษณ์ จะใช้รูปสี่เหลี่ยมหนึ่งรูปแทนตำแหน่งของวาล์ว 1 ตำแหน่ง ถ้า วาล์วควบคุมมีตำแหน่งการทำงานหลายตำแหน่งก็จะมีรูปสี่เหลี่ยมหลายรูปต่อกัน เช่น วาล์วควบคุม 2 ตำแหน่งดังแสดงในรูปที่ 2.29 ก็จะมีรูปสี่เหลี่ยม 2 รูปติดต่อกัน ในลักษณะสี่เหลี่ยมที่แสดงตำแหน่งของวาล์วนี้จะประกอบด้วยตำแหน่งปกติ หรือตำแหน่งที่วาล์วยังไม่ถูกเลื่อนและตำแหน่งการทำงานของวาล์ว ซึ่ง สามารถแสดงให้เห็นด้วยตัวเลขที่กำหนดภายในช่องสี่เหลี่ยม โดยเลข 0 หมายถึงตำแหน่งปกติ หมายเลขอื่น หมายถึงตำแหน่งทำงาน ซึ่งอาจเป็นตำแหน่งที่ 1,2 หรือ 3 เรียงลำดับกันไปแล้วแต่ วาล์วจะมีกี่ตำแหน่ง



รูปที่ 2.29 สัญลักษณ์ที่ใช้แทนตำแหน่งการทำงานของวาล์ว

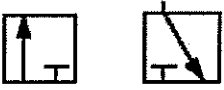
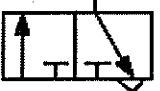
ทางต่อลมของวาล์วควบคุมทิศทางในระบบนิวแมติกส์จะมีการกำหนดรหัสทางต่อลม เพื่อให้เกิดความสะดวก และเข้าใจตรงกันในการออกแบบ และต่อวงจร การกำหนดรหัสทางต่อลมของ วาล์วควบคุมทิศทางโดยทั่วๆ ไปสามารถกระทำได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.4 การกำหนดรหัสทางต่อลมของวาล์วควบคุมทิศทาง

ตัวเลข	ตัวอักษร	ตัวอักษรต่อ	หน้าที่
1	P	Sub	รูระบายลมอัดเข้าวาล์ว
2,4	A,B	Out	รูต่อลมอัดไปใช้งาน
3,5	R,S	Ex	รูระบายลมทิ้ง
12,14	X,Y,Z	Signal in	รูต่อเข้าวาล์วควบคุมเพื่อผลในการบังคับให้วาล์วทำงาน

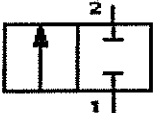
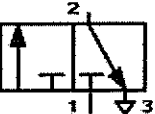
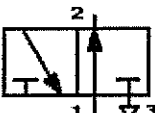
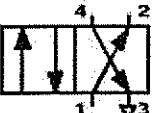
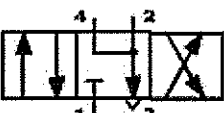
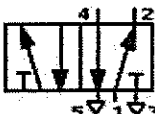
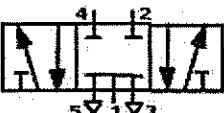
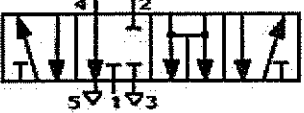
การอ่านสัญลักษณ์ของวาล์วควบคุมทิศทาง วาล์วแต่ตัวจะมีสัญลักษณ์ติดไว้ที่ตัว วาล์ว เพื่อบอกหน้าที่และการทำงานของวาล์ว ตารางข้างล่างนี้ เป็นตารางที่แสดงสัญลักษณ์ของวาล์วไฮดรอลิก

ตารางที่ 2.5 สัญลักษณ์ของวาล์ว

สัญลักษณ์	ความหมาย
	ทิศทางหัวลูกศรจะหมายถึง ท่อทางภายในวาล์วซึ่งจะทำให้ ลมผ่านตลอดตามทิศทางหัวลูกศร
	ท่อทางของวาล์วที่ถูกปิดกั้นไม่ให้ลมผ่านไป
	ท่อลมของวาล์วต่อถึงกันแสดงด้วยจุดต่อจุดใหญ่
	สัญลักษณ์ N แสดงว่าการระบายลมอัดภายในตัวของวาล์ว เอง
	สัญลักษณ์รูป N แสดงว่าการระบายลมอัดสามารถต่อท่อหรือ ติดตัวเก็บเสียงได้
	สัญลักษณ์รูป N แสดงว่าการระบายลมอัดสามารถต่อท่อหรือ ติดตัวเก็บเสียงได้
	สัญลักษณ์ คือแหล่งจ่ายลมที่ต่อเข้ากับวาล์วควบคุม

การเรียกชื่อวาล์วควบคุมทิศทางในระบบนิวแมติกส์จึงเรียกชื่อ โดยเรียกทางต่อลมก่อนแล้ว  
ตามด้วยตำแหน่งการทำงานดังจะกล่าวต่อไปนี้

ตารางที่ 2.6 การกำหนดแสดงทิศทาง


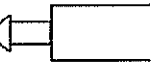


สัญลักษณ์	ความหมาย
	วาล์วควบคุม 2 ทาง 2 ตำแหน่งปกติปิด (2/2 D.C. Valve Normally Closed)
	วาล์วควบคุม 2 ทาง 2 ตำแหน่ง ปกติเปิด (2/2 D.C. Valve Normally Opened)
	วาล์วควบคุม 3 ทาง 2 ตำแหน่ง ปกติปิด (3/2 D.C. Valve Normally Closed)
	วาล์วควบคุม 4 ทาง 2 ตำแหน่ง ปกติเปิด (3/2 D.C. Valve)
	วาล์วควบคุม 4 ทาง 3 ตำแหน่ง (4/2 D.C. Valve Closed Center) สำหรับตำแหน่งกลางนี้มีอยู่หลายแบบแล้วแต่ลักษณะของการนำไปใช้งาน
	วาล์วควบคุม 5 ทาง 2 ตำแหน่ง (5/2 D.C. Valve)
	วาล์วควบคุม 5 ทาง 3 ตำแหน่ง (5/3 D.C. Valve)
	วาล์วควบคุม 5 ทาง 4 ตำแหน่ง (5/4 D.C. Valve)

#### 2.4.2 การเลื่อนวาล์วควบคุม

การเลื่อนให้วาล์วควบคุมเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่นั้นสามารถทำได้หลายลักษณะ ขึ้นอยู่กับลักษณะของวงจรที่ออกแบบ เพื่อใช้ในงานที่แตกต่างกันออกไป โดยที่ลักษณะของการเลื่อนวาล์วควบคุมทิศทางแบ่งออกได้เป็น 5 ประเภทด้วยกันดังต่อไปนี้


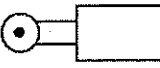
- การเลื่อนวาล์วควบคุมโดยใช้กล้ามเนื้อ คือ การควบคุมวาล์วที่ต้องอาศัยแรงกระทำต่อวาล์วเพื่อให้วาล์วสามารถ เปิด-ปิด ได้ เช่น การใช้มือกด ใช้เท้าเหยียบ เป็นต้น

ตารางที่ 2.7 การเลื่อนวาล์วควบคุมโดยใช้กล้ามเนื้อ

สัญลักษณ์	ความหมาย
	ใช้กล้ามเนื้อในการเลื่อน (สัญลักษณ์ทั่วไป)
	ใช้มือกด
	ใช้เท้าเหยียบ
	ใช้มือตึง ดัน มีตัวล็อคตำแหน่ง

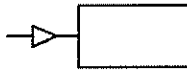
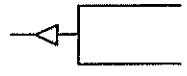

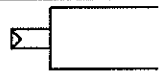
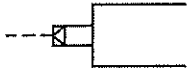
- การเลื่อนวาล์วควบคุมโดยใช้กลไก คือการควบคุมวาล์วโดยอาศัยกลไก ช่วยในการเปิด-ปิดเช่น ใช้แรงดันสปริงกด หรือ ใช้ก้านลูกสูบกดเปิด-ปิดวาล์ว เป็นต้น

ตารางที่ 2.8 การเลื่อนวาล์วควบคุมโดยใช้กลไก

สัญลักษณ์	ความหมาย
	ใช้สปริงดันให้อยู่ตำแหน่งปกติ
	ใช้กลไกภายนอกกดทำงานสองทิศทาง เช่น ใช้ก้านลูกสูบกด

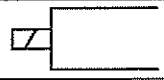
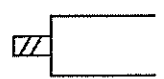

- การเลื่อนวาล์วควบคุมโดยใช้ลมควบคุม คือ การควบคุมวาล์วโดยอาศัยแรงดันลม ในการเปิด-ปิดวาล์ว ซึ่งมีสัญลักษณ์ดังนี้

ตารางที่ 2.9 การเลื่อนวาล์วควบคุมโดยใช้ลมควบคุม

สัญลักษณ์	ความหมาย
	ใช้สัญญาณลมดันให้วาล์วเลื่อนไป และเลื่อนกลับ
	ใช้สัญญาณลมระบายทิ้งให้วาล์วเลื่อนไป และเลื่อนกลับ
	ใช้สัญญาณลมดันให้วาล์วเลื่อน โดยใช้ความแตกต่างของพื้นที่หน้าตัดของวาล์ว
	ใช้สัญญาณลมควบคุมทางอ้อม คือใช้ลมไปดันวาล์วให้ผ่านลิ้นช่วย (Pilot Valve) ที่อยู่ภายในตัววาล์ว ไปดันเมนวาล์วให้เคลื่อนที่
	แบบระบายลมออกสู่บรรยากาศ

• การเลื่อนวาล์วควบคุมโดยใช้ไฟฟ้า คือ การควบคุมวาล์วโดยใช้แรงดันไฟฟ้าจ่ายไฟให้ขดลวดที่พันรอบแกนเหล็ก ซึ่งจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กเมื่อไปผลัดดันแกนเหล็กเลื่อนเข้า หรือเลื่อนออกให้ไปดันวาล์ว เปิด-ปิด ได้

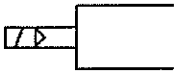
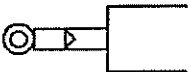

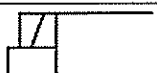
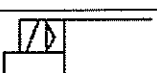
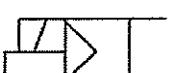
ตารางที่ 2.10 การเลื่อนวาล์วควบคุมโดยใช้ไฟฟ้า

สัญลักษณ์	ความหมาย
	ใช้โซลินอยด์จำนวน 1 ชุด ทำให้วาล์วเลื่อน
	ใช้โซลินอยด์จำนวนมากกว่า 1 ชุด ทำงานทิศทางเดียวกันเพื่อให้วาล์วเลื่อน
	ใช้โซลินอยด์จำนวนมากกว่า 1 ชุด ทำงานทิศทางตรงข้ามกัน เพื่อให้วาล์วเลื่อน

• การเลื่อนวาล์วควบคุมโดยใช้วิธีแบบผสม คือการควบคุมวาล์วที่ๆ ใช้ แรงดันลมแรงดันไฟฟ้า ในการเปิด-ปิด วาล์ว



ตารางที่ 2.11 การเลื่อนวาล์วควบคุมโดยใช้วิธีแบบผสม

สัญลักษณ์	ความหมาย
	ใช้โซลินอยด์เปิดทางลม และลมเป็นตัวเลื่อนวาล์ว
	ใช้ลูกกลิ้งไปเปิดทางลมให้เป็นตัวเลื่อนวาล์ว
	ใช้โซลินอยด์ หรือแรงดันลมอย่างใดอย่างหนึ่ง ในการเลื่อนวาล์ว
	ใช้โซลินอยด์ หรือมือกดในการเลื่อนวาล์ว
	ใช้โซลินอยด์เปิดทางลมให้ลม ไปเลื่อนวาล์ว
	ใช้โซลินอยด์เปิดทางลม หรือใช้มือกดไปเปิดทางลมเพื่อให้ลม ไปเลื่อนวาล์ว

### 2.4.3 การกำหนดหรือให้อุปกรณ์หรือวิธีแสดงขั้นตอนการทำงานในวงจรมีเมติกส์

การกำหนดหรือให้รหัสอุปกรณ์หรือวิธีแสดงขั้นตอนการทำงานในวงจรมีเมติกส์ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธีดังนี้

#### 1. การเขียนรหัสอุปกรณ์โดยใช้ตัวเลขมี 2 วิธีคือ

- การเรียงลำดับตัวเลข ไม่มีการแยกกลุ่มการทำงานโดยจะนับจากแถวล่างขึ้นไปซึ่งเป็นอุปกรณ์ให้สัญญาณจนถึงอุปกรณ์ทำงาน โดยเริ่มตั้งแต่อุปกรณ์ให้สัญญาณจะเป็น 0.1 0.2 อุปกรณ์ควบคุม การทำงานเริ่มจาก 1.1 จากซ้ายไปขวา จากล่างขึ้นบนจนครบทุกตัว ทำให้ยุ่งยากถ้าวงจรมีกระบอกสูบจำนวนมาก เพราะไม่ทราบว่าแต่ละตัวทำหน้าที่อะไร จึงไม่นิยมใช้

- การแบ่งเป็นกลุ่มตัวเลขเรียงตามลำดับ การวางอุปกรณ์ในวงจรมีเมติกส์จะวางเป็นแถวมีแถวหลักอยู่ 4 แถว และมีอุปกรณ์ช่วย 1 แถว เรียงตามลำดับจากบนลง

#### 2. การเขียนรหัสอุปกรณ์โดยใช้ตัวอักษร

การใช้ตัวอักษรภาษาอังกฤษแทนอุปกรณ์ในวงจรมีเมติกส์ที่กระบอกสูบทำงานเป็นระบบ และอุปกรณ์สัญญาณ ไม่แบ่งเป็นกลุ่มตามสัญญาณบังคับกระบอกสูบ โดยใช้ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์

ใหญ่แทน อุปกรณ์การทำงาน คือกระบอกสูบ มอเตอร์ลมการแสดงขั้นตอนการทำงานของกระบอกสูบต่างๆโดยใช้ตัวอักษรภาษาอังกฤษผสมกับเครื่องหมาย + และ - มีหลักเกณฑ์ดังนี้

อักษรตัวพิมพ์ใหญ่ หมายถึง อุปกรณ์การทำงาน เช่น กระบอกสูบใดทำงานก่อนจะได้รับตัวอักษรก่อน เช่น กระบอกสูบ A,B,C ตามลำดับ

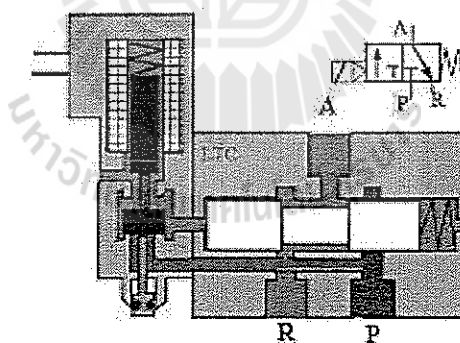
เครื่องหมาย + หมายถึง ลูกสูบเคลื่อนที่ออก เช่น A+ B+

เครื่องหมาย - หมายถึง ลูกสูบเคลื่อนที่เข้า เช่น A+ B-

#### 2.4.4 โซลินอยด์วาล์ว (Solenoid valve)

คืออุปกรณ์สวิตช์ที่อาศัย หลักการทำงานของแม่เหล็กไฟฟ้าทำงานร่วมกับกลไก โดยใช้การป้อนไฟเป็นตัวกำหนดเงื่อนไขในการทำงานควบคุมให้ลิ้นกลไกปิดหรือเปิดได้ อุปกรณ์ที่ใช้โซลินอยด์วาล์วควบคุม ได้แก่ วาล์วน้ำ เบรก และคลัตช์ เป็นต้น ประเภทของโซลินอยด์วาล์วลมที่ใช้กันทั่วไป โซลินอยด์วาล์วสามารถจำแนกได้หลายแบบดังนี้

- วาล์วควบคุม 3 ทิศทาง 2 ตำแหน่ง ปกติปิดเลื่อนวาล์วโดยโซลินอยด์และลมดันช่วย วาล์วเลื่อนกลับโดยสปริงดังแสดงในรูปที่ 2.30

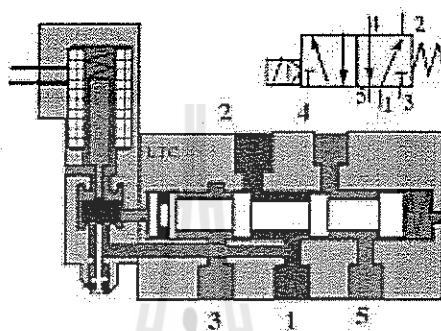


รูปที่ 2.30 แสดง โซลินอยด์วาล์วควบคุม 3 ทิศทาง 2 ตำแหน่ง

ปกติ สปริงจะดันให้วาล์วไหลปิด สปริงจะดันให้ลูกสูบเลื่อนไปทางซ้ายมือ สมจากช่อง P ไม่สามารถผ่านไปยังช่อง A ได้ ช่อง A จะต่อกับช่อง R เมื่อป้อนไฟให้โซลินอยด์แกนจะถูกดึงให้เปิด วาล์วไหล วาล์วไหลจะเปิดให้ลมไปดันลูกสูบให้เลื่อนไปด้านขวามือ เปิดให้ลมผ่านจากช่อง P ไป

ยังช่อง A เมื่อตัดไฟออกจากโซลินอยด์ อำนาจแม่เหล็กของโซลินอยด์หมดไป สปริงจะดันให้แกนเลื่อนลงดันให้วาล์วไหลปิด สปริงจะดันให้ลูกสูบกลับตำแหน่งปกติ

- วาล์วควบคุม 5 ทิศทาง 2 ตำแหน่ง เลื่อนวาล์วโดยโซลินอยด์และลมดันช่วยวาล์วเลื่อนกลับโดยสปริงดังแสดงในรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.31 โซลินอยด์วาล์วควบคุม 5 ทิศทาง 2 ตำแหน่ง

ปกติ ลมจากช่อง 1 ต่อไปยังช่อง 2 ลมจากช่อง 4 ต่อไปยังช่อง 3 ส่วนช่อง 3 อุดตัน เมื่อป้อนไฟฟ้าให้กับโซลินอยด์วาล์วไหลจะเปิดให้ลมไปดันลูกสูบให้เลื่อนไปทางขวามือ ลมจากช่อง 1 จะต่อไปยังช่อง 4 ส่วนลมจากช่อง 2 จะไหลไปยังช่อง 3 ส่วนช่อง 5 อุดตัน เมื่อตัดไฟออกจากโซลินอยด์สปริงจะดันลูกสูบกลับตำแหน่งปกติ

ในการเลือกใช้โซลินอยด์วาล์วสำหรับอุตสาหกรรมนั้น นอกจากจะระบุถึงขนาดเกลียวข้อต่อของวาล์วที่จะนำไปติดตั้งเป็นสำคัญพร้อมกับ รายละเอียดของไฟฟ้าที่ใช้ป้อนคอยล์ของวาล์ว แล้ว ยังต้องพิจารณาชนิดของวัสดุที่เป็นตัวเรือนว่าเป็นสแตน เป็นทองเหลือง หรือเป็นพลาสติก เป็นต้น โดยความเป็นจริงแล้วการเลือก โซลินอยด์วาล์วไปใช้ให้ถูกกับงานนั้นยังมีเรื่องที่ต้องพิจารณาอีก หลายอย่างทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาที่จะเกิดขึ้นภายหลังไม่ว่าจะเกิดจากการที่วาล์วทำงานบ้างไม่ทำงานบ้าง, ลื่นเปิดเปิดวาล์ว กระทบเป็นเสียงดัง, คอยล์ไหม้เป็นประจำ หรือซีลลื่นวาล์วสึกหรอ อย่างรวดเร็วทั้งที่ใช้งานได้ไม่นาน ปัญหาเหล่านี้จะทำให้เสียทั้ง เงินและเวลา

## 2.5 ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller)

ไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นอุปกรณ์ที่สามารถสร้างระบบควบคุมได้ โดยอุปกรณ์นี้มีขนาดเล็ก และเป็นอุปกรณ์ประเภทสารกึ่งตัวนำที่มีการรวมเอาฟังก์ชันการทำงานต่างๆ ไว้ในตัวมันเอง ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับคอมพิวเตอร์ ซึ่งในที่นี้หมายถึงอุปกรณ์ภายในที่ประกอบด้วย หน่วยประมวลผลกลาง, พอร์ตในการเชื่อมต่อแบบต่างๆ

### 2.5.1 ส่วนประกอบทั่วไปของไมโครคอนโทรลเลอร์

- หน่วยประมวลผลกลาง (Control Processing Unit) หน่วยประมวลผลกลาง หรือ ไมโครโพรเซสเซอร์ มีหน้าที่นำคำสั่งและข้อมูลที่เก็บไว้ใน หน่วยความจำมาแปลความหมาย และกระทำตามคำสั่งพื้นฐานของ ไมโครโพรเซสเซอร์ ซึ่งแทนด้วยรหัสเลขฐานสอง

- หน่วยความจำ (Memory Unit) เป็นที่เก็บโปรแกรมข้อมูลและผลลัพธ์ ซึ่งประกอบด้วยหน่วยความจำหลัก (Main Memory Unit) จะทำงานเชื่อมต่อกับหน่วยประมวลผลกลาง และหน่วยประมวลผลกลางสามารถใช้งานได้โดยตรง หน่วยความจำชนิดนี้จะเก็บข้อมูลและชุดคำสั่งในระหว่างการประมวลผล และหน่วยความจำรอง (Secondary Storage) ทำหน้าที่เก็บข้อมูลตามคำสั่งของผู้ใช้ ซึ่งจะมีพื้นที่หรือความจุมากกว่าหน่วยความจำหลัก ลักษณะในการเก็บข้อมูลจะเป็นแบบถาวร

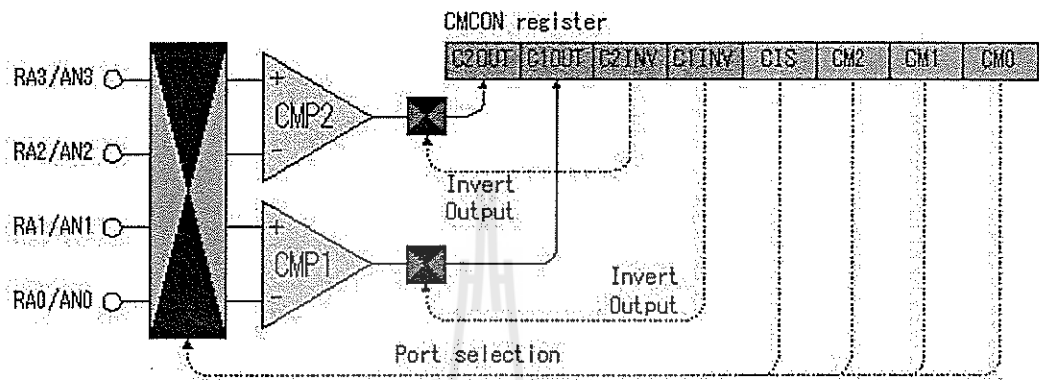
- หน่วยรับ และแสดงผลข้อมูล (Input / Output) เป็นตัวรับข้อมูลชุดคำสั่งเพื่อใช้ในการประมวลผล เช่นการติดต่อกับ จอยสติค (Joy Stick) เครื่องอ่านพิกัด (Digitizing tablet) อุปกรณ์กวาดข้อมูล (Data Scanning Devices) และสแกนเนอร์ (Scanner) เป็นต้น ในขณะที่เดียวกันก็จะทำหน้าที่ในการแสดงผลการประมวลผลคำสั่ง

- ไทเมอร์ (Timer) เป็นตัวสร้างฐานเวลา สามารถใช้กำเนิดสัญญาณอินเทอร์รัปต์เมื่อเกิดการนับค่าเกินหรือโอเวอร์โฟลว (Overflow) นอกจากนี้ยังสามารถนำมาใช้งานเป็นตัวสร้างฐานเวลาให้กับ โมดูล ตรวจสอบสัญญาณ เปรียบเทียบ และสร้างสัญญาณ PWM หรือ โมดูล CCP ไทเมอร์หรือ เคาท์เตอร์จะขึ้นอยู่กับการนับสัญญาณถ้าเป็นการนับสัญญาณนาฬิกาจากภายในก็ทำงานเป็นตัวตั้งเวลา หรือ ไทเมอร์ แต่ถ้าเป็นการนับสัญญาณจากภายนอกก็จะเป็นตัวนับหรือ เคาท์เตอร์

- หน่วยควบคุมการอินเทอร์รัปต์ (Interrupt Controller) เป็นตัวควบคุมการทำงานของ การ อินเทอร์รัปต์ (Interrupt) ของไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ อินเทอร์รัปต์ภายนอก และ อินเทอร์รัปต์ภายใน

### 2.5.2 โมดูลการเปรียบเทียบ (Comparator Module)

เป็นตัวเลขการเปรียบเทียบความแตกต่างของแรงดันแบบอนาล็อก ซึ่งจะนำค่าอินพุตที่ได้รับมาเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิง ฟังก์ชันในการเปรียบเทียบแรงดันแบบอนาล็อกจะถูกควบคุมโดยรีจิสเตอร์ CMCON ดังแสดงในรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 วงจรและฟังก์ชันการทำงานของ โมดูลการเปรียบเทียบของ PIC16F628

การอินเทอร์รัพท์จะเกิดขึ้นเมื่อค่าของแรงดัน เอาต์พุตเปลี่ยนแปลงไป ในกรณีนี้ ค่าของบิต CIME ในรีจิสเตอร์ PIE1 จะถูกเซ็ทเป็น 1 ซึ่งค่าของบิต PEIE ใน รีจิสเตอร์ OPTION ควนที่จะเป็น 1 ด้วย เมื่อ เอาต์พุตของการเปรียบเทียบเปลี่ยนแปลง ค่าของบิต CMIF ในรีจิสเตอร์จะเป็น 1 เมื่อเกิดการ อินเทอร์รัพท์ ในกระบวนการอินเทอร์รัพท์ บิตCMIFในรีจิสเตอร์ PIR1 จะต้อง โคนเคลียร์ทิ้งเสมอถ้าเกิดการ อินเทอร์รัพท์ แต่เพื่อค่าของเอาต์พุตของตัวเปรียบเทียบไม่เปลี่ยนแปลงก็จะไม่เกิดการ อินเทอร์รัพท์

การควบคุมเอาต์พุต (Output Control) เอาต์พุตของการเปรียบเทียบจะเก็บไว้ใน บิต C1OUT และ C2OUT ในรีจิสเตอร์ CMCON ซึ่งค่าของ บิต C1OUT และ C2OUT สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงได้จากการเซ็ทค่า บิต C1INV และ C2INV

การควบคุมอินพุต (Input Control) อินพุตของการเปรียบเทียบควบคุมได้จาก บิต CM0-CM2 และ CIS ในรีจิสเตอร์ CMCON เมื่อเว็ทบิต CM2 เป็น 0 จะเป็นการเปิดการใช้งานฟังก์ชันการเปรียบเทียบแรงดัน การกำหนดอินพุตทำได้โดยการกำหนดบิต CIS ให้เป็น 0 จะได้ขา AN0-AN3 เป็นอนาล็อกอินพุต เมื่อไม่ต้องการใช้ตัวเปรียบเทียบแรงดันก็เซ็ทค่าของ CM2 เป็น 1

แรงดันอ้างอิง (Voltage Reference,  $V_{REF}$ ) ในการกำหนดค่าของแรงดันอ้างอิงในไมโครคอนโทรลเลอร์ 16F628 จะมีรีจิสเตอร์ VRCON ที่ใช้ในการกำหนดแรงดันอ้างอิง เช่นเมื่อมีการ

ทำให้ CM0-CM2 เป็น 010 แรงดันอ้างอิงก็จะได้จากแรงดันที่จ่ายให้กับ ไมโครคอนโทรลเลอร์ 16F628 แรงดันเอาต์พุตอ้างอิงจะถูกกำหนดที่พอร์ต RA2 ในรีจิสเตอร์ VRCONN แรงดันอ้างอิงสามารถ ออกแบบได้จาก บิต RA0-RA3 ในรีจิสเตอร์ VRCON ซึ่งสามารถระบุช่วงได้เป็น 16 แบบจาก 0-15 ซึ่งค่า ของระดับแรงดันจะมีแบบช่วงแรงดันต่ำ และช่วงแรงดันสูง ในที่นี้ค่าของแรงดันสูงสุดจะมีค่าเท่ากับ 3.6V ซึ่งเป็นค่าของแรงดันที่สามารถตั้งค่าได้ในบิต VRR ของรีจิสเตอร์ VRCON สมการการคำนวณหา ค่าแรงดันเอาต์พุต จากการเซ็ทบิต VR0-VRR3 ในรีจิสเตอร์ VRCON

ตารางที่ 2.12 ความสัมพันธ์ของบิต VRR กับแรงดันที่แหล่งจ่ายไฟ ( $V_{DD}$ ) 5 โวลต์

VR3-0	Low Range	High Range
0000	0.00	1.25
0001	0.21	1.41
0010	0.42	1.56
0011	0.63	1.72
0100	0.83	1.88
0101	1.04	2.03
0110	1.25	2.19
0111	1.46	2.34
1000	1.67	2.50
1001	1.88	2.66
1010	2.08	2.81
1011	2.29	2.97
1100	2.50	3.31
1101	2.71	2.28
1110	2.92	3.44
1111	3.13	3.59

การกำหนดค่า VRR เพื่อคำนวณหา  $V_{REF}$

$$\text{เมื่อ } VRR = 1 \text{ (Low Range) } V_{REF} = (VR\langle 3:0 \rangle / 24) * V_{DD}$$

$$\text{เมื่อ } VRR = 0 \text{ (High Range) } V_{REF} = 1/4 * V_{DD} + (VR\langle 3:0 \rangle / 32) * V_{DD}$$

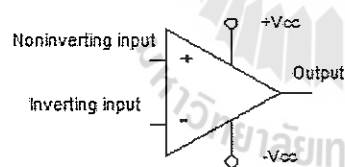
## 2.6 ออปแอมป์ (Op-Amp)

OP-Amp คืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ออกแบบเพื่อให้สามารถทำงานได้หลายรูปแบบ และเน้นความสะดวกในการใช้งาน OP-Amp เป็น IC (Integrated Circuit) ชนิดหนึ่งสามารถนำไปต่อวงจรได้มากมาย เช่น ขยายสัญญาณ ผลิตสัญญาณ เปรียบเทียบสัญญาณ และรวมสัญญาณ เป็นต้น

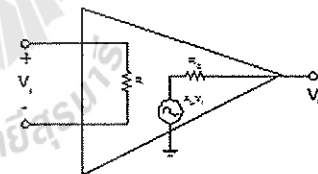
### 2.6.1 OP-Amp ในทางอุดมคติ (Ideal OP-Amp)

- Input Impedance ( $R_i$ ) =  $\infty\Omega$  ปกติประมาณ 5 Mohm
- Output Impedance ( $R_o$ ) =  $0\Omega$  ปกติประมาณ 10 ohm
- Voltage Gain ( $A_v$ ) =  $\infty$  ปกติประมาณ 105 เท่า
- Bandwidth =  $\infty H_z$  ปกติประมาณ 5 MHz
- ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ
- การสวิงของเอาต์พุตเป็นแบบเส้นตรง ( Linear Output Swing )
- ไม่มีสัญญาณรบกวน

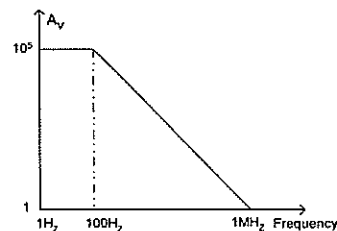
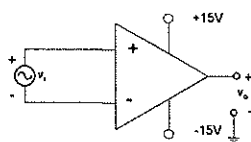
สัญลักษณ์ OP-Amp



วงจรเสมือน OP-Amp

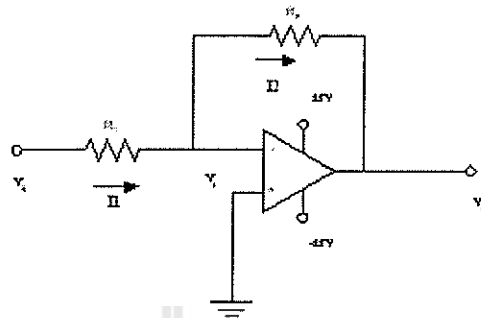


รูปที่ 2.33 Op-Amp ในอุดมคติ



รูปที่ 2.34 วงจรขยายสัญญาณ OP-Amp แบบ Open Loop

- วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier)

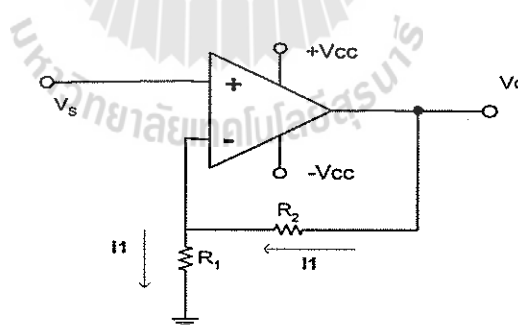


รูปที่ 2.35 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส ( Inverting Amplifier )

จากรูปที่ 2.35 สามารถหาอัตราขยายของแรงดันขาออกได้จาก

$$V_o = \left(-\frac{R_f}{R_1}\right)V_s \quad (2.31)$$

- วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส ( Non-inverting Amplifier)



รูปที่ 2.36 วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส ( Non-inverting Amplifier)

จากรูปที่ 2.36 สามารถหาอัตราขยายของแรงดันขาออกได้จาก

$$V_o = \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1}\right)V_s \quad (2.32)$$



## 2.7 ปรัชญ์นั้วรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษา บทความ ทฤษฎีการสั่นสะเทือนของเครื่องจักร การออกแบบวงจรควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ การขยายสัญญาณด้วยออปแอมป์ และการทำงานของเครื่องจักรด้วยระบบนิวเมติก พร้อมทั้งยังได้ศึกษาเพิ่มเติมจากงานวิจัยอื่น ๆ ที่มีเนื้อหาเกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ โดยสามารถนำสามารถที่นำมาไปใช้เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงและพัฒนาต่อกับงานวิจัยอื่นๆ ได้

จิระพล ศรีเสริฐผล และ สมใจ สุนทรสกุล(2006) ได้ศึกษา ทดสอบและวิเคราะห์ลักษณะการตอบสนองของตัวดูดซับการสั่นขนาดเล็ก (Miniature Shock Absorber) ตามสภาพการใช้งานจริง เพื่อหาตัวแปรบ่งชี้ความสัมพันธ์ แบบมีนัยสำคัญต่อลักษณะการทำงานของชุดขนถ่ายชิ้นงานที่ส่งผลกระทบต่อทำให้เกิดความเสียหายโดยตรงต่อหัวอ่านและบันทึกข้อมูล ในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (HDD) อันเป็นผลทำให้ประสิทธิภาพของหัวอ่านและบันทึกข้อมูลลดลง โดยทำการทดสอบและเปรียบเทียบการสั่นที่เกิดจากการติดตั้งตัวดูดซับการสั่นที่มีคุณสมบัติที่แตกต่างกันกับระบบ ผลที่ได้จะเป็นประโยชน์ต่อการการเลือกตัวดูดซับและควบคุมการสั่นของชุดขนถ่ายชิ้นงานให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จิระพล ศรีเสริฐผล สุเมธี ถีสุงเนิน และพีระยุทธ หวังรักไพบูลย์(2006) ได้วิเคราะห์ด้านการสั่นสะเทือนเชิงกลของอุปกรณ์สำหรับทดสอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการทดสอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ มีผลต่อการทดสอบที่มีความผิดพลาดและความเสียหายที่เกิดขึ้น วิธีการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนในเครื่องจักร จะใช้เครื่องมือวัดการสั่นสะเทือนเพื่อที่จะวิเคราะห์หาปัญหาเป็นการติดตามสภาพของเครื่องจักรกลในขณะที่กำลังทำงาน ทำให้สามารถป้องกันการเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับเครื่องจักรได้ ซึ่งทำให้สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในด้านงานบำรุงรักษาเครื่องจักรลงได้ โดยทำการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นที่แสดงรูปร่างการสั่นและความถี่ธรรมชาติจำนวน 5 โหมด ของอุปกรณ์สำหรับทดสอบ ซึ่งจะได้ว่าความถี่พื้นฐาน (Fundamental frequency) ของอุปกรณ์สำหรับทดสอบจะอยู่ในช่วง ความถี่ 49 Hz ถึง 51 Hz และความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นจำนวน 5 โหมดที่ได้จะอยู่ในช่วงความถี่ 51 Hz ถึง 121 HZ โดยผลที่ได้จากการเทคนิคการวัดจริงจากอุปกรณ์สำหรับทดสอบเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์

ประดิษฐ์ หมู่เมืองสอง และ สุขญาณ ธรรมชาติ (2250) ได้กล่าวถึงพลศาสตร์ของเครื่องจักรว่ารูปแบบการสั่นของเครื่องจักรมีความหลากหลายแตกต่างกันนั้นมีสาเหตุมาจากการเคลื่อนแบบพลศาสตร์ของเครื่องจักร (Machine Dynamics) โดยการเคลื่อนที่จะขึ้นอยู่กับมวล (Mass) ความมั่นคงแข็งแรง (Stiffness) ความหน่วง (Damping) และองศาอิสระในการเคลื่อนที่ (Degree of Freedom) แต่อย่างไรก็ตาม ยังจำเป็นต้องมีความระมัดระวังในการวิเคราะห์อยู่ เพราะรูปแบบการสั่นสะเทือนและ

ระดับพลังงานที่ถูกสร้างขึ้นมาโดยเครื่องจักรอาจจะแปรผันไปตามปัจจัยของตำแหน่งหรือปัจจัยของ แวกต์ลุ่มอื่น ๆ ในการวัด

สมคิด ขงหอม, สุชัย นิจรินทร์ (2550) ได้กล่าวถึงระบบนิวแมติกส์เป็นระบบที่อาศัยแรงดันลม ในการขับเคลื่อนเครื่องจักรให้ทำงานโดยที่มีส่วนประกอบในการทำงานจะประกอบไปด้วย ชุดต้นกำลังซึ่งทำหน้าที่ส่งลมอัด อุปกรณ์ให้สัญญาณ อุปกรณ์ควบคุม และอุปกรณ์ทำงาน โดยการควบคุมแรงดันลมของระบบนิวแมติกส์จะใช้วาล์ว ซึ่งจะคอยทำหน้าที่ควบคุมการเริ่มและหยุดการทำงานของ วงจรนิวแมติกส์ ในงานอุตสาหกรรมนิยมใช้สัญลักษณ์เพื่อความสะดวกรวดเร็วและง่ายต่อการเข้าใจ

เดชฤทธิ์ มณีธรรม และ สำเร็จ เต็มราม (2554) ได้กล่าวไว้ว่าไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นอุปกรณ์ที่สามารถสร้างระบบควบคุมได้ โดยอุปกรณ์นี้มีขนาดเล็ก และเป็นอุปกรณ์ประเภทสารกึ่งตัวนำที่มีการรวมเอาฟังก์ชันการทำงานต่างๆ ไว้ในตัวเอง ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับคอมพิวเตอร์ซึ่งมีใช้กันอย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรม

## 2.8 สรุป

โรงงานอุตสาหกรรมโดยทั่วไปจะมีความพยายามควบคุมการผลิตให้ได้ปริมาณที่มากและคุณภาพดีตามที่ลูกค้าต้องการ และส่งได้ตามเวลาที่กำหนดพร้อมทั้งควบคุมต้นทุนในการผลิตให้ต่ำที่สุด ซึ่งผู้ปฏิบัติงานภายในโรงงานนั้นจะต้องมีความปลอดภัยในการทำงาน โดยการทำงานนั้นจะต้องมีการประสานงานที่ดีกันระหว่างหน่วยงานด้านการผลิตและบำรุงรักษา ซึ่งถ้าเกิดการชำรุดเสียหายของเครื่องจักรก็จะส่งผลโดยตรงต่อการผลิต ดังนั้นการวางแผนในการบำรุงรักษาที่ดีจะทำให้เครื่องจักรทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความมั่นคงต่อการผลิต

การวิเคราะห์การสิ้นสะสมเตือนไม่ได้ถูกนำมาใช้เฉพาะงานบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์เท่านั้น แต่ยังสามารถนำไปใช้ได้ดีสำหรับการวิจัหาสาเหตุของความผิดปกติของเครื่องจักรต่าง ๆ โดยเฉพาะเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไปเมื่อมีการนำเทคนิคนี้มาใช้อย่างถูกต้องและเหมาะสม ความหมายที่แปรผลได้จากข้อมูลการสิ้นสะสมเตือนนั้นจะส่งผลให้การรักษาระดับเงื่อนไขการทำงานที่มีประสิทธิภาพของระบบของโรงงานเป็นไปได้ดียิ่ง

### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินงานวิจัย

การเคลื่อนที่ คือการเปลี่ยนตำแหน่งของวัตถุในช่วงเวลาหนึ่ง ซึ่งวัดโดยผู้สังเกตที่เป็นส่วนหนึ่งของกรอบอ้างอิง เมื่อปลายคริสต์ศตวรรษที่ 19 เซอร์ไอแซก นิวตัน ได้ศึกษาธรรมชาติของแรงที่มีผลต่อสภาพการเคลื่อนที่ของวัตถุ เพื่ออธิบายถึงสภาพการเคลื่อนที่และการเปลี่ยนแปลงสภาพการเคลื่อนที่ของวัตถุ ได้สรุปเป็นกฎการเคลื่อนที่ไว้ 3 ข้อ ดังต่อไปนี้

กฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 1 ของนิวตัน ถ้ามีวัตถุวางนิ่งอยู่บนพื้นราบแล้วไม่มีแรงภายนอกอื่นมากระทำต่อวัตถุ วัตถุจะยังคงหยุดนิ่งเช่นนั้นต่อไป หรือถ้าให้แรงสองแรงมากระทำต่อวัตถุโดยแรงทั้งสองมีขนาดเท่ากันและมีทิศตรงกันข้าม ซึ่งเป็นผลให้แรงลัพธ์เป็นศูนย์ จะพบว่าวัตถุจะยังคงสภาพหยุดนิ่งเช่นเดิม จึงสามารถสรุปได้ว่า “ถ้าไม่มีแรงภายนอกมากระทำต่อวัตถุ หรือแรงลัพธ์ที่มากระทำมีค่าเป็นศูนย์ วัตถุจะไม่เปลี่ยนสภาพการเคลื่อนที่” เช่น ถ้าวัตถุหยุดนิ่งก็จะหยุดนิ่งต่อไป ถ้ากำลังเคลื่อนที่ก็จะเคลื่อนที่ต่อไปด้วยความเร็วคงตัวโดยมีความสัมพันธ์ตามสมการดังนี้

$$\sum \vec{F} = 0 \quad (3.1)$$

กฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 2 ของนิวตัน เมื่อมีแรงลัพธ์ที่มีค่าไม่เท่ากับศูนย์มากระทำต่อวัตถุ จะทำให้วัตถุเกิดความเร่งในทิศเดียวกับแรงลัพธ์ที่มากระทำ และขนาดของความเร่งนี้จะแปรผันตรงกับขนาดของแรงลัพธ์ และแปรผกผันกับมวลของวัตถุโดยมีความสัมพันธ์ตามสมการดังนี้

$$\sum \vec{F} = m\vec{a} \quad (3.2)$$

เมื่อ  $\vec{F}$  คือแรงที่กระทำกับวัตถุ มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

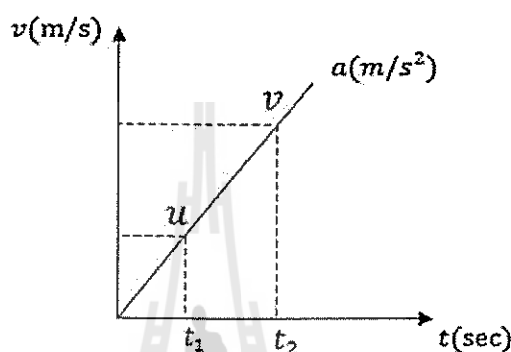
$m$  คือมวลของวัตถุ มีหน่วยเป็นกิโลกรัม (kg)

$\vec{a}$  คือ ความเร่งของวัตถุ มีหน่วยเป็น เมตรต่อวินาทียกกำลังสอง ( $m/s^2$ )

กฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 3 ของนิวตัน เมื่อมีแรงกระทำต่อวัตถุหนึ่ง วัตถุนั้นจะออกแรงโต้ตอบในทิศตรงกันข้ามกับแรงที่มากระทำ แรงทั้งสองนี้เกิดขึ้นพร้อมกันเสมอ เราเรียกแรงที่มากระทำต่อ

วัตถุว่า “แรงกิริยา” และเรียกแรงที่วัตถุได้ตอบสนองที่มากกระทำว่า “แรงปฏิกิริยา” และแรงทั้งสองนี้รวมเรียกว่า “แรงคู่กิริยา – ปฏิกิริยา” (Action – Reaction Pair)

จากกฎข้อ 2 ของนิวตัน ความเร่งของวัตถุเป็นปฏิภาคโดยตรงกับแรงลัพธ์ที่กระทำและเป็นปฏิภาคผกผันกับมวลของวัตถุ จากสมการที่ 3.2 ค่าความเร่งของวัตถุขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็ว ณ เวลานั้นดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การหาค่าความเร่ง

จากรูปที่ 3.1 จะได้

$$\vec{a} = \frac{(v - u)}{(t_2 - t_1)} \quad (3.3)$$

เมื่อ

$v$  คือ ความเร็วสุดท้ายของวัตถุ

$u$  คือ ความเร็วเริ่มต้นของวัตถุ

$t_1$  คือ เวลาที่ความเร็วของวัตถุที่ตำแหน่งเริ่มต้น

$t_2$  คือ เวลาที่ความเร็วของวัตถุที่ตำแหน่งสุดท้าย

แทนค่าสมการที่ 3.3 ลงในสมการที่ 3.2 จะได้

$$\vec{F} = \frac{(mv - mu)}{\Delta t} \quad (3.4)$$

จากสมการที่ 3.4 จะได้

$$\vec{F}\Delta t = mv - mu \quad (3.5)$$

จากสมการที่ 3.5 ปริมาณการเคลื่อนที่ของวัตถุซึ่งปริมาณนี้จะบอกถึงความพยายามที่จะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าของวัตถุปริมาณนี้ขึ้นอยู่กับมวล และความเร็วของวัตถุในขณะนั้นคือ โมเมนตัม และ ผลคูณของเวลากับแรงที่ไม่เป็นศูนย์มากระทำกับวัตถุจะทำให้โมเมนตัมเปลี่ยนไปในช่วงเวลาหนึ่ง คือ การลด ดังนั้นการลดแรงกระทำต่อวัตถุสามารถกระทำได้โดยการลดความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัตถุก่อนเกิดการชนกัน

การเพิ่มความเร็วของหุ่นยนต์ในการเคลื่อนที่แบบหมุนที่ไม่เหมาะสมนั้นจะส่งผลทำให้แอมพลิจูดการสั่นเพิ่มขึ้นเนื่องจากการกระแทกกันระหว่างแขนของหุ่นยนต์กับฉนวนการสั่น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว เวลา และการสั่นที่เกิดจากแรงกระแทกในการหมุน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันลมที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของแขนจับหุ่นยนต์อัตโนมัติในกระบวนการหยิบออก-ใส่เข้าฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งการศึกษาครั้งนี้จะใช้แรงดันลมขนาด 4 - 8 บาร์ โดยการวิจัยจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ

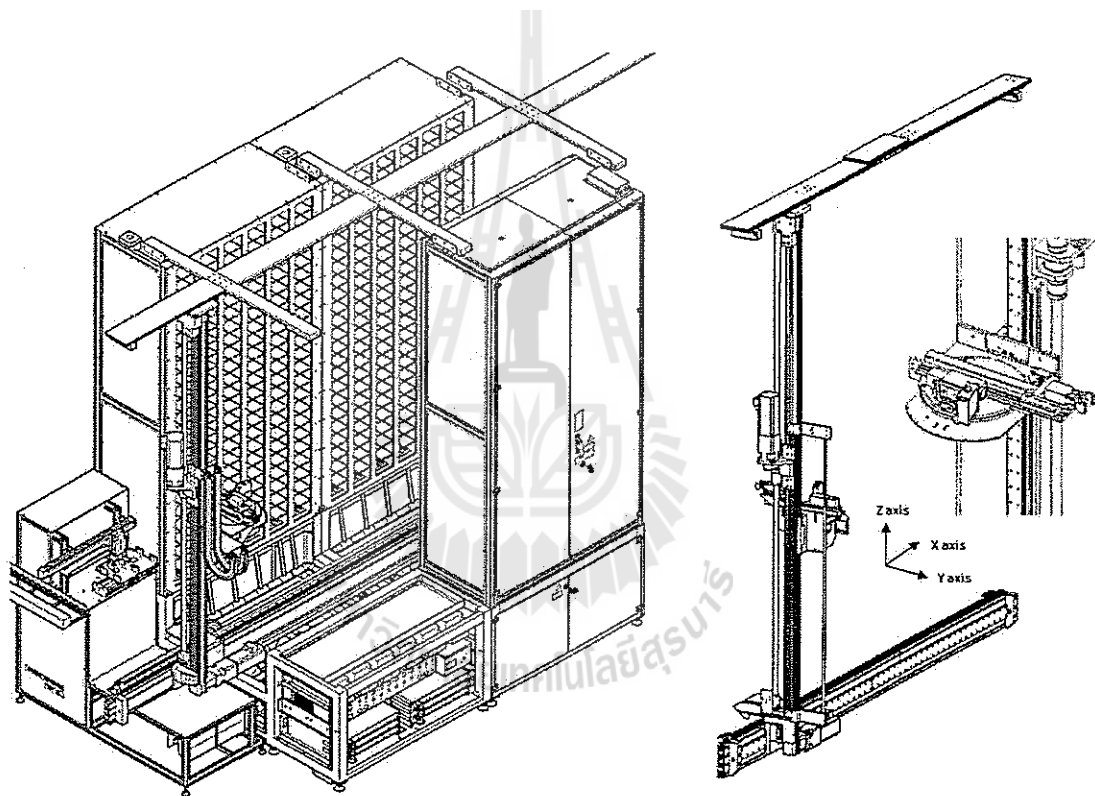
- ศึกษาความสัมพันธ์ของการสั่นกับแรงดันลมในการเคลื่อนที่ของแขนจับหุ่นยนต์
- ออกแบบวงจรควบคุมการสั่น

เมื่อทราบค่าความสัมพันธ์ของการสั่นกับแรงดันลมในการเคลื่อนที่ของแขนจับหุ่นยนต์ ก็จะได้ทำการออกแบบวงจรควบคุมแรงดันลมแบบอัตโนมัติ เพื่อลดความเร็วในการหมุนของแขนจับหุ่นยนต์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันลม โดยใช้โซลินอยด์วาล์วเป็นตัวควบคุมการปล่อยลมในการเคลื่อนที่ และใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมการทำงานของโซลินอยด์ ซึ่งการชนกันของหุ่นยนต์กับตัวฉนวนการสั่นแต่ละครั้งจะมีเซ็นเซอร์ตรวจจับการสั่นคอยส่งสัญญาณมายังไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อใช้ในการคำนวณหาช่วงเวลาในการเปิด-ปิดวาล์วลมในแต่ละครั้งโดยให้มีแอมพลิจูดการสั่นน้อยที่สุด และคำนึงถึงเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่น้อยที่สุดด้วย

### 3.1 เครื่องทดสอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และแขนจับหุ่นยนต์

เครื่องทดสอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีช่องทดสอบมากกว่า 1 ช่องทดสอบ ในกระบวนการหยิบออก-ใส่เข้าฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เข้าช่องทดสอบของเครื่องทดสอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะใช้หุ่นยนต์ โดยการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จะมีการเคลื่อนที่ทั้งหมด 3 แกน คือ ขนานกับตัวเครื่อง (แนวแกน X) ในแนวตั้งฉาก (แนวแกน Y) และในแนวตั้ง (แนวแกน Z) โดยการเคลื่อนที่ในแนวแกน X และแนวแกน

Z จะใช้เซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor) เป็นตัวขับเคลื่อน ส่วนในแนวแกน Y จะใช้ระบบนิวเมติกส์ เครื่องทดสอบจะแบ่งช่องทดสอบออกเป็น 2 ซ้ำงที่เท่า ๆ กัน คือด้านซ้าย และด้านขวา โดยมีช่องทดสอบมากกว่า 1000 ช่อง ดังแสดงในรูปที่ 3.2 การค้นหาตำแหน่งช่องทดสอบของแขนจับหุ่นยนต์จะใช้กล้องเป็นตัวตรวจจับภาพ เพื่อหาระยะตำแหน่งช่องทดสอบในการหยิบออก-ใส่เข้า ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ ซึ่งแรงดันลมที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของแขนจับหุ่นยนต์ในแนวแกน Y จะมีค่าประมาณ 3-4 บาร์ และการเคลื่อนที่ของแขนจับหุ่นยนต์จากด้านหนึ่งไปยังด้านหนึ่งจะมีฉนวนการสั่นเป็นตัวลดแรงกระแทกจากการหมุน

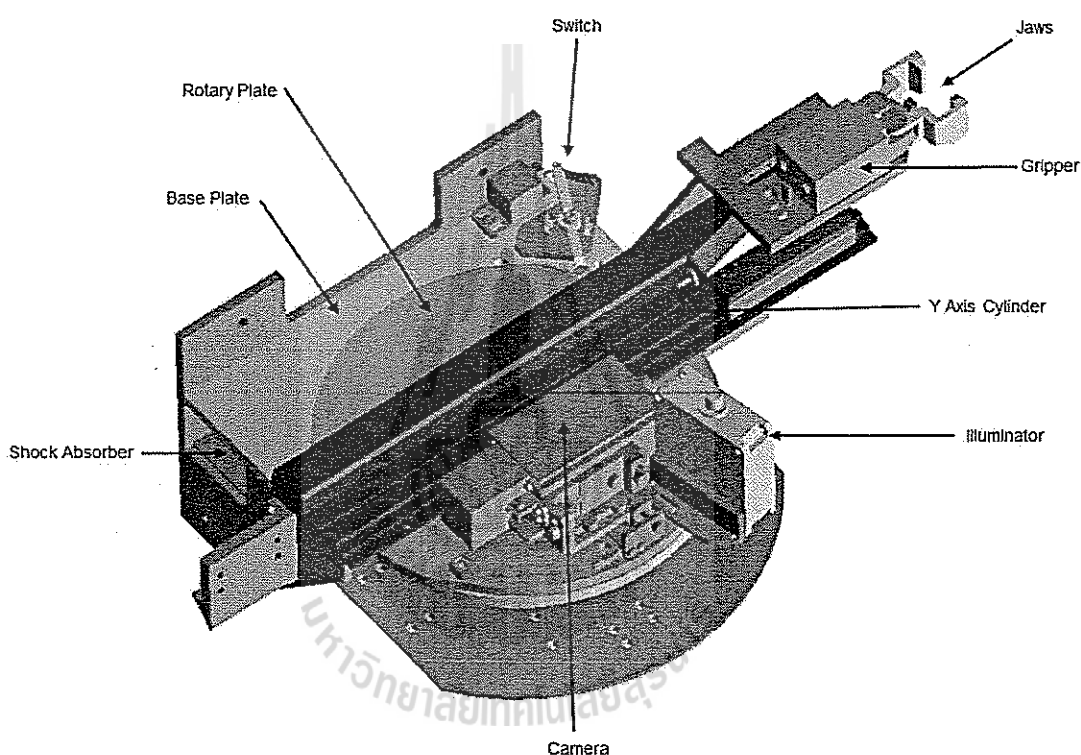


รูปที่ 3.2 เครื่องทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

ส่วนประกอบของแขนจับหุ่นยนต์ดังแสดงในรูปที่ 3.3 มีหน้าที่การทำงานมีดังนี้

- Base Plate ทำหน้าที่เป็นแท่นยึดกับแขนจับหุ่นยนต์
- Rotary Plate ทำหน้าที่เป็นตัวหมุนของแขนจับหุ่นยนต์
- Jaws ทำหน้าที่เป็นกตสลักถาดรองฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ในช่องทดสอบ

- Gripper ทำหน้าที่เป็นตัวจับฮาร์ดดิสก์ไครฟ์
- Y axis Cylinder ทำหน้าที่เป็นตัวเลื่อนของแขนจับหุ่นยนต์
- Illuminator ทำหน้าที่ให้แสงสว่างเวลาจับภาพตำแหน่งช่องทดสอบ
- Camera ทำหน้าที่จับภาพตำแหน่งช่องทดสอบ
- Switch ทำหน้าที่กำหนดของเขตการหมุนของหุ่นยนต์
- Shock Absorber ทำหน้าที่ลดแรงกระแทกจากการหมุนของแขนจับหุ่นยนต์



รูปที่ 3.3 แขนจับหุ่นยนต์อัตโนมัติ

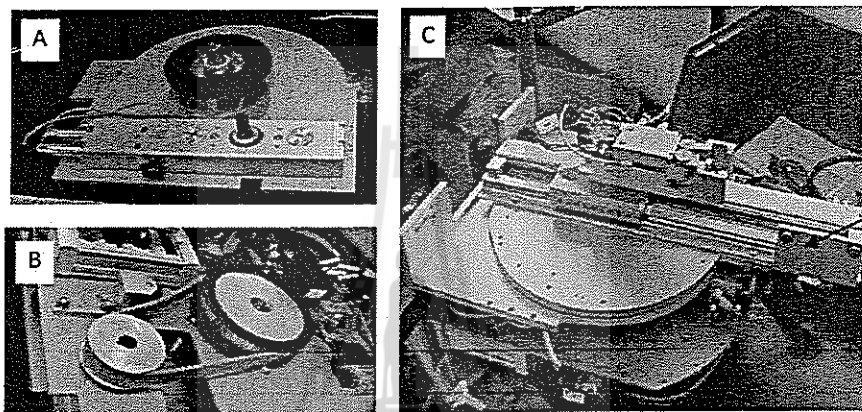
การสั่นจากการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จะส่งผลกระทบต่อจับภาพตำแหน่งช่องทดสอบในกระบวนการหยิบออก-ใส่เข้าฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

### 3.2 การเคลื่อนที่แบบหมุนของแขนจับหุ่นยนต์

เนื่องจากการเคลื่อนที่ของแขนจับหุ่นยนต์ในกระบวนการหยิบออก-ใส่เข้าฮาร์ดดิสก์ไครฟ์เข้าช่องทดสอบเป็นระบบนิวเมติกส์ คือใช้แรงดันลมในการเคลื่อนที่ เช่น การหมุนของหุ่นยนต์ การ

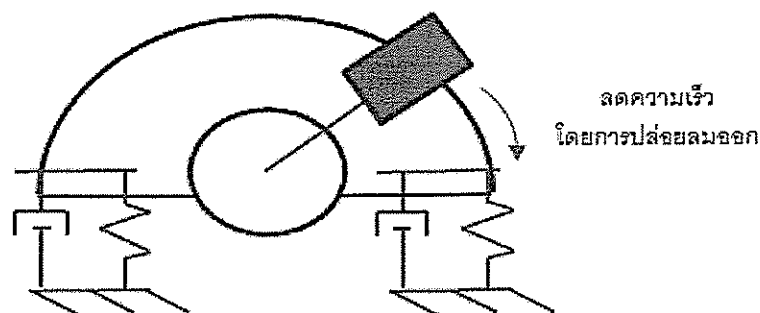
เลื่อนเข้าเลื่อนออกของมือจับหุ่นยนต์ เป็นต้น ซึ่งส่วนประกอบหลักที่ทำหน้าที่ในการหมุนของแขนจับหุ่นยนต์มี 3 ส่วนดังแสดงในรูปที่ 3.4 ดังนี้คือ

- รูป A ชุดควบคุมการหมุนและฉนวนการสั่น
- รูป B ชุดสายพานควบคุมการหมุนของแขนจับหุ่นยนต์
- รูป C แขนจับหุ่นยนต์



รูปที่ 3.4 ส่วนประกอบในการหมุนของแขนจับหุ่นยนต์

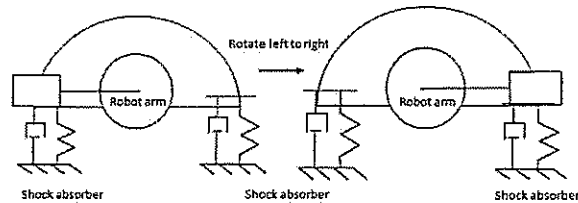
การทำให้แขนจับหุ่นยนต์หยุดเคลื่อนที่ทำได้โดยหยุดปล่อยลมในการเคลื่อนที่ แต่ในขณะที่หยุดปล่อยลมเพื่อให้หุ่นยนต์หยุดหมุนนั้นจะทำให้เกิดการสั่น ดังนั้นจึงต้องมีฉนวนการสั่น (Shock Absorber) ดังแสดงในรูปที่ 3.5 เพื่อเป็นการลดการสั่นจากการชนดังกล่าว



รูปที่ 3.5 แสดงการเคลื่อนที่แบบหมุนของแขนจับหุ่นยนต์

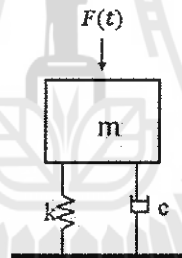


การเคลื่อนที่จากซ้ายไปขวาของแขนจับหุ่นยนต์จะมีจำนวนการสั่น 2 ชุดคือรับแรงจากแขนจับหุ่นยนต์เพื่อเป็นการลดแอมพลิจูดการสั่น ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การหมุนของแขนหุ่นยนต์

เมื่อพิจารณาเฉพาะแรงของแขนจับหุ่นยนต์ที่กระทำต่อมวลการสั่น ณ เวลาหนึ่ง ดังนั้นจะได้ลักษณะการสั่นของแขนจับหุ่นยนต์ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แรงที่กระทำต่อตัวดูดซับแรงกระแทก

ซึ่งจะได้สมการการสั่นของแขนจับหุ่นยนต์ดังนี้

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) \quad (3.1)$$

เนื่องจากการสั่นที่มีแรงกระทำจากภายนอกกับความหน่วงจะเรียกว่า การสั่นแบบมีแรงกระทำ โดยมีตัวหน่วง ถ้าขนาดของแรงกระทำมีค่าเท่ากับหนึ่งจะได้ฟังก์ชันการดลเป็นแบบหนึ่งหน่วย (Unit impulse function,  $\delta(t)$ ) หรือเรียกว่า Dirac delta function ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมขณะแรงดลกระทำจะมีค่าเท่ากับ

$$\hat{F} = F\Delta t = mv_0 \quad (3.2)$$

เมื่อการตอบสนองของระบบนั้น เป็นการสั่นแบบอิสระภายใต้ความหน่วงต่ำ ( $0 < \zeta < 1$ ) จะได้ผลเฉลยของสมการการสั่นของแขนจับหุ่นยนต์คือ

$$x(t) = \frac{\hat{F}}{m\omega_d} e^{-\zeta\omega_n t} \sin \omega_d t \quad (3.3)$$

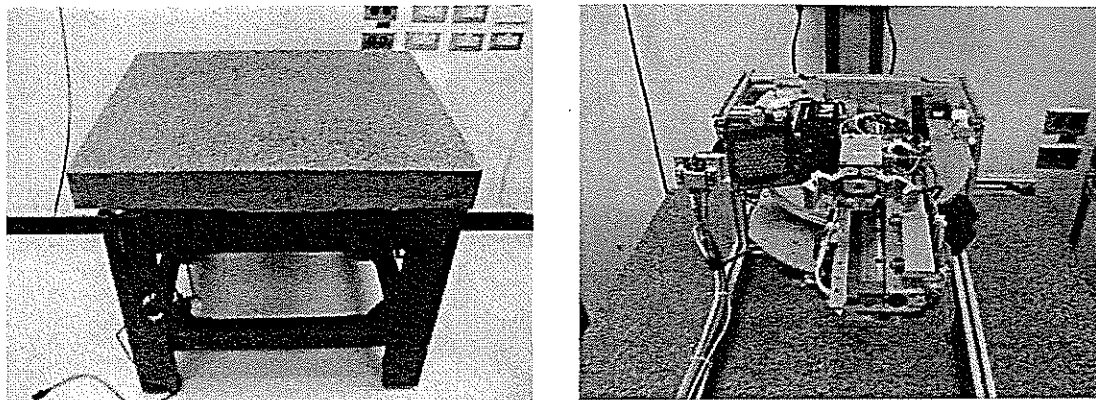
### 3.3 ขั้นตอนการออกแบบงานวิจัย

การลดการสั่นในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จะพิจารณาเฉพาะการสั่นที่เกิดจากการชนกันระหว่างแขนจับหุ่นยนต์กับจนวนการสั่นเท่านั้น ซึ่งเป็นแนวการสั่นที่มีผลกระทบต่อการจัดภาพตำแหน่งช่องทดสอบของหุ่นยนต์โดยตรง ซึ่งสามารถทำได้ด้วยการลดความเร็วก่อนชนของแขนจับหุ่นยนต์กับจนวนการสั่น ดังสมการที่ 3.2 โดยการลดแรงคืนลมที่ใช้ในการเคลื่อนที่เพื่อให้ความเร็วในการเคลื่อนที่ลดลง แต่เนื่องจากค่าของแรงคืนลมที่ไม่คงที่จึงต้องทำการออกแบบวงจรควบคุมการปล่อยลมตามแอมพลิจูดการสั่น โดยจะพิจารณาความสัมพันธ์ของแอมพลิจูดการสั่นกับเวลาในการปล่อยลมออกซึ่งมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

- ติดตั้งชุดจำลองการเคลื่อนที่ของแขนจับหุ่นยนต์และเครื่องวัดการสั่น
- การกำหนดแรงคืนลมเพื่อลดความเร็วในการหมุน
- ออกแบบวงจรควบคุมการปล่อยลมและทดสอบการทำงานของวงจร

#### 3.3.1 ติดตั้งชุดจำลองการเคลื่อนที่ของแขนจับหุ่นยนต์ และเครื่องวัดการสั่น

การติดตั้งแขนจับหุ่นยนต์ที่ใช้ในหีบออก-ใส่เข้าฮาร์ดดิสก์ไครฟ์จะติดตั้งบนแท่นลดการสั่นสะเทือนซึ่งพื้นโต๊ะจะเป็นหินแกรนิต และที่ฐานทั้งสี่มุมของโต๊ะจะมีสปริงเพื่อเป็นการลดการสั่นสะเทือนจากสภาวะแวดล้อมภายนอกระบบ พร้อมกับชุดแหล่งจ่ายลมสามารถปรับระดับได้ตั้งแต่ 0-8 บาร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 การติดตั้งแกนจับหุ่นยนต์บน Vibration Table

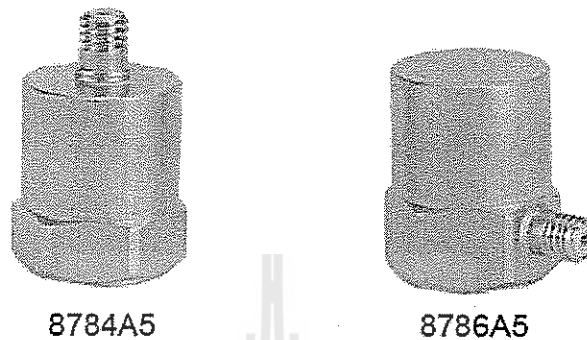
เครื่องวัดการสั่นของของแกนจับหุ่นยนต์จะใช้ Dynamic signal analyzer ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ซึ่งเป็นเครื่องวัดแบบ 4 แชนแนล สามารถบันทึกข้อมูลการวัดได้พร้อมกัน และสามารถแปลงหน่วยการวัดได้ เช่น วัดค่าการสั่นในหน่วยความเร่งสามารถที่จะแปลงเป็นหน่วยวัดการสั่นแบบขนาดได้ เป็นต้น ซึ่งรายละเอียดของเครื่องจะอธิบายอยู่ในภาคผนวก ข



รูปที่ 3.9 Dynamic signal analyzer

หัววัดการสั่นจะใช้รุ่น 8784A5 และ 8786A5 ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ซึ่งเป็นหัววัดที่ใช้วัดค่าแอมพลิจูดการสั่นเป็นความเร่ง แต่ในการทดลองจะใช้วัดขนาดของการสั่นเป็นเมตร ในการ

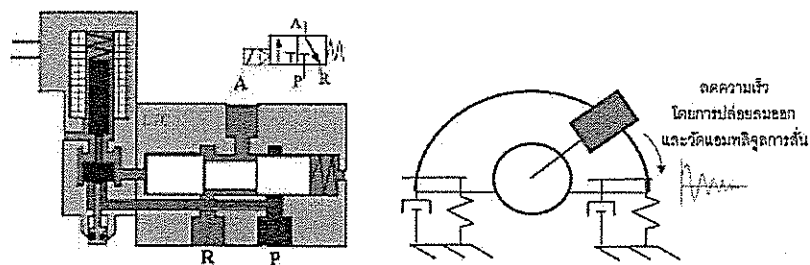
เคลื่อนที่แบบหมุนของแขนจับหุ่นยนต์ เพื่อความสะดวกต่อการคำนวณหาสมการของระบบ ซึ่งรายละเอียดของหัววัดการสั่นนี้จะอยู่ในภาคผนวก ข



รูปที่ 3.10 หัววัดการสั่นแบบวัดความเร่ง

### 3.3.2 การกำหนดแรงดันลมเพื่อลดความเร็วในการหมุน

การลดความเร็วในการเคลื่อนที่แบบหมุนของแขนจับหุ่นยนต์ซึ่งแต่เดิมจะมีเพียง วาล์วปรับลดแรงดันเท่านั้น ดังนั้นในการลดแรงดันลม โดยการปล่อยลมออกจะเลือกใช้โซลินอยด์ วาล์วเป็นตัวกำหนดการปล่อยลมแทนซึ่งโซลินอยด์วาล์วที่ใช้จะเป็นแบบควบคุม 3 ทิศทาง 2 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ซึ่งการกำหนดระยะเวลาในการปล่อยลมออกนั้นจะพิจารณาจาก แอมพลิจูดการสั่นที่เกิดขึ้นหลังจากแขนจับหุ่นยนต์ชนกับฉนวนการสั่น โดยที่ค่าของเวลาในการเคลื่อนที่ของแขนจับหุ่นยนต์ทั้งหมดตั้งแต่จุดเริ่มต้นจนหยุดนิ่งจะต้องไม่เกินเวลาที่ระบุกำหนดไว้ คือประมาณ 3200 มิลลิวินาที



รูปที่ 3.11 โซลินอยด์วาล์วและการกำหนดระยะเวลาปล่อยลม

การกำหนดแรงดันลมที่จ่ายให้กับแขนจับหุ่นยนต์ในการเคลื่อนที่จะใช้วาล์วปรับแรงดันลมเพื่อควบคุมให้แหล่งจ่ายแรงดันลมให้มีค่าที่คงที่



รูปที่ 3.12 วาล์วปรับแรงดันลม

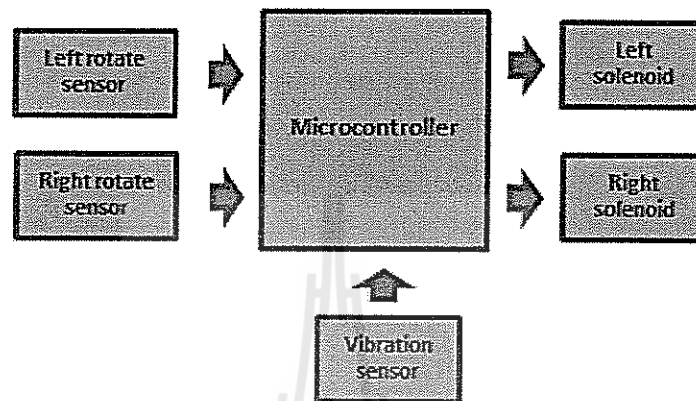
### 3.3.3 ออกแบบวงจรควบคุมการปล่อยลมและทดสอบการทำงานของวงจร

การออกแบบวงจรควบคุมการเปิด-ปิดวาล์วลมของโซลินอยด์ในการปล่อยลมเพื่อเป็นการลดความเร็วในการเคลื่อนที่ของแขนจับหุ่นยนต์นั้นจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ 16F628ซึ่งการทำงานโดยรวมของวงจรจะประกอบไปด้วย

- ส่วนรับสัญญาณ Rotation sensor
- ส่วนรับสัญญาณ Vibration sensor
- ส่วนควบคุม โซลินอยด์วาล์ว

แผนภาพการทำงานของตัวควบคุมการเปิด-ปิดวาล์วปล่อยลมดังแสดงในรูปที่ 3.13 เมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์ได้รับสัญญาณจากตัวเซ็นเซอร์ตรวจจับการหมุนของแขนจับหุ่นยนต์แล้วตัวนับเวลาจะทำการนับเวลาไปจนถึงเวลาการเปิดวาล์วปล่อยลม เมื่อถึงเวลาการเปิดวาล์วปล่อยลม ไมโครคอนโทรลเลอร์ ก็จะสั่งให้โซลินอยด์เปิดวาล์วปล่อยลมออกตามเวลาหน่วงที่กำหนด พร้อมกับวัดแอมพลิจูดการสั่นเมื่อแขนจับของหุ่นยนต์ชนกับฉนวนการสั่น โดยที่โปรแกรมการประมวลผลของไมโครคอนโทรลเลอร์จะนำค่าแอมพลิจูดการสั่นสูงสุดที่ได้ไปคำนวณหาเวลาใน

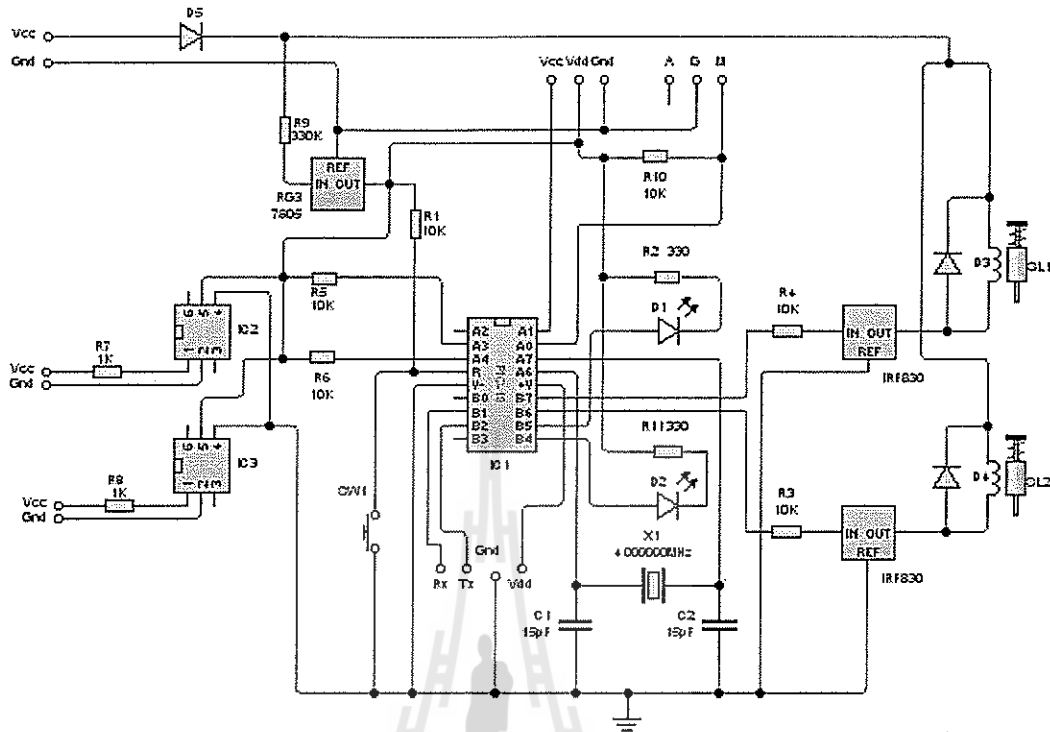
การเปิดวาล์วในครั้งต่อไป จนกว่าจะได้แอมพลิจูดการสั่นน้อยที่สุดตามที่กำหนดไว้ในตัวโปรแกรมควบคุมของไมโครคอนโทรลเลอร์ และจะทำการบันทึกค่าของเวลาในการเปิดวาล์วปล่อยลมไว้ในหน่วยความจำเพื่อให้ทำงานได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่ต้องคำนวณเวลาในการเปิด-ปิดวาล์วลมใหม่เมื่อมีการรีบูตระบบใหม่



รูปที่ 3.13 แผนภาพของวงจรควบคุมการปล่อยลม

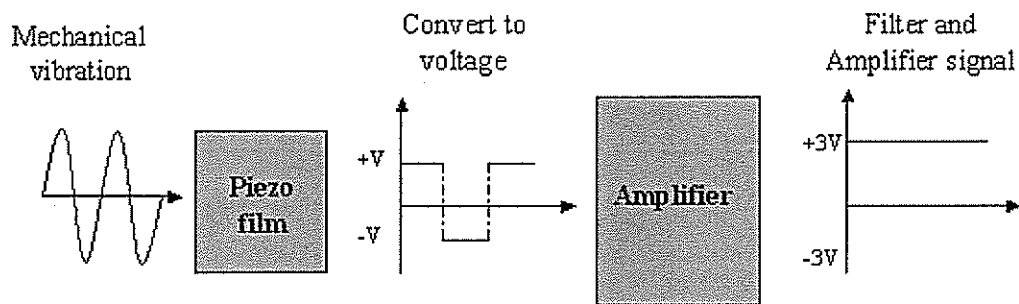
การออกแบบวงจรควบคุมการเปิด-ปิดวาล์วลม จะมีส่วนประกอบดังแสดงในรูปที่ 3.14 ซึ่งจะมีหน้าที่การทำงานดังนี้

- ส่วนรับสัญญาณ Rotation sensor ที่ตำแหน่ง  $IC_2$  และ  $IC_3$  จะใช้ Optic-Sensor เป็นตัวรับสัญญาณจากแมกเนติกเซ็นเซอร์ของหุ่นยนต์ในระหว่างการหมุนไปทางซ้ายหรือทางขวา
- ส่วนรับสัญญาณ Vibration sensor จะอยู่ที่ตำแหน่ง  $V_{cc}$ ,  $V_{dd}$ ,  $G_{nd}$  ซึ่งจะเป็นจุดเชื่อมต่อกับตัวเซ็นเซอร์โดยมี  $V_{dd}$  และ  $G_{nd}$  จะเป็นแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงให้วงจรเซ็นเซอร์ ส่วนที่ตำแหน่ง  $V_{cc}$  จะเป็นตัวรับสัญญาณการสั่นจากเซ็นเซอร์วัดการสั่น
- ส่วนควบคุมโซลินอยด์วาล์ว ที่ตำแหน่ง  $IC_1$  จะเป็นตัวควบคุมการเปิด-ปิดวาล์วลมที่ตำแหน่ง  $D_3$  และ  $D_4$  โดยจะมี  $RG_1$  และ  $RG_2$  ทำหน้าที่เป็นสวิตช์เปิด-ปิดการทำงานเมื่อได้รับสัญญาณจากไมโครคอนโทรลเลอร์
- ส่วนปรับเล็กระบบการทำงาน จะอยู่ที่ตำแหน่ง  $M$  (แบบกำหนดค่าคงที่) และ  $A$  (แบบทำงานอัตโนมัติ) ซึ่งจะมีสวิตช์ในการเล็กระบบ
- ส่วนติดส่งต่อข้อมูลภายนอก จะอยู่ที่ตำแหน่ง  $T_x$ ,  $R_x$ ,  $G_{nd}$ ,  $V_{dd}$  ทำหน้าที่ในการรับส่งข้อมูลผ่านทางพอร์ตอนุกรม

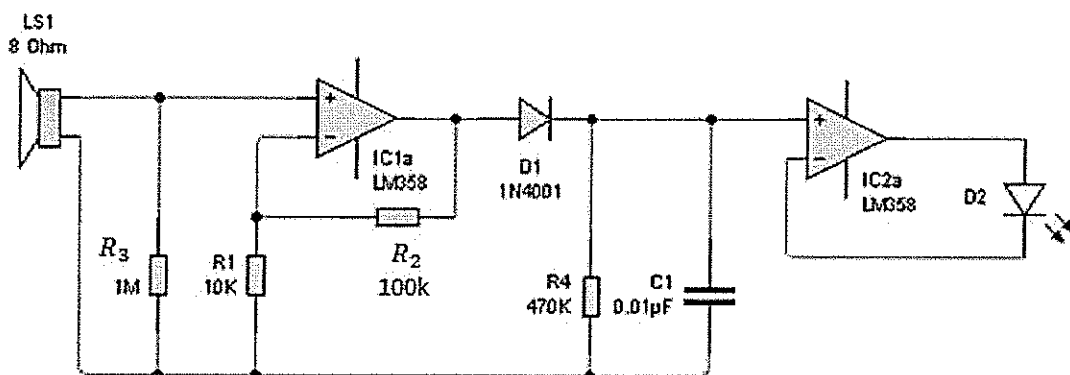


รูปที่ 3.14 หน้าที่และคุณสมบัติของส่วนประกอบวงจรควบคุมการเปิด-ปิดวาล์วลม

การออกแบบเซ็นเซอร์วัดการสั่นขนาดเล็ก จะใช้เพียโซเป็นตัวแปลงสัญญาณจากการสั่นทางกลเป็นไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 3.15 และใช้ออปแอมป์เป็นตัวขยายสัญญาณเพื่อส่งต่อไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งมีส่วนประกอบของวงจรดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.15 การแปลงสัญญาณการสั่นเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า



รูปที่ 3.16 วงจรเซ็นเซอร์ตรวจวัดการสั่นขนาดเล็ก

จากรูปที่ 3.16 วงจรเซ็นเซอร์สามารถคำนวณหาอัตราขยายสัญญาณได้จากสมการที่ 2.17 เมื่อกำหนดให้  $R_1 = 10K$  และ  $R_2 = 100K$  จะได้

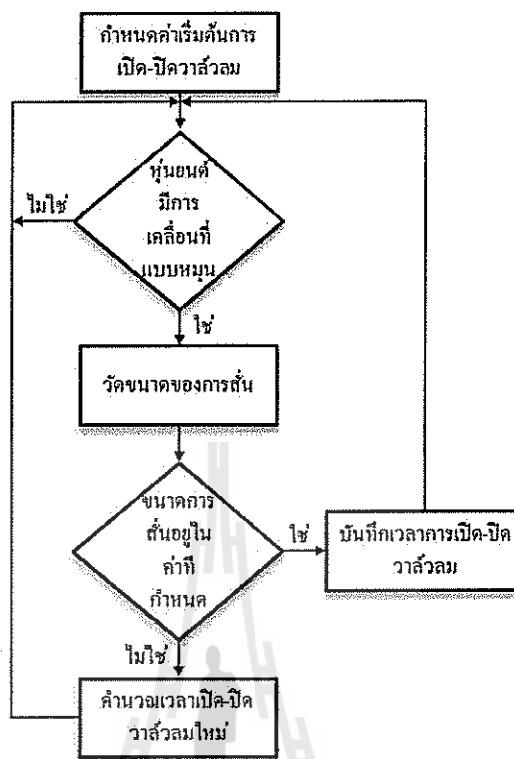
$$V_o = \frac{(10+100)}{10} V_s$$

$$V_o = 11V_s$$

ดังนั้นอัตราขยายจะมีค่าเท่ากับ 11 ของสัญญาณจากการสั่น ซึ่งรายละเอียดของวงจรควบคุมการเปิด-ปิดวาล์วลมและเซ็นเซอร์จะอธิบายอยู่ในภาคผนวก ข

โปรแกรมควบคุมการทำงานของวงจรควบคุมการเปิด-ปิดวาล์วลม การทำงานของโปรแกรมจะทำการตรวจสอบการสั่นทุกครั้งที่แขนจับหุ่นยนต์เคลื่อนที่จนกว่าจะได้ค่าการสั่นและเวลาในการเคลื่อนที่น้อยสุด แต่เมื่อขนาดของการสั่นเปลี่ยนแปลงไปคือมีค่าเพิ่มขึ้น โปรแกรมจะทำการคำนวณหาเวลาในการปล่อยลมใหม่เสมอ โดยมีขั้นตอนการทำงานดังแสดงในรูปที่ 3.17





รูปที่ 3.17 Flow Chart การทำงาน โดยรวมของโปรแกรม

จากรูปที่ 3.17 โปรแกรมการทำงานจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังนี้

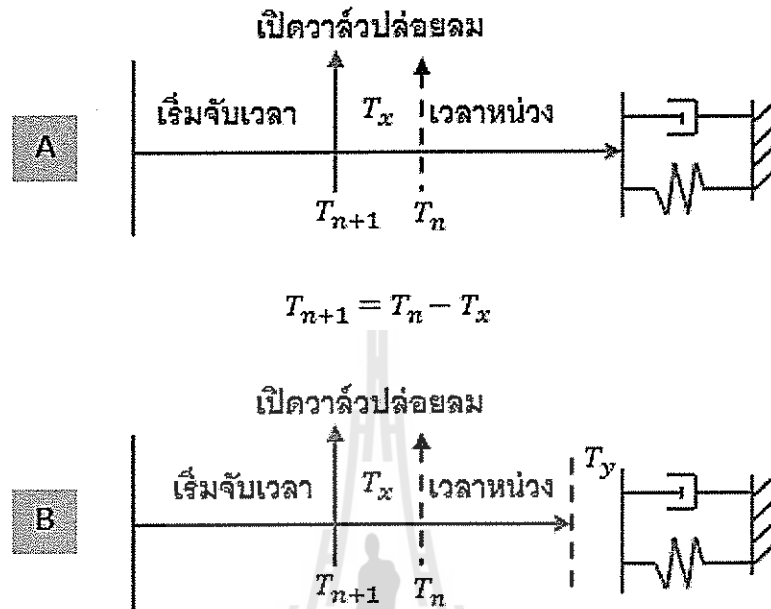
1. ส่วนตรวจสอบการเคลื่อนที่แบบหมุนของแขนจับหุ่นยนต์ จะทำหน้าที่รับสัญญาณจากตัวเซ็นเซอร์ตรวจจับการหมุนของแขนจับหุ่นยนต์ ว่ามีการหมุนไปทางซ้าย หรือทางขวา แล้วทำการเปิด-ปิดวาล์วตามเวลาที่คำนวณได้

2. ส่วนคำนวณหาค่าผลต่างของเวลาเปิดวาล์ว จะทำหน้าที่นำค่าที่ได้จากเซ็นเซอร์วัดการสั่นของแขนหุ่นยนต์มาเปรียบเทียบเพื่อหาผลต่างของเวลาตามแอมพลิจูดการสั่น ซึ่งเป็นค่าที่ใช้คำนวณหาเวลาในการเปิด-ปิดวาล์ว

3. ส่วนคำนวณเวลาเปิด-ปิดวาล์ว จะทำหน้าที่คำนวณหาเวลาเปิด-ปิดวาล์วที่เหมาะสมเพื่อให้เวลาในการเคลื่อนที่และการแอมพลิจูดสั่นน้อยที่สุด

โปรแกรมควบคุมการเปิด-ปิดวาล์วจะต้องมีการกำหนดค่าเริ่มต้นของเวลาในการเปิดวาล์วซึ่งจะใช้เป็นค่าอ้างอิงเบื้องต้นในการวัดการสั่นจากการหมุนครั้งแรก ซึ่งหลังจากนั้นค่าของเวลาในการหน่วงจะเปลี่ยนแปลงไปตามแอมพลิจูดการสั่นโดยขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมจะอยู่ในภาคผนวก ก

หลักการทํางานของโปรแกรมควบคุมการเปิด-ปิดวาล์วลมมีหลักการดังนี้



รูปที่ 3.18 หลังการเลื่อนเวลา

จากรูปที่ 3.18 กำหนดให้

$T_n$  คือ เวลานครึ่งการเปิดการเปิด-ปิดวาล์วลม

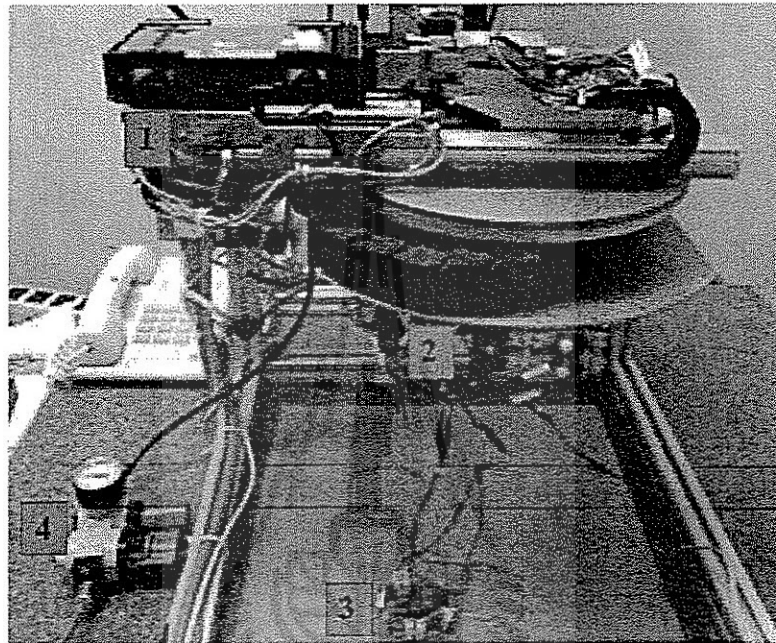
$T_x$  คือ ตัวเลื่อนเวลาหน่วง

$T_y$  คือ ค่าเวลาหน่วงที่ไม่ถึงจนวนการสั้น

ที่ตำแหน่ง A ค่าของ  $T_n$  จะลดลงทุกรอบของการชนกันระหว่างแขนจับของหุ่นยนต์กับจนวนการสั้น ซึ่งจะลดลงตามค่าของ  $T_x$  จนกว่าค่าการสั้นจะได้ตามค่าที่ตั้งเอาไว้ หากค่าของเวลาหน่วงของการเปิดวาล์วไม่ไปถึงตำแหน่งจนวนการสั้นที่ตำแหน่ง B ก็จะมีค่าของ  $T_y$  เข้าไปในกรณีที่มีการสั้นเกินจำนวนครั้งที่กำหนดหลังจากวงจรสามารถควบคุมการสั้นได้ตามข้อกำหนด โปรแกรมจะกลับไปใช้ค่า  $T_n$  ถ้าสุดบวกกับ 30 ซึ่งเป็นค่าที่ทำให้จำนวนรอบในการคำนวณการสั้นน้อยที่สุด และเริ่มต้นเลื่อนเวลาใหม่จนกว่าจะได้แอมพลิจูดการสั้นตามที่กำหนด

การติดตั้งและทดสอบการทํางานของวงจร ทำการติดตั้งวงจรควบคุมการเปิด-ปิดวาล์วลม โซลินอยด์วาล์ว เครื่องปรับแหล่งจ่ายลม และเซ็นเซอร์วัดการสั้นตามรูปที่ 3.19 ซึ่งประกอบไปด้วย

- เซ็นเซอร์วัดการสั่น
- โซลีนอยด์วาล์ว
- ชุดควบคุมการเปิด-ปิดวาล์วลม
- ตัวปรับแหล่งจ่ายลมให้กับหุ่นยนต์



รูปที่ 3.19 การติดตั้งชุดควบคุมการเปิด-ปิดวาล์วลม

การทดสอบการใช้งานของชุดควบคุมการเปิด-ปิดวาล์วลมเพื่อลดการสั่น เมื่อทำการเปิดสวิตช์วงจรควบคุมการเปิด-ปิดวาล์วลม หลอดไฟบนวงจรควบคุมจะติดทั้ง 2 ข้าง หลังจากนั้นสั่งให้หุ่นยนต์หมุนไปทางซ้าย และทางขวา วงจรควบคุมจะทำการเปิด-ปิดวาล์วลมตามเวลาหน่วงที่คำนวณได้ หลังจากนั้นสั่งให้หุ่นยนต์หมุนไปเรื่อย ๆ จนกว่าหลอดไฟของวงจรควบคุมการสั่นทั้ง 2 ดวงดับ ซึ่งแสดงว่าได้เวลาหน่วงที่ทำให้เกิดการสั่นที่เหมาะสมตามที่กำหนดไว้แล้ว ทดลองปรับแรงดันลมจากแหล่งจ่ายลมให้เพิ่มขึ้นจากเดิมจนถึง 8 บาร์ และทดลองซ้ำตามวิธีข้างต้น ซึ่งตัวควบคุมการเปิด-ปิดวาล์วลมจะทำการคำนวณหาเวลาหน่วงใหม่อีกครั้ง

ในงานวิจัยนี้จะทำการทดลองที่แรงดันลม 4, 5, 6, 7 และ 8 บาร์ ซึ่งจะมีการเปรียบเทียบค่าของเวลารวมในการเคลื่อนที่ ขนาดการสั่น และปริมาณการหยิบออกใส่เข้า

ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ที่เพิ่มขึ้นดังตารางที่ 3.1 การเคลื่อนที่ของแขนจับหุ่นยนต์ก่อนและหลังจากการมีการควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่โดยการลดแรงดันลม

ตารางที่ 3.1 ตารางการบันทึกผลการทดลอง

แรงดัน (บาร์)	เวลาหน่วง (ms)	เวลาหมุน 1 รอบ (ms)		ความเร็วก่อน ชน(m/s)		แอมพลิจูดการ ถื่น(mm)		จำนวนหยิบ HDD เพิ่มขึ้น (%)
		ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	
4								
5								
6								
7								
8								



## บทที่ 4

### วิเคราะห์การสั้นก่อนและหลังควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่ ของแขนจับหุ่นยนต์

การวิเคราะห์ผลการทดลองการสั้นของแขนจับหุ่นยนต์ที่ใช้แรงดันลมในการเคลื่อนที่ โดยจะใช้แรงดันลมที่ 4, 5, 6, 7 และ 8 บาร์ เพื่อหาความสัมพันธ์ของเวลาในการเปิด-ปิดวาล์วลมเพื่อลดความเร็วในการเคลื่อนที่ของแขนจับหุ่นยนต์โดยให้มีแอมพลิจูดการสั้น ได้ตามที่กำหนด ซึ่งจะแบ่งการทดลองออกเป็น 5 ขั้นตอนดังนี้

#### 4.1 วิเคราะห์ผลการตอบสนองทางพลวัตโดยการลดความเร็วในการเคลื่อนที่

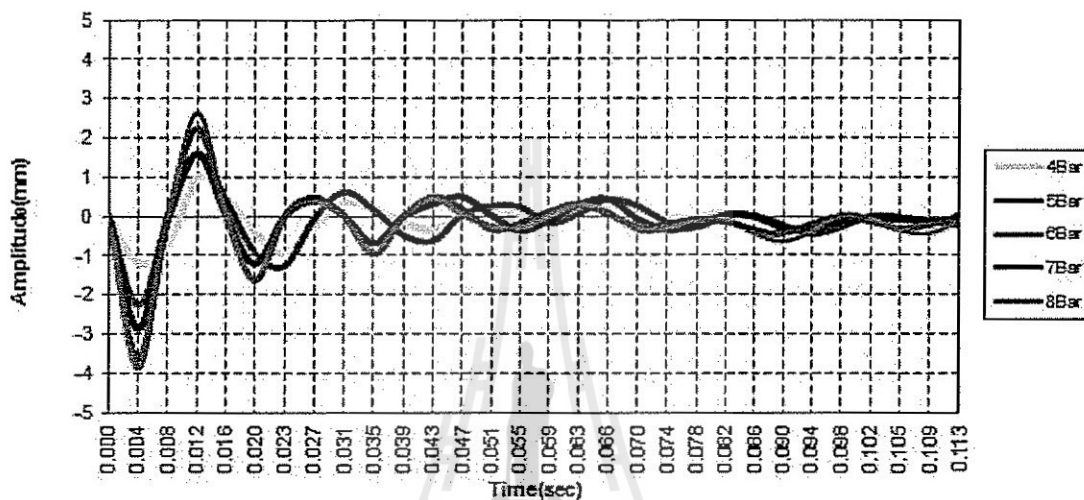
จากสมการที่ 1.4 การลดแอมพลิจูดการสั้นทำได้โดยการลดความเร็วในการเคลื่อนที่ของแขนจับหุ่นยนต์ก่อนชนกับจนวนการสั้น โดยการลดแรงดันลมในการเคลื่อนที่ ซึ่งจะกำหนดให้ค่าของเวลาหน่วงในการลดแรงดันลมมีคงที่ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 จะได้ว่า การกำหนดเวลาหน่วงให้คงที่ไม่สามารถควบคุมการสั้นเมื่อแรงดันลมเกิดการเปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 4.1 แอมพลิจูดการสั้นเมื่อลดความเร็วในการเคลื่อนที่

แรงดันลม (บาร์)	เวลาเคลื่อนที่		แอมพลิจูด (mm)
	1 รอบ(ms)	เวลาหน่วง (ms)	
3	2200	0	0.092
	2250	0	0.076
4	2100	0	1.178
	2200	350	0.015
5	1990	0	2.274
	2100	350	0.097
6	1932	0	2.877
	2064	350	0.189
7	1908	0	3.648
	1995	350	0.328
8	1866	0	3.902
	1980	350	0.585

#### 4.2 วัดขนาดของการสั่นก่อนติดตั้งชุดควบคุมความเร็วของแขนจับหุ่นยนต์

การวัดขนาดของการสั่นของแขนจับหุ่นยนต์จะวัดในแนวระนาบเดียวกันกับการชนกันระหว่างแขนจับหุ่นยนต์กับฉนวนการสั่น ซึ่งการวัดแอมพลิจูดการสั่นของแขนจับหุ่นยนต์ที่แรงดันลม 4, 5, 6, 7 และ 8 บาร์ จะใช้ Dynamic Signal Analyzer ได้ผลดังนี้



รูปที่ 4.1 แอมพลิจูดการสั่น โดยไม่ลดความเร็วในการเคลื่อนที่ของแขนจับหุ่นยนต์

จากรูปที่ 4.1 ขนาดของการสั่นจะเพิ่มขึ้นตามระดับของแรงดันลมที่ใช้ในการเคลื่อนที่ ซึ่งเราสามารถคำนวณหาค่า ความถี่ของการสั่น ( $\omega_d$ ) ความถี่ธรรมชาติ ( $\omega_n$ ) และอัตราส่วนความหน่วง ( $\zeta$ ) ของแขนจับหุ่นยนต์ โดยใช้สมการที่ 2.15 – 2.18 ที่แรงดันลม 4, 5, 6, 7 และ 8 บาร์ ได้ผลดังนี้

ตารางที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์ของระบบที่ได้จากการคำนวณ

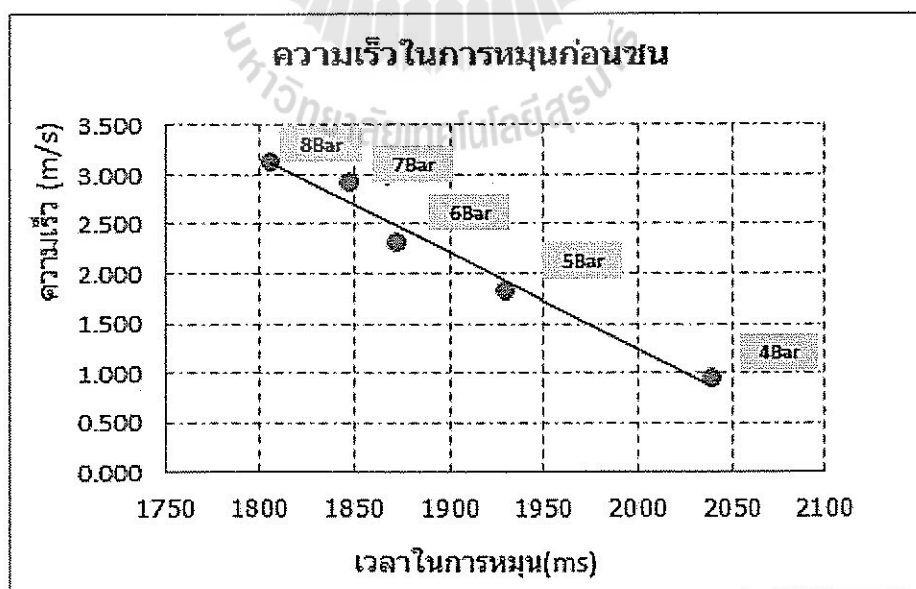
แรงดันลม (บาร์)	แอมพลิจูด (mm)	$t_0$	$\omega_d$	$\omega_n$	$\zeta$
4	1.17841	0.04	321.54	324.32	0.1307
5	2.27413	0.04	321.54	324.65	0.1380
6	2.87743	0.04	321.52	324.52	0.1357
7	3.64801	0.04	321.53	324.13	0.136
8	3.90173	0.04	320.89	323.94	0.1368

จากตารางที่ 4.2 เนื่องจากค่าอัตราส่วนความหน่วงมีค่า  $< 1$  แสดงว่าระบบเป็นการสั่นแบบหน่วงต่ำกว่าปกติ ดังนั้นการคำนวณหาค่าความเร็วก่อนชนของแขนจับหุ่นยนต์จะใช้สมการที่ 2.28 และ 2.26 ซึ่งจะได้ค่าความเร็วที่แรงดันลมต่าง ๆ ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ความเร็วก่อนชนและเวลาในการเคลื่อนที่ของการหมุนใน 1 รอบ

แรงดันลม (บาร์)	เวลาหมุน 1 รอบ (ms)	ความเร็วก่อนชน (m/s)
4	2040	0.936
5	1930	1.824
6	1872	2.300
7	1848	2.918
8	1806	3.118

จากตารางที่ 4.3 จะได้ว่าค่าของความเร็วขณะที่แขนจับหุ่นยนต์เข้าชนกับตัวลดแรงกระแทกจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วในการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นตามแรงดันลม โดยเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่แบบหมุนใน 1 รอบ จะมีค่าลดลง ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ของ ความเร็วก่อนชนกับเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของการหมุนใน 1 รอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ความเร็วก่อนชนกับเวลาในการหมุน 1 รอบ

#### 4.3 ค่าความสัมพันธ์ของผลต่างเวลากับขนาดของการสั้น

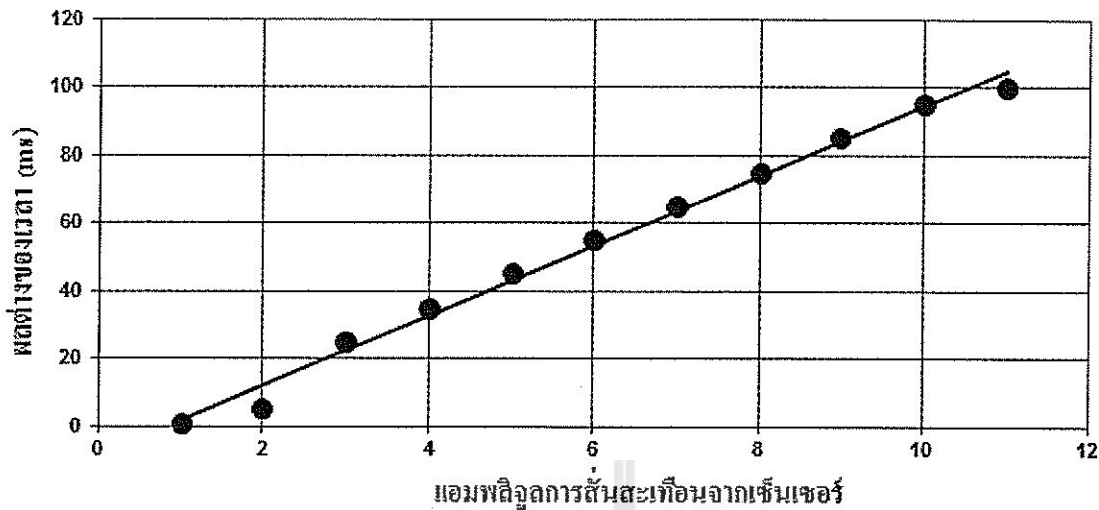
ค่าผลต่างของเวลาจะเป็นค่าที่บ่งบอกถึงขนาดการสั้นของแขนจับหุ่นยนต์กับผลต่างของเวลาในการเปิด-ปิดวาล์วลม ซึ่งจะเป็นตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณหาเวลาในการเปิด-ปิดวาล์วลมจากการทดลองปรับค่าผลต่างของเวลาจะได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลต่างของเวลากับสัญญาณการสั้นจากเซ็นเซอร์วัดการสั้น

ค่าที่ไมโครคอนโทรลเลอร์อ่านได้	ผลต่างของเวลา (ms)
1	1
2	5
3	25
4	35
5	45
6	55
7	65
8	75
9	85
10	95
11	100

จากตารางที่ 4.4 การหาค่าผลต่างของเวลาจะใช้หลักการสุ่มตัวเลขตามแอมพลิจูดการสั้นเพื่อหาค่าเวลาที่เหมาะสมที่จะทำให้จำนวนครั้งในการคำนวณหาเวลาเปิด-ปิดวาล์วลมน้อยที่สุดและให้ขนาดแอมพลิจูดการสั้นได้ตามขอบเขตที่กำหนด ค่าที่ไมโครคอนโทรลเลอร์อ่านได้จะเป็นเลขฐานสองซึ่งสามารถแปลงกลับมาในหน่วยโวลต์ได้จากตารางที่ 2.12 ซึ่งค่าแรงดันสูงสุดที่วัดได้จะมีค่าไม่เกินแรงดันอ้างอิงคือ 5 โวลต์ โดยจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดการสั้นจากเซ็นเซอร์วัดการสั้นกับผลต่างของเวลาในการคำนวณหาเวลาเปิด-ปิดวาล์วลมดังแสดงในรูปที่ 4.3





รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างเวลากับแอมพลิจูดการสั่น

จากรูปที่ 4.3 สามารถหาสมการของแอมพลิจูดการสั่นกับผลต่างของเวลา ได้ดังนี้

$$y = 10.318x - 8.6364 \quad (4.1)$$

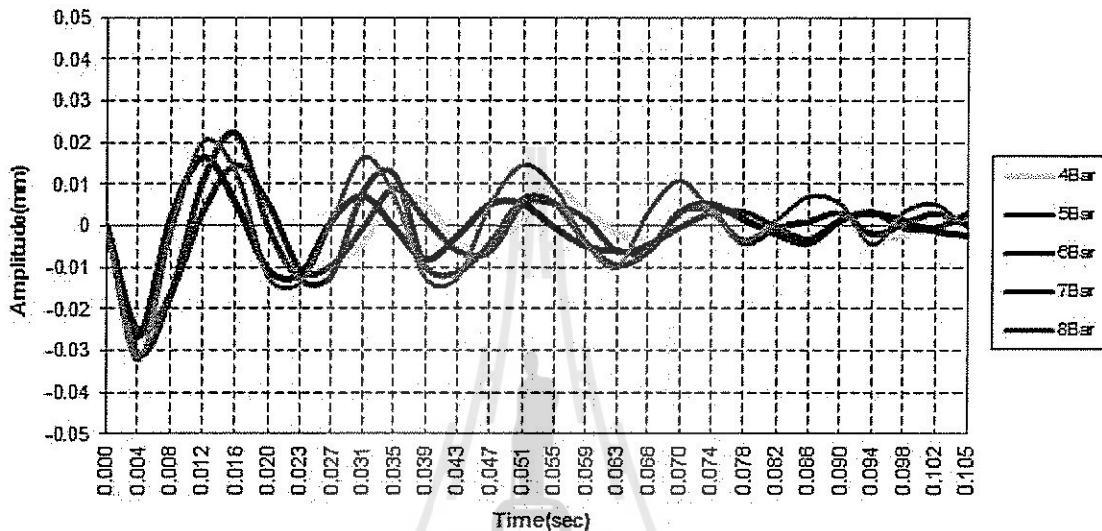
สมการที่ 4.1 จะเป็นตัวเลื่อนเวลาที่ใช้ในการคำนวณหาเวลาเปิดวาล์วตามทฤษฎีการเลื่อนเวลาที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 ซึ่งการปรับค่าของตัวเลื่อนเวลานี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของ เซ็นเซอร์ ด้วย ดังนั้นหากมีการเปลี่ยนชนิดของเซ็นเซอร์วัดการสั่น ก็จะต้องทำการหาค่าเลื่อนเวลาในตารางที่ 4.4 ใหม่ทั้งหมด การกำหนดขอบเขตหรือช่วงเวลาของการสั่นจะมีความสำคัญมากเพราะหากกำหนดค่าที่ไม่เหมาะสมจะทำให้เกิดการคำนวณไม่รู้จบซึ่งก็คือตัวโปรแกรมไม่สามารถหาเวลาเปิด-ปิดวาล์วที่ทำให้แอมพลิจูดการสั่นได้ตามขอบเขตที่กำหนด ซึ่งจากการทดลองได้แบ่งช่วงการหาผลต่างของเวลาออกเป็น 2 ช่วง คือ

- ช่วงที่ไม่ต้องการความละเอียดจะอยู่ในช่วงการสั่นที่ 5-11 คือมีแอมพลิจูดการสั่นที่รุนแรง
- ช่วงที่ต้องการความละเอียดจะอยู่ในช่วง 1-4 คือมีแอมพลิจูดการสั่นที่ไม่รุนแรง

การสั่นจากภายนอกระบบจะมีผลต่อการวัดแอมพลิจูดการสั่นที่ผิดพลาดได้ดังนั้นการเลือกใช้เซ็นเซอร์ต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับรูปแบบการสั่น

#### 4.4 วัดขนาดของการสั่นหลังจากติดตั้งชุดควบคุมความเร็วของแขนจับหุ่นยนต์

การวัดขนาดของการสั่นหลังจากมีการติดตั้งชุดควบคุมความเร็วในการลดแรงดันลมก่อนที่แขนจับหุ่นยนต์เข้าชนกับฉนวนการสั่นที่แรงดันลม 4, 5, 6, 7 และ 8 บาร์โดยจะใช้ Dynamic Signal Analyzer ได้ผลดังนี้



รูปที่ 4.4 แอมพลิจูดการสั่นโดยปรับความเร็วในการเคลื่อนที่ของแขนจับหุ่นยนต์

จากรูปที่ 4.4 แอมพลิจูดการสั่นจะเพิ่มขึ้นตามแรงดันลมที่ใช้ในการเคลื่อนที่ ซึ่งเราสามารถคำนวณหาค่า ความถี่ของการสั่น ( $\omega_d$ ) ความถี่ธรรมชาติ ( $\omega_n$ ) และอัตราส่วนความหน่วง ( $\zeta$ ) ของแขนจับหุ่นยนต์ โดยใช้สมการที่ 2.15 – 2.18 ที่แรงดันลม 4, 5, 6, 7 และ 8 บาร์ได้ผลดังนี้

ตารางที่ 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์ของระบบที่ได้จากการคำนวณ

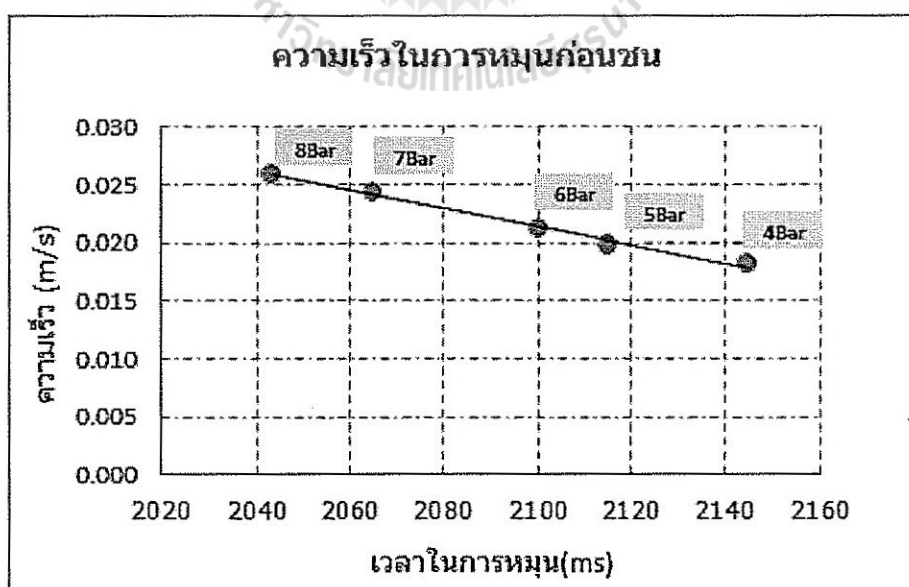
แรงดันลม (บาร์)	แอมพลิจูด (mm)	$t_0$	$\omega_d$	$\omega_n$	$\zeta$
4	0.023	0.04	321.540	324.262	0.131
5	0.025	0.04	321.540	324.464	0.135
6	0.027	0.04	321.540	324.427	0.132
7	0.031	0.04	321.524	324.333	0.133
8	0.032	0.04	321.524	324.283	0.136

จากตารางที่ 4.4 เนื่องจากค่าอัตราส่วนความหน่วงมีค่า  $< 1$  แสดงแดงว่าระบบเป็นการสั่นแบบหน่วงต่ำกว่าปกติ ดังนั้นการคำนวณหาความเร็วก่อนชนของแขนจับหุ่นยนต์จะใช้สมการที่ 2.28 และ 2.26 ซึ่งจะได้ค่าความเร็วที่แรงดันลมต่าง ๆ ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ความเร็วก่อนชนและเวลาในการเคลื่อนที่ของการหมุนใน 1 รอบ

แรงดันลม (บาร์)	เวลาหมุน 1 รอบ (ms)	ความเร็วก่อนชน (m/s)
4	2145	0.018
5	2115	0.020
6	2100	0.021
7	2065	0.024
8	2043	0.026

จากตารางที่ 4.5 จะได้ว่าค่าของความเร็วขณะที่แขนจับหุ่นยนต์เข้าชนกับจำนวนการสั่นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อความเร็วในการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นตามแรงดันลม โดยเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่แบบหมุนใน 1 รอบ จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการเคลื่อนที่ของแขนจับหุ่นยนต์แบบไม่มีการควบคุมความเร็ว ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วก่อนชนกับเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของหมุนใน 1 รอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ความเร็วก่อนชนกับเวลาในการหมุน 1 รอบ

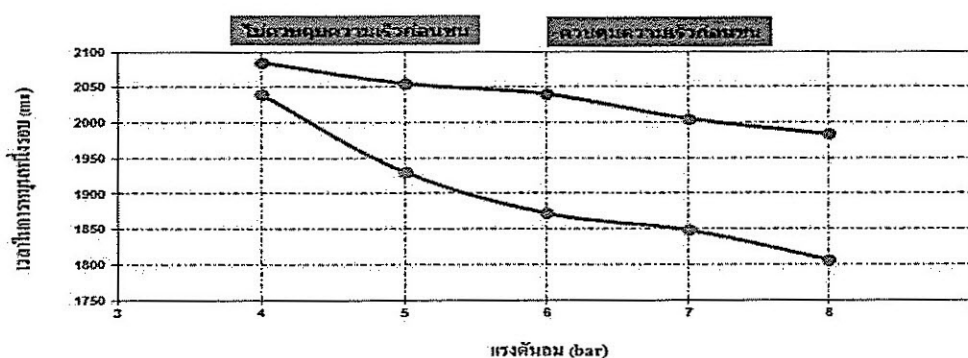
#### 4.5 เปรียบเทียบก่อนและหลังติดตั้งชุดควบคุมความเร็วและสมการการเคลื่อนที่

จากการวัดแอมพลิจูดสั้นของแกนจับหุ่นยนต์จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการลดความเร็วก่อนชนของแกนจับหุ่นยนต์ในการเคลื่อนที่ แอมพลิจูดการสั้นจะมีค่าน้อยกว่า การที่ไม่ลดความเร็วก่อนชนซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 2.28 แต่ความเร็วที่ใช้ในการเคลื่อนที่ใน 1 รอบจะใช้เวลานานกว่าเพราะต้องเพิ่มเวลาในการหน่วง (ลดความเร็วโดยการลดแรงดันลม) แต่เมื่อเปรียบเทียบปริมาณในการหีบฮาร์ดดิสก์ใครที่มีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่มีแอมพลิจูดของการสั้นอยู่ในเกณฑ์ที่รับได้

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบก่อนและหลังควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่ของแกนจับหุ่นยนต์

แรงดัน (บาร์)	เวลาหน่วง (ms)	เวลาหมุน 1 รอบ (ms)		ความเร็วก่อน ชน(m/s)		แอมพลิจูดการ สั้น(mm)		จำนวนหีบ HDD เพิ่มขึ้น (%)
		ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	
4	295-305	2040	2145	0.936	0.018	1.178	0.023	2.6
5	385-395	1930	2115	1.824	0.020	2.274	0.025	4.0
6	455-465	1872	2100	2.300	0.021	2.877	0.027	4.8
7	470-480	1848	2065	2.918	0.024	3.648	0.031	6.5
8	480-490	1806	2043	3.118	0.026	3.901	0.032	7.7

จากตารางที่ 4.6 จะสามารถหาความสัมพันธ์ของเวลาในการหมุน 1 รอบของแกนจับหุ่นยนต์ระหว่างไม่มีการลดความเร็วก่อนชนกับมีการลดความเร็วก่อนชนได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ซึ่งค่าของเวลาในการเคลื่อนที่แบบลดความเร็วจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อค่าของแรงดันลมเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบเวลาในการเคลื่อนที่ 1 รอบ

จากตารางที่ 4.2 และ 4.4 จะเห็นได้ว่าค่าของอัตราส่วนความหน่วงจะมีค่า  $< 1$  ซึ่งจะเป็นการสั่นแบบอิสระโดยมีความหน่วงต่ำกว่าปกติ (Underdamping) ดังนั้น จะได้สมการการเคลื่อนที่ของแขนจับหุ่นยนต์ เมื่อกำหนดให้มวลของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์มีขนาดเท่ากับ 0.5 กิโลกรัม จากสมการที่ 2.28 คือ

$$x(t) = \frac{\hat{F}}{m\omega_d} e^{-\zeta\omega_n t} \sin \omega_d t$$

จากผลการทดลองเมื่อ

$$\omega_d \approx 321.50$$

$$\omega_n \approx 324.40$$

$$\zeta \approx 0.14$$

$$m = 0.50$$

จากสมการที่ 2.26 ค่าของ  $\hat{F}$  จะเพิ่มขึ้นตามความเร็วก่อนชนของแขนจับหุ่นยนต์ ดังนั้น เมื่อแทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 2.8 จะได้สมการการเคลื่อนที่ของแขนจับหุ่นยนต์ดังนี้

เมื่อ  $\hat{F} = mv_0$  แทนลงในสมการที่ 2.8 จะได้

$$x(t) = \frac{mv_0}{m\omega_d} e^{-\zeta\omega_n t} \sin \omega_d t \quad (4.1)$$

จากสมการที่ 4.1 สมการการเคลื่อนที่จะขึ้นอยู่กับความเร็วต้นของแขนจับหุ่นยนต์ก่อนชนกับตัวคูดับแรง ดังนั้นจะได้ผลเฉลยของสมการการเคลื่อนที่ของแขนจับหุ่นยนต์ในกระบวนการหยิบออก-ใส่เข้าฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ดังนี้

$$x(t) = \frac{v_0}{321.50} e^{-45.42t} \sin 321.50t \quad (4.2)$$

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาและวิเคราะห์ผลการตอบสนองทางพลวัตของแขนจับหุ่นยนต์ในกระบวนการหยิบออก-ใส่เข้าฮาร์ดดิสก์โครฟีของการทดสอบฮาร์ดดิสก์โครฟีก่อนจะจำหน่ายสู่ท้องตลาด ซึ่งผลการทดลองได้ศึกษาและพิจารณาดังนี้

- ศึกษาผลการตอบสนองทางพลวัตของแขนจับหุ่นยนต์ในการเคลื่อนที่โดยพิจารณาแรงดันลมช่วงที่ 4 - 8 บาร์
- ศึกษาความสัมพันธ์ของแอมพลิจูดการสั่นกับผลต่างของเวลาที่จะใช้ในการคำนวณหาเวลาเปิดวาล์วปล่อยลมเพื่อลดความเร็วในการเคลื่อนที่ของแขนจับหุ่นยนต์ และออกแบบชุดควบคุมความเร็วของแขนจับหุ่นยนต์แบบอัตโนมัติ

โดยที่วัตถุประสงค์ของงานวิจัยจะมุ่งเน้นไปในแนวทางออกแบบชุดควบคุมความเร็ว เพื่อจะได้นำไปใช้ได้ในงานจริงในกระบวนการหยิบออก-ใส่เข้าฮาร์ดดิสก์โครฟีให้มีความสามารถเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้นและมีแอมพลิจูดการสั่นอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

#### 5.1 สรุปผลงานวิจัย

ผลการทดลองก่อนและหลังติดตั้งชุดควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่แบบหมุนของแขนจับหุ่นยนต์ได้ผลดังนี้

- ผลการตอบสนองทางพลวัตของแขนจับหุ่นยนต์ก่อนติดตั้งชุดควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่ของการหมุนซ้าย-ขวาในช่วงความดันลม 4-8 บาร์ จะมีแอมพลิจูดการสั่นอยู่ในช่วง  $1.178 - 3.902 \text{ mm}$  โดยใช้เวลาในการหมุน 1 รอบอยู่ในช่วง  $2040 - 1806 \text{ ms}$  และมีความเร็วในการเคลื่อนที่ก่อนกระทบกับฉนวนการสั่นอยู่ในช่วง  $0.936 - 3.118 \text{ m/s}$
- การออกแบบชุดควบคุมความเร็วเพื่อลดแอมพลิจูดการสั่นของแขนจับหุ่นยนต์ก่อนกระทบกับฉนวนการสั่นซึ่งสามารถทำให้แขนจับหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้เร็วขึ้นและมีแอมพลิจูดการสั่นอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้
- ผลการตอบสนองทางพลวัตของแขนจับหุ่นยนต์หลังติดตั้งชุดควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่ของการหมุนซ้าย-ขวาในช่วงความดันลม 4-8 บาร์ จะมีแอมพลิจูดการสั่นอยู่ในช่วง  $0.023 - 0.032 \text{ mm}$  โดยใช้เวลาในการหมุน 1 รอบอยู่ในช่วง  $2145 - 2043 \text{ ms}$  และมีความเร็วใน

การเคลื่อนที่ก่อนกระแทกกับจำนวนการสั่นอยู่ในช่วง  $0.018 - 0.026 \text{ m/s}$  ซึ่งสามารถทำให้แขนจับหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น โดยที่ขนาดของแอมพลิจูดการสั่นมีค่าน้อยกว่า  $0.09 \text{ mm}$  และเวลาในการเคลื่อนที่ 1 รอบมีค่าน้อยกว่า  $2200 \text{ ms}$

เมื่อเปรียบเทียบแรงดันลม 3 บาร์ ชุดควบคุมสามารถควบคุมการหมุนของแขนจับหุ่นยนต์ให้หมุนซ้าย-ขวาใน 1 รอบ ได้เร็วขึ้น  $11.17\%$  และแอมพลิจูดการสั่นมีค่าน้อยกว่า  $0.09 \text{ mm}$  ที่ความดันลม 8 บาร์ ซึ่งทำให้การหยิบออก-ใส่เข้า ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เพิ่มขึ้น  $7.7\%$  ใน 1 ชั่วโมง

## 5.2 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยต่อไป

จากการทดลองจะเห็นได้ว่าค่าของแอมพลิจูดการสั่นของแขนจับหุ่นยนต์หลังจากติดตั้งชุดควบคุมความเร็วมีค่าน้อยกว่า  $0.09 \text{ mm}$  แต่เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่จะมีค่ามากกว่าการเคลื่อนที่ของแขนจับหุ่นยนต์แบบไม่ติดตั้งชุดควบคุมความเร็ว ดังนั้นการที่จะลดเวลาในการเคลื่อนที่ให้น้อยลงจะต้องให้แอมพลิจูดการสั่นมีค่าเข้าใกล้  $0.09 \text{ mm}$  ให้มากที่สุดซึ่งสามารถแก้ไขตัวเลื่อนเวลาได้จากสมการที่ 4.1 คือการปรับช่วงเวลาผลต่างของเวลาในแอมพลิจูดการสั่นที่คิดกันให้มีค่าน้อยลง แต่การปรับช่วงเวลาดังกล่าวจะมีผลกระทบต่อจำนวนรอบของการคำนวณที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งต้องคำนึงถึงจุดนี้ด้วย

จากงานวิจัยในเบื้องต้นสามารถทำการพัฒนาระบบต่อไปได้ดังนี้

1. วิเคราะห์ค่าเสื่อมสภาพของจำนวนการสั่น การเสื่อมสภาพของสายพาน และเบร็ริงที่ใช้ในการหมุน จากเวลาหน่วงของการเปิด-ปิดวาล์วลมที่เปลี่ยนไป
2. เชื่อมต่อระบบเข้ากับระบบเครือข่าย (Network) เพื่อสามารถตรวจสอบความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ของแขนจับหุ่นยนต์ได้ในขณะทำงาน
3. ใช้กับเซ็นเซอร์ที่สามารถวัดการสั่นที่วัดได้ทั้ง 3 แกนเพื่อไปใช้กับหุ่นยนต์ที่มีการเคลื่อนที่มากกว่า 1 แกน

## รายการอ้างอิง

- ก่อเกียรติ บุญชูกุล, สมศักดิ์ ไชยะภินันท์ และชัยโรจน์ คุณพานิชกิจ. (2539).การวิเคราะห์การ  
สั่นสะเทือน.กรุงเทพฯ:สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย)-ญี่ปุ่น
- จิระพล ศรีเสริฐผล และ สมใจ สุนทรสกุล. (2552). การวิเคราะห์การสั่นของชุดขนถ่ายชิ้นงานที่มี  
ผลต่อชิ้นงานหัวอ่านและบันทึกข้อมูล ตามสถานะการใช้งานจริง. การประชุมวิชาการ  
ข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม. ขอนแก่น.
- เดชฤทธิ์ มณีธรรม และ ดำรง เต็มราม ,(2554). คัมภีร์ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC (Microcontroller  
PIC).เคทีพี คอมพิวเตอร์ คอนซัลท์,บจก.
- นภัทร วัจนเทพินทร์ (2541). อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ปทุมธานี .บริษัทสกายบุ๊ก จำกัด ..
- หทัยเทพ วงศ์สุวรรณ (2550), การตรวจสอบเครื่องจักรกลจากการสั่นสะเทือน วารสาร:Mechanical  
Technology Magazine ฉบับที่ 6 เล่มที่ 69 หน้าที่ 80-83.
- สุระ วุฒิพรหม(2554),การเคลื่อนที่เป็นวงกลม [ออนไลน์].ได้จาก <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/ap-physics1/index.html>.
- สมคิด ขงหอม,สุชัย นิจรัตน์ (2550), ทฤษฎีนิวมเมติกส์[ออนไลน์].ได้จาก <http://mte.kmutt.ac.th/elearning/Plc/unit.htm>.
- ไทยไมโครตรอน,หลักการทํางานไทม์เมอร์ของ PIC ไมโครคอนโทรลเลอร์ [ออนไลน์] ได้จาก  
[http://www.thaimicrotron.com/CCS-628/Timer/Timer0\\_1.htm](http://www.thaimicrotron.com/CCS-628/Timer/Timer0_1.htm).
- ประดิษฐ์ หมู่เหมือนสอง และ สุขฐาน หรรษสุข(2550)วิเคราะห์การสั่นสะเทือน.กรุงเทพฯ.
- มนตรี พรุณเกษต(2542)วิศวกรรมการสั่นสะเทือน.( (Vibration Engineering).กรุงเทพฯ.
- Jiraphon Srisertpol, Sumetee Theesungnern and Adisol Boonmag (2008) “Testing of a  
Miniature Shock Absorber Base on Operating Situation to Obtain Its Parameters”,  
in Proceedings of the Industrial Engineering Network Conference 2008, p.921-926.





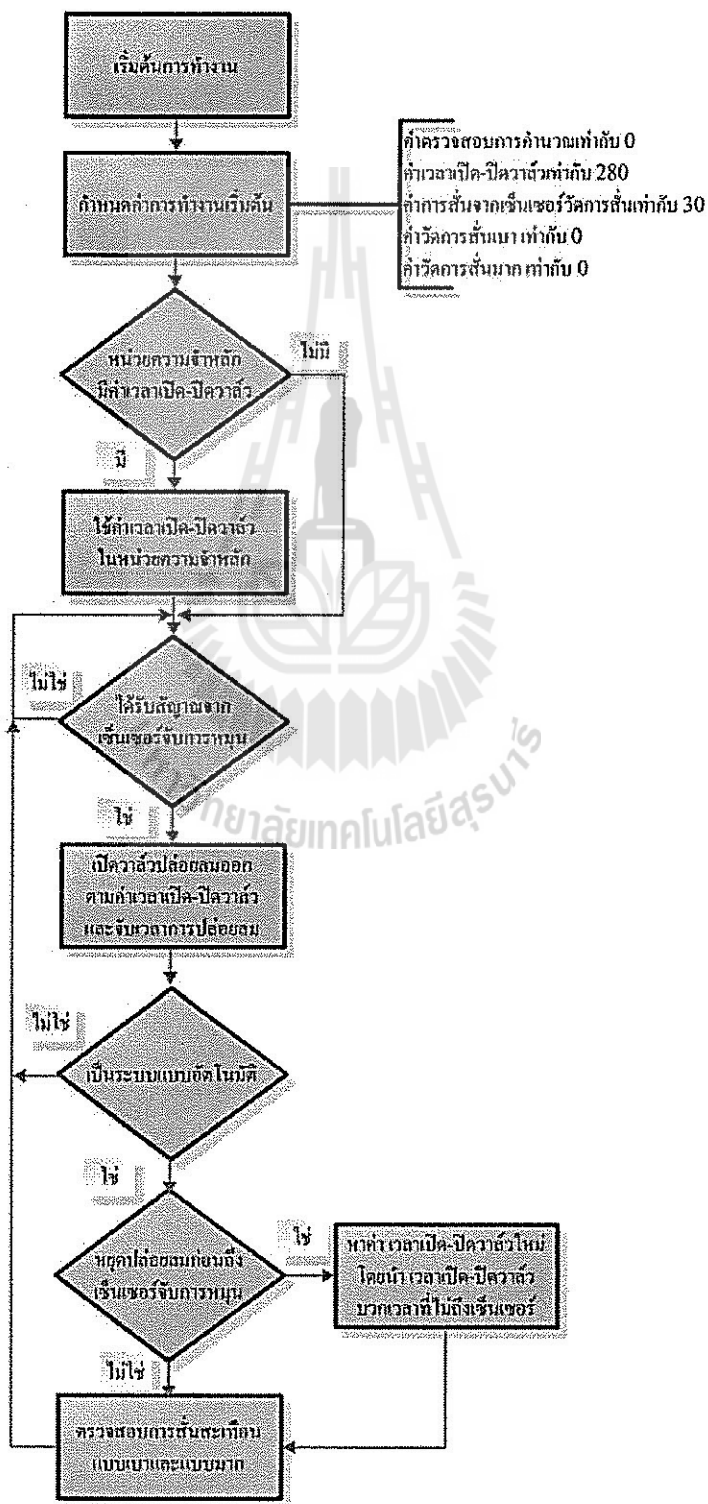
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

โปรแกรมควบคุมการเปิด-ปิดวาล์วลม

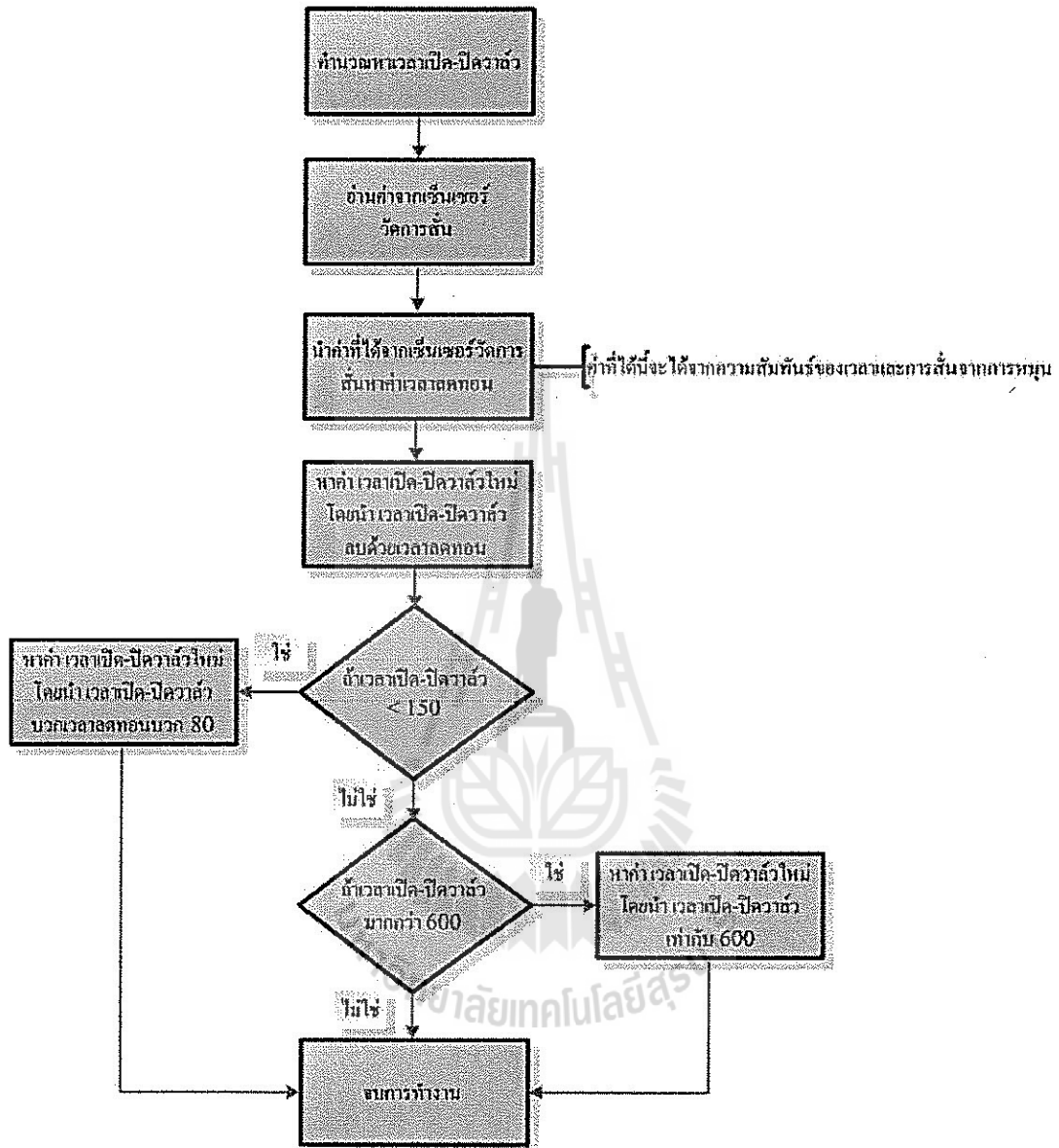
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ก.1 Flow Chart การทำงานของโปรแกรมควบคุมวาล์วลม การทำงานของวงจรควบคุมวาล์วลม แบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ

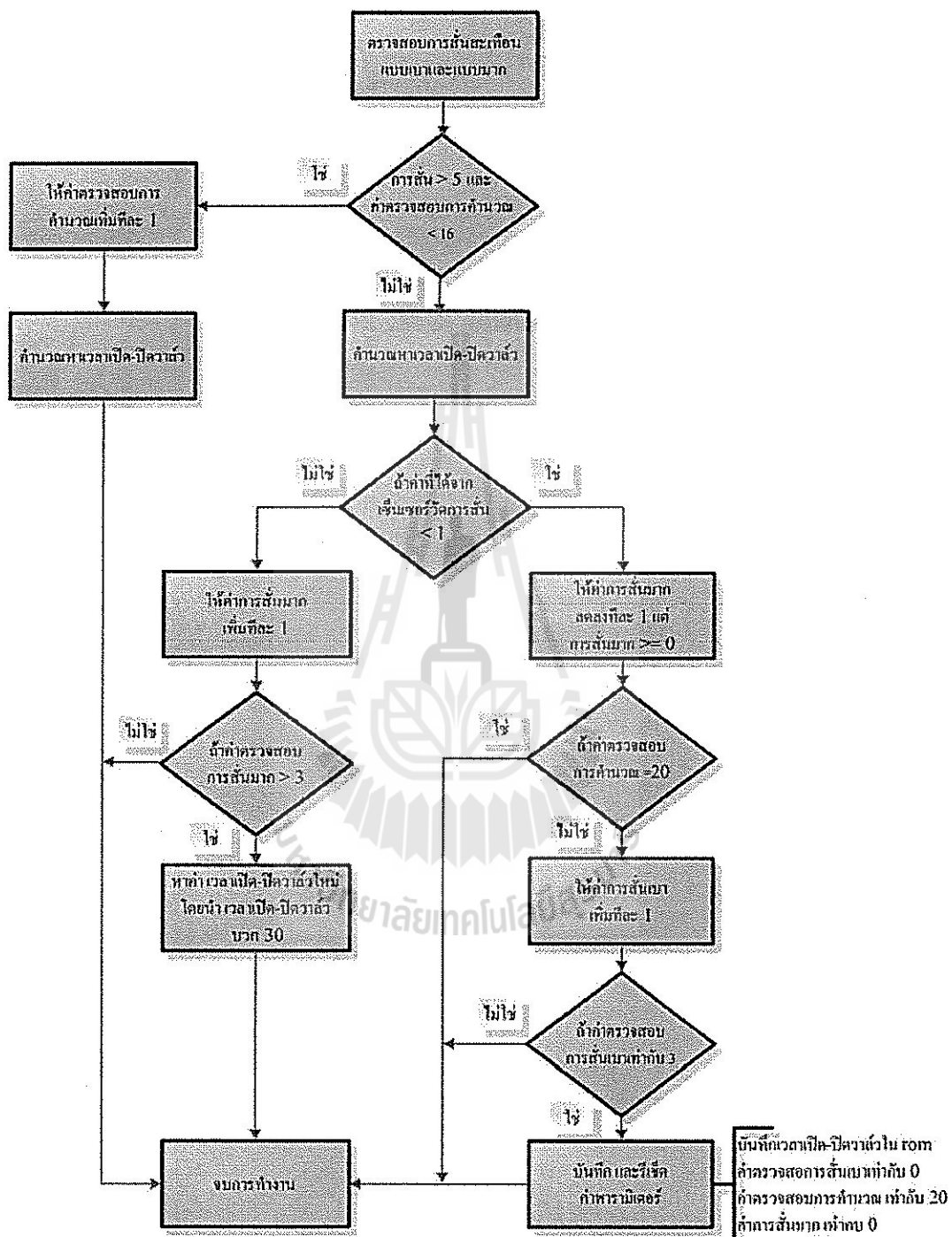
ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมควบคุมการเปิด-ปิดวาล์ว



### โปรแกรมในการคำนวณเวลาเปิด-ปิดวาล์ว



โปรแกรม ตรวจสอบการสิ้นสะท้อนหลังการหมุน



## ก.2 โปรแกรมควบคุมการเปิด-ปิดวาล์วลม

โปรแกรมควบคุมวาล์วจะประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือ โปรแกรมควบคุมเปิด-ปิดวาล์ว และ โปรแกรมกำหนดค่าใน รีจิสเตอร์ของไมโครคอนโทรลเลอร์

### โปรแกรมควบคุมการเปิด-ปิด วาล์ว

```
#include "control_valve.h"
#rom 0x2100={0,1,2,3,4}
byte SENSOR_A =PIN_A3;
byte SOLINOID_A =PIN_B7;

byte SENSOR_B =PIN_A4;
byte SOLINOID_B =PIN_B6;

int8 vstep = 0;
int8 save_vstep = 0;
int vibra_input=0;
int CMCON7_changed;
int voltage=0;
int viba_check=0;
int rl_rotage=0;

long TmSum1=0;
long TmSum0=0;
long TmSum2=0;
long time_defaultA=280;
long time_defaultB=280;

int lp =0;
int startA=0;
int startB=0;
int rotageA=0;
int rotageB=0;
int getTime_Obset=0;
int saveVibration=30;
int saveVibrationA=30;
int saveVibrationB=30;
int countA =0;
```

```

int countB=0;
int checkA=0;
int checkB=0;
int ccA=0;
int ccB=0;
int addTionA=0;
int addTionB=0;
int addSA=0;
int addSB=0;
int addA=0;
int addB=0;

int rrr=0;
int lll=0;
int srl=0;

//***** Inrtrupt Timcr 0, 1, 2 *****
#INT_TIMER0
void INTM0(void)
{
  TmSum0=TmSum0+1;
  if(TmSum0==700)
  {
    output_bit(SOLINOID_A,0);
    output_bit(SOLINOID_B,0);
    getTime_Obset=1;
  }
  set_timer0(252);
}

#INT_TIMER1
void INTTMI(void)
{
  TmSum1=TmSum1+1;
  set_timer1(65411);
}

#INT_TIMER2

```

```
void INTTM2(void)
{
    TmSum2=TmSum2+1;
    set_timer2(0);
}

void Write_eepromf(int adrA,int adrB,long data_delay)
{
    int x_loop=0;
    int y_loop=0;
    for(y_loop=0;y_loop<100;y_loop++){

        if(data_delay-200 > 254){
            data_delay=data_delay-200;
            x_loop=x_loop+1;
        }else if(data_delay-200<=254){
            if(data_delay-200 >=0){
                data_delay=data_delay-200;
                x_loop=x_loop+1;}
            write_eeprom(adrA,data_delay);
            write_eeprom(adrB,x_loop);
            y_loop=150;}
    }
}

long Read_eepromf(int adrA,int adrB)
{
    int i;
    long delayT=0;
    int addT=0;
    delayT=read_eeprom(adrA);
    addT=read_eeprom(adrB);

    for(i=0;i<addT;i++){
        delayT=delayT+200;
    }

    return(delayT);
}
```

```

//***** Vibration Effected *****

```

```

int get_voltage(){
    CMCON7_changed=0;
    vstep=0;
    voltage=0;
    while(!CMCON7_changed && (vstep < 16)){
        vstep=vstep+1;
        VRCON6=0;
        VRCON0=bit_test(vstep,0);
        VRCON1=bit_test(vstep,1);
        VRCON2=bit_test(vstep,2);
        VRCON3=bit_test(vstep,3);
        VRCON6=1;
        delay_ms(1);

        if(C2OUT==0){
            C2OUT=1;
            CMCON7_changed=1;
            save_vstep=vstep;
            vstep=0;}
        }

        if(CMCON7_changed && C2OUT==0){
            C2OUT=1;
            if(voltage<save_vstep)
                voltage=save_vstep;
        }
    }
    return voltage;
}

```

```

//***** Start Timer 0 *****

```

```

void start_TM0(void)
{
    TmSum0=0;
    enable_interrupts(GLOBAL);
    enable_interrupts (INT_RTCC);
    setup_timer_0(RTCC_INTERNAL | RTCC_DIV_256);
    enable_interrupts(INT_TIMER0);
    set_timer0(252);
}

```



```

//***** Stop Timer 0 *****
void stop_TM0(void)
{
    disable_interrupts(INT_TIMER0);
    TmSum0=0;
}

//***** Start Timer 1 *****
void start_TM1(void)
{
    TmSum1=0;
    enable_interrupts(GLOBAL);
    enable_interrupts(INT_TIMER1);
    setup_timer_1(T1_INTERNAL | T1_DIV_BY_8);
    set_timer1(65411);
}

//***** Stop Timer 1 *****
void stop_TM1(void)
{
    disable_interrupts(INT_TIMER1);
}

//***** Start Timer 2 *****
void start_TM2()
{
    enable_interrupts(INT_TIMER2);
    setup_timer_2(T2_DIV_BY_16,63,1);
    TmSum2=0;
    set_timer2(0);
}

//***** Stop Timer 2 *****
void stop_TM2()
{
    disable_interrupts(INT_TIMER2);
}

//***** time default*****
long time_default(long time_x,int vibra, int addX)

```

```

{

vibra =10.318* vibra -8.6364

if(addX==0){

if(time_x > vibra && time_x-vibra > 80){
    time_x=time_x-vibra;
} else{
    time_x=time_x+10;
}
} else{
    time_x=time_x+vibra;
}

if(time_x > 600){
    time_x=600;
} else if(time_x < 150){
    time_x=time_x | vibra | 80;
}
return time_x;
}

int get_adT(int addC,int addD,int VB, int VBs)
{
if(addC==0 && VB>VBs ){
    addC=1;
} else{
    addC=0;
}
return addC;
}

int additional_check(int addC,int addD,int cCount,int VB, int VBs)
{
int ccNum=0;

if(addC==0 && VB>VBs ){
    ccNum=1;
}

```

```

}else{
    ccNum=0;}

return ccNum;
}

void check_RL_LED(int RL,int ST)
{
    if(RL==1 && ST==0){
        output_bit(PIN_B4,0);
        m=0;
    }else if(RL==1 && ST==1){
        output_bit(PIN_B4,1);
    }else if(RL==2 && ST==0){
        output_bit(PIN_B5,0);
        lll=0;
    }else if(RL==2 && ST==1){
        output_bit(PIN_B5,1);
    }
}

//***** Show data *****
void show_data(int indexRL,int vibrator,int vibraAB,long time_AB,int checkAB,int countAB ,int ccAB,int addSAB,int addAB,int
addTionAB,int ep1, int ep2)
{
    if(checkAB <= 15 && vibrator >=6){
        time_AB=time_default(time_AB,vibrator,0);
        checkAB=checkAB+1;

    }else if(vibrator<6 && checkAB!=20){
        checkAB=16;
    }

    if(checkAB==16){

        addTionAB=0;
        time_AB=time_default(time_AB,vibrator,addTionAB);
        checkAB=16;
        if(vibrator<=2){
            ccAB=ccAB+1;

```

```

if(ccAB==3){
    checkAB=20;
    countAB=0;
    addTionAB=0;
    addAB=0;
    Write_eeppromf(ep1,ep2,time_AB);
    ccAB=0;
    check_RL_LED(indexRL,1);
}
}

if(checkAB > 15 && vibrator >=2){
    countAB=countAB+1;
}else if(checkAB >15 && vibrator <5){
    if(countAB > 1)
        countAB=countAB-1;
}

if(countAB >= 3 && checkAD > 15){
    time_AB=time_AB+30;
    countAB=0;
    checkAB=0;
    ccAB=0;
    check_RL_LED(indexRL,0);
}

if(indexRL==1){
    time_defaultB=time_AB;
    checkB=checkAB;
    countB=countAB;
    ccB=ccAB;
    addSB=addSAB;
    addB=addAB;
    addTionB=addTionAB;

    if(checkAB!=20){
        nr=nr+1;
    }

    srl=nr;
}

```

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	เครื่องทดสอบฮาร์คิสก์ไครฟ์.....	2
1.2	การปรับสมดุลของหุ่นยนต์ที่เกิดจากการเสียสมดุลของหุ่นยนต์จากการสั่น.....	3
1.3	การเสื่อมสภาพของตัวคู้บแรงเนื่องจากการปรับแรงคั่นลมไม่เหมาะสม.....	3
2.1	การสั่นสะเทือนโดยอิสระ (Free Body Vibration) ของชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเครื่องจักร .	9
2.2	การสั่นสะเทือนแบบชนกันหรือเคลื่อนที่ผ่าน.....	10
2.3	การสั่นสะเทือนจากแรงเสียดทาน.....	10
2.4	ลักษณะองค์ประกอบของการสั่นสะเทือน.....	11
2.5	รอบการหมุนของเพลลา.....	11
2.6	การแกว่งของสปริงแผ่น.....	12
2.7	ประเภทของแอมพลิจูด.....	13
2.8	ค่า RMS ของคลื่นที่ไม่สม่ำเสมอ.....	14
2.9	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการวัดระยะทาง ความเร็วและอัตราเร่งในการเคลื่อนที่ในรูปคลื่นไซน์ของการสั่นสะเทือน.....	15
2.10	การเคลื่อนที่แบบ Simple Harmonics.....	16
2.11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าต่าง ๆ ของการสั่นสะเทือน.....	17
2.12	แนวของจุดที่วัดการสั่นสะเทือน.....	18
2.13	จุดวัดการสั่นของเครื่องจักร ตัวมอเตอร์และชุดแบร์ริง (Bearing Unit).....	19
2.14	การวัดการเคลื่อนที่ของสปริงในรอบของระยะเวลาหนึ่ง.....	20
2.15	Displacement Probe.....	21
2.16	หัววัดความเร่ง (Accelerometer).....	22
2.17	ตัวอย่างการวัดแบบ Time Waveform.....	23
2.18	การสั่นสะเทือนของเครื่องจักรแสดงบน โดเมนเวลา (t) และ โดเมนความถี่ (f).....	24
2.19	การสั่นสะเทือนของเครื่องจักรแสดงในรูปของแถบคลื่นความถี่ FFT Spectrum.....	25
2.20	แบบจำลองของระบบเชิงกลที่มีการสั่นสะเทือน.....	28
2.21	การสั่นแบบหน่วงเกิน.....	29
2.22	การสั่นแบบหน่วงวิกฤต.....	30

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.23	ความหน่วงต่ำกว่าปกติ ..... 30
2.24	แบบจำลองของระบบที่มีการสั่นอันเนื่องมาจากแรงกระทำภายนอกระบบ ..... 32
2.25	แรงกระทำแบบความชัน..... 33
2.26	แรงกระทำแบบขึ้นบันได ..... 33
2.27	แรงกระทำแบบคาบเวลา ..... 34
2.28	แรงคด..... 34
2.29	สัญลักษณ์ที่ใช้แทนตำแหน่งการทำงานของวาล์ว ..... 38
2.30	แสดงโซลินอยด์วาล์วควบคุม 3 ทิศทาง 2 ตำแหน่ง..... 44
2.31	โซลินอยด์วาล์วควบคุม 5 ทิศทาง 2 ตำแหน่ง..... 45
2.32	วงจรและฟังก์ชันการทำงานของ โมดูลการเปรียบเทียบของ PIC16F628 ..... 47
2.33	Op-Amp ในอุดมคติ..... 49
2.34	วงจรขยายสัญญาณ OP-Amp แบบ Open Loop..... 49
2.35	วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส ( Inverting Amplifier ) ..... 50
2.36	วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส ( Non-inverting Amplifier)..... 50
3.1	การหาค่าความเร่ง..... 54
3.2	เครื่องทดสอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์..... 56
3.3	แขนจับหุ่นยนต์อัตโนมัติ..... 57
3.4	ส่วนประกอบในการหมุนของแขนจับหุ่นยนต์..... 58
3.5	แสดงการเคลื่อนที่แบบหมุนของแขนจับหุ่นยนต์..... 58
3.6	การหมุนของแขนจับหุ่นยนต์ ..... 59
3.7	แรงที่กระทำต่อตัวดูดซับแรงกระแทก..... 59
3.8	การติดตั้งแขนจับหุ่นยนต์บน Vibration Table ..... 61
3.9	Dynamic signal analyzer ..... 61
3.10	หัวข้อการสั่นแบบ..... 62
3.11	โซลินอยด์วาล์วและการกำหนดระยะปล่อยลม ..... 62
3.12	วาล์วปรับแรงดันลม ..... 63

```

}
start_TM2();
} else if(input(SENSOR_A)==1 && startA==1){
startA=0;
rotageA=1;
getTime_Obset=0;

TmSum1=0;
stop_TM1();
start_TM1();

} else if(input(SENSOR_B)==1 && startB==1){
startB=0;
rotageB=1;
getTime_Obset=0;
TmSum1=0;
stop_TM1();
start_TM1();
}

if(rotageA==1){

if(TmSum1==time_defaultA){
stop_TM1();
rotageA=0;
rl_rotage=0;
TmSum1=0;
start_TM0();
output_bit(SOLINOID_A,1);
output_bit(SOLINOID_B,0);}

} else if(rotageB==1){

if(TmSum1==time_defaultB){
stop_TM1();
TmSum1=0;
rotageB=0;
rl_rotage=1;
start_TM0();
output_bit(SOLINOID_A,0);

```



```

    output_bit(SOLINOID_B,1);}
}

if(input(SENSOR_A)==0 || input(SENSOR_B)==0){
    if(viba_check==0){
        if(TmSum2 >=10 && TmSum2<=750){
            vibra_input=get_voltage();

            if(saveVibration<vibra_input)
                saveVibration=vibra_input;
        }else if(TmSum2 > 750){
            stop_TM2();
            viba_check=1;

            if(input(PIN_A0)==1 && rl_rotage==1){
                show_data(1,saveVibration,saveVibrationB,time_defaultB,checkB,countB,ccB,addSB,addB,addTionB,2,3);
                saveVibrationB=saveVibration;
                addSB=addTionB;
                saveVibration=1;
            }else if(input(PIN_A0)==1 && rl_rotage==0){
                show_data(2,saveVibration,saveVibrationA,time_defaultA,checkA,countA,ccA,addSA,addA,addTionA,0,1);
                saveVibrationA=saveVibration;
                addSA=addTionA;
                saveVibration=1;
            }else {delay_ms(5);} //end if
            if(getTime_Obset==0){
                if(addTionA==1){
                    addTionA=0;
                    addA=0;}

                if(addTionB==1){
                    addTionB=0;
                    addB=0;}
            }
            TmSum2=0;
        }
    }
}
}
}
} //end while

```





```

#define TRUE 1

#define BYTE int8
#define BOOLEAN int1

#define getch getch
#define fggetc getch
#define getchar getch
#define putc putchar
#define fputc putchar
#define fgets gets
#define fputs puts

//////////////////////////////////// Control
// Control Functions: RESET_CPU(), SLEEP(), RESTART_CAUSE()
// Constants returned from RESTART_CAUSE() are:
#define WDT_FROM_SLEEP 3
#define WDT_TIMEOUT 11
#define MCLR_FROM_SLEEP 19
#define MCLR_FROM_RUN 27
#define NORMAL_POWER_UP 25
#define BROWNOUT_RESTART 26

//////////////////////////////////// Timer 0
// Timer 0 (AKA RTCC) Functions: SETUP_COUNTERS() or SETUP_TIMER_0(),
//          SET_TIMER0() or SET_RTCC(),
//          GET_TIMER0() or GET_RTCC()
// Constants used for SETUP_TIMER_0() are:
#define RTCC_INTERNAL 0
#define RTCC_EXT_L_TO_H 32
#define RTCC_EXT_H_TO_L 48

#define RTCC_DIV_1 8
#define RTCC_DIV_2 0
#define RTCC_DIV_4 1
#define RTCC_DIV_8 2
#define RTCC_DIV_16 3
#define RTCC_DIV_32 4
#define RTCC_DIV_64 5

```

```

#define RTCC_DIV_128  6
#define RTCC_DIV_256  7

#define RTCC_8_BIT    0

// Constants used for SETUP_COUNTERS() are the above
// constants for the 1st param and the following for
// the 2nd param:

//////////////////////////////////// WDT
// Watch Dog Timer Functions: SETUP_WDT() or SETUP_COUNTERS() (see above)
//          RESTART_WDT()
// WDT base is 18ms
//

#define WDT_18MS      0x8008
#define WDT_36MS      9
#define WDT_72MS      10
#define WDT_144MS     11
#define WDT_288MS     12
#define WDT_576MS     13
#define WDT_1152MS    14
#define WDT_2304MS    15

//////////////////////////////////// Timer 1
// Timer 1 Functions: SETUP_TIMER_1, GET_TIMER1, SET_TIMER1
// Constants used for SETUP_TIMER_1() are:
// (or (via |) together constants from each group)

#define T1_DISABLED    0
#define T1_INTERNAL    0x85
#define T1_EXTERNAL    0x87
#define T1_EXTERNAL_SYNC 0x83

#define T1_CLK_OUT     8

#define T1_DIV_BY_1    0
#define T1_DIV_BY_2    0x10
#define T1_DIV_BY_4    0x20
#define T1_DIV_BY_8    0x30

```

```

//////////////////////////////////// Timer 2
// Timer 2 Functions: SETUP_TIMER_2, GET_TIMER2, SET_TIMER2
// Constants used for SETUP_TIMER_2() are:
#define T2_DISABLED      0
#define T2_DIV_BY_1     4
#define T2_DIV_BY_4     5
#define T2_DIV_BY_16    6

//////////////////////////////////// CCP
// CCP Functions: SETUP_CCPx, SET_PWMx_DUTY
// CCP Variables: CCP_x, CCP_x_LOW, CCP_x_HIGH
// Constants used for SETUP_CCPx() are:
#define CCP_OFF          0
#define CCP_CAPTURE_FE   4
#define CCP_CAPTURE_RE   5
#define CCP_CAPTURE_DIV_4 6
#define CCP_CAPTURE_DIV_16 7
#define CCP_COMPARE_SET_ON_MATCH 8
#define CCP_COMPARE_CLR_ON_MATCH 9
#define CCP_COMPARE_INT   0xA
#define CCP_COMPARE_RESET_TIMER 0xB
#define CCP_PWM           0xC
#define CCP_PWM_PLUS_1    0x1c
#define CCP_PWM_PLUS_2    0x2c
#define CCP_PWM_PLUS_3    0x3c
long CCP_1;
#define CCP_1 =           0x15
#define CCP_1_LOW=       0x15
#define CCP_1_HIGH=      0x16

//////////////////////////////////// UART
// Constants used in setup_uart() are:
// FALSE - Turn UART off
// TRUE  - Turn UART on
#define UART_ADDRESS     2
#define UART_DATA        4

//////////////////////////////////// COMP
// Comparator Variables: C1OUT, C2OUT
// Constants used in setup_comparator() are:
#define A0_A3_A1_A2 0xff04

```

```

#define A0_A2_A1_A2 0x7ff03
#define NC_NC_A1_A2 0x6ff05
#define NC_NC_NC_NC 0x0ff07
#define A0_VR_A1_VR 0x3ff02
#define A3_VR_A2_VR 0xcff0A
#define A0_A2_A1_A2_OUT_ON_A3_A4 0x7e706
#define A3_A2_A1_A2 0xeff09
#define CP1_INVERT 0x00010
#define CP2_INVERT 0x00020

#define CMCON 0x1f
#define C2INV = 0x1f.5
#define C1OUT = 0x1f.6
#define C2OUT = 0x1f.7

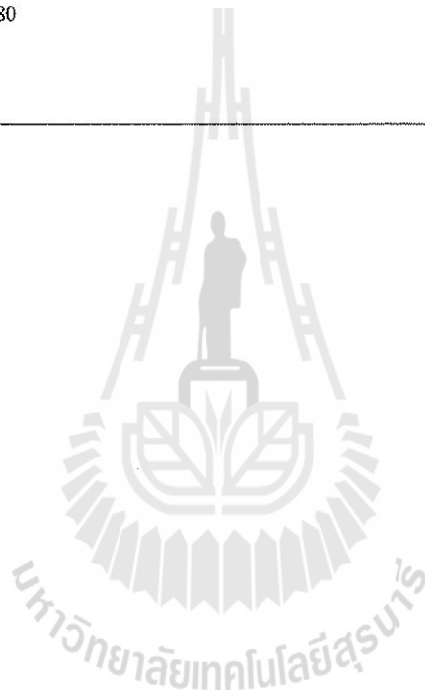
//////////////////////////////////// VREF
// Constants used in setup_vref() are:
//
#define VREF_LOW 0xa0
#define VREF_HIGH 0x80
// Or (with |) the above with a number 0-15
#define VREF_A2 0x40
#define VRCON0 = 0x9f.0
#define VRCON1 = 0x9f.1
#define VRCON2 = 0x9f.2
#define VRCON3 = 0x9f.3
#define VRCON4 = 0x9f.4
#define VRCON5 = 0x9f.5
#define VRCON6 = 0x9f.6

//////////////////////////////////// INT
// Interrupt Functions: ENABLE_INTERRUPTS(), DISABLE_INTERRUPTS(),
//      CLEAR_INTERRUPT(), INTERRUPT_ACTIVE(),
//      EXT_INT_EDGE()
//
// Constants used in EXT_INT_EDGE() are:
#define L_TO_H      0x40
#define H_TO_L      0
// Constants used in ENABLE/DISABLE_INTERRUPTS() are:
#define GLOBAL      0x0BC0

```

```
#define INT_RTCC      0x0B20
#define INT_RB       0xFF0B08
#define INT_EXT      0x0B10
#define INT_TBE      0x8C10
#define INT_RDA      0x8C20
#define INT_TIMER1   0x8C01
#define INT_TIMER2   0x8C02
#define INT_CCPI     0x8C04
#define INT_COMP     0x8C40
#define INT_TIMER0   0x0B20
#define INT_EEPROM   0x8C80

#list
```



ภาคผนวก ข

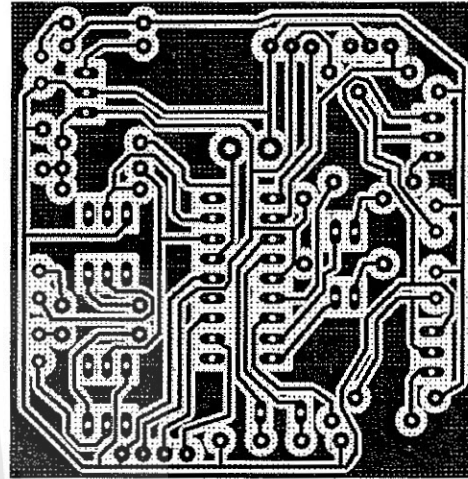
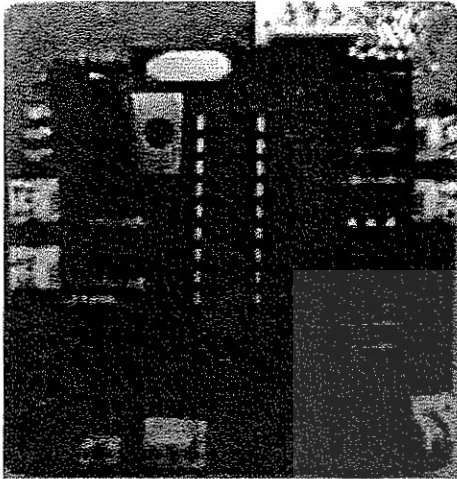
แผนภาพของจรควบคุมวาล์วลม วงจรเซ็นเซอร์วัดการสั่น และอุปกรณ์ในการ

ประกอบวงจร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

แผนภาพของจอร์ควบคุมวาล์วลม วงจรเซ็นเซอร์วัดการสั่น และอุปกรณ์ในการประกอบวงจร

### ข.1 วงจรควบคุมวาล์วลม

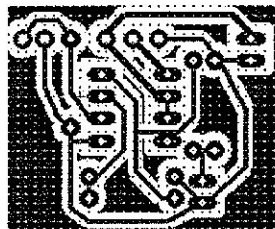
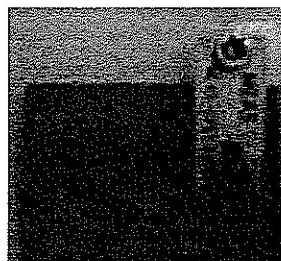


#### รายการอุปกรณ์

รายการ	จำนวน
1. PIC16F628	1
2. Resistor 10K	6
3. Resistor 1K	2
4. Resistor 330 Ohm	3
5. IRF803	2
6. MC7805	1
7. 4N25	2
8. Diode 1N4001	2
9. Switch	1
10. LED	2
11. Capacitor 104	1
12. Capacitor 33	2
13. Crystal 4MHz	1



## ข.2 วงจรเซ็นเซอร์



## รายการอุปกรณ์

รายการ	จำนวน
1. Piezo file sensor	1
2. Resistor 1M	1
3. Resistor 100K	2
4. Resistor 470K	1
5. Capacitor 104	1
6. Diode 1N4001	1
7. LED	1
8. LM358N	1

The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, faint watermark in the center of the page. It features a central figure of a person standing on a pedestal, surrounded by a circular emblem with a gear and a book. The text 'มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี' is written in a circular path around the bottom of the emblem.

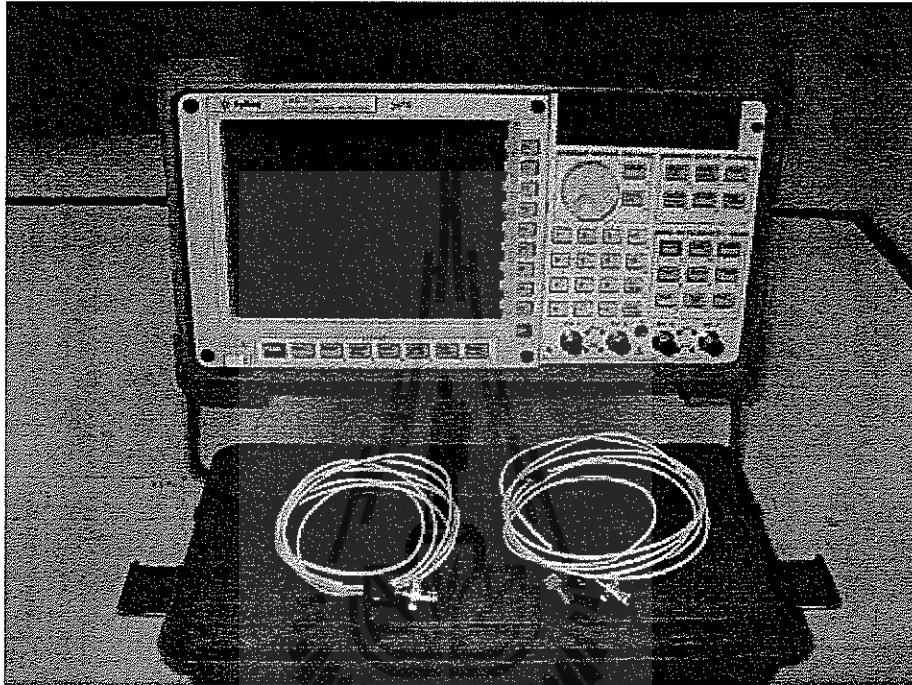
ภาคผนวก ก

รายละเอียดต่างๆ ของชุดอุปกรณ์วัดการสั่นสะเทือน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

### ค.1 รายละเอียดของอุปกรณ์วัดการสั่นสะเทือน

อุปกรณ์วัดการสั่นสะเทือน (Dynamic Signal Analyzer) ใช้สำหรับวัดค่าการสั่นสะเทือน ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท Agilent Technologies รุ่น 35670A โดยมีรายละเอียดของเครื่องดังนี้



รูปที่ ค.1 อุปกรณ์วัดการสั่นสะเทือนของบริษัท Agilent Technologies รุ่น 35670A

#### ตารางที่ ค.1 คุณสมบัติของอุปกรณ์วัดการสั่นสะเทือน

Feature	FFT	Octave	Order	Swept Sine	Correction	Histogram /Time
Power Spec CH 1/2/3/4	Yes	Yes	Yes			
Linear Spec CH 1/2/3/4	Yes			Yes		
Time Channel 1/2/3/4	Yes		Yes	Yes	Yes	Yes
Window Time CH 1/2/3/4	Yes				Yes	
Frequency Response	Yes			Yes		
Coherence	Yes					
Cross Spectrum	Yes			Yes		

ตารางที่ ค.1 คุณลักษณะของอุปกรณ์วัดการสั่นสะเทือน (ต่อ)

Orbit	Yes		Yes			
Math Function	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Data Register	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Waterfall Register	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Capture CH 1/2/3/4/	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
<b>Feature</b>	<b>FFT</b>	<b>Octave</b>	<b>Order</b>	<b>Swept Sine</b>	<b>Correction</b>	<b>Histogram /Time</b>
Composite Power CH 1/2/3/4			Yes			
Order Track CH 1/2/3/4			Yes			
RPM Profile			Yes			
Normalized Variance CH 1/2/3/4				Yes		
Auto Correlation CH 1/2/3/4					Yes	
Cross Correlation					Yes	
Histogram CH 1/2/3/4						Yes
PDF CH 1/2/3/4						Yes
CDF CH 1/2/3/4						Yes

## ค.2 รายละเอียดของอุปกรณ์ตัวตรวจวัดความเร่ง

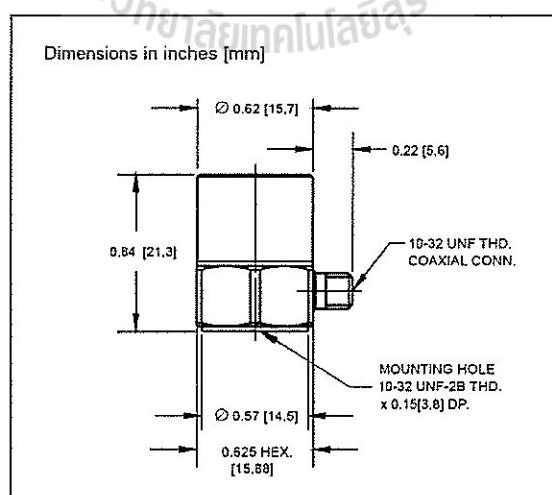
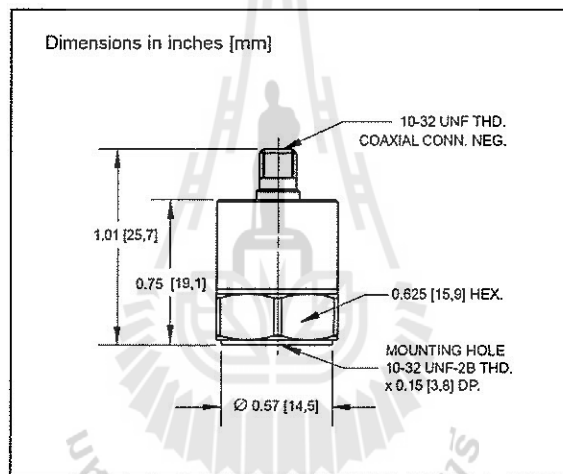
อุปกรณ์ตรวจวัดความเร่ง (Accelerometer Sensor) ใช้เป็นตัวตรวจวัดการสั่นสะเทือนของช่องทดสอบ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท Kistler รุ่น 8784A5 และ 8786A5 สามารถวัดค่าได้ที่ละแกน โดยมีรายละเอียดดังนี้



8784A5

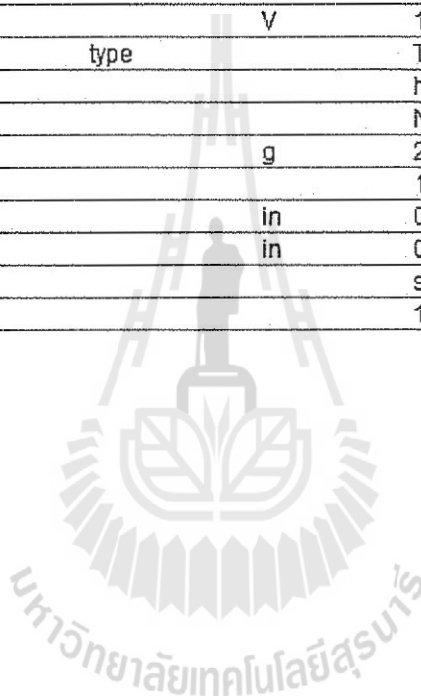


8786A5



ตารางที่ ค.2 คุณสมบัติของอุปกรณ์ตัวตรวจวัดความเร่ง

Specifications		Type 8786A5
Model (Single axis or triaxial)		Single axis linear
Range	g	±5
Sensitivity	mV/g	1000
Frequency Range	Hz	1...6000
Resolution, Threshold	mgrms	0.4
Transverse Sensitivity	%	1.5
Non linearity	% FSO	±1
Shock	g	2500
Temp. coef. of sensitivity	%/°F	-0.0283
Operating temperature range	°F	-67...176
Supply	mA	2...20
Voltage	V	18...30
Housing/Base	type	Titanium
Sealing		hermetic (IP68)
Ground isolation		No
Mass	g	21
Connector		10-32 neg.
Diameter	in	0.625
Height	in	0.84
Mounting		stud/wax
Mounting thread		10-32 UNF x 3,8



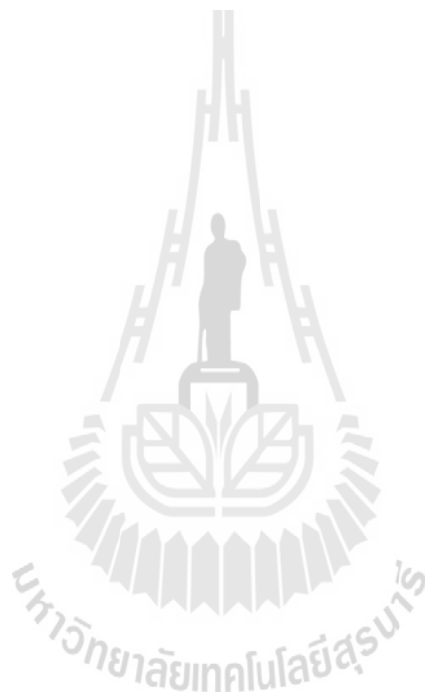
ภาคผนวก ง

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

ไกรลาศบุญทรบุญชู , จิระพล ศรีเสริฐผล. (2013). ศึกษาและวิเคราะห์การตอบสนองทางพลวัตของ  
แขนจับหุ่นยนต์ในกระบวนการหยิบออก-ใส่เข้า ฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ. การประชุมวิชาการ  
งานวิจัย และพัฒนาเชิงประยุกต์ครั้งที่ 5 หน้า 491-496





## ศึกษาและวิเคราะห์การตอบสนองทางพลวัตของแขนจับหุ่นยนต์ใน กระบวนการหยิบออก-ใส่เข้า ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

### STUDY AND ANALYSIS DYNAMIC RESPONSE OF ROBOT ARM IN HDD LOADING PROCESS

นายไกรลาส บุตรบุญชู

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Krailas.butbunchoo@seagate.com

จิระพล ศรีเจริญผล

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

jiraphon@sut.ac.th

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษามูลค่าการตอบสนองทางพลวัต ในกระบวนการหยิบออก-ใส่เข้าฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เข้าช่องทดสอบบนหุ่นยนต์ ตามสภาพการใช้งานจริง เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วจากการเพิ่มแรงดันลมที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ กับค่าแอมพลิจูดของการสั่นที่เกิดขึ้น จากการรบกวนระหว่างแขนจับหุ่นยนต์กับตัวดูดซับแรงกระแทก (Shock absorber) ที่แรงดันลม 4, 5, 6, 7 และ 8 บาร์ ผลการวิเคราะห์พบว่า ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จะแปรผันตรงกับแอมพลิจูดของการสั่นตามแรงดันลมที่เพิ่มขึ้น และได้ออกแบบวงจรควบคุมการสั่นของแขนจับหุ่นยนต์แบบอัตโนมัติ เพื่อควบคุมแอมพลิจูดของการสั่นเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันลม

#### Abstract

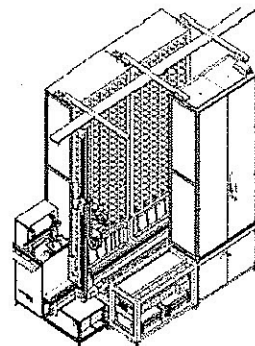
The research studied dynamic response of robot in harddisk loading process into test slots which base on operating situation to find the relation between velocity from increased the pneumatic pressure that it used to robot movement and amplitude of vibration from robot arm bumped with shock absorber at the pneumatic pressure 4, 5, 6, 7 and 8 bar. The analysis result showed that velocity of robot is directly proportional to amplitude of vibration which according to the increase of the pneumatic pressure and design automatic circuit control amplitude of vibration when the pneumatic pressure changed.

#### คำสำคัญ

amplitude of vibration, pneumatic pressure, Dynamic response, velocity of robot, shock absorber

#### 1. บทนำ

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สำหรับบันทึกข้อมูลแบบดิจิทัล ซึ่งมีใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากในภาคอุตสาหกรรมการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ มีการแข่งขันที่สูงขึ้น ดังนั้นจึงทำให้บริษัทผู้ผลิตได้มีการนำเอาระบบอัตโนมัติต่าง ๆ มาใช้ในการผลิตเพื่อเป็นการเพิ่มปริมาณการผลิต และให้การทำงานเป็นไปอย่างต่อเนื่อง ในกระบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานเป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่มีความสำคัญ ที่จะต้องมีการทดสอบทั้งขั้นตอนการทำงานต่าง ๆ เช่น การบันทึกข้อมูล การอ่านข้อมูล และการลบข้อมูล เป็นต้น ก่อนที่จะส่งออกสู่ตลาด ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มปริมาณการทดสอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ บริษัทผู้ผลิตจึงต้องใช้เครื่องทดสอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีช่องทดสอบหลายช่องในเครื่องเดียว และใช้หุ่นยนต์อัตโนมัติในกระบวนการหยิบออก-ใส่เข้าฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เข้าช่องทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 1



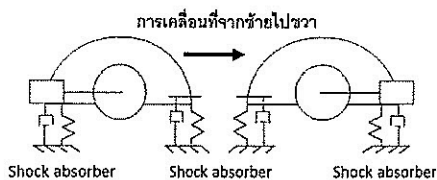
รูปที่ 1 เครื่องทดสอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ และหุ่นยนต์

การเคลื่อนที่ของแขนจับหุ่นยนต์ในการหมุนตัว และ หีบจับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะใช้ระบบนิวเมตริก ซึ่งให้แรงดันลม ในการเคลื่อนที่ และมีไฮลีนอยด์วาล์วแบบควบคุมทิศทาง[4] เป็นตัวกำหนดทิศทางลม การเพิ่มปริมาณการหนี้ออก-ใส่ เข้าฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เข้าช่องทดสอบสามารถทำได้โดยการเพิ่ม แรงดันลมในการเคลื่อนที่ของแขนจับหุ่นยนต์ ซึ่งจะทำให้ หุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น แต่การเพิ่มความเร็วนี้จะทำให้เกิด การสั่นจากการชนกันระหว่างแขนจับของหุ่นยนต์กับตัวดูดซับ แรงกระแทก โดยการสั่นนี้จะส่งผลกระทบต่อการจัดตำแหน่งช่อง ทดสอบของแขนจับหุ่นยนต์ในขณะที่ทำการหนี้ออก-ใส่เข้า ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เข้าช่องทดสอบผิดพลาด และจะทำให้หุ่นยนต์ หยุดทำงานทันที ซึ่งทำให้สูญเสียเวลาในการซ่อมบำรุง และ โอกาสในการหนี้ออก-ใส่เข้าฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เข้าช่องทดสอบ

บทความนี้จะทำการศึกษา และวิเคราะห์ผลของการ ตอบสนองทางพลวัตของแขนจับหุ่นยนต์ ในกระบวนการหนี้ออก-ใส่เข้าฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เข้าช่องทดสอบ ที่แรงดันลม 4, 5, 6, 7 และ 8 บาร์ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างเวลาหน่วงในการ ลดความเร็วของแขนจับหุ่นยนต์กับแอมพลิจูดของการสั่น เพื่อ จะนำไปออกแบบวงจรควบคุมการสั่นของแขนจับหุ่นยนต์แบบ อัตโนมัติ โดยที่ค่าแอมพลิจูดของการสั่นต้องไม่เกิน 0.1 mm และเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่น้อยกว่า 2400 ms ซึ่งเป็นค่าของ แรงดันลม 3 บาร์ ที่ใช้ในปัจจุบัน

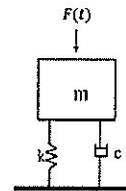
2. งานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในการเคลื่อนที่แบบหมุนของแขนจับหุ่นยนต์จะมีตัวรับ แรงกระแทกอยู่ 2 ชุด ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวรับแรงกระแทกเมื่อ หุ่นยนต์มีการเคลื่อนที่ เช่น การหมุนไปทางซ้าย หรือการหมุน ไปทางขวา ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 การเคลื่อนที่แบบหมุนของแขนจับหุ่นยนต์

เมื่อพิจารณาเฉพาะแรงที่กระทำต่อตัวดูดซับแรงกระแทก ณ เวลาหนึ่ง จะได้ลักษณะการสั่นของแขนจับหุ่นยนต์ดังแสดง ในรูปที่ 3



รูปที่ 3 แรงที่กระทำต่อตัวดูดซับแรงกระแทก

จากรูปที่ 3 จะได้สมการของการสั่นดังนี้

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) \tag{1.1}$$

เนื่องจากเป็น การสั่นแบบมีแรงกระทำโดยมีตัวหน่วง [5] ถ้าขนาดของแรงกระทำมีค่าเท่ากับหนึ่ง จะได้ฟังก์ชันการลด เป็นแบบหนึ่งหน่วย(Unit impulse function,  $\delta(t)$ ) หรือ เรียกว่า Dirac data function [2] ดังนั้นการเปลี่ยนแปลง โมเมนตัมขณะแรงดลกระทำจะมีค่าเท่ากับ

$$\hat{F} = F\Delta t = mv_0 \tag{1.2}$$

เมื่อการตอบสนองของระบบนั้น เป็นการสั่นแบบอิสระ ภายใต้ความหน่วงต่ำ ( $0 < \zeta < 1$ ) จะได้ผลเฉลยของสมการ การสั่นของแขนจับหุ่นยนต์คือ

$$x(t) = \frac{\hat{F}}{m\omega_d} e^{-\zeta\omega_n t} \sin \omega_d t \tag{1.3}$$

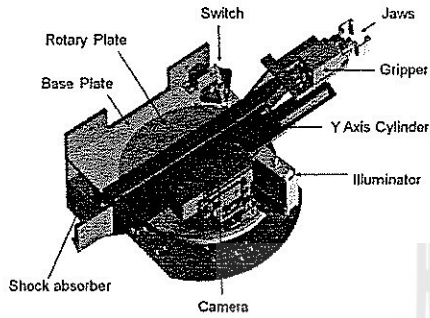
เมื่อแทนค่า  $\hat{F}$  จากสมการที่ (1.2) ลงในสมการที่(1.3) จะได้ว่าแอมพลิจูดของการสั่นจะแปรผันตรงกับความเร็วใน การเคลื่อนที่ของแขนจับหุ่นยนต์

$$x(t) = \frac{v_0}{\omega_d} e^{-\zeta\omega_n t} \sin \omega_d t \tag{1.4}$$

3. ภาพรวมของระบบ

การเคลื่อนที่ของแขนจับหุ่นยนต์จะเป็นระบบนิวเมตริก โดยจะมีตัวดูดซับแรงกระแทกเป็นตัวคอยลดแรงกระแทกเมื่อ ต้องการหยุดการเคลื่อนที่ หุ่นยนต์จะใช้กลไกเป็นตัวจับภาพ

ตำแหน่งของทดสอบในการหยิบออก-ใส่เข้าฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งมีส่วนประกอบต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ส่วนประกอบของแขนจับหุ่นยนต์

4. การวิเคราะห์ผลตอบสนองทางพลวัต

จากสมการที่ 1.4 การลดแอมพลิจูดการสั่นจะทำให้ได้โดยการลดความเร็วในการเคลื่อนที่ของแขนจับหุ่นยนต์ โดยการลดแรงดันลมในการเคลื่อนที่ของแขนจับหุ่นยนต์ก่อนชนกับตัวดูดซับแรงกระแทก ซึ่งจะกำหนดให้ค่าของเวลาหน่วงในการลดแรงดันลมมีค่าที่ ซึ่งจะได้ผลดังตารางที่ 1

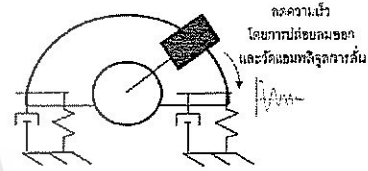
ตารางที่ 1 แอมพลิจูดการสั่นเมื่อลดความเร็วในการเคลื่อนที่

แรงดันลม (บาร์)	เวลาเคลื่อนที่ )รอบ 1ms(	เวลาหน่วง )ms(	แอมพลิจูด )mm(
3	2200	0	0.092
	2250	0	0.076
4	2100	0	1.178
	2200	350	0.015
5	1990	0	2.274
	2100	350	0.097
6	1932	0	2.877
	2064	350	0.189
7	1908	0	3.648
	1995	350	0.328
8	1866	0	3.902
	1980	350	0.585

การกำหนดเวลาหน่วงให้คงที่ซึ่งไม่สามารถควบคุมการสั่นเมื่อแรงดันลมเกิดการเปลี่ยนแปลงจึงจำเป็นต้องออกแบบวงจรควบคุมการสั่นแบบอัตโนมัติ

5. การออกแบบและพัฒนาระบบ

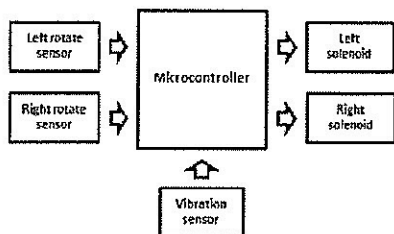
เมื่อแขนจับหุ่นยนต์เริ่มเคลื่อนที่จะเกิดแอมพลิจูดการสั่นเล็กน้อย และแอมพลิจูดการสั่นจะมีค่าสูงสุดเมื่อกระทบกับปลายตัวดูดซับการกระแทก[1] ดังนั้นการออกแบบระบบจะทำการลดความเร็วของแขนจับหุ่นยนต์ก่อนชนกับตัวดูดซับการกระแทก โดยการลดแรงดันลมในการเคลื่อนที่ด้วยการปล่อยลมออก ดังแสดงในรูปที่ 5 และใช้ค่าแอมพลิจูดของการสั่นที่เกิดขึ้นเป็นตัวกำหนดเวลาการปล่อยลม



รูปที่ 5 แสดงการลดความเร็วก่อนการชน

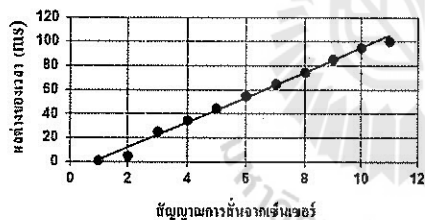
การออกแบบวงจรควบคุมความเร็วของแขนจับหุ่นยนต์ จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวควบคุมใช้เซ็นเซอร์ตัวสั่น ในการเปิด-ปิดวาล์วเพื่อปล่อยลมออก ซึ่งเป็นการลดความเร็วในการเคลื่อนที่ และใช้ตัวนับเวลาภายในของไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยมี Timer0 Timer1 และ Timer2 เป็นตัวนับเวลา[3] ในการเปิดวาล์วปล่อยลม โดยระบบจะใช้สัญญาณจากเซ็นเซอร์ตรวจจับการหมุน (Rotation sensor) ของแขนจับหุ่นยนต์เป็นตัวกำหนดการเริ่มนับเวลาของการเคลื่อนที่ และใช้เซ็นเซอร์วัดการสั่น (Vibration sensor) วัดค่าการสั่น ดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งระบบควบคุมสามารถแบ่งเป็น 3 ส่วนได้ดังนี้

1. ส่วนรับสัญญาณ Rotation sensor
2. ส่วนรับสัญญาณ Vibration sensor
3. ส่วนควบคุมใช้เซ็นเซอร์ตัวสั่น



รูปที่ 6 แผนภาพของวงจรควบคุมการปล่อยลม

เมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์ได้รับสัญญาณจากตัวเซ็นเซอร์ตรวจจัมการหมุนของแขนจับหุ่นยนต์แล้ว ตัวนับเวลาที่จะทำการนับเวลาไปจนถึงเวลาการเปิดวาล์วปล่อยลม เมื่อถึงเวลาดังกล่าว ก็จะสั่งให้โซลินอยด์เปิดวาล์วปล่อยลมออกตามเวลานองที่กำหนด พร้อมกับวัดแอมพลิจูดของการสั่นเมื่อแขนจับของหุ่นยนต์ชนกับตัวดูดซับแรงกระแทก โดยที่โปรแกรมการประมวลผลของไมโครคอนโทรลเลอร์จะนำค่าแอมพลิจูดการสั่นสูงสุดไปเปรียบเทียบกับค่าผลต่างของเวลาที่ใช้ใช้คำนวณหาเวลาการเปิดวาล์วลมในครั้งต่อไป ซึ่งค่าความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณการสั่นจากเซ็นเซอร์วัดการสั่นกับผลต่างของเวลาจะได้นี้แสดงในรูปที่ 7

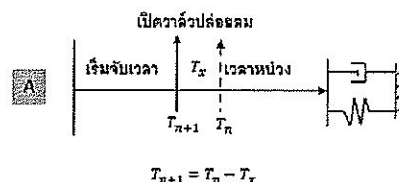


รูปที่ 7 แสดงค่าผลต่างของเวลาเทียบกับสัญญาณการสั่น

จากรูที่ 7 จะได้สมการเคลื่อนเวลาได้ดังนี้

$$y = 10.318x - 8.6364 \quad (1.5)$$

โปรแกรมการควบคุมทำงานจะใช้หลักการเคลื่อนเวลาเพื่อหาเวลานองในการเปิด-ปิดวาล์วปล่อยลมที่ทำให้เกิดการสั่นภายในขอบเขตที่กำหนด ซึ่งเวลานองต้องไม่เกิน 700 ms โดยใช้สมการที่ (1.5) เป็นตัวเคลื่อนเวลา



รูปที่ 8 แสดงหลักการเคลื่อนเวลา

จากรูปที่ 7 กำหนดให้

$T_n$  คือ เวลาของการสั่งในการเปิดวาล์วลม

$T_x$  คือ ตัวเคลื่อนเวลานองจาก สมการที่ (1.5)

$T_y$  คือ ค่าเวลานองที่ไม่มีถึงตัวดูดซับแรงกระแทก

ที่ตำแหน่ง A ค่าของ  $T_n$  จะลดลงทุกรอบของการชนกันระหว่างแขนจับของหุ่นยนต์กับตัวดูดซับการกระแทก ซึ่งจะลดลงตามค่าของ  $T_x$  จนกว่าค่าการสั่งจะได้ตามค่าที่ตั้งเอาไว้ หากค่าของเวลานองไม่ไปถึงตำแหน่งตัวดูดซับการกระแทกที่ตำแหน่ง B ก็จะถูกค่าของ  $T_y$  เข้าไป ในกรณีที่มีการสั่นเกินจำนวนครั้งที่กำหนด โปรแกรมจะกลับไปใช้ค่า  $T_n$  ค่าสุดท้ายกับ 30 ซึ่งเป็นค่าที่ทำให้จำนวนรอบในการคำนวณการสั่นน้อยที่สุด และเริ่มต้นเคลื่อนเวลาใหม่จนกว่าจะได้เวลาการเปิด-ปิดวาล์วที่เกิดการสั่นตามที่กำหนด

## 6. การทดสอบการใช้งาน

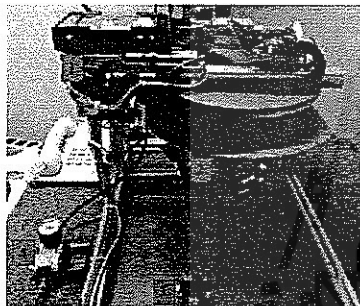
ทำการติดตั้งหุ่นยนต์ที่ใช้ในหยิบออก-ใส่เข้าฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะติดตั้งบนแท่นที่มีการลดแรงการสั่นจากภายนอกระบบและติดตั้งชุดควบคุมการเปิดวาล์วลมแบบอัตโนมัติ ดังแสดงในรูปที่ 9 และใช้ Dynamic signal analyzer วัดสัญญาณการสั่นดังแสดงในรูปที่ 10 ซึ่งชุดควบคุมการสั่นของแขนจับหุ่นยนต์จะประกอบไปด้วย

1. เซ็นเซอร์วัดการสั่น
2. โซลินอยด์วาล์ว

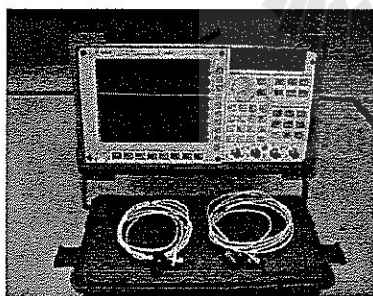
3. ชุดควบคุมการเปิด-ปิดวาล์วลม

4. ตัวปรับแหล่งจ่ายลมให้กับหุ่นยนต์

เมื่อเปิดสวิตช์วงจรควบคุมการเปิด-ปิดวาล์วลม หลอดไฟบนวงจรควบคุมจะติดทั้ง 2 ข้าง หลังจากนั้นสั่งให้หุ่นยนต์หมุนไปทางซ้าย และทางขวา วงจรควบคุมจะทำการเปิด-ปิดวาล์วลมตามเวลาที่คำนวณได้ สั่งให้หุ่นยนต์หมุนไปเรื่อยๆ จนกว่าหลอดไฟของวงจรควบคุมการสั่งทั้ง 2 ดวงดับ ซึ่งแสดงว่าได้เวลานั่งตามที่กำหนดไว้แล้ว ทดลองปรับระดับแรงดันลมจากแหล่งจ่ายลมให้เพิ่มขึ้นจากเดิมเป็น 4, 5, 6, 7 และ 8 บาร์ และทดลองซ้ำตามวิธีข้างต้นตัวควบคุมการสั่งจะทำการคำนวณหาเวลาใหม่แบบอัตโนมัติ



รูปที่ 9 การติดตั้งชุดควบคุมการเปิด-ปิดวาล์วลม

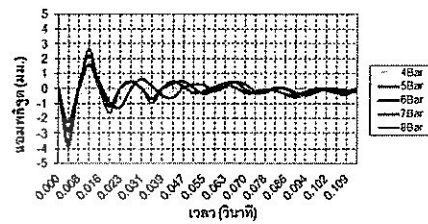


รูปที่ 10 Dynamic signal analyzer

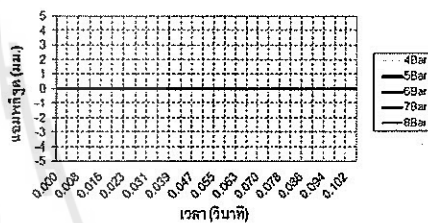
6.1 ผลการทดสอบและการวิจารณ์ผล

แอมพลิจูดการสั่งของแขนจับหุ่นยนต์ที่แรงดันลม 4, 5, 6, 7 และ 8 บาร์ ก่อนทำการติดตั้งชุดควบคุมการเปิด-ปิดวาล์ว

ปลอยลมจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามแรงดันลมเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 11 และเมื่อลดความเร็วในการเคลื่อนที่ของแขนจับหุ่นยนต์ก่อนที่จะชนกับตัวดูดซับแรงกระแทก แอมพลิจูดของการสั่งจะมีค่าลดลง ดังรูปที่ 12 โดยที่แอมพลิจูดสูงสุดที่แรงดันลมต่างๆ จะมีค่าน้อยกว่า 0.1 mm

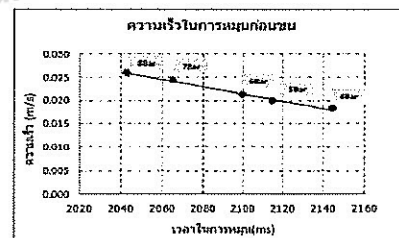


รูปที่ 11 แอมพลิจูดของการสั่งแบบไม่ลดความเร็วก่อนชน

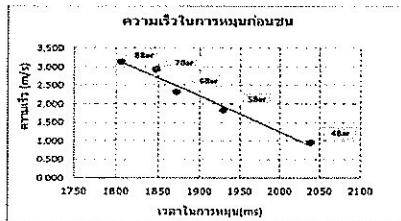


รูปที่ 12 แอมพลิจูดของการสั่งแบบลดความเร็วก่อนชน

จากสมการที่ (1.4) เมื่อคำนวณหาค่าของความเร็วของแขนจับของหุ่นยนต์ก่อนชนกับตัวดูดซับแรงกระแทก ก่อนและหลังติดตั้งตัวควบคุมการสั่งที่ระดับแรงดันลม 4, 5, 6, 7 และ 8 บาร์ จะได้ว่าเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของแขนจับหุ่นยนต์แบบมีการหน่วงจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีเคลื่อนที่แบบไม่มีการหน่วงดังแสดงในรูปที่ 13 และรูปที่ 14



รูปที่ 13 ความเร็วก่อนชนกับเวลาการหน่วงแบบลดความเร็ว



รูปที่ 14 ความเร็วก่อนชนกับเวลาการหมุนแบบไม่ลดความเร็ว

เนื่องจากช่วงเวลาของการทรงตัวในการเปิดวาล์วลม เพื่อเป็นการลดความเร็วในการเคลื่อนที่ของแกนจับหุ่นยนต์ที่ แรงดันลม 4, 5, 6, 7 และ 8 บาร์ จะไม่คงที่ ดังแสดงในตาราง ที่ 1 เพราะว่าการทดลองที่ซ้ำ ๆ กันนั้น จะส่งผลทำให้เกิด การเปลี่ยนแปลงค่าความแข็ง (Stiffness) ของสปริงหรือค่า ความหนืดคงที่ (Damping constant) ภายในตัวดูดซับการ กระแทก[1]

ตารางที่ 1 แสดงเวลาในการเปิดวาล์วเพื่อลดความเร็วของแกน จับหุ่นยนต์ก่อนที่จะชนกับตัวดูดซับแรงกระแทก

แรงดันลม (บาร์)	เวลาหน่วง (ms)	ความเร็ว (m/s)	แอมพลิจูด (mm)
4	295-305	0.018	0.023
5	385-395	0.020	0.025
6	455-465	0.021	0.027
7	470-480	0.024	0.031
8	480-490	0.026	0.032

ปัจจุบันหุ่นยนต์จะใช้เวลาในการเคลื่อนที่แบบหมุนใน 1 รอบโดยเฉลี่ยประมาณ 2200 มิลลิวินาที เมื่อเปรียบเทียบกับ ปริมาณการหนีบออก-ใส่เร้าอาร์คติดกับโคโรน่าเข้าช่องทดสอบ ก่อนและหลังจากมีควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่ของแกน จับหุ่นยนต์ จะได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การหนีบออก-ใส่เร้าอาร์คติดกับโคโรน่าใน 1 ชั่วโมง

แรงดันลม (บาร์)	เวลาในการหมุน 1 รอบ (ms)	จำนวนที่เพิ่มขึ้น (%)
4	2145	2.6

5	2115	4.0
6	2100	4.8
7	2065	6.5
8	2043	7.7

### 7. บทสรุป

จากผลการทดลองทำให้ทราบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันลมกับแอมพลิจูดการสั่นจะขึ้นไปตามสมการที่ (1.4) คือค่าของแอมพลิจูดการสั่นจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วในการ เคลื่อนที่ของแกนจับหุ่นยนต์มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นการที่จะเพิ่ม ปริมาณของการหนีบออก-ใส่เร้าอาร์คติดกับโคโรน่าโดยการเพิ่ม ความเร็วของแกนจับหุ่นยนต์จะต้องคำนึงถึงแอมพลิจูดของ การสั่นที่เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งการลดแอมพลิจูดการสั่นทำได้โดยการ ลดความเร็วก่อนที่แกนจับหุ่นยนต์จะชนกับตัวดูดซับแรง

การออกแนวของจรวดควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่ของ แกนจับหุ่นยนต์นี้สามารถนำไปใช้งานจริงได้เนื่องจากเวลาใน การเคลื่อนที่และแอมพลิจูดของการสั่นอยู่ภายใต้ข้อกำหนด คือมีค่าน้อยกว่า 0.1 mm และใช้เวลาในการเคลื่อนที่น้อยกว่า 2400 ms

#### 7.1 แนวทางการพัฒนาต่อ

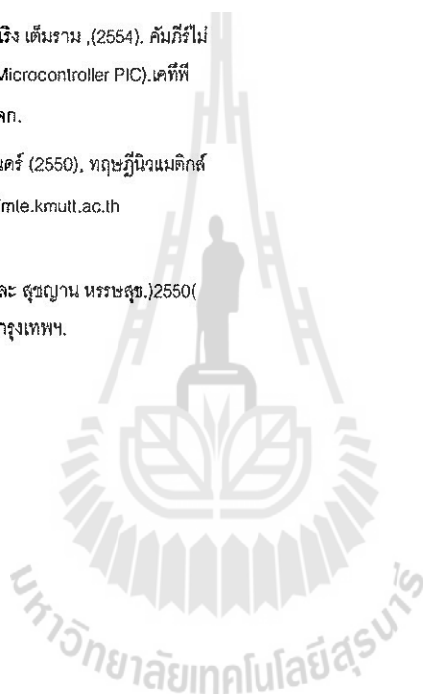
ค่าของเวลาหน่วงในการเปิดวาล์วลม สามารถที่จะบ่ง ขกถึงการเสื่อมสภาพของส่วนประกอบอื่น ๆ ของแกนจับ หุ่นยนต์ได้ ซึ่งสังเกตได้จากค่าของเวลาในการเปิด-ปิดวาล์วลม ที่เปลี่ยนแปลงไป ถ้านำค่าดังกล่าวมาพิจารณาจะทำให้ สามารถซ่อมบำรุงหุ่นยนต์ก่อนที่จะเกิดการชำรุดเสียหายได้

### 8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี วิทยาลัย ภาควิชาเทคโนโลยีอากาศยาน และสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีประเทศไทยจำกัด และสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีไทยอิมแพค (สวทช.) ที่ให้ทุนในการวิจัยในครั้งนี้

### 9. เอกสารอ้างอิง

- [1] Jiraphon Sriserlpol, Sumelee Theesungnern and Adisoi Boonmag (2008) "Testing of a Miniature Shock Absorber Base on Operating Situation to Obtain Its Parameters", in Proceedings of the Industrial Engineering Network Conference 2008, p.921-926.
- [2] จิระพล ศรีเสริฐผล,(2554). MECHANICAL VIBRATION
- [3] เดชฤทธิ์ มณีธรรม และ สำเริง เต็มราม ,(2554). คัมภีร์ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC (Microcontroller PIC).เคทีพี คอมพิวเตอร์ คอนซัลท์,บจก.
- [4] สมคิด ยงหอม,สุชัย นิจรงค์ (2550). ทฤษฎีนิรนามติคส์ [ออนไลน์].ได้จาก [http ://mle.kmutt.ac.th /elearning/Pic/unit.htm](http://mle.kmutt.ac.th/elearning/Pic/unit.htm).
- [5] ประดิษฐ์ หมู่เหมือนตอง และ สุชญา นรราชสุข.(2550)วิเคราะห์การสั่นสะเทือน.กรุงเทพฯ.



## ประวัติผู้เขียน

นายไกรลาส บุตรบุญชู เกิดเมื่อวันที่ 20 กุมภาพันธ์ 2521 ณ จังหวัดชัยภูมิ จบการหลักสูตร ประกอบวิชาชีพชั้นสูงสาขาวิชาเทคนิคคอมพิวเตอร์ ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัด ของแก่นเมื่อปี พ.ศ. 2545 และสำเร็จการศึกษาจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปี 2548 หลังจากสำเร็จการศึกษาได้เข้าทำงานใน บริษัทซีเกท ซึ่งเป็นบริษัทผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์โดยมีหน้าที่เป็นวิศวกรการดูแลรักษาการทำงานของ เครื่องทดสอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ใช้หุ่นยนต์อัตโนมัติในการหยิบจับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในเครื่องทดสอบจึง เป็นแรงจูงใจให้ ศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาแมคคาทรอนิกส์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2552 ซึ่งในขณะที่ศึกษาอยู่ได้มีความสนใจในวิชาที่เรียน เรื่องการสั่นสะเทือน (Vibration) และ ไมโครโปรเซสเซอร์ จึงทำให้ผู้ทำวิจัยทำการค้นคว้าและ ออกแบบวงจรควบคุมการสั่นของแขนจับหุ่นยนต์ในการวิจัยครั้งนี้

