

ชุดทดสอบเซ็นเซอร์ตรวจวัดการสีกหรือของมีดกลึงด้วยสัญญาณการสั่นสะเทือน

ชุดิมา เวชพันธ์

TNI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

บัณฑิตวิทยาลัย สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรม

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

ปีการศึกษา 2559

SENSOR TESTING SET FOR TOOL WEAR MONITORING WITH VIBRATION SIGNALS

Chutima Watchapan

TNI

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for The Degree of Master of Engineering Program in Engineering Technology

Graduate School
Thai-Nichi Institute of Technology

Academic Year 2016

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ชุดทดสอบเซ็นเซอร์ตรวจวัดการสีกหรือของมีดกลึงด้วย
สัญญาณการสั่นสะเทือน

โดย

ชุตินา เวชพันธ์

สาขาวิชา

เทคโนโลยีวิศวกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วราคม เนินน้อย

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. พิชิต สุขเจริญพงษ์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ดร. เสถียรพงศ์ หุยนันท์)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พรชัย นิเวศน์รังสรรค์)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จินตวัฒน์ ไชยชนะวงศ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วราคม เนินน้อย)

ชุดิมา เวชพันธ์ : ชุดทดสอบเซ็นเซอร์ตรวจวัดการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ด้วยสัญญาณการ
สั่นสะเทือน. อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วราคม เนินน้อย, 123 หน้า.

ในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาเกี่ยวกับการสร้างชุดตัวรับรู้สำหรับวัดการสั่นสะเทือน (ADXL) ราคาถูก และทำการทดสอบเปรียบเทียบกับชุดตัวรับรู้อ้างอิงที่มีมาตรฐาน (PCB) โดยการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนจากคานซึ่งเกิดจากงานไม่สมดุลที่ยึดไว้บนคาน และถูกหมุนด้วย DC มอเตอร์ ทั้งนี้ความเร็วรอบในการหมุนของมอเตอร์ถูกปรับไปที่ความถี่ 97, 120, 127, 134 และ 159 Hz ซึ่งถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์วัดความเร็วรอบของมอเตอร์ HIOKI 3403 สำหรับชุดวัดสัญญาณ ADXL ใช้ความเร็วในการอ่านสัญญาณ 10 kHz โดยเก็บข้อมูลชุดละ 10000 ข้อมูล ส่วนชุดเซ็นเซอร์ PCB ใช้ความเร็วในการอ่านสัญญาณ 51.2 kHz สัญญาณการสั่นสะเทือนทั้งสองใช้โปรแกรม LabVIEW ในการเก็บ และวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนในโดเมนเวลา และโดเมนความถี่ ในการทดลองครั้งนี้เซ็นเซอร์ ADXL และ PCB ถูกติดตั้งที่ตำแหน่งเดียวกันบนคาน และจับสัญญาณการสั่นสะเทือนพร้อมกัน

จากการทดลองสัญญาณที่วัดจาก ADXL สามารถให้ค่าความถี่การหมุนของงานไม่สมดุลที่ถูกต้อง ผิดพลาดน้อยกว่า 3 % เมื่อเทียบกับการวัดด้วย PCB และอุปกรณ์วัดความเร็วรอบ ส่วนการสั่นสะเทือนที่ความถี่อื่นๆ ที่เกิดบนคาน สัญญาณสั่นสะเทือนที่วัดจาก ADXL และ PCB เมื่อวิเคราะห์หาค่า Mean และ SD ของสัญญาณก็มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน คือที่ความถี่ของสัญญาณเพิ่มขึ้นค่า Mean และ SD จะเพิ่มสูงขึ้นเป็นสัดส่วน และที่ความเร็วที่มากกว่า 100 Hz จะวัดสัญญาณสั่นสะเทือนได้ดีขึ้น เนื่องจากแรงสั่นสะเทือนเพิ่มขึ้นตามแรงหนีศูนย์กลาง

TNI

บัณฑิตวิทยาลัย
สาขาวิชา เทคโนโลยีวิศวกรรม
ปีการศึกษา 2559

ลายมือชื่อนักศึกษา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

CHUTIMA WATCHAPAN : SENSOR TESTING SET FOR TOOL WEAR MONITORING
WITH VIBRATION SIGNALS. ADVISOR : ASST. PROF. DR. WARAKOM NERDNOI,
123 PP.

This research is a study of low cost accelerometer (ADXL) and testing to compare with reference accelerometer (PCB). The testing vibration signals on beam that was generated by a rotated unbalance mass which was drove by DC motor. The rotating speed of motor was adjusted to 97, 120, 127, 134 and 159 Hz which was measured by Tachometer (HIOKI 3403). The measured signals of ADXL was read with sampling rate 10 kHz and 10000 data where the measured signals of PCB was read with sampling rate 51.2 kHz. These vibration signals were collected and analyzed on time-domain and frequency-domain with LabVIEW program that was developed by AIE&T Laboratory. In these testing the ADXL and PCB were fixed on the same position on vibrated beam and collected signal at the same time.

In these testing, the signal from ADXL can gave a right frequency of the rotated unbalance mass, the errors were less than 3 % which were compare to PCB and Tachometer. For the time-domain analyze of Mean and SD values, the results shown the same trend between the ADXL and PCB signals. At the higher frequency of unbalance mass rotating, there were good results since there were a strong vibration signals that were effect from more centrifugal force at high rotating speed.

TNI

Graduate School
Field of Engineering of Technology
Academic Year 2016

Student's Signature.....
Advisor's Signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้กระทำให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี อันเนื่องมาจากความกรุณาของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วราคม เนติน้อย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ กรุณาเสียเวลาอันมีค่าของท่าน มาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาแนวทางและการพัฒนาในการทำวิจัย ตลอดจนสอนขั้นตอนการดำเนินวิจัยตลอดการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรชัย นิเวศน์รังสรรค์ (สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น) ที่กรุณาเสียสละเวลาให้คำปรึกษา อีกทั้งยังแนะนำโปรแกรม LabVIEW ที่ใช้ในการทำวิจัย และให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์ทำวิจัย และแนะนำความรู้ในเรื่องต่างๆ

ขอขอบพระคุณ ดร. เสถียรพงศ์ หุยนันท์ (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร) ที่กรุณาเสียสละเวลาเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จินตวัฒน์ ไชยชนะวงศ์ (สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น) ที่กรุณาเสียสละเวลาเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

และท้ายที่สุดขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ที่ให้โอกาสในการศึกษาและขอบคุณเพื่อนๆ อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน ทั้งผู้ที่กล่าวนามและไม่ได้กล่าวนามใน ณ ที่นี้ผู้เขียนมีความซาบซึ้งในความกรุณาอันดีเยี่ยมจากทุกท่านและขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ชุตินา เวชพันธ์

TNI

THAI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฌ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 แผนการดำเนินงาน.....	3
2 หลักการพื้นฐาน และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 หลักการพื้นฐาน.....	4
2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	60
3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	62
3.1 กระบวนการวิจัย.....	62
3.2 แผนการทดลอง	66
3.3 การทดลอง.....	71
4 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	73
4.1 ผลการทดลอง.....	73

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	91
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	91
5.2 ข้อเสนอแนะ	91
บรรณานุกรม	92
ภาคผนวก	96
ภาคผนวก ก. Data Sheet เซ็นเซอร์ ADXL001	97
ภาคผนวก ข. DC Motor Speed Control	108
ภาคผนวก ค. Data Sheet HIOKI 3404	110
ภาคผนวก ง. Data Sheet DAQ Card USB-6009	113
ภาคผนวก จ. Data Sheet เซ็นเซอร์ PCB 356A01	121
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	123

TNI

TAHITI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 แผนงานและระยะเวลาดำเนินงาน	3
4.1 ค่าวิเคราะห์ในโดเมนเวลาที่มีความถี่การสั่นสะเทือน 32.2 Hz	78
4.2 ค่าวิเคราะห์ในโดเมนเวลาที่มีความถี่การสั่นสะเทือน 53.2 Hz	78
4.3 ค่าวิเคราะห์ในโดเมนเวลาที่มีความถี่การสั่นสะเทือน 73.7 Hz	78
4.4 ค่าวิเคราะห์ในโดเมนเวลาที่มีความถี่การสั่นสะเทือน 5820 rpm (97 Hz).....	87
4.5 ค่าวิเคราะห์ในโดเมนเวลาที่มีความถี่การสั่นสะเทือน 7200 rpm (120 Hz).....	87
4.6 ค่าวิเคราะห์ในโดเมนเวลาที่มีความถี่การสั่นสะเทือน 7620 rpm (127 Hz).....	87
4.7 ค่าวิเคราะห์ในโดเมนเวลาที่มีความถี่การสั่นสะเทือน 8040 rpm (134 Hz).....	87
4.8 ค่าวิเคราะห์ในโดเมนเวลาที่มีความถี่การสั่นสะเทือน 9540 rpm (159 Hz)	88
4.9 ผลการยืนยันผลการทดลองที่โดเมนความถี่ด้วยอุปกรณ์วัดความเร็วรอบของมอเตอร์ (HIOKI 3403) ที่ความถี่การสั่นสะเทือน 5820 rpm (97 Hz), 7200 rpm (120 Hz), 7620 rpm (127 Hz), 8040 rpm (134 Hz) และ 9540 rpm (159 Hz).....	90



TNi

สารบัญรูป

รูป	หน้า
2.1 การสึกหรอจากการขัดสี.....	4
2.2 การสึกหรอจากการยึดเกาะของวัสดุ.....	4
2.3 การสึกหรอจากการแพร่ของธาตุ.....	5
2.4 (a) ส่วนประกอบ 7 อย่างที่ใช้ในการพิจารณารูปร่างของมิตัดคมเดียว และ (b) สัญลักษณ์ของส่วนประกอบ 7 อย่างที่ใช้ในการพิจารณารูปร่างของ มิตัดคมเดียว.....	6
2.5 อุปกรณ์กำจัดเศษตัดในมิตคมตัดเดียวมี 2 วิธี: (a) อุปกรณ์กำจัดเศษตัดแบบ Groove และ (b) อุปกรณ์กำจัดเศษตัดแบบ Obstruction.....	7
2.6 3 วิธีของการยึดจับและคมตัดของมิตคมตัดเดียว : (a) เป็นมิตตัดทั้งอันที่ทำจากเหล็กกล้า ความเร็วสูง (b) แสดงชิ้นส่วนของซีเมนต์คาร์ไบด์ที่ยึดติดกับมิตที่ทำจากเหล็กกล้า ด้วยการเชื่อม และ (c) แสดงชิ้นส่วนซีเมนต์คาร์ไบด์ที่ยึดติดกับมิตตัดด้วยตัวยึด ทางกล.....	8
2.7 ค่าความแข็งที่อุณหภูมิห้องและค่าความแข็งแรงของวัสดุ.....	9
2.8 ค่าความแข็งของวัสดุชนิดต่างๆ.....	10
2.9 ค่า n และ C ของวัสดุชนิดต่างๆ ที่ใช้คำนวณอายุการใช้งานของมิตตัดโดยสมการ ของเทย์เลอร์.....	11
2.10 ค่าความเร็วในการตัดที่เหมาะสมสำหรับวัสดุที่ใช้ทำมิตตัดชนิดต่างๆ และปีที่เริ่มใช้.....	11
2.11 คุณสมบัติของโลหะผสมชนิดต่างๆ ที่เติมในเหล็กกล้าความเร็วสูง.....	13
2.12 การจัดแบ่งกลุ่มตามมาตรฐานจากระบบเกรดซีของซีเมนต์คาร์ไบด์.....	15
2.13 การสึกหรอของใบมีดกลึง.....	17
2.14 การสึกหรอบนผิวหลบ.....	17
2.15 การสึกหรอบนผิวคาย.....	18
2.16 การสึกหรอที่ปลายมีดกลึง.....	18
2.17 เขตของการสึกหรอตามมาตรฐานสากล (ISO).....	19
2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการใช้งานของมิตและขนาดการสึกหรอแบบ Flank Wear.....	22
2.19 อิทธิพลของความเร็วตัดต่อขนาดการสึกหรอแบบ Flank Wear.....	23
2.20 ตัวอย่างการตรวจสอบขนาดการสึกหรอโดยตรง.....	24

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
2.21 ลักษณะของการสั่น	25
2.22 ตัวอย่างของสัญญาณ.....	26
2.23 สัญญาณ Sinusoidal ซึ่งมีความถี่ 6 Hz แสดงการเปลี่ยนแปลงของระดับสัญญาณ (Amplitude) เทียบกับเวลา (Time) ในช่วงเวลา 1 วินาที.....	27
2.24 สัญญาณ Sinusoidal ซึ่งมีเฟสเลื่อนไป 0 90 และ 180 องศา ตามลำดับ	28
2.25 การแสดงผลในโดเมนเวลา Sinusoidal Signal ที่มีแอมพลิจูดและความถี่ต่างกันแสดง การเปลี่ยนแปลงความเข้ม (Amplitude) ของสัญญาณทั้งสองเทียบกับเวลา (Time).....	30
2.26 กราฟโดเมนเวลาประกอบไปด้วยความถี่ซ้อนกันหลายความถี่.....	31
2.27 การแสดงผลในโดเมนเวลา (ซ้าย) เทียบกับการแสดงผลในโดเมนความถี่ (ขวา) ของ Sinusoidal Signal ที่มีความถี่ต่างกัน	31
2.28 แนวคิดของความเพี้ยนของสัญญาณที่ฝั่งด้านรับ (Output Signal) จากสัญญาณที่ฝั่ง ด้านส่ง (Input Signal)	33
2.29 กราฟความถี่ของแถบความถี่ที่สามารถส่งผ่านตัวกลางไปได้ ซึ่งอยู่ในช่วง 1000 Hz ถึง 5000 Hz หรือคิดเป็นความกว้างของแถบความถี่ ซึ่งมีความกว้างเท่ากับ 4000 Hz....	33
2.30 กราฟความถี่ของแถบความถี่ที่สามารถส่งผ่านตัวกลางไปได้ ซึ่งอยู่ในช่วง 1000 Hz ถึง 5000 Hz หรือคิดเป็นความกว้างของแถบความถี่ ซึ่งมีความกว้างเท่ากับ 4000 Hz....	35
2.31 การเกิดความเพี้ยนในตัวกลางอันเนื่องมาจากความต่างเฟสกันของความถี่แต่ละ องค์ประกอบ	35
2.32 เส้นสเปกตรัมของสัญญาณรายคาบ (ก) สเปกตรัมด้านเดียว (ข) สเปกตรัมสองด้าน.....	38
2.33 ขบวนการพัลส์สี่เหลี่ยมรายคาบ	39
2.34 ฟังก์ชัน $\frac{\sin(\pi x)}{\pi x}$	40
2.35 สเปกตรัมของสัญญาณขบวนการพัลส์สี่เหลี่ยม (ก) ขนาด (ข) เฟส	40
2.36 สัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมที่สร้างจากอนุกรมฟูเรียร์ (ก) ผลรวมสามเทอม (ข) ผลรวมถึง เทอมที่ 7	41
2.37 สัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยม $A \Pi\left(\frac{f}{f_c}\right)$	44
2.38 สเปกตรัมของพัลส์สี่เหลี่ยม $V(f) = A \text{sinc } f \tau$	45

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
2.39 สัญญาณรูปแบบชายน์.....	46
2.40 การแทนเฟสเซอร์ของสัญญาณรูปแบบชายน์.....	47
2.41 ตัวอย่างการแทนสัญญาณด้วยเฟสเซอร์.....	48
2.42 (ก) คอนจูเกตเฟสเซอร์ (ข) เส้นสเปกตรัมสองด้าน	49
2.43 สเปกตรัมสองด้านของสัญญาณรูปที่ 2.37	49
2.44 ความสัมพันธ์ของการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลากับโดเมนความถี่.....	51
2.45 ความละเอียดที่ใช้แสดงผลของความถี่บนจอ	51
2.46 ความสัมพันธ์ของหน่วยสัญญาณการสั่นสะเทือน.....	52
2.47 หลักการทำงานของ Fast Fourier Transform.....	57
2.48 ผลการปรับค่าซีโรของวงจรซีโรสแปน	58
2.49 ผลการปรับค่าสแปนของวงจรซีโรสแปน	59
2.50 วงจรปรับซีโรและสแปน	59
3.1 ชุดทดสอบเพื่อสร้างแรงสั่นสะเทือน เพื่อใช้ในการสอบเทียบเซ็นเซอร์ Accelerometer ...	63
3.2 DC มอเตอร์และจานหมุนที่มีมวลไม่สมดุล.....	63
3.3 เซ็นเซอร์จับสัญญาณสั่นสะเทือน PCB.....	64
3.4 เซ็นเซอร์จับสัญญาณสั่นสะเทือน ADXL.....	64
3.5 ตำแหน่งติดตั้งเซ็นเซอร์เพื่อวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน ณ ตำแหน่งเดียวกันบนคาน.....	64
3.6 ชุดทดสอบเพื่อสร้างแรงสั่นสะเทือนที่มีการปรับแต่ง	66
3.7 อุปกรณ์วัดความเร็วรอบของมอเตอร์ (HIOKI 3403).....	66
3.8 ผังการดำเนินงานการทดลองที่ 1	67
3.9 การเก็บผลโดยผ่านโปรแกรม LABVIEW.....	68
3.10 วิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนในโดเมนเวลา.....	68
3.11 วิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนในโดเมนความถี่	69
3.12 ผังการดำเนินงานการทดลองที่ 2	70
3.13 การเชื่อมต่อระบบในการเก็บข้อมูลของเซ็นเซอร์ ADXL ใช้ Arduino เป็นชุดอ่านค่า.....	71
3.14 การเชื่อมต่อระบบในการเก็บข้อมูลของเซ็นเซอร์ PCB และชุด DAQ Card ของ National Instrument รหัส NI 9234 และ NI cDAQ-9191 เป็นชุดอ่านค่า	71

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
3.15 การเชื่อมต่อระบบในการเก็บข้อมูลของเซ็นเซอร์ ADXL ใช้ DAQ Card เป็นชุดอ่านค่า.....	72
3.16 การเชื่อมต่อระบบในการเก็บข้อมูลของเซ็นเซอร์ PCB และชุด DAQ Card ของ National Instrument รหัส NI 9234 และ NI cDAQ-9191 เป็นชุดอ่านค่า	72
4.1 สัญญาณจากเซ็นเซอร์อ้างอิง (PCB).....	73
4.2 สัญญาณจากเซ็นเซอร์ ADXL ที่ความเร็วในการอ่านสัญญาณ 2000 Hz.....	74
4.3 สัญญาณจากเซ็นเซอร์ ADXL ที่ความเร็วในการอ่านสัญญาณ 4000 Hz.....	74
4.4 สัญญาณจากเซ็นเซอร์ ADXL ที่ความเร็วในการอ่านสัญญาณ 8000 Hz.....	75
4.5 ผลวิเคราะห์บนโดเมนเวลา ของสัญญาณจากเซ็นเซอร์ ADXL ที่ความเร็วในการอ่านสัญญาณ 8000 Hz	75
4.6 ผลวิเคราะห์ในโดเมนความถี่ที่ความถี่ของการสั่นสะเทือน 1932 rpm (32.2 Hz).....	76
4.7 ผลวิเคราะห์ในโดเมนความถี่ที่ความถี่ของการสั่นสะเทือน 3189 rpm (53.2 Hz).....	77
4.8 ผลวิเคราะห์ในโดเมนความถี่ที่ความถี่ของการสั่นสะเทือน 4419 rpm (73.7 Hz).....	77
4.9 ผลการวิเคราะห์ในโดเมนความถี่สัญญาณจากเซ็นเซอร์อ้างอิง (PCB) ที่ความถี่ของการสั่นสะเทือน 5820 rpm (97 Hz).....	80
4.10 ผลการวิเคราะห์บนโดเมนความถี่สัญญาณจากเซ็นเซอร์ ADXL ที่ความถี่ของการสั่นสะเทือน 5820 rpm (97 Hz).....	80
4.11 ผลการวิเคราะห์บนโดเมนความถี่สัญญาณจากเซ็นเซอร์อ้างอิง (PCB) ที่ความถี่ของการสั่นสะเทือน 7200 rpm (120 Hz).....	81
4.12 ผลการวิเคราะห์บนโดเมนความถี่สัญญาณจากเซ็นเซอร์ ADXL ที่ความถี่ของการสั่นสะเทือน 7200 rpm (120 Hz).....	82
4.13 ผลการวิเคราะห์บนโดเมนความถี่สัญญาณจากเซ็นเซอร์อ้างอิง (PCB) ที่ความถี่ของการสั่นสะเทือน 7620 rpm (127 Hz).....	83
4.14 ผลการวิเคราะห์บนโดเมนความถี่สัญญาณจากเซ็นเซอร์ ADXL ที่ความถี่ของการสั่นสะเทือน 7620 rpm (127 Hz).....	83
4.15 ผลการวิเคราะห์บนโดเมนความถี่สัญญาณจากเซ็นเซอร์อ้างอิง (PCB) ที่ความถี่ของการสั่นสะเทือน 8040 rpm (134 Hz).....	84

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.16 ผลการวิเคราะห์แบนโดเมนความถี่สัญญาณจากเซ็นเซอร์ ADXL ที่ความถี่ของการสั่นสะเทือน 8040 rpm (134 Hz).....	85
4.17 ผลวิเคราะห์แบนโดเมนเวลา ของสัญญาณจากเซ็นเซอร์ ADXL ที่ความถี่ของการสั่นสะเทือน 8040 rpm (134 Hz).....	86
4.18 ผลการวิเคราะห์แบนโดเมนความถี่สัญญาณจากเซ็นเซอร์ ADXL ที่ความถี่ของการสั่นสะเทือน 9540 rpm (159 Hz).....	86
4.19 กราฟค่าเฉลี่ยของ Mean จากผลการวิเคราะห์ในโดเมนเวลาที่ความถี่ของการสั่นสะเทือน 5820 rpm (97 Hz), 7200 rpm (120 Hz), 7620 rpm (127 Hz) และ 8040 rpm (134 Hz).....	88
4.20 กราฟเฉลี่ยของ SD จากผลการวิเคราะห์ในโดเมนเวลาที่ความถี่ของการสั่นสะเทือน 5820 rpm (97 Hz), 7200 rpm (120 Hz), 7620 rpm (127 Hz) และ 8040 rpm (134 Hz).....	89

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนต่างๆ มีการแข่งขันที่สูงมาก ผู้ผลิตจึงมีความจำเป็นต้องพัฒนาศักยภาพในการผลิต และลดต้นทุนเพื่อที่จะสามารถแข่งขันกับบริษัทอื่นได้ อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนส่วนใหญ่จะนิยมเอาเทคโนโลยีสมัยใหม่เข้ามาในการผลิต เพื่อให้สามารถควบคุมคุณภาพและปริมาณการผลิตชิ้นส่วนได้เป็นอย่างดี รวมถึงความไม่ยุ่งยากในการใช้ทักษะและความสามารถของผู้ควบคุมเครื่องจักร

ในปัจจุบันกระบวนการผลิตชิ้นส่วนโดยใช้เครื่อง CNC Lathe มีการป้องกันชิ้นงานเสียหายเนื่องจากการสั่นหรือของมีดกลึงที่นิยมใช้ทั่วไปในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วน คือ การกำหนดระยะเวลาในการใช้งานมีดกลึงที่ปลอดภัยต่อชิ้นงาน ซึ่งการกำหนดระยะเวลานั้นต้องมีการเผื่อระยะเวลาช่วงหนึ่งก่อนที่มีดกลึงจะมีการสึกหรอจริง เป็นการใช้มีดกลึงที่ทำให้ชิ้นงานออกมามีคุณภาพ แต่เป็นการใช้มีดกลึงไม่คุ้มค่าที่สุด เนื่องจากการเผื่อระยะเวลาไว้มาก่อนมีดกลึงมีการสึกหรอจริง เพื่อความปลอดภัยของชิ้นงาน ช่วงระยะเวลาที่เผื่อค่าไว้นั้นคือต้นทุนที่สูงสูญเสียเปล่า อีกทั้งยังเป็นการสูญเสียเวลาในการเปลี่ยนมีดกลึงบ่อยเกินความจำเป็น ดังนั้นถ้าสามารถพัฒนาระบบ Monitoring ให้มีความแม่นยำในการบ่งบอกสภาพการสึกหรอจริงของมีดกลึงที่ใช้อยู่ในช่วงเวลานั้นๆได้ จะช่วยให้สามารถลดต้นทุนและเวลาในการผลิตชิ้นส่วนได้เป็นอย่างมาก จึงได้มีการพัฒนาการตรวจสอบสถานะของมีดกลึง ด้วยการใช้สัญญาณสั่นสะเทือนของใบมีดกลึง เพื่อใช้ในการทำนายสถานะของมีดกลึง เพื่อป้องกันไม่ให้เกิด ปัญหาต่างๆ ขึ้น เช่น การแตกหักของมีดกลึง สถานะการตัดเฉือนต่างๆ ที่ไม่เหมาะสมที่ทำให้เกิด Chatter การเกิดเศษโลหะที่ต่อเนื่องและการสึกหรอของใบมีดกลึง เป็นต้น ซึ่งปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นนั้นจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของชิ้นงานรวมไปถึงอายุการใช้งานของเครื่องจักร จึงมีความจำเป็นที่ต้องมีการทำนายการสึกหรอของมีดกลึง

ในการตรวจสอบสถานะของมีดกลึงด้วยการใช้สัญญาณสั่นสะเทือนของมีดกลึงต้องใช้เซ็นเซอร์ Accelerometer ที่ได้มาตรฐาน ซึ่งมีราคาแพงประมาณ 100,000 บาทต่อชุด ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ค่อนข้างที่จะแม่นยำ ส่งผลให้อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนที่มีขนาดเล็ก และขนาดกลางที่ต้องการจะพัฒนาการตรวจสอบสถานะการสึกหรอของมีดกลึง เพื่อให้สามารถควบคุมคุณภาพเป็นไปได้อย่างมาก จึงได้มีงานวิจัยที่ทำการศึกษาการตรวจสอบสถานะของมีดกลึงด้วยเซ็นเซอร์ Accelerometer ที่มีราคาถูก เพื่อให้อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนที่มีขนาดเล็กและขนาดกลางสามารถนำมาใช้แทน Accelerometer ที่มีราคาแพงได้

จากการศึกษาค้นคว้างานวิจัย พบว่า ธวัชชัย นิกากิจ [1] ได้นำเสนอการทำนายสภาวะการสั่นของมอดกิ้งบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีด้วยสัญญาณการสั่นสะเทือนในโดเมนความถี่ จากผลการทดลองพบว่าความถี่ที่สามารถเห็นความเปลี่ยนแปลงของการสั่นของมอดกิ้งได้คือความถี่ที่ 1800-3000 Hz. จึงทำการค้นคว้าหาเซ็นเซอร์ Accelerometer ที่มีราคาถูกและเหมาะสมในการทำนายสภาวะการสั่นของมอดกิ้งได้อยู่ในช่วงความถี่ 1800-3000 Hz จึงได้พบว่าเซ็นเซอร์ ADXL (ADXL001-70) มีช่วงความถี่ในการสั่น 22 kHz ซึ่งอยู่ในช่วงความถี่ที่สามารถใช้ในการทำนายสภาวะการสั่นของมอดกิ้ง และในครั้งนี้จะใช้เซ็นเซอร์ PCB (PCB 356A01 Accelerometer) เป็นเซ็นเซอร์อ้างอิงที่ได้มาตรฐานและมีราคาแพง ซึ่งเป็นเซ็นเซอร์ที่ใช้ใน Lab ของสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

ในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาเกี่ยวกับการสร้างชุดเซ็นเซอร์ Accelerometer ราคาถูก ซึ่งจะทำให้การเปรียบเทียบกับเซ็นเซอร์ Accelerometer ที่ได้มาตรฐาน ก่อนนำไปใช้งานจริง เพื่อให้อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนที่มีขนาดเล็ก และขนาดกลางจะสามารถใช้งานได้เพื่อการพัฒนาศักยภาพในกระบวนการผลิตให้สามารถควบคุมคุณภาพ และลดต้นทุนในการผลิตได้ เพื่อที่จะสามารถแข่งขันกับบริษัทอื่นๆ ได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อสร้างชุดเซ็นเซอร์ Accelerometer ที่มีราคาถูก และสามารถใช้ในการทำนายสภาวะการสั่นของมอดกิ้งได้จริง

1.2.2 เพื่อศึกษาชุดเซ็นเซอร์จับสัญญาณสั่นสะเทือน ADXL ที่มีราคาถูกกับชุดเซ็นเซอร์จับสัญญาณสั่นสะเทือน PCB ที่ได้มาตรฐาน ว่าสามารถใช้ทดแทนกันได้หรือไม่

1.3 ขอบเขตการวิจัย

สร้างและพิจารณาชุดเซ็นเซอร์ Accelerometer ของเซ็นเซอร์ ADXL ที่มีราคาถูกกับชุดเซ็นเซอร์จับสัญญาณสั่นสะเทือน PCB ว่าสามารถใช้ทดแทนกันได้หรือไม่

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถสร้างชุดเซ็นเซอร์ Accelerometer ที่ได้มาตรฐานและมีราคาถูก สามารถใช้ในการทำนายสภาวะการสั่นของมอดกิ้งได้จริง

1.4.2 สามารถหาชุดเซ็นเซอร์ Accelerometer ที่มีราคาถูกเหมาะสมในการทำนายสภาวะการสั่นของมอดกิ้งได้

บทที่ 2

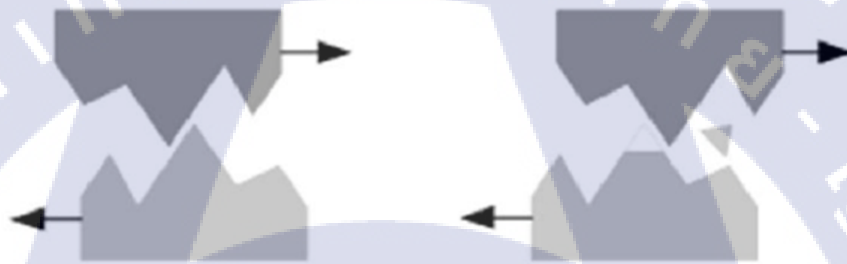
หลักการพื้นฐาน และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการพื้นฐาน

2.1.1 กลไกการสึกหรอ (Tool Wear Mechanism) [2]

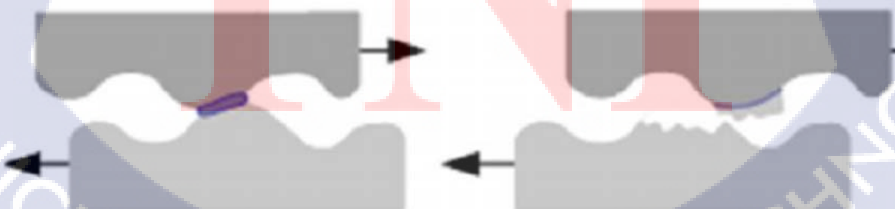
กลไกการสึกหรอที่มีผลต่อมีดกลึงแบ่งออกเป็น 3 ประเภท

1. การสึกหรอจากการขัดสี (Abrasive Wear) เกิดจากการขัดสีของวัสดุชิ้นงานที่แข็งมาสัมผัสหรือขัดบนผิวของมีดกลึงจึงทำให้เกิดการขูดเนื้อของมีดกลึงที่ผิวสัมผัสออก ทำให้เกิดการสึกหรอที่มีดกลึงเกิดขึ้นเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิด Flank Wear ดังรูปที่ 2.1



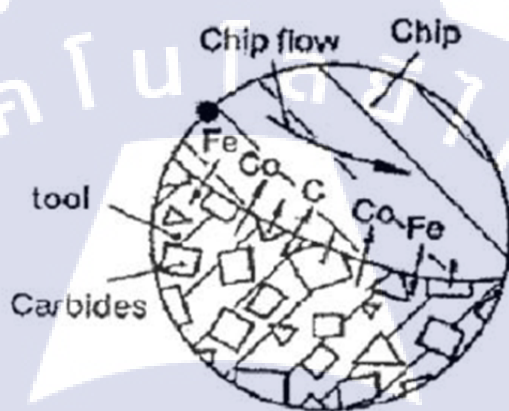
รูปที่ 2.1 การสึกหรอจากการขัดสี

2. การสึกหรอจากการยึดเกาะของวัสดุ (Adhesive Wear) การสึกหรอเนื่องจากการยึดเกาะของวัสดุที่เกิดจากการสัมผัสของวัสดุของชนิดภายใต้อุณหภูมิและความดันที่สูงและเกิดแรงเฉือนจนทำให้บริเวณที่สัมผัสกันยึดเกาะเป็นเนื้อเดียวกับวัสดุที่มีความแข็งแรงน้อยกว่าก็จะขาดออกจากตัวเนื้อวัสดุ ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การสึกหรอจากการยึดเกาะของวัสดุ

3. การสึกหรอจากการแพร่ของธาตุวัสดุ (Diffusive Wear) การสึกหรอเนื่องจากการแพร่ของธาตุวัสดุเกิดจากสภาวะของแข็ง 2 ชนิดที่สัมผัสกันภายใต้อุณหภูมิที่สูง และเกิดการแพร่ของอะตอมเคลื่อนย้ายจาก Lattice ที่มีความเข้มข้นมากกว่าไปยังที่มีความเข้มข้นน้อยกว่าการที่อะตอมของมิดกึ่งแพร่ออกไปภายนอกส่งผลให้คุณสมบัติเปลี่ยนไปหรือสึกหรอได้ง่ายและอาจส่งผลให้วัสดุของชิ้นงานมีความแข็งมากขึ้นการแพร่ของอะตอมจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่าง 2 วัสดุและการสั่นของอะตอมขึ้นอยู่กับอุณหภูมิถ้าเวลาสัมผัสกันนานก็จะแพร่ได้มาก ดังนั้นถ้าใช้ความเร็วตัดที่สูงก็จะแพร่ซึมได้น้อยซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิด Crater Wear ดังรูปที่ 2.3

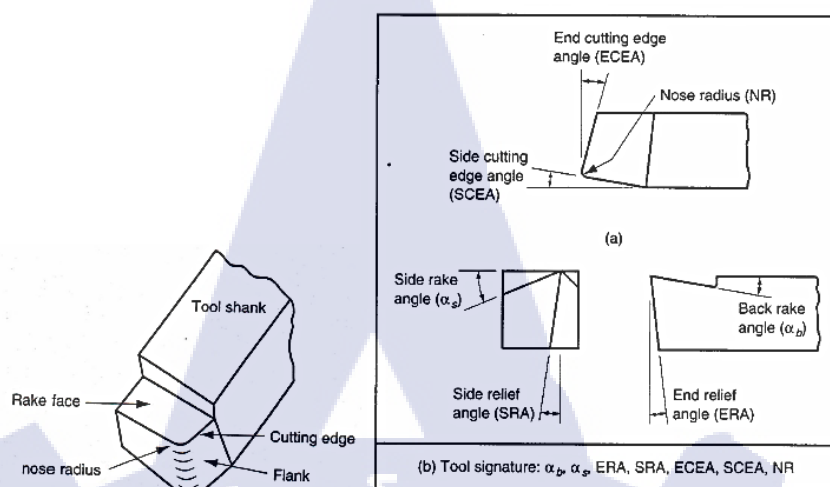


รูปที่ 2.3 การสึกหรอจากการแพร่ของธาตุ

2.1.2 รูปร่างของมีดตัด (Tool Geometry) [3]

เครื่องมือตัดหรือมีดตัดจะต้องมีรูปร่างเหมาะสมกับวิธีการหรือกระบวนการกัด ดังนั้นการจำแนกประเภทของมีดตัดวิธีหนึ่งคือการพิจารณาวิธีการหรือกระบวนการที่ใช้ เช่น การกลึง การไสการกัด การเจาะ การเรียกชื่อมีดตัดจึงเรียกตามกระบวนการดังกล่าว เช่น มีดกลึง มีดตัด มีดกัด ดอกเจาะ ดอกต๊าบ เป็นต้น ดังที่กล่าวถึงในบทที่ผ่านมาว่ามีดตัดสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ มีดตัดคมเดียว (Single-Point Tools) และมีดตัดหลายคม (Multiple-Cutting-Edge Tools) ในส่วนของการพิจารณารูปร่างของมีดตัดนี้จะกล่าวถึงมีดตัดคมเดียวเท่านั้น ส่วนมีดตัดหลายคมสามารถประยุกต์หลักการเดียวกันในการพิจารณารูปร่างมีดตัดที่เหมาะสมได้

รูปร่างของมีดตัดคมเดียว (Single-Point Tool Geometry) รูปร่างของมีดตัดคมเดียวโดยทั่วไปและรายละเอียดแสดงได้ดังรูปที่ 2.4

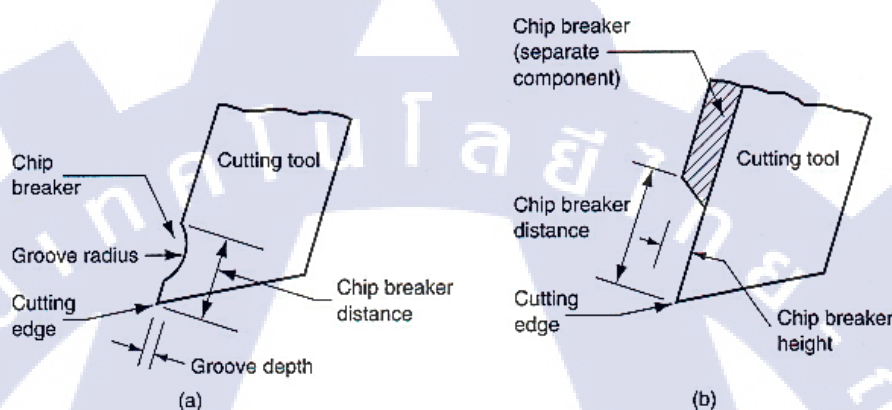


รูปที่ 2.4 (a) ส่วนประกอบ 7 อย่างที่ใช้ในการพิจารณารูปร่างของมีดตัดคมเดียว และ (b) สัญลักษณ์ของส่วนประกอบ 7 อย่างที่ใช้ในการพิจารณารูปร่างของมีดตัดคมเดียว

จากบทที่ผ่านมาเราพิจารณา Rake Angle ของมีดตัดเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอันหนึ่ง ในมีดตัดคมเดียวบริเวณหน้ามีดที่เรียกว่า Rake Face พิจารณาจากมุมสำคัญ 2 มุมคือ Back Rake Angle (α_b) และ Side Rake Angle (α_s) ซึ่งมุมทั้งสองนี้จะใช้ในการพิจารณาทิศทางการไหลของเศษตัดบนหน้ามีด ส่วนผิวของมีดตัดบริเวณ Flank จะพิจารณาจากมุม 2 มุมคือ End Relief Angle (ERA) และ Side Relief Angle (SRA) ซึ่งมุมทั้งสองนี้จะใช้พิจารณาขนาดของระยะเพื่อ (Clearance) ระหว่างมีดตัดกับผิวหน้าใหม่ของชิ้นงาน คมตัดในมีดตัดคมเดียวจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ Side Cutting Edge และ End Cutting Edge ซึ่งแยกออกจากกันที่ส่วนมุมของมีดตัด (Tool Point) ที่มีรัศมีคงที่ค่าหนึ่งเรียกว่า Nose Radius (NR) สำหรับมุมที่เรียกว่า Side Cutting Edge Angle (SCEA) เป็นตัวพิจารณาการเข้าตัดของมีดตัดที่กระทำต่อชิ้นงาน ซึ่งช่วยในการลดแรงที่มีดกระทำต่อชิ้นงาน ส่วน End Cutting Edge Angle (ECEA) เป็นมุมที่ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างหน้ามีดกับผิวใหม่ของชิ้นงานซึ่งช่วยลดการขัดถูและความเสียหายที่เกิดขึ้นระหว่างมีดตัดกับชิ้นงาน

ส่วนประกอบ 7 อย่างที่ใช้ในการพิจารณารูปร่างของมีดตัดคมเดียวเรียกว่า Tool Geometry Signature ประกอบไปด้วย α_b , α_s , ERA, SRA, ECEA, SCEA, NR ตัวอย่างเช่น มีดตัดคมเดียวที่ใช้ในงานกลึงจะระบุรูปร่างของมีดตัดด้วยค่าต่างๆ ดังนี้ 5, 5, 7, 7, 20, 15, 2/64 In

Chip Breakers การกำจัดเศษตัดเป็นปัญหาสำคัญในกระบวนการกลึงและกระบวนการกัดโลหะแบบต่อเนื่อง โดยเฉพาะในกระบวนการกลึงวัสดุเหนียว (Ductile Materials) ที่ความเร็วตัดสูงจะเกิดเศษตัดที่ยาวและมันวาว ซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน ทำความเสียหายให้กับผิวของชิ้นงานและทำให้กระบวนการตัดไม่มีประสิทธิภาพ Chip Breakers หรืออุปกรณ์กำจัดเศษตัดจึงเป็นเครื่องมือที่ช่วยทำให้เศษตัดสั้นลง โดยมี 2 ลักษณะที่นิยมใช้กับมิตัดคมเดียว ดังแสดงในรูปที่ 2.5

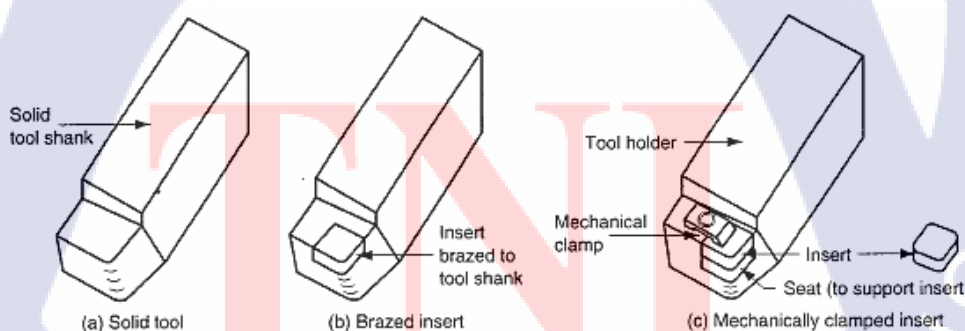


รูปที่ 2.5 อุปกรณ์กำจัดเศษตัดในมิตัดคมเดียวมี 2 วิธี: (a) อุปกรณ์กำจัดเศษตัดแบบ Groove และ (b) อุปกรณ์กำจัดเศษตัดแบบ Obstruction

อุปกรณ์ตัดเศษชนิดแรกเรียกว่า Groove-Type Chip Breaker จะถูกออกแบบให้เป็นส่วนหนึ่งของมิตัด ส่วนอีกประเภทหนึ่งเรียกว่า Obstruction-Type Chip Breaker จะถูกออกแบบให้เป็นชิ้นส่วนที่ติดตั้งเข้ากับผิวหน้ามิตัดที่บริเวณ Rake Face และสามารถปรับระยะให้เหมาะสมกับการตัดในสภาวะต่างๆ กันได้

ผลของวัสดุที่ใช้ทำมิตัดต่อรูปร่างของมิตัด (Effect of Tool Material on Tool Geometry) จากสมการของ Merchant จะเห็นว่า Rake Angle ที่มีค่าบวก (Positive Angle) จะมีความเหมาะสมกับกระบวนการกัดต่างๆ เนื่องจากจะช่วยลดแรง อุณหภูมิ และกำลังงานที่ใช้ในกระบวนการกัด ในมิตัดที่ทำจากเหล็กกล้าความเร็วสูงมักจะกำหนดให้ค่า Rake Angle อยู่ในช่วง $+5^\circ$ ถึง $+20^\circ$ และเนื่องจากมิตัดชนิดนี้จะมีค่า Strength และ Toughness ค่อนข้างสูง ดังนั้นการที่พื้นที่หน้าตัดของมิตัดลดลงเนื่องจากค่ามุมที่สูงขึ้นจึงไม่ปัญหาต่อการแตกหักของมิตัด นอกจากนี้เหล็กกล้าความเร็วสูงยังสามารถนำไปผ่านกระบวนการทางความร้อน (Heat Treatment) ให้มีมิตัดที่แข็งขึ้นได้และสามารถทำมิตัดทั้งอันจากวัสดุชนิดนี้

สำหรับวัสดุที่มีความแข็งมากๆ เช่น ซีเมนต์คาร์ไบด์และเซรามิกส์ การกำหนดรูปร่างของมิตัดจะต่างออกไปเนื่องจากวัสดุกลุ่มนี้จะมีค่าความแข็งสูงกว่าเหล็กกล้าความเร็วสูงแต่มี Toughness ต่ำกว่า ค่าความแข็งแรงต่อแรงเฉือนและแรงดึง (Shear Strength and Tensile Strength) ที่มีค่อนข้างน้อยและวัสดุประเภทนี้มักปรับปรุงคุณสมบัติโดยกระบวนการทางความร้อน ไม่ได้ทำให้การออกแบบรูปร่างมิตัดจากวัสดุกลุ่มนี้จะต่างจากมิตัดที่ทำจากเหล็กกล้าความเร็วสูงประการแรกคือสำหรับวัสดุที่แข็งมากๆ ต้องออกแบบให้ Rake Angle มีค่าน้อยๆ หรือให้มีค่าลบ (Negative Angle) ซึ่งจะช่วยให้สามารถรับแรงอัดได้ดีขึ้นและลดการเกิดแรงเฉือน ตัวอย่างเช่น ซีเมนต์คาร์ไบด์จะมีค่า Rake Angle อยู่ในช่วง -5° ถึง $+10^{\circ}$ ส่วนเซรามิกส์จะกำหนดค่า Rake Angle อยู่ในช่วง -5° ถึง -15° และมักออกแบบให้ Relief Angle มีค่าน้อยๆ (โดยปกติประมาณ 5°) ความแตกต่างอีกประการหนึ่งของการนำวัสดุเหล่านี้มาทำมิตัดคือ จะไม่นิยมทำมิตัดทั้งอันจากวัสดุประเภทนี้เนื่องจากจะมีราคาค่อนข้างแพง ดังนั้นจะใช้เป็นชิ้นส่วนเล็กๆ ที่เรียกว่า Insert ประกอบติดกับมิตัดที่ทำจากวัสดุอื่นโดยการเชื่อมติดหรือโดยการยึดทางกล ดังแสดงในรูปที่ 2.6 รูป (a) เป็นมิตัดทั้งอันที่ทำจากเหล็กกล้าความเร็วสูง ส่วนมิตัดในรูป (b) แสดงชิ้นส่วนของซีเมนต์คาร์ไบด์ที่ยึดติดกับมิตัดที่ทำจากเหล็กกล้าเครื่องมือ (Tool Steel) ด้วยการเชื่อม ในรูป (c) แสดงชิ้นส่วนซีเมนต์คาร์ไบด์ที่ยึดติดกับมิตัดด้วยตัวยึดทางกล (Mechanical Clamp) ข้อดีของการยึดด้วยตัวยึดทางกลคือสามารถหมุนเปลี่ยนคมของมิตัดเมื่อด้านที่ถูกใช้งานเกิดการสึกหรอ รวมถึงสามารถเปลี่ยนชิ้นส่วนใหม่ได้รูปร่างของชิ้นส่วนมิตัดเหล่านี้จะมีความหลากหลาย เช่น มีรูปร่างเป็นสามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม กลม และรูปทรงอื่นๆ



รูปที่ 2.6 3 วิธีของการยึดจับและคมตัดของมิตัดคมเดียว : (a) เป็นมิตัดทั้งอันที่ทำจากเหล็กกล้าความเร็วสูง (b) แสดงชิ้นส่วนของซีเมนต์คาร์ไบด์ที่ยึดติดกับมิตัดที่ทำจากเหล็กกล้าด้วยการเชื่อม และ (c) แสดงชิ้นส่วนซีเมนต์คาร์ไบด์ที่ยึดติดกับมิตัดด้วยตัวยึดทางกล

2.1.3 วัสดุที่ใช้ทำมีดตัด (Tool Materials) [4]

จากลักษณะการพังของเครื่องมือตัด 3 ลักษณะ ที่กล่าวมาแล้วข้างต้นทำให้สามารถระบุคุณสมบัติที่สำคัญ 3 ประการ ของวัสดุที่ควรจะนำมาทำเครื่องมือตัด ดังนี้

1. Toughness เป็นความสามารถของวัสดุที่จะรับพลังงานโดยไม่เกิดการพังหรือแตกหัก วัสดุที่จะใช้ทำมีดตัดควรมีลักษณะผสมระหว่าง ความแข็งแรง (Strength) และความเหนียว (Ductility)

2. Hot Hardness เป็นความสามารถของวัสดุที่จะยังคงความแข็งไว้ได้ที่อุณหภูมิสูง

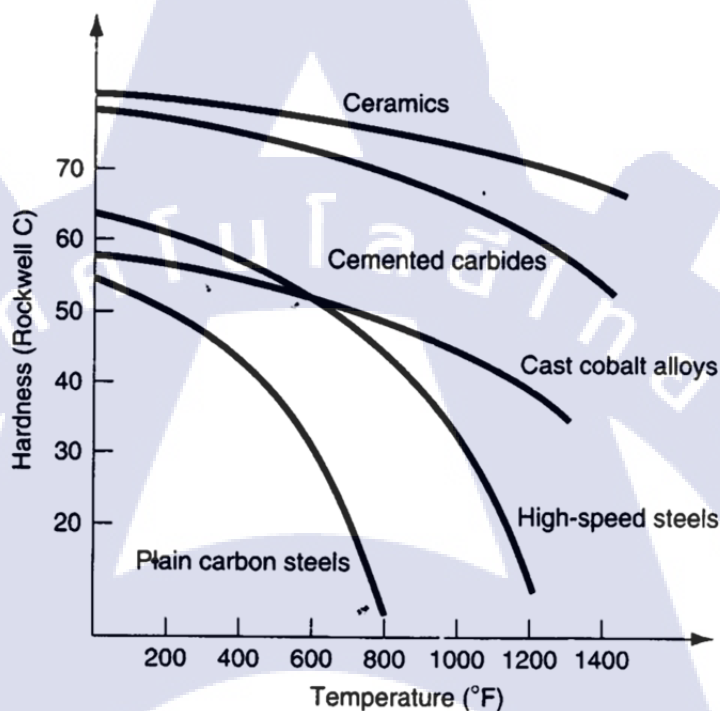
3. Wear Resistance เป็นความสามารถของวัสดุในการต้านทานการสึกหรอซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดในการต้านทานการสึกหรอคือ ความแข็ง

วัสดุที่ใช้ทำมีดตัดควรมีคุณสมบัติสำคัญทั้ง 3 ประการข้างต้น จะมากน้อยแตกต่างกันอย่างไรขึ้นอยู่กับวัสดุที่เลือกมาใช้ วัสดุที่นิยมนำมาใช้ทำมีดตัด ได้แก่ เหล็กกล้าคาร์บอน (Plain Carbon and Low Alloy Steels) เหล็กกล้าความเร็วสูง (High-Speed Steel, HSS) โลหะผสมโคบอลต์ (Cast Cobalt Alloys) ซีเมนต์คาร์ไบด์ (Cemented Carbides, Cermets) เซรามิกส์ (Ceramics) เพชร (Synthetic Diamond) เป็นต้น ค่าความแข็งและความแข็งแรงของวัสดุชนิดต่างๆ ที่ใช้ทำมีดตัดแสดงในรูปที่ 2.7 โดยค่า Transverse Rupture Strength เป็นค่าที่ใช้พิจารณา Toughness ของวัสดุ

Material	Hardness	Transverse Rupture Strength	
		lb/in. ²	(MPa)
Plain carbon steel	60 HRC	750,000	(5200)
High-speed steel	65 HRC	600,000	(4100)
Cast cobalt alloy	65 HRC	325,000	(2250)
Cemented carbide (WC)			
Low Co content	93 HRA, 1800 HK	200,000	(1400)
High Co content	90 HRA, 1700 HK	350,000	(2400)
Cermet (TiC)	2400 HK	250,000	(1700)
Alumina (Al ₂ O ₃)	2100 HK	60,000	(400)
Cubic boron nitride	5000 HK	100,000	(700)
Polycrystalline diamond	6000 HK	150,000	(1000)
Natural diamond	8000 HK	215,000	(1500)

รูปที่ 2.7 ค่าความแข็งที่อุณหภูมิห้องและค่าความแข็งแรงของวัสดุ

รูปที่ 2.8 แสดงค่าความแข็งของวัสดุชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิต่างๆ กัน จะเห็นว่าค่าความแข็งของวัสดุที่ใช้ทำมีดตัดจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น จากกราฟพบว่าเหล็กกล้าคาร์บอนจะสูญเสียความแข็งอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ส่วนเซรามิกส์และซีเมนต์คาร์ไบด์จะยังคงความแข็งได้มากที่อุณหภูมิสูงๆ



รูปที่ 2.8 ค่าความแข็งของวัสดุชนิดต่างๆ

รูปที่ 2.9 แสดงค่า n และ C ของวัสดุชนิดต่างๆ ที่ใช้คำนวณอายุการใช้งานของมีดตัดโดยสมการของเทย์เลอร์ โดยค่าดังกล่าววัดที่สภาวะการตัดดังนี้ อัตราการป้อน (Feed) = 0.01 In/Rev (0.25 Mm/Rev) และความลึกในการตัด (Depth of Cut) = 0.10 In (2.50 Mm)

Tool Material	n	C	
		ft/min	(m/min)
Plain carbon tool steel			
Nonsteel cutting	0.1	200	(70)
Steel cutting	0.1	60	(20)
High-speed steel			
Nonsteel cutting	0.125	350	(120)
Steel cutting	0.125	200	(70)
Cemented carbide			
Nonsteel cutting	0.25	2700	(900)
Steel cutting	0.25	1500	(500)
Cermet			
Steel cutting	0.25	2000	(600)
Coated carbide			
Steel cutting	0.25	2200	(700)
Ceramic			
Steel cutting	0.6	10000	(3000)

รูปที่ 2.9 ค่า n และ C ของวัสดุชนิดต่างๆ ที่ใช้คำนวณอายุการใช้งานของมีดตัดโดยสมการของเทย์เลอร์

ค่าความเร็วในการตัดที่เหมาะสมสำหรับวัสดุที่ใช้ทำมีดตัดชนิดต่างๆ และปีที่เริ่มใช้แสดงในรูปที่ 2.10

Tool Material	Year of Initial Use	Allowable Cutting Speed, ft/min (m/min) ^a	
Plain carbon tool steel	1800s		
Nonsteel cutting		Below 30	(10)
Steel cutting		Below 15	(5)
High-speed steel	1900		
Nonsteel cutting		75–200	(25–65)
Steel cutting		50–100	(17–33)
Cast cobalt alloys	1915		
Nonsteel cutting		150–600	(50–200)
Steel cutting		100–300	(33–100)
Cemented carbides (WC)			
Nonsteel cutting	1930	1000–2000	(330–650)
Steel cutting	1940	300–900	(100–300)
Cermets (TiC)	1950s		
Steel cutting		500–1200	(165–400)
Ceramics (Al ₂ O ₃)	1955		
Steel cutting ^b		1000–2000	(330–650)
Synthetic diamonds	1954, 1973		
Nonsteel cutting		1200–4000	(390–1300)
Cubic boron nitride	1969		
Steel cutting		1500–2500	(500–800)
Coated carbides	1970		
Steel cutting ^c		500–1200	(165–400)

รูปที่ 2.10 ค่าความเร็วในการตัดที่เหมาะสมสำหรับวัสดุที่ใช้ทำมีดตัดชนิดต่างๆ และปีที่เริ่มใช้

การพัฒนาวัสดุที่ใช้ทำมีดตัดเกิดขึ้นเนื่องจากความต้องการความเร็วในการตัดที่สูงขึ้น ทำให้ต้องมีการพัฒนาวัสดุที่สามารถทนความร้อนและรับแรงที่ความเร็วสูงๆได้ วัสดุบางชนิดแม้จะมีการพัฒนามานานแต่ยังเป็นที่ยอมรับใช้กันอย่างแพร่หลายเช่น เหล็กกล้าความเร็วสูง (High-Speed Steel) การพัฒนาวัสดุในช่วงหลังๆ จะเน้นที่ส่วนผสมของโลหะผสมที่มีคุณสมบัติพิเศษ รวมถึงการพิจารณาโลหะวิทยาของวัสดุ ในบทนี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำมีดตัดบางชนิดดังนี้

1. Plain Carbon And Low-Alloy Tool Steels

เหล็กกล้าคาร์บอน หรือเหล็กกล้าที่มีส่วนผสมของโลหะผสมอื่นๆ ต่ำ เป็นวัสดุชนิดแรกๆ ที่ถูกพัฒนาใช้ทำมีดตัดก่อนที่จะมีการพัฒนาเหล็กกล้าความเร็วสูง เหล็กกล้าคาร์บอนที่จะใช้ในการตัดสามารถทำให้มีความแข็งสูงถึง 60 Rockwell C แต่ในปัจจุบันไม่ค่อยนิยมใช้ในอุตสาหกรรมเนื่องจากทำงานได้ไม่ดีในสภาวะการตัดที่เกิดความร้อนสูง ยกเว้นในงานที่มีความเร็วในการตัดต่ำๆ

2. High-Speed Steel (HSS)

เหล็กกล้าความเร็วสูงจะมีส่วนผสมของโลหะผสมมากขึ้นทำให้สามารถคงความแข็งของวัสดุได้ดีที่อุณหภูมิสูงเมื่อเทียบกับเหล็กกล้าคาร์บอน จึงสามารถใช้งานที่ความเร็วตัดสูงๆ ได้ เหล็กกล้าความเร็วสูงมีหลายชนิดแต่สามารถแบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ โดยสถาบันเหล็กกล้าอเมริกัน (AISI) ได้แก่

- 1) ชนิดที่ผสมทังสเตน (Tungsten Type) เรียกว่า เหล็กเกรดที (T-Grades)
- 2) ชนิดที่ผสมโมลิบดีนัม (Molybdenum Type) เรียกว่า เหล็กเกรดเอ็ม (M-Grades)

เหล็กกล้าชนิดที่ผสมทังสเตน จะมีทังสเตน (W) เป็นโลหะผสมหลักในอัตราส่วน 12-20% นอกจากนี้ยังมีโลหะผสมอื่นๆ อีกเช่น โครเมียม (Chromium, Cr) ประมาณ 4% และวานาเดียม (Vanadium, V) 1-2% เหล็กกล้าความเร็วสูงเกรดที ที่เป็นที่รู้จักและใช้กันมากชนิดหนึ่งคือ T1 หรือเหล็กกล้าความเร็วสูงชนิด 18-4-1 จะมีโลหะผสมดังนี้ 18% W, 4% Cr และ 1% V

เหล็กกล้าชนิดที่ผสมโมลิบดีนัม จะมีทังสเตนและโมลิบดีนัมเป็นส่วนผสมหลักในอัตราส่วน 6% และ 5% ตามลำดับ รวมทั้งโลหะผสมอื่นๆ เช่นเดียวกับเหล็กเกรดที สำหรับคุณสมบัติของโลหะผสมชนิดต่างๆ ที่เติมในเหล็กกล้าความเร็วสูงแสดงได้ดังรูปที่ 2.11

เหล็กกล้าความเร็วสูงทั่วไปจะมีส่วนผสมของคาร์บอน (C) ประมาณ 0.75 - 1.5% ในทางการค้าเหล็กกล้าความเร็วสูงจะมีความสำคัญและนิยมใช้กันมากในปัจจุบันแม้จะมีการใช้งานมานานแล้ว โดยจะเหมาะกับมีดตัดหรือเครื่องมือตัดที่มีรูปร่างซับซ้อนเช่น ดอกเจาะ ดอกต๊าบ หรือมีดกัด เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถผ่านกระบวนการทางความร้อนให้มีความแข็งสูงถึง 65 Rockwell C

รวมถึงมีค่า Toughness ที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับวัสดุชนิดอื่น เช่น เซรามิกส์ หรือซีเมนต์คาร์ไบด์ สำหรับการปรับปรุงคุณสมบัติหรือเพิ่มประสิทธิภาพในการตัดของวัสดุชนิดนี้ให้ดีขึ้นทำได้โดยการเคลือบผิวด้วยไททาเนียมไนไตรด์ (Titanium Nitride, Tin)

Alloying Element	Functions in High Speed Steel
Tungsten	Increases hot hardness Improves abrasion resistance through formation of hard carbides in HSS
Molybdenum	Increases hot hardness Improves abrasion resistance through formation of hard carbides in HSS
Chromium	Depth hardenability during heat treatment Improves abrasion resistance through formation of hard carbides in HSS Corrosion resistance (minor effect)
Vanadium	Combines with carbon for wear resistance Retards grain growth for better toughness
Cobalt	Increases hot hardness
Carbon	Principal hardening element in steel Provides available carbon to form carbides with other alloying elements for wear resistance

รูปที่ 2.11 คุณสมบัติของโลหะผสมชนิดต่างๆ ที่เติมในเหล็กกล้าความเร็วสูง

3. Cast Cobalt Alloys

โลหะผสมโคบอลต์ จะประกอบไปด้วย โคบอลต์ประมาณ 40-50%, โครเมียมประมาณ 25-35%, ทังสเตนประมาณ 15-20% และโลหะผสมอื่นๆ เครื่องมือตัดหรือมีดตัดที่ทำจากวัสดุชนิดนี้จะถูกผลิตให้มีรูปร่างที่ต้องการด้วยกระบวนการหล่อในแม่พิมพ์กราไฟต์แล้วทำการเจียระไนให้มีรูปร่างและความคมตามต้องการ คุณสมบัติในการทนการสึกหรอ (Wear Resistance) จะมีค่าสูงกว่าเหล็กกล้าความเร็วสูงแต่ไม่ดีเท่าซีเมนต์คาร์ไบด์ คุณสมบัติเรื่อง Toughness จะสูงกว่าซีเมนต์คาร์ไบด์แต่ไม่ดีเท่าเหล็กกล้าความเร็วสูง ส่วนค่าความแข็งแรงในการทำงานในสภาวะที่มีความร้อนสูง (Hot-hardness) ของโลหะผสมโคบอลต์จะมีค่าอยู่ระหว่างวัสดุทั้งสอง

มีดตัดที่ทำจากวัสดุชนิดนี้จะเหมาะกับการกัดหยาบ (Heavy Roughing Cuts) ที่ความเร็วสูงกว่ามีดตัดที่ทำจากเหล็กกล้าความเร็วสูงและที่อัตราการป้อนสูงกว่ามีดตัดที่ทำจากซีเมนต์คาร์ไบด์และสามารถใช้ตัดหรือกัดชิ้นงานที่ทำจากทั้งโลหะและอโลหะ รวมถึงพลาสติกและ

กราไฟต์ ปัจจุบันมีดัดที่ทำจากโลหะผสมโคบอลต์มีความสำคัญน้อยกว่ามีดัดที่ทำจากเหล็กกล้าความเร็วสูงและซีเมนต์คาร์ไบด์

4. Cemented Carbides, Cermets And Coated Carbides

Cemented Carbides เป็นกลุ่มของวัสดุที่ทำจากทั้งสแตนคาร์ไบด์ (WC) โดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปด้วยโลหะผง (Powder Metallurgy Technique) โดยมีโคบอลต์เป็นวัสดุประสาน รวมถึงอาจมีส่วนผสมอื่นๆ เช่น ไททาเนียมคาร์ไบด์ (Tic) และ แทนทาลัมคาร์ไบด์ (Tac) ในช่วงแรกของการทำมีดัดจากซีเมนต์คาร์ไบด์ส่วนผสมหลักจะเป็นทั้งสแตนคาร์ไบด์และโคบอลต์ซึ่งสามารถใช้ในการกัดชิ้นงานเหล็กหล่อและชิ้นงานที่ไม่ใช่โลหะเพราะสามารถใช้งานที่ความเร็วตัดสูงกว่ามีดัดที่ทำจากเหล็กกล้าความเร็วสูงและโลหะผสมโคบอลต์ แต่พบว่าการสึกหรอแบบ Crater Wear เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วทำให้อายุการใช้งานของมีดัดที่ทำจากซีเมนต์คาร์ไบด์ในยุคแรกๆ ค่อนข้างสั้นและไม่เหมาะกับการตัดชิ้นงานที่ทำจากเหล็ก จากนั้นมีการค้นพบส่วนผสมที่ทำให้การสึกหรอลดลง ได้แก่ การเติมไททาเนียมคาร์ไบด์ (Tic) และแทนทาลัมคาร์ไบด์ (Tac) ซึ่งส่วนผสมใหม่นี้สามารถใช้ในการตัดหรือกัดชิ้นงานที่ทำจากเหล็กได้ด้วย ดังนั้นซีเมนต์คาร์ไบด์ จึงสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่

1) เกรดที่ใช้ตัดชิ้นงานที่ไม่ใช่เหล็ก (Non-Steel Cutting Grade) เช่น อลูมิเนียม ทองเหลือง ทองแดงแมกนีเซียม เหล็กหล่อ จะมีส่วนผสมหลักคือ ทั้งสแตนคาร์ไบด์และโคบอลต์ (WC-Co)

2) เกรดที่ใช้กับชิ้นงานที่ทำจากเหล็ก (Steel Cutting Grade) เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ สแตนเลส หรือโลหะผสมกลุ่มเหล็กอื่นๆ จะเพิ่มส่วนผสมอีกสองอย่างคือ ไททาเนียมคาร์ไบด์ (Tic) และ แทนทาลัมคาร์ไบด์ (Tac)

คุณสมบัติของซีเมนต์คาร์ไบด์ทั้งสองเกรดจะคล้ายๆ กัน ได้แก่

1) มีค่าความทนแรงอัดสูง (High Compressive Strength) แต่มีค่าความทนแรงดึงต่ำถึงปานกลาง (Low-To-Moderate Tensile Strength)

2) ความแข็งสูง (High Hardness)

3) ความแข็งใน การทำงานที่อุณหภูมิสูงมีค่าสูง (High Hot Hardness)

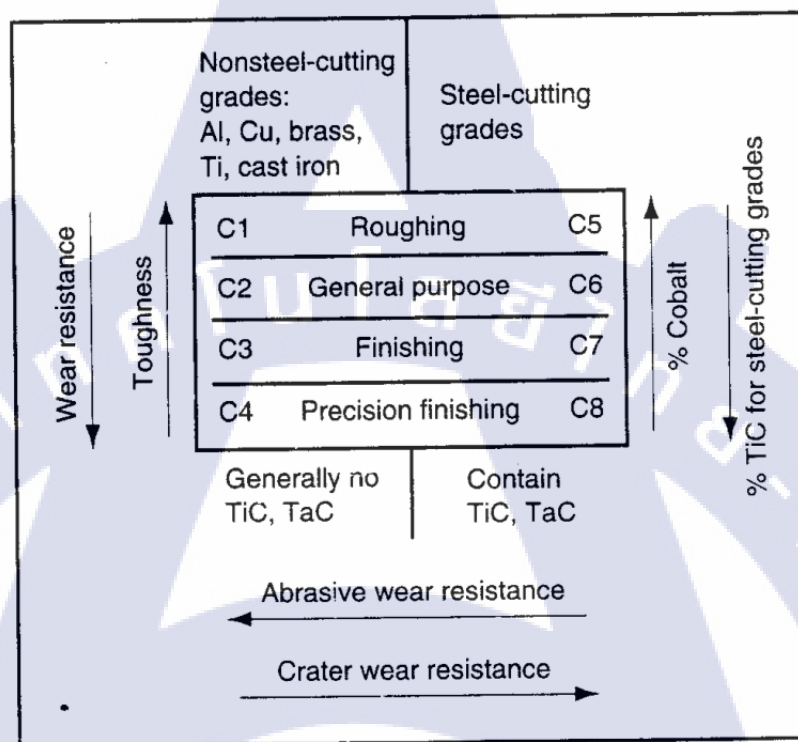
4) ความทนต่อการสึกหรอสูง (High Wear Resistance)

5) ค่าการนำความร้อนสูง (High Thermal Conductivity)

6) ค่าโมดูลัสของอีลาสติคสูง (High Modulus of Elasticity)

7) ค่า Toughness ต่ำกว่าเหล็กกล้าความเร็วสูง

ส่วนผสมของซีเมนต์คาร์ไบด์จะมีความหลากหลายซึ่งสามารถแบ่งกลุ่มตามมาตรฐาน ANSI เรียกว่า ระบบเกรดซี (C-Grade System) รูปที่ 2.12 แสดงระบบเกรดซีของซีเมนต์คาร์ไบด์ การประยุกต์ใช้งาน คุณสมบัติ และส่วนผสม



รูปที่ 2.12 การจัดแบ่งกลุ่มตามมาตรฐานจากระบบเกรดซีของซีเมนต์คาร์ไบด์

Cermets เป็นส่วนผสมของเซรามิกส์และโลหะบางชนิด โดยซีเมนต์คาร์ไบด์ถือเป็นวัสดุชนิดหนึ่งในกลุ่ม Cermets แต่ลักษณะเฉพาะของ Cermets คือจะมีส่วนผสมของไททาเนียมคาร์ไบด์ (TiC) แทนทาลัมคาร์ไบด์ (TaC) และไททาเนียมคาร์ไบด์ไนไตรด์ (TiCN) ที่มีนิกเกิลและโมลิบดีนัมเป็นวัสดุประสาน เหมาะกับการกัดชิ้นงานที่ทำจาก เหล็กกล้า สแตนเลส และเหล็กหล่อที่ความเร็วสูงและอัตราการป้อนต่ำซึ่งจะทำให้ผิวของชิ้นงานเรียบโดยอาจไม่จำเป็นต้องมีการเจียระไน

Coated Carbides เป็นซีเมนต์คาร์ไบด์ที่เคลือบผิวบางๆ ด้วยวัสดุที่ทนต่อการสึกหรอ เช่น ไททาเนียมคาร์ไบด์ ไททาเนียมไนไตรด์ และ/หรือ อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ความหนาของการเคลือบจะบางมากอยู่ในช่วง 0.0001 – 0.0005 นิ้ว (2.5-13 μm) เนื่องจากพบว่า การเคลือบที่หนาเกินไปจะทำให้วัสดุเปราะและแตกง่าย มีดตัดที่ทำจากวัสดุชนิดนี้นิยมใช้กับชิ้นงานที่ทำจาก เหล็กหล่อและเหล็กกล้าในกระบวนการกลึงและกระบวนการกัดโดยใช้ความเร็วสูง ในระยะหลัง

มีการพัฒนาวัสดุให้ใช้งานกับโลหะนอกกลุ่มเหล็กได้โดยการเคลือบด้วยวัสดุต่างชนิดกัน เช่น โครเมียมคาร์ไบด์ (CrC) เซอร์โคเนียมไนไตรด์ (ZrN) และเพชร (Diamond) ซึ่งจะช่วยยืดอายุการใช้งานของมีดตัดได้

5. Ceramics

เซรามิกส์เป็นวัสดุที่มีส่วนผสมหลักคือ อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ที่มีเกรนละเอียดมาก ในปริมาณ 99% โดยประมาณ และอาจมีออกไซด์ชนิดอื่นๆ ผสมอยู่ด้วยเล็กน้อยเช่น เซอร์โคเนียมออกไซด์ (Zirconium Oxide) เซรามิกส์ถูกผลิตโดยกระบวนการกดอัดขึ้นรูปที่ความดันและอุณหภูมิสูงโดยไม่ต้องใช้วัสดุประสาน (Sintering Process) มีดตัดที่ทำจากเซรามิกส์จะใช้งานได้ดียเยี่ยมในการกลึงเหล็กหล่อและเหล็กกล้าที่ความเร็วสูง โดยเฉพาะในการกลึงละเอียดซึ่งจะให้ผิวชิ้นงานที่ดีมาก แต่ไม่เหมาะสมอย่างยิ่งในการกัดหยาบเนื่องจากมีค่า Toughness ต่ำ นอกจากนี้ มีดตัดที่มีส่วนผสมของอลูมิเนียมออกไซด์มักถูกใช้อย่างแพร่หลายในงานขัดละเอียด (Abrasive) เช่น การเจียรไน

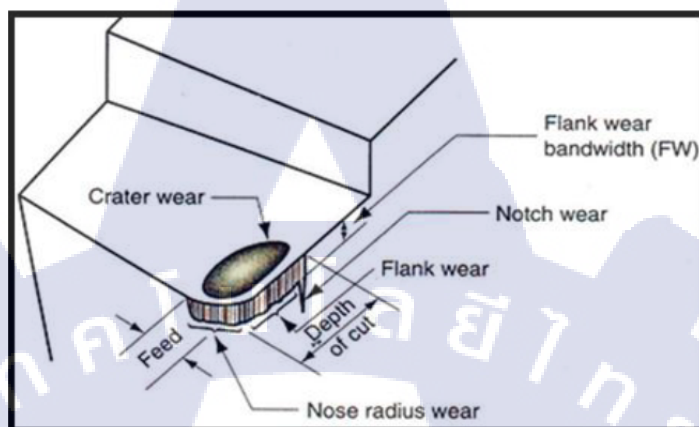
6. Synthetic Diamonds and Cubic Boron Nitride

Synthetic Diamonds หรือเพชรสังเคราะห์ ในบรรดาวัสดุทั้งหลายที่เรารู้จักเพชร (Diamond) นับเป็นวัสดุที่มีความแข็งที่สุด จากการวัดค่าความแข็งพบว่าเพชรจะมีค่าความแข็งมากกว่าทั้งสแตนคาร์ไบด์และอลูมิเนียมออกไซด์ประมาณ 3-4 เท่า เนื่องจากความแข็งเป็นคุณสมบัติสำคัญประการหนึ่งของมีดตัดที่ดีทำให้เพชรเป็นหนึ่งในวัสดุที่ถูกพิจารณานำมาใช้งาน กระบวนการผลิตมีดตัดที่ทำจากเพชรสังเคราะห์ทำได้โดยกระบวนการกดอัดขึ้นรูปเพชรที่มีเกรนละเอียดมากที่ความดันและอุณหภูมิสูงโดยไม่ต้องใช้วัสดุประสาน สำหรับการใช้งานของมีดตัดที่ทำจากเพชรจะนิยมใช้ในการกัดชิ้นงานที่ไม่ใช่เหล็กที่ความเร็วสูงและใช้ในการขัดผิวชิ้นงานที่ไม่ใช่โลหะเช่น ไฟเบอร์กลาส (Fiberglass) และกราไฟต์ ส่วนชิ้นงานที่ทำจากเหล็กไม่ค่อยนิยมใช้กับมีดตัดชนิดนี้เนื่องจากจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างเหล็กกับคาร์บอนในเพชร

Cubic Boron Nitride (CBN) เป็นวัสดุที่มีความแข็งรองลงมาจากเพชร กระบวนการผลิตจะเหมือนกันคือใช้การกดอัดที่ความดันและอุณหภูมิสูง โดยปกติมักใช้ในการเคลือบผิวมีดตัดที่ทำจากซีเมนต์คาร์ไบด์ และเนื่องจาก CBN จะไม่ทำปฏิกิริยากับเหล็กและนิกเกิลเหมือนกับเพชร ทำให้เป็นที่นิยมใช้ในการกัดชิ้นงานที่ทำจากเหล็กกล้าและโลหะผสมนิกเกิล วัสดุทั้งสองจะมีราคาแพง ดังนั้นการนำมาใช้งานจำเป็นต้องคำนึงถึงต้นทุนด้วย

2.1.4 ประเภทของการสึกหรอบนมีดกลึง [5]

การการสึกหรอบนมีดกลึงสามารถแบ่งออกเป็น 4 ประเภทตามลักษณะของตำแหน่งที่เกิดการสึกหรอ ดังรูปที่ 2.13



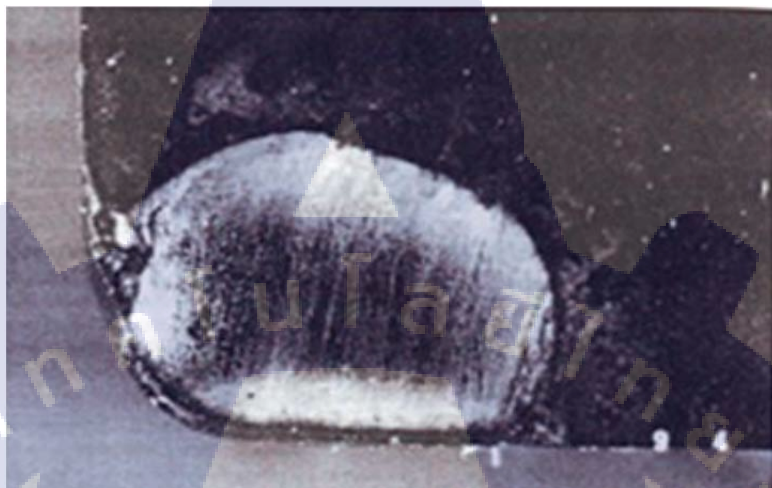
รูปที่ 2.13 การสึกหรอของใบมีดกลึง

1. การสึกหรอบนผิวหยาบ (Flank Wear) เกิดจากการขัดถูของผิวงานใหม่กับขอบคมตัดของมีดบริเวณ Flank Face และวัดขนาดได้จากความสูงของรอยสึกหรอหรือ Flank Wear Band Width เมื่อเกิดการสึกหรอบนผิวหยาบมากขึ้นก็จะทำให้เกิดแรงที่มากกระทำมากขึ้น ดังรูปที่ 2.14



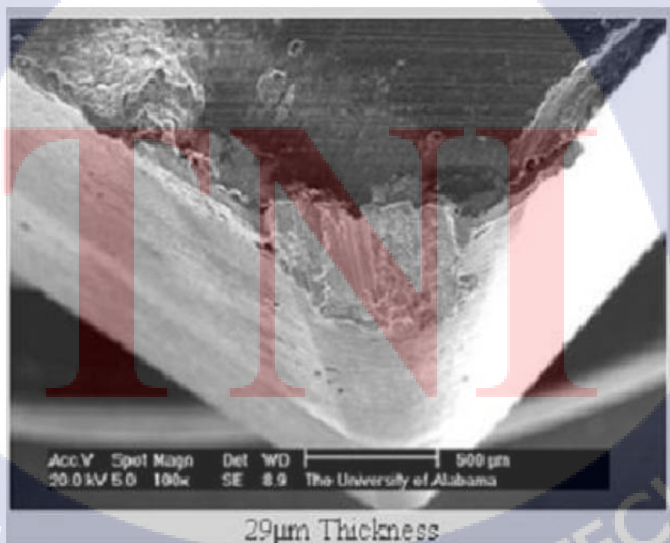
รูปที่ 2.14 การสึกหรอบนผิวหยาบ

2. การสึกหรอบนผิวคาย (Carter Wear) เกิดจากการขัดสีหรือกระแทกของเศษโลหะที่บริเวณ Rake Face และเกิดอุณหภูมิที่เศษโลหะสูงมาก จึงเกิดลักษณะเป็นหลุมหรือร่องลึก เกิดใกล้ๆ กับคมตัด ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 การสึกหรอบนผิวคาย

3. การสึกหรอที่ปลายมีดกลึง (Nose Wear) เป็นการสึกหรอที่ปลายมีดกลึงกับชิ้นงานที่กำลังตัดเฉือน ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของชิ้นงาน ดังรูปที่ 2.16



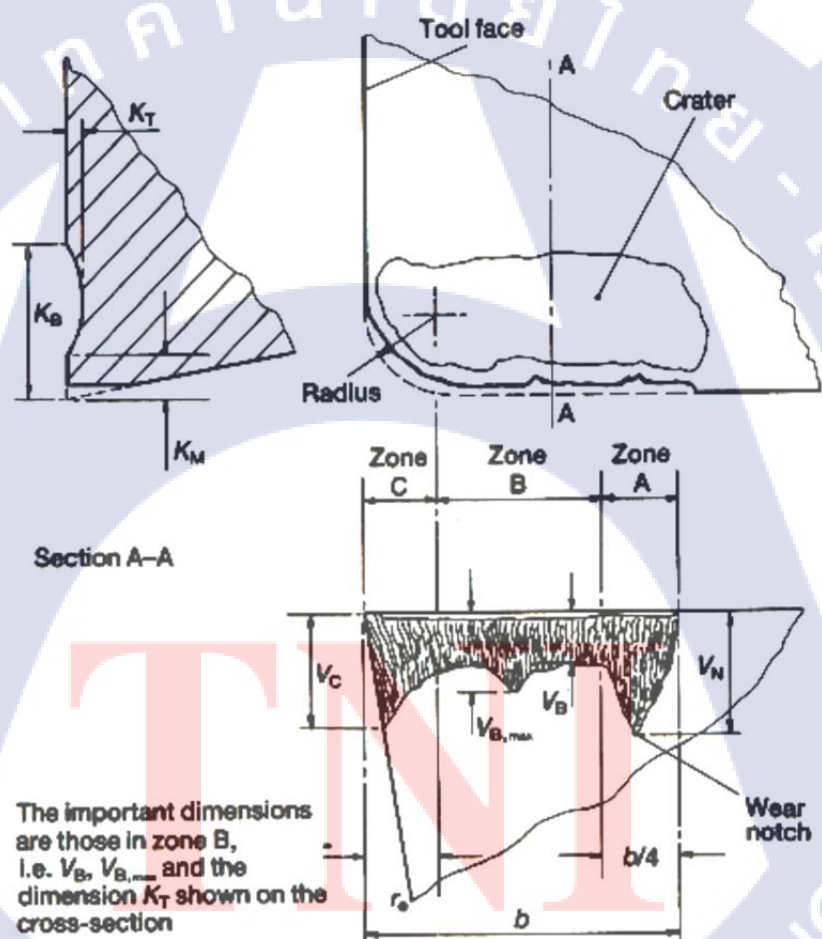
รูปที่ 2.16 การสึกหรอที่ปลายมีดกลึง

4. การสึกหรอลักษณะแหง (Nose Wear) เกิดการสึกหรอเป็นหลุมข้างบริเวณที่เกิด Flank Wear เนื่องจากเกิดการขัดสีจากขอบนอกของชิ้นงาน

2.1.5 ข้อกำหนดเกี่ยวกับการสึกหรอบนคมตัดของใบมีดกลึงตามมาตรฐาน ISO [6]

1. การแบ่งเขตของการสึกหรอบนผิวหยาบ (Flank Wear)

มาตรฐาน ISO ได้มีการแบ่งเขตของการสึกหรอบนผิวหยาบ (Flank Wear) เพื่อให้การวัดขนาดของการสึกหรอบนผิวหยาบ (Flank Wear) เป็นไปในแนวทางเดียวกัน โดยเขตของการสึกหรอบนผิวหยาบ (Flank Wear) แสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 เขตของการสึกหรอตามมาตรฐานสากล (ISO) [7]

จากรูปที่ 2.17 มาตรฐาน ISO ได้แบ่งเขตของการสึกหรบนผิวหยาบ (Flank Wear Zone) ออกเป็น 3 เขต คือ เขต A เขต B และเขต C โดยกำหนดให้ B เป็นระยะบ่อนลึกในการตัดเฉือนชิ้นงาน

1) เขต A เป็นเขตที่อยู่บนผิวหยาบด้านในสุดของคมตัด มาตรฐาน ISO 3685:1993 (E) ได้กำหนดให้เขต A มีค่าเท่ากับ 1 ใน 4 ของ B (เมื่อ B คือ ระยะบ่อนความลึก) ดังที่แสดงในรูปที่ 2.17

2) เขต B เป็นเขตที่อยู่บนผิวหยาบเช่นเดียวกับเขต A และเขต B ก็เป็นเขตที่มีอยู่ระหว่างเขต A กับเขต C มาตรฐาน ISO 3685:1993 (E) ไม่ได้กำหนดช่วงกว้างขอบเขต B แต่จะกำหนดให้ช่วงกว้างของขอบเขต B ขึ้นอยู่กับช่วงกว้างขอบเขต A กับเขต C ดังที่แสดงในรูปที่ 2.17

3) เขต C เป็นเขตที่อยู่บนผิวหยาบเช่นเดียวกับเขต A และเขต B เขต C จะอยู่บนขอบเขตสุดของคมตัดและเขต C ก็อยู่ติดกับเขต B มาตรฐาน ISO 3685:1993 (E) กำหนดให้เขต C มีช่วงกว้างเท่ากับรัศมีปลายมีด (Nose) ดังที่แสดงในรูปที่ 2.17

2.1.6 อายุของมีดกลึง (Tool Life) [8]

อายุมีด คือ เมื่อมีดตัดเสื่อมสภาพ มีการเปลี่ยนมีดใหม่มาทดแทนและลับมีดที่เสียหรือเครื่องมือเดิม อายุบอกเป็นเวลาที่ใช้งานได้ และเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปแล้วว่า อายุการใช้งานของใบมีด (Tool Life) มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อต้นทุนการผลิต การวัดอายุการใช้งานของใบมีดนั้นจะเริ่มนับอายุจากเวลาที่ใบมีดเพิ่งลับใหม่ จนกระทั่งถึงเวลาที่ใบมีดเสื่อมสภาพจนไม่สามารถทำการตัดโลหะให้ได้ดีตามที่ต้องการ ซึ่งใบมีดอาจจะกะเทาะร่วงลงจริงๆ หรือเพียงแค่สึกหรอก็ได้ เวลาของอายุการใช้งานมักเป็นเวลาของการใช้งานจริงๆ คือเวลาของการตัดโลหะจริงๆ นอกจากจะวัดอายุการใช้งานของใบมีดในหน่วยเวลาแล้ว ยังอาจวัดเป็นหน่วยอื่นๆ เช่น จำนวนปริมาตรของวัสดุงาน (Work Material) ที่ถูกตัดออกไปก่อนใบมีดจะสิ้นสภาพ เป็นต้น

1. เกณฑ์การหมดอายุของใบมีด (Tool Life Criterion) สภาพการหมดอายุของใบมีดกลึง (Tool Life Criterion) สามารถพิจารณาได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ

1) เกณฑ์การหมดอายุการใช้งานของใบมีดโดยยึดถือตัวใบมีดเป็นหลัก (Tool Life Criteria Base on Tool) ซึ่งก็ได้แก่ การพิจารณาสภาพของใบมีดโดยอาจถือว่าใบมีดสิ้นสภาพเมื่อ

ก. คมมีด (Cutting Edge) กะเทาะหรือร้าว

ข. ขนาดของการสึกหรบนผิวหยาบ (Flank Wear) ใหญ่เกินไป ตาม ISO ถ้า $V_b \text{ Max} > 0.6$ มิลลิเมตร หรือ $V_b \text{ Average} > 0.3$ มิลลิเมตร

ค. ขนาดของการสึกหรอบนผิวคาย (Crater Wear) ลึกเกินไปหรือใหญ่เกินไป หรือกว้างเกินไป

ง. พิจารณาดูทั้งการสึกหรอบนผิวหลบ (Flank Wear) และการสึกหรอบนผิวคาย (Crater Wear) ประกอบเข้าด้วยกัน

จ. ปริมาตรหรือน้ำหนักของเนื้อสารที่สึกออกจากใบมีดมีค่ามากเกินไป

ฉ. ใบมีดแตกหักลงจริงๆ

2) เกณฑ์การหมดอายุการใช้งานของใบมีดโดยยึดถือเอาชิ้นงานเป็นหลัก (Tool Life Criteria Base on Work Piece) เป็นต้นว่า

ก. ความขรุขระของพื้นผิวของชิ้นงานมีค่าสูงเกินไป หรือหยาบเกินไปกว่า พิกัดความเรียบผิวในแบบงาน

ข. ขนาดของชิ้นส่วนที่ผลิตออกมามีขนาดไม่ถูกต้องตามที่กำหนด เช่น เกิด Nose Wear มิดก็จะทุ้ม มิดก็มี ขนาดสั้นลง ทำให้ชิ้นงานโตขึ้น หรือโตไม่สม่ำเสมอ

3) เกณฑ์การหมดอายุการใช้งานของใบมีดโดยยึดถือหลักอื่นๆ

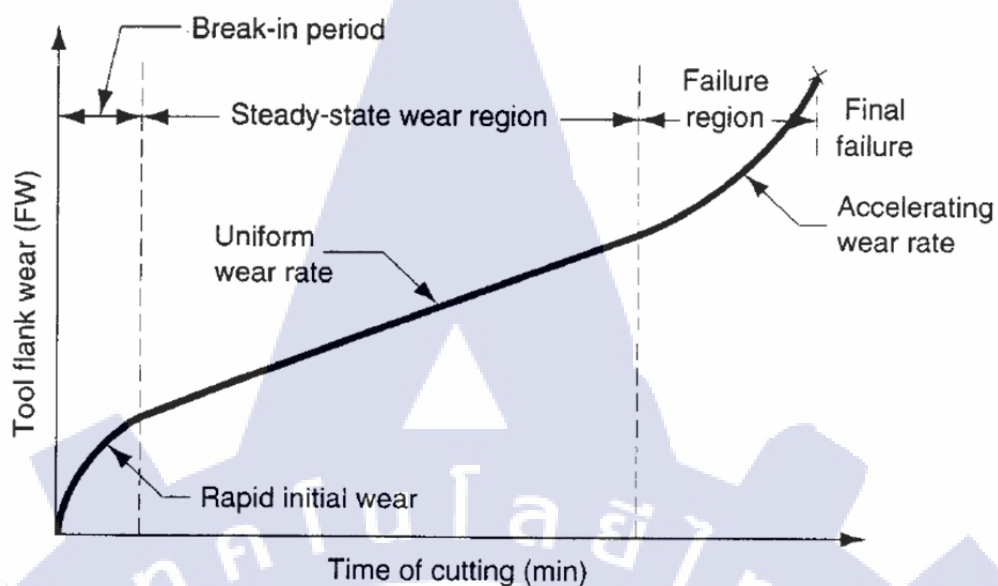
ก. แรงหรือกำลังในการตัดโลหะมีค่าสูงจนเกินไป

ข. เสียงที่เกิดจากการกลึง ดังกว่าปกติ มีค่าผิดไป เช่น การใช้วัดเสียงความถี่สูง/ต่ำ Acoustic Emission Signals

ค. การสั่นสะเทือน ในการตัดโลหะ โดยวัดแรงสั่นสะเทือน เนื่องจากการกระแทกของมีดตัดชิ้นงาน

ในระหว่างกระบวนการการกลึงนั้นจะมีหลายกลไกที่ผลต่อการเพิ่มการสึกหรอของมีดกลึง ถ้าเทียบระหว่างเวลาในการตัดและขนาดของ Flank Wear ได้ [9] ดังรูปที่ 2.18

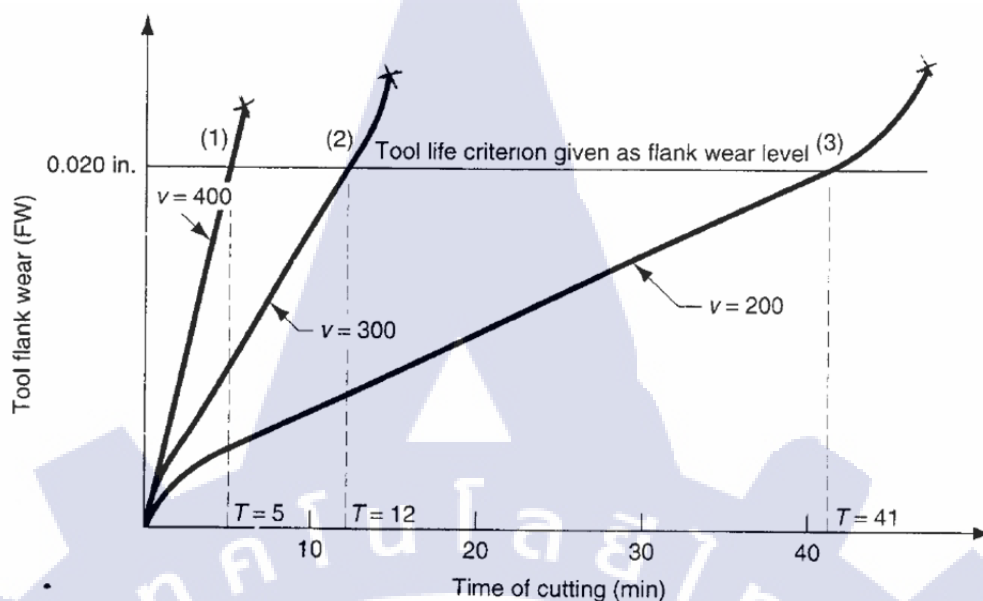
TNI



รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการใช้งานของมีดและขนาดการสึกหรอแบบ Flank Wear

ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ช่วงแรกคือ Break-In-Period เป็นช่วงที่เริ่มต้นการสึกหรอและเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ช่วงนี้จะใช้เวลาเพียงไม่กี่นาที เมื่อเข้าสู่ช่วงที่สอง Steady-State Wear Region เป็นช่วงที่เกิดอัตราการสึกหรออย่างคงที่ จากรูปสังเกตได้ว่าช่วงนี้มีลักษณะเป็นเส้นตรงที่มีความชันคงที่ และช่วงสุดท้ายคือ Failure Region เป็นช่วงที่อัตราเริ่มเพิ่มเร็วขึ้น จะเกิดอุณหภูมิสูงขึ้นและประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องจะลดลง ถ้ายังคงดำเนินใช้ต่อไปจะส่งผลให้มีดแตกหักได้

TNI

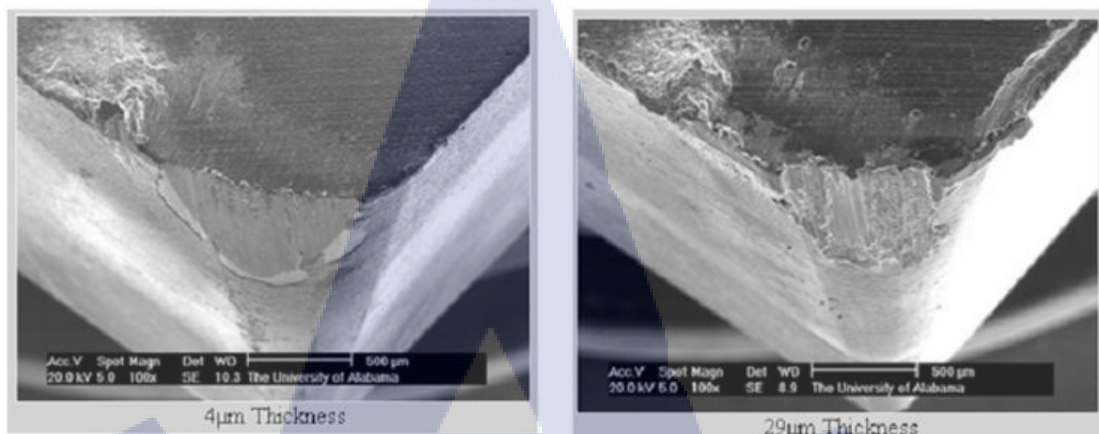


รูปที่ 2.19 อิทธิพลของความเร็วตัดต่อขนาดการสึกหรอแบบ Flank Wear

การเพิ่มความเร็วในการตัด อัตราการป้อน และความลึกในการตัดนั้นจะมีผลต่อการเพิ่มอัตราการสึกหรอ โดยเฉพาะการเพิ่มความเร็วในการตัดจะมีอิทธิพลมากที่สุดดังรูปที่ 2.19 แสดงถึงอิทธิพลของการเพิ่มความเร็วในการตัดถ้าเทียบในขนาดของ Flank Wear ที่ 0.5 mm จะพบว่าเส้นที่ 3 ($V=100$ m/min) จะมีอายุการใช้งานมากที่สุดเมื่อเทียบกับเส้นที่ 1 ($V=160$ m/min) และเส้นที่ 2 ($V=130$ m/min)

2.1.7 การตรวจสอบการสึกหรอของมีดกลึงแบ่งออกเป็น 2 วิธี [10]

1. การตรวจสอบโดยตรง (Direct Method) เป็นการตรวจสอบขนาดการสึกหรอโดยวัดจากรอยสึกของมีดกลึงโดยตรง การใช้วิธีนี้ค่อนข้างที่จะยุ่งยากและมีค่าใช้จ่ายสูง ซึ่งไม่สามารถวัดขณะที่เครื่องจักรทำงานได้ แต่ผลที่ได้จะมีความแม่นยำกว่า ดังรูปที่ 2.20

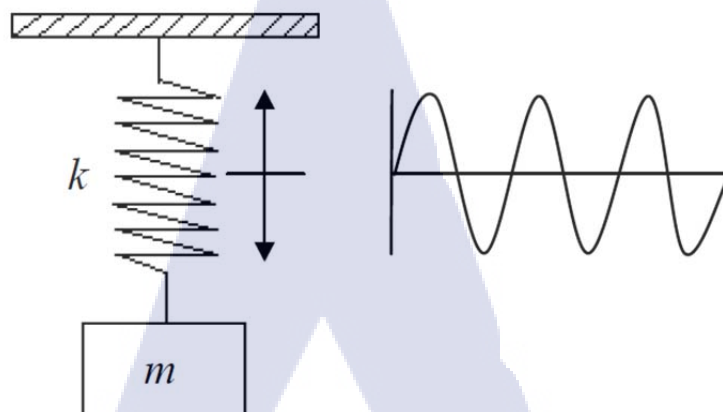


รูปที่ 2.20 ตัวอย่างการตรวจสอบขนาดการสึกหรอโดยตรง

2. การตรวจสอบโดยทางอ้อม (Indirect Method) เป็นการวัดการสึกหรอโดยการวัดพารามิเตอร์ที่สัมพันธ์กับการสึกหรอของมีดกลึง เช่น ความหยาบของผิวงาน สัญญาณการสั่นสะเทือน ขนาดของแรง ความเข้มของเสียง เป็นต้น การใช้วิธีเหล่านี้สามารถวัดได้ง่ายกว่าแต่การวิเคราะห์ค่อนข้างยากและซับซ้อน ในงานวิจัยจึงนิยมใช้วิธีวัดทางอ้อมมากกว่า วัดโดยใช้เซนเซอร์ต่างๆ เช่น Sound Sensor, Accelerometer, Dynamometer เป็นต้น แล้วเก็บสัญญาณมาวิเคราะห์ผลเพื่อหาขนาดการสึกหรอของมีดกลึง

2.1.8 การสั่นสะเทือน (Vibration)

การสั่นสะเทือน คือ การเคลื่อนที่ของวัตถุรอบๆ จุดสมดุลในช่วงเวลาหนึ่งของการเคลื่อนที่ไม่ว่าการเคลื่อนที่รอบจุดสมดุลนั้นจะเกิดขึ้นในแบบการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาหรือจะเป็นการแกว่ง (Oscillation) รอบจุดสมดุลก็ตาม ตัวอย่างเช่น การแกว่งตัวของลูกตุ้มนาฬิกาหรือการเคลื่อนที่ของก้อนมวลที่ติดอยู่กับสปริง เป็นต้น ถ้าเราสามารถมองเห็นการเคลื่อนที่แบบสั่นในลักษณะที่ซ้ำมาๆ ได้เราจะพบรูปแบบของการเคลื่อนที่ในทิศทางที่ต่างกันขึ้นอยู่กับระยะ หรือความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัตถุนั้นๆ รอบตำแหน่งหนึ่งซึ่งจะทำให้เราเห็นลักษณะรูปแบบเฉพาะของการเคลื่อนที่แบบสั่นได้ [11] รูปที่ 2.21 แสดงลักษณะของการสั่นสะเทือน ในการศึกษาการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของเครื่องจักรนั้นจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเข้าใจพื้นฐานและองค์ประกอบต่างๆ เช่น โดเมนเวลา (Wave Form หรือ Time Domain) โดเมนความถี่ (Spectrum Domain) ความถี่ (Frequency) แอมพลิจูด (Amplitude) และการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform) เป็นต้น ซึ่งองค์ประกอบที่ได้กล่าวมานั้นจะนำไปใช้ในการอธิบายการเคลื่อนที่แบบสั่นในลักษณะต่างๆ



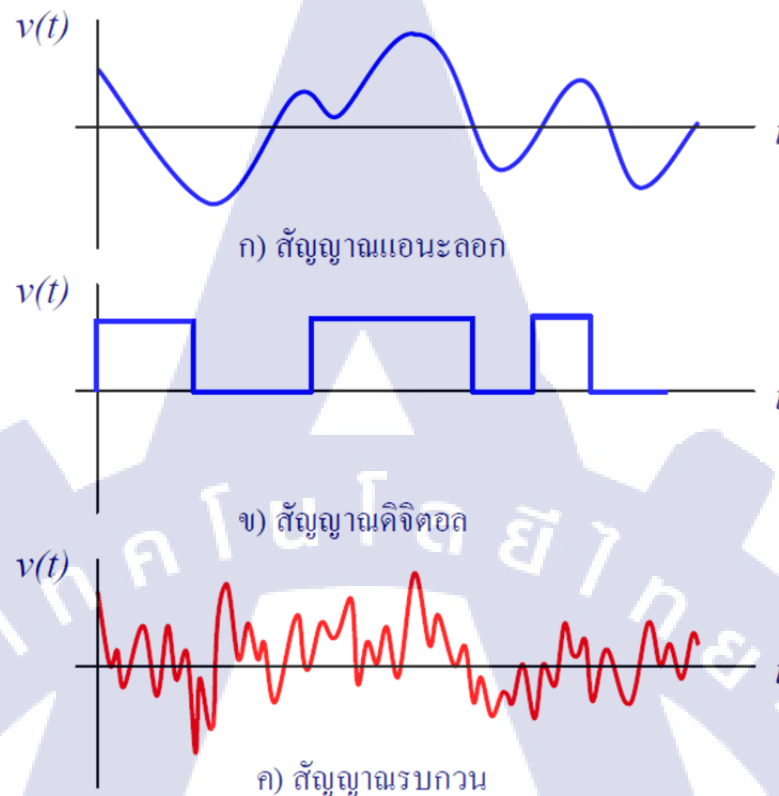
รูปที่ 2.21 ลักษณะของการสั่น

2.1.9 ทฤษฎีการวิเคราะห์สัญญาณ

การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน ก่อนอื่นควรทำความเข้าใจรูปแบบของกราฟแสดงผลของการสั่นสะเทือน ซึ่งถ้าไม่เข้าใจความหมายและความเป็นมาของกราฟแล้ว การที่จะทำการวิเคราะห์ก็จะเป็นไปได้ยากลำบาก กราฟแสดงผลของการสั่นสะเทือนที่จะนำมาวิเคราะห์ [12] ซึ่งประกอบด้วยกราฟโดเมนเวลา (Time Domain Plot) กราฟสเปกตรัม (Spectrum Plot) กราฟแนวโน้ม (Trend Plot) นอกจากกราฟแสดงผลแล้วยังมีพารามิเตอร์ที่สำคัญของการสั่นสะเทือน ซึ่งประกอบด้วยความถี่ (Frequency) ขนาดของการสั่นสะเทือน (Amplitude) มุมเฟส (Phase) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์หลักของการสั่นสะเทือน เพื่อช่วยในการวิเคราะห์การสั่นสะเทือน

2.1.10 ลักษณะสัญญาณ [13]

สัญญาณที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสารทางไฟฟ้าอาจแบ่งออกเป็น 3 แบบด้วยกัน คือ สัญญาณอนาล็อก (Analog Signal) สัญญาณดิจิทัล (Digital Signal) และสัญญาณรบกวน (Noise)



รูปที่ 2.22 ตัวอย่างของสัญญาณ

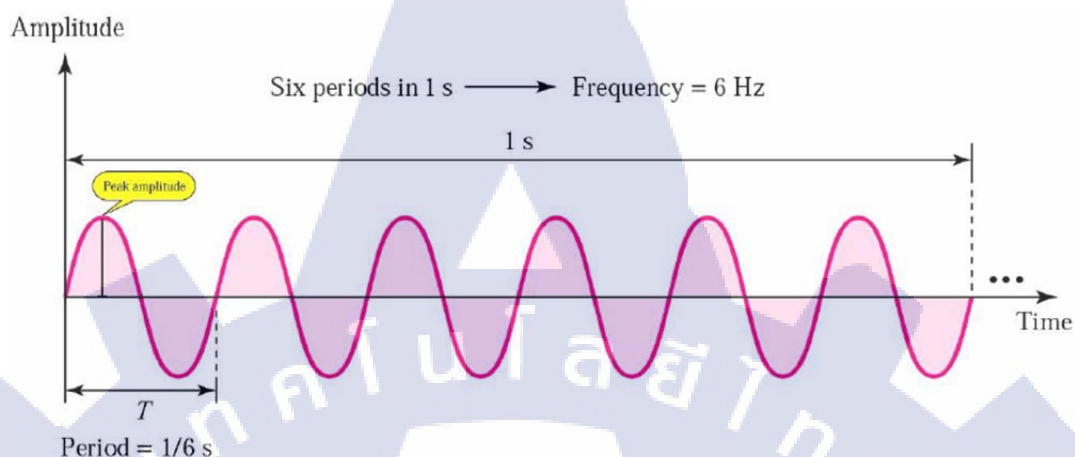
1. สัญญาณอนาล็อก (Analog Signal)

สัญญาณประเภทนี้เป็นสัญญาณที่สามารถนำเสนอ (Represent) ปริมาณทางกายภาพที่เป็นปริมาณจริง (Real Quantity) กล่าวคือ สัญญาณ Analog เป็นสัญญาณที่มีระดับ (Levels) ของความเข้มที่เป็นไปได้ เป็นจำนวนอนันต์ ตลอดช่วงเวลาที่พิจารณา ระดับสัญญาณที่เปลี่ยนไปจาก เวลา A ไปเวลา B จะผ่าน และครอบคลุมค่าของระดับเป็นจำนวนอนันต์ หรืออีกนัยหนึ่ง ในทางคณิตศาสตร์ เราสามารถหาค่าของอนุพันธ์ของฟังก์ชันของสัญญาณเทียบกับเวลาได้ทุกจุดตลอดช่วง (A, B) สัญญาณอนาล็อก (Analog Signal) ชนิดซ้ำคาบ สามารถแบ่งจำแนกออกได้เป็นสองประเภท ได้แก่ Simple Signal และ Composite Signal ดังนี้

1.1 สัญญาณอย่างง่าย (Simple Signal)

สัญญาณอย่างง่าย (Simple Signal) อีกชื่อหนึ่งเรียกว่า Sine Wave ได้แก่สัญญาณที่สามารถอธิบายได้ด้วยฟังก์ชันประเภท Sinusoidal และไม่สามารถแบ่งย่อยออกเป็นฟังก์ชันที่ง่ายกว่านั้นได้ Simple Signal หรือ Sinusoidal Signal เป็นสัญญาณซ้ำคาบมูลฐาน

สำหรับการสื่อสารแบบ Analog มีลักษณะเส้นโค้งต่อเนื่อง ที่มีการแกว่งด้วยคาบเวลาคงที่ T (วัดจาก ท้องคลื่น ถึง ยอดคลื่น) ดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 สัญญาณ Sinusoidal ซึ่งมีความถี่ 6 Hz แสดงการเปลี่ยนแปลงของระดับสัญญาณ (Amplitude) เทียบกับเวลา (Time) ในช่วงเวลา 1 วินาที

สัญญาณดังรูปที่ 2.28 สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ

$$s(t) = A \sin(2\pi ft + \phi) \quad (2.1)$$

โดยที่

$s(t)$ คือ ความเข้มของสัญญาณ ณ เวลา t ใดๆ ในช่วงที่พิจารณา

A คือ ความเข้มสูงสุดของสัญญาณ (Peak Amplitude) วัดจากจุดสมดุลถึง

ยอดคลื่น

f คือ ความถี่ของสัญญาณ (จำนวนของรอบการเปลี่ยนแปลงของรูปแบบต่อวินาที)

ซึ่งสัมพันธ์เป็นส่วนกลับของคาบเวลา T (วินาที) กล่าวคือ $f = \frac{1}{T}$

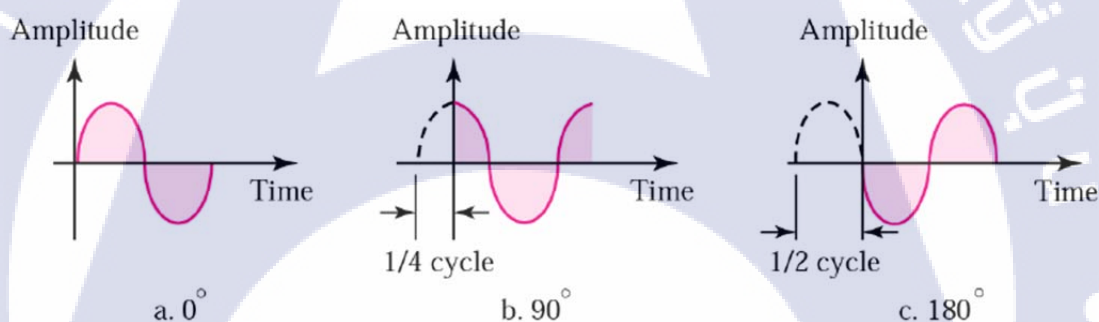
ϕ คือ Phase หรือ ตำแหน่งเชิงมุม ณ จุดเริ่มต้น $t = 0$ ของสัญญาณ (เวลาอ้างอิง)

มุมเฟส (Phase)

Phase ของสัญญาณ คือ ตำแหน่งเชิงมุม ϕ (radian) ณ จุดเริ่มต้น (เวลา $t = 0$) หรือ คือการเลื่อนของสัญญาณ ในแกนเวลา ณ คาบแรก เนื่องจาก $\theta(t) = \omega t + \phi$ ดังนั้น เราอาจแบ่งมุม $\theta(t)$ ออกเป็น สอง ส่วน ได้แก่ ωt และ ϕ ซึ่งเป็นตำแหน่งซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลา (t) และตำแหน่งคงที่ หรือ Phase ของสัญญาณ หน่วยการวัดของ Phase ได้แก่ Rad หรือ Degree โดยที่ $2\pi \text{ rad} = 360^\circ \text{ Degree}$ จากรูปที่ 2.24 a. b. และ c. คือรูปสัญญาณ Sinusoidal หนึ่งคาบ ที่มี Phase เลื่อน ไป 0° , 90° และ 180° องศา ตามลำดับ

เนื่องจากความถี่คืออัตราการเปลี่ยนแปลง (ของสัญญาณ) เทียบกับเวลา ดังนั้นเราอาจพิจารณาจำแนกลักษณะของสัญญาณเชิงความถี่ ได้ดังต่อไปนี้

- การเปลี่ยนแปลงในระยะเวลาสั้น หมายถึง ความถี่สูง (High Frequency)
- การเปลี่ยนแปลงในระยะเวลายาว หมายถึง ความถี่ต่ำ (Low Frequency)
- สัญญาณไม่มีการเปลี่ยนแปลง ความถี่มีค่าเป็น 0 (DC – Direct Current)
- สัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด ความถี่มีค่าเป็นอนันต์ (Infinity)



รูปที่ 2.24 สัญญาณ Sinusoidal ซึ่งมีเฟสเลื่อนไป 0° , 90° และ 180° องศา ตามลำดับ

สำหรับมุมเฟสของการสั่นสะเทือน คือความแตกต่างของตำแหน่งขึ้นส่วนหรือวัตถุที่มีการสั่นสะเทือนขึ้นหนึ่ง เมื่อเทียบกับจุดอ้างอิงหรือขึ้นส่วนที่มีการสั่นสะเทือนอีกขึ้นหนึ่ง ประโยชน์เรื่องมุมเฟสของการสั่นสะเทือนสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ความเสียหายของเครื่องจักรได้ เช่น ปัญหาการเอียงแนวแกนของเพล่า ปัญหาการหลวมคลอน ปัญหาความถี่ธรรมชาติของเครื่องจักร เป็นต้น และยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการลดปัญหาการสั่นสะเทือนโดยการทำดุลยภาพในเครื่องจักรหมุนอีกด้วย

ขนาดของการสั่นสะเทือน (Amplitude) [14]

การที่จะบอกถึงระดับความรุนแรงนั้น จะอาศัยการบอกเป็นขนาดของการสั่นสะเทือน ถ้าขนาดของการสั่นมีค่าเพิ่มขึ้นมากเมื่อเทียบกับภาวะปกติแสดงว่าเครื่องจักรเริ่มมีปัญหา ซึ่งขนาดของการสั่นสะเทือนที่ใช้ในปัจจุบันและเป็นที่ยอมรับกันมากที่สุดมีอยู่ 3 แบบ คือ

1. การขจัดหรือระยะการเคลื่อนที่ (Displacement) หมายถึงระยะ การเคลื่อนที่ของวัตถุหรือมวลจากจุดสมดุลเคลื่อนที่ไปสู่จุดที่สูงสุดแล้วเคลื่อนที่ไปสู่จุดที่ต่ำสุด (Peak to Peak) ซึ่งเป็นค่าระยะทางทั้งหมดที่วัตถุเคลื่อนที่จากจุดสูงสุดไปสู่จุดต่ำสุดในแต่ละรอบของการเคลื่อนที่ของวัตถุนั้นๆ ดังสมการที่ 2.2

$$y(t) = y_{max} \sin(\omega t + \phi)$$

$$V(t) = \frac{dy}{dt}$$

$$y(t) = \int V(t) dt \quad (2.2)$$

2. ความเร็ว (Velocity) หมายถึงความเร็วของการเคลื่อนที่ที่กลับไปกลับมาของวัตถุ วัตถุจะมีความเร็วเป็นศูนย์เมื่อเคลื่อนที่อยู่ที่จุดสูงสุดและต่ำสุด และมีความเร็วสูงสุดในขณะที่เคลื่อนที่ผ่านจุดสมดุล ซึ่งค่าการขจัดหรือระยะการเคลื่อนที่ที่มีความสัมพันธ์กับความเร็วดังสมการ 2.3

$$V_{max} = y_{max} \omega$$

$$V(t) = V_{max} \cos(\omega t + \phi)$$

$$V(t) = y_{max} \omega \sin(\omega t + \phi + \frac{2}{\pi})$$

$$V(t) = V_{max} \omega \cos(\omega t + \phi) \quad (2.3)$$

3. ความเร่ง (Acceleration) หมายถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วของวัตถุ ในขณะวัตถุที่เคลื่อนที่กลับไปกลับมา โดยจะมีค่าสูงสุดเมื่ออยู่ในตำแหน่งสูงสุดและตำแหน่งต่ำสุด เมื่อผ่านจุด ดังสมการ 2.4

$$a_{max} = y_{max}\omega^2$$

$$a(t) = -a_{max} \sin(\omega t + \phi)$$

$$a(t) = y_{max}\omega^2 \sin(\omega t + \phi + \pi)$$

$$a(t) = -y_{max}\omega^2 \sin(\omega t + \phi) \quad (2.4)$$

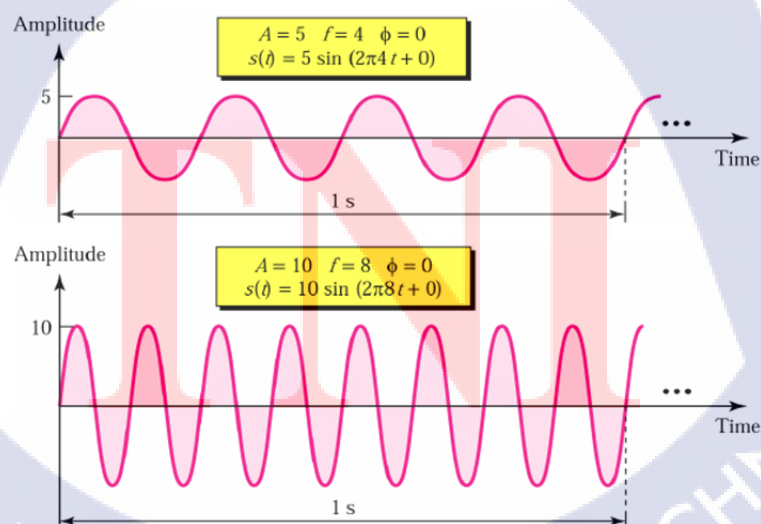
โดเมนเวลา และโดเมนความถี่ (Time and Frequency Domains)

Sinusoidal Signal หนึ่งประกอบด้วยสมบัติ 3 ประการ ได้แก่

- Amplitude
- Frequency
- Phase

การนำเสนอสัญญาณดังกล่าวด้วยแผนภาพ เพื่อเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณสามารถทำได้ 2 วิธี ได้แก่

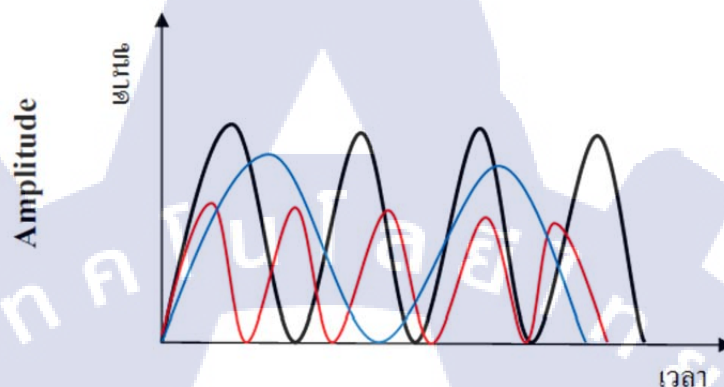
1. การแสดงผลในโดเมนเวลา (Time Domain Plot) เป็นการแสดงการเปลี่ยนแปลงของ ความเข้ม (A) เทียบกับเวลา (t) โดยที่สำหรับความถี่ (f) และ เฟส (ϕ) นั้นถึงแม้จะ ไม่มีการแสดงอย่างชัดเจน แต่สามารถวัดได้ ดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 การแสดงผลในโดเมนเวลา Sinusoidal Signal ที่มีแอมพลิจูดและความถี่ต่างกันแสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้ม (Amplitude) ของสัญญาณทั้งสองเทียบกับเวลา (Time)

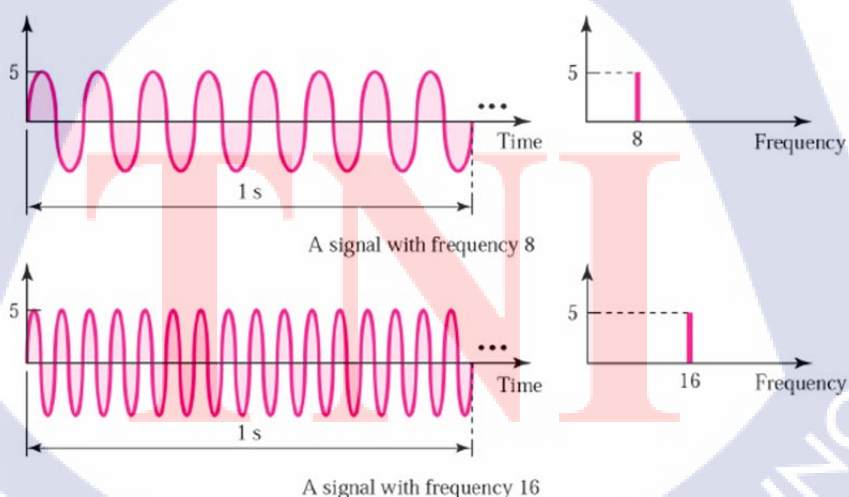
กราฟโดเมนเวลา

กราฟโดเมนเวลา ซึ่งเป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าขนาดการสั่นสะเทือนกับเวลาโดยแกนนอนจะเป็นแกนของเวลา ส่วนในแกนตั้งจะเป็นขนาดของการสั่นสะเทือน รูปที่ 2.26 แสดงกราฟโดเมนเวลาประกอบไปด้วยความถี่ซ้อนกันหลายความถี่



รูปที่ 2.26 กราฟโดเมนเวลาประกอบไปด้วยความถี่ซ้อนกันหลายความถี่

2. การแสดงผลในโดเมนความถี่ (Frequency-domain Plots) เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูด และความถี่ของสัญญาณ ดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 การแสดงผลในโดเมนเวลา (ซ้าย) เทียบกับการแสดงผลในโดเมนความถี่ (ขวา) ของ Sinusoidal Signal ที่มีความถี่ต่างกัน

เมื่อพิจารณาจากแผนภาพในรูปที่ 2.27 จะเห็นว่าเราสามารถอธิบายคุณสมบัติด้าน Amplitude และ Frequency ของสัญญาณ ใน Frequency-Domain Plot ด้วยแท่งตรง (Spike) เพียง 1 แท่ง ซึ่งกระชับกว่าการแสดงด้วย Time-Domain Plot ของสัญญาณที่สมมูลกัน ดังนั้น สัญญาณ Frequency-Domain Plots จึงเหมาะสำหรับใช้อธิบาย Analog Signal ชนิดซ้ำคาบ

ความถี่ (Frequency)

ความถี่ (Frequency) สัญญาณการสั่นสะเทือนบนกราฟโดเมนของความถี่ในที่นี้ก็คือ จำนวนรอบของการสั่นสะเทือนต่อหน่วยเวลา และหน่วยที่นิยมใช้จะเป็นรอบต่อวินาที (CPM) และบางครั้งใช้เป็นรอบต่อวินาทีหรือหน่วยเฮิรตซ์ (Hz) ความถี่นี้จะปัจจัยที่สำคัญมากตัวหนึ่งในการบ่งบอกถึงแหล่งที่มาและปัญหาของเครื่องจักร [15] ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากต่อการวิเคราะห์ถึงปัญหาหรือความเสียหายต่างๆ

1.2 สัญญาณผสม (Composite Signal)

สัญญาณผสม (Composite Signal) สัญญาณประเภท Simple Signal เพียงหนึ่งสัญญาณ เป็นการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานในรูปแบบซ้ำๆ กัน ซึ่งไม่สามารถบรรจุปริมาณข่าวสารได้เพียงพอต่อการสื่อสารข้อมูล ดังนั้นหากต้องการใช้ Sine Wave ในการสื่อสาร จำเป็นต้องมีการปรับแต่งคุณลักษณะของสัญญาณ ได้แก่ ระดับความสูง (A) เฟส (ϕ) และความถี่ (ω) อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างประกอบกัน

การสื่อสารข้อมูลที่ประกอบด้วยการปรับแต่งคุณลักษณะ (Characteristics) ของสัญญาณ ตามข่าวสารที่ต้องการถ่ายโอนดังกล่าว ก่อให้เกิด สัญญาณชนิดใหม่เรียกว่าสัญญาณผสม (Composite Signal) ซึ่งประกอบด้วย Simple Signal หลายสัญญาณ อนึ่งการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะสัมพันธ์กับความถี่ของสัญญาณ ดังนั้นจำนวนความถี่ของ Composite Signal จึงแปรผันโดยตรงกับ ความหลากหลายของกลุ่มคุณลักษณะเหล่านั้น

ตัวกลางส่งผ่าน

ในการสื่อสาร สัญญาณ Composite จะส่งผ่านตัวกลาง (เช่น สายนำสัญญาณ หรืออากาศ) ซึ่งตัวกลางส่งผ่าน (Transmission Medium) แต่ละประเภทจะมีคุณสมบัติแตกต่างกันไป

คุณสมบัติของตัวกลาง สัมพันธ์กับความถี่ กล่าวคือตัวกลางอาจ ส่งผ่าน เพียงบางความถี่ และ ลดทอนหรือ กัก ความถี่อื่นที่เหลือ ดังนั้น สัญญาณที่รับได้ที่ปลายด้านรับของตัวกลาง อาจไม่สมบูรณ์ เช่น เมื่อส่งสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยมเข้าสู่ตัวกลาง ฝั่งด้านรับอาจจะไม่ได้รับสัญญาณที่เหมือนกับต้นทางก็ได้ ดังรูปที่ 2.28



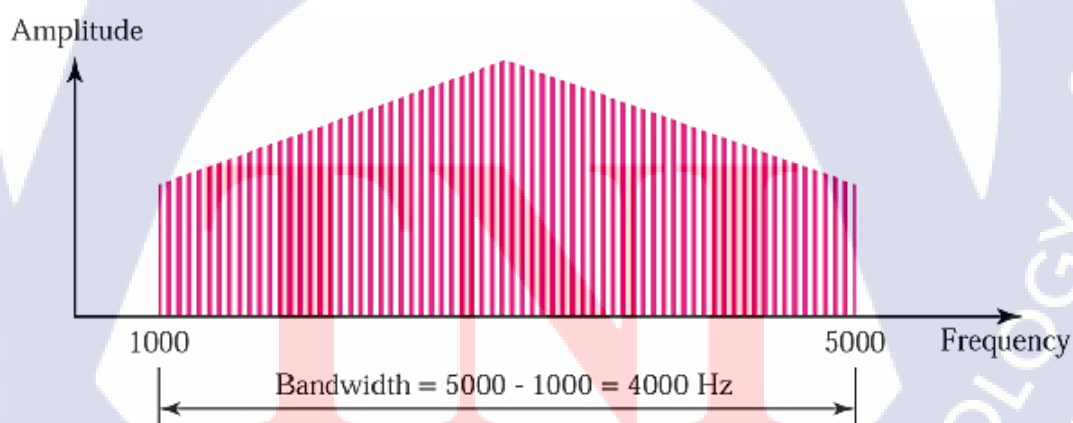
รูปที่ 2.28 แนวคิดของความเพี้ยนของสัญญาณที่ฝั่งด้านรับ (Output Signal) จากสัญญาณที่ฝั่งด้านส่ง (Input Signal)

ความกว้างของแถบความถี่ (Bandwidth)

ความกว้างของแถบความถี่ (Bandwidth) คือพิสัยของความถี่ ซึ่งตัวกลางยอมให้ผ่านไปได้ คำนวณได้จากผลต่างระหว่างความถี่สูงสุด และต่ำสุด ซึ่งมีระดับพลังงานลดทอนลงไม่เกินกึ่งหนึ่ง หรืออีกนัยหนึ่ง ดังสมการที่ 2.7

$$0.5 \cdot A_{in}^2(f) \leq A_{out}^2(f) \leq A_{in}^2(f) \quad (2.7)$$

เมื่อ A_{in} และ A_{out} คือระดับสัญญาณที่ฝั่ง Input และ Output ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 กราฟความถี่ของแถบความถี่ที่สามารถส่งผ่านตัวกลางไปได้ ซึ่งอยู่ในช่วง 1000 Hz ถึง 5000 Hz หรือคิดเป็นความกว้างของแถบความถี่ ซึ่งมีความกว้างเท่ากับ 4000 Hz

2. สัญญาณดิจิทัล (Digital Signal)

สัญญาณประเภทนี้เป็นสัญญาณที่เหมาะสมสำหรับนำเสนอ ปริมาณในรูปแบบของสัญลักษณ์ (Symbols) เนื่องจากเป็นสัญญาณที่มีระดับของความเข้มเป็นค่าคงที่จำนวนจำกัด (เป็นจำนวนที่นับได้) โดยที่ระดับสัญญาณค่าหนึ่งจะหมายถึงสัญลักษณ์ตัวหนึ่ง ตลอดช่วงเวลาที่พิจารณา จากเวลา A ไปเวลา B จะมีการเปลี่ยนแปลงของระดับสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่อง (Abrupt) ระหว่างสัญลักษณ์ที่ติดกัน หรืออีกนัยหนึ่งในทางคณิตศาสตร์ เราไม่สามารถหาค่าของอนุพันธ์ของฟังก์ชันของสัญญาณเทียบกับเวลาได้ทุกๆ จุดตลอดช่วง (A, B) โดยทั่วไป ค่าของสัญญาณมักจะมี 2 ค่า เพื่อใช้แทน สัญลักษณ์ 0 และ 1 จะเรียกสัญญาณดิจิทัลนั้นว่า สัญญาณเลขฐานสอง (Binary Signal)

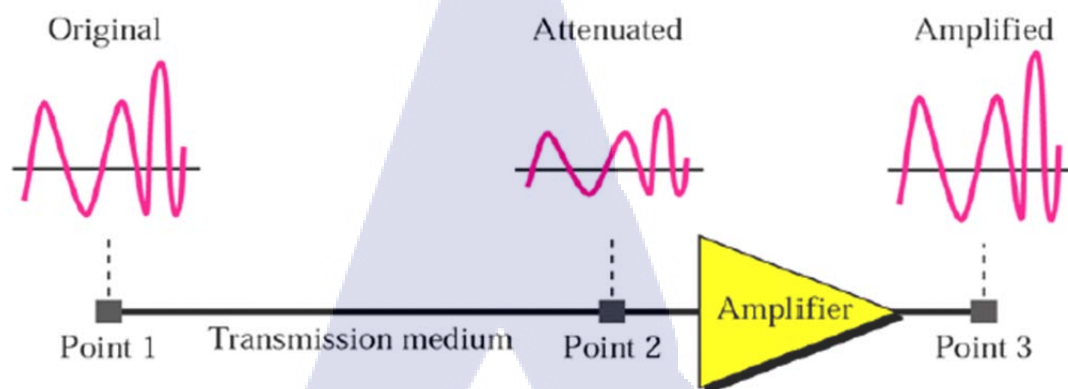
ข้อบกพร่องในการส่งผ่านสัญญาณ

การออกแบบระบบการสื่อสารข้อมูลในทางปฏิบัติ มักจำเป็นต้องมีการเผื่อให้อัตราเร็วของข้อมูลที่ส่งจริงมีค่า น้อยกว่า ค่าที่คำนวณได้ ทั้งนี้เนื่องจากระบบส่งผ่านสัญญาณโดยทั่วไปอาจมีข้อบกพร่องต่างๆ (Transmission Impairments) ที่มีผลต่อสัญญาณข้อมูล อาทิเช่น เกิดการสูญเสียพลังงานระหว่างการส่งข้อมูล และ เกิดการเปลี่ยนแปลงของรูปสัญญาณที่ด้านรับจากด้านส่ง ซึ่งนำไปสู่การแปลความหมายของข้อมูลผิดพลาด ข้อบกพร่องดังกล่าวสามารถจำแนกได้ดังต่อไปนี้

การลดทอน (Attenuation)

การลดทอน คือการสูญเสียพลังงานของสัญญาณ (ทั้ง Simple และ Composite Signals) ภายในตัวกลางส่งผ่าน อันเนื่องมาจาก ความต้านทาน (เช่น ในรูปของความร้อน) ซึ่งอาจแก้ไขโดยใช้อุปกรณ์ขยายสัญญาณ (Amplifier) หรือในระบบเครือข่ายเรียกว่า Repeater ดังรูปที่ 2.30 Attenuation หรือ Gain (อันเกิดจากการลดทอน หรือ การทวนสัญญาณตามลำดับ) วัดได้จาก ความเข้มสัมพัทธ์ระหว่างสัญญาณปลายทาง (P_2) และต้นทาง (P_1) (ในหน่วย dB) ดังสมการที่ 2.8

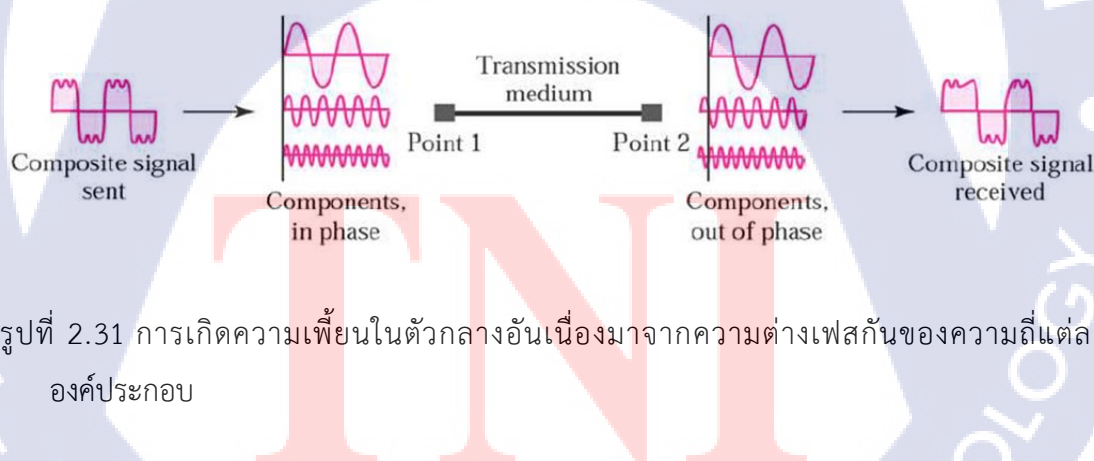
$$\text{Attenuation} = 10 \times \log_{10}(P_2 / P_1) \quad (2.8)$$



รูปที่ 2.30 กราฟความถี่ของแถบความถี่ที่สามารถส่งผ่านตัวกลางไปได้ ซึ่งอยู่ในช่วง 1000 Hz ถึง 5000 Hz หรือคิดเป็นความกว้างของแถบความถี่ ซึ่งมีความกว้างเท่ากับ 4000 Hz

ความผิดเพี้ยน (Distortion)

ความผิดเพี้ยน คือการที่สัญญาณเปลี่ยนรูปร่าง มักเกิดขึ้นเฉพาะกับ Composite Signal เท่านั้น เพราะสัญญาณแต่ละความถี่เคลื่อนที่ไปในตัวกลางด้วยความเร็วต่างกัน ทำให้ไปถึงด้านรับไม่พร้อมกัน สัญญาณแต่ละความถี่ ถูกลดทอนภายในตัวกลางด้วยอัตราที่ต่างกัน ดังนั้นผลรวมของสัญญาณที่ด้านรับจึงแตกต่างจากด้านส่ง ดังรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.31 การเกิดความผิดเพี้ยนในตัวกลางอันเนื่องมาจากความต่างเฟสกันของความถี่แต่ละองค์ประกอบ

3. สัญญาณรบกวน (Noise)

สัญญาณรบกวน คือสัญญาณไม่พึงประสงค์ซึ่งปนมากับสัญญาณข่าวสารในตัวกลาง แบ่งออกได้หลายประเภทดังต่อไปนี้

- Thermal Noise เกิดจากการสั่นแบบสุ่มของ Electron ในตัวกลาง ซึ่งก่อให้เกิดสัญญาณไฟฟ้า (Electron เคลื่อนที่ที่เกิดกระแสไฟฟ้า) ไปรบกวนสัญญาณต้นฉบับ

- Induced Noise เกิดจากการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าจากอุปกรณ์ภายนอก เช่นเครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ (สนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ เกิดกระแสไฟฟ้า)

- Cross Talk คือสัญญาณรบกวนชนิดเหนี่ยวนำ (Induced Noise) รูปแบบหนึ่ง ซึ่งเกิดจากสายนำสัญญาณข้างเคียง (กระแสไฟฟ้าสลับ เหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก และสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้า)

- Impulse Noise (สัญญาณรบกวนที่มีระดับสูงมาก ในช่วงเวลาสั้นๆ) มักเกิดจากข้อบกพร่องในสายไฟฟ้ากำลังสูงใกล้เคียง และฟ้าผ่า เป็นต้น

นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นๆ ซึ่งมีผลต่อการส่งข่าวสาร โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณ และตัวกลางดังนี้

Propagation Time คือเวลาที่ข้อมูลใช้ในการเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง คำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่าง ระยะที่ข่าวสารเดินทาง (Distance) และความเร็วของข่าวสารนั้น (Speed)

Wavelength คือคุณสมบัติหนึ่งของ สัญญาณที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง ซึ่งสัมพันธ์กับความถี่ (f) และคุณสมบัติของตัวกลาง ความยาวคลื่นเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญมาก ในการวิเคราะห์การสื่อสารด้วยใยแก้วนำแสง (Fiber Optic)

นอกจากการแบ่งสัญญาณออกเป็น 3 แบบ ดังกล่าวแล้วยังอาจแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ สัญญาณซ้ำคาบ และไม่ซ้ำคาบ ทั้งสัญญาณดิจิทัล และสัญญาณอนาลอก ยังสามารถจำแนกออกได้เป็นแบบ ซ้ำคาบ และ ไม่ซ้ำคาบ กล่าวคือ

1. สัญญาณซ้ำคาบ (Periodic Signal) คือสัญญาณที่มีรูปแบบ (Pattern) หนึ่งภายในช่วงเวลา หรือ คาบ (Period) ที่จำกัด (สามารถวัดได้) โดยรูปแบบดังกล่าวปรากฏซ้ำ ด้วยคาบที่เท่าๆ กัน ตลอดช่วงที่พิจารณา และเรียกการวนครบรูปแบบหนึ่งครั้ง ของสัญญาณดังกล่าวว่า รอบ (Cycle)

2. สัญญาณไม่ซ้ำคาบ (Non-periodic หรือ Aperiodic Signal) ได้แก่สัญญาณซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่สามารถระบุรูปแบบที่แน่นอน หรือระบุรอบการปรากฏซ้ำของสัญญาณได้ตลอดช่วงที่พิจารณา

อนุกรมฟูเรียร์และการวิเคราะห์สัญญาณรายคาบ

1. อนุกรมฟูเรียร์ (Fourier Series) การเขียนสเกตรัมที่ผ่านมาเป็นการเขียนสเปกตรัมของสัญญาณที่มีความถี่เพียงค่าเดียวหรือเพียง 2-3 ความถี่เท่านั้น แต่ในความเป็นจริงสัญญาณต่างๆ จะมีส่วนประกอบของสัญญาณหลายความถี่ ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ ในรูปของผลรวม

ของสัญญาณแบบซายน์หลายความถี่ หรือการหมุนของเฟสเซอร์ได้ เรียกผลบวกของ สัญญาณแบบซายน์หลายๆ ความถี่ที่แทนสัญญาณนี้ว่า อนุกรมฟูเรียร์ (Fourier Series) เขียนได้หลาย รูปแบบดังนี้

- อนุกรมฟูเรียร์รูปแบบที่ 1

$$v(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos\left(\frac{2\pi nt}{T_0}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin\left(\frac{2\pi nt}{T_0}\right) \quad (2.9)$$

A_0 เป็นค่าเฉลี่ยของ $v(t)$ ได้จาก

$$A_0 = \frac{1}{T_0} \int_{-T/2}^{T/2} v(t) dt \quad (2.10)$$

สัมประสิทธิ์ A_n และ B_n ได้จาก

$$A_n = \frac{2}{T_0} \int_{-T/2}^{T/2} v(t) \cos\left(\frac{2\pi nt}{T_0}\right) dt, B_n = \frac{2}{T_0} \int_{-T/2}^{T/2} v(t) \sin\left(\frac{2\pi nt}{T_0}\right) dt \quad (2.11)$$

- อนุกรมฟูเรียร์รูปแบบที่ 2

$$v(t) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos\left(\frac{2\pi nt}{T_0} - \phi_n\right) \quad (2.12)$$

C_n มีความสัมพันธ์กับ A_0, A_n, B_n ตามสมการ

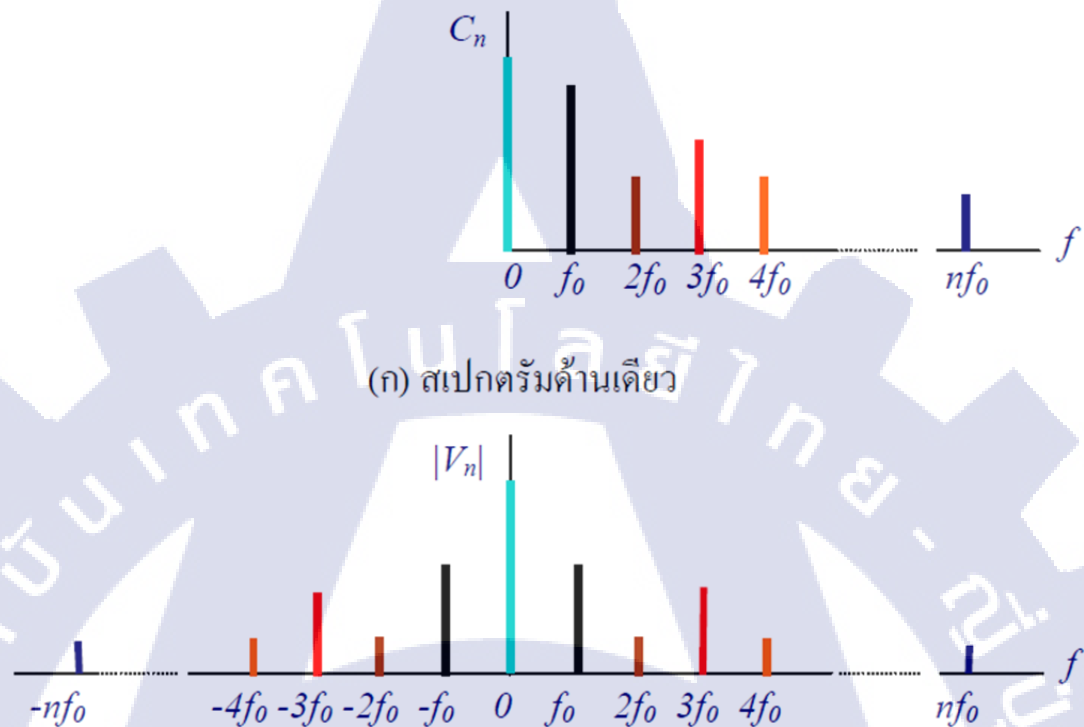
$$C_0 = A_0$$

$$C_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2}$$

$$\phi_n = \tan^{-1} \frac{B_n}{A_n} \quad (2.13)$$

อนุกรมฟูเรียร์ของสัญญาณรายคาบ อาจมองได้ว่าประกอบด้วยผลรวมฮาร์มอนิกของความถี่หลัก $f_0 = \frac{1}{T_0}$ สัมประสิทธิ์ C_n เรียกว่า Spectral Amplitudes เป็นขนาดขององค์ประกอบสเปกตรัม $C_n \cos(2\pi n f_0 t - \phi_n)$ ณ ความถี่ $n f_0$ ดังแสดงในรูปที่ 2.32 จะเห็นเส้นตรงในแนวดิ่งมีความยาวเท่ากับขนาดขององค์ประกอบสเปกตรัม ณ ความถี่ฮาร์มอนิกนั้นๆ เห็น

ได้ว่าสัญญาณรายคาบที่แทนด้วยอนุกรมฟูเรียร์จะมีค่าเฉพาะที่ความถี่หลักและความถี่ฮาร์มอนิกเท่านั้น



รูปที่ 2.32 เส้นสเปกตรัมของสัญญาณรายคาบ (ก) สเปกตรัมด้านเดียว (ข) สเปกตรัมสองด้าน

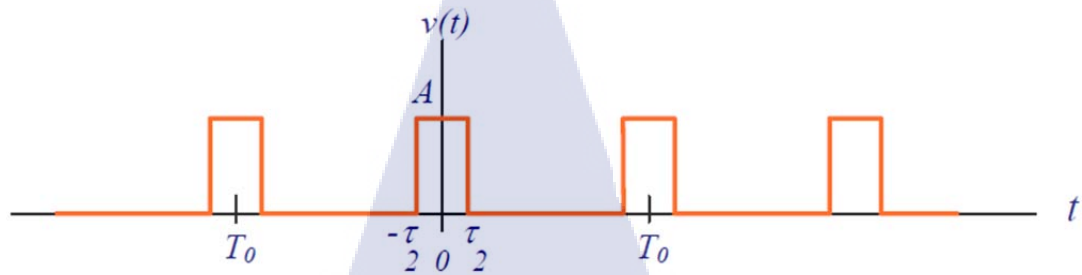
สำหรับรูปแบบของอนุกรมฟูเรียร์ที่เหมาะสมสำหรับการสื่อสารนั้นคือรูปแบบเอกโปเนนเชียล เขียนได้ดังนี้

- อนุกรมฟูเรียร์รูปแบบที่ 3

$$v(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{j2\pi f_0 t} \quad n = \dots -2, -1, 0, 1, 2 \dots \quad (2.14)$$

$$C_n = \frac{1}{T_0} \int_{T_0} v(t) e^{-j2\pi n f_0 t} dt \quad (2.15)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ C_n เป็นจำนวนเชิงซ้อนสามารถเขียนได้เป็น $C_n = |C_n| e^{j \arg C_n}$ ตัวอย่างการกระจายสัญญาณขบวนพัลส์สี่เหลี่ยมรายคาบที่มีลักษณะดังรูปที่ 2.33 คือมีคาบเวลาเป็น T_0 ความสูงของพัลส์เป็น A และมีความกว้างของพัลส์เป็น τ



รูปที่ 2.33 ขบวนพัลส์สี่เหลี่ยมรายคาบ

จากสมการ 2.15 หาค่า C_n ได้ดังนี้

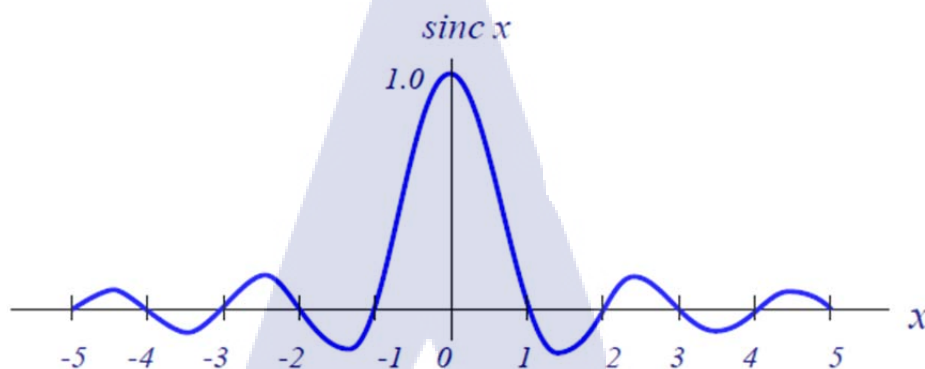
$$\begin{aligned} c_n &= \frac{1}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} v(t) e^{-j2\pi n f_0 t} dt = \frac{1}{T_0} \int_{-\tau/2}^{\tau/2} A e^{-j2\pi n f_0 t} dt \\ &= \frac{A}{-j2\pi n f_0 T_0} (e^{-j\pi n f_0 \tau} - e^{+j\pi n f_0 \tau}) \\ C_n &= \frac{A}{T_0} \left(\frac{\sin \pi n f_0 \tau}{\pi n f_0} \right) \end{aligned} \quad (2.16)$$

ฟังก์ชันในรูป $\frac{\sin(\pi x)}{\pi x}$ พบบ่อยมากในเรื่องการสื่อสารจึงมีการนิยามฟังก์ชันไว้ดังนี้

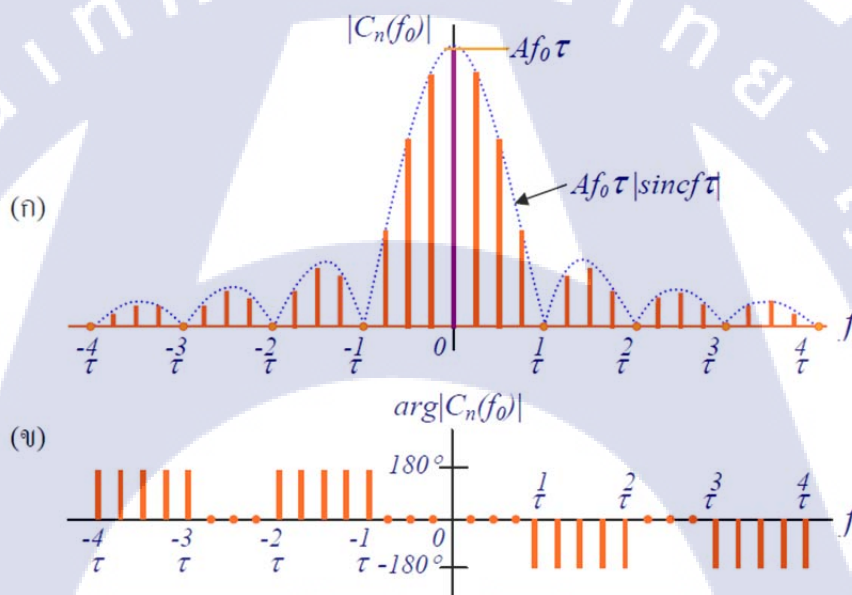
$$\text{sinc}(x) = \frac{\sin(\pi x)}{\pi x} \quad (2.17)$$

มีลักษณะดังรูปที่ 2.34 และเมื่อนำ cn ในสมการ 2.16 ไปเขียนในรูป **sinc** ฟังก์ชันได้ดังสมการที่ 2.18

$$C_n = \frac{A\tau}{T_0} \text{sinc}(n f_0 \tau) \quad (2.18)$$



รูปที่ 2.34 ฟังก์ชัน $\frac{\sin(\pi x)}{\pi x}$



รูปที่ 2.35 สเปกตรัมของสัญญาณขบวนพัลส์สี่เหลี่ยม (ก) ขนาด (ข) เฟส

เมื่อนำไปเขียนสเปกตรัมจะได้ ขนาดของสเปกตรัม คือขนาดของ C_n คือ $|C_n|$ เป็นฟังก์ชันของ f และ $\arg(nf_0)$ แทน สเปกตรัมเฟส ดังแสดงในรูปที่ 2.10 เป็นกรณี $\tau = \frac{T_0}{4}$ จะเห็นว่าคุณสมบัติที่สำคัญของสเปกตรัมของสัญญาณกำลังรายคาบ มีดังนี้

1. สัญญาณที่กระจายออกจะอยู่ที่ความถี่ที่เป็นจำนวนเท่าของความถี่หลัก $f_0 = \frac{1}{T_0}$ คือประกอบด้วยความถี่ที่เป็นฮาร์มอนิกของความถี่ f_0 หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งเส้นสเปกตรัมจะอยู่ห่างกันเป็นระยะเท่ากับ f_0

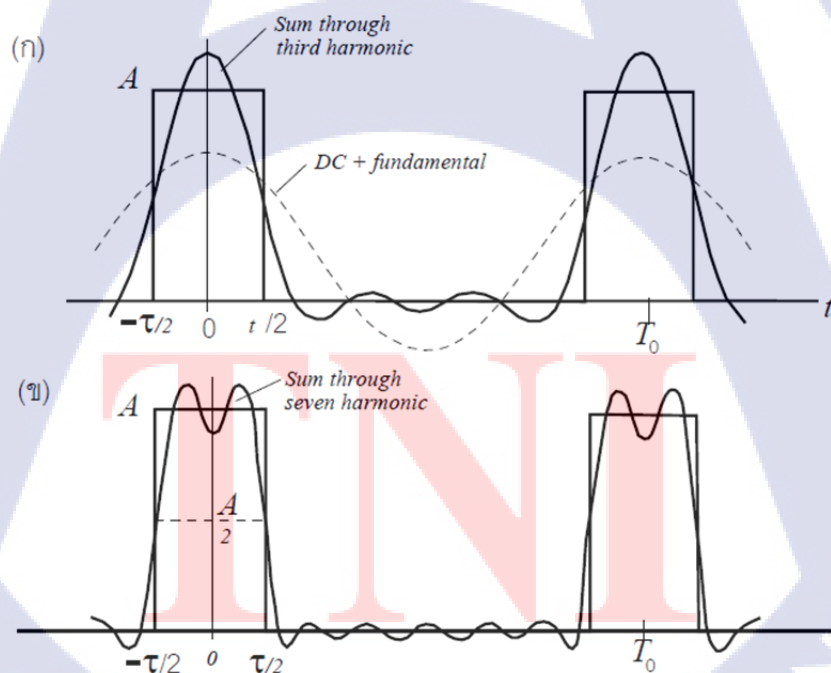
2. ที่ $n = 0$ ค่า $c(0) = \frac{1}{T_0} \int v(t) dt$ คือค่าเฉลี่ยของ $v(t)$ เป็นส่วนประกอบของสัญญาณกระแสตรง (ณ ความถี่ = 0) หรือเรียกว่า DC Component

3. ถ้า $v(t)$ เป็นค่าจริง จะได้ $C_{-n} = C_n^*$

การกระจายสัญญาณออกเป็นอนุกรมฟูรีเยร์ จึงเป็นผลรวมของส่วนประกอบที่มีความถี่ต่างๆ ที่เป็นฮาร์มอนิกของความถี่ f_0 ดังกล่าว เพื่อให้เห็นชัดเจนขึ้นโดยการรวมส่วนประกอบที่มีความถี่ต่างๆ จากตัวอย่างในรูป 2.35 เขียนให้อยู่ในรูปสมการ 2.12 โดยที่ค่า $C_n = c_n$ และ $\phi_n = \arg c_n$ จะได้

$$v(t) = \frac{A}{4} + \frac{\sqrt{2}A}{\pi} \cos \omega_0 t + \frac{A}{\pi} \cos 2\omega_0 t + \frac{\sqrt{2}A}{3\pi} \cos 3\omega_0 t + \dots \quad (2.19)$$

เมื่อรวมส่วนประกอบความถี่ถึงฮาร์มอนิกที่ 3 คือมีเฉพาะค่า $c(0), c(1), c(2)$ และ $c(3)$ จะทำให้ได้ $v(t)$ มีลักษณะดังรูปที่ 2.36 (ก) และเมื่อรวมถึงฮาร์มอนิกที่ 7 จะได้ดังรูปที่ 2.36 (ข)



รูปที่ 2.36 สัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมที่สร้างจากอนุกรมฟูรีเยร์ (ก) ผลรวมสามเทอม (ข) ผลรวมถึงเทอมที่ 7

จากการแทนสัญญาณ $v(t)$ ด้วยอนุกรมฟูเรียร์ที่มีการกระจายเทอมจำกัดคือไม่ได้กระจายเทอมจนถึง ∞ นั่นคือการประมาณค่าของ $v(t)$ ด้วยจำนวนเทอมที่จำกัด จะทำให้เกิดความแตกต่างของรูปสัญญาณที่ได้จากการประมาณกับรูปสัญญาณจริง และที่น่าสนใจคือการที่ค่าประมาณมีค่าสูงกว่าค่าจริงในบางช่วงและมีการแกว่งขึ้นลงระหว่างค่าของสัญญาณจริง เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Gibbs's phenomenon ดังรูปที่ 2.39

2. Parseval's Power Theorem เป็นทฤษฎีที่กล่าวถึงการหาค่ากำลังเฉลี่ยได้จากผลบวกของกำลังสองของค่า c_n ดังสมการที่ 2.20

$$P = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n c_n^* = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |c_n|^2 \quad (2.20)$$

นั่นคือ ถ้าทราบสเปกตรัมของสัญญาณ จะสามารถหาค่ากำลังเฉลี่ยของสัญญาณได้จากสเปกตรัมของสัญญาณนั้น

ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มและการวิเคราะห์สัญญาณที่ไม่เป็นรายคาบ

1. สัญญาณพลังงานและฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม ในหัวข้อนี้จะได้กล่าวถึงสัญญาณที่ไม่เป็นรายคาบซึ่งมีค่าจำกัดในช่วงเวลาหนึ่ง ถ้าสัญญาณที่ไม่เป็นรายคาบนี้มีพลังงานทั้งหมดจำกัด ค่าในอาณาจักรความถี่จะแทนได้ด้วยสเปกตรัมต่อเนื่องที่ได้จากการทำฟูเรียร์ทรานสฟอร์มสัญญาณนั้น จากหัวข้อที่ผ่านมาสัญญาณรายคาบจะเกี่ยวข้องกับการหาค่ากำลังเฉลี่ย แต่สำหรับสัญญาณที่ไม่เป็นรายคาบ ซึ่งมักจะเป็นสัญญาณที่มีลักษณะเป็น พัลส์ (pulse) กล่าวคือมีค่าเฉพาะในช่วงเวลาจำกัด การหาค่ากำลังเฉลี่ยคือการหาพื้นที่ของกราฟ $|v(t)|^2$ แล้วหารด้วยคาบเวลา T ที่มีค่าเข้าสู่ ∞ ตามสมการที่ 2.21

$$\langle v(t) \rangle \equiv \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} v(t) dt \quad (2.21)$$

ค่าที่ได้จะเข้าสู่ศูนย์ ในการวิเคราะห์สัญญาณที่ไม่เป็นรายคาบจึงจะการใช้การหาพลังงานแทน โดยมีนิยามดังนี้

$$E \equiv \int_{-\infty}^{\infty} |v(t)|^2 dt \quad (2.22)$$

จากสมการจะเห็นว่า มีลักษณะเช่นเดียวกับการหาค่าเฉลี่ยแต่ไม่ต้องหารด้วยคาบเวลา T_0 ถ้าพลังงานที่ได้มีค่าจำกัด คือ $0 < E < \infty$ แล้ว $v(t)$ จะนิยามได้ว่าเป็นสัญญาณพลังงาน (Nonperiodic Energy Signal) สัญญาณที่มีค่าในช่วงเวลาจำกัดเกือบทั้งหมดจะเป็นสัญญาณพลังงาน เป็นเงื่อนไขของสัญญาณที่จะหาฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มได้

ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มเป็นการเปลี่ยนฟังก์ชันทางเวลา $v(t)$ ให้เป็นฟังก์ชันทางความถี่เขียนได้เป็น $V(f)$ มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.23

$$V(f) = F[v(t)] \equiv \int_{-\infty}^{\infty} v(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (2.23)$$

การอินทิเกรตตลอดช่วงเวลาทำให้ได้ฟังก์ชันที่ต่อเนื่องตามตัวแปร f ฟังก์ชันทางเวลา $v(t)$ กลับคืนมาได้ โดยการหาฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มกลับ (Inverse Fourier Transform) เขียนได้เป็นดังสมการที่ 2.24

$$v(t) = F^{-1}[V(f)] \equiv \int_{-\infty}^{\infty} V(f)e^{j2\pi ft} dt \quad (2.24)$$

พิจารณาสมการที่ 2.14 กับสมการ 2.24 จะเห็นว่า $V(f)$ ในกรณีสัญญาณที่ไม่เป็นรายคาบจะเทียบได้กับ $c(nf_0)$ ในกรณีสัญญาณรายคาบ ฉะนั้น $V(f)$ คือสเปกตรัมของสัญญาณไม่เป็นรายคาบของ $v(t)$ จะต่างกับที่ $V(f)$ เป็นฟังก์ชันต่อเนื่องในขณะที่ $c(nf_0)$ จะมีค่าเฉพาะความถี่ไม่ต่อเนื่อง นั่นคือสัญญาณที่ไม่เป็นรายคาบจะมีสเปกตรัมเป็น สเปกตรัมแบบต่อเนื่อง (Continuous Spectrum) แทนที่จะเป็น Line Spectrum ข้อแตกต่างอีกประการหนึ่งของสัญญาณรายคาบกับสัญญาณที่ไม่เป็นรายคาบ คือในกรณีที่จะหาค่ากลับไปในอาณาจักรเวลา สัญญาณรายคาบใช้การบวกส่วนประกอบแต่ละความถี่ (อนุกรมฟูเรียร์) ในขณะที่สัญญาณไม่เป็นรายคาบใช้วิธีการอินทิเกรต (อินเวอร์สฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม) คุณสมบัติที่สำคัญของ $V(f)$ 3 ประการคือ

1. $V(f)$ เป็นฟังก์ชันเชิงซ้อน $|V(f)|$ เป็นสเปกตรัมขนาด และ $\arg V(f)$ เป็นสเปกตรัมเฟส
2. ที่ $f = 0$ ค่า $V(f)$ เท่ากับพื้นที่ทั้งหมดของ $v(t)$ เนื่องจาก

$$v(0) = \int_{-\infty}^{\infty} v(t) dt \quad (2.25)$$

ในกรณีของสัญญาณรายคาบค่า $c(0)$ เป็นค่าเฉลี่ยของสัญญาณ
 3. ถ้า $v(t)$ เป็นค่าจริง

$$V(-f) = V^*(f)$$

และ

$$|V(-f)| = |V(f)| \quad \arg V(-f) = -\arg V(f) \quad (2.26)$$

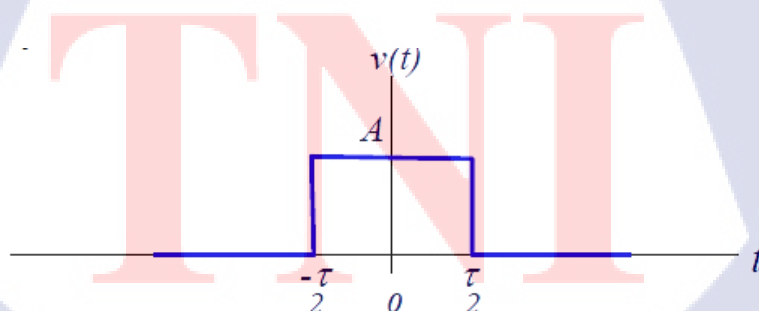
เรียกฟังก์ชันแบบนี้ว่า hermitian เพื่อให้เห็นชัดเจนขึ้น พิจารณาตัวอย่างกรณีของพัลส์สี่เหลี่ยม สามารถเขียนสัญลักษณ์แทนพัลส์สี่เหลี่ยมได้ดังสมการที่ 2.27

$$\Pi\left(\frac{t}{\tau}\right) \equiv \begin{cases} 1 & |t| < \tau/2 \\ 0 & |t| > \tau/2 \end{cases} \quad (2.27)$$

เป็นพัลส์สี่เหลี่ยมขนาดหนึ่งหน่วยช่วงกว้าง τ และจุดกึ่งกลางพัลส์อยู่ที่จุด 0 เมื่อให้สัญญาณ $v(t)$ เป็นพัลส์สี่เหลี่ยม ดังนิยามจะได้

$$v(t) = A \Pi\left(\frac{t}{\tau}\right) \quad (2.28)$$

มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.37

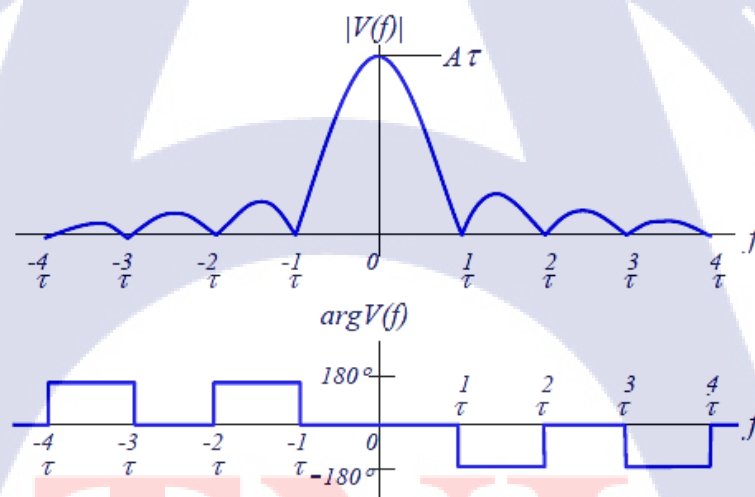


รูปที่ 2.37 สัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยม $A \Pi\left(\frac{t}{\tau}\right)$

เมื่อแทนค่า $v(t)$ ในสมการ 2.23 ได้

$$V(f) = F[v(t)] \equiv \int_{-\infty}^{\infty} v(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (2.30)$$

$V(f)$ ที่ได้แสดงในรูปที่ 2.41 ที่ $f = 0$ จะได้ $V(f) = A\tau$ คือพื้นที่ใต้กราฟของพัลส์นั่นเอง เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 2.35 จะเห็นความแตกต่างระหว่างสเปกตรัมแบบเส้น (Line Spectra) กับ สเปกตรัมแบบต่อเนื่อง (Continuous Spectrum) ส่วนที่สำคัญของสเปกตรัมในรูปที่ 2.38 จะอยู่ในช่วงความถี่ที่ $|f| < \frac{1}{\tau}$ เนื่องจากว่าค่าของ $V(f)$ ที่ห่างออกไปจะต่ำกว่าค่าที่อยู่ในช่วงนี้มากๆ ค่า $\frac{1}{\tau}$ จึงเป็นตัวบอกความกว้างของสเปกตรัม (Spectrum Width) ได้ ถ้าค่า τ ลดต่ำลงความกว้างทางความถี่จะมากขึ้นคือรูปสเปกตรัมจะขยายออกในทางกลับกัน ถ้าพัลส์กว้างขึ้นคือ ค่า τ เพิ่มขึ้นจะทำให้สเปกตรัมแคบลง



รูปที่ 2.38 สเปกตรัมของพัลส์สี่เหลี่ยม $V(f) = A\tau \text{sinc } f\tau$

2. Rayleigh's Energy Theorem หัวข้อที่ผ่านมาได้กล่าวถึง ทฤษฎีบทกำลังของพาซีวัล (Parseval's Power Theorem) ซึ่งกล่าวถึงการหาลำดับของสัญญาณได้จากผลรวมกำลังสองของส่วนประกอบแต่ละความถี่ของสเปกตรัม ในทำนองเดียวกันทฤษฎีบทพลังงานของเรเลย์กล่าวว่าสัญญาณที่ไม่เป็นรายคาบสามารถหาลำดับได้จากสเปกตรัมของสัญญาณนั้น โดยสมการที่ 2.31

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |V(f)|^2 df \quad (2.31)$$

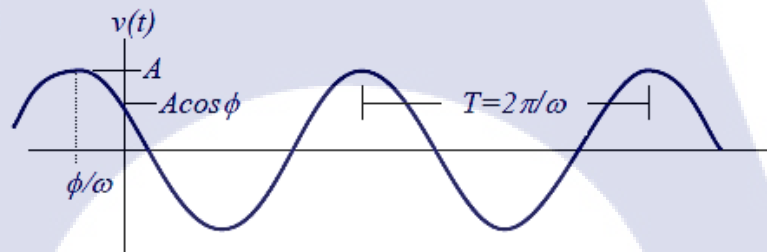
นั่นคือการรวมค่ากำลังสองของสเปกตรัมทุกความถี่ (โดยการอินทิเกรต) เมื่อพิจารณาแล้วจะเห็นว่าค่า $|V(f)|^2$ เป็นค่าพลังงานในช่วงความถี่เล็กๆ df จึงเรียกว่าเป็นความหนาแน่นสเปกตรัมพลังงาน (*Energy Spectral Density*)

2.1.11 สเปกตรัมของสัญญาณ

1. ลักษณะสเปกตรัมของสัญญาณ พิจารณาสัญญาณรูปแบบชายนความถี่เดียว ซึ่งเขียนเป็นฟังก์ชันของเวลาได้ ดังสมการที่ 2.9

$$v(t) = A \cos(\omega_0 t + \phi) \quad (2.32)$$

โดยที่ A เป็นขนาดของสัญญาณ ω_0 เป็นความถี่เชิงมุม และ ϕ เป็นเฟสของสัญญาณ ดังแสดงในรูป 2.35 ลักษณะของสัญญาณนี้สามารถอธิบายได้ด้วยค่าทั้ง 3 ค่าดังกล่าว

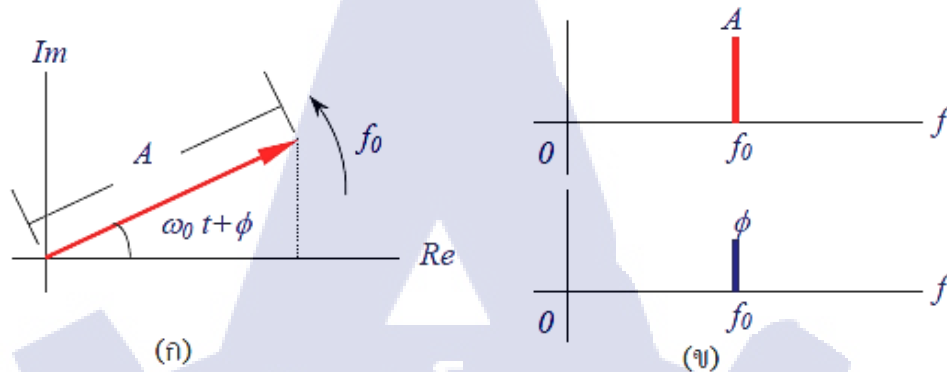


รูปที่ 2.39 สัญญาณรูปแบบชายน

แทนการแสดงสัญญาณในลักษณะแปรตามเวลา สามารถแสดงโดยการใช้เฟสเซอร์จาก $v(t)$ เป็นส่วนจริงของฟังก์ชันเอกโปเนนเชียล ดังสมการที่ 2.30

$$v(t) = A \cos(\omega_0 t + \phi) = A \Re[e^{j(\omega_0 t + \phi)}] \quad (2.33)$$

ซึ่งสามารถแสดงในรูปเฟสเซอร์ได้ดังรูป 2.36 ก



รูปที่ 2.40 การแทนเฟสเซอร์ของสัญญาณรูปแบบชายน

จะเห็นว่าข้อมูลของสัญญาณยังอยู่ครบทั้งขนาด ความถี่ และเฟส นอกจากการแทนสัญญาณด้วยเฟสเซอร์แล้วยังอาจแสดงสัญญาณในแกนความถี่ได้ ดังรูปที่ 2.40 (ข) เป็นการเขียนกราฟของขนาดตามความถี่ และเฟสตามความถี่ ตามลำดับ เห็นได้ว่าสัญญาณนี้มีเพียงความถี่เดียว กราฟแสดงขนาดตามความถี่จึงมี เส้นที่แสดงขนาดอยู่ที่ความถี่ f_0 ความถี่เดียวมีขนาด A ส่วนกราฟแสดงเฟสกับความถี่ เส้นแสดงเฟสก็จะอยู่ที่ f_0 มีขนาด ϕ การแสดงในลักษณะนี้เรียกว่าการแสดงผลสเปกตรัมของสัญญาณ (Line Spectrum) โดยมีหลักการเขียนคือ

- ใช้ความถี่ f_0 ซึ่ง เท่ากับ $\frac{\omega_0}{2\pi}$
- มุมเฟสวัดจากสัญญาณโคไซน์เทียบกับแกน x ถ้าเขียนจากสัญญาณชายนก็เปลี่ยนให้เป็นสัญญาณ โคไซน์ โดยใช้ความสัมพันธ์ $\sin \omega t = \cos(\omega t - 90^\circ)$
- ให้ขนาดเป็นบวกเสมอถ้าเป็นลบก็เปลี่ยนโดยใช้ความสัมพันธ์ $-A \cos \omega t = A \cos(\omega t \pm 180^\circ)$
- มุมเฟสใช้หน่วยองศา

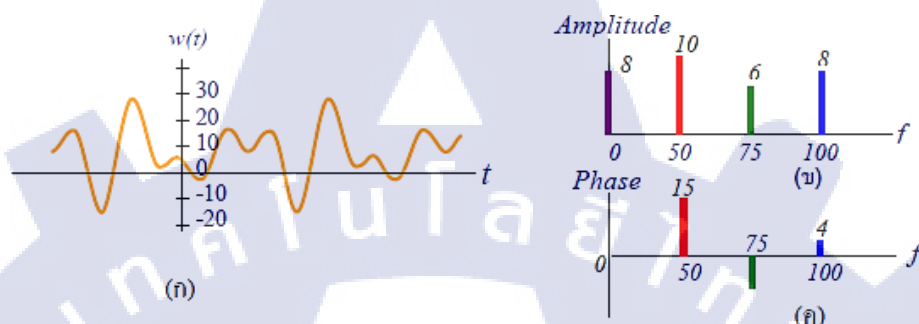
พิจารณาตัวอย่าง

$$w(t) = 8 - 10 \cos(100\pi t - 30^\circ) + 6 \sin 150\pi + 8 \cos(200\pi t + 45^\circ) \quad (2.34)$$

เปลี่ยนค่าคงที่เป็นสัญญาณความถี่ศูนย์ และเปลี่ยนชายนเป็นโคไซน์จะได้

$$w(t) = 8 \cos 2\pi 0t + 10 \cos(2\pi 50t) + 6 \cos(2\pi 75t - 90^\circ) + 8 \cos(2\pi 100t + 45^\circ) \quad (2.35)$$

ได้สเปกตรัมดังแสดงในรูป 2.37 ซึ่งมีส่วนประกอบอยู่ที่ความถี่ 0 50 75 และ 100 Hz มีขนาด 8, 10 6 และ 8 หน่วย ตามลำดับ

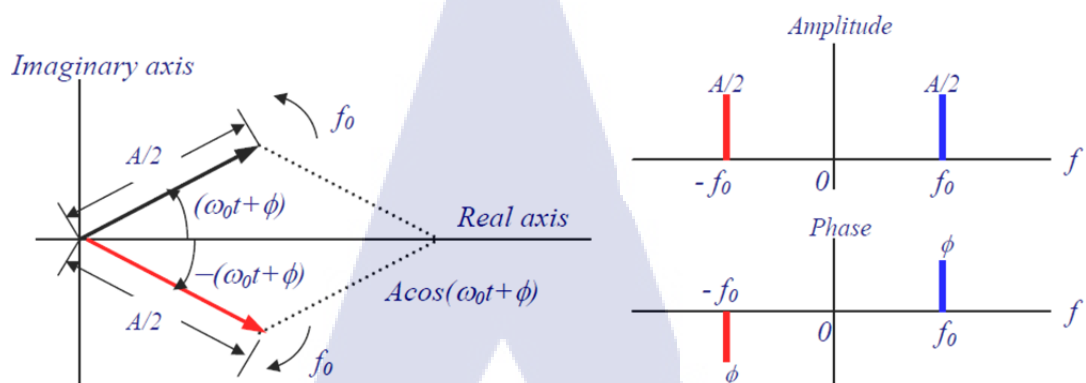


รูปที่ 2.41 ตัวอย่างการแทนสัญญาณด้วยเฟสเซอร์

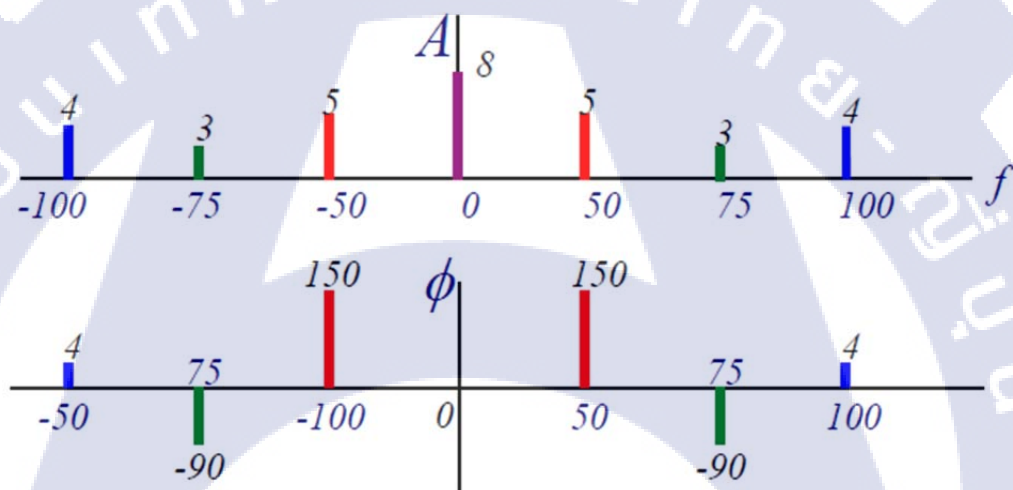
นอกจากการใช้เฟสเซอร์แทนสัญญาณในรูปแบบที่ได้กล่าวไปแล้วยังอาจแทนได้รูปแบบ โดยพิจารณาจากสมการ 2.33

$$A \cos(\omega t + \phi) = \frac{A}{2} e^{j\phi} e^{j\omega t} + \frac{A}{2} e^{-j\phi} e^{-j\omega t} \quad (2.36)$$

จะเห็นว่าเฟสเซอร์นี้มีส่วนประกอบที่หมุนในทิศทางบวกและลบสวนทางกันด้วยความเร็วเชิงมุมที่เท่ากันเมื่อเขียนเป็นสเปกตรัมของสัญญาณ จะมีส่วนประกอบของความถี่บวกและความถี่ลบ คือ f_0 และ $-f_0$ ดังแสดงในรูปที่ 2.38 เรียกการแทนสัญญาณแบบนี้ว่า สเปกตรัมสองด้าน (Two-Sided Line Spectrum) ซึ่งแตกต่างจากการเขียนสเปกตรัมในรูปที่ 2.39 ที่เป็นสเปกตรัมด้านเดียว และสำหรับสมการ 2.32 เมื่อเขียนสเปกตรัมจะได้ตามรูปที่ 2.43



รูปที่ 2.42 (ก) คอนจูเกตเฟสเซอร์ (ข) เส้นสเปกตรัมสองด้าน



รูปที่ 2.43 สเปกตรัมสองด้านของสัญญาณรูปที่ 2.37

2. ค่าเฉลี่ยและกำลังเฉลี่ยของสัญญาณ ให้ $v(t)$ เป็นสัญญาณใดๆ ค่าเฉลี่ยของสัญญาณจะถูก นิยามดังสมการที่ 2.21 ซึ่งก็คือค่าพื้นที่ใต้กราฟจากเวลา $-T/2$ ถึง $T/2$ หารด้วยเวลา T ที่เข้าใกล้ ∞ คือเวลาทั้งหมดแต่ถ้าเป็นสัญญาณรายคาบจะเป็นการเฉลี่ยในหนึ่งคาบ

$$\langle v(t) \rangle = \frac{1}{T_0} \int_{t_1}^{t_1+T_0} v(t) dt = \frac{1}{T_0} \int_{T_0} v(t) dt \quad (2.37)$$

เป็นพื้นที่ใต้กราฟระหว่างเวลา t_1 ใดๆ จนถึง $t_1 + T_0$ ถ้าให้ $v(t)$ เป็นแรงดันตกคร่อมความต้านทานตัวหนึ่งกำลังที่ใช้ไปในตัวต้านทานจะเป็น $P(t) = \frac{v^2(t)}{R}$ เมื่อให้ $R = 1$ เพื่อความสะดวก หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือเป็นกำลังนอร์มอลไลซ์จะได้กำลังเฉลี่ยเป็น

$$P \equiv \langle |v(t)|^2 \rangle = \frac{1}{T_0} \int_{T_0} |v(t)|^2 dt \quad (2.38)$$

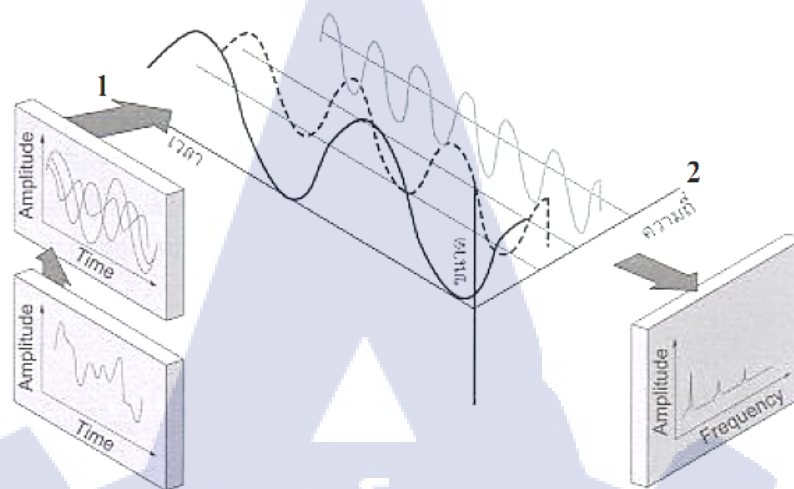
ค่ากำลัง P นี้จะเป็นค่าจริงและเป็นบวกเสมอ สัญญาณ $v(t)$ ที่สามารถหาค่า P ได้ และ $0 < P < \infty$ สัญญาณนี้จะนิยามว่าเป็น สัญญาณกำลังรายคาบ (Periodic Power Signal) ตัวอย่างการหาลงเฉลี่ยของสัญญาณรายคาบ $v(t) = A \cos(\omega_0 t + \phi)$ จะได้ค่าเฉลี่ยกำลังเป็น

$$P = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} A^2 \cos^2(\omega_0 t + \phi) dt = \frac{A^2}{2} \quad (2.39)$$

ถ้าใช้ความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.37 แทนค่า $v(t)$ ในสมการ 2.39 ก็สามารถเขียนสเปกตรัมออกมาได้ เรียกสเปกตรัมที่ได้นี้ว่า สเปกตรัมกำลังเฉลี่ย (Average Power Spectrum) หรือเรียกสั้นๆ ว่า สเปกตรัมกำลัง

กราฟสเปกตรัม

ในกราฟสเปกตรัมนั้นจะเป็นการแสดงผลการสั่นสะเทือนบนแกนของความถี่ การแสดงผลในลักษณะนี้หากนำไปใช้วิเคราะห์ความเสียหายในเครื่องจักรกลแล้ว ก็จะทำให้เห็นรายละเอียดของสัญญาณการสั่นสะเทือนได้มากกว่าการวิเคราะห์สัญญาณจากกราฟโดเมนเวลา เพื่อให้เห็นภาพชัดเจนถึงความสัมพันธ์ของการแปลงสัญญาณจากกราฟโดเมนเวลาไปสู่สัญญาณบนโดเมนความถี่ ดังนั้นการมองแบบ 3 มิติ ซึ่งสามารถที่จะอธิบายให้เข้าใจความหมายได้ง่ายและชัดเจนรูปที่ 2.44 แสดงความสัมพันธ์ของการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลากับ โดเมนความถี่ โดยในแกนนอนที่ 1 จะเป็นแกนของเวลาและแนวแกนนอนที่ 2 ซึ่งตั้งฉากกับแกนที่ 1 จะเป็นแกนของความถี่

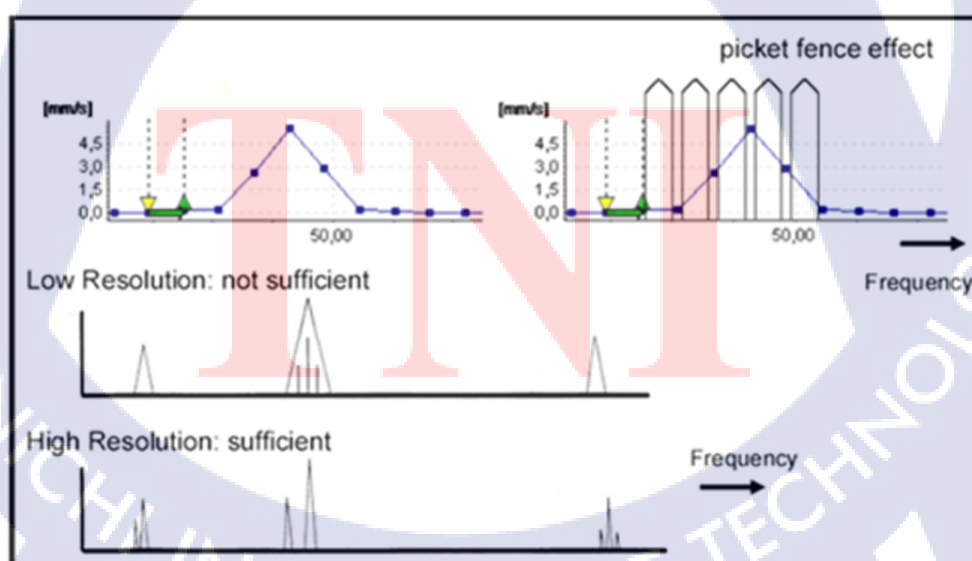


รูปที่ 2.44 ความสัมพันธ์ของการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลากับโดเมนความถี่

2.1.12 ความละเอียดที่ใช้แสดงผลของความถี่บนจอ (Resolution in the Spectrum)

[16]

ความละเอียดในกราฟแสดงผลนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าจำนวนเส้น (Line) ที่ได้มีการกำหนดไว้ในตอนแรกจากเงื่อนไขในการวัดอีกทั้งยังขึ้นอยู่กับความสามารถของเครื่องวัดนั้นๆ ด้วย ทั้งนี้ในการตั้งค่าให้มีความละเอียดในการแสดงผลที่สูงขึ้นก็จะต้องใช้ระยะเวลาในการวัดเพิ่มขึ้นเช่นกัน รูปที่ 2.45 แสดงความละเอียดที่ใช้แสดงผลของความถี่บนจอ



รูปที่ 2.45 ความละเอียดที่ใช้แสดงผลของความถี่บนจอ

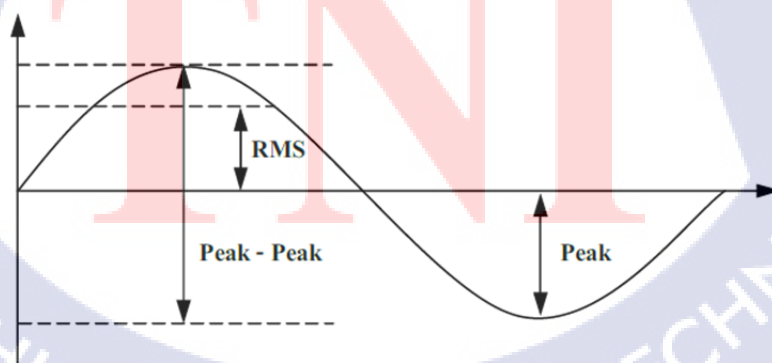
2.1.13 หน่วยการวัดขนาดการสั่นสะเทือน [17]

ในเรื่องของการสั่นสะเทือนไม่ว่าจะเป็นการขจัด ความเร็ว หรือความเร่ง สัญญาณทั้ง 3 แบบนี้จะอยู่ในรูปของคลื่นไซน์ ซึ่งจะมีทั้งค่าบวกและค่าลบโดยมีค่าแปรเปลี่ยนตามเวลา สำหรับการบอกขนาดของการสั่นสะเทือนจะบอกลักษณะการสั่นสะเทือนแบบรวม (Overall Vibration) ที่ใช้ทั่วไปประกอบด้วย

1. ค่ายอดสูงสุด (Peak) จะบอกค่าระดับสูงสุดของการสั่นสะเทือนที่เบี่ยงเบนไปจากระดับอ้างอิง (ศูนย์) โดยไม่ได้คำนึงถึงลักษณะการสั่นสะเทือนแบบอย่างอื่น ซึ่งค่านี้ส่วนมากจะใช้วัดการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการกระแทกในช่วงเวลาสั้นๆ เช่น การเคาะเพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติของวัตถุ (Bump Test) เป็นต้น
2. ค่ายอดสูงสุดถึงยอดสูงสุดด้านตรงข้าม (Peak to Peak) เป็นค่าขนาดการสั่นสะเทือนที่วัดจากจุดสูงสุดของคลื่นไซน์กับจุดต่ำสุดของคลื่นไซน์
3. ค่า RMS (Root Mean Square) เป็นค่าของขนาดการสั่นสะเทือนที่ได้จากการนำค่าที่วัดได้ในโดเมนเวลา (Time Domain) ที่เกิดขึ้นในช่วงหนึ่งๆ มายกกำลังสอง แล้วทำการเฉลี่ยตลอดคาบและถอดรากที่สองออกมา ดังสมการที่ 2.37

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{1}{t} \int_0^t x^2(t) dt} \quad (2.40)$$

ความสัมพันธ์ของขนาดสัญญาณการสั่นสะเทือนทั้ง 3 แบบรูปที่ 2.46 แสดงความสัมพันธ์ของหน่วยสัญญาณการสั่นสะเทือน ซึ่งใช้ในกรณีสัญญาณการสั่นสะเทือนเป็นแบบฮาร์มอนิก รูปไซน์ของความถี่ได้ตามทฤษฎีของฟูรีเยร์ (Fourier)



รูปที่ 2.46 ความสัมพันธ์ของหน่วยสัญญาณการสั่นสะเทือน

2.1.14 การวิเคราะห์สัญญาณ [18]

สัญญาณที่บันทึกจากหัววัดต่างๆ เช่น หัววัดการสั่นสะเทือน ไมโครโฟน เทอร์โมคัปเปิล เป็นต้น จะอยู่ในรูปของสัญญาณบนโดเมนเวลา ซึ่งมีแกนตั้งเป็นแอมพลิจูดของสัญญาณและแกนนอนเป็นเวลาซึ่งลักษณะของสัญญาณที่เก็บได้จะขึ้นอยู่กับสภาพและเงื่อนไขในการกลึงการประมวลผลสัญญาณมีหลายวิธี เป็นการปรับปรุงสัญญาณให้ดีขึ้น บางวิธีอาจเป็นการตัดส่วนของสัญญาณที่มีลักษณะเด่นออกมา และบางวิธีอาจจะเป็นการวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อเป็นตัวแทนของข้อมูลหรือสัญญาณออกมา สัญญาณการสั่นสะเทือนซึ่งเป็นสัญญาณบนโดเมนเวลาเป็นที่นิยมใช้กันแพร่หลายเพื่อตรวจสอบการสั่นสะเทือนของมีดกลึง การวิเคราะห์สัญญาณมีหลายเทคนิคการวิเคราะห์บนโดเมนเวลาซึ่งเป็นการวิเคราะห์โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติ เช่น ค่าสูงสุด ค่าต่ำ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าความเบ้ และค่าความโด่ง เป็นเป็นส่วนเทคนิคการวิเคราะห์บนโดเมนความถี่จะใช้เทคนิคการแปลงฟูเรียร์ เป็นต้น

1. การวิเคราะห์บนโดเมนเวลา

สัญญาณที่ตรวจวัดได้จากหัววัดต่างๆ จะเป็นสัญญาณบนโดเมนเวลา คือสัญญาณที่แสดงอยู่ในรูปของแอมพลิจูดของสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของข้อมูล สัญญาณบนโดเมนเวลาจะฟังก์ชันของเวลา คือ $x(t)$ โดยที่ t คือ เวลาใดๆ ในหน่วยวินาที เป็นต้น

พารามิเตอร์ที่นิยมใช้สำหรับวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลาได้แก่ ค่าเฉลี่ย รากกำลังสองเฉลี่ย ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าแปรปรวน ค่าความเบ้ ค่าความโด่ง และค่า Crest factor เป็นต้น โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ค่าเฉลี่ย (Mean, $\bar{x}$) เป็นค่าเฉลี่ยของสัญญาณที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาหนึ่งๆ ซึ่งคำนวณจากผลบวกของข้อมูลและหารด้วยจำนวนข้อมูลทั้งหมด

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (2.41)$$

เมื่อ N คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

x_i คือ ข้อมูลลำดับ i

โดยทั่วไปสัญญาณมีทั้งค่าเป็นบวกและเป็นลบเมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งสมดุลจะทำให้ค่าเฉลี่ยมีค่าประมาณเป็นศูนย์ ค่าเฉลี่ยในกรณีนี้จะคำนวณโดยการหาค่าสัมบูรณ์ของสัญญาณก่อนแล้วจึงคำนวณหาค่าเฉลี่ยของสัญญาณ

ค่ารากกำลังสอง Root Mean Square (*RMS*) เป็นค่ารากของเฉลี่ยผลรวมสัญญาณที่วัดได้ในระยะเวลาที่เกิดขึ้นในช่วงหนึ่งๆ

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N x_i^2}{N}} \quad (2.42)$$

ค่าแอมพลิจูดสูงสุด หรือค่าสูงสุดของสัญญาณ (*Peak* หรือ *Max*) เป็นการบอกค่าระดับสูงสุดของสัญญาณที่เบี่ยงเบนจากระดับศูนย์

$$Peak = \max(|x(t)|) \quad (2.43)$$

ค่าแอมพลิจูดต่ำสุด หรือค่าต่ำสุดของสัญญาณ (*Min*) เป็นการบอกค่าระดับต่ำสุดของสัญญาณที่เบี่ยงเบนไปจากระดับศูนย์

$$Min = \min(|x(t)|) \quad (2.44)$$

ค่า Peak to Peak เป็นการบอกค่าขนาดของสัญญาณที่วัดได้จากจุดสูงสุดทางด้านบวกกับจุดต่ำสุดทางด้านลบ

$$V_{pp} = \max(x(f)) - \min(x(t)) \quad (2.45)$$

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation, σ) คือ ค่าการกระจายตัว ซึ่งเป็นค่าที่เกิดจากผลรวมยกกำลังสองของผลต่างของข้อมูลแต่ละตัวกับข้อมูลเฉลี่ยแล้วหารด้วยจำนวนข้อมูลทั้งหมด

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [x_i - \bar{x}]^2} \quad (2.46)$$

เมื่อ N คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

x_i คือ ข้อมูลลำดับที่ i

$\bar{x}$ คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูล

ค่าความแปรปรวน (Variance) คือ ค่าการกระจาย ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของผลรวมทั้งหมดของข้อมูลเบี่ยงเบนยกกำลังสอง

$$Var = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [x_i - \bar{x}]^2 \quad (2.47)$$

ค่าความเบ้ (Skewness) คือ ลักษณะของเส้นโค้งของการแจกแจงข้อมูล ที่ไม่อยู่ในรูปสมมาตรถ้าลักษณะของเส้นโค้งลึบไปทางข้อมูลที่มีค่าสูงเรียกว่าโค้งเบ้ไปทางบวก (Positively Skewness) แต่ถ้าเส้นโค้งลึบไปทางข้อมูลที่มีค่าต่ำเรียกว่า โค้งเบ้ทางลบ (Negatively Skewness)

$$Skewness = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \right]^3 \quad (2.48)$$

ค่าความโด่ง (Kurtosis) คือลักษณะของเส้นโค้งของการแจกแจงความถี่ว่าสูงโด่งหรือเตี้ยตามแนวตั้งลักษณะความโด่งมี 3 ประเภทคือ

1. โด่งสูงสูงมากผิดปกติเรียกว่า Leptokurtic
2. โด่งปานกลางเรียกว่า Mesokurtic
3. โด่งน้อยกว่าปกติเรียกว่า Platykurtic

$$Kurtosis = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \right]^4 - 3 \quad (2.49)$$

Crest Factor คืออัตราส่วนแอมพลิจูดสูงสุดที่เกิดขึ้นในช่วงหนึ่งๆหารด้วยค่า *RMS* ของสัญญาณสามารถระบุช่วงที่เริ่มเกิดความเสียหายของชิ้นส่วนอุปกรณ์ เช่น แบตเตอรี่

$$Crest Factor = \frac{Peak}{RMS} \quad (2.50)$$

ค่าพลังงานของสัญญาณ (Signal Energy, *E*) คือ การหาผลรวมกำลังสองของ *x(t)* ตลอดช่วงเวลา *T*

$$E = \int_0^T x(t)^2 df \quad (2.51)$$

วิธีวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลาด้วยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังกล่าวข้างต้นสามารถใช้ตรวจสอบสถานะเครื่องจักรรวมถึงพัดลมอุตสาหกรรมด้วย พารามิเตอร์ที่ใช้ทำนานอาจมีมากกว่า 1 ชนิดขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยเช่น ชนิดของสัญญาณที่บันทึก ความซับซ้อนของสัญญาณ ตำแหน่งที่วัดสัญญาณ ความซับซ้อนของโครงสร้างของเครื่องจักร เป็นต้น ซึ่งบางครั้งพารามิเตอร์ต่างๆ เหล่านี้อาจไม่เหมาะสมที่จะใช้ทำนายสถานะของเครื่องจักร

2.1.15 การวิเคราะห์บนโดเมนความถี่

การแปลงฟูเรียร์ (Fourier Transforms) เป็นเครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์สเปกตรัมของฟังก์ชันที่มีความต่อเนื่องด้านความถี่ การแปลงฟูเรียร์ของลูกคลื่นคือ การแยกลูกคลื่นอยู่ในภาพผลรวมของลูกคลื่นไซน์ที่มีความถี่ต่างๆ ดังสมการที่ 2.52

$$x(t) \rightarrow x(t_k) \equiv x(k) = x_k \rightarrow X_n \equiv \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{-2\pi i \frac{nk}{N}} \quad (2.52)$$

สัญญาณบนโดเมนความถี่ที่ได้จากการแปลงสัญญาณโดเมนเวลาเป็นโดเมนความถี่โดยสมการของการแปลงฟูเรียร์ ดังสมการที่ 2.52 และสามารถแปลงกลับมาให้มาอยู่ในรูปของโดเมนเวลาได้ ดังสมการที่ 2.53

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(f) e^{i2\pi ft} dt \rightarrow X_k = \sum_{n=0}^{N-1} X_n e^{2\pi i \frac{kn}{N}} \quad (2.53)$$

จากสมการที่ 2.52 และ 2.53 f คือความถี่ในหน่วยเฮิรตซ์ (Hz) รูปแบบของการแปลงสัญญาณกลับจาก $x(f)$ มาเป็น $x(t)$ นี้เรียกว่า Inverse Fourier Transform และจากสมการทั้งสองสมมติว่า $x(t)$ มีคาบของสัญญาณเป็นอนันต์

การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform, FFT) คือ วิธีการแปลงสัญญาณที่อยู่ในโดเมนเวลาให้อยู่ในโดเมนความถี่อย่างรวดเร็ว เนื่องจากวิธีการแปลงฟูเรียร์แบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Fourier Transform) ใช้เวลาในการคำนวณมาก คือ ต้องทำการบวกจำนวนเชิงซ้อนทั้งหมด N ครั้งและคูณจำนวนเชิงซ้อนทั้งหมด N ครั้งรวมแล้วต้องทำการคำนวณทั้งหมด N^2 ครั้งดังนั้นวิธีการแปลงฟูเรียร์เร็วได้พัฒนาจากการแปลงฟูเรียร์แบบไม่ต่อเนื่อง แต่มีการคำนวณเพียง $N \log_2 N$ ครั้ง เท่านั้น โดยมีหลักการดังรูปที่ 2.47 หลักการทำงานของ Fast Fourier Transform



รูปที่ 2.47 หลักการทำงานของ Fast Fourier Transform

2.1.16 การแปลงสเปกตรัม (Spectrum)

การแปลงสเปกตรัม (Spectrum) ของลอการิทึมของเพาเวอร์สเปกตรัม (Power spectrum) เพื่อแสดงจุดเด่นที่เกิดขึ้นในสเปกตรัม ซึ่งมีลักษณะเหมือนกับสเปกตรัม ที่ใช้แสดงจุดเด่นสัญญาณที่เกิดขึ้นในโดเมนเวลา การประมวลผลสัญญาณนี้เรียกว่า การวิเคราะห์เซปส์ตรัม (Cepstrum analysis) เนื่องจากสัญญาณโดเมนความถี่หรือเซปส์ตรัมจะแสดงลักษณะความเป็นคาบของยอดสัญญาณบนโดเมนความถี่ โดยยอดสเปกตรัมที่มีระยะห่างความถี่เท่ากับ RPM จะปรากฏเป็นยอดสัญญาณที่มีความถี่เท่ากับ $1/RPM$ บนโดเมนความถี่ การวิเคราะห์เซปส์ตรัม จะใช้การวิเคราะห์ชุดแถบความถี่ข้างซึ่งปกติจะมีแอมพลิจูดต่ำและยอดสัญญาณมีจำนวนมาก นอกจากนี้สัญญาณจะมีแถบความถี่มากกว่าหนึ่งชุดซึ่งแต่ละชุดจะมีระยะความถี่ที่แตกต่างกัน ดังนั้นการวิเคราะห์แถบความถี่ข้างบนโดเมนความถี่จึงมีความยุ่งยากและเสียเวลามาก การใช้การวิเคราะห์เซปส์ตรัมสามารถช่วยประหยัดเวลาและลดความยุ่งยากดังกล่าวข้างต้น เซปส์ตรัมมีจุดยอดที่ตรงกับระยะห่างฮาร์โมนิกและแถบความถี่ด้านข้างเซปส์ตรัมมีด้วยกัน 2 แบบได้แก่ เพาเวอร์เซปส์ตรัม และเซปส์ตรัมเชิงซ้อนเป็นองค์ประกอบเฟส เช่นเดียวกันกับลอการิทึมแอมพลิจูดแต่ละความถี่ในสเปกตรัม

สมการของเพาเวอร์สเปกตรัม แสดงดังสมการที่ 2.54

$$C_p(\pi) = \mathfrak{I}^{-1}\{\log F_{xx}(f)\} \quad (2.54)$$

สมการของเซปส์ตรัมเชิงซ้อน แสดงดังสมการที่ 2.55

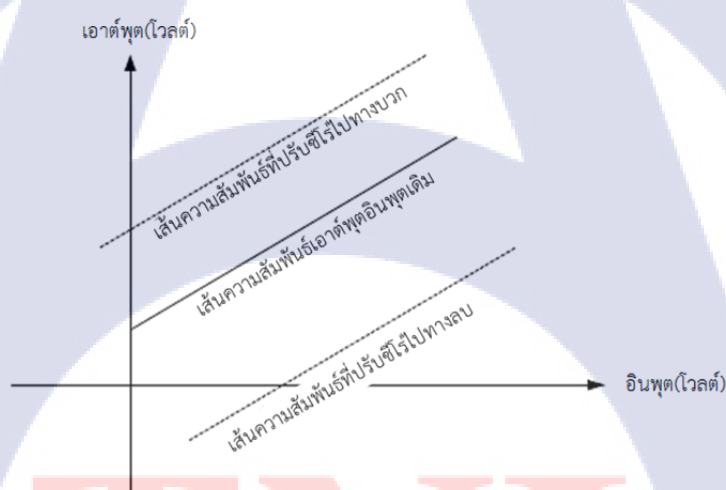
$$C_c(\tau) = \mathfrak{I}^{-1}\{\log F(f)\} \quad (2.55)$$

เมื่อ $F_{xx}(f)$ คือ เพาเวอร์สเปกตรัม
 $f(f)$ คือ สเปกตรัมเชิงซ้อนหรือการแปลงฟูเรียร์
 $\mathfrak{F}^{-1}$ คือ การแปลงฟูเรียร์ย้อนกลับ

$$F(f) = \mathfrak{F}\{f(t)\} = A(f) \cdot e^{j\phi(f)} \quad (2.56)$$

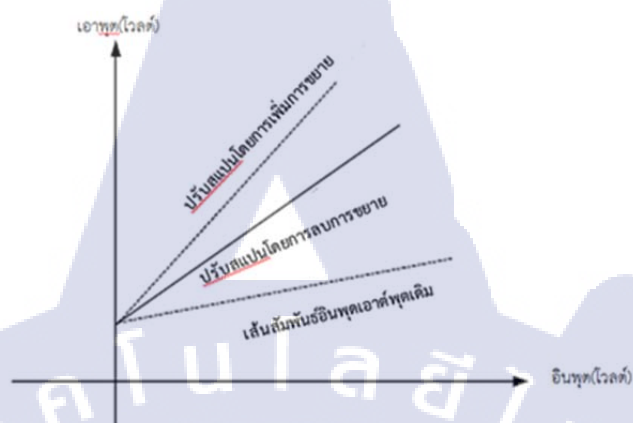
2.1.17 วงจรปรับซีโร่ และสแปน (Zero Span) [19]

วงจรปรับซีโร่และสแปนเป็นวงจรปรับสภาพสัญญาณ ที่ใช้ในการแปลงช่วงของสัญญาณแรงดันหนึ่งไปเป็นช่วงแรงดันที่ต้องการหรือเหมาะกับการใช้งาน ซึ่งไม่ได้เป็นการขยายขนาดเพียงอย่างเดียวการปรับค่าของวงจรจะมีปรับคุณสมบัติของวงจรมี 2 อย่างด้วยกันคือการปรับซีโร่ และการปรับสแปน



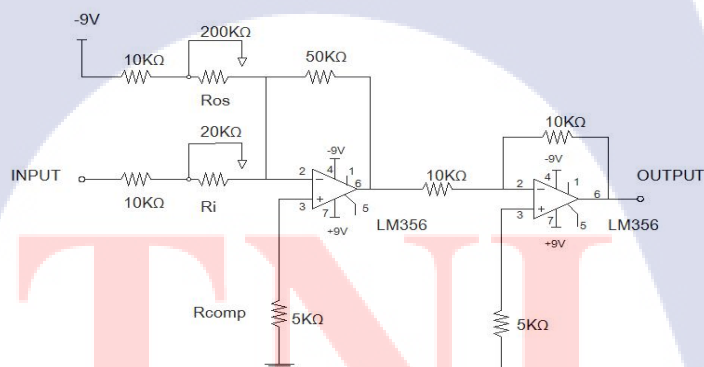
รูปที่ 2.48 ผลการปรับค่าซีโร่ของวงจรซีโร่สแปน

การปรับค่าซีโร ก็คือการการปรับจุดตัดแกนแนวตั้งของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตและอินพุตของวงจรซีโรสแปน ดังรูปที่ 2.48



รูปที่ 2.49 ผลการปรับค่าสแปนของวงจรซีโรสแปน

การปรับสแปน ก็คือการปรับค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุต/อินพุตวงจรซีโรสแปน โดยที่ค่าของจุดตัดแกนแนวตั้งนั้นไม่ได้เปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 2.49



รูปที่ 2.50 วงจรปรับซีโรและสแปน

วงจรปรับซีโรและสแปนดังรูปที่ 2.50 แท้จริงแล้วก็คือวงจรซัมมิงแอมป์ ที่นำมาต่อกับวงจรอินเวอร์ตติ้งแอมป์นั่นเอง โดยวงจรมีสมการแรงดันเอาต์พุตดังสมการที่ 2.57

$$V_{out} = \frac{R_f}{R_{os}} V_{in} + \frac{R_f}{R_i} V_{cc} \quad (2.57)$$

2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันมีหลายงานวิจัยที่พัฒนาระบบการวิเคราะห์การสั่นหรือของมีดกลึงบนเครื่องกลึง CNC เพื่อที่จะลดปัญหาในเรื่องสภาวะการทำงานที่ไม่เหมาะสม ซึ่งจะส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงาน และเป็นการเพิ่มต้นทุนในการผลิต

ประดิษฐ์ หมู่มืองสอง และสุชญาณ หรรษสุข [20] การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของเครื่องจักร กล่าวว่า ความเสียหายที่เกิดขึ้นในเครื่องจักรกลเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นแล้วจะเป็นผลให้เครื่องจักรมีอายุสั้นลง ซึ่งความเสียหายที่พบในเครื่องจักรโดยทั่วไป เช่น การไม่สมดุลของเครื่องจักร (Unbalance) การเอียงแนวแกนเครื่องจักร (Misalignment) การหลวมคลอนทางกล การโค้งของเพลลา การเสียดสีกันของชิ้นงาน การเอียงศูนย์กลาง (Eccentric) การชำรุดของเฟืองเกียร์ เป็นต้น ในการวิเคราะห์ความเสียหายโดยมุ่งเน้นการวิเคราะห์ในรูปแบบของกราฟโดเมนความถี่ (Frequency Analysis) หรือการแสดงผลในรูปแบบกราฟสเปกตรัม (Spectrum Plot) โดยแกนตั้งจะเป็นขนาดของการสั่นสะเทือน (Amplitude) โดยจะใช้หน่วยวัดแบบระยะทาง ความเร็ว หรือความเร่ง และแกนนอนจะแสดงความถี่ (Frequency) ของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากเครื่องจักรนั้น ในการวิเคราะห์แบบกราฟสเปกตรัมนี้ สามารถแปลความหมายโดยแกนตั้งจะบ่งบอกถึงความรุนแรงของการสั่นสะเทือนของเครื่องจักร ส่วนแกนนอนจะบอกลักษณะปัญหาหรือแหล่งที่มาของการสั่นสะเทือนนั้นว่าอยู่ตรงตำแหน่งไหนของเครื่องจักร

พรชัย นิเวศน์รังสรรค์ และคณะ [21] ได้เสนอแนวคิดในการตรวจสอบสภาวะของมีดกลึงด้วยสัญญาณการสั่นสะเทือนโดยวิเคราะห์ในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ในการวิเคราะห์ ในโดเมนเวลาจะใช้พารามิเตอร์ทางสถิติและโดเมนความถี่จะใช้การแปลงฟูเรียร์แบบเร็วมาช่วยในการวิเคราะห์ ผลพารามิเตอร์ทางสถิติที่ใช้ คือ ค่าเฉลี่ย ความเบ้ ค่าความโด่ง ค่าความแปรปรวนและ Crest Factor ผลที่ได้คือค่าเฉลี่ยและค่าแปรปรวนสามารถทำนายสภาวะของมีดได้ดังนั้นจึงต้องการที่ใช้พารามิเตอร์ทางสถิติในการวิเคราะห์ เพื่อที่จะใช้ทำนายสภาวะของมีดกลึงให้ถูกต้องและชัดเจนมากขึ้นโดยอาศัยพารามิเตอร์ทางสถิติอื่นๆ และการวิเคราะห์โดเมนความถี่จะใช้ด้วยการเปรียบเทียบค่าแอมพลิจูดสูงสุดหรือพลังงานในช่วงความถี่ 2000 – 4000 Hz คาดว่าจะนำมาใช้ทำนายสภาวะของมีดตัดได้

D. M. D'Addona and R. Teti. [22] ได้วิจัยการตรวจสอบพัลคมอัตโนมัติในห่องปฏิบัติการด้วยสัญญาณการสั่นสะเทือนโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์บนโดเมนเวลาเพื่อทำนายสภาวะของพัลคมที่เงื่อนไขต่างๆ การวิเคราะห์ด้วยพารามิเตอร์บนโดเมนเวลาพบว่าการใช้เฉพาะค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานหรือค่าความเบ้ไม่สามารถทำนายสภาวะของพัลคมได้ทุกกรณีแต่การใช้พารามิเตอร์ทั้งสองรวมกันสามารถใช้จำแนกกลุ่มข้อมูลและทำนายสภาวะของพัลคมได้ดี

S. K. Al-Arbi [23] ได้เสนอวิธีการตรวจสอบการทำงานของชุดเกียร์จากการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน โดยวิเคราะห์ในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่และพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลง คือ โทลด์และความเร็ว จากการทดลองสรุปได้ว่าการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องสามารถใช้ในการทำนายสภาพการทำงานของชุดเกียร์ได้

สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ และชาญณรงค์ รุ่งเรือง [24] ได้พัฒนาระบบการตรวจสอบการสึกหรอของมีดกลึงที่เกิดขึ้นในกระบวนการกลึงซีเอ็นซีสำหรับเหล็กกล้าคาร์บอน (S45C) โดยการใช้เซนเซอร์ร่วมกันประกอบด้วยเซนเซอร์แรงตึงเซนเซอร์เสียงและเซนเซอร์อะคูสติกรีสมิชั่นข้อมูลของสัญญาณจากแต่ละเซนเซอร์ถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ของสัญญาณที่เกิดขึ้นกับการสึกหรอของมีดกลึงดังนั้นสัญญาณที่ได้ถูกประมวลผลผ่านโครงข่ายประสาทเทียมชนิดที่มีการแพร่ค่าย้อนกลับจากผลการทดลองพบว่าระบบการตรวจติดตามภายในกระบวนการที่ได้เสนอและพัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้สามารถประมาณค่าระดับการสึกหรอของมีดกลึงได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยมีค่าความถูกต้องสูงมากกว่า 90 เปอร์เซนต์

J. Kopac and S. Sali [25] ได้เสนอวิธีการทำนายการสึกหรอโดยใช้ความดันเสียงเป็นตัวกำหนดสถานะของมีดกลึงการทดลองได้เปลี่ยนค่า Cutting Speed, Feed Rate และขนาดของ Flank Wear และวัดด้วย Condenser Microphone โดยวิเคราะห์ในเทอมของความถี่ตั้งแต่ 0 ถึง 22 kHz. จากผลการทดลองพบว่าความดันเสียงสามารถใช้บ่งบอกสถานะของมีดกลึงได้จริงแต่จะใช้ได้เพียงบางกรณี เท่านั้น

วินัย เวชวิทยาลัง [26] ได้อธิบายการวัดการสั่นสะเทือนว่าเป็นวิธีการที่ใช้ในการตรวจสอบการทำงานของเครื่องจักร โดยการวัดการสั่นสะเทือนว่าเป็นวิวัฒนาการและใช้กันมาก ในปัจจุบันเพราะสามารถวิเคราะห์สาเหตุความผิดปกติของเครื่องจักรได้ครอบคลุมเกือบทุกปัญหา ทั้งการติดตั้งประกอบ การสึกหรอ การหลวมคลาย การยึดไม่แน่น แท่นไม่แข็งแรง การเสียหายของฟันเกียร์ ตลับลูกปืน โดยผลที่ได้จากการวิเคราะห์สามารถนำไปแก้ไขปัญหา และข้อมูลที่ได้จากการวัดการสั่นสะเทือนนั้น จะช่วยในการวางแผนการบำรุงรักษา

นภัสทวิห์ อัครศรีธนก [27] ได้นำเสนอการตรวจสอบการสึกหรอของมีดกลึงบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีด้วยสัญญาณการสั่นสะเทือนในโดเมนเวลา โดยค่าพารามิเตอร์พื้นฐานทางสถิติ ที่สามารถแยกสถานะของมีดกลึงในเครื่องกลึงซีเอ็นซีด้วยสัญญาณการสั่นสะเทือนในโดเมนเวลา จากผลการทดลองพบว่าค่าพารามิเตอร์พื้นฐานทางสถิติ 2 ตัว คือ ค่าเฉลี่ย และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน สามารถแยกแยะสถานะมีดกลึงสึกได้ชัดเจนกว่าค่าพารามิเตอร์พื้นฐานทางสถิติอื่นๆ

S. Tangjitsitharoen [28] ได้เสนอวิธีการตรวจสอบการสึกหรอด้วยภาพ ร่วมกับ Neural Networks ซึ่งพยายามที่จะแยกแยะภาพมีดปกติ และมีดสึกหรอ ยังต้องมีการปรับปรุงอุปกรณ์ให้สามารถจับภาพได้แม่นยำต่อไป

บทที่ 3

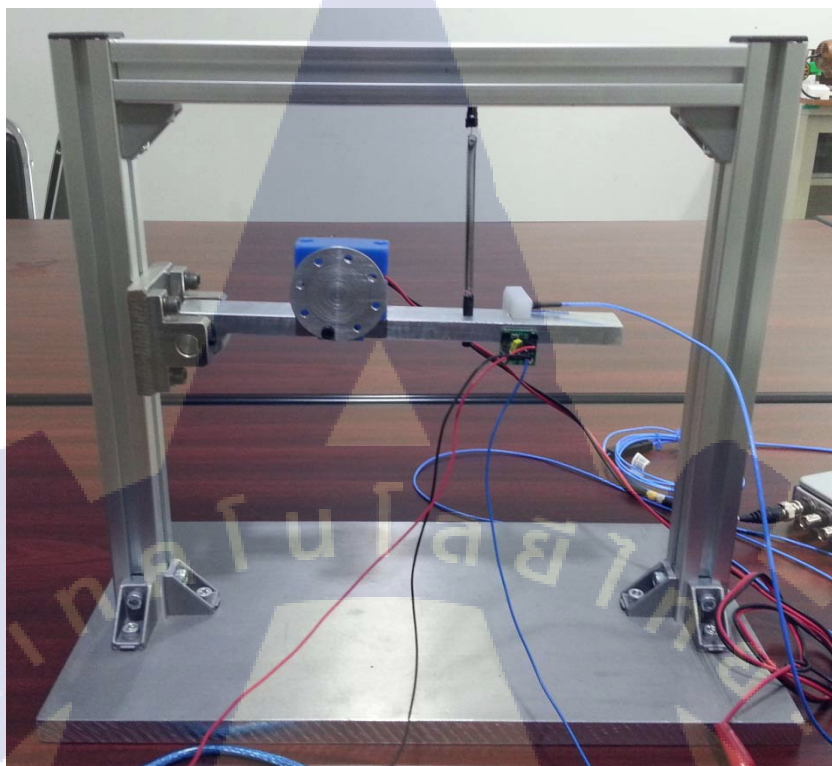
วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยในครั้งนี้มีด้วยกัน 2 การทดลอง เนื่องจากการทดลองสร้างชุดทดสอบที่มีราคาถูกครั้งที่ 1 ไม่ประสบความสำเร็จเป็นเพราะ Resolution ของ Arduino มีเพียง 10 bits ทำให้มีผลต่อความผิดพลาดในการวิเคราะห์ ในการทดลองที่ 2 จึงทำการเปลี่ยนไมโครคอนโทรเลอร์มาเป็น DAQ Card ซึ่งมี Resolution 14 bits ส่งผลให้การวิเคราะห์สัญญาณดีขึ้น

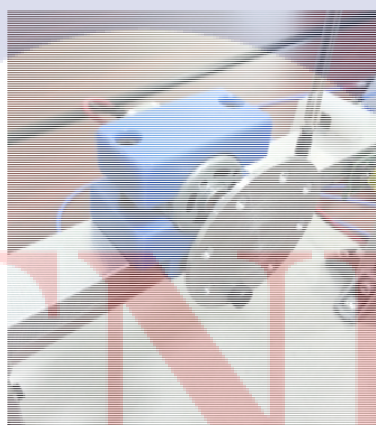
3.1 กระบวนการวิจัย

3.1.1 กระบวนการวิจัยที่ 1

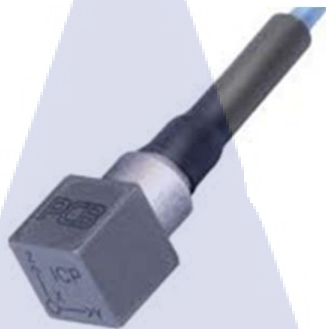
ในงานวิจัยที่ 1 นี้ได้สร้างชุดทดสอบเพื่อสร้างแรงสั่นสะเทือน เพื่อใช้ในการสอบเทียบเซ็นเซอร์ Accelerometer ดังรูปที่ 3.1 ชุดทดสอบทำการสร้างการสั่นสะเทือนจากการใช้ DC มอเตอร์หมุนงานที่มีมวลไม่สมดุล ดังรูปที่ 3.2 การทดลองนี้ได้ปรับความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ด้วยค่าความต่างศักย์ของ Power Supply ของมอเตอร์ เพื่อนำมาวิเคราะห์หาการเปลี่ยนแปลงของแรงสั่นสะเทือนโดยวิเคราะห์จากสัญญาณการสั่นสะเทือนที่จับได้จาก DC มอเตอร์หมุนงานที่มีมวลไม่สมดุล วิธีการทดลองนี้จะเริ่มจากปรับความเร็วในการหมุนของมอเตอร์โดยปรับ Power Supply ไปที่ 2V, 3V, และ 4V. สำหรับชุดวัดสัญญาณด้วย Arduino ใช้ความเร็วในการอ่านสัญญาณ 2000, 4000 และ 8000 Hz โดยเก็บข้อมูลชุดละ 5000 ข้อมูล ส่วนชุดเซ็นเซอร์อ้างอิงของ National Instrument ใช้ความเร็วในการอ่านสัญญาณ 51.2 kHz และเก็บข้อมูลชุดละ 10000 ข้อมูล ข้อมูลจะถูกบันทึก 3 ครั้งในและใช้โปรแกรม LabVIEW ในการเก็บสัญญาณการสั่นสะเทือน และวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ ในการทดลองครั้งนี้จะทดลองใช้เซ็นเซอร์ที่จับสัญญาณสั่นสะเทือน PCB เป็นเซ็นเซอร์มาตรฐานที่ใช้ในการอ้างอิง ดังรูปที่ 3.3 พร้อมกับเซ็นเซอร์จับสัญญาณสั่นสะเทือน ADXL ที่มี ราคาถูก ดังรูปที่ 3.4 โดยทำการติดตั้งระยะที่เดียวกัน ดังรูปที่ 3.5 และจับสัญญาณการสั่นสะเทือนออกมาจาก DC มอเตอร์หมุนงานที่มีมวลไม่สมดุลพร้อมกัน เพื่อทดลองว่าเซ็นเซอร์จับสัญญาณสั่นสะเทือน ADXL ที่มีราคาถูกกว่าเซ็นเซอร์จับสัญญาณสั่นสะเทือน PCB ที่ได้มาตรฐานและมีราคาแพงกว่านั้นสามารถใช้งานได้เหมือนกันหรือไม่



รูปที่ 3.1 ชุดทดสอบเพื่อสร้างแรงสั่นสะเทือน เพื่อใช้ในการสอบเทียบเซ็นเซอร์ Accelerometer



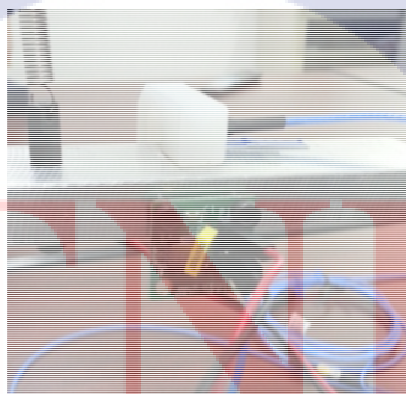
รูปที่ 3.2 DC มอเตอร์และจานหมุนที่มีมวลไม่สมดุล



รูปที่ 3.3 เซ็นเซอร์จับสัญญาณสั่นสะเทือน PCB



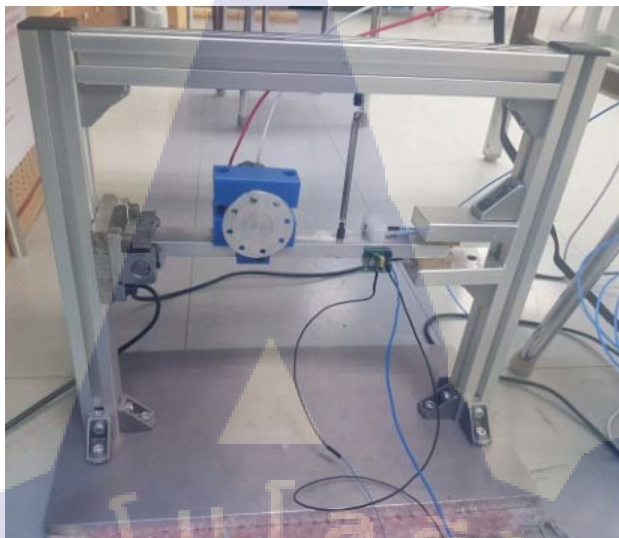
รูปที่ 3.4 เซ็นเซอร์จับสัญญาณสั่นสะเทือน ADXL



รูปที่ 3.5 ตำแหน่งติดตั้งเซ็นเซอร์เพื่อวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน ณ ตำแหน่งเดียวกันบนคาน

3.1.2 กระบวนการวิจัยที่ 2

ในงานวิจัยที่ 2 นี้ได้ทำการปรับแต่งดัดแปลงชุดทดสอบเพื่อสร้างแรงสั่นสะเทือนเพื่อใช้ในการสอบเทียบเซ็นเซอร์ Accelerometer ดังรูปที่ 3.6 ในครั้งนี้ได้ทำการเปลี่ยนมอเตอร์ให้มีความเร็วรอบมากยิ่งขึ้น และมีการเปลี่ยนมวลที่งานไม่สมดุลให้มีน้ำหนักเบาขึ้น มีการเพิ่มชุดประกอบการสั่นของคาน เพื่อรองรับการสั่นสะเทือนที่มากขึ้น การทดลองนี้ได้ปรับความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ด้วยค่าความต่างศักย์ของ Power Supply ของมอเตอร์ เพื่อนำมาวิเคราะห์หาการเปลี่ยนแปลงของแรงสั่นสะเทือนโดยวิเคราะห์จากสัญญาณการสั่นสะเทือนที่จับได้จาก DC มอเตอร์หมุนงานที่มีมวลไม่สมดุล วิธีการทดลองนี้จะเริ่มจากปรับความเร็วในการหมุนของมอเตอร์โดยปรับ DC Step Down Converter ไปที่ความถี่ 97, 120, 127, 134 และ 159 Hz สำหรับชุดวัดสัญญาณด้วย DAQ Card ใช้ความเร็วในการอ่านสัญญาณ 10000 Hz โดยเก็บข้อมูลชุดละ 10000 ข้อมูล ส่วนชุดเซ็นเซอร์อ้างอิงของ National Instrument ใช้ความเร็วในการอ่านสัญญาณ 51.2 kHz และเก็บข้อมูลชุดละ 10000 ข้อมูล ข้อมูลจะถูกบันทึก 3 ครั้งในและใช้โปรแกรม LabVIEW ในการเก็บสัญญาณการสั่นสะเทือน และวิเคราะห์สัญญาณ การสั่นสะเทือนในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ ในการทดลองครั้งนี้จะทดลองใช้เซ็นเซอร์ที่จับสัญญาณสั่นสะเทือน PCB เป็นเซ็นเซอร์มาตรฐานที่ใช้ในการอ้างอิง พร้อมกับเซ็นเซอร์จับสัญญาณสั่นสะเทือน ADXL ที่มีราคาถูก โดยทำการติดตั้งระยะที่เดียวกัน และจับสัญญาณการสั่นสะเทือนออกมาจาก DC มอเตอร์หมุนงานที่มีมวลไม่สมดุลพร้อมกัน เพื่อทดลองว่าเซ็นเซอร์จับสัญญาณสั่นสะเทือน ADXL ที่มีราคาถูกกว่าเซ็นเซอร์จับสัญญาณสั่นสะเทือน PCB ที่ได้มาตรฐานและมีราคาแพงกว่านั้นสามารถใช้งานได้เหมือนกันหรือไม่ และทำการยืนยันผลการทดลองอีกครั้งด้วยอุปกรณ์วัดความเร็วรอบของมอเตอร์ (HIOKI 3403) ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.6 ชุดทดสอบเพื่อสร้างแรงสั่นสะเทือนที่มีการปรับแต่ง

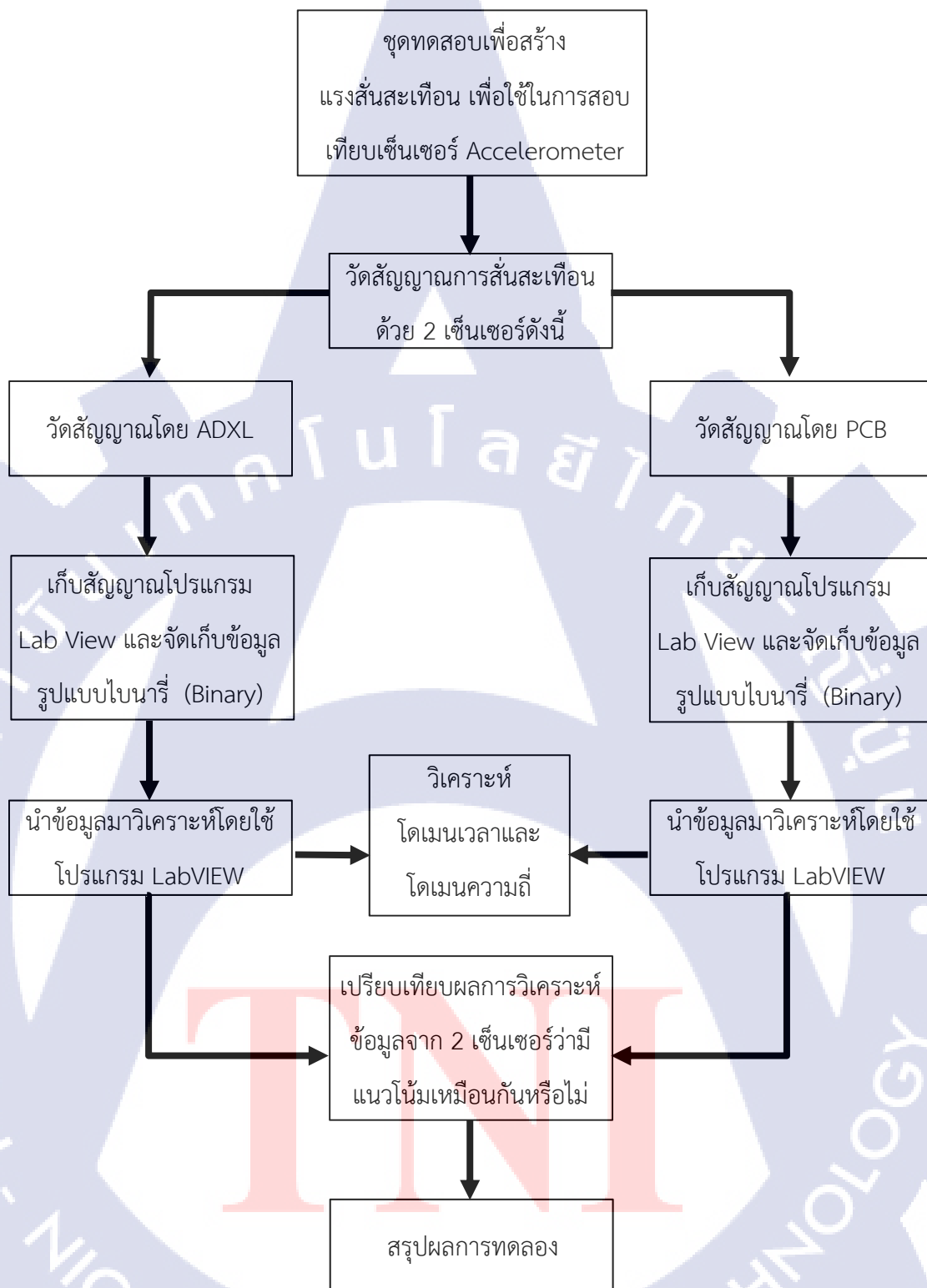


รูปที่ 3.7 อุปกรณ์วัดความเร็วรอบของมอเตอร์ (HIOKI 3403)

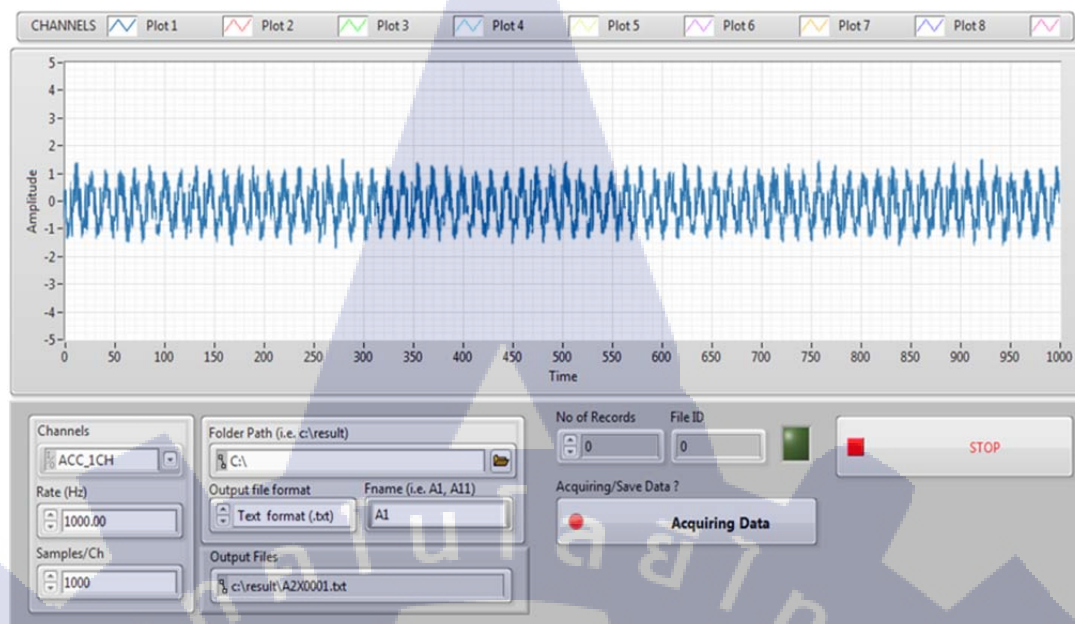
3.2 แผนการทดลอง

3.2.1 แผนการทดลองที่ 1

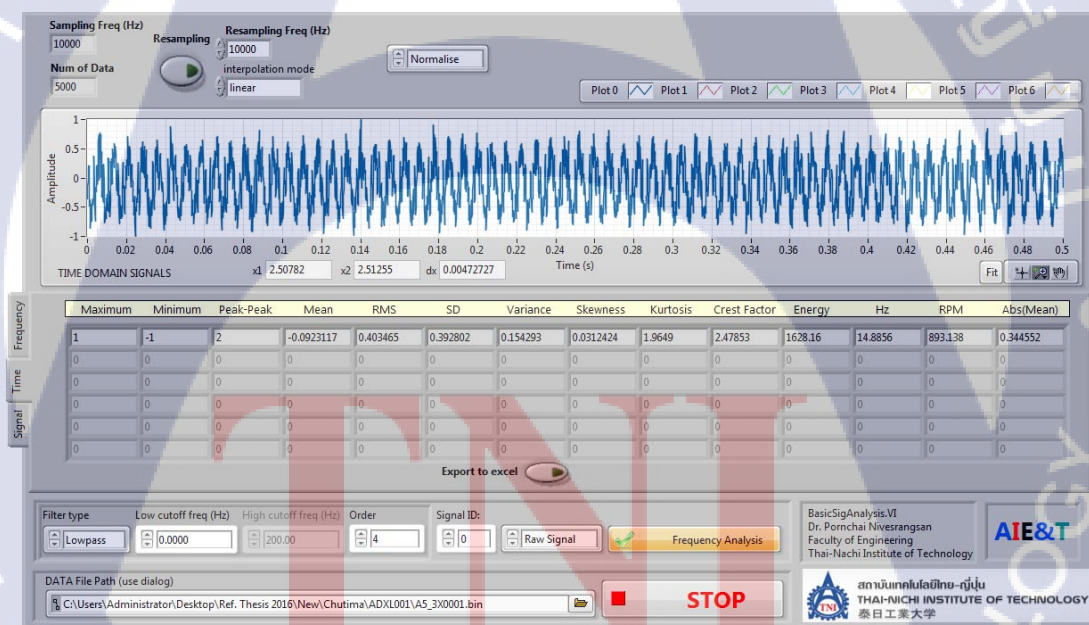
โดยมีผังการทำงานวิจัยดังรูปที่ 3.8 จัดเก็บสัญญาณโดยใช้ ADXL และ PCB เป็นตัวจับสัญญาณการสั่น ทำการเก็บผลโดยผ่านโปรแกรม LabVIEW ตามรูปที่ 3.9 เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนในโดเมนเวลา ตามรูปที่ 3.10 และโดเมนความถี่โดยใช้โปรแกรม LabVIEW ตามรูปที่ 3.11 เพื่อทดลองว่าเซ็นเซอร์จับสัญญาณสั่นสะเทือน ADXL ที่มีราคาถูกกว่าเซ็นเซอร์จับสัญญาณสั่นสะเทือน PCB ที่ได้มาตรฐานและมีราคาแพงกว่านั้นสามารถใช้งานได้เหมือนกันหรือไม่



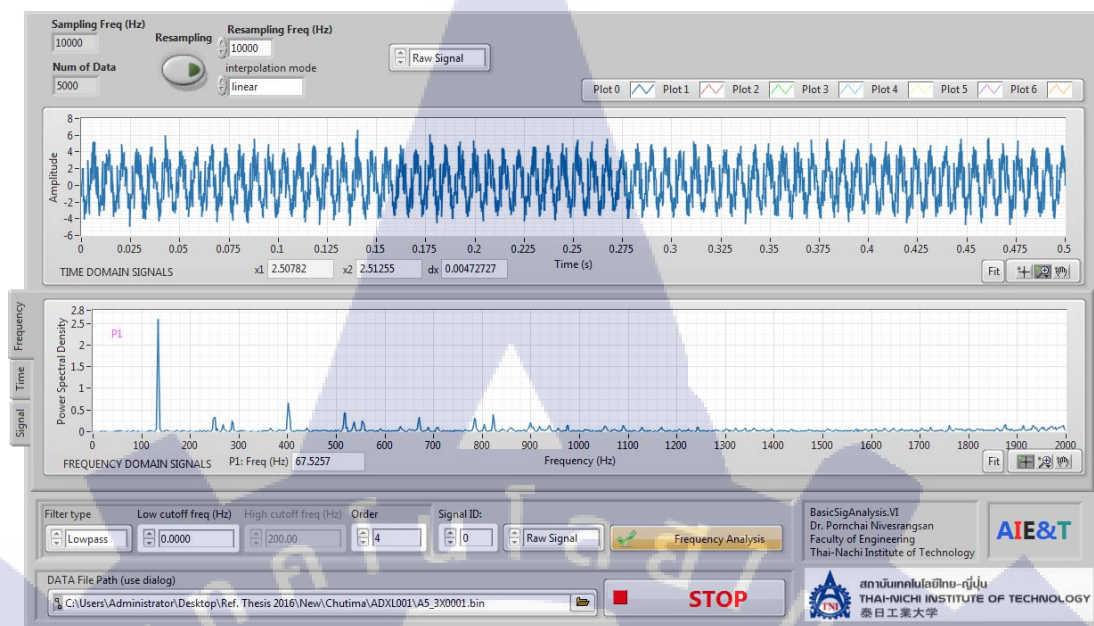
รูปที่ 3.8 ผังการดำเนินงานการทดลองที่ 1



รูปที่ 3.9 การเก็บผลโดยผ่านโปรแกรม LABVIEW



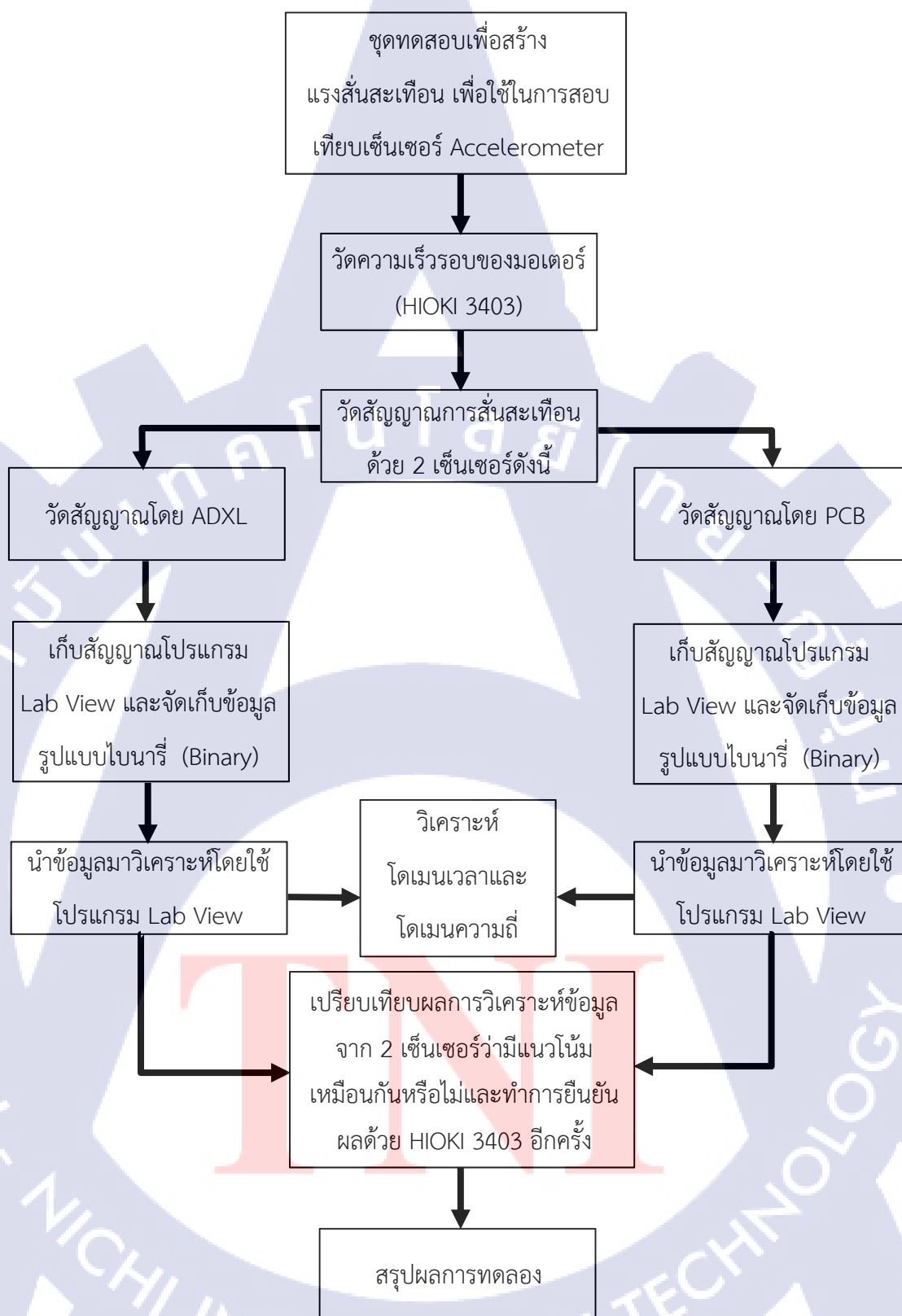
รูปที่ 3.10 วิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนในโดเมนเวลา



รูปที่ 3.11 วิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนในโดเมนความถี่

3.2.2 แผนการทดลองที่ 2

โดยมีผังการทำงานวิจัยดังรูปที่ 3.12 วัดความเร็วรอบของมอเตอร์ด้วย HIOKI 3403 จัดเก็บสัญญาณโดยใช้ ADXL และ PCB เป็นตัวจับสัญญาณการสั่น ทำการเก็บผลโดยผ่านโปรแกรม LabVIEW ตามรูปที่ 3.9 เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนในโดเมนเวลา ตามรูปที่ 3.10 และโดเมนความถี่โดยใช้โปรแกรม LabVIEW ตามรูปที่ 3.11 เพื่อทดลองว่าเซ็นเซอร์จับสัญญาณสั่นสะเทือน ADXL ที่มีราคาถูกกว่าเซ็นเซอร์จับสัญญาณสั่นสะเทือน PCB ที่ได้มาตรฐานและมีราคาแพงกว่านั้นสามารถใช้งานได้เหมือนกันหรือไม่ และทำการยืนยันผลการทดลองอีกครั้งด้วยอุปกรณ์วัดความเร็วรอบของมอเตอร์ (HIOKI 3403)

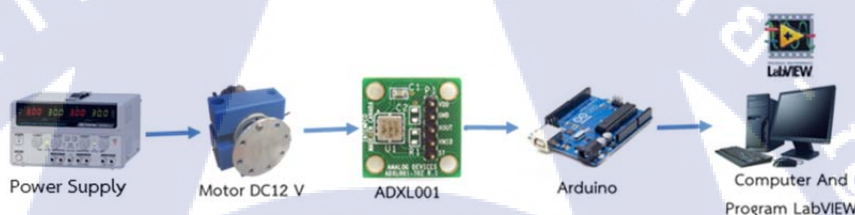


รูปที่ 3.12 ผังการดำเนินการทดลองที่ 2

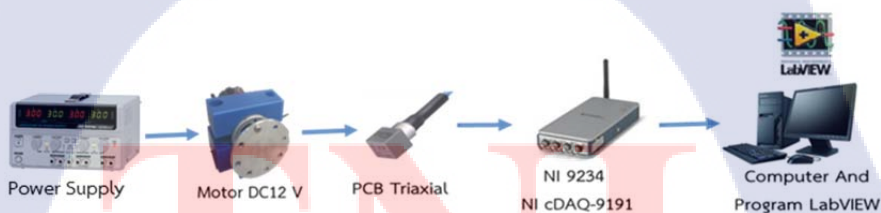
3.3 การทดลอง

3.3.1 การทดลองที่ 1

การเชื่อมต่อระบบในการเก็บข้อมูลของเซ็นเซอร์วัดสัญญาณสั่นสะเทือนราคาถูก ADXL ใช้ Arduino เป็นชุดอ่านค่าการสั่นสะเทือนจากเซ็นเซอร์ แสดงดังรูปที่ 3.13 สำหรับชุดอุปกรณ์อ้างอิงที่ใช้ในการเปรียบเทียบเป็นเซ็นเซอร์ PCB และชุด DAQ Card ของ National Instrument รหัส NI 9234 และ NI cDAQ-9191 การเชื่อมต่อระบบในการเก็บข้อมูลของเซ็นเซอร์ PCB และชุด DAQ Card ของ National Instrument รหัส NI 9234 และ NI cDAQ-9191 แสดงดังรูปที่ 3.13 เซ็นเซอร์ทั้งสองชุดติดตั้งเพื่อวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน ณ ตำแหน่งเดียวกันบนคานาดังรูปที่ 3.14 โดยสัญญาณการสั่นสะเทือน นั้นถูกบันทึก วิเคราะห์ในโดเมนเวลา และวิเคราะห์ในโดเมนความถี่โดยใช้โปรแกรม LabVIEW



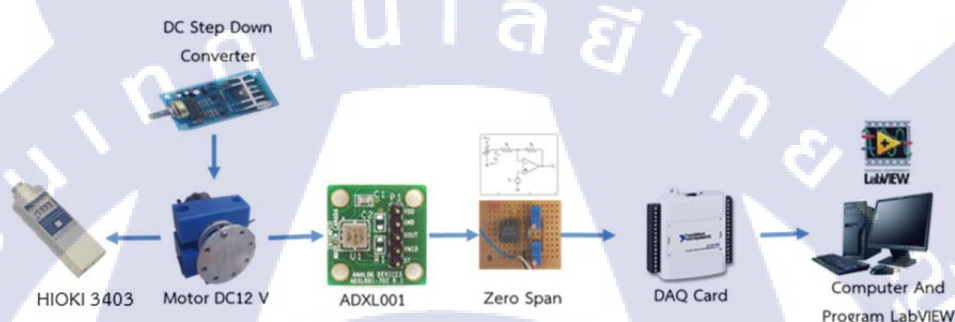
รูปที่ 3.13 การเชื่อมต่อระบบในการเก็บข้อมูลของเซ็นเซอร์ ADXL ใช้ Arduino เป็นชุดอ่านค่า



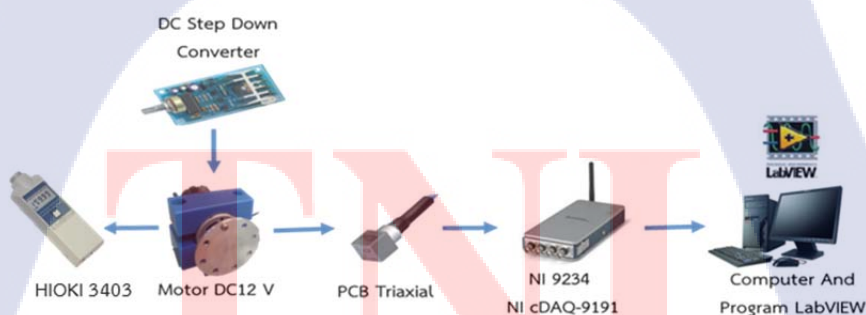
รูปที่ 3.14 การเชื่อมต่อระบบในการเก็บข้อมูลของเซ็นเซอร์ PCB และชุด DAQ Card ของ National Instrument รหัส NI 9234 และ NI cDAQ-9191 เป็นชุดอ่านค่า

3.3.2 การทดลองที่ 2

การเชื่อมต่อระบบในการเก็บข้อมูลของเซ็นเซอร์วัดสัญญาณสั่นสะเทือนราคาถูก ADXL ใช้ DAQ Card เป็นชุดอ่านค่าการสั่นสะเทือนจากเซ็นเซอร์ แสดงดังรูปที่ 3.15 สำหรับชุดอุปกรณ์อ้างอิงที่ใช้ในการเปรียบเทียบเป็นเซ็นเซอร์ PCB และชุด DAQ Card ของ National Instrument รหัส NI 9234 และ NI cDAQ-9191 เซ็นเซอร์ทั้งสองชุดติดตั้งเพื่อวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน ณ ตำแหน่งเดียวกันบนคัน โดยสัญญาณการสั่นสะเทือน นั้นถูกบันทึก วิเคราะห์ในโดเมนเวลา และวิเคราะห์ในโดเมนความถี่โดยใช้โปรแกรม LabVIEW และทำการยืนยันผลการทดลองอีกครั้งด้วยอุปกรณ์วัดความเร็วรอบของมอเตอร์ (HIOKI 3403)



รูปที่ 3.15 การเชื่อมต่อระบบในการเก็บข้อมูลของเซ็นเซอร์ ADXL ใช้ DAQ Card เป็นชุดอ่านค่า



รูปที่ 3.16 การเชื่อมต่อระบบในการเก็บข้อมูลของเซ็นเซอร์ PCB และชุด DAQ Card ของ National Instrument รหัส NI 9234 และ NI cDAQ-9191 เป็นชุดอ่านค่า

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลอง

4.1.1 ผลการทดลองที่ 1

การเก็บข้อมูลของเซ็นเซอร์ ADXL ใช้ Arduino เป็นชุดอ่านค่าการสั่นสะเทือนจากเซ็นเซอร์สำหรับชุดอุปกรณ์อ้างอิงที่ใช้ในการเปรียบเทียบเป็นเซ็นเซอร์ PCB และชุด DAQ Card ของ National Instrument รหัส NI 9234 และ NI cDAQ-9191 ตัวอย่างผลการทดลองของการสั่นสะเทือนที่ความถี่ 4419 rpm ของการวัดด้วยเซ็นเซอร์ทั้งสองได้แสดงไว้ด้านล่างนี้ ดังรูปที่ 4.1-4.4 เป็นการวิเคราะห์ในโดเมนความถี่ ดังรูปที่ 4.5 เป็นการวิเคราะห์ในโดเมนเวลา



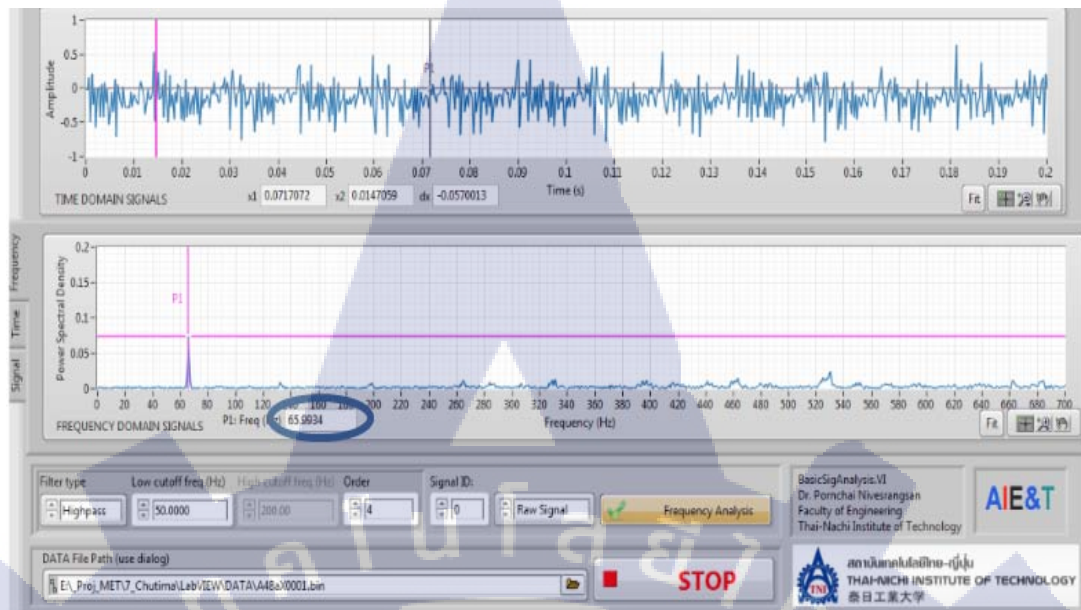
รูปที่ 4.1 สัญญาณจากเซ็นเซอร์อ้างอิง (PCB)



รูปที่ 4.2 สัญญาณจากเซ็นเซอร์ ADXL ที่ความเร็วในการอ่านสัญญาณ 2000 Hz



รูปที่ 4.3 สัญญาณจากเซ็นเซอร์ ADXL ที่ความเร็วในการอ่านสัญญาณ 4000 Hz



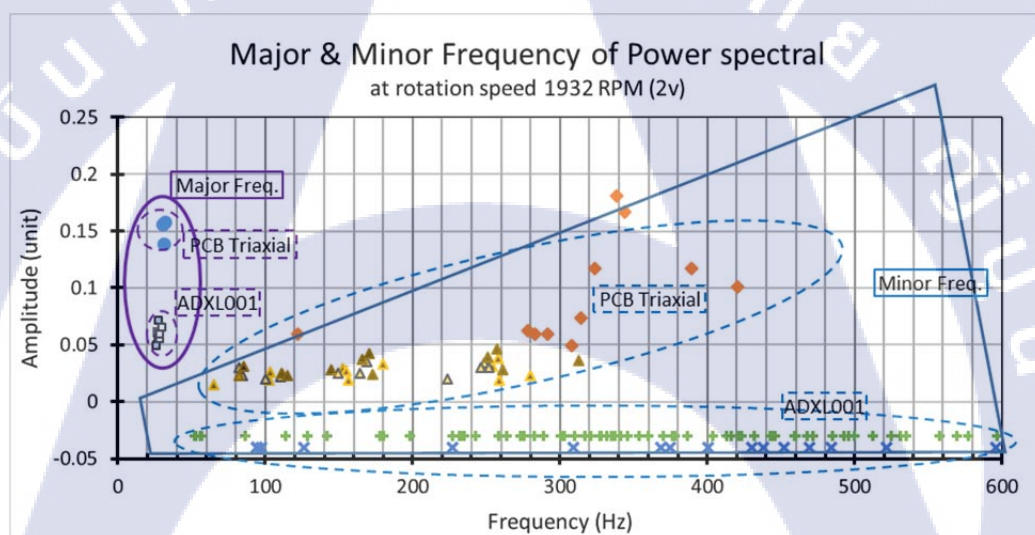
รูปที่ 4.4 สัญญาณจากเซ็นเซอร์ ADXL ที่ความเร็วในการอ่านสัญญาณ 8000 Hz



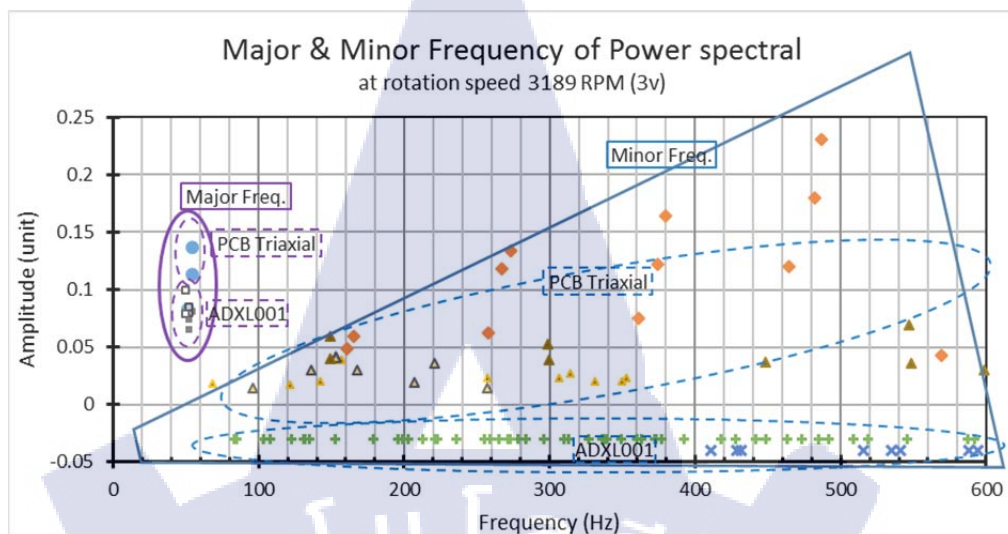
รูปที่ 4.5 ผลวิเคราะห์บนโดเมนเวลา ของสัญญาณจากเซ็นเซอร์ ADXL ที่ความเร็วในการอ่านสัญญาณ 8000 Hz

จากผลการทดลอง รูปที่ 4.1 เป็นการวิเคราะห์ด้วยโดเมนความถี่ของสัญญาณจากเซ็นเซอร์อ้างอิง จะเห็นค่าความถี่ของการสั่นจะมี Amplitude สูงสุดที่ 71.6 Hz (เรียกว่าค่าความถี่หลัก) และที่ความถี่รอง (ความถี่อื่นๆ) จะมี Amplitude น้อยกว่าของความถี่หลักกว่าครึ่งสำหรับในรูปที่ 4.2-4.4 ก็ทำนองเดียวกัน แต่เป็นสัญญาณที่ได้จาก เซ็นเซอร์ ADXL และจะเห็นได้ว่าที่ค่าความถี่หลักอยู่ในช่วง 66-71 Hz แต่มี Amplitude เพียง 25 % ของสัญญาณจากเซ็นเซอร์อ้างอิง

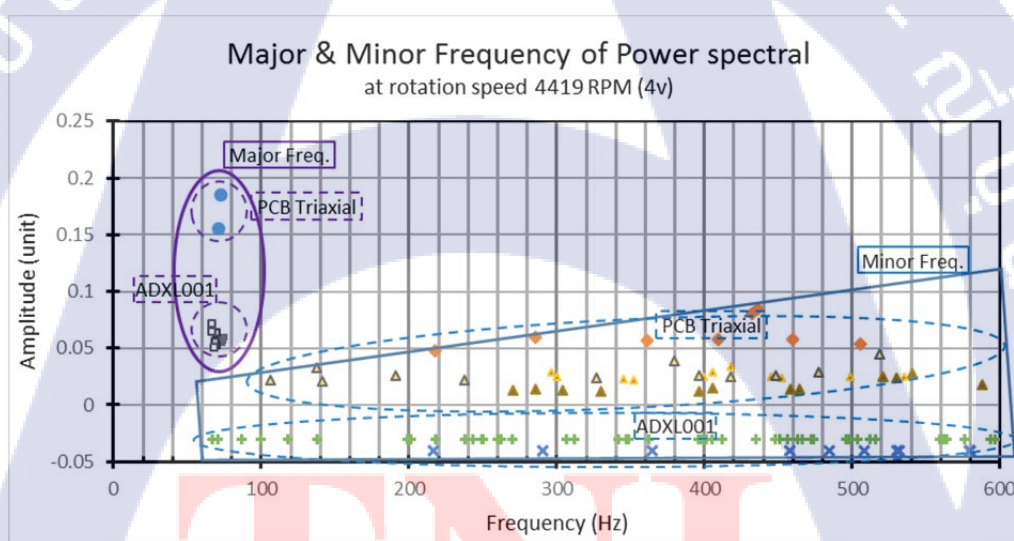
จากผลการทดลอง รูปที่ 4.6-4.8 จะเห็นได้ว่าทุกความถี่ของการสั่นสะท้อน (พิจารณาเป็นค่าความถี่หลัก (32.2, 53.2 และ 73.7 Hz) เซ็นเซอร์ ADXL สามารถวัดค่าความถี่ได้ 27.2, 51.7 และ 70.2 Hz ผิดพลาด 15.6%, 2.8% และ 4.7% ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับเซ็นเซอร์อ้างอิง ในทุกความเร็วของการอ่านสัญญาณ แต่ค่า Amplitude จะต่ำกว่าประมาณครึ่งหนึ่ง ส่วนความถี่รองนั้นจะมีค่าใกล้เคียงกับเซ็นเซอร์อ้างอิง เมื่อความถี่ของการสั่นสะท้อนสูง (73.7 Hz, ดูรูปที่ 4.8)



รูปที่ 4.6 ผลวิเคราะห์ในโดเมนความถี่ที่ความถี่ของการสั่นสะท้อน 1932 rpm (32.2 Hz)



รูปที่ 4.7 ผลวิเคราะห์ในโดเมนความถี่ที่ความถี่ของการสั่นสะเทือน 3189 rpm (53.2 Hz)



รูปที่ 4.8 ผลวิเคราะห์ในโดเมนความถี่ที่ความถี่ของการสั่นสะเทือน 4419 rpm (73.7 Hz)

ตารางที่ 4.1 ค่าวิเคราะห์ในโดเมนเวลาที่มีความถี่การสั่นสะเทือน 32.2 Hz

	Mean	RMS	SD	Var	Skew	Kurt	Crest
PCB	0.19	0.34	0.27	0.07	-0.94	5.19	3.01
ADXL	0.05	0.22	0.20	0.04	-0.18	5.40	4.59
Error (%)	73.68	35.29	25.93	42.86	80.85	4.05	52.49

ตารางที่ 4.2 ค่าวิเคราะห์ในโดเมนเวลาที่มีความถี่การสั่นสะเทือน 53.2 Hz

	Mean	RMS	SD	Var	Skew	Kurt	Crest
PCB	0.25	0.37	0.24	0.06	-1.04	6.83	2.84
ADXL	-0.03	0.23	0.22	0.04	0.02	3.79	4.33
Error (%)	112.0	37.84	8.33	33.33	101.92	44.51	52.46

ตารางที่ 4.3 ค่าวิเคราะห์ในโดเมนเวลาที่มีความถี่การสั่นสะเทือน 73.7 Hz

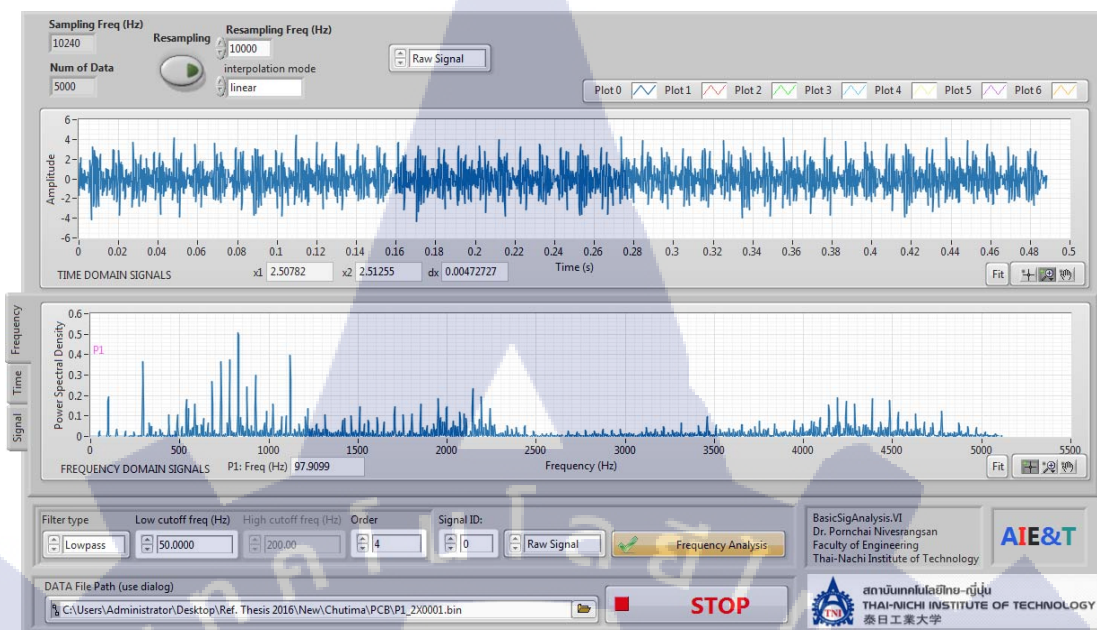
	Mean	RMS	SD	Var	Skew	Kurt	Crest
PCB	0.11	0.26	0.23	0.05	0.01	3.26	3.80
ADXL	0.04	0.24	0.21	0.04	-0.02	4.28	4.14
Error (%)	63.0	7.7	8.7	20.0	300.0	31.3	8.95

จากตารางที่ 4.1-4.3 และรูปที่ 4.6-4.8 จะเห็นได้ว่าค่าตัวแปรต่างๆ ที่คำนวณและค่า Amplitude ของแต่ละความถี่ จะให้ผลที่ดีขึ้น (ค่าระหว่างเซ็นเซอร์มาตรฐาน กับ เซ็นเซอร์ ADXL มีค่าใกล้เคียงกัน) เมื่อความถี่ของการสั่นสะเทือนสูงขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เพราะที่ความถี่ของการสั่นสะเทือนสูง เกิดขึ้นเมื่อมอเตอร์หมุนเร็วขึ้น มีผลให้สัญญาณการสั่นสะเทือนแรงขึ้น และประกอบกับ ชดวัดด้วย เซ็นเซอร์ PCB ซึ่งเป็นเซ็นเซอร์อ้างอิง นั้นมี Resolution ของการแปลงสัญญาณขนาด 24 bits แต่ เซ็นเซอร์ ADXL ที่ใช้ร่วมกับ Arduino นั้นมี Resolution ขนาด 10 bits (ให้ Resolution แย่กว่าชดวัดด้วยเซ็นเซอร์อ้างอิง ประมาณ 1600 เท่า) ทำให้การวัดการสั่นสะเทือนที่มีแรงสั่นสะเทือนน้อย ของเซ็นเซอร์ ADXL เกิดความผิดพลาดมากแต่เมื่อความถี่ของการสั่นสะเทือนสูงขึ้น จะทำให้เกิดสัญญาณการสั่นสะเทือนที่แรงขึ้น (ทั้งนี้สัญญาณที่ความถี่การสั่นสะเทือน 73.7 Hz เกิดแรงมากกว่าที่ความถี่การสั่นสะเทือน 32.2 Hz ประมาณ 5.2 เท่า เป็นเช่นนี้เพราะมวลไม่สมดุลของจานหมุนในการทดลองนี้ ไม่เปลี่ยนแปลง อนึ่งแรงสั่นสะเทือนที่เกิดที่ความถี่การสั่นสะเทือน 73.7 Hz มีค่าประมาณ 20 g ก็จะทำให้ผลการวัดได้ใกล้เคียงกันทั้งในด้านโดเมนความถี่และโดเมนเวลาโดยเฉพาะค่า ค่าราก

กำลังสองเฉลี่ย (RMS), ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD), ค่าความแปรปรวน (Variance) และ ค่า Crest Factor (ดูตารางที่ 4.3)

4.1.2 ผลการทดลองที่ 2

การเก็บข้อมูลของเซ็นเซอร์ ADXL ใช้ DAQ Card เป็นชุดอ่านค่าการสั่นสะเทือน จากชุดเซ็นเซอร์ที่มีราคาถูก ส่วนเซ็นเซอร์ PCB จะใช้ชุด DAQ Card ของ National Instrument รหัส NI 9234 และ NI cDAQ-9191 ซึ่งเป็นเซ็นเซอร์ที่มีมาตรฐานและมีราคาแพง มีผลการทดลองที่ความถี่ของการสั่นสะเทือน 5820 rpm (97 Hz), 7200 rpm (120 Hz), 7620 rpm (127 Hz), 8040 rpm (134 Hz) และ 9540 rpm (159 Hz) ของการวัดด้วยเซ็นเซอร์ทั้งสองได้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.9-4.16 และ 4.18 เป็นการวิเคราะห์ในโดเมนความถี่ ส่วน การวิเคราะห์ในโดเมนเวลาได้ยกตัวอย่างผลการทดลองที่ความถี่ของการสั่นสะเทือน 8040 rpm (134 Hz) ในการวิเคราะห์ผลในโดเมนเวลาจะมีการวิเคราะห์ ได้แก่ ค่าเฉลี่ย รากกำลังสองเฉลี่ย ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าแปรปรวน ค่าความเบ้ ค่าความโด่ง และค่า Crest factor เป็นต้น แสดงไว้ดังรูปที่ 4.17 แต่ในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้จะขอเน้นเพียง ค่าเฉลี่ย และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เนื่องจากค่าพารามิเตอร์พื้นฐานทางสถิติ 2 ตัว คือ ค่าเฉลี่ย และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสามารถแยกแยะสภาวะมีดกลึงสึกได้ชัดเจนกว่าค่าพารามิเตอร์พื้นฐานทางสถิติอื่นๆ ดังที่กล่าวมาในบทที่ 2 จึงได้ทำการวิเคราะห์ผลในโดเมนเวลาที่มีความถี่ของการสั่นสะเทือน 5820 rpm (97 Hz), 7200 rpm (120 Hz), 7620 rpm (127 Hz), 8040 rpm (134 Hz) และ 9540 rpm (159 Hz) ดังตารางที่ 4.4-4.8

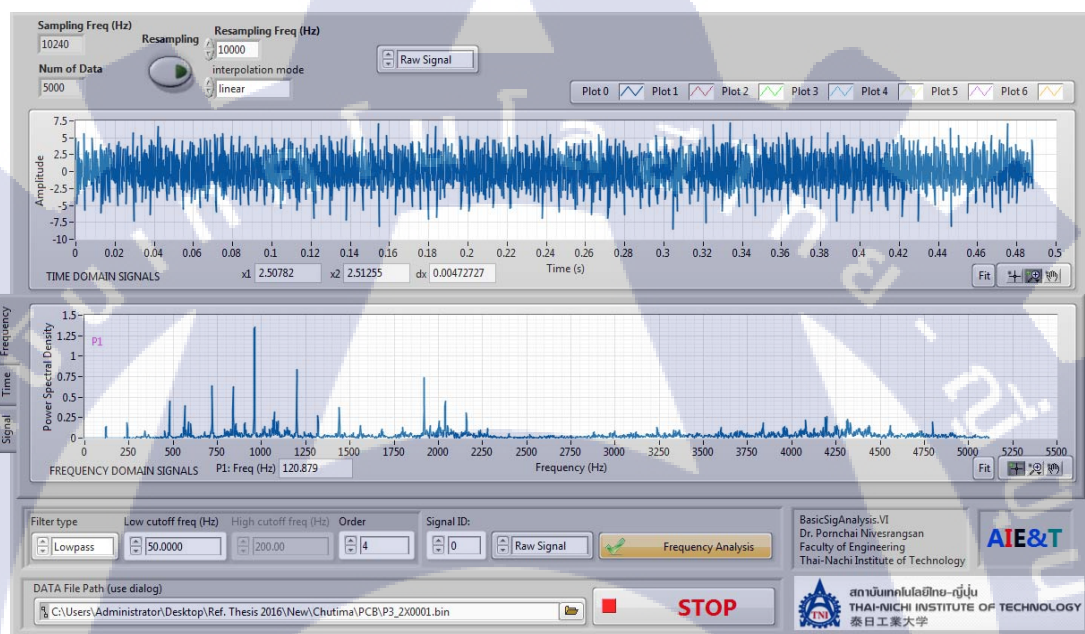


รูปที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์ในโดเมนความถี่สัญญาณจากเซ็นเซอร์อ้างอิง (PCB) ที่ความถี่ของการสั่นสะเทือน 5820 rpm (97 Hz)

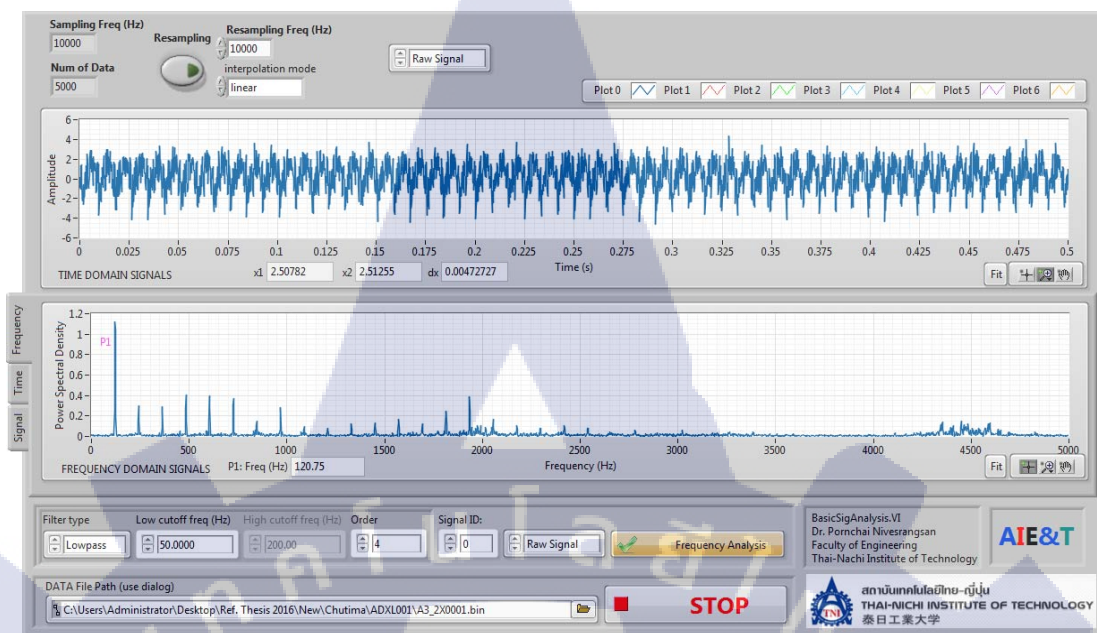


รูปที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์บนโดเมนความถี่สัญญาณจากเซ็นเซอร์ ADXL ที่ความถี่ของการสั่นสะเทือน 5820 rpm (97 Hz)

จากผลการทดลอง รูปที่ 4.10 เป็นการวิเคราะห์ด้วยโดเมนความถี่ของสัญญาณจากเซ็นเซอร์ ADXL ที่ความถี่ของการสั่นสะเทือน 5820 rpm (97 Hz) จะเห็นค่าความถี่ของการสั่นจะมี Amplitude สูงสุดที่ 97.68 Hz (เรียกว่าค่าความถี่หลัก) และที่ความถี่รอง (ความถี่อื่นๆ) จะมี Amplitude น้อยกว่าของความถี่หลักสำหรับใน รูปที่ 4.9 แต่เป็นสัญญาณที่ได้จาก เซ็นเซอร์อ้างอิง (PCB) และจะเห็นได้ว่าที่ค่าความถี่หลักอยู่ที่ 97.99 Hz แต่มี Amplitude เพียง 50% ของสัญญาณจากเซ็นเซอร์ ADXL มีค่าความผิดพลาดที่ความถี่ของการสั่นสะเทือน 0.31%

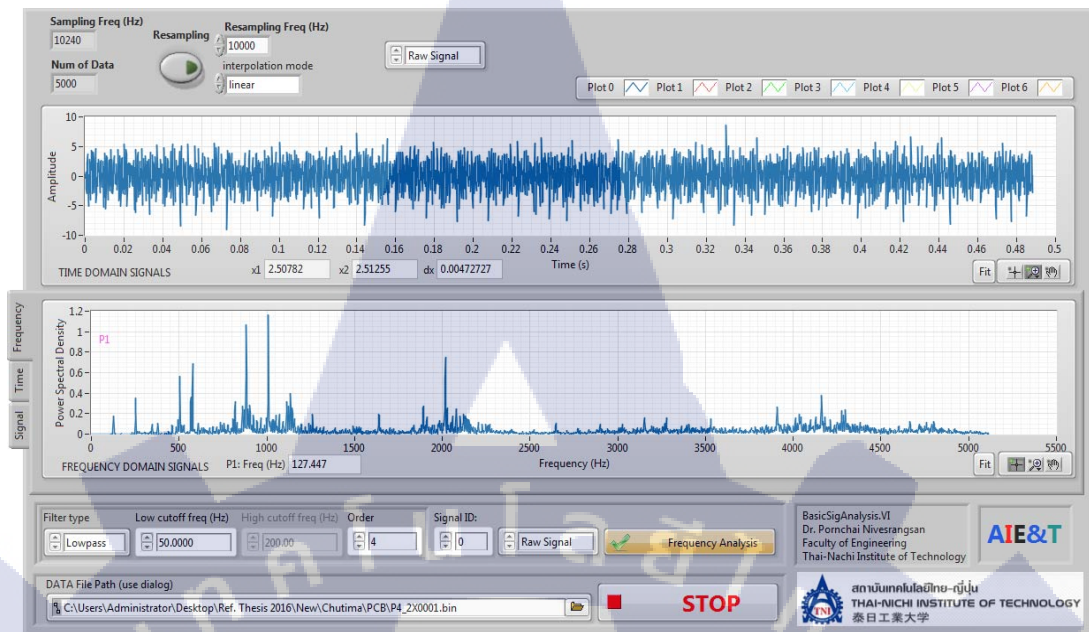


รูปที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์บนโดเมนความถี่สัญญาณจากเซ็นเซอร์อ้างอิง (PCB) ที่ความถี่ของการสั่นสะเทือน 7200 rpm (120 Hz)



รูปที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์บนโดเมนความถี่สัญญาณจากเซ็นเซอร์ ADXL ที่ความถี่ของการสั่นสะเทือน 7200 rpm (120 Hz)

จากผลการทดลอง รูปที่ 4.11 เป็นการวิเคราะห์ด้วยโดเมนความถี่ของสัญญาณจากเซ็นเซอร์ อ้างอิง (PCB) ที่ความถี่ของการสั่นสะเทือน 7200 rpm (120 Hz) จะเห็นค่าความถี่หลักอยู่ที่ 120.93 Hz รูปที่ 4.12 แต่เป็นสัญญาณที่ได้จาก เซ็นเซอร์อ้างอิง ADXL และจะเห็นได้ว่าที่ค่าความถี่หลักอยู่ที่ 120.79 Hz แต่มี Amplitude มากกว่า 82.75% ของสัญญาณจากเซ็นเซอร์อ้างอิง (PCB) มีค่าความผิดพลาดที่ความถี่ของการสั่นสะเทือน 0.12%

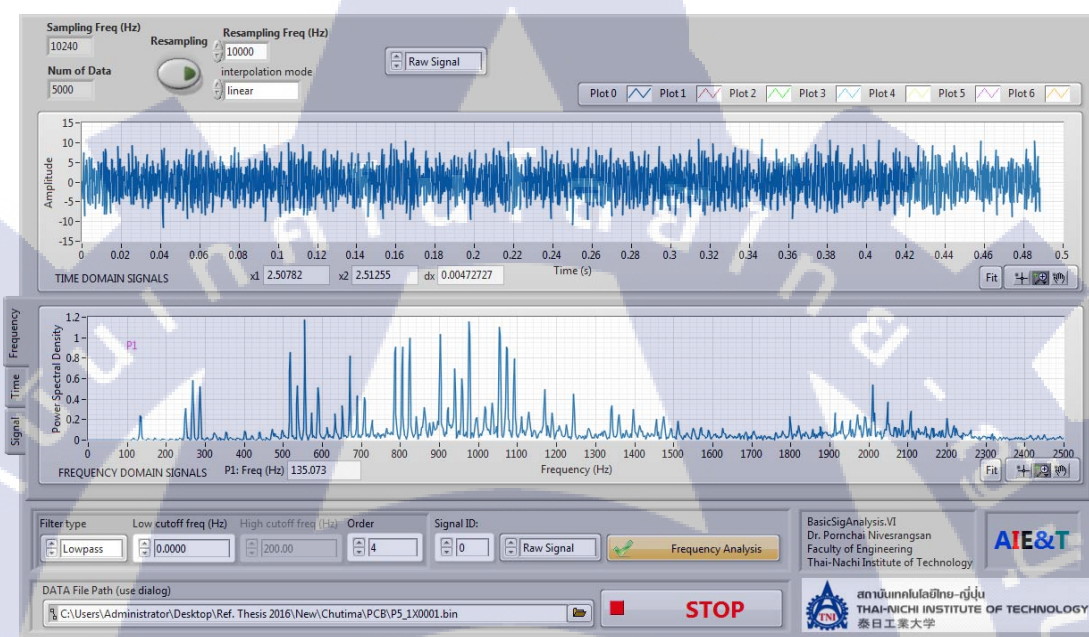


รูปที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์บนโดเมนความถี่สัญญาณจากเซ็นเซอร์อ้างอิง (PCB) ที่ความถี่ของการสั่นสะเทือน 7620 rpm (127 Hz)

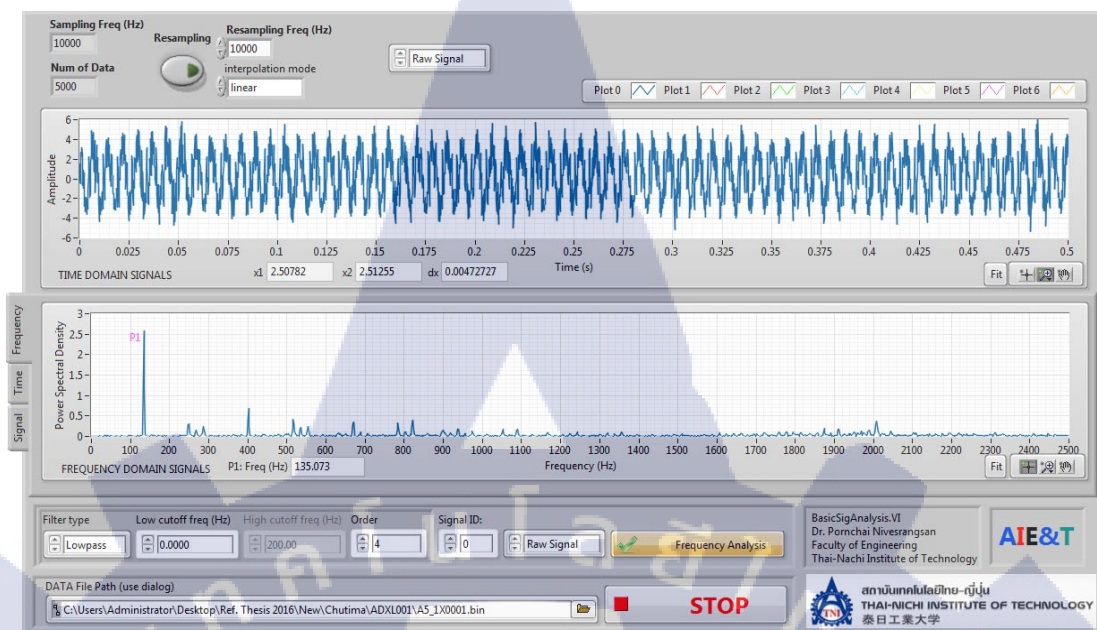


รูปที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์บนโดเมนความถี่สัญญาณจากเซ็นเซอร์ ADXL ที่ความถี่ของการสั่นสะเทือน 7620 rpm (127 Hz)

จากผลการทดลอง รูปที่ 4.13 เป็นการวิเคราะห์ด้วยโดเมนความถี่ของสัญญาณจากเซ็นเซอร์ อ้างอิง (PCB) ที่ความถี่ของการสั่นสะเทือน 7620 rpm (127 Hz) จะเห็นค่าความถี่หลักอยู่ที่ 127.76 Hz รูปที่ 4.14 แต่เป็นสัญญาณที่ได้จาก เซ็นเซอร์อ้างอิง ADXL และจะเห็นได้ว่าที่ค่าความถี่หลักอยู่ที่ 127.59 Hz แต่มี Amplitude มากกว่า 63 % ของสัญญาณจากเซ็นเซอร์ อ้างอิง (PCB) มีค่าความผิดพลาดที่ความถี่ของการสั่นสะเทือน 0.13%

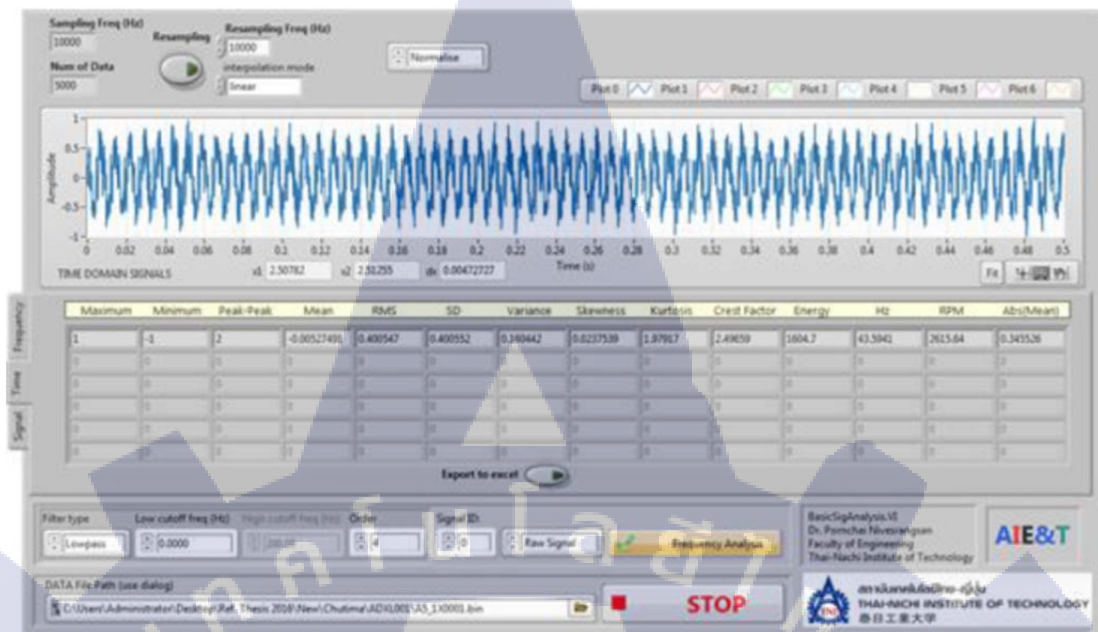


รูปที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์บนโดเมนความถี่สัญญาณจากเซ็นเซอร์อ้างอิง (PCB) ที่ความถี่ของการสั่นสะเทือน 8040 rpm (134 Hz)



รูปที่ 4.16 ผลการวิเคราะห์บนโดเมนความถี่สัญญาณจากเซ็นเซอร์ ADXL ที่ความถี่ของการสั่นสะเทือน 8040 rpm (134 Hz)

จากผลการทดลอง รูปที่ 4.15 เป็นการวิเคราะห์ด้วยโดเมนความถี่ของสัญญาณจากเซ็นเซอร์อ้างอิง (PCB) ที่ความถี่ของการสั่นสะเทือน 8040 rpm (134 Hz) จะเห็นค่าความถี่หลักอยู่ที่ 134.92 Hz รูปที่ 4.16 แต่เป็นสัญญาณที่ได้จาก เซ็นเซอร์อ้างอิง ADXL และจะเห็นได้ว่าที่ค่าความถี่หลักอยู่ที่ 134.62 Hz แต่มี Amplitude มากกว่า 44 % ของสัญญาณจากเซ็นเซอร์ อ้างอิง (PCB) มีค่าความผิดพลาดที่ความถี่ของการสั่นสะเทือน 0.23%



รูปที่ 4.17 ผลวิเคราะห์บนโดเมนเวลา ของสัญญาณจากเซ็นเซอร์ ADXL ที่ความถี่ของการสั่นสะเทือน 8040 rpm (134 Hz)



รูปที่ 4.18 ผลการวิเคราะห์บนโดเมนความถี่สัญญาณจากเซ็นเซอร์ ADXL ที่ความถี่ของการสั่นสะเทือน 9540 rpm (159 Hz)

จากผลการทดลอง รูปที่ 4.18 เป็นการวิเคราะห์ด้วยโดเมนความถี่ของสัญญาณจากเซ็นเซอร์ ADXL ที่ความถี่ของการสั่นสะเทือน 9540 rpm (159 Hz) จะเห็นค่าความถี่หลักอยู่ที่ 159.64 Hz ส่วนสัญญาณที่ได้จากเซ็นเซอร์อ้างอิง (PCB) จะเกิดการการสั่นที่รุนแรงจะเกิดการครีปของสัญญาณ จึงทำได้เพียงแค่เก็บค่าของเซ็นเซอร์ ADXL

ตารางที่ 4.4 ค่าวิเคราะห์ในโดเมนเวลาที่มีความถี่การสั่นสะเทือน 5820 rpm (97 Hz)

	PCB		ADXL		Error (%)
	Mean	SD	Mean	SD	
Mean	0.1885	0.0063	0.2167	0.0386	14.9447
SD	0.2456	0.0116	0.2545	0.0224	3.6211

ตารางที่ 4.5 ค่าวิเคราะห์ในโดเมนเวลาที่มีความถี่การสั่นสะเทือน 7200 rpm (120 Hz)

	PCB		ADXL		Error (%)
	Mean	SD	Mean	SD	
Mean	0.2213	0.0120	0.2674	0.0294	20.7948
SD	0.2781	0.0143	0.3115	0.0224	12.0466

ตารางที่ 4.6 ค่าวิเคราะห์ในโดเมนเวลาที่มีความถี่การสั่นสะเทือน 7620 rpm (127 Hz)

	PCB		ADXL		Error (%)
	Mean	SD	Mean	SD	
Mean	0.2337	0.0397	0.2967	0.0058	26.9562
SD	0.2489	0.0132	0.3439	0.0098	38.1702

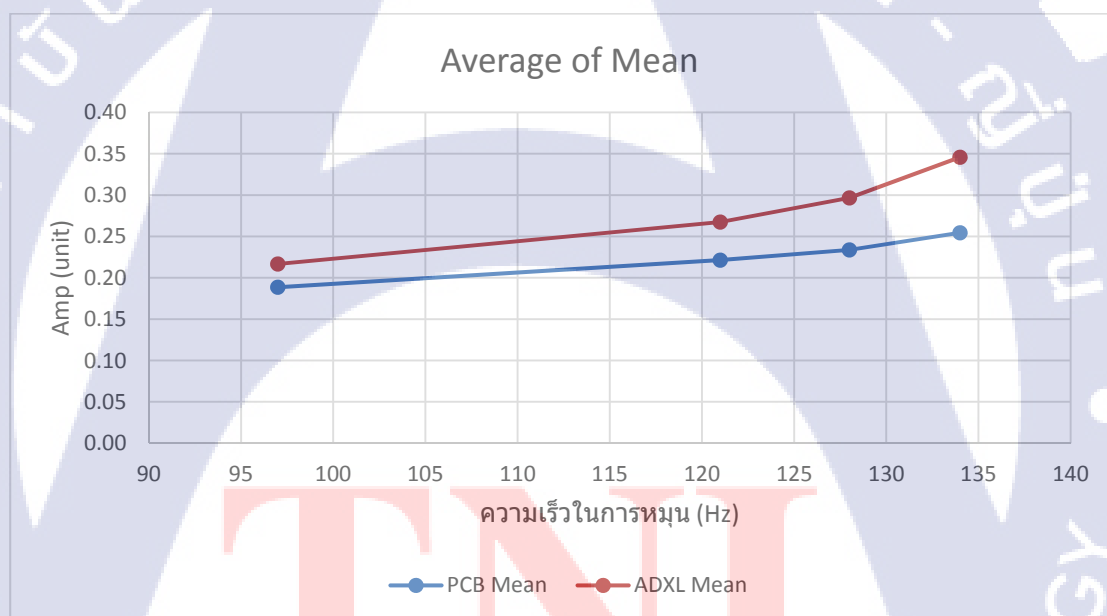
ตารางที่ 4.7 ค่าวิเคราะห์ในโดเมนเวลาที่มีความถี่การสั่นสะเทือน 8040 rpm (134 Hz)

	PCB		ADXL		Error (%)
	Mean	SD	Mean	SD	
Mean	0.2545	0.00397	0.2967	0.0058	26.9562
SD	0.2489	0.0132	0.3439	0.0098	38.1702

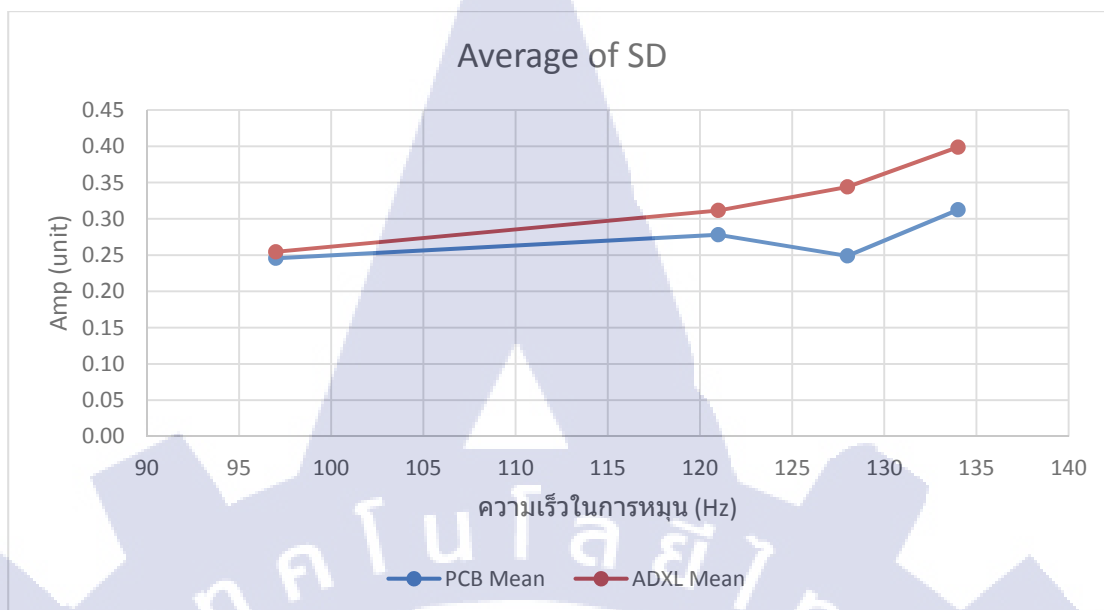
ตารางที่ 4.8 ค่าวิเคราะห์ในโดเมนเวลาที่มีความถี่การสั่นสะเทือน 9540 rpm (159 Hz)

	PCB		ADXL		Error (%)
	Mean	SD	Mean	SD	
Mean	-	-	0.3922	0.4467	-
SD	-	-	0.0274	0.0235	-

จากรูปที่ 4.9-4.16 จะเห็นได้ว่าค่าตัวแปรต่างๆ ที่คำนวณและค่า Amplitude ของแต่ละความถี่ การวิเคราะห์ด้วยความถี่ที่ความถี่ ต่ำกว่า 100 Hz ค่าความถี่หลักวัดได้ใกล้เคียงกัน (วัดต่างกัน < 1%) ค่าความถี่รองวัดได้ไม่ตรงกัน ที่ความถี่สูงกว่า 100 Hz (7200 rpm (120 Hz), 7620 rpm (127 Hz) และ 8040 rpm (134 Hz)) ค่าความถี่หลักวัดได้ใกล้เคียงกัน (วัดต่างกัน < 1%) ค่าความถี่รองวัดได้ใกล้เคียงกันมาก ที่ 2, 4, 5, 6, 7 เท่าของความถี่หลัก



รูปที่ 4.19 กราฟค่าเฉลี่ยของ Mean จากผลการวิเคราะห์ในโดเมนเวลาที่มีความถี่ของการสั่นสะเทือน 5820 rpm (97 Hz), 7200 rpm (120 Hz), 7620 rpm (127 Hz) และ 8040 rpm (134 Hz)



รูปที่ 4.20 กราฟเฉลี่ยของ SD จากผลการวิเคราะห์ในโดเมนเวลาที่มีความถี่ของการสั่นสะเทือน 5820 rpm (97 Hz), 7200 rpm (120 Hz), 7620 rpm (127 Hz) และ 8040 rpm (134 Hz)

จากตารางที่ 4.4-4.7 ได้นำค่าเฉลี่ยของ Mean ค่า SD จากผลการวิเคราะห์ในโดเมนเวลาที่มีความถี่ของการสั่นสะเทือน 5820 rpm (97 Hz), 7200 rpm (120 Hz), 7620 rpm (127 Hz) และ 8040 rpm (134 Hz) มาทำการพอดกราฟ จะได้ดังรูปที่ 4.19-4.20

จากรูปที่ 4.19 การวัดด้วย PCB และ ADXL ค่า Average จากการทดลอง 3 ครั้ง จะให้ค่า Mean ที่มีแนวโน้มเดียวกันคือ ที่ความเร็วในการหมุนต่ำ (ซึ่งจะเกิดแรงสั่นสะเทือนต่ำ) ค่า Mean ก็จะมีค่าต่ำ และจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อความเร็วในการหมุนเพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่ามีค่าแนวโน้มไปในทิศทางที่ถูกต้อง ต่างเพียงค่า Amplitude

จากรูปที่ 4.20 ค่า SD จากการทดลอง 3 ครั้งที่มีความถี่ต่ำกว่า 100 Hz จะไม่สามารถวัดได้ตรงกัน แต่ที่ความถี่สูงกว่า 100 Hz จะมีแนวโน้มเดียวกันต่างที่ค่า Amplitude จะเห็นได้ว่ามีค่าแนวโน้มไปในทิศทางที่ถูกต้อง

จากการทดลองที่มีความถี่ของการสั่นสะเทือน 5820 rpm (97 Hz), 7200 rpm (120 Hz), 7620 rpm (127 Hz), 8040 rpm (134 Hz) และ 9540 rpm (159 Hz) เราจะทำการยืนยันผลการทดลองว่าเซ็นเซอร์ PCB และเซ็นเซอร์ ADXL ที่ใช้ในการทดลองนี้มีค่าแนวโน้มไปในทิศทางที่ถูกต้อง โดยทำการยืนยันผลการทดลองอีกครั้งด้วยอุปกรณ์วัดความเร็วรอบของมอเตอร์ (HIOKI 3403) ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ผลการยืนยันผลการทดลองที่โดเมนความถี่ด้วยอุปกรณ์วัดความเร็วรอบของมอเตอร์ (HIOKI 3403) ที่ความถี่การสั่นสะเทือน 5820 rpm (97 Hz), 7200 rpm (120 Hz), 7620 rpm (127 Hz), 8040 rpm (134 Hz) และ 9540 rpm (159 Hz)

	PCB	HIOKI	Error %	ADXL	HIOKI	Error %
5820 rpm (97 Hz)	97.99	97	1.01	97.68	97	0.69
7200 rpm (120 Hz)	120.93	118	2.42	120.79	118	2.30
7620 rpm (127 Hz)	127.76	128	0.18	127.59	128	0.32
8040 rpm (134 Hz)	134.92	133	1.42	134.62	133	1.20
9540 rpm (159 Hz)	-	-	-	159.64	159	0.40

จากตารางพบว่าเซ็นเซอร์ PCB เมื่อเทียบกับ HIOKI 3403 มีความผิดพลาดวัดต่างกัน < 3% ส่วนเซ็นเซอร์ ADXL เมื่อเทียบกับ HIOKI 3403 มีความผิดพลาดวัดต่างกัน < 3% ก็เช่นกัน ดังนั้นเซ็นเซอร์ PCB และเซ็นเซอร์ ADXL ที่ใช้ในการทดลองนี้มีค่าแนวโน้มไปในทิศทางที่ถูกต้อง

TNI

THAI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 สรุปผลการทดลองที่ 1

จากผลการทดลอง จะเห็นได้ค่า resolution ของการแปลงสัญญาณจะมีผลต่อค่าความผิดพลาดอย่างมากในการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของโดเมนเวลาโดยเฉพาะการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนที่มีค่าต่ำ ดังนั้นถ้าต้องทำการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนที่มีค่าต่ำควรเลือกไมโครคอนโทรเลอร์ตัวอื่นแทน Arduino หรือเลือกที่มี resolution ของการแปลงสัญญาณดีกว่า 10 bits

ส่วนการวิเคราะห์ด้านโดเมนความถี่ความแรงของสัญญาณก็มีผลต่อความผิดพลาดเช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์ด้านโดเมนเวลาเพียงแต่ส่งผลน้อยกว่า โดยที่แรงสั่นสะเทือนมากกว่า 9 g จะทำให้เกิดความผิดพลาดในการหาค่าความถี่ของการสั่นสะเทือน น้อยกว่า 5 %

5.1.2 สรุปผลการทดลองที่ 2

จากการทดลองสัญญาณที่วัดจาก ADXL สามารถให้ค่าความถี่การหมุนของจานไม่สมดุล ที่ถูกต้อง ผิดพลาดน้อยกว่า 3% เมื่อเทียบกับการวัดด้วย PCB และอุปกรณ์วัดความเร็วรอบ ส่วนการสั่นสะเทือนที่ความถี่อื่นๆ ที่เกิดบนคาน สัญญาณสั่นสะเทือนที่วัดจาก ADXL และ PCB เมื่อวิเคราะห์หาค่า Mean และ SD ของสัญญาณก็มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน คือ ที่ความถี่ของสัญญาณเพิ่มขึ้นค่า Mean และ SD จะเพิ่มสูงขึ้นเป็นสัดส่วน และที่ความเร็วที่มากกว่า 100 Hz จะวัดสัญญาณสั่นสะเทือนได้ดีขึ้น เนื่องจากแรงสั่นสะเทือนเพิ่มขึ้นตามแรงหนีศูนย์กลาง

5.2 ข้อเสนอแนะ

- สร้างวงจร Zero-Span ที่มี Noise ต่ำไว้ใช้งาน (เนื่องจากถ้าต้องการวัดที่สัญญาณการสั่นต่ำๆ Noise จะทำให้เกิดความผิดพลาดของสัญญาณ)
- เนื่องจากการใช้มอเตอร์สร้างแรงสั่นสะเทือนไม่สามารถสร้างความถี่ที่ 1800 Hz-3000 Hz ได้ ควรทำการเปลี่ยนแปลงการสร้างแรงสั่นสะเทือนเป็นวิธีอื่น เช่น การใช้ลำโพงที่สามารถสร้างความถี่สูงได้มาใช้ในการทดสอบแทน

บรรณานุกรม

TNI

บรรณานุกรม

- [1] ธวัชชัย นิกากิจ, *การทำนายสภาวะการสึกหรอของมีดกลึงบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีด้วยสัญญาณการสั่นสะเทือนในโดเมนความถี่*, วิทยานิพนธ์ วศ.ม. (เทคโนโลยีวิศวกรรม), กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น, 2557.
- [2] D. Kopeliovich, "Mechanisms of Wear," [Online]. Available : http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=mechanisms_of_wear. [Accessed : August 21, 2015].
- [3] K. Scrop, *Manufacturing engineering and technology*, Illionis : USA, 2014.
- [4] J. Thaitan, "Tool Material," [Online]. Available : <http://www.Engineeringknowledge now.blogspot.com/2012/10/cutting-tool.html>. [Accessed : September 12, 2015].
- [5] Georgia Institute of Technology, "Machining-Cutting Tool Life," [Online]. Available : <http://dc373.4shared.com/doc/HZHthW07/preview.html>. [Accessed : April 21, 2015].
- [6] ISO, *ISO 3685 Tool Life Testing With Single Point Turning Tools*, New York : Irwin/McGraw, 2014.
- [7] ประสาน แสงเขียว, *การศึกษาอิทธิพลของเครื่องมือตัดในกระบวนการตัดเฉือนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304*, ปทุมธานี : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2553.
- [8] J. Thaitan, "Tool Life," [Online]. Available : <http://www.Engineeringknowledge now.blogspot.com/2012/10/tool-life.html>. [Accessed : September 12, 2015].
- [9] M. P. Groover, *Fundamentals of Modern Manufacturing Materials, Processes, and Systems*, 4th ed, NJ: J. Wiley & Sons, 2007.
- [10] Cutting Tool Technology, "Cutting Tool Technology," [Online]. Available : http://202.28.32.233/pics_upload/CUTTING%2520TOOL%2520TECHNOLOGY.pdf. [Accessed : March 11, 2016].
- [11] T. S. Yuh, "An impulse-response extracting method from the modulated signal In a roller bearing, measurement (electronic)," *Science Direct*. vol. 10, no. 40, pp. 868-875, July 2007.
- [12] J. I. Taylor, *Determination of Antifriction Bearing Condition by Spectral Analysis*, Vibration Institued, 1978.

- [13] Computer and Communication, “Signal,” [Online]. Available : <http://personal.sut.ac.th/paramate/file/compcom/compcomm03.pdf>. [Accessed : April 21, 2016].
- [14] เทิดเกียรติ ลิ้มปิทีปรากร และสุริยา สารมัตย์, เครื่องทดสอบอายุการใช้งานของตลับลูกปืนสำหรับรถไฟฟ้านขนส่งมวลชน, ปทุมธานี : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2553.
- [15] N. Takafumi, “Measurement of Acoustic Emission and Vibration of Rolling Bearings with an Artificial Defect,” vol. 41 no. 3, pp. 119-124, March 2000.
- [16] Schaeffler Gruppe. “Schaeffler Gruppe Basis Vibration Analysis Hands on with FAG Detector III 2007,” [Online]. Available : <http://Schaeffler.co.th>. [Accessed : March 17, 2016].
- [17] T. Komolmis, “Signal,” [Online]. Available : http://ee.eng.cmu.ac.th/doc/doc_2_1. [Accessed : December 3, 2016].
- [18] Georgia Institute of Technology, “Machining-Cutting Tool Life,” [Online]. Available : <http://dc373.4shared.com/doc/HZHthW07/preview.html>. [Accessed : August 21, 2014].
- [19] P. Wisutmetheekom, “Signal Conditioning Circuit & Data Conversion,” [Online]. Available : <http://slidesshare.net/Mobile/psw19991/mt2-3-56>. [Accessed : December 21, 2016].
- [20] ประดิษฐ์ หมุ่มเมืองสอง และสุชญาณ หารรรษสุข, การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน, กรุงเทพฯ : บริษัท วี.พรินท์ (1991) จำกัด, 2550.
- [21] พรชัย นิเวศน์รังสรรค์ และคณะ, “การตรวจสอบสถานะของมิดตัดด้วยสัญญาณการสั่นสะเทือน,” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23, ME-NETT, เชียงใหม่, 4-7 พฤศจิกายน 2552, หน้า 18.
- [22] D. M. D’Addona and R. Teti. “Image data processing via neural networks for tool wear prediction,” *Eighth CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering*, vol. 12, no. 3, pp. 252-257, December 2013.
- [23] S. K. Al-Arbi, *Condition Monitoring of Gear Systems Using Vibration Analysis*, UK : University of Huddersfield Repository, 2012.
- [24] สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ และชาญณรงค์ รุ่งเรือง, “การตรวจติดตามการสึกหรอของมิดตัดภายในกระบวนการบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี,” การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ครั้งที่ 8, IE Network, ชลบุรี, 20-21 ตุลาคม 2554, หน้า 19-23.

- [25] J. Kopac and S. Sali. "Tool wear monitoring during the turning process," *Asia Pacific Conference on Materials Processing*, vol. 113, no. 1-3, pp. 312-316, June 2001.
- [26] วินัย เวชวิทยาลัง, *เทคนิคการวัดและวิเคราะห์การสั่นสะเทือนเพื่องานบำรุงรักษา*, กรุงเทพฯ : เอ็มแอนด์อี, 2552.
- [27] นภสพวิทย์ อัครศรีธนากร, *การตรวจสอบการสึกหรอของมีดกลึงบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีด้วยสัญญาณการสั่นสะเทือนในโดเมนเวลา*, วิทยานิพนธ์ วศ.ม. (เทคโนโลยีวิศวกรรม), กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น, 2557.
- [28] S. Tangitsitcharoen. "Intelligent monitoring and identification of cutting states of chips and chatter on CNC turning machine," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 10, no. 1, pp. 40-46, January 2008.



TNI

ภาคผนวก

TNI

ภาคผนวก ก.

Data Sheet เซ็นเซอร์ ADXL001

TNI



High Performance Wide Bandwidth Accelerometer

Preliminary Technical Data

ADXL001

FEATURES

High Performance Accelerometer
 $\pm 70g$, $\pm 250g$ And $\pm 500g$ Wideband Ranges Available
 22kHz Resonant Frequency Structure
 High Linearity (0.2% of Full-scale)
 Low-Noise ($4 \text{ mg}/\sqrt{\text{Hz}}$)
 Sensitive Axis in the Plane of the Chip
 Frequency Response Down To DC
 Full Differential Signal Processing
 High Resistance to EMI/RFI
 Complete Electromechanical Self-test
 Output Ratiometric to Supply
 Velocity Preservation During Acceleration Input Overload
 Low-Power Consumption (2.5mA typ)
 5mm LCC Hermetic Ceramic Package

APPLICATIONS

Vibration Monitoring
 Shock Detection
 Sports Diagnostic Equipment
 Medical Instrumentation
 Industrial Monitoring

GENERAL DESCRIPTION

The ADXL001 is a major advance over previous generations of accelerometers - providing high performance and wide bandwidth. This part is ideal for industrial, medical, and military applications where wide bandwidth, small size, low power, and robust performance are essential.

Utilizing our proprietary 5th Generation iMEMs process enables the ADXL001 to provide the desired dynamic range that extends from $\pm 70g$ to $\pm 500g$ in combination with 22kHz of bandwidth. The accelerometer output channel passes through a wide bandwidth differential to single ended converter, which allows access to the full mechanical performance of the sensor.

The part can operate on voltage supplies from 3.3V to 5V.

The ADXL001 also has a Self-Test (ST) pin that can be asserted to verify the full electromechanical signal chain for the accelerometer channel.

This information applies to an ongoing development. Its characteristics and specifications are subject to change without notice. Analog Devices assumes no obligation regarding future manufacturing unless otherwise agreed to in writing. Patents pending.

Rev. PrA

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. Specifications subject to change without notice. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM

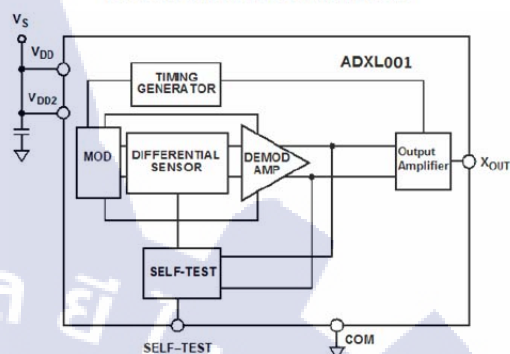


Figure 1. Functional Block Diagram

The ADXL001 is available in industry standard 8 pin LCC and is rated to work over the extended industrial temperature range (-40 to $+125^\circ\text{C}$).

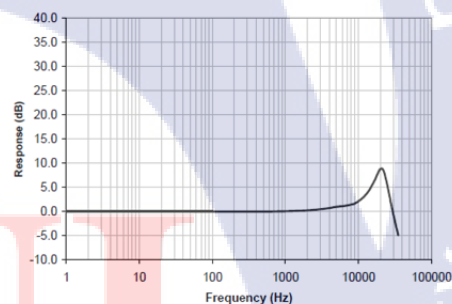


Figure 2. Sensor Frequency Response

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.
 Tel: 781.329.4700 www.analog.com
 Fax: 781.461.3113

©2008 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

ADXL001**Preliminary Technical Data****TABLE OF CONTENTS**

Features	1	Applications.....	8
Applications.....	1	Application Circuit.....	8
GENERAL DESCRIPTION	1	Self-Test	8
Functional Block Diagram	1	Acceleration Sensitive Axis.....	8
Revision History	2	Operating Voltages Other Than 5V	8
Specifications.....	3	Layout, Grounding, and Bypassing Considerations	9
Absolute Maximum Ratings.....	5	Clock Frequency Supply Response	9
ESD Caution.....	5	Power Supply Decoupling	9
Pin Configuration and Function Descriptions.....	6	Electromagnetic Interference	9
Theory of Operation	7	Outline Dimensions	10
Design Principles.....	7	Ordering Guide.....	10
Mechanical Sensor.....	7		

REVISION HISTORY

4/08— Preliminary Technical Data Rev A

This information applies to an ongoing development. Its characteristics and specifications are subject to change without notice. Analog Devices assumes no obligation regarding future manufacturing unless otherwise agreed to in writing. Patents pending.

Rev. PrA | Page 2 of 10

Preliminary Technical Data

ADXL001

SPECIFICATIONS

Table 1. ADXL001 Specifications

(@ T_A = -40°C to +125°C, V_S = 3.3V ± 5% DC, Acceleration = 0g; unless otherwise noted)

@T _A = -40 °C to +125 °C, V _S = 3.3 ± 5% DC, Acceleration = -g, (unless otherwise noted)											
	Conditions	70g			250g			500g			
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Units
SENSOR											
Nonlinearity			0.2	2		0.2	2		0.2	2	%
Alignment error	Die in package		1			1			1		degree
Package resonance			130			130			130		kHz
Cross-axis sensitivity	Includes pkg. Alignment		2%			2%			2%		%
Resonant frequency			22			22			22		kHz
Quality factor			2.5			2.5			2.5		
SENSITIVITY											
	Ratiometric(1)			1			1			1	%
Full scale range	I _{out} ≤ +/-100μA	-70		70	-250		250	-500		500	g
Sensitivity	V _S = 3.3V, 100Hz		16.0			4.30			2.15		mV/g
Sensitivity	V _S = 5V, 100Hz		24.2			6.5			3.26		mV/g
OFFSET											
	Ratiometric(1)										
Zero-g output	V _S = 3.3V	1.35	1.65	1.95	TBD	1.65	TBD	TBD	1.65	TBD	V
Zero-g output	V _{out} - V _S /2	-90.9		90.9							mV/V
Noise											
Noise	10Hz-400Hz		100			100			100		mg rms
Noise density	10Hz-400Hz		4			4			4		mg/rt Hz
Frequency Response											
-3dB frequency			22			22			22		kHz
-3dB frequency drift			2			2			2		%
Self Test											
Delta V	V _S = 3.3V		400			TBD			TBD		mV
Delta V (cubic vs. V _S)			10			TBD			TBD		mV/V^3
Logic input high	V _S = 3.3V	2.1			2.1			2.1			V
Logic input low	V _S = 3.3V			0.66			0.66			0.66	V
Input resistance	To Ground	30	50		30	50		30	50		kΩ
Output Amplifier											
Output swing	I _{out} = +/-100μA	0.2		V _S - 0.2	0.2		V _S - 0.2	0.2		V _S - 0.2	V
Capacitive load		1000			1000			1000			pF
PSRR/CFSR	DC-1MHz		0.5			0.5			0.5		V/V
Power Supply (V _S)											
Functional Range		3.135		6	3.135		6	3.135		6	V
I _{supply}			2.5	5		2.5	5		2.5	5	mA
Turn-on time			TBD			TBD			TBD		ms

This information applies to an ongoing development. Its characteristics and specifications are subject to change without notice. Analog Devices assumes no obligation regarding future manufacturing unless otherwise agreed to in writing. Patents pending.

ADXL001

Preliminary Technical Data

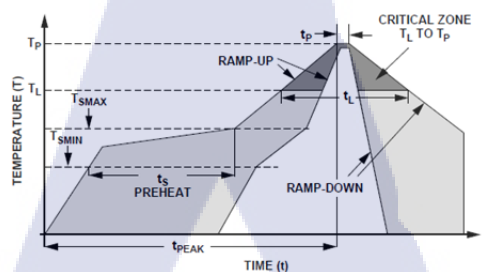


Figure 3. Recommended Soldering Profile

Table 2. Recommended Soldering Profile

Profile Feature	Sn63/Pb37	Pb-Free
Average Ramp Rate (T_L to T_P)	3°C/s maximum	3°C/s maximum
Preheat		
Minimum Temperature (T_{SMIN})	100°C	150°C
Maximum Temperature (T_{SMAX})	150°C	200°C
Time (T_{SMIN} to T_{SMAX}), t_S	60 sec to 120 sec	60 sec to 150 sec
T_{SMAX} to T_L		
Ramp-Up Rate	3°C/s	3°C/s
Time Maintained Above Liquidous (t_L)		
Liquidous Temperature (T_L)	183°C	217°C
Time (t_L)	60 sec to 150 sec	60 sec to 150 sec
Peak Temperature (T_P)	240°C + 0°C/-5°C	260°C + 0°C/-5°C
Time Within 5°C of Actual Peak Temperature (t_P)	10 sec to 30 sec	20 sec to 40 sec
Ramp-Down Rate	6°C/s maximum	6°C/s maximum
Time 25°C to Peak Temperature (t_{PEAK})	6 minute maximum	8 minute maximum

This information applies to an ongoing development. Its characteristics and specifications are subject to change without notice. Analog Devices assumes no obligation regarding future manufacturing unless otherwise agreed to in writing. Patents pending.

Rev. PrA | Page 4 of 10

Preliminary Technical Data

ADXL001

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Table 3. Absolute Maximum Ratings

Parameter*	Rating
Acceleration (Any Axis, Unpowered and Powered)	4000 g
Supply Voltage V_s	-0.3 to 7.0V
Output Short Circuit Duration (Vout, to Ground)	Indefinite
Storage Temperature	-65°C to 150°C
Soldering Temperature Range (Soldering 10 sec)	245°C
Operating Temperature Range	-55°C to 125°C

*Stresses above those listed under Absolute Maximum Ratings may cause permanent damage to the device. This is a stress rating only; functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational section of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

Drops onto hard surfaces can cause shocks of greater than 4000 g and can exceed the absolute maximum rating of the device. Exercise care during handling to avoid damage.

ESD CAUTION



ESD (electrostatic discharge) sensitive device. Charged devices and circuit boards can discharge without detection. Although this product features patented or proprietary protection circuitry, damage may occur on devices subjected to high energy ESD. Therefore, proper ESD precautions should be taken to avoid performance degradation or loss of functionality.

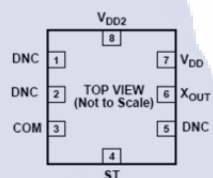
This information applies to an ongoing development. Its characteristics and specifications are subject to change without notice. Analog Devices assumes no obligation regarding future manufacturing unless otherwise agreed to in writing. Patents pending.

Rev. PrA | Page 5 of 10

ADXL001

Preliminary Technical Data

PIN CONFIGURATION AND FUNCTION DESCRIPTIONS



DNC = DO NOT CONNECT

Figure 4. Pin Configuration

Table 4. Pin Function Descriptions

Pin No.	Mnemonic	Description
1	DNC	Do Not Connect
2	DNC	Do Not Connect
3	COM	Common
4	ST	Self Test Control (Logic Input)
5	DNC	Do Not Connect
6	X _{OUT}	X Axis Acceleration Output
7	V _{DD}	3.135 V to 6 V (Should Be Connected Physically To V _{DD2})
8	V _{DD2}	3.135 V to 6 V (Should Be Connected Physically To V _{DD})

This information applies to an ongoing development. Its characteristics and specifications are subject to change without notice. Analog Devices assumes no obligation regarding future manufacturing unless otherwise agreed to in writing. Patents pending.

Rev. PrA | Page 6 of 10

Preliminary Technical Data

ADXL001

THEORY OF OPERATION

DESIGN PRINCIPLES

The ADXL001 accelerometer provides a fully differential sensor structure and circuit path for excellent resistance to EMI/RFI interference.

This latest generation SOIMEMS device takes advantage of mechanically coupled but electrically isolated differential sensing cells. This improves sensor performance and size as a single proof mass generates the fully differential signal. The sensor signal conditioning also uses electrical feedback with zero-force feedback for improved accuracy and stability. This force-feedback cancels out the electrostatic forces contributed by the sensor circuitry.

Figure 5 is a simplified view of one of the differential sensor cell blocks. Each sensor block includes several differential capacitor unit cells. Each cell is composed of fixed plates attached to the device layer and movable plates attached to the sensor frame. Displacement of the sensor frame changes the differential capacitance. On-chip circuitry measures the capacitive change.

MECHANICAL SENSOR

The ADXL001 is built using the Analog Devices, Inc., SOIMEMS sensor process. The sensor device is micromachined in-plane in the SOI device layer. Trench isolation is used to electrically isolate, but mechanically couple, the differential sensing elements. Single-crystal silicon springs suspend the structure over the handle wafer and provide resistance against acceleration forces.

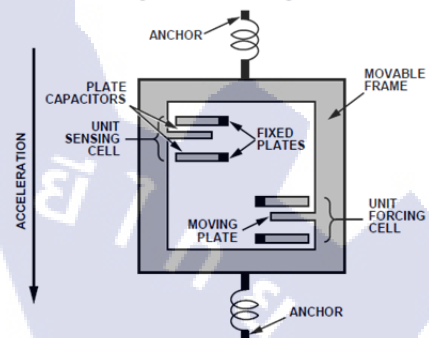


Figure 5. Simplified View of Sensor Under Acceleration

This information applies to an ongoing development. Its characteristics and specifications are subject to change without notice. Analog Devices assumes no obligation regarding future manufacturing unless otherwise agreed to in writing. Patents pending.

ADXL001

Preliminary Technical Data

APPLICATIONS

APPLICATION CIRCUIT

Figure 6 shows the standard application circuit for the ADXL001. Note that V_{DD} and V_{DD2} should always be connected. The output is shown connected to a 1000 pF output capacitor for improved EMI performance and can be connected directly to the ADC input of a microcontroller. See the ADC specifications for proper antialiasing filtering, based on the user's sample rate.

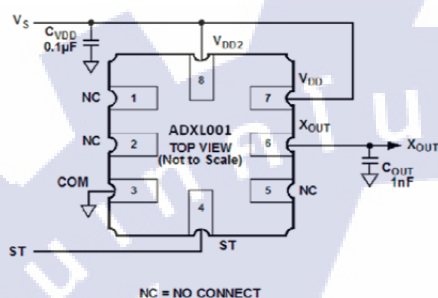


Figure 6. Application Circuit

SELF-TEST

The fixed fingers in the forcing cells are normally kept at the same potential as that of the movable frame. When the user activates the digital self-test input, the ADXL001 changes the voltage on the fixed fingers in these forcing cells on one side of the moving plate. This potential creates an attractive electrostatic force, causing the sensor to move towards those fixed fingers. The entire signal channel is active, so the sensor displacement causes a change in X_{out} . The ADXL001 self-test function verifies proper operation of the sensor, interface electronics, and accelerometer channel electronics.

The ST pin should never be exposed to voltages greater than $V_S + 0.3$ V. If this cannot be guaranteed due to the system design (for instance, if there are multiple supply voltages), then a low V_F clamping diode between ST and V_S is recommended.

ACCELERATION SENSITIVE AXIS

The ADXL001 is an X-Axis acceleration and vibration-sensing device. It produces a positive-going output voltage for vibration toward its Pin 8 marking.

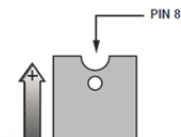


Figure 7. X_{out} Increases with Acceleration in the +X-Axis Direction

OPERATING VOLTAGES OTHER THAN 5V

The ADXL001 is specified at $V_S = 3.3$ V and $V_S = 5$ V. Note that some performance parameters change as the voltage is varied.

In particular, the X_{out} output exhibits ratiometric offset and sensitivity with supply. The output sensitivity (or scale factor) scales proportionally to the supply voltage. At $V_S = 3.3$ V, output sensitivity is typically 16 mV/g. At $V_S = 5$ V, sensitivity is nominally 24.2 mV/g. X_{out} zero g bias is nominally equal to $V_S/2$ at all supply voltages.

Self-test response in g is roughly proportional to the square of the supply voltage. However, when one factors ratiometricity of sensitivity in with supply voltage, the self-test response in voltage is roughly proportional to the cube of the supply voltage. For example, the self-test response for the ADXL001-70 at $V_S = 5$ V is approximately 1.4 V. At $V_S = 3.3$ V, the response is approximately 400 mV.

This information applies to an ongoing development. Its characteristics and specifications are subject to change without notice. Analog Devices assumes no obligation regarding future manufacturing unless otherwise agreed to in writing. Patents pending.

LAYOUT, GROUNDING, AND BYPASSING CONSIDERATIONS

CLOCK FREQUENCY SUPPLY RESPONSE

In any clocked system, power supply noise near the clock frequency may have consequences at other frequencies. An internal clock typically controls the sensor excitation and the signal demodulator for micromachined accelerometers.

If the power supply contains high frequency spikes, they may be demodulated and interpreted as acceleration signals. A signal appears at the difference between the noise frequency and the demodulator frequency. If the power supply noise is 100 Hz away from the demodulator clock, there will be an output term at 100 Hz. If the power supply clock is at exactly the same frequency as the accelerometer clock, the term will appear as an offset. If the difference frequency is outside the signal bandwidth, the output filter attenuates it. However, both the power supply clock and the accelerometer clock may vary with time or temperature, which can cause the interference signal to appear in the output filter bandwidth.

ADXL001 addresses this issue in two ways. First, the high clock frequency, 125 kHz for the output stage, eases the task of choosing a power supply clock frequency such that the difference between it and the accelerometer clock remains well outside the filter bandwidth. Second, ADXL001 has a fully differential signal path, including a pair of electrically isolated, mechanically coupled sensors. The differential sensors eliminate most of the power supply noise before it reaches the demodulator. Good high frequency supply bypassing, such as a ceramic capacitor close to the supply pins, also minimizes the amount of interference.

Clock frequency supply response (CFSR) is the ratio of the response at the output to the noise on the power supply near the accelerometer clock frequency or its harmonics. A CFSR of 0.5 means that the signal at the output is half the amplitude of the supply noise. This is analogous to power supply rejection ratio (PSRR), except that the stimulus and the response are at different frequencies.

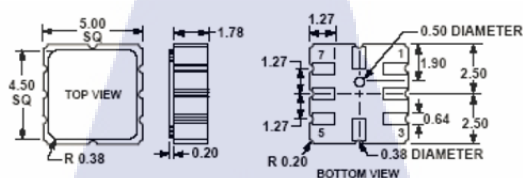
POWER SUPPLY DECOUPLING

For most applications, a single 0.1 μF capacitor, C_{DC} , adequately decouples the accelerometer from noise on the power supply. However, in some cases, particularly where noise is present at the 1 MHz internal clock frequency (or any harmonic thereof), noise on the supply can cause interference on the ADXL001 output. If additional decoupling is needed, a 50 Ω (or smaller) resistor or ferrite bead can be inserted in the supply line. Additionally, a larger bulk bypass capacitor (in the 1 μF to 4.7 μF range) can be added in parallel to C_{DC} .

ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE

The ADXL001 can be used in areas and applications with high amounts of EMI or with components susceptible to EMI emissions. The fully differential circuitry of the ADXL001 is designed to be robust to such interference. For improved EMI performance, especially in automotive applications, a 1000 pF output capacitor is recommended on the X_{OUT} output.

This information applies to an ongoing development. Its characteristics and specifications are subject to change without notice. Analog Devices assumes no obligation regarding future manufacturing unless otherwise agreed to in writing. Patents pending.

ADXL001**Preliminary Technical Data****OUTLINE DIMENSIONS**

8-Terminal Ceramic Leadless Chip Carrier [LCC]
(E-8)

Dimensions shown in millimeters

Figure 8. Package Dimensions

ORDERING GUIDE

Table 5. Ordering Guide

Model	Branding	Package	Gee Range	Temperature Range
ADXL001-70	TBD	LCC-8	$\pm 70g$	-40°C to 125°C
ADXL001-250	TBD	LCC-8	$\pm 250g$	-40°C to 125°C
ADXL001-500	TBD	LCC-8	$\pm 500g$	-40°C to 125°C

©2008 Analog Devices, Inc. All rights reserved. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.
PR07510-0-5/08(PrA)



www.analog.com

This information applies to an ongoing development. Its characteristics and specifications are subject to change without notice. Analog Devices assumes no obligation regarding future manufacturing unless otherwise agreed to in writing. Patents pending.

Rev. PrA | Page 10 of 10

ภาคผนวก ข.

DC Motor Speed Control

TNI

MXA033 DC MOTOR SPEED CONTROL (15A)

MXA033 วงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ DC 12/24V 15A

This DC motor speed control circuit is a small speed control and easy to use.

TECHNICAL SPECIFICATION

- power supply : 12/24VDC (select jumper)
- load voltage : 12/24VDC / 15A. max.
- output : controlled DC motor by PWM (pulse with modulation)
- range : 0-100%
- PCB dimensions : 3.28 x 1.82 inches.

CONNECTING AND TUNING

- Point +12V is to be connected to the positive pole of power supply 12VDC or 24VDC (jumper select it).
- Point +M is to be connected to the positive pole of DC motor.
- Point -M is to be connected to the negative pole of DC motor.
- Point G is to be connected to the negative pole of power supply.
- VR 10K is used for adjusting the speed of DC motor (PWM 0-100%).
- J is used for selecting the voltage of motor. If J is jumping 12V point, the circuit use power supply 12VDC and 12VDC motor, but if J is jumping 24V point, the circuit use power supply 24VDC and 24VDC motor.

วงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ DC ที่มีขนาดเล็กและใช้งานง่าย

ข้อมูลทางเทคนิค

- ใช้งานที่แรงดันไฟฟ้า 12VDC หรือ 24VDC (เลือก jumper)
- สามารถควบคุมมอเตอร์ DC ขนาด 12/24 โวลต์ซีซี กระแสสูงสุด 15 แอมป์
- ใช้อัลกอริทึม PWM (Pulse Width Modulation) ในการควบคุมความเร็วมอเตอร์
- สามารถปรับความเร็วมอเตอร์ได้ตั้งแต่ 0-100%
- ขนาดแผ่นวงจรพิมพ์ : 3.28 x 1.82 นิ้ว

จุดต่อและอุปกรณ์

- จุด +12V เป็นจุดต่อไฟกระแสนับ 12 โวลต์ หรือ 24 โวลต์ (เลือกจาก jumper) เพื่อไม่ให้สับสนระหว่างแรงดัน
- จุด +M เป็นจุดต่อขั้วบวกของมอเตอร์
- จุด -M เป็นจุดต่อขั้วลบของมอเตอร์
- จุด G เป็นจุดต่อขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟ
- VR 10K ใช้สำหรับปรับความเร็วมอเตอร์ PWM 0-100%
- J มีไว้สำหรับเลือกแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์ที่ใช้ ถ้า J ว่างไว้ที่ตำแหน่ง 12V จะใช้แหล่งจ่ายไฟขนาด 12 โวลต์ซีซี และมอเตอร์ 12 โวลต์ซีซี แต่ถ้า J ว่างไว้ที่ตำแหน่ง 24V จะใช้แหล่งจ่ายไฟขนาด 24 โวลต์ซีซี และมอเตอร์ 24 โวลต์ซีซี

CIRCUIT DIAGRAM

INSTALLATION OF THE DC MOTOR SPEED CONTROL 15A CIRCUIT

Select jumper

24VDC

12VDC

NOTE: Selecting the power supply for motor.

ภาคผนวก ค.

Data Sheet HIOKI 3404

TNI

HIOKI

TACHO HiTESTER 3403, 3404

Field measuring instruments



**High 0.01 r/min resolution
Wide range digital
tachometer covers up to 100,000r/min**



3404

3403

*Digital tachometers offering high resolution and covering a wide range up through 100,000 r/min.
Choose from two models to match your needs:
the basic 3403 and the multi-functional 3404.*



ISO 9001
JMF-0216



ISO 14001
JQA-E-90091



www.hioki.com

Hioki company overview, new products, environmental considerations and other information are available on our website.

INSTITUTE OF TECHNOLOGY

Record r/min data with the Universal 3404

High-precision, high-resolution

Maximum 0.01 r/min resolution and high ± 1 dgt. precision make the tachometer effective for precise measurements.

Internal micro-computer for multi-functional performance (3404 only)

MIN, MAX-Holds minimum and maximum r/min, r/s values.

TOTAL-Provides total rotation counts from 0 to 500,000 for real-time rotation count measurement.

PERIOD-Accurately measure rotation pulses from 600 μ s to 2.000 seconds.

Analog output (3404 only)

Stable analog signal output from low to high speeds provides clear recording by merely connecting your existing recorder. Output sampling mode can be set to slow or fast to meet different application needs.

Double performance from one tachometer

By using the optional 9213 contact adapter the 3403 and 3404 become contact-type tachometers, while the peripheral ring can be used in applications like measurement of conveyor line speed (period).

Simple reflector detection check

LED and buzzer signals confirm that the light pulses reflected from the tape on the rotating body are being picked up. Signals can be turned on and off freely.

r/min $\leftrightarrow$ r/s

Switch units even during measurement.

Auto-ranging function covers from 30 to 100,000 r/min.

Tripod mounting socket included.

AC and DC power supplies may be used.

Measurement range

Note: Contact adapter may be used for rotations up to 20,000 r/min.

NORMAL, MIN and MAX modes (MIN and MAX modes only on the 3404)

SLOW sampling (3403 and 3404)

	Range	Accuracy
r/min	30.00 to 199.99	30.00 to 99.99 ± 1 dgt. 100.00 to 199.99 ± 2 dgt.
	200.0 to 1999.9	200.0 to 999.9 ± 1 dgt. 1000.0 to 1999.9 ± 2 dgt.
	2000 to 19999	2000 to 9999 ± 1 dgt. 10000 to 19999 ± 2 dgt.
	20000 to 99990	± 10 dgt.
r/s	0.5000 to 1.9999	0.5000 to 0.9999 ± 1 dgt. 1.0000 to 1.9999 ± 2 dgt.
	2.000 to 19.999	2.000 to 9.999 ± 1 dgt. 10.000 to 19.999 ± 2 dgt.
	20.00 to 199.99	20.00 to 99.99 ± 1 dgt. 100.00 to 199.99 ± 2 dgt.
	200.0 to 1600.0	200.0 to 999.9 ± 1 dgt. 1000.0 to 1600.0 ± 2 dgt.

Note: Display will read 0.0 below 30 r/min or 0.5 r/s.

FAST sampling (3404 only)

	Range	Accuracy
r/min	120.00 to 199.90	± 40 dgt.
	200.0 to 1999.0	200.0 to 999.0 ± 20 dgt. 1000.0 to 1999.0 ± 40 dgt.
	2000 to 19990	2000 to 9990 ± 20 dgt. 10000 to 19990 ± 40 dgt.
	20000 to 99900	± 200 dgt.
r/s	2.000 to 19.990	2.000 to 9.990 ± 20 dgt. 10.000 to 19.990 ± 40 dgt.
	20.00 to 199.90	20.00 to 99.90 ± 20 dgt. 100.00 to 199.90 ± 40 dgt.
	200.0 to 1600.0	200.0 to 999.0 ± 20 dgt. 1000.0 to 1600.0 ± 40 dgt.

Note: Display will read 0.0 below 120 r/min or 2 r/s.

TOTAL mode (3404 only) - 0 to 499999 5-digit display. (decimal point code used for 100,000 counts and over)

PERIOD mode (3404 only) 600 μ s to 2.000 s - ± 1 dgt. for 4 digit display, ± 2 dgt. for 4 1/2 - digit display.

Specifications

Measurement method	Visible light reflection
Display	LCD 4 1/2 digits (5 digits with the last digit fixed at 0 for 20,000 r/min and higher). TOTAL measurement 5 digits (3404 only). HOLD r/min, r/s, μ marks (MAX, MIN, TOTAL, PERIOD, μ sec, msec, sec (3404 only)) --- displays :50 to 200 mm (1.97" to 7.87") Reflected light detection confirmation Operating temperature/humidity Analog output Power supply Dimensions and mass
Over range display	---
Detection distance	---
Reflected light detection confirmation	Buzzer and LED
Operating temperature/humidity	0 to 40 °C 80% RH or less (no condensation)
Analog output	1000mVDC fs. (3404 only). Output accuracy $\pm 1\%$ rdg. ± 1 mV, output resistance 1k Ω
Power supply	R6P (AA) $\times 4$ (continuous use of 16 hours) or AC adapter (6V, 300mA, 100V only)
Dimensions and mass	Approx. 182H $\times$ 62W $\times$ 38Dmm (7.17"H $\times$ 2.44"W $\times$ 1.50"D) Approx. 260g (9.2 oz.)

Selection guide

	Single-function type 3403	Multi-function type 3404
Measurement method	Non-contact	Non-contact
Sampling rate	0.5 to 2.0 sec	SLOW mode 0.5 to 2.0 sec FAST mode 0.1 to 0.5 sec
Mode select	FAST/SLOW mode select	MAX, MIN, TOTAL (total count measurement) PERIOD (period measurement)
Analog output	---	---
Auto-range function	---	---
Data hold function	---	---
Tripod mounting	---	---
AC power jack	---	---
Accessories	Reflective tape 9211 (1 sheet) Carrying case	Reflective tape 9211 (1 sheet) Output cord 9094 Carrying case

Optional accessories

Reflective tape 9211 (10 sheets)
(30 pieces per sheet, each sheet 12 $\times$ 12 mm)

Output cord 9094 (1.5 m)

9213	(includes 9032, two 9033 and 9212)		9212
Contact adapter	9032	9033	Peripheral ring
	Metal contact tip	Rubber contact tip	

9213 dimensions: 70H $\times$ 62W $\times$ 39Dmm (Not including contact tip)

HIOKI

HIOKI E. E. CORPORATION

HEAD OFFICE:
81 Kotzumai, Ueda, Nagano, 386-1192, Japan
TEL +81-268-28-0562 / FAX +81-268-28-0568
E-mail: os-com@hioki.co.jp

HIOKI USA CORPORATION:
6 Corporate Drive, Cranbury, NJ 08512 USA
TEL +1-609-409-9109 / FAX +1-609-409-9108
E-mail: hioki@hiokiusa.com

HIOKI (Shanghai) Sales & Trading Co., Ltd.:
1608-1610 Shanghai Times Square Office, 93 Hualai Hai Zhong Road, Shanghai, P.R.China POSTCODE: 200021
TEL +86-21-6391-0090/0092 FAX +86-21-6391-0360
E-mail: info-sh@hioki.com.cn

Beijing Office:
A-2602 Freetown, 58 Dong San Huan Nan Road
Beijing, P.R.China POSTCODE: 100022
TEL +86-10-5867-4080/4081 FAX +86-10-5867-4090
E-mail: info-bj@hioki.com.cn

Guangzhou Office:
Room A-3206, Victory Plaza Services Center, No.103, Tianyuan Road, Guangzhou, P.R.China POSTCODE: 510620
TEL +86-20-38382573/2575 FAX +86-20-38392579
E-mail: info-gz@hioki.com.cn

DISTRIBUTED BY

All information correct as of Dec. 2, 2009. All specifications are subject to change without notice.

3403E3-92B Printed in Japan

ภาคผนวก ง.

Data Sheet DAQ Card USB-6009

TNI



Technical Sales

(866) 531-6285
orders@ni.com

Requirements and Compatibility | Ordering Information | Detailed Specifications

For user manuals and dimensional drawings, visit the product page resources tab on ni.com.

Last Revised: 2014-11-06 07:14:12.0

Low-Cost, Bus-Powered Multifunction DAQ for USB

12- or 14-Bit, Up to 48 kS/s, 8 Analog Inputs



- 8 analog inputs at 12 or 14 bits, up to 48 kS/s
- 2 analog outputs at 12 bits, software-timed
- 12 TTL/CMOS digital I/O lines
- One 32-bit, 5 MHz counter

- Digital triggering
- Bus-powered
- 1-year warranty

Overview

With recent bandwidth improvements and new innovations from National Instruments, USB has evolved into a core bus of choice for measurement applications. The NI USB-6008 and USB-6009 are low-cost DAQ devices with easy screw connectivity and a small form factor. With plug-and-play USB connectivity, these devices are simple enough for quick measurements but versatile enough for more complex measurement applications.

[Back to Top](#)

Requirements and Compatibility

OS Information

- Mac OS X
- Windows 2000/XP
- Windows 7
- Windows CE
- Windows Mobile
- Windows Vista 32-bit
- Windows Vista 64-bit

Driver Information

- NI-DAQmx
- NI-DAQmx Base

Software Compatibility

- ANSI C/C++
- LabVIEW
- LabWindows/CVI
- Measurement Studio
- SignalExpress
- Visual Basic .NET
- Visual C#

[Back to Top](#)

Comparison Tables

Product	Analog Inputs	Input Resolution	Max Sampling Rate (kS/s)	Analog Outputs	Output Resolution	Output Rate (Hz)	Digital I/O Lines	32-Bit Counter	Triggering
USB-6008	8 single-ended/4 differential	12	10	2	12	150	12	1	Digital
USB-6009	8 single-ended/4 differential	14	48	2	12	150	12	1	Digital

[Back to Top](#)

Application and Technology

The USB-6008 and USB-6009 are ideal for applications where a low-cost, small form factor and simplicity are essential. Examples include the following:

- Data logging—quick and easy environmental or voltage data logging
- Academic lab use—student ownership of data acquisition hardware for completely interactive lab-based courses (Academic pricing available. Visit the [academic product page](#) for details.)
- OEM applications as I/O for embedded systems

Recommended Software

National Instruments measurement services software, built around NI-DAQmx driver software, includes intuitive application programming interfaces, configuration tools, I/O assistants, and other tools designed to reduce system setup, configuration, and development time. National Instruments recommends using the latest version of NI-DAQmx driver software for application development in NI LabVIEW, SignalExpress, LabWindows/CVI, and Measurement Studio software. To obtain the latest version of NI-DAQmx, visit ni.com/support/daq/versions.

NI measurement services software speeds up your development with features including the following:

- A guide to create fast and accurate measurements with no programming using the DAQ Assistant
- Automatic code generation to create your application in LabVIEW
- LabWindows/CVI, SignalExpress, and C#, Visual Studio .NET, ANSI C/C++, or Visual Basic using Measurement Studio
- Multithreaded streaming technology for 1,000 times performance improvements
- Automatic timing, triggering, and synchronization routing to make advanced applications easy
- More than 3,000 free software downloads at ni.com/zone to jump-start your project
- Software configuration of all digital I/O features without hardware switches/jumpers
- Single programming interface for analog input, analog output, digital I/O, and counters on hundreds of multifunction DAQ hardware devices; M Series devices are compatible with the following versions (or later) of NI application software—LabVIEW, LabWindows/CVI, or Measurement Studio versions 7.x; and SignalExpress 2.x

Every National Instruments DAQ device includes a copy of SignalExpress LE data-logging software, so you can quickly acquire, analyze, and present data without programming. The NI-DAQmx Base driver software is provided for use with Linux, Mac OS X, Windows Mobile, and Windows CE OSS.

Recommended Accessories

The USB-6008 and USB-6009 have removable screw terminals for easy signal connectivity. For extra flexibility when handling multiple wiring configurations, NI offers the USB-600x Connectivity Kit, which includes two extra sets of screw terminals, extra labels, and a screwdriver. In addition, the USB-600x Prototyping Kit provides space for adding more circuitry to the inputs of the USB-6008 or USB-6009.

NI USB DAQ for OEMs

Shorten your time to market by integrating world-class National Instruments OEM measurement products into your embedded system design. Board-only versions of NI USB DAQ devices are available for OEM applications, with competitive quantity pricing and available software customization. The NI OEM Elite Program offers free 30-day trial kits for qualified customers. Visit ni.com/oem for more information.

Information for Student Ownership

To supplement simulation, measurement, and automation theory courses with practical experiments, NI has developed the USB-6008 and USB-6009 student kits, which include the LabVIEW Student Edition and a ready-to-run data logger application. These kits are exclusively for students, giving them a powerful, low-cost, hands-on learning tool. Visit ni.com/academic for more details.

Information for OEM Customers

For information on special configurations and pricing, call (800) 813-3693 (United States only) or visit ni.com/oem. Go to the Ordering Information section for part numbers.

[Back to Top](#)

Ordering Information

For a complete list of accessories, visit the product page on ni.com.

Products	Part Number	Recommended Accessories	Part Number
NI USB-6009			
NI USB-6009 with NI-DAQmx software, LabVIEW SignalExpress LE, and a USB cable.	779026-01	No accessories required.	
NI USB-6009 Student Kit with NI-DAQmx software, LabVIEW SignalExpress LE, and a USB cable. Includes LabVIEW Student Edition.	779321-22	No accessories required.	
NI USB-6009 OEM (no enclosure)	193132-01	No accessories required.	
Prototyping Kit			
NI USB-600x Prototyping Kit	779511-01	No accessories required.	
NI USB-6008			
NI USB-6008 with NI-DAQmx software, LabVIEW SignalExpress LE, and a USB cable.	779051-01	No accessories required.	
NI USB-6008 OEM (no enclosure)	193132-02	No accessories required.	
NI USB-6008 Student Kit with NI-DAQmx software, LabVIEW SignalExpress LE, and a USB cable. Includes LabVIEW Student Edition.	779320-22	No accessories required.	
Connectivity Kit			
NI USB-600x Connectivity Kit	779371-01	No accessories required.	

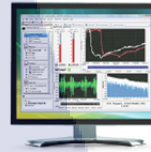
Software Recommendations

NI LabVIEW Full Development System for Windows



- Fully integrated graphical system design software
- Support for a wide range of measurement hardware, I/O, and buses
- Custom, event-driven user interfaces for measurement and control
- Extensive signal processing, analysis, and math functionality
- Advanced compiler to ensure high-performance execution and code optimization
- Includes SSP for professional technical support, online training, and software upgrades

SignalExpress for Windows



- Quickly configure projects without programming
- Control over 400 PC-based and stand-alone instruments
- Log data from more than 250 data acquisition devices
- Perform basic signal processing, analysis, and file I/O
- Scale your application with automatic LabVIEW code generation
- Create custom reports or easily export data to LabVIEW, DIAdem or Microsoft Excel

NI LabWindows™/CVI for Windows



- Real-time advanced 2D graphs and charts
- Complete hardware compatibility with IVI, VISA, DAQ, GPIB, and serial
- Analysis tools for array manipulation, signal processing statistics, and curve fitting
- Simplified cross-platform communication with network variables
- Measurement Studio .NET tools (included in LabWindows/CVI Full only)
- The mark LabWindows is used under a license from Microsoft Corporation.

NI Measurement Studio Standard Edition



- Customizable graphs and charts for WPF, Windows Forms, and ASP.NET Web Forms UI design
- Analysis libraries for basic signal generation
- Hardware integration support with data acquisition and instrument control libraries
- Project setup wizards to speed up development
- Support for Microsoft Visual Studio .NET 2012/2010/2008

[Back to Top](#)

Support and Services

System Assurance Programs

NI system assurance programs are designed to make it even easier for you to own an NI system. These programs include configuration and deployment services for your NI PXI, CompactRIO, or Compact FieldPoint system. The NI Basic System Assurance Program provides a simple integration test and ensures that your system is delivered completely assembled in one box. When you configure your system with the NI Standard System Assurance Program, you can select from available NI system driver sets and application development environments to create customized, reorderable software configurations. Your system arrives fully assembled and tested in one box with your software preinstalled. When you order your system with the standard program, you also receive system-specific documentation including a bill of materials, an integration test report, a recommended maintenance plan, and frequently asked question documents. Finally, the standard program reduces the total cost of owning an NI system by providing three years of warranty coverage and calibration service. Use the online product advisors at ni.com/advisor to find a system assurance program to meet your needs.

Technical Support

Get answers to your technical questions using the following National Instruments resources.

- **Support** - Visit ni.com/support to access the NI KnowledgeBase, example programs, and tutorials or to contact our applications engineers who are located in NI sales offices around the world and speak the local language.
- **Discussion Forums** - Visit forums.ni.com for a diverse set of discussion boards on topics you care about.
- **Online Community** - Visit community.ni.com to find, contribute, or collaborate on customer-contributed technical content with users like you.

Repair

While you may never need your hardware repaired, NI understands that unexpected events may lead to necessary repairs. NI offers repair services performed by highly trained technicians who quickly return your device with the guarantee that it will perform to factory specifications. For more information, visit ni.com/repair.

Training and Certifications

The NI training and certification program delivers the fastest, most certain route to increased proficiency and productivity using NI software and hardware. Training builds the skills to more efficiently develop robust, maintainable applications, while certification validates your knowledge and ability.

- **Classroom training in cities worldwide** - the most comprehensive hands-on training taught by engineers.
- **On-site training at your facility** - an excellent option to train multiple employees at the same time.
- **Online instructor-led training** - lower cost, remote training if classroom or on-site courses are not possible.
- **Course kits** - lowest-cost, self-paced training that you can use as reference guides.
- **Training memberships and training credits** - to buy now and schedule training later.

Visit ni.com/training for more information.

Extended Warranty

NI offers options for extending the standard product warranty to meet the life-cycle requirements of your project. In addition, because NI understands that your requirements may change, the extended warranty is flexible in length and easily renewed. For more information, visit ni.com/warranty.

OEM

NI offers design-in consulting and product integration assistance if you need NI products for OEM applications. For information about special pricing and services for OEM customers, visit ni.com/oem.

Alliance

Our Professional Services Team is comprised of NI applications engineers, NI Consulting Services, and a worldwide National Instruments Alliance Partner program of more than 700 independent consultants and integrators. Services range from start-up assistance to turnkey system integration. Visit ni.com/alliance.

[Back to Top](#)

Detailed Specifications

The following specifications are typical at 25 °C, unless otherwise noted.

Analog Input

Converter type	Successive approximation
Analog inputs	8 single-ended, 4 differential, software selectable
Input resolution	
NI USB-6008	12 bits differential, 11 bits single-ended
NI USB-6009	14 bits differential, 13 bits single-ended
Max sampling rate (aggregate) ¹	
NI USB-6008	10 kS/s
NI USB-6009	48 kS/s
AI FIFO	512 bytes
Timing resolution	41.67 ns (24 MHz timebase)
Timing accuracy	100 ppm of actual sample rate
Input range	
Single-ended	±10 V
Differential	±20 V ² , ±10 V, ±5 V, ±4 V, ±2.5 V, ±2 V, ±1.25 V, ±1 V
Working voltage	±10 V
Input impedance	144 kΩ
Overvoltage protection	±35
Trigger source	Software or external digital trigger
System noise ³	
Single-ended	
±10 V range	5 mVrms
Differential	
±20 V range	5 mVrms
±1 V range	0.5 mVrms

Absolute accuracy at full scale, single-ended		
Range	Typical at 25 °C (mV)	Maximum over Temperature (mV)
±10	14.7	138

Absolute accuracy at full scale, differential ⁴		
Range	Typical at 25 °C (mV)	Maximum over Temperature (mV)
±20	14.7	138
±10	7.73	84.8

Absolute accuracy at full scale, differential ⁴		
Range	Typical at 25 °C (mV)	Maximum over Temperature (mV)
±5	4.28	58.4
±4	3.59	53.1
±2.5	2.56	45.1
±2	2.21	42.5
±1.25	1.70	38.9
±1	1.53	37.5

Analog Output

Analog outputs	2
Output resolution	12 bits
Maximum update rate	150 Hz, software-timed
Output range	0 to +5 V
Output impedance	50 Ω
Output current drive	5 mA
Power-on state	0 V
Slew rate	1 V/μs
Short circuit current	50 mA
Absolute accuracy (no load)	7 mV typical, 36.4 mV maximum at full scale

Digital I/O

Digital I/O	
P0.<0..7>	8 lines
P1.<0..3>	4 lines
Direction control	Each channel individually programmable as input or output
Output driver type	
NI USB-6008	Open collector (open-drain)
NI USB-6009	Each channel individually programmable as active drive (push-pull) or open collector (open-drain)
Compatibility	TTL, LVTTTL, CMOS
Absolute maximum voltage range	–0.5 to 5.8 V with respect to GND
Pull-up resistor	4.7 kΩ to 5 V
Power-on state	Input

Digital logic levels			
Level	Min	Max	Units
Input low voltage	–0.3	0.8	V
Input high voltage	2.0	5.8	V
Input leakage current	—	50	μA
Output low voltage (I = 8.5 mA)	—	0.8	V
Output high voltage			
Active drive (push-pull), I = –8.5 mA	2.0	3.5	V
Open collector (open-drain), I = –0.6 mA, nominal	2.0	5.0	V
Open collector (open-drain), I = –8.5 mA, with external pull-up resistor	2.0	—	V

External Voltage

+5 V output (200 mA maximum)	+5 V typical, +4.85 V minimum
+2.5 V output (1 mA maximum)	+2.5 V typical
+2.5 V accuracy	0.25% max
Reference temperature drift	50 ppm/°C max
Counter	
Number of counters	1
Resolution	32 bits
Counter measurements	Edge counting (falling-edge)
Counter direction	Count up
Pull-up resistor	4.7 kΩ to 5 V
Maximum input frequency	5 MHz
Minimum high pulse width	100 ns
Minimum low pulse width	100 ns
Input high voltage	2.0 V
Input low voltage	0.8 V
Power Requirements	
USB	
4.10 to 5.25 VDC	80 mA typical, 500 mA max
USB suspend	300 μA typical, 500 μA max
Physical Characteristics	
Dimensions	
Without connectors	6.35 cm × 8.51 cm × 2.31 cm (2.50 in. × 3.35 in. × 0.91 in.)
With connectors	8.18 cm × 8.51 cm × 2.31 cm (3.22 in. × 3.35 in. × 0.91 in.)
I/O connectors	USB series B receptacle, (2) 16 position terminal block plug headers
Weight	
With connectors	84 g (3 oz)
Without connectors	54 g (1.9 oz)
Screw-terminal wiring	16 to 28 AWG
Torque for screw terminals	0.22–0.25 N · m (2.0–2.2 lb · in.)
Safety	
If you need to clean the module, wipe it with a dry towel.	
Safety Voltages	
Connect only voltages that are within these limits.	
Channel-to-GND	±30 V max, Measurement Category I
Measurement Category I is for measurements performed on circuits not directly connected to the electrical distribution system referred to as MAINS voltage. MAINS is a hazardous live electrical supply system that powers equipment. This category is for measurements of voltages from specially protected secondary circuits. Such voltage measurements include signal levels, special equipment, limited-energy parts of equipment, circuits powered by regulated low-voltage sources, and electronics.	
 Caution Do not use this module for connection to signals or for measurements within Measurement Categories II, III, or IV.	
Safety Standards	
This product is designed to meet the requirements of the following standards of safety for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use:	
• IEC 61010-1, EN 61010-1 • UL 61010-1, CSA 61010-1	
 Note For UL and other safety certifications, refer to the product label or visit ni.com/certification , search by model number or product line, and click the appropriate link in the Certification column.	
Hazardous Locations	
The NI USB-6008/6009 device is not certified for use in hazardous locations.	

Environmental

The NI USB-6008/6009 device is intended for indoor use only.

Operating temperature

(IEC 60068-2-1 and IEC 60068-2-2)

0 to 55 °C

Operating humidity

(IEC 60068-2-56)

5 to 95% RH, noncondensing

Maximum altitude

2,000 m (at 25 °C ambient temperature)

Storage temperature

(IEC 60068-2-1 and IEC 60068-2-2)

–40 to 85 °C

Storage humidity

(IEC 60068-2-56)

5 to 90% RH, noncondensing

Pollution Degree (IEC 60664)

2

Electromagnetic Compatibility

This product is designed to meet the requirements of the following standards of EMC for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use:

- EN 61326 EMC requirements; Minimum Immunity
- EN 55011 Emissions; Group 1, Class A
- CE, C-Tick, ICES, and FCC Part 15 Emissions; Class A

 **Note** For EMC compliance, operate this device with double-shielded cables.

CE Compliance

This product meets the essential requirements of applicable European Directives, as amended for CE marking, as follows:

- 2006/95/EC; Low-Voltage Directive (safety)
- 2004/108/EC; Electromagnetic Compatibility Directive (EMC)

 **Note** Refer to the Declaration of Conformity (DoC) for this product for any additional regulatory compliance information. To obtain the DoC for this product, visit ni.com/certification, search by module number or product line, and click the appropriate link in the Certification column.

Environmental Management

National Instruments is committed to designing and manufacturing products in an environmentally responsible manner. NI recognizes that eliminating certain hazardous substances from our products is beneficial not only to the environment but also to NI customers.

For additional environmental information, refer to the *NI and the Environment* Web page at ni.com/environment. This page contains the environmental regulations and directives with which NI complies, as well as other environmental information not included in this document.

Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)

 **EU Customers** At the end of their life cycle, all products *must* be sent to a WEEE recycling center. For more information about WEEE recycling centers and National Instruments WEEE initiatives, visit ni.com/environment/weee.htm.

电子信息产品污染控制管理办法（中国 RoHS）



中国客户 National Instruments 符合中国电子信息产品中限制使用某些有害物质指令 (RoHS)。关于 National Instruments 中国 RoHS 合规性信息，请登录 ni.com/environment/rohs_china。(For information about China RoHS compliance, go to ni.com/environment/rohs_china.)

¹ System dependent.

² ±20 V means that |AI+ – (AI–)| ≥ 20 V. However, AI+ and AI– must both be within ±10 V of GND.

³ System noise measured at maximum sample rate.

⁴ Input voltages may not exceed the working voltage range.

[Back to Top](#)

©2013 National Instruments. All rights reserved. CompactRIO, CVI, FieldPoint, LabVIEW, Measurement Studio, National Instruments, NI, ni.com, NI-DAQ, and SignalExpress are trademarks of National Instruments. The mark LabWindows is used under a license from Microsoft Corporation. Windows is a registered trademark of Microsoft Corporation in the United States and other countries. Other product and company names listed are trademarks or trade names of their respective companies. A National Instruments Alliance Partner is a business entity independent from National Instruments and has no agency, partnership, or joint-venture relationship with National Instruments.

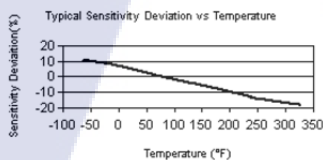
[My Profile](#) | [RSS](#) | [Privacy](#) | [Legal](#) | [Contact NI](#) © 2014 National Instruments Corporation. All rights reserved.

ภาคผนวก จ.

Data Sheet เซ็นเซอร์ PCB 356A01

TNI

Model Number 356A01	TRIAxIAL ICP® ACCELEROMETER		Revision: G ECN #: 42197
Performance	ENGLISH	SI	OPTIONAL VERSIONS
Sensitivity(± 20 %)	5 mV/g	0.51 mV/(m/s²)	Optional versions have identical specifications and accessories as listed for the standard model except where noted below. More than one option may be used.
Measurement Range	± 1000 g pk	± 9810 m/s² pk	
Frequency Range(± 5 %)(y or z axis)	2 to 8000 Hz	2 to 8000 Hz	
Frequency Range(± 5 %)(x axis)	2 to 5000 Hz	2 to 5000 Hz	
Resonant Frequency	≥ 8 kHz	≥ 8 kHz	
Broadband Resolution(1 to 10,000 Hz)	0.003 g rms	0.03 m/s² rms	
Non-Linearity	≤ 1 %	≤ 1 %	
Transverse Sensitivity	≤ 5 %	≤ 5 %	
Environmental			
Overload Limit(Shock)	± 10,000 g pk	± 98,100 m/s² pk	
Temperature Range(Operating)	-65 to +250 °F	-54 to +121 °C	
Temperature Response	See Graph	See Graph	
Electrical			
Excitation Voltage	18 to 30 VDC	18 to 30 VDC	
Constant Current Excitation	2 to 20 mA	2 to 20 mA	
Output Impedance	≤ 200 Ohm	≤ 200 Ohm	
Output Bias Voltage	7 to 12 VDC	7 to 12 VDC	
Discharge Time Constant	0.24 to 1.0 sec	0.24 to 1.0 sec	
Settling Time(within 10% of bias)	<3 sec	<3 sec	
Spectral Noise(1 Hz)	1200 µg/√Hz	11,772 (µm/sec²)/√Hz	
Spectral Noise(10 Hz)	300 µg/√Hz	2943 (µm/sec²)/√Hz	
Spectral Noise(100 Hz)	100 µg/√Hz	981 (µm/sec²)/√Hz	
Spectral Noise(1 kHz)	30 µg/√Hz	294 (µm/sec²)/√Hz	
Physical			
Sensing Element	Ceramic	Ceramic	
Sensing Geometry	Shear	Shear	
Housing Material	Titanium	Titanium	
Sealing	Hermetic	Hermetic	
Size (Height x Length x Width)	0.25 in x 0.25 in x 0.25 in	6.35 mm x 6.35 mm x 6.35 mm	
Weight(without cable)	0.04 oz	1.0 gm	
Electrical Connector	Integral Cable	Integral Cable	
Electrical Connection Position	Side	Side	
Cable Length	5 ft	1.5 m	
Cable Type	034 4-cond Shielded	034 4-cond Shielded	
Mounting	Adhesive	Adhesive	
NOTES: [1] Typical. [2] 250° F to 325° F data valid with HT option only. [3] Zero-based, least-squares, straight line method. [4] See PCB Declaration of Conformance PS023 for details.			
SUPPLIED ACCESSORIES: Model 034G05 4-cond, shielded cable, 5 ft (1.5M), 4-pin plug to (3) BNC plugs (1) Model 080A105 Petro Wax (1) Model 080A90 Quick Bonding Gel (1) Model ACS-1T NIST traceable triaxial amplitude response, 10 Hz to upper 5% frequency. (1)			
Entered: AP Engineer: JJB Sales: WDC Approved: JJB Spec Number: Date: 11/8/2013 Date: 11/8/2013 Date: 11/8/2013 Date: 11/8/2013 21822			
PCB PIEZOTRONICS™ Phone: 716-684-0001 Fax: 716-684-0987 E-Mail: info@pcb.com 3425 Walden Avenue, Depew, NY 14043			



All specifications are at room temperature unless otherwise specified.
In the interest of constant product improvement, we reserve the right to change specifications without notice.
ICP® is a registered trademark of PCB Group, Inc.