

การศึกษาพฤติกรรมการสันเสื่อของเพลลาที่มีรอยแตกตามแนวหน้าตัด



นาย รัชตพงษ์ บุญวัตรสกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

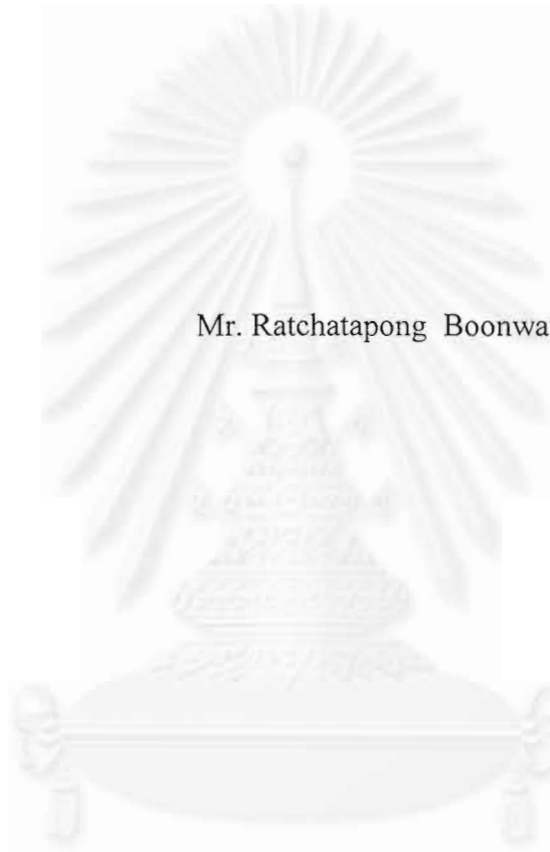
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-334-843-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

STUDY OF VIBRATION BEHAVIOR OF A SHAFT  
CONTAINING A TRANSVERSE CRACK



Mr. Ratchatapong Boonwatsakul

สถาบันวิทยบริการ

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

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering  
Chulalongkorn University

Academic Year 1999

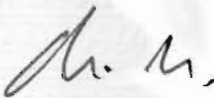
ISBN 974-334-843-3


หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาพฤติกรรมการสัมผัสเอนของเพลลาที่มีรอยแตก  
ตามแนวหน้าตัด  
โดย นาย รัชตพงษ์ บุญวัตรสกุล  
ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล  
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ก่อเกียรติ บุญชูกุล

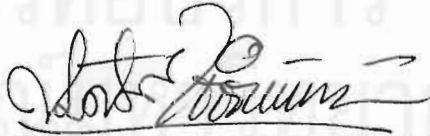
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต


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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. อธิธิพล ปานงาม)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ก่อเกียรติ บุญชูกุล)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ไชยะภินันท์)

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

รัชตพงษ์ บุญวัตรสกุล : การศึกษาพฤติกรรมการสั่นสะเทือนของเพลลาที่มีรอยแตกตามแนวหน้าตัด (STUDY OF VIBRATION BEHAVIOR OF A SHAFT CONTAINING A TRANSVERSE CRACK) อ.ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร. ก่อเกียรติ บุญชูกุล ; 129 หน้า.  
ISBN 974-334-843-3

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการสั่นสะเทือนและหารูปแบบของสัญญาณการสั่นสะเทือนที่สามารถบ่งชี้ถึงการเกิดรอยแตกตามแนวหน้าตัดในเพลลา ในการทดลองจะสร้างรอยแตกขึ้นในเพลลาโดยให้เพลลาแต่ละเส้นมีระดับความลึกของรอยแตกและตำแหน่งของรอยแตกแตกต่างกัน จากนั้นทำการตรวจวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนของเพลลาที่มีรอยแตกแต่ละเส้นและเปรียบเทียบกับสัญญาณการสั่นสะเทือนของเพลลาที่ไม่มีรอยแตก

การทดลองเป็นสภาวะที่ไม่มีภาระจึงมีเพียงแรงเนื่องจากน้ำหนักของตัวเพลลาในแนวตั้งเท่านั้น ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อเกิดรอยแตกตามแนวหน้าตัดขึ้นในเพลลาแล้วจะทำให้สัญญาณการสั่นสะเทือนที่ความถี่  $1 \times \text{rpm}$  และ  $2 \times \text{rpm}$  ในแนวตั้งมีขนาดเพิ่มขึ้น ในขณะที่สัญญาณการสั่นสะเทือนที่ความถี่  $1 \times \text{rpm}$  และ  $2 \times \text{rpm}$  ในแนวนอนจะมีขนาดคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามระดับความลึกของรอยแตกที่เพิ่มขึ้น และยังพบว่าเมื่อรอยแตกมีระดับความลึกเพิ่มขึ้นจะสังเกตเห็นการเพิ่มขึ้นของขนาดสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ความถี่  $2 \times \text{rpm}$  ได้ชัดเจนกว่าสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ความถี่  $1 \times \text{rpm}$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล

สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา.....2542

ลายมือชื่อนิสิต.....รัชตพงษ์ บุญวัตรสกุล

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

## 4070390321 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD : VIBRATION / CRACK / SHAFT / TRANSVERSE

RATCHATAPONG BOONWATSAKUL : STUDY OF VIBRATION  
BEHAVIOR OF A SHAFT CONTAINING A TRANSVERSE CRACK.

THESIS ADVISOR : ASSIST.PROF.KAUKEART BOONCHUKOSOL,  
Dr.Eng. 129 pp.

ISBN 974-334-843-3

The intention of this research is to study the vibration behavior and the patterns of vibration signals that indicate a transverse crack on a shaft. In the experiments conducted, a crack was created on each shaft. The crack on each of shafts had different depth and was located on different position. Then, the vibration signals of each shaft were investigated and compared with the vibration signals of uncracked shaft.

The experiments are no-load condition and have only force due to the shaft weight in the vertical direction. The results of these experiments show that a transverse crack on a shaft causes the increasing in the amplitude of vibration signals at 1 x rpm and 2 x rpm frequency in the vertical direction. But the amplitude of vibration signals at the same frequency in the horizontal direction is constant and does not depend on the increasing of the crack depth. Moreover, the increasing in the amplitude of vibration signals at 2 x rpm frequency is more clearly change than that of 1 x rpm frequency when the crack depth increases.



ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล

สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา.....2542

ลายมือชื่อนิสิต.....รัชตพงษ์ บุญวัชรกุล

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....K. P. B.

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างยิ่งของ ผศ.ดร. ก่อเกียรติ บุญชูกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รวมทั้ง รศ.ดร. อธิธิพล ปานงาม รศ.ดร. สมศักดิ์ ไชยะภินันท์ และ ผศ.ดร. ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ ซึ่งทั้งสี่ท่านได้ให้คำปรึกษา แนะนำ และหาแนวทางการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำวิจัยตลอดมา ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงต่อความกรุณาจากอาจารย์ทั้งสี่ท่าน

งานวิจัยนี้นับได้ว่าเป็นผลงานหนึ่งของหน่วยปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีการบำรุงรักษาเครื่องจักรกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เอกสารทางวิชาการ อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นของหน่วยปฏิบัติการฯ จึงต้องขอขอบพระคุณหน่วยปฏิบัติการฯเป็นอย่างยิ่ง และเนื่องจากทุนวิจัยครั้งนี้ได้รับมาจากทุนอุดหนุนการวิจัยของบัณฑิตวิทยาลัย จึงขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัยมา ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบคุณ อาจารย์ จิระพงศ์ กสิวิทย์อำนวย ที่ให้ความช่วยเหลือในการค้นคว้าเอกสารทางวิชาการ รวมทั้งให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์แม้ว่าท่านอาจารย์กำลังศึกษาต่ออยู่ ณ ประเทศญี่ปุ่นก็ตาม ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งต่อความกรุณาของท่านอาจารย์เป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ นิสิตปริญญาโทและปริญญาเอก ของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งคอยให้กำลังใจและให้คำแนะนำต่างๆ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัย

ขอขอบคุณน้อง กุลชาติ เอกวรรณ นิสิตระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความร่วมมือทำการทดลองจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณบิดามารดา ที่สนับสนุนการศึกษาของผู้วิจัย มีความเข้าใจและคอยให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมา ทำให้สามารถฝ่าฟันอุปสรรคนานาประการจนสำเร็จการศึกษา

ประโยชน์อันใดจากงานวิจัยนี้ ขอมอบเป็นกตัญญูตามบูชาแต่บิดามารดา ครูอาจารย์ ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน เทอญ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญภาพ .....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ .....	ณ
บทที่	
1 บทนำ .....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์ .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ .....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ .....	2
1.4 การดำเนินงานวิจัย .....	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์ .....	4
2 ทฤษฎีการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน .....	5
2.1 การสั่นสะเทือน .....	5
2.2 การสั่นสะเทือนแบบบิด .....	6
2.3 โดเมนความถี่และโดเมนเวลา .....	6
2.4 การแปลงฟูรีเยร์ .....	8
2.5 การสั่นสะเทือนของเครื่องจักร .....	9
3 การสั่นสะเทือนของเพลลาที่มีรอยแตก .....	10
3.1 การสั่นสะเทือนแบบบิด .....	10
3.2 การสั่นสะเทือนตามขวาง .....	17

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4 การทดลองวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนของเพลลา ที่มีรอยแตกตามแนวหน้าตัด.....	19
4.1 อุปกรณ์การทดลอง.....	19
4.2 การทดลอง.....	24
4.2.1 การทดลองขั้นที่ 1.....	24
4.2.2 การทดลองขั้นที่ 2.....	28
4.3 การตรวจวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน.....	29
4.4 ผลการทดลอง.....	32
4.4.1 ผลการทดลองขั้นที่ 1.....	33
4.4.2 ผลการทดลองที่ 2.1.....	38
4.4.3 ผลการทดลองที่ 2.2.....	43
รูปแบบของสัญญาณการสั่นสะเทือนเมื่อรอยแตกมีความลึกเพิ่มขึ้น (สัญญาณการสั่นสะเทือนของเพลลาชุดที่ 1).....	44
แนวโน้มของสัญญาณการสั่นสะเทือนเมื่อรอยแตกมีความลึกเพิ่มขึ้น (สัญญาณการสั่นสะเทือนของเพลลาชุดที่ 1).....	56
รูปแบบของสัญญาณการสั่นสะเทือนเมื่อรอยแตกมีความลึกเพิ่มขึ้น (สัญญาณการสั่นสะเทือนของเพลลาชุดที่ 2).....	62
แนวโน้มของสัญญาณการสั่นสะเทือนเมื่อรอยแตกมีความลึกเพิ่มขึ้น (สัญญาณการสั่นสะเทือนของเพลลาชุดที่ 2).....	74
รูปแบบของสัญญาณการสั่นสะเทือนเมื่อรอยแตกมีความลึกเพิ่มขึ้น (สัญญาณการสั่นสะเทือนของเพลลาชุดที่ 3).....	80
แนวโน้มของสัญญาณการสั่นสะเทือนเมื่อรอยแตกมีความลึกเพิ่มขึ้น (สัญญาณการสั่นสะเทือนของเพลลาชุดที่ 3).....	92
4.5 อภิปรายผลการทดลอง.....	98
4.5.1 การทดลองขั้นที่ 1.....	98
4.5.2 การทดลองขั้นที่ 2.....	98



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5 สรุปผลการวิจัย ประโยชน์ที่ได้รับ และข้อเสนอแนะ.....	107
รายการอ้างอิง.....	109
ภาคผนวก.....	110
ภาคผนวก ก การคำนวณภาระที่ใช้ในการทดลอง.....	110
ภาคผนวก ข การตรวจสอบหารอยแตกโดยการดูดัชนีของเหลว.....	112
ภาคผนวก ค การประกอบเพลลาเข้ากับชุดทดลอง.....	114
ภาคผนวก ง การวัดความลึกของรอยแตก.....	118
ภาคผนวก จ การทำ bump test.....	119
ภาคผนวก ฉ ขนาดของชุดทดลอง.....	127
ประวัติผู้วิจัย.....	129

## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 วิธีการ lumped masses and lumped springs .....	6
2.2 ความสัมพันธ์ของสัญญาณในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ .....	7
3.1 การแบ่งเฟลาเป็นมวลก้อนซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยสปริงที่ไม่มีมวล .....	10
3.2 การแบ่งเฟลาเป็นมวลก้อนซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยสปริงที่ไม่มีมวล .....	11
3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสั่นสะเทือนของ lumped mass 1 และความเร็วรอบของเฟลา เปรียบเทียบระหว่างเฟลาที่สมบูรณ์กับ เฟลาที่มีรอยแตกตามแนวหน้าตัดที่ lumped mass 3 .....	14
3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสั่นสะเทือนของ lumped mass 2 และความเร็วรอบของเฟลา เปรียบเทียบระหว่างเฟลาที่สมบูรณ์กับ เฟลาที่มีรอยแตกตามแนวหน้าตัดที่ lumped mass 3 .....	14
3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสั่นสะเทือนของ lumped mass 3 และความเร็วรอบของเฟลา เปรียบเทียบระหว่างเฟลาที่สมบูรณ์กับ เฟลาที่มีรอยแตกตามแนวหน้าตัดที่ lumped mass 3 .....	14
3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสั่นสะเทือนของ lumped mass 4 และความเร็วรอบของเฟลา เปรียบเทียบระหว่างเฟลาที่สมบูรณ์กับ เฟลาที่มีรอยแตกตามแนวหน้าตัดที่ lumped mass 3 .....	15
3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสั่นสะเทือนของ lumped mass 5 และความเร็วรอบของเฟลา เปรียบเทียบระหว่างเฟลาที่สมบูรณ์กับ เฟลาที่มีรอยแตกตามแนวหน้าตัดที่ lumped mass 3 .....	15
3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสั่นสะเทือนของ lumped mass 1 และความเร็วรอบของเฟลา แสดงค่าความถี่ธรรมชาติฮาร์โมนิกที่ 1 .....	16
3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสั่นสะเทือนของ lumped mass 1 และความเร็วรอบของเฟลา แสดงค่าความถี่ธรรมชาติฮาร์โมนิกที่ 2 .....	16
3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสั่นสะเทือนของ lumped mass 1 และความเร็วรอบของเฟลา แสดงค่าความถี่ธรรมชาติฮาร์โมนิกที่ 3 .....	16
3.11 การเคลื่อนที่ตามขวางของเฟลาที่มีรอยแตก .....	17

## สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.12 แบบจำลองการเคลื่อนที่ของมวลที่มีความไม่สมดุล.....	17
3.13 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสั่นสะเทือนและความเร็วรอบของเพลลา เปรียบเทียบระหว่างเพลลาที่สมบูรณ์กับเพลลาที่มีรอยแตก.....	18
4.1 เพลลา S45C ที่ใช้ในการทดลอง.....	20
4.2 Dynamic Servo Machine ของ Sakinomiya.....	20
4.3 ฐานชุดทดลอง.....	21
4.4 มอเตอร์.....	21
4.5 แบร์ริงลูกปืน.....	22
4.6 แทคโคมิเตอร์.....	22
4.7 อินเวอร์เตอร์.....	23
4.8 คัปปลิง.....	23
4.9 Microlog CMVA10 และ หัววัดสัญญาณการสั่นสะเทือน.....	24
4.10 ตำแหน่งการทำรอยบากในเพลลา.....	25
4.11 การติดตั้งเพลลาบนเครื่อง Dynamic Servo Machine.....	25
4.12 การประมาณความถี่ของรอยแตกจาก ความยาวของรอยแตกตามเส้นรอบวง.....	26
4.13 เพลลาและตำแหน่งของรอยแตกหลังการกลึง.....	27
4.14 การตรวจวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน.....	30
4.15 การตรวจวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนในแนวตั้ง.....	30
4.16 การตรวจวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนในแนวนอน.....	31
4.17 ขนาดและส่วนประกอบของชุดทดลอง.....	32
4.18 เพลลาหลังจากการกลึงแล้ว.....	33
4.19 ลักษณะหน้าตัดของรอยแตกก่อนทำการกลึง (ซ้าย) และหลังจากทำการกลึง (ขวา).....	33
4.20 หน้าตัดรอยแตกของเพลลาชุดที่ 1.....	34
4.21 หน้าตัดรอยแตกของเพลลาชุดที่ 2.....	35

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.22 หน้าตัดรอยแตกของเพลาชุดที่ 3 .....	36
4.23 สัญญาณสันสะเทือนแนวตั้งเพื่อศึกษาผลของรอยแตก ที่มีต่อความถี่ธรรมชาติของระบบ .....	39
4.24 สัญญาณสันสะเทือนแนวนอนเพื่อศึกษาผลของรอยแตก ที่มีต่อความถี่ธรรมชาติของระบบ .....	41
4.25 สัญญาณสันสะเทือนของเพลาชุดที่ 1 ความเร็วรอบ 600 rpm แนวตั้ง .....	44
4.26 สัญญาณสันสะเทือนของเพลาชุดที่ 1 ความเร็วรอบ 600 rpm แนวนอน .....	45
4.27 สัญญาณสันสะเทือนของเพลาชุดที่ 1 ความเร็วรอบ 800 rpm แนวตั้ง .....	46
4.28 สัญญาณสันสะเทือนของเพลาชุดที่ 1 ความเร็วรอบ 800 rpm แนวนอน .....	47
4.29 สัญญาณสันสะเทือนของเพลาชุดที่ 1 ความเร็วรอบ 1000 rpm แนวตั้ง .....	48
4.30 สัญญาณสันสะเทือนของเพลาชุดที่ 1 ความเร็วรอบ 1000 rpm แนวนอน .....	49
4.31 สัญญาณสันสะเทือนของเพลาชุดที่ 1 ความเร็วรอบ 1200 rpm แนวตั้ง .....	50
4.32 สัญญาณสันสะเทือนของเพลาชุดที่ 1 ความเร็วรอบ 1200 rpm แนวนอน .....	51
4.33 สัญญาณสันสะเทือนของเพลาชุดที่ 1 ความเร็วรอบ 1300 rpm แนวตั้ง .....	52
4.34 สัญญาณสันสะเทือนของเพลาชุดที่ 1 ความเร็วรอบ 1300 rpm แนวนอน .....	53

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.35 สัญญาณสั่นสะเทือนของเพลาชุดที่ 1 ความเร็วรอบ 1400 rpm แนวตั้ง.....	54
4.36 สัญญาณสั่นสะเทือนของเพลาชุดที่ 1 ความเร็วรอบ 1400 rpm แนวนอน.....	55
4.37 สัญญาณสั่นสะเทือนของเพลาชุดที่ 2 ความเร็วรอบ 600 rpm แนวตั้ง.....	62
4.38 สัญญาณสั่นสะเทือนของเพลาชุดที่ 2 ความเร็วรอบ 600 rpm แนวนอน.....	63
4.39 สัญญาณสั่นสะเทือนของเพลาชุดที่ 2 ความเร็วรอบ 800 rpm แนวตั้ง.....	64
4.40 สัญญาณสั่นสะเทือนของเพลาชุดที่ 2 ความเร็วรอบ 800 rpm แนวนอน.....	65
4.41 สัญญาณสั่นสะเทือนของเพลาชุดที่ 2 ความเร็วรอบ 1000 rpm แนวตั้ง.....	66
4.42 สัญญาณสั่นสะเทือนของเพลาชุดที่ 2 ความเร็วรอบ 1000 rpm แนวนอน.....	67
4.43 สัญญาณสั่นสะเทือนของเพลาชุดที่ 2 ความเร็วรอบ 1200 rpm แนวตั้ง.....	68
4.44 สัญญาณสั่นสะเทือนของเพลาชุดที่ 2 ความเร็วรอบ 1200 rpm แนวนอน.....	69
4.45 สัญญาณสั่นสะเทือนของเพลาชุดที่ 2 ความเร็วรอบ 1300 rpm แนวตั้ง.....	70
4.46 สัญญาณสั่นสะเทือนของเพลาชุดที่ 2 ความเร็วรอบ 1300 rpm แนวนอน.....	71
4.47 สัญญาณสั่นสะเทือนของเพลาชุดที่ 2 ความเร็วรอบ 1400 rpm แนวตั้ง.....	72

## สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.48 สัญญาณสั่นสะเทือนของเพลาชุดที่ 2 ความเร็วรอบ 1400 rpm แนวนอน.....	73
4.49 สัญญาณสั่นสะเทือนของเพลาชุดที่ 3 ความเร็วรอบ 600 rpm แนวตั้ง.....	80
4.50 สัญญาณสั่นสะเทือนของเพลาชุดที่ 3 ความเร็วรอบ 600 rpm แนวนอน.....	81
4.51 สัญญาณสั่นสะเทือนของเพลาชุดที่ 3 ความเร็วรอบ 800 rpm แนวตั้ง.....	82
4.52 สัญญาณสั่นสะเทือนของเพลาชุดที่ 3 ความเร็วรอบ 800 rpm แนวนอน.....	83
4.53 สัญญาณสั่นสะเทือนของเพลาชุดที่ 3 ความเร็วรอบ 1000 rpm แนวตั้ง.....	84
4.54 สัญญาณสั่นสะเทือนของเพลาชุดที่ 3 ความเร็วรอบ 1000 rpm แนวนอน.....	85
4.55 สัญญาณสั่นสะเทือนของเพลาชุดที่ 3 ความเร็วรอบ 1200 rpm แนวตั้ง.....	86
4.56 สัญญาณสั่นสะเทือนของเพลาชุดที่ 3 ความเร็วรอบ 1200 rpm แนวนอน.....	87
4.57 สัญญาณสั่นสะเทือนของเพลาชุดที่ 3 ความเร็วรอบ 1300 rpm แนวตั้ง.....	88
4.58 สัญญาณสั่นสะเทือนของเพลาชุดที่ 3 ความเร็วรอบ 1300 rpm แนวนอน.....	89
4.59 สัญญาณสั่นสะเทือนของเพลาชุดที่ 3 ความเร็วรอบ 1400 rpm แนวตั้ง.....	90
4.60 สัญญาณสั่นสะเทือนของเพลาชุดที่ 3 ความเร็วรอบ 1400 rpm แนวนอน.....	91

## สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก-1 แผนภูมิแรง (Free Body Diagram).....	110
ก-2 ภาพแสดงการกระจายความเค้นบริเวณหน้าตัด.....	110
ข-1 การพันสารแทรกซึมบนเพลลา.....	112
ข-2 การพันสารสร้างภาพเพื่อให้เห็นเป็นภาพของรอยแตก.....	113
ค-1 การสวมเพลลาผ่านแบริ่งชุดที่ 2.....	114
ค-2 การสวมเพลลาผ่านแบริ่งชุดที่ 1 และประกอบเข้ากับคัปปลิง.....	115
ค-3 การจับยึดเพลลากับแบริ่ง.....	115
ค-4 การจับยึดเพลลากับคัปปลิง.....	116
ค-5 ตำแหน่งรอยแตกของเพลลา.....	117
ง-1 ตำแหน่งที่วัดความลึกของรอยแตก.....	118
จ-1 เพลลาที่ทำการเจาะร่องเพื่อใช้ในการทำ bump test (CD14).....	119
จ-2 ตำแหน่งการจับยึดเพลลาการทำ bump test เพลลา บนเครื่องกลึงแบบที่ 1.....	120
จ-3 สัญญาณการสันสะท้อนการทำ bump test เพลลา บนเครื่องกลึงแบบที่ 1.....	122
จ-4 ตำแหน่งการจับยึดเพลลาการทำ bump test เพลลา บนเครื่องกลึงแบบที่ 2.....	122
จ-5 สัญญาณการสันสะท้อนการทำ bump test เพลลา บนเครื่องกลึงแบบที่ 2.....	124
จ-6 สัญญาณการสันสะท้อนการทำ bump test ที่เพลลาบนฐานชุดทดลอง.....	125
จ-7 สัญญาณการสันสะท้อนการทำ bump test ที่ฐานชุดทดลอง.....	126
ฉ-1 แบบของฐานชุดทดลอง.....	127
ฉ-2 แบบของฐานชุดทดลองเมื่อประกอบเพลลา.....	128

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย
CD11	เพลลาในชุดที่ 1 มีรอยแตกลึก 1/8 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง
CD12	เพลลาในชุดที่ 1 มีรอยแตกลึก 1/4 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง
CD13	เพลลาในชุดที่ 1 มีรอยแตกลึก 1/2 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง
CD21	เพลลาในชุดที่ 2 มีรอยแตกลึก 1/8 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง
CD22	เพลลาในชุดที่ 2 มีรอยแตกลึก 1/4 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง
CD23	เพลลาในชุดที่ 2 มีรอยแตกลึก 1/2 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง
CD31	เพลลาในชุดที่ 3 มีรอยแตกลึก 1/8 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง
CD32	เพลลาในชุดที่ 3 มีรอยแตกลึก 1/4 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง
CD33	เพลลาในชุดที่ 3 มีรอยแตกลึก 1/2 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง
d	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเพลลา
G	Modulus of Rigidity
H1	ตำแหน่งวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนแนวอนที่แบริงชุดที่ 1
H2	ตำแหน่งวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนแนวอนที่แบริงชุดที่ 2
$I_p$	Polar Moment of Inertia
J	Mass Moment of Inertia
K	Torsional Stiffness
k	Spring Stiffness
L	ความยาวของเพลลา
r	รัศมีของหน้าตัดเพลลา
Std	เพลลามาตรฐานที่ไม่มีรอยแตก
T	แรงบิด
V1	ตำแหน่งวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนแนวตั้งที่แบริงชุดที่ 1
V2	ตำแหน่งวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนแนวตั้งที่แบริงชุดที่ 2
$\theta$	มุมบิด
$\rho$	ความหนาแน่นของเพลลา
$\omega$	อัตราเร็วเชิงมุม
$\tau$	คาบของการเคลื่อนที่



# บทที่ 1

## บทนำ



### 1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์

ในช่วงเวลาหลายปีที่ผ่านมา ประเทศไทยมีการขยายตัวทางอุตสาหกรรมปิโตรเคมี และเพิ่มกำลังการผลิตขึ้นเป็นอย่างมาก ซึ่งส่งผลให้มีการนำระบบการบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์ (predictive maintenance) เข้ามาใช้ในการจัดการบำรุงรักษาเครื่องจักรกล การบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์เป็นการบำรุงรักษาที่จะตรวจสอบสภาพของเครื่องจักรได้โดยไม่ต้องหยุดเครื่อง และสามารถทำนายอายุการใช้งานจริงของชิ้นส่วนต่างๆ ของเครื่องจักรก่อนเกิดการเสียหายได้ถูกต้องแม่นยำมากขึ้น ดังนั้นการบำรุงรักษาด้วยวิธีนี้จึงสามารถลดค่าใช้จ่ายในส่วนที่ต้องสูญเสียไปเนื่องจากการเปลี่ยนชิ้นส่วนของเครื่องจักรก่อนเวลาอันสมควร รวมไปถึงความเสียหายอย่างฉับพลันที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนนั้นๆ และอุปกรณ์ใกล้เคียง และยังสามารถวางแผนการบำรุงรักษาได้อย่างเหมาะสม ทำให้ใช้เวลาในการหยุดเครื่องเพื่อทำการซ่อมบำรุงน้อยลง และยังสร้างความมั่นใจในการดำเนินการผลิตของโรงงานอีกด้วย ดังข้อมูลแสดงการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาประเภทต่างๆ

Run to Failure	17-18	U.S. dollars/Hp/Year
Preventive Maintenance	11-13	U.S. dollars/Hp/Year
Predictive Maintenance	7-8	U.S. dollars/Hp/Year

\* 1985 U.S dollars

Source: Electric Power Research Institute, Poto Alto, Calif.

การเฝ้าตรวจสอบสัญญาณการสั่นสะเทือน (vibration monitoring) เป็นวิธีการหลักที่ใช้ในการบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์ เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายในการตรวจวัด อุปกรณ์ที่ใช้มีอยู่ทั่วไป ราคาเหมาะสม และสามารถบ่งชี้สภาพการทำงานของเครื่องจักรได้ในขณะที่เครื่องจักรยังทำงานอยู่ ทำให้ทราบล่วงหน้าถึงปัญหาที่เริ่มเกิดขึ้นกับชิ้นส่วนของเครื่องจักรและสามารถวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาได้ การเฝ้าตรวจสอบสัญญาณการสั่นสะเทือนของเครื่องจักร สามารถจำแนกถึงปัญหาที่เกิดขึ้นได้หลายแบบเช่น การไม่สมดุล (unbalance) การเยื้องแนวแกน (misalignment) และความเสียหายของดัลล์ลูกปืน (bearing defect) เป็นต้น

เพลลาเป็นชิ้นส่วนพื้นฐานของเครื่องจักรกลหมุน (rotating machinery) โดยทั่วไป ซึ่งอาจเกิดความเสียหายได้หลายอย่าง เช่น เพลลาโก่ง (bent shaft) การเยื้องแนวแกน (misalignment) การไม่สมดุล (unbalance) และรอยแตกในเพลลา (shaft crack) เป็นต้น ในส่วนของเพลลาโก่ง การเยื้องแนวแกน และการไม่สมดุลนั้น ได้มีการศึกษาและสามารถระบุลักษณะของสัญญาณการสั่นสะเทือนของแต่ละปัญหาได้แล้ว แต่สำหรับรอยแตกในเพลลานั้นยังไม่มีลักษณะของสัญญาณการสั่นสะเทือนเฉพาะที่จะบ่งชี้ถึงการเกิดรอยแตกขึ้นในเพลลาได้

รอยแตกในเพลลาเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ เช่น stress corrosion cracking (SCC), ภาวะจากการเยื้องแนวแกน (misalignment pre-load) และความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิ (thermal stress) ซึ่งสามารถนำไปสู่ความเสียหายอย่างรุนแรงกับเครื่องจักรได้ ดังนั้นถ้าสามารถตรวจพบรอยแตกในเพลลาด้วยวิธีการตรวจวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนได้ ก็จะสามารถหลีกเลี่ยงความเสียหายอย่างรุนแรงที่จะเกิดขึ้นและสามารถวางแผนการบำรุงรักษาได้อย่างเหมาะสม

## 1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการสั่นสะเทือนและหารูปแบบสัญญาณการสั่นสะเทือนที่สามารถบ่งชี้ถึงการเกิดรอยแตกตามแนวหน้าตัดในเพลลา

## 1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานการสั่นสะเทือนและทฤษฎีการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน
2. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เบื้องต้นเพื่อศึกษาพฤติกรรมการสั่นสะเทือนบางอย่างที่อาจเป็นตัวบ่งชี้ความเป็นไปได้ของการเกิดรอยแตกตามแนวหน้าตัดขึ้นในเพลลา และใช้เป็นแนวทางในการตรวจวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนจากชุดทดลอง
3. ตรวจวัดและวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนจากชุดทดลองของเพลลาที่มีรอยแตกตามแนวหน้าตัด เปรียบเทียบกับสัญญาณการสั่นสะเทือนจากเพลลาที่ไม่มีรอยแตก และสรุปผลถึงความเป็นไปได้ในการที่จะบ่งชี้ถึงการเกิดรอยแตกตามแนวหน้าตัดขึ้นในเพลลา

#### 1.4 การดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานของการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนด้วยสเปกตรัม  
ทำการศึกษาทฤษฎีพื้นฐานของการสั่นสะเทือน วิธีการตรวจวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนและเครื่องมือต่างๆ ศึกษาวิธีการแปลงสัญญาณบนโดเมนเวลาให้เป็นโดเมนความถี่ด้วยเครื่องวิเคราะห์เฟอเอฟที และศึกษาวิธีการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน
2. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พื้นฐาน เพื่อศึกษาพฤติกรรมการสั่นสะเทือนเบื้องต้นของเพลลาที่มีรอยแตกตามแนวหน้าตัด  
ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เบื้องต้นหลายๆ แบบ เพื่อหาลักษณะการสั่นสะเทือนที่เป็นไปได้ของเพลลาที่มีรอยแตกตามแนวหน้าตัด เพื่อที่จะนำไปใช้เป็นแนวทางการกำหนดพารามิเตอร์ในการตรวจวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนจากชุดทดลอง
3. สร้างรอยแตกตามแนวหน้าตัดในเพลลาและนำไปประกอบกับชุดทดลองการสั่นสะเทือน  
ทำการสร้างรอยแตกตามแนวหน้าตัดในเพลลา โดยจะสร้างเพลลาแต่ละเส้นให้มีตำแหน่งและระดับความลึกของรอยแตกแตกต่างกัน แล้วนำไปประกอบกับชุดทดลองการสั่นสะเทือน
4. ตรวจวัดและวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนของเพลลาที่มีรอยแตก  
ทำการตรวจวัดและวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนที่วัดได้จากเพลลาแต่ละเส้นที่มีตำแหน่งและระดับความลึกของรอยแตก แตกต่างกันและเปรียบเทียบกับสัญญาณการสั่นสะเทือนจากเพลลาที่ไม่มีรอยแตก
5. อภิปรายและสรุปผล  
อภิปรายและสรุปผลการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน ถึงความเป็นไปได้ในการตรวจวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนของเพลลาที่มีรอยแตกตามแนวหน้าตัด รวมทั้งรูปแบบและแนวโน้มของสัญญาณการสั่นสะเทือนของเพลลาที่มีรอยแตกตามแนวหน้าตัด

### 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์

1. รูปแบบของสัญญาณการสั่นสะเทือนของเพลลาที่มีรอยแตกตามแนวหน้าตัดที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการบำรุงรักษาเครื่องจักรกลหมุนและตรวจวัดความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับเพลลา ทำให้สามารถป้องกันความเสียหายอย่างรุนแรงที่จะเกิดขึ้นและเป็นประโยชน์ในการวางแผนการจัดการบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์ของเครื่องจักรกลที่มีเพลลาโดยทั่วไป
2. เป็นพื้นฐานในการศึกษาการสั่นสะเทือนของเพลลาที่มีรอยแตกและสามารถขยายผลไปสู่การศึกษาในรายละเอียดต่อไป



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

# ทฤษฎีการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน

### 2.1 การสั่นสะเทือน

การสั่นสะเทือนเป็นปรากฏการณ์ที่วัตถุเคลื่อนที่กลับไปกลับมาภายใต้แรงกระทำ ซึ่งอาจจะเป็นแรงภายนอกหรือแรงภายในก็ได้ การสั่นสะเทือนโดยทั่วไปแบ่งออกเป็นสองประเภทคือ [1]

#### (1) การสั่นสะเทือนแบบอิสระ (free vibration)

การสั่นสะเทือนแบบอิสระเกิดขึ้นเมื่อระบบเคลื่อนที่กลับไปกลับมาภายใต้การกระทำของแรงภายในระบบและไม่มีแรงภายนอกมากระทำ ระบบจะเกิดการสั่นสะเทือนที่ความถี่เท่ากับความถี่ธรรมชาติ (natural frequency) ของระบบ

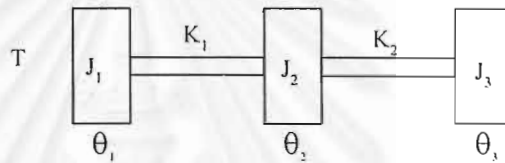
#### (2) การสั่นสะเทือนแบบถูกกระตุ้น (forced vibration)

การสั่นสะเทือนแบบถูกกระตุ้นเกิดขึ้นเมื่อระบบถูกกระตุ้นด้วยแรงภายนอกแบบกลับไปกลับมา ระบบจะสั่นที่ความถี่เท่ากับความถี่ของแรงภายนอกที่มากระทำ ถ้าความถี่ของแรงภายนอกที่มากระทำตรงกับความถี่ธรรมชาติของระบบแล้ว จะเกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ (resonance) ขึ้น ซึ่งระบบจะสั่นสะเทือนอย่างรุนแรงและอาจเกิดความเสียหายกับระบบได้

การสั่นสะเทือนในเครื่องจักรกลหมุน (rotating machinery) โดยทั่วไปเป็นการสั่นสะเทือนแบบถูกกระตุ้น โดยที่แรงกระตุ้นเกิดจากหลายสาเหตุเช่น การไม่สมดุล (unbalance) การเยื้องแนวแกน (misalignment) ความเสียหายของแบริ่ง (bearing defect) เป็นต้น

## 2.2 การสั่นสะเทือนแบบบิด (torsional vibration)

การสั่นสะเทือนแบบบิดเป็นการสั่นสะเทือนของวัตถุรอบแกนอ้างอิง ดังนั้นระยะของการสั่นสะเทือนจะอยู่ในรูปของพิกัดเชิงมุม (angular coordinate) ในความเป็นจริงระบบที่มีการสั่นสะเทือนแบบบิดเป็นระบบที่มีความต่อเนื่อง (continuous system) ซึ่งมีดีกรีความอิสระ (degree of freedom) จำนวนมาก ในการแก้ปัญหาสามารถทำได้ 2 แนวทางคือพิจารณาเป็นระบบที่ไม่ต่อเนื่อง (discrete system) โดยใช้วิธีมวลก้อนและสปริง (lumped masses and lumped springs) ซึ่งคุณสมบัติความยืดหยุ่นของวัตถุจะถูกสมมติให้อยู่ในสปริงที่ไม่มีมวล และคุณสมบัติเบื้องต้นอื่นๆ จะให้รวมอยู่ในมวลก้อนซึ่งจะพิจารณาเป็นมวลจุด (point masses) ส่วนอีกวิธีหนึ่งจะพิจารณาเป็นระบบต่อเนื่อง คุณสมบัติต่างๆ จะกระจายอยู่ในระบบ ซึ่งคำตอบที่ได้จากวิธีนี้จะมีความถูกต้องมากกว่าวิธีแรกแต่มีความซับซ้อนในการคำนวณมากกว่า [2]



รูปที่ 2.1 วิธีการ lumped masses and lumped springs

จากรูปเป็นตัวอย่างการใช้วิธีมวลก้อนโดยแบ่งออกเป็น 3 มวลก้อน ซึ่งจะได้สมการการเคลื่อนที่คือ

$$I_1 \ddot{\theta}_1 + K_1(\theta_1 - \theta_2) = T$$

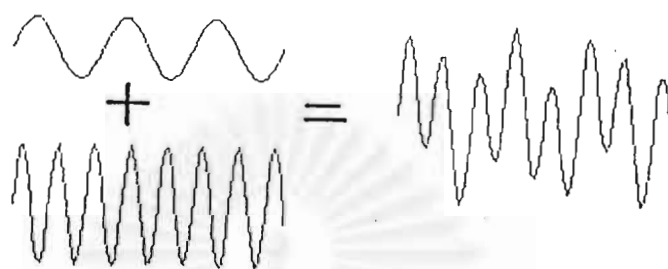
$$I_2 \ddot{\theta}_2 + K_2(\theta_2 - \theta_3) - K_1(\theta_1 - \theta_2) = 0 \quad (2.1)$$

$$I_3 \ddot{\theta}_3 - K_2(\theta_2 - \theta_3) = 0$$

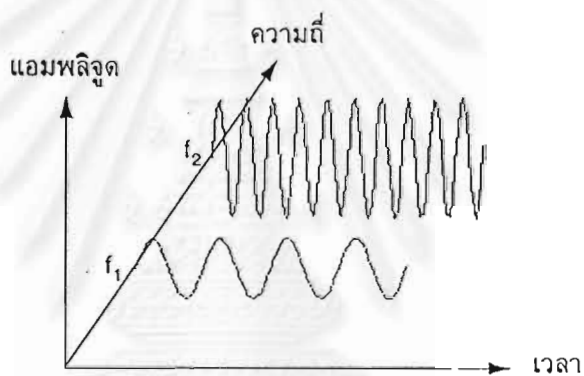
## 2.3 โดเมนความถี่และโดเมนเวลา (time domain and frequency domain)

สัญญาณการสั่นสะเทือนในโดเมนเวลาจะมีแกนตั้งเป็นขนาดของการสั่นสะเทือน และมีแกนนอนเป็นเวลา ส่วนสัญญาณการสั่นสะเทือนในโดเมนความถี่จะมีแกนตั้งเป็นขนาดของการสั่นสะเทือนและมีแกนนอนเป็นความถี่

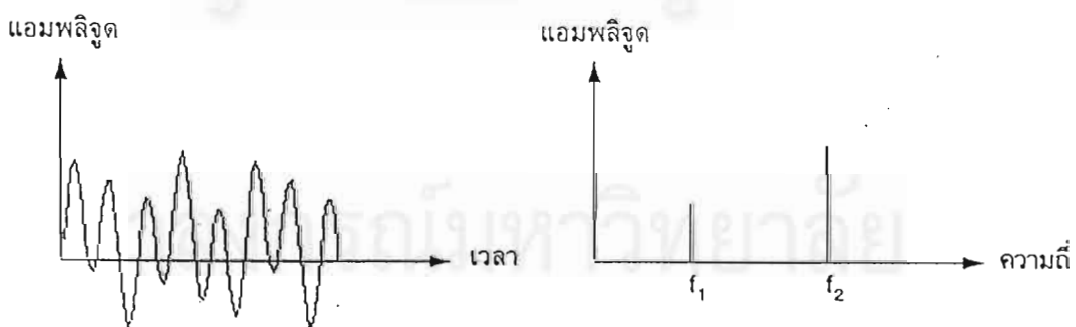
ฟูรีเยร์ (Fourier) พบว่าสัญญาณที่มีความซับซ้อนและมีลักษณะเป็นคาบ สามารถแยกออกเป็นอนุกรมของสัญญาณรูปไซน์ (sine wave) ได้ โดยที่สัญญาณรูปไซน์แต่ละอันจะมีขนาดและความถี่ที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.2ก



รูปที่ 2.2ข



รูปที่ 2.2ค

รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ของสัญญาณในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่

จากรูปที่ 2.2ก แสดงสัญญาณรูปซายน์สองอันซึ่งมีขนาดและความถี่แตกต่างกัน เมื่อรวมสัญญาณรูปซายน์ทั้งสองเข้าด้วยกัน จะได้สัญญาณที่มีลักษณะซับซ้อนมากขึ้น คลื่นรูปซายน์ทั้งสองสามารถแสดงในแกนสามมิติซึ่งประกอบด้วยแกนแอมพลิจูด แกนเวลา และแกนความถี่ดังรูปที่ 2.2ข ดังนั้นเมื่อมองสัญญาณในมุมมองที่ต่างกันก็จะเห็นสัญญาณมีลักษณะดังรูปที่ 2.2ค ดังนั้นถ้าสามารถแยกสัญญาณการสั่นสะเทือนที่มีลักษณะซับซ้อนซึ่งวัดได้จากเครื่องจักร ออกเป็นอนุกรมของสัญญาณรูปซายน์ที่มีขนาดและความถี่ต่างๆ กัน ก็จะสามารถวิเคราะห์ถึงที่มาของปัญหาการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรได้ [3]

สัญญาณการสั่นสะเทือนสามารถแยกออกเป็นสัญญาณรูปซายน์ได้โดยการใช้เครื่องวิเคราะห์เอฟเฟท (FFT analyzer) ซึ่งจะรับสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ซับซ้อน จากทรานสดิวเซอร์ (transducer) และใช้การแปลงฟูริเยร์ (fourier transform) แปลงสัญญาณเป็นอนุกรมของสัญญาณรูปซายน์ แล้วแสดงสัญญาณที่ได้บนโดเมนความถี่

#### 2.4 การแปลงฟูริเยร์ (Fourier series)

การเคลื่อนที่แบบเป็นคาบสามารถแยกเขียนออกมาเป็นผลรวมของการเคลื่อนที่แบบฮาร์โมนิกที่มีความถี่ต่างๆ กันได้ โดยใช้วิธีการของฟูริเยร์ ถ้าให้  $x(t)$  คือฟังก์ชันแบบเป็นคาบที่มีคาบเท่ากับ  $\tau$  จะสามารถเขียน  $x(t)$  เป็นสมการอนุกรมฟูริเยร์ (Fourier series) ได้ดังนี้ [4]

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos \omega_1 t + a_2 \cos \omega_2 t + \dots + b_1 \sin \omega_1 t + b_2 \sin \omega_2 t + \dots \quad (2.2)$$

โดยที่  $\omega_1 = \frac{2\pi}{\tau}, \omega_n = n\omega_1; n=1,2,3,\dots$

และค่าสัมประสิทธิ์  $a_n$  และ  $b_n$  หาได้จาก

$$a_n = \frac{2}{\tau} \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} x(t) \cos \omega_n t dt \quad (2.3)$$

$$b_n = \frac{2}{\tau} \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} x(t) \sin \omega_n t dt \quad (2.4)$$

ฟังก์ชัน  $x(t)$  สามารถแสดงให้อยู่ในรูปอินทิกรัลของฟูริเยร์ (Fourier integral) ได้ดังนี้

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{i2\pi ft} df$$



โดยที่  $X(f)$  เรียกว่า การแปลงฟูรีเยร์ของ  $x(t)$  ซึ่งหาค่าได้โดย

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i2\pi ft} dt$$

เมื่อนำสมการ (2.2) มาเขียนโดยให้แกนในแนวดิ่งเป็นขนาดของการสั่นสะเทือน และแกนนอนเป็นแกนความถี่ ก็จะได้สัญญาณอยู่ในรูปของโดเมนความถี่

## 2.5 การสั่นสะเทือนของเครื่องจักร

เครื่องจักรกลหมุนทุกชนิดมีการสั่นสะเทือน ซึ่งมีสาเหตุจากความบกพร่องต่างๆ ในเครื่องจักรกลหมุน เช่น การไม่สมดุล การเยื้องศูนย์ ข้อบกพร่องในแบร์ริง เป็นต้น การสั่นสะเทือนในเครื่องจักรหมุนจึงมีลักษณะเป็นการสั่นสะเทือนแบบกระตุ้นด้วยตนเอง (self-excited vibration)

ความบกพร่องต่างๆ ในเครื่องจักรกลหมุน ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนที่มีลักษณะแตกต่างกัน ดังนั้นการวิเคราะห์ความถี่และขนาดของสัญญาณการสั่นสะเทือนจะทำให้ทราบถึงสภาพการทำงานและความผิดปกติในเครื่องจักร และยังอาจทราบถึงข้อบกพร่องที่เพิ่งเริ่มเกิดขึ้นกับเครื่องจักร ทำให้สามารถเตรียมการวางแผนการบำรุงรักษาหรือหยุดซ่อมได้อย่างเหมาะสม



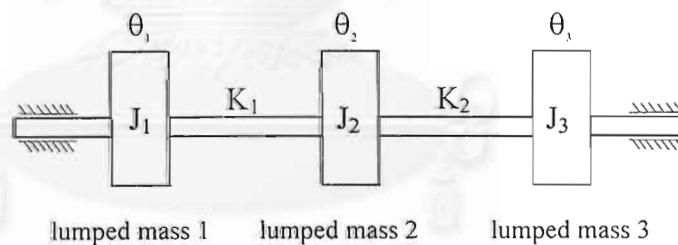
### บทที่ 3

## การสั่นสะเทือนของเพลามีรอยแตก

เนื่องจากการสั่นสะเทือนของเพลามีรอยแตกมีความซับซ้อนมาก ดังนั้นจึงไม่สามารถที่จะกำหนดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถแสดงลักษณะการสั่นสะเทือนทั้งหมดของเพลามีรอยแตกได้ครบถ้วน แต่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์พื้นฐานอาจสามารถแสดงลักษณะการสั่นสะเทือนบางอย่างของเพลามีรอยแตกได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เบื้องต้นเพื่อศึกษาพฤติกรรมของการสั่นสะเทือนที่เป็นไปได้ของเพลามีรอยแตก เพื่อที่จะนำไปใช้เป็นแนวทางในการกำหนดพารามิเตอร์ในการตรวจวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนจากชุดทดลอง โดยที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์พื้นฐานนี้ตั้งอยู่บนสมมติฐานว่า รอยแตกในเพลาส่งผลให้ค่าความแข็ง (stiffness) ของเพลาลดลง

### 3.1 การสั่นสะเทือนแบบบิด (torsional vibration)

เมื่อพิจารณาการสั่นสะเทือนแบบบิด จะเห็นว่าเพลาคือระบบที่มีความต่อเนื่อง (continuous systems) ดังนั้นในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะเปลี่ยนระบบที่มีความต่อเนื่องไปเป็นระบบแบบมวลก้อน (lumped masses) ซึ่งจะแบ่งเพลานออกเป็นมวลโดยพิจารณาเป็นจุด (point masses) ที่เชื่อมต่อกันด้วยสปริงที่ไม่มีมวล



รูปที่ 3.1 การแบ่งเพลาคือเป็นมวลก้อนซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยสปริงที่ไม่มีมวล

ซึ่งมีสมการการเคลื่อนที่คือ

$$[J]\{\ddot{\theta}\} + [K]\{\theta\} = \{T\} \quad (3.1)$$

โดยที่

$[J]$  คือ Inertia Matrix

$\theta$  คือ มุมบิด

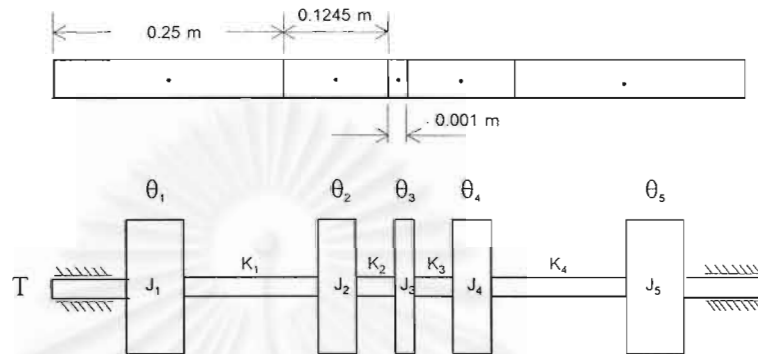
$[K]$  คือ Stiffness Matrix

$T$  คือ แรงบิด

ลำดับต่อไปจะนำเสนอตัวอย่างการคำนวณโดยจะแบ่งเพลลาทำจากเหล็กกล้า (steel shaft) ออกเป็น 5 lumped masses โดยที่เพลลามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.02 เมตร ยาว 0.75 เมตร และมีคุณสมบัติดังนี้

$$G = 80 \times 10^9 \text{ Pa}$$

$$\rho = 7.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$$



รูปที่ 3.2 การแบ่งเพลลาเป็นมวลก้อนซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยสปริงที่ไม่มีมวล

ซึ่งจะได้สมการการเคลื่อนที่คือ

$$\begin{bmatrix} J_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & J_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \\ \ddot{\theta}_4 \\ \ddot{\theta}_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_1 & -K_1 & 0 & 0 & 0 \\ -K_1 & K_1 + K_2 & -K_2 & 0 & 0 \\ 0 & -K_2 & K_2 + K_3 & -K_3 & 0 \\ 0 & 0 & -K_3 & K_3 + K_4 & -K_4 \\ 0 & 0 & 0 & -K_4 & K_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \\ \theta_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

ซึ่ง  $T$  เป็นแรงบิดภายนอกแบบกลับไปกลับมาด้วยความถี่  $\omega$  คือ

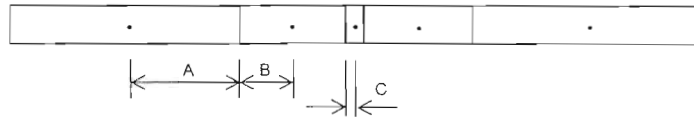
$$T = T \sin \omega t$$

เมื่อพิจารณาเพลลาที่ไม่มีรอยแตก

ค่า polar moment of inertia ( $I_p$ ) ของหน้าตัดวงกลม

$$I_p = \frac{\pi}{32} d^4 = \frac{\pi}{32} (0.02)^4 = 1.571 \times 10^{-8} \text{ m}^4$$

ค่า torsional stiffness ( $K$ ) ของเพลลา



$$K_A = \frac{I_p G}{L_A} = \frac{(1.571 \times 10^{-8})(80 \times 10^9)}{0.125} = 10053.094 \text{ N} \cdot \text{m} / \text{rad}$$

$$K_B = \frac{I_p G}{L_B} = \frac{(1.571 \times 10^{-8})(80 \times 10^9)}{0.06225} = 20186.937 \text{ N} \cdot \text{m} / \text{rad}$$

$$K_C = \frac{I_p G}{L_C} = \frac{(1.571 \times 10^{-8})(80 \times 10^9)}{0.0005} = 2513273.6 \text{ N} \cdot \text{m} / \text{rad}$$

ดังนั้น

$$K_1 = K_4 = \frac{K_A \cdot K_B}{K_A + K_B} = \frac{(10053.094)(20186.937)}{(10053.094 + 20186.937)} = 6711.011 \text{ N} \cdot \text{m} / \text{rad}$$

$$K_2 = K_3 = \frac{K_B \cdot K_C}{K_B + K_C} = \frac{(20186.937)(2513273.6)}{(20186.937 + 2513273.6)} = 20026.0845 \text{ N} \cdot \text{m} / \text{rad}$$

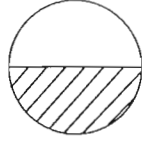
ค่า mass moment of inertia ( $J$ ) ของ lumped mass

$$J_1 = J_5 = I_p \rho L = (1.571 \times 10^{-8})(7.7 \times 10^3)(0.25) \\ = 3.024 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$J_2 = J_4 = I_p \rho L = (1.571 \times 10^{-8})(7.7 \times 10^3)(0.1245) \\ = 1.506 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$J_3 = I_p \rho L = (1.571 \times 10^{-8})(7.7 \times 10^3)(0.001) \\ = 1.209 \times 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

เมื่อพิจารณาให้เพลลาเกิดรอยแตกเล็กครึ่งหนึ่งของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่บริเวณกึ่งกลางเพลลาคือที่บริเวณเพลลาท่อนกลาง การเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเพลลาท่อนกลางให้เป็น lumped mass 3 โดยสมมติให้ความหนาของรอยแตกมีค่าเท่ากับ 1 มม. ซึ่งเท่ากับ ความหนาของ lumped mass 3 หากพิจารณาเฉพาะค่า polar moment of inertia เฉพาะ ส่วนของเพลลาที่มีรอยแตกจะเขียนได้เป็น



$$\begin{aligned}
 I_p &= \int_A r^2 dA = \int_0^\pi \int_0^r r^3 dr d\theta \\
 &= \frac{\pi}{4} r^4 = \frac{\pi}{64} d^4 \\
 &= \frac{\pi}{64} (0.02)^4 = 7.854 \times 10^{-9} \text{ m}^4
 \end{aligned}$$

สำหรับค่า torsional stiffness ( $K$ ) ของเพลลาที่มีรอยแตกนั้น  $K_A$  และ  $K_B$  ยังคงมีค่าเท่ากับเพลลาที่ไม่มีรอยแตกและ

$$K_C = \frac{I_p G}{L_C} = \frac{(7.854 \times 10^{-9})(80 \times 10^9)}{0.0005} = 1256637.061 \text{ N} \cdot \text{m/rad}$$

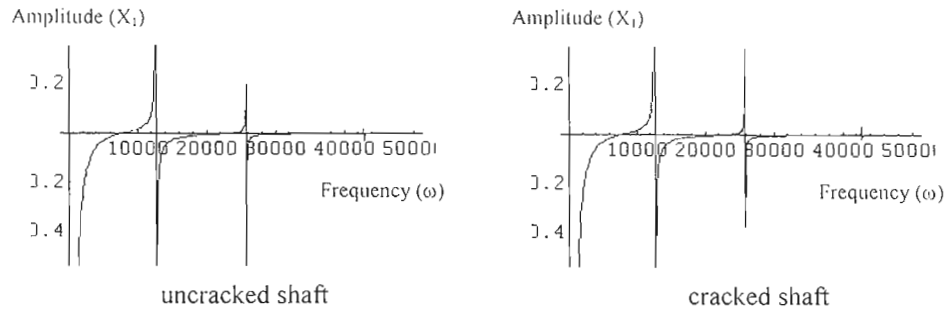
จะได้ว่า  $K_1$  และ  $K_4$  มีค่าเท่ากับเพลลาที่ไม่มีรอยแตกและ

$$K_2 = K_3 = \frac{K_B \cdot K_C}{K_B + K_C} = \frac{(20186.937)(1256637.061)}{(20186.937 + 1256637.061)} = 19867.776 \text{ N} \cdot \text{m/rad}$$

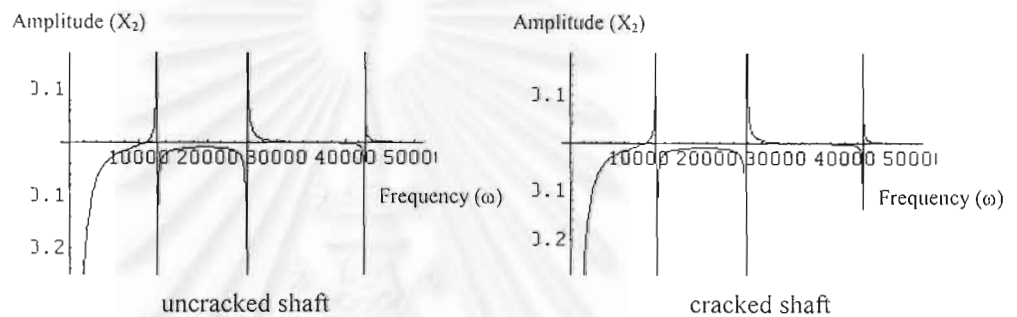
เมื่อทำการแก้สมการที่ 3.2 โดยสมมติคำตอบให้อยู่ในรูป

$$\theta_n = X_n \sin \omega t$$

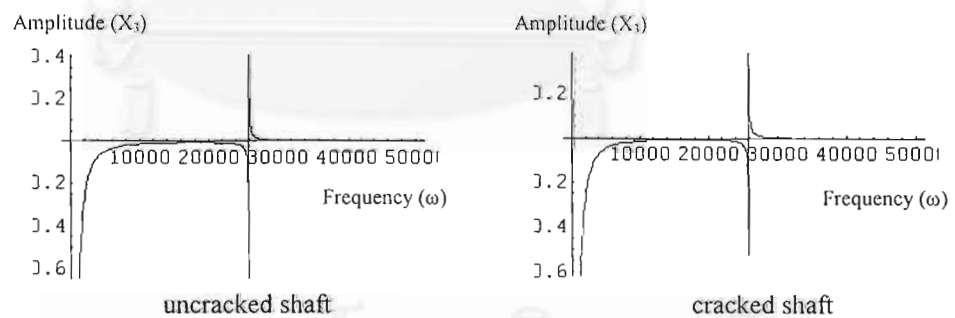
และแทนค่าคุณสมบัติต่างๆ ที่คำนวณไว้เบื้องต้นลงในสมการที่ 3.2 แล้วนำคำตอบมาวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสั่นสะเทือนกับความถี่ จะได้ลักษณะของกราฟดังรูปที่ 3.3 – 3.7 ดังนี้



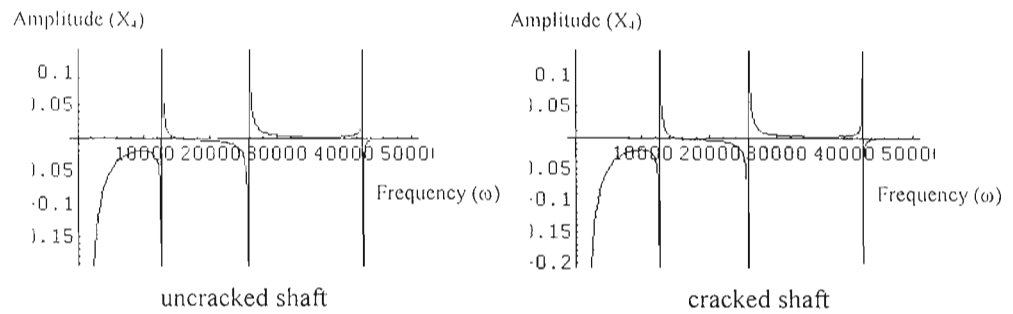
รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสั่นสะเทือนของ lumped mass 1 และความถี่รอบของเพลลา เปรียบเทียบระหว่างเพลลาที่สมบูรณ์กับเพลลาที่มีรอยแตกตามแนวหน้าตัดที่ lumped mass 3



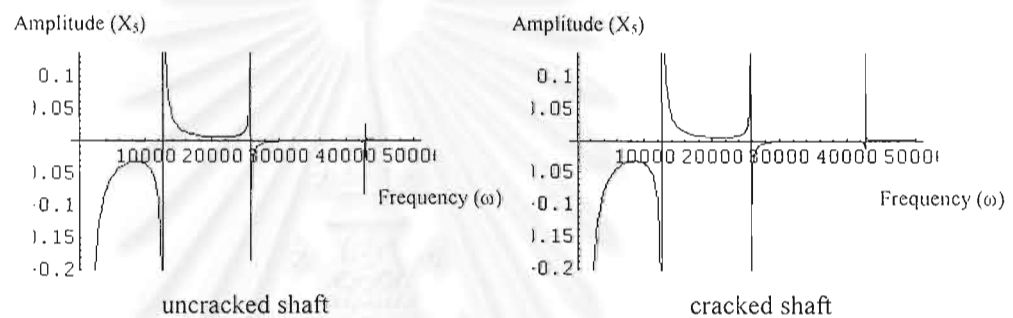
รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสั่นสะเทือนของ lumped mass 2 และความถี่รอบของเพลลา เปรียบเทียบระหว่างเพลลาที่สมบูรณ์กับเพลลาที่มีรอยแตกตามแนวหน้าตัดที่ lumped mass 3



รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสั่นสะเทือนของ lumped mass 3 และความถี่รอบของเพลลา เปรียบเทียบระหว่างเพลลาที่สมบูรณ์กับเพลลาที่มีรอยแตกตามแนวหน้าตัดที่ lumped mass 3



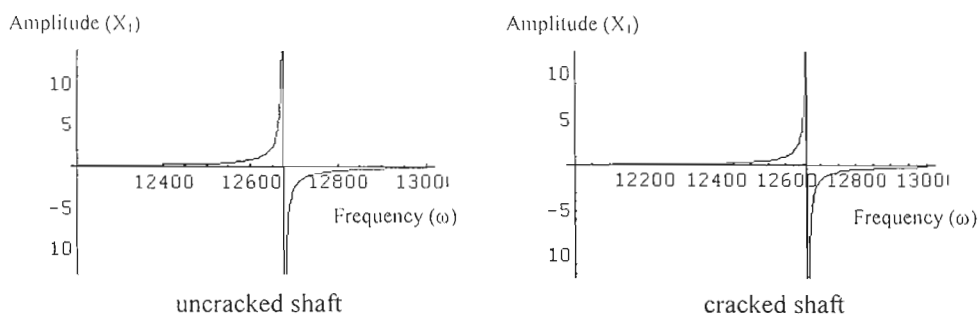
รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสั่นสะเทือนของ lumped mass 4 และความถี่รอบของเพลลาเปรียบเทียบกับเพลลาที่สมบูรณ์กับเพลลาที่มีรอยแตกตามแนวหน้าตัดที่ lumped mass 3



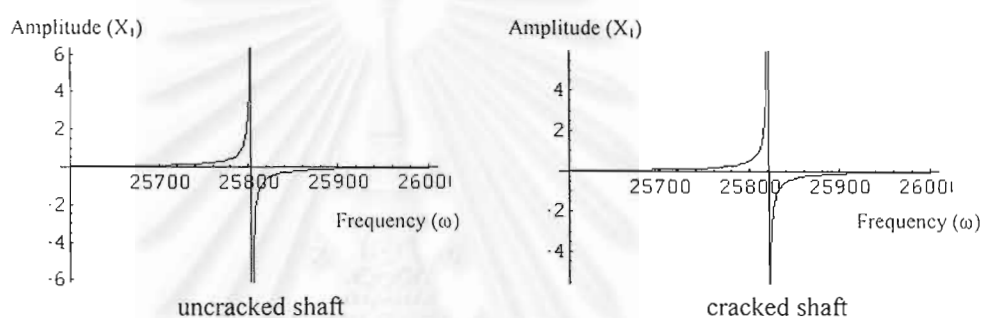
รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสั่นสะเทือนของ lumped mass 5 และความถี่รอบของเพลลาเปรียบเทียบกับเพลลาที่สมบูรณ์กับเพลลาที่มีรอยแตกตามแนวหน้าตัดที่ lumped mass 3

เนื่องจากเมื่อเพลลาเกิดรอยแตกแล้ว ความถี่ธรรมชาติฮาร์โมนิกต่างๆ มีค่าเปลี่ยนแปลงไปน้อยจึงขอนำเสนองราฟของแต่ละฮาร์โมนิกเพื่อให้เห็นการเปลี่ยนแปลงได้ชัดเจนยิ่งขึ้น และเนื่องจากความถี่ธรรมชาติฮาร์โมนิกต่างๆ ของทั้ง 5 lumped mass มีค่าเท่ากัน จึงขอนำเสนอเฉพาะของ lumped mass 1 ดังแสดงในรูป 3.8-3.10

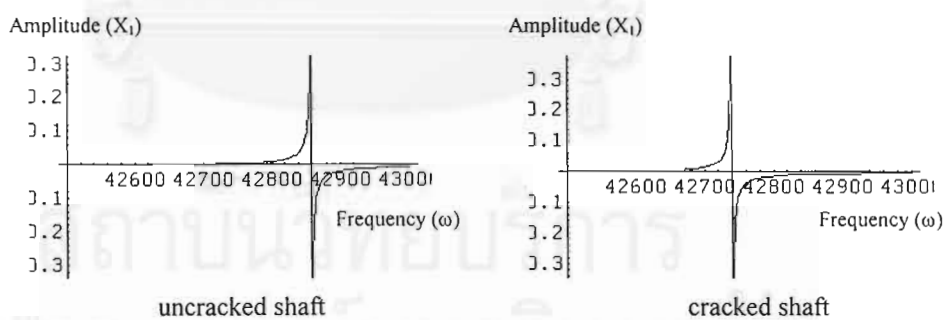
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสั่นสะเทือนของ lumped mass 1 และความเร็วยรอบของเพลลา แสดงค่าความถี่ธรรมชาติฮาร์โมนิกที่ 1



รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสั่นสะเทือนของ lumped mass 1 และความเร็วยรอบของเพลลา แสดงค่าความถี่ธรรมชาติฮาร์โมนิกที่ 2



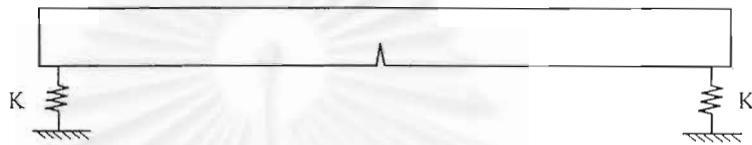
รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสั่นสะเทือนของ lumped mass 1 และความเร็วยรอบของเพลลา แสดงค่าความถี่ธรรมชาติฮาร์โมนิกที่ 3



จากรูปที่ 3.3 – 3.10 แสดงให้เห็นว่าความถี่ธรรมชาติ ฮาร์โมนิกที่ 1, ฮาร์โมนิกที่ 2 และ ฮาร์โมนิกที่ 3 ของเพลลาที่ไม่มีรอยแตกมีค่าเท่ากับ 12675 rad/s, 25800 rad/s และ 42860 rad/s ตามลำดับ และเมื่อเพลลาเกิดรอยแตกขึ้นแล้ว ฮาร์โมนิกที่ 1, ฮาร์โมนิกที่ 2 และ ฮาร์โมนิกที่ 3 ของเพลลาที่มีค่าเท่ากับ 12650 rad/s, 25820 rad/s และ 42740 rad/s ตามลำดับ

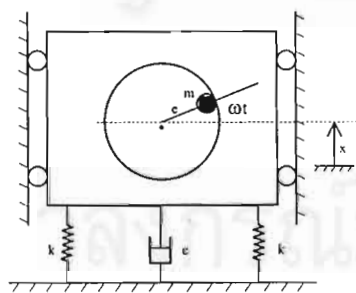
สรุปได้ว่าเมื่อเพลลาเกิดรอยแตกขึ้นแล้วจะทำให้ความถี่ธรรมชาติ ฮาร์โมนิกที่ 1 และ ฮาร์โมนิกที่ 3 มีค่าลดลง แต่ความถี่ธรรมชาติ ฮาร์โมนิกที่ 2 จะมีค่าเพิ่มขึ้น

### 3.2 การสั่นสะเทือนตามขวาง (lateral vibration)



รูปที่ 3.11 การเคลื่อนที่ตามขวางของเพลลาที่มีรอยแตก

เมื่อพิจารณาให้เพลลาเกิดการสั่นสะเทือนตามขวาง เมื่อเพลลาหมุนไปจนรอยแตกอยู่บริเวณด้านล่างของเพลลา น้ำหนักของเพลลาเองจะทำให้รอยแตกในเพลลาเปิดออกและเมื่อรอยแตกหมุนขึ้นมาอยู่ที่ส่วนบนของเพลลา น้ำหนักของเพลลาจะทำให้รอยแตกปิดลงซึ่งก็จะเป็นเช่นนี้ในทุกๆ รอบของการหมุน [5] โดยในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้จะตั้งสมมติฐานว่าการที่รอยแตกเปิดออกจะส่งผลให้เพลลาเกิดการเคลื่อนที่คล้ายกับการเกิดความไม่สมดุล และเมื่อรอยแตกยังมีระดับความลึกมากขึ้น จะทำให้ปริมาณความไม่สมดุลเพิ่มขึ้นด้วย สมการการเคลื่อนที่ของการสั่นสะเทือนเนื่องจากความไม่สมดุลคือ



$$M\ddot{x} + c\dot{x} + kx = (me\omega^2)\sin \omega t$$

เมื่อสมมติให้  $x = X \sin(\omega t - \phi)$  จะได้ว่า

$$X = \frac{me\omega^2}{\sqrt{(k - M\omega^2)^2 + (c\omega)^2}} \quad (3.3)$$

$$\tan \phi = \frac{c\omega}{k - M\omega^2}$$

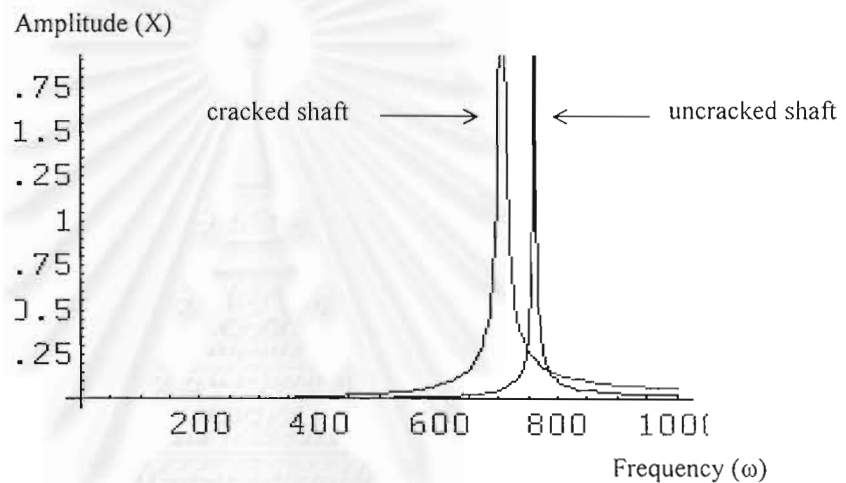
รูปที่ 3.12 แบบจำลองการเคลื่อนที่ของมวลที่มีความไม่สมดุล

โดยในการคำนวณจะสมมติว่าเมื่อเกิดรอยแตกขึ้นแล้วจะทำให้ปริมาณของความไม่สมดุล “*me*” มีค่าเพิ่มมากขึ้น และค่าความแข็งของสปริงลดลง

ลำดับต่อไปจะยกตัวอย่างเพลาเหล็กกล้า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.03 เมตร ยาว 0.3 เมตร ซึ่งมีคุณสมบัติคือ

$$E = 210 \times 10^9 \text{ N/m}^2, \quad I = \frac{\pi D^4}{64}, \quad k = \frac{3EI}{L^3}$$

เมื่อแทนค่าในสมการ (3.3) แล้วนำมาวาดกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสั่นสะเทือน ( $X$ ) กับความถี่รอบ ( $\omega$ ) จะได้กราฟดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสั่นสะเทือนและความถี่รอบของเพลา เปรียบเทียบระหว่างเพลาที่สมบูรณ์กับเพลาที่มีรอยแตก

จากรูปที่ 3.13 แสดงให้เห็นว่า เมื่อรอยแตกในเพลา มีระดับความลึกมากขึ้นจะทำให้ค่าความไม่สมดุลในสมการมากขึ้น ส่งผลให้ขนาดของการสั่นสะเทือนที่ความถี่รอบเท่ากัน มีค่าเพิ่มขึ้น และเนื่องจากการเปิดปิดของรอยแตกจะเกิดขึ้น 1 ครั้งเมื่อเพลาหมุนไป 1 รอบ ดังนั้นเมื่อเกิดรอยแตกขึ้นในเพลาแล้วจะส่งผลให้สัญญาณการสั่นสะเทือนที่ความถี่เท่ากับความถี่รอบของเพลา มีขนาดเพิ่มขึ้น และเมื่อเกิดรอยแตกขึ้นจะส่งผลให้ค่าความแข็ง (stiffness) ของเพลาลดลงทำให้ค่าความถี่ธรรมชาติของเพลาลดลง โดยความถี่ธรรมชาติของเพลาที่ไม่มีรอยแตกมีค่า  $775 \text{ rad/s}$  และค่าความถี่ธรรมชาติของเพลาที่มีรอยแตกลดลงเหลือ  $700 \text{ rad/s}$



## บทที่ 4

# การทดลองวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนของเพลลาที่มีรอยแตก ตามแนวหน้าตัด

การทดลองวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนของเพลลาที่มีรอยแตกตามแนวหน้าตัด แบ่งออกเป็นสองขั้นตอนคือ ในขั้นแรกเป็นการสร้างรอยแตกขึ้นบนเพลลา ส่วนการทดลอง ขั้นที่สองเป็นการนำเพลลาที่สร้างรอยแตกแล้วมาประกอบเข้ากับชุดทดลอง จากนั้นทำการ วัดสัญญาณการสั่นสะเทือนเพื่อนำสัญญาณการสั่นสะเทือนมาวิเคราะห์แบบสเปกตรัม

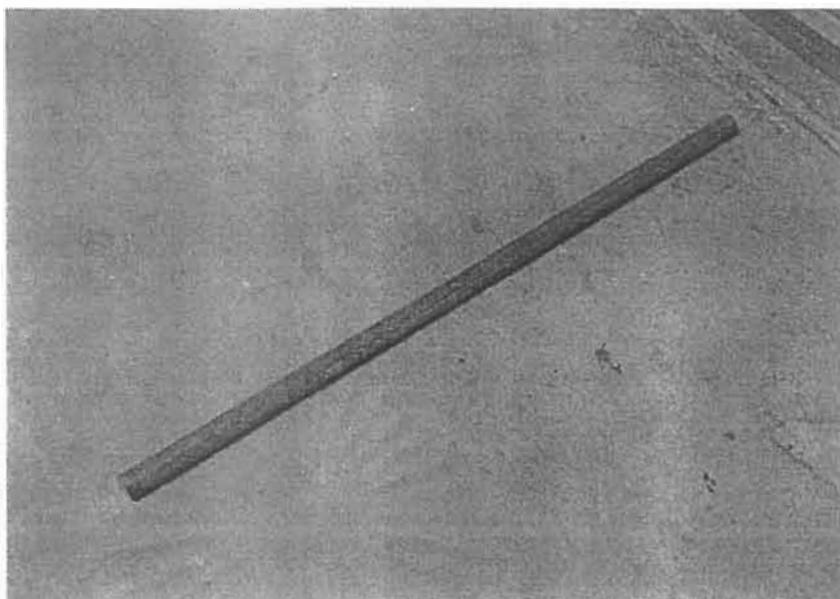
### 4.1 อุปกรณ์การทดลอง

#### การทดลองขั้นที่ 1 การสร้างรอยแตกขึ้นบนเพลลา

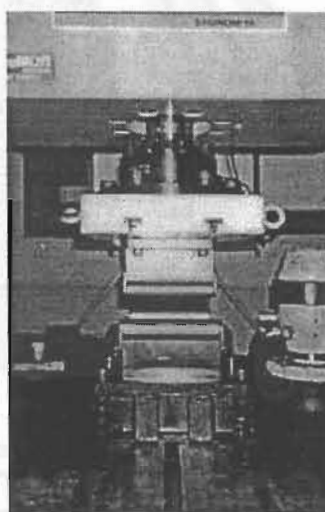
1. เพลลาทำจากวัสดุ S45C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 26 มม. ยาว 800 มม. จำนวน 9 เส้น การเลือกใช้เพลลาขนาดนี้เนื่องจากหลังการสร้างรอยแตกแล้ว ต้องกลึงให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. เพื่อที่จะประกอบเข้ากับชุดทดลองที่มีอยู่แล้วได้พอดี
2. เลื่อยฉลุ สำหรับสร้างรอยบากเพื่อเป็นจุดเริ่มต้นของรอยแตก
3. Dynamic Servo Machine ของ Sakinomiya
4. ชุดตรวจสอบหารอยแตกโดยการดูซึมของเหลว (liquid penetrant)
5. ชุดตรวจสอบหารอยแตกโดยใช้ผงแม่เหล็ก (magnetic particle)

#### การทดลองขั้นที่ 2 การวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน

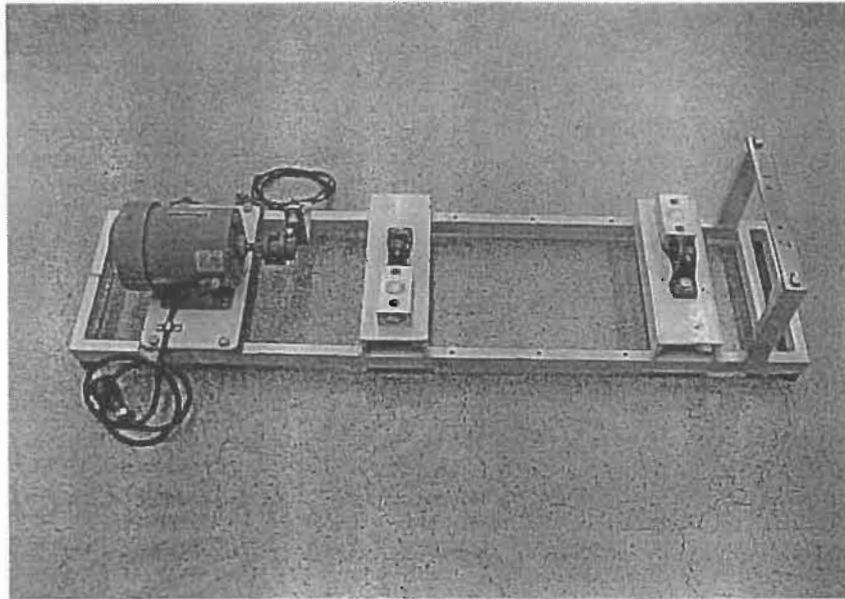
1. ฐานชุดทดลอง (ขนาดของฐานชุดทดลองแสดงไว้ในภาคผนวก จ)
2. มอเตอร์ 3 เฟส ขนาด 0.5 kW 1,400 rpm
3. แบริ่งลูกปืน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. จำนวน 2 ชุด
4. ชุดอินเวอร์เตอร์ (inverter) และ แทคโคมิเตอร์ (tachometer)
5. คัปปลิง (coupling)
6. เครื่องตรวจวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน Microlog CMVA10 ของ SKF
7. หัววัด (probe) สัญญาณการสั่นสะเทือน SKF Model CMSS786M
8. ซอฟต์แวร์ Prism 4 Pro สำหรับจัดการสัญญาณการสั่นสะเทือน



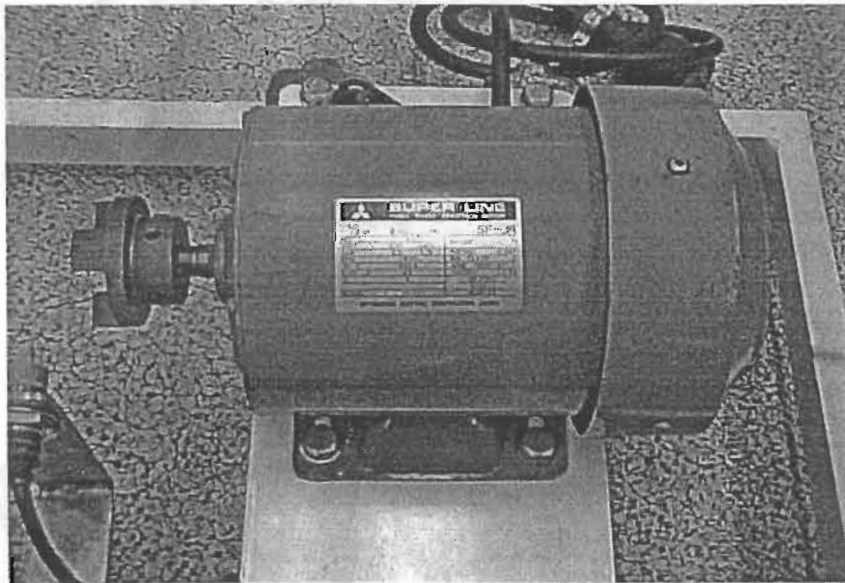
รูปที่ 4.1 เหล็ก S45C ที่ใช้ในการทดลอง



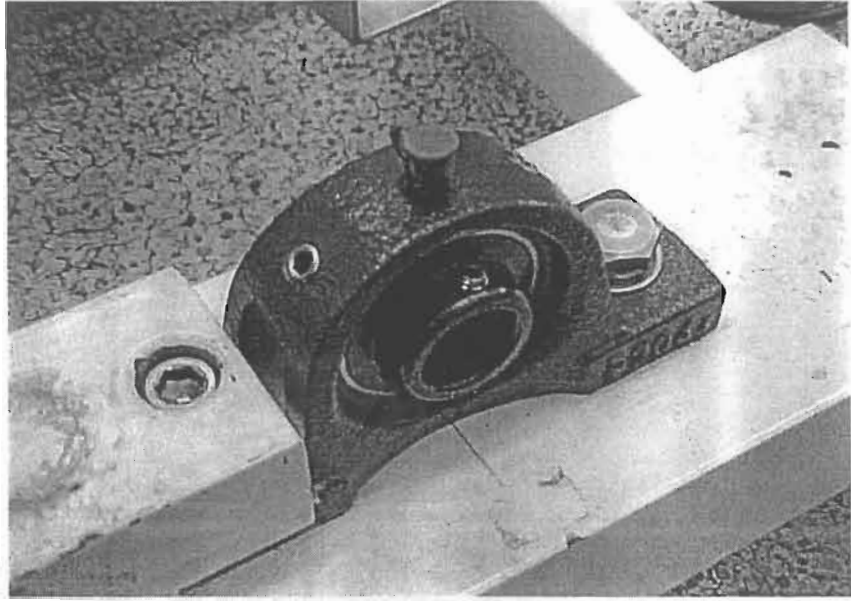
รูปที่ 4.2 Dynamic Servo Machine ของ Sakinomiya



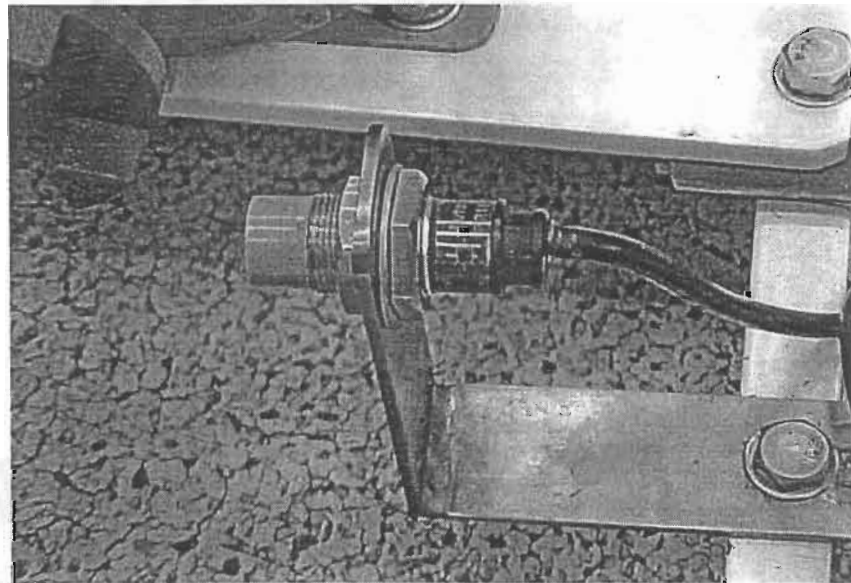
รูปที่ 4.3 ฐานชุดทดลอง



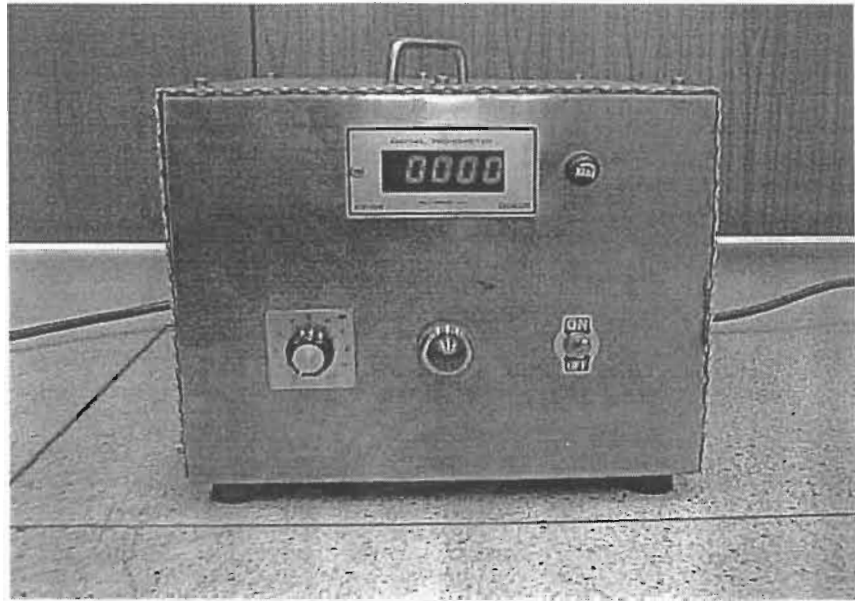
รูปที่ 4.4 มอเตอร์



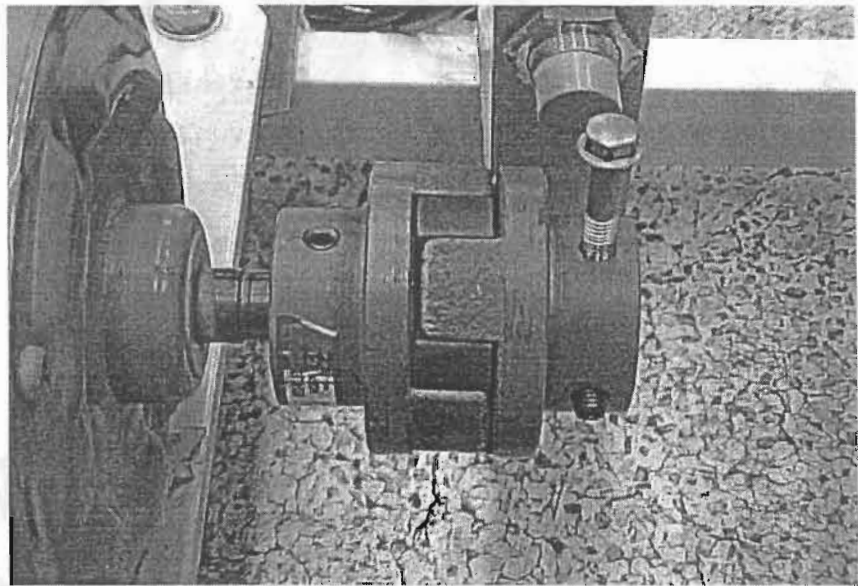
รูปที่ 4.5 แบริ่งลูกปืน



รูปที่ 4.6 แทคโคมิเตอร์



รูปที่ 4.7 อินเวอร์เตอร์



รูปที่ 4.8 คัปปลิง



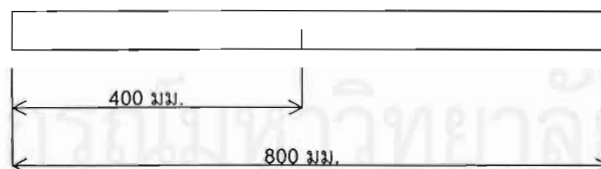
รูปที่ 4.9 Microlog CMVA10 และ หัววัดสัญญาณการสั่นสะเทือน

## 4.2 การทดลอง

### 4.2.1 การทดลองขั้นที่ 1 การสร้างรอยแตกขึ้นบนเพลลา

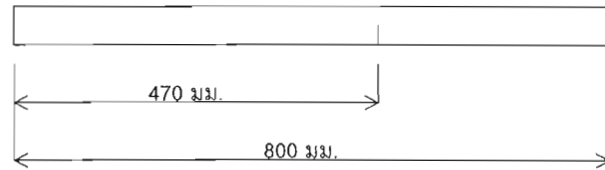
1. นำเพลลา S45C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 26 มม. ยาว 800 มม. จำนวน 9 เส้น มาทำรอยบากเพื่อให้เป็นจุดเริ่มต้นของรอยแตกโดยใช้เลื่อยฉลุ เลื่อยลงไปลึกประมาณ 1 มม. โดยจะทำรอยบากทั้งหมด 3 ตำแหน่ง โดยแต่ละตำแหน่งจะใช้เพลลา 3 เส้น เพื่อสร้างรอยแตกให้มีระดับความลึกแตกต่างกัน 3 ระดับ

เพลลาชุดที่ 1 จำนวน 3 เส้น

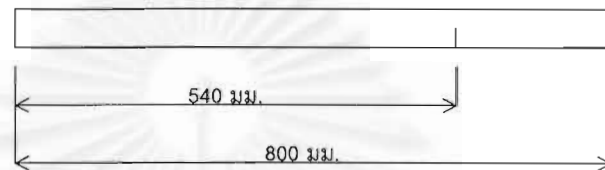




เพลาชดที่ 2 จำนวน 3 เส้น



เพลาชดที่ 3 จำนวน 3 เส้น



รูปที่ 4.10 ตำแหน่งการทำรอยบากในเพลาล

2. นำเพล่าที่ทำรอยบากแล้วไปติดตั้งบนเครื่อง Dynamic Servo Machine โดยให้รอยบากอยู่ด้านล่างและอยู่กึ่งกลางระหว่างฐานทั้งสองดังรูปที่ 4.11



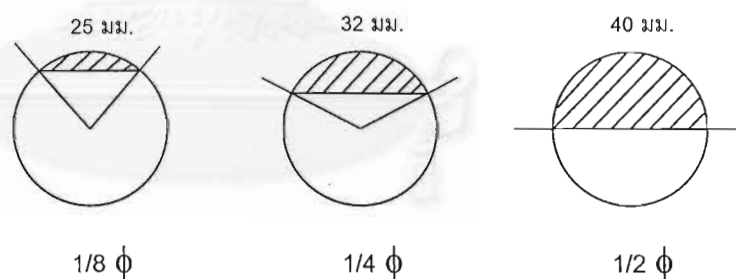
รูปที่ 4.11 การติดตั้งเพลาลบนเครื่อง Dynamic Servo Machine

3. สร้างรอยแตกโดยใช้วิธี 3-point bending fatigue โดยหัวไฮดรอลิกด้านบนจะกดลงบนเพลาลด้านตรงข้ามกับรอยแตกและรอยแตกจะอยู่กึ่งกลางระหว่างฐานทั้ง 2 และใช้ภาระ (load) เป็นรูปคลื่นไซน์ (sine wave) เริ่มต้นใช้ค่าภาระเฉลี่ย (mean

load)  $-0.350$  ตัน ใช้แอมพลิจูด (amplitude)  $0.320$  ตัน และใช้ความถี่  $15$  Hz ซึ่งวิธีการคำนวณค่าภาระที่ใช้แสดงไว้ในภาคผนวก ก

4. เมื่อเดินเครื่องไป รอยแตกจะมีระดับความลึกมากขึ้นทำให้เพลามีความแข็งแรงลดลงส่งผลให้เพลากเกิดการแอ่น (deflection) มากขึ้น ดังนั้นเพื่อเป็นการไม่ให้เพลาแอ่นจนเกินค่า elastic limit จนเพลากเกิดการเสียรูป จึงต้องทำการลดภาระลง โดยจะลดค่าภาระเฉลี่ยและค่าแอมพลิจูดลง  $25\%$  เมื่อค่าความแอ่นของเพลามีเพิ่มขึ้น  $0.1$  มม.

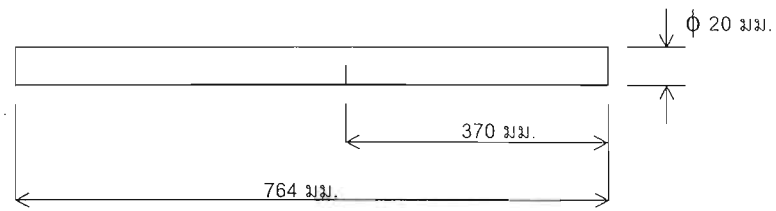
5. ในเพลาดังกล่าวจะสร้างรอยแตกให้มีระดับความลึกแตกต่างกัน 3 ระดับคือ ให้รอยแตกมีระดับความลึก  $\frac{1}{8}$ ,  $\frac{1}{4}$  และ  $\frac{1}{2}$  ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเพลาดังกล่าว และเนื่องจากไม่สามารถวัดความลึกของรอยแตกได้โดยตรง จึงต้องใช้วิธีการตรวจสอบรอยแตกโดยการดูซึมของเหลวในการตรวจสอบความลึกของรอยแตก ซึ่งวิธีการตรวจสอบแสดงไว้ในภาคผนวก ข โดยประมาณความลึกของรอยแตกจากความยาวของรอยแตกที่วัดได้ตามแนวเส้นรอบวงของเพลาดังกล่าว โดยเพลาดังกล่าวมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $26$  มม. และเส้นรอบวงของหน้าตัดเพลายาว  $81.7$  มม. ดังนั้น ระดับความลึกของรอยแตก  $\frac{1}{8}$ ,  $\frac{1}{4}$  และ  $\frac{1}{2}$  ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเพลาดังกล่าวจะประมาณโดยความยาวของรอยแตกตามแนวเส้นรอบวง  $25$  มม.  $32$  มม. และ  $40$  มม. ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.12



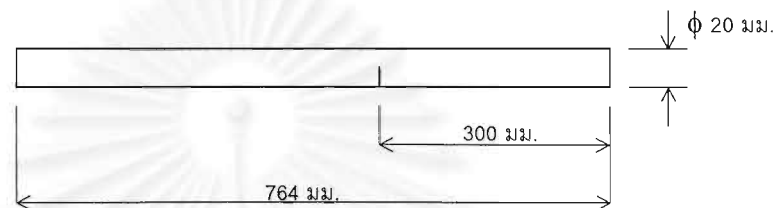
รูปที่ 4.12 การประมาณความลึกของรอยแตกจากความยาวของรอยแตกตามเส้นรอบวง

6. นำเพลาดังกล่าวทั้งสามชุดที่สร้างรอยแตกเรียบร้อยแล้ว ไปกลึงเพื่อกำจัดรอยบากจากเลื่อยฉลุและให้ได้ขนาดดังรูปที่ 4.13 เพื่อที่จะนำไปประกอบกับฐานชุดทดลองที่มีอยู่แล้ว ณ หน่วยปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีการบำรุงรักษาเครื่องจักรกล ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

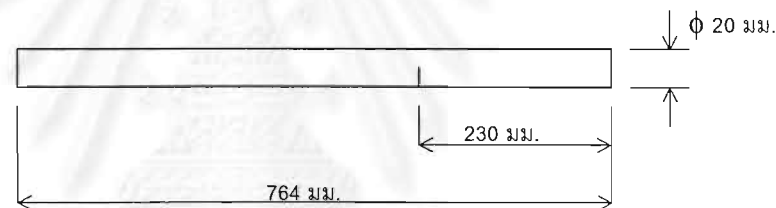
เพลาชุดที่ 1 จำนวน 3 เส้น



เพลาชุดที่ 2 จำนวน 3 เส้น



เพลาชุดที่ 3 จำนวน 3 เส้น



รูปที่ 4.13 เพลและตำแหน่งของรอยแตกหลังการกลึง

7. นำเพลากี่กลึงแล้วทั้ง 3 ชุด มาทำการตรวจสอบหารอยแตกอีกครั้งโดยใช้วิธีการดูซีมของเหลวและวิธีการตรวจสอบโดยใช้ผงแม่เหล็ก
8. กลึงเพลากที่ไม่มีรอยแตกให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. ยาว 764 มม. เพื่อนำมาใช้เป็นเพลามาตรฐาน (standard shaft) เพื่อเปรียบเทียบสัญญาณการสั่นสะเทือนกับเพลามีรอยแตกทั้ง 3 ชุด

#### 4.2.2 การทดลองขั้นที่ 2 การตรวจวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน

ทำการประกอบเพลลาเข้ากับชุดทดลอง โดยที่วิธีการประกอบเพลลาแสดงไว้ในภาคผนวก ค หลังจากนั้นเริ่มทำการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน โดยการทดลองจะแบ่งออกเป็น

การทดลองที่ 2.1 การตรวจวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนเพื่อหาความถี่ธรรมชาติ (natural frequency) ของระบบ และศึกษาผลของรอยแตกในเพลลาที่มีต่อความถี่ธรรมชาติของระบบ

1. นำเพลลามาตรฐานมาประกอบกับชุดทดลอง แล้วทำการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ความเร็วรอบต่างๆ ตั้งแต่ 0 ถึง 3000 rpm โดยเพิ่มความเร็วรอบครั้งละ 30 rpm
2. นำเพลลาชุดที่ 1 มาประกอบกับชุดทดลองแล้วทำการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนเช่นเดียวกับเพลลามาตรฐาน
3. วิเคราะห์ผลของรอยแตกที่มีต่อความถี่ธรรมชาติของระบบ

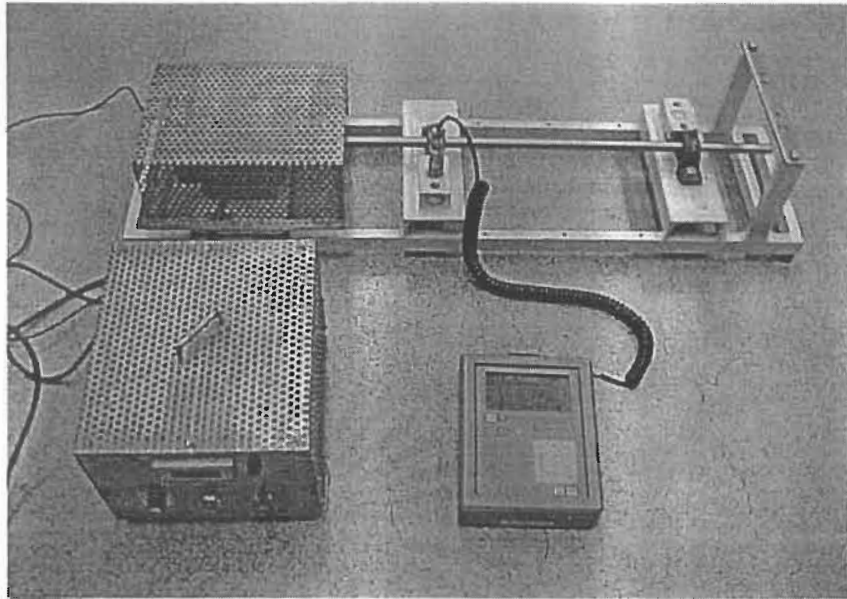
การทดลองที่ 2.2 การตรวจวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนเพื่อหารูปแบบของสัญญาณการสั่นสะเทือนของเพลลาที่มีรอยแตก (โดยเบื้องต้นจะทำการทดลองที่ 1,300 rpm เพื่อศึกษาแนวโน้มของสัญญาณการสั่นสะเทือนเบื้องต้น หลังจากนั้นจึงทำการทดลองที่ความเร็วรอบอื่น)

1. นำเพลลามาตรฐานมาประกอบเข้ากับชุดทดลอง แล้วทำการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ 1300 rpm
2. นำเพลลาที่มีรอยแตกทั้ง 3 ชุดมาทำการทดลองเช่นเดียวกับเพลลามาตรฐานตามลำดับ
3. ศึกษาและวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนที่ความเร็วรอบ 1300 rpm
4. นำเพลลามาตรฐานมาประกอบเข้ากับชุดทดลองแล้วทำการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ 600, 800, 1000, 1200 และ 1400 rpm ตามลำดับ
5. นำเพลลาที่มีรอยแตกทั้ง 3 ชุดมาทำการทดลองเช่นเดียวกับเพลลามาตรฐานตามลำดับ
6. ศึกษาและวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนที่ความเร็วรอบต่างๆ

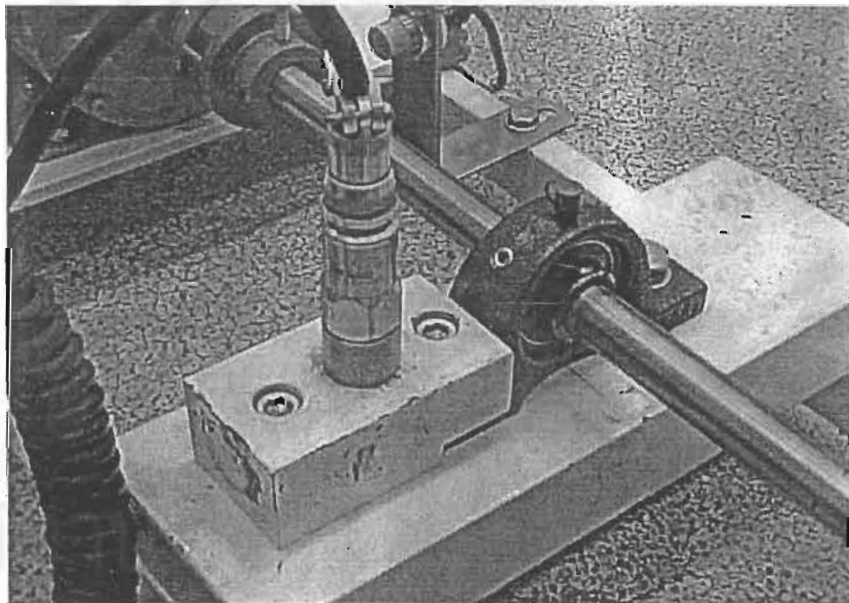
#### 4.3 การตรวจวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน

การตรวจวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน จะวัดสัญญาณในหน่วยความเร็ว (velocity) เนื่องจากความเร็วรอบที่ใช้ในการทดลองมีค่าไม่สูงนัก ในการตรวจวัดแต่ละครั้งจะตั้งค่าให้เครื่อง Microlog ทำการเฉลี่ยบนโดเมนความถี่ 8 ครั้ง การวิเคราะห์สเปกตรัมมีพิสัยของโดเมนความถี่ 30,000 cpm สำหรับการทดลองที่ 2.1 และการทดลองที่ 2.2 จะใช้พิสัยของโดเมนความถี่ 30,000 cpm สำหรับการทดลองที่ความเร็วรอบ 600 และ 800 rpm และใช้พิสัยของโดเมนความถี่ 60,000 cpm สำหรับการทดลองที่ความเร็วรอบ 1000, 1200, 1300 และ 1400 rpm โดยใช้ความละเอียด 1600 เส้น (line) การตั้งพิสัยของโดเมนความถี่ไว้ค่อนข้างสูงนั้น เพื่อทำการเก็บข้อมูลของสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ความถี่สูงเผื่อเอาไว้ ซึ่งอาจต้องใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนเพิ่มเติม

สำหรับตำแหน่งการตรวจวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนนั้น จะทำการวัดที่แบร็งทั้ง 2 ชุด โดยที่แบร็งแต่ละชุดจะทำการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนในแนวรัศมี (radius) สองแนว คือ แนวตั้ง (vertical) และแนวนอน (horizontal) แต่จะไม่วัดสัญญาณการสั่นสะเทือนในแนวแกน (axial) เนื่องจากลักษณะวิธีการประกอบเพลลาเข้ากับชุดทดลองและคัปปลิงที่ใช้ทำให้ไม่สามารถควบคุมระยะห่างระหว่างหน้าคัปปลิงให้เท่ากันทุกครั้งที่ทำให้การถอดและประกอบเพลลาได้ ส่งผลให้สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนวแกนของเพลลาเส้นเดียวกัน ในการถอดประกอบแต่ละครั้งมีค่าแตกต่างกันมาก แต่สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนวตั้งและแนวนอนจะมีค่าใกล้เคียงกันทุกครั้งที่ทำให้การประกอบเพลลาเข้ากับชุดทดลอง

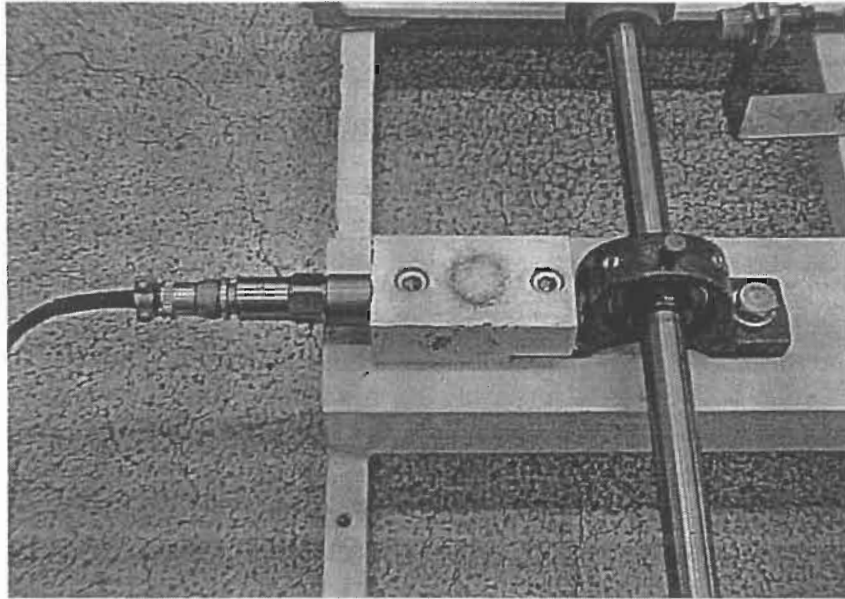


รูปที่ 4.14 การตรวจวัดสัญญาณการสั้นสะท้อน



รูปที่ 4.15 การตรวจวัดสัญญาณการสั้นสะท้อนในแนวตั้ง





รูปที่ 4.16 การตรวจวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนในแนวนอน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.4 ผลการทดลอง

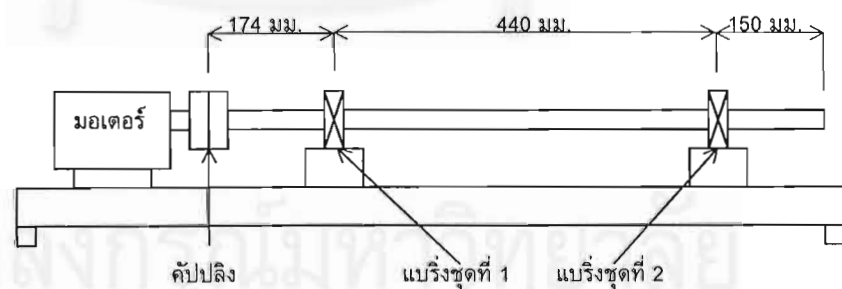
เนื่องจากการทดลองใช้เพลลาจำนวน 10 เส้น และมีตำแหน่งในการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนหลายจุด จึงขอกำหนดสัญลักษณ์เพื่อความสะดวกในการทำความเข้าใจดังนี้

เพลลาที่ใช้ในการทดลอง

Std	เพลลามาตรฐานที่ไม่มีรอยแตก
CD11	เพลลาในชุดที่ 1 มีรอยแตกลึก 1/8 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง
CD12	เพลลาในชุดที่ 1 มีรอยแตกลึก 1/4 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง
CD13	เพลลาในชุดที่ 1 มีรอยแตกลึก 1/2 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง
CD21	เพลลาในชุดที่ 2 มีรอยแตกลึก 1/8 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง
CD22	เพลลาในชุดที่ 2 มีรอยแตกลึก 1/4 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง
CD23	เพลลาในชุดที่ 2 มีรอยแตกลึก 1/2 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง
CD31	เพลลาในชุดที่ 3 มีรอยแตกลึก 1/8 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง
CD32	เพลลาในชุดที่ 3 มีรอยแตกลึก 1/4 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง
CD33	เพลลาในชุดที่ 3 มีรอยแตกลึก 1/2 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

ตำแหน่งที่วัดสัญญาณการสั่นสะเทือน

V1	ตำแหน่งแนวตั้งที่แบริงชุดที่ 1
V2	ตำแหน่งแนวตั้งที่แบริงชุดที่ 2
H1	ตำแหน่งแนวนอนที่แบริงชุดที่ 1
H2	ตำแหน่งแนวนอนที่แบริงชุดที่ 2

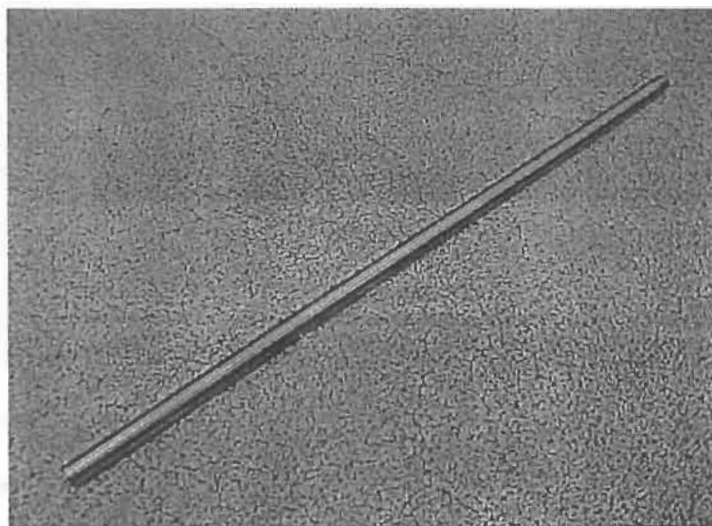


รูปที่ 4.17 ขนาดและส่วนประกอบของชุดทดลอง

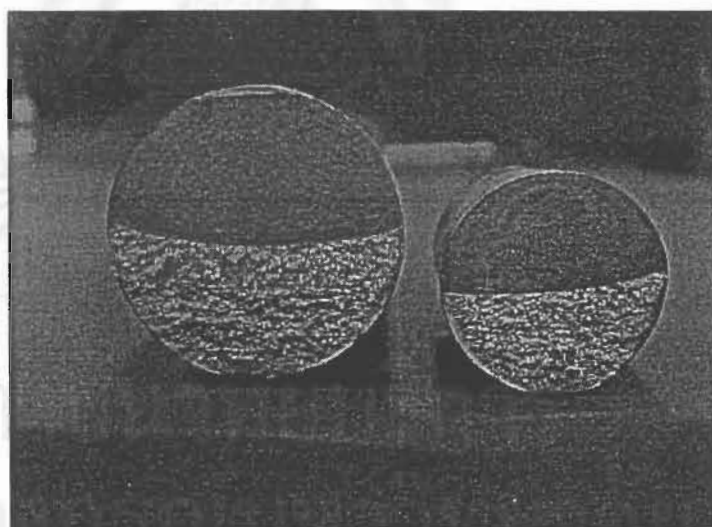


#### 4.4.1 ผลการทดลองขั้นที่ 1

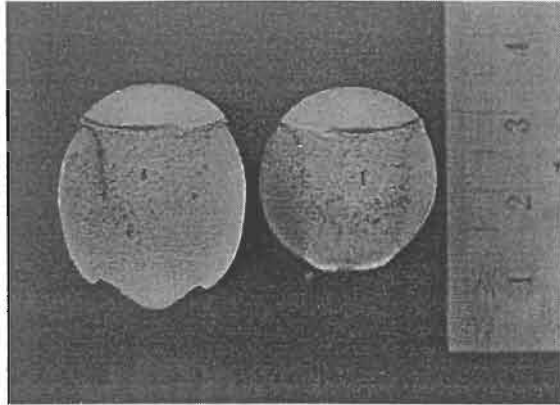
เพลที่มีรอยแตกทั้งสามซุดหลังจากการกลิ้งแล้ว จะได้เพลหน้าตัดของรอยแตกดังรูป 4.19 – 4.22



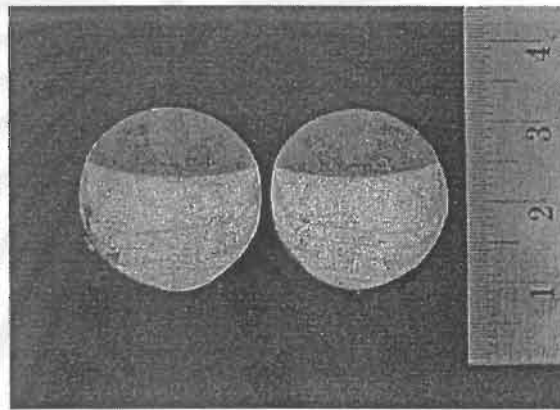
รูปที่ 4.18 เพลหลังจากการกลิ้งแล้ว



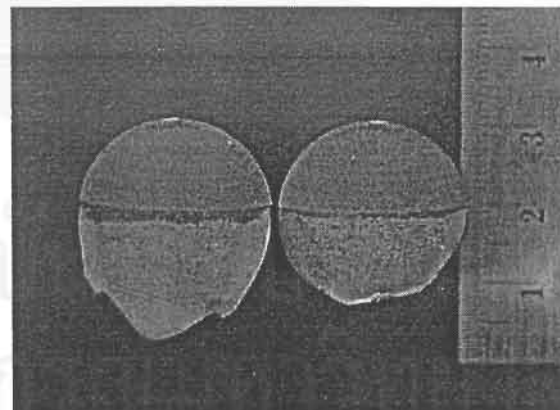
รูปที่ 4.19 ลักษณะหน้าตัดของรอยแตกก่อนทำการกลิ้ง (ซ้าย) และหลังจากทำการกลิ้ง (ขวา)



CD11

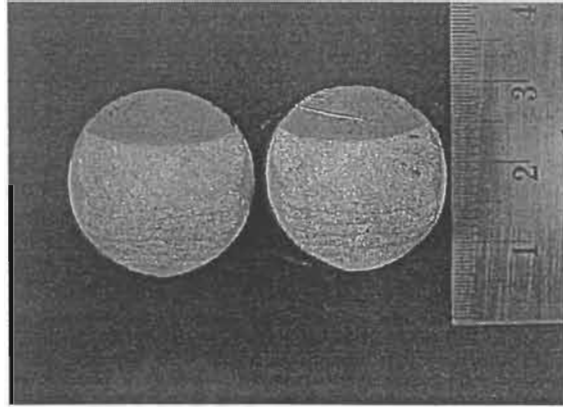


CD12

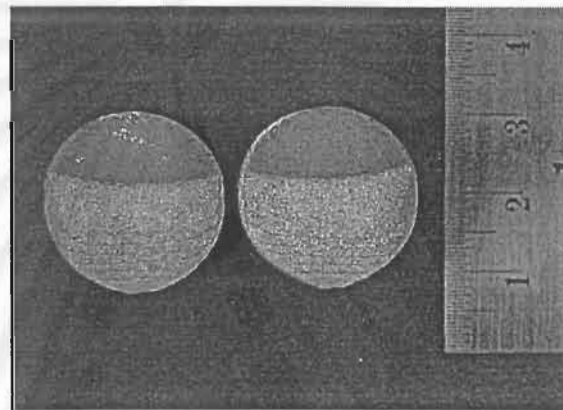


CD13

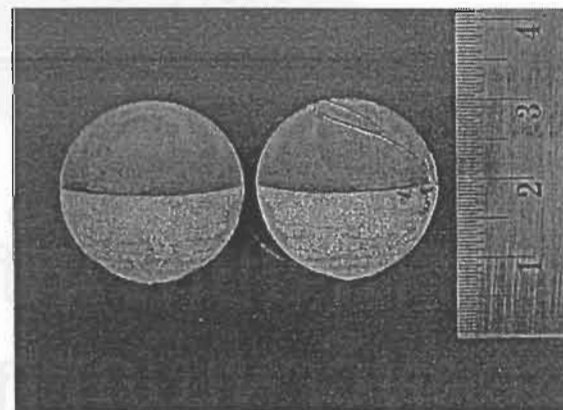
รูปที่ 4.20 หน้าตัดรอยแตกของเพลาชุดที่ 1



CD21

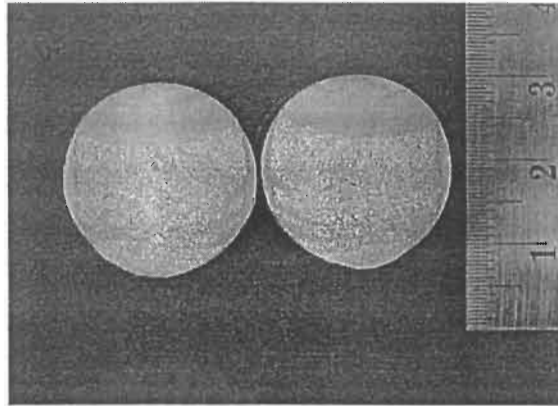


CD22

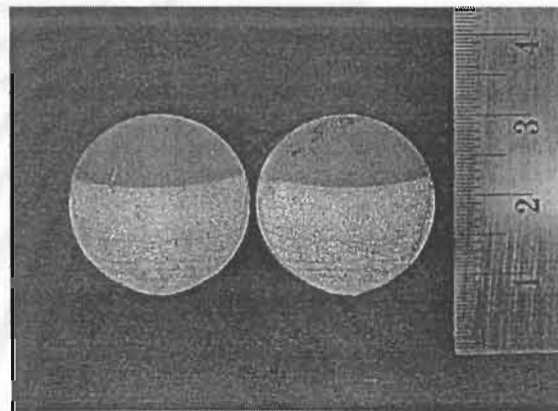


CD23

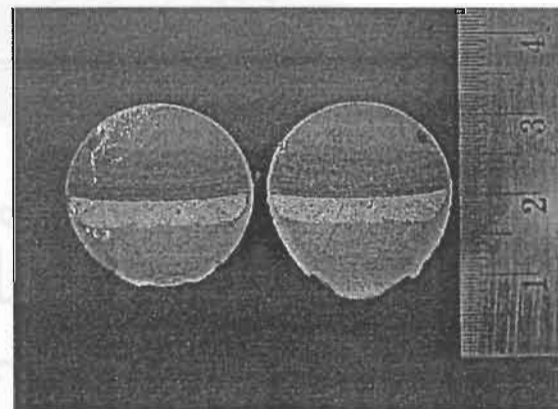
รูปที่ 4.21 หน้าตัดรอยแตกของเพลาชุดที่ 2



CD31



CD32



CD33

รูปที่ 4 ๖๖ หน้าตัดรอยแตกกลางเพลลาซด์ที่ 3

จากรูปที่ 4.19 ด้านซ้ายจะเป็นหน้าตัดรอยแตกของเพลาก่อนที่จะนำไปกลึงซึ่งบริเวณด้านบนจะเห็นรอยบากที่เกิดจากเลื่อยฉลุ ต่ำลงมาจะเป็นบริเวณของรอยแตกที่เกิดจาก fatigue load ซึ่งจะมีลักษณะเรียบและโค้งเข้าหาจุดศูนย์กลางของหน้าตัดเพล่า ส่วนบริเวณผิวขรุขระเกิดจากการที่เนื้อโลหะขาดออกจากกันเมื่อทำการกดให้เพล่าหักบริเวณด้านตรงข้ามรอยแตกเพื่อดูหน้าตัดของรอยแตก ส่วนรูปทางด้านขวาเป็นหน้าตัดรอยแตกของเพล่าหลังจากนำไปกลึงเพื่อกำจัดรอยบากแล้ว

จากรูปที่ 4.20 – 4.22 แสดงหน้าตัดรอยแตกของเพล่าชุดที่ 1, ชุดที่ 2 และชุดที่ 3 ตามลำดับ จะเห็นว่าเพล่าแต่ละชุดจะได้รอยแตกที่มีระดับความลึกแตกต่างกัน 3 ระดับ และบริเวณขอบของหน้าตัดที่เกิดจากการขาดออกจากกันของเนื้อโลหะขณะทำการกดหักเพล่าจะเกิดเป็นครีบนี้อาจเกิดจากขณะใส่ภาระเพื่อกดหักเพล่านั้น ได้ทำการเพิ่มภาระในอัตราที่ช้าเกินไป แต่หน้าตัดรอยแตกที่มีลักษณะค่อนข้างกลมและไม่เกิดครีบเนื่องมาจากใส่ภาระในการหักเพล่าอย่างรวดเร็วเนื้อเพล่าจึงกระชากจากกันโดยไม่เกิดครีบ

จากการวัดระดับความลึกของรอยแตกในเพล่าทั้ง 3 ชุด ซึ่งวิธีการวัดความลึกของรอยแตกแสดงในภาคผนวก ง จะได้ระดับความลึกของรอยแตกดังนี้

#### เพล่าชุดที่ 1

- CD11 รอยแตกลึก 5.20 มม. เท่ากับ 0.26 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพล่า
- CD12 รอยแตกลึก 7.64 มม. เท่ากับ 0.38 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพล่า
- CD13 รอยแตกลึก 9.72 มม. เท่ากับ 0.49 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพล่า

#### เพล่าชุดที่ 2

- CD21 รอยแตกลึก 6.04 มม. เท่ากับ 0.30 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพล่า
- CD22 รอยแตกลึก 8.04 มม. เท่ากับ 0.40 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพล่า
- CD23 รอยแตกลึก 10.52 มม. เท่ากับ 0.53 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพล่า

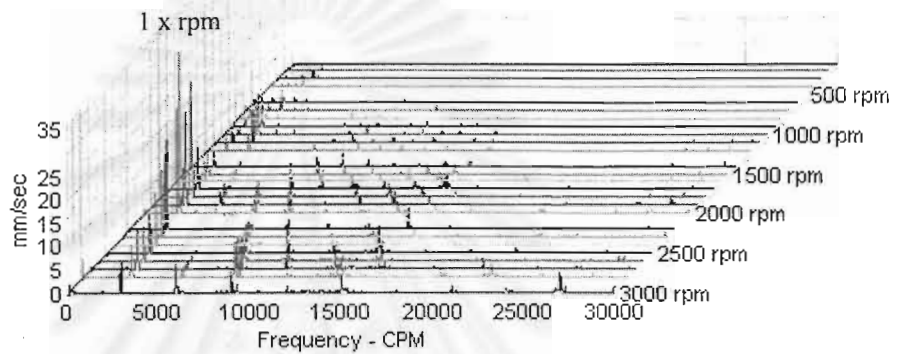
#### เพล่าชุดที่ 3

- CD31 รอยแตกลึก 6.54 มม. เท่ากับ 0.33 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพล่า
- CD32 รอยแตกลึก 8.20 มม. เท่ากับ 0.41 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพล่า
- CD33 รอยแตกลึก 10.50 มม. เท่ากับ 0.53 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพล่า

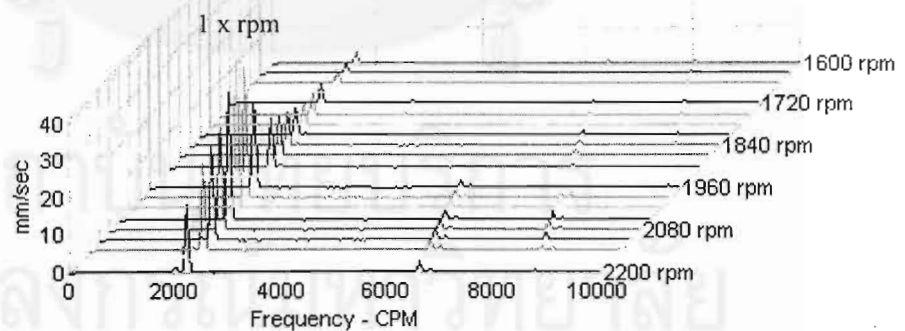
หมายเหตุ การวัดความลึกของรอยแตกนี้ ทำโดยการหักเพล่าเพื่อดูหน้าตัดของรอยแตกหลังจากทำการทดลองในขั้นที่ 2 เรียบร้อยแล้ว

#### 4.4.2 ผลการทดลองที่ 2.1

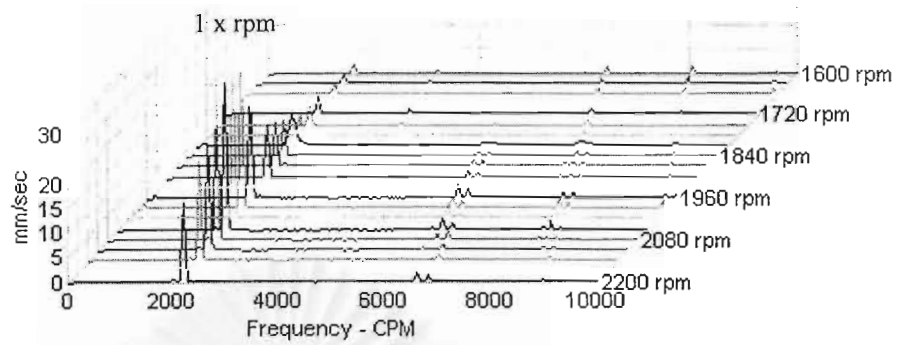
ผลการทดลองวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนที่แบริ่งชุดที่ 1 เพื่อหาความถี่ธรรมชาติของระบบ และศึกษาผลของรอยแตกในเพลลาที่มีต่อความถี่ธรรมชาติของระบบ แสดงให้เห็นเป็นสัญญาณสเปกตรัมบนสามแกนคือแกนความถี่ แกนแอมพลิจูดและแกนความเร็วรอบ โดยจะเรียงลำดับจากเพลมามาตรฐาน (Std), CD11, CD12 และ CD13 ตามลำดับ



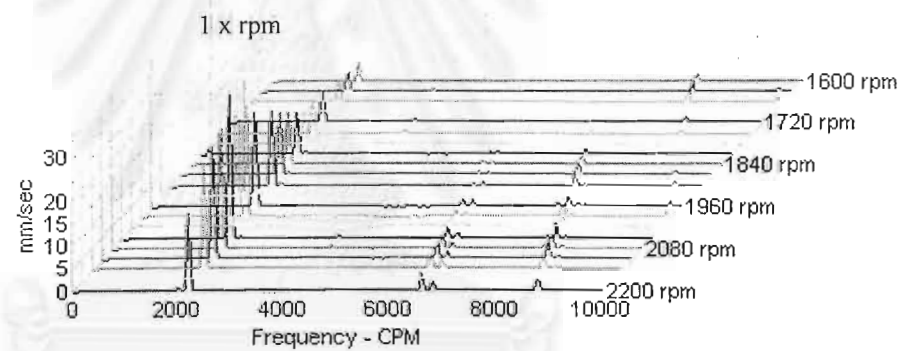
รูปที่ 4.23ก สัญญาณสั่นสะเทือนแบริ่งที่แบริ่งชุดที่ 1 ของ Std



รูปที่ 4.23ข สัญญาณสั่นสะเทือนแบริ่งที่แบริ่งชุดที่ 1 ของ CD11

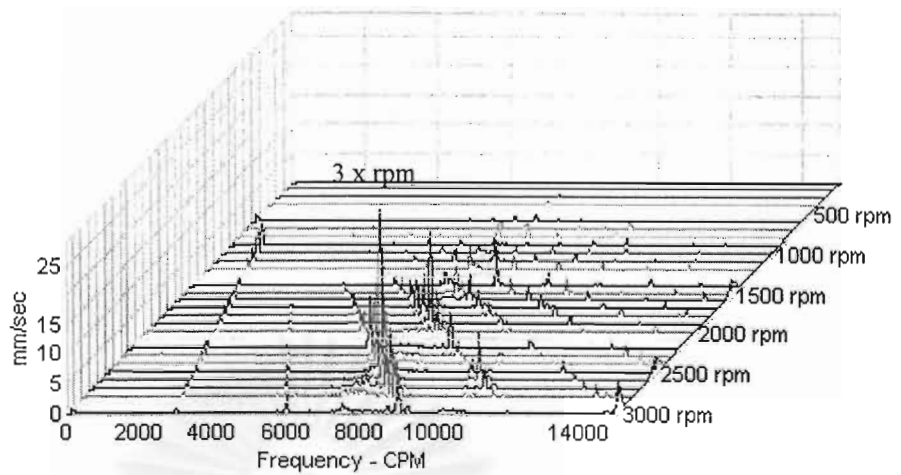


รูปที่ 4.23ค สัญญาณสั่นสะเทือนแวนดิ่งที่แบริ่งชุดที่ 1 ของ CD12

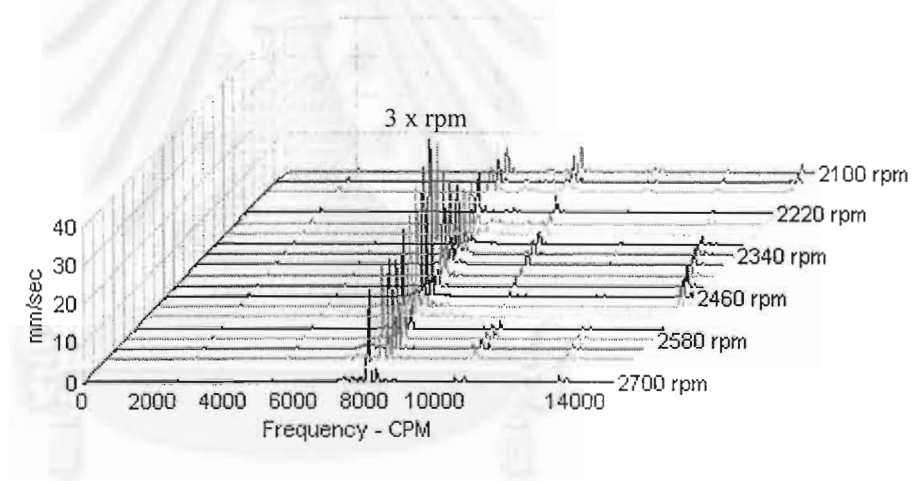


รูปที่ 4.23ง สัญญาณสั่นสะเทือนแวนดิ่งที่แบริ่งชุดที่ 1 ของ CD13

รูปที่ 4.23 สัญญาณสั่นสะเทือนแวนดิ่งเพื่อศึกษาผลของรอยแตกที่มีต่อความถี่ธรรมชาติของระบบ



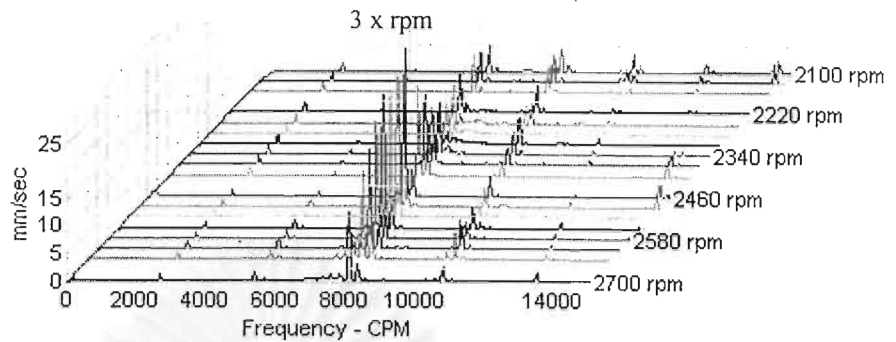
รูปที่ 4.24ก สัญญาณสั่นสะเทือนแวนอนที่แบริงชุดที่ 1 ของ Std



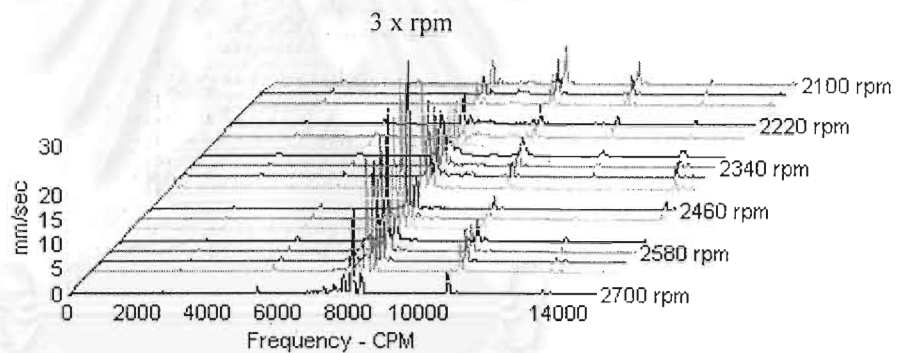
รูปที่ 4.24ข สัญญาณสั่นสะเทือนแวนอนที่แบริงชุดที่ 1 ของ CD11

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 4.24ค สัญญาณสั่นสะเทือนแวนอนที่แบริ่งชุดที่ 1 ของ CD12



รูปที่ 4.24ง สัญญาณสั่นสะเทือนแวนอนที่แบริ่งชุดที่ 1 ของ CD13

รูปที่ 4.24 สัญญาณสั่นสะเทือนแวนอนเพื่อศึกษาผลของรอยแตกที่มีต่อความถี่ธรรมชาติของระบบ

ในเครื่องจักรกลหมุนโดยทั่วไป เรโซแนนซ์ (resonance) หรือความเร็วรอบวิกฤติ (critical speed) จะเกิดขึ้นเมื่อความเร็วรอบของเครื่องจักรเข้าใกล้ค่าความถี่ธรรมชาติของเครื่องจักร ส่งผลให้มีขนาดการสั่นสะเทือนที่สูงมาก [3] ดังนั้นในการหาความถี่ธรรมชาติของระบบจึงสามารถพิจารณาจากความถี่รอบวิกฤติของระบบได้โดยพิจารณาแอมพลิจูด

ของสเปกตรัมที่ความถี่ 1 x rpm ว่ามีค่ามากที่สุดที่ความเร็วรอบใด ความเร็วรอบนั้นก็คือค่าความเร็วรอบวิกฤติของระบบนั้น

#### พิจารณาในแนวตั้ง

จากรูปที่ 4.23ก ค่าแอมพลิจูดสูงสุดของเพลามาตรฐานเกิดขึ้นที่ความถี่ 1 x rpm ที่ความเร็วรอบ 2,000 rpm

ดังนั้นค่าความเร็วรอบวิกฤติของเพลามาตรฐานในแนวตั้งคือ 2,000 rpm

จากรูปที่ 4.23ข ค่าแอมพลิจูดสูงสุดของเพลามาตรฐาน CD11 เกิดขึ้นที่ความถี่ 1 x rpm ที่ความเร็วรอบ 2,020 rpm

ดังนั้นค่าความเร็วรอบวิกฤติของเพลามาตรฐาน CD11 ในแนวตั้งคือ 2,020 rpm

จากรูปที่ 4.23ค ค่าแอมพลิจูดสูงสุดของเพลามาตรฐาน CD12 เกิดขึ้นที่ความถี่ 1 x rpm ที่ความเร็วรอบ 2,020 rpm

ดังนั้นค่าความเร็วรอบวิกฤติของเพลามาตรฐาน CD12 ในแนวตั้งคือ 2,020 rpm

จากรูปที่ 4.23ง ค่าแอมพลิจูดสูงสุดของเพลามาตรฐาน CD13 เกิดขึ้นที่ความถี่ 1 x rpm ที่ความเร็วรอบ 2,020 rpm

ดังนั้นค่าความเร็วรอบวิกฤติของเพลามาตรฐาน CD13 ในแนวตั้งคือ 2,020 rpm

#### พิจารณาในแนวนอน

จากรูปที่ 4.24ก ค่าแอมพลิจูดสูงสุดของเพลามาตรฐานเกิดขึ้นที่ความถี่ 3 x rpm ที่ความเร็วรอบ 2,500 rpm

ดังนั้นค่าความเร็วรอบวิกฤติของเพลามาตรฐานในแนวนอนคือ 7,500 rpm

จากรูปที่ 4.24ข ค่าแอมพลิจูดสูงสุดของเพลามาตรฐาน CD11 เกิดขึ้นที่ความถี่ 3 x rpm ที่ความเร็วรอบ 2,430 rpm

ดังนั้นค่าความเร็วรอบวิกฤติของเพลามาตรฐาน CD11 ในแนวนอนคือ 7,290 rpm

จากรูปที่ 4.24ค ค่าแอมพลิจูดสูงสุดของเพลามาตรฐาน CD12 เกิดขึ้นที่ความถี่ 3 x rpm ที่ความเร็วรอบ 2,460 rpm

ดังนั้นค่าความเร็วรอบวิกฤติของเพลามาตรฐาน CD12 ในแนวนอนคือ 7,380 rpm

จากรูปที่ 4.24ง ค่าแอมพลิจูดสูงสุดของเพลามาตรฐาน CD13 เกิดขึ้นที่ความถี่ 3 x rpm ที่ความเร็วรอบ 2,460 rpm

ดังนั้นค่าความเร็วรอบวิกฤติของเพลามาตรฐาน CD13 ในแนวนอนคือ 7,380 rpm

เมื่อพิจารณาค่าความเร็ววิกฤติที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการทำ bump test รูปที่ จ-6 ในภาคผนวก จ ปรากฏว่ามีค่าใกล้เคียงกันโดยค่าความถี่ธรรมชาติในแนวตั้งคือ 2,125 cpm และค่าความถี่ธรรมชาติในแนวระดับคือ 7,625 cpm

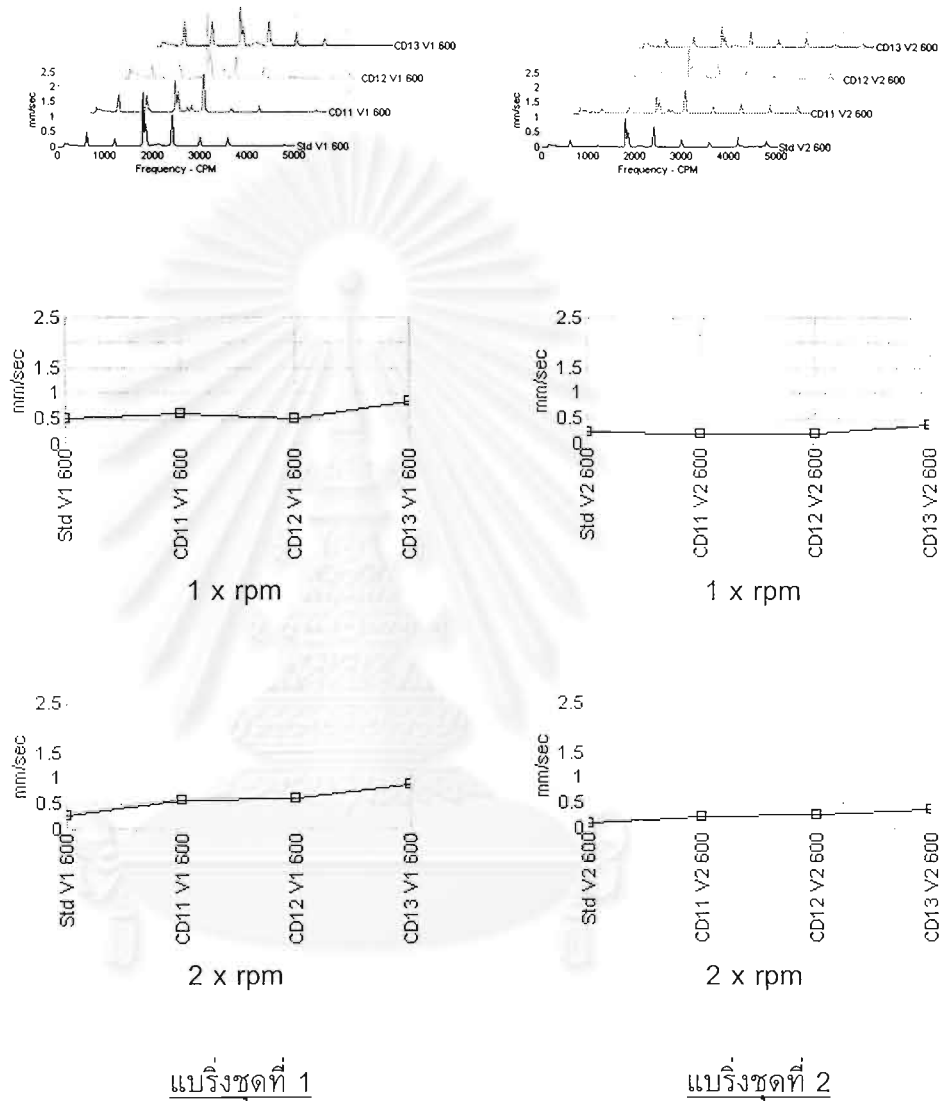
#### 4.4.3 ผลการทดลองที่ 2.2

ผลการทดลองในส่วนนี้จะแสดงรูปแบบและแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณการสั่นสะเทือนของเพลลาเมื่อรอยแตกในเพลลา มีระดับความลึกมากขึ้น จากผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในบทที่ 3 จะพิจารณาสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ความถี่ 1 x rpm และฮาร์มอนิกของความถี่เท่ากับความถี่รอบเพลลา โดยจะแสดงผลการทดลองให้อยู่ในพิสัยความถี่ 5,000 cpm

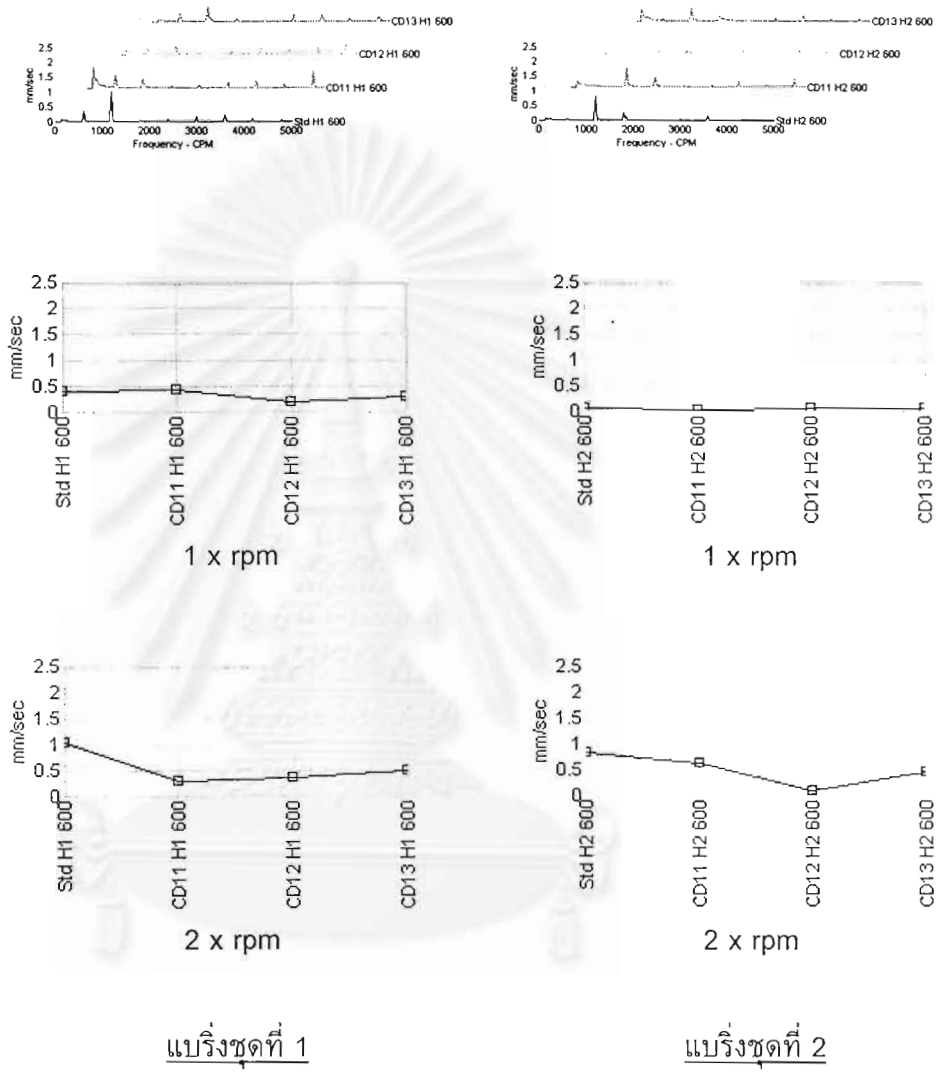


สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

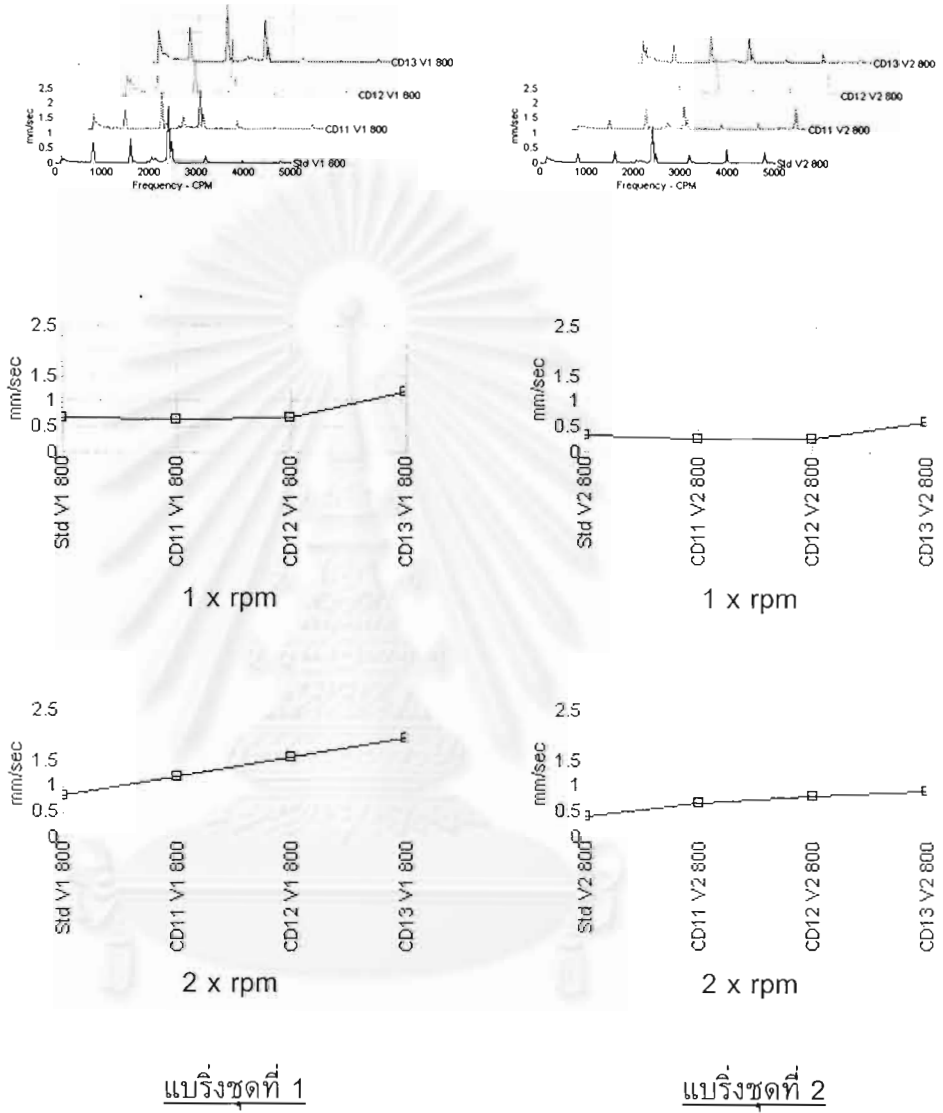
รูปแบบของสัญญาณการสั่นสะเทือนเมื่อรอยแตกมีความลึกเพิ่มขึ้น  
สัญญาณการสั่นสะเทือนของเพลาชุดที่ 1



รูปที่ 4.25 สัญญาณสั่นสะเทือนของเพลาชุดที่ 1 ความเร็วรอบ 600 rpm แนวตั้ง

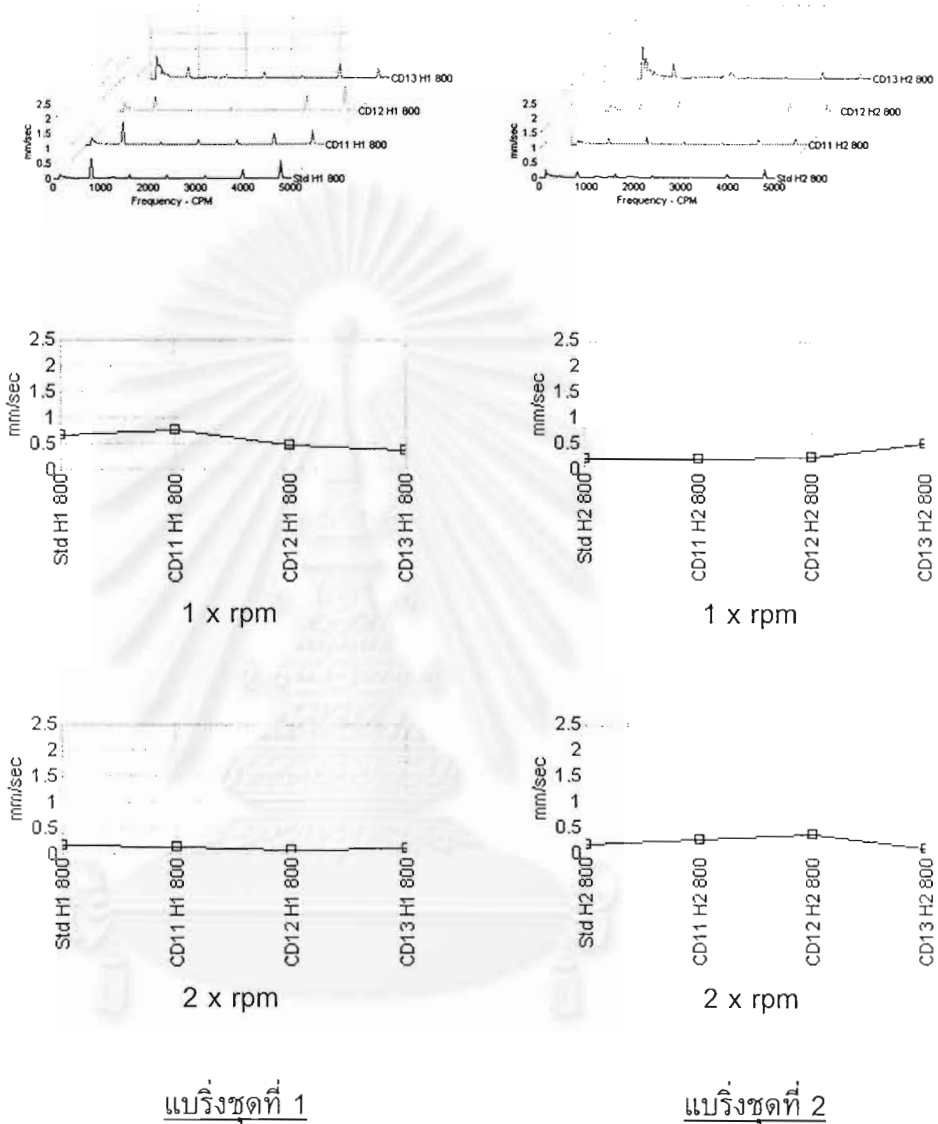


จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
รูปที่ 4.26 สัญญาณสั่นสะเทือนของเพลาชุดที่ 1 ความเร็วรอบ 600 rpm แนวนอน

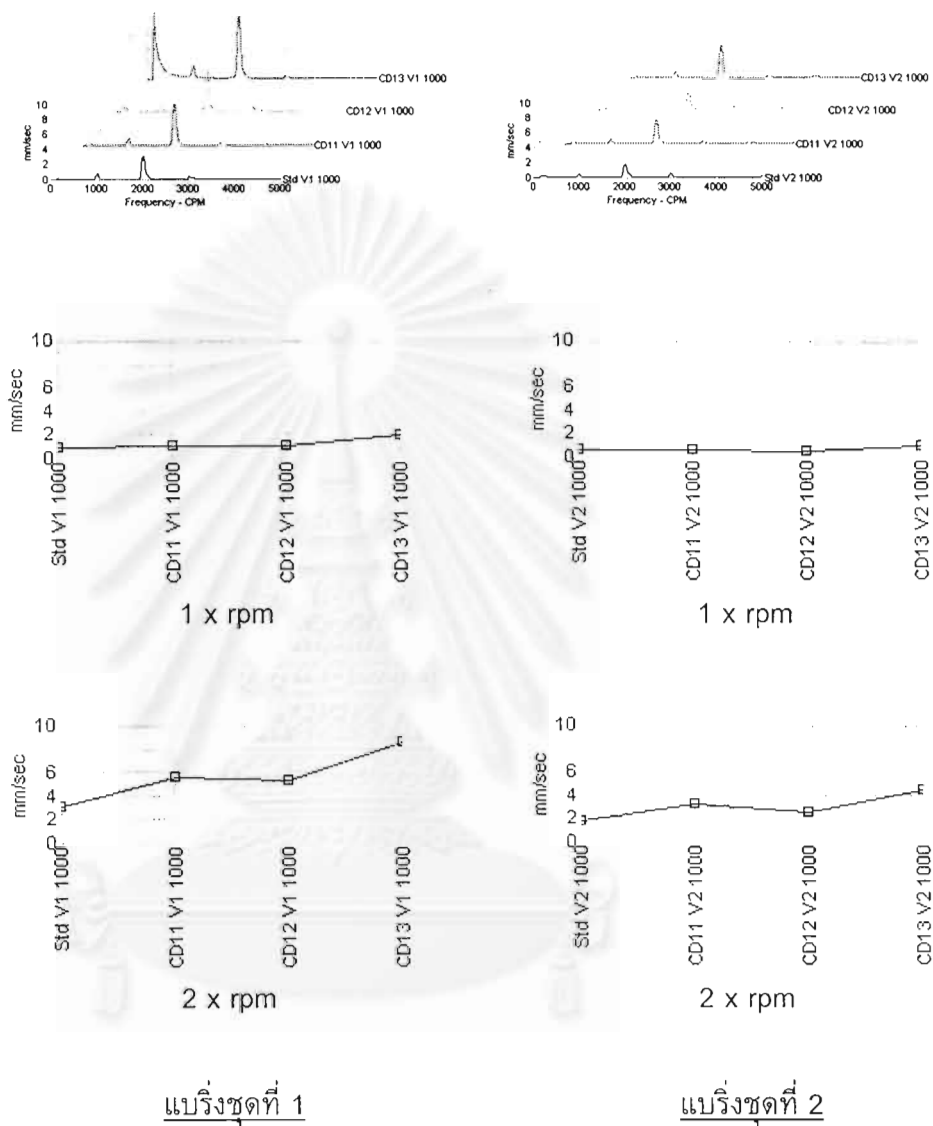


จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.27 สัญญาณสั่นสะเทือนของเพลาชุดที่ 1 ความเร็วรอบ 800 rpm แนวตั้ง

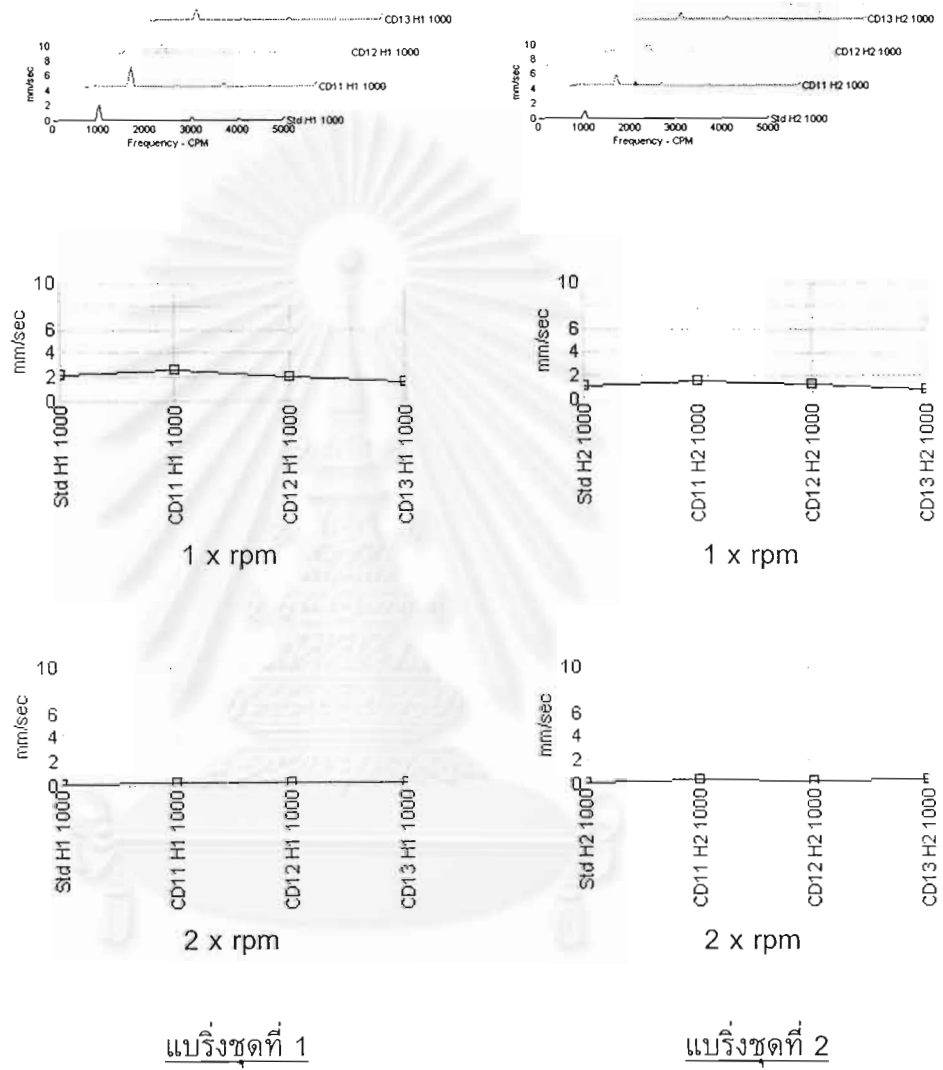


รูปที่ 4.28 สัญญาณเส้นสะท้อนของเพลาชดที่ 1 ความเร็วรอบ 800 rpm แนวนอน



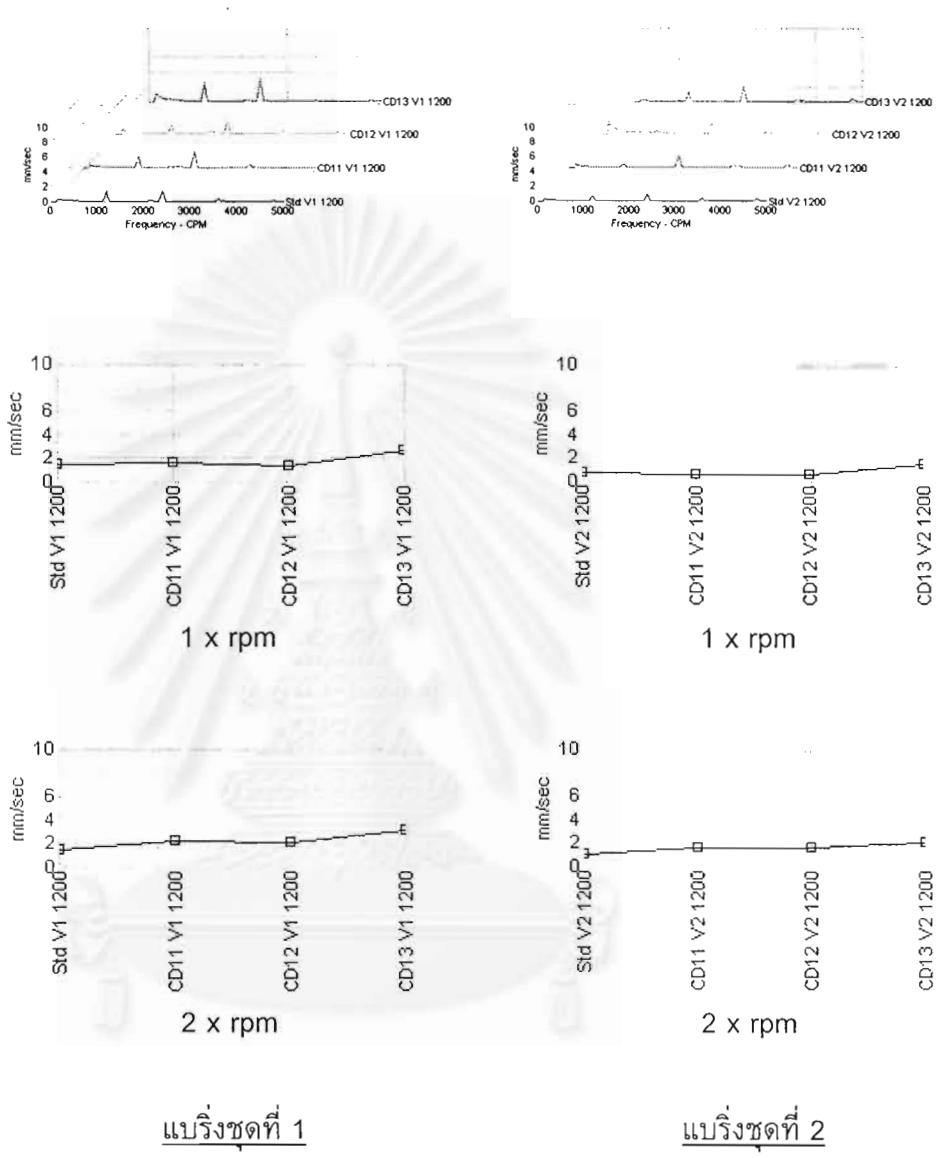
รูปที่ 4.29 สัญญาณสั่นสะเทือนของเพลารูตที่ 1 ความเร็วรอบ 1000 rpm แนวตั้ง





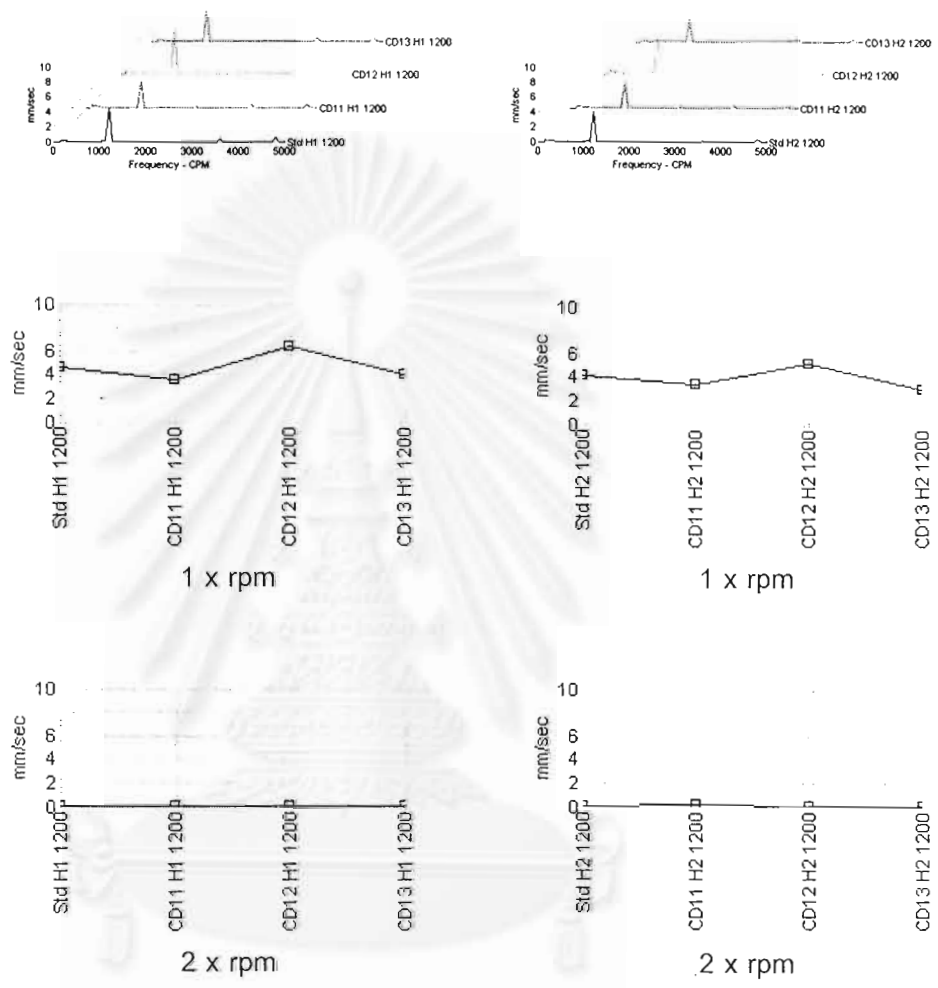
# จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.30 สัญญาณสั่นสะเทือนของเพลาชุดที่ 1 ความเร็วรอบ 1000 rpm แนวนอน



รูปที่ 4.31 สัญญาณสั่นสะเทือนของเพลาชุดที่ 1 ความเร็วรอบ 1200 rpm แนวตั้ง

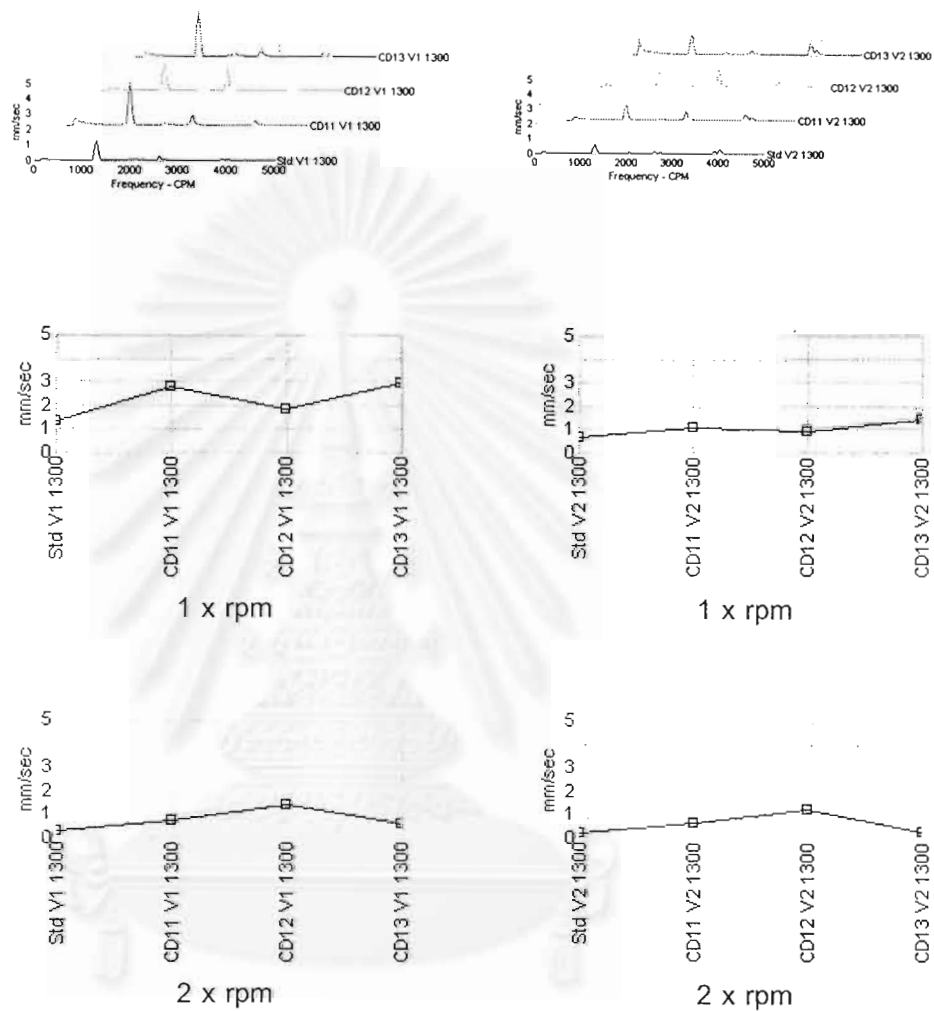
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สภำกรงคหภรกร  
จุฬำลงกรณมหำวศทยำลย

แบรรงชุดที่ 1 แบรรงชุดที่ 2

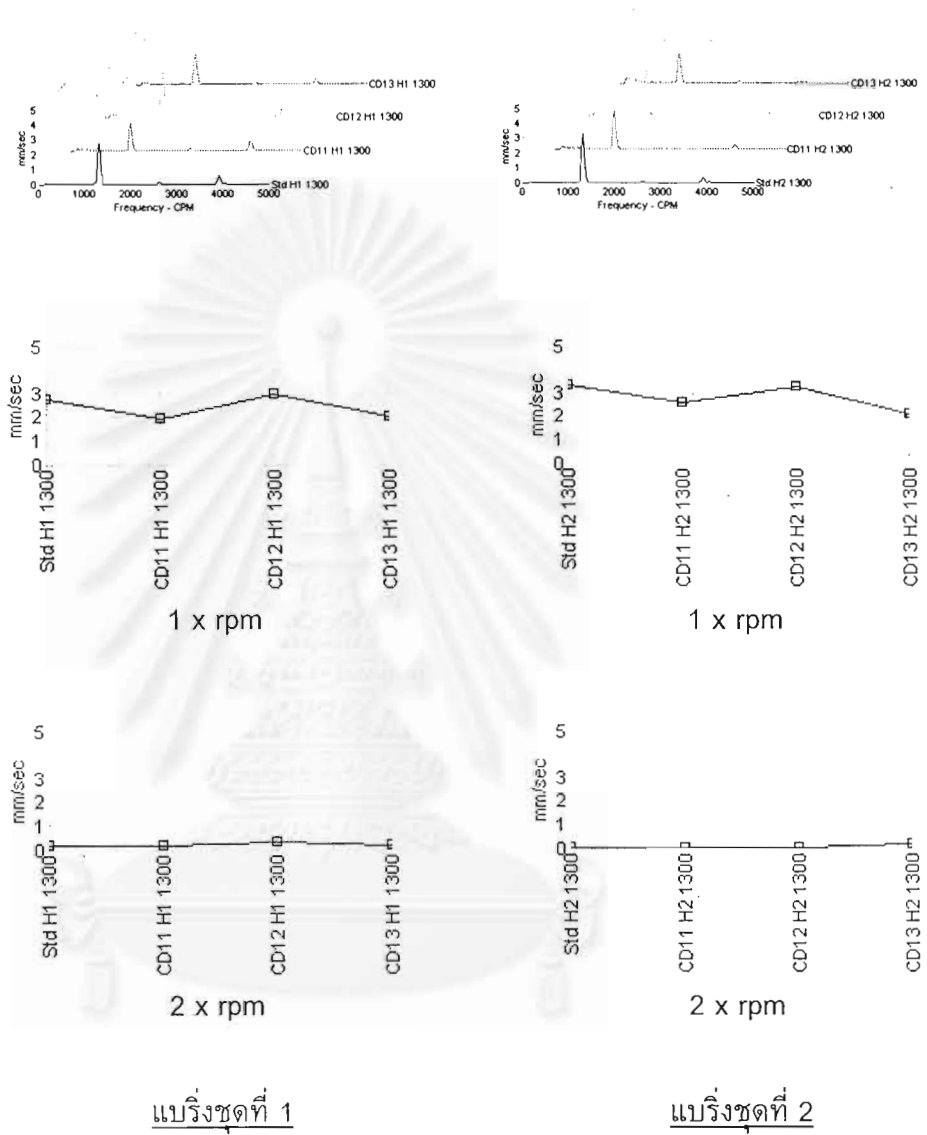
รูปที่ 4.32 สันญภำณสันสะเทอนของเพลชุดที่ 1 ควมเรอรอบ 1200 rpm นวนอน



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

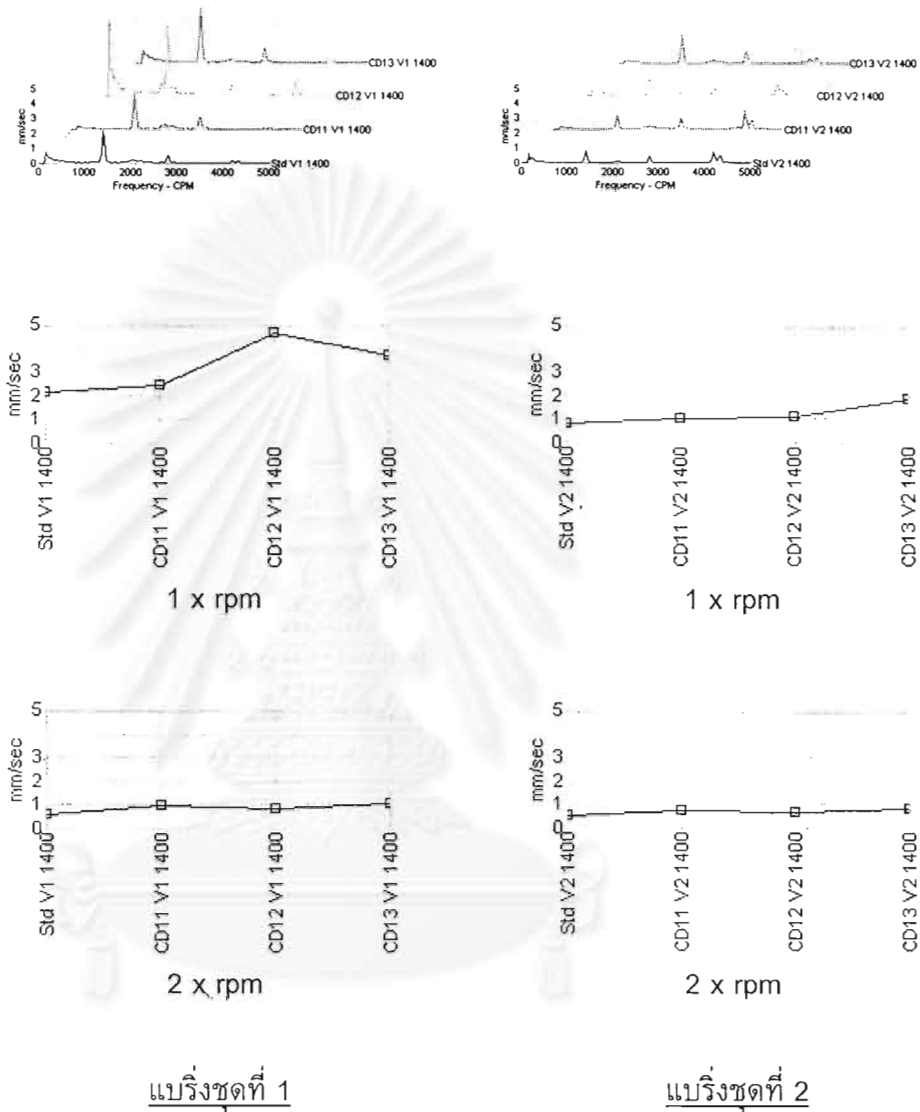
แบริ่งชุดที่ 1      แบริ่งชุดที่ 2

รูปที่ 4.33 สัญญาณสั่นสะเทือนของเพลาชุดที่ 1 ความเร็วรอบ 1300 rpm แนวตั้ง



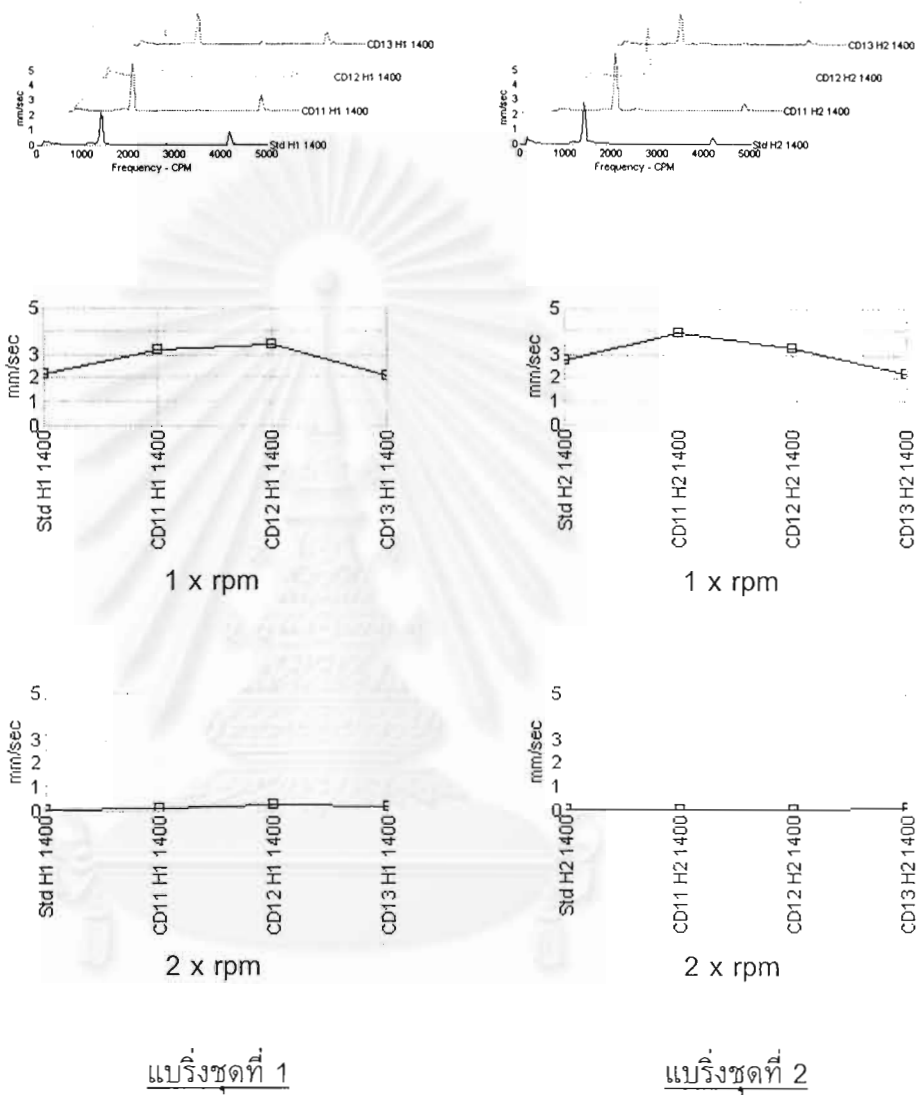
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.34 สัญญาณสั่นสะเทือนของเพลาชุดที่ 1 ความเร็วรอบ 1300 rpm แนวนอน



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.35 สัญญาณสั่นสะเทือนของเพลาชุดที่ 1 ความเร็วรอบ 1400 rpm แนวตั้ง



รูปที่ 4.36 สัญญาณสั่นสะเทือนของเฟลาชุดที่ 1 ความเร็วรอบ 1400 rpm แนวนอน

**แนวโน้มของสัญญาณการสันสะเทือนเมื่อรอยแตกมีความลึกเพิ่มขึ้น**  
**สัญญาณการสันสะเทือนของเพลาชุดที่ 1**

**ความเร็วรอบ 600 rpm**

สัญญาณการสันสะเทือนแนวตั้ง (รูปที่ 4.25)

แบร์ริงชุดที่ 1

1 x rpm : สัญญาณมีขนาดใกล้เคียงกันที่ Std, CD11 และ CD12 และสัญญาณมีขนาดเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนที่ CD13

2 x rpm : สัญญาณมีขนาดใกล้เคียงกันที่ CD11 และ CD12 ซึ่งมีขนาดสูงกว่าที่ Std และสัญญาณมีขนาดเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนที่ CD13

แบร์ริงชุดที่ 2

1 x rpm : แนวโน้มของสัญญาณจากแบร์ริงชุดที่ 2 คล้ายกับแบร์ริงชุดที่ 1 แต่ขนาดและการเพิ่มขึ้นของสัญญาณต่ำกว่าแบร์ริงชุดที่ 1

2 x rpm : สัญญาณมีขนาดเพิ่มขึ้นที่ Std, CD11, CD12 และ CD13 ตามลำดับ โดยที่มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นในลักษณะเชิงเส้น และมีขนาดสัญญาณต่ำกว่าแบร์ริงชุดที่ 1

จากสัญญาณการสันสะเทือนที่แบร์ริงทั้งสองชุด จะเห็นสัญญาณ 3 x rpm (1,800 cpm) และ 4 x rpm (2,400 cpm) มีขนาดสูงมาก เมื่อพิจารณาผลการทดลองที่ 2.1 รูปที่ 4.23 ก จะเห็นว่าสัญญาณ 1 x rpm ที่ความเร็วรอบ 1,500 rpm ถึง 2,500 rpm ซึ่งอยู่ใกล้กับค่าความเร็วรอบวิกฤติ (2,000 rpm) จะมีขนาดค่อนข้างสูง เนื่องจากเมื่อเพลามีความเร็วรอบเข้าใกล้ค่าความเร็วรอบวิกฤติ ขนาดของการสันสะเทือนจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และมีค่าสูงสุดที่ความเร็วรอบวิกฤติและขนาดการสันสะเทือนจะเริ่มลดลงเมื่อความเร็วรอบของเพลากลับจากความเร็วรอบวิกฤติไปแล้ว จากเหตุผลนี้ส่งผลให้สัญญาณการสันสะเทือนที่ความถี่ซึ่งอยู่ในช่วง 1,500 cpm ถึง 2,500 cpm มีขนาดสูงมาก

สัญญาณการสันสะเทือนแนวนอน (รูปที่ 4.26)

แบร์ริงชุดที่ 1

1 x rpm : สัญญาณมีขนาดใกล้เคียงกันที่ Std, CD11, CD12 และ CD13

2 x rpm : สัญญาณมีขนาดลดลงจาก Std ที่ CD11 และมีขนาดเพิ่มขึ้นจาก CD11 เล็กน้อยที่ CD12 และ CD13 ตามลำดับ



แบริ่งชุดที่ 2

1 x rpm : สัญญาณมีขนาดค่อนข้างคงที่เช่นเดียวกับแบริ่งชุดที่ 1 แต่มีขนาดต่ำกว่า

2 x rpm : สัญญาณมีขนาดลดลงจาก Std ที่ CD11 และ CD12 ตามลำดับ และมีขนาดเพิ่มขึ้นที่ CD13

**ความเร็วรอบ 800 rpm**สัญญาณการสั่นสะเทือนแนวตั้ง (รูปที่ 4.27)แบริ่งชุดที่ 1

1 x rpm : ขนาดของสัญญาณมีแนวโน้มคงที่ในเพลลา Std, CD11 และ CD12 และขนาดสัญญาณเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดที่ CD13

2 x rpm : สัญญาณมีขนาดเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นที่ CD11, CD12 และ CD13 ตามลำดับ

แบริ่งชุดที่ 2

1 x rpm : สัญญาณมีแนวโน้มคล้ายกับแบริ่งชุดที่ 1 แต่ขนาดและการเพิ่มขึ้นของสัญญาณต่ำกว่าแบริ่งชุดที่ 1

2 x rpm : สัญญาณมีขนาดเพิ่มแบบเชิงเส้นเมื่อรอยแตกมีระดับความลึกเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับสัญญาณจากแบริ่งชุดที่ 1 แต่มีขนาดสัญญาณต่ำกว่า

จากสัญญาณการสั่นสะเทือนที่แบริ่งทั้งสองชุด จะเห็นสัญญาณ 3 x rpm (2,400 cpm) มีขนาดสูงมาก ซึ่งมีสาเหตุเช่นเดียวกับสัญญาณ 3 x rpm (1,800 cpm) และ 4 x rpm (2,400 cpm) ที่ความเร็วรอบ 600 rpm

สัญญาณการสั่นสะเทือนแนวนอน (รูปที่ 4.28)แบริ่งชุดที่ 1

1 x rpm : สัญญาณมีขนาดใกล้เคียงกันที่ Std, CD11, CD12 และ CD13

2 x rpm : สัญญาณมีแนวโน้มคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามระดับความลึกของรอยแตกที่เพิ่มขึ้น

แบริ่งชุดที่ 2

1 x rpm : สัญญาณมีขนาดใกล้เคียงกันที่ Std, CD11 และ CD12 แต่มีขนาดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่ CD13

2 x rpm : สัญญาณมีขนาดใกล้เคียงกันที่ Std, CD11 และ CD12 แต่มีขนาดลดลงเล็กน้อยที่ CD13

### ความเร็วรอบ 1,000 rpm

#### สัญญาณการสั่นสะเทือนแนวตั้ง (รูปที่ 4.29)

##### แบริ่งชุดที่ 1

1 x rpm : สัญญาณมีขนาดคงที่ในเพลลา Std, CD11 และ CD12 และสัญญาณมีขนาดเพิ่มขึ้นที่ CD13

2 x rpm : สัญญาณมีขนาดใกล้เคียงกันที่ CD11 และ CD12 ซึ่งสูงกว่า Std มาก และสัญญาณยังมีขนาดเพิ่มขึ้นอย่างมากที่ CD13

##### แบริ่งชุดที่ 2

1 x rpm : สัญญาณมีแนวโน้มคล้ายกับแบริ่งชุดที่ 1 แต่เห็นการเพิ่มขึ้นของขนาดสัญญาณที่ CD13 ได้ไม่ชัดเจนเท่ากับแบริ่งชุดที่ 1

2 x rpm : สัญญาณมีแนวโน้มคล้ายกับแบริ่งชุดที่ 1 แต่มีขนาดและการเพิ่มขึ้นของสัญญาณต่ำกว่าแบริ่งชุดที่ 1

จากแนวโน้มของสัญญาณการสั่นสะเทือนในแนวตั้งจะเห็นสัญญาณ 2 x rpm (2,000 cpm) มีขนาดสูงกว่าสัญญาณ 1 x rpm มาก เนื่องจากตรงกับค่าความถี่ธรรมชาติของระบบในแนวตั้ง ดังแสดงในภาคผนวก จ รูปที่ จ-6 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับความเร็วรอบวิกฤติในแนวตั้งที่ได้จากการทดลองที่ 2.1 และจากการที่สัญญาณ 2 x rpm มีขนาดสูงมาก ทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณ 1 x rpm ได้ไม่ชัดเจน

#### สัญญาณการสั่นสะเทือนแนวนอน (รูปที่ 4.30)

##### แบริ่งชุดที่ 1

1 x rpm : สัญญาณมีแนวโน้มคงที่ในเพลลา Std, CD11, CD12 และ CD13

2 x rpm : สัญญาณมีขนาดคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามระดับความลึกของรอยแตกที่เพิ่มขึ้น

##### แบริ่งชุดที่ 2

1 x rpm : สัญญาณมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามความลึกของรอยแตก และมีขนาดต่ำกว่าสัญญาณจากแบริ่งชุดที่ 1 เล็กน้อย

2 x rpm : สัญญาณมีขนาดใกล้เคียงกันที่ Std, CD11, CD12 และ CD13 และมีขนาดสัญญาณใกล้เคียงกับแบริ่งชุดที่ 1

### ความเร็วรอบ 1,200 rpm

#### สัญญาณการสั่นสะเทือนแนวตั้ง (รูปที่ 4.31)

##### แบริ่งชุดที่ 1

1 x rpm : สัญญาณมีขนาดใกล้เคียงกันที่ Std, CD11 และ CD12 และสัญญาณมีขนาดเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนที่ CD13

2 x rpm : สัญญาณมีขนาดใกล้เคียงกันที่ CD11 และ CD12 ซึ่งสูงกว่า Std และสัญญาณมีขนาดเพิ่มขึ้นที่ CD13

##### แบริ่งชุดที่ 2

1 x rpm : สัญญาณมีขนาดต่ำกว่าสัญญาณจากแบริ่งชุดที่ 1 แต่มีแนวโน้มของสัญญาณคล้ายคลึงกัน

2 x rpm : สัญญาณมีแนวโน้มและขนาดใกล้เคียงกับสัญญาณจากแบริ่งชุดที่ 1

#### สัญญาณการสั่นสะเทือนแนวนอน (รูปที่ 4.32)

##### แบริ่งชุดที่ 1

1 x rpm : ขนาดของสัญญาณมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงไม่แน่นอนโดย สัญญาณมีขนาดลดลงจาก Std ที่ CD11 เพิ่มขึ้นที่ CD12 และลดลงอีก CD13

2 x rpm : สัญญาณมีขนาดต่ำมาก และคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามระดับความลึกของรอยแตกที่เพิ่มขึ้น

##### แบริ่งชุดที่ 2

1 x rpm : สัญญาณมีแนวโน้มที่ไม่แน่นอนเช่นเดียวกับแบริ่งชุดที่ 1

2 x rpm : สัญญาณมีขนาดและแนวโน้มคล้ายกับสัญญาณจากแบริ่งชุดที่ 1

### ความเร็วรอบ 1,300 rpm

#### สัญญาณการสั่นสะเทือนแนวตั้ง (รูปที่ 4.33)

##### แบริ่งชุดที่ 1

- 1 x rpm : สัญญาณมีขนาดเพิ่มขึ้นจาก Std ที่ CD11 ลดลงเล็กน้อยที่ CD12 และเพิ่มขึ้นอีกที่ CD13
- 2 x rpm : สัญญาณมีขนาดเพิ่มขึ้นจาก Std ที่ CD11 และ CD12 แบบเชิงเส้น และกลับลดลงที่ CD13

##### แบริ่งชุดที่ 2

- 1 x rpm : สัญญาณมีขนาดใกล้เคียงกันที่ CD11 และ CD12 ซึ่งมีขนาดสูงกว่าที่ Std และสัญญาณมีขนาดเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนที่ CD13
- 2 x rpm : สัญญาณมีแนวโน้มและขนาดใกล้เคียงกับสัญญาณจากแบริ่งชุดที่ 1

#### สัญญาณการสั่นสะเทือนแนวนอน (รูปที่ 4.34)

##### แบริ่งชุดที่ 1

- 1 x rpm : สัญญาณมีขนาดลดลงจาก Std ที่ CD11 เพิ่มขึ้นที่ CD12 และลดลงอีกที่ CD13
- 2 x rpm : สัญญาณมีขนาดใกล้เคียงกันที่ Std, CD11, CD12 และ CD13

##### แบริ่งชุดที่ 2

- 1 x rpm : สัญญาณมีขนาดและแนวโน้มคล้ายกับแบริ่งชุดที่ 1
- 2 x rpm : สัญญาณมีแนวโน้มคล้ายกับสัญญาณจากแบริ่งชุดที่ 1 แต่ขนาดของสัญญาณต่ำกว่าแบริ่งชุดที่ 1

### ความเร็วรอบ 1,400 rpm

#### สัญญาณการสันสะเทือนแนวตั้ง (รูปที่ 4.35)

##### แบริ่งชุดที่ 1

1 x rpm : สัญญาณมีขนาดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก Std ที่ CD11 แล้วเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนที่ CD12 และลดลงเล็กน้อยที่ CD13

2 x rpm : สัญญาณมีขนาดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก Std ที่ CD11 และ CD12 และ CD13

##### แบริ่งชุดที่ 2

1 x rpm : สัญญาณมีขนาดใกล้เคียงกันที่ Std, CD11 และ CD12 และสัญญาณมีขนาดเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนที่ CD13

2 x rpm : สัญญาณมีแนวโน้มและขนาดใกล้เคียงกับสัญญาณจากแบริ่งชุดที่ 1

#### สัญญาณการสันสะเทือนแนวนอน (รูปที่ 4.36)

##### แบริ่งชุดที่ 1

1 x rpm : สัญญาณมีขนาดเพิ่มขึ้นจาก Std ที่ CD11 และ CD12 และลดลงที่ CD13

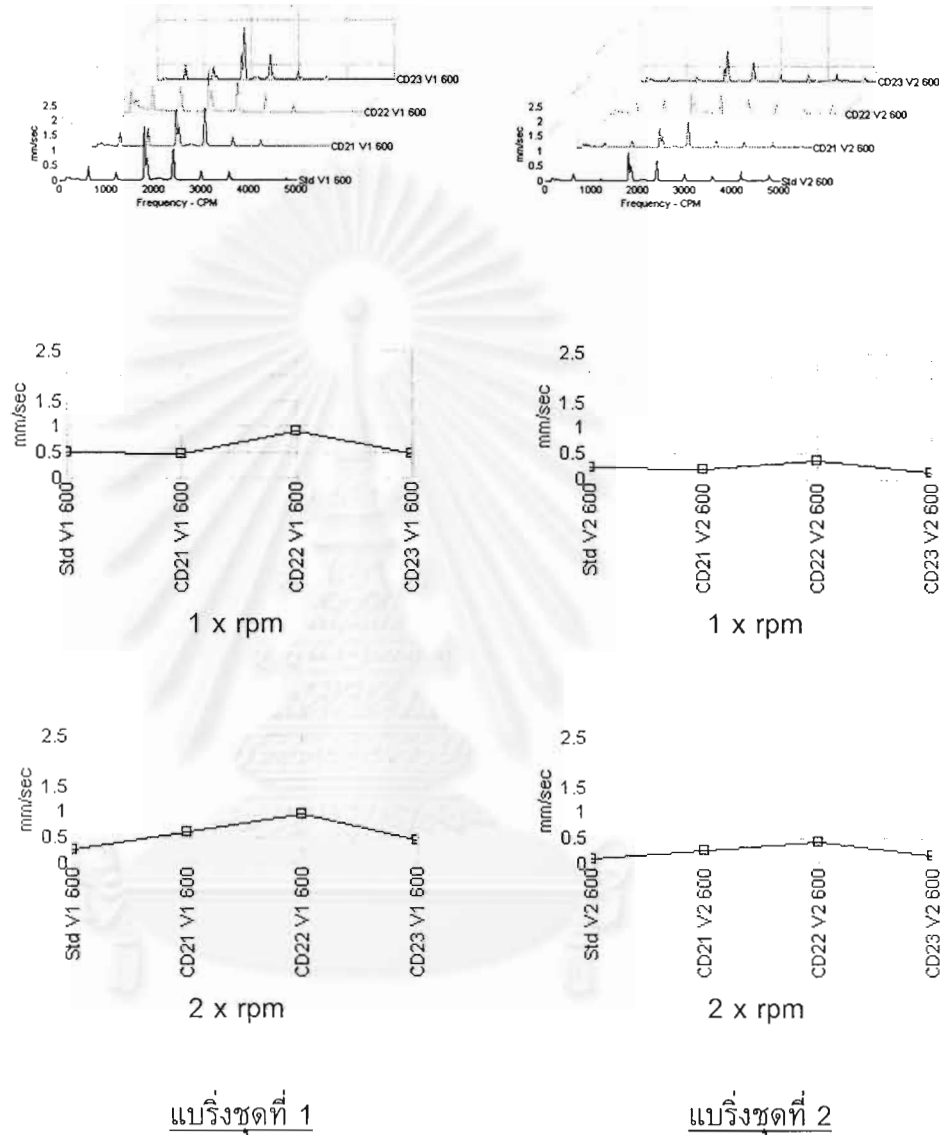
2 x rpm : สัญญาณมีขนาดคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามความลึกของรอยแตกที่เพิ่มขึ้น

##### แบริ่งชุดที่ 2

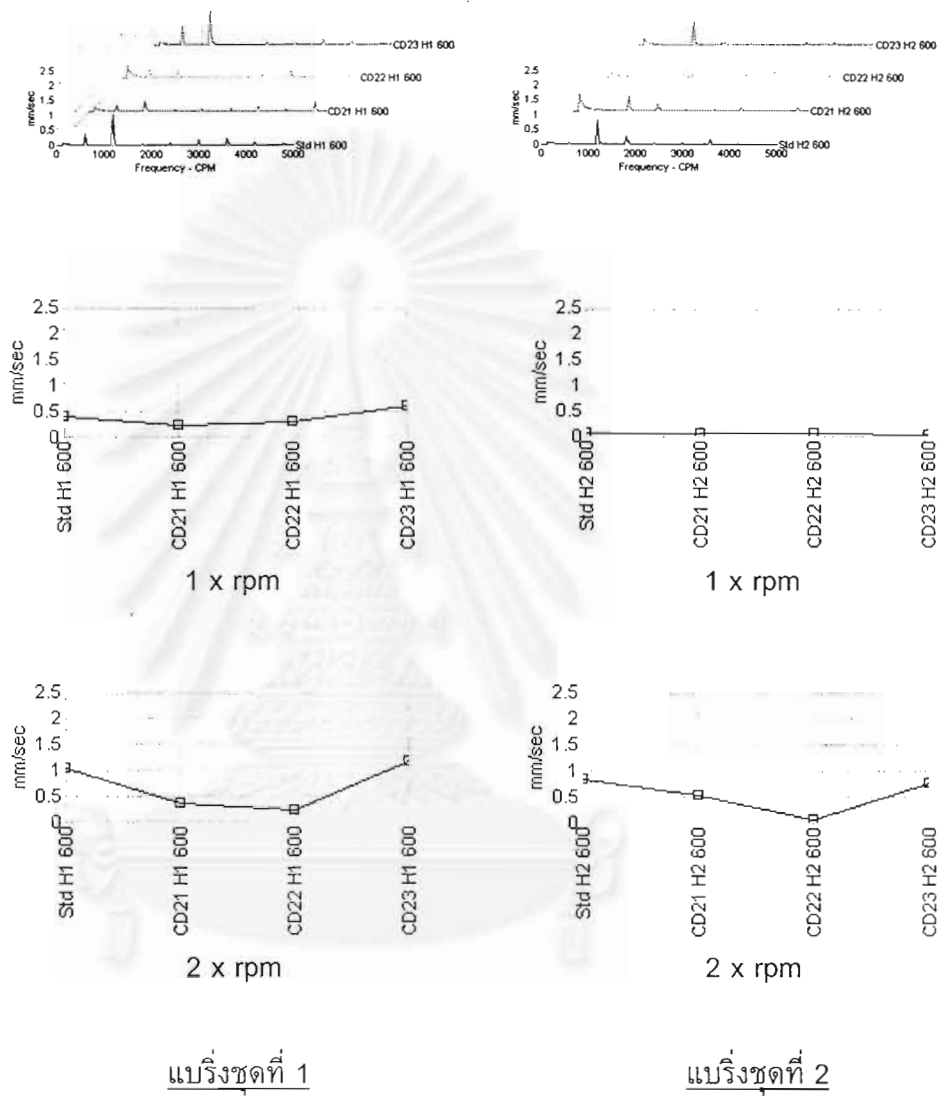
1 x rpm : สัญญาณมีขนาดเพิ่มขึ้นจาก Std ที่ CD11 และลดลงที่ CD12 และ CD13 ตามลำดับ

2 x rpm : สัญญาณมีขนาดและแนวโน้มคล้ายกับสัญญาณจากแบริ่งชุดที่ 1

รูปแบบของสัญญาณการสั่นสะเทือนเมื่อรอยแตกมีความลึกเพิ่มขึ้น  
สัญญาณสั่นสะเทือนของเพลาชุดที่ 2



รูปที่ 4.37 สัญญาณสั่นสะเทือนของเพลาชุดที่ 2 ความเร็วรอบ 600 rpm แนวตั้ง

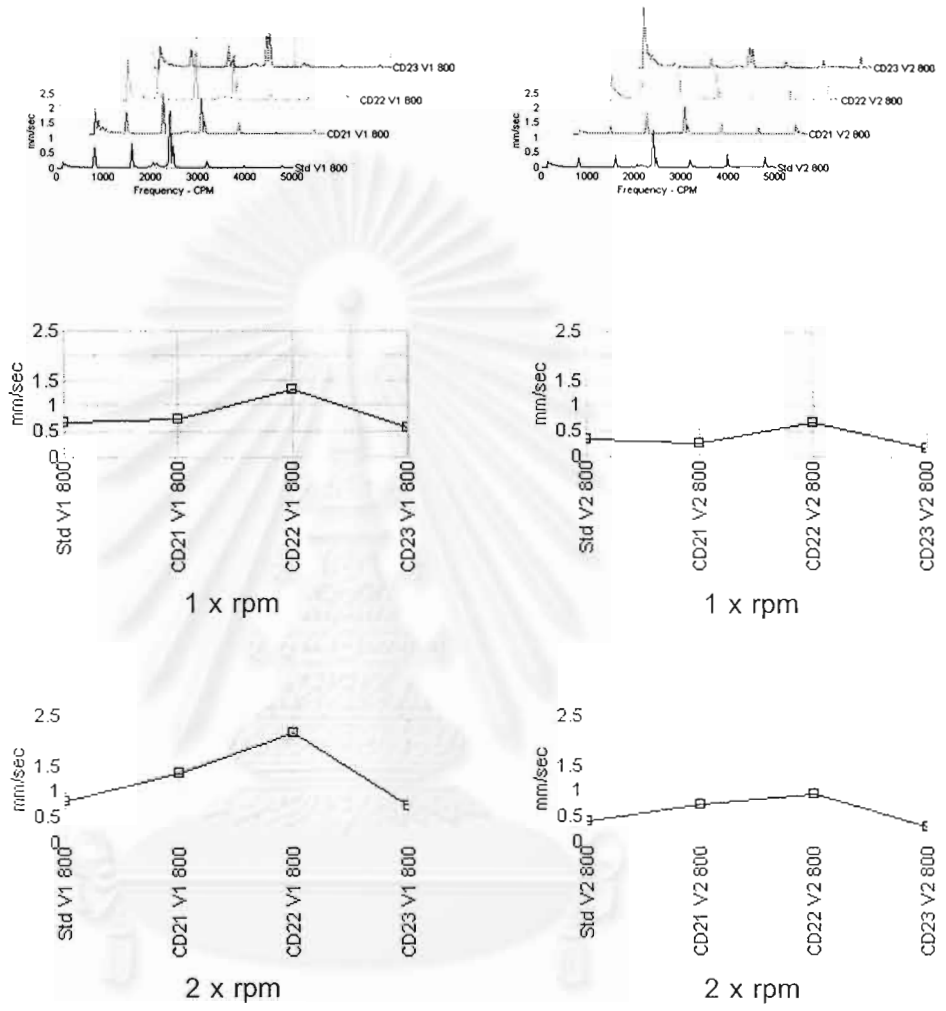


แบริ่งชุดที่ 1

แบริ่งชุดที่ 2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.38 สัญญาณเส้นสะท้อนของเพลาชุดที่ 2 ความเร็วรอบ 600 rpm แนวนอน

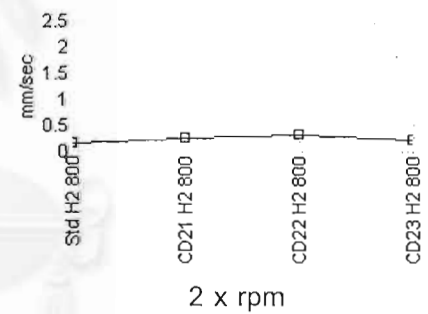
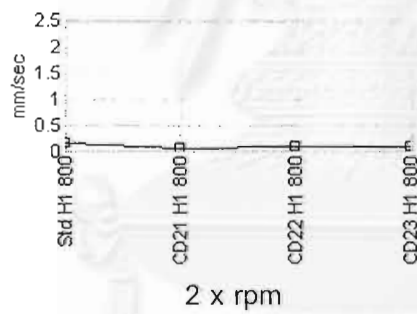
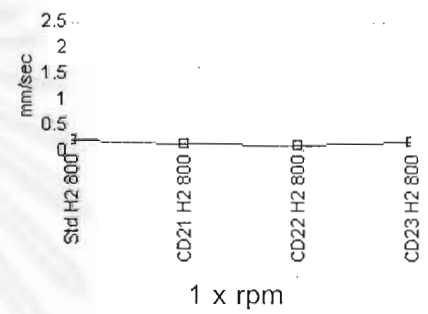
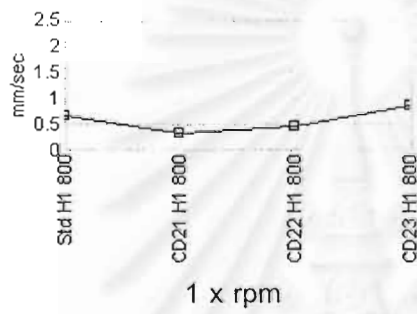
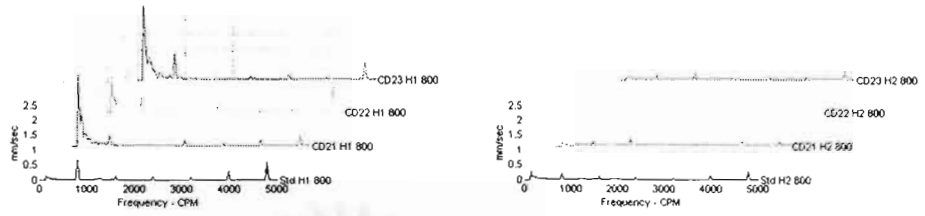


สถาบันวิทยบริการ
แบร็งชุดที่ 1
แบร็งชุดที่ 2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.39 สัญญาณสั่นสะเทือนของเพลาชุดที่ 2 ความเร็วรอบ 800 rpm แนวตั้ง

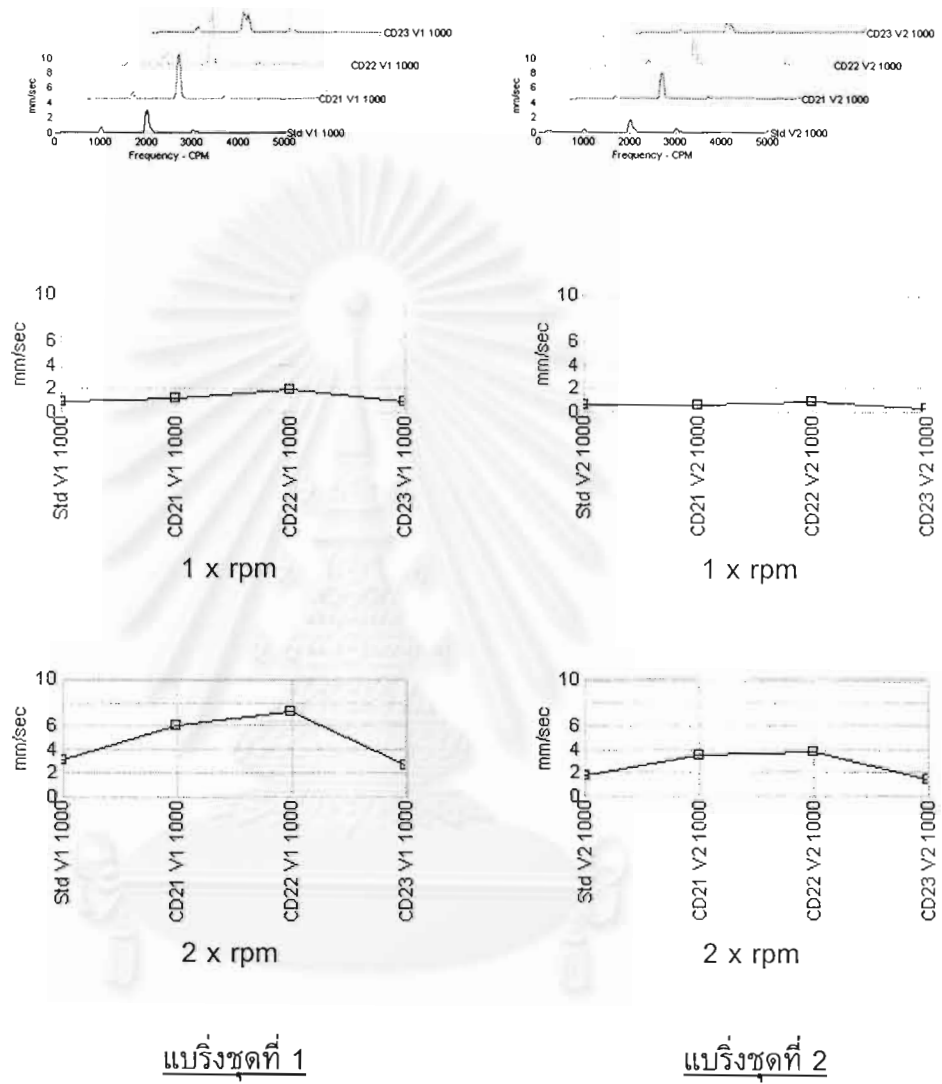




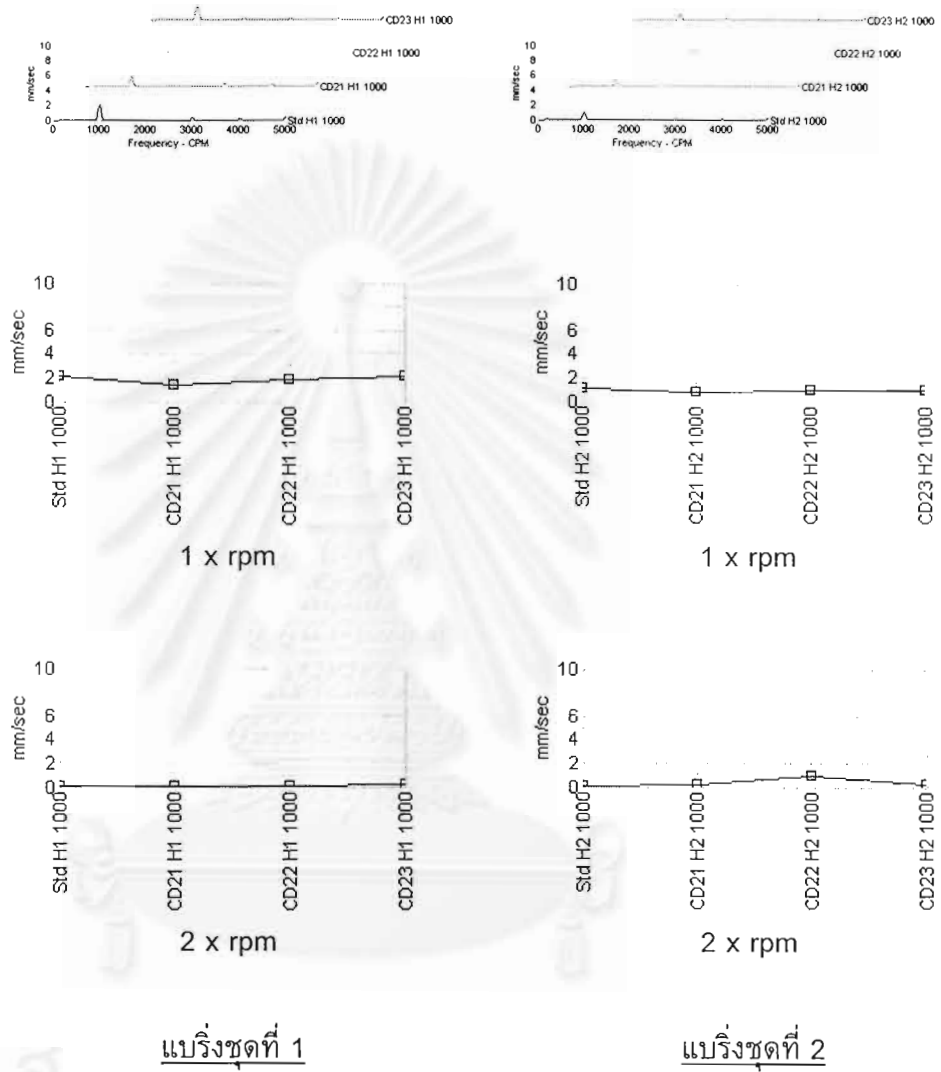
แปรงชุดที่ 1

แปรงชุดที่ 2

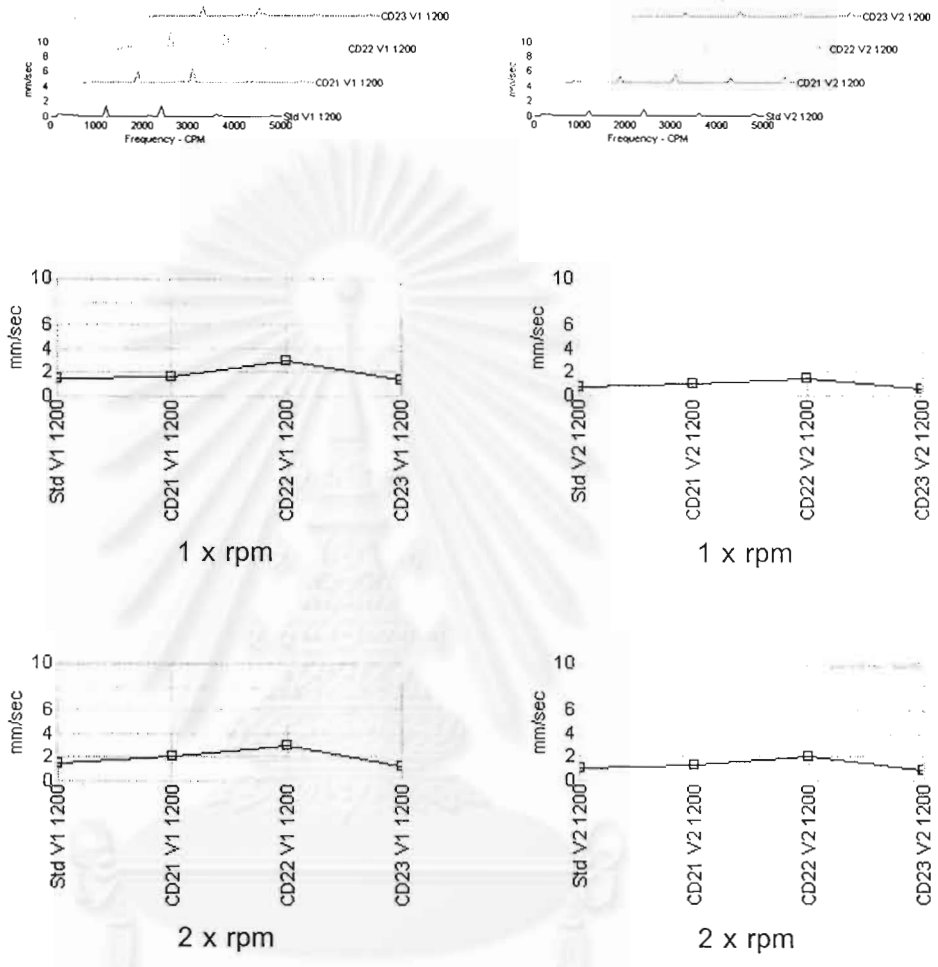
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
รูปที่ 4.40 สัญญาณสั่นสะเทือนของเพลาชุดที่ 2 ความเร็วรอบ 800 rpm แนวนอน



รูปที่ 4.41 สัญญาณเส้นสะท้อนของเพลาชุดที่ 2 ความเร็วรอบ 1000 rpm แนวตั้ง



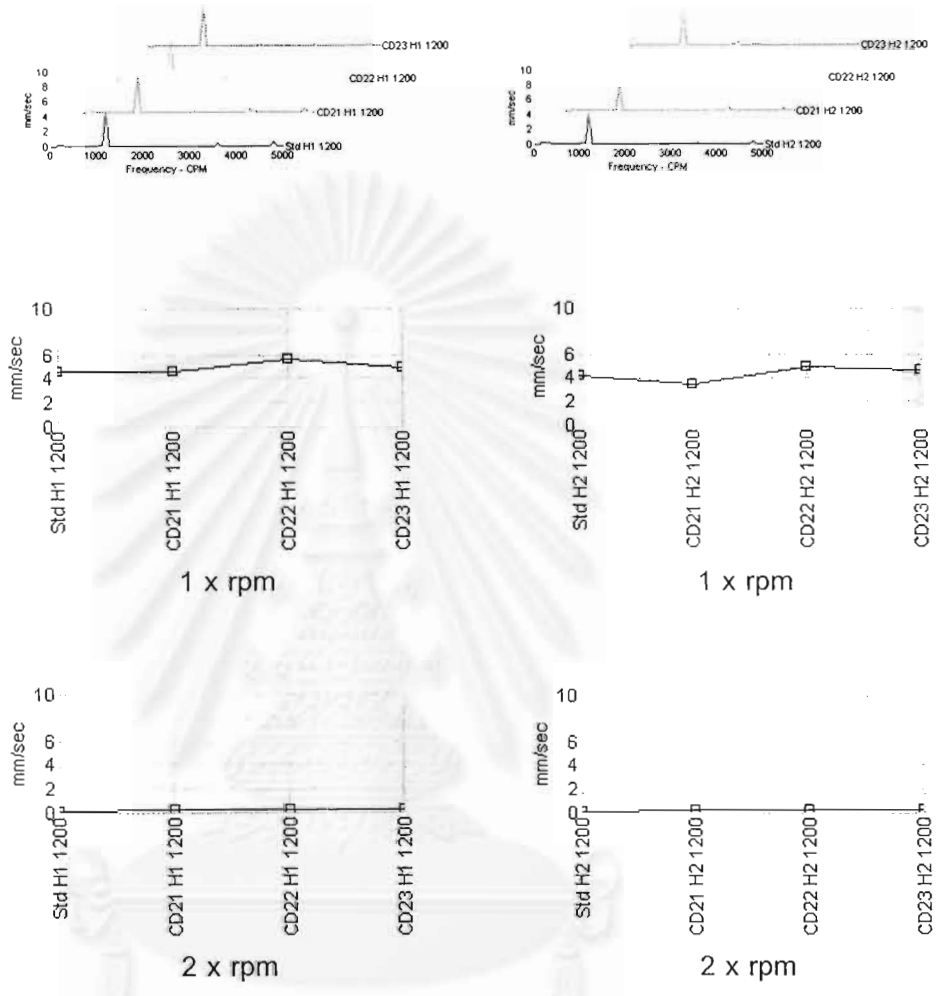
รูปที่ 4.42 สัญญาณสัมพันธ์ของเพลาชุดที่ 2 ความเร็วรอบ 1000 rpm แนวนอน



แปรงชุดที่ 1

แปรงชุดที่ 2

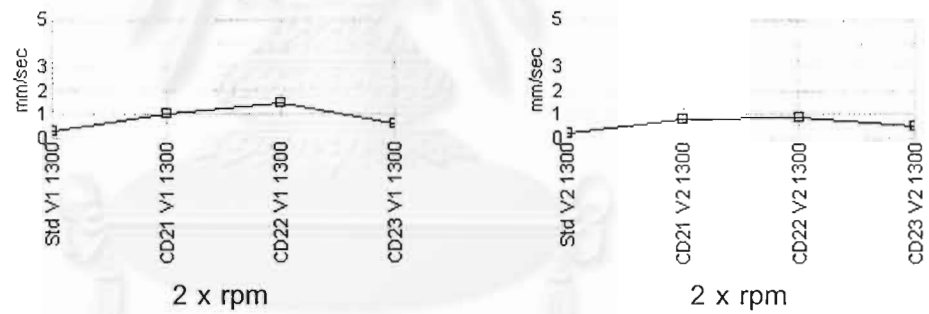
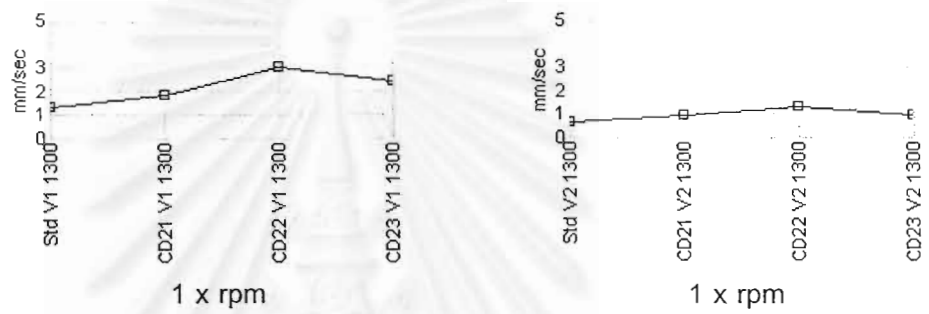
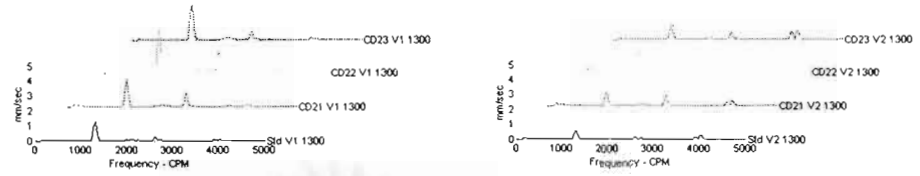
รูปที่ 4.43 สัญญาณสั่นสะเทือนของเฟลาชุดที่ 2 ความเร็วรอบ 1200 rpm แนวตั้ง



แบริ่งชุดที่ 1

แบริ่งชุดที่ 2

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
 รูปที่ 4.44 สัญญาณสั่นสะเทือนของเพลาชุดที่ 2 ความเร็วรอบ 1200 rpm แนวนอน

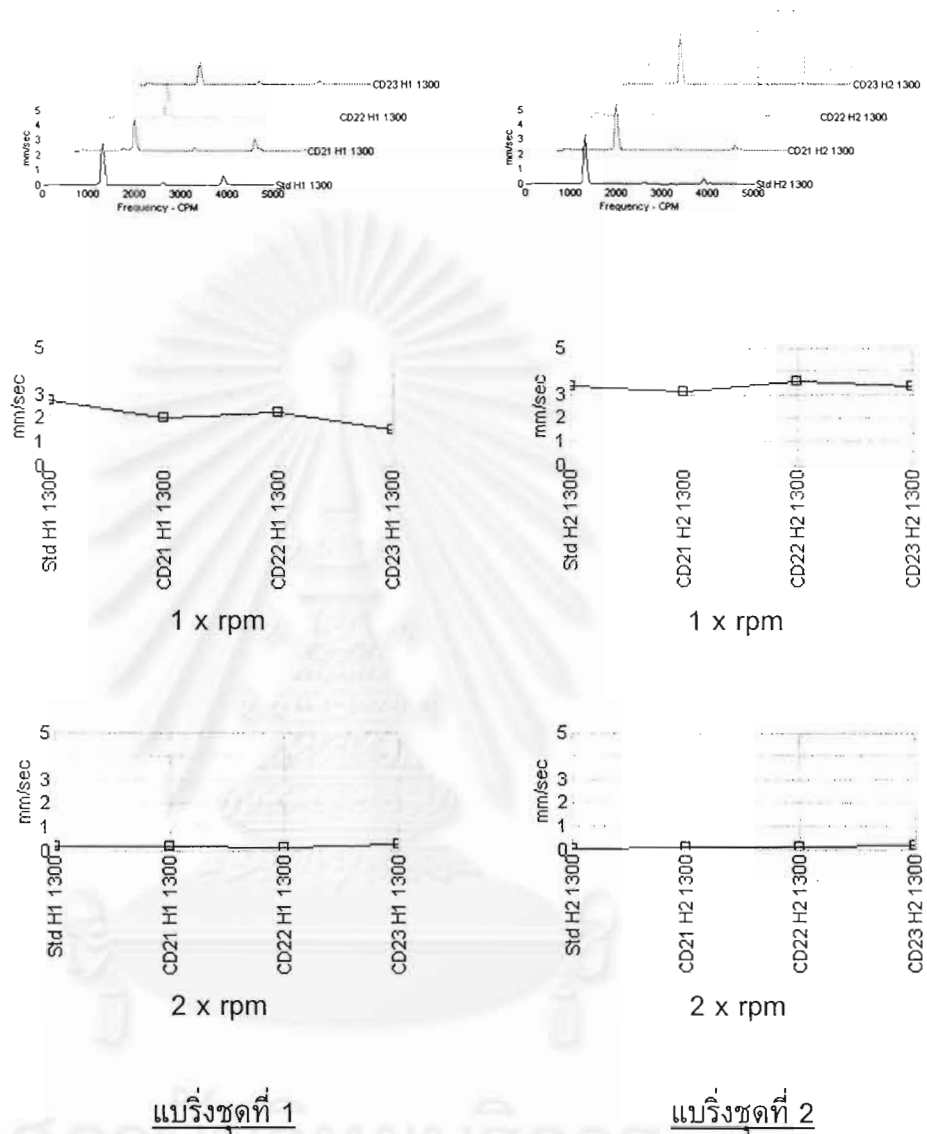


แบริ่งชุดที่ 1

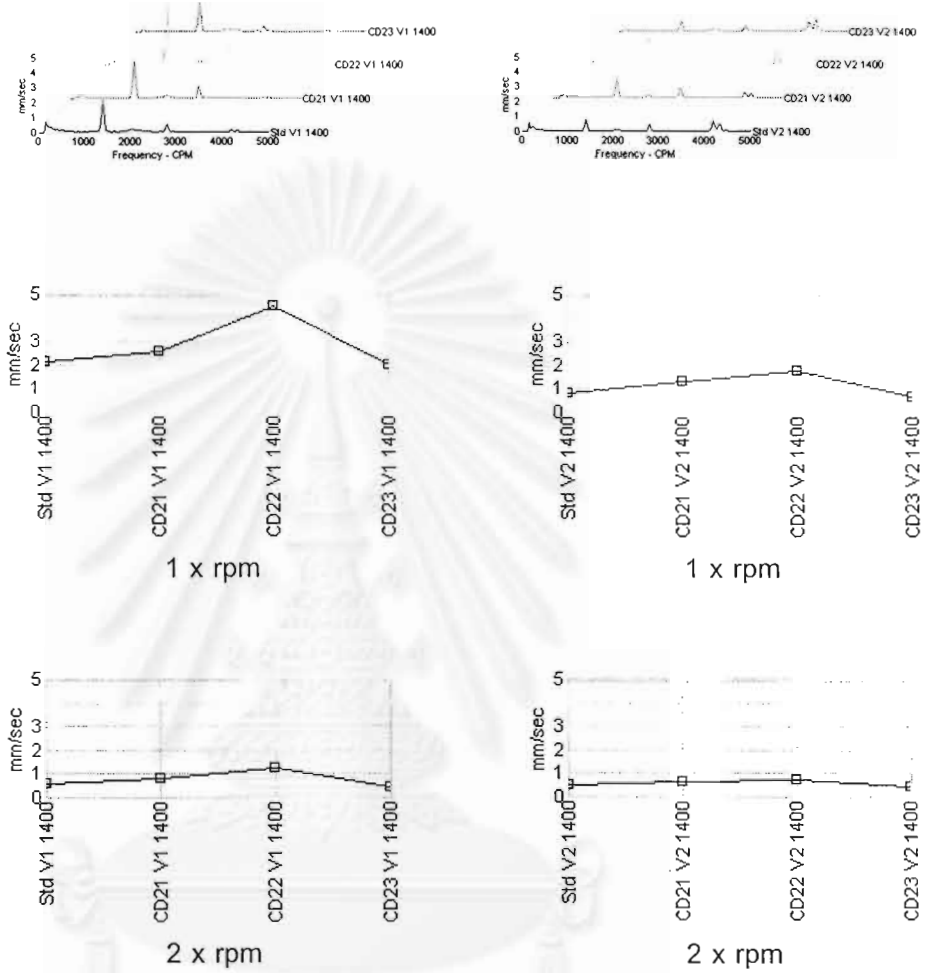
แบริ่งชุดที่ 2

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.45 สัญญาณสั่นสะเทือนของเพลาชุดที่ 2 ความเร็วรอบ 1300 rpm แนวตั้ง



รูปที่ 4.46 สัญญาณสัมพันธ์ของเฟลาชุดที่ 2 ความเร็วรอบ 1300 rpm แนวนอน



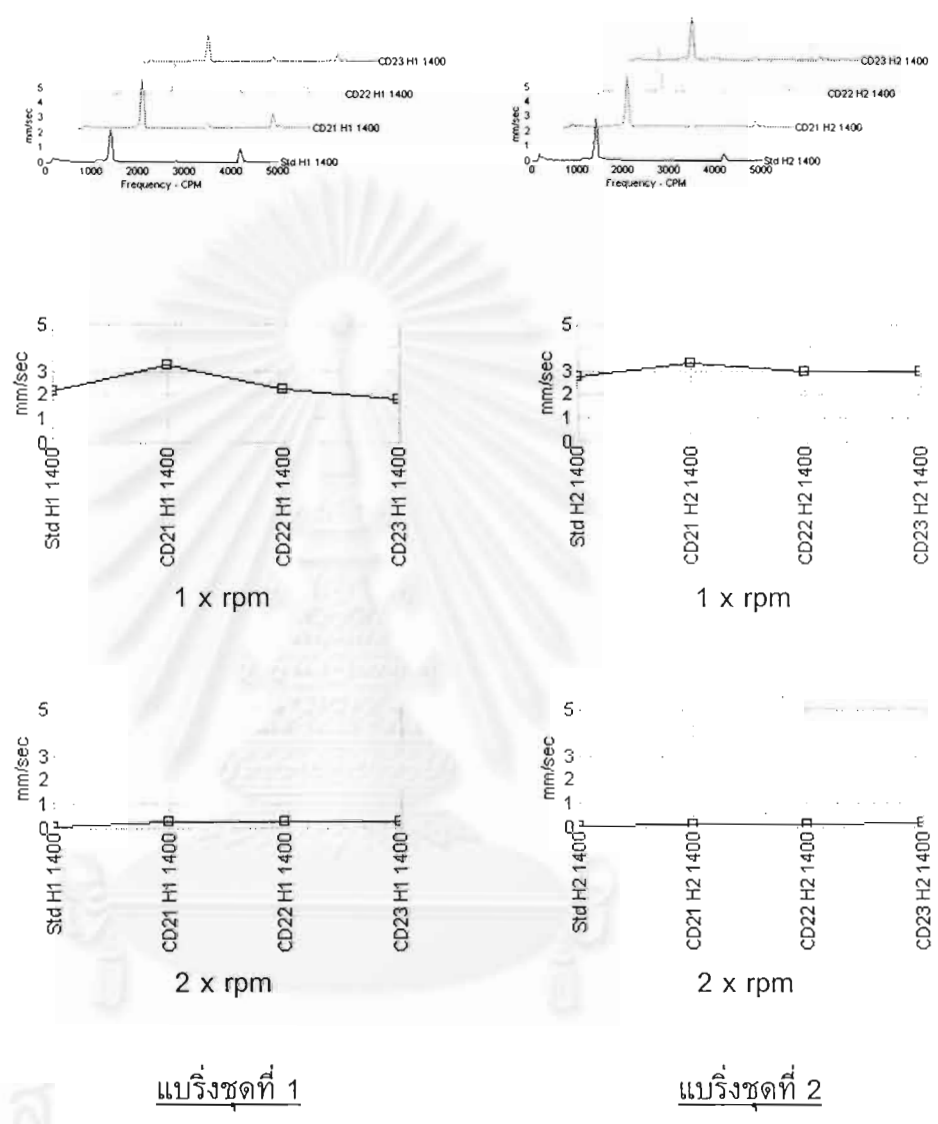
แบบริงชุดที่ 1

แบบริงชุดที่ 2

สถาบันนทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.47 สัญญาณสั่นสะเทือนของเพลาชุดที่ 2 ความเร็วรอบ 1400 rpm แนวตั้ง





รูปที่ 4.48 สัญญาณสั่นสะเทือนของเพลาชุดที่ 2 ความเร็วรอบ 1400 rpm แนวนอน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**แนวโน้มของสัญญาณการสันสะเทือนเมื่อรอยแตกมีความลึกเพิ่มขึ้น**  
**สัญญาณการสันสะเทือนของเพลาชุดที่ 2**

**ความเร็วรอบ 600 rpm**

สัญญาณการสันสะเทือนแนวตั้ง (รูปที่ 4.37)

แบร์ริงชุดที่ 1

1 x rpm : สัญญาณมีขนาดใกล้เคียงกันที่ Std และ CD21 และมีขนาดเพิ่มขึ้นที่ CD22 และมีขนาดลดลงที่ CD23

2 x rpm : สัญญาณมีขนาดเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นจาก Std ที่ CD21 และ CD22 และมีขนาดลดลงที่ CD23

แบร์ริงชุดที่ 2

1 x rpm : สัญญาณมีแนวโน้มคล้ายกับแบร์ริงชุดที่ 1 แต่เห็นการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณได้ไม่ชัดเจนเท่ากับแบร์ริงชุดที่ 1

2 x rpm : สัญญาณมีแนวโน้มคล้ายกับแบร์ริงชุดที่ 1 แต่สัญญาณมีขนาดต่ำกว่า

จากสัญญาณการสันสะเทือนที่แบร์ริงทั้งสองชุด จะเห็นสัญญาณ 3 x rpm (1,800 cpm) และ 4 x rpm (2,400 cpm) มีขนาดสูงมาก ซึ่งมีสาเหตุเช่นเดียวกับเพลาชุดที่ 1

สัญญาณการสันสะเทือนแนวนอน (รูปที่ 4.38)

แบร์ริงชุดที่ 1

1 x rpm : สัญญาณมีขนาดใกล้เคียงกันที่ Std, CD21 และ CD22 และมีขนาดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่ CD23

2 x rpm : สัญญาณมีขนาดลดลงจาก Std ที่ CD21 และ CD22 และมีขนาดเพิ่มขึ้นอย่างมากที่ CD23

แบร์ริงชุดที่ 2

1 x rpm : สัญญาณมีขนาดคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามระดับความลึกของรอยแตกที่เพิ่มขึ้น

2 x rpm : สัญญาณมีขนาดลดลงจาก Std ที่ CD21 และ CD22 ตามลำดับ และมีขนาดเพิ่มขึ้นที่ CD23

### ความเร็วรอบ 800 rpm

#### สัญญาณการสั่นสะเทือนแนวตั้ง (รูปที่ 4.39)

##### แบริ่งชุดที่ 1

1 x rpm : สัญญาณมีขนาดใกล้เคียงกันที่ Std และ CD21 และมีขนาดเพิ่มขึ้นที่ CD22 แต่มีขนาดลดลงอย่างมากที่ CD23

2 x rpm : สัญญาณมีขนาดเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นที่ CD21, CD22 แต่มีขนาดลดลงอย่างมากที่ CD23

##### แบริ่งชุดที่ 2

1 x rpm : สัญญาณมีแนวโน้มคล้ายกับแบริ่งชุดที่ 1 แต่ขนาดและการเพิ่มขึ้นของสัญญาณต่ำกว่าแบริ่งชุดที่ 1

2 x rpm : สัญญาณมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงคล้ายกับสัญญาณจากแบริ่งชุดที่ 1 แต่มีขนาดต่ำกว่า

จากสัญญาณการสั่นสะเทือนที่แบริ่งทั้งสองชุด จะเห็นสัญญาณที่ความถี่ 3 x rpm (2,400 cpm) มีขนาดสูงมาก ซึ่งมีสาเหตุเช่นเดียวกับเพลลาชุดที่ 1

#### สัญญาณการสั่นสะเทือนแนวนอน (รูปที่ 4.40)

##### แบริ่งชุดที่ 1

1 x rpm : สัญญาณมีขนาดใกล้เคียงกันที่ Std, CD21 และ CD22 และมีขนาดเพิ่มขึ้นที่ CD23

2 x rpm : สัญญาณมีแนวโน้มคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามระดับความลึกของรอยแตกที่เพิ่มขึ้น

##### แบริ่งชุดที่ 2

1 x rpm : สัญญาณมีขนาดใกล้เคียงกันที่ Std, CD21, CD22 และ CD23

2 x rpm : สัญญาณมีขนาดค่อนข้างคงที่ เหมือนกับสัญญาณจากแบริ่งชุดที่ 1

### ความเร็วรอบ 1,000 rpm

สัญญาณการสั่นสะเทือนแนวตั้ง (รูปที่ 4.41)

แบริ่งชุดที่ 1

1 x rpm : สัญญาณมีขนาดเพิ่มขึ้นที่ Std, CD21 และ CD22 และสัญญาณมีขนาดลดลงที่ CD23

2 x rpm : ขนาดของสัญญาณมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมากที่ Std, CD21 และ CD22 แต่สัญญาณมีขนาดลดลงอย่างมากที่ CD23

แบริ่งชุดที่ 2

1 x rpm : สัญญาณมีแนวโน้มคล้ายกับแบริ่งชุดที่ 1 แต่เห็นการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณได้ไม่ชัดเจนเท่ากับแบริ่งชุดที่ 1

2 x rpm : สัญญาณมีแนวโน้มคล้ายกับแบริ่งชุดที่ 1 แต่มีขนาดและการเพิ่มขึ้นของสัญญาณต่ำกว่าแบริ่งชุดที่ 1

จากแนวโน้มของสัญญาณการสั่นสะเทือนในแนวตั้งจะเห็นสัญญาณ 2 x rpm (2,000 cpm) มีขนาดสูงกว่าสัญญาณ 1 x rpm มาก ซึ่งมาสาเหตุเหมือนกับเพลลาชุดที่ 1

สัญญาณการสั่นสะเทือนแนวนอน (รูปที่ 4.42)

แบริ่งชุดที่ 1

1 x rpm : สัญญาณมีขนาดไม่เปลี่ยนแปลงที่ Std, CD21, CD22 และ CD23

2 x rpm : สัญญาณมีขนาดต่ำและมีแนวโน้มคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามระดับความลึกของรอยแตกที่เพิ่มขึ้น

แบริ่งชุดที่ 2

1 x rpm : สัญญาณมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามความลึกของรอยแตก และมีขนาดต่ำกว่าสัญญาณจากแบริ่งชุดที่ 1 เล็กน้อย

2 x rpm : สัญญาณมีขนาดใกล้เคียงกันที่ Std, CD21 และ CD23 และมีขนาดสูงกว่าเล็กน้อยที่ CD22

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ความเร็วรอบ 1,200 rpm

#### สัญญาณการสั่นสะเทือนแนวตั้ง (รูปที่ 4.43)

##### แบริ่งชุดที่ 1

1 x rpm : สัญญาณมีขนาดใกล้เคียงกันที่ Std, CD21 และ CD23 และสัญญาณมีขนาดเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนที่ CD22

2 x rpm : สัญญาณมีขนาดเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นที่ Std, CD21 และ CD22 และสัญญาณมีขนาดลดลงที่ CD23

##### แบริ่งชุดที่ 2

1 x rpm : สัญญาณมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่ Std, CD21 และ CD22 และสัญญาณมีขนาดลดลงที่ CD23 โดยมีขนาดโดยรวมต่ำกว่าแบริ่งชุดที่ 1

2 x rpm : สัญญาณมีแนวโน้มและขนาดใกล้เคียงกับสัญญาณจากแบริ่งชุดที่ 1

#### สัญญาณการสั่นสะเทือนแนวนอน (รูปที่ 4.44)

##### แบริ่งชุดที่ 1

1 x rpm : สัญญาณมีขนาดค่อนข้างสูงและใกล้เคียงกันที่ Std, CD21 และ CD23 และมีขนาดสูงที่ CD22

2 x rpm : สัญญาณมีขนาดต่ำมาก และมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลงตามความลึกของรอยแตก

##### แบริ่งชุดที่ 2

1 x rpm : สัญญาณมีแนวโน้มที่ไม่แน่นอน โดยมีขนาดลดลงจาก Std ที่ CD21 เพิ่มขึ้นที่ CD22 และลดลงที่ CD23

2 x rpm : สัญญาณมีขนาดและแนวโน้มเหมือนกับสัญญาณจากแบริ่งชุดที่ 1

### ความเร็วรอบ 1,300 rpm

#### สัญญาณการสั่นสะเทือนแนวตั้ง (รูปที่ 4.45)

##### แบริ่งชุดที่ 1

- 1 x rpm : สัญญาณมีขนาดเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนจาก Std ที่ CD21 และ CD22 และลดลงเล็กน้อยที่ CD23
- 2 x rpm : สัญญาณมีขนาดเพิ่มขึ้นจาก Std ที่ CD21 และ CD22 แบบเชิงเส้น และกลับลดลงอย่างมากที่ CD23

##### แบริ่งชุดที่ 2

- 1 x rpm : สัญญาณมีแนวโน้มคล้ายกับแบริ่งชุดที่ 1 แต่เห็นการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณที่แบริ่งชุดที่ 1 ได้ชัดเจนกว่า
- 2 x rpm : สัญญาณมีขนาดเพิ่มขึ้นจาก Std ที่ CD21 และ CD22 และลดลงเล็กน้อยที่ CD23

#### สัญญาณการสั่นสะเทือนแนวนอน (รูปที่ 4.46)

##### แบริ่งชุดที่ 1

- 1 x rpm : สัญญาณมีขนาดลดลงจาก Std ที่ CD21 และ CD22 โดยที่ CD21 และ CD22 มีขนาดสัญญาณใกล้เคียงกัน และสัญญาณมีขนาดลดลงอีกที่ CD23
- 2 x rpm : สัญญาณมีขนาดใกล้เคียงกันที่ Std, CD21, CD22 และ CD23

##### แบริ่งชุดที่ 2

- 1 x rpm : ขนาดของสัญญาณมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่เมื่อรอยแตกมีความลึกเพิ่มขึ้น
- 2 x rpm : สัญญาณมีแนวโน้มคล้ายกับสัญญาณจากแบริ่งชุดที่ 1 แต่ขนาดของสัญญาณต่ำกว่าแบริ่งชุดที่ 1 เล็กน้อย

### ความเร็วรอบ 1,400 rpm

#### สัญญาณการสั่นสะเทือนแนวตั้ง (รูปที่ 4.47)

##### แบริ่งชุดที่ 1

- 1 x rpm : สัญญาณมีขนาดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก Std ที่ CD21 แล้วเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนที่ CD22 และลดลงอย่างมากที่ CD23
- 2 x rpm : สัญญาณมีขนาดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก Std ที่ CD21 และ CD22 และลดลงที่ CD23

##### แบริ่งชุดที่ 2

- 1 x rpm : สัญญาณมีขนาดเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นที่ Std, CD21 และ CD22 และสัญญาณมีขนาดลดลงที่ CD23
- 2 x rpm : สัญญาณมีแนวโน้มคล้ายกับสัญญาณจากแบริ่งชุดที่ 1 แต่เห็นการเปลี่ยนแปลงได้ไม่ชัดเจนเท่ากับแบริ่งชุดที่ 1

#### สัญญาณการสั่นสะเทือนแนวนอน (รูปที่ 4.48)

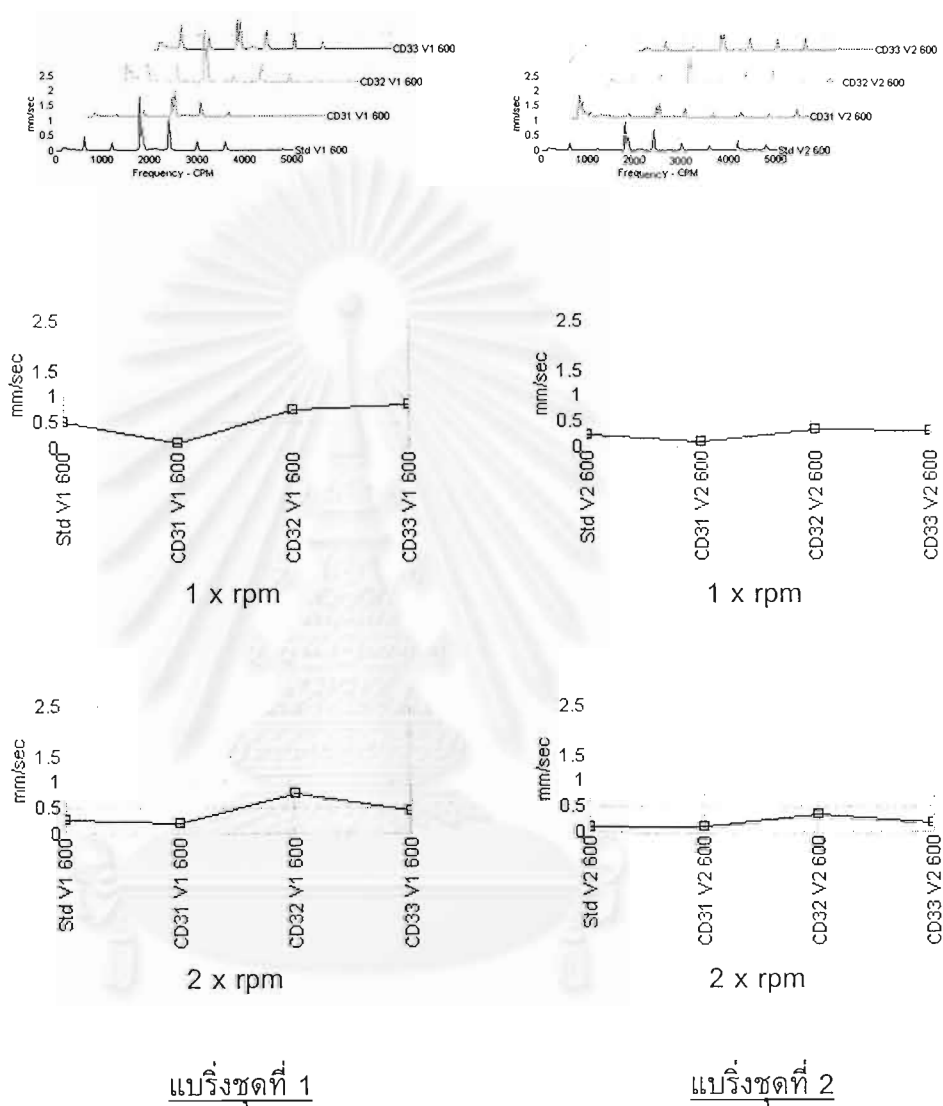
##### แบริ่งชุดที่ 1

- 1 x rpm : สัญญาณมีขนาดเพิ่มขึ้นจาก Std ที่ CD21 และลดลงที่ CD22 และ CD23 ตามลำดับ
- 2 x rpm : สัญญาณมีขนาดคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามความลึกของรอยแตกที่เพิ่มขึ้น

##### แบริ่งชุดที่ 2

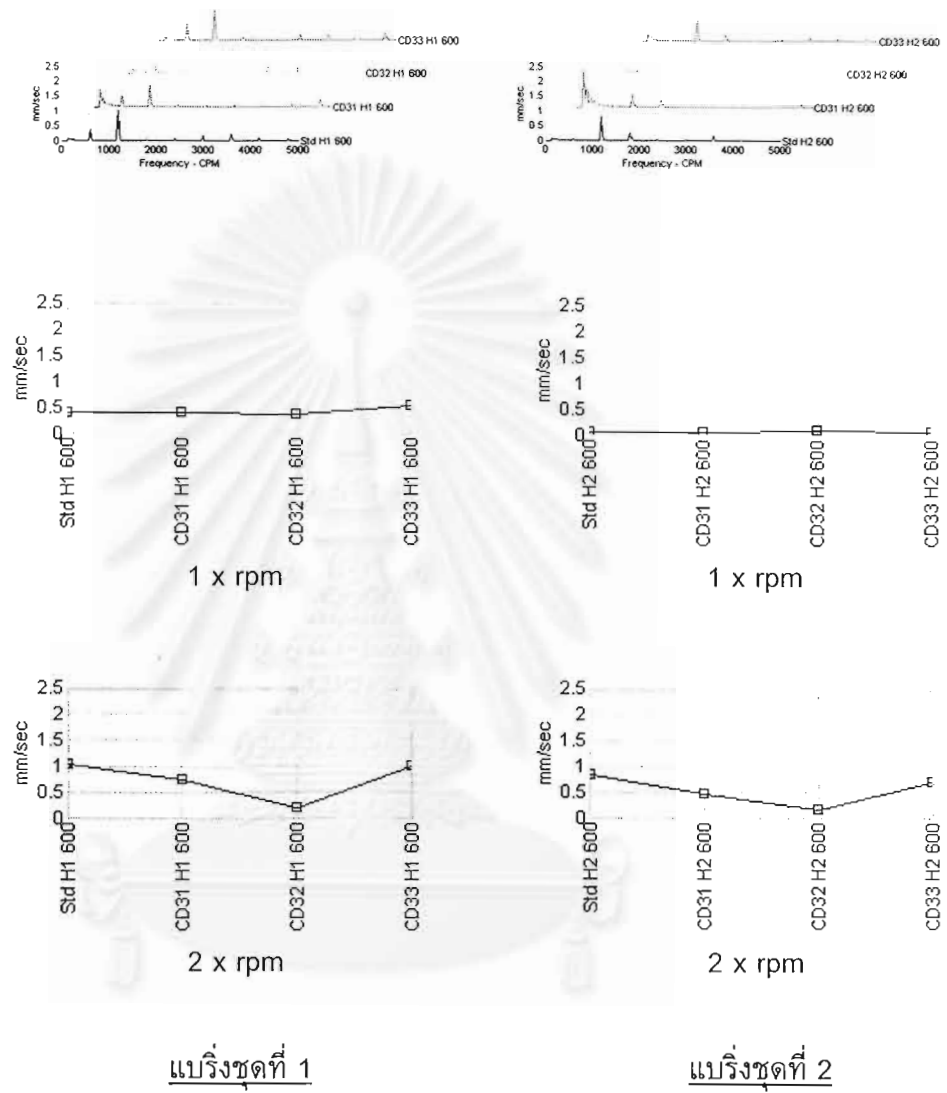
- 1 x rpm : สัญญาณมีขนาดเพิ่มขึ้นจาก Std ที่ CD21 และลดลงที่ CD22 และสัญญาณที่ CD22 และ CD23 มีขนาดใกล้เคียงกัน
- 2 x rpm : สัญญาณมีขนาดและแนวโน้มคล้ายกับสัญญาณจากแบริ่งชุดที่ 1

รูปแบบของสัญญาณการสั่นสะเทือนเมื่อรอยแตกมีความลึกเพิ่มขึ้น  
สัญญาณสั่นสะเทือนของเพลาชดที่ 3

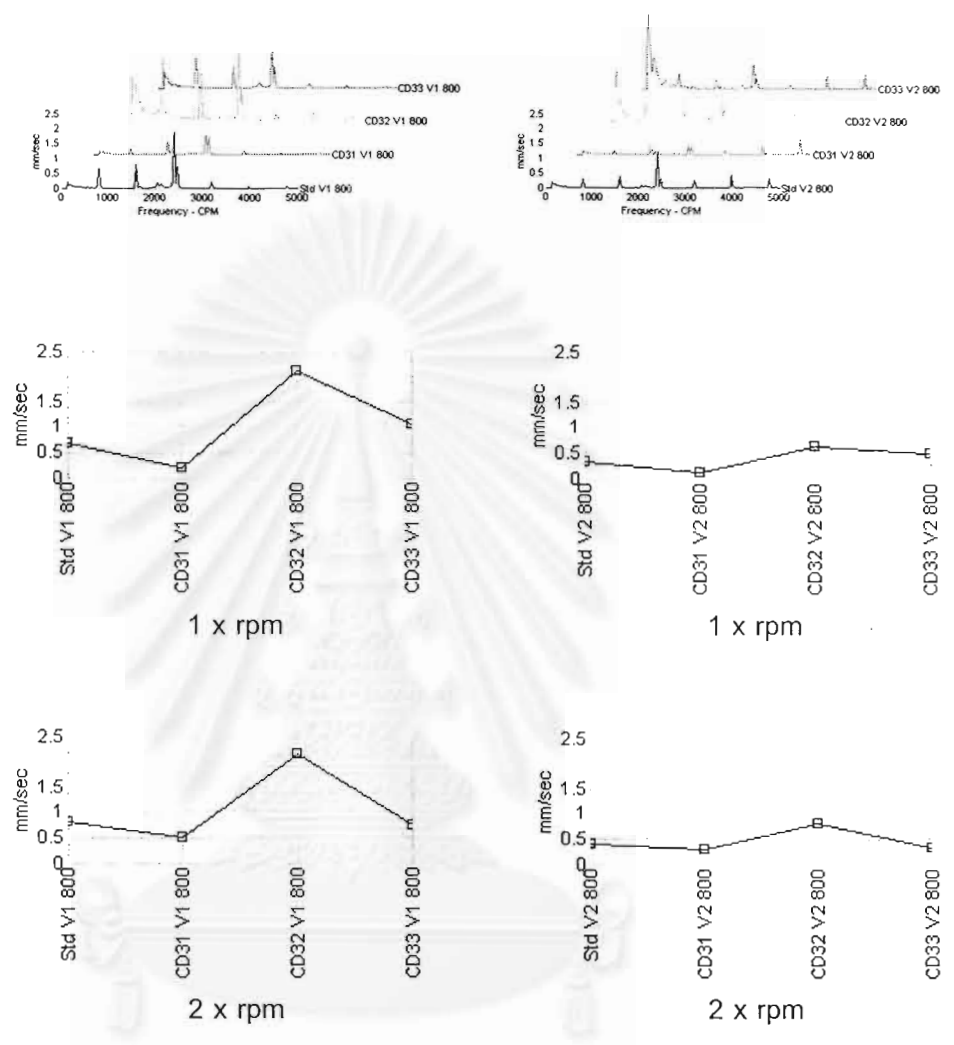


รูปที่ 4.49 สัญญาณสั่นสะเทือนของเพลาชดที่ 3 ความเร็วรอบ 600 rpm แนวตั้ง





รูปที่ 4.50 สัญญาณสั่นสะเทือนของเพลาชุดที่ 3 ความเร็วรอบ 600 rpm แนวนอน

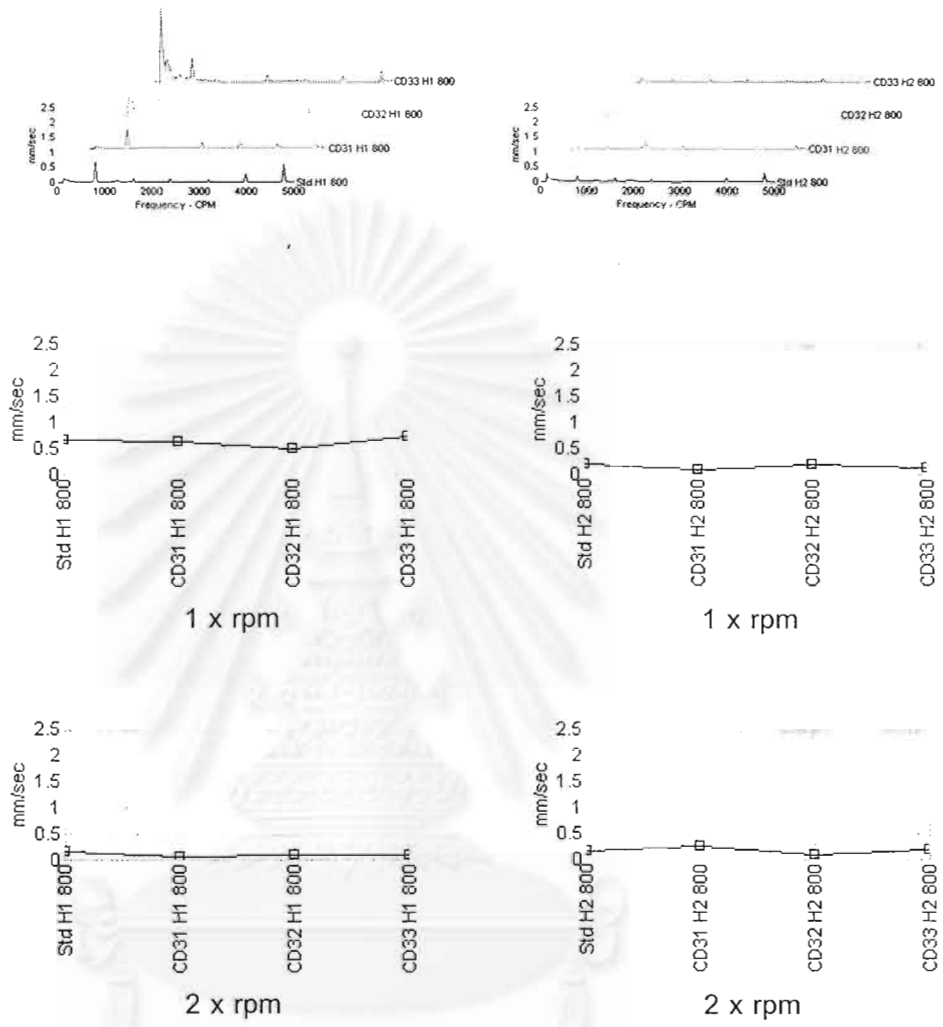


แปรงชุดที่ 1

แปรงชุดที่ 2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.51 สัญญาณสั่นสะเทือนของเพลาชุดที่ 3 ความเร็วรอบ 800 rpm แนวตั้ง

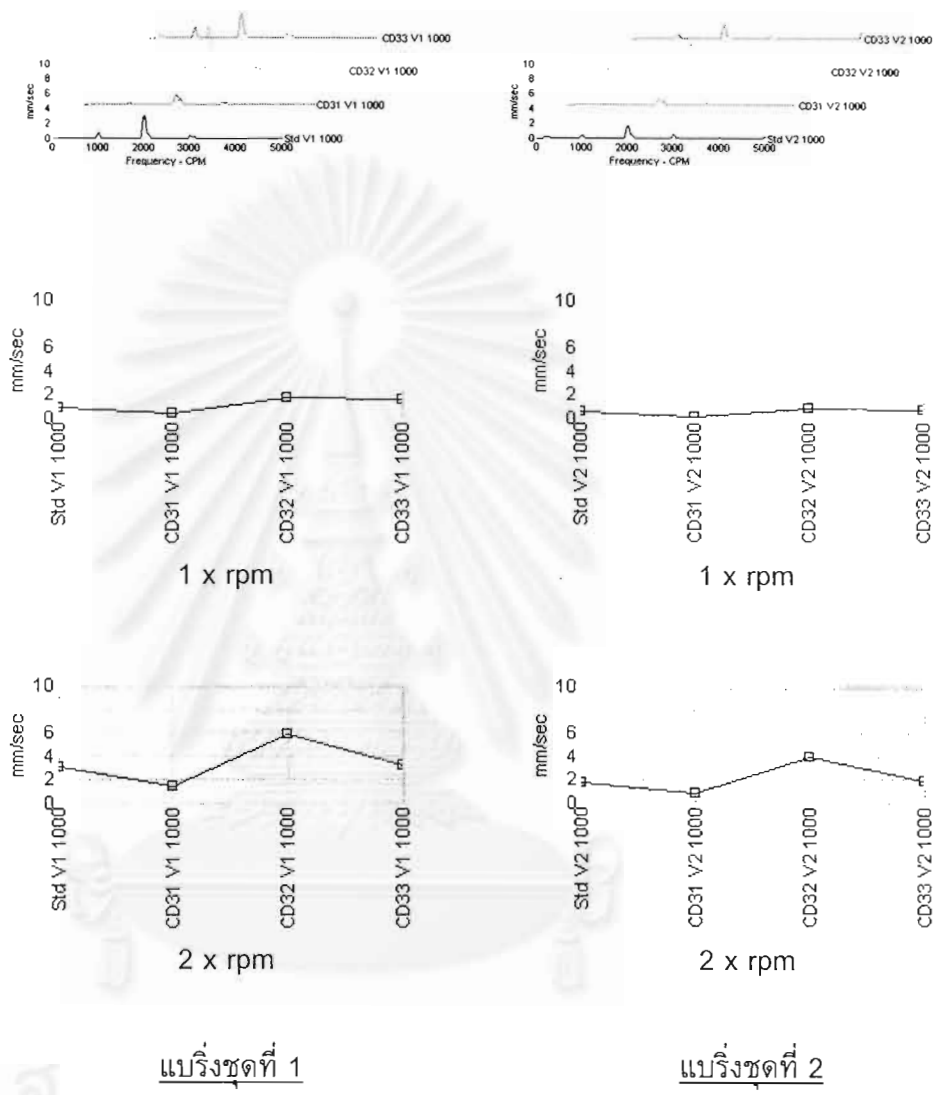


แบริ่งชุดที่ 1

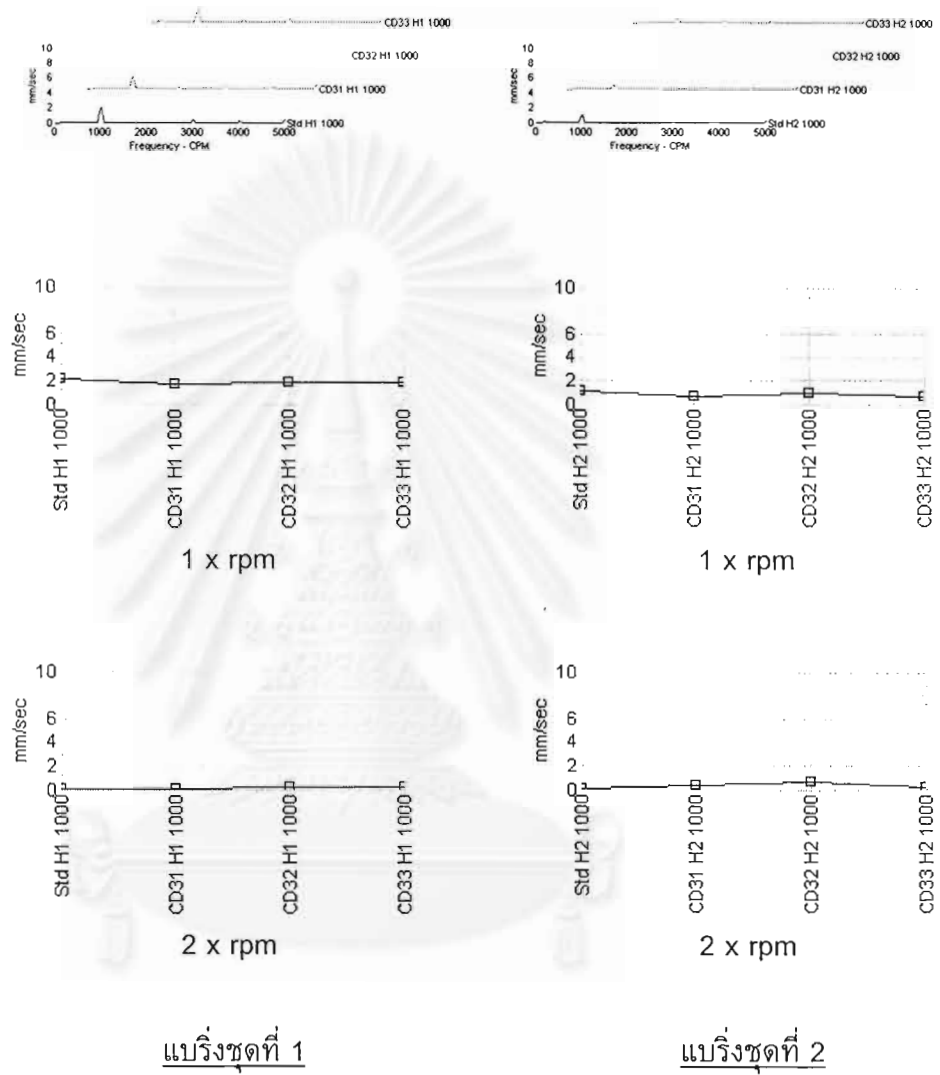
แบริ่งชุดที่ 2

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

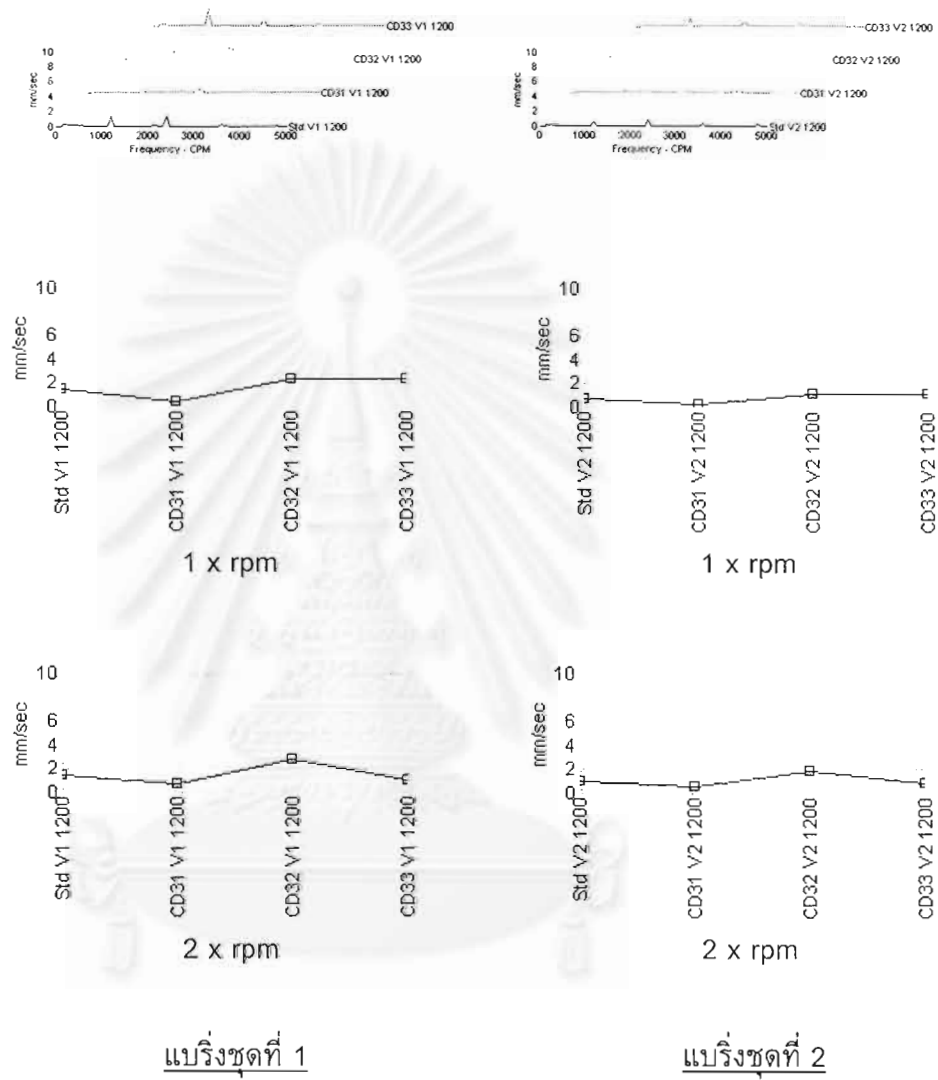
รูปที่ 4.52 สัญญาณสั่นสะเทือนของเพลาชุดที่ 3 ความเร็วรอบ 800 rpm แนวนอน



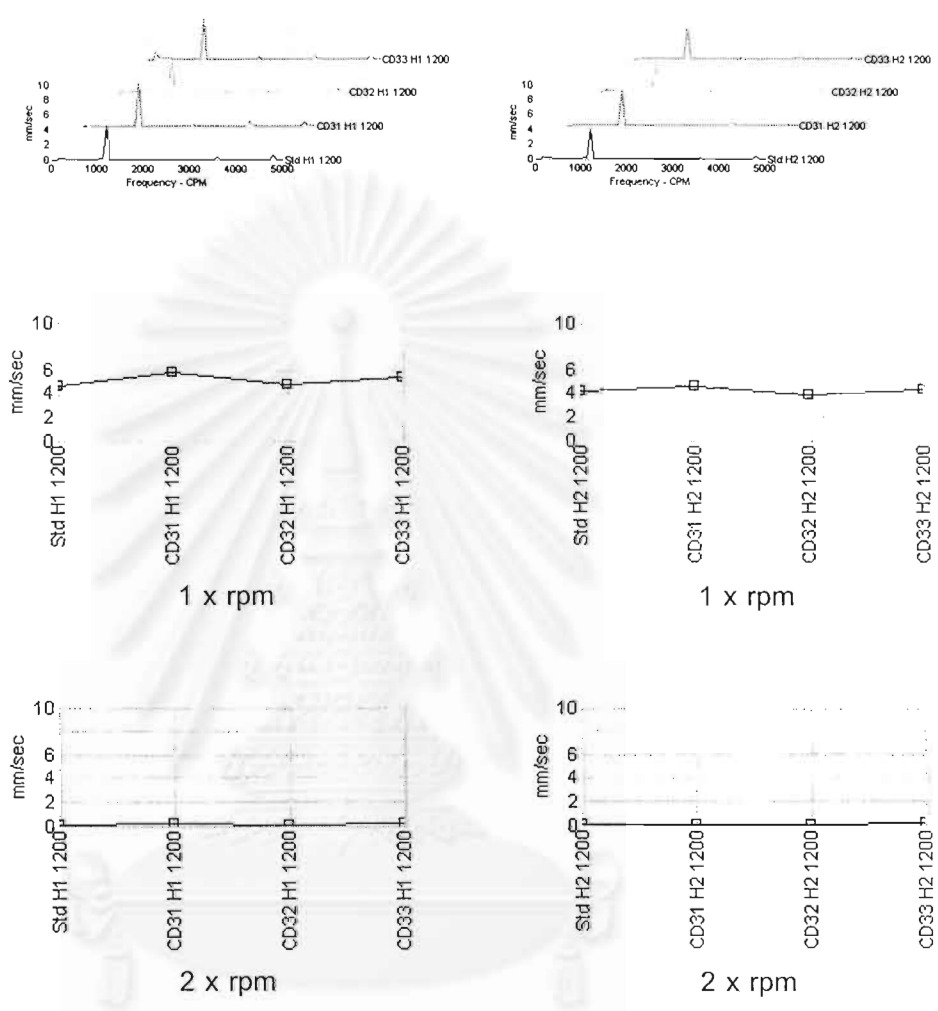
รูปที่ 4.53 สัญญาณสั่นสะเทือนของเพลาชดที่ 3 ความเร็วรอบ 1000 rpm แนวตั้ง



รูปที่ 4.54 สัญญาณสั่นสะเทือนของเพลาชุดที่ 3 ความเร็วรอบ 1000 rpm แนวนอน



รูปที่ 4.55 สัญญาณสั่นสะเทือนของเพลาชุดที่ 3 ความเร็วรอบ 1200 rpm แนวตั้ง

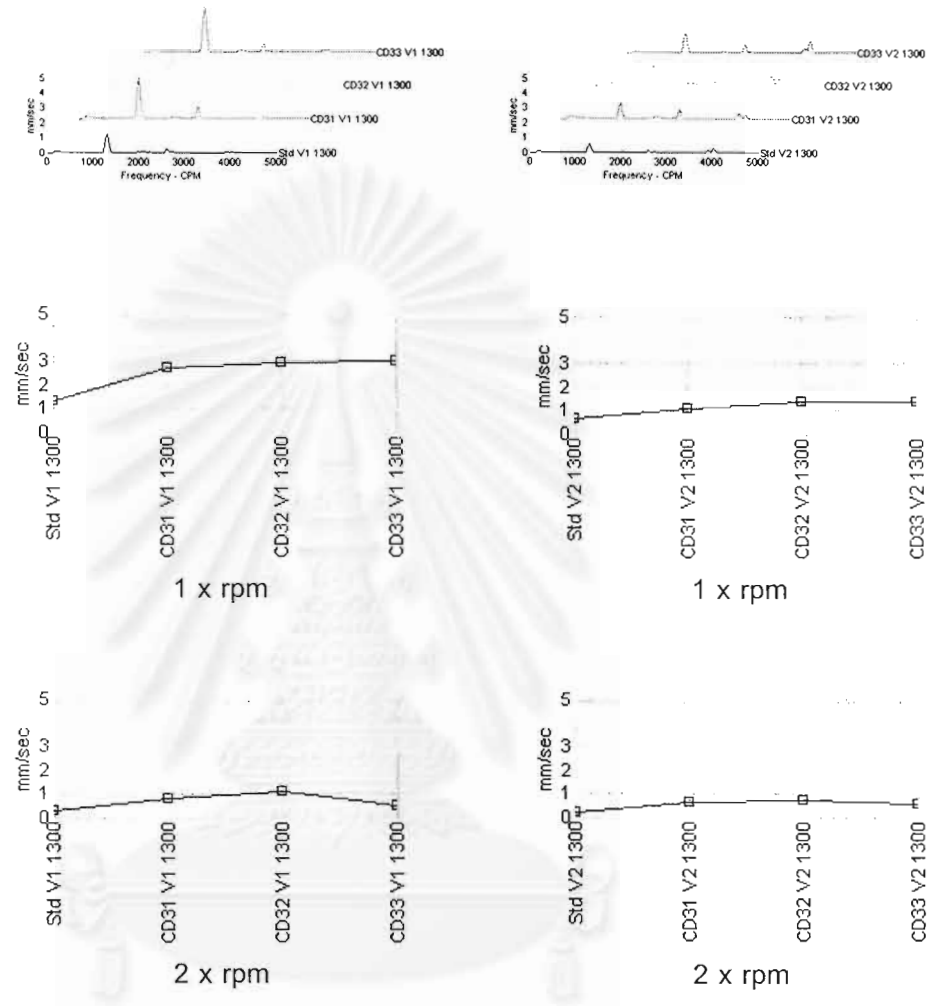


แบริ่งชุดที่ 1

แบริ่งชุดที่ 2

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.56 สัญญาณสั่นสะเทือนของเพลาชุดที่ 3 ความเร็วรอบ 1200 rpm แนวนอน



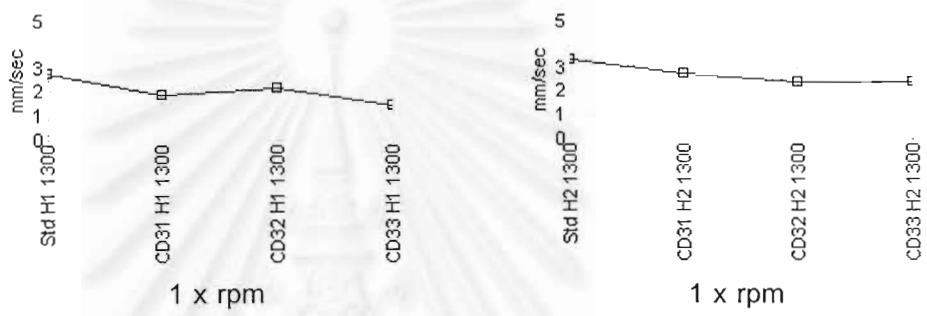
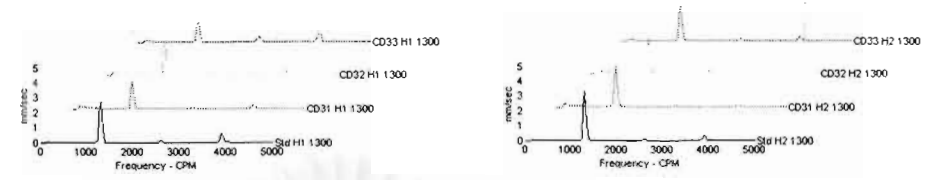
แบริ่งชุดที่ 1

แบริ่งชุดที่ 2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.57 สัญญาณสั่นสะเทือนของเพลาชุดที่ 3 ความเร็วรอบ 1300 rpm แนวตั้ง



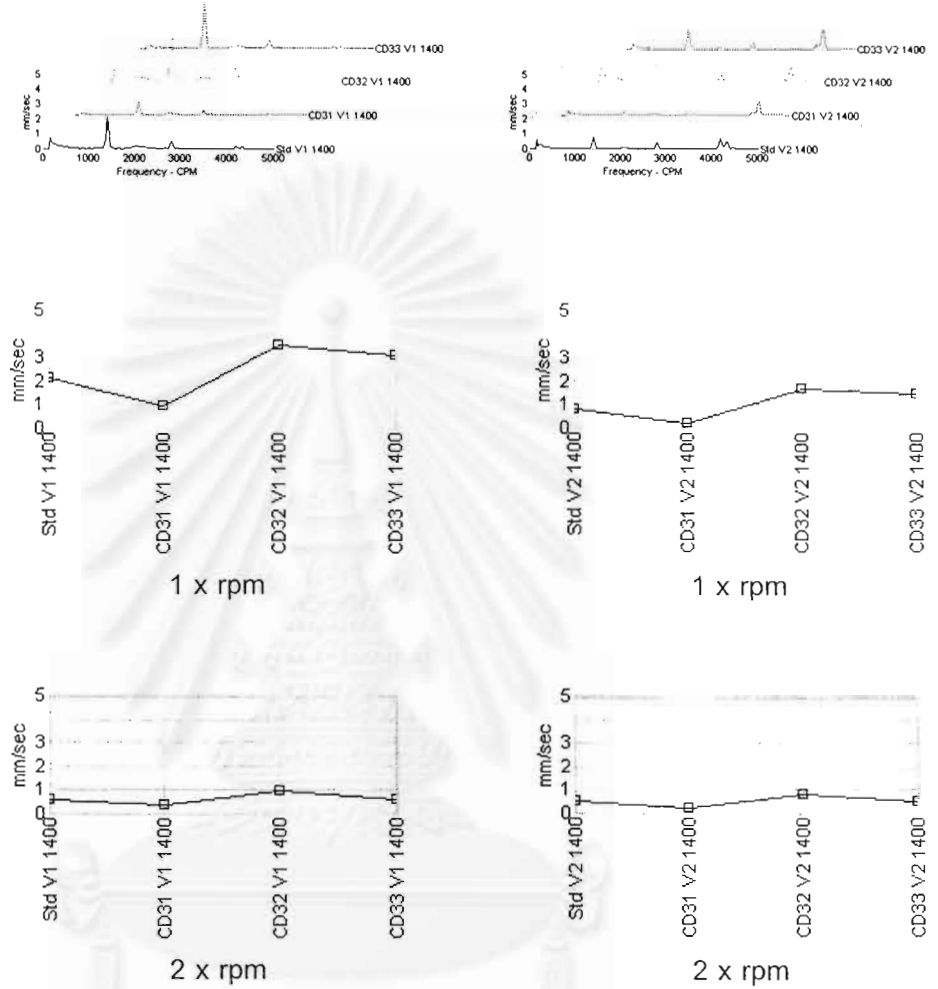


แบริ่งชุดที่ 1

แบริ่งชุดที่ 2

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.58 สัญญาณสั่นสะเทือนของเพลาชุดที่ 3 ความเร็วรอบ 1300 rpm แนวนอน

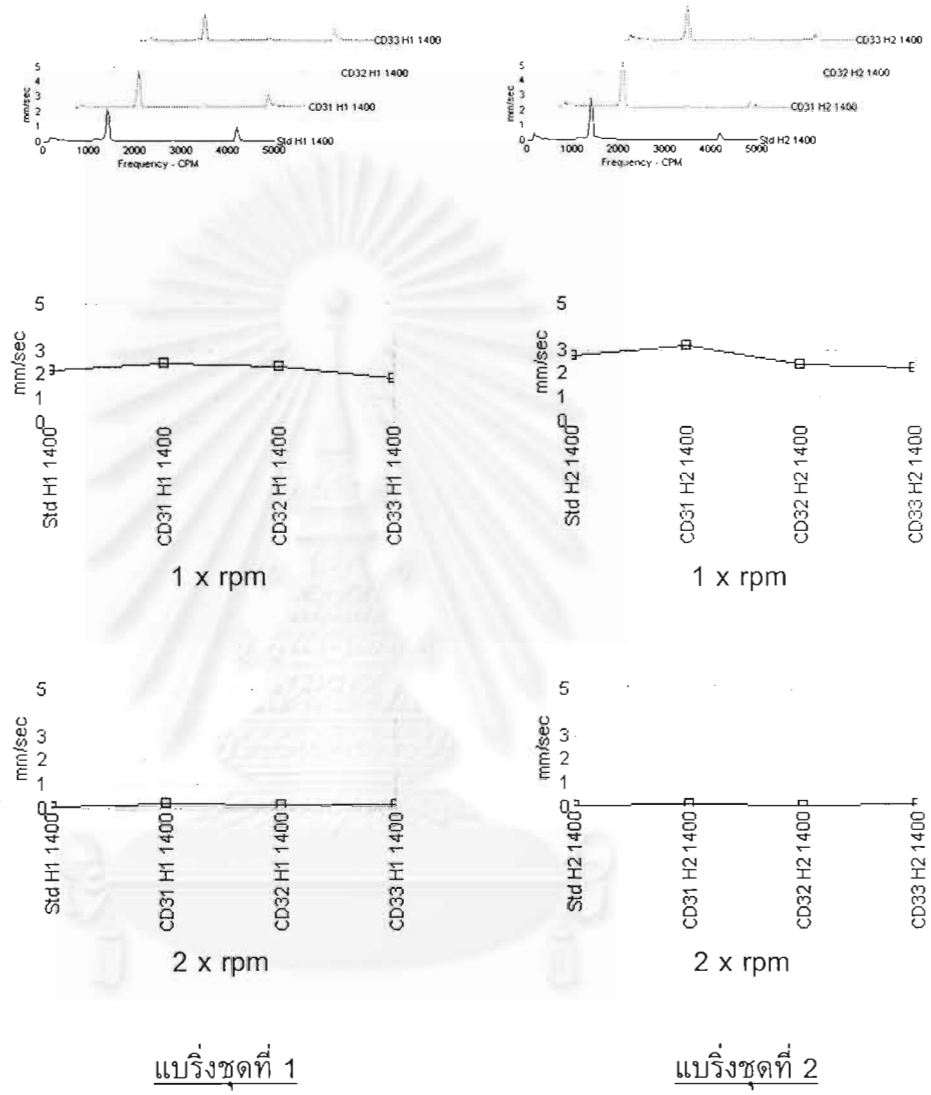


แบร็งชุดที่ 1

แบร็งชุดที่ 2

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.59 สัญญาณสั่นสะเทือนของเพลาชุดที่ 3 ความเร็วรอบ 1400 rpm แนวตั้ง



แบริ่งชุดที่ 1

แบริ่งชุดที่ 2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.60 สัญญาณสั่นสะเทือนของเพลาชุดที่ 3 ความเร็วรอบ 1400 rpm แนวนอน

แนวโน้มของสัญญาณการสันสะเทือนเมื่อรอยแตกมีความลึกเพิ่มขึ้น  
สัญญาณการสันสะเทือนของเพลาชุดที่ 3

**ความเร็วรอบ 600 rpm**

สัญญาณการสันสะเทือนแนวตั้ง (รูปที่ 4.49)

แบร์ริงชุดที่ 1

*1 x rpm* : สัญญาณมีขนาดลดลงจาก Std ที่ CD31 และมีขนาดเพิ่มขึ้นที่ CD32 และ CD33 ตามลำดับ

*2 x rpm* : สัญญาณมีขนาดใกล้เคียงกันที่ Std และ CD31 เพิ่มขึ้นที่ CD32 และมีขนาดลดลงที่ CD33

แบร์ริงชุดที่ 2

*1 x rpm* : สัญญาณมีแนวโน้มคล้ายกับแบร์ริงชุดที่ 1 แต่สัญญาณมีขนาดต่ำกว่า

*2 x rpm* : สัญญาณมีแนวโน้มคล้ายกับแบร์ริงชุดที่ 1 แต่สัญญาณมีขนาดต่ำกว่า

จากสัญญาณการสันสะเทือนที่แบร์ริงทั้งสองชุด จะเห็นสัญญาณ  $3 \times \text{rpm}$  (1,800 cpm) และ  $4 \times \text{rpm}$  (2,400 cpm) มีขนาดสูงมาก เช่นเดียวกับที่พบในสัญญาณการสันสะเทือนของเพลาชุดที่ 1 และ เพลาชุดที่ 2

สัญญาณการสันสะเทือนแนวนอน (รูปที่ 4.50)

แบร์ริงชุดที่ 1

*1 x rpm* : สัญญาณมีขนาดใกล้เคียงกันที่ Std, CD31, CD32 และ CD33

*2 x rpm* : สัญญาณมีขนาดลดลงจาก Std ที่ CD31 และ CD32 และมีขนาดเพิ่มขึ้นอย่างมากที่ CD33

แบร์ริงชุดที่ 2

*1 x rpm* : สัญญาณมีขนาดคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามระดับความลึกของรอยแตกที่เพิ่มขึ้น

*2 x rpm* : สัญญาณมีขนาดและแนวโน้มคล้ายกับแบร์ริงชุดที่ 1

### ความเร็วรอบ 800 rpm

#### สัญญาณการสั่นสะเทือนแนวตั้ง (รูปที่ 4.51)

##### แบริ่งชุดที่ 1

1 x rpm : สัญญาณมีขนาดลดลงจาก Std ที่ CD31 และมีขนาดเพิ่มขึ้นอย่างมากที่ CD32 และกลับมีขนาดลดลงอย่างมากที่ CD33

2 x rpm : สัญญาณมีขนาดลดลงจาก Std ที่ CD31 และมีขนาดเพิ่มขึ้นอย่างมากที่ CD32 และกลับมีขนาดลดลงอย่างมากที่ CD33

##### แบริ่งชุดที่ 2

1 x rpm : สัญญาณมีขนาดลดลงจาก Std ที่ CD31 และมีขนาดเพิ่มขึ้นที่ CD32 และมีขนาดลดลงเล็กน้อยที่ CD33

2 x rpm : สัญญาณมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงคล้ายกับสัญญาณจากแบริ่งชุดที่ 1 แต่มีขนาดต่ำกว่า

จากสัญญาณการสั่นสะเทือนที่แบริ่งทั้งสองชุด จะเห็นสัญญาณที่ความถี่ 3 x rpm (2,400 cpm) มีขนาดสูงมาก เช่นเดียวกับที่พบในเพลลาชุดที่ 1 และเพลลาชุดที่ 2

#### สัญญาณการสั่นสะเทือนแนวนอน (รูปที่ 4.52)

##### แบริ่งชุดที่ 1

1 x rpm : สัญญาณมีขนาดใกล้เคียงกันที่ Std, CD31 และ CD32 และ CD33

2 x rpm : ขนาดของสัญญาณมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลง ตามระดับความลึกของรอยแตกที่เพิ่มขึ้น

##### แบริ่งชุดที่ 2

1 x rpm : สัญญาณมีแนวโน้มเหมือนกับแบริ่งชุดที่ 1 แต่มีขนาดต่ำกว่า

2 x rpm : สัญญาณมีขนาดค่อนข้างคงที่ เหมือนกับสัญญาณจากแบริ่งชุดที่ 1

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ความเร็วรอบ 1,000 rpm

#### สัญญาณการสั่นสะเทือนแนวตั้ง (รูปที่ 4.53)

##### แบริ่งชุดที่ 1

- 1 x rpm : สัญญาณมีขนาดลดลงเล็กน้อยจาก Std ที่ CD31 และสัญญาณที่ CD32 และ CD33 มีขนาดใกล้เคียงกันและสูงกว่า Std
- 2 x rpm : สัญญาณมีขนาดลดลงจาก Std ที่ CD31 และมีขนาดเพิ่มขึ้นอย่างมากที่ CD32 และกลับมีขนาดลดลงอย่างมากที่ CD33

##### แบริ่งชุดที่ 2

- 1 x rpm : สัญญาณมีแนวโน้มคล้ายกับแบริ่งชุดที่ 1 แต่เห็นการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณได้ไม่ชัดเจนเท่ากับแบริ่งชุดที่ 1
- 2 x rpm : สัญญาณมีแนวโน้มคล้ายกับแบริ่งชุดที่ 1 แต่มีขนาดและการเพิ่มขึ้นของสัญญาณต่ำกว่าแบริ่งชุดที่ 1

จากแนวโน้มของสัญญาณการสั่นสะเทือนในแนวตั้งจะเห็นสัญญาณ 2 x rpm (2,000 cpm) มีขนาดสูงกว่าสัญญาณ 1 x rpm มาก เช่นเดียวกับกับเพลลาชุดที่ 1 และเพลลาชุดที่ 2

#### สัญญาณการสั่นสะเทือนแนวนอน (รูปที่ 4.54)

##### แบริ่งชุดที่ 1

- 1 x rpm : สัญญาณมีขนาดคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามความลึกของรอยแตกที่เพิ่มขึ้น
- 2 x rpm : สัญญาณมีขนาดต่ำและมีขนาดไม่เปลี่ยนแปลงที่ Std, CD31, CD32 และ CD33

##### แบริ่งชุดที่ 2

- 1 x rpm : สัญญาณมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามความลึกของรอยแตก และมีขนาดต่ำกว่าสัญญาณจากแบริ่งชุดที่ 1 เล็กน้อย
- 2 x rpm : สัญญาณมีขนาดใกล้เคียงกันที่ Std, CD31 และ CD33 และมีขนาดสูงกว่าเล็กน้อยที่ CD32

### ความเร็วรอบ 1,200 rpm

#### สัญญาณการสั่นสะเทือนแนวตั้ง (รูปที่ 4.55)

##### แบริ่งชุดที่ 1

1 x rpm : สัญญาณมีขนาดลดลงเล็กน้อยจาก Std ที่ CD31 และเพิ่มขึ้นที่ CD32 โดยที่ CD32 และ CD33 มีขนาดสัญญาณใกล้เคียงกัน

2 x rpm : สัญญาณมีขนาดลดลงจาก Std ที่ CD31 เพิ่มขึ้นที่ CD32 และกลับมีขนาดลดลงที่ CD33

##### แบริ่งชุดที่ 2

1 x rpm : สัญญาณมีแนวโน้มคล้ายกับแบริ่งชุดที่ 1 แต่สัญญาณมีขนาดต่ำกว่าแบริ่งชุดที่ 1

2 x rpm : สัญญาณมีแนวโน้มและขนาดใกล้เคียงกับสัญญาณจากแบริ่งชุดที่ 1

#### สัญญาณการสั่นสะเทือนแนวนอน (รูปที่ 4.56)

##### แบริ่งชุดที่ 1

1 x rpm : สัญญาณมีแนวโน้มที่ไม่แน่นอน โดยมีขนาดเพิ่มขึ้นจาก Std ที่ CD31 ลดลงที่ CD32 และเพิ่มขึ้นที่ CD33

2 x rpm : สัญญาณมีขนาดต่ำมาก และมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลงตามความลึกของรอยแตก

##### แบริ่งชุดที่ 2

1 x rpm : สัญญาณมีแนวโน้มและขนาดใกล้เคียงกับแบริ่งชุดที่ 1 แต่ขนาดสัญญาณมีความคงที่มากกว่า

2 x rpm : สัญญาณมีขนาดและแนวโน้มเหมือนกับสัญญาณจากแบริ่งชุดที่ 1

### ความเร็วรอบ 1,300 rpm

#### สัญญาณการสั่นสะเทือนแนวตั้ง (รูปที่ 4.57)

##### แบริ่งชุดที่ 1

1 x rpm : สัญญาณมีขนาดเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนจาก Std ที่ CD31, CD32 และ CD33 ตามลำดับ

2 x rpm : สัญญาณมีขนาดเพิ่มขึ้นจาก Std ที่ CD31 และ CD32 แบบเชิงเส้น และกลับลดลงอย่างมากที่ CD33

##### แบริ่งชุดที่ 2

1 x rpm : สัญญาณมีแนวโน้มคล้ายกับแบริ่งชุดที่ 1 แต่สัญญาณมีขนาดต่ำกว่า

2 x rpm : สัญญาณมีขนาดใกล้เคียงกันที่ CD31, CD32 และ CD33 ซึ่งมีขนาดสูงกว่าที่ Std

#### สัญญาณการสั่นสะเทือนแนวนอน (รูปที่ 4.58)

##### แบริ่งชุดที่ 1

1 x rpm : สัญญาณมีขนาดลดลงจาก Std ที่ CD31 และ CD32 โดยที่ CD31 และ CD32 มีขนาดสัญญาณใกล้เคียงกัน และสัญญาณมีขนาดลดลงอีกที่ CD33

2 x rpm : สัญญาณมีขนาดใกล้เคียงกันที่ Std, CD31, CD32 และ CD33

##### แบริ่งชุดที่ 2

1 x rpm : ขนาดของสัญญาณมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อรอยแตกมีความลึกมากขึ้น

2 x rpm : สัญญาณมีขนาดและแนวโน้มคล้ายกับสัญญาณจากแบริ่งชุดที่ 1



### ความเร็วรอบ 1,400 rpm

#### สัญญาณการสั่นสะเทือนแนวตั้ง (รูปที่ 4.59)

##### แบริ่งชุดที่ 1

1 x rpm : สัญญาณมีขนาดลดลงจาก Std ที่ CD31 และมีขนาดเพิ่มขึ้นอย่างมากที่ CD32 และกลับมีขนาดลดลงเล็กน้อยที่ CD33

2 x rpm : สัญญาณมีขนาดใกล้เคียงกันที่ Std, CD31 และ CD33 แต่สัญญาณมีขนาดสูงขึ้นที่ CD32

##### แบริ่งชุดที่ 2

1 x rpm : สัญญาณมีขนาดต่ำกว่าที่แบริ่งชุดที่ 1 แต่มีแนวโน้มของสัญญาณคล้ายกัน

2 x rpm : สัญญาณมีขนาดและแนวโน้มคล้ายกับสัญญาณจากแบริ่งชุดที่ 1

#### สัญญาณการสั่นสะเทือนแนวนอน (รูปที่ 4.60)

##### แบริ่งชุดที่ 1

1 x rpm : สัญญาณมีขนาดเพิ่มขึ้นจาก Std ที่ CD31 และลดลงที่ CD32 และ CD33 ตามลำดับ

2 x rpm : สัญญาณมีขนาดคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามความลึกของรอยแตกที่เพิ่มขึ้น

##### แบริ่งชุดที่ 2

1 x rpm : สัญญาณมีขนาดเพิ่มขึ้นจาก Std ที่ CD31 และลดลงที่ CD32 และสัญญาณที่ CD32 และ CD33 มีขนาดใกล้เคียงกัน

2 x rpm : สัญญาณมีขนาดและแนวโน้มคล้ายกับสัญญาณจากแบริ่งชุดที่ 1

## 4.5 อภิปรายผลการทดลอง

### 4.5.1 การทดลองขั้นที่ 1 การสร้างรอยแตกขึ้นบนเพลลา

จากการวัดความลึกของรอยแตกในเพลลาทั้งสามชุดจะเห็นได้ว่าความลึกของรอยแตกที่ทำได้ไม่ตรงกับที่คาดคะเนไว้ โดยความลึกของรอยแตกสามระดับที่คาดคะเนไว้คือ 1/8, 1/4 และ 1/2 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเพลลา แต่รอยแตกที่สร้างขึ้นได้จริงจากการทดลองจะมีความลึกมากกว่าที่คาดคะเนไว้ ทั้งนี้เนื่องมาจากการคาดคะเนความลึกของรอยแตกจากการวัดความยาวของรอยแตกตามแนวเส้นรอบวงเป็นการประมาณอย่างคร่าวๆ และภาพความยาวของรอยแตกที่ได้จากวิธีการดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ไม่ใช่ว่าภาพความยาวที่แท้จริงของรอยแตก แต่เป็นการขยายภาพของรอยแตกให้เห็นชัดเจนขึ้น รวมไปถึงการวัดความยาวของรอยแตกโดยใช้ตลับเมตรจะให้ความละเอียดในการวัดน้อย และในการเปรียบเทียบความลึกของรอยแตกระดับเดียวกันในเพลลาแต่ละชุดจะเห็นว่า ความลึกของรอยแตกก็ไม่เท่ากันจึงทำให้ไม่สามารถเปรียบเทียบแนวโน้มของสัญญาณการสั่นสะเทือนเมื่อรอยแตกมีตำแหน่งเปลี่ยนไปได้

อย่างไรก็ตามความลึกของรอยแตกที่ได้ในเพลลาแต่ละชุดยังคงมีความลึกที่แตกต่างกันสามระดับอย่างชัดเจน ทำให้สามารถนำไปใช้ในการทดลองเพื่อศึกษาแนวโน้มของสัญญาณการสั่นสะเทือนเมื่อรอยแตกมีความลึกมากขึ้นได้

### 4.5.2 การทดลองขั้นที่ 2 การตรวจวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน

การทดลองที่ 2.1 การตรวจวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนเพื่อหาความถี่ธรรมชาติของระบบ และศึกษาผลของรอยแตกในเพลลาที่มีต่อความถี่ธรรมชาติของระบบ

จากผลการทดลองวัดสัญญาณสั่นสะเทือนในเพลลา Std จะเห็นว่าค่าความถี่ธรรมชาติของระบบในแนวตั้งและแนวนอนมีค่าไม่เท่ากัน เนื่องจากฐานชุดทดลองไม่มีความสมมาตรต่อกันในแนวตั้งและแนวนอน และเมื่อเปรียบเทียบค่าความเร็วรอบวิกฤติที่ได้จากการทดลองนี้กับค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการ bump test ในภาคผนวก จ รูปที่ จ-6 พบว่าได้ค่าใกล้เคียงกันคือ ความถี่ธรรมชาติในแนวตั้งมีค่าประมาณ 2,000 cpm และค่าความถี่ธรรมชาติในแนวระดับมีค่าประมาณ 7,500 cpm

เมื่อนำเพลลาที่มีรอยแตกชุดที่ 1 มาทำการทดลองวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนพบว่า ผลที่ได้จากการทดลองไม่เป็นไปตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การสั่นสะเทือนแบบบิดใน

บทที่ 3 คือเมื่อเพลลาเกิดรอยแตกและรอยแตกมีความลึกเพิ่มขึ้นจะมีผลต่อค่าความถี่ธรรมชาติของระบบทั้งแนวตั้งและแนวนอนน้อยมากโดยสังเกตจากค่าความเร็วรอบวิกฤติที่ได้จากการทดลองแทบจะไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเพลลา มีระดับความลึกของรอยแตกเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเพลลาที่ใช้ในการทดลองมีขนาดเล็กเกินไปทำให้การเปลี่ยนแปลงระดับความลึกของรอยแตกมีผลน้อยต่อค่าความถี่ธรรมชาติของระบบ และเนื่องจากฐานของชุดทดลองวางอยู่บนยางบริเวณสี่มุม ไม่มีการจับยึดที่มั่นคงจึงทำให้ฐานมีขนาดการสั่นสะเทือนมาก ระหว่างทำการทดลอง ส่งผลให้ไม่สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่ธรรมชาติเมื่อรอยแตกมีระดับความลึกมากขึ้นได้

เพื่อเป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติของตัวเพลลาเอง จึงนำเพลลา Std, เพลลาชุดที่ 1 และเพลลาที่มีการเจาะร่องเพื่อจำลองการเกิดรอยแตกในเพลลา (รูปที่ จ-1) ซึ่งจะแทนด้วยสัญลักษณ์ CD14 ไปทำ bump test บนเครื่องกลึง ซึ่งแสดงไว้ในภาคผนวก จ โดยจับยึดให้ปลายเพลลาด้านหนึ่งเป็นปลายอิสระ จากการทดลองโดยจับเพลลายาว 700 มม. พบว่าเมื่อเพลลา มีระดับความลึกของรอยแตกเพิ่มขึ้น ค่าความถี่ธรรมชาติของเพลลาฮาร์โมนิก (harmonic) ที่ 1 แทบจะไม่มีเปลี่ยนแปลง แต่จะเห็นการลดลงของค่าความถี่ธรรมชาติฮาร์โมนิกที่ 2 โดยจะเห็นว่าที่ CD11 และ CD12 ความถี่ธรรมชาติฮาร์โมนิกที่ 2 มีค่าลดลงเล็กน้อยและจะมีค่าลดลงอย่างชัดเจนที่ CD13 และ CD14 แสดงให้เห็นว่ายิ่งรอยแตกมีระดับความลึกเพิ่มขึ้น จะเห็นการลดลงของค่าความถี่ธรรมชาติได้ชัดเจนมากขึ้น และการที่ไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่ธรรมชาติฮาร์โมนิกที่ 1 เนื่องจากรอยแตกอยู่ไกลจากตำแหน่งที่ทำการจับยึดทำให้รอยแตกส่งผลน้อยต่อการสั่นสะเทือนในโหมด (mode) ที่ 1 และเมื่อทำ bump test อีกครั้งโดยจับเพลลายาว 400 มม. ทำให้รอยแตกอยู่ใกล้กับตำแหน่งจับยึดมากขึ้น จะเห็นการลดลงของค่าความถี่ธรรมชาติฮาร์โมนิกที่ 1 ได้อย่างชัดเจน

การทดลองที่ 2.2 การตรวจวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนเพื่อหารูปแบบของสัญญาณการสั่นสะเทือนเมื่อเพลลา มีระดับความลึกของรอยแตกเพิ่มขึ้น

จากผลการทดลองที่ 2.2 เมื่อพิจารณาแนวโน้มของสัญญาณการสั่นสะเทือนในเพลลาแต่ละชุดเป็นดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## เพลาชุดที่ 1

### สัญญาณการสั่นสะเทือนแนวตั้ง

1 x rpm : จากผลการทดลองที่ความเร็วรอบต่างๆ จะเห็นว่าแนวโน้มของสัญญาณการสั่นสะเทือนมีลักษณะคล้ายกันคือ สัญญาณจะมีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่อเพลามีระดับความลึกของรอยแตกเพิ่มขึ้น และสัญญาณการสั่นสะเทือนจากแบร์ริงชุดที่ 1 มีแนวโน้มคล้ายกับสัญญาณการสั่นสะเทือนจากแบร์ริงชุดที่ 2 ยกเว้นที่ความเร็วรอบ 1,300 และ 1,400 rpm ซึ่งสัญญาณจากแบร์ริงชุดที่ 1 จะแตกต่างจากสัญญาณจากแบร์ริงชุดที่ 2 เล็กน้อย

2 x rpm : จากผลการทดลองที่ความเร็วรอบต่างๆ จะเห็นว่าแนวโน้มของสัญญาณการสั่นสะเทือนมีลักษณะคล้ายกับสัญญาณความถี่ 1 x rpm คือสัญญาณจะมีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่อเพลามีระดับความลึกของรอยแตกเพิ่มขึ้น ซึ่งจะเห็นการเปลี่ยนแปลงขนาดสัญญาณการสั่นสะเทือนได้ชัดเจนกว่าสัญญาณ 1 x rpm และสัญญาณการสั่นสะเทือนจากแบร์ริงชุดที่ 1 มีแนวโน้มคล้ายกับสัญญาณการสั่นสะเทือนจากแบร์ริงชุดที่ 2 และจะสังเกตเห็นว่าสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ความเร็วรอบ 1,000 rpm มีขนาดสูงมาก เนื่องจากตรงกับความถี่ธรรมชาติของระบบในแนวตั้ง และสัญญาณที่ความเร็วรอบ 1,300 rpm จะแตกต่างจากสัญญาณที่ความเร็วรอบอื่นๆ คือสัญญาณจะเริ่มมีขนาดลดลงที่ CD13 ขณะที่ความเร็วรอบอื่นๆ สัญญาณจะมีขนาดเพิ่มขึ้นตลอดเมื่อเพลามีระดับความลึกของรอยแตกเพิ่มขึ้น

ที่ความเร็วรอบ 600 rpm จะเห็นสัญญาณ 3 x rpm (1,800 cpm) และ 4 x rpm (2,400 cpm) มีขนาดสูงมาก เช่นเดียวกับสัญญาณ 3 x rpm (2,400 cpm) ที่ความเร็วรอบ 800 rpm เมื่อพิจารณาผลการทดลองที่ 2.1 รูปที่ 4.23 ก จะเห็นว่าสัญญาณ 1 x rpm ที่ความเร็วรอบ 1,500 rpm ถึง 2,500 rpm ซึ่งอยู่ใกล้กับค่าความเร็วรอบวิกฤติ (2,000 rpm) จะมีขนาดค่อนข้างสูง เนื่องจากเมื่อเพลามีความเร็วรอบเข้าใกล้ค่าความเร็วรอบวิกฤติขนาดของการสั่นสะเทือนจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และมีค่าสูงสุดที่ความเร็วรอบวิกฤติและขนาดการสั่นสะเทือนจะเริ่มลดลงเมื่อความเร็วรอบของเพลाप้นจากความเร็วรอบวิกฤติไปแล้ว จากเหตุผลนี้ส่งผลให้สัญญาณการสั่นสะเทือนที่ความถี่ซึ่งอยู่ในช่วง 1,500 cpm ถึง 2,500 cpm มีขนาดสูงมาก

### สัญญาณการสั่นสะเทือนแนวนอน

*1 x rpm* : จากผลการทดลองที่ความเร็วรอบต่างๆ จะเห็นว่าสัญญาณการสั่นสะเทือนจากแบริ่งชุดที่ 1 และแบริ่งชุดที่ 2 มีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามระดับความลึกของรอยแตกที่เพิ่มขึ้น และเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นขนาดของการสั่นสะเทือนโดยรวมจะเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดที่ 1,200 rpm และเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น ขนาดของสัญญาณการสั่นสะเทือนโดยรวมจะเริ่มลดลง ซึ่งเมื่อพิจารณารูปที่ 4.24 ก จะเห็นว่าสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ความถี่ 1 x rpm จะมีขนาดสูงสุดที่ 1,200 rpm ซึ่งคาดว่าตรงกับความถี่ธรรมชาติของส่วนประกอบบางส่วนของฐานชุดทดลอง และที่ความเร็วรอบ 1,200 rpm ขนาดสัญญาณจะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นและลดลงให้เห็นบ้างเล็กน้อย โดยจะไม่คงที่เหมือนที่ความเร็วรอบต่ำ

*2 x rpm* : จากผลการทดลองที่ความเร็วรอบต่างๆ จะเห็นว่าสัญญาณการสั่นสะเทือนจากแบริ่งชุดที่ 1 และแบริ่งชุดที่ 2 มีแนวโน้มค่อนข้างจะคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามระดับความลึกของรอยแตกที่เพิ่มขึ้น ยกเว้นที่ความเร็วรอบ 600 rpm ซึ่งสัญญาณจะไม่คงที่ โดยสัญญาณมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงลดลงแล้วเพิ่มขึ้น เนื่องจากสัญญาณที่ความถี่นี้ตรงกับความถี่ธรรมชาติของฐานชุดทดลองเช่นเดียวกับสัญญาณ 1 x rpm ที่ความเร็วรอบ 1,200 rpm

### เพลาชุดที่ 2

#### สัญญาณการสั่นสะเทือนแนวตั้ง

*1 x rpm* : จากผลการทดลองที่ความเร็วรอบต่างๆ จะเห็นว่าแนวโน้มของสัญญาณการสั่นสะเทือนมีลักษณะคล้ายกันทั้งแบริ่งชุดที่ 1 และแบริ่งชุดที่ 2 คือ สัญญาณจะมีขนาดเพิ่มขึ้นตามระดับความลึกของรอยแตกที่เพิ่มขึ้นที่ CD21 และ CD22 แต่สัญญาณจะมีขนาดลดลงที่ CD23 และยังคงเห็นสัญญาณ 3 x rpm และ 4 x rpm ที่ความเร็วรอบ 600 rpm และสัญญาณ 3 x rpm ที่ความเร็วรอบ 800 rpm มีขนาดสูงมาก เช่นเดียวกับเพลาชุดที่ 1

*2 x rpm* : จากผลการทดลองที่ความเร็วรอบต่างๆ จะเห็นว่าแนวโน้มของสัญญาณการสั่นสะเทือนมีลักษณะคล้ายกันทั้งแบริ่งชุดที่ 1 และแบริ่งชุดที่ 2 คือสัญญาณจะมีขนาดเพิ่มขึ้นตามระดับความลึกของรอยแตกที่เพิ่มขึ้นที่ CD21 และ CD22 แต่สัญญาณจะมีขนาดลดลงที่ CD23 ซึ่งจะเห็นการเปลี่ยนแปลงขนาดสัญญาณการสั่นสะเทือนได้ชัดเจนกว่าสัญญาณ

1 x rpm และจะสังเกตเห็นได้ว่าสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ความเร็วรอบ 1,000 rpm มีขนาดสูงมาก เนื่องจากตรงกับความถี่ธรรมชาติของระบบในแนวตั้ง

#### สัญญาณการสั่นสะเทือนแนวนอน

1 x rpm : จากผลการทดลองที่ความเร็วรอบต่างๆ จะเห็นว่าสัญญาณการสั่นสะเทือนจากแบริ่งชุดที่ 1 และแบริ่งชุดที่ 2 มีแนวโน้มค่อนข้างจะคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามระดับความลึกของรอยแตกที่เพิ่มขึ้น และที่ความเร็วรอบ 1,200 rpm จะเห็นแนวโน้มของสัญญาณไม่คงที่นักเนื่องจากตรงกับความถี่ธรรมชาติของฐานชุดทดลอง

2 x rpm : จากผลการทดลองที่ความเร็วรอบต่างๆ จะเห็นว่าสัญญาณการสั่นสะเทือนจากแบริ่งชุดที่ 1 และแบริ่งชุดที่ 2 มีแนวโน้มค่อนข้างจะคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามระดับความลึกของรอยแตกที่เพิ่มขึ้น ยกเว้นที่ความเร็วรอบ 600 rpm ซึ่งสัญญาณจะไม่คงที่ โดยสัญญาณมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงลดลงแล้วเพิ่มขึ้น เนื่องจากสัญญาณที่ความถี่นี้ตรงกับความถี่ธรรมชาติของฐานชุดทดลองเช่นเดียวกับสัญญาณ 1 x rpm ที่ความเร็วรอบ 1,200 rpm

#### เพลลาชุดที่ 3

##### สัญญาณการสั่นสะเทือนแนวตั้ง

จากผลการทดลองจะเห็นว่าสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ความเร็วรอบ 600, 800, 1000, 1200 และ 1400 rpm ของเพลลา CD31 มีขนาดต่ำมากโดยต่ำกว่าขนาดสัญญาณการสั่นสะเทือนของ Std อย่างเห็นได้ชัด โดยการทดลองที่ความเร็วรอบดังกล่าวข้างต้นเป็นการถอดประกอบเพลลาครั้งเดียวกัน แต่สัญญาณการสั่นสะเทือนของ CD31 ที่ความเร็วรอบ 1300 rpm จะมีขนาดสัญญาณการสั่นสะเทือนปกติคือขนาดของสัญญาณจะสูงกว่า Std และต่ำกว่า CD32 โดยการทดลองที่ความเร็วรอบ 1300 rpm นี้ได้ทำการทดลองก่อนที่ความเร็วรอบอื่นและเป็นการถอดประกอบเพลลาคนละครั้งกับความเร็วรอบอื่น

เพื่อเป็นการทวนสอบผลการทดลองที่ผิดปกติ จึงทำการถอดประกอบเพลลาใหม่อีกครั้งแล้ววัดสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ความเร็วรอบต่างๆ รวมทั้งที่ 1300 rpm ด้วย ปรากฏว่าสัญญาณการสั่นสะเทือนของ CD31 ยังคงต่ำมากอยู่ รวมทั้งสัญญาณที่ความเร็วรอบ 1300 rpm ซึ่งจะมีขนาดต่ำกว่าสัญญาณที่ 1300 rpm ที่ได้จากการทดลองในครั้งแรก

ความผิดปกติของสัญญาณการสังเคราะห์ของ CD31 ที่ได้จากการทดลองนี้อาจเนื่องมาจากความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับตัวเพลาระหว่างทำการขนย้ายและการเก็บรักษา ดังนั้นในการพิจารณาแนวโน้มของสัญญาณการสังเคราะห์ในเพลาชุดที่ 3 นี้ จะไม่พิจารณาสัญญาณการสังเคราะห์ของ CD31

*1 x rpm* : จากผลการทดลองที่ความเร็วรอบต่างๆ จะเห็นว่าสัญญาณการสังเคราะห์มีแนวโน้มคล้ายกันคือ สัญญาณการสังเคราะห์ที่ CD32 และ CD33 มีขนาดใกล้เคียงกัน ซึ่งมีขนาดสูงกว่าสัญญาณของ Std อย่างเห็นได้ชัด โดยที่สัญญาณจากแบรีงชุดที่ 1 มีแนวโน้มคล้ายกับแบรีงชุดที่ 2 ยกเว้นสัญญาณจากแบรีงชุดที่ 1 ที่ความเร็วรอบ 800 rpm ซึ่งขนาดของสัญญาณที่ CD33 จะลดลงจาก CD32 อย่างมาก และยังคงเห็นสัญญาณ 3 x rpm และ 4 x rpm ที่ความเร็วรอบ 600 rpm และสัญญาณ 3 x rpm ที่ความเร็วรอบ 800 rpm มีขนาดสูงมาก เช่นเดียวกับเพลาชุดที่ 1 และเพลาชุดที่ 2

*2 x rpm* : จากผลการทดลองที่ความเร็วรอบต่างๆ จะเห็นว่าแนวโน้มของสัญญาณการสังเคราะห์มีลักษณะคล้ายกันทั้งแบรีงชุดที่ 1 และแบรีงชุดที่ 2 คือสัญญาณจะมีขนาดเพิ่มขึ้นตามระดับความลึกของรอยแตกที่เพิ่มขึ้นจาก Std ที่ CD32 และสัญญาณจะมีขนาดลดลงที่ CD33 และจะสังเกตได้ว่าสัญญาณการสังเคราะห์ที่ความเร็วรอบ 1,000 rpm มีขนาดสูงมาก เนื่องจากตรงกับความถี่ธรรมชาติของระบบในแนวตั้ง

#### สัญญาณการสังเคราะห์บนแนวนอน

*1 x rpm* : จากผลการทดลองที่ความเร็วรอบต่างๆ จะเห็นว่าสัญญาณการสังเคราะห์จากแบรีงชุดที่ 1 และแบรีงชุดที่ 2 มีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามระดับความลึกของรอยแตกที่เพิ่มขึ้น และที่ความเร็วรอบ 1,200 rpm จะเห็นแนวโน้มของสัญญาณไม่คงที่นักเนื่องจากตรงกับความถี่ธรรมชาติของฐานชุดทดลอง

*2 x rpm* : จากผลการทดลองที่ความเร็วรอบต่างๆ จะเห็นว่าสัญญาณการสังเคราะห์จากแบรีงชุดที่ 1 และแบรีงชุดที่ 2 มีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามระดับความลึกของรอยแตกที่เพิ่มขึ้น ยกเว้นที่ความเร็วรอบ 600 rpm ซึ่งสัญญาณจะไม่คงที่ โดยสัญญาณมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงลดลงแล้วเพิ่มขึ้น เนื่องจากสัญญาณที่ความถี่นี้ตรงกับความถี่ธรรมชาติของฐานชุดทดลองเช่นเดียวกับสัญญาณ 1 x rpm ที่ความเร็วรอบ 1,200 rpm

เมื่อพิจารณาแนวโน้มของสัญญาณการสั่นสะเทือนของเพลาทังสามชุดจะเห็นลักษณะที่คล้ายกันคือ เมื่อรอยแตกมีระดับความลึกเพิ่มขึ้นแล้วจะส่งผลให้ขนาดของสัญญาณ 1 x rpm และ 2 x rpm ในแนวตั้ง หรือในแนวเดียวกันกับการเปิดและปิดของรอยแตก มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากเพล่าที่ไม่มีรอยแตก เนื่องจากเมื่อรอยแตกมีระดับความลึกเพิ่มขึ้นแล้วทำให้การเปิดและปิดของรอยแตกชัดเจนมากขึ้น และยังสามารรถสังเกตได้อีกว่าการเพิ่มขึ้นของขนาดสัญญาณ 2 x rpm จะเห็นได้ชัดเจนกว่าสัญญาณ 1 x rpm แต่จะเห็นว่าสัญญาณ 1 x rpm และ 2 x rpm ในแนวนอนมีแนวโน้มคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามระดับความลึกของรอยแตกที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเปิดและปิดของรอยแตกเกิดขึ้นจากน้ำหนักของตัวเพล่าเองเมื่อเพล่าหมุนไป ซึ่งจะมีผลเฉพาะในแนวตั้งเท่านั้น และในการทดลองไม่มีการใส่ภาระในแนวระดับ จึงทำให้สัญญาณในแนวระดับคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง

จากแนวโน้มของสัญญาณการสั่นสะเทือนของเพลาทังสามชุด จะเห็นสัญญาณการสั่นสะเทือน 3 x rpm และ 4 x rpm ที่ความเร็วรอบ 600 rpm และสัญญาณ 3 x rpm ที่ความเร็วรอบ 800 rpm ในแนวตั้ง มีขนาดสูงมากเนื่องจากความถี่นี้อยู่ในช่วงใกล้เคียงกับความถี่วิกฤติหรือค่าความถี่ธรรมชาติของระบบ และสัญญาณการสั่นสะเทือน 2 x rpm ที่ความเร็วรอบ 1,000 rpm ในแนวตั้ง สัญญาณการสั่นสะเทือน 1 x rpm ที่ความเร็วรอบ 1200 rpm และสัญญาณการสั่นสะเทือน 2 x rpm ที่ความเร็วรอบ 600 rpm ในแนวนอน มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของขนาดเพิ่มขึ้นและลดลงที่ไม่แน่นอนซึ่งแตกต่างจากสัญญาณการสั่นสะเทือนอื่นๆ เนื่องจากสัญญาณที่ความถี่เหล่านี้มีค่าใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของฐานชุดทดลอง ทำให้มีขนาดของสัญญาณการสั่นสะเทือนสูงมากและเห็นการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ไม่แน่นอน

เมื่อพิจารณาขนาดของสัญญาณการสั่นสะเทือนโดยรวม จะเห็นว่าสัญญาณการสั่นสะเทือนจากแบร์ริงชุดที่ 1 และแบร์ริงชุดที่ 2 มีแนวโน้มที่คล้ายกัน แต่ขนาดของสัญญาณการสั่นสะเทือนจากแบร์ริงชุดที่ 1 จะสูงกว่าสัญญาณการสั่นสะเทือนจากแบร์ริงชุดที่ 2 และยังสังเกตเห็นสัญญาณการสั่นสะเทือนที่บางความเร็วรอบจากแบร์ริงชุดที่ 1 มีแนวโน้มที่แตกต่างจากแบร์ริงชุดที่ 2 เล็กน้อย ทั้งหมดที่เกิดขึ้นนี้เนื่องจากแบร์ริงชุดที่ 1 อยู่ใกล้กับคัปปลิงและมอเตอร์มากกว่าแบร์ริงชุดที่ 2 ทำให้สัญญาณการสั่นสะเทือนจากคัปปลิงและมอเตอร์มารบกวนสัญญาณการสั่นสะเทือนที่แบร์ริงชุดที่ 1 ได้มากกว่าแบร์ริงชุดที่ 2

เมื่อพิจารณาแนวโน้มของสัญญาณการสั่นสะเทือนโดยรวมจะเห็นว่า ยังมีแนวโน้มของสัญญาณการสั่นสะเทือนบางอย่างที่ยังไม่สามารถยืนยันได้อย่างชัดเจน เช่น การลดลงของขนาดสัญญาณ 1 x rpm และ 2 x rpm แนวตั้งในเพล่า CD23 และการลดลงของขนาดสัญญาณการสั่นสะเทือน 2 x rpm แนวตั้งในเพล่า CD33 เป็นต้น แนวโน้มเหล่านี้อาจเป็นลักษณะเฉพาะของเพล่าเมื่อรอยแตกมีระดับความลึกมากๆ หรืออาจเกิดจากความผิดพลาด



และข้อจำกัดต่างๆ ในการทดลองซึ่งต้องทำการศึกษาในรายละเอียดต่อไป โดยข้อจำกัดต่างๆ ในการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. เฟลาที่ใช้ในการทดลองมีขนาดเล็ก ทำให้ไม่สามารถสร้างรอยแตกให้มีระดับความลึกแตกต่างกันหลายระดับได้ และทำให้สัญญาณการสั่นสะเทือนที่ส่งออกมาไม่ชัดเจน และมีจำนวนข้อมูลน้อยจึงเห็นแนวโน้มของสัญญาณการสั่นสะเทือนไม่ชัดเจน
2. ฐานชุดทดลองมีขนาดเล็กและไม่มีการจับยึดที่มั่นคงทำให้การสั่นสะเทือนจากฐานชุดทดลองมารบกวนสัญญาณการสั่นสะเทือนจากเฟลาที่มีรอยแตก
3. ในการทดลองใช้เฟลาหลายเส้น ทำให้ต้องมีการถอดประกอบหลายครั้งซึ่งเป็นการลำบากในการควบคุมสภาวะแวดล้อมต่างๆ ให้เหมือนกันทุกประการในการถอดประกอบเฟลาแต่ละครั้ง
4. การทดลองเป็นแบบไม่มีภาระ จึงทำให้สัญญาณการสั่นสะเทือนจากรอยแตกไม่ชัดเจน

จากผลการทดลอง ถึงแม้ว่าสัญญาณการสั่นสะเทือนจากเฟลาที่มีรอยแตกนั้นจะมีความถี่เดียวกันกับสัญญาณการสั่นสะเทือนจากความผิดปกติอื่นๆ เช่น ความไม่สมดุล และการเยื้องแนวแกน เป็นต้น แต่ยังมีลักษณะของสัญญาณการสั่นสะเทือนบางอย่างที่แตกต่างกันคือ ปัญหาความไม่สมดุลจะทำให้สัญญาณการสั่นสะเทือนความถี่  $1 \times \text{rpm}$  ในแนวรัศมีมีขนาดเพิ่มขึ้นซึ่งสามารถตรวจได้ทั้งในแนวตั้งและแนวนอน แต่สัญญาณการสั่นสะเทือนจากเฟลาที่มีรอยแตกจะตรวจพบการเพิ่มขึ้นของสัญญาณความถี่  $1 \times \text{rpm}$  เฉพาะในแนวตั้งเท่านั้น แต่จะไม่พบการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณในแนวนอน

สำหรับปัญหาการเยื้องแนวแกนเกิดจากการตั้งศูนย์ในการติดตั้งเครื่องจักรไม่ได้ในแนวขนาน (offset) หรือแนวแกนเอียงทำมุมกัน (angular) หรือผลรวมของทั้งสองแบบ ทำให้เกิดสัญญาณความถี่  $1 \times \text{rpm}$ ,  $2 \times \text{rpm}$  และ  $3 \times \text{rpm}$  ขึ้นทั้งในแนวแกนและแนวรัศมีทั้งแนวตั้งและแนวนอน [4] ซึ่งจะตรวจวัดสัญญาณในแนวใดก็ได้ชัดเจนนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของการเยื้องแนวแกนที่เกิดขึ้น แต่สัญญาณจากเฟลาที่มีรอยแตกจะสามารถตรวจวัดการเพิ่มขึ้นของสัญญาณความถี่  $1 \times \text{rpm}$  และ  $2 \times \text{rpm}$  เฉพาะในแนวตั้งเท่านั้น และแม้ว่าจะไม่สามารถแยกลักษณะของสัญญาณการสั่นสะเทือนระหว่างการเยื้องแนวแกนและรอยแตกในเฟลาได้อย่างชัดเจน แต่ก็ทำให้สามารถเพิ่มข้อสันนิษฐานถึงการเกิดปัญหารอยแตกในเฟลาได้ โดยเมื่อทำ alignment เพื่อแก้ปัญหาการเยื้องแนวแกนแล้วไม่สามารถทำให้ขนาดของสัญญาณการสั่นสะเทือน  $1 \times \text{rpm}$  และ  $2 \times \text{rpm}$  ในแนวตั้งลดลงได้ ทำให้สันนิษฐานถึง

การเกิดรอยแตกในเพลลาได้ และสามารถตรวจสอบเพื่อยืนยันโดยวิธีการตรวจสอบโดยไม่ทำลายได้เมื่อหยุดเครื่องเพื่อทำการซ่อมบำรุง

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองที่ 2.2 กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การสั่นสะเทือนตามขวางในบทที่ 3 จะเห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้สามารถแสดงลักษณะการสั่นสะเทือนของเพลลาที่มีรอยแตกตามแนวหน้าตัดได้บางส่วนคือ แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงขนาดสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ความถี่เท่ากับความถี่รอบของเพลลา ( $1 \times \text{rpm}$ ) คือ น้ำหนักของตัวเพลลาจะทำให้รอยแตกมีการเปิดและปิด 1 ครั้งในทุกๆ รอบของการหมุน และเมื่อระดับความลึกของรอยแตกเพิ่มขึ้นก็จะส่งผลให้สัญญาณการสั่นสะเทือนที่ความถี่เท่ากับความถี่รอบของเพลลา มีขนาดเพิ่มขึ้น

อย่างไรก็ตาม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ยังไม่สามารถแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงขนาดสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ความถี่  $2 \times \text{rpm}$  ได้ ถ้าได้มีการปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้มีความใกล้เคียงกับการสั่นสะเทือนของเพลลาที่มีรอยแตกมากขึ้น จะทำให้ผลที่ได้จากการวิจัยมีความชัดเจนมากขึ้น



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัย ประโยชน์ที่ได้รับ และข้อเสนอแนะ

### สรุปผลการวิจัย

จากการวิจัยพบว่า เมื่อเกิดรอยแตกขึ้นในเพลาลูกเบี้ยวจะทำให้ขนาดของสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ความถี่  $1 \times \text{rpm}$  และ  $2 \times \text{rpm}$  ในแนวตั้งเพิ่มขึ้น และสามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณ  $2 \times \text{rpm}$  ได้ชัดเจนกว่าสัญญาณ  $1 \times \text{rpm}$  แต่สัญญาณการสั่นสะเทือนที่ความถี่  $1 \times \text{rpm}$  และ  $2 \times \text{rpm}$  ในแนวนอนจะคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามระดับความลึกของรอยแตกที่เพิ่มขึ้น แต่จากการวิจัยนี้ยังไม่สามารถระบุถึงรูปแบบการเพิ่มขึ้นของขนาดสัญญาณการสั่นสะเทือนได้อย่างชัดเจน เนื่องจากข้อจำกัดบางอย่างในการทดลอง และเมื่อเปรียบเทียบผลการวิจัยที่ได้กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เบื้องต้นที่แสดงไว้ในบทที่ 3 จะเห็นว่ายังมีรูปแบบการสั่นสะเทือนบางอย่างจากการทดลองที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ยังไม่สามารถแสดงได้ ซึ่งต้องทำการปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้มีความเหมาะสมยิ่งขึ้น

### ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

จากรูปแบบของสัญญาณการสั่นสะเทือนของเพลาลูกเบี้ยวที่มีรอยแตกที่ได้จากงานวิจัยสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการบำรุงรักษาเครื่องจักรกลหมุนและตรวจวัดความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับเพลาลูกเบี้ยวได้ ถึงแม้ว่ารูปแบบของสัญญาณการสั่นสะเทือนของเพลาลูกเบี้ยวที่มีความถี่เดียวกับปัญหาความไม่สมดุลและปัญหาการเยื้องแนวแกนก็ตาม แต่การเกิดรอยแตกขึ้นในเพลาลูกเบี้ยวสามารถตรวจวัดการเพิ่มขึ้นของสัญญาณที่ความถี่  $1 \times \text{rpm}$  และ  $2 \times \text{rpm}$  ในแนวตั้งเท่านั้น แต่ขนาดของสัญญาณที่ความถี่  $1 \times \text{rpm}$  และ  $2 \times \text{rpm}$  ในแนวนอนจะไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะที่ปัญหาการไม่สมดุลจะทำให้สัญญาณการสั่นสะเทือนความถี่  $1 \times \text{rpm}$  ในแนวรัศมีทั้งแนวตั้งและแนวนอนมีขนาดเพิ่มขึ้น และปัญหาการเยื้องศูนย์กลางจะทำให้เกิดสัญญาณความถี่  $1 \times \text{rpm}$ ,  $2 \times \text{rpm}$  และ  $3 \times \text{rpm}$  ทั้งในแนวแกนและแนวรัศมีทั้งแนวตั้งและแนวนอน ซึ่งจะตรวจวัดสัญญาณในแนวใดได้ชัดเจนนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของการเยื้องแนวแกนที่เกิดขึ้น ดังนั้นถ้าตรวจวัดพบความผิดปกติของสัญญาณการสั่นสะเทือนในลักษณะดังกล่าว ทำให้สามารถสันนิษฐานถึงการเกิดรอยแตกในเพลาลูกเบี้ยวได้ เป็นการป้องกันความเสียหายอย่างรุนแรงที่จะเกิดขึ้นรวมทั้งยังสามารถวางแผนการบำรุงรักษาได้อย่าง

เหมาะสม นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังเป็นพื้นฐานของการศึกษาเพื่อที่จะหารูปแบบที่แน่นอนของสัญญาณการสั่นสะเทือนของเพลลาที่มีรอยแตกต่อไป

### ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยนี้จะเห็นว่ายังมีข้อจำกัดอยู่หลายประการ ดังนั้นเพื่อที่จะทำให้ผลการวิจัยในอนาคตมีความชัดเจนมากขึ้น จะต้องทำการปรับปรุงชุดทดลองให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่น ฐานของชุดทดลองต้องมีความแข็งแรง มีการจับยึดที่มั่นคง และมีค่าความถี่ธรรมชาติที่ต่ำไม่รบกวนสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ตรวจวัด เพลลาที่ใช้ในการทดลองต้องมีขนาดใหญ่เพื่อที่จะสร้างรอยแตกให้มีความลึกได้หลายระดับ และควรจะทำแบบชุดทดลองให้สามารถสร้างภาระอย่างเพียงพอที่จะทำให้เกิดรอยแตกและทำให้รอยแตกมีความลึกเพิ่มขึ้นได้ ทำให้สามารถใช้เพลลาเพียงเส้นเดียวในการทดลองและไม่ต้องมีการถอดประกอบเพลลาหลายครั้ง และยังทำให้สามารถตรวจวัดแนวโน้มของสัญญาณในแนวแกนได้ดี นอกจากนี้การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะทำให้การศึกษาสัญญาณการสั่นสะเทือนของเพลลาที่มีรอยแตกมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



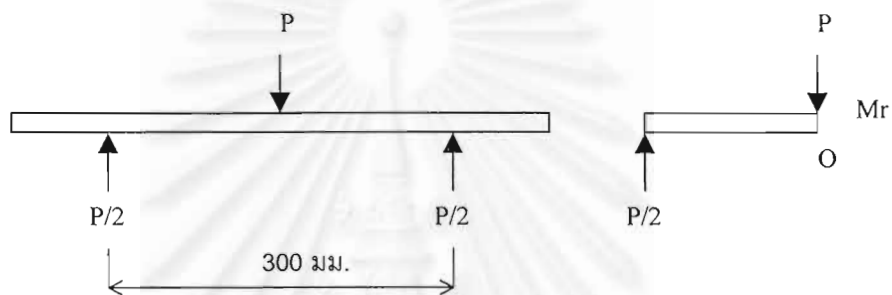
## รายการอ้างอิง

1. William T. Thomson. Theory of Vibration with Applications. 4<sup>th</sup> ed. New Jersey: Prentice Hall, 1993.
2. Robert F. Steidel, Jr. An Introduction to Mechanical Vibrations. 3<sup>rd</sup> ed. New York: John Wiley & Sons, 1989.
3. Victor Wowk. Mechanical Vibration Measurement and Analysis. New York: McGraw-Hill, Inc., 1991.
4. ก่อเกียรติ บุญชูกุศล, สมศักดิ์ ไชยะภินันท์ และ ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ. การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน การเฝ้าตรวจวัดและการจัดการบำรุงรักษา. กรุงเทพมหานคร: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2540.
5. Grabowski, B. The vibrational Behavior of a Turbine Rotor Containing a Transverse Crack. ASME Journal of mechanical Design, Vol. 102, January 1980, pp. 140-146.
6. William F. Riley, Loren Zachary. Introduction to Mechanics of Materials. New York: John Wiley & Sons, 1989.
7. พูฉิฉิ ซาโตะ. การทดสอบแบบไม่ทำลาย. กรุงเทพมหานคร: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2538.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ภาคผนวก ก**  
**การคำนวณภาระที่ใช้ในการทดลอง**

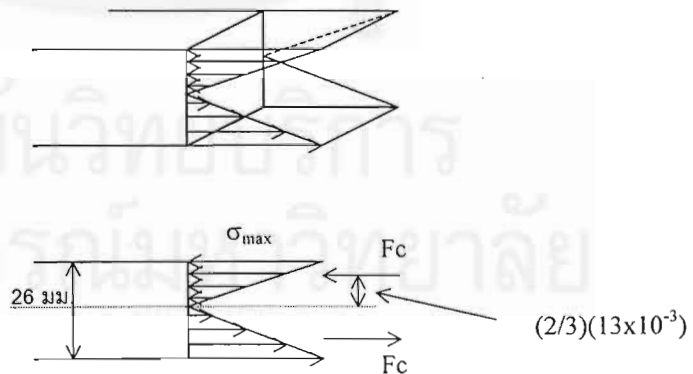
ในการทดลองจะใช้เพลาน้ำดีตัวกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 26 มม. ยาว 800 มม. และระยะห่างระหว่างฐานของเครื่อง Dynamic Servo Machine คือ 300 มม. แต่เพื่อลดความซับซ้อนในการคำนวณจึงสมมติให้ใช้เพลาน้ำดีสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 26x26 มม. แทนเพลาน้ำดีตัวกลม [6]



รูปที่ ก-1 แผนภูมิแรง (Free Body Diagram)

จาก Free Body Diagram

$$\begin{aligned} \sum M_o = 0 ; \quad Mr - (P/2)(0.15) &= 0 \\ Mr &= 0.075P \end{aligned} \quad (1)$$



รูปที่ ก-2 ภาพแสดงการกระจายความเค้นบริเวณหน้าตัด

$$\begin{array}{l}
 \text{จากรูปที่ ก-2} \\
 \text{ให้} \\
 \text{ดังนั้น}
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 F_c = (1/2)(\sigma_{\max})(13 \times 10^{-3})(26 \times 10^{-3}) \\
 \sigma_{\max} = 360 \text{ MPa} \\
 F_c = 60,840 \text{ N}
 \end{array}
 \quad (2)$$

จาก (1) และ (2)

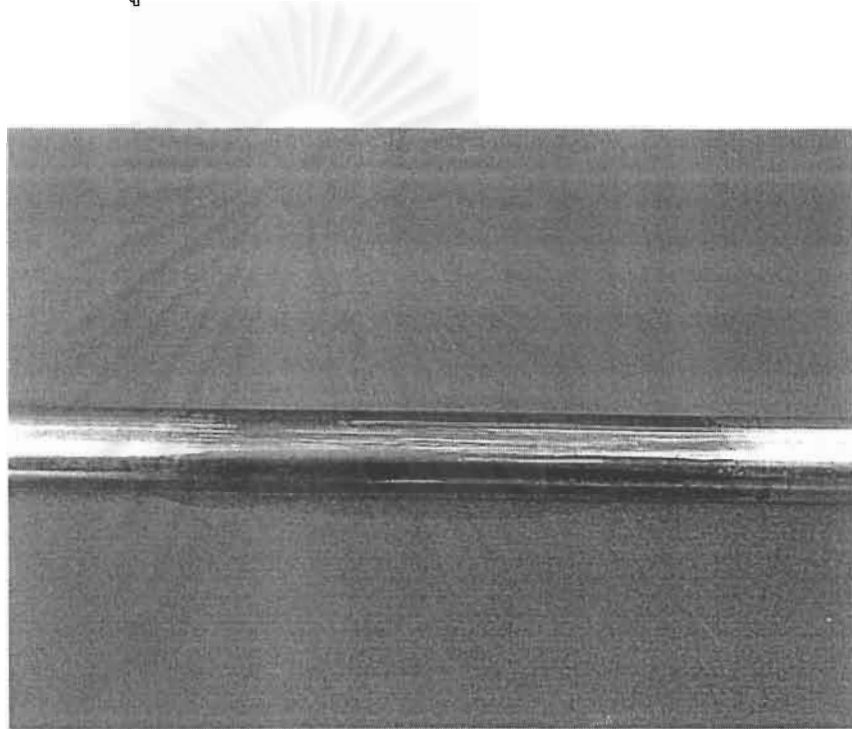
$$\begin{array}{l}
 \text{ดังนั้น} \\
 M_r = (60,840)(2)(2/3)(13 \times 10^{-3}) = 0.075 P_{\max} \\
 P_{\max} = 14,033.8 \text{ N} \\
 = 1,430.56 \text{ kg} = 1.43 \text{ ton}
 \end{array}$$

จากการคำนวณจะเห็นได้ว่า ค่าภาระสูงสุดที่ใช้ได้โดยไม่เกิน elastic limit คือ 1.43 ตัน สำหรับหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ดังนั้นสำหรับเพลาน้ำดัดวงกลมซึ่งมีพื้นที่รับแรงน้อยกว่า ค่าภาระสูงสุดที่รับได้ก็จะน้อยกว่าด้วย และจากการทดลองใส่ภาระสูงสุดให้กับเพล่า ปรากฏว่าสามารถให้ภาระสูงสุดได้ประมาณ 1 ตัน ดังนั้นเพื่อที่จะให้มั่นใจได้ว่าความเค้นที่เกิดขึ้นในเพล่าไม่เกินค่า elastic limit ในการทดลองจึงเลือกใช้ค่าภาระเฉลี่ย  $-0.350$  ตัน ค่าแอมพลิจูด  $0.320$  ตัน ดังนั้นค่าภาระสูงสุดที่ใช้ในการทดลองคือ  $-0.670$  ตัน และค่าภาระต่ำสุดที่ใช้ในการทดลองคือ  $0.03$  ตัน

## ภาคผนวก ข

### การตรวจสอบหารอยแตกโดยการดูดรัมของเหลว

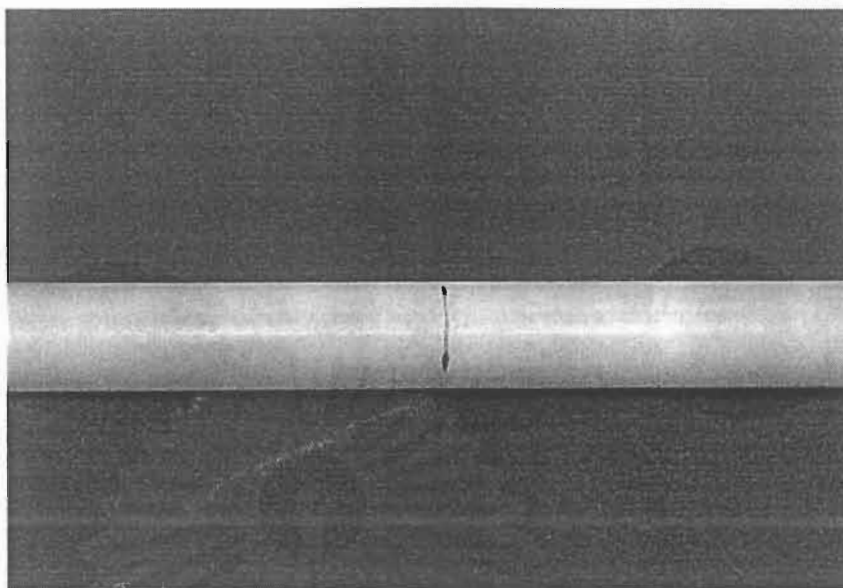
การตรวจสอบหารอยแตกโดยการดูดรัมของเหลว [7] เริ่มต้นจากใช้น้ำยาทำความสะอาด ฟันลงไปในเพลลาแล้วเช็ดออกให้สะอาด หลังจากนั้นพ่นสารแทรกซึมในตำแหน่งที่ต้องการตรวจสอบดังรูปที่ ข-1



รูปที่ ข-1 การพ่นแทรกซึมบนเพลลา

หลังจากพ่นสารแทรกซึมแล้ว ทิ้งไว้ประมาณ 10-15 นาที เพื่อให้สารแทรกซึมถูกดูดรัมเข้าไปในรอยแตก จากนั้นใช้ผ้าชุบตัวทำความสะอาด เช็ดสารแทรกซึมบริเวณผิวออกให้สะอาด แล้วใช้สารสร้างภาพ (developer) ฟันลงไปในเพลลา สารแทรกซึมที่แทรกตัวอยู่ในรอยแตกจะถูกดูดรัมขึ้นมาให้เห็นเป็นภาพของรอยแตกดังรูปที่ ข-2





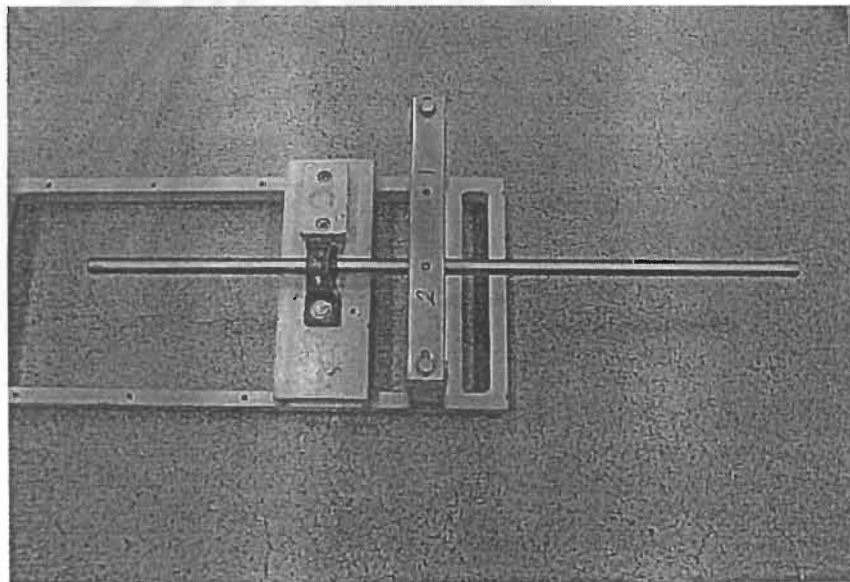
รูปที่ ข-2 การฟอสสารสร้างภาพเพื่อให้เห็นเป็นภาพของรอยแตก

จากนั้นทำการวัดความยาวของรอยแตกตามเส้นรอบวงเพื่อประมาณความลึกของรอยแตกที่เกิดขึ้นบนเพลลา

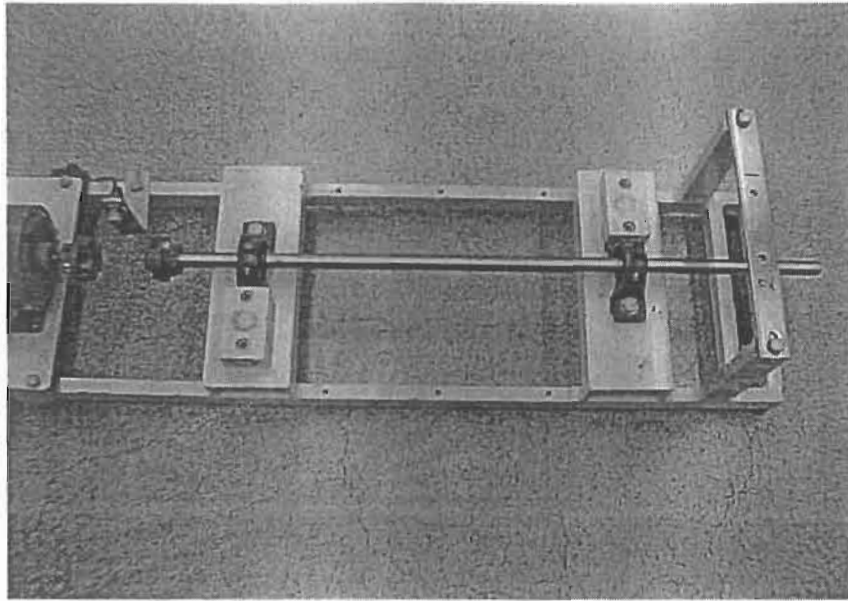
## ภาคผนวก ค

### การประกอบเพลาลูกเบี้ยวเข้ากับชุดทดลอง

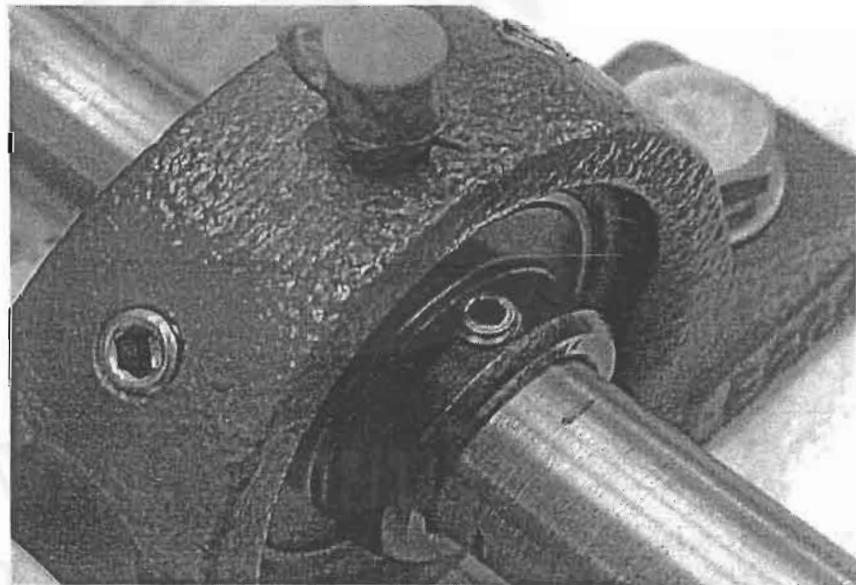
เพื่อเป็นการควบคุมปัจจัยภายนอกต่างๆให้เหมือนกันมากที่สุดเพื่อเปรียบเทียบสัญญาณการสั่นสะเทือนในเพลาลูกเบี้ยวแต่ละเส้น จึงออกแบบชุดทดลองให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเพลาลูกเบี้ยว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแบริ่ง และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของคัปปลิง มีขนาดเท่ากันคือ 20 มม. ทำให้สามารถถอดประกอบเพลาลูกเบี้ยวผ่านแบริ่งชุดที่ 2 แบริ่งชุดที่ 1 และสวมเข้ากับคัปปลิงได้โดยไม่ต้องถอดประกอบส่วนอื่นๆ ของชุดทดลอง ตัวเพลาลูกเบี้ยวจะจับยึดกับแบริ่งและคัปปลิงโดยใช้เช็ทสกรูและในการถอดประกอบเพลาลูกเบี้ยวแต่ละเส้นจะให้ตำแหน่งของรอยแตกอยู่ด้านบนให้อยู่ในแนวเดียวกับตำแหน่งของเช็ทสกรูทุกครั้ง ดังแสดงในรูปที่ ค-1 ถึง ค-4



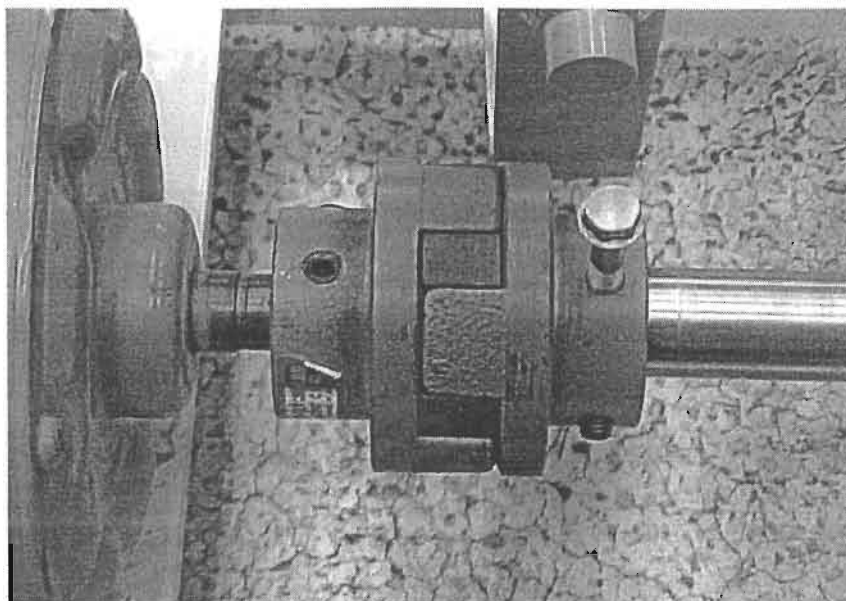
รูปที่ ค-1 การสวมเพลาลูกเบี้ยวผ่านแบริ่งชุดที่ 2



รูปที่ ค-2 การสวมเพลลาผ่านแบริ่งชุดที่ 1 และประกอบเข้ากับคัปปลิง

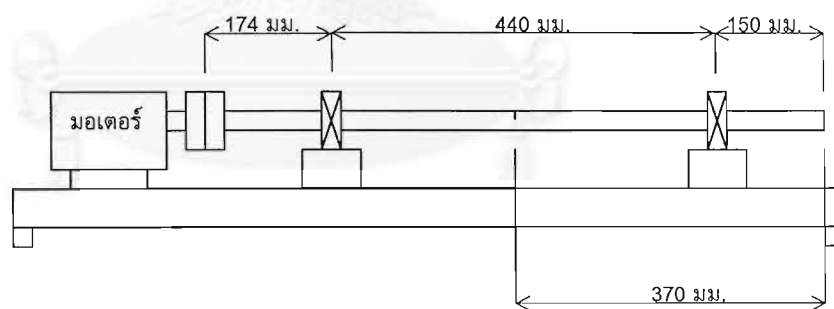


รูปที่ ค-3 การจับยึดเพลากับแบริ่ง



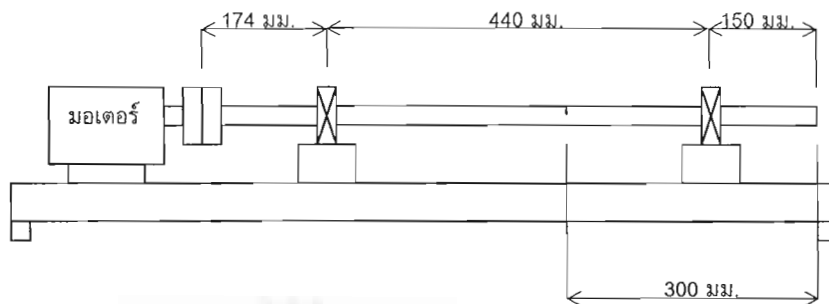
รูปที่ ค-4 การจับยึดเพลากับคัปปลิง

เมื่อนำเพลามีรอยแตกทั้งสามชุดประกอบเข้ากับชุดทดลองแล้ว จะได้ตำแหน่งของรอยแตกดังรูปที่ ค-5

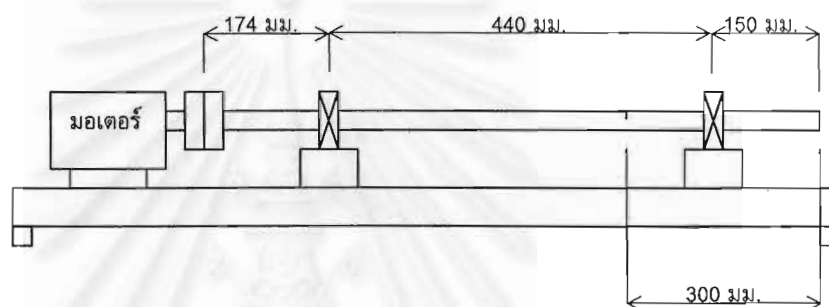


เพลาชุดที่ 1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



เพลาชุดที่ 2



เพลาชุดที่ 3

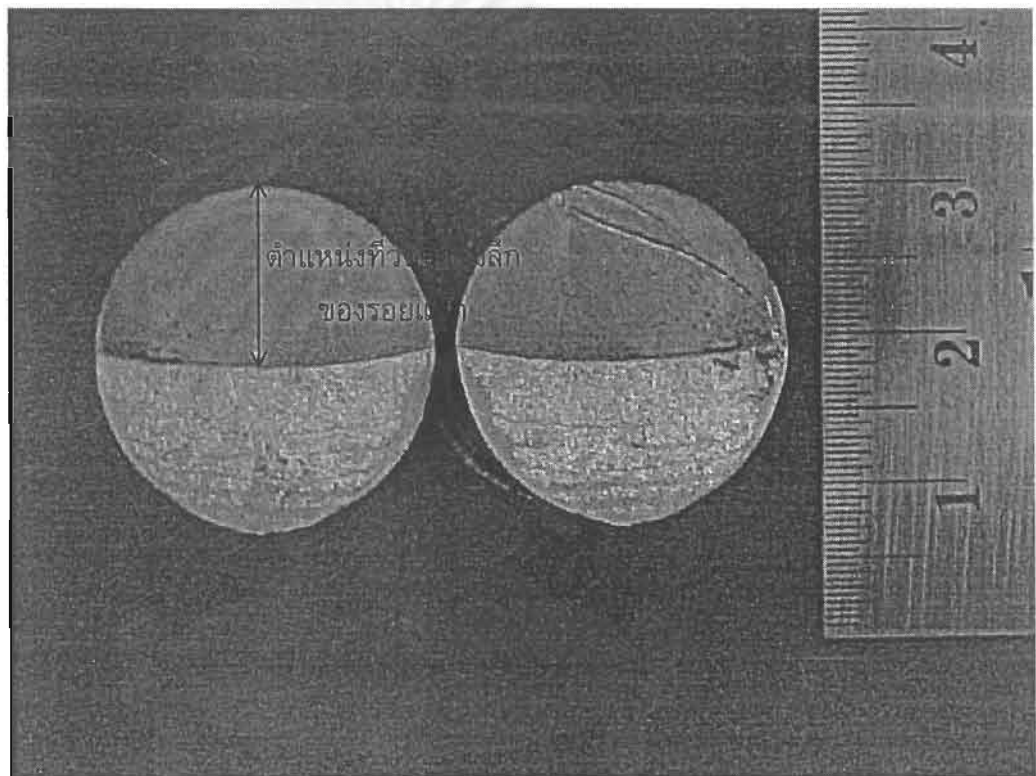
รูปที่ ค-5 ตำแหน่งรอยแตกของเพลาลูก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ง

### การวัดความลึกของรอยแตก

การวัดความลึกที่แน่นอนของรอยแตกจะทำหลังจากทำการทดลองทุกอย่างเรียบร้อยแล้ว นำเพลไปหักแล้วใช้เวอร์เนียวัดความลึกของรอยแตก โดยจะวัดความลึกที่ลึกที่สุดของรอยแตกดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ ง-1

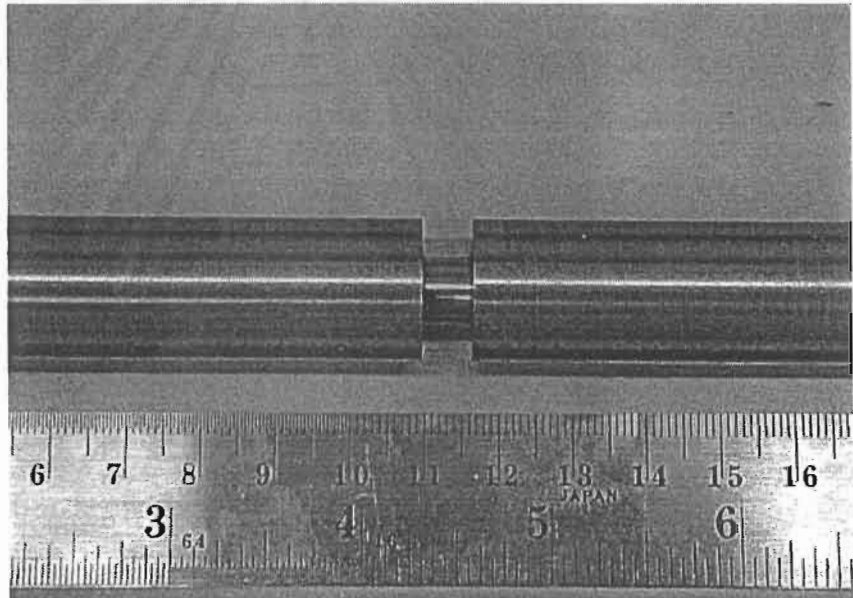


รูปที่ ง-1 ตำแหน่งที่วัดความลึกของรอยแตก

## ภาคผนวก จ

### การทำ Bump Test

การทำ bump test แบ่งออกเป็นสองส่วนคือ การทำ bump test เพลابนเครื่องกลึง โดยจะจับยึดเพลลาให้ปลายเพลลาข้างหนึ่งเป็นปลายอิสระเพื่อศึกษาผลของความลึกของรอยแตกที่มีต่อความถี่ธรรมชาติของเพลลา และการทำ bump test เพลลาบนฐานชุดทดลองเพื่อวัดค่าความถี่ธรรมชาติของฐานชุดทดลอง โดยจะใช้เพลลามาตรฐานและเพลลาชุดที่ 1 และเพลลาที่ทำการเจาะร่องที่ตำแหน่งเดียวกันกับรอยแตกเพื่อจำลองการเกิดรอยแตกในการทำ การทดลอง โดยเพลลาที่ทำการเจาะร่องจะเจาะร่องกว้าง 7 มม. ลึก 5 มม. ดังรูปที่ จ-1

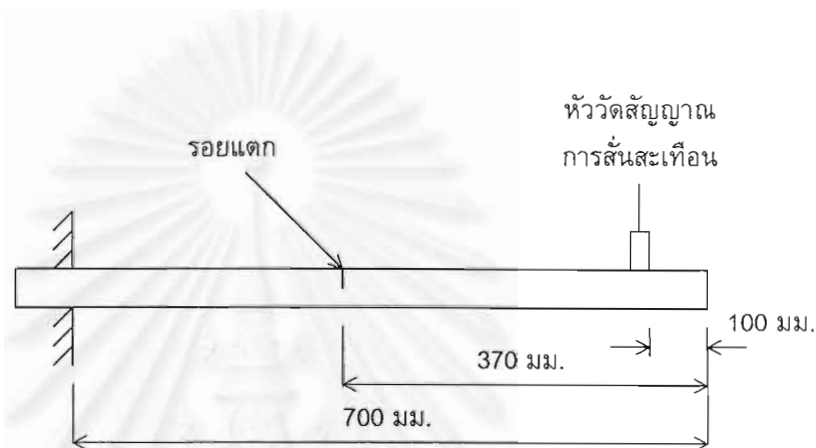


รูปที่ จ-1 เพลลาที่ทำการเจาะร่องเพื่อใช้ในการทำ bump test (CD14)

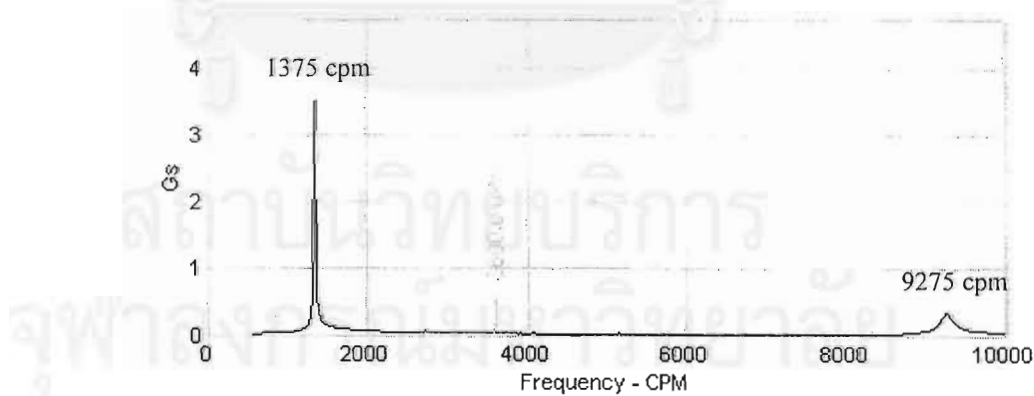
(1) การทำ bump test เพลานเครื่องกลึง

การทำ bump test เพลานเครื่องกลึง จะใช้ค้อนยางเคาะที่บริเวณปลายเพลานในแนวตั้งและจับยึดหัววัดสัญญาณการสั่นสะเทือนโดยหัวแม่เหล็กในแนวตั้ง และจัดให้รอยแตกอยู่ในตำแหน่งดังรูปที่ จ-2 และ จ-4 โดยจะทำทั้งหมดสองแบบ แบบแรกจะจับเพลายาว 700 มม. และแบบที่สองจะจับเพลายาว 400 มม.

การทำ bump test เพลานเครื่องกลึงแบบที่ 1

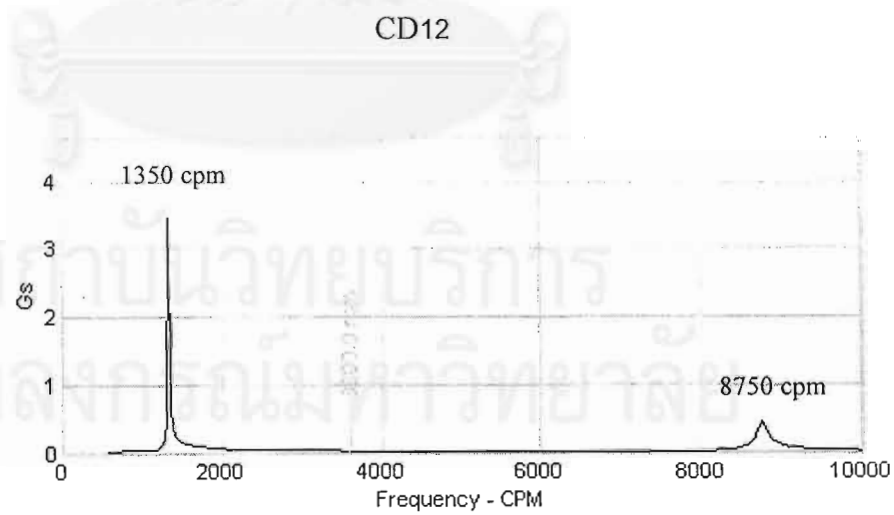
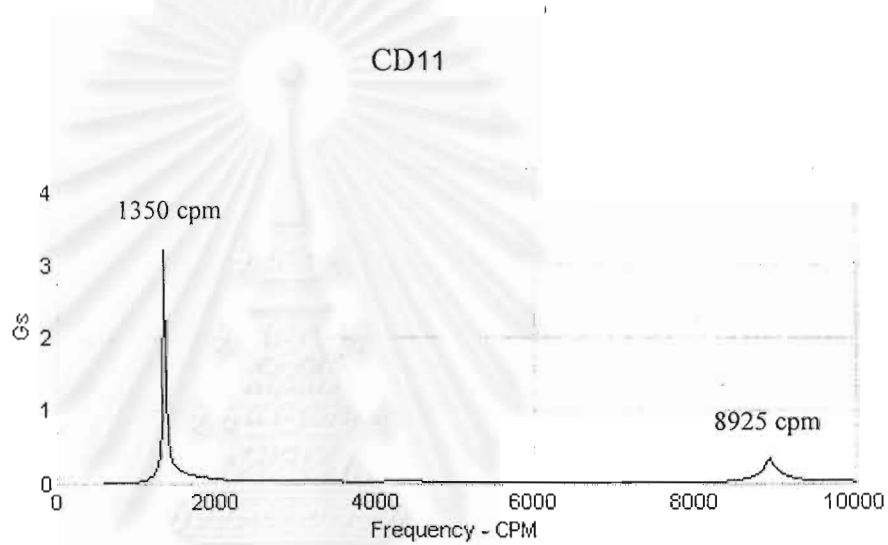
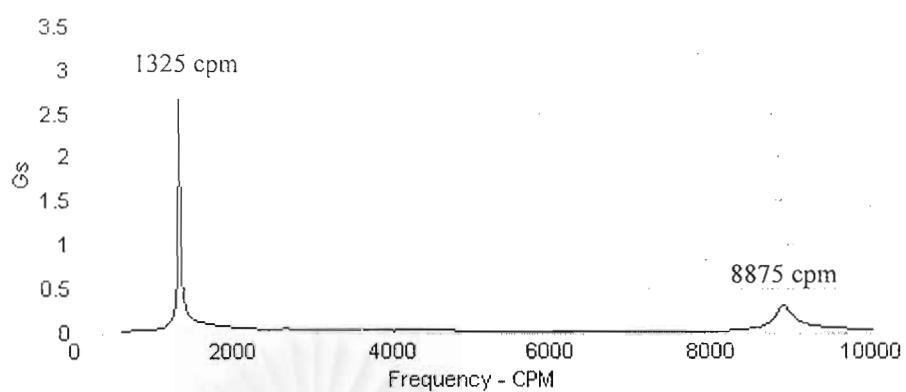


รูปที่ จ-2 ตำแหน่งการจับยึดเพลากการทำ bump test เพลานเครื่องกลึงแบบที่ 1

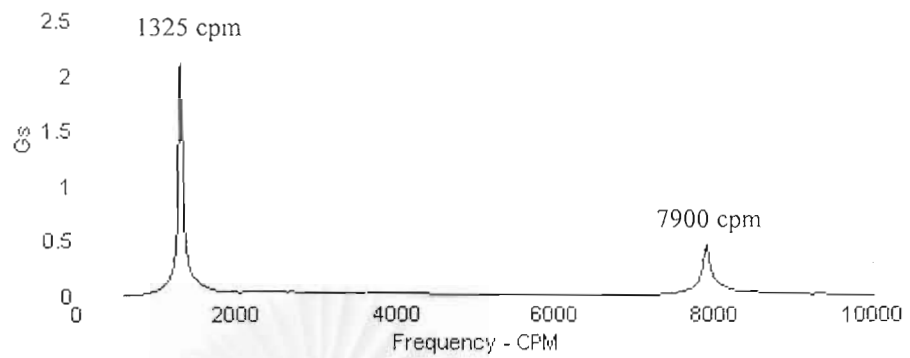


Std





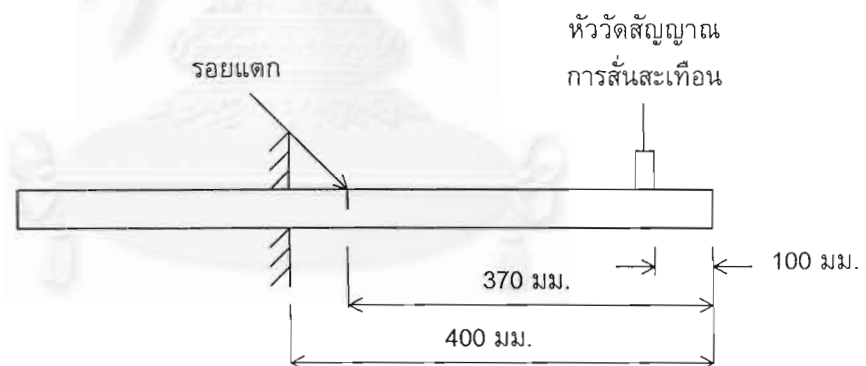
CD13



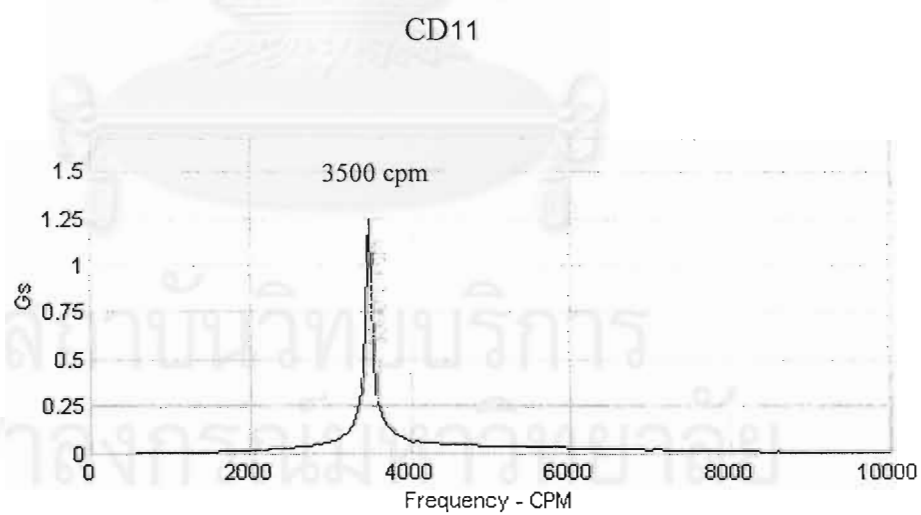
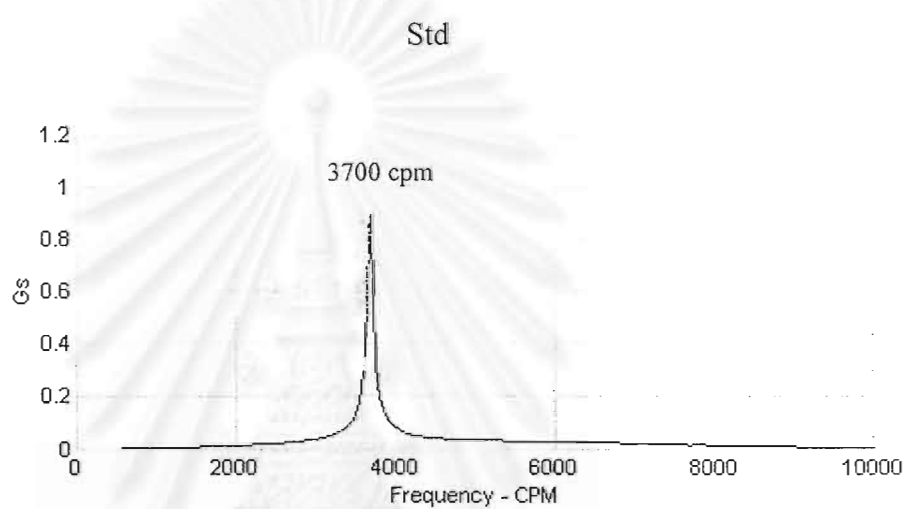
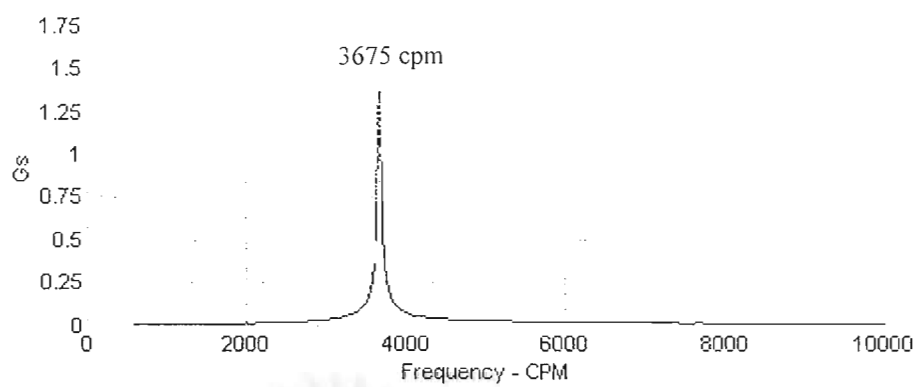
CD14

รูปที่ จ-3 สัญญาณการสั่นสะเทือนการทำ bump test เพลabanเครื่องกลึงแบบที่ 1

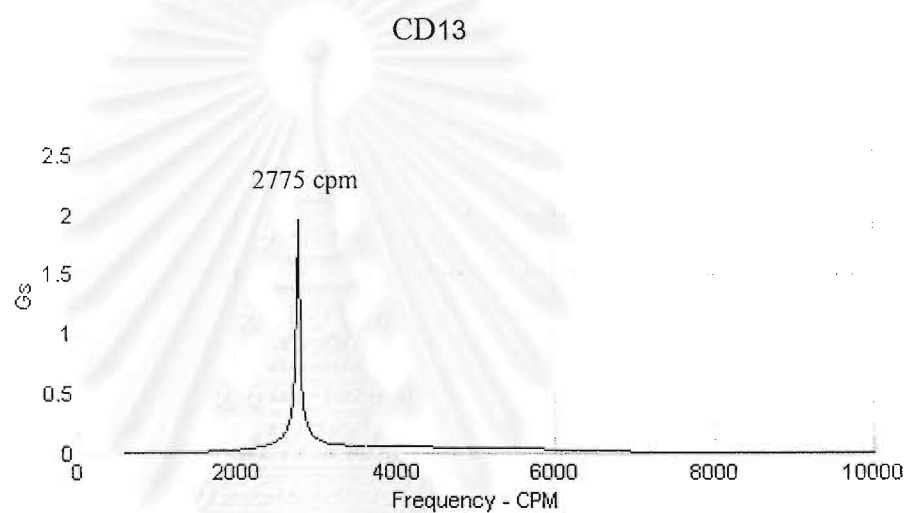
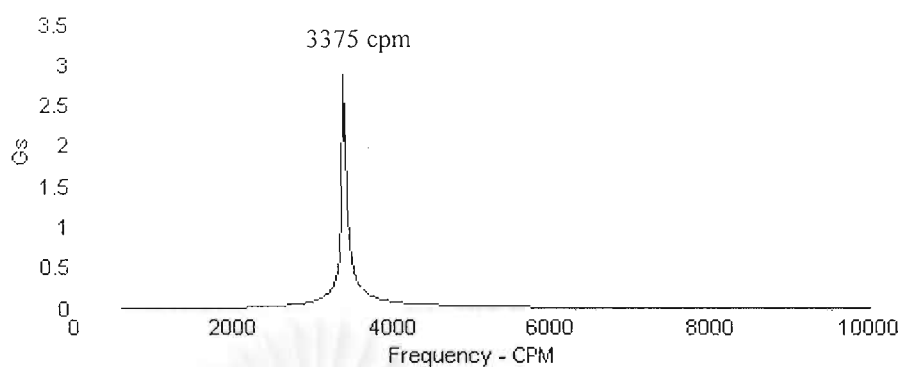
การทำ bump test เพลabanเครื่องกลึงแบบที่ 2



รูปที่ จ-4 ตำแหน่งการจับยึดเพลากการทำ bump test เพลabanเครื่องกลึงแบบที่ 2



CD12



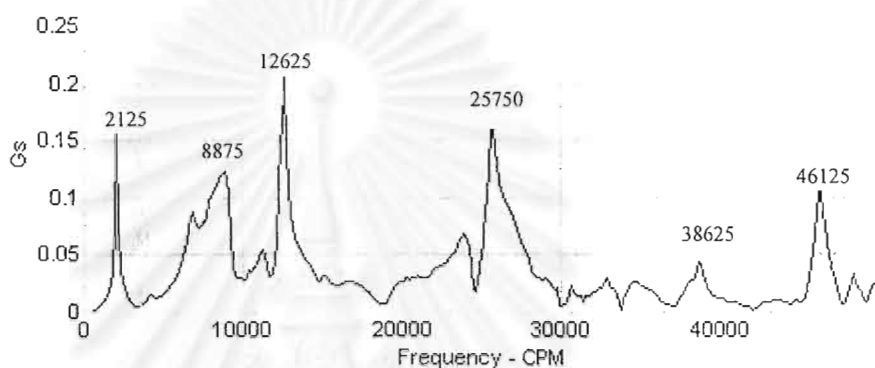
รูปที่ จ-5 สัญญาณการสั่นสะเทือนการทำ bump test เฟลาบนเครื่องกลึงแบบที่ 2

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

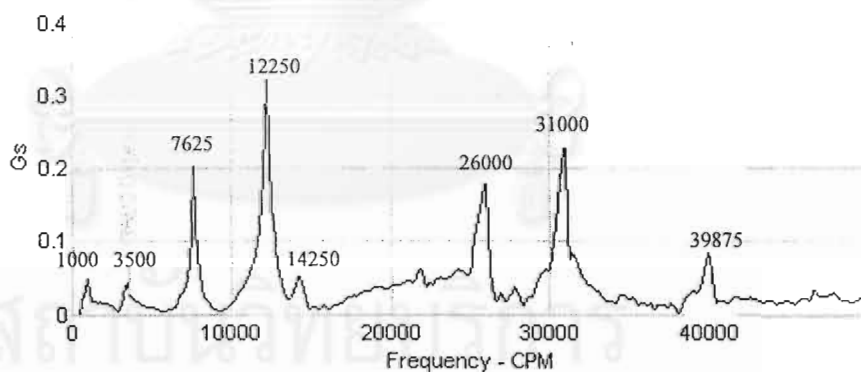
(2) การทำ bump test เพลานฐานชุดทดลอง

การทำ bump test เพลานฐานชุดทดลองแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ในส่วนแรกทำการ bump test ที่เพลลา ซึ่งจะจับหัววัดสัญญาณที่เพลลาและเคาะที่ตัวเพลลา ส่วนที่สองคือการ bump test ที่ฐานชุดทดลองที่ไม่ประกอบเพลลา ซึ่งจับหัววัดสัญญาณที่ตัวฐานและเคาะที่ตัวฐาน โดยจับยึดหัววัดในทิศทางเดียวกันกับทิศทางการเคาะ และทำการเคาะโดยใช้ค้อนยาง

การทำ bump test ที่เพลลา



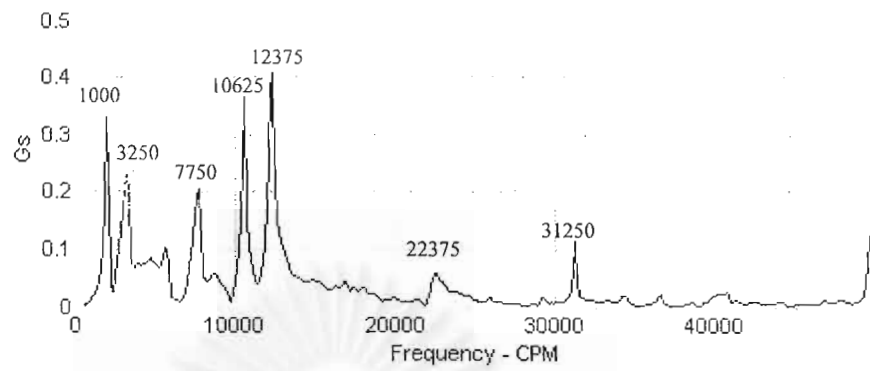
สัญญาณแนวตั้ง



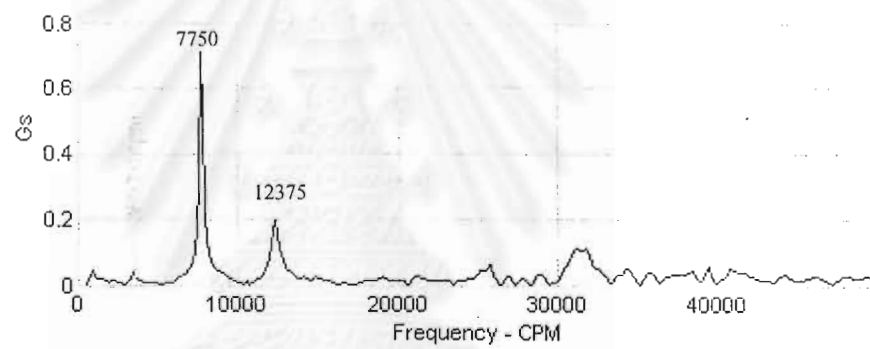
สัญญาณแนวระดับ

รูปที่ จ-6 สัญญาณการสั่นสะเทือนการทำ bump test ที่เพลานฐานชุดทดลอง

การทำ bump test ที่ฐานชุดทดลอง



สัญญาณแนวตั้ง



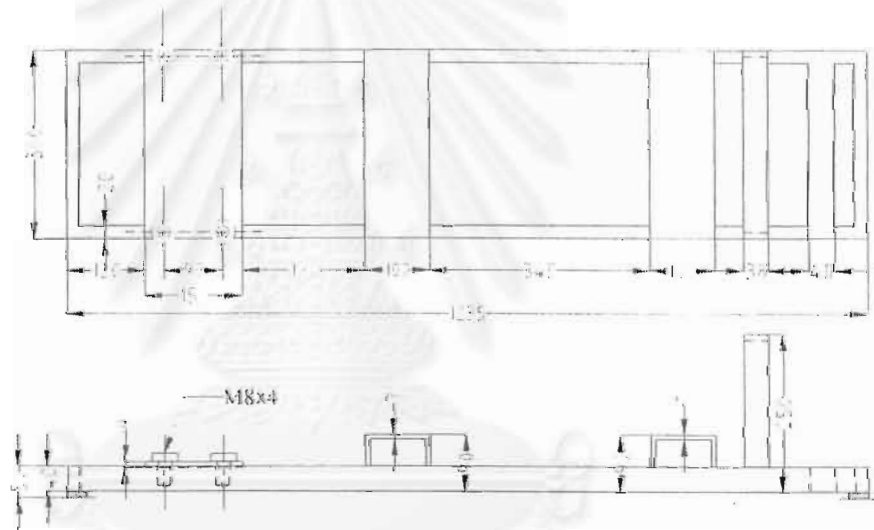
สัญญาณแนวระดับ

รูปที่ จ-7 สัญญาณการสั่นสะเทือนการทำ bump test ที่ฐานชุดทดลอง

## ภาคผนวก ฉ

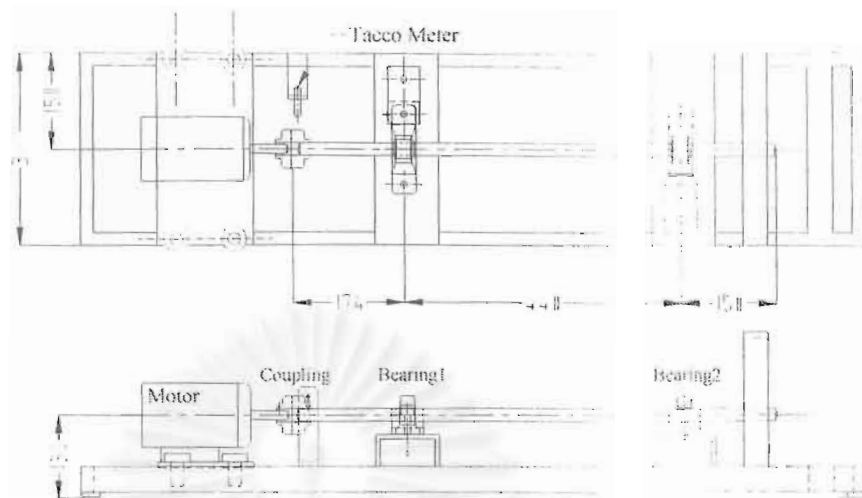
### ขนาดของชุดทดลอง

ชุดทดลองการสันเสทือนของเพลามีรอยแตกที่ใช้ในการทดลองบทที่ 4 วางอยู่บนฐานรองรับที่เป็นยาง 4 ข้างที่ปรับความสูงได้เล็กน้อย เพื่อให้ฐานชุดทดลองทั้ง 4 มุมสัมผัสพื้นตลอดเวลาทำการทดลอง แบบของชุดทดลองแสดงในรูปที่ ฉ-1 และรูปที่ ฉ-2 ในหน่วยมิลลิเมตร



รูปที่ ฉ-1 แบบของฐานชุดทดลอง

สถาบันนวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ฉ-2 แบบของฐานชุดทดลองเมื่อประกอบเฟลา

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ประวัติผู้วิจัย



นายรัชตพงษ์ บุญวัตรสกุล เกิดวันที่ 10 ตุลาคม พ.ศ. 2519 ที่เขตป้อมปราบ กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2539 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2540



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย