

บทที่ 4

การทดลองวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง

สัญญาณการสั่นสะเทือนที่จะนำไปวิเคราะห์สำหรับวิทยานิพนธ์นี้เก็บจากชุดทดลอง ณ ตำแหน่งเบริงของเฟืองขับ ซึ่งเป็นเฟืองที่ได้จำลองรอยแตกร้าวระดับต่าง ๆ ไว้ 4 ระดับ ชุดเฟืองที่ใช้ทดลองเป็นแบบเฟืองตรง ทำงานโดยไม่มีสารหล่อลื่นระหว่างฟันเฟือง การจำลองรอยแตกร้าวบนเฟืองขับของเครื่องได้อาศัยเครื่องทดสอบความล้า (Dynamic Servo Testing System) สร้างรอยแตกร้าวขึ้นที่บริเวณโคนฟัน จำนวน 1 ซี่ต่อเฟือง 1 ตัว เพื่อลดความซับซ้อนของสัญญาณที่ตรวจวัดจึงจำลองรอยแตกร้าวเพียง 1 ซี่เท่านั้น เมื่อได้ชุดเฟืองที่มีรอยแตกร้าวตามกำหนดแล้วจึงนำมาทดลองวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนโดยสภาวะการทดลองแปรตามระดับภาระและความเร็วรอบเฟืองขับ ในแต่ละสภาวะทำการเก็บสัญญาณด้วยวิธีการเก็บ 3 วิธีดังต่อไปนี้ การเฉลี่ยบนโดเมนความถี่ (Spectrum Averaging) กระบวนการขยายความละเอียดของโดเมนความถี่ (Zoom Processing) และการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ (Synchronous Time Averaging)

4 - 1 การจำลองรอยแตกร้าวบนฟันเฟือง

รอยแตกร้าวบนฟันเฟืองโดยส่วนใหญ่แล้วเป็นประเภทรอยแตกร้าวเนื่องมาจากความล้า (Fatigue Crack) เป็นผลมาจากความเค้นดัดที่เกิดขึ้นซ้ำ ๆ กัน (Repeated Bending Stress) มีขนาดมากกว่าค่าขีดจำกัดความทนทานของวัสดุที่ใช้ผลิตเฟืองตัวนั้น ซึ่งอาจเป็นเพราะเฟืองได้รับการออกแบบมาไม่เหมาะสมกับสภาวะการทำงาน การติดตั้งที่เอียงแนวแกน (Misalignment) การขับภาระที่มากเกินไป หรือเกิดข้อบกพร่องบนผิวฟันเฟืองที่ทำให้ความเค้นบริเวณนั้นสูงกว่าปกติ เช่น รอยบาก (Notch) รอยแตกร้าวจะเริ่มเกิดขึ้นบนหน้าฟันเฟืองด้านที่รับแรง โดยปกติแล้วจะปรากฏบริเวณฟิลเลต (Fillet) ตรงตำแหน่งขอบด้านข้าง หลังจากนั้นจึงขยายตัวลึกเข้าไปผ่านฐานของฟัน จนในที่สุดฟันชิ้นนั้นได้หักลง

จากการศึกษาผลงานการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนของรอยแตกร้าวบนฟันเฟือง โดยส่วนมากแล้ว ผู้ทำการวิจัยจะใช้ชุดทดสอบที่มีภาระจำนวนมาก จึงสามารถสร้างรอยแตกร้าวจริงขึ้นได้ หรือไม่ก็เป็นการวิเคราะห์สัญญาณที่เก็บมาจากชุดเฟือง

ที่มีปัญหาการแตกร้าวจากการใช้งานจริง แต่สำหรับการทดลองในวิทยานิพนธ์นี้ เพื่อให้เห็น การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณการสั่นสะเทือนเมื่อระดับความยาวรอยแตกร้าวมากขึ้น จึงได้สร้าง ให้ชุดเฟืองมีระดับความยาวรอยแตกร้าวต่าง ๆ กันก่อนการทดลอง เนื่องจากความจำกัดของ ชุดทดลองที่มีภาระน้อยและต้องการทดลองวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ระดับความยาวรอย แตกร้าวหนึ่ง ๆ ได้หลายครั้ง และสามารถนำกลับมาทดลองเก็บสัญญาณซ้ำใหม่ได้เมื่อเกิดข้อ สงสัยในผลที่ได้ รวมทั้งเพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลที่ได้จากการเก็บสัญญาณทั้ง 3 วิธี ซึ่ง คาดว่าการทดลองจะไม่มีผลทำให้ขนาดของรอยแตกร้าวเพิ่มขึ้น

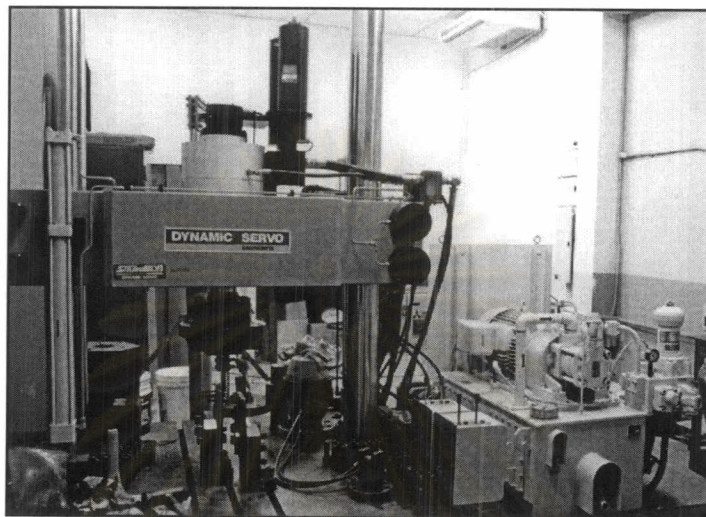
ชุดเฟืองที่เลือกใช้เป็นเฟืองตรงโมดูล 4 มม. มุมกด 20 องศา มีรายละเอียดดังตารางที่ 4-1 เหตุผลที่เลือกใช้โมดูล 4 มม. เพราะเป็นโมดูลที่อยู่ในกลุ่มตัวเลือกปฐมนิยม ฐานพื้นบริเวณฟิลเลต กว้างประมาณ 8.5 มม. ซึ่งถ้าใช้โมดูลเล็กกว่านี้ระดับความยาวรอยแตกร้าวจะแตกต่างกันน้อย เกินไปซึ่งยากต่อการสร้างให้แตกต่างกันและอาจจะไม่เห็นความแตกต่างของสัญญาณการสั่น สะเทือนระหว่างรอยแตกร้าวแต่ละระดับ ถ้าเลือกใช้โมดูลที่โตกว่านี้จะทำให้เฟืองมีขนาดใหญ่ โตเกินขนาดของฐานชุดทดลอง และขนาดของมอเตอร์ที่ใช้กับชุดทดลองนี้คือ 0.5 แรงม้า ขนาด ของฟันเฟืองที่ใหญ่โตเกินไปมากอาจจะทำให้ไม่สามารถเห็นผลของรอยแตกร้าวที่มีต่อสัญญาณ การสั่นสะเทือน

ตารางที่ 4-1 รายละเอียดของชุดเฟืองที่ใช้ในการทดลอง

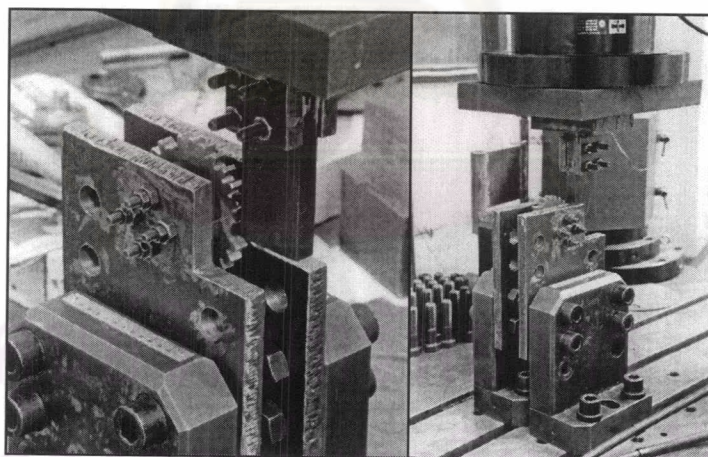
รายละเอียด	เฟืองขับ	เฟืองตาม
วัสดุที่ใช้ผลิต	ทองเหลือง	เหล็กกล้า
จำนวนฟัน	26 ซี่	37 ซี่
เส้นผ่านศูนย์กลางพิตช์	104 มม.	148 มม.
ความหนาของเฟือง	12 มม.	12 มม.

การเลือกจำนวนฟันให้เฟืองขับมี 26 ซี่ ส่วนเฟืองตามมี 37 ซี่ ซึ่งมีตัวประกอบร่วม (Common Factor) เท่ากับ 1 เพื่อที่ฟันทุก ๆ ซี่ของชุดเฟืองมีการสึกหรอเท่า ๆ กัน ฟันที่สร้าง รอยแตกร้าวของเฟืองขับจะต้องขบกับฟันของเฟืองตามทุกซี่ก่อนที่จะกลับมาขบกับฟันซี่เดิมอีก ครั้ง ซึ่งก็คือการหลีกเลี่ยงปัญหาของฮันติงทูธ (Hunting Tooth) เฟืองขับทำจากทองเหลืองเพื่อ ให้ง่ายต่อการจำลองรอยแตกร้าว ส่วนเฟืองตามทำจากเหล็กกล้า เนื่องจากถูกใช้งานตลอด การทดลองจึงต้องการให้เกิดการสึกหรอน้อยที่สุด

การทดลองนี้จำลองรอยแตกร้าวบนพื้นเฟืองด้วยเครื่องทดสอบความล้าดังแสดงในรูปที่ 4-1 ผลิตโดยบริษัท SAGINOMIYA ซึ่งออกแบบมาสำหรับทดสอบทางด้านกลศาสตร์การพังทลาย (Fracture Mechanics) เพื่อให้สามารถนำมาใช้กัดพื้นเฟืองให้แตกร้าวได้นั้นจำเป็นต้องมีการประยุกต์สร้างหัวกดและอุปกรณ์ยึดจับสำหรับเฟืองขึ้นมา ดังแสดงในรูปที่ 4-2



รูปที่ 4-1 เครื่องทดสอบความล้า



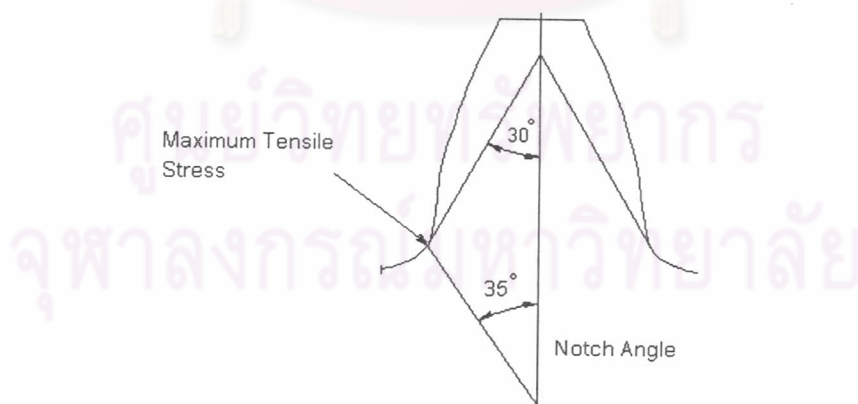
รูปที่ 4-2 หัวกดพื้นเฟืองและแท่นยึดจับเฟือง

หัวกดมีลักษณะคล้ายกับ Spur Rack¹ ที่มีโมดูล 4 มม.เช่นเดียวกับเฟือง ทำจากเหล็กกล้า เพื่อที่จะได้ส่งแรงในทิศทางใกล้เคียงกับทิศทางของแรงที่กระทำต่อพื้นเฟืองในขณะที่หมุนจริงเมื่อตำแหน่งวงกลมพิตซ์ของชุดเฟืองสัมพันธ์กัน การติดตั้งหัวกดเข้ากับเครื่องทดสอบ

¹ขนาดของหัวกดแสดงไว้ในภาคผนวก ข.

ความล้าจำเป็นต้องสร้างอุปกรณ์เสริมเพิ่มขึ้นมาดังแสดงในรูปที่ 4-2 การยึดจับเพ็องให้อยู่นิ่งทำโดยการเจาะรู 4 รู ทะลุผ่านบริเวณบ่าเพ็องเพื่อร้อยสลักเกลียว (Bolt) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มม. ชั้นยึดแผ่นประกบทั้ง 2 ข้างอัดเพ็องให้แน่น แผ่นประกบถูกติดตั้งอยู่บนแท่นซึ่งเป็นอุปกรณ์เสริมของเครื่องทดสอบความล้า อุปกรณ์ทุกชิ้นต้องติดตั้งอย่างแน่นหนาเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการหลุดหลวมขึ้นในระหว่างที่เครื่องทดสอบความล้ากำลังทำงาน การจัดวางตำแหน่งของตัวยึดจับเพ็องต้องพยายามให้อยู่ในตำแหน่งที่หัวกดจะกดลงบนพื้นที่ที่ต้องการในบริเวณพิทช์และหัวกดกับเพ็องต้องขนานกันเพื่อที่แรงกดจะได้กระจายสม่ำเสมอ พื้นที่นี้ถูกกำหนดให้อยู่ในแนวอนนโดยเจาะสำหรับร้อยสลักเกลียว หัวกดนี้ออกแบบให้มีพื้น 3 ซี่ เพื่อไว้สำหรับในกรณีพื้นที่ที่กดแล้วเกิดความเสียหายขึ้น ก็สามารถเปลี่ยนมาใช้ซี่ที่เหลืออยู่ทดแทนได้ แต่ก็ประสบกับปัญหาคือ เมื่อใช้พื้นที่ล่างกดแล้วปรากฏว่าในขณะที่เครื่องทดสอบความล้ากำลังทำงานมันจะกดพื้นที่ที่ต้องการสร้างรอยแตกกว้างให้โค้งลงเล็กน้อย พื้นของหัวกดที่กลางจึงมีโอกาสสัมผัสกับพื้นเพ็องซี่อื่น ซึ่งไม่ต้องการให้มีความบกร่องใด ๆ ปรากฏ เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหานี้จึงทำการตัดพื้นของหัวกดที่กลางออก

เพื่อที่จะให้รอยแตกกว้างเกิดขึ้นได้เร็วขึ้นและช่วยลดขนาดของแรงที่ใช้ในการสร้างรอยแตกกว้างเริ่มต้น (Pre-Crack) จึงสร้างรอยบากโดยใช้เลื่อยฉลุค่อย ๆ เลื่อยกินเนื้อทองเหลืองบริเวณฟิลเลตที่รัศมีวัดจากจุดศูนย์กลางเพ็องประมาณ 47.56 มม. ซึ่งเป็นตำแหน่งที่คาดว่าจะมีความเค้นดึงมากที่สุด ตำแหน่งดังกล่าวสามารถหาได้จากจุดสัมผัสระหว่างฟิลเลตกับเส้นที่ลากทำมุม 30 องศา กับแนวกึ่งกลางพื้น ดังแสดงในรูปที่ 4-3 [17]



รูปที่ 4-3 การหาตำแหน่งของความเค้นดึงมากที่สุดและมุมของรอยบาก (Notch angle)

ในทางปฏิบัติผู้วิจัยใช้เครื่องขยายโพรไฟล์ 20 เท่า ขยายขนาดของพื้นแล้ววัดความหนาของพื้นที่ระยะต่าง ๆ นับจากปลายพื้น เพื่อนำมาเขียนแบบลงในเครื่องคอมพิวเตอร์ แล้วจึงหา

ตำแหน่งที่เส้นลากทำมุม 30 องศากับแนวกึ่งกลางพื้นสัมผัสกับฟิลเลต จากนั้นสร้างรอยบากโดยลากเส้นจากแนวกึ่งกลางพื้นทำมุม 35 องศา มาตัดกับจุดที่มีความเค้นดึงมากที่สุดนี้ มุมนี้เรียกว่า มุมของรอยบาก (Notch Angle) ขนาดของมุมมุมนี้ได้จากการเฉลี่ยมุมที่ใช้ในการทดลองของ Lewicki และ Ballarini [18] โดยตั้งสมมติฐานว่าน่าจะเป็นมุมที่ตั้งฉากกับความเค้นดึงสูงสุด ณ ตำแหน่งที่สร้างรอยบากนี้ แต่ก็ไม่อาจยืนยันได้ว่าเป็นมุมนี้จริงหรือไม่ ผู้วิจัยคิดว่ามุมนี้ไม่น่าจะมีผลต่อทิศทางการเกิดรอยแตกร้าว ขนาดความลึกของรอยบากแสดงในตารางที่ 4-2 ในที่นี้กำหนดให้ด้านเดียวกับบ่าเพื่อใช้สัญลักษณ์ R กำกับ ส่วนด้านตรงกันข้ามใช้สัญลักษณ์ F กำกับ

ตารางที่ 4-2 ขนาดของรอยบากบริเวณโคนพื้นเพือง

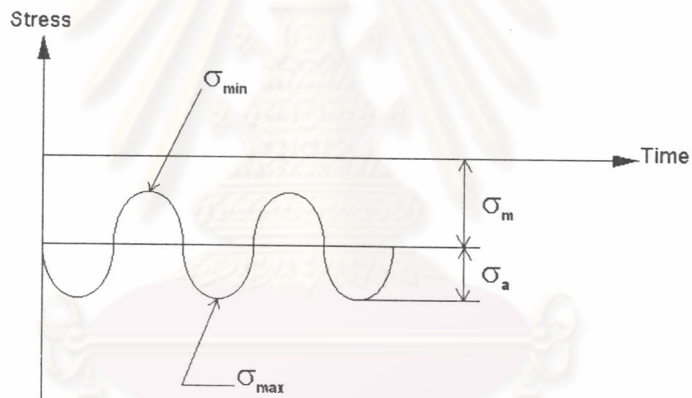
เพือง	ความยาวรอยแตกร้าว ที่ต้องการสร้าง	ความลึกรอยบาก ด้าน F	ความลึกรอยบาก ด้าน R
01-1	1.5 มม.	0.23 มม.	0.24 มม.
01-2	2.5 มม.	0.23 มม.	0.24 มม.
01-3	3.5 มม.	0.22 มม.	0.21 มม.
01-4	4.5 มม.	0.14 มม.	0.18 มม.

เหตุผลที่เลือกใช้วิธีการสร้างรอยบากด้วยเลื่อยฉลุแทนที่จะใช้วิธีการตัดด้วยลวด (Wire Cut) เพราะว่ารอยบากนี้เป็นเพียงการสร้างความบกพร่องนำเพื่อให้รอยแตกร้าวเริ่มต้นเกิดขึ้นที่บริเวณปลายรอยบาก ในการสร้างรอยบากจะเลื่อยโคนพื้นเข้าไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้นไม่น่ามีผลกระทบต่อทิศทางการขยายตัวของรอยแตกร้าว ถ้านำไปสร้างรอยบากด้วยวิธีการตัดด้วยลวดจะต้องประสบกับความยากลำบากในการตั้งตำแหน่งให้ลวดตัดเนื้อทองเหลืองในจุดที่ต้องการ ขนาดลวดเล็กสุดที่ทางร้านมีคือ 0.2 มม. ในขณะที่ความหนาของใบเลื่อยฉลุคือ 0.3 มม. และถ้าต้องการให้ลวดตัดเข้าไปเพียงครึ่งลวดเพื่อตัดปัญหาเรื่องมุมของรอยบากด้วยแล้วยังเป็นการยากต่อการตั้งเครื่อง

ในการฉลุทำรอยบาก ผู้วิจัยพยายามตั้งให้หน้าใบเลื่อยกินเนื้อทองเหลืองทั้ง 2 ด้านของเพืองเท่า ๆ กัน แล้วจึงส่งด้วยกล่องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100-400 เท่า เพื่อวัดขนาดความลึกของรอยบากทั้ง 2 ด้านของเพือง ในการฉลุต้องพยายามไม่ออกแรงดันใบเลื่อยมากเกินไป ซึ่งจะทำให้ใบเลื่อยกินเนื้อทองเหลืองบริเวณขอบด้านข้างมากกว่าตรงกลางพื้น เมื่อได้รอยบากตามขนาดที่ต้องการแล้วจึงทำการขัดผิวด้านข้างของพื้นบริเวณรอบ ๆ รอยบากที่คิดว่ารอยแตกร้าว

จะขยายตัวผ่านไปด้วยกระดาศทรายน้ำเบอร์ละเอียด (เบอร์ 600 ขึ้นไป) ชัดในทิศทางขวางแนว การขยายตัวของรอยแตกกว้างเพื่อที่ว่าเมื่อเวลาส่องกล้องจุลทรรศน์สังเกตดูการเปลี่ยนแปลงของ รอยแตกกว้างจะได้สามารถมองเห็นปลายของรอยแตกกว้างได้อย่างชัดเจน

แรงที่กระทำต่อพื้นเฟืองโดยเครื่องทดสอบความล้าจะเป็นแรงแบบแอมพลิจูดคงที่ (Constant Amplitude Loading) โดยที่แรงเปลี่ยนแปลงในลักษณะแบบคลื่นไซน์ ด้วยความถี่ 10 Hz รูปที่ 4-4 แสดงให้เห็นถึงความเค้นที่มีค่าเป็นลบ (ความเค้นกด) ตลอดเวลา การระบุ ลักษณะของแรงชนิดนี้ต้องใช้ตัวแปรหรือพารามิเตอร์ในการบ่งบอกลักษณะของแรง 2 ตัว เช่น ความเค้นสูงสุด (σ_{max}) และความเค้นต่ำสุด (σ_{min}) หรือความเค้นเฉลี่ย (σ_m) และความเค้นส่วน เปลี่ยน (σ_a) เป็นต้น ด้วยข้อจำกัดของเครื่องทดสอบความล้าจึงต้องตั้งค่าความเค้นให้เครื่องกด อยู่ตลอดเวลาจึงไม่สามารถตั้งให้ค่าความเค้นต่ำสุดมีค่าเท่ากับศูนย์ซึ่งเป็นรูปแบบของแรงที่ใกล้เคียงกับแรงที่กระทำต่อพื้นเฟืองในสภาวะการทำงานจริง

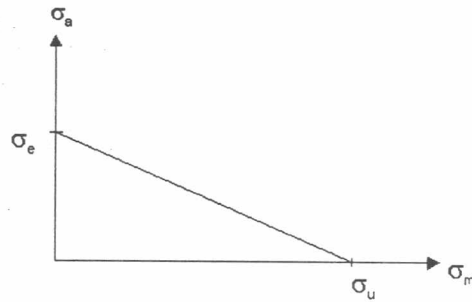


รูปที่ 4-4 ลักษณะความเค้นที่ใช้สำหรับกดพื้นเฟืองให้แตกกว้าง

การหาขนาดของแรงที่ใช้ในการสร้างรอยแตกกว้างเริ่มต้นอาศัยเกณฑ์ของ Goodman

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_e} + \frac{\sigma_m}{\sigma_u} = 1 \quad (4-1)$$

เมื่อนำสมการ 4-1 นี้มาแสดงลงในกราฟอายุความล้าคงที่ (Constant-life Diagram) หรือ เรียกว่า Haigh's Diagram จะได้เส้นอายุความล้าคงที่ที่อายุความล้าอนันต์ ดังรูปที่ 4-5



รูปที่ 4-5 กราฟอายุความล้าคงที่ หรือ Haigh's Diagram

ในกรณีเฟืองทองเหลืองไม่มีขีดจำกัดความทนทาน (Endurance Limit) หรือขีดจำกัดความล้า (Fatigue Limit) ซึ่งเขียนแทนด้วย σ'_e ดังนั้นจึงใช้การประมาณค่าขีดจำกัดความล้า (สำหรับการคงอยู่ 50%) ในกรณีการดัดดังนี้

$$\sigma'_e = 0.45\sigma_u \quad (4-2)$$

โดยที่ σ_u แทน ความต้านแรงดึงตรวจสอบ (Ultimate Strength)

เนื่องจากค่า σ'_e ใช้สำหรับชิ้นงานทดสอบเท่านั้น สำหรับค่าที่จะนำมาใช้งานจริงจำเป็นต้องมีค่าตัวประกอบมาคูณค่าขีดจำกัดความล้าจากชิ้นงานทดสอบดังนี้

$$\sigma_e = k_b k_c \sigma'_e \quad (4-3)$$

โดยที่ - ตัวประกอบของขนาด (Size Factor) : $k_b = 0.85$ สำหรับความยาวส่วนที่สั้นที่สุดของหน้าตัดอยู่ระหว่าง 8 และ 50 มม.

- ตัวประกอบของแรง (Load Factor) : $k_c = 1$ สำหรับการดัด

เนื่องจากไม่รู้ข้อมูลจำเพาะของทองเหลืองที่ใช้ทำเฟือง จึงสมมติความต้านทานแรงดึงตรวจสอบ (σ_u) มีค่าประมาณ 250 MPa จากสมการ 4-2 และ 4-3 จะได้ว่าขีดจำกัดความล้าสำหรับนำมาใช้งานจริง (σ_e) มีค่าประมาณ 95.63 MPa เมื่อนำค่าทั้งสองนี้แทนเข้าไปในสมการ 4-1 จะได้เส้นอายุความล้าอันันต์โดยประมาณ ใน Haigh's Diagram ถ้าจุดใดๆที่ได้จากการเลือกใช้ค่าความเค้นเฉลี่ยและความเค้นส่วนเปลี่ยนอยู่เหนือเส้นอายุความล้าอันันต์แสดงว่าที่สภาวะนี้จะทำให้มีอายุความล้าจำกัด (Finite Life) ถึงอย่างไรก็ตามก็ไม่อาจจะทำนายได้อย่างแน่นอนว่า ณ ค่าความเค้นเฉลี่ยและความเค้นส่วนต่างๆที่เลือกนี้จะทำให้เกิดรอยแตกร้าวเริ่มต้นได้

ในช่วงอายุความล้าที่ต้องการจึงต้องอาศัยการลองกดจริงแล้วนับอายุความล้าที่ใช้ไป ถ้าต้องใช้ อายุความล้ามากเกินไปเช่น เกินกว่า 10^6 รอบ ก็จำเป็นต้องเปลี่ยนสภาวะความเค้นที่เลือกใช้ใหม่ ซึ่งผู้วิจัยต้องการใช้อายุความล้าไม่เกิน 5×10^5 รอบเพื่อประหยัดเวลาที่ใช้ในการสร้างรอยแตกร้าว เริ่มต้น ถ้าอายุความล้ามีค่าน้อยเกินไปจะทำให้ยากแก่การควบคุมรอยแตกร้าวและแรงที่ใช้อาจ จะทำให้พื้นเพียงเกิดการสึกหรอบริเวณพิชต์มากเกินไป

การหาขนาดของแรงที่ใช้กดพื้นเพียงเริ่มจากสมมติค่าแรงเฉลี่ย (F_m) และ แรงส่วนเปลี่ยน (F_a) จากนั้นคำนวณหาค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในพื้นเพียงโดยอาศัยสมการของลูอิส (Luwis)

$$F = \sigma b Y m \quad (4-4)$$

โดยที่ F คือ แรงที่กระทำตั้งฉากกับพื้นเพียง ในที่นี้สมมติให้แรงที่หักดกระทำกับพื้นเพียง กระทำในทิศทางตั้งฉากกับพื้นเพียง

σ คือ ความเค้นในพื้นเพียง

b คือ ความหนาของพื้น

Y คือ ตัวประกอบรูปแบบของลูอิส

m คือ โมดูลที่เลือกใช้

ดังนั้นจึงสามารถคำนวณหาค่าความเค้นเฉลี่ย และความเค้นส่วนเปลี่ยนได้จากการแทนค่าแรงเฉลี่ยและแรงส่วนเปลี่ยน ลงในสมการ 4.4 ซึ่งจะได้ว่า

$$\sigma_m = \frac{F_m}{b Y m} \quad (4-5)$$

$$\sigma_a = \frac{F_a}{b Y m} \quad (4-6)$$

นำค่าความเค้นทั้งสองมากำหนดจุดลงใน Haigh's Diagram ถ้าจุดที่ได้ยังอยู่ใต้เส้นอายุความล้า อนันต์ก็ลองสมมติค่าแรงที่ใช้ใหม่อีกครั้ง

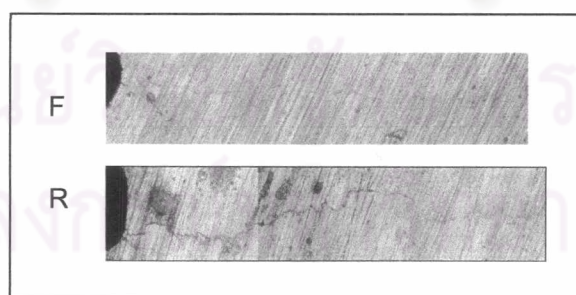
ผู้วิจัยได้ลองนำค่าแรงที่คำนวณได้สำหรับการสร้างรอยแตกร้าวเริ่มต้นมาใช้กับพื้นตัว ทดสอบก่อนเพื่อหาค่าแรงที่สามารถทำให้เกิดรอยแตกร้าวได้จริงในช่วงอายุความล้าที่ต้องการ โดยกำหนดว่าถ้าอายุความล้า 10^6 แล้วยังไม่เริ่มแตกร้าว จะทำการเพิ่มค่าของแรงเฉลี่ยก่อนโดย

พยายามที่จะคงค่าของแรงส่วนต่าง เนื่องจากการเพิ่มแรงส่วนต่างมีผลต่อการเกิดรอยแตกกว้างมากกว่า อาจจะทำให้เกิดรอยแตกกว้างเร็วเกินไปยากแก่การควบคุมการขยายตัว และรอยแตกกว้างอาจจะอ้าออกมากเกินไปซึ่งจะมีผลให้พื้นเฟืองโย้จากตำแหน่งเดิม เมื่อนำเฟืองไปหมุนแล้วอาจเกิดการติดขัดขึ้น แต่อย่างไรก็ตามแรงที่ใช้สำหรับเฟืองตัวหนึ่งมักจะให้ผลที่ต่างออกไปเมื่อนำไปใช้กับเฟืองตัวอื่น นั่นคือมีอายุความล้าที่ต่างกัน หรืออาจจะไม่เกิดรอยแตกกว้างเริ่มต้นขึ้นเลยซึ่งก็ต้องเพิ่มขนาดของแรงเฉื่อยขึ้นไปอีก ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากขนาดของรอยบากบริเวณโคนฟันต่างกัน หรือตำแหน่งที่หวักดสัมผัสฟันเฟืองจะต่างกันเล็กน้อยอันเป็นผลมาจากการติดตั้งแทนยึดเฟือง

เมื่อเกิดรอยแตกกว้างขึ้นแล้วจะต้องลดค่าของแรงมากที่สุดลงประมาณ 10% เพื่อชะลออัตราการขยายตัวของรอยแตกกว้าง และป้องกันการเกิดบริเวณเสียหายแบบพลาสติกที่ปลายรอยแตกกว้าง โดยที่พยายามให้ค่า R คงที่ ถ้ากำหนดให้ R แทนอัตราส่วนความเค้น (Stress Ratio) ดังนี้

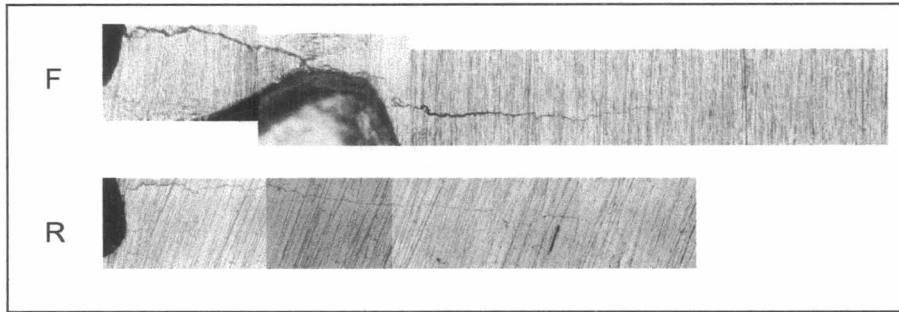
$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = \frac{F_{\min}}{F_{\max}} = \frac{F_m - F_a}{F_m + F_a} \quad (4-7)$$

เมื่อความยาวรอยแตกกว้างเพิ่มมากขึ้นประมาณ 0.20 – 0.30 มม. ให้ทำการลดแรงลงอีกครั้งหนึ่ง ทำเช่นนี้จนกระทั่งได้ความยาวเฉลี่ยที่ได้จากการวัดทั้งสองด้านของเฟืองใกล้เคียงกับความยาวที่กำหนดไว้คือ 1.5, 2.5, 3.5, และ 4.5 มม. ในการวัดความยาวจะวัดรวมความลึกของรอยบากด้วย รูปที่ 4-6 ถึง 4-9 คือภาพรอยแตกกว้างของเฟืองแต่ละตัว²

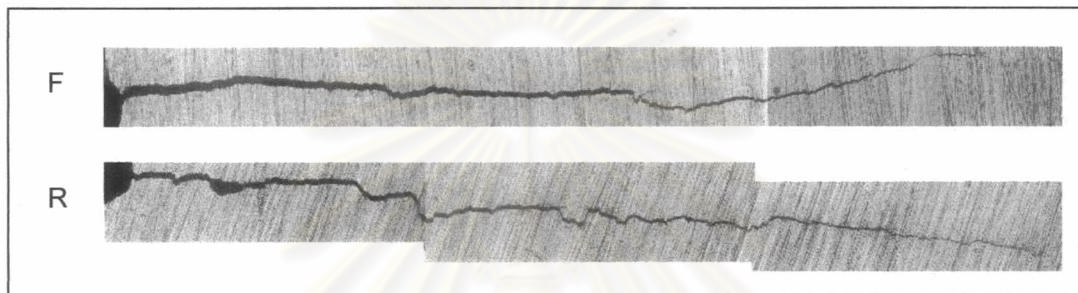


รูปที่ 4-6 รอยแตกกว้างของเฟือง 01-1 ยาวประมาณ 1.5 มม.

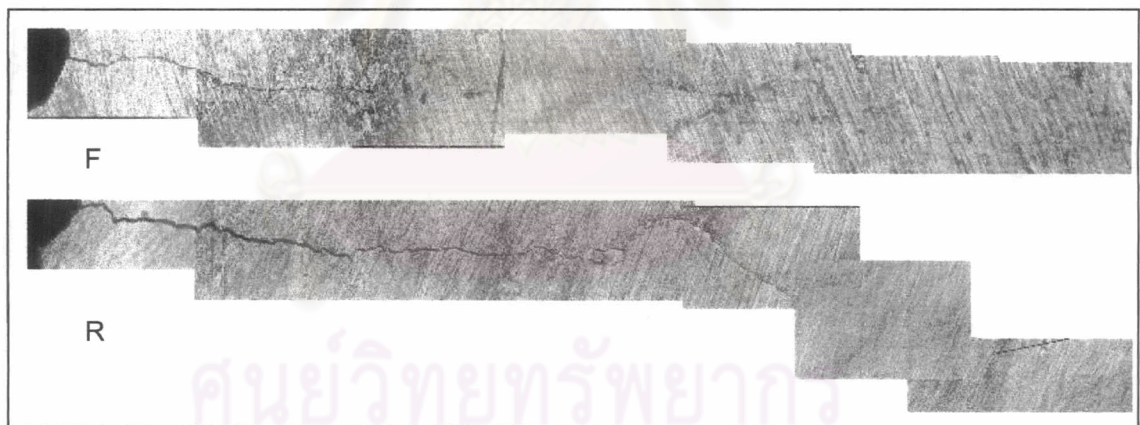
² ข้อมูลการสร้งรอยแตกกว้างแสดงในภาคผนวก จ.



รูปที่ 4-7 รอยแตกร้าวของเฟือง 01-2 ยาวประมาณ 2.5 มม.



รูปที่ 4-8 รอยแตกร้าวของเฟือง 01-3 ยาวประมาณ 3.5 มม.



รูปที่ 4-9 รอยแตกร้าวของเฟือง 01-4 ยาวประมาณ 4.5 มม.

หลังจากสร้างรอยแตกร้าวเสร็จแล้วจะปรากฏการสึกหรอขึ้นบริเวณพิตช์เล็กน้อย โดยถือว่าฟันเฟืองยังคงเป็นโค้งอินโวลูทอยู่ เฟือง 01-3 รอยแตกร้าว้าออกมากกว่าเฟืองตัวอื่นและปรากฏบริเวณเสียรูปแบบพลาสติกที่ปลายรอยแตกร้าว คาดว่าเกิดขึ้นเนื่องจากการทำงานของเครื่องทดสอบความล้าไม่ปกติในช่วงที่กำลังจะเริ่มกดฟันเฟืองครั้งสุดท้ายหลังจากที่ถอดออกมาส่องดูความยาวของรอยแตกร้าว จึงต้องหยุดการทำงานของเครื่องทดสอบความล้าโดยที่ไม่ได้ถอดเฟืองออกก่อน เมื่อเริ่มเดินเครื่องใหม่หวัคเคลื่อนที่ขึ้นลงเล็กน้อย เฟือง 01-3 และ 01-4

พื้นเฟืองจะโย้ไปจากตำแหน่งปกติประมาณ 0.1 มม. เมื่อทำการวัดบริเวณปลายฟัน ดังแสดงในรูปที่ 4-10 คงเนื่องมาจากรอยแตกร้าวที่ยาวลึกเข้าไปประมาณครึ่งความกว้างของฐานฟัน



รูปที่ 4-10 ภาพร่างแสดงฟันของเฟือง 01-3 และ 01-4 ภายหลังสร้างรอยแตกร้าว (เส้นสีแดง) เปรียบเทียบกับก่อนสร้างรอยแตกร้าว (เส้นสีดำ)

4 - 2 รูปแบบการทดลอง

ในการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง สัญญาณที่ได้มักรวมข้อบกพร่องหลาย ๆ ชนิด จากทุก ๆ ส่วนมามอดูเลตกัน ดังนั้นเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณการสั่นสะเทือนที่มีต่อรอยแตกร้าวของฟันเฟืองจึงต้องควบคุมให้ชุดทดลองมีความผิดพลาดน้อยที่สุด โดยตั้งศูนย์เพลลาให้ได้แนวแกนและเพลลาทั้งสองเส้นต้องขนานกัน ปรับระยะห่างระหว่างเพลลาให้ได้ระยะตรงตามผลรวมของรัศมีพิตช์เฟืองขับและเฟืองตาม ตรวจสอบจุดเชื่อมต่อกับทุกจุดในชุดทดลองไม่ให้เกิดความหลุดหลวมทุกครั้งก่อนการทดลอง ในส่วนของเฟืองให้มีความบกพร่องแบบเดียวคือรอยแตกร้าวบริเวณโคนฟัน โดยสร้างให้เกิดรอยแตกร้าวหลายระดับตั้งแต่ไม่มีรอยแตกร้าวจนกระทั่งรอยแตกร้าวมีความยาว 4.5 มม. และเพื่อลดความซับซ้อนของสัญญาณที่ใช้ตรวจวัดจึงให้เกิดรอยแตกร้าวขึ้นบนเฟืองเพียงตัวเดียวคือ เฟืองขับ และมีฟันที่แตกร้าวเพียงซี่เดียว

สภาวะการทดลอง

- ภาระ (Load) : 150 และ 300 วัตต์ ปรับภาระโดยการเปลี่ยนความต่างศักย์ที่จ่ายให้ขดลวดสนามของเครื่องปั่นไฟรถยนต์ (Alternator)
- ความเร็วรอบเฟืองขับ : 500 และ 800 รอบต่อนาที
- ระดับการเกิดรอยแตกร้าว : 5 ระดับ คือ 0 , 1.5 , 2.5 , 3.5 , และ 4.5 มม.
- เฟืองขับ : ทำจากทองเหลือง ϕ พิตช์ 104 มม. โมดูล 4 มม.

เฟืองตาม : ทำจากเหล็ก ϕ พิตซ์ 148 มม. โมดูล 4 มม.
 สาระหล่อลิ้น : ไม่ใช่

จากสภาวะการทดลองจึงมีทั้งหมด 4 ชุดการทดลองดังนี้

1. ภาระ 150 วัตต์ ความเร็ว 500 รอบต่อนาที
2. ภาระ 150 วัตต์ ความเร็ว 800 รอบต่อนาที
3. ภาระ 300 วัตต์ ความเร็ว 500 รอบต่อนาที
4. ภาระ 300 วัตต์ ความเร็ว 800 รอบต่อนาที

โดยที่ในแต่ละสภาวะทำการเก็บสัญญาณด้วยวิธีการเก็บ 3 วิธี คือ

1. การเฉลี่ยบนโดเมนความถี่ (Spectrum Averaging)
2. กระบวนการขยายความละเอียดของสเปกตรัม (Zoom Processing)
3. การเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ (Synchronous Time Averaging)

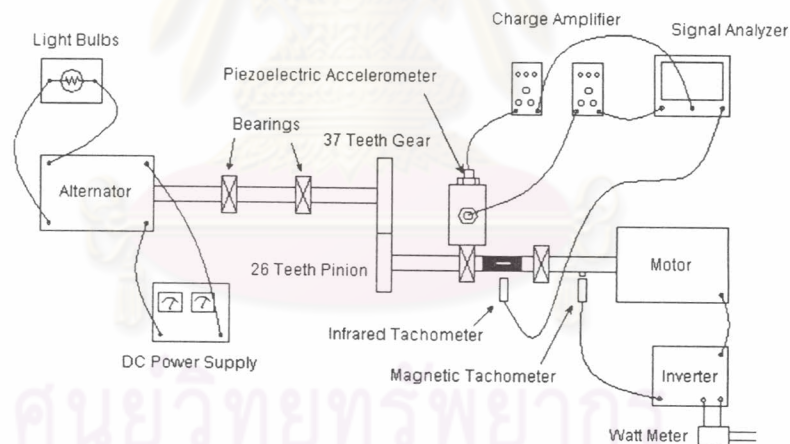
โดยแต่ละชุดการทดลองทำการวัดสัญญาณที่ตำแหน่งแบริงเฟืองขับในแนวรัศมี (Radial Axis) สองทิศทางคือ แนวตั้ง (Vertical Axis) และแนวนอน (Horizontal Axis) วัดสัญญาณตั้งแต่เฟืองตัวที่ไม่มีรอยแตกร้าว จนถึงเฟืองที่มีรอยแตกร้าวมากที่สุดคือ 4.5 มม.

อุปกรณ์การทดลอง

1. ชุดเฟืองที่มีฟันเป็นโค้งอินโวลูท
2. ชุดเฟืองที่ได้สร้างให้เกิดรอยแตกร้าวของฟันที่ระดับต่าง ๆ
3. ชุดทดลองการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง (Diagnostic Test Bed)
 - 3.1 มอเตอร์ 3 เฟส ขนาด 0.5 แรงม้า
 - 3.2 อินเวอร์เตอร์สำหรับแปลงเป็นกระแสไฟฟ้า 3 เฟส
 - 3.3 แทกโคมิเตอร์แบบแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic Tachometer) สำหรับวัดความเร็วรอบ
 - 3.3 เพลลา ϕ 20 มม.
 - 3.3 บอลล์แบริง และเฮาส์ซิง 4 ชุด
 - 3.4 แท่นชุดทดลอง
 - 3.5 ชุดล้อยายพานและสายพาน
 - 3.6 เครื่องปั่นไฟรถยนต์ขนาด 12 โวลต์ จ่ายกระแสสูงสุด 30 แอมแปร์
 - 3.7 แผงหลอดไฟ สำหรับเป็นภาระทางไฟฟ้า

- 3.8 เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power Supply)
- 3.9 พัดลม สำหรับช่วยระบายความร้อนของมอเตอร์
4. ตัวตรวจรู้ชนิดวัดความเร่งแบบพิโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Accelerometer)
5. เครื่องขยายประจุ (Charge Amplifier)
6. เครื่องวิเคราะห์สัญญาณ (Signal Analyzer)
7. แทกโคมิเตอร์แบบอินฟราเรด (Infrared Tachometer)
8. วัตต์มิเตอร์ (Watt Meter)
9. เครื่องขยายโพรไฟล์

รูปที่ 4-11 แสดงลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ³ ชุดอุปกรณ์วิเคราะห์สัญญาณทั้งหมดเป็นของบริษัท Brüel & Kjaer ประกอบด้วยเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ รุ่น 2035 เครื่องขยายประจุ รุ่น 2635 และตัวตรวจรู้ชนิดวัดสัญญาณความเร่ง รุ่น 4371 และ รุ่น 4444 ส่วนแทกโคมิเตอร์แบบอินฟราเรดเป็นชุดวงจรสำเร็จรูปที่ประยุกต์ติดตั้งเพิ่มเข้ามาเพื่อสร้างสัญญาณทริกเกอร์สำหรับการเก็บสัญญาณด้วยวิธีการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ



รูปที่ 4-11 ชุดอุปกรณ์ทดลองการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง

4 - 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. สอบเทียบ (Calibrating) เครื่องวิเคราะห์สัญญาณ
2. ใส่ชุดเฟืองทดสอบเข้ากับเพลลาขับ

³ ภาพถ่ายชุดอุปกรณ์ทดลองการสั่นสะเทือนแสดงในภาคผนวก ก.

3. ตรวจสอบความแน่นของจุดเชื่อมต่อต่าง ๆ
4. เริ่มเดินเครื่อง
5. ปรับความเร็วรอบโดยการปรับอินเวอร์เตอร์และความต่างศักย์ที่จ่ายให้กับขดลวดสนามในเครื่องปั่นไฟรถยนต์
6. เริ่มเก็บข้อมูลจริงเมื่อความเร็วและภาระที่วัดได้เริ่มคงที่ โดยเก็บสัญญาณ 5 ครั้งในแต่ละวิธีการเก็บสัญญาณของแต่ละสภาวะการทดลอง

4 – 4 การวิเคราะห์สัญญาณ

4 – 4 – 1 การเก็บสัญญาณด้วยวิธีการเปลี่ยนบนโดเมนความถี่

ตารางที่ 4-3 รายละเอียดของสัญญาณชนิดต่าง ๆ ที่เก็บด้วยวิธีการเปลี่ยนบนโดเมนความถี่ สำหรับความเร็ว 500 รอบต่อนาที

ชนิดของสัญญาณที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ	พิสัยของโดเมน	ความละเอียด (Resolution)	จำนวนจุดข้อมูล (Data Points)
สัญญาณบนโดเมนเวลา	1sec	488 μ sec	2048 points
สเปกตรัม (Spectrum)	800 Hz	1 Hz	800 lines
เซปส์ตรัม (Cepstrum)	500 msec	488 μ sec	1024 points

ตารางที่ 4-4 รายละเอียดของสัญญาณชนิดต่าง ๆ ที่เก็บด้วยวิธีการเปลี่ยนบนโดเมนความถี่ สำหรับความเร็ว 800 รอบต่อนาที

ชนิดของสัญญาณที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ	พิสัยของโดเมน	ความละเอียด (Resolution)	จำนวนจุดข้อมูล (Data Points)
สัญญาณบนโดเมนเวลา	500 msec	244 μ sec	2048 points
สเปกตรัม (Spectrum)	1.6 kHz	2 Hz	800 lines
เซปส์ตรัม (Cepstrum)	250 msec	244 μ sec	1024 points

การเก็บสัญญาณแต่ละครั้งใช้สัญญาณเฉลี่ย 20 ชุดสัญญาณ การเฉลี่ยเป็นแบบเหลื่อมกัน 75 % ใช้ฟังก์ชันแฮนนิ่ง (Hanning) เป็นฟังก์ชันถ่วงน้ำหนัก ใช้ตัวกรองความถี่ต่ำที่ 0.7 Hz

ส่วนตัวกรองความถี่สูงใช้ตามพิสัยของโดเมนความถี่คือ 800 Hz สำหรับความเร็ว 500 รอบต่อนาที และ 1.6 kHz สำหรับความเร็ว 800 รอบต่อนาที รายละเอียดของโดเมนต่าง ๆ แสดงไว้ในตารางที่ 4-3 และ 4-4 สัญญาณบนโดเมนเวลาแสดงผลเฉพาะชุดสัญญาณสุดท้ายเท่านั้น

4-4-2 กระบวนการขยายความละเอียดของโดเมนความถี่

กระบวนการขยายความละเอียดของโดเมนความถี่ คือการเก็บสัญญาณด้วยวิธีการเฉลี่ยบนโดเมนความถี่แต่สามารถกำหนดให้เก็บสัญญาณเฉพาะช่วงความถี่ที่สนใจโดยไม่ต้องเริ่มตั้งแต่ 0 Hz ทำให้ความละเอียดของสัญญาณสเปกตรัมมีมากขึ้น แต่เนื่องจากข้อมูลสัญญาณบนโดเมนเวลาที่เก็บไว้ในหน่วยความจำคือข้อมูลที่สุ่มตัวอย่างจากทุก ๆ N ข้อมูลของข้อมูลดิบ เมื่อ N คือจำนวนเท่าที่ต้องการเพิ่มความละเอียด ทำให้สัญญาณบนโดเมนเวลาไม่ใช่สัญญาณการสังเคราะห์จริงของชุดเฟือง ดังนั้นจึงไม่นำมาวิเคราะห์ การเก็บสัญญาณแต่ละครั้งใช้สัญญาณเฉลี่ย 10 ชุดสัญญาณ เหตุผลที่เลือกใช้จำนวนชุดสัญญาณน้อยกว่าวิธีการเฉลี่ยบนโดเมนความถี่ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของความเร็วรอบมีผลต่อคุณภาพสัญญาณ และเวลาที่ใช้ในการเก็บสัญญาณแต่ละชุดนานขึ้น การเฉลี่ยเป็นแบบเหลื่อมกัน 75 % ใช้ฟังก์ชันแฮนนิ่ง (Hanning) เป็นฟังก์ชันถ่วงน้ำหนัก ใช้ตัวกรองความถี่ต่ำและตัวกรองความถี่สูงขึ้นอยู่กับช่วงความถี่ที่เลือกใช้ โดยที่กรณีความเร็ว 500 รอบต่อนาที เลือกใช้ความถี่กึ่งกลางที่ 200 Hz ช่วงพิสัยของโดเมนความถี่ 200 Hz ส่วนกรณีความเร็ว 800 รอบต่อนาที เลือกใช้ความถี่กึ่งกลางที่ 320 Hz ช่วงพิสัยของโดเมนความถี่ 400 Hz เหตุที่เลือกให้ความถี่กึ่งกลางไม่ตรงกับความถี่ GMF เพื่อหลีกเลี่ยงความผิดพลาดทางแอมพลิจูดของยอดสเปกตรัมที่ความถี่ GMF รายละเอียดของโดเมนต่าง ๆ แสดงไว้ในตารางที่ 4-5 และ 4-6

ตารางที่ 4-5 รายละเอียดของสัญญาณชนิดต่าง ๆ ที่เก็บด้วยกระบวนการขยายความละเอียดของโดเมนความถี่ สำหรับความเร็ว 500 รอบต่อนาที

ชนิดของสัญญาณที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ	พิสัยของโดเมน	ความละเอียด (Resolution)	จำนวนจุดข้อมูล (Data Points)
สเปกตรัม (Spectrum)	200 Hz	0.25 Hz	800 lines
เซปส์ตรัม (Cepstrum)	2 sec	1.95 msec	1024 points

ตารางที่ 4-6 รายละเอียดของสัญญาณชนิดต่าง ๆ ที่เก็บด้วยกระบวนการขยายความละเอียดของโดเมนความถี่
สำหรับความเร็ว 800 รอบต่อนาที

ชนิดของสัญญาณที่ได้จาก เครื่องวิเคราะห์สัญญาณ	พิสัยของโดเมน	ความละเอียด (Resolution)	จำนวนจุดข้อมูล (Data Points)
สเปกตรัม (Spectrum)	400 Hz	0.50 Hz	800 lines
เซปส์ตรัม (Cepstrum)	1 sec	977 μ sec	1024 points

4-4-3 การเก็บสัญญาณด้วยวิธีการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ

การเก็บสัญญาณแต่ละครั้งใช้สัญญาณเฉลี่ย 100 ชุดสัญญาณ โดยที่ใช้สัญญาณ
ทริกเกอร์ซึ่งรับมาจากแทกโคมิเตอร์แบบอินฟราเรดผ่านทางช่อง External Trigger Input ของ
เครื่องวิเคราะห์สัญญาณ สั่งให้เครื่องเริ่มเก็บสัญญาณแต่ละชุดสัญญาณ ใช้ตัวกรองความถี่ต่ำ
และตัวกรองความถี่สูงเช่นเดียวกับการเก็บสัญญาณด้วยวิธีการเฉลี่ยบนโดเมนความถี่ การเก็บ
สัญญาณด้วยวิธีนี้ไม่ต้องใช้ฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักเนื่องจากการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะมี
ลักษณะความเป็นตัวกรองความถี่เหมือนกับการกรองแบบหวี (Comb Filtering) รายละเอียด
ของโดเมนต่าง ๆ แสดงไว้ในตารางที่ 4-7 และ 4-8

ตารางที่ 4-7 รายละเอียดของสัญญาณชนิดต่าง ๆ ที่เก็บด้วยวิธีการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ
สำหรับความเร็ว 500 รอบต่อนาที

ชนิดของสัญญาณที่ได้จาก เครื่องวิเคราะห์สัญญาณ	พิสัยของโดเมน	ความละเอียด (Resolution)	จำนวนจุดข้อมูล (Data Points)
สัญญาณบนโดเมนเวลา	1sec	488 μ sec	2048 points
สเปกตรัม (Spectrum)	800 Hz	1 Hz	800 lines
เซปส์ตรัม (Cepstrum)	1 sec	488 μ sec	2048 points

ตารางที่ 4-8 รายละเอียดของสัญญาณชนิดต่าง ๆ ที่เก็บด้วยวิธีการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ
สำหรับความเร็ว 800 รอบต่อนาที

ชนิดของสัญญาณที่ได้จาก เครื่องวิเคราะห์สัญญาณ	พิสัยของโดเมน	ความละเอียด (Resolution)	จำนวนจุดข้อมูล (Data Points)
สัญญาณบนโดเมนเวลา	500 msec	244 μ sec	2048 points
สเปกตรัม (Spectrum)	1.6 kHz	2 Hz	800 lines
เซปส์ตรัม (Cepstrum)	500 msec	244 μ sec	2048 points

พารามิเตอร์ต่างๆของสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ใช้วิเคราะห์มีดังนี้

1) สัญญาณบนโดเมนเวลา

RMS คือ ค่าแอมพลิจูดอาร์เอ็มเอส

Peak คือ แอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณในช่วงระยะเวลาที่เก็บสัญญาณ

Crest Factor คือ อัตราส่วนระหว่างค่า Peak ต่อค่า RMS

Kurtosis คือ ค่าทางสถิติโมเมนต์อันดับที่ 4 สำหรับวัดขนาดการแผ่กว้างของการกระจายตัวของแอมพลิจูดการสั่นสะเทือน

2) สัญญาณสเปกตรัม

□ แอมพลิจูดของ 1xGMF 2xGMF และ 3xGMF คือ แอมพลิจูดของยอดสัญญาณสเปกตรัมที่ความถี่การขบกันของชุดเฟือง ฮาร์มอนิกที่ 2 และ 3 ของความถี่การขบกันของชุดเฟืองตามลำดับ

□ แอมพลิจูดของ 1 SBP 2 SBP และ 3 SBP คือ แอมพลิจูดของยอดสัญญาณสเปกตรัมที่เป็นชุดแถบความถี่ข้างรอบ ๆ 1xGMF โดยห่างจาก 1xGMF ออกไปทั้ง 2 ด้านเท่ากับ ความถี่ของเฟืองขับ ฮาร์มอนิกที่ 2 และ 3 ตามลำดับ ซึ่งคำนวณได้ในลักษณะเดียวกัน

□ แอมพลิจูดของ 1 SBW 2 SBW และ 3 SBW คือ แอมพลิจูดของยอดสัญญาณสเปกตรัมที่เป็นชุดแถบความถี่ข้างรอบ ๆ 1xGMF โดยห่างจาก 1xGMF ออกไปทั้ง 2 ด้านเท่ากับ ความถี่ของเฟืองตาม ฮาร์มอนิกที่ 2 และ 3 ตามลำดับ ซึ่งคำนวณได้ในลักษณะเดียวกัน

3) สัญญาณเซปส์ตัม

- แกมมนิจูดของ 1/P 2/P และ 3/P คือ ค่าแกมมนิจูดของยอดสัญญาณเซปส์ตัมที่ควิเฟรนซีเท่ากับ 1/(ความถี่เฟืองขับ) รัสมอนิกที่ 2 และ 3 ตามลำดับ
- แกมมนิจูดของ 1/W คือ ค่าแกมมนิจูดของยอดสัญญาณเซปส์ตัมที่ควิเฟรนซีเท่ากับ 1/(ความถี่เฟืองตาม)

ข้อมูลความถี่ต่างๆรวมทั้งควิเฟรนซีที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์สัญญาณแสดงไว้ในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4-9 ความถี่และควิเฟรนซีที่ใช้วิเคราะห์สัญญาณ

Speed (rpm)	Frequency (Hz)					Quefrequency (ms)			
	Pinion	Wheel	1xGMF	2xGMF	3xGMF	1/P	2/P	3/P	1/W
500	8.33	5.86	216.67	433.33	650	120	240	360	170.77
800	13.33	9.37	346.67	693.33	1040	75	150	225	106.73

4 - 5 สัญญาณการสันสะเทือนจากการทดลอง

เลือกแสดงผลของสัญญาณการสันสะเทือนเฉพาะภาวะ 300 วัตต์ ซึ่งเห็นการเปลี่ยนแปลงได้ชัดเจนกว่าที่ภาวะ 150 วัตต์ โดยแสดงผลสัญญาณเรียงลำดับตั้งแต่ที่ยังไม่มีรอยแตกร้าวจนถึงความยาวรอยแตกร้าวมากที่สุด สำหรับที่ระดับไม่มีรอยแตกร้าวทำการเก็บสัญญาณจากเฟือง 2 ตัวคือ เฟือง 01-0 และ 02-0 ตามลำดับ

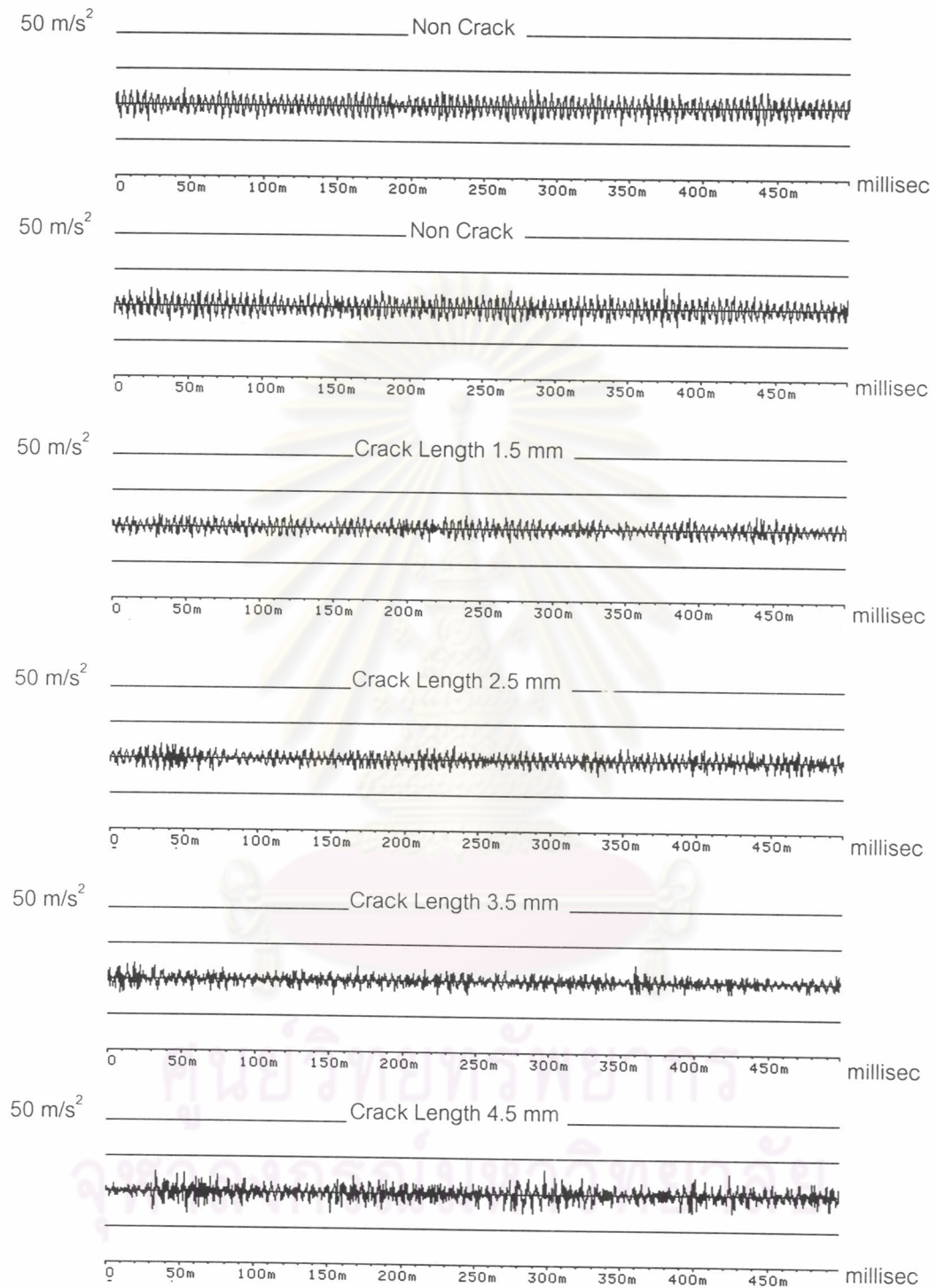
4-5-1 ภาพสัญญาณบนโดเมนเวลา

แสดงเฉพาะสัญญาณที่เก็บด้วยวิธีการเฉลี่ยบนโดเมนความถี่และโดเมนเวลาเข้าจังหวะพิสัยของโดเมนเวลาเลือกให้แสดงเท่านั้นทั้งสัญญาณที่เก็บเมื่อหมุนด้วยความเร็ว 500 รอบต่อนาที และ 800 รอบต่อนาที คือ 0 - 500 มิลลิวินาที ช่วงของค่าแอมพลิจูดที่แสดงจะเปลี่ยนแปลงตามความเร็วรอบหมุนและวิธีการเก็บสัญญาณ โดยที่ความเร็ว 800 รอบต่อนาทีจะเป็น 2 เท่าของความเร็ว 500 รอบต่อนาที การเก็บสัญญาณด้วยการเฉลี่ยบนโดเมนความถี่จะเป็น 5 เท่าของการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ รูปสัญญาณเรียงตามลำดับสภาวะการทดลองดังต่อไปนี้

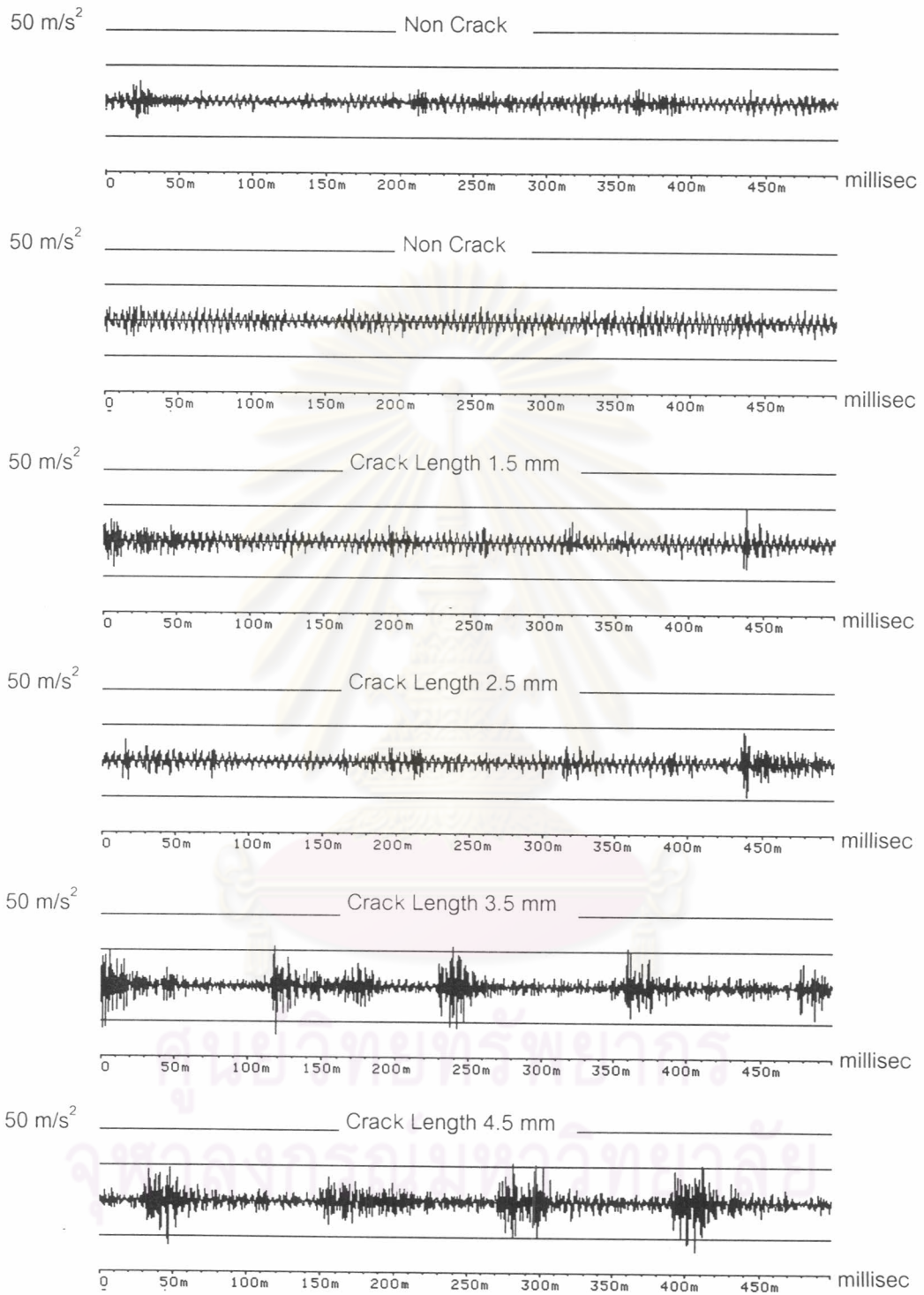
- 1) สัญญาณที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที
 - รูปที่ 4-12 : ภาวะ 300 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging
วัดสัญญาณแนวระดับ
 - รูปที่ 4-13 : ภาวะ 300 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging
วัดสัญญาณแนวตั้ง
 - รูปที่ 4-14 : ภาวะ 300 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging
วัดสัญญาณแนวระดับ
 - รูปที่ 4-15 : ภาวะ 300 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging
วัดสัญญาณแนวตั้ง

- 2) สัญญาณที่ความเร็ว 800 รอบต่อนาที
 - รูปที่ 4-16 : ภาวะ 300 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging
วัดสัญญาณแนวระดับ
 - รูปที่ 4-17 : ภาวะ 300 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging
วัดสัญญาณแนวตั้ง
 - รูปที่ 4-18 : ภาวะ 300 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging
วัดสัญญาณแนวระดับ
 - รูปที่ 4-19 : ภาวะ 300 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging
วัดสัญญาณแนวตั้ง

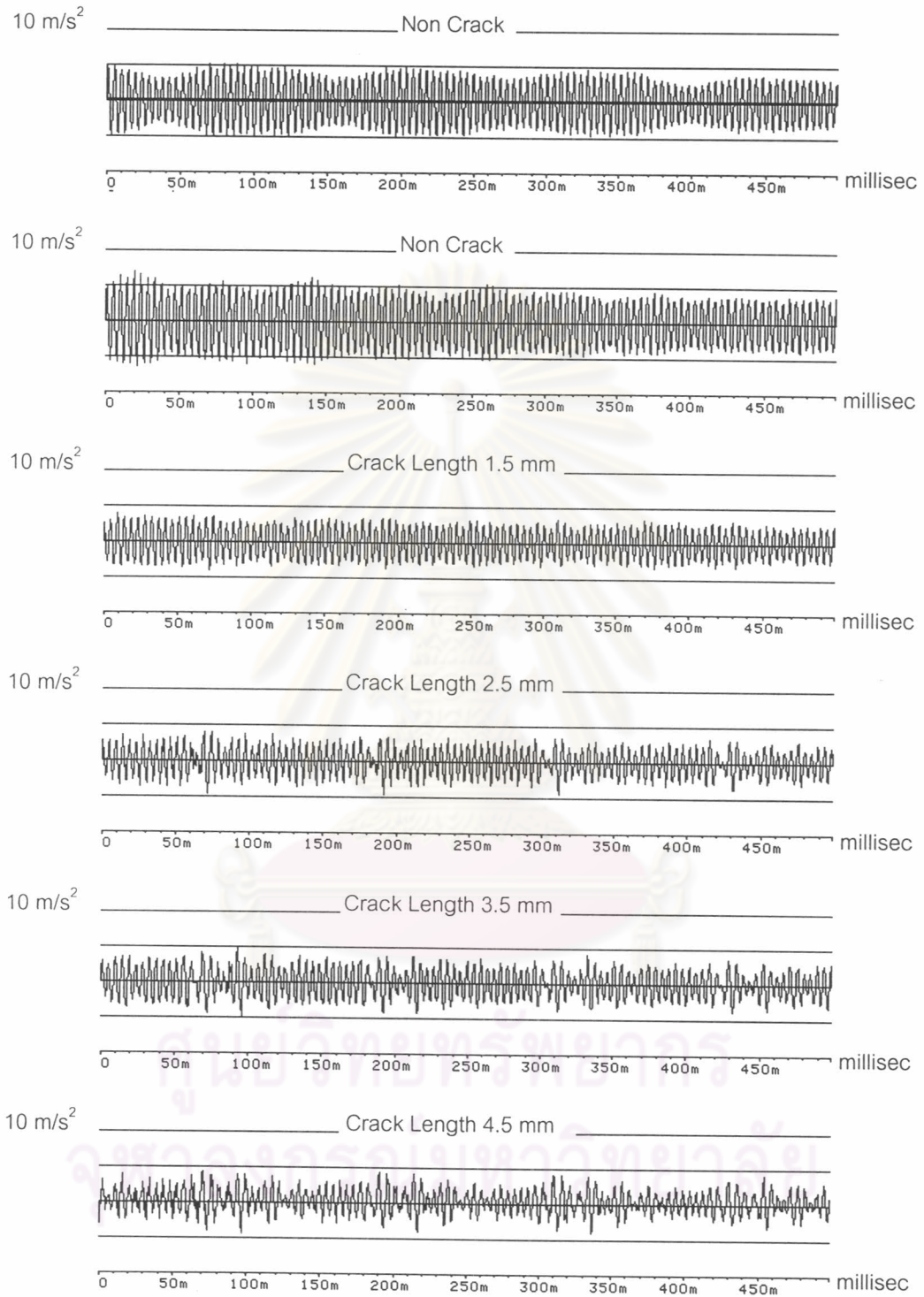
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



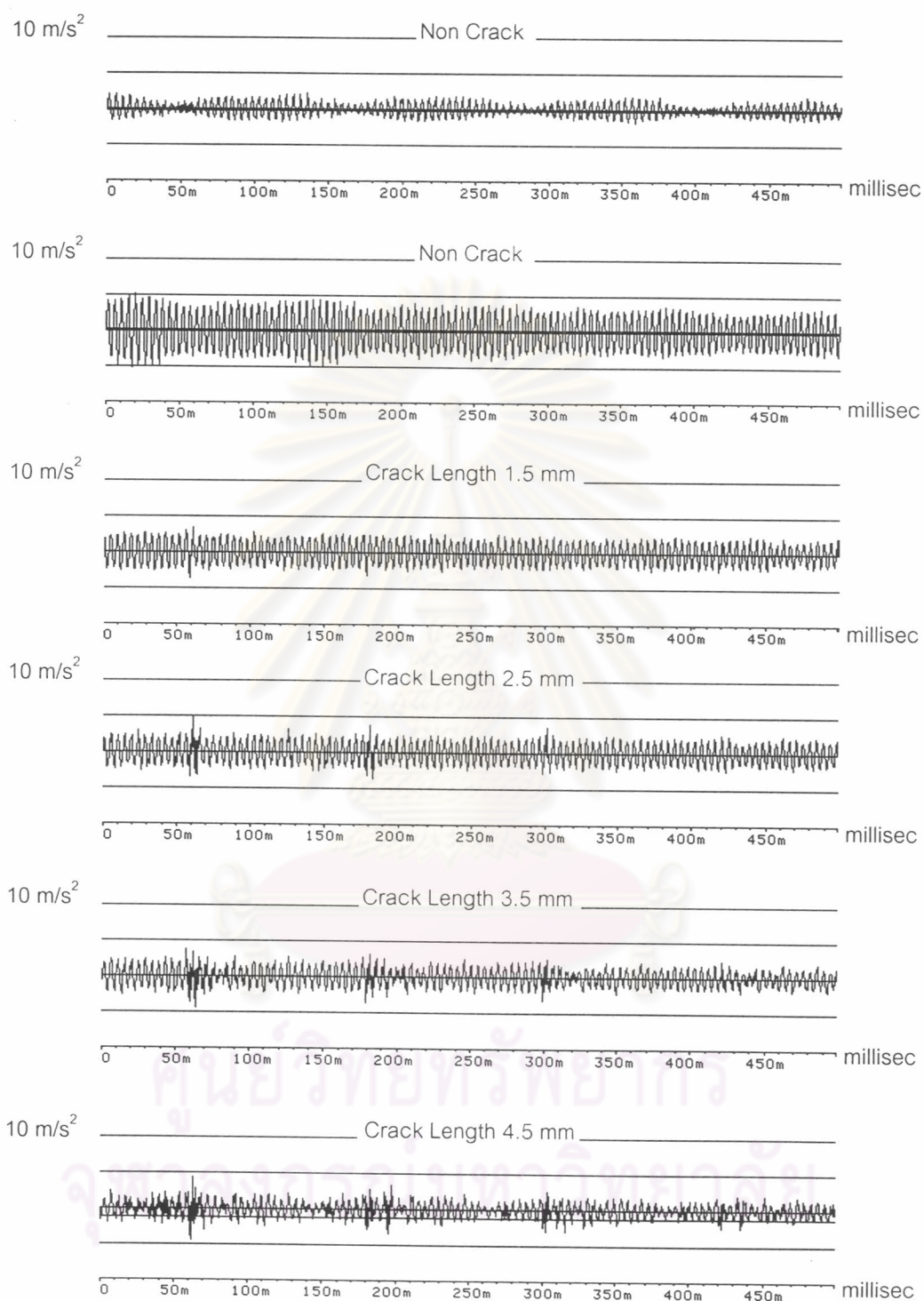
รูปที่ 4-12 สัญญาณบนโดเมนเวลา : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์ วัดสัญญาณแนวระดับ
เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging



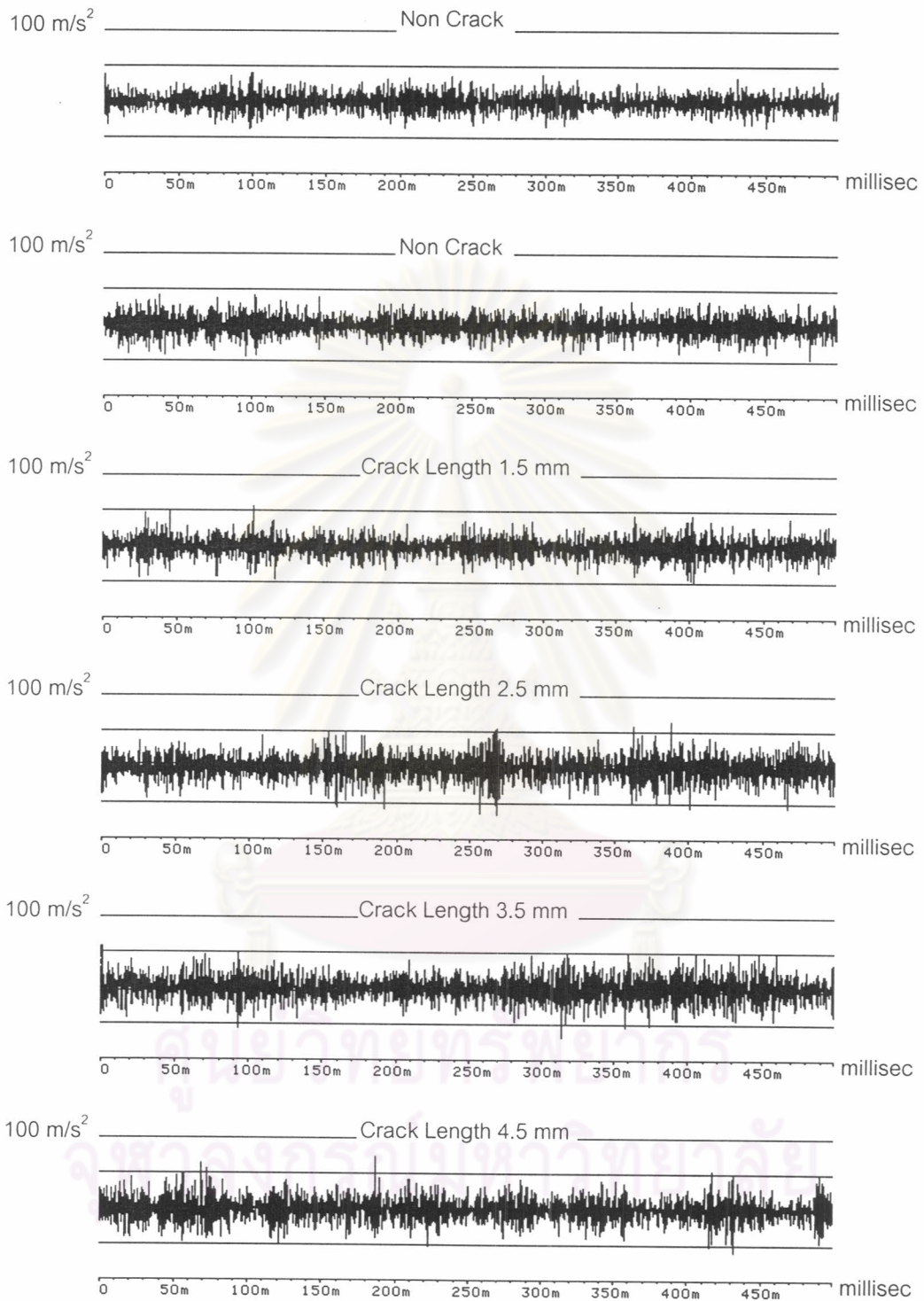
รูปที่ 4-13 สัญญาณบนโดเมนเวลา : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ภาวะ 300 วัตต์ วัดสัญญาณแนวตั้ง
เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging



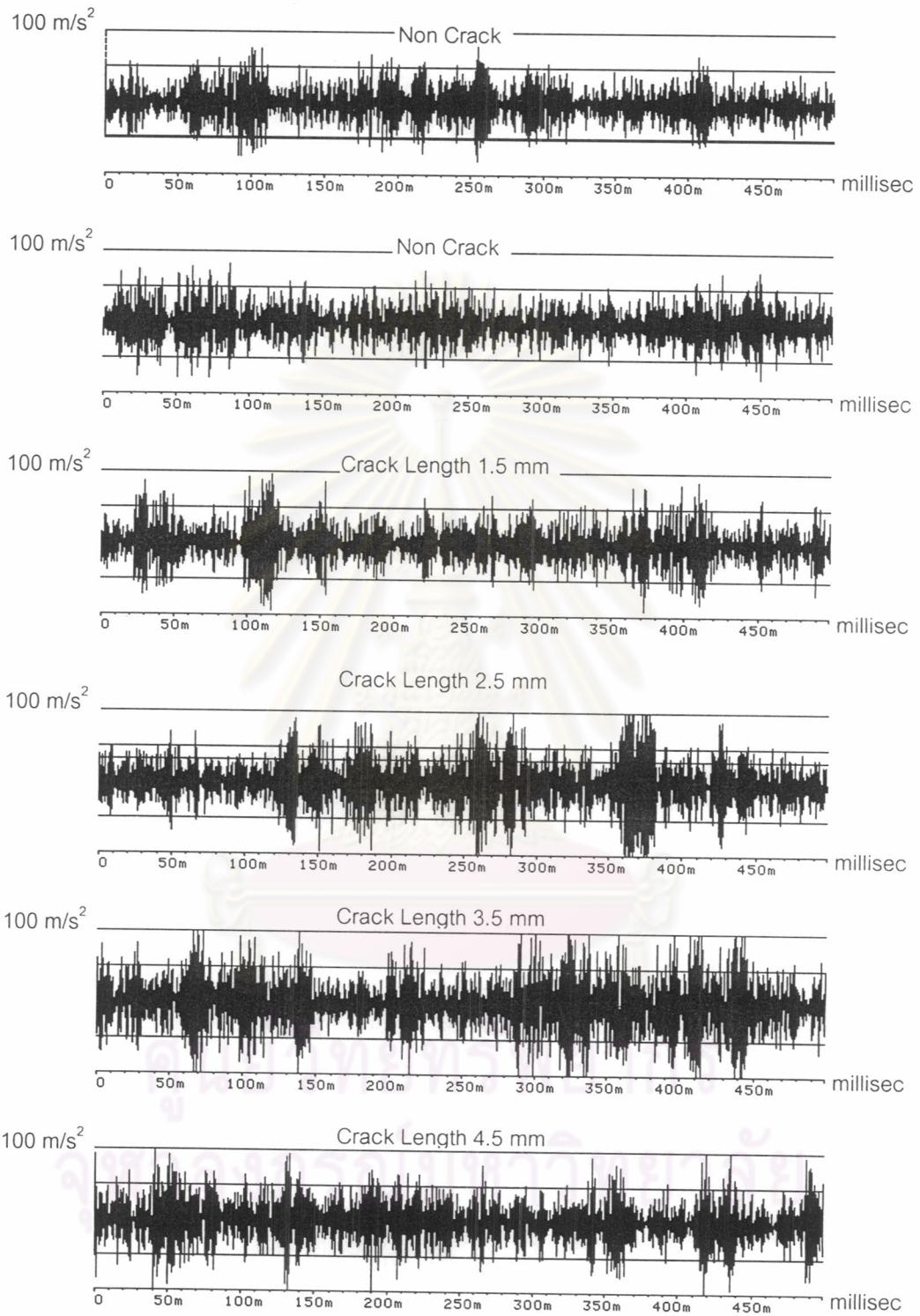
รูปที่ 4-14 สัญญาณบนโดเมนเวลา : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์ วัดสัญญาณแนวระดับ
 เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging



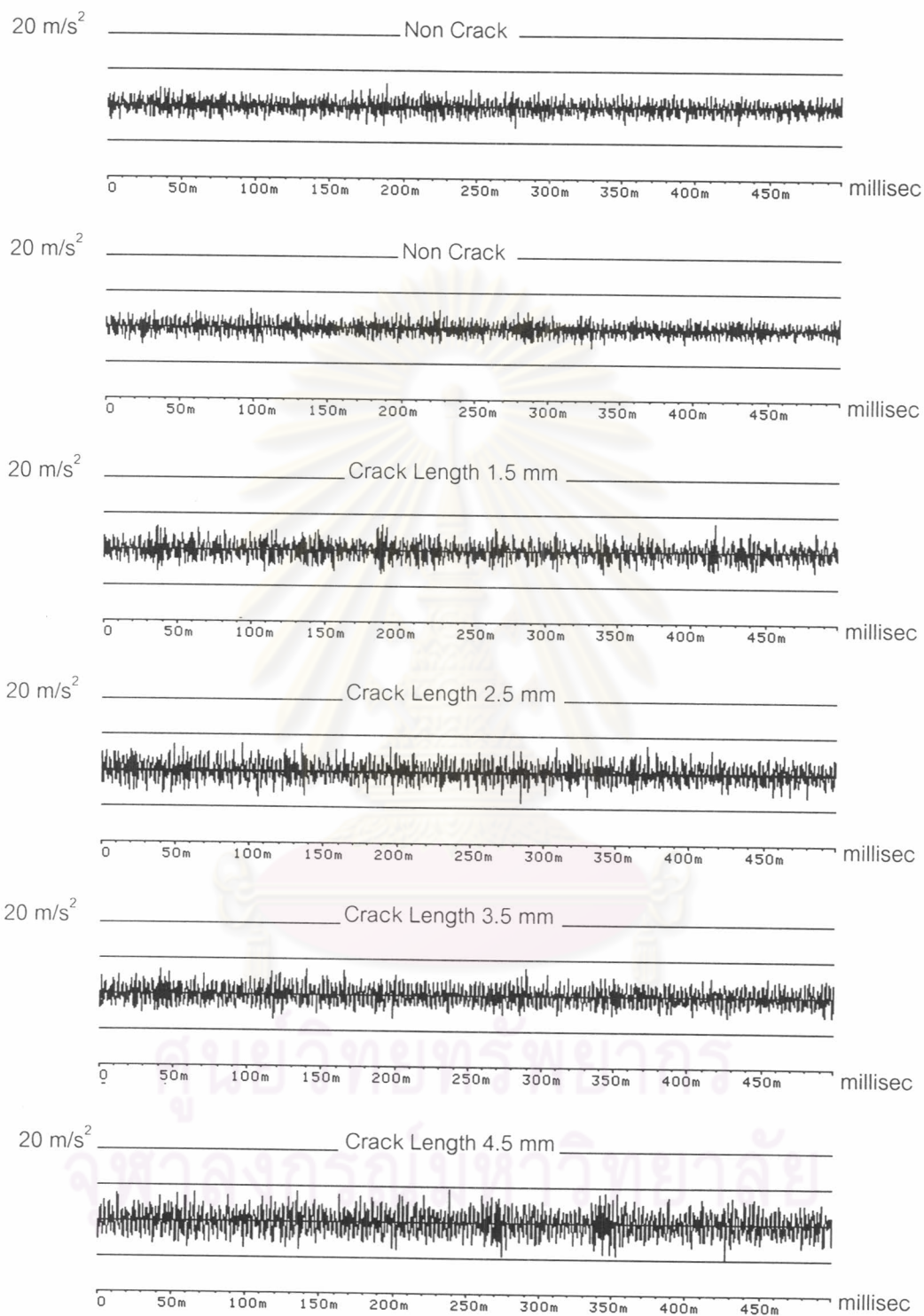
รูปที่ 4-15 สัญญาณบนโดเมนเวลา : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์ วัดสัญญาณแนวตั้ง
เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging



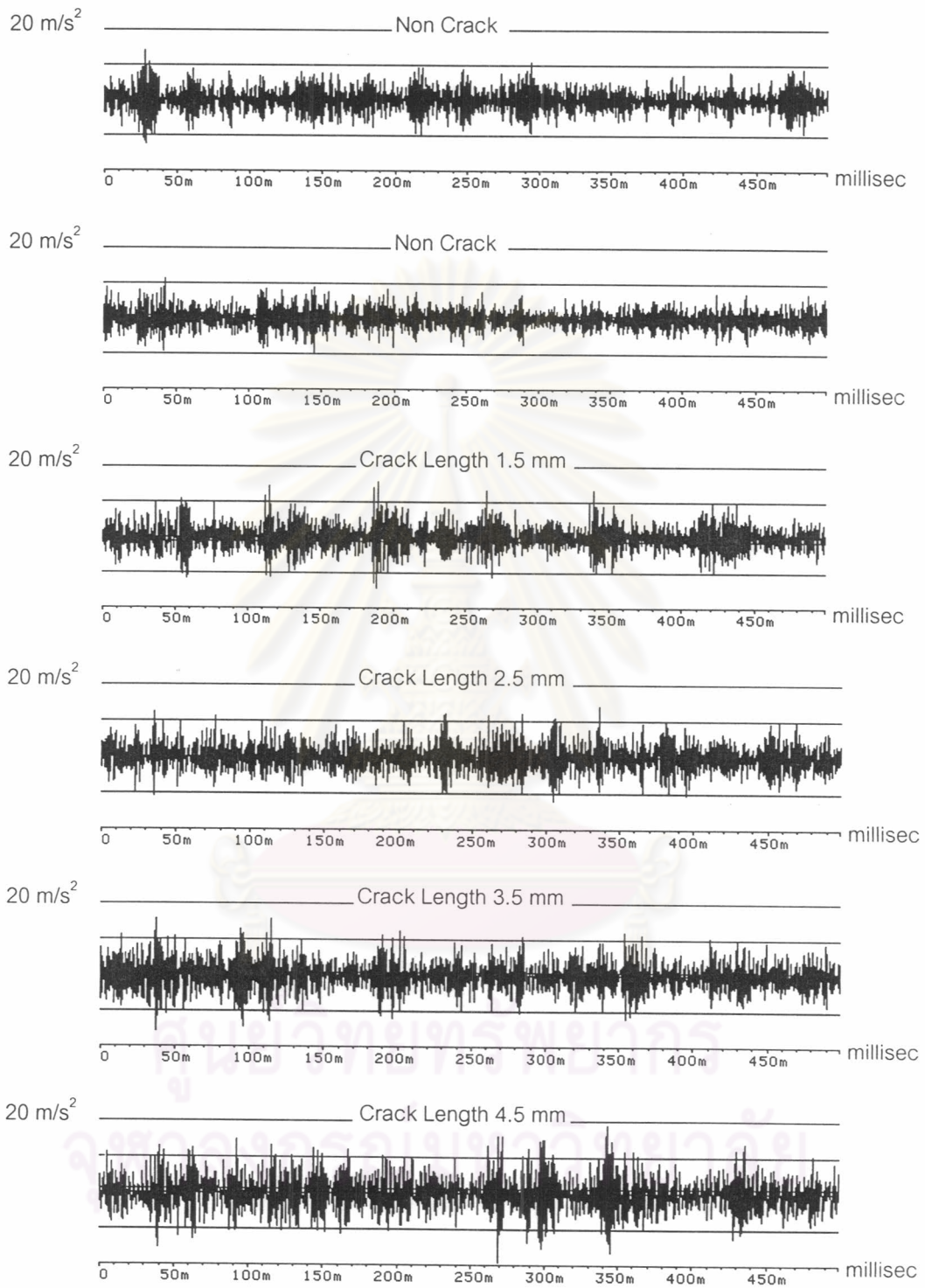
รูปที่ 4-16 สัญญาณบนโดเมนเวลา : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์ วัดสัญญาณแนวระดับ
 เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging



รูปที่ 4-17 สัญญาณบนโดเมนเวลา : ความเร็ว 800 รอบต่อวินาที ภาวะ 300 วัตต์ วัดสัญญาณแนวดิ่ง
เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging



รูปที่ 4-18 สัญญาณบนโดเมนเวลา : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์ วัดสัญญาณแนวระดับ
เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging



รูปที่ 4-19 สัญญาณบนโดเมนเวลา : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์ วัดสัญญาณแนวตั้ง
เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging

4-5-2 อภิปรายผลของสัญญาณบนโดเมนเวลา

- 1) สัญญาณที่ได้จากการเก็บด้วยวิธีการเฉลี่ยบนโดเมนความถี่ที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที สัญญาณที่วัดในแนวระดับดังในรูปที่ 4-12 สามารถสังเกตเห็นลักษณะของการสั่นที่มีคาบเท่ากับคาบการขบของเฟืองได้ตั้งแต่ไม่มีรอยแตกร้าวจนกระทั่งที่ความยาวรอยแตกร้าว 2.5 มม. ที่ความยาวรอยแตกร้าวมากกว่านี้มีการสั่นด้วยองค์ประกอบความถี่อื่นปะปนเข้ามาจนไม่สามารถสังเกตเห็นได้ สังเกตไม่พบพัลส์ชั่วขณะที่ห่างกันเท่ากับคาบการหมุนของเฟืองขับแม้ว่ารอยแตกร้าวจะยาว 4.5 มม.ก็ตาม ในรูปที่ 4-13 สัญญาณที่วัดในแนวตั้งสามารถสังเกตเห็นพัลส์ชั่วขณะที่คาดว่าน่าจะเป็นขึ้นเนื่องจากพื้นที่ที่แตกร้าวขบกันได้ตั้งแต่ความยาวรอยแตกร้าว 1.5 มม. แต่ทว่าพัลส์ที่เกิดขึ้นไม่ได้อยู่ห่างกันเท่ากับคาบการหมุนของเฟืองขับ (120 มิลลิวินาที) ในขณะที่ความยาวรอยแตกร้าว 3.5 มม. และ 4.5 มม. สามารถพบพัลส์ที่อยู่ห่างกันเท่ากับคาบการหมุนของเฟืองขับได้ชัดเจน ขนาดของพัลส์ไม่สูงขึ้นตามขนาดของรอยแตกร้าว นอกจากนี้แล้ว ขนาดการสั่นสะเทือนโดยรวมของสัญญาณทั้ง 2 ทิศทางยังไม่เพิ่มขึ้นตามขนาดของรอยแตกร้าว
- 2) สัญญาณที่ได้จากการเก็บด้วยวิธีการเฉลี่ยบนโดเมนความถี่ที่ความเร็ว 800 รอบต่อนาที สัญญาณที่วัดในแนวระดับ ในรูปที่ 4-16 มีขนาดการสั่นสะเทือนโดยรวมมากกว่าสัญญาณในกรณีความเร็ว 500 รอบต่อนาที 1 เท่า การสั่นสะเทือนมีองค์ประกอบความถี่ต่าง ๆ ปะปนอยู่มากมายจนไม่สามารถสังเกตเห็นลักษณะการสั่นที่มีคาบเท่ากับคาบการขบของเฟืองได้เลยแม้ว่าจะไม่มีรอยแตกร้าวก็ตามที่ สังเกตไม่พบพัลส์ชั่วขณะที่ห่างกันเท่ากับคาบการหมุนของเฟือง (75 มิลลิวินาที) เช่นเดียวกับในกรณีความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที ในขณะที่สัญญาณที่วัดในแนวตั้ง ดังในรูปที่ 4-17 พบพัลส์จำนวนมากตั้งแต่ยังไม่มีรอยแตกร้าวเกิดขึ้น จึงยากแก่การระบุว่าพัลส์ใดเกิดจากการขบกันของพื้นที่ที่แตกร้าว พัลส์ที่เกิดขึ้นจำนวนมากทำให้ขนาดการสั่นสะเทือนโดยรวมสูงเป็นประมาณ 3 เท่าของกรณีความเร็ว 500 รอบต่อนาที สังเกตพบว่าขนาดการสั่นสะเทือนโดยรวมมากที่สุดที่ความยาวรอยแตกร้าว 3.5 มม. ทั้งนี้ขนาดการสั่นสะเทือนโดยรวมของสัญญาณที่วัดทั้ง 2 ทิศทางมีการเปลี่ยนแปลงตามความยาวรอยแตกร้าวไม่มาก โดยที่สัญญาณที่วัดในแนวระดับไม่พบความเปลี่ยนแปลง
- 3) สัญญาณที่ได้จากการเก็บด้วยวิธีการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ ที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ดังในรูปที่ 4-14 และ 4-15 นอกจากช่วยให้สามารถสังเกตเห็นลักษณะของการสั่นที่มีคาบเท่ากับคาบการขบของเฟืองได้ชัดเจนขึ้นแล้ว ยังสามารถกำหนดตำแหน่งที่น่าจะเป็น

พื้นที่ที่ร้าวได้ เนื่องจากมีสัญญาณทริกเกอร์เป็นตัวสั่งให้เริ่มทำการเก็บสัญญาณ ใน 2 รูปนี้ พื้นที่ที่แตกร้าวจะขบกันครั้งแรกที่เวลาประมาณ 60 มิลลิวินาที ที่สภาวะการทดลองนี้ สังเกตพบการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ ณ จังหวะการขบกันของพื้นที่ที่แตกร้าวดูได้ชัดเจนกว่า สภาวะอื่น ๆ โดยเฉพาะสัญญาณในแนวตั้ง โดยพบว่ามีแอมพลิจูดสูงกว่าจังหวะการขบกัน ของพื้นที่อื่น ๆ เล็กน้อย อีกทั้งยังมีการสั้นด้วยองค์ประกอบความถี่อื่นปะปนอยู่ในจังหวะการ ขบกันของพื้นที่นี้และพื้นที่ติด ๆ กันที่ตามมาด้วย สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้ ได้ตั้งแต่ความยาวรอยแตกร้าวดู 2.5 มม. แต่สำหรับสัญญาณที่วัดในแนวระดับสามารถ สังเกตพบความเปลี่ยนแปลงที่จังหวะการขบกันของพื้นที่ที่แตกร้าวดูได้เฉพาะที่ความยาวรอย แตกร้าวดู 2.5 มม. และ 3.5 มม. โดยที่จังหวะการขบกันของพื้นที่ที่แตกร้าวดูมีแอมพลิจูดของ การสั้นน้อยกว่าจังหวะการขบกันของพื้นที่อื่น อีกทั้งยังมีคาบของจังหวะการขบกันที่นานกว่า คาบของจังหวะการขบกันของพื้นที่อื่น ๆ เมื่อสังเกตขนาดการสั้นสะท้อนโดยรวมพบว่า สัญญาณที่วัดในแนวระดับมีขนาดที่มากกว่าสัญญาณที่วัดในแนวตั้งแม้ว่าการขบกันของ เฟืองจะเกิดขึ้นในแนวตั้งก็ตาม โดยเฟืองตัวที่ไม่มีรอยแตกร้าวดูตัวแรก (01-0) มีขนาดที่ แตกต่างกันเป็นอย่างมากเนื่องจากสัญญาณที่วัดในแนวตั้งกลับมีขนาดที่ต่ำกว่าเฟืองตัวอื่น ๆ เมื่อรอยแตกร้าวดูเกิดขึ้นกลับพบว่าแอมพลิจูดของการสั้นสะท้อนลดลง จากนั้นมีขนาดที่ค่อนข้างคงที่เมื่อรอยแตกร้าวดูยาวมากขึ้น

- 4) สัญญาณที่ได้จากการเก็บสัญญาณด้วยวิธีการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ ที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ยังสามารถช่วยให้สังเกตเห็นลักษณะการมอดูเลตทางแอมพลิจูดที่เกิดขึ้นกับ เฟืองบางตัว ในขณะที่ไม่สามารถสังเกตเห็นได้ในกรณีความเร็ว 800 รอบต่อนาที สัญญาณที่เก็บจากเฟืองตัวที่ไม่มีรอยแตกร้าวดูตัวแรก (01-0) และ เฟืองตัวที่มีรอยแตกร้าวดูยาว 4.5 มม. เมื่อทำการสังเกตอย่างตรงจักษุ พบว่ามีกรรมมอดูเลตด้วยสัญญาณที่มีคาบเท่ากับ คาบการหมุนของเฟืองขับอย่างชัดเจน คาดว่าน่าจะเป็นผลมาจากคุณภาพในการผลิตเฟือง ซึ่งทำให้เมื่อติดตั้งเฟืองขับเข้ากับเพลาลแล้ว ไม่สามารถทำให้ตั้งฉากกับเพลาลได้ เมื่อตรวจสอบโดยใช้ไดอัลเกจวัดด้านข้างเฟืองพบว่าเมื่อหมุนเฟืองขับครบ 1 รอบ ไดอัลเกจอ่านค่าต่าง กันประมาณ 0.2-0.3 มม.
- 5) สัญญาณที่ได้จากการเก็บสัญญาณด้วยวิธีการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ ที่ความเร็ว 800 รอบต่อนาที สังเกตลักษณะของการสั้นที่มีคาบเท่ากับคาบการขบของเฟืองได้ยากเนื่องจากยัง มีการสั้นด้วยองค์ประกอบด้วยความถี่อื่นปะปนอยู่มาก สัญญาณที่วัดในแนวระดับในรูปที่ 4-18 ไม่สามารถสังเกตพบการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ ณ จังหวะการขบกันของพื้นที่ที่

แตกร้าวได้ ขนาดการสั่นสะเทือนโดยรวมใกล้เคียงกับกรณีความเร็ว 500 รอบต่อนาที และเมื่อรอยแตกร้าวยาวมากขึ้นขนาดของการสั่นสะเทือนมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ สัญญาณที่วัดในแนวตั้งดังในรูปที่ 4-19 สามารถสังเกตพบพัลส์ที่เกิดขึ้นห่างกันเท่ากับคาบการหมุนของเฟืองขับ โดยพื้นที่ที่แตกร้าวจะขบกันครั้งแรกที่เวลาประมาณ 37.5 มิลลิวินาที แต่ก็ยังปรากฏพัลส์ที่ตำแหน่งอื่น ๆ อีกเพียงแต่ที่ไม่มีลักษณะการเกิดที่เป็นคาบ สัญญาณที่ได้จากเฟืองที่มีรอยแตกร้าวยาว 1.5 มม. ปรากฏพัลส์ที่จังหวะการขบกันของพื้นที่ที่แตกร้าวได้ชัดเจนที่สุด ขนาดของการสั่นสะเทือนโดยรวมสูงกว่าสัญญาณที่วัดในแนวระดับเกือบเท่าตัว และมีขนาดเป็นประมาณ 3-4 เท่าของกรณีความเร็ว 500 รอบต่อนาที เมื่อรอยแตกร้าวยาวมากขึ้นขนาดของการสั่นสะเทือนเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

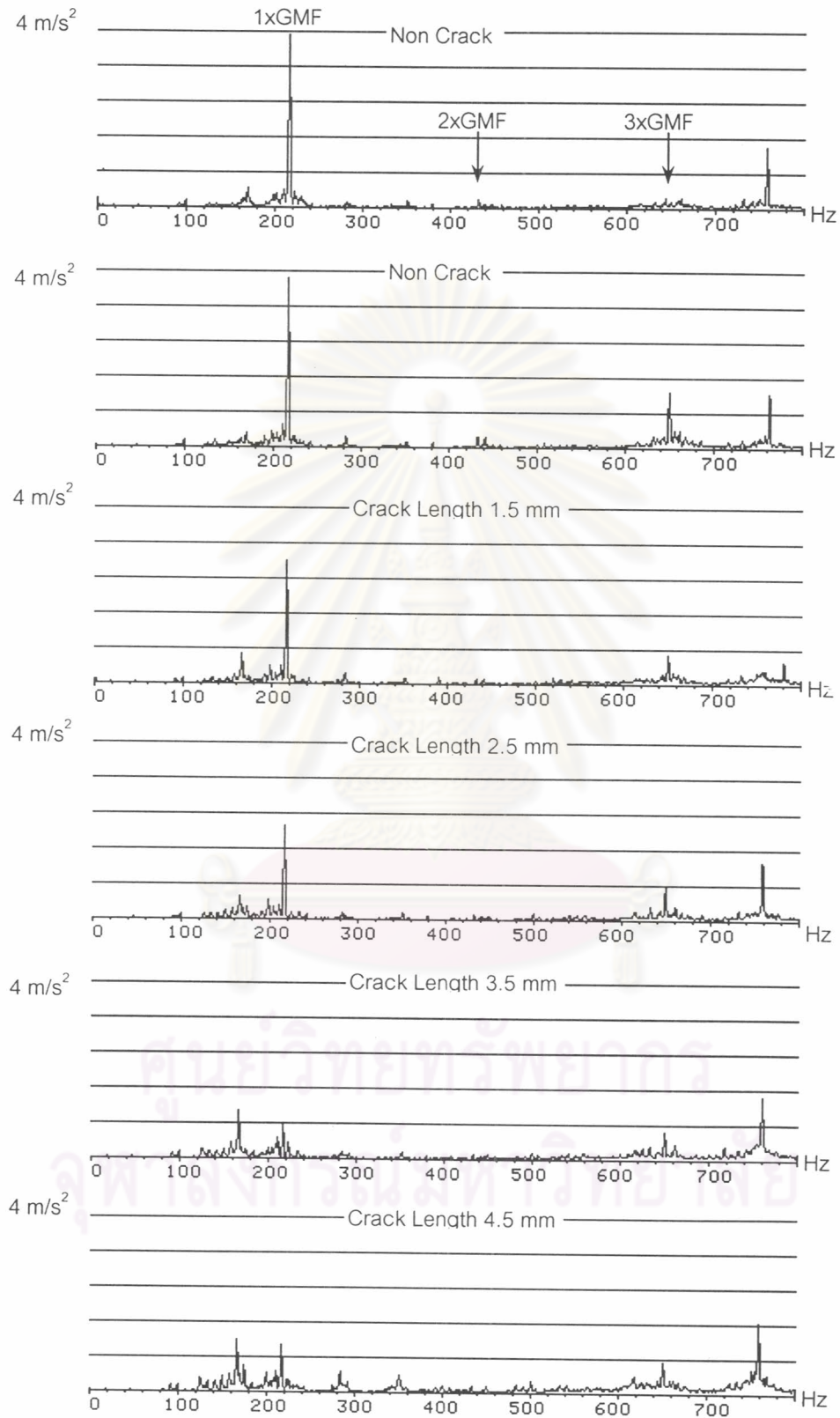
- 6) ที่สภาวะความเร็ว 500 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์ แรงที่ส่งผ่านเฟืองมีขนาดมากที่สุดทำให้การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ทำได้ยากมาก การเก็บสัญญาณด้วยวิธีการเฉื่อยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะใช้เวลาในการเก็บสัญญาณที่นานมากคือประมาณ 3 นาทีสำหรับความเร็ว 500 รอบต่อนาที และใช้เวลาลดลงครึ่งหนึ่งสำหรับความเร็ว 800 รอบต่อนาที ผลที่ตามมาคือขนาดของการสั่นสะเทือนลดลงในช่วงท้าย ๆ ของหน้าต่างเวลาที่ใช้เก็บสัญญาณ ดังเช่นสัญญาณที่ได้จากเฟืองตัวที่ไม่มีรอยแตกร้าวทั้ง 2 ตัวในรูปที่ 4-14 เนื่องมาจากการเฉื่อยไม่เข้าจังหวะกันพอดี ดังนั้นจึงจำเป็นต้องควบคุมให้ความเร็วของมอเตอร์คงที่หรือเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 2 รอบต่อนาทีเพื่อให้ตำแหน่งที่เริ่มต้นเก็บสัญญาณในแต่ละชุดสัญญาณตรงกัน

4-5-3 ภาพสัญญาณสเปกตรัม

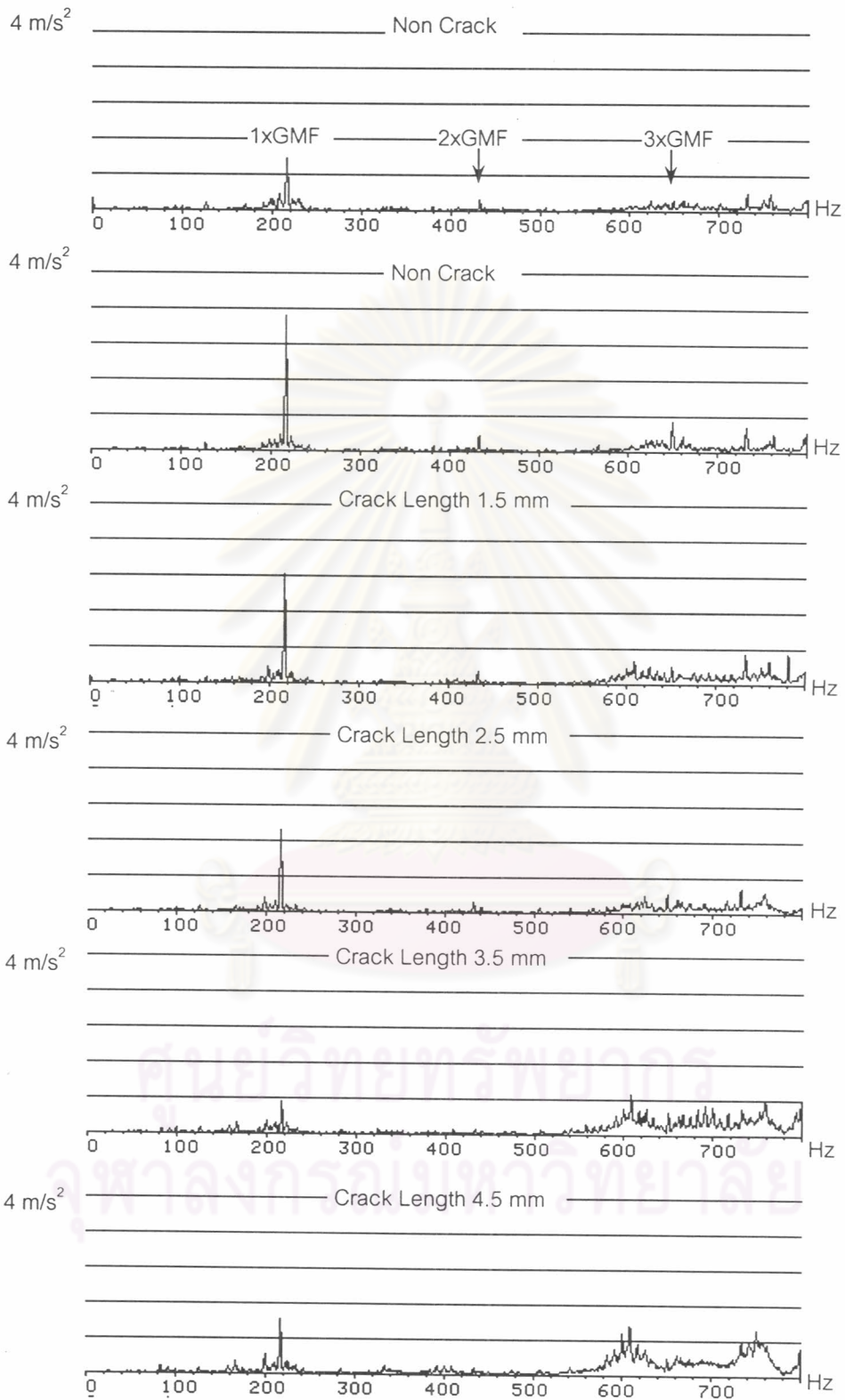
ค่าสูงสุดของแอมพลิจูดที่ใช้แสดงผลคือ 4 m/s^2 ยกเว้นในกรณีการเก็บสัญญาณด้วยการเฉื่อยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะที่มีค่าเท่ากับ 2 m/s^2 พิสัยของโดเมนความถี่สำหรับการเก็บสัญญาณด้วยวิธีการเฉื่อยบนโดเมนความถี่และการเฉื่อยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ กรณีการวัดสัญญาณที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาทีคือ 800 Hz ในขณะที่การวัดสัญญาณที่ความเร็ว 800 รอบต่อนาทีคือ 1,600 Hz เมื่อใช้กระบวนการขยายความละเอียดของโดเมนความถี่จะมีพิสัยแคบลง 4 เท่า รูปสัญญาณเรียงตามลำดับสภาวะการทดลองดังต่อไปนี้

- 1) สัญญาณที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที
 - รูปที่ 4-20 : ภาวะ 300 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging
วัดสัญญาณแนวระดับ
 - รูปที่ 4-21 : ภาวะ 300 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging
วัดสัญญาณแนวตั้ง
 - รูปที่ 4-22 : ภาวะ 300 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Zoom Processing
วัดสัญญาณแนวระดับ
 - รูปที่ 4-23 : ภาวะ 300 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Zoom Processing
วัดสัญญาณแนวตั้ง
 - รูปที่ 4-24 : ภาวะ 300 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging
วัดสัญญาณแนวระดับ
 - รูปที่ 4-25 : ภาวะ 300 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging
วัดสัญญาณแนวตั้ง

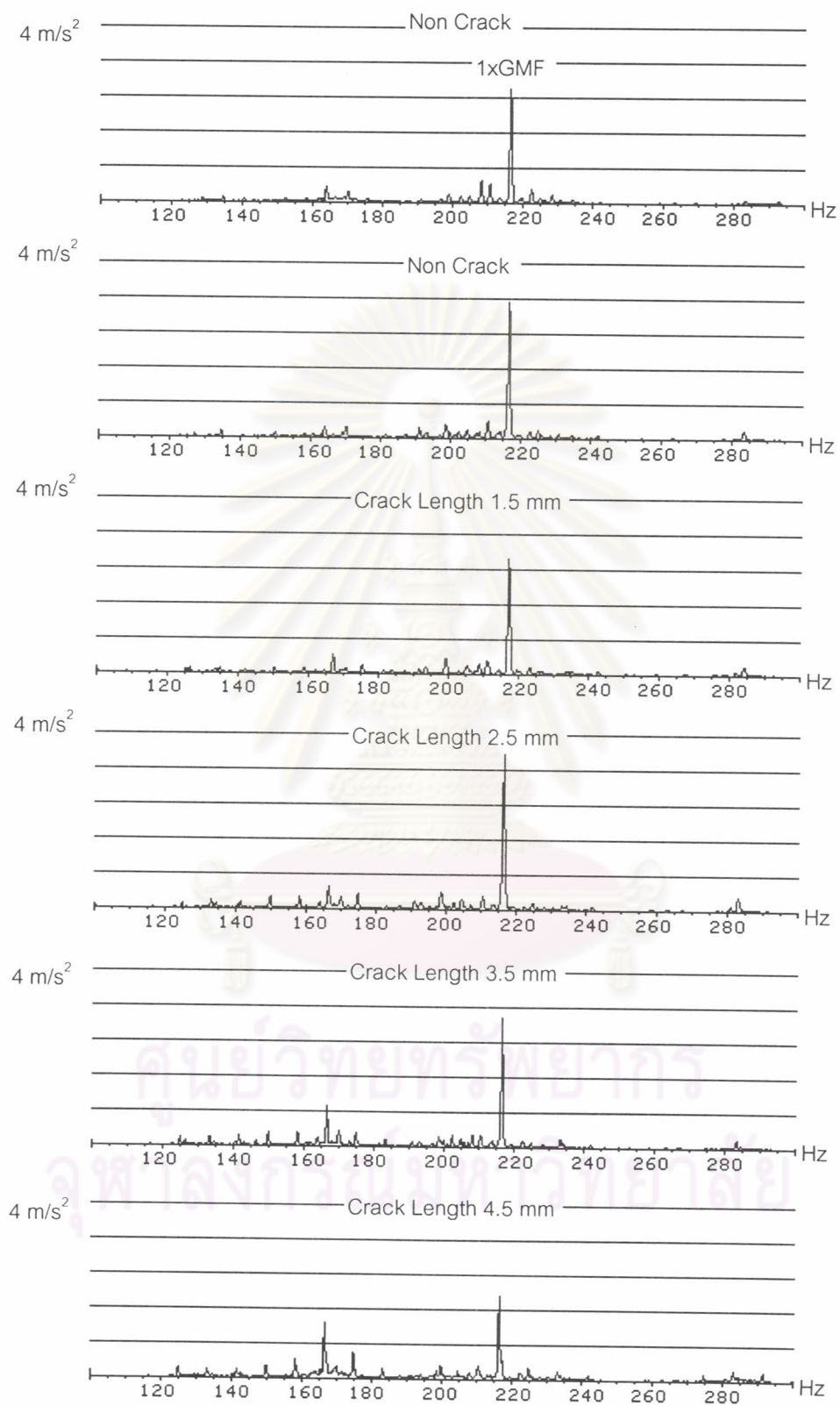
- 2) สัญญาณที่ความเร็ว 800 รอบต่อนาที
 - รูปที่ 4-26 : ภาวะ 300 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging
วัดสัญญาณแนวระดับ
 - รูปที่ 4-27 : ภาวะ 300 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging
วัดสัญญาณแนวตั้ง
 - รูปที่ 4-28 : ภาวะ 300 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Zoom Processing
วัดสัญญาณแนวระดับ
 - รูปที่ 4-29 : ภาวะ 300 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Zoom Processing
วัดสัญญาณแนวตั้ง
 - รูปที่ 4-30 : ภาวะ 300 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging
วัดสัญญาณแนวระดับ
 - รูปที่ 4-31 : ภาวะ 300 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging
วัดสัญญาณแนวตั้ง



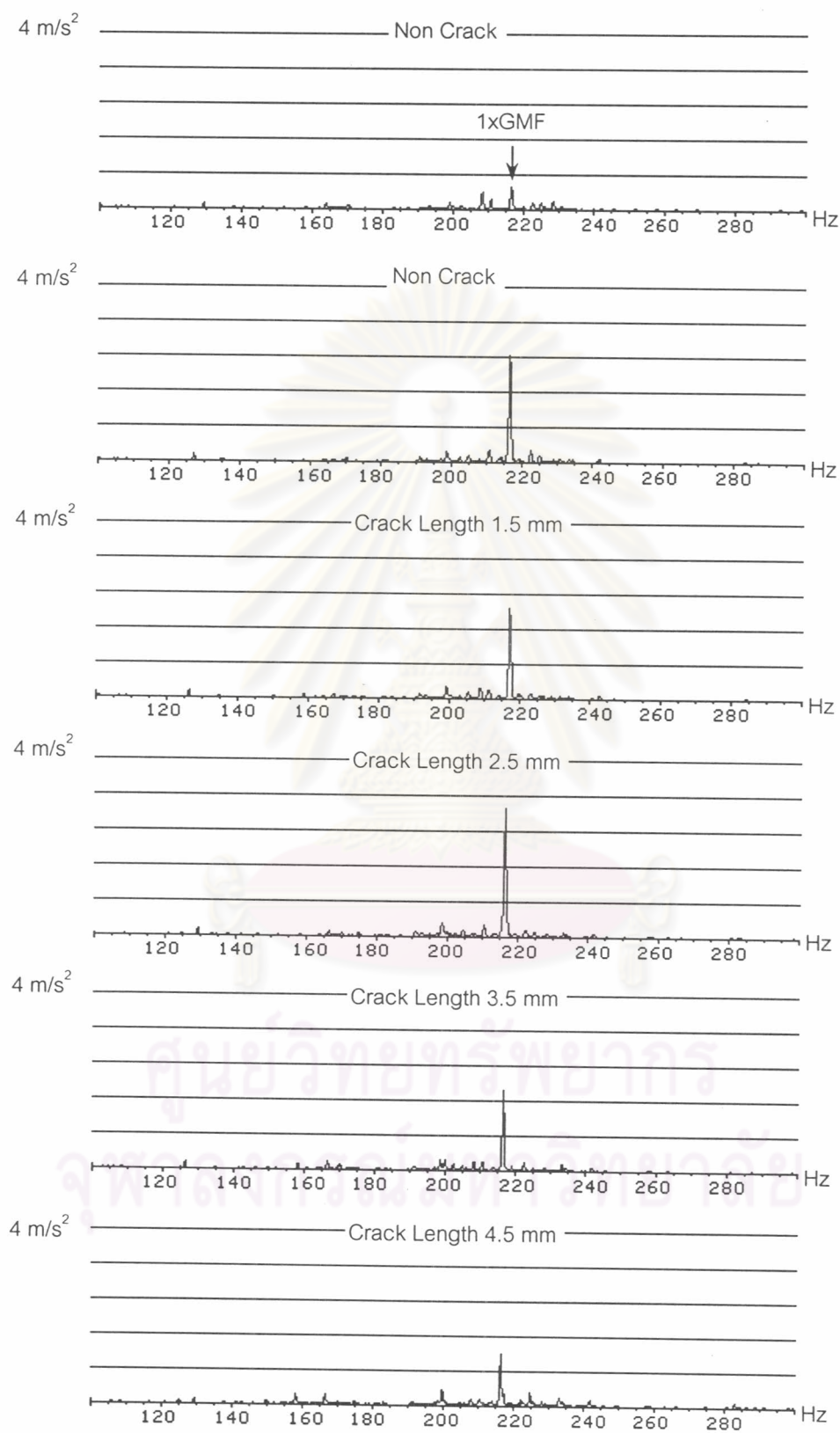
รูปที่ 4-20 สัญญาณสเปกตรัม : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์ วัดสัญญาณแนวระดับ
เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging



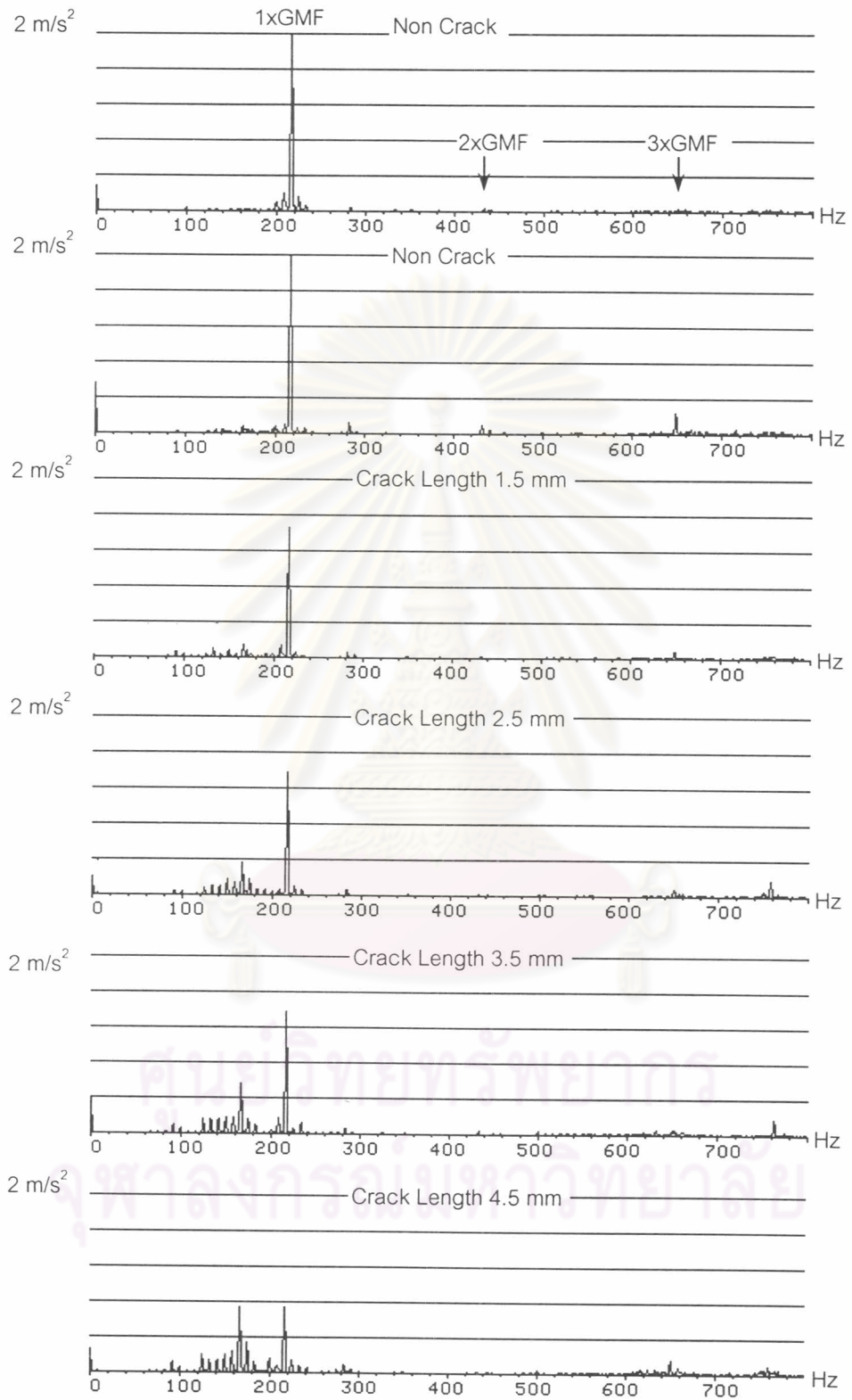
รูปที่ 4-21 สัญญาณสเปกตรัม : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์ วัดสัญญาณแนวตั้ง
เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging



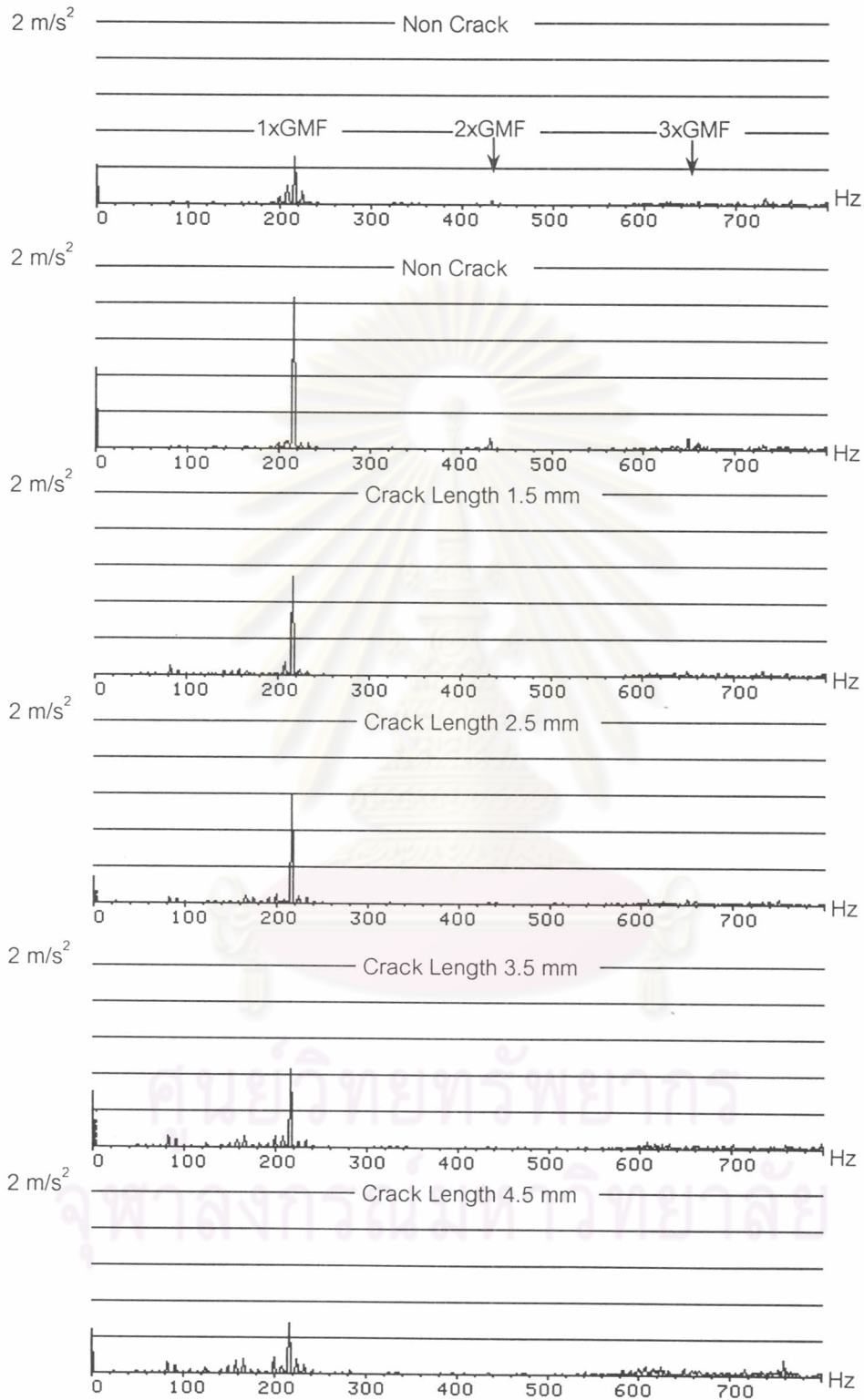
รูปที่ 4-22 สัญญาณสเปกตรัม : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์ วัดสัญญาณแนวระดับ
เก็บสัญญาณด้วยวิธี Zoom Processing



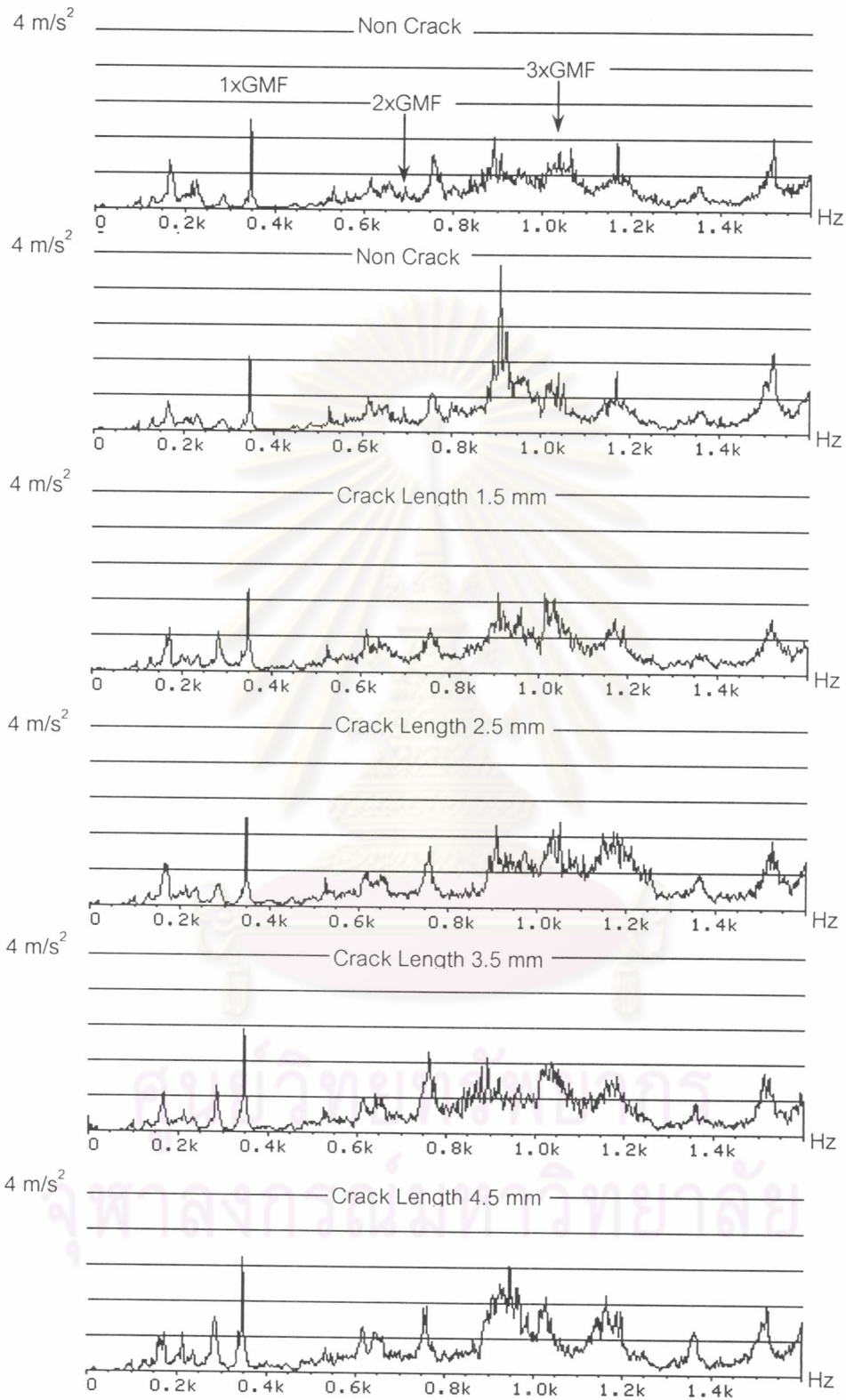
รูปที่ 4-23 สัญญาณสเปกตรัม : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์ วัดสัญญาณแนวตั้ง
เก็บสัญญาณด้วยวิธี Zoom Processing



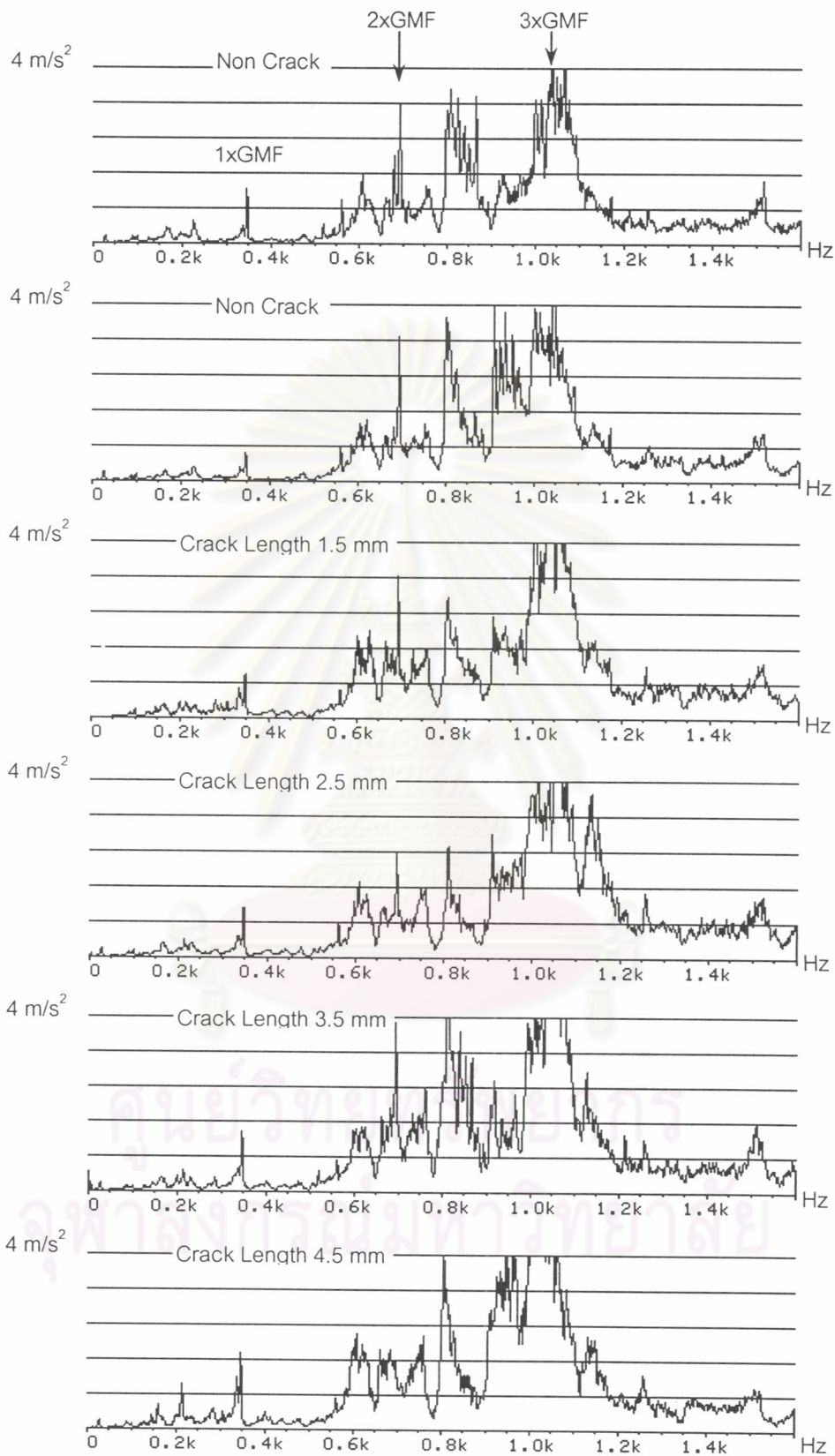
รูปที่ 4-24 สัญญาณสเปกตรัม : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์ วัดสัญญาณแนวระดับ
เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging



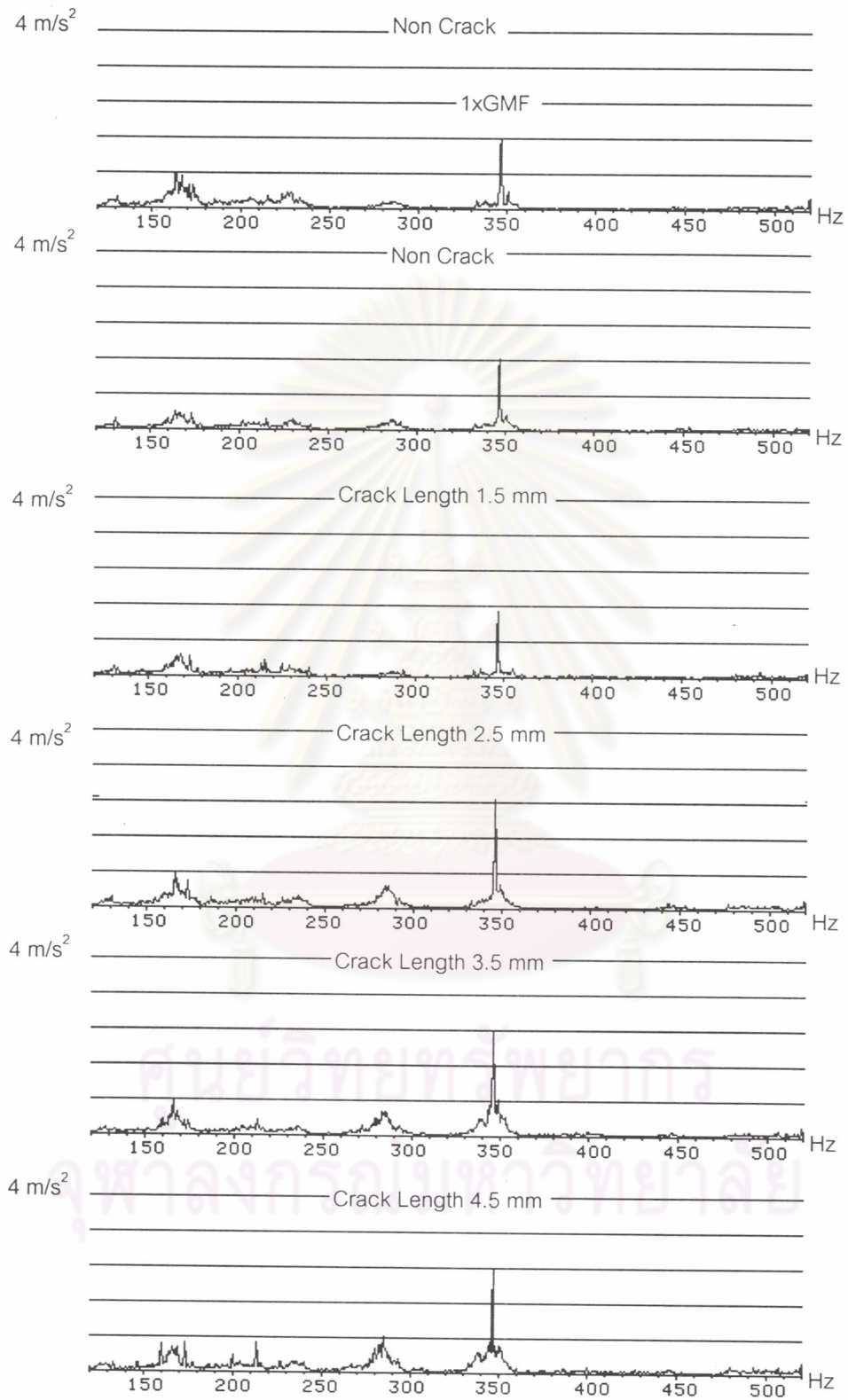
รูปที่ 4-25 สัญญาณสเปกตรัม : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์ วัดสัญญาณแนวตั้ง
เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging



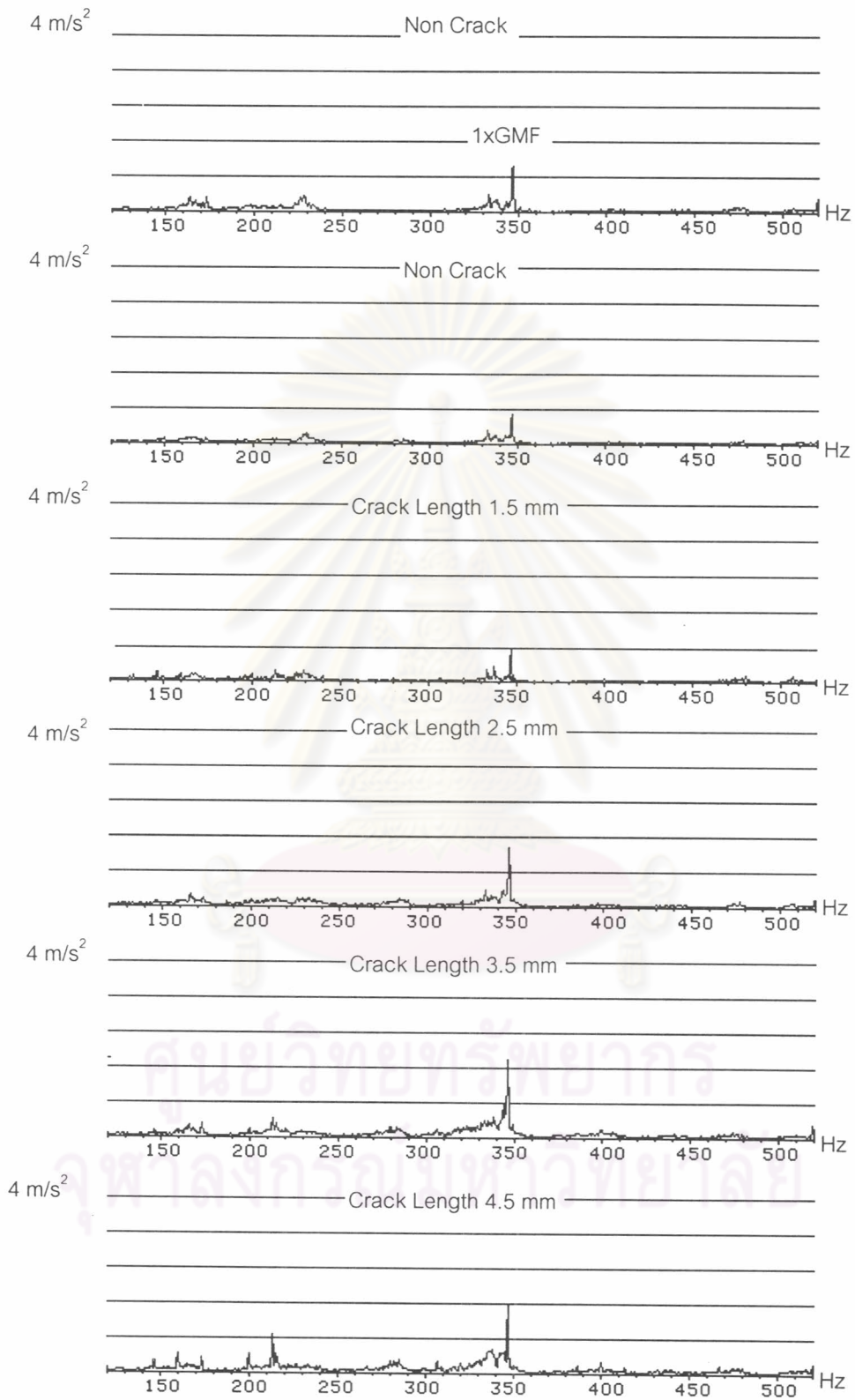
รูปที่ 4-26 สัญญาณสเปกตรัม : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์ วัดสัญญาณแนวระดับ
เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging



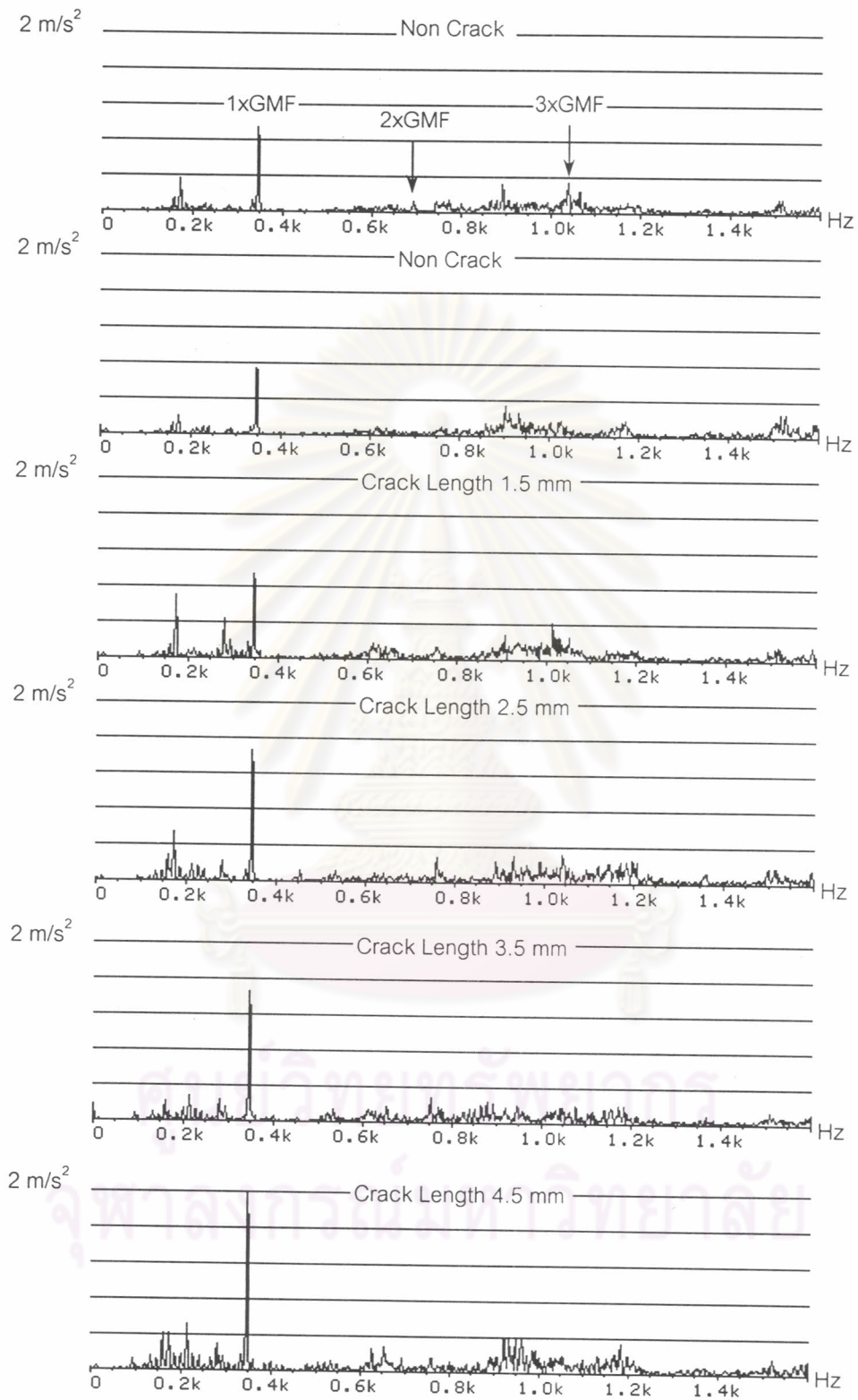
รูปที่ 4-27 สัญญาณสเปกตรัม : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์ วัดสัญญาณแนวตั้ง
เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging



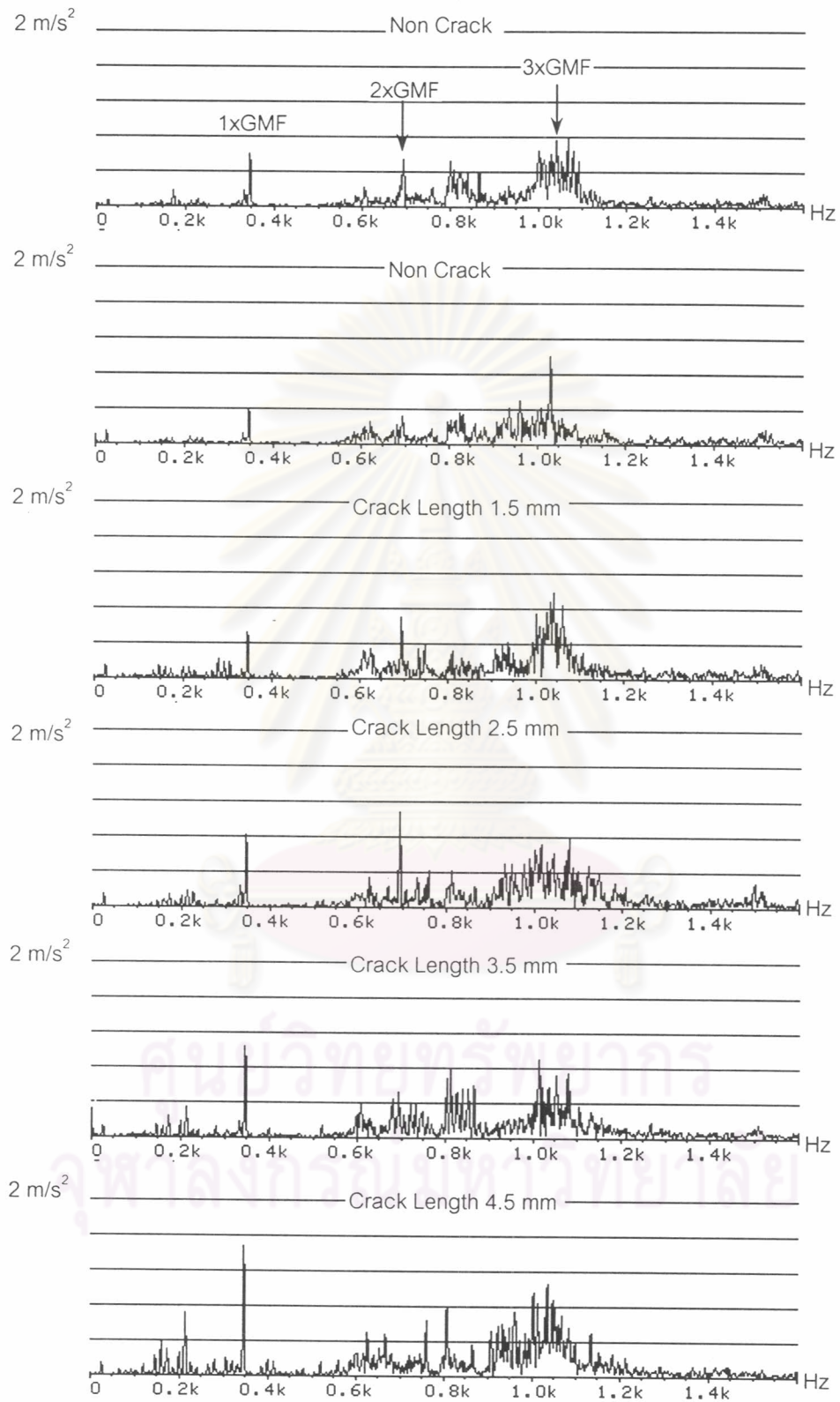
รูปที่ 4-28 สัญญาณสเปกตรัม : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์ วัดสัญญาณแนวระดับ
เก็บสัญญาณด้วยวิธี Zoom Processing



รูปที่ 4-29 สัญญาณสเปกตรัม : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์ วัดสัญญาณแนวตั้ง
เก็บสัญญาณด้วยวิธี Zoom Processing



รูปที่ 4-30 สัญญาณสเปกตรัม : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์ วัดสัญญาณแนวระดับ
เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging



รูปที่ 4-31 สัญญาณสเปกตรัม : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์ วัดสัญญาณแนวตั้ง
เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging

4-5-4 อภิปรายผลของสัญญาณสเปกตรัม

- 1) สัญญาณที่ได้จากการเก็บด้วยวิธีการเฉลี่ยบนโดเมนความถี่ที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 4-20 และ 4-21 สามารถสังเกตเห็นยอดสเปกตรัมที่ความถี่ $1 \times \text{GMF}$ ได้อย่างชัดเจนทั้งการวัดสัญญาณในแนวระดับและแนวตั้ง โดยเมื่อขนาดความยาวของรอยแตกกว้างเพิ่มขึ้นพบว่าค่าแอมพลิจูดลดลงทั้ง 2 ทิศทาง นอกจากนี้ยอดสเปกตรัมที่ความถี่ $1 \times \text{GMF}$ แล้วยังพบว่ายอดสเปกตรัมที่ความถี่ $3 \times \text{GMF}$ และที่ความถี่ประมาณ 760 Hz มีแอมพลิจูดสูงเด่นขึ้นมาสำหรับการวัดสัญญาณในแนวระดับที่เฟืองบางตัว โดยที่ไม่มีความสัมพันธ์กับความยาวของรอยแตกกว้าง นอกจากนี้ยังพบว่าปรากฏสัญญาณรบกวนช่วงความถี่กว้าง (White Noise) ที่ยังมีค่าแอมพลิจูดต่ำ ตั้งแต่ความถี่ 600 Hz ขึ้นไป แต่ที่การวัดในแนวตั้งแอมพลิจูดของสัญญาณรบกวนช่วงความถี่กว้างนี้มีค่าเพิ่มขึ้นตามความยาวของรอยแตกกว้าง ชุดแถบความถี่ข้างปรากฏชัดเจนสำหรับการวัดสัญญาณในแนวระดับ โดยในขณะที่ยังไม่มีรอยแตกกว้างชุดแถบความถี่ข้างจากเฟืองตามปรากฏชัดกว่าชุดแถบความถี่ข้างจากเฟืองขับ แต่เมื่อเฟืองมีรอยแตกกว้างแล้วจะปรากฏชุดแถบความถี่ข้างจากเฟืองขับที่ชัดเจนกว่า โดยอยู่ทางด้านความถี่ต่ำกว่า $1 \times \text{GMF}$ เป็นส่วนใหญ่ และมีจำนวนเพิ่มขึ้นตามขนาดของรอยแตกกว้าง แอมพลิจูดของแถบความถี่ข้าง 6 SBP ทางด้านความถี่ต่ำกว่า $1 \times \text{GMF}$ ซึ่งตรงกับความถี่ประมาณ 166 – 168 Hz มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามขนาดของรอยแตกกว้าง
- 2) สัญญาณที่ได้จากการเก็บด้วยกระบวนการขยายความละเอียดของโดเมนความถี่ ที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 4-22 และ 4-23 พบว่าค่าแอมพลิจูดของ $1 \times \text{GMF}$ ต่างไปจากการเก็บด้วยวิธีการเฉลี่ยบนโดเมนความถี่อย่างไม่มีรูปแบบที่แน่นอน โดยในขณะที่เฟืองไม่มีรอยแตกกว้างค่าแอมพลิจูดของ $1 \times \text{GMF}$ ลดลง แต่ในขณะที่มีรอยแตกกว้างแล้วค่าจะเพิ่มขึ้น ค่าแอมพลิจูดเปลี่ยนแปลงโดยไม่มีแนวโน้มที่สัมพันธ์กับความยาวรอยแตกกว้าง การเก็บสัญญาณด้วยวิธีการนี้ช่วยให้สามารถแยกแยะชุดแถบความถี่ข้างจากเฟืองขับออกจากชุดแถบความถี่ข้างจากเฟืองตามได้ชัดเจน โดยพบว่าการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดของชุดแถบความถี่ข้างเมื่อขนาดรอยแตกกว้างยาวเพิ่มขึ้นคล้ายกับการเก็บสัญญาณด้วยวิธีการเฉลี่ยบนโดเมนความถี่
- 3) สัญญาณที่ได้จากการเก็บด้วยวิธีการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 4-24 และ 4-25 สามารถลดสัญญาณรบกวนช่วงความถี่กว้างออกไปได้เกือบหมด ค่าแอมพลิจูดที่ความถี่ $1 \times \text{GMF}$ ยังมีขนาดที่สูงเด่นชัดเจนและมีแนวโน้ม

การเปลี่ยนแปลงที่ลดลงตามความยาวรอยแตกร้าว คล้ายกันกับการเก็บด้วยวิธีการเฉลี่ยบนโดเมนความถี่ ชุดแถบความถี่ข้างทางด้านความถี่ต่ำกว่า $1 \times \text{GMF}$ ปรากฏเฉพาะชุดแถบความถี่ข้างจากเฟืองขับ มีการเพิ่มขึ้นทั้งแอมพลิจูดและจำนวนของแถบความถี่ข้างตามขนาดของรอยแตกร้าว โดยที่แอมพลิจูดของ 6 SBP ทางด้านความถี่ต่ำกว่า $1 \times \text{GMF}$ ของสัญญาณที่วัดในแนวระดับมีการเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเหมือนกับวิธีการเก็บสัญญาณอื่น ๆ ชุดแถบความถี่ข้างของสัญญาณในแนวตั้งมีแอมพลิจูดที่ต่ำกว่าแนวนอนมาก

- 4) สัญญาณที่ได้จากการเก็บด้วยวิธีการเฉลี่ยบนโดเมนความถี่ที่ความเร็ว 800 รอบต่ออนาที ดังแสดงในรูปที่ 4-26 และ 4-27 มีค่าแอมพลิจูดที่ความถี่ $1 \times \text{GMF}$ เพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามขนาดของรอยแตกร้าว สำหรับสัญญาณที่วัดในแนวตั้งแอมพลิจูดที่ความถี่ $2 \times \text{GMF}$ และ $3 \times \text{GMF}$ มีแอมพลิจูดที่สูงเด่นแต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามขนาดของรอยแตกร้าว คาดว่าที่แอมพลิจูดของ $2 \times \text{GMF}$ และ $3 \times \text{GMF}$ มีค่าสูงเนื่องจากเกิดการเรโซแนนซ์ขึ้น จากภาพสัญญาณ 2 รูปนี้จะเห็นว่าสัญญาณรบกวนช่วงความถี่กว้างตั้งแต่ 600 – 1,200 Hz มีแอมพลิจูดที่สูงมากโดยเฉพาะสัญญาณที่วัดในแนวตั้ง สัญญาณรบกวนนี้คงเป็นเพราะการกระแทกกันของฟันเฟืองที่รุนแรงกว่าในกรณีความเร็ว 500 รอบต่ออนาที จึงทำให้ความถี่ธรรมชาติของชุดอุปกรณ์ทดลองถูกกระตุ้นให้มีแอมพลิจูดสูงกว่าด้วย ประกอบกับฮาร์มอนิกของ GMF อันดับที่ 2 และ 3 อยู่ในช่วงความถี่เหล่านี้จึงเกิดการเรโซแนนซ์ขึ้น สัญญาณรบกวนช่วงความถี่กว้างนี้ยังไปบดบังชุดแถบความถี่ข้างรอบ ๆ $1 \times \text{GMF}$ ให้ปรากฏเฉพาะบางฮาร์มอนิกเท่านั้น แม้จะใช้กระบวนการขยายความละเอียดของโดเมนความถี่ก็ยังไม่สามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจนทุก ๆ ระดับความยาวรอยแตกร้าว ดังแสดงในรูปที่ 4-28 และ 4-29 แต่เมื่อใช้การเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะสามารถสังเกตพบชุดแถบความถี่ข้างของเฟืองขับได้ชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 4-30 และ 4-31
- 5) สัญญาณที่ได้จากการเก็บด้วยวิธีการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะสำหรับกรณีความเร็ว 800 รอบต่ออนาที ดังแสดงในรูปที่ 4-30 และ 4-31 ยังคงปรากฏยอดสเปกตรัมในช่วงความถี่ 600 – 1200 Hz มีแอมพลิจูดสูงอยู่ โดยเฉพาะสัญญาณที่วัดในแนวตั้งยังคงมีขนาดที่สูงมากเมื่อเทียบกับกรณีความเร็ว 500 รอบต่ออนาที ที่สามารถกำจัดออกไปได้จนเกือบหมด คาดว่าเป็นเพราะการสั่นสะเทือนด้วยองค์ประกอบความถี่เหล่านี้ของสัญญาณบนโดเมนเวลาที่ทำให้ไม่สามารถสังเกตพบการสั่นสะเทือนที่มีคาบเท่ากับคาบการขบของเฟืองได้ ค่าแอมพลิจูดของ $1 \times \text{GMF}$ มีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามขนาดของรอยแตกร้าว สำหรับการวัดทั้ง 2 ทิศทาง

4-5-5 ภาพสัญญาณเซปต์รัม

ค่าสูงสุดของแกมมาจุดที่ใช้แสดงผลคือ 4 dB ยกเว้นในกรณีการเก็บสัญญาณด้วยการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะที่มีค่าเท่ากับ 8 dB พิสัยของโดเมนคิวิเฟรนซีสำหรับการเก็บสัญญาณด้วยวิธีการเฉลี่ยบนโดเมนความถี่และการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ กรณีการวัดสัญญาณที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาทีคือ 500 มิลลิวินาที ในขณะที่การวัดสัญญาณที่ความเร็ว 800 รอบต่อนาทีคือ 250 มิลลิวินาที เมื่อใช้กระบวนการขยายความละเอียดของโดเมนความถี่จะมีพิสัยกว้างขึ้น 4 เท่า รูปสัญญาณเรียงตามลำดับสภาวะการทดลองดังต่อไปนี้

- 1) สัญญาณที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที
 - รูปที่ 4-32 : ภาวะ 300 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging
วัดสัญญาณแนวระดับ
 - รูปที่ 4-33 : ภาวะ 300 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging
วัดสัญญาณแนวตั้ง
 - รูปที่ 4-34 : ภาวะ 300 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Zoom Processing
วัดสัญญาณแนวระดับ
 - รูปที่ 4-35 : ภาวะ 300 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Zoom Processing
วัดสัญญาณแนวตั้ง
 - รูปที่ 4-36 : ภาวะ 300 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging
วัดสัญญาณแนวระดับ
 - รูปที่ 4-37 : ภาวะ 300 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging
วัดสัญญาณแนวตั้ง
- 2) สัญญาณที่ความเร็ว 800 รอบต่อนาที
 - รูปที่ 4-38 : ภาวะ 300 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging
วัดสัญญาณแนวระดับ
 - รูปที่ 4-39 : ภาวะ 300 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging
วัดสัญญาณแนวตั้ง
 - รูปที่ 4-40 : ภาวะ 300 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Zoom Processing
วัดสัญญาณแนวระดับ

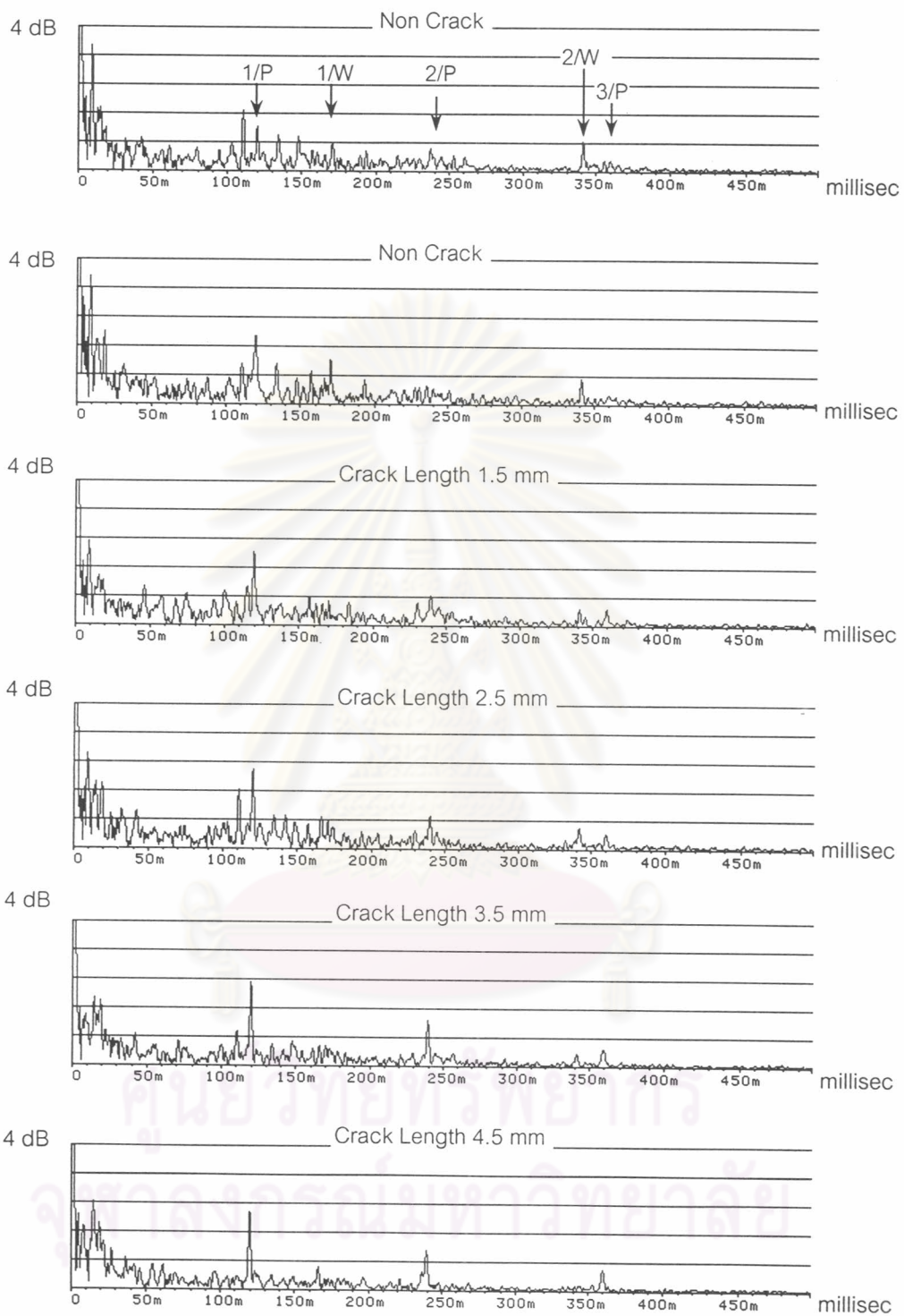
รูปที่ 4-41 : ภาวะ 300 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Zoom Processing
วัดสัญญาณแนวตั้ง

รูปที่ 4-42 : ภาวะ 300 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging
วัดสัญญาณแนวระดับ

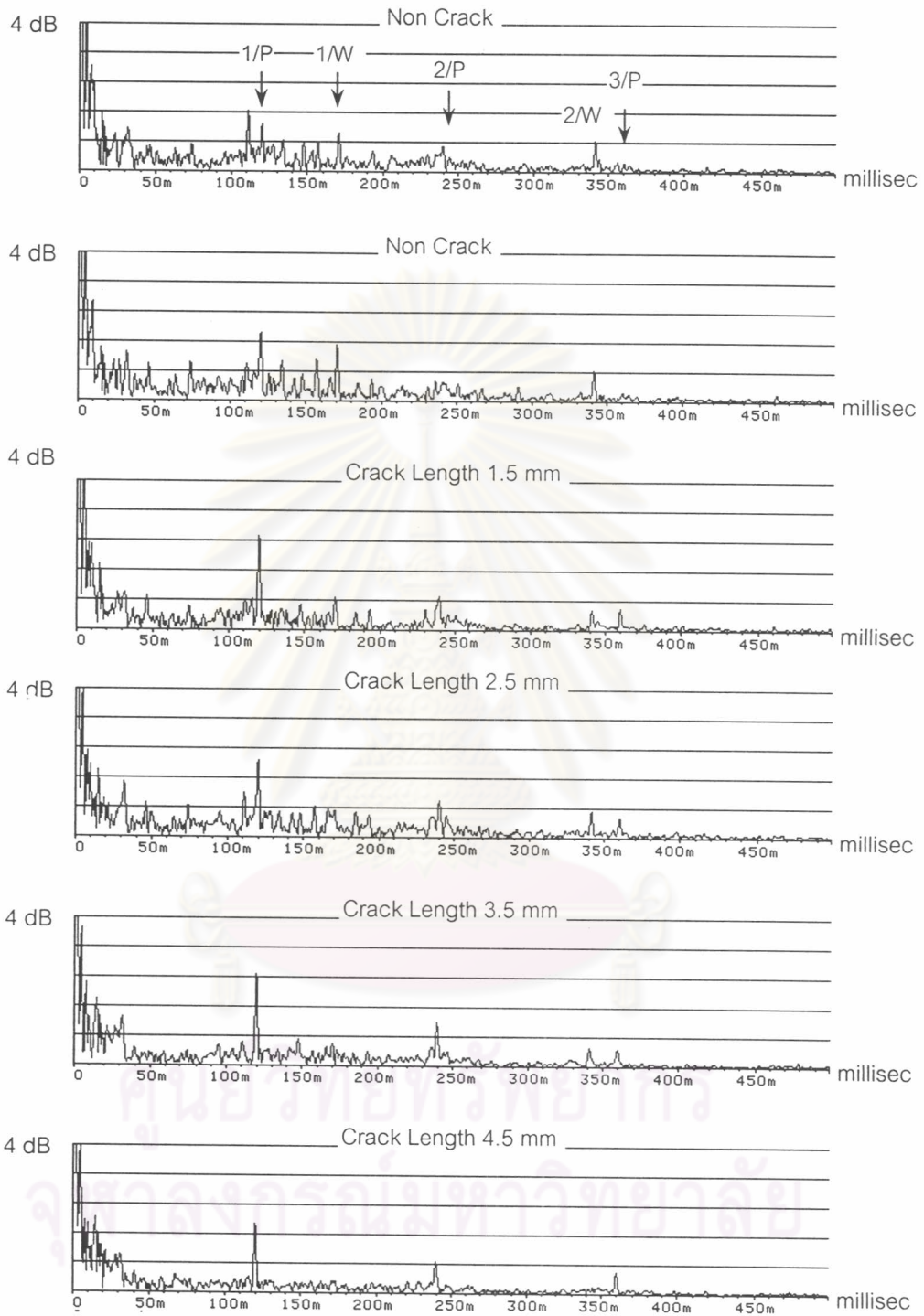
รูปที่ 4-43 : ภาวะ 300 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging
วัดสัญญาณแนวตั้ง



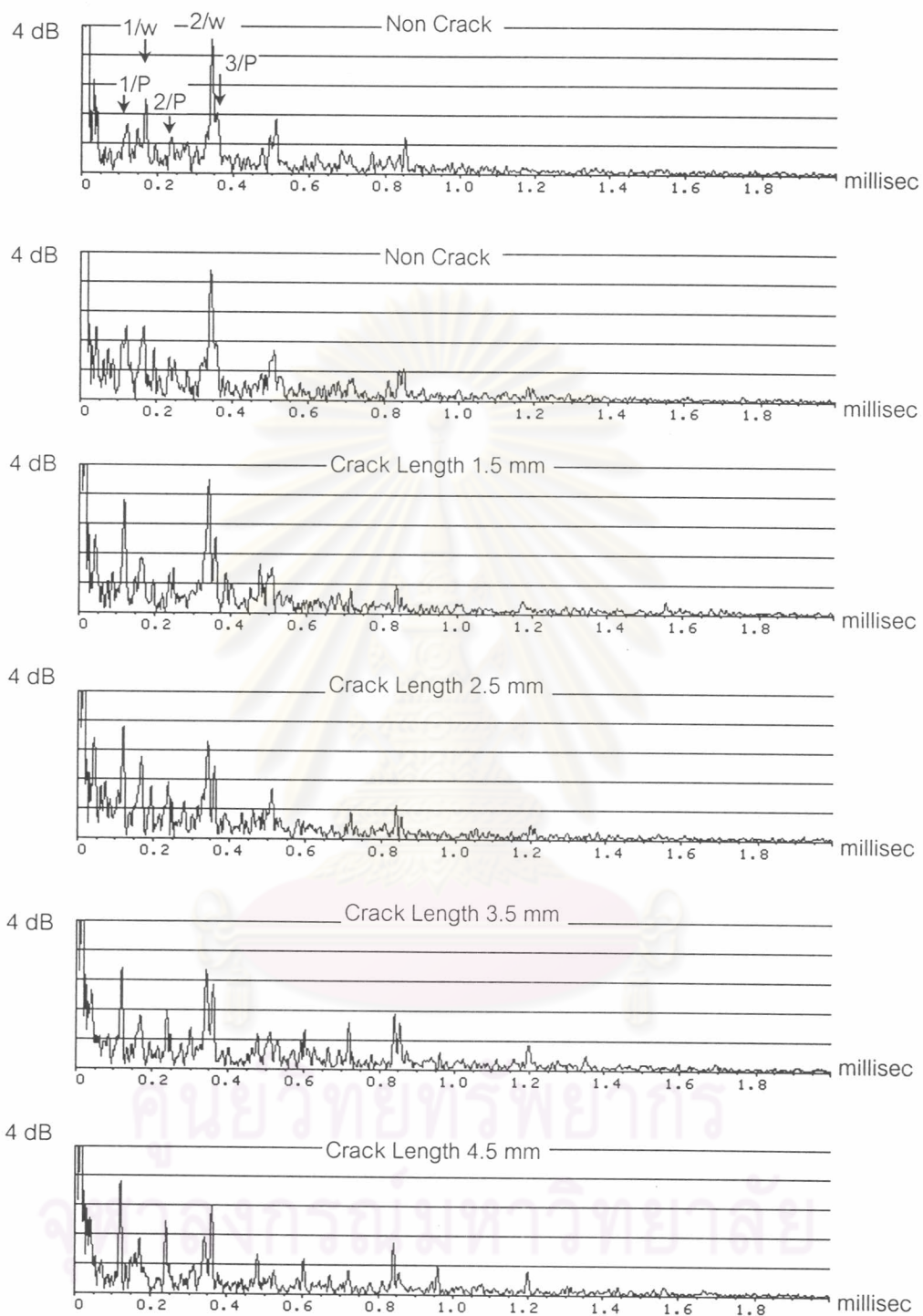
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



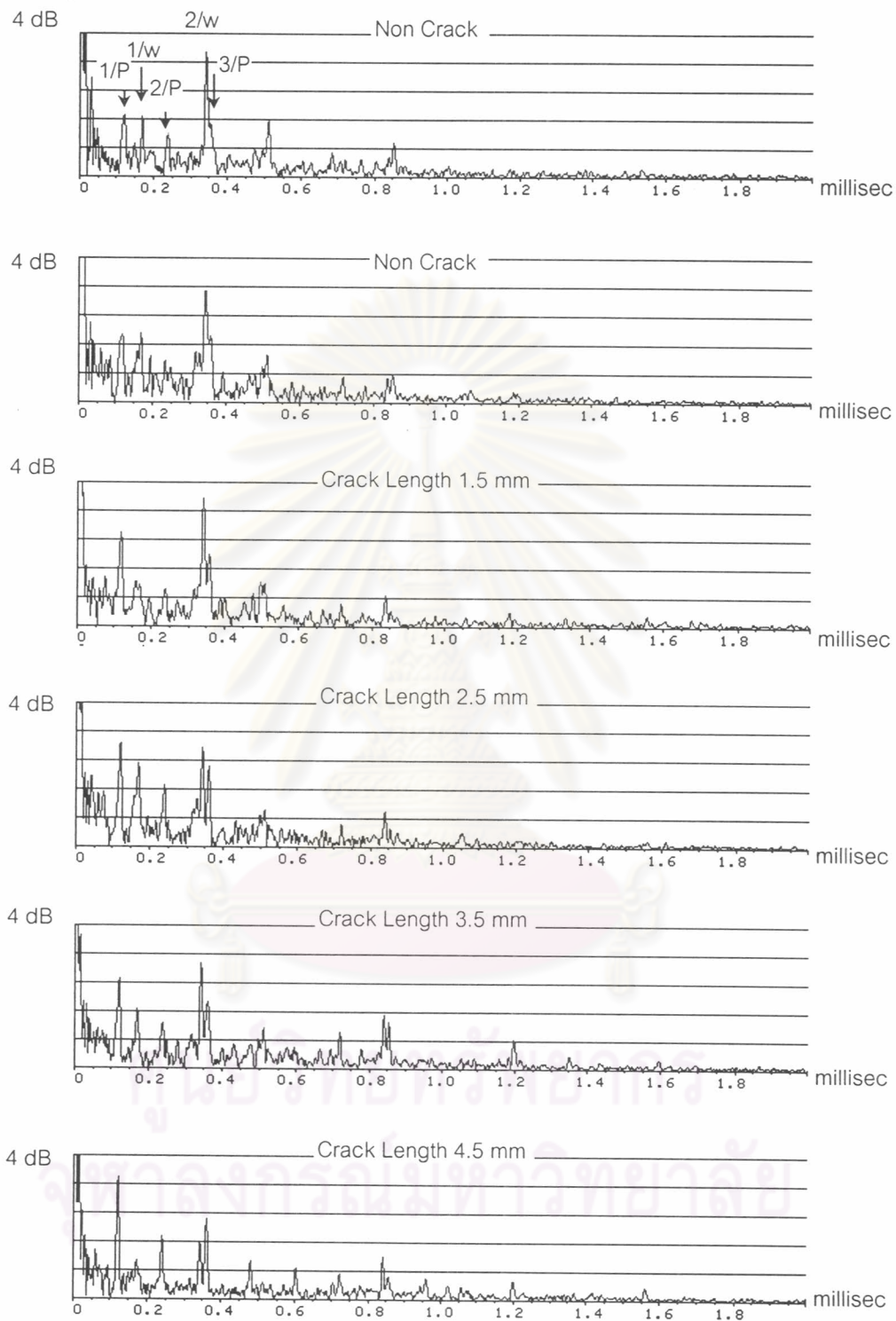
รูปที่ 4-32 สัญญาณเซปัสตรีม : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ภาวะ 300 วัตต์ วัดสัญญาณแนวระดับ
เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging



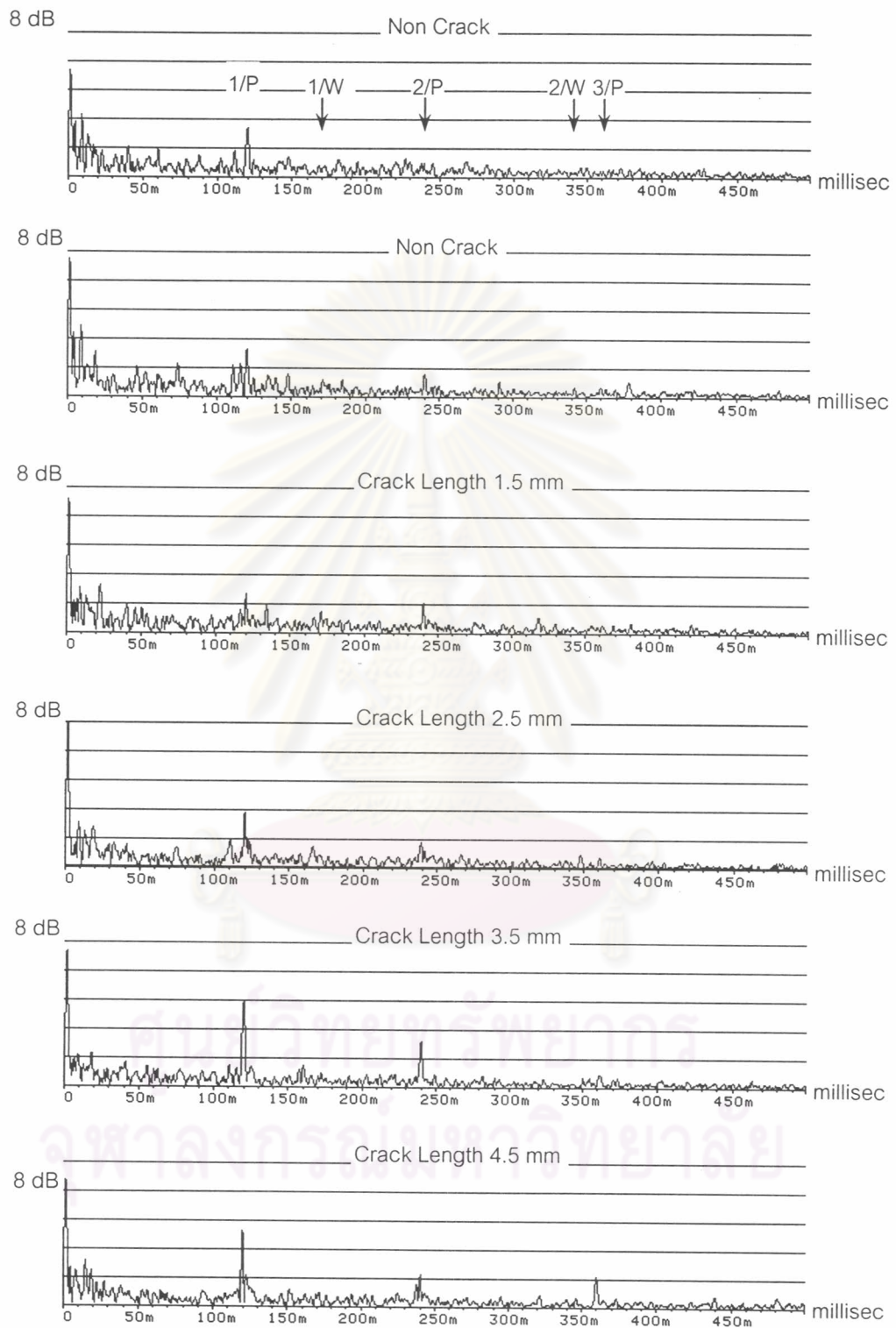
รูปที่ 4-33 สัญญาณเซปัสตรีม : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์ วัดสัญญาณแนวตั้ง
เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging



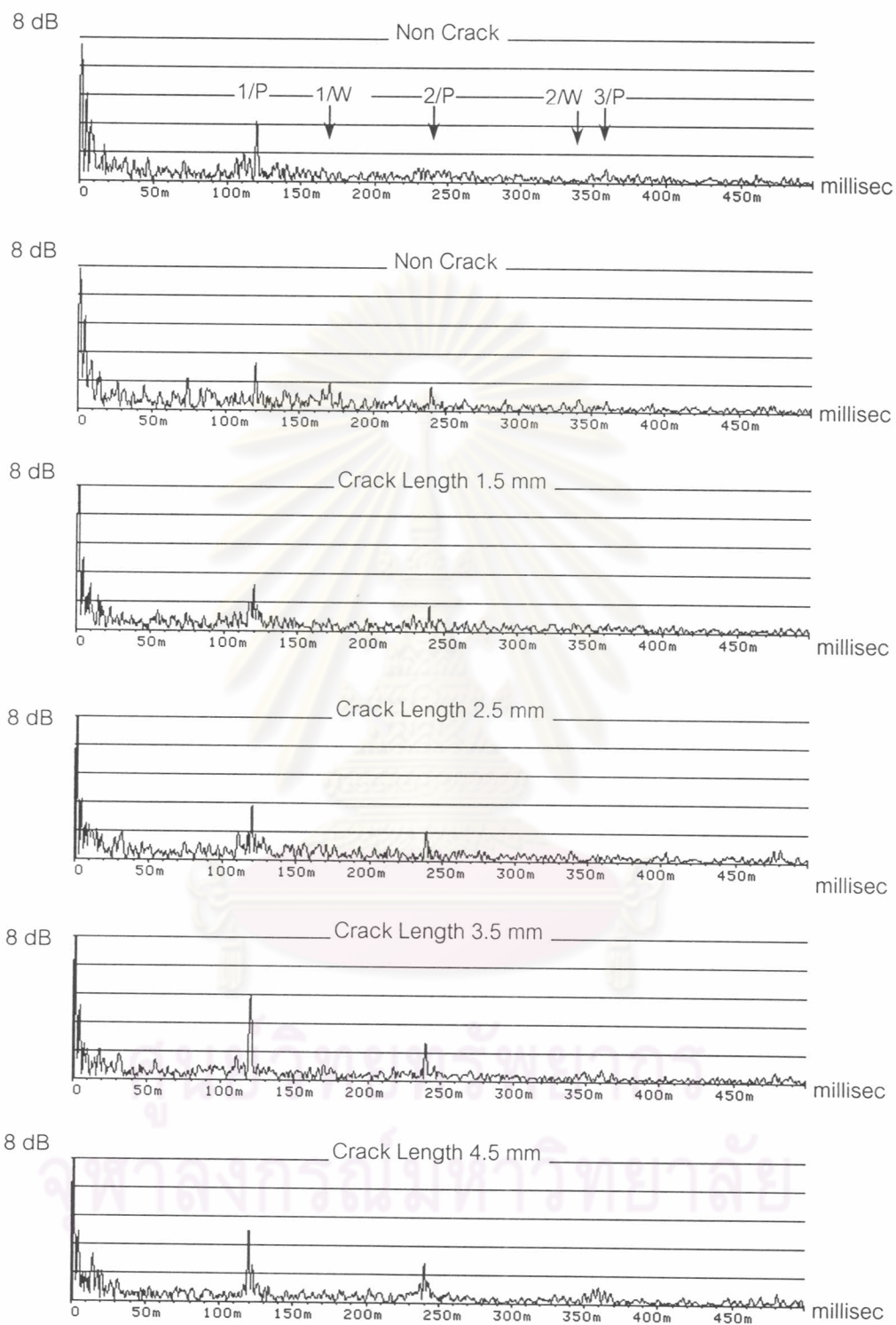
รูปที่ 4-34 สัญญาณเชปส์ตรัม : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ภาวะ 300 วัตต์ วัดสัญญาณแนวระดับ
เก็บสัญญาณด้วยวิธี Zoom Processing



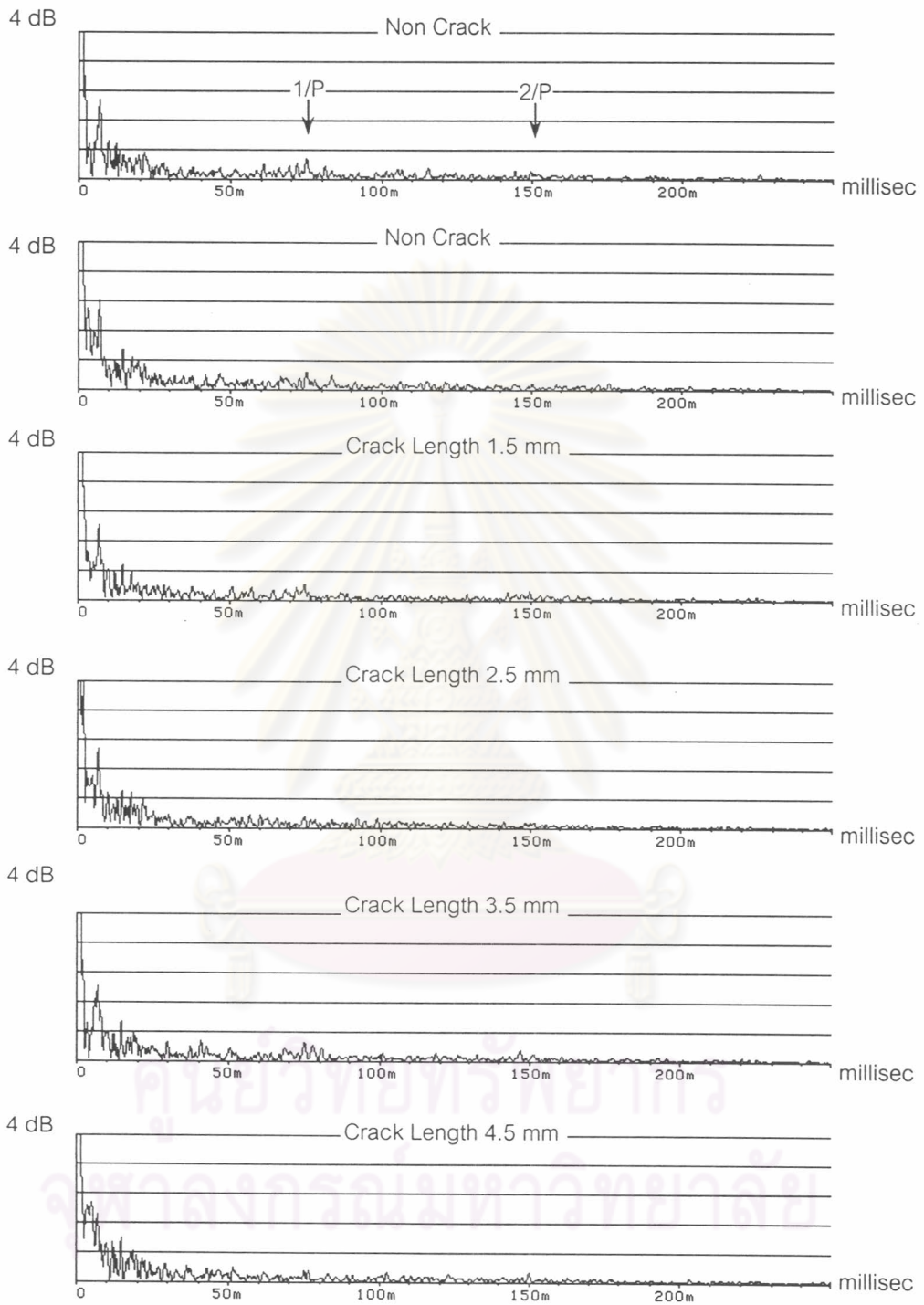
รูปที่ 4-35 สัญญาณเซปัสตรัม : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ภาวะ 300 วัตต์ วัดสัญญาณแนวตั้ง
เก็บสัญญาณด้วยวิธี Zoom Processing



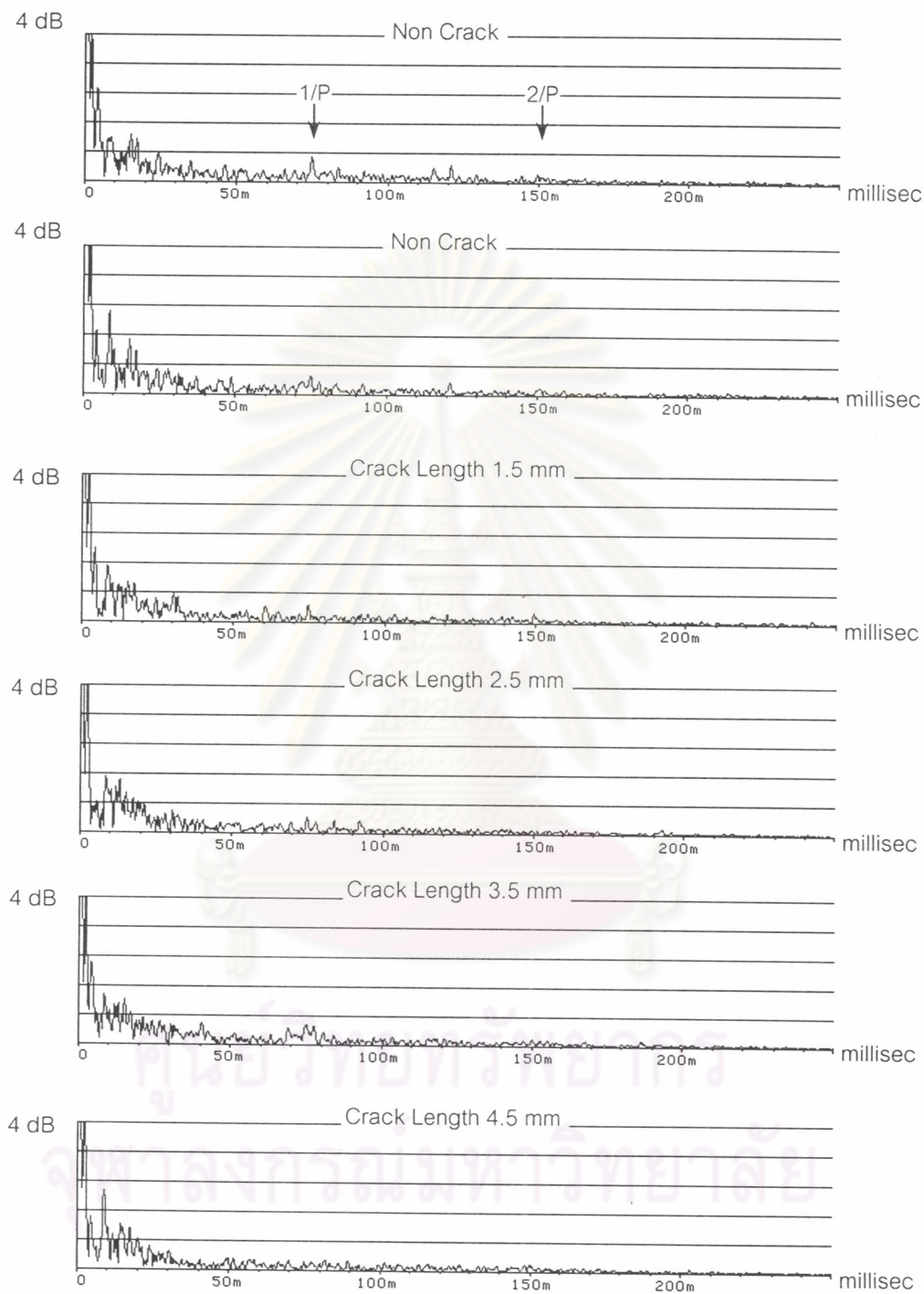
รูปที่ 4-36 สัญญาณเชปส์ตรัม : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์ วัดสัญญาณแนวระดับ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging



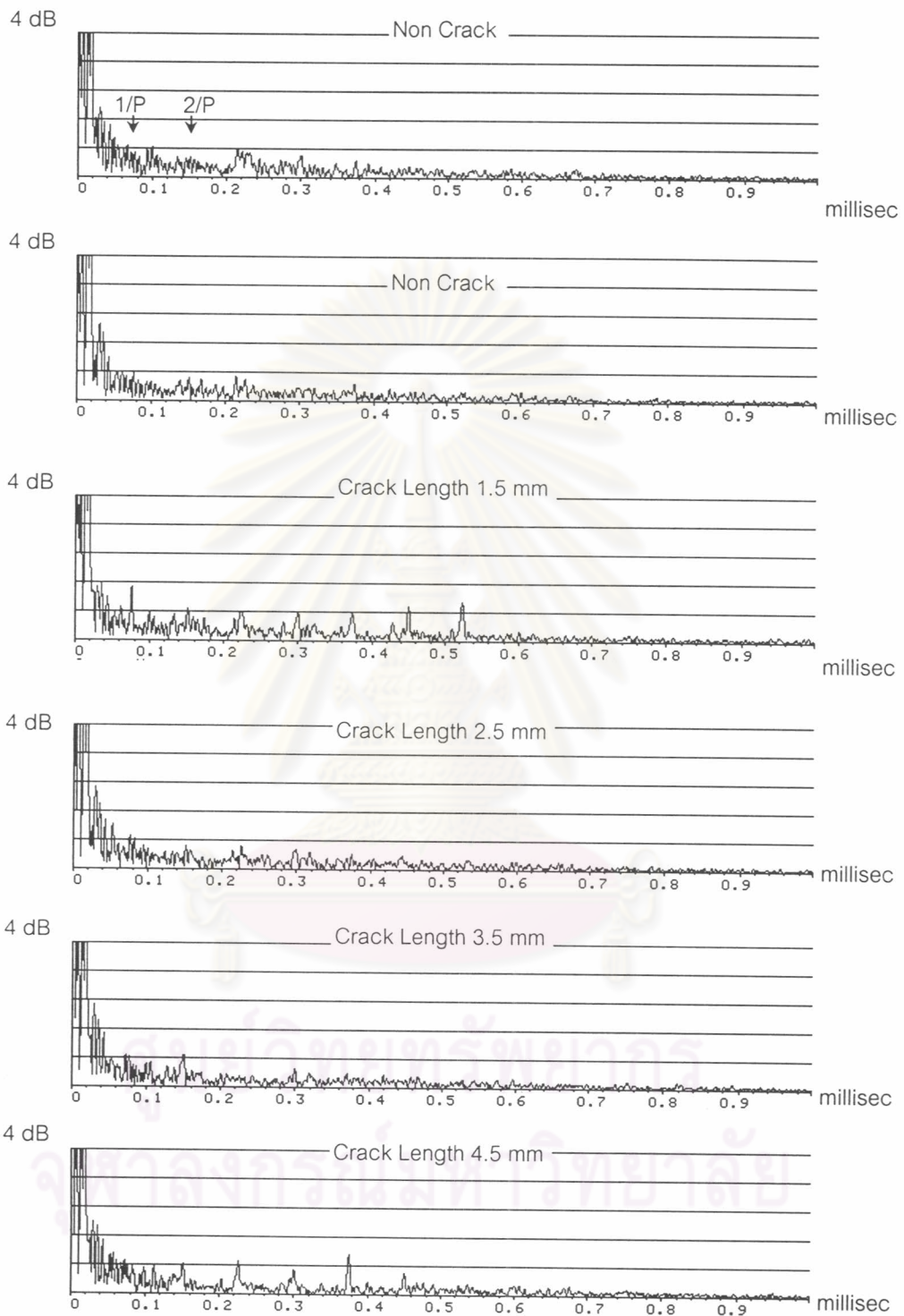
รูปที่ 4-37 สัญญาณเชิงสัณฐาน : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์ วัดสัญญาณแนวตั้ง
เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging



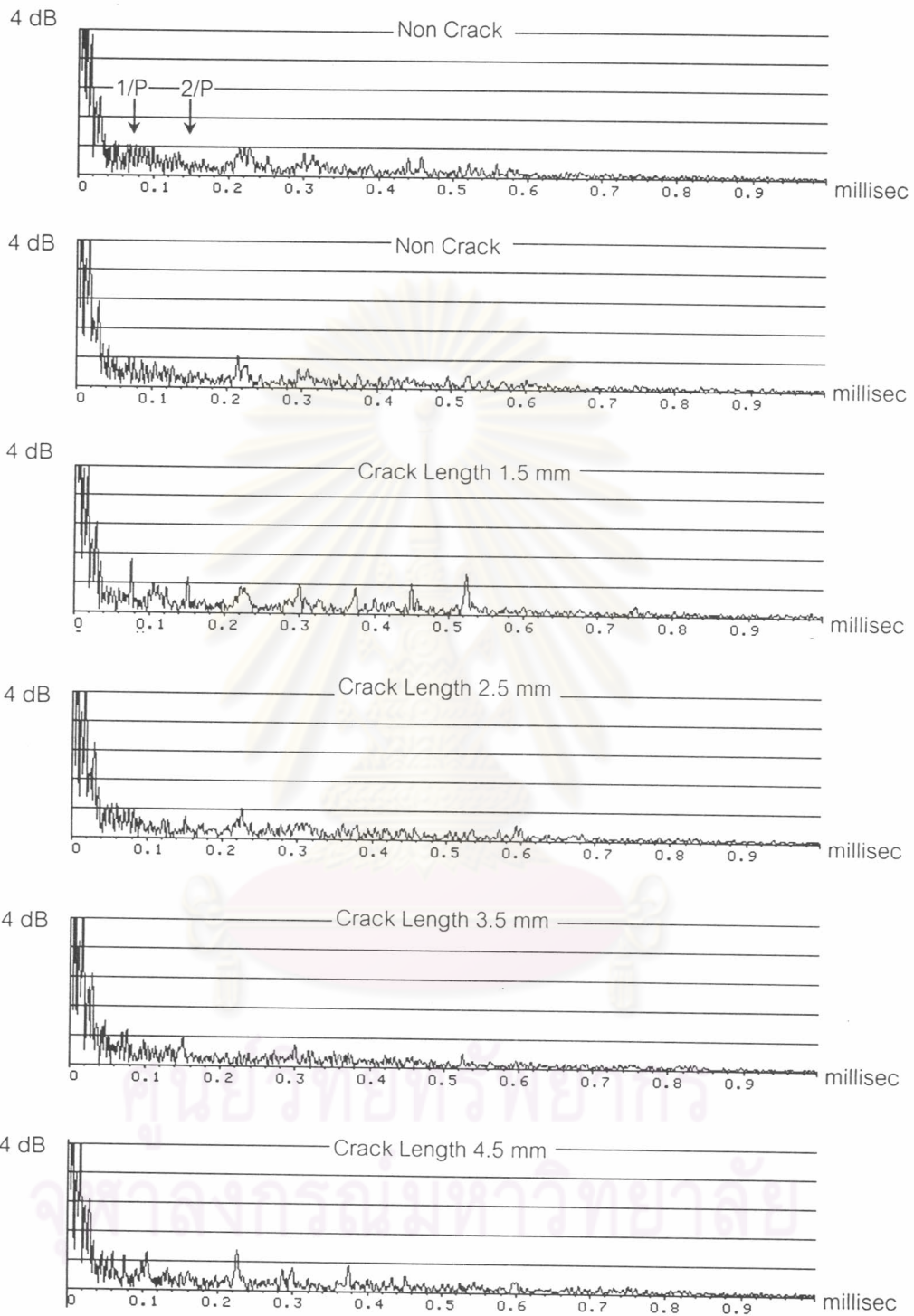
รูปที่ 4-38 สัญญาณเชปส์ตรัม : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์ วัดสัญญาณแนวระดับ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging



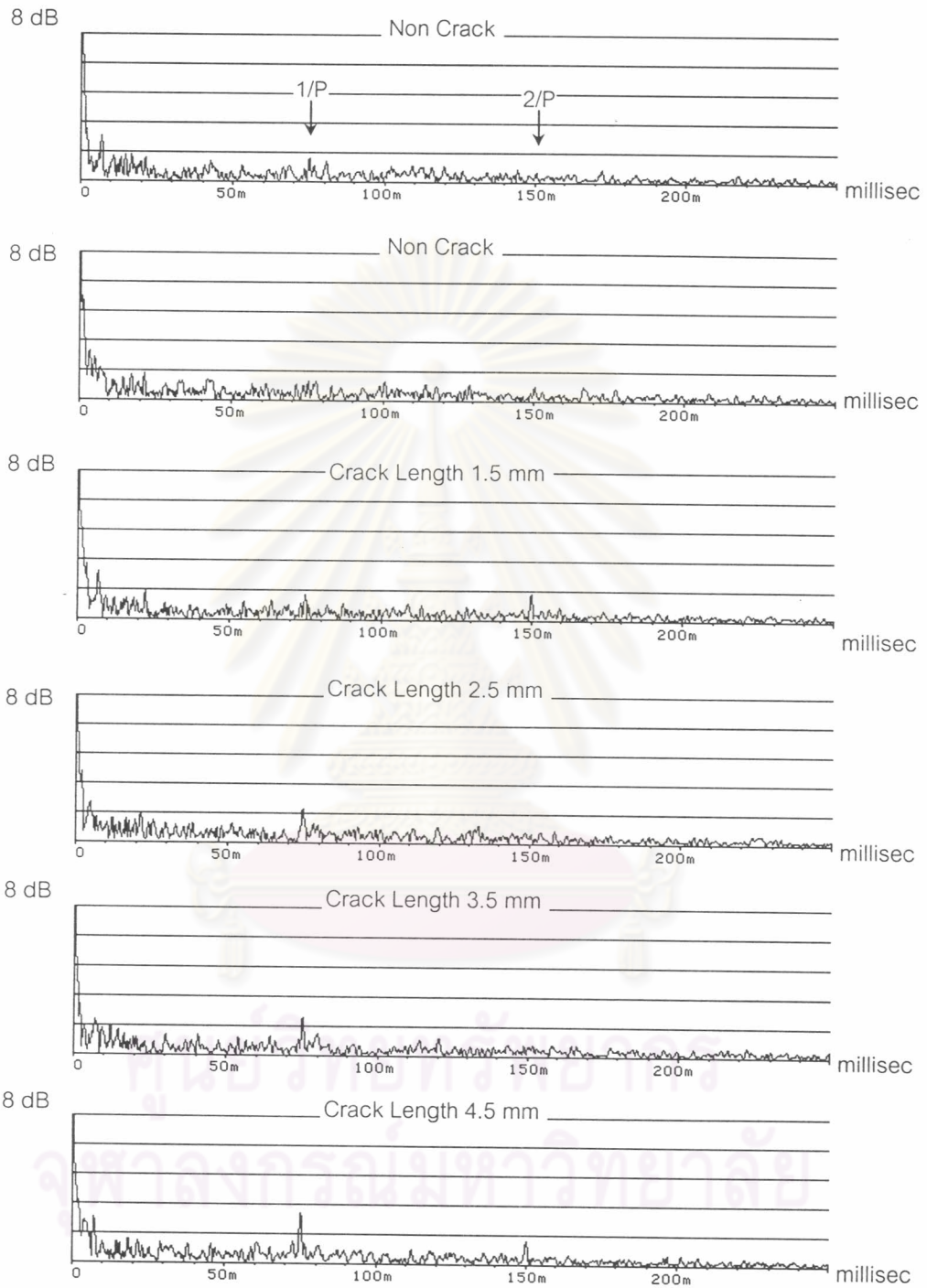
รูปที่ 4-39 สัญญาณเซปัสต์รัม : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์ วัดสัญญาณแนวตั้ง
เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging



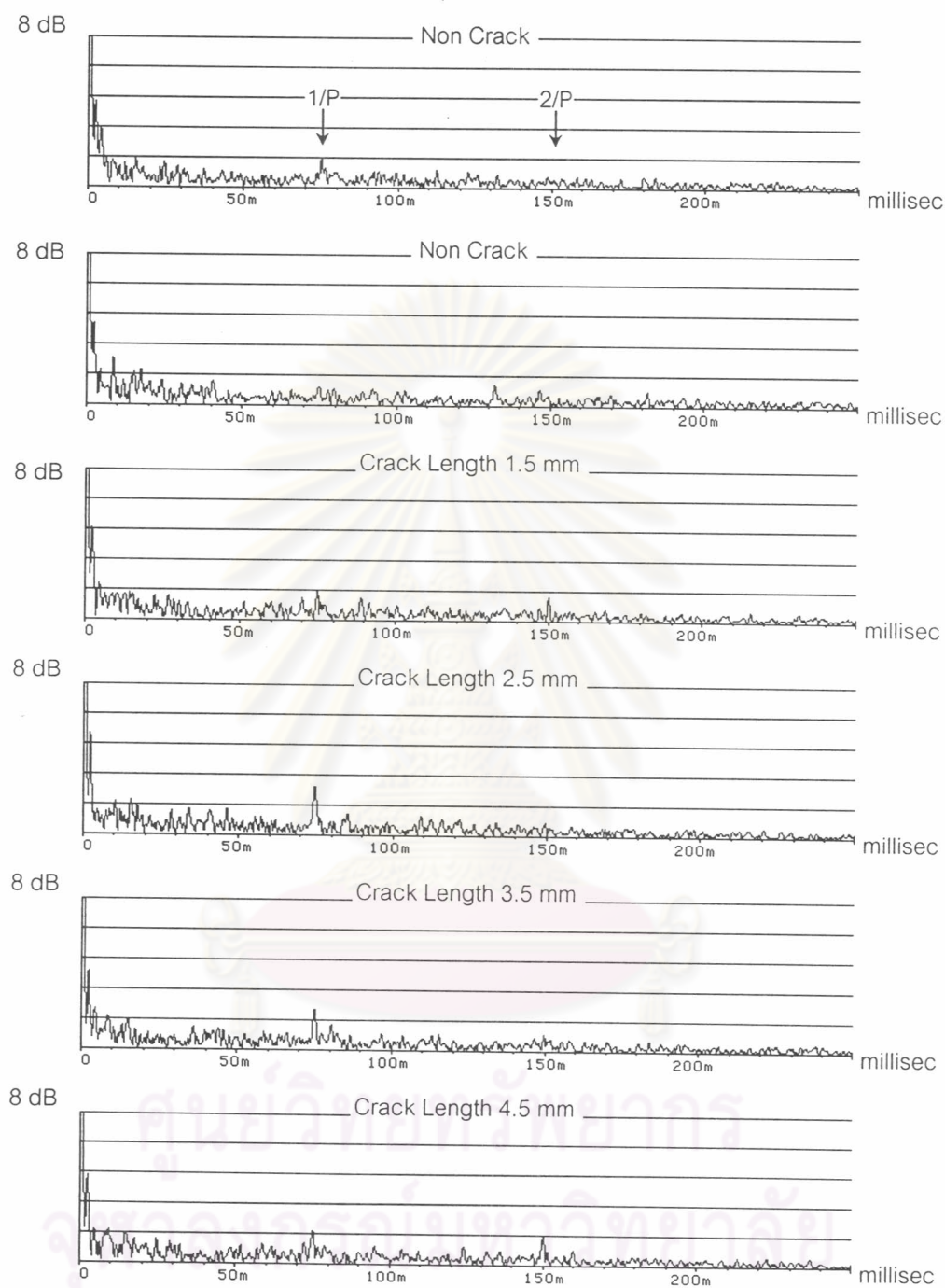
รูปที่ 4-40 สัญญาณเชปส์ตีร์ม : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์ วัดสัญญาณแนวระดับ
เก็บสัญญาณด้วยวิธี Zoom Processing



รูปที่ 4-41 สัญญาณเซปัสตรัม : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์ วัดสัญญาณแนวตั้ง
เก็บสัญญาณด้วยวิธี Zoom Processing



รูปที่ 4-42 สัญญาณเซปัสตรัม : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์ วัดสัญญาณแนวระดับ
เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging



รูปที่ 4-43 สัญญาณเซปส์ตรัม : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์ วัดสัญญาณแนวตั้ง
เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging

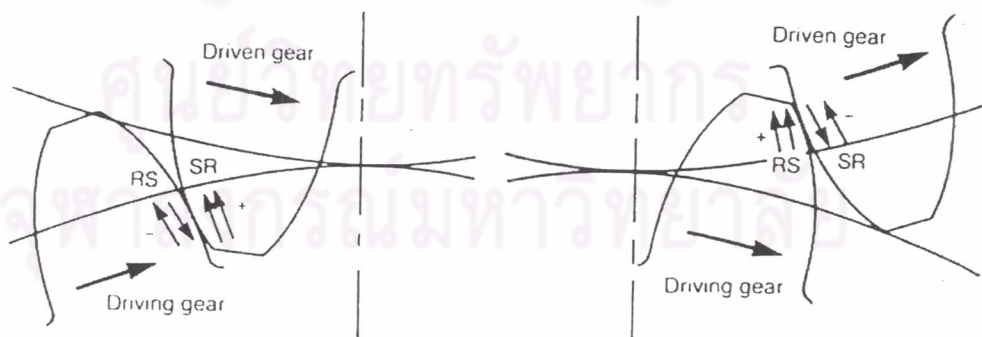
4-5-6 อภิปรายผลของสัญญาณเซปส์ตรัม

- 1) สัญญาณที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที เก็บสัญญาณด้วยวิธีการเคลื่อนโดเมนความถี่ ดังแสดงในรูปที่ 4-32 และ 4-33 สามารถสังเกตเห็นยอดเซปส์ตรัมที่ควิเฟรนซี 1/P , 2/P , 3/P ได้ชัดเจน เพียงแต่ว่า 3/P จะปรากฏชัดเมื่อเพื่องมีรอยแตกกว้างแล้ว และยังสามารถสังเกตเห็นยอดเซปส์ตรัมที่ควิเฟรนซี 1/W และ 2/W โดยจะเห็นเด่นชัดในกรณีเพื่องที่ไม่มีรอยแตกกว้างทั้งสองตัว แต่แทบไม่ปรากฏในเพื่องที่มีรอยแตกกว้างยาว 4.5 มม. เกมนิจุดของ 1/P เปลี่ยนแปลงไม่มากนักเมื่อความยาวรอยแตกกว้างเพิ่มขึ้น การเก็บสัญญาณด้วยการเคลื่อนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ ดังแสดงในรูปที่ 4-36 และ 4-37 ทำให้ขนาดของสัญญาณโดยรวมสูงขึ้นประมาณ 2 เท่า และสามารถสังเกตเห็นยอดเซปส์ตรัมที่ควิเฟรนซี 1/P และ 2/P ได้ชัดเจน ในขณะที่ 3/P สังเกตเห็นเฉพาะกรณีเพื่องที่มีรอยแตกกว้างยาว 4.5 มม.เท่านั้น ส่วนควิเฟรนซี 1/W และ 2/W ไม่สามารถสังเกตเห็นยอดสัญญาณได้ เกมนิจุดของ 1/P มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อรอยแตกกว้างยาวมากขึ้น
- 2) สัญญาณที่ความเร็ว 800 รอบต่อนาที เก็บสัญญาณด้วยวิธีการเคลื่อนโดเมนความถี่ ดังแสดงในรูปที่ 4-38 และ 4-39 สามารถสังเกตเห็นยอดเซปส์ตรัมได้เฉพาะที่ควิเฟรนซี 1/P ซึ่งมีเกมนิจุดต่ำ ค่าเกมนิจุดของ 1/P แทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามขนาดของรอยแตกกว้าง การเก็บสัญญาณด้วยการเคลื่อนโดเมนเวลาเข้าจังหวะทำให้สังเกตเห็นยอดเซปส์ตรัมที่ควิเฟรนซี 1/P ชัดเจนขึ้น รวมทั้งยังมีโอกาสเห็นยอดเซปส์ตรัมที่ควิเฟรนซี 2/P ได้ในเพื่องที่มีรอยแตกกว้างยาว 1.5 และ 4.5 มม. ค่าเกมนิจุดของยอดเซปส์ตรัมที่ควิเฟรนซี 1/P มีขนาดเพิ่มขึ้นตามขนาดของรอยแตกกว้าง
- 3) การเก็บสัญญาณด้วยกระบวนการขยายความละเอียดของโดเมนความถี่ทำให้พิสัยของควิเฟรนซีเพิ่มขึ้นจึงสามารถสังเกตเห็นยอดเซปส์ตรัมได้จนถึงราฮ์มอนิกที่ 10 ของ 1/P สำหรับการเก็บสัญญาณที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 4-34 และ 4-35 และสังเกตเห็นยอดเซปส์ตรัมได้จนถึงราฮ์มอนิกที่ 7 ของ 1/P สำหรับการเก็บสัญญาณที่ความเร็ว 800 รอบต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 4-40 และ 4-41 สามารถสังเกตเห็นยอดเซปส์ตรัมที่ควิเฟรนซี 1/P , 2/P , 3/P , 1/W และ 2/W ได้อย่างชัดเจน ยอดเซปส์ตรัมที่ควิเฟรนซี 2/W ในสภาวะความเร็ว 500 รอบต่อนาที มีเกมนิจุดที่สูงเด่นมาก

- 4) การเก็บสัญญาณด้วยกระบวนการขยายความละเอียดของโดเมนความถี่ พิสัยของคิเวเฟรนซี กว้างมากขึ้น ความละเอียดของโดเมนจึงลดลง ทำให้บางยอดเซปส์ตรัมปรากฏที่คิเวเฟรนซี ซึ่งไม่ตรงกับคาบการหมุนของทั้งเฟืองขับ และเฟืองตาม

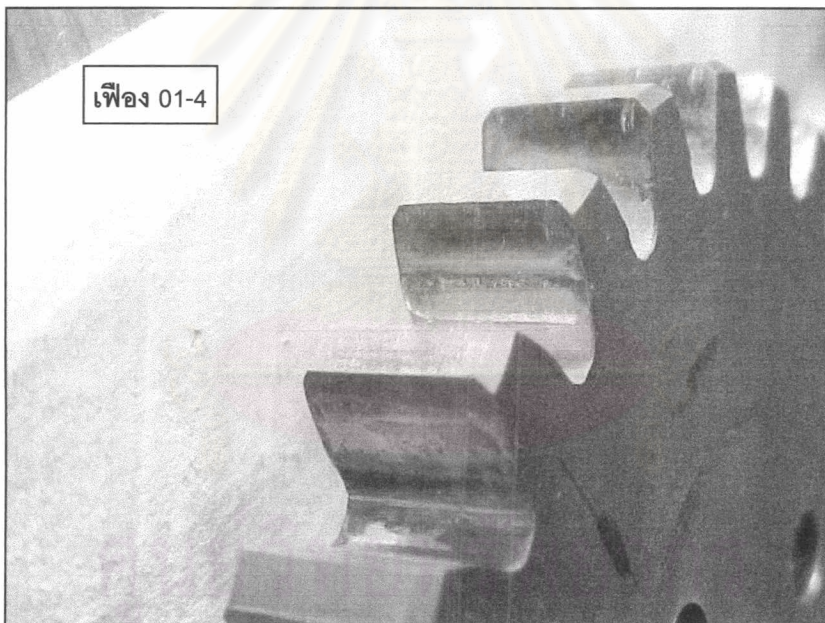
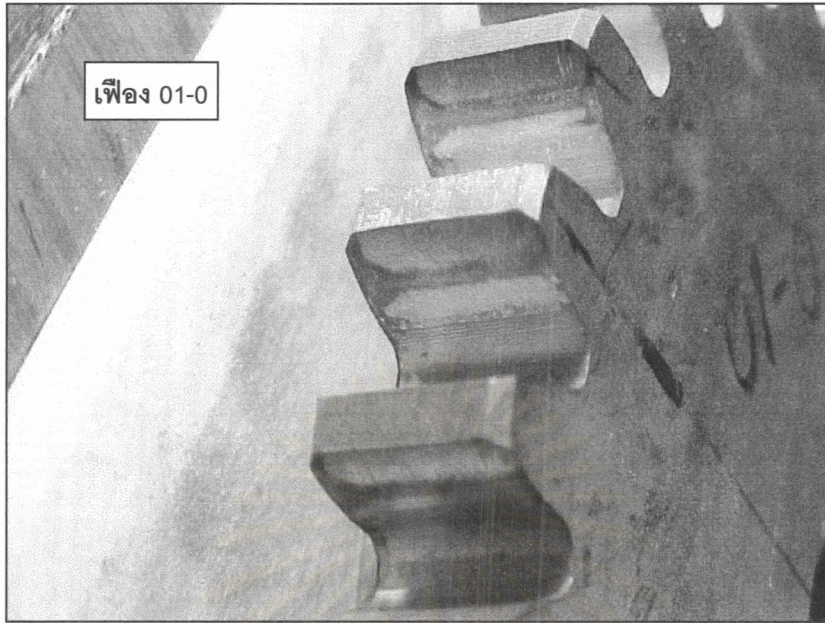
4 - 6 รูปแบบการสึกหรอภายหลังการทดลอง

ฟันเฟืองมีการสึกหรอเพียงเล็กน้อยบริเวณเหนือและใต้ตำแหน่งเส้นพิตช์ โดยการสึกหรอ จะปรากฏบริเวณดีเดนดัมมากกว่า⁴ เนื่องจากเมื่อชุดเฟืองเคลื่อนที่ฟันคู่ที่ขบกันจะเคลื่อนที่ สัมพัทธ์กันด้วยการกลิ้งเพียงอย่างเดียว ณ บริเวณเส้นพิตช์ แต่ในบริเวณแอดเดนดัมและดีเดนดัม จะมีการเคลื่อนที่เป็นแบบผสมทั้งแบบกลิ้งและไถล เฟืองขับมีการเคลื่อนตัวโดยเริ่มเข้าขบที่ บริเวณโคนฟันก่อนแล้วเคลื่อนออกจากการขบกันที่บริเวณปลายฟัน ในขณะที่การไถลจะมีทิศทางออกจากบริเวณเส้นพิตช์ดังในรูปที่ 4-44 ทำให้การกลิ้งและการไถลมีทิศตรงกันข้ามกัน (Negative Sliding) ในบริเวณดีเดนดัมซึ่งมักเป็นสาเหตุให้เกิดจุดเริ่มต้นของหลุมบนพื้นผิว (Surface-Origin Pitting) [19] รูปที่ 4-45 เป็นตัวอย่างการสึกหรอที่เกิดขึ้นบนเฟือง 01-0 ที่ไม่มี รอยแตกร้าว และเฟือง 01-4 ที่มีรอยแตกร้าวยาว 4.5 มม. จะสังเกตเห็นได้ว่าสำหรับเฟือง 01-4 นี้มีการสึกหรอลักษณะเป็นหลุมบริเวณดีเดนดัมของฟันซี่ที่ตามหลังฟันซี่ที่แตกร้าว คาดว่าเกิดขึ้นเนื่องจากการไถ้ออกจากตำแหน่งประกบของฟันซี่ที่แตกร้าวทำให้ช่องว่างระหว่างฟันคู่นี้แคบเข้ามา เมื่อทำการขบกับเฟืองตามปลายฟันของเฟืองตามจึงชุดเอาเนื้อทองเหลืองบริเวณนี้ออกไป ช่องว่างที่แคบลงนี้ยังทำให้ปรากฏการสึกหรอบริเวณด้านหลังของฟันซี่ที่แตกร้าวด้วย



รูปที่ 4-44 ภาพจำลองแสดงทิศทางการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง (R) และแบบไถล (S) ของฟันเฟือง

⁴ ภาพตัวอย่างการสึกหรอของเฟืองแต่ละตัวแสดงไว้ในภาคผนวก ค.



รูปที่ 4-45 การสีกรอของเฟือง 01-0 และ 01-4 ภายหลังจากการทดลอง