

การทำนายความชุกของผิวสีน้ำตาลในกระบวนการกลึงโดยประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเลขของ
แรงตัดพลวัต



นางสาวทองพรรณราย มัยโชติ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

In process surface roughness prediction in turning process utilizing wavelet transform
of dynamic cutting force.

Miss Thongphannarai Maiyachote



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

Department of Industrial Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การทำนายความขรุขระของผิวชิ้นงานในกระบวนการ
กลึงโดยประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเลทของ แรงดัดพลวัต
โดย นางสาวทองพรรณราย มัยโชติ
สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก รองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชาย พัวจินดาเนตร)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิภาวี ธรรมมาภรณ์พิลาศ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ สมชาย พวงเพิกคี่ก)



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	12
1.3 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	13
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	13
บทที่ 2.....	15
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	15
2.1 กระบวนการตัดเฉือน (Machining Process)	15
2.2 กระบวนการกลึง	15
2.3 เงื่อนไขของการตัดในกระบวนการกลึง (Cutting Conditions in turning)	16
2.4 วัสดุที่ใช้ทำเครื่องมือตัด	17
2.5 แรงในการตัด [11].....	18
2.6 การเกิดเศษโลหะ [11]	22
2.7 ทฤษฎีความขรุขระผิว	30
2.8 การประมวลผลสัญญาณ (Signal Processing)	31
2.9 การแปลงเวฟเล็ต (Wavelet Transform)	33
2.10 เวฟเลตดาเบชีส์ (Daubechies wavelets).....	36

2. 11 วิธีประมาณด้วยสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Method).....	39
2.12 การวิเคราะห์ความถดถอย (Multiple Regression).....	41
2.13 การวิเคราะห์ผล	42
2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	43
บทที่ 3.....	48
วิธีดำเนินการวิจัย	48
3.1 การออกแบบการทดลอง	48
3.2 ปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง.....	48
3.3 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	50
3.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	54
3.5 การออกแบบการทดลอง	55
3.6 การพัฒนาสมการทำนายความชรุชะผิวชิ้นงานขณะตัด	59
3.7 การวิเคราะห์ข้อมูล	62
บทที่ 4.....	64
วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	64
4.1 ผลการทดลอง.....	64
4.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความชรุชะผิวและแรงตัดพลวัต	73
4.3 การแปลงเวฟเลขของแรงตัดพลวัตจากการเกิดเศษโลหะและความชรุชะผิวชิ้นงาน	81
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการตัด ความชรุชะผิว และ อัตราส่วนของแรง กับปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อค่าความชรุชะผิว	107
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชรุชะผิวชิ้นงานและอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟของแรงตัดพลวัตในโดเมนเวลา.....	121
4.7 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	124

4.8 สมการทำนายความขรุขระของผิวชิ้นงาน.....	133
4.10 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล	142
บทที่ 5.....	143
สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	143
5.1 สรุปผลการวิจัย	143
5.2 อภิปรายผลการวิจัย.....	144
5.3 ข้อจำกัดและอุปสรรคในงานวิจัย.....	145
5.4 ข้อเสนอแนะ	145
รายการอ้างอิง.....	146
ภาคผนวก ก	150
โปรแกรมการแปลงเวฟเลขชนิดดอเบซีส์สำหรับวิเคราะห์ความขรุขระผิว	150
ภาคผนวก ข	162
โปรแกรมการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วสำหรับวิเคราะห์ความขรุขระผิว	162
ภาคผนวก ค	165
การวิเคราะห์ความขรุขระผิวโดยการแปลงเวฟเลขสำหรับเงื่อนไขการตัดต่างๆ.....	165
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	221

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

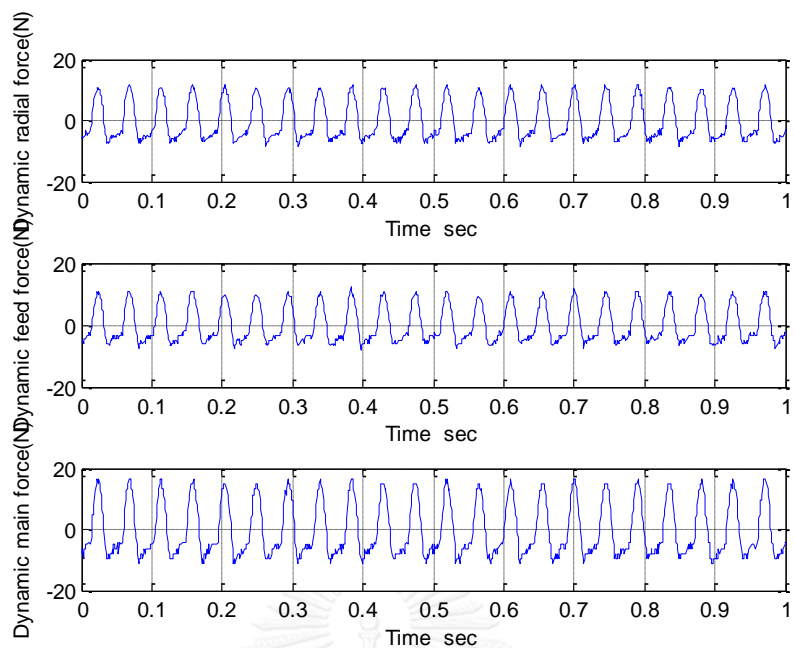
เนื่องจากปัจจุบันวงการอุตสาหกรรมในประเทศไทยได้มีการขยายตัวอย่างรวดเร็วและมีการแข่งขันทางการตลาดที่สูงขึ้นดังนั้นผู้ผลิตจึงควรตระหนักถึงการพัฒนาคูณภาพของผลิตภัณฑ์ กระบวนการผลิตรวมถึงเทคโนโลยีใหม่ในการปรับปรุงกระบวนการผลิตให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น เพื่อเพิ่มผลผลิตให้มากขึ้นตามอัตราการขยายตัวของเศรษฐกิจ ซึ่งปัจจุบันประเทศไทยนั้นได้เป็นสมาชิกประชาคมเศรษฐกิจอาเซียน(Asian Economic Community : AEC) ดังนั้นผลิตภัณฑ์จึงต้องได้มาตรฐานสากลมาตรฐานสากล ISO (International Standardization Organization) หรือตามมาตรฐานของเยอรมัน DIN (Deutsche Industries Norm) จึงมีการนำเครื่องจักรอัจฉริยะมาใช้ในกระบวนการผลิตซึ่งเครื่องจักรอัจฉริยะนี้มีการควบคุมเชิงตัวเลขด้วยระบบคอมพิวเตอร์ เรียกว่าเครื่องซีเอ็นซี (Computer Numerical Control : CNC) การใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมการทำงานของเครื่องจักรกลต่างๆ เช่น เครื่องกัดซีเอ็นซี เครื่องกลึงซีเอ็นซี เครื่องเจียระไน เครื่อง EDM และอื่นๆ โดยการป้อนข้อมูลตัวเลขให้กับเครื่องจักรในรูปแบบรหัส Code ซึ่งสามารถควบคุมและตรวจสอบตัวเอง เรียกว่า (Intelligent manufacturing System :IMS) คุณภาพของชิ้นงานกลึงนั้นมีความสำคัญต่อคุณสมบัติของชิ้นงานในการใช้งานต่างๆโดยชิ้นงานกลึงที่ดีควรมีความขรุขระผิวที่น้อยหรือมีความเรียบผิวที่มาก เนื่องจากผิวของชิ้นงานส่งผลต่อคุณสมบัติและประสิทธิภาพในการนำไปใช้งานของชิ้นงานนั้นๆ ยกตัวอย่างเช่น ลูกสูบที่ผิวด้านในขรุขระมากจะทำให้เกิดการเสียดสีขณะใช้งาน ทำให้ต้องใช้แรงในการขับเคลื่อนมากขึ้น การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ทำให้เกิดความร้อนสูง รวมถึงกระจกและเลนส์ชนิดต่างๆ โดยเฉพาะที่ใช้ในการทำแว่นตาจำเป็นต้องมีความเรียบสูง เพื่อให้แสงสามารถสะท้อนและลอดผ่านได้โดยปราศจากการกระเจิงของแสง หรือเกิดขึ้นน้อยที่สุด เพื่อให้การมองผ่านเลนส์เป็นไปโดยสมบูรณ์ ทั้งนี้ความขรุขระผิวชิ้นงานมีความเกี่ยวข้องกับปัจจัยต่างๆ มากมาย รวมถึงมีความสำคัญต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้อง แต่ในความเป็นจริงนั้นในระหว่างกระบวนการตัดจริงไม่สามารถวัดความขรุขระผิวชิ้นงานได้ ดังนั้นเพื่อลดข้อเสียที่เกิดจากการผลิตที่ไม่ได้ขนาดและคุณภาพผิวตามต้องการจึงมีการนำเทคโนโลยีเซนเซอร์มาใช้และ มีการควบคุมกระบวนการทำงานภายใต้เงื่อนไขซึ่งมีสภาวะการตัดที่เหมาะสมเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลต่างๆที่เกี่ยวข้อง เพื่อตรวจจับความขรุขระผิวระหว่างกระบวนการกลึง

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่ส่งผลต่อความขรุขระผิว แบ่งได้เป็น 2 ปัจจัยหลัก คือ ปัจจัยภายใน เช่น แรงตัด ความสั่นสะเทือน อุณหภูมิ และเสียงซึ่งเป็นปัจจัยที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการตัด และปัจจัยภายนอก เช่น เงื่อนไขการตัด ซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์หลายตัวที่มีความเกี่ยวข้อง ซึ่งพารามิเตอร์แต่ละตัวนั้นล้วนส่งผลต่อความขรุขระผิวที่แตกต่างกัน เช่น การใช้มีดตัดที่มีรัศมีจุกมีด น้อยจะส่งผลให้เกิดความขรุขระที่มากกว่าการใช้มีดตัดที่มีรัศมีจุกมีดมาก แต่อย่างไรก็ตามการใช้รัศมีจุกมีดที่มากเกินไป ก็จะทำให้เกิดแรงตัดที่สูง อันก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนมาก ซึ่งมีผลให้เกิดความขรุขระผิวที่มากขึ้นด้วยเช่นกัน หรือหากอัตราการป้อนตัดที่มากก็จะส่งผลให้ชิ้นงานมีค่าความขรุขระผิวที่มาก ในขณะที่อัตราการป้อนที่น้อยก็จะทำให้เกิดความขรุขระผิวที่น้อยแต่อาจจะทำให้ใช้เวลาในการตัดเพิ่มขึ้น รวมถึงอิทธิพลของมีดตัด วัสดุของมีดตัด ค่าความแข็งของวัสดุ ค่าความเหนียว ค่าการต้านการสึกหรบ แต่ในทางปฏิบัติในขณะที่ทำการตัดในกระบวนการกลึงนั้นเราไม่สามารถที่จะวัดความขรุขระของผิวชิ้นงานได้อย่างทันที จึงต้องมีการควบคุมกระบวนการทำงานภายใต้เงื่อนไขซึ่งมีสภาวะการตัดที่เหมาะสม และศึกษาถึงอิทธิพลที่เกี่ยวข้องเพื่อตรวจจับความขรุขระผิวระหว่างกระบวนการอย่างทันทีทั้งนี้ โดยนำเทคโนโลยีเซ็นเซอร์เข้ามาใช้ในการผลิตสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ การตรวจติดตามทางตรงและทางอ้อมทางอ้อม การตรวจติดตามทางตรงจะให้ค่าของตัวแปรที่ต้องการจะวัด เช่น การสึกหรบของมีดตัด ในขณะที่การตรวจติดตามทางอ้อมเป็นการวัดค่าที่เกิดขึ้นในระบบ เช่น การใช้ไดนาโมมิเตอร์วัดแรงที่เกิดขึ้นในขณะตัด จากนั้นจึงนำค่าที่ได้มาแปลงเพื่อให้ได้ค่าของตัวแปรที่ต้องการจะวัดต่อไป โดยแรงตัดที่ตรวจจับได้ 3 แรง ตามทิศทางแรงที่เกิดขึ้น คือ แรงตัดแนวรัศมี (Radial force: F_x) แรงตัดป้อน (Feed force: F_y) และแรงตัดหลัก (Main force: F_z) ซึ่งมีการนำแรงตัดที่เกิดขึ้นนี้มาใช้ทำนายความขรุขระผิว

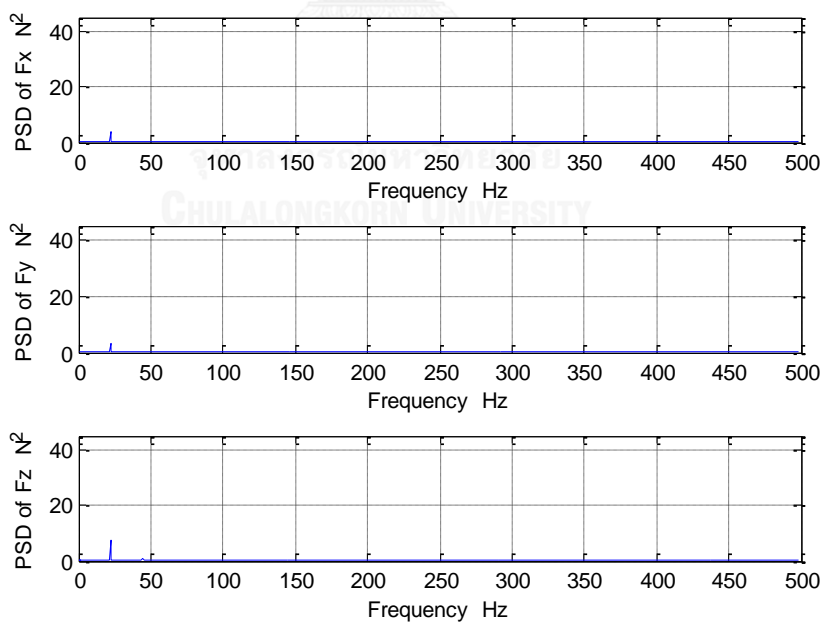
จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าแรงป้อนตัด(Feed force: F_y) เป็นแรงที่มีผลกระทบมากที่สุดต่อความขรุขระผิวชิ้นงาน ในขณะที่แรงตัดหลัก (Main force: F_z) เกิดจากเงื่อนไขการตัดซึ่งแรงดังกล่าวทั้งสองแรงล้วนมีอิทธิพลในกระบวนการกลึง ดังนั้นจึงนำแรงตัดหลักและแรงป้อนมาใช้ในการหาค่าความขรุขระผิวชิ้นงานในขณะกลึงชิ้นงาน จากความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของแรงตัดพลวัตและลักษณะของเศษโลหะโดยทั่วไปแล้ว การกลึงตัดที่เกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องนั้นให้ผิวชิ้นงานที่มีคุณภาพดีกว่าการกลึงตัดที่เกิดเศษโลหะแบบแตกหักเนื่องจากการตัดที่เกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องนั้นใช้แรงตัดที่น้อยกว่า และแรงตัดที่เกิดขึ้นในขณะตัดมีค่าความถี่ต่ำกว่า นอกจากนี้ยังมีความสอดคล้องกับความขรุขระผิวชิ้นงานที่โดเมนความถี่ ซึ่งได้มีการนำความถี่นี้มาพิจารณาหาความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและแรงตัดพลวัตในโดเมนเวลา เพื่อนำเงื่อนไข

ต่างๆในการตัดมาพัฒนาเป็นสมการทำนายค่าความขรุขระผิวขณะตัดที่เกิดขึ้นในโดเมนเวลาโดยการวิเคราะห์หาพื้นที่ใต้กราฟของแรงตัดพลวัตด้วยการประยุกต์ใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal rule) โดยที่เงื่อนไขการกลิ้งที่ทำให้เกิดเศษโลหะแบบแตกหักนั้นพบว่าแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นในขณะตัดนั้นจะมีความถี่ที่สูงกว่าการตัดกลิ้งที่เกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่อง และความถี่ที่ได้จากการเก็บสัญญาณจะมีความถี่ของความขรุขระผิวและความถี่ของการแตกหักของโลหะปนอยู่ ซึ่งไม่สามารถแยกออกจากกันได้ ดังนั้นลักษณะความถี่ของสัญญาณแรงตัดพลวัตนี้ สามารถนำวิธีการแปลงเวฟเลทมาวิเคราะห์เพื่อแยกสัญญาณแรงอย่างละเอียด โดยการแปลงเวฟเลท (Wavelet Transform) คือ แปลงข้อมูลจากโดเมนเวลา ไปยัง โดเมนเวลาและความถี่ (Time-frequency Domain) ด้วยการแยกย่อยสัญญาณออกเป็นหลายระดับ (Level) ซึ่งสามารถแยกความถี่ของความขรุขระผิวออกจากความถี่ที่เกิดจากการแตกหักได้ โดยการแปลงเวฟเลทนั้นเป็นเครื่องมือที่ถูกพัฒนาขึ้น และถูกนำไปประยุกต์ใช้ ในหลายๆด้าน เช่น การประมวลผลสัญญาณ (Signal Processing) และการประมวลผลภาพ (Image processing) เวฟเลทเป็นคลื่นรูปแบบหนึ่งที่มีช่วงเวลาที่จำกัดและมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ โดยเวฟเลทถูกแบบออกเป็นหลายลักษณะ โดยถูกเรียกลักษณะต่างๆนี้ว่า แฟมิลี (Family) ซึ่งแต่ละแฟมิลี นั้นก็มีลักษณะและรูปแบบที่แตกต่างกันออกไป ตัวอย่างเช่น Daubechies, Symlet, Haar, Coiflet ซึ่งเวฟเลทดอเบชีส์นั้นเป็นที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณเชิงกล ซึ่งให้ผลที่ดีกว่า การแปลงฟูเรียร์ (Fourier transform) ในการวิเคราะห์สัญญาณซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้เฉพาะสัญญาณความถี่เท่านั้น แต่ในขณะที่การแปลงเวฟเลทนั้นสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงเวลาและเชิงความถี่ของสัญญาณ (Time-Frequency Domain)

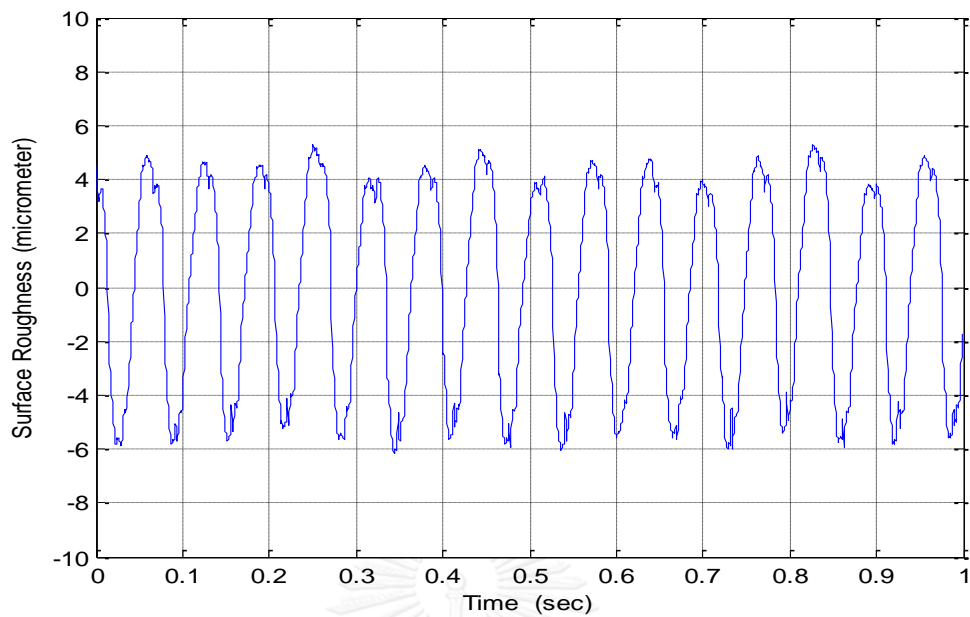
จากผลการทดลองการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวและแรงตัดพลวัตที่มีการเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่อง โดยมีเงื่อนไขการตัด ดังนี้ ความเร็วตัด 180 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.2 มิลลิเมตร รัศมีจุมุกมีด 0.4 มิลลิเมตร และมุมคายเศษโลหะ -6° จากการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform) ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวของชิ้นงานและแรงตัดพลวัตในโดเมนเวลานั้นมีลักษณะการเกิดเป็นรูปคลื่น และความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดพลวัตและความขรุขระผิวชิ้นงานในโดเมนความถี่นั้นเกิดความถี่ที่มีค่าใกล้เคียงกัน



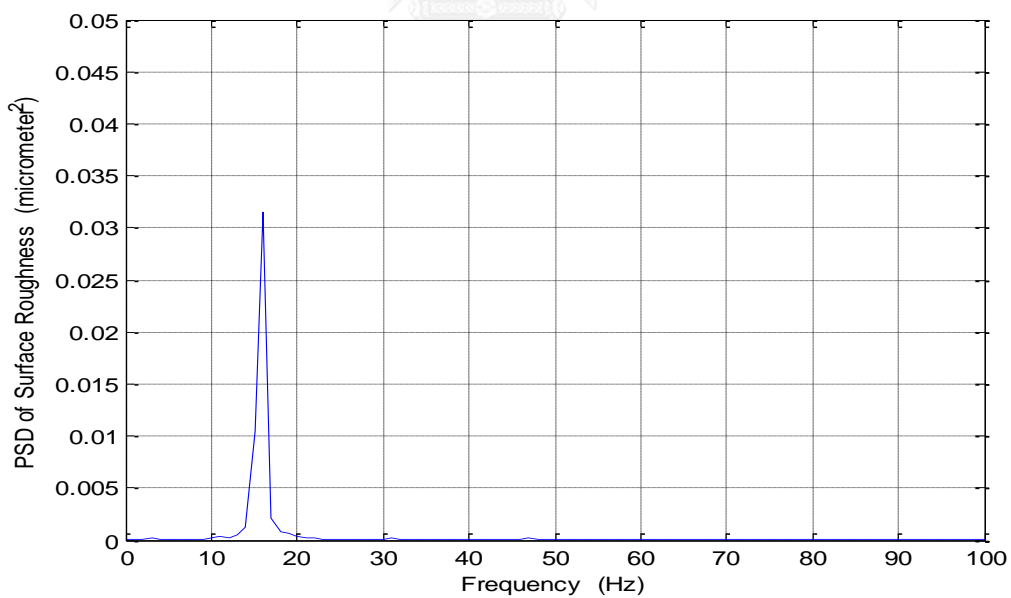
รูปที่ 1.1 แรงตัดพลวัตในโดเมนเวลาโดยฟูเรียร์แบบเร็วในเงื่อนไขการเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่อง



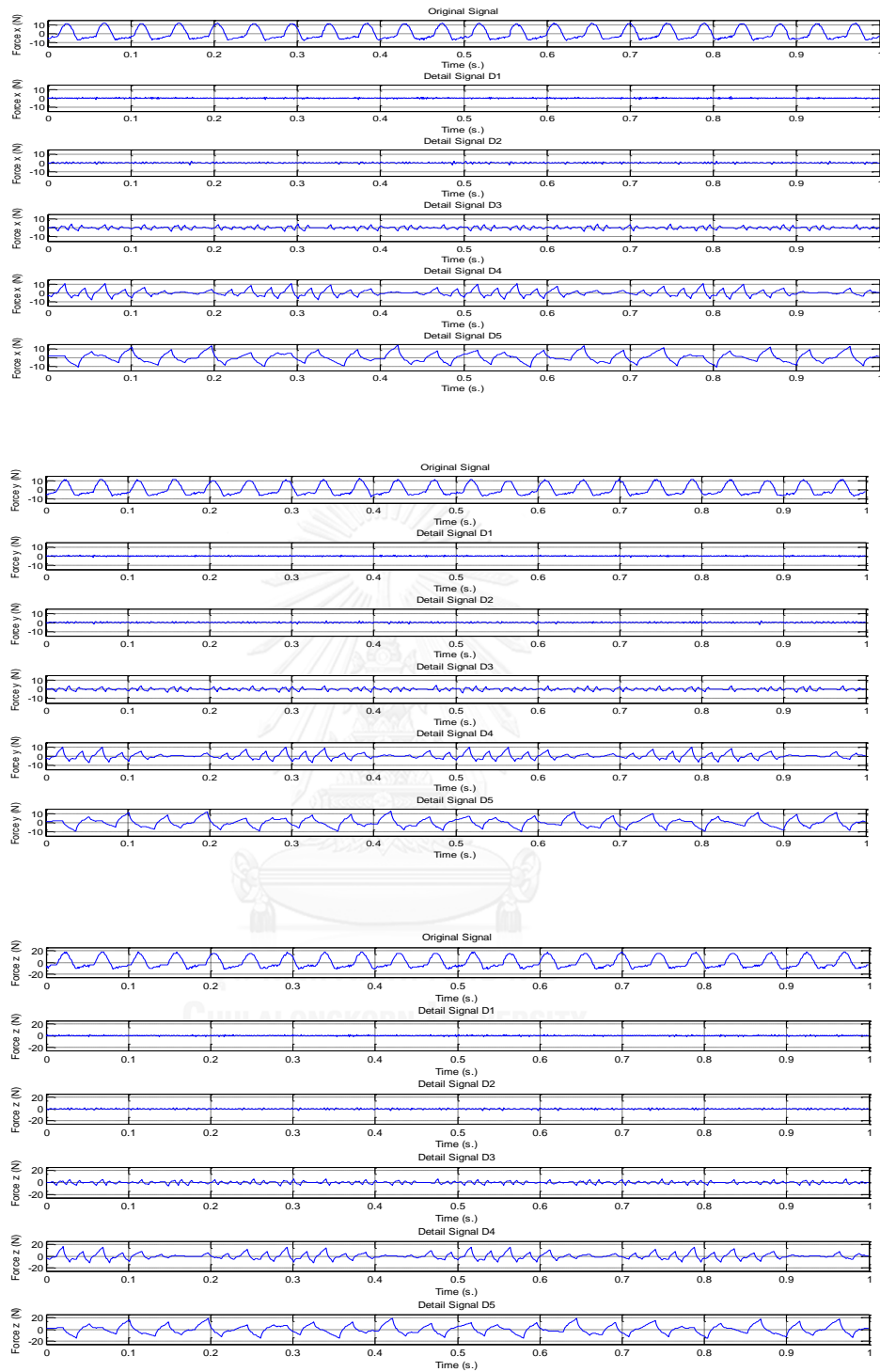
รูปที่ 1.2 แรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่โดยฟูเรียร์แบบเร็วในเงื่อนไขการเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่อง



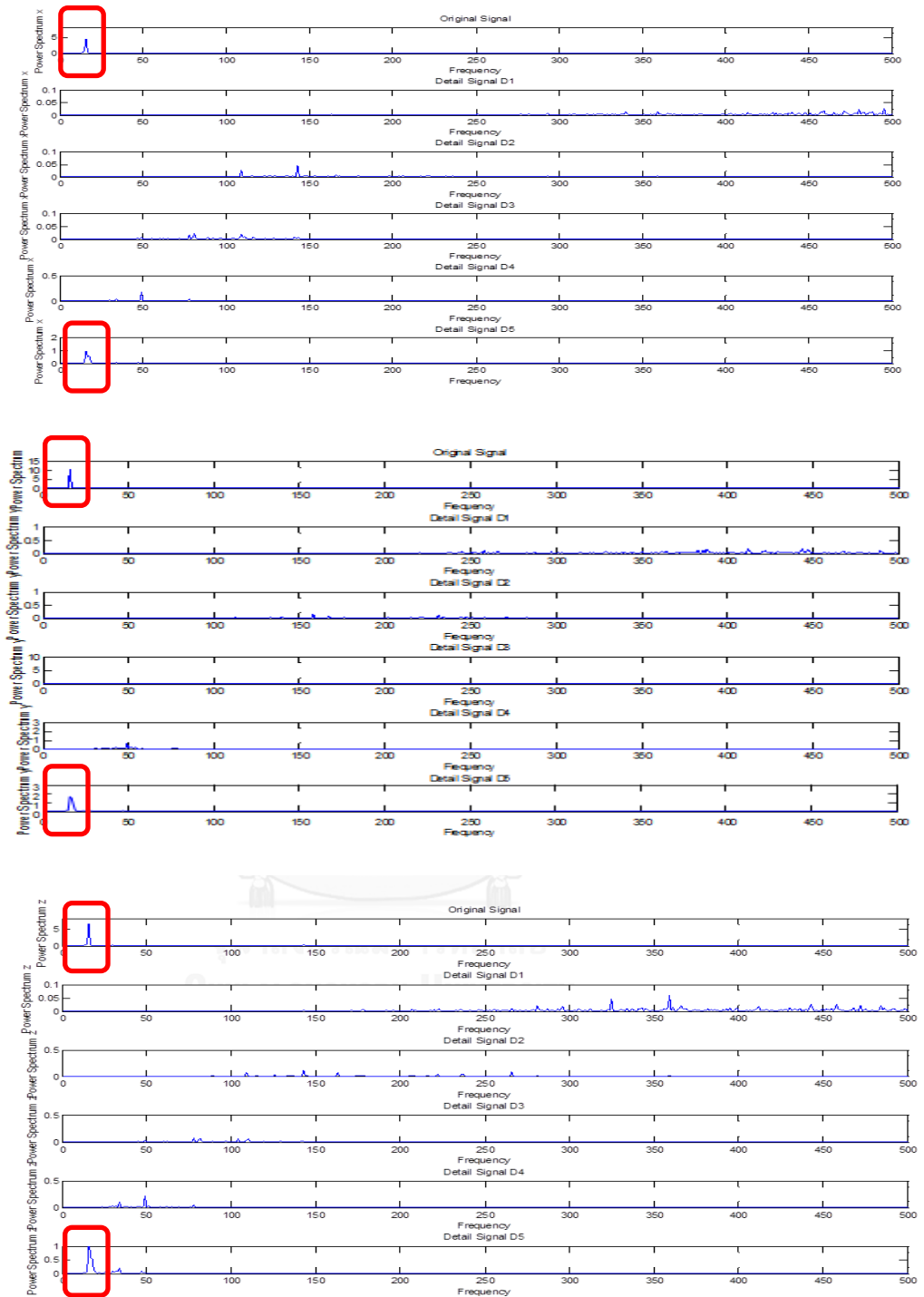
รูปที่ 1.3 ความขรุขระผิวในโดเมนเวลาโดยฟูเรียร์แบบเร็วในเงื่อนไขการเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่อง



รูปที่ 1.4 ความขรุขระผิวในโดเมนความถี่โดยฟูเรียร์แบบเร็วในเงื่อนไขการเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่อง โดยมีค่าความถี่เกิดขึ้นที่ 18 Hz

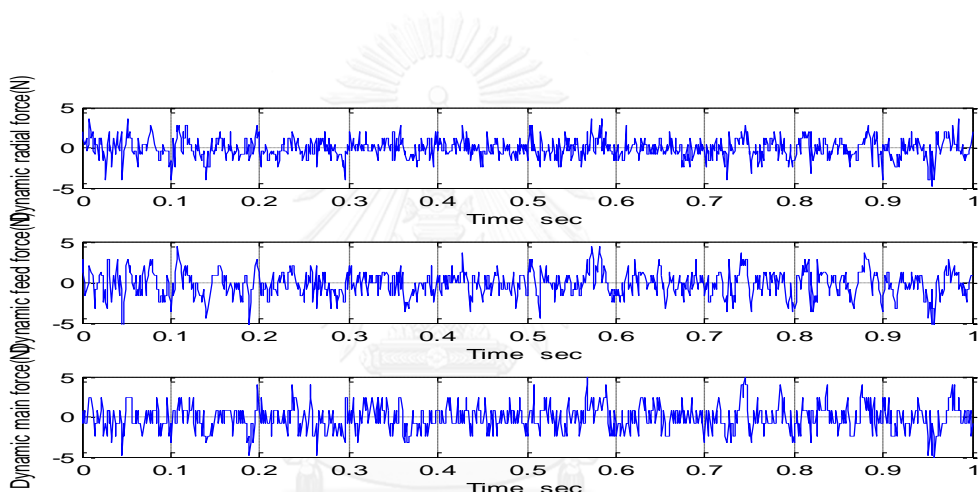


รูปที่ 1.5 (ก),(ข),(ค)แรงตัดพลวัตโดยการแปลงเวฟเลทในโดเมนเวลาในเงื่อนไขการเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องในแกน X,Y และ Z

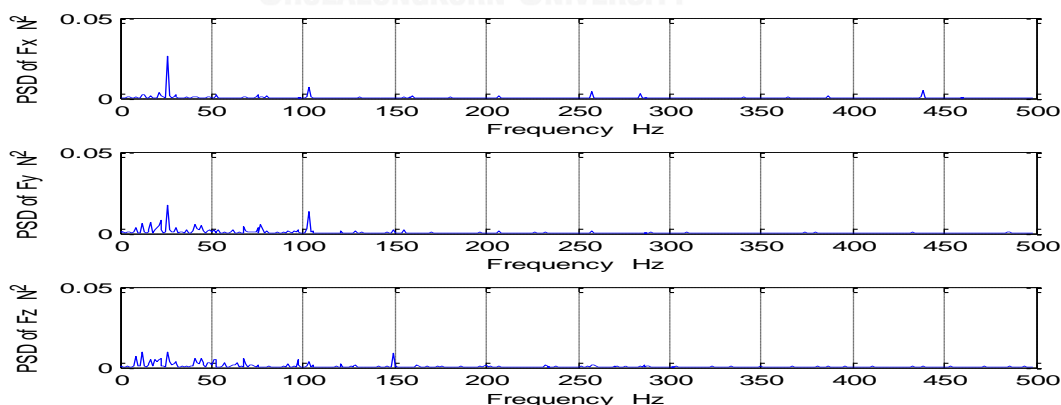


รูปที่ 1.6 (ก),(ข),(ค)) แรงตัดพลวัต โดยการแปลงเวฟเลทในโดเมนความถี่ในเงื่อนไขการเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องในแกน X,Y และ Z โดยมีค่าความถี่เกิดขึ้นที่ 18 Hz

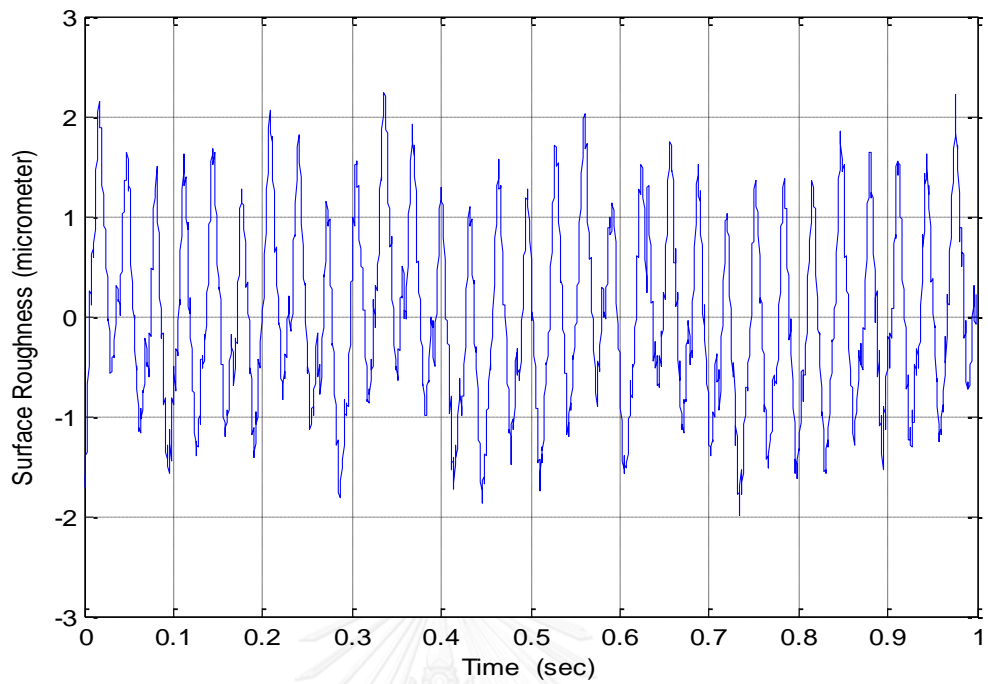
จากผลการทดลองการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวและแรงตัดพลวัต ที่มีการเกิดเศษโลหะแบบแตกหัก โดยมีเงื่อนไขการตัด ดังนี้ ความเร็วตัด 180 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.5 มิลลิเมตร รัศมีจุมุมมีด 0.4 มิลลิเมตร และมุมคายเศษโลหะ 11 จากการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (FFT) ไม่สามารถวิเคราะห์หาค่าความถี่ที่เกิดจากความขรุขระผิวได้เนื่องจากการปนกันของความถี่ความขรุขระผิวและความถี่ที่เกิดจากการแตกหัก ดังนั้นจึงได้มีการนำวิธีการแปลงเวฟเลต (Wavelet Transform) มาใช้โดยการแปลงข้อมูลจากโดเมนเวลา ไปยัง โดเมนเวลาและความถี่ (Time-frequency Domain) ด้วยวิธีการนี้ทำการแยกย่อยสัญญาณออกเป็นหลายระดับ (Level) ซึ่งสามารถแยกความถี่ของความขรุขระผิวออกจากความถี่ที่เกิดจากการแตกหักได้



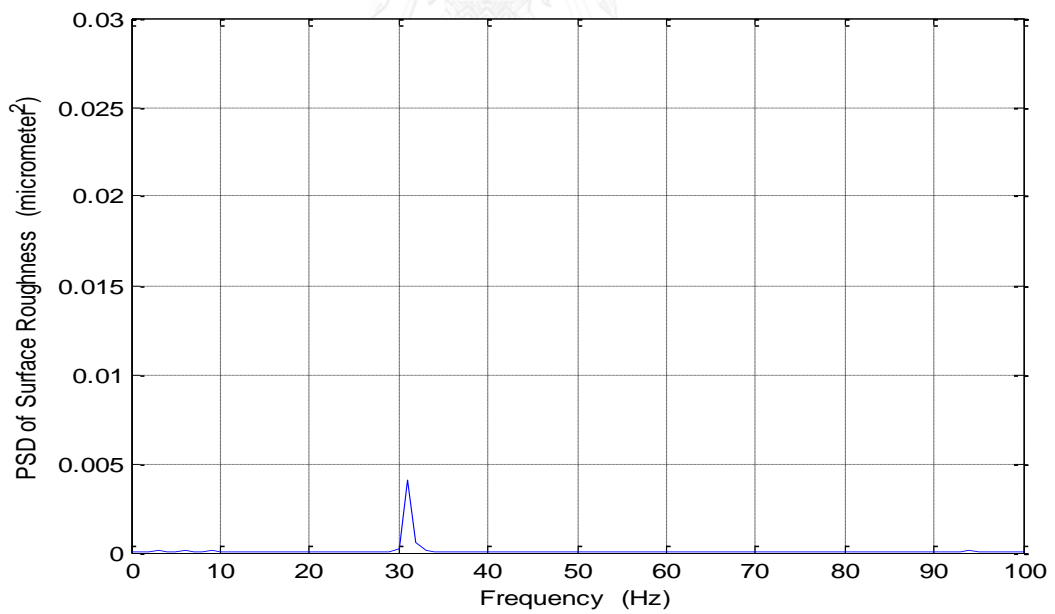
รูปที่ 1.7 แรงตัดพลวัตในโดเมนเวลาโดยฟูเรียร์แบบเร็วในเงื่อนไขเกิดเศษโลหะแบบแตกหัก



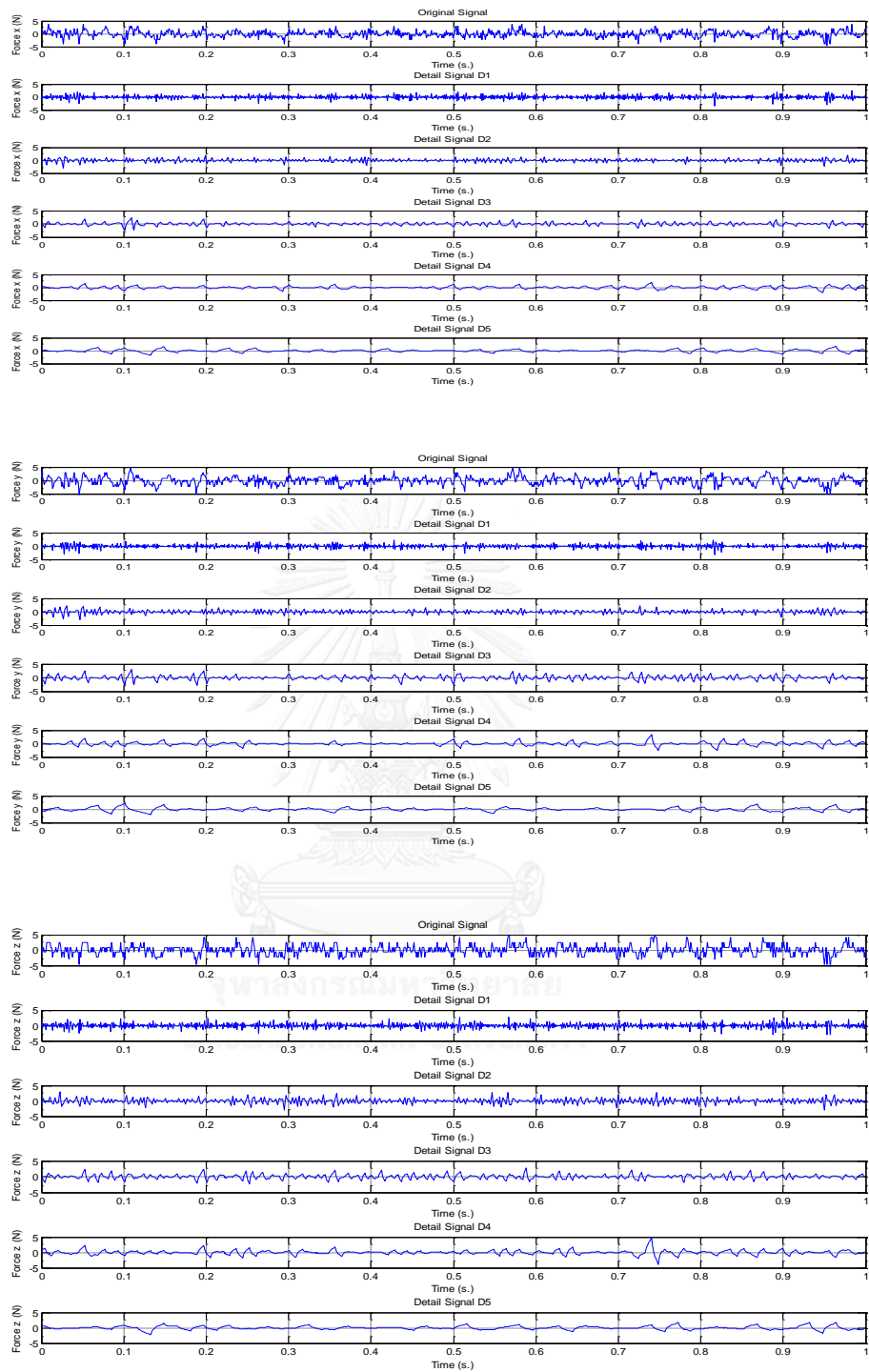
รูปที่ 1.8 แรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่โดยฟูเรียร์แบบเร็วในเงื่อนไขเกิดเศษโลหะแบบแตกหัก



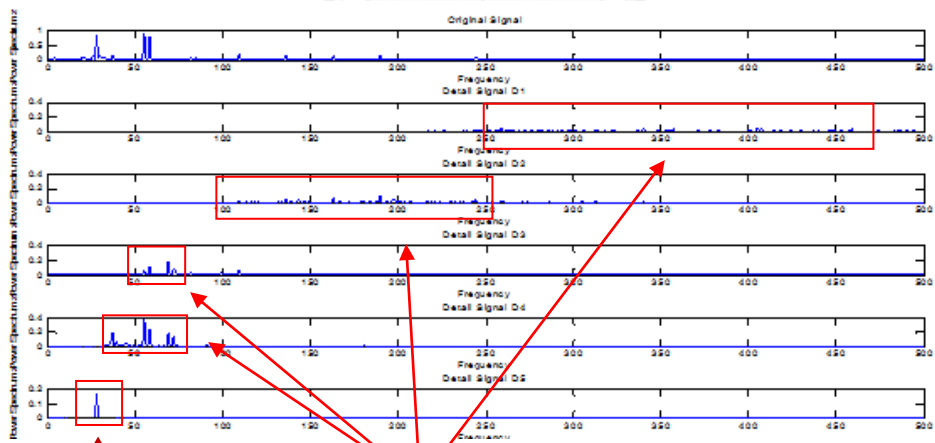
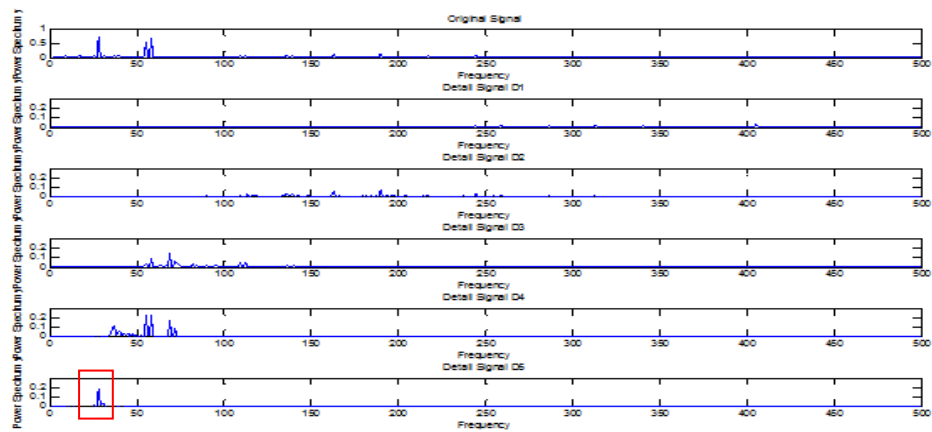
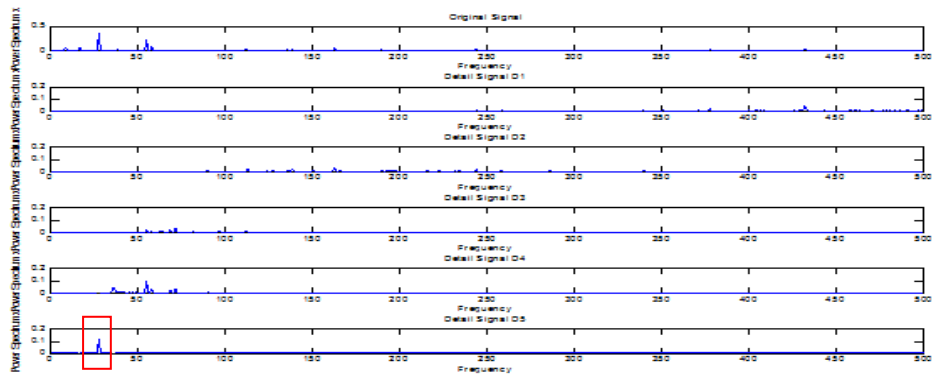
รูปที่ 1.9 ความขรุขระผิวในโดเมนเวลาโดยฟูเรียร์แบบเร็วในเงื่อนไขเกิดเศษโลหะแบบแตกหัก



รูปที่ 1.10 ความขรุขระผิวในโดเมนความถี่โดยฟูเรียร์แบบเร็วในเงื่อนไขเกิดเศษโลหะแบบแตกหัก โดยมีค่าความถี่เกิดขึ้นที่ 30 Hz



รูปที่ 1.11 (ก),(ข),(ค)แรงตัดพลวัตโดยการแปลงเวฟเลทในโดเมนเวลาในเงื่อนไขการเกิดเศษโลหะแบบแตกหักแกน X ,Y และ Z



ความถี่ ความขรุขระผิวชิ้นงาน สัญญาณรบกวน

รูปที่ 1.22 (ก),(ข),(ค)แรงตัดพลวัตโดยการแปลงเวฟเลขในโดเมนความถี่ในเงื่อนไขการเกิดเศษโลหะแบบแตกหักแกน X , Y และ Z โดยมีค่าความถี่เกิดขึ้นที่ 30 Hz

จากงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตยังไม่สามารถทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานของการตัดที่เกิดเศษโลหะแบบแตกหักได้ (Broken Chip) เนื่องจากในสัญญาณแรงในโดเมนความถี่ของการตัดที่เกิดเศษโลหะแบบแตกหักนั้นมีความถี่จากการแตกหักและความถี่ของความขรุขระผิวปะปนกันอยู่ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้การนำการแปลงเวฟเลตมาใช้แยกความถี่ของความขรุขระผิวและความถี่ของการแตกหักซึ่งมีค่าความถี่ที่แตกต่างกัน หากสามารถแยกความถี่ดังกล่าวออกจากกันได้อย่างชัดเจนจริง ก็จะสามารถหาความถี่ของความขรุขระผิวจากการตัดที่เกิดเศษโลหะแบบแตกหักทำนายความขรุขระผิวได้ในขณะตัด ซึ่งงานวิจัยเก่าได้มีการทดลองเบื้องต้นเพื่อพิสูจน์ว่าสามารถนำมาใช้ได้จริง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระของผิวชิ้นงานกับแรงที่เกิดขึ้นในขณะตัดไม่ว่าเศษของโลหะที่เกิดขึ้นจะเป็นเศษโลหะแบบต่อเนื่อง (Continuous Chip) หรือ เศษโลหะแบบแตกหัก (Broken Chip) โดยประยุกต์ใช้วิธีการแปลงเวฟเลต (Wavelet Transform)

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. กระบวนการกลึงปลอกโดยเป็นการตัดแบบแห้ง (Dry Cutting)
2. ทำการทดลองบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี 4 แกน ยี่ห้อ Mazak รุ่น NEXUS 200MY/MSY
3. วัสดุทดสอบในการกลึงคือ เหล็กกล้าคาร์บอน S45C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 120 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร
4. เม็ดมีดที่ใช้ตัด เป็นแบบคาร์ไบด์เคลือบผิว (Coated Carbide) TNMG160404HQ , TPRM160304HQ
5. กำหนดค่าออสซิลโลสโคป โดยมีค่า
 - Low-pass filter = 500 Hz.
 - Sampling rate =1,000 Sampling/second

6. เงื่อนไขและปัจจัยในการทดลอง

ตารางที่ 1.1 เงื่อนไขและปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	ระดับ
ความเร็วตัด	100 180 และ 260 เมตร/นาที
อัตราป้อนตัด	0.1 0.2 และ 0.3 มิลลิเมตร/รอบ
ความลึกตัด	0.2 0.5 และ 0.8 มิลลิเมตร
รัศมีจุมุมมีด	0.4 และ 0.8 มิลลิเมตร
มุมคายเศษโลหะ	-6 และ 11

7. เซนเซอร์วัดแรง (3-Component Dynamometer) ยี่ห้อ KISTLER รุ่น 9121

8. การทดลองจะใช้มีดตัดใหม่ที่มีค่าการสึกหรอไม่เกิน 0.1 มิลลิเมตร

1.3 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- สามารถทำนายค่าความขรุขระผิวชิ้นงานขณะตัดได้ไม่ว่าเศษโลหะจะเป็นแบบต่อเนื่องหรือแบบแตกหักก็ตาม
- สามารถนำไปเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบการตรวจติดตามความขรุขระผิวในกระบวนการกลึงสำหรับเครื่องจักรกลอัจฉริยะต่อไป
- เพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต ลดของเสียจากการสิ้นเปลืองวัสดุอันเกิดจากชิ้นงานไม่ได้คุณภาพ

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาขั้นตอนการใช้เครื่องกลึงซีเอ็นซี เครื่องขยายสัญญาณ ไดนาโมมิเตอร์ และเครื่องวัดความขรุขระผิว วิธีการเก็บสัญญาณข้อมูล วิธีการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform) วิธีการแปลงเวฟเลต (Wavelet Transform)
2. ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องรวมถึงเงื่อนไขและปัจจัยต่างๆในการตัดอันมีผลต่อความขรุขระผิวชิ้นงาน
3. กำหนดเงื่อนไขในการทดลองที่ ความเร็วตัด (Speed) 100 180 และ 260 เมตร/นาที

อัตราการป้อนตัด (Feed) 0.1 0.2 และ 0.3 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด (Depth) 0.2 0.5 และ 0.8 มิลลิเมตร รัศมีจมูกมีด (Nose radius) 0.4 และ 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ (Rake angle) -6 และ 11

4. ทำการทดลองตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ข้างต้น โดยการเก็บสัญญาณแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นในแต่ละเงื่อนไขด้วยไดนาโมมิเตอร์

5. วัดค่าความขรุขระผิวของชิ้นงานในแต่ละเงื่อนไขการตัด

6. วิเคราะห์ความขรุขระผิวชิ้นงานและแรงตัดพลวัตในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ โดยวิธีการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform)

7. วิเคราะห์ความขรุขระผิวชิ้นงานและแรงตัดพลวัตในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ โดยวิธีการแปลงเวฟเลท (Wavelet Transform)

8. วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของเงื่อนไขการทดลองต่างๆที่เกิดขึ้นในกระบวนการการตัดโดยแยกเป็นแบบต่อเนื่อง/แตกหัก

9. หาสมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพื้นที่แรงตัดพลวัตและความขรุขระผิวชิ้นงานภายใต้เงื่อนไขการตัดต่างๆที่เกิดขึ้นโดยแยกแบบต่อเนื่องและแบบแตกหัก

10. ทำการทดสอบความแม่นยำของสมการความขรุขระผิวดำเนินงานที่ได้เทียบกับค่าความขรุขระผิวที่วัดได้จริง

11. สรุปและวิเคราะห์ผลการดำเนินงานวิจัย

12. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

หมายเหตุ : เงื่อนไขการตัดอาจเปลี่ยนแปลงได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการตัดเฉือน (Machining Process)

กระบวนการตัดเป็นกระบวนการผลิตที่ใช้เครื่องมือตัด (Cutting tool) ในการกำจัดเนื้อวัสดุส่วนเกินออกจากพื้นผิวชิ้นงานเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีรูปร่างและขนาดตามความต้องการ หรือที่ได้ทำการออกแบบไว้ เมื่อเปรียบเทียบกระบวนการผลิตทั้งหมด กระบวนการตัดเฉือนถือว่าเป็นกระบวนการที่มีความหลากหลายและให้ความถูกต้องแม่นยำมากที่สุดซึ่งกระบวนการตัดนี้สามารถใช้ได้กับวัสดุหลายประเภท มีความสามารถในการสร้างชิ้นงานได้หลากหลายรูปแบบ และยังมีความแม่นยำสูง กระบวนการตัดมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี และกระบวนการตัดแต่ละวิธีนั้นมีความสามารถในการผลิตชิ้นงานที่มีลักษณะหรือรูปร่างที่แตกต่างกันออกไป โดยทั่วไปแล้ววิธีการตัดที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบันมีอยู่ 3 วิธีด้วยกัน ได้แก่ การกลึง (Turning) การเจาะ (Drilling) และการกัดขึ้นรูป (Milling)

2.2 กระบวนการกลึง

กระบวนการกลึงเป็นกระบวนการตัดซึ่งใช้มีดตัดคมตัดเดี่ยว (Single cutting edge) ในการขจัดเนื้อวัสดุออกจากผิวของชิ้นงานทรงกระบอกที่กำลังหมุนอยู่ โดยเครื่องจักรที่ใช้ปฏิบัติการกลึงเรียกว่าเครื่องกลึง (Lathe) กระบวนการกลึงแบ่งได้หลายประเภท เช่น

1. การกลึงปาดหน้า (Facing) มีดกลึงถูกป้อนเข้าไปในแนวรัศมีชิ้นงาน
2. การกลึงคอนทัวร์ (Contour turning) ทิศทางการป้อนมีดเคลื่อนที่ตามแนวเส้นคอนทัวร์ที่ถูกตั้งรูปแบบไว้ ไม่ได้เคลื่อนที่ขนานกับแกนในการหมุนชิ้นงาน
3. การลบคม (Chamfering) คือ การใช้คมตัดของมีดกลึงลบมุมที่ขอบของชิ้นงานออก
4. การตัด (Cutoff) ทิศทางการเคลื่อนที่ของมีดตัดถูกป้อนเข้าไปภายในชิ้นงานที่กำลังหมุนอยู่ และสามารถตัดชิ้นงานให้ขาดออกจากกันได้
5. การกลึงเกลียว (Threading) คมตัดเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงขนานกับชิ้นงานที่หมุน และใช้อัตราการป้อนตัดที่มาก

2.3 เงื่อนไขของการตัดในกระบวนการกลึง (Cutting Conditions in turning)

ความเร็วรอบในกระบวนการกลึงมีความสัมพันธ์กับความเร็วในการตัดที่พื้นผิวของชิ้นงาน
ทรงกระบอกดังสมการที่ 2.1

$$N = \frac{v}{\pi D_0} \quad (2.1)$$

โดยที่ N (Rotational Speed) = ความเร็วรอบในการหมุน (รอบ/นาที)
 v (Cutting Speed) = ความเร็วในการตัด (เมตร/นาที หรือ ฟุต/นาที)
 D_0 (Diameter of workpiece) = เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานเริ่มต้น (เมตร หรือ ฟุต)

การกลึงชิ้นงานเป็นการขจัดเนื้อวัสดุชิ้นงานออก ทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน
ลดลงจาก D_0 เหลือ D_f โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ลดลงแสดงถึงความลึกในการตัด (depth of
cut, d) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 2.1.3-2

$$D_0 - D_f = 2d \quad (2.2)$$

ส่วนอัตราการป้อนตัดโดยทั่วไปจะแสดงในหน่วย มิลลิเมตร/รอบ หรือนิ้ว/รอบ และ
สามารถที่จะเปลี่ยนเป็นอัตราเร็วเชิงเส้นในหน่วย มิลลิเมตร/นาที หรือนิ้ว/นาทีได้ดังสมการที่
2.1.3-3

$$fr = N \times f \quad (2.3)$$

โดยที่ fr (feed rate) = อัตราป้อนตัดมีดเชิงเส้น (มิลลิเมตร/นาที หรือนิ้วต่อนาที)
 f (feed) = อัตราการป้อนมีด (มิลลิเมตร/รอบ หรือนิ้วต่อรอบ)

เวลาที่ใช้ในการตัดชิ้นงานจากด้านหนึ่งของชิ้นงานไปอีกด้านหนึ่งจะสามารถคำนวณได้จาก
สมการที่ 2.1.3-4

$$T_m = \frac{L}{f} \quad (2.4)$$

โดยที่ T_m (Time of actual machining) = เวลาที่ใช้ในการตัดชิ้นงาน (นาที)
 L (Length) = ความยาวของชิ้นงาน (มิลลิเมตร หรือ นิ้ว)

ปริมาณของวัสดุชิ้นงานที่ถูกกลึงออกไปต่อหน่วยเวลาจะแสดงในรูป อัตราการกำจัดเนื้อวัสดุ (Material Removal Rate, MRR) มีหน่วยเป็น ลบ.มม./นาที หรือ ลบ.นิ้ว/นาที จะคำนวณได้จากสมการที่ 2.5

$$MRR = v \times f \times d \quad (2.5)$$

2.4 วัสดุที่ใช้ทำเครื่องมือตัด

เครื่องมือตัดที่ดีนั้นต้องมีความแข็งแรงสูงภายใต้อุณหภูมิการตัดที่สูง (Hot hardness) สามารถรับแรงกระแทกได้ดี มีความเหนียว (Toughness) และต้องสามารถต้านทานการสึกหรอ (Wear resistance) แต่อย่างไรก็ตาม ไม่มีวัสดุใดที่มีคุณสมบัติดังที่กล่าวมาข้างต้น โดยวัสดุที่นิยมใช้มาทำมีดตัด ได้แก่ เหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสมปานกลาง (Carbon and medium alloy steels) เป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการตัดที่ใช้ความเร็วรอบไม่สูงนัก เนื่องจาก มีดตัดไม่สามารถทนทานการตัดที่มีอุณหภูมิสูง และยังมีแข็งแรงและการสึกหรอต่ำอีกด้วย แต่มีข้อดีคือมีต้นทุนต่ำ

เหล็กกล้าเร็วรอบสูง (High-speed steels) เป็นวัสดุที่เหมาะสมกับการตัดที่ใช้ความเร็วรอบที่สูง ทนทานต่อแรงกระแทก, การแตกหักและการสึกหรอ รวมถึงการสิ้นเปลืองอื่นอีกด้วย

โคบอลต์หล่อผสม (Cast-cobalt alloys) เป็นวัสดุที่เหมาะสมกับการตัดหยาบ ทนทานต่อการสึกหรอ มีความแข็งแรงสูง และอุณหภูมิที่สูงได้ดี แต่มีความเหนียวน้อยกว่าเหล็กกล้าเร็วรอบสูง ทนแรงกระแทกได้น้อย

คาร์ไบด์ (Cemented or sintered carbide) เป็นวัสดุที่เหมาะสมกับการตัดที่ความเร็วรอบที่ไม่สูงนัก ทนทานต่อการสึกหรอ มีความแข็งแรงสูง ทนทานการตัดที่มีอุณหภูมิสูง แต่ไม่เหมาะสมกับการตัดที่เกิดการสั่น

เครื่องมือเคลือบผิว (Coated tools) การเคลือบมีเป้าหมายเพื่อให้ มีดนั้นสามารถทนต่อการตัดที่เร็วรอบสูงได้ดีขึ้น และยังทำให้อายุการใช้งานของมีดตัดนั้นยาวนานขึ้นอีกด้วย ซึ่งสารเคลือบที่

นิยมใช้กันได้แก่ ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) ที่ทำให้มีดตัดมีความแข็งแรง, ทนทานต่ออุณหภูมิมากขึ้น และมีความเหนียวเพิ่มขึ้น ไทเทเนียมคาร์ไบด์ (TiC) ที่ทำให้ทนทานต่อการสึกหรอ เซรามิก (Ceramics) เป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการตัดที่ความเร็วรอบสูง ทนความร้อนได้ดีลดการติดของเศษโลหะบนชิ้นงานได้ ให้ผิวสำเร็จที่มีความเรียบสูง แต่ ไม่มีความเหนียวซึ่งทำให้ไม่ทนต่อแรงกระแทกนั่นเอง

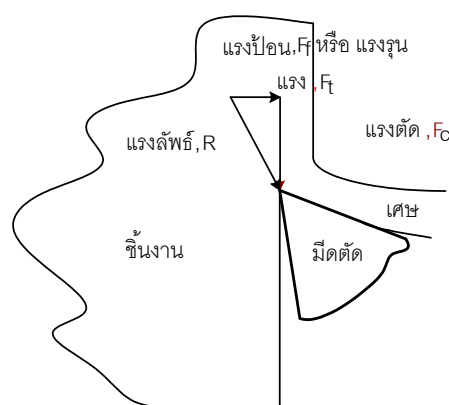
คิวบิกโบรอนไนไตรด์ (Cubic boron nitride) เป็นวัสดุที่เหมาะสมต่อการตัดวัสดุที่มีความแข็งสูง เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความแข็งมากที่สุด ทนทานต่อการสึกหรอ มีความแข็งแรงสูง แต่ไม่ทนต่อแรงกระแทกและการสั่นสะเทือน

ซิลิกอนไนไตรด์ (Silicon nitride) เป็นวัสดุที่เหมาะสมกับงานที่ต้องการความละเอียดสูง มีความเหนียวสูง ทนทานต่ออุณหภูมิที่สูง และทนต่อการสึกหรอได้ดี

2. 5 แรงในการตัด [11]

2.5.1 แรงบนคมตัด

แรงบนคมตัด หมายถึงแรงที่กระทำที่คมตัดของเครื่องมือตัดขณะเกิดการตัด ในเบื้องต้นนี้จะใช้แบบจำลองของการตัดฉาก (Orthogonal Cutting) ในการวิเคราะห์เนื่องจากทำให้ระบบของแรงบนคมตัดมีเพียง 2 มิติเพื่อให้ง่ายต่อการเข้าใจ จากรูปที่ 2.1 พบว่าแรงลัพธ์ (Resultant force) สามารถแยกออกเป็น 2 องค์ประกอบย่อย คือ แรงในทิศขนานกับทิศของความเร็วตัด เรียกว่า แรงตัด (Cutting force) และแรงในทิศขนานกับทิศของการป้อน เรียกว่าแรงป้อน (Feed force) ซึ่งแรงตัด และแรงป้อนนี้สามารถวัดได้โดยใช้อุปกรณ์วัดแรงตัด ทำให้สามารถคำนวณแรงลัพธ์ได้จากสมการที่ 2.6



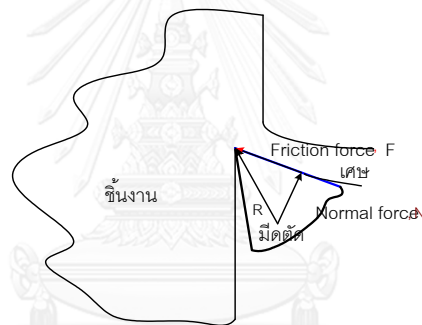
รูปที่ 2.1 ระบบแรงบนคมตัดของการตัดฉาก

$$R = \sqrt{F_c^2 + F_f^2} \quad (2.6)$$

$$\gamma = \tan^{-1} \frac{F_f}{F_c} \quad (2.7)$$

2.5.2 แรงเสียดทาน

แรงเสียดทาน หมายถึงการที่เศษวัสดุเคลื่อนที่ผ่านผิวคายเศษวัสดุของเครื่องมือตัด ทำให้เกิดแรงขึ้นอีกระบบหนึ่งดังแสดงในรูปที่ 2.2 คือ แรงเสียดทาน (Friction force) และแรงกดบนผิวคายเศษวัสดุ (Normal force) สามารถคำนวณสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างเศษวัสดุและผิวคายเศษวัสดุ เมื่อกำหนดให้ β คือ มุมเสียดทาน (Friction angle) ได้จาก



รูปที่ 2.2 ระบบแรงเสียดทาน

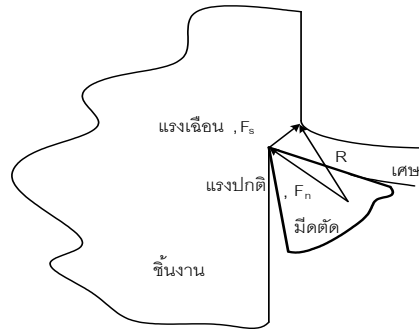
$$\mu = \frac{F}{N} = \tan\beta \quad (2.8)$$

โดยที่

- μ = สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน
- F = แรงเสียดทาน (นิวตัน)
- N = แรงกดบนผิวคายเศษวัสดุ (นิวตัน)

2.5.3 แรงเฉือน

แรงเฉือน หมายถึง แรงที่กระทำบนระนาบเฉือน เป็นแรงที่ทำให้วัสดุชิ้นงานเกิดการแปรสภาพกลายเป็นเศษวัสดุ แสดงในรูปที่ 2.3 โดยกำหนดให้ F_s คือ แรงเฉือน (Shear force)

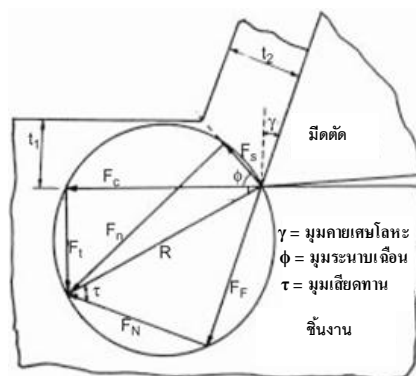


รูปที่ 2.3 ระบบของแรงเฉือน

และ F_N คือ แรงกดบนระนาบเฉือน (Normal force on shear plane)

$$R = \sqrt{F_s^2 + F_N^2} \quad (2.9)$$

การใช้รูปหลายเหลี่ยมแทนแรงเป็นวิธีทางกราฟที่ใช้แรงแทนการคำนวณได้อย่างสะดวกและถูกต้อง ดังในรูปที่ 2.4 โดยการกำหนดเวกเตอร์ของแรงตัดและแรงป้อน จะได้ผลลัพธ์โดยการบวกเวกเตอร์ทั้งสอง (ขั้นตอนที่ 1) ใช้แรงลัพธ์เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางสร้างวงกลม จากนั้นลากเส้นต่อจากผิวคายเศษวัสดุตัดกับวงกลม จะได้แรงเสียดทานและแรงกดผิวคายเศษวัสดุ (ขั้นตอนที่ 2) คำนวณมุมระนาบเฉือน (ϕ) จากนั้นกำหนดมุมนี้ลงในรูป จากจุดตัดของมุมนี้กับวงกลม จะได้แรงเฉือนและแรงกดบนระนาบเฉือน (ขั้นตอนที่ 3) สามารถวัดขนาดของแรงได้จากรูปที่สร้างขึ้นเทียบกับมาตราส่วนที่กำหนดเอาไว้



รูปที่ 2.4 วิธีการสร้างรูปหลายเหลี่ยมแทนแรงตัด

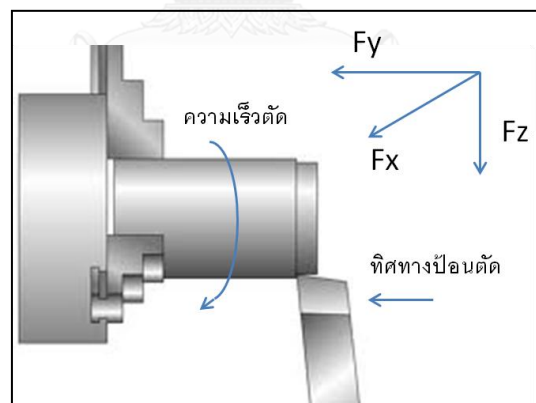
จากรูปที่ 2.4 การใช้แผนภาพของแรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการตัดโลหะ (Force diagram) นั้นจะสามารถคำนวณค่าของแรง F , N , F_s และ F_n ได้โดยใช้ความสัมพันธ์เชิงตรีโกณมิติของแรงที่สามารถวัดได้ (F_c , F_t) ซึ่งจะได้ค่าของแรงต่าง ๆ ดังสมการที่ 2.10 ถึง 2.13

$$F = F_c \sin \alpha + F_t \cos \alpha \quad (2.10)$$

$$N = F_c \cos \alpha - F_t \sin \alpha \quad (2.11)$$

$$F_s = F_c \cos \alpha - F_t \sin \phi \quad (2.12)$$

$$F_n = F_c \sin \phi + F_t \cos \phi \quad (2.13)$$



รูป 2.5 ทิศทางแรงตัด

จากรูป 2.5 สามารถแบ่งได้เป็น 3 แรงหลัก ประกอบด้วย แรงตัดที่เกิดในแนวรัศมี เรียกว่า แรงรัศมีหรือแรงรัศมี (Radial force: F_x) แรงในทิศทางขนานกับทิศของการป้อน เรียกว่า แรงป้อนตัด (Feed force: F_y) และแรงในทิศทางขนานกับทิศของความเร็วจัด เรียกว่า แรงตัดหลัก (Main force: F_z) โดยแรงทั้งสามแนวแกน จะถูกเก็บสัญญาณด้วยไดนาโมมิเตอร์ เพื่อนำมาวิเคราะห์ จะประกอบด้วย 3 ส่วนสำคัญ คือ แรงตัดศูนย์ แรงตัดพลวัต และแรงตัดสถิต โดยแรงตัดศูนย์ คือ

แรงที่ยังไม่เกิดการตัดจริง ซึ่งเกิดจากสัญญาณรบกวน (Noise) ของอุปกรณ์ แรงตัดพลวัตเป็นแรงที่เกิดขึ้นจริงขณะทำการตัดจริง และแรงตัดสถิต คือแรงตัดเฉลี่ยที่กำหนดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น โดยเกิดจากผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยแรงตัดพลวัตและค่าเฉลี่ยแรงตัด

2.6 การเกิดเศษโลหะ [11]

2.6.1 แบบจำลองการเกิดเศษโลหะ

เมื่อพิจารณาการตัด ตามแบบจำลองอย่างง่ายในดังแสดงในรูปที่ 2.6 พบว่าการตัดวัสดุชิ้นงาน จะรับแรงกระทำจากเครื่องมือตัดผ่านทางคมตัด ซึ่งจะมีผลให้ชิ้นงานเกิดความเค้นขึ้นในหลายลักษณะ

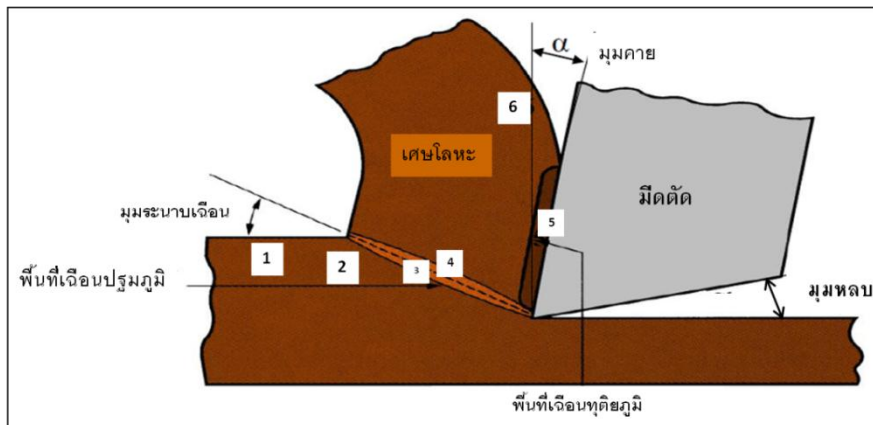
บริเวณที่ 1 เป็นบริเวณที่วัสดุยังไม่เกิดการเปลี่ยนรูป เนื่องจากยังไม่มีแรงมากระทำต่อเกรนของวัสดุงาน ซึ่งพบว่าจะจะเป็นบริเวณการตัดที่เม็ดเกรนของวัสดุงาน ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

บริเวณที่ 2 เป็นบริเวณที่โลหะหรือวัสดุงานเกิดการเปลี่ยนรูป เมื่อมีแรงมากระทำกับวัสดุ แต่จะสามารถกลับสู่สภาพเดิมได้ เนื่องจากยังไม่ถึงจุดคราก (Yield Point) และจุด Plastic deformation ซึ่งเป็นจุดที่ 3

บริเวณที่ 3-4 จะเกิดความเค้นที่จุดนี้มากขึ้น และเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรจนกลายเป็นเศษตัดที่บริเวณนี้ เม็ดเกรนของวัสดุเกิดการเคลื่อนตัวในแนวตัดเฉือน (Shear Plan) เนื่องจากการเปลี่ยนรูปไปของวัสดุที่บริเวณนี้ และความแข็งจะมากขึ้น ซึ่งเรียกว่าบริเวณการเฉือน (Shear zone)

บริเวณที่ 5 เลยจุดที่เกิดการเคลื่อนตัว (Slip) ของเกรนในแนวเฉือนที่บริเวณการเฉือนไปแล้ว โดยบริเวณนี้เกรนของวัสดุจะเคลื่อนตัวอย่างถาวร นอกจากความแข็งจะมากขึ้นแล้ว ความร้อนหรืออุณหภูมิก็จะสูงขึ้นด้วย และวัสดุจะเกิดการเปลี่ยนรูปมากขึ้น

บริเวณที่ 6 เกรนส่วนใหญ่ที่เกิดการเปลี่ยนรูปไปของวัสดุกลายเป็นเศษที่ได้จากการตัดเฉือน ทำให้เกิดความแตกต่างกันด้านคุณสมบัติทางฟิสิกส์และความแข็งในเศษตัดมากขึ้น



รูปที่ 2.6 แบบจำลองของการตัด

รูปร่างของมีดตัดสามารถแสดงได้ด้วยมุม 2 มุมคือ มุมค้ำ (Rake angle , α) และมุมหลบ (Clearance angle) โดยมุมค้ำจะเป็นตัวกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ของเศษกลึงโลหะ ส่วนมุมหลบจะเป็นมุมระหว่างผิวหลบ (flank face) กับผิวชิ้นงานที่ผ่านการกลึงแล้ว [11] โดยในระหว่างการตัด คมตัดของมีดกลึงจะถูกตั้งไว้ที่ตำแหน่งที่แน่นอนในระนาบที่ต่ำกว่าพื้นผิวของชิ้นงาน รูปแบบของเศษโลหะที่เกิดขึ้นจะขึ้นกับความลึกตัด (t_1) ในขณะที่เศษโลหะกำลังก่อตัวตามระนาบเฉือน ความหนาของเศษโลหะจะเพิ่มขึ้นเป็น t_2 อัตราส่วนระหว่าง t_1 กับ t_2

เรียกว่าอัตราส่วนความหนาของเศษโลหะ (Chip thickness ratio , r) ซึ่งอาจเขียนได้ดังสมการที่ 2.14 และอัตราส่วนนี้จะมีค่าน้อยกว่า 1 เสมอ เนื่องจากความหนาของเศษโลหะหลังจากการตัดจะมากกว่าความหนาก่อนการตัดเสมอ

$$r = \frac{t_1}{t_2} \quad (2.14)$$

และความยาวของระนาบเฉือนสามารถคำนวณได้จาก

$$l = \frac{t_1}{\sin \phi} = \frac{t_2}{\cos(\phi - \alpha)} \quad (2.15)$$

โดยที่

l = ความยาวระนาบเฉือน (มิลลิเมตร)

t_1 = การป้อน หรือความลึกในการตัดแล้วแต่กรณี (มิลลิเมตร)

t_2 = ความหนาของเศษโลหะ (มิลลิเมตร)

ϕ = มุมระนาบเฉือน (องศา)
 α = มุมคายนเฉือน (องศา)

จากสมการที่ 2.15

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{\sin \phi}{\cos(\phi - \alpha)} \quad (2.16)$$

จากกรที่

$$\cos(\phi - \alpha) = \cos \phi \cos \alpha + \sin \phi \sin \alpha$$

แทนค่าลงในสมการที่ 2.16 แล้วจัดใหม่สมการใหม่จะได้

$$\tan \phi = \frac{(t_1/t_2) \cos \alpha}{1 - (t_1/t_2) \sin \alpha} \quad (2.17)$$

จากสมการที่ 2.15 แทนค่าลงในสมการที่ 2.17 สามารถเขียนได้เป็น

$$\tan \phi = \frac{r_a \cos \alpha}{1 - r_a \sin \alpha} \quad (2.18)$$

จากสมการที่ 2.18 พบว่า มุมคายนเฉือน เป็นตัวแปรที่มีผลต่อมุมระนาบเฉือน ในกรณีที่มุมคายนเฉือนมีค่ามากขึ้น จะมีผลให้ความหนาของคายนเฉือนมีค่าลดลง และมุมระนาบเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าของมุมระนาบเฉือนสามารถใช้คำนวณค่าที่สำคัญอีกตัวหนึ่ง คือ พื้นที่ระนาบเฉือนได้ดังนี้

$$A_s = \frac{t_1 b}{\sin \phi} \quad (2.19)$$

A_s = พื้นที่ระนาบเฉือน (ตารางมิลลิเมตร)

b = ความกว้างของการตัด (มิลลิเมตร)

2.6.2 อิทธิพลของเงื่อนไขการตัดต่อการแตกหักของเศษโลหะ

การเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องมักจะพบในการกลึงชิ้นงานจำพวก เหล็กกล้าผสมเหล็กเหนียว และพวกอลูมิเนียม ซึ่งเป็นผลมาจาก อัตราป้อนและความเร็วตัด รวมทั้งมีแนวโน้มผลของความลึกการตัด มุมคายเศษตัดและมุมตั้งสันคมมีดตัด

เมื่ออัตราการป้อนเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้เกิดเศษตัดงอมากขึ้นและหักง่ายขึ้น

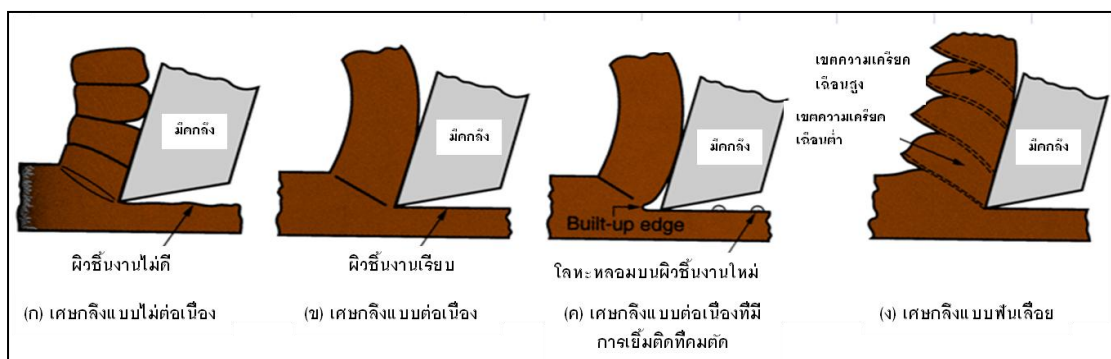
เมื่อใช้ความเร็วตัดสูงขึ้น ทำให้การหักเศษตัดเลวลงและทำให้เศษตัดมีโอกาสเป็นเส้นยาวหรือขาดง่าย

เมื่อเพิ่มความลึกการตัดให้มากขึ้น ทำให้การหักเศษตัดง่ายขึ้น

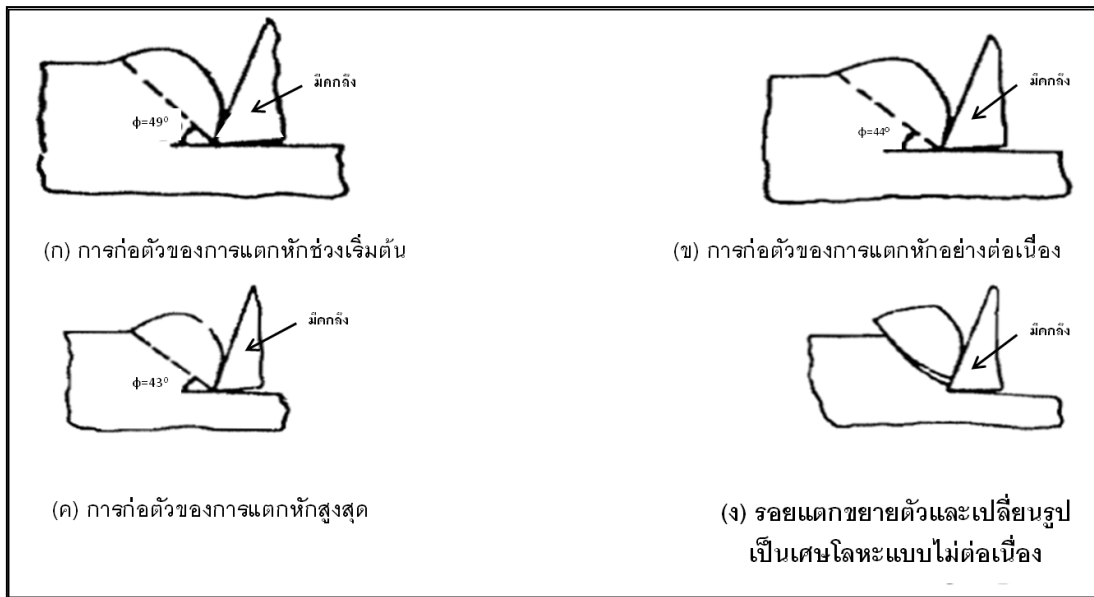
เมื่อมุมคายเศษน้อยลงจนมุมมีค่าเป็นลบ ส่วนมากแล้วจะทำให้การหักเศษดีขึ้น

2.6.3 การเกิดเศษตัดและลักษณะเศษตัด [12]

ลักษณะของเศษตัด หมายถึงลักษณะรูปร่างของเศษตัดที่หลังจากจบสิ้นการตัดเฉือน ไหลหลุดพ้นจากผิวคายเศษแล้ว ซึ่งเป็นผลมาจาก อัตราการป้อนตัดและความเร็วตัด รวมทั้งยังเป็นผลมาจาก ความลึกตัด มุมคายเศษโลหะและมุมตั้งสันคมมีดตัด อย่างไรก็ตามสภาพการกลึงอาจทำให้เกิดเศษโลหะจากการกลึงเป็นอย่างไรอย่างหนึ่งใน 4 แบบหลักๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.7 รูปแบบหลักของการเกิดเศษโลหะในการตัด



รูปที่ 2.8 การเกิดเศษโลหะไม่ต่อเนื่อง

เศษโลหะแบบต่อเนื่อง (Continuous Chips) นี้เกิดขึ้นเมื่อวัสดุชิ้นงานเป็นวัสดุเปราะ เช่น เหล็กหล่อ ทองเหลือง ซึ่งเป็นวัสดุที่มีส่วนผสมของสังกะสีอยู่มาก โดยที่กลไกของการเกิดเศษโลหะชนิดนี้ก็จะแตกต่างจากกลไกของการเกิดเศษโลหะเมื่อวัสดุชิ้นงานเป็นวัสดุเหนียว เนื่องจากวัสดุเปราะมีคุณสมบัติที่ไม่สามารถรับความเค้นเฉือนที่บริเวณเขตการแปรรูปหลัก จึงเกิดการแตกออกเป็นชิ้นเล็กๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ก)(ข)(ค)(ง) เนื่องจากเวลาที่เศษโลหะสัมผัสกับเครื่องมือตัดเป็นช่วงเวลาสั้นๆ ดังนั้นส่วนมากแล้วความร้อนที่เกิดขึ้นจึงติดไปกับเศษโลหะ อุณหภูมิของเครื่องมือตัดจึงต่ำลง ส่งผลให้อายุการใช้งานของเครื่องมือตัดสูงขึ้น

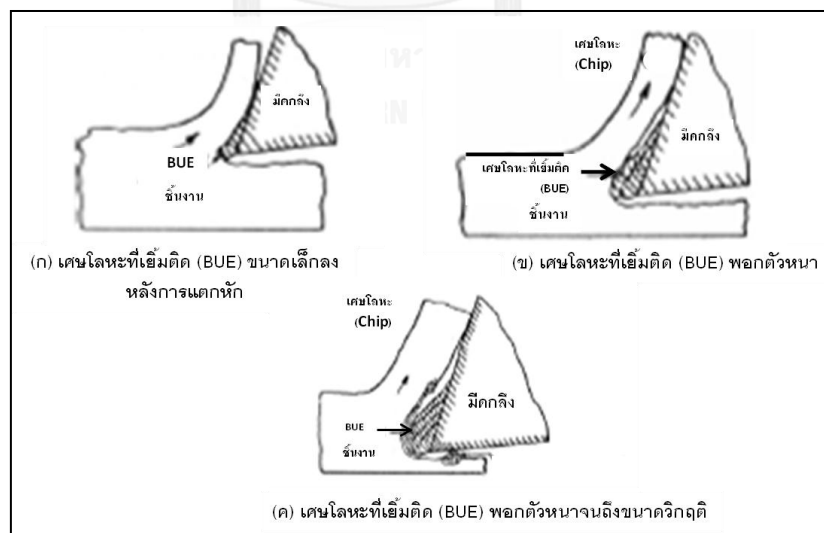
เศษโลหะแบบต่อเนื่อง (Continuous Chips)

รูปที่ 2.6(ข) เกิดขึ้นในกรณีที่วัสดุชิ้นงานเป็นวัสดุเหนียว เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ อลูมิเนียมผสม และสแตนเลส (Stainless) ลักษณะของเศษโลหะจะเป็นเส้นยาว เคลื่อนที่สัมผัสกับผิวคายเศษโลหะเป็นระยะทางเล็กน้อย จากนั้นก็จะเคลื่อนที่พ้นผิวคายเศษโลหะออกไป การเปลี่ยนรูปของเศษโลหะเกิดขึ้นในสองบริเวณ คือ เขตการแปรรูปหลัก (Primary Deformation Zone) หรือตามสมมติฐานก็คือ ระบายเฉือน เพราะเนื่องจากการแปรรูปจากวัสดุชิ้นงานกลายเป็นเศษโลหะเกิดขึ้นเพราะการเฉือน บริเวณที่สองที่เกิดการแปรรูปโดยความดันระหว่างผิวคายเศษ

โลหะกับเศษโลหะ ส่วนที่สัมผัสกับผิวคายเศษโลหะ เรียกว่า เขตการแปรรูปรอง (Secondary Deformation Zone) เศษโลหะแบบต่อเนื่องนี้ หากไม่สามารถควบคุมได้ จะยากต่อการทำงานและเป็นอันตรายอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับการกลึงที่ให้เศษโลหะที่มีความยาวมากอย่างอิสระ โดยจะเกิดการม้วนตัวพันรอบชิ้นงาน และมีดกลึง รวมถึงก่อให้เกิดอันตรายกับผู้ควบคุม เนื่องจากอาจเกิดการเหวี่ยงของเศษโลหะยาวๆ ที่มีร้อนสูง ทั้งเพื่อความปลอดภัยและง่ายต่อการควบคุมคง ต้องมีการทำให้เศษโลหะขาดลงบ้างด้วยการใช้มีดกลึงตัดที่มีตัวหักเศษโลหะให้ขาดเป็นช่วงสั้นๆ หรือที่เรียกว่า chip breaker

เศษโลหะต่อเนื่องที่มีการเชื่อมติดที่คมตัด (Continuous Chips with built-up Edge)

รูปที่ 2.6 (ค) เนื่องจากขณะเกิดการตัดบริเวณผิวสัมผัสระหว่างเศษโลหะและเครื่องมือตัดมี อุณหภูมิสูงประกอบกับความดันขนาดมหึมาในบริเวณนั้น ทำให้มีเนื้อบางส่วนของเศษโลหะ เชื่อมติดอยู่ที่บริเวณคมตัดและผิวคายเศษโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ก) มีผลให้ความเสียดทานใน บริเวณนั้นเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งขัดขวางการเคลื่อนที่ของเศษโลหะ จึงเกิดการพอกตัวเพิ่มของส่วนที่เชื่อม ติดรูปที่ 2.6(ข) ส่วนนี้พอกตัวเพิ่มสูงขึ้นจนถึงขนาดที่เรียกว่า ขนาดวิกฤต (Critical Size) รูปที่ 2.6 (ค) ชิ้นส่วนนี้ก็จะหลุดออกมาซึ่งบางส่วนจะติดไปกับเศษโลหะและบางส่วนจะฝังตัวอยู่บนผิว สำเร็จของชิ้นงาน ซึ่งจะทำให้คุณภาพของผิวสำเร็จแยกลง



รูปที่ 2.9 ขั้นตอนการเชื่อมติดที่คมตัด

การเย็บติดที่คมตัดจะเกิดเป็นวัฏจักร กล่าวคือ เกิดขึ้นแล้วหลุดออกไปแล้วก็เกิดขึ้นใหม่ ซึ่งส่งผลให้อัตราการสึกหรอของเครื่องมือตัดเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากส่วนที่หลุดออกไปนี้จะมีเนื้อของเครื่องมือตัดติดออกไปด้วย การเพิ่มความเร็วตัดให้สูงขึ้นมีผลให้ส่วนที่เย็บติดอ่อนตัวลง จึงทำให้ขนาดวิกฤติเล็กลงด้วย ซึ่งเมื่อเพิ่มความเร็วตัดขึ้นสูงเพียงพอ จะไม่พบส่วนที่เย็บติดนี้

เศษโลหะแบบที่มีลักษณะเป็นฟันเลื่อย (Serrated chips)

เศษโลหะในลักษณะนี้จะมีลักษณะเป็นแบบกิ่งต่อเนื่องและมีรูปร่างคล้ายฟันเลื่อย ซึ่งเกิดจากการเกิดเศษโลหะแบบเป็นวัฏจักรของการสับเปลี่ยนกันระหว่างความเครียดเฉือนที่สูงและความเครียดเฉือนที่ต่ำ โดยพื้นที่ส่วนใหญ่จะมีความเครียดเฉือนต่ำ และพื้นที่ส่วนน้อยเป็นบริเวณที่มีความเครียดเฉือนสูงดังรูปที่ 2.6 (ง) การเกิดเศษโลหะลักษณะนี้จะเกิดกับวัสดุที่มีความสามารถในการต้านทานอุณหภูมิต่ำพร้อมทั้งมีความแข็งลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อมีความร้อนเกิดขึ้น เช่น ไทเทเนียม เป็นต้น

จากรูปแบบเศษโลหะที่กล่าวมาข้างต้นทั้ง 4 แบบนั้นเป็นรูปแบบที่เกิดจากการตัดวัสดุที่แตกต่างกัน โดยไม่ผ่านตัวหักเศษ (Chip Breaker) แต่รูปแบบของเศษโลหะที่จะกล่าวถึงในงานวิจัยนี้หมายถึงเศษโลหะที่ผ่านการตัดแล้วไหลออกมาโดยไม่คำนึงถึงตัวหักเศษและเกิดการแตกหักของเศษโลหะ 2 แบบคือ เศษโลหะแบบต่อเนื่อง (Continuous Chip) และ เศษโลหะแบบแตกหัก (Broken Chip) จากรูปที่ 2.9 แสดงรูปแบบของเศษโลหะแบบต่างๆ ซึ่งในงานวิจัยครั้งนี้จัดให้ลักษณะเศษโลหะตามรูปหมายเลข 1-3 เป็นเศษโลหะแบบต่อเนื่อง (Continuous Chip) และลักษณะเศษโลหะตามรูปหมายเลข 4-10 เป็นเศษโลหะแบบแตกหัก (Broken Chip) อ้างจากงานวิจัยการจำแนกเศษโลหะ กำหนดให้เศษโลหะที่มีความยาวมากกว่า 5 เซนติเมตรเป็นเศษโลหะแบบต่อเนื่อง และเศษโลหะที่มีความยาวน้อยกว่า 5 เซนติเมตรเป็นเศษโลหะแบบแตกหัก

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ริบบิ้น	ม้วนพัน	เกลียว	เซลิคซ์	เกลียว ยาว	เกลียว สั้น	ม้วน โคน	ม้วนวง	โค้งตัวซี	หยิก หยอย

รูปที่ 2.10 เศษโลหะแบบต่างๆ

1.ริบบิ้น	2.เกลียว	3.ม้วนเป็นวง	4.เซลิคซ์	5.โคน	6.โค้ง	7.ชิ้นเล็ก	8.เชื่อม
1.1 ยาว	2.1 ยาว	3.1 ม้วนเรียบ	4.1 ยาว	5.1 ยาว	6.1 หยิกหยอย		
1.2 สั้น	2.2 สั้น	3.2 ม้วนโคน	4.2 สั้น	5.2 สั้น	6.2 แดกหัก		
1.3 ม้วนพัน	2.3 ม้วนพัน		4.3 ม้วนพัน	5.3 ม้วนพัน			

รูปที่ 2.11 ประเภทของรูปแบบของเศษโลหะตามมาตรฐาน ISO 3685-1993

นอกจากนี้ยังมีการจัดประเภทของรูปแบบของเศษโลหะที่เกิดจากกระบวนการตัดโลหะตามมาตรฐาน ISO 3685-1993 โดยขึ้นกับขนาดและรูปทรงของเศษโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งแบ่งเป็น 8 กลุ่มตามรูปทรงของเศษโลหะ โดยในแต่ละกลุ่มจะถูกแบ่งย่อยตามขนาด (ยาว, สั้น) และตามลักษณะทางกายภาพ (พันกัน, เป็นชิ้นเล็กๆ) อีกด้วย ทั้งนี้เศษโลหะที่เกิดขึ้นในกระบวนการกลึงอาจเป็นแบบริบบิ้น, แบบหยิกหยอย หรือแบบเกลียว เป็นต้น

2.7 ทฤษฎีความขรุขระผิว

ความขรุขระ (Roughness) เป็นคุณสมบัติของชิ้นงานซึ่งไม่ขึ้นกับชนิดของวัสดุ หากแต่ขึ้นอยู่กับกระบวนการที่ใช้ในการขัดผิวหน้า (Surface Finish) เกิดเป็นลวดลายต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นเส้นตรง เส้นโค้ง หรืออาจเป็นลวดลายที่มีระเบียบหรือไม่ระเบียบก็ได้ ในการพิจารณาพื้นผิววัสดุ จะดูจากปริมาณความกว้าง (Roughness Width) และความสูง (Roughness Height) ของความขรุขระผิว

การวิเคราะห์ความขรุขระผิวหน้าของชิ้นงาน จะต้องทำการแยกลักษณะความเป็นคลื่น (waviness height) ที่เป็ความคลาดเคลื่อนของรูปร่าง ซึ่งมีสาเหตุมาจากความไม่ถูกต้องทางเรขาคณิตของกรรมวิธีการผลิตผิวหน้า โดยจะมีขนาดใหญ่กว่า roughness sampling length ประมาณ 1 ไมครอน เมื่อเปรียบเทียบกับระนาบอ้างอิง การแยกความเป็นคลื่น (waviness height) ออกจากความขรุขระผิว สามารถทำได้โดยการจำกัดการทดสอบของผิวหน้าที่ถูกตกแต่งมาด้วยช่วงความยาวหนึ่ง ซึ่งจะไม่นับความยาวคลื่นที่ยาว ดังนั้นจะมีเฉพาะความขรุขระผิวเท่านั้น ความยาวคลื่นสูงสุดที่ถูกพิจารณาเราเรียกว่าความยาวคลื่นตัดออก (Cut-off wavelength) ซึ่งกำหนดเป็นมาตรฐานในสหราชอาณาจักรโดย B.S1134 ให้มีค่าเท่ากับ 0.25 มม. 0.8 มม. และ 2.5 มม. ซึ่งการเลือกใช้ค่าเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะของผิวหน้าที่จะทำการทดสอบ นอกจากนี้คุณภาพผิวชิ้นงานสามารถวิเคราะห์ค่าอื่นๆ ได้ดังนี้

รอยตำหนิยาว (Lay) เป็นรอยตำหนิ หรือรอยทางเดินของเครื่องมือตัด ซึ่งเกิดขึ้นบนพื้นผิวระหว่างกระบวนการตัดเฉือน ทิศทางที่เกิดขึ้นอาจเป็นได้หลายแบบ ขึ้นอยู่กับเครื่องมือที่ใช้

ตำหนิผิวหน้า (Surface Flaw) เป็นรอยตำหนิเล็กๆ บนสันของยอด เช่น รอยร้าว โพรงอากาศ ที่มีลักษณะเกิดขึ้นแบบสุ่ม ซึ่งไม่ควรนำมาพิจารณาในการคำนวณความขรุขระผิวชิ้นงาน

ความขรุขระของพื้นผิวชิ้นงานมีผลต่อคุณสมบัติและประสิทธิภาพในการทำงานของชิ้นงานนั้นๆ เช่น ลูกสูบที่ผิวด้านในขรุขระมากจะทำให้เกิดการเสียดสีขณะใช้งาน ทำให้ต้องใช้แรงในการขับเคลื่อนมากขึ้น การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ นอกจากนี้ยังทำให้เกิดความร้อนสูง กระจกและเลนส์ชนิดต่างๆ โดยเฉพาะที่ใช้ในการทำแว่นตาจำเป็นต้องมีความเรียบสูง เพื่อให้แสงสามารถสะท้อนและลอดผ่านได้โดยปราศจากการกระเจิงของแสง หรือเกิดขึ้นน้อยที่สุด เพื่อให้การมองผ่านเลนส์เป็นไปโดยสมบูรณ์

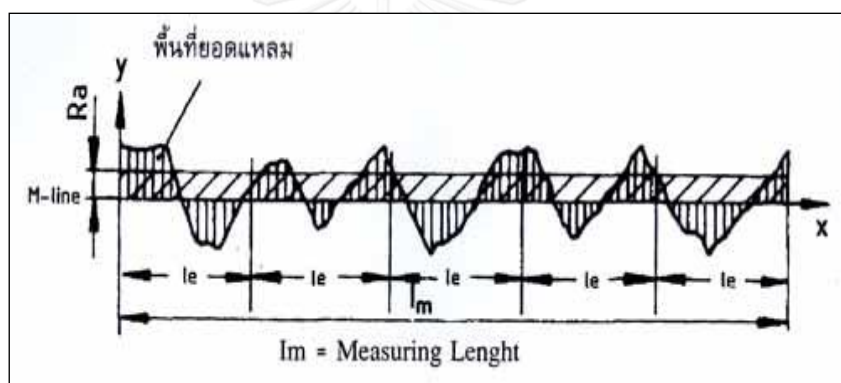
วิธีการวัดความขรุขระมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน ในระดับอุตสาหกรรมตรวจสอบความขรุขระของผลิตภัณฑ์โดยดูด้วยตา หรือใช้นิ้วสัมผัสเปรียบเทียบกับความขรุขระมาตรฐาน การตรวจสอบวิธีนี้พบว่ามีความผิดพลาดสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากผู้ตรวจสอบ สำหรับการวัดที่ต้องการความ

ถูกต้องสูงขึ้น สามารถทำได้โดยใช้เครื่องสไตลัส อินสทรูเมนต์ (Stylus Instrument) ซึ่งประกอบด้วยหัววัดที่ต่อกับตัวแปลงสัญญาณ (Transducer) ลากไปบนผิวชิ้นงาน ซึ่งสัญญาณเชิงกลจะถูกแปลงสัญญาณไฟฟ้าแล้วนำไปคำนวณเป็นค่าความขรุขระผิว

2.7.1 การวัดความขรุขระผิว

ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย

ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย (Average Roughness, Ra) หมายถึง ค่าความขรุขระผิวที่หาได้จากการรวมพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นเหนือเส้นกึ่งกลาง (M-Line) กับพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นใต้เส้นกึ่งกลาง ทหารด้วยความยาวเฉลี่ย (Lm) มีหน่วยวัดเป็นไมโครเมตร การวัดค่าความขรุขระผิวแสดงในรูปที่ 2.11

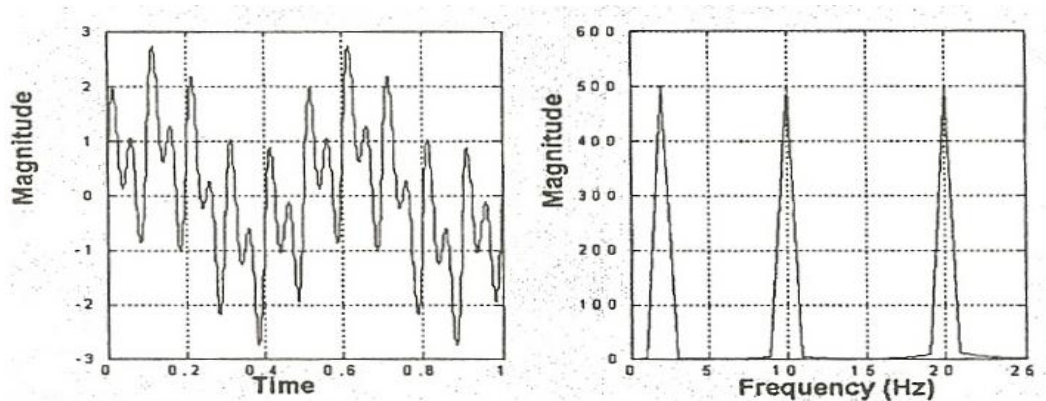


รูปที่ 2.12 การวัดค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย Ra

ค่าความขรุขระชิ้นงานสูงสุด (Rz) หมายถึง ค่าความหยาบผิวซึ่งหาได้จากการวัดทดสอบเป็นช่วงเท่า ๆ แล้วนำค่าที่ได้มารวมกันหารเป็นค่าเฉลี่ย โดยที่ค่าของ Rz มีหน่วยเป็นไมโครเมตร

2.8 การประมวลผลสัญญาณ (Signal Processing)

การวิเคราะห์สัญญาณ (Signal Analysis) เป็นกระบวนการที่สำคัญในการประมวลผล โดยเมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบต่างๆ ของสัญญาณ และทราบว่าส่วนใดเป็นส่วนที่มีความสำคัญ ส่วนใดสามารถตัดทิ้งได้โดยไม่ก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนมากนัก ก็สามารถที่จะประมวลผลสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยการแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลา (Time Domain) ไปเป็นโดเมนความถี่ (Frequency Domain) ดังรูปที่ 2.1.8 และสมการที่ 2.1.8-1 โดยที่ $f(t)$ คือสัญญาณใดๆ



รูปที่ 2.13 การแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลาไปสู่โดเมนความถี่

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-2\pi f t} dt \quad (2.20)$$

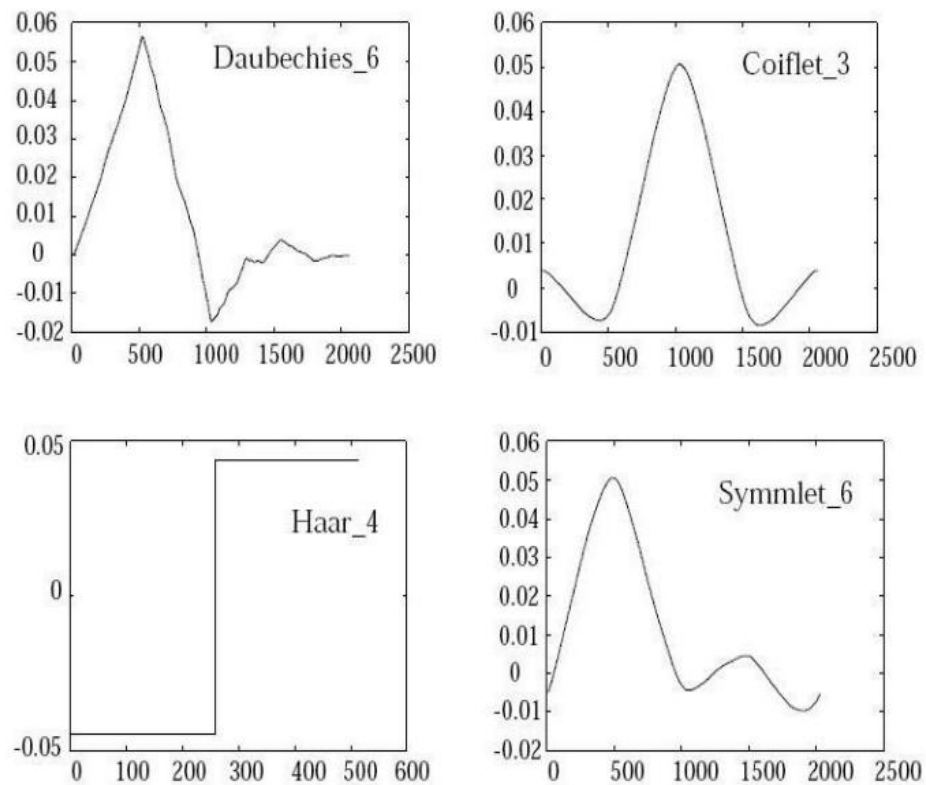
ในการวิเคราะห์สัญญาณใดๆนั้น บางครั้งการพิจารณาที่โดเมนเวลาของสัญญาณอย่างเดียวอาจไม่สามารถให้ข้อมูลที่เพียงพอต่อการวิเคราะห์ได้ การเปลี่ยนมุมมองของสัญญาณสามารถช่วยในการวิเคราะห์ง่ายขึ้น ซึ่งการแปลงฟูเรียร์ (Fourier Transform) เป็นการวิเคราะห์รูปแบบหนึ่งที่ใช้ช่วยในการเปลี่ยนมุมมองดังกล่าวกล่าวนี้ โดยการแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลาไปเป็นโดเมนความถี่นั้น ใช้หลักการที่ว่าสัญญาณบางประเภทสามารถสังเคราะห์จากผลรวมของฟังก์ชันไซน์ (Sine Function) ที่ความถี่และขนาดต่างๆได้ เมื่อรู้เกี่ยวกับความถี่และขนาดของฟังก์ชันไซน์ที่เป็นองค์ประกอบของสัญญาณ หรือที่เรียกว่าสเปกตรัมของความถี่ (Frequency Spectrum) ของสัญญาณนั้น โดยจะทำให้รู้ถึงการกระจายกำลังของสัญญาณในความถี่ต่างๆ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการวิเคราะห์สัญญาณนั้นๆ เพราะจะทำให้ทราบว่ากำลังของสัญญาณนั้นอยู่ในย่านไหนของสเปกตรัมของความถี่ และส่วนใดที่สำคัญหรือไม่สำคัญ

อย่างไรก็ตามการแปลงฟูเรียร์ก็ยังคงมีข้อเสียอยู่ ไม่สามารถรู้ทั้งเวลาและพลังงานของสัญญาณใดๆได้ถูกต้องพร้อมๆกัน ซึ่งในบางครั้งต้องการรู้ทั้งกำลังในความถี่ต่างๆ รวมทั้งเวลาที่สัญญาณนั้นเกิดขึ้นด้วย ดังนั้นการแปลงฟูเรียร์แบบหน้าต่าง (Window fourier transform) จึงถูกพัฒนาขึ้น โดยแบ่งสัญญาณออกเป็นหลายๆช่วงต่อเนื่องกัน และทำการแปลงสัญญาณแต่ละช่วงให้อยู่ในโดเมนความถี่ ด้วยวิธีนี้ทำให้สามารถรู้ถึงความถี่ของสัญญาณและช่วงเวลาที่เกิดสัญญาณนั้นเกิดขึ้น อย่างไรก็ตามขนาดของช่วงที่คงที่ไม่สามารถปรับเปลี่ยนให้เหมาะสมกับสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาสั้นๆได้

ดังนั้นการการแปลงเวฟเลต ซึ่งเป็นการวิเคราะห์สัญญาณที่ได้ทั้งความถี่ และเวลาโดยแทนที่แปลงสัญญาณ ไปหาฟังก์ชันชายน์เหมือนกับวิธีแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว ซึ่งเน้นความสำคัญที่ความถี่มากกว่าเวลา การแปลงเวฟเลตเป็นการแปลงสัญญาณไปหาฟังก์ชันเวฟเลตหรือที่เรียกกันว่าเวฟเลตแม่ซึ่งให้ความสำคัญทั้งความถี่และเวลา

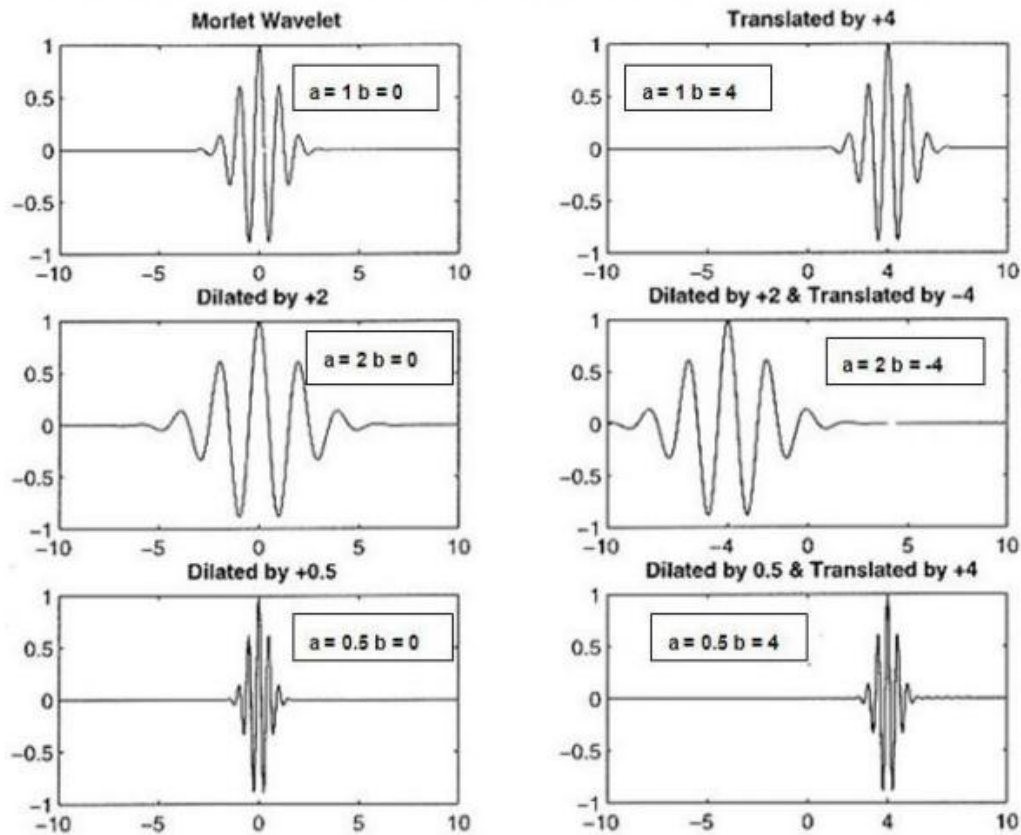
2.9 การแปลงเวฟเลต (Wavelet Transform) [4]

การแปลงเวฟเลตนั้นเป็นเครื่องมือที่ถูกพัฒนาขึ้น และถูกนำไปประยุกต์ใช้ในหลายๆด้าน เช่น การประมวลผลสัญญาณ (Signal Processing) และการประมวลภาพ (Image processing) เวฟเลตเป็นคลื่นรูปแบบหนึ่งที่มีช่วงเวลาที่จำกัดและมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ โดยเวฟเลตถูกแบบออกเป็นหลายลักษณะ โดยถูกเรียกลักษณะต่างๆนี้ว่า แฟมิลี (Family) ซึ่งแต่ละแฟมิลี นั้นก็มีลักษณะและรูปแบบที่แตกต่างกันออกไป ตัวอย่างเช่น Daubechies, Symlet, Haar, Coiflet เป็นต้น ดังนั้นในการแปลงเวฟเลต ผู้ใช้ก็ควรเลือกใช้ Family ที่เหมาะสมกับสัญญาณที่ต้องการวิเคราะห์ให้มากที่สุด ในการวิเคราะห์สัญญาณนั้น เวฟเลตได้ถูกนำมาใช้ในการแบ่งสัญญาณหรือฟังก์ชันออกเป็นส่วนๆที่มีความสัมพันธ์กัน หลังจากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว การวิเคราะห์สัญญาณอาจสามารถทำได้ในรูปของการวิเคราะห์ในเชิงเวลาและการวิเคราะห์ในเชิงความถี่ แต่เดิมนั้นนิยมใช้วิธี การแปลงฟูเรียร์ (Fourier transform) ในการวิเคราะห์สัญญาณ อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์สัญญาณด้วยวิธีดังกล่าว สามารถวิเคราะห์ได้เฉพาะสัญญาณความถี่เท่านั้น แต่ในขณะที่การแปลงเวฟเลตนั้นสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงเวลาและเชิงความถี่ของสัญญาณ จึงอาจเรียกได้ว่าเป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ในเชิงเวลา-ความถี่ (Time-Frequency Domain) นั่นเอง



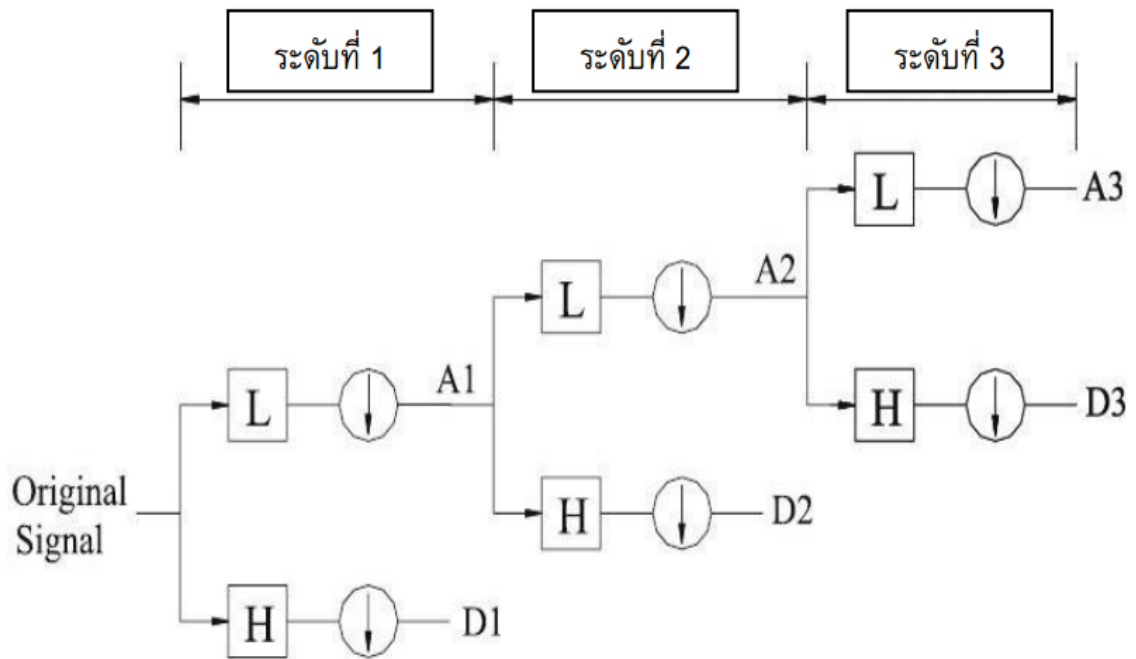
รูปที่ 2.14 สัญญาณเวฟเลทในแต่ละแฟมิลี

เวฟเลทในแต่ละแฟมิลีนั้น ก็อาจมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไปหลายๆลักษณะ อีกเช่นกัน โดยมีพารามิเตอร์ 2 ตัว คือ การย่อหรือขยาย (Scaling, a) และการเลื่อนตำแหน่ง (Translation or shifting, b) โดยที่ การย่อหรือขยาย เป็นการเปลี่ยนความถี่ของเวฟเลทนั่นเอง และการเลื่อนตำแหน่งหมายถึงการเลื่อนตำแหน่งการเกิดของคลื่นเวฟเลทบนแกนเวลา ดังภาพที่ 2.13 ซึ่งสังเกตว่าเวฟเลทแต่ละคลื่นนั้นมีลักษณะใกล้เคียงกัน แตกต่างกันเพียงความถี่และตำแหน่งของการเกิดเท่านั้น



ภาพที่ 2.14 ลักษณะของเวฟเลตที่ค่า a และ b ต่างๆกัน

ทฤษฎีเวฟเลตนั้นถูกใช้ในการอธิบายสัญญาณหนึ่ง ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบย่อยๆหลายๆ ส่วนที่มีความสัมพันธ์กัน องค์ประกอบย่อยๆเหล่านี้อยู่ในรูปของเวฟเลตที่ถูกย่อหรือขยายและเลื่อนตำแหน่ง โดยมีกระบวนการในการแยกย่อยสัญญาณนี้ ซึ่งถูกเรียกว่า เวฟเลต ดีคอมโพสิชัน (Wavelet decomposition) ซึ่งสัญญาณที่ต้องการวิเคราะห์ (Original signal) นั้นสามารถแบ่งออกได้เป็นสัญญาณ 2 ประเภทด้วยกันคือสัญญาณประมาณ (Approximation signal) และสัญญาณรายละเอียด (Detail signal) โดยที่สัมประสิทธิ์การประมาณ (Approximation coefficient) นั้นเป็นองค์ประกอบของสัญญาณ $f(t)$ ที่มีค่าความถี่ต่ำขณะที่สัมประสิทธิ์รายละเอียด (Detailed coefficient) เป็นองค์ประกอบของสัญญาณ $f(t)$ ที่มีค่าความถี่สูง และในการแยกย่อยสัญญาณสามารถทวนซ้ำไปได้เรื่อยๆ ตามจำนวนระดับที่ต้องการ สัญญาณที่ต้องการวิเคราะห์นั้น ในระดับที่ 1 สามารถแบ่งออกได้เป็น สัญญาณ A1 และ D1 ต่อจากนั้นในระดับที่ 2 สัญญาณ A1 ถูกแบ่งย่อยออกเป็นสัญญาณ A2 และ D2 ไปเรื่อยๆจนกระทั่งถึงระดับที่กำหนดไว้ ดังภาพที่ 2.1.9.2



ภาพที่ 2.16 การแยกย่อยสัญญาณของการแปลงเวฟเล็ต

2.10 เวฟเลทดอเบชีส์ (Daubechies wavelets)

เวฟเลทดอเบชีส์ เป็นแฟมิลี่ (Family) หนึ่งที่นิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์สัญญาณเชิงกล โดยเวฟเลทดอเบชีส์นั้นมีอยู่ด้วยกันหลายประเภทด้วยกันขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์หรือที่เรียกว่า Scale Coefficient ที่แตกต่างกันไป ตัวอย่างเช่น D4 โดยที่ 'D' หมายถึง Family ของเวฟเลท ซึ่งก็คือเวฟเลทดอเบชีส์ และ '4' หมายถึง จำนวนสัมประสิทธิ์ (Scale coefficient) ที่มีค่าไม่เท่ากับ 0 นั่นเอง โดยค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆนั้นแสดงได้ดังภาพ 2.16 ระดับที่ 1 ระดับที่ 2 ระดับที่ 3

D2	-0.34265671	0.01774979	0.04345268
1	-0.04560113	6.07514995e - 4	-0.09564726
1	0.10970265	-2.54790472e - 3	3.54892813e - 4
	-0.00882680	5.00226853e - 4	0.03162417
D4	-0.01779187		-6.67962023e - 3
0.6830127	4.71742793e - 3	D16	-6.05496058e - 3
1.1830127		0.07695562	-3.261296728e - 3
0.3169873	D12	0.44246725	3.25814671e - 4
-0.1830127	0.15774243	0.95548615	-3.56329759e - 4
	0.69950381	0.82781653	-5.5645514e - 5
D6	1.06226376	-0.02238574	
0.47046721	0.44583132	-0.40165863	D20
1.14111692	-0.31998660	6.68194092e - 4	0.03771716
0.650365	-0.18351806	0.18207636	0.26612218
-0.19093442	0.13788809	-0.02456390	0.74557507
-0.12083221	0.03892321	-0.06235021	0.97362811
0.0498175	-0.04466375	0.01977216	0.39763774
	7.83251152e - 4	0.01236884	-0.35333620
D8	6.75606236e - 3	-6.88771926e - 3	-0.27710988
0.32580343	-1.52353381e - 3	-5.54004549e - 4	0.18012745
1.01094572		9.55229711e - 4	0.13160299
0.89220014	D14	-1.66137261e - 4	-0.10096657
-0.03957503	0.11009943		-0.04165925
-0.26450717	0.56079128	D18	0.04696981
0.0436163	1.03114849	0.05385035	5.10043697e - 3
0.0465036	0.66437248	0.34483430	-0.01517900
-0.01498699	-0.20351382	0.85534906	1.97332536e - 3
	-0.31683501	0.92954571	2.81768659e - 3
D10	0.10084647	0.18836955	-9.69947840e - 4
0.22641898	0.11400345	-0.41475176	-1.64709006e - 4
0.85394354	-0.05378245	-0.13695355	1.32354367e - 4
1.02432694	-0.02343994	0.21006834	-1.87584156e - 5
0.19576696			

ภาพที่ 2.17 ค่าสัมประสิทธิ์ของเวฟเลทตอเบซีส D2 ถึง D20

สามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การประมาณ (Approximation coefficient) ค่าสัมประสิทธิ์รายละเอียด (Detailed coefficient) ได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$S_{m+1,n} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{k=0}^{N_k-1} c_k S_{m,2n+k}$$

$$T_{m+1,n} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{k=0}^{N_k-1} b_k S_{m,2n+k}$$

C_k คือ ค่าสัมประสิทธิ์ ที่ k

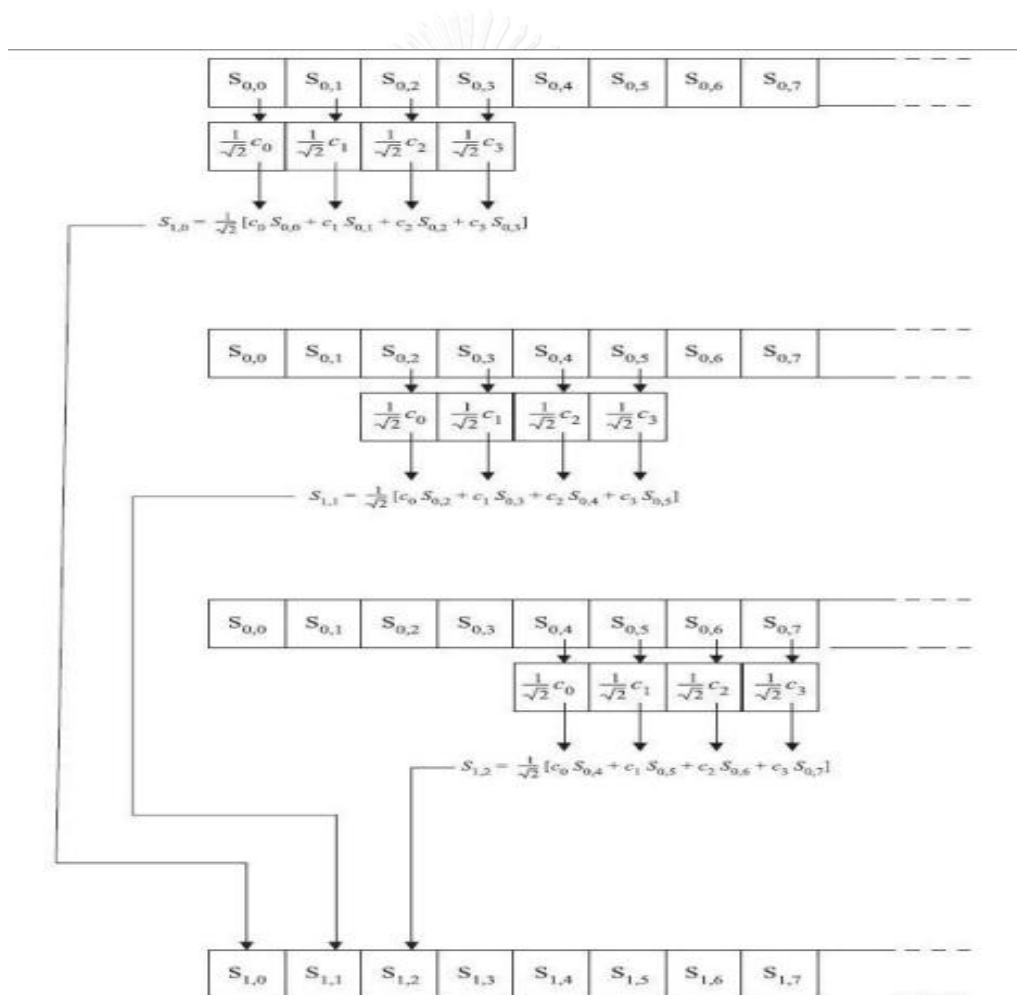
b_k คือ ค่า Reconfigured Coefficient ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$b_k = (-1)^k c_{N_k-1-k}$$

S_{m, n} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การประมาณ ในระดับที่ m ตำแหน่ง n

T_{m, n} คือ ค่าสัมประสิทธิ์รายละเอียด ในระดับที่ m ตำแหน่ง n

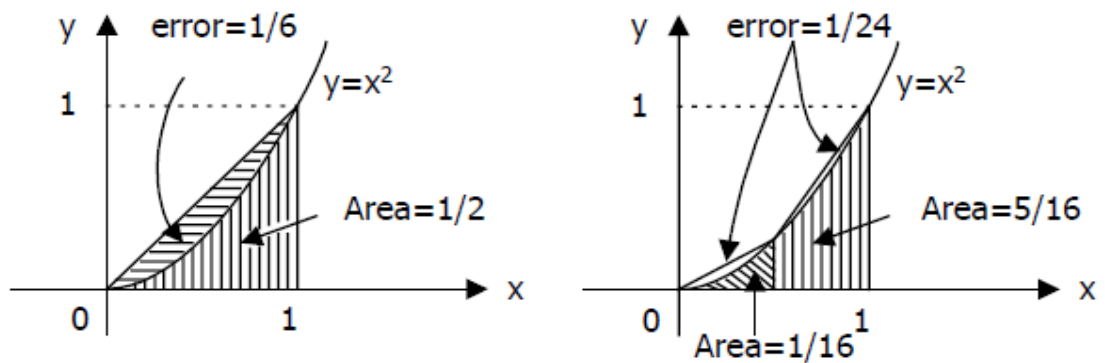
N_k คือ จำนวน Scale Coefficient



ภาพที่ 2.18 ตัวอย่างในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การประมาณในระดับที่ 1 (S_{1,n}) จากสัญญาณนำเข้า (S_{0,n})

2. 11 วิธีการประมาณด้วยสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Method)

วิธีนี้การหาพื้นที่ใต้กราฟโดยการประมาณด้วยกฎสี่เหลี่ยมคางหมู ทำได้โดยการแบ่งพื้นที่ใต้กราฟออกเป็นส่วนย่อย n ส่วนเท่าๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ 2.25 โดยการหาพื้นที่ของสี่เหลี่ยมคางหมูแต่ละรูปแล้วนำพื้นที่ของแต่ละรูปมารวมกันจะได้คำตอบเป็นค่าปริพันธ์ของฟังก์ชัน $f(x)$ ในช่วงตัวแปร x เปลี่ยนแปลงจาก a ถึง b เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.18

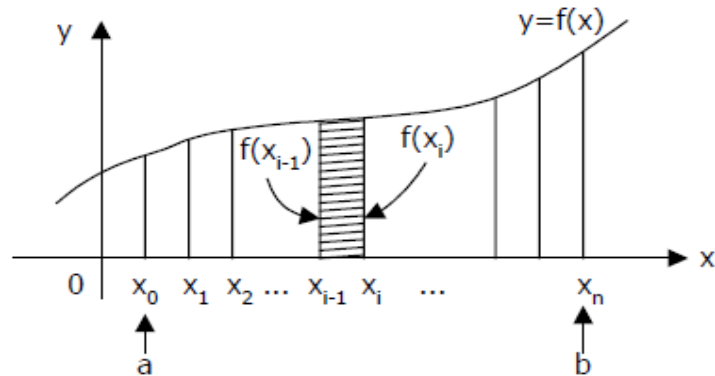


(ก) ประมาณพื้นที่ใต้กราฟด้วยสามเหลี่ยม

(ข) แบ่งพื้นที่ใต้กราฟเป็นสี่เหลี่ยมคางหมู

รูปที่ 2.19 การคำนวณพื้นที่ใต้กราฟ

จากรูปที่ 2.18 (ก) แสดงการประมาณพื้นที่ใต้กราฟด้วยรูปสามเหลี่ยม ซึ่งพบว่าจะมีความคลาดเคลื่อน (error) มากกว่าที่ควรเป็น จึงใช้วิธีการแบ่งพื้นที่ใต้กราฟเป็นสี่เหลี่ยมคางหมูดังแสดงในรูปที่ 2.18 (ข) ซึ่งจะพบว่าจะมีความคลาดเคลื่อนลดน้อยลง นั่นคือถ้าแบ่งพื้นที่ใต้กราฟออกเป็นส่วนย่อยๆ มากขึ้นจะทำให้มีความถูกต้องดีกว่า ในทางทฤษฎีจะคำนวณที่จำนวนเป็นอนันต์ เพื่อให้มีความถูกต้องสมบูรณ์ แต่ความคลาดเคลื่อนจะมาจากการปัดค่าแทน ซึ่งจะยังไม่กล่าวถึงโดยทั่วไป เมื่อเราต้องการหาค่าปริพันธ์ของฟังก์ชัน $f(x)$ จาก $x = a$ ถึง $x = b$ ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.20 การหาค่าปริพันธ์ด้วยวิธีสี่เหลี่ยมคางหมู

การใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมู เราจะแบ่งช่วงขีดจำกัดเริ่มจาก a ถึง b ออกเป็นส่วนย่อย n ส่วนเท่าๆ กันจะได้สี่เหลี่ยมคางหมูที่มีขอบเขตของแต่ละส่วนอยู่ที่ตำแหน่ง $x_0, x_1, x_2, \dots, x_n$ พิจารณาที่สี่เหลี่ยมลำดับที่ i ซึ่งอยู่ระหว่าง x_{i-1} และ x_i จะมีความกว้าง ความสูงด้านซ้าย และความสูงด้านขวาเป็น $w = \frac{b-a}{n}$, $f(x_{i-1})$ และ $f(x_i)$ จะคำนวณหาพื้นที่ได้จากสมการ

$$A_i = \frac{w}{2} (f(x_{i-1}) + f(x_i))$$

ซึ่งได้มาจากสูตรการหาพื้นที่ของรูปสี่เหลี่ยมคางหมู

$$A = m w$$

$$\text{โดยที่} \quad m = \frac{1}{2} (a + b)$$

$$\text{เมื่อแทน } m \text{ จะได้} \quad A = \frac{1}{2} (a+b) w$$

พื้นที่ทั้งหมดของสี่เหลี่ยมคางหมูจำนวน n รูปจะใช้แทนเป็นค่าปริพันธ์ ดังนั้นเมื่อกำหนดให้ T_n คือเป็นผลรวมของพื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมูแต่ละรูปจะได้

$$\begin{aligned} T_n &= A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_{n-1} + A_n \\ &= \frac{w}{2} [f(x_0) + f(x_1)] + \frac{w}{2} [f(x_1) + f(x_2)] + \frac{w}{2} [f(x_2) + f(x_3)] \\ &\quad + \dots + \frac{w}{2} [f(x_{n-2}) + f(x_{n-1})] + \frac{w}{2} [f(x_{n-1}) + f(x_n)] \\ &= \frac{w}{2} [f(x_0) + 2f(x_1) + 2f(x_2) + \dots + 2f(x_{n-1}) + f(x_n)] \end{aligned}$$

เมื่อพิจารณาจากสมการจะเห็นว่าความถูกต้องของวิธีสี่เหลี่ยมคางหมูขึ้นอยู่กับจำนวนของสี่เหลี่ยมคางหมูที่ใช้ในการประมาณค่า และนอกจากนี้จะได้ว่าพื้นที่ใต้กราฟที่เป็นเส้นตรงจะสามารถใช้สี่เหลี่ยมคางหมูเพียงรูปเดียวได้ ขณะที่พื้นที่ภายใต้กราฟที่มีความโค้งเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว หลายโค้ง ในทางทฤษฎีอาจต้องใช้สี่เหลี่ยมคางหมูหลายรูป ดังนั้นเมื่อพิจารณาถึงเรื่องของความเร็วในการคำนวณ และความผิดพลาดที่เกิดจากการปัดค่าตัวเลขแล้วปรากฏว่าจำนวนสี่เหลี่ยมที่ใช้จะมีจำนวนหนึ่งเท่านั้นที่เหมาะสมและให้ผลดีกว่าจำนวนที่มากเกินไป

2.12 การวิเคราะห์ความถดถอย (Multiple Regression) [20]

2.12.1 รูปแบบของสมการความถดถอยเชิงพหุคูณ

การวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุคูณ (Multiple Regression Analysis) เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นที่ทำหน้าที่พยากรณ์ตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป กับตัวแปรตาม 1 ตัว ในการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณนั้นจะต้องหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณ (Multiple Correlation Coefficient) เพื่อให้ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับตัวแปรตามว่ามีลักษณะความสัมพันธ์กันเช่นใด สำหรับการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ จะต้องหาสมการถดถอยเพื่อใช้ในการพยากรณ์ของตัวแปรตาม (Y) และหาค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน รวมทั้งหาค่าสหสัมพันธ์พหุคูณ (Multiple Correlation) เพื่อหาความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงที่เป็นไปได้สูงสุดระหว่างตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นกับตัวแปรตาม รูปแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณที่มีตัวแปรถดถอย k ตัว มีรูปแบบดังสมการที่ 2.21

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + e \quad (2.21)$$

พารามิเตอร์ $\beta_j, j = 0, 1, \dots, k$ ถูกเรียกว่าสัมประสิทธิ์การถดถอย แบบจำลองนี้แสดงระนาบแบบระนาบเกิน (Hyperplane) ที่มีมิติ k ของตัวแปรถดถอย $\{x_j\}$ (Cakir, 2009 #20; Feng, 2003 #3; Fnides, 2008 #10; Groover, 2004 #12; Huang, 2001 #2; Kwak, 2005 #4; Kyocera, 2014 #22; S, 2008 #9; Salah Hamed Ramadan Ali, 2009 #23; Shawky, 1996 #28; Tangjitsitcharoen, 2008 #17; Tangjitsitcharoen, 2008 #8; Tangjitsitcharoen, 2013 #15; Tangjitsitcharoen, 2013 #18; Venkataramaiah, 2014 #25; Xiaoli, 1999 #1; Yaldiz, 2006 #27; Zhang, 2007 #6; กิ่งผล, 2554 #13; จันทร์ผ่อง, 2554 #14; จันทลักษณ์, 2545 #26; ชูติมา, 2545 #21; ตั้งจิตลิตเจริญ, 2548 #5; ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา, 2545 #19; ศิริธรรมปิติ, 2550

#7;สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ , 2555 #24;สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ, 2553 #11;สมานมิตร, 2556 #16} พารามิเตอร์ β_j แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับผลตอบ y ต่อหนึ่งหน่วยของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับ x_j เมื่อตัวแปรอิสระที่เหลือ $x_i (i \neq j)$ มีค่าคงตัว

2.12.2 สมมติฐานหรือเงื่อนไขของการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุคูณ

- ความคลาดเคลื่อน e เป็นตัวแปรที่มีการแจกแจงแบบปกติ
- ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนเป็นศูนย์ นั่นคือ $E(e) = 0$
- ค่าความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนเป็นค่าคงที่ที่ไม่ทราบค่า $V(e) = \sigma^2$
- e_i และ e_j เป็นอิสระต่อกัน ; $(i \neq j)$ นั่นคือ covariance $(e_i, e_j) = 0$

2.13 การวิเคราะห์ผล [19]

2.13.1 การใช้ P-Value ในการทดสอบสมมติฐาน

การสรุปผลของการทดสอบสมมติฐานวิธีหนึ่งคือ การแสดงว่าสมมติฐานหลักจะถูกปฏิเสธหรือไม่ที่ค่า α หรือระดับนัยสำคัญที่กำหนด โดย P-Value คือ ความน่าจะเป็นที่ค่าทดสอบทางสถิติจะมีค่าเป็นอย่างน้อยที่จะทำให้ค่านี้มีค่ามากกว่าค่าสังเกตในทางสถิติเมื่อสมมติฐานหลักเป็นจริง ดังนั้น P-Value จะแสดงถึงค่าที่จะใช้ในการปฏิเสธ H_0 และผู้ตัดสินใจสามารถข้อสรุปผลการทดลองที่ระดับนัยสำคัญอื่นๆ ได้ นอกจากนี้ยังสามารถนิยาม P-Value ว่าเป็นค่าที่น้อยที่สุดของระดับนัยสำคัญซึ่งนำไปสู่การปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0

โดยปกติแล้วค่าทดสอบทางสถิติมีนัยสำคัญก็ต่อเมื่อ สมมติฐานหลัก H_0 ถูกปฏิเสธ ดังนั้นเราอาจจะพิจารณาค่า P-Value ว่าเป็น α ที่น้อยที่สุดซึ่งทำให้ข้อมูลมีนัยสำคัญ เมื่อรู้ค่า P-Value แล้ว ผู้ทดลองก็จะสามารถทราบว่าข้อมูลมีนัยสำคัญอย่างไร โดยไม่ต้องอาศัยการวิเคราะห์ข้อมูลซึ่งมีการกำหนดระดับนัยสำคัญไว้ก่อน

2.13.2. การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination: R^2)

การทดสอบความเหมาะสมของสมการต้นแบบด้วยการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเป็นค่าที่ใช้อธิบายความสามารถของสมการถดถอยหรือตัวแปรอิสระในสมการถดถอยว่าสามารถจะอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าตอบสนอง หรือตัวแปรตามได้ในสัดส่วนเท่าใด ค่า R^2 ยิ่งมาก สมการก็ยิ่งมีความเหมาะสมมาก แต่ในทางปฏิบัติ เนื่องจากค่าค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจมีความไวในการเปลี่ยนแปลง คือ เมื่อเปลี่ยนแปลงจำนวนตัวแปรอิสระในสมการค่าจะมีค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไป จึงนิยมใช้ค่าที่ทำการปรับค่าแล้ว (R^2_{adj})

แทน

2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี 1999 Xiaoli, L., Dong, S., Zhejun, Y, [1] เริ่มต้นได้นำการแปลงเวฟเล็ตและ fuzzy neural network มาประยุกต์ใช้กับการติดตามความเสียหายของเครื่องมือในกระบวนการเจาะ และต่อมาได้ทำการศึกษาต่อจากงานวิจัยเดิม โดยนำเสนออัลกอริทึมโดยนำวิธีการแปลงเวฟเลทแบบไม่ต่อเนื่อง มาประยุกต์ใช้ในการติดตามการแตกหักของเครื่องมือในกระบวนการขุดเจาะ (Drilling) โดยใช้การประมวลผลแบบทันที (Real time processing) โดยวิธีการแปลงเวฟเลทแบบไม่ต่อเนื่องนี้ใช้เวลาในการประมวลผลที่เร็วกว่าและการตรวจจับการแตกหักของเครื่องมือที่มีความน่าเชื่อถือสูงมากกว่าวิธีแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว

ต่อมาในปี 2011 Huang, L., and Chen, J.C.A.[2] ได้ศึกษาถึงการวัดแรงในการตัดและการวัดสั่นสะเทือน ซึ่งเป็นการวัดทางอ้อมประกอบด้วยพารามิเตอร์ 4 ตัวคือ ความเร็วรอบ อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด และค่าเฉลี่ยแอมพลิจูดการสั่น และได้พัฒนาสมการถดถอยแบบพหุคูณในการทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานในขณะที่ตัดโดยใช้เซ็นเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) ซึ่งงานวิจัยทำการพัฒนาสมการที่แตกต่างกันที่รัศมีจุมุมมีดที่ 0.016 นิ้วและ 0.031 นิ้ว โดยงานวิจัยพัฒนาสมการพยากรณ์ แบ่งออกเป็นสองรูปแบบคือ แบบที่พิจารณาถึงความสั่นสะเทือน และแบบที่ไม่พิจารณาความสั่นสะเทือนผลจากการวิจัยพบว่าสมการทั้งสองสามารถพยากรณ์ความขรุขระผิวได้อย่างมีนัยสำคัญแต่ค่าความถูกต้องแม่นยำของสมการที่พิจารณาถึงความสั่นสะเทือนมีแนวโน้มความถูกต้องมากกว่า

ต่อมาในปี 2003 Feng, C.X. และ Wang, X.F. [3] ได้ศึกษาพัฒนาสมการทำนายความขรุขระของผิวชิ้นงานกึ่งด้วยมีดกลึงเคลือบคาร์ไบด์ โดยมีพารามิเตอร์ 6 ตัว คือ ความเร็วรอบ อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมุมมีด และความแข็งของชิ้นงาน โดยการเปรียบเทียบรูปแบบการวิเคราะห์สมการถดถอยไม่เป็นเส้นตรง (Nonlinear Regression Analysis; RA) และระบบการคำนวณด้วยโครงข่ายประสาท (Computational Neural Network) พบว่าแม้ค่า Root-Mean-Square Error ของวิธีการวิเคราะห์สมการถดถอยไม่เป็นเส้นตรงจะให้ค่าที่สูงกว่าการคำนวณด้วยโครงข่ายประสาทเล็กน้อย แต่ก็ไม่มี ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญสำหรับสองวิธีการนี้ ทั้งนี้ งานวิจัยเสนอว่าการวิธีวิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เป็นเส้นตรงมีความเหมาะสมและชัดเจนกว่าขณะที่วิธีการคำนวณด้วยโครงข่ายประสาท ที่ไม่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรได้อย่างชัดเจน ทั้งนี้วิธีการวิเคราะห์สมการถดถอยไม่เป็นเส้นตรงสามารถแสดงค่าทางสถิติที่เกี่ยวข้องได้

ต่อมาในปี 2005 Kwak, J. [4] ได้ศึกษาและนำวิธีการแปลงเวฟเลทแบบไม่ต่อเนื่องมาประยุกต์ใช้สำหรับการตรวจจับความเสียหายของเครื่องมือและเครื่องจักรในกระบวนการกลึงด้วยการแยก

ย่อยสัญญาณโดยใช้เวฟเลทตอบเบซิสซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับสัญญาณเชิงกลใช้ในการตรวจจับ แชนเตอร์ และการจัดสัญญาณรบกวน ของสัญญาณของแรงตัดในกระบวนการกลึง แทนวิธีการ แปลงฟูเรียร์แบบเร็วซึ่งเป็นวิธีเดิมที่ใช้ทั่วไป โดยวิธีการแปลงเวฟเลทแบบไม่ต่อเนื่องนี้สามารถ ตรวจจับแชนเตอร์ ได้อย่างชัดเจนสำหรับสัญญาณรายละเอียด

ในขณะเดียวกันสมเกียรติ ตั้งจิตลิตเจริญ.[5] ได้ศึกษาศึกษาลักษณะของเศษโลหะขณะตัดด้วย เงื่อนไขต่างๆและได้นำเสนอทฤษฎีสำหรับการตรวจจับการแตกหักของเศษโลหะแม้เงื่อนไขการตัด จะเปลี่ยนแปลงไปซึ่งสามารถนำไปพัฒนาเพื่อหาสภาพเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมโดยการ ประยุกต์ใช้การตรวจติดตามแรงตัดพลวัตและความหนาแน่นพาวเวอร์สเปกตรัมของแรงป้อนตัด พลวัตนั้นในระหว่างกระบวนการตัดจริง โดยการติดตั้งไดนาโมมิเตอร์ในเครื่องกลึงซีเอ็นซีเพื่อใช้วัด แรงป้อนตัดพลวัตที่เกิดขึ้นขณะทำการกลึง ซึ่งแรงป้อนตัดนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากเกิดเศษ โลหะแบบแตกหักเป็นชิ้นเล็กๆมากที่สุด โดยสัญญาณแรงป้อนตัดที่วัดได้จากไดนาโมมิเตอร์จะถูก ขยายและผ่านเครื่องกรองความถี่ต่ำผ่านก่อนที่จะถูกนำมาแปลงเป็นข้อมูลเชิงตัวเลขและทำการ แปลงฟูเรียร์แบบเร็วเพื่อหาค่าพาวเวอร์สเปกตรัมของแรงตัดพลวัตโดยใช้อัตราส่วนความหนาแน่น พาวเวอร์สเปกตรัมของแรงป้อนตัดพลวัตในช่วงความถี่ของการแตกหักของเศษโลหะต่อช่วง ความถี่ทั้งหมด เพื่อขจัดอิทธิพลจากเงื่อนไขการตัด และเกณฑ์ในการตรวจจับจะเท่ากับ 0.6 โดยที่ ถ้าเศษโลหะเป็นแบบแตกหักอัตราส่วนพาวเวอร์สเปกตรัมจะมีค่ามากกว่า 0.6 ถ้าเศษโลหะเป็น แบบต่อเนื่องจะน้อยกว่า 0.6 และถ้าเศษโลหะเป็นแบบผสมจะมีค่าประมาณ 0.6

ต่อมาในปี 2007 Zhang, J.Z and Chen , J.C [6] ได้ศึกษาระบบควบคุมแบบปรับตัวเพื่อควบคุม ความขรุขระผิวชิ้นงานบนเครื่องกัดซีเอ็นซีแบ่งออกเป็น 2 ระบบย่อย ได้แก่ระบบการวิเคราะห์ ความขรุขระผิวขณะตัดจริงโดยการคำนวณค่าความขรุขระผิวอ้างอิงนำมาเทียบกับค่าความขรุขระ ผิวขณะตัดซึ่งคำนวณได้จากแบบจำลองแรงตัดและระบบควบคุมพารามิเตอร์แบบปรับตัวขณะตัด ซึ่งจะทำงานเมื่อค่าความขรุขระผิวที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าความขรุขระผิวอ้างอิง โดยระบบจะนำ ค่าความแตกต่างของความขรุขระผิวที่เกิดขึ้นไปปรับอัตราป้อนใหม่เพื่อให้ความขรุขระผิวลดลงอยู่ ในค่าที่ยอมรับได้ จากการทดลองและการสร้างแบบจำลองในการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวขณะ ตัดเทียบกับความขรุขระผิวที่เกิดขึ้นจริงพบว่าแบบจำลองมีความแม่นยำ 91.5 %

ในขณะเดียวกัน ปิยะ ศิริธรรมปิติ.[7] ได้ศึกษาพารามิเตอร์ของกระบวนการกลึงเหล็กกล้าคาร์บอน บนเครื่องกลึงซีเอ็นซีโดยการประยุกต์ใช้วิธีปริมาณสารหล่อเย็นน้อยที่สุด และทำการหาเงื่อนไข การตัดที่เหมาะสมของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C กับเม็ดตัดคาร์ไบด์เคลือบผิว โดยกำหนด พารามิเตอร์ที่ใช้ ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกการตัด และวิธีการหล่อเย็น (การตัด

แบบเปียก การใช้สเปิร์กของสารหล่อเย็น และการตัดแบบแห้ง) ผลจากการศึกษาพบว่า การตัดแบบแห้งมักจะให้ผลที่ดีกว่าเสมอ ยกเว้นการตัดด้วยความเร็วสูงมาก ที่ควรจะใช้สารหล่อเย็นช่วย และเงื่อนไขการตัดแบบแห้งที่ความเร็วตัด 250 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกการตัด 0.5 มิลลิเมตร ให้ความสามารถในการตัดที่ดีที่สุด ก่อให้เกิดมลพิษขณะตัดต่ำที่สุด และต้นทุนต่ำที่สุด

ต่อมาในปี 2008 Tangjitsitcharoen, S., and Moriwaki, T. [8] ได้วิจัยและพัฒนาระบบตรวจติดตามและชี้บ่งสถานะของเศษโลหะแบบต่อเนื่อง เศษโลหะแบบแตกหัก และการเกิดแฮตเตอร์ในระหว่างกระบวนการตัดจริง โดยประยุกต์ใช้เซนเซอร์ในการตรวจจับสัญญาณแรงตัดที่เกิดขึ้น โดยได้เสนอตัวแปร 3 ตัว คือ I1, I2 และ I3 ที่คำนวณได้จากค่าเฉลี่ยความแปรปรวนของแรงตัดพลวัตทั้งสาม (แรงตัดหลัก แรงป้อนตัด และแรงรัศมี) ทำให้ได้ค่าที่เหมาะสมคือ C1, C2 และ C3 เพื่อใช้ในการบ่งชี้สถานะการตัดโดยอ้างอิงพื้นที่จากการทดลอง ซึ่งพบว่าสามารถจำแนกสถานะการตัดได้อย่างชัดเจนดีเยี่ยม โดยไม่ต้องคำนึงถึงเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไป

และในขณะเดียวกัน Tangjitsitcharoen, S. [9] ได้นำวิธีการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วมาประยุกต์หาความหนาแน่นของค่าการกระจายพลังงานเฉลี่ย (Power spectrum density) ของแรงตัดพลวัตเพื่อจำแนกเศษโลหะว่าเป็นแบบต่อเนื่องหรือเศษโลหะแบบแตกหักรวมทั้งยังสามารถนำไปใช้ในการตรวจจับแฮตเตอร์

ในขณะเดียวกัน Fnides, B., Aouici, H., และ Yallese, M.A. [10] ได้ศึกษาอิทธิพลของแรงตัดและความขรุขระผิวสำหรับการกลึงงานแข็ง (Hard turning) สำหรับเหล็กงานร้อน (Hot work steel) เกรด X38CrMoV5-1 ด้วยมีดตัดชนิดเซรามิกส์แบบผสม (Mixed Ceramic) พารามิเตอร์ที่ใช้ประกอบด้วย อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด ความเร็วตัด และการสึกหรบบนผิวหลบของมีดตัด (Flank wear) จากการศึกษพบว่า ความลึกตัดที่เปลี่ยนแปลงไปมีอิทธิพลอย่างชัดเจนต่อแรงตัดและอัตราการป้อนตัดเปลี่ยนแปลงไปมีอิทธิพลอย่างชัดเจนต่อความขรุขระผิวและขนาดการสึกหรบของมีดตัดที่มากขึ้นมีอิทธิพลอย่างมากต่อแรงตัด และทำให้คุณภาพผิวชิ้นงานแย่ลง

ต่อมาในปี 2010 สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ, ศักดิ์ดา ศรีอนุศาสตร์ และดวงตา ละเอียดดี [11] ได้มีการนำเสนอสมการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานในกระบวนการกลึงโดยการประยุกต์ใช้อัตราส่วนแรงตัดสมการจากงานวิจัยนี้ได้พัฒนามาจากการทดลองโดยอยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันเอ็กโปเนนเชียลที่ประกอบด้วยตัวแปรห้าตัวแปร ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราการป้อน รัศมีจุมูกมีดตัด ความลึกในการตัด และอัตราส่วนแรงตัด ค่าสัมประสิทธิ์ในฟังก์ชันเอ็กโปเนนเชียลสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการถดถอยพหุคูณด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด พยากรณ์ที่ระดับความ

เชื่อมั่น 95% ในการพยากรณ์ความชุกชุมของชิ้นงาน จากผลการนำไปประยุกต์ใช้พบว่าสมการที่สร้างขึ้นสามารถพยากรณ์ความชุกชุมของชิ้นงานเป็นที่ยอมรับได้ แต่ทั้งนี้งานวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัด นั่นคือเป็นการวิเคราะห์ที่สัญญาณแรงตัดสถิต ซึ่งจะเป็นการเฉลี่ยทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้ในการทำงาน

ต่อมาในปี 2011 กิติกุล กลึงผล [12] ได้มีการเสนอทฤษฎีสำหรับกระบวนการตรวจจับการแตกหักของเศษโลหะแบบต่อเนื่องและแบบแตกหักแม้เงื่อนไขการตัดจะเปลี่ยนแปลงไปโดยการประยุกต์ใช้ค่าความหนาแน่นพาวเวอร์สเปกตรัมของแรงป้อนตัดพลวัตและค่าความแปรปรวนของอุณหภูมิตัดพลวัตโดยนำเสนอพารามิเตอร์ที่หาได้จากอัตราส่วนค่าความหนาแน่นพาวเวอร์สเปกตรัมสะสมของแรงตัดในช่วงความถี่การแตกหักของเศษโลหะเทียบกันระหว่าง 3 แคน นั่นคือ AX, AY และ AZ และ พารามิเตอร์ AVT ที่หาได้จากอัตราส่วนความแปรปรวนของอุณหภูมิสูงสุดต่อความแปรปรวนของอุณหภูมิเฉลี่ย ซึ่งผลการวิจัยทำให้ทราบว่าเมื่อเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องจะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของพาวเวอร์สเปกตรัมของแรงตัดพลวัตมีความถี่สูงกว่า 500 เฮิรตซ์ ทั้ง 3 แคน ซึ่งแตกต่างกับการเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องที่ค่าความหนาแน่นพาวเวอร์สเปกตรัมต่ำกว่า 100 เฮิรตซ์ ทั้ง 3 แคน ตลอดจนพบว่าเกิดการเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องให้ค่าความแปรปรวนสูงสุดและค่าความแปรปรวนเฉลี่ยของอุณหภูมิตัดมีค่าใกล้เคียงกันซึ่งแตกต่างกับการเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องที่ให้ค่าความแปรปรวนสูงสุดและค่าความแปรปรวนเฉลี่ยของอุณหภูมิตัดนั้นแตกต่างกันมาก จากนั้นนำมาพล็อตในพื้นที่อ้างอิง ซึ่งสามารถกำหนดค่าควบคุมได้ผลดังนี้คือเมื่อเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่อง ค่า AX จะน้อยกว่า 0.8 ค่า AY จะมากกว่า 0.4 ค่า AZ จะมากกว่า 0.6 และค่า AVT จะมากกว่า 1.6 ซึ่งอัลกอริทึมที่ถูกพัฒนาขึ้นจากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าค่าพารามิเตอร์แต่ละตัวสามารถจำแนกเศษโลหะได้อย่างชัดเจน

ต่อมาในปี 2011 ศิริวัลย์ จันทร์ผ่อง [13] ได้วิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาสมการพยากรณ์ความชุกชุมของชิ้นงานในการกลึงเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยมีดตัดคาร์ไบด์เคลือบผิวโดยใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบสนองด้วยการออกแบบการทดลองแบบบ็อก-เบห์นเคน เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยการตัดที่มีผลต่อความชุกชุมของชิ้นงาน แรงตัดและอุณหภูมิในการตัด ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด และรัศมีจุ่มกมิต และเพื่อหาเงื่อนไขการตัดที่ดีที่สุดที่ให้ความชุกชุมของชิ้นงานน้อยสุดภายในช่วงความชุกชุมที่ยอมรับได้สำหรับชิ้นงานที่ใช้ในเครื่องจักรกล คือ ความชุกชุมผิวเฉลี่ย (Ra) ไม่เกิน 3.125 ไมโครเมตร ตามมาตรฐาน JIS B0601(1982) โดยติดตั้งไดนาโมมิเตอร์สำหรับวัดแรงตัดและอินฟาเรดไพโรมิเตอร์สำหรับวัดอุณหภูมิขณะตัดเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความชุกชุมผิวและเงื่อนไขการตัดรวมถึงได้พัฒนาสมการของ

อัตราส่วนแรงตัดและอุณหภูมิตัดด้วย จากผลการทดลองอัตราป้อนตัดและรัศมีจุมูกมีดีมีอิทธิพลต่อความขรุขระผิวมากกว่าความเร็วตัดและความลึกตัดโดยความขรุขระผิวที่ดีขึ้นเกิดจากรัตราป้อนตัดและความลึกตัดน้อยลงขณะที่รัศมีจุมูกมีดีและความเร็วตัดมากขึ้นสมการพยากรณ์ความขรุขระผิวที่ได้มีความแม่นยำและน่าเชื่อถือในการประมาณความขรุขระผิวด้วยระดับความเชื่อมั่น 95%

ต่อมาในปี 2003 Tangjitsitcharoen, S. [14] ได้นำเสนอสมการทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานในกระบวนการกลึงโดยการประยุกต์ใช้อัตราส่วนแรงตัดซึ่งพัฒนามาจากการทดลองโดยอยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันเอ็กโปเนนเชียลที่ประกอบด้วยตัวแปรหกตัวแปร ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราการป้อน รัศมีจุมูกมีดีตัด ความลึกในการตัด มุมคายเศษโลหะ และอัตราส่วนแรงตัดสถิต จากการนำไปประยุกต์ใช้พบว่าสมการที่สร้างขึ้นสามารถพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานเป็นที่ยอมรับได้ แต่ทั้งนี้ยังมีข้อจำกัด ซึ่งเกิดจากการวิเคราะห์แรงตัดด้วยสัญญาณแรงตัดสถิต ซึ่งเป็นการเฉลี่ยทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้ในการทำนายต่อมามีการศึกษาความสัมพันธ์ของความขรุขระผิวชิ้นงานกับแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นในขณะตัดโดยนำมาพัฒนาเป็นสมการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานในขณะตัดจริงโดยทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของแรงตัดพลวัตและความขรุขระผิวชิ้นงานในขณะตัดในโดเมนความถี่ พบว่าแรงตัดพลวัตกับความขรุขระผิวชิ้นงานในขณะตัดมีความถี่ที่สอดคล้องตรงกัน และสามารถนำข้อมูลความขรุขระผิวชิ้นงานและแรงตัดพลวัตที่ได้จากการทดลองมาใช้ในการพัฒนาสมการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานในรูปเอกซ์โปเนนเชียลในเงื่อนไขการตัดอื่นๆ ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด รัศมีจุมูกมีดี ความลึกตัด และอัตราส่วนแรงตัดพลวัต โดยประยุกต์ใช้การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ด้วยวิธีการกำลังสองน้อยที่สุดที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ให้ค่าความแม่นยำในการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงาน 90.3%

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การออกแบบการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ถูกออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design) เนื่องจากสามารถตรวจสอบอิทธิพลของปัจจัยหลายๆปัจจัยได้พร้อมกัน โดยทำการทดลองกลึงตัดตามเงื่อนไขที่กำหนด มาวิเคราะห์หาความขรุขระผิว โดยใช้วิธีการแปลงเวฟเลขทประยุกต์ใช้หาค่าความขรุขระผิวในเงื่อนไขการตัดที่ให้เศษโลหะแบบต่อเนื่อง เพื่อนำมาสร้างสมการทำนายความขรุขระผิวชิ้นงาน

3.2 ปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความขรุขระผิวชิ้นงาน

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าในกระบวนการกลึงมีปัจจัยส่งผลกระทบต่อความขรุขระผิวชิ้นงาน ดังนี้ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุ่มกมิต และมุมคายเศษโลหะ ปัจจัยต่างที่ส่งผลกระทบต่อความขรุขระผิวชิ้นงานได้ถูกนำมาพิจารณาความสัมพันธ์ต่อความขรุขระผิวชิ้นงาน รวมถึงลักษณะเศษโลหะที่เกิดจากเงื่อนไขการกลึงต่างๆ เพื่อนำไปพัฒนาสมการทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานในการกลึงเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C ด้วยใบมีดคาร์ไบด์เคลือบผิว

3.2.2 การกำหนดระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

การกำหนดระดับของปัจจัยในการทดลอง (Level) ได้ถูกพิจารณาจากคู่มือที่มาจากผู้ผลิตเครื่องมือตัด โดยคำนึงถึงทฤษฎีส่งผลให้ได้ความขรุขระผิวที่ดี และเงื่อนไขการตัดที่ให้เศษโลหะทั้งแบบต่อเนื่องและแตกหัก โดยแบ่งเป็นระดับต่างๆ ดังนี้

ตารางที่ 3.1 ปัจจัยและระดับในการทำการทดลอง

ปัจจัย	ระดับ
ความเร็วตัด	100, 180 และ 260 เมตร/นาที
อัตราป้อน	0.1, 0.2 และ 0.3 มิลลิเมตร/รอบ
ความลึกตัด	0.2, 0.5 และ 0.8 มิลลิเมตร
รัศมีจมูก	0.4 และ 0.8 มิลลิเมตร
มุมคายเศษโลหะ	-6 และ 11 องศา

การกำหนดระดับปัจจัยของความเร็วตัด ได้ถูกแบ่งออกเป็น 3 ระดับ คือ

100 180 และ 260 เมตร/นาที ซึ่งเป็นความเร็วตัดที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม เป็นไปตามคู่มือของเครื่องมือตัด รวมถึงมีความเป็นไปได้ว่าความสัมพันธ์อาจไม่เป็นเชิงเส้นตรง

การกำหนดระดับปัจจัยของอัตราการป้อนตัดได้ถูกแบ่งออกเป็น 3 ระดับ

คือ 0.1 0.2 และ 0.3 มิลลิเมตร/รอบ เพื่อต้องการทราบแนวโน้มของความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้น ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าความสัมพันธ์อาจไม่เป็นเชิงเส้นตรง

การกำหนดระดับปัจจัยของความลึกตัดได้ถูกแบ่งออกเป็น 3 ระดับ

คือ 0.2 0.5 และ 0.8 มิลลิเมตร เพื่อต้องการทราบแนวโน้มของความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้น ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าความสัมพันธ์อาจไม่เป็นเชิงเส้นตรง

การกำหนดระดับปัจจัยของรัศมีจมูกมีได้ถูกแบ่งออกเป็น 2 ระดับ

คือ 0.4 และ 0.8 มิลลิเมตร เพื่อศึกษาอิทธิพลของรัศมีจมูกมีต่อความขรุขระผิวชิ้นงานซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ารัศมีจมูกมีมีผลกระทบโดยตรงต่อความขรุขระผิวชิ้นงาน

การกำหนดระดับปัจจัยของมุมคายเศษโลหะได้ถูกแบ่งออกเป็น 2 ระดับ

คือ -6 และ 11 องศา เพื่อศึกษาอิทธิพลของมุมคายเศษโลหะที่เปลี่ยนแปลงไปมีผลอย่างไรต่อความขรุขระผิวชิ้นงาน

3.3 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.3.1 ชิ้นงาน (Work piece material)

เหล็กกล้าคาร์บอน S45C รูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 120 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร โดยระยะที่ใช้ในการตัด 180 มิลลิเมตร โดยเว้นระยะการจับด้วยหัวจักร 120 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.1 ชิ้นงานที่ใช้กลึงตัดในการทดลอง

3.3.2 เม็ดมีด (Insert)

เม็ดมีดเป็นชนิดคาร์ไบด์เคลือบผิวด้วยสารเคลือบแบบคาร์ไบด์เคลือบผิว เกรด CA 5525 ยี่ห้อ Kennametal

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดเม็ดมีดที่ใช้ในการทดลอง

มุมคายเศษโลหะ -6 องศา		มุมคายเศษโลหะ 11 องศา	
	TNMG 160404 HQ		TPMR 160304 HQ
	TNMG 160408 HQ		TPMR 160308 HQ

3.3.3 ด้ามมีดกลึง (Tool Holder)



รูปที่ 3.2 ด้ามมีดกลึง ยี่ห้อ Kyocera เบอร์ CTGPR 2525M-16N



รูปที่ 3.3 ด้ามมีดกลึง ยี่ห้อ Kyocera เบอร์ WTJNR 2525M-16N

3.3.4 เครื่องกลึงซีเอ็นซี (CNC turning machine)

เครื่องกลึงซีเอ็นซี ชนิด 4 แกน ยี่ห้อ Mazak รุ่น QUICK TURN NEXUS 200MY/MSY



รูปที่ 3.4 เครื่องกลึงซีเอ็นซี ชนิด 4 แกน

3.3.5 ไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer)

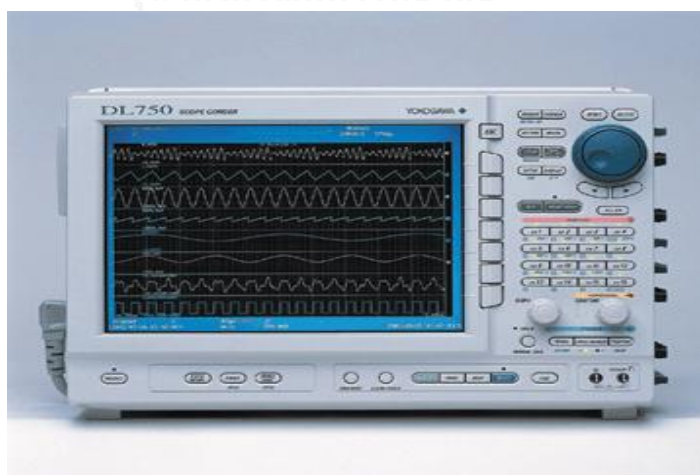
ไดนาโมมิเตอร์ยี่ห้อ Kister รุ่น 9121 สำหรับวัดแรงตัดในขณะที่ทำการกลึงตัดชิ้นงาน



รูปที่ 3.5 ไดนาโมมิเตอร์

3.3.6 ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)

ออสซิลโลสโคปยี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น DL750 ใช้ในการแสดงผลและบันทึกค่าแรงตัดที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัด



รูปที่ 3.6 ออสซิลโลสโคป

3.3.7 เครื่องขยายสัญญาณ (Charge Amplifier)



รูปที่ 3.7 เครื่องขยายสัญญาณ

3.3.8 เครื่องวัดความขรุขระผิว (Roughness tester)

เครื่องวัดค่าความขรุขระผิวยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น SJ-400 เพื่อวัดค่าความขรุขระผิวของชิ้นงาน



รูปที่ 3.8 เครื่องวัดความขรุขระผิว

3.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

ติดตั้งไดนาโมมิเตอร์(Dynamometer)เข้ากับป้อมมิด(Turret)ของเครื่องกลึง เพื่อวัดสัญญาณแรงตัดที่เกิดขึ้นขณะทำการกลึงตัดชิ้นงาน

เชื่อมต่อสายสัญญาณของไดนาโมมิเตอร์(Dynamometer)เข้ากับเครื่องขยายสัญญาณ (Charge Amplifier)

เชื่อมต่อสายสัญญาณเครื่องขยายสัญญาณ(Charge Amplifier) เข้ากับออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) เพื่อแสดงผลแรงตัดที่เกิดขึ้นขณะตัดและบันทึกค่า

ติดตั้งชิ้นงานกับหัวจับชิ้นงาน (Chuck) และยื่นศูนย์ท้าย (Tail Stock) เพื่อป้องกันชิ้นงานสั่นในขณะตัด

ทำการกลึงปลอกชิ้นงานตามเงื่อนไขการที่กำหนดไว้ ตามตารางที่ 3.1

ทำการบันทึกค่าแรงที่เกิดขึ้นในขณะตัด โดยสัญญาณแรงตัดพลวัตจากไดนาโมมิเตอร์ จะถูกขยายสัญญาณด้วยเครื่องขยายสัญญาณ และถูกกรองความถี่ย่านสัญญาณต่ำที่ 500 เฮิรตซ์ โดยใช้อัตราการเก็บข้อมูล 1,000 ค่าต่อวินาที

ทำการเก็บตัวอย่างของเศษโลหะของในแต่ละเงื่อนไขการทดลองเพื่อนำมาศึกษาความสัมพันธ์ตรวจสอบการสึกหรอของเม็ดมีดตัดโดยเครื่องวัดความสึกหรอ โดยที่ความสึกหรอที่สามารถใช้ได้ นั้นจะต้องมีขนาดไม่เกิน 0.1 มิลลิเมตร

ทำการวัดค่าความขรุขระผิวชิ้นงานด้วยเครื่องวัดความขรุขระผิวชิ้นงาน โดยใช้ความเร็วในการลากเข็มวัด 0.5 มิลลิเมตรต่อวินาที อัตราสุ่มเท่ากับ 400 ข้อมูลต่อวินาที และระยะที่ทำการวัดเท่ากับ 12.5 มิลลิเมตร

ทำการวิเคราะห์รูปแบบความถี่ของความขรุขระผิวชิ้นงานและสัญญาณแรงตัดที่เกิดขึ้นด้วยการแปลงเวฟเลท (Wavelet Transform)

3.5 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลอง ประกอบด้วยปัจจัยทั้งหมด 5 ปัจจัย คือ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมกมิต มุมคายเศษโลหะ โดยการกลิ้งตัดเป็นการตัดแบบแห้ง เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองมีทั้งหมด 108 เงื่อนไขดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขการทดลอง

Run Order	ความเร็วตัด (ม/นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม/รอบ)	ความลึกตัด (มม)	รัศมีจุมกมิต (มม)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
1	180	0.2	0.2	0.8	11
2	180	0.2	0.8	0.4	11
3	180	0.3	0.2	0.4	11
4	100	0.1	0.8	0.8	-6
5	180	0.2	0.8	0.8	11
6	100	0.1	0.2	0.8	11
7	180	0.3	0.5	0.4	11
8	100	0.1	0.8	0.8	11
9	260	0.2	0.5	0.4	11
10	260	0.1	0.2	0.4	11
11	100	0.1	0.2	0.4	-6
12	100	0.2	0.2	0.8	11
13	180	0.1	0.2	0.4	-6
14	100	0.1	0.2	0.4	11
15	180	0.3	0.5	0.8	-6
16	260	0.1	0.8	0.4	-6
17	260	0.2	0.8	0.8	-6
18	260	0.1	0.2	0.4	-6
19	260	0.1	0.2	0.8	-6

Run Order	ความเร็วตัด (ม/นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม/รอบ)	ความลึกตัด (มม)	รัศมีจุมูกมีด (มม)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
20	260	0.1	0.2	0.8	11
21	180	0.3	0.5	0.4	-6
22	100	0.1	0.5	0.4	-6
23	100	0.1	0.5	0.4	11
24	100	0.3	0.2	0.8	-6
25	180	0.2	0.5	0.4	-6
26	260	0.2	0.5	0.4	-6
27	100	0.1	0.5	0.8	11
28	260	0.2	0.2	0.8	11
29	180	0.2	0.5	0.8	11
30	100	0.2	0.8	0.8	-6
31	100	0.2	0.2	0.4	-6
32	260	0.3	0.5	0.8	-6
33	180	0.1	0.8	0.4	11
34	260	0.3	0.8	0.4	-6
35	180	0.3	0.8	0.8	-6
36	260	0.3	0.2	0.8	-6
37	100	0.1	0.8	0.4	11
38	100	0.3	0.8	0.4	11
39	260	0.3	0.8	0.8	11
40	100	0.1	0.8	0.4	-6
41	100	0.2	0.5	0.4	11
42	180	0.3	0.2	0.8	11
43	260	0.1	0.8	0.8	-6
44	260	0.2	0.8	0.8	11
45	260	0.2	0.5	0.8	11

Run Order	ความเร็วตัด (ม/นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม/รอบ)	ความลึกตัด (มม)	รัศมีจุมูกมีด (มม)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
46	180	0.3	0.5	0.8	11
47	260	0.3	0.8	0.4	11
48	100	0.3	0.5	0.4	-6
49	260	0.2	0.8	0.4	-6
50	260	0.2	0.8	0.4	11
51	180	0.2	0.8	0.4	-6
52	260	0.1	0.5	0.8	-6
53	180	0.2	0.5	0.4	11
54	180	0.2	0.2	0.4	-6
55	100	0.2	0.5	0.8	-6
56	260	0.3	0.2	0.4	-6
57	180	0.3	0.2	0.8	-6
58	260	0.3	0.5	0.4	11
59	100	0.1	0.5	0.8	-6
60	180	0.2	0.2	0.4	11
61	180	0.1	0.5	0.8	-6
62	180	0.3	0.8	0.4	11
63	100	0.2	0.8	0.4	11
64	180	0.2	0.8	0.8	-6
65	100	0.2	0.2	0.4	11
66	260	0.3	0.5	0.4	-6
67	180	0.1	0.2	0.8	11
68	100	0.3	0.8	0.8	-6
69	180	0.1	0.2	0.8	-6
70	260	0.3	0.2	0.4	11
71	100	0.1	0.2	0.8	-6

Run Order	ความเร็วตัด (ม/นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม/รอบ)	ความลึกตัด (มม)	รัศมีจุมูกมีด (มม)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
72	260	0.3	0.5	0.8	11
73	100	0.3	0.8	0.8	11
74	260	0.1	0.5	0.8	11
75	260	0.1	0.5	0.4	11
76	260	0.1	0.8	0.8	11
77	180	0.1	0.5	0.8	11
79	180	0.2	0.5	0.8	-6
80	180	0.1	0.8	0.4	-6
81	180	0.1	0.8	0.8	-6
82	260	0.3	0.2	0.8	11
83	260	0.1	0.8	0.4	11
84	100	0.3	0.8	0.4	-6
85	100	0.3	0.5	0.8	11
86	180	0.1	0.8	0.8	11
87	100	0.2	0.5	0.8	11
88	260	0.2	0.5	0.8	-6
89	180	0.2	0.2	0.8	-6
90	100	0.3	0.2	0.8	11
91	180	0.1	0.5	0.4	-6
92	180	0.3	0.2	0.4	-6
93	260	0.3	0.8	0.8	-6
94	180	0.1	0.2	0.4	11
95	100	0.2	0.8	0.8	11
96	100	0.2	0.8	0.4	-6
97	260	0.2	0.2	0.8	-6
98	180	0.1	0.5	0.4	11
Run	ความเร็วตัด	อัตราการป้อนตัด	ความลึกตัด	รัศมีจุมูกมีด	มุมคายเศษโลหะ

Order	(ม/นาที)	(มม/รอบ)	(มม)	(มม)	(องศา)
99	180	0.3	0.8	0.4	-6
100	180	0.3	0.8	0.8	11
101	100	0.2	0.2	0.8	-6
102	100	0.3	0.2	0.4	11
103	260	0.1	0.5	0.4	-6
104	100	0.3	0.5	0.4	11
105	100	0.2	0.5	0.4	-6
106	100	0.3	0.5	0.8	-6
107	260	0.2	0.2	0.4	-6
108	260	0.2	0.2	0.4	11

3.6 การพัฒนาสมการทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานขณะตัด

การหาค่าความขรุขระผิวของชิ้นงานจากทฤษฎีนั้น พบว่าสมการที่ใช้ในการหาค่าความขรุขระผิวชิ้นงานอยู่ในรูปของฟังก์ชันเอกโปเนนเชียล ซึ่งพิจารณาจากความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์หลัก คือ อัตราการป้อนตัด และรัศมีจุ่มกมิต และปัจจัยในการตัดอื่น ได้ถูกนำเสนอในรูปเอกโปเนนเชียลเช่นกัน

โดยความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย(R_a)ในขณะตัด สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพื้นที่แรงตัดพลวัต และปัจจัยอื่นๆ ดังสมการนี้

$$R_a = C_1 \cdot (V)^{a_1} \cdot (f)^{a_2} \cdot (D)^{a_3} \cdot (R_n)^{a_4} \cdot (e)^{a_5} \gamma \cdot \left(\frac{AF_y}{AF_z}\right)^{a_6} \quad (3.1)$$

ความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด(R_z)ในขณะตัด สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพื้นที่แรงตัดพลวัต และปัจจัยอื่นๆ ดังสมการนี้

$$R_z = C_2 \cdot (V)^{a_7} \cdot (f)^{a_8} \cdot (D)^{a_9} \cdot (R_n)^{a_{10}} \cdot (e)^{a_{11}\gamma} \cdot \left(\frac{AF_y}{AF_z}\right)^{a_{12}} \quad (3.2)$$

R_a คือ ความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (ไมโครเมตร)

R_z คือ ความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุดเฉลี่ย (ไมโครเมตร)

V คือ ความเร็วตัดชิ้นงาน (เมตรต่อนาที)

f คือ อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)

D คือ ค่าความลึกตัด (มิลลิเมตร)

R_n คือ ค่ารัศมีจุกมิด (มิลลิเมตร)

γ คือ ค่ามุมคายเศษโลหะ (องศา)

$\frac{AF_y}{AF_z}$ คือ อัตราส่วนพื้นที่ใต้กราฟระหว่างแรงป้อนตัดพลวัตและแรงตัดหลักพลวัต

$a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9, a_{10}, a_{11}, a_{12}, C_1$ และ C_2 คือค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการ

จากสมการ 3.1 และ 3.2 เป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้น จึงถูกแปลงและนำเสนอในรูปสมการถดถอยพหุคูณด้วยการแปลงลอการิทึม ได้ดังต่อไปนี้

$$\ln R_a = \ln C_1 + a_1 \ln V + a_2 \ln f + a_3 \ln D + a_4 \ln R_n + a_5 \gamma + a_6 \ln \left(\frac{AF_y}{AF_z} \right)$$

(3.3)

$$\ln R_z = \ln C_2 + a_7 \ln V + a_8 \ln f + a_9 \ln D + a_{10} \ln R_n + a_{11} \gamma + a_{12} \ln \left(\frac{AF_y}{AF_z} \right) \quad (3.4)$$

จากสมการถดถอยพหุคูณ 3.3 และ 3.4 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้ดังนี้

$$y_1 = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_5 x_5 + \beta_6 x_6 \quad (3.5)$$

$$y_2 = \beta_7 + \beta_8 x_1 + \beta_9 x_2 + \beta_{10} x_3 + \beta_{11} x_4 + \beta_{12} x_5 + \beta_{13} x_6 \quad (3.6)$$

โดยที่

y_1 และ y_2 แทนค่า $\ln R_a$ และ $\ln R_z$

ตัวแปร x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 , และ x_6 แทนด้วยค่า $\ln V, \ln f, \ln D, \ln R_n, \gamma$ และ $\ln \frac{AF_y}{AF_z}$ ตามลำดับ

β_0 และ β_7 คือ จุดตัดแกน y ของสมการ y_1 และ y_2 เมื่อพารามิเตอร์ x_1 ถึง x_6 เท่ากับ 0

$\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6, \beta_7, \beta_8, \beta_9, \beta_{10}, \beta_{11}, \beta_{12}$ และ β_{13} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยซึ่งได้มาจากการใช้การวิเคราะห์แบบถดถอยพหุคูณ โดยใช้การประมาณค่าด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least square method)

3.7 การวิเคราะห์ข้อมูล

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลอง คือ สัญญาณแรงตัดพลวัตมาแปลงสัญญาณในโดเมนเวลา-ความถี่ โดยใช้วิธีการแปลงเวฟเลต (Wavelet Transform) และนำความขรุขระผิวมาแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลา เป็นโดเมนความถี่ โดยใช้การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform)

วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและแรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่รวมถึงลักษณะการเกิดเศษโลหะเพื่อหาความสัมพันธ์กัน และนำผลที่ได้จากการทดลอง ณ เงื่อนไขการตัดนั้นๆ มาใช้วิเคราะห์

ใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal rule) ในการคำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟของแรงตัดพลวัตของการแปลงเวฟเลตในระดับชั้นที่ 5 ของโดเมนเวลา ซึ่งพื้นที่ใต้กราฟนี้จะเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสัมพันธ์กับค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน และถูกพัฒนาสมการความสัมพันธ์ โดยจะอยู่ในรูปของอัตราส่วนแรงป้อนตัดพลวัตต่อแรงตัดหลักพลวัต

การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับการถดถอยพหุคูณ เพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือของการทำนายความขรุขระผิว โดยการทดสอบว่า ความผิดพลาดในสมการ ϵ_i มีการกระจายแบบปกติและเป็นอิสระ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และมีความแปรปรวนเท่ากับ σ^2 ซึ่งเขียนย่อได้เป็น $\epsilon \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$ ซึ่งจะส่งผลให้ผลที่ตามมาคือค่า y จะมีการกระจายแบบปกติและเป็นอิสระ ขั้นตอนการทดสอบประกอบด้วย

การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normality) เป็นการพิจารณาการกระจายตัวของค่าคลาดเคลื่อน (Residual) ของตัวแปรผลตอบว่ามีแจกแจงแบบปกติหรือไม่ โดยได้นำค่าคลาดเคลื่อนมาสร้าง Normal Probability Plot และพิจารณาการกระจายตัว หากการกระจายตัวมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงถือได้ว่าเป็นการกระจายตัวแบบปกติ

การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระ (Independent) เป็นการตรวจสอบค่าคลาดเคลื่อน (Residual) ของตัวแปรผลตอบว่ามีความเกี่ยวพันกันหรือไม่ โดยการพล็อตค่าคลาดเคลื่อนกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล (Observation order) ค่าคลาดเคลื่อนไม่ควรมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงหรือมีการเปลี่ยนแปลงเป็นรอบ จึงถือว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระ

การทดสอบความมีเสถียรภาพของความแปรปรวน (Variance stability) เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายของค่าคลาดเคลื่อน (Residual) กับค่าที่ถุกฟิต (Fitted Value) ซึ่งการกระจายไม่ควรจะมีลักษณะที่เป็นแนวโน้ม หรือมีการกระจายตัวที่มีรูปแบบกรวยปากเปิด จะถือว่ามีเสถียรภาพของความแปรปรวน



บทที่ 4

วิเคราะห์ผลการทดลอง

บทที่ 4 นี้แสดงผลที่ได้จากการทดลอง รวมถึงการวิเคราะห์ผลการทดลอง ภายหลังจากที่ได้กล่าวถึงวิธีการดำเนินการวิจัยในบทที่ 3 มาแล้ว เพื่อนำมาพัฒนาสมการทำนายความขรุขระผิวของชิ้นงาน อันมีเงื่อนไขการตัดที่เกิดเศษโลหะแบบแตกหักได้ โดยประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเลขชนิดคอเบซีส์ มาช่วยวิเคราะห์ความถี่ของสัญญาณแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นในขณะกลึงชิ้นงาน และแยกสัญญาณแรงตัดพลวัตออกเป็นหลายระดับชั้น เพื่อชี้บ่งสัญญาณแรงตัดพลวัตที่เกิดจากการแตกหักของเศษโลหะ สัญญาณความขรุขระผิวชิ้นงานและสัญญาณรบกวนอื่นจากสัญญาณแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้น ในเงื่อนไขการตัดต่างๆ โดยมีปัจจัยในการตัดซึ่งเป็นตัวแปรอิสระดังต่อไปนี้ คือ ความเร็วตัด (V) อัตราการป้อนตัด (F) ความลึกตัด (D) รัศมีจุมุมมีด (Rn) มุมคายเศษโลหะ (Rake angle) จากการทดลองนี้สามารถหาสมการทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานที่มีเงื่อนไขการตัดที่ให้เศษโลหะแบบแตกหักและแบบต่อเนื่องได้ในทุกๆกรณี

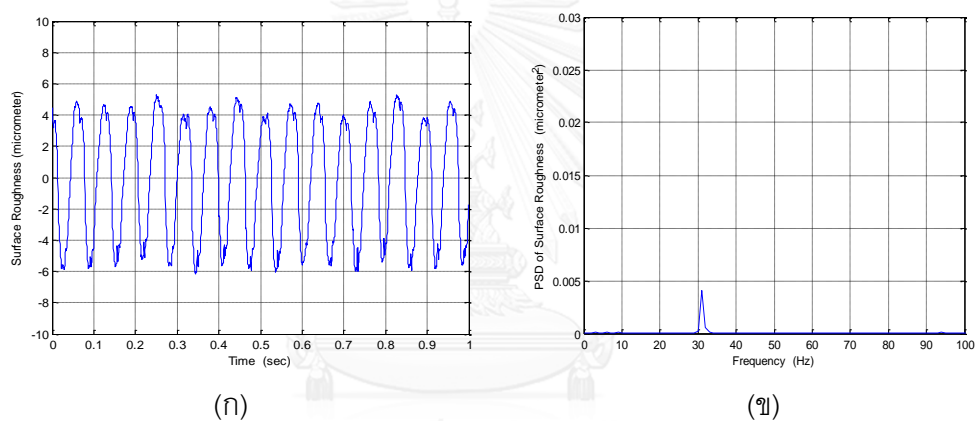
4.1 ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองโดยการกลึงชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน S45C ภายใต้อันตรึงตัวต่างๆ ที่กำหนดไว้ในตารางที่ 3.1 รวมเป็นจำนวนทั้งสิ้น 108 เงื่อนไข ซึ่งประกอบด้วยปัจจัย ดังนี้ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมุมมีด มุมคายเศษโลหะ และทำการบันทึกผลที่ได้จากการทดลองในแต่ละเงื่อนไข โดยค่าความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (R_a) ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (R_z) และคำนวณอัตราส่วนพื้นที่แรงตัด พลวัต (AF_y/AF_z) ทั้งเงื่อนไขการตัดที่ให้เศษโลหะแบบต่อเนื่อง และเงื่อนไขการตัดที่ให้เศษโลหะแบบแตกหัก ได้ถูกแสดงในตารางที่ 4.1

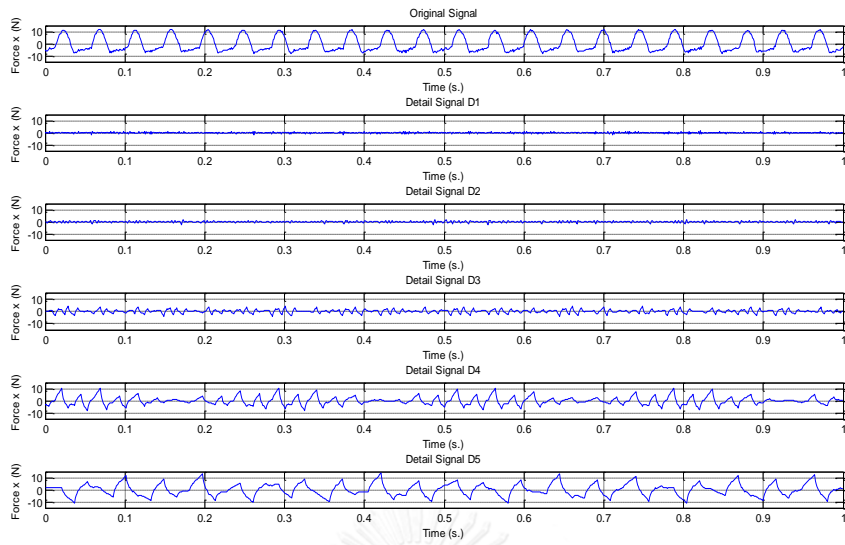
4.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวและแรงตัดพลวัต

4.2.1 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวและแรงตัดพลวัตที่เกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่อง

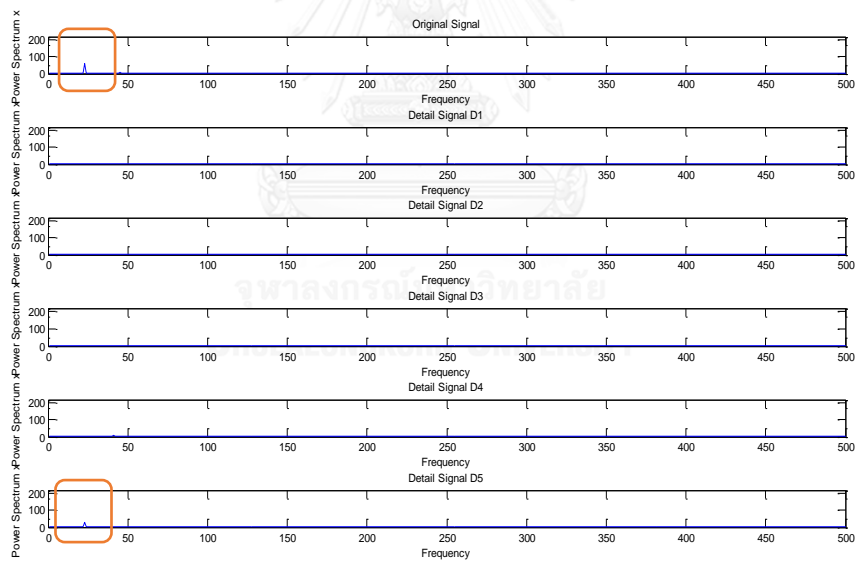
จากผลการทดลองการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวและการแปลงเวฟเลขของแรงตัดพลวัต ที่มีการเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่อง โดยมีเงื่อนไขการตัด ดังต่อไปนี้ ความเร็วตัด 180 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.2 มิลลิเมตร รัศมีจุมกมีด 0.4 มิลลิเมตร และมุมคายเศษโลหะ 11 พบว่ามีความสัมพันธ์กันระหว่างความขรุขระผิวของชิ้นงานและการแปลงเวฟเลขแรงตัดพลวัต โดยความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดพลวัตและความขรุขระผิวชิ้นงานในโดเมนความถี่นั้นเกิดค่าความถี่ที่มีค่าใกล้เคียงกัน



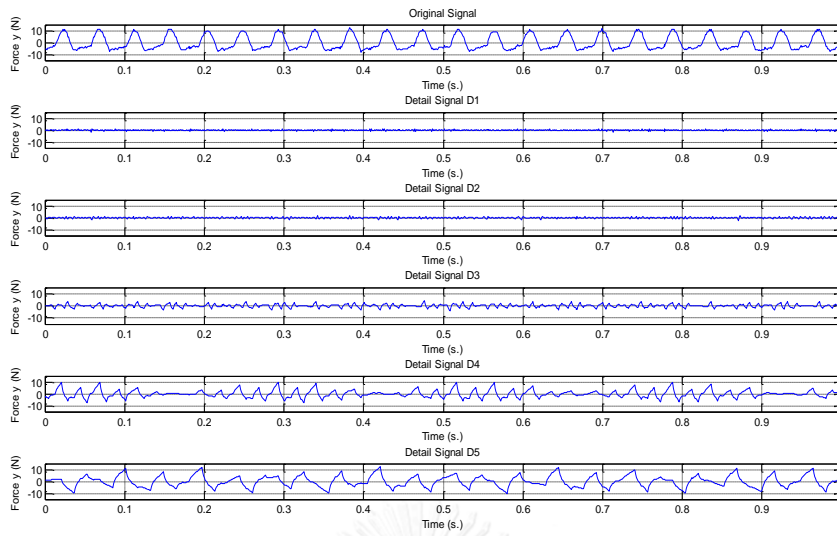
รูปที่ 4.1(ก)(ข)สัญญาณความขรุขระผิวชิ้นงานในโดเมนเวลาและความถี่โดยการแปลงฟูเรียร์ จากการแปลงเวฟเลขของแรงตัดพลวัตที่เกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องทั้ง 3 แกน ได้แก่ แกน X , Y และ Z พบว่าแรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่สามารถแยกสัญญาณความถี่ของข้อมูลออกเป็น 5 ระดับ ซึ่งจากรูป 4.2 , 4.3 และ 4.4 แสดงให้เห็นว่าค่าความถี่ของสัญญาณความขรุขระผิวในระดับที่ 5 ทั้งแกน X, Y และ Z จากการแปลงเวฟเลขนั้น มีความสอดคล้องกับค่าความถี่ของสัญญาณความขรุขระผิวชิ้นงานโดยการแปลงข้อมูลแบบฟูเรียร์แบบเร็ว ที่ค่าความขรุขระผิวเท่ากับ 31 Hz



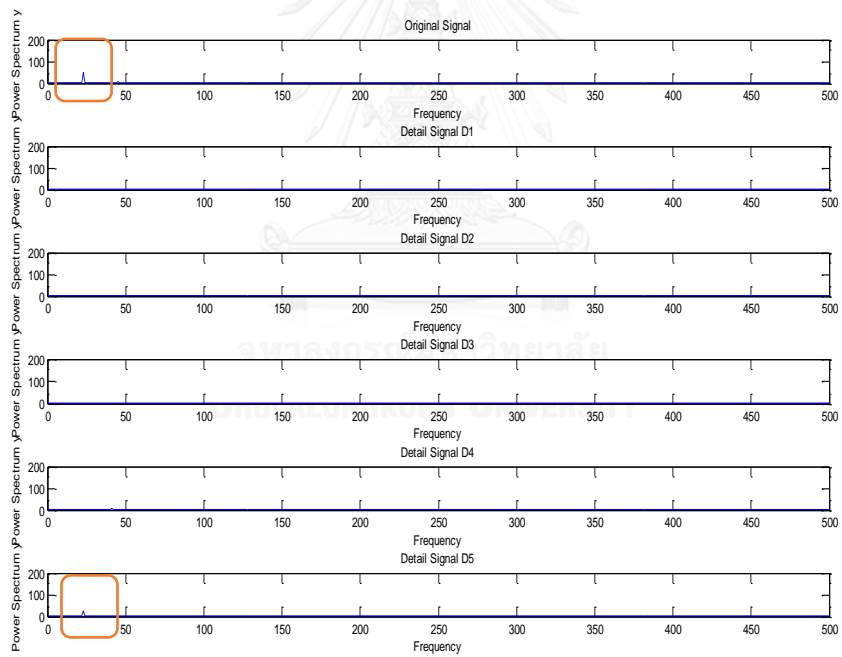
รูปที่ 4.2 (ก) การแปลงเวฟเลขในโดเมนเวลาของแรงตัดพลวัตที่ให้เศษโลหะแบบต่อเนื่องแกน X



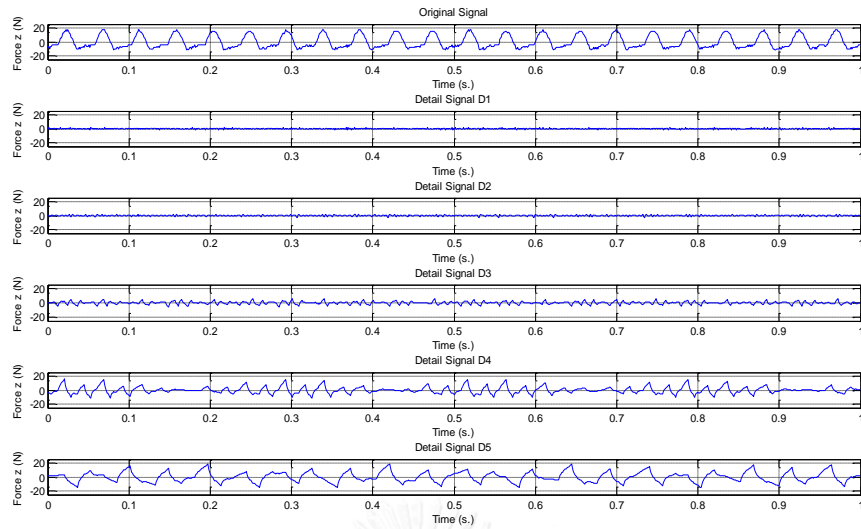
รูปที่ 4.2(ข)การแปลงเวฟเลขในโดเมน ความถี่ของแรงตัดพลวัตที่ให้เศษโลหะแบบต่อเนื่องแกน X



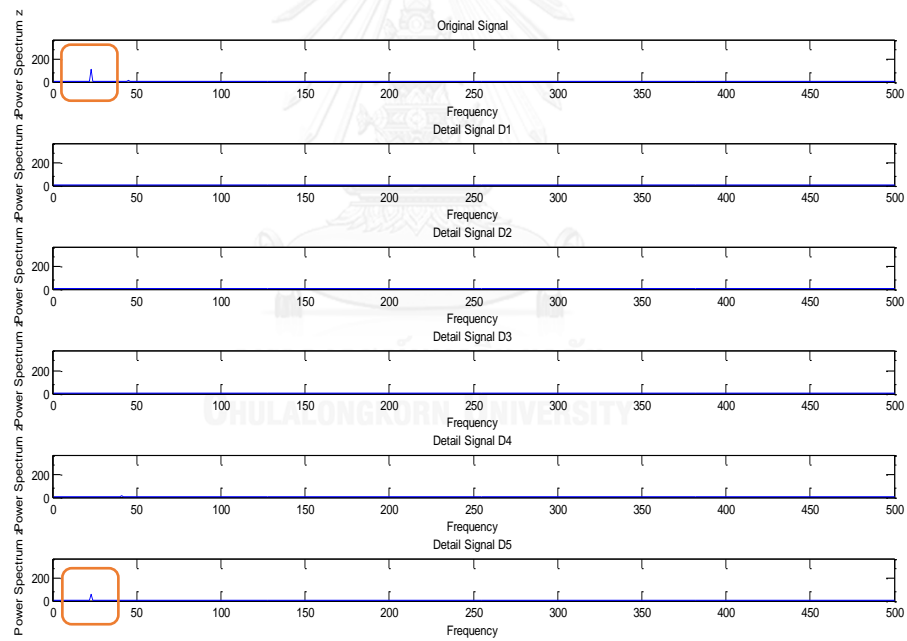
รูปที่ 4.3 (ก) การแปลงเวฟเลทของแรงตัดพลวัตในโดเมนเวลาที่ก่อให้เกิดโหละแบบต่อเนื่องในแกน Y



รูปที่ 4.3(ข)การแปลงเวฟเลทของแรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่ที่เกิดโหละแบบต่อเนื่องในแกน Y

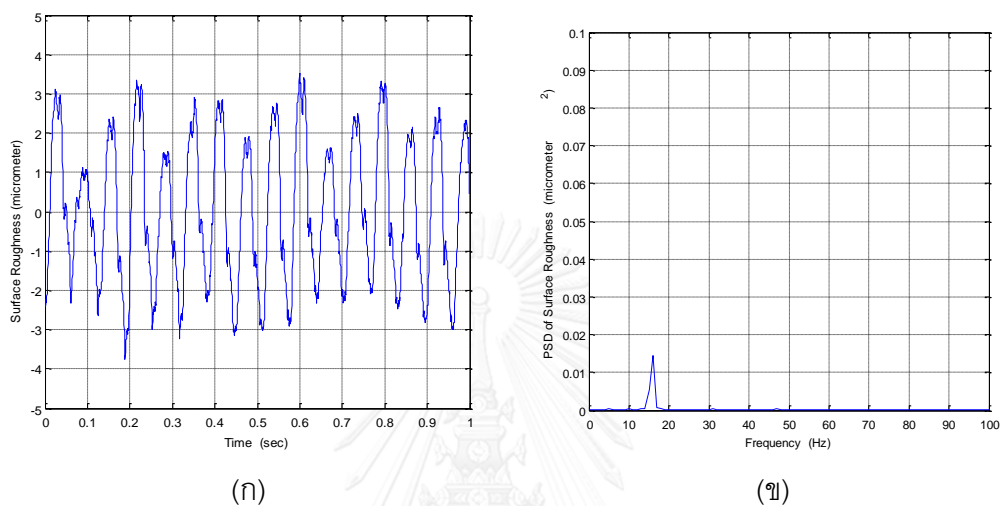


รูปที่ 4.4 (ก) การแปลงเวฟเลทของแรงดัดพลวัตในโดเมนเวลาที่ก่อให้เกิดโหนดแบบต่อเนื่องในแกน Z



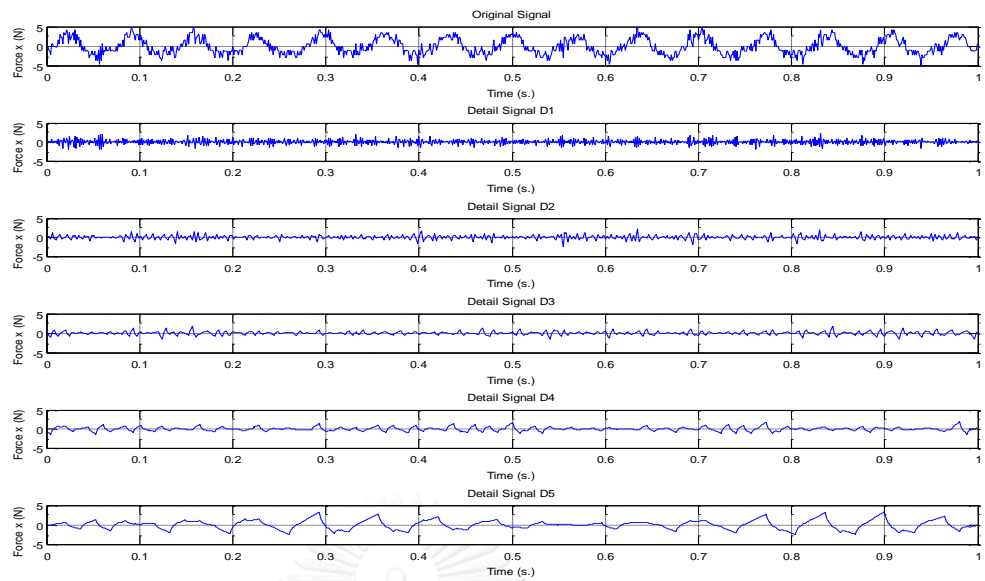
รูปที่ 4.4 (ข) การแปลงเวฟเลทของแรงดัดพลวัตในโดเมนความถี่ที่เกิดโหนดแบบต่อเนื่องแกน Z

จากผลการทดลองการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวและการแปลงเวฟเลขของแรงตัดพลวัต ที่มีการเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่อง โดยมีเงื่อนไขการตัด ดังต่อไปนี้ ความเร็วตัด 100 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.5 มิลลิเมตร รัศมีจุกมีด 0.8 มิลลิเมตร และมุมคายเศษโลหะ 11 พบว่ามีความสัมพันธ์กันระหว่างความขรุขระผิวของชิ้นงานและการแปลงเวฟเลขของแรงตัดพลวัต

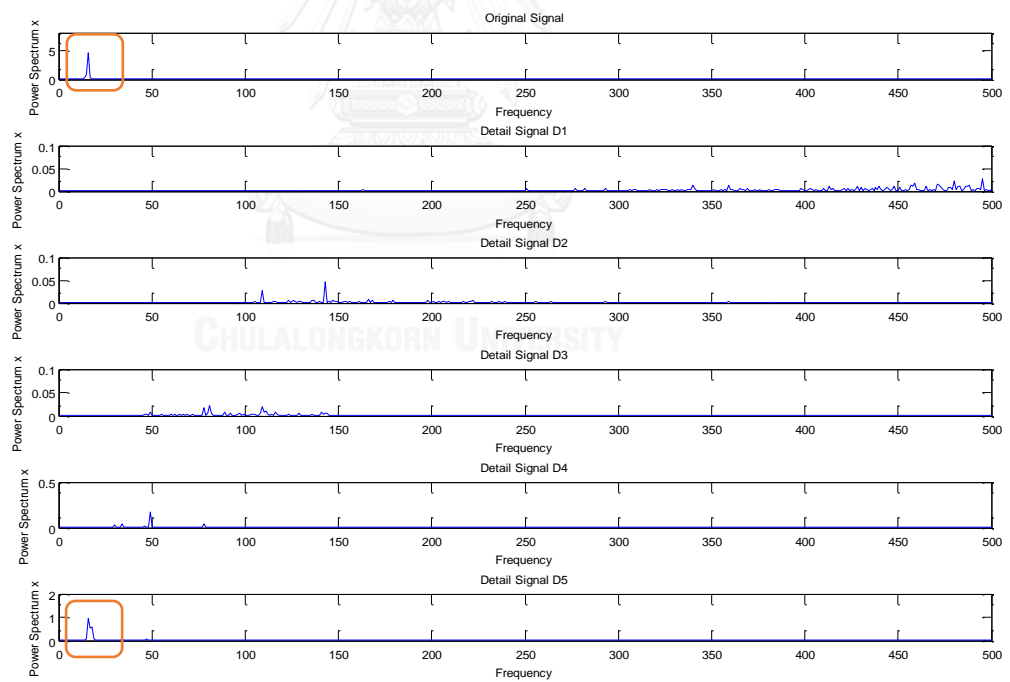


รูปที่ 4.5(ก),(ข) สัญญาณความขรุขระผิวชิ้นงานในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่โดยการแปลงฟูเรียร์

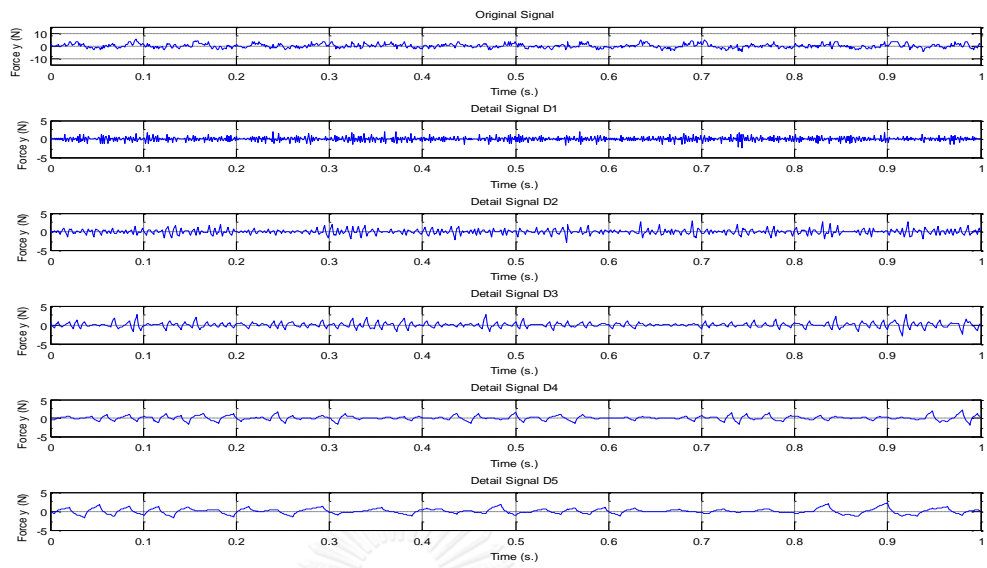
จากการแปลงเวฟเลขของแรงตัดพลวัตที่เกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องทั้ง 3 แกน ได้แก่ แกน X , Y และ Z พบว่าแรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่สามารถแยกสัญญาณความถี่ของข้อมูลออกเป็น 5 ระดับ ซึ่งจากรูป 4.6 , 4.7 และ 4.8 แสดงให้เห็นว่าค่าความถี่ของสัญญาณความขรุขระผิวในระดับที่ 5 ทั้งแกน X, Y และ Z จากการแปลงเวฟเลขนั้น มีความสอดคล้องกับค่าความถี่ของสัญญาณความขรุขระผิวชิ้นงานโดยการแปลงข้อมูลแบบฟูเรียร์แบบเร็ว ที่ค่าความขรุขระผิวเท่ากับ 18 Hz



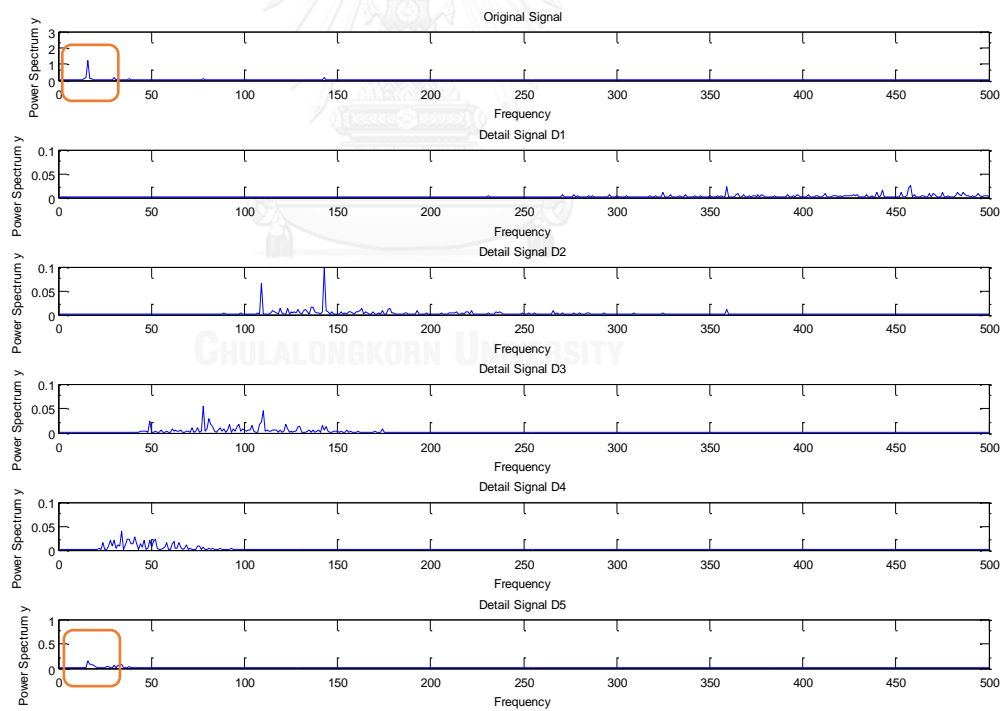
รูปที่ 4.6 (ก) การแปลงเวฟเลขของแรงตดพลวัตในโดเมนเวลาที่เกิดให้โลหะแบบต่อเนื่องในแกน x



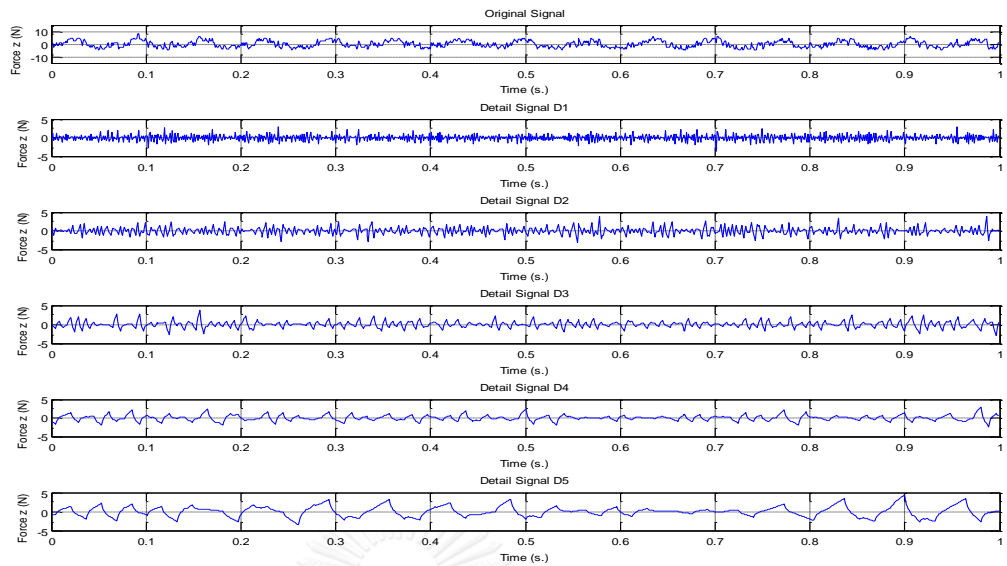
รูปที่ 4.6 (ข) การแปลงเวฟเลขของแรงตดพลวัตในโดเมนความถี่ที่เกิดให้โลหะแบบต่อเนื่องในแกน x



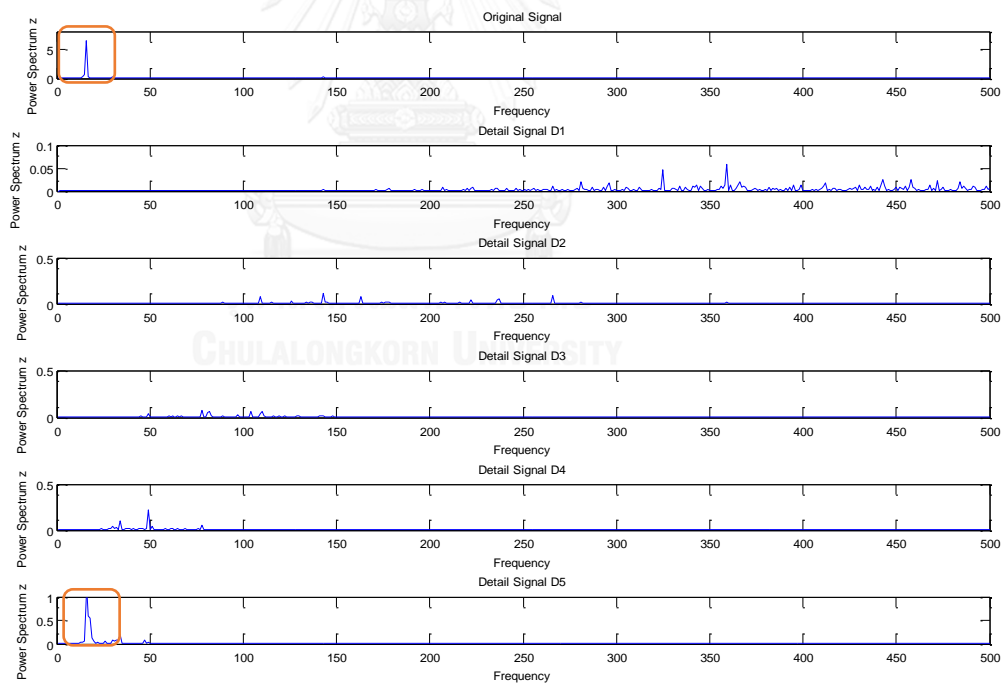
รูปที่ 4.7 (ก) การแปลงเวฟเลขของแรงตัดพลวัตในโดเมนเวลาที่ก่อให้เกิดโหนดแบบต่อเนื่องแกน y



รูปที่ 4.7 (ข) การแปลงเวฟเลขของแรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่ที่เกิดโหนดแบบต่อเนื่องแกน y



รูปที่ 4.8 (ก) การแปลงเวฟเลทของแรงตัดพลวัตในโดเมนเวลาที่ก่อให้เกิดโหะแบบต่อเนื่องแกน z



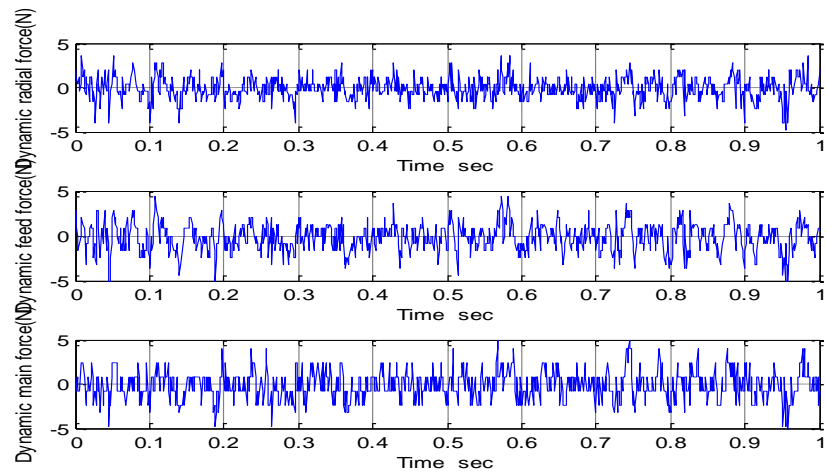
รูปที่ 4.8 (ข) การแปลงเวฟเลทของแรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่ที่เกิดโหะแบบต่อเนื่องแกน z
 4.2.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวและแรงตัดพลวัตที่เกิดเศษโหะแบบ
 แฉกหัก

จากผลการทดลองการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวและแรงตัดพลวัต ที่มีการเกิดเศษโลหะแบบแตกหัก โดยมีเงื่อนไขการตัด ดังนี้ ความเร็วตัด 180 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.5 มิลลิเมตร รัศมีจุมุมมีด 0.4 มิลลิเมตร และมุมคายเศษโลหะ -6 พบว่าการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (FFT) ไม่สามารถวิเคราะห์หาค่าความถี่ที่เกิดจากความขรุขระผิวได้เนื่องจากมีการปะปนกันของค่าความถี่ความขรุขระผิวและค่าความถี่ที่เกิดจากการแตกหัก ดังนั้นจึงนำวิธีการแปลงเวฟเลต (Wavelet Transform) มาประยุกต์ใช้โดยการแปลงข้อมูลจากโดเมนเวลา ไปยัง โดเมนเวลาและความถี่ (Time-frequency Domain) ด้วยวิธีการนี้ทำการแยกย่อยสัญญาณออกเป็นหลายระดับ (Level) ซึ่งสามารถแยกค่าของความขรุขระผิวออกจากค่าความถี่ที่เกิดจากการแตกหักได้ ในความถี่ของสัญญาณแรงตัดในระดับที่ 5

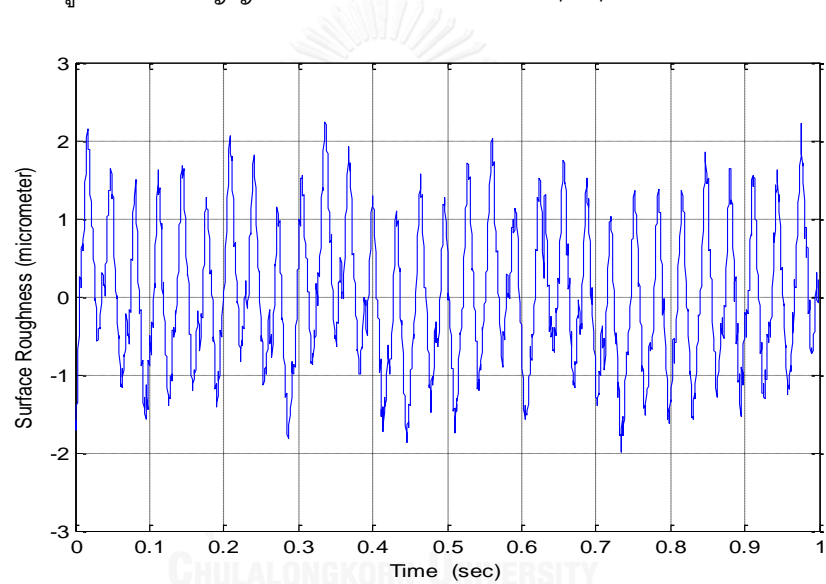
4.3 การแปลงเวฟเลตของแรงตัดพลวัตจากการเกิดเศษโลหะและความขรุขระผิวชิ้นงาน

สัญญาณแรงตัดพลวัตถูกนำมาวิเคราะห์โดยวิธีการแปลงเวฟเลตชนิดคอเบซีส์อันเป็นที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณเชิงกล ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งสัญญาณออกเป็น 5 ระดับโดยในระดับที่แตกต่างกันจะมีช่วงความถี่ที่แตกต่างกัน ซึ่งการแตกหักของเศษโลหะและสัญญาณอื่นๆจะถูกตรวจจับและแยกออกจากสัญญาณแรงตัดพลวัตในขั้นที่ต่างกันของการแปลงเวฟเลต จากงานวิจัยนี้พบว่าในระดับขั้นที่ต่ำของการแปลงเวฟเลตสามารถตรวจจับค่าความถี่ของการแตกหักของเศษโลหะได้และในระดับขั้นที่สูงของการแปลงเวฟเลตสามารถตรวจสอบความถี่ของความขรุขระผิวชิ้นงานได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการแปลงเวฟเลตเป็นเครื่องมือวิเคราะห์เชิงเวลา-ความถี่ โดยให้ผลลัพธ์ที่ชัดเจนทั้งในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ในการตรวจจับสัญญาณแรงพลวัตของการตัดที่ให้เศษโลหะแบบแตกหักและสัญญาณรบกวนในกระบวนการกลึงด้วยเครื่องซีเอ็นซี ดังนั้นการเลือกเวฟเลตระดับขั้นที่เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญในการแยกสัญญาณแรงตัดพลวัต ซึ่งสอดคล้องกับสัญญาณความขรุขระผิว หากกำหนดระดับการแปลงเวฟเลตที่เหมาะสมการทำนายค่าความขรุขระผิวชิ้นงานก็จะมีประสิทธิภาพมากขึ้น

รูปที่ 4.9 และ 4.10 แสดงให้เห็นว่าสัญญาณแรงตัดพลวัตและสัญญาณความขรุขระผิวขณะเกิดเศษโลหะแบบแตกหักในโดเมนเวลาโดยการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว โดยมีเงื่อนไขการตัด ดังนี้ ความเร็วตัด 180 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.5 มิลลิเมตร รัศมีจุมุมมีด 0.4 มิลลิเมตร และมุมคายเศษโลหะ -6 องศา

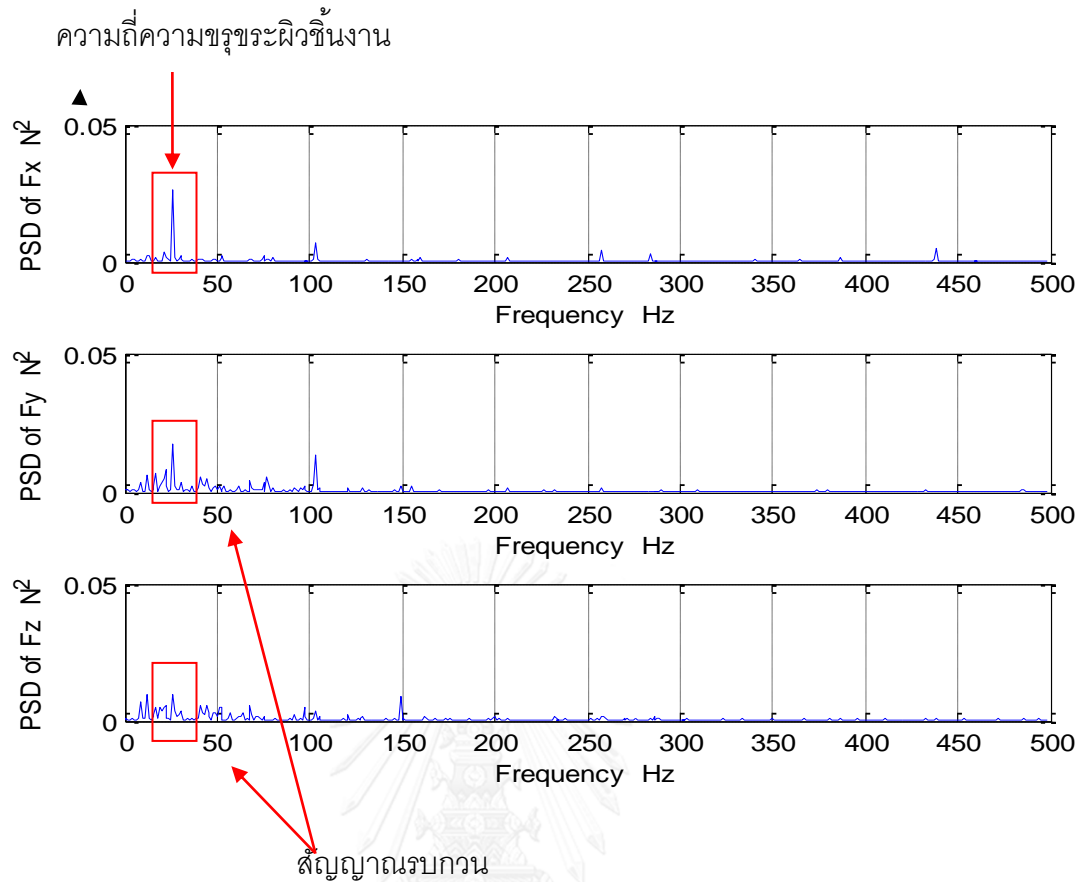


รูปที่ 4.9 สัญญาณแรงตัดพลวัตในแกน X , Y , Z ในโดเมนเวลา



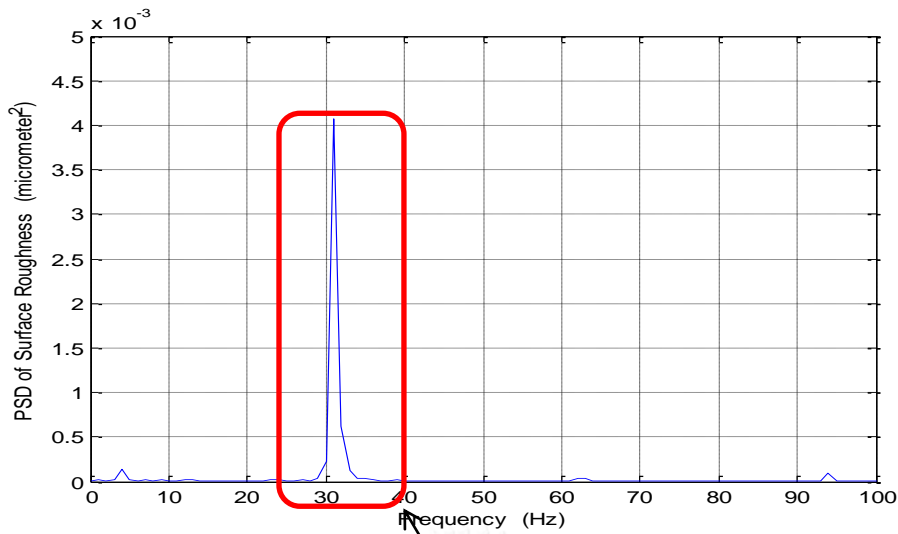
รูปที่ 4.10 สัญญาณความขรุขระผิวในโดเมนเวลา

รูปที่ 4.11 สัญญาณแรงตัดพลวัตขณะตัดที่เกิดเศษโลหะแบบแตกหักในโดเมนความถี่โดยการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว โดยมีเงื่อนไขการตัด ดังนี้ ความเร็วตัด 180 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.5 มิลลิเมตร รัศมีจุมุกมีด 0.4 มิลลิเมตร และมุมคายเศษโลหะ -6 องศา พบว่าสัญญาณความถี่แรงตัดพลวัตนั้นไม่สามารถทราบค่าความถี่ของความขรุขระผิวชิ้นงานที่แน่นอนได้เนื่องจากมีสัญญาณรบกวนอื่นปะปนอยู่ ดังนั้นการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วจึงไม่สามารถนำมาใช้วิเคราะห์หาค่าสัญญาณความถี่ของแรงตัดพลวัตได้ ในขณะเดียวกัน



รูปที่ 4.11 สัญญาณแรงตัดพลวัตในแกน X, Y, Z ในโดเมนความถี่โดยวิธีแปลงฟูเรียร์แบบเร็วซึ่งมีค่าความถี่แรงตัดพลวัตเกิดขึ้นหลายค่าโดยมีแอมพลิจูดสูงสุดเกิดขึ้นที่ 32 Hz

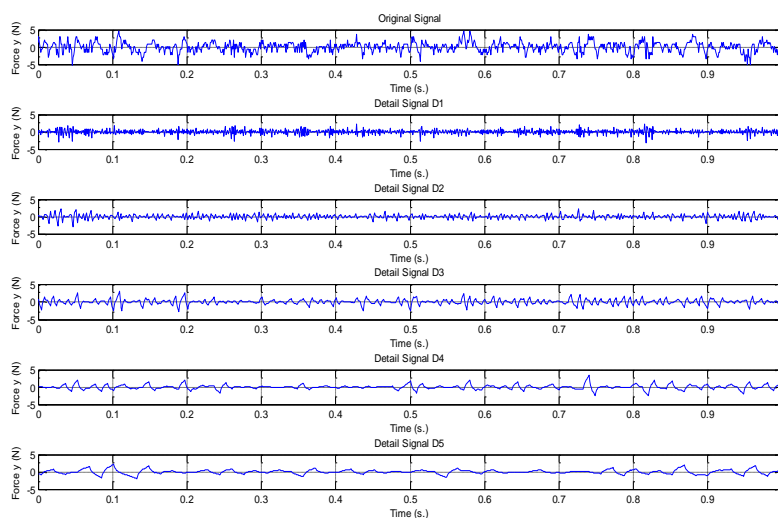
รูปที่ 4.12 สัญญาณความขรุขระผิวชิ้นงานขณะตัดที่เกิดเศษโลหะแบบแตกหักในโดเมนความถี่โดยการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว โดยมีเงื่อนไขการตัด ดังนี้ ความเร็วตัด 180 เมตรต่ออนาที อัตราป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.5 มิลลิเมตร รัศมีจุมุมมีด 0.4 มิลลิเมตร และมุมคายเศษโลหะ -6 องศา พบว่าสัญญาณความขรุขระผิวชิ้นงานในโดเมนความถี่สามารถทราบค่าที่แน่นอนได้โดยการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วเกิดขึ้นที่ 32 Hz



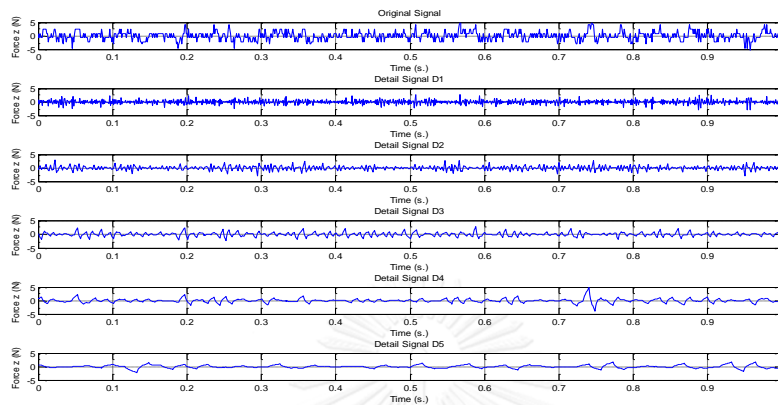
ความถี่ความขรุขระผิวชิ้นงาน

รูปที่ 4.12 สัญญาณความขรุขระผิวในโดเมนความถี่โดยวิธีแปลงฟูเรียร์แบบเร็วซึ่งมีค่าความถี่ความขรุขระผิวเกิดขึ้นที่ 32 Hz

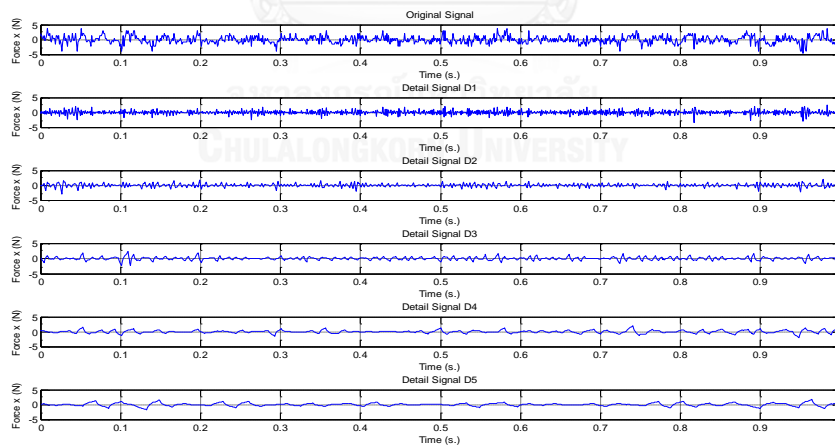
รูปที่ 4.13, 4.14 และ 4.15 แสดงการแปลงเวฟเลทของสัญญาณแรงตัดพลวัตที่มีการเกิดเศษโลหะแบบแตกหักในโดเมนเวลาโดยแบ่งออกเป็น 5 ระดับในแกน X, Y และ Z ซึ่งมีเงื่อนไขการตัด ดังนี้ ความเร็วตัด 180 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.5 มิลลิเมตร รัศมีจุ่มมีด 0.4 มิลลิเมตร และมุมคายเศษโลหะ -6 องศา จะพบว่าความหนาแน่นของแรงในโดเมนเวลาที่ระดับชั้น (level) ที่ต่ำกว่านั้นมีความหนาแน่นของแรงสูงกว่าในระดับชั้น (level) ที่สูง



รูปที่ 4.13 การแปลงเวฟเลทของสัญญาณแรงตัดพลวัตที่มีการเกิดเศษโลหะแบบแตกหักในโดเมนเวลาของแกน X ซึ่งมีเงื่อนไขการตัด ดังนี้ ความเร็วตัด 180 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.5 มิลลิเมตร รัศมีจุมุมมีด 0.4 มิลลิเมตร และมุมคายเศษโลหะ -6 องศา

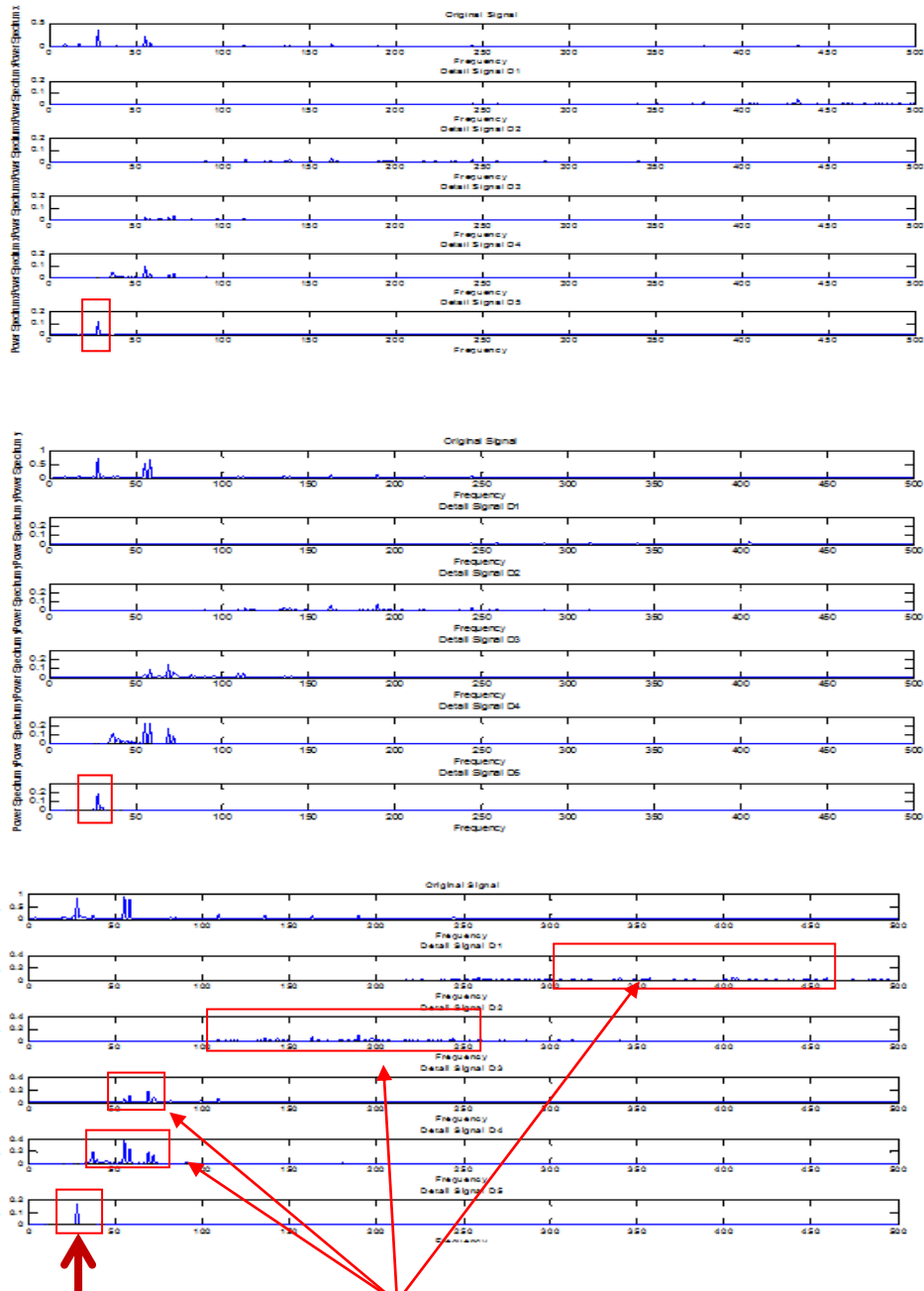


รูปที่ 4.14 การแปลงเวฟเลทของสัญญาณแรงตัดพลวัตที่มีการเกิดเศษโลหะแบบแตกหักในโดเมนเวลาของแกน Y ซึ่งมีเงื่อนไขการตัด ดังนี้ ความเร็วตัด 180 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.5 มิลลิเมตร รัศมีจุมุมมีด 0.4 มิลลิเมตร และมุมคายเศษโลหะ -6 องศา



รูปที่ 4.15 การแปลงเวฟเลทของสัญญาณแรงตัดพลวัตที่มีการเกิดเศษโลหะแบบแตกหักในโดเมนเวลาของแกน Z ซึ่งมีเงื่อนไขการตัด ดังนี้ ความเร็วตัด 180 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.5 มิลลิเมตร รัศมีจุมุมมีด 0.4 มิลลิเมตร และมุมคายเศษโลหะ -6 องศา

การแปลงเวฟเลทของสัญญาณแรงตัดพลวัตที่ทำให้เกิดเศษโลหะแบบแตกหักในโดเมนความถี่ 5 ระดับ เงื่อนไขการตัด ความเร็วตัด 180 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.5 มิลลิเมตร รัศมีจุกมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา ดังรูปที่ 4.16



ความถี่ความขรุขระผิวชิ้นงาน สัญญาณรบกวน

รูปที่ 4.16 การแปลงเวฟเลทของแรงตัดพลวัตในแกน X,Y,Z ในโดเมนความถี่ซึ่งถูกแบ่งออกเป็น 5 ระดับ

4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการตัดและลักษณะการเกิดเศษโลหะ

4.4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตัดและลักษณะการเกิดเศษโลหะ

จากการทำวิจัยภายใต้เงื่อนไขการตัดต่างๆ ซึ่งประกอบไปด้วยปัจจัยในการตัดดังนี้ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมุมมีด และมุมคายเศษโลหะ สามารถอธิบายความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นได้ดังนี้



100 ม./นาที

(ข) 180 ม./นาที

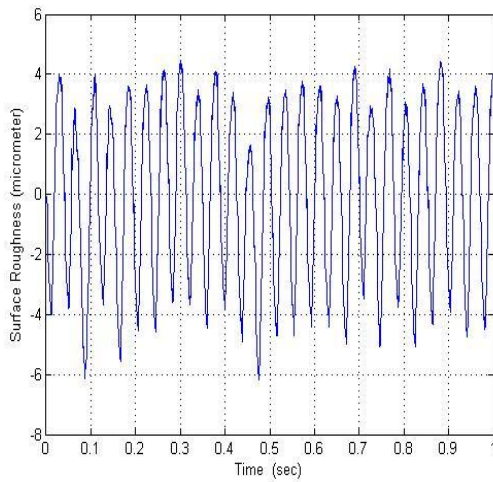
(ค) 260 ม./นาที

รูปที่ 4.17(ก) เศษโลหะที่เกิดขึ้นจากเงื่อนไขการตัดที่ความเร็วตัด 100 ม./นาที อัตราป้อนตัด 0.1 มม. ความลึกตัด 0.8 มม. รัศมีจุมุมมีด 0.8 มม. และมุมคายเศษโลหะ 11 องศา

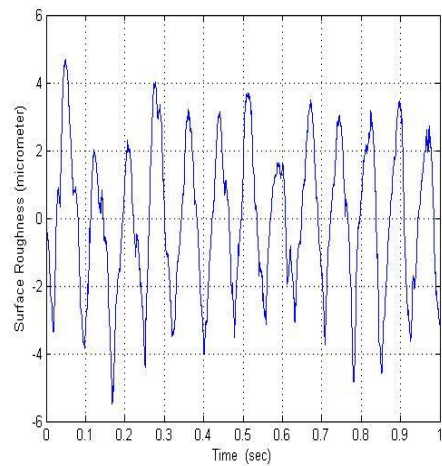
รูปที่ 4.17(ข) เศษโลหะที่เกิดขึ้นจากเงื่อนไขการตัดที่ความเร็วตัด 180 ม./นาที อัตราป้อนตัด 0.1 มม. ความลึกตัด 0.8 มม. รัศมีจุมุมมีด 0.8 มม. และมุมคายเศษโลหะ 11 องศา

รูปที่ 4.17(ค) เศษโลหะที่เกิดขึ้นจากเงื่อนไขการตัดที่ความเร็วตัด 260 ม./นาที อัตราป้อนตัด 0.1 มม. ความลึกตัด 0.8 มม. รัศมีจุมุมมีด 0.8 มม. และมุมคายเศษโลหะ 11 องศา

จากการทดลองพบว่าเมื่อความเร็วตัดเพิ่มขึ้น เศษโลหะที่ได้จากการกลึงตัดจะมีความยาวเพิ่มขึ้นตามไปด้วย หรือให้เศษโลหะแบบต่อเนื่องเนื่องจากการใช้ความเร็วในการตัดที่สูง ส่งผลให้อุณหภูมิในการตัดสูงขึ้นตาม ทำให้ผิวของวัสดุมีความอ่อนตัว รวมทั้งเศษวัสดุที่มีความเหนียว เคลื่อนตัวออกมาอย่างต่อเนื่อง และการใช้ความเร็วตัดที่สูงนั้นยังทำให้ใช้แรงในการตัดน้อยลง โอกาสที่ชิ้นงานจะเกิดการสั่นสะเทือนต่ำ ชิ้นงานกลึงจึงมีความเรียบผิวสูง ดังภาพเศษโลหะต่อไปนี้ซึ่งเรียงตามลำดับจากซ้ายไปขวา

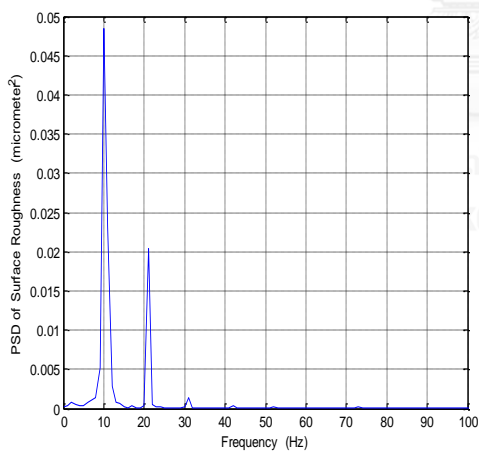


ความเร็วตัด 100 ม./นาที

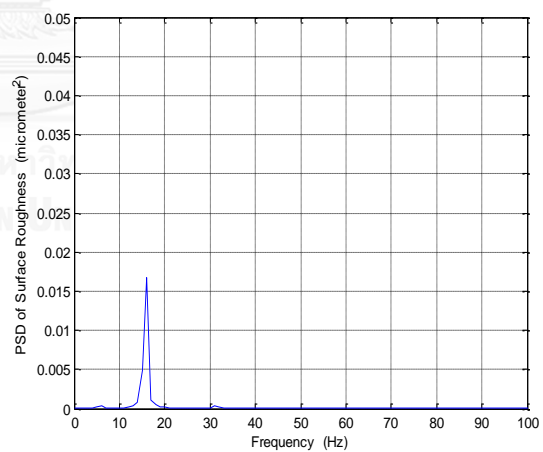


(ข) ความเร็วตัด 260ม./นาที

รูปที่ 4.18 (ก),(ข) การวิเคราะห์ความขรุขระผิวโดยการวัดด้วยเครื่องวัดค่าความขรุขระผิว จากเงื่อนไขการตัดที่ อัตราป้อนตัด 0.1 มม. ความลึกตัด 0.8 มม. รัศมีจุมุมมีด 0.8 มม. และมุมคายเศษโลหะ 11

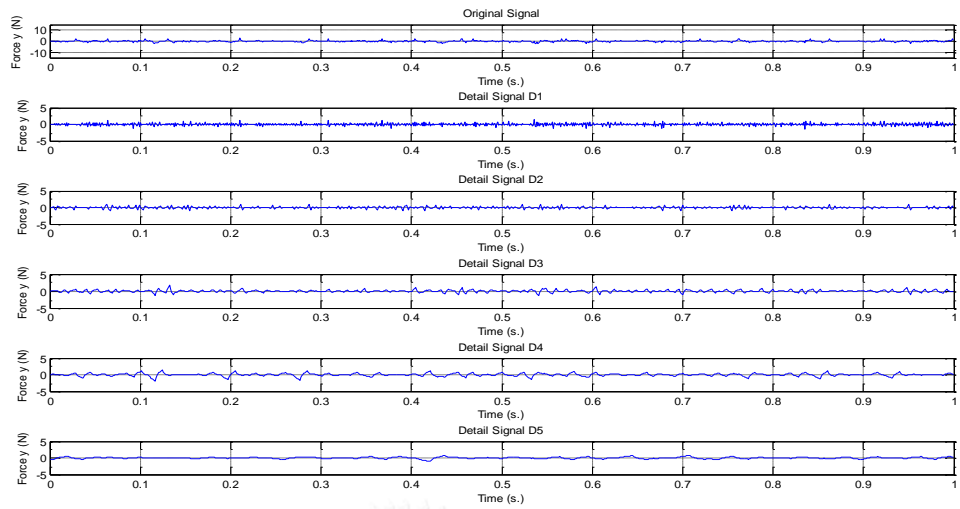


ความเร็วตัด 100 ม./นาที

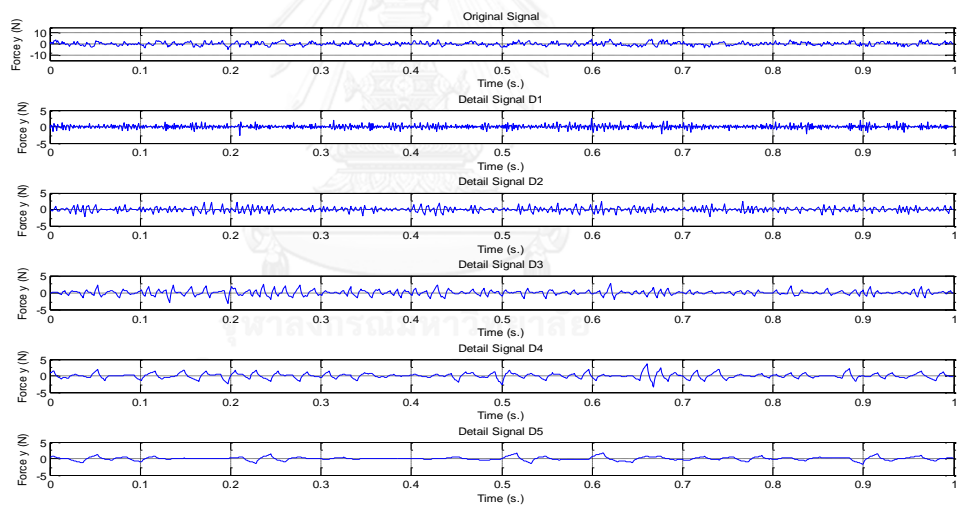


(ข) ความเร็วตัด 260ม./นาที

รูปที่ 4.19 (ก),(ข) การวิเคราะห์ความขรุขระผิวจากการแปลงฟูเรียร์ในโดเมนความถี่ จากเงื่อนไขการตัดที่ อัตราป้อนตัด 0.1 มม. ความลึกตัด 0.8 มม. รัศมีจุมุมมีด 0.8 มม. และมุมคายเศษโลหะ

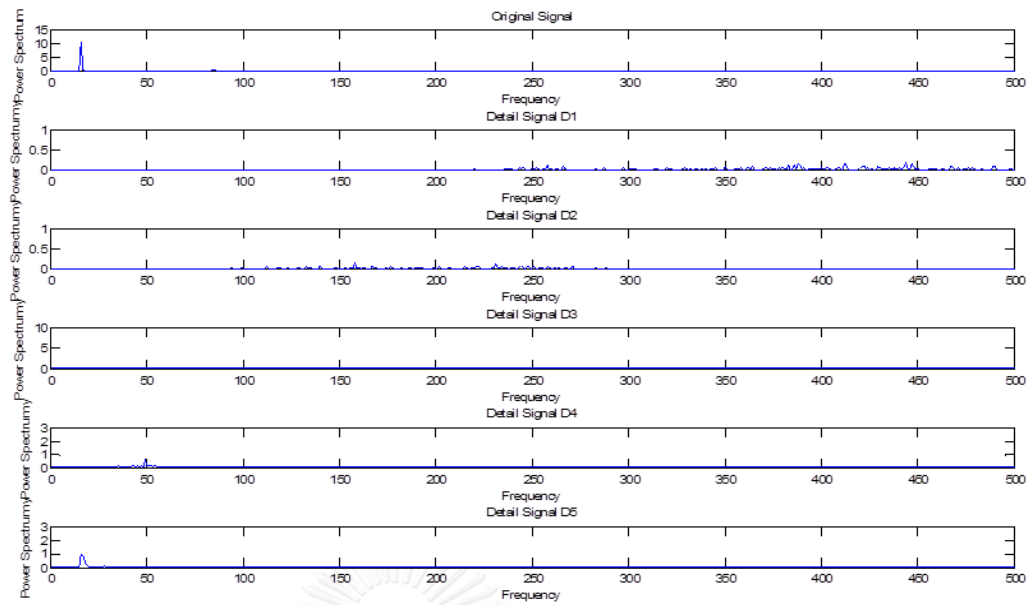


ความเร็วตัด 100 ม./นาที

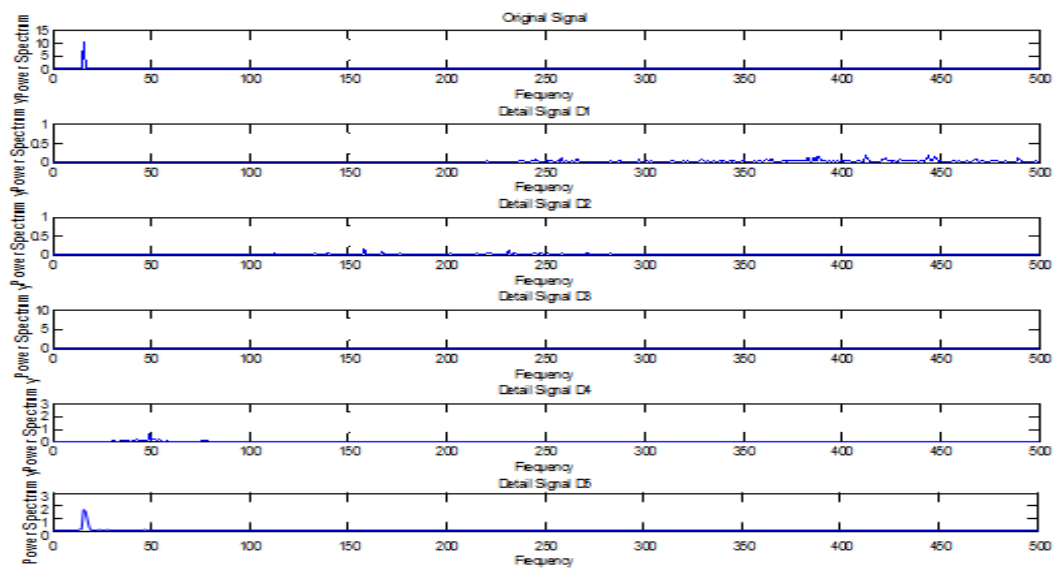


ความเร็วตัด 260 ม./นาที

รูปที่ 4.20 (ก),(ข) การวิเคราะห์แรงตัดพลวัตจากการแปลงเวฟเลขแกมมา F_y แรงป้อนตัดในโดเมนเวลา จาก เงื่อนไขการตัดที่ อัตราป้อนตัด 0.1 มม. ความลึกตัด 0.8 มม. รัศมีจุ่มมีด 0.8 มม. และ มุมคายเศษโลหะ 11



(ก) ความเร็วตัด 100 ม./นาที



ความเร็วตัด 260 ม./นาที

รูปที่ 4.21 (ก),(ข) การวิเคราะห์แรงตัดพลวัตจากการแปลงเวฟเลขแทน F_y แรงป้อนตัดในโดเมนความถี่ จาก เงื่อนไขการตัดที่ อัตราป้อนตัด 0.1 มม. ความลึกตัด 0.8 มม. รัศมีจุ่มกมิด 0.8 มม. และมุมคายเศษโลหะ 11

จากรูปที่ 4.21 พบว่าความถี่ระหว่างสัญญาณแรงตัดพลวัตจากการแปลงเวฟเลขในโดเมนความถี่ กับสัญญาณความขรุขระผิวจากการแปลงฟูเรียร์ในโดเมนความถี่ มีความสอดคล้องกันที่การแปลงเวฟเลขในระดับที่ 5 ดังนั้น สามารถนำแรงตัดพลวัตจากการแปลงเวฟเลขในโดเมนเวลาระดับที่ 5 มาประมาณหาค่าความขรุขระผิวจากพื้นที่ได้กราฟซึ่งมีความแม่นยำสูงกว่าการคำนวณหาพื้นที่ที่ได้กราฟวิธีการแปลงฟูเรียร์ เพราะสามารถคำนวณหาค่าความขรุขระผิวจากพื้นที่ได้กราฟของเงื่อนไขการเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องได้

4.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนตัดและลักษณะการเกิดเศษโลหะ

เศษโลหะที่เกิดขึ้นจากเงื่อนไขการตัด ที่ความเร็วตัด 100 ม./นาที อัตราป้อนตัด 0.1 , 0.2 , 0.3 มม. ความลึกตัด 0.5 มม. รัศมีจุมูกมีด 0.4 มม. และมุมคายเศษโลหะ -6 องศา



0.1 มม.

(ข) 0.2 มม.

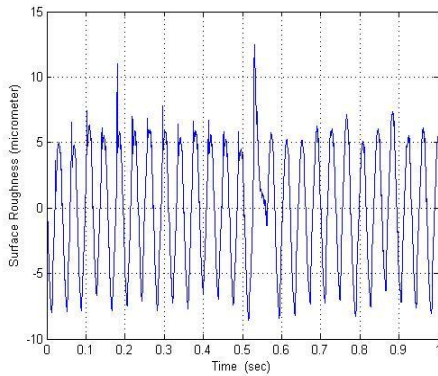
(ค) 0.3 มม.

รูปที่ 4.22(ก) เศษโลหะที่เกิดขึ้นจากเงื่อนไขการตัด ที่ความเร็วตัด 100 ม./นาที อัตราป้อนตัด 0.1 มม. ความลึกตัด 0.5 มม. รัศมีจุมูกมีด 0.4 มม. และมุมคายเศษโลหะ -6 องศา

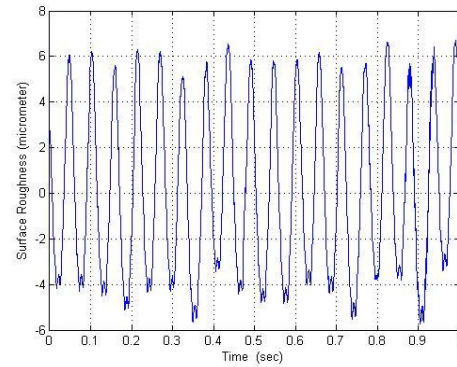
รูปที่ 4.22(ข) เศษโลหะที่เกิดขึ้นจากเงื่อนไขการตัด ที่ความเร็วตัด 100 ม./นาที อัตราป้อนตัด 0.2 มม. ความลึกตัด 0.5 มม. รัศมีจุมูกมีด 0.4 มม. และมุมคายเศษโลหะ -6 องศา

รูปที่ 4.22(ค) เศษโลหะที่เกิดขึ้นจากเงื่อนไขการตัด ที่ความเร็วตัด 100 ม./นาที อัตราป้อนตัด 0.3 มม. ความลึกตัด 0.5 มม. รัศมีจุมูกมีด 0.4 มม. และมุมคายเศษโลหะ -6 องศา

จากการทดลองพบว่าการตัดที่ใช้อัตราการป้อนตัดเพิ่มขึ้น จะทำให้เศษโลหะมีความยาวลดลง เนื่องจากการใช้อัตราการป้อนตัดที่สูงเป็นการเพิ่มพื้นที่ในการตัด ส่งผลให้เศษโลหะมีความหนาที่เพิ่มขึ้น และเกิดการโค้งงอเคลือบที่ชนกับหน้าคายเศษโลหะ มีโอกาสให้เกิดการแตกหักของเศษโลหะสูงดังภาพเศษโลหะต่อไปนี้ซึ่งเรียงตามลำดับจากซ้ายไปขวา

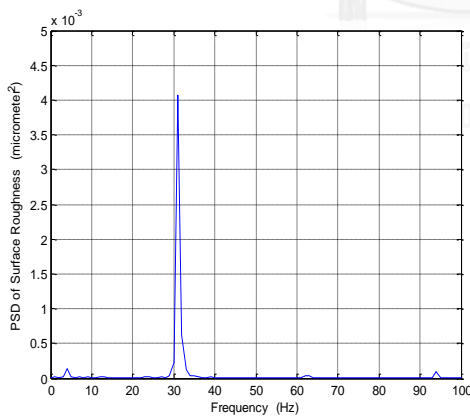


(ก) อัตราป้อนตัด 0.1 มม.

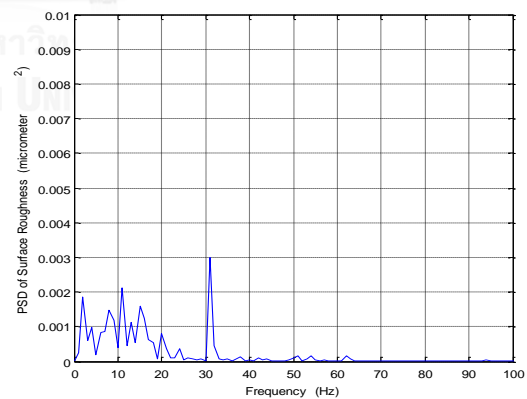


(ข) อัตราป้อนตัด 0.3 มม.

รูปที่ 4.23 (ก),(ข) การวิเคราะห์ความขรุขระผิวโดยการวัดด้วยเครื่องวัดค่าความขรุขระผิว จากเงื่อนไขการตัดที่ความเร็วตัด 100 ม./นาที ความลึกตัด 0.5 มม. รัศมีจุ่มกมิต 0.4 มม. และมุมคายเศษโลหะ -6 องศา

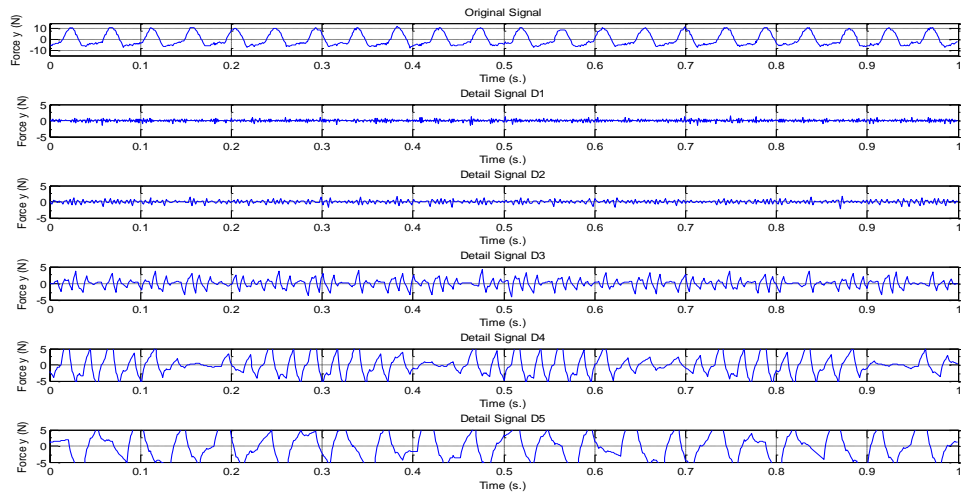


(ก) อัตราป้อนตัด 0.1 มม.

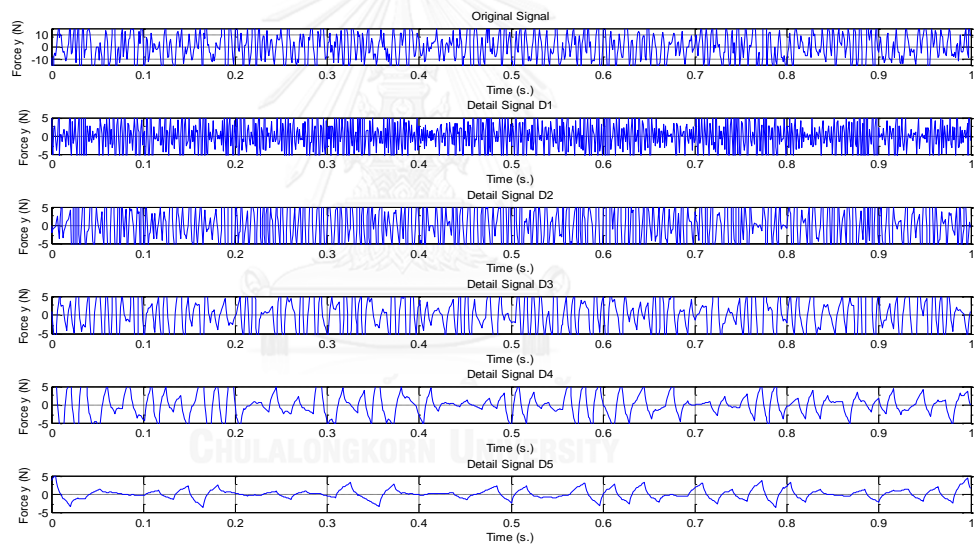


(ข) อัตราป้อนตัด 0.3 มม.

รูปที่ 4.24(ก),(ข) การวิเคราะห์ความขรุขระผิวจากการแปลงฟูเรียร์ในโดเมนความถี่ จากเงื่อนไขการตัดที่ ที่ความเร็วตัด 100 ม./นาที ความลึกตัด 0.5 มม. รัศมีจุ่มกมิต 0.4 มม. และมุมคายเศษโลหะ -6 องศา

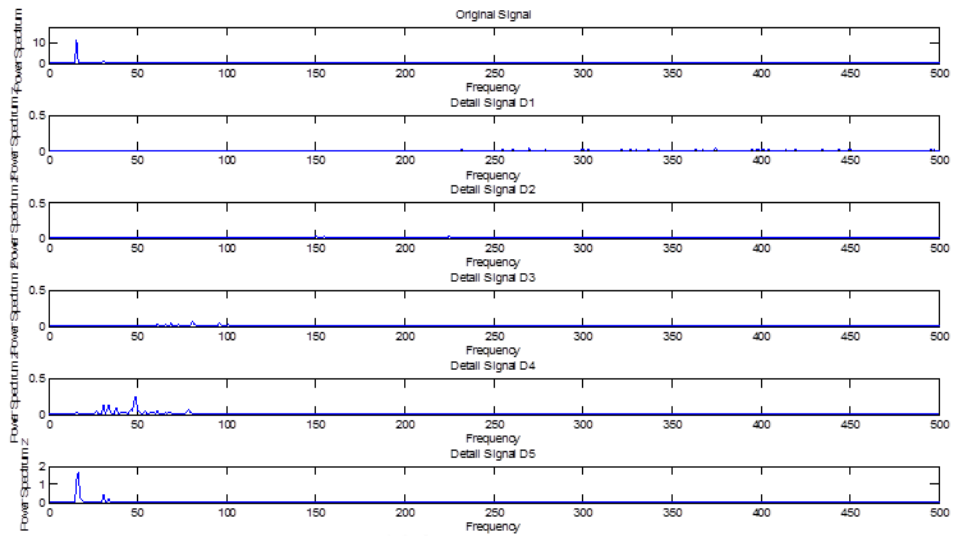


(ก) อัตราป้อนตัด 0.1 มม.

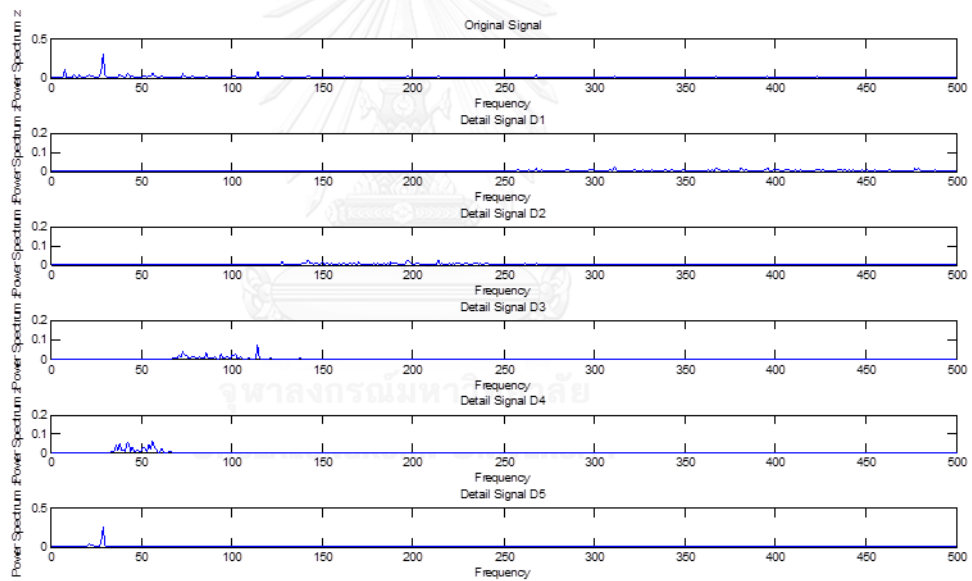


อัตราป้อนตัด 0.3 มม.

รูปที่ 4.25 (ก),(ข) การวิเคราะห์แรงตัดพลวัตจากการแปลงเวฟเลท แกน F_y แรงป้อนตัดในโดเมนเวลา จาก เงื่อนไขการตัดที่ความเร็วตัด 100 ม./นาที ความลึกตัด 0.5 มม. รัศมีจุกมีด 0.4 มม. และมุมคายเศษโลหะ -6 องศา



อัตราป้อนตัด 0.1 มม.



อัตราป้อนตัด 0.3 มม.

รูปที่ 4.26 (ก),(ข) การวิเคราะห์แรงตัดพลวัตจากการแปลงเวฟเลขแทน F_y แรงป้อนตัดในโดเมนความถี่ จาก เงื่อนไขการตัดที่ความเร็วตัด 100 ม./นาที ความลึกตัด 0.5 มม. รัศมีจุมูกมีด 0.4 มม. และมุมคายเศษโลหะ -6 องศา

จากรูปที่ 4.26 พบว่าความถี่ระหว่างสัญญาณแรงตัดพลวัตจากการแปลงเวฟเลขในโดเมนความถี่ กับสัญญาณความขรุขระผิวจากการแปลงฟูเรียร์ในโดเมนความถี่ มีความสอดคล้องกันที่การแปลงเวฟเลขในระดับที่ 5 ดังนั้น สามารถนำแรงตัดพลวัตจากการแปลงเวฟเลขในโดเมนเวลาระดับที่ 5 มาประมาณหาค่าความขรุขระผิวจากพื้นที่ได้กราฟซึ่งมีความแม่นยำสูงกว่าการคำนวณหาพื้นที่ที่ได้กราฟวิธีการแปลงฟูเรียร์ เพราะสามารถคำนวณหาค่าความขรุขระผิวจากพื้นที่ได้กราฟของเงื่อนไขการเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องได้

4.4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกตัดและลักษณะการเกิดเศษโลหะ

เศษโลหะที่เกิดขึ้นจากเงื่อนไขการตัด ที่ความเร็วตัด 100 ม./นาที อัตราป้อนตัด 0.1 มม. ความลึกตัด 0.2 , 0.5 และ 0.8 มม. รัศมีจุมุมมีด 0.4 มม. และมุมคายเศษโลหะ -6 องศา

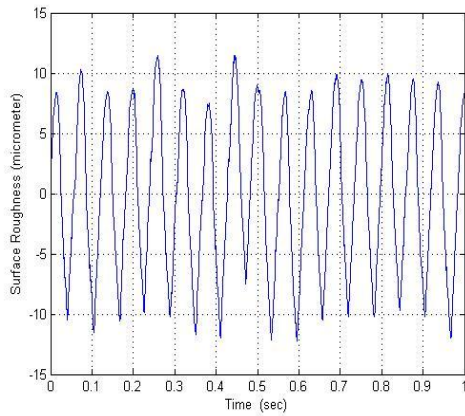


รูปที่ 4.27(ก) เศษโลหะที่เกิดขึ้นจากเงื่อนไขการตัด ที่ความเร็วตัด 100 ม./นาที อัตราป้อนตัด 0.1 มม. ความลึกตัด 0.2 มม. รัศมีจุมุมมีด 0.4 มม. และมุมคายเศษโลหะ -6 องศา

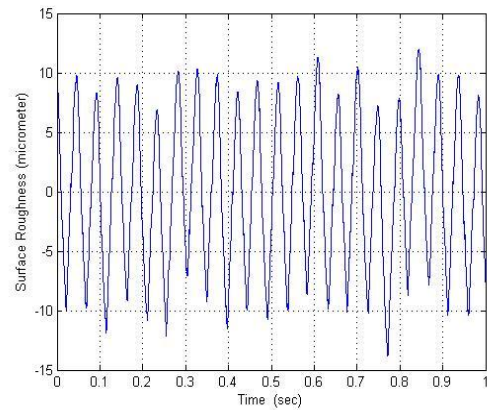
รูปที่ 4.27(ข) เศษโลหะที่เกิดขึ้นจากเงื่อนไขการตัด ที่ความเร็วตัด 100 ม./นาที อัตราป้อนตัด 0.1 มม. ความลึกตัด 0.5 มม. รัศมีจุมุมมีด 0.4 มม. และมุมคายเศษโลหะ -6 องศา

รูปที่ 4.27(ค) เศษโลหะที่เกิดขึ้นจากเงื่อนไขการตัด ที่ความเร็วตัด 100 ม./นาที อัตราป้อนตัด 0.1 มม. ความลึกตัด 0.8 มม. รัศมีจุมุมมีด 0.4 มม. และมุมคายเศษโลหะ -6 องศา

พบว่าการตัดกลึงที่ใช้ความลึกตัดมาก จะทำให้ความยาวของเศษโลหะลดลง เนื่องจากเศษโลหะจะมีความกว้างและความหนาที่เพิ่มขึ้น จึงเกิดการโค้งงอของเศษโลหะเคลื่อนที่ชนกับหน้าคายเศษโลหะทำให้มีโอกาสเกิดการแตกหักของเศษโลหะสูง ดังภาพเศษโลหะต่อไปนี้ซึ่งเรียงตามลำดับจากซ้ายไปขวา

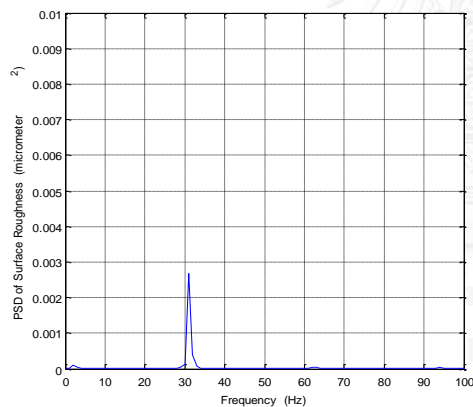


(ก) ความลึกตัด 0.2 มม.

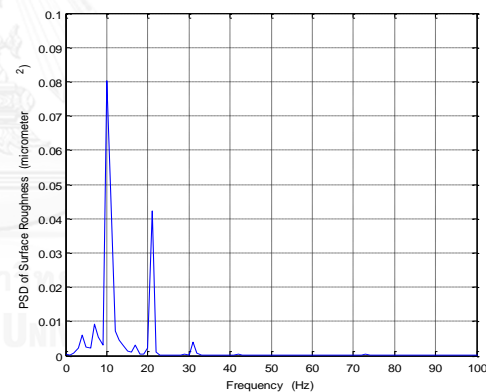


(ข) ความลึกตัด 0.8 มม.

รูปที่ 4.28(ก),(ข) การวิเคราะห์ความขรุขระผิวโดยการวัดด้วยเครื่องวัดค่าความขรุขระผิว จากเงื่อนไขการที่ความเร็วตัด 100 ม./นาที อัตราป้อนตัด 0.1 มม. รัศมีจุกมีด 0.4 มม. และมุมคายเศษโลหะ -6 องศา

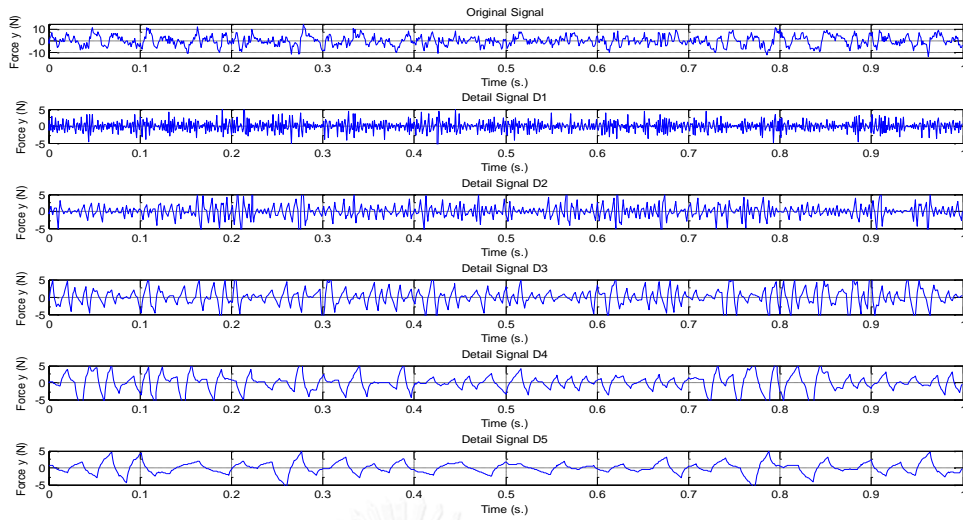


(ก) ความลึกตัด 0.2 มม.

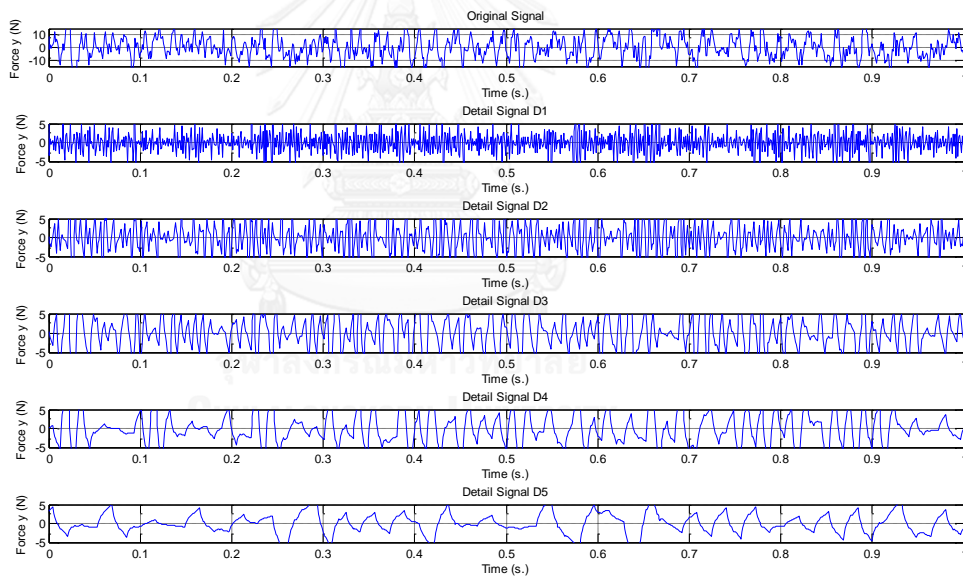


(ข) ความลึกตัด 0.8 มม.

รูปที่ 4.29(ก),(ข) การวิเคราะห์ความขรุขระผิวจากการแปลงฟูเรียร์ในโดเมนความถี่เงื่อนไขการที่ความเร็วตัด 100 ม./นาที อัตราป้อนตัด 0.1 มม. รัศมีจุกมีด 0.4 มม. และมุมคายเศษโลหะ -6

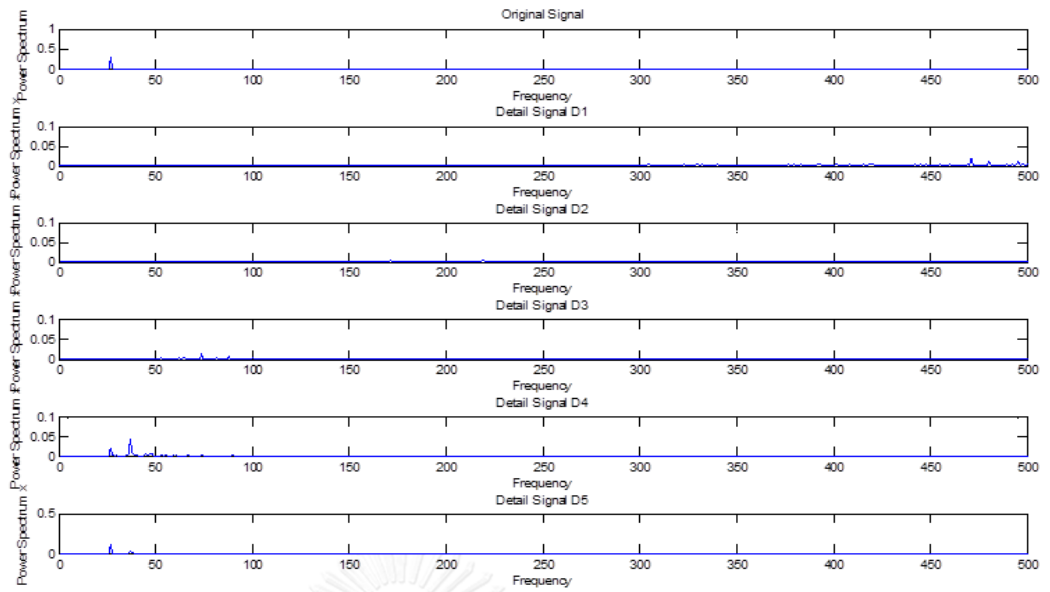


ความลึกตัด 0.2 มม.

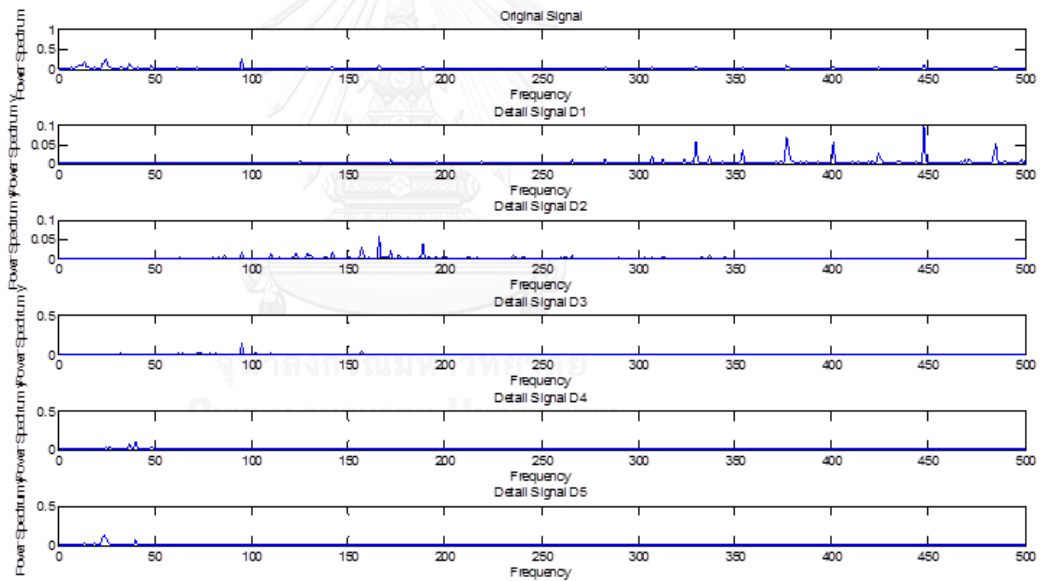


ความลึกตัด 0.8 มม.

รูปที่ 4.30(ก),(ข) การวิเคราะห์แรงตัดพลวัตจากการแปลงเวฟเลขแทน F_y แรงป้อนตัดในโดเมนความถี่ของเครื่องที่มีความเร็วตัด 100 ม./นาที อัตราป้อนตัด 0.1 มม. รัศมีจุมุมมีด 0.4 มม. และมุมคายเศษโลหะ -6 องศา



ความลึกตัด 0.2 มม.



ความลึกตัด 0.8 มม.

รูปที่ 4.31(ก),(ข) การวิเคราะห์แรงตัดพลวัตจากการแปลงเวฟเลขแทน F_y แรงป้อนตัดในโดเมนความถี่ เงื่อนไขการที่ความเร็วตัด 100 ม./นาที อัตราป้อนตัด 0.1 มม. รัศมีจุมุมมีด 0.4 มม. และมุมคายเศษโลหะ -6 องศา

จากรูปที่ 4.31 พบว่าความถี่ระหว่างสัญญาณแรงตัดพลวัตจากการแปลงเวฟเลขในโดเมนความถี่ กับสัญญาณความขรุขระผิวจากการแปลงฟูเรียร์ในโดเมนความถี่ มีความสอดคล้องกันที่การแปลงเวฟเลขในระดับที่ 5 ดังนั้น สามารถนำแรงตัดพลวัตจากการแปลงเวฟเลขในโดเมนเวลาระดับที่ 5 มาประมาณหาค่าความขรุขระผิวจากพื้นที่ได้กราฟซึ่งมีความแม่นยำสูงกว่าการคำนวณหาพื้นที่ที่ได้กราฟวิธีการแปลงฟูเรียร์ เพราะสามารถคำนวณหาค่าความขรุขระผิวจากพื้นที่ได้กราฟของเงื่อนไขการเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องได้

4.4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีจุมูกมีดและลักษณะการเกิดเศษโลหะ

เศษโลหะที่เกิดขึ้นจากเงื่อนไขการตัด ที่ความเร็วตัด 100 ม./นาที อัตราป้อนตัด 0.1 มม. ความลึกตัด 0.5 มม. รัศมีจุมูกมีด 0.4, 0.8 มม. และมุมคายเศษโลหะ 11 องศา

พบว่าเมื่อใช้รัศมีจุมูกมีดมีขนาดใหญ่ในกระบวนการกลึงตัด จะส่งผลให้ความยาวของเศษโลหะเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีดตัดที่มีรัศมีจุมูกมีดมากทำให้เศษโลหะที่ได้มีความบาง เมื่อเศษโลหะเคลื่อนที่เข้าชนกับหน้าคายเศษโลหะมีโอกาสเกิดการแตกหักของเศษโลหะต่ำ ดังนั้นเศษโลหะที่เกิดจากการตัดโดยใช้มีดตัดที่มีรัศมีจุมูกมีดมากจะมีความยาวที่มากกว่าเศษโลหะที่เกิดจากการตัดโดยใช้มีดตัดที่มีรัศมีจุมูกมีดที่น้อย ดังภาพเศษโลหะต่อไปนี้ซึ่งเรียงตามลำดับจากซ้ายไปขวา

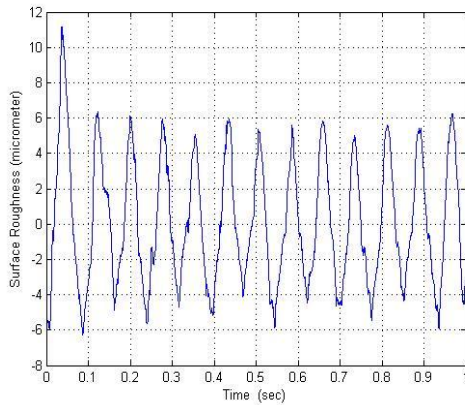


รัศมีจุมูกมีด 0.4 มม.

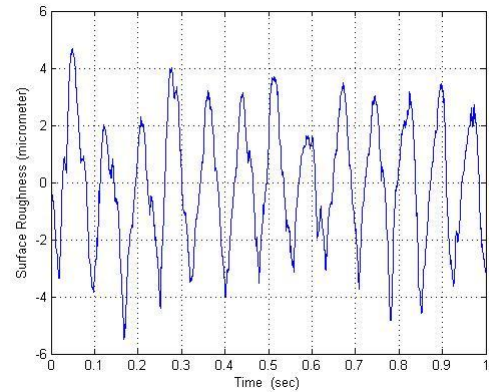
(ข) รัศมีจุมูกมีด 0.8 มม.

รูป 4.32 (ก) เศษโลหะที่เกิดขึ้นจากเงื่อนไขการตัด ที่ความเร็วตัด 100 ม./นาที อัตราป้อนตัด 0.1 มม. ความลึกตัด 0.5 มม. รัศมีจุมูกมีด 0.4 มม. และมุมคายเศษโลหะ 11 องศา

รูป 4.32 (ข) เศษโลหะที่เกิดขึ้นจากเงื่อนไขการตัด ที่ความเร็วตัด 100 ม./นาที อัตราป้อนตัด 0.1 มม. ความลึกตัด 0.5 มม. รัศมีจุมูกมีด 0.8 มม. และมุมคายเศษโลหะ 11 องศา

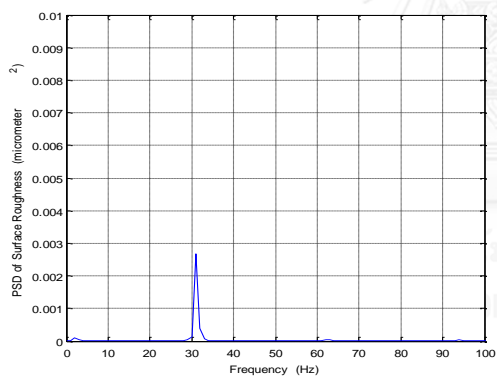


(ก) รัศมีจุ่มกมิด 0.4 มม.

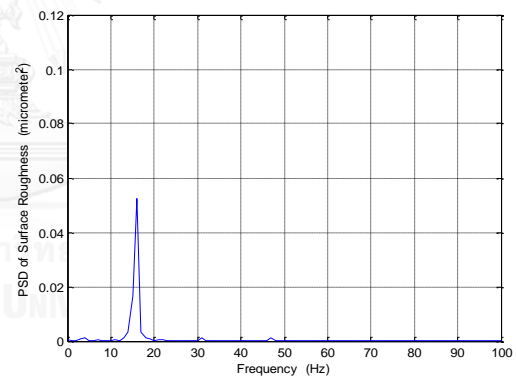


(ข) รัศมีจุ่มกมิด 0.8 มม.

รูปที่ 4.33 (ก),(ข) การวิเคราะห์ความขรุขระผิวโดยการวัดด้วยเครื่องวัดค่าความขรุขระผิว จากเงื่อนไขการตัดที่ ความเร็วตัด 100 ม./นาที อัตราป้อนตัด 0.1 มม. ความลึกตัด 0.5 มม. และมุมคายเศษโลหะ 11 องศา

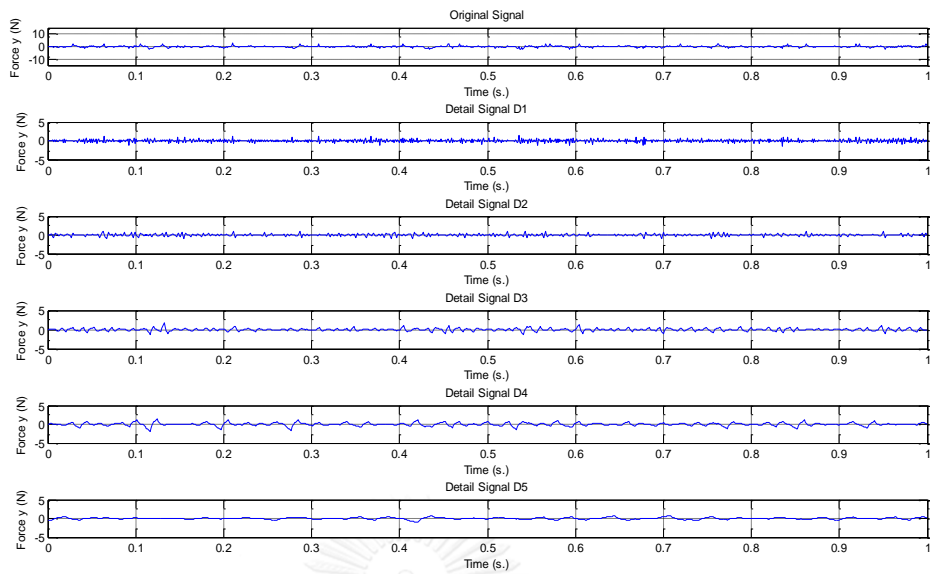


(ก) รัศมีจุ่มกมิด 0.4 มม.

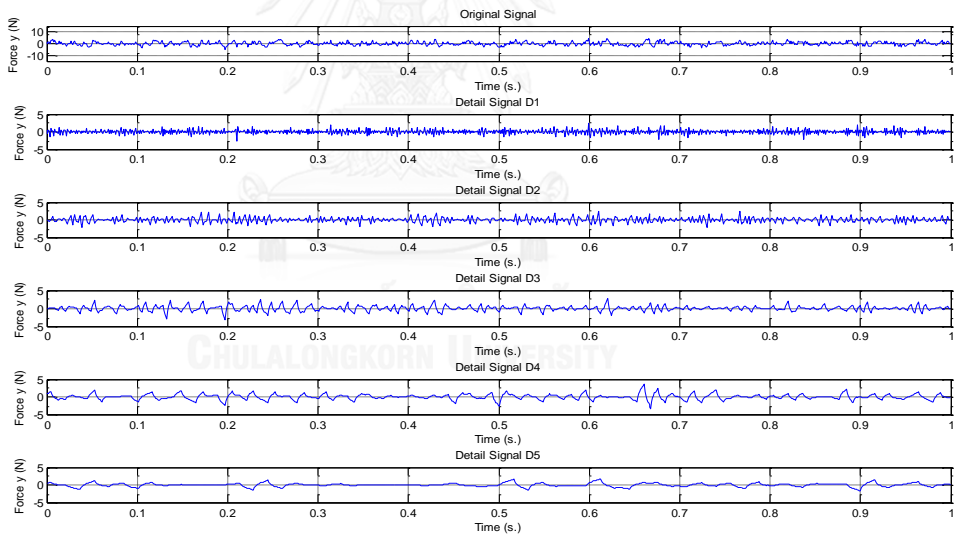


(ข) รัศมีจุ่มกมิด 0.8 มม.

รูปที่ 4.34 (ก),(ข) การวิเคราะห์ความขรุขระผิวจากการแปลงฟูเรียร์ในโดเมนความถี่ จากเงื่อนไขการตัดที่ ความเร็วตัด 100 ม./นาที อัตราป้อนตัด 0.1 มม. ความลึกตัด 0.5 มม. และมุมคายเศษโลหะ 11 องศา

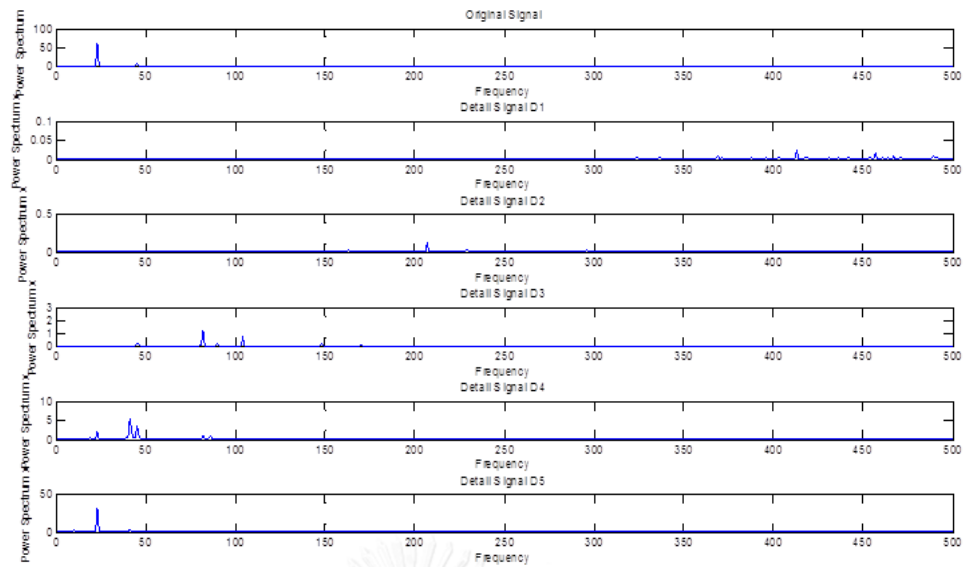


รัศมีจุมุมมีด 0.4 มม.

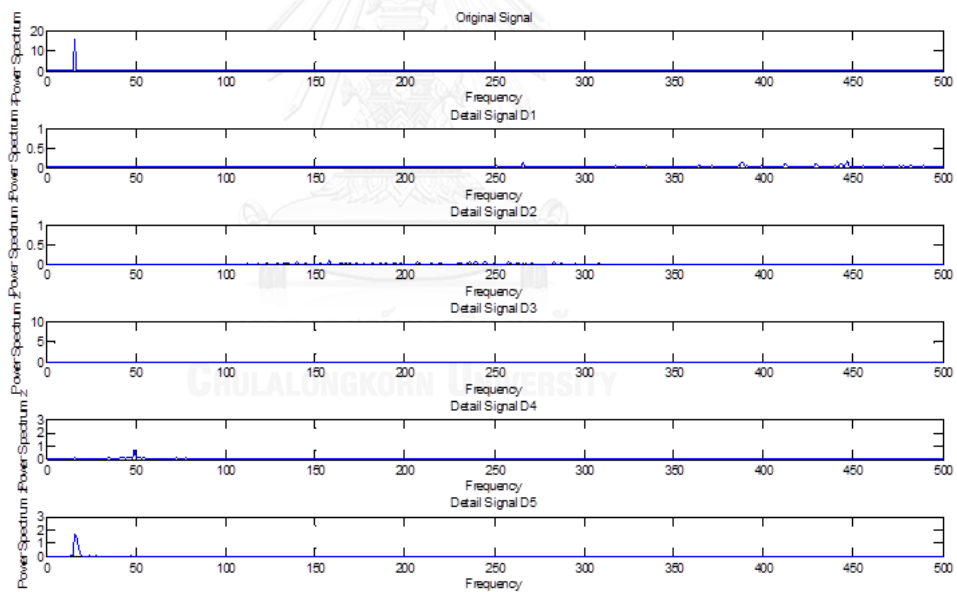


รัศมีจุมุมมีด 0.8 มม.

รูปที่ 4.35 (ก),(ข) การวิเคราะห์แรงตัดพลวัตจากการแปลงเวฟเลท แกน F_y แรงป้อนตัดในโดเมนเวลา จาก เงื่อนไขการตัดที่ ความเร็วตัด 100 ม./นาที อัตราป้อนตัด 0.1 มม. ความลึกตัด 0.5 มม. และมุมคายเศษโลหะ 11 องศา



(ก) รัศมีจุมุมมีด 0.4 มม.



(ข) รัศมีจุมุมมีด 0.8 มม.

รูปที่ 4.36 (ก),(ข) การวิเคราะห์แรงตัดพลวัตจากการแปลงเวฟเลข แกน F_y แรงป้อนตัดในโดเมนความถี่ จากเงื่อนไขการตัดที่ ความเร็วตัด 100 ม./นาที อัตราป้อนตัด 0.1 มม. ความลึกตัด 0.5 มม. และมุมคายเศษโลหะ 11 องศา

จากรูปที่ 4.36 พบว่าความถี่ระหว่างสัญญาณแรงตัดพลวัตจากการแปลงเวฟเลขในโดเมนความถี่ กับสัญญาณความขรุขระผิวจากการแปลงฟูเรียร์ในโดเมนความถี่ มีความสอดคล้องกันที่การแปลงเวฟเลขในระดับที่ 5 ดังนั้น สามารถนำแรงตัดพลวัตจากการแปลงเวฟเลขในโดเมนเวลาระดับที่ 5 มาประมาณหาค่าความขรุขระผิวจากพื้นที่ได้กราฟซึ่งมีความแม่นยำสูงกว่าการคำนวณหาพื้นที่ที่ได้กราฟวิธีการแปลงฟูเรียร์ เพราะสามารถคำนวณหาค่าความขรุขระผิวจากพื้นที่ได้กราฟของเงื่อนไขการเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องได้

4.4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมคายเศษโลหะและลักษณะการเกิดเศษโลหะ

เศษโลหะที่เกิดขึ้นจากเงื่อนไขการตัด ที่ความเร็วตัด 100 ม./นาที อัตราป้อนตัด 0.2 มม. ความลึกตัด 0.5 มม. รัศมีจุมุมมีด 0.4 มม. และมุมคายเศษโลหะ -6,11 องศา

พบว่าเมื่อทำการตัดโดยใช้มุมคายเศษโลหะมาก เศษโลหะจะมีความยาวของที่ต่อเนื่องมากขึ้น เนื่องจากมุมคายเศษโลหะที่มาก จะให้เศษโลหะที่มีความบาง เมื่อเศษโลหะเคลื่อนที่เข้าชนกับหน้าคายเศษโลหะมีโอกาสเกิดการแตกหักของเศษโลหะต่ำ ทำให้ความยาวเศษโลหะยาวกว่าการตัดโดยใช้มุมคายเศษโลหะที่น้อย ดังภาพเศษโลหะต่อไปนี้เรียงตามลำดับจากซ้ายไปขวา

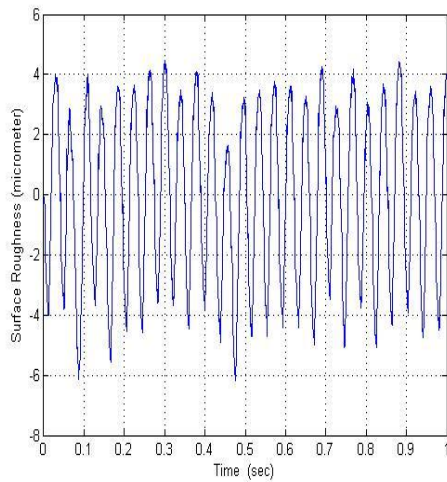


มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

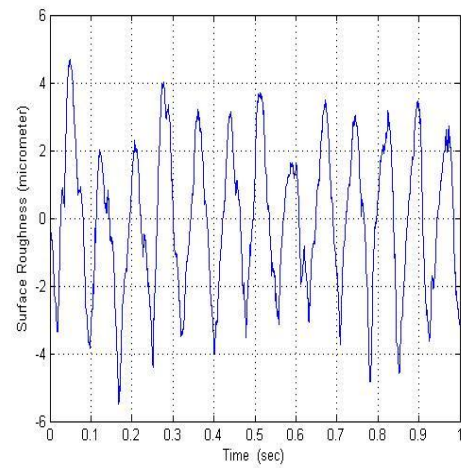
(ข) มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

รูปที่ 4.37(ก) เศษโลหะที่เกิดขึ้นจากเงื่อนไขการตัด ที่ความเร็วตัด 100 ม./นาที อัตราป้อนตัด 0.2 มม. ความลึกตัด 0.5 มม. รัศมีจุมุมมีด 0.4 มม. และมุมคายเศษโลหะ -6 องศา

รูปที่ 4.37(ข) เศษโลหะที่เกิดขึ้นจากเงื่อนไขการตัด ที่ความเร็วตัด 100 ม./นาที อัตราป้อนตัด 0.2 มม. ความลึกตัด 0.5 มม. รัศมีจุมุมมีด 0.4 มม. และมุมคายเศษโลหะ 11 องศา

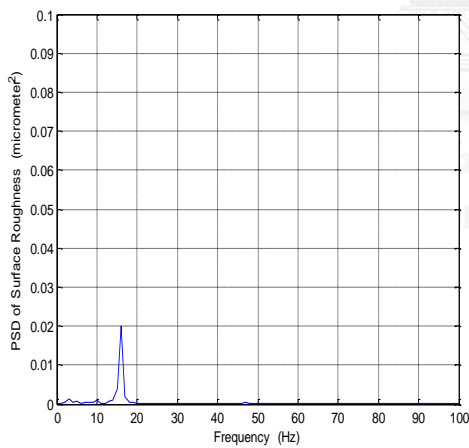


(ก) มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

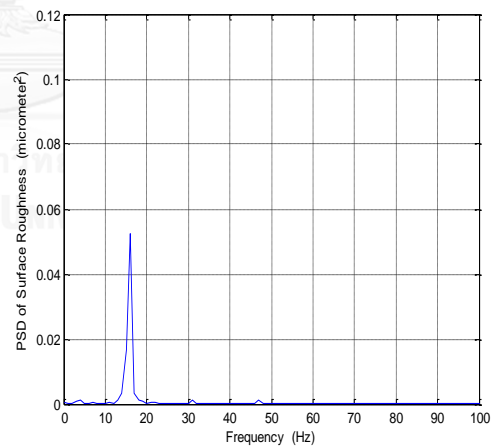


(ข) มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

รูปที่ 4.38(ก),(ข) การวิเคราะห์ความขรุขระผิวโดยการวัดด้วยเครื่องวัดค่าความขรุขระผิว จากเงื่อนไขการตัดที่ ความเร็วตัด 100 ม./นาที อัตราป้อนตัด 0.2 มม. ความลึกตัด 0.5 มม. รัศมีจุกมีด 0.4 มม. และมุมคายเศษโลหะ 11 องศา

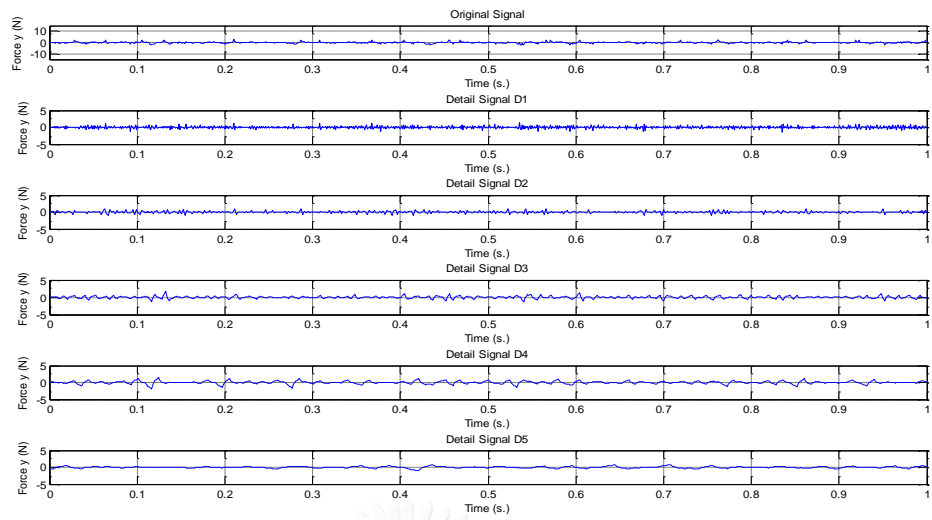


(ก) มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

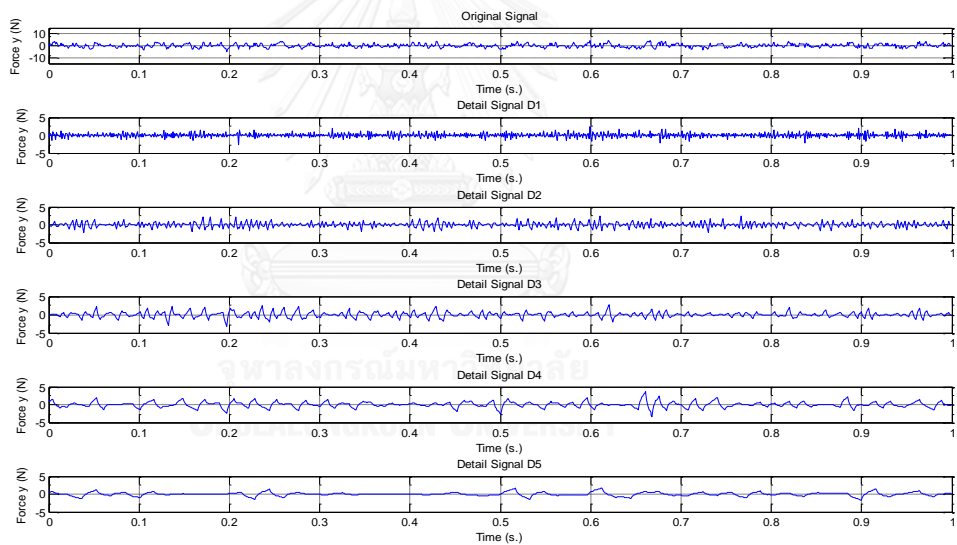


(ข) มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

รูปที่ 4.39(ก),(ข) การวิเคราะห์ความขรุขระผิวจากการแปลงฟูเรียร์ในโดเมนความถี่ จากเงื่อนไขที่ ความเร็วตัด 100 ม./นาที อัตราป้อนตัด 0.2 มม. ความลึกตัด 0.5 มม. รัศมีจุกมีด 0.4 มม. และมุมคายเศษโลหะ 11 องศา

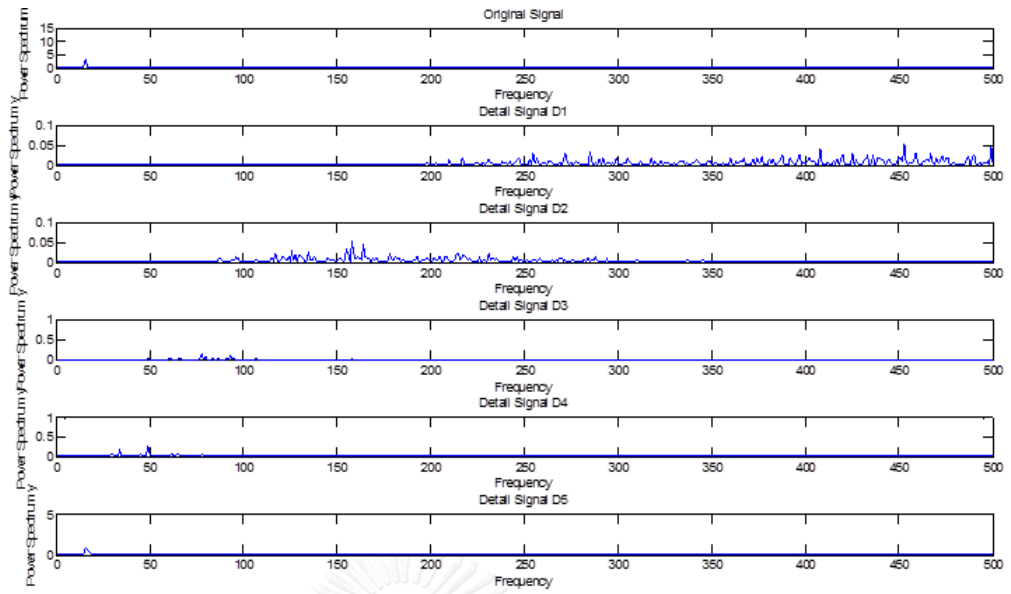


มุ่มคายนเคษลโหะ -6 องศา

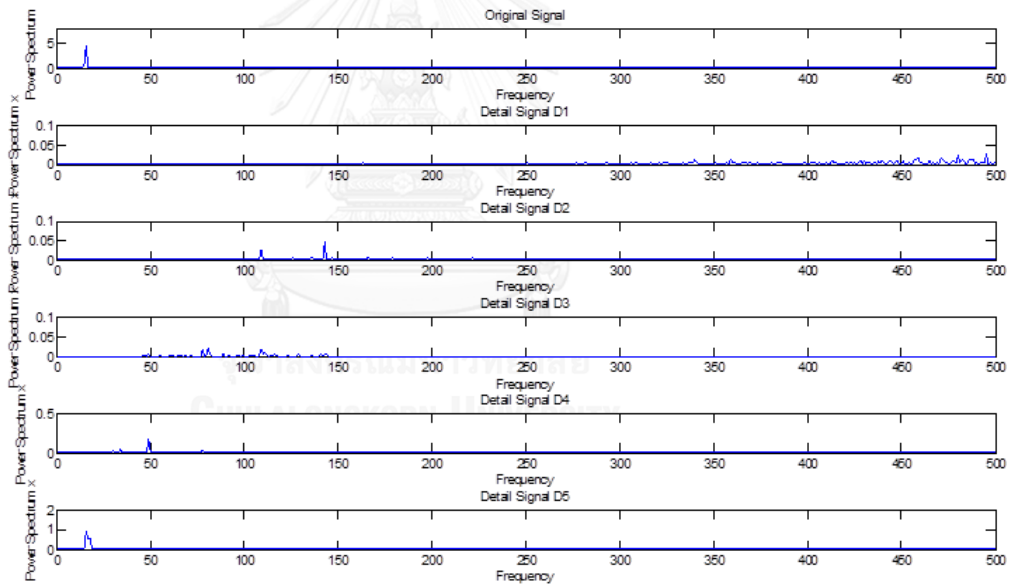


มุ่มคายนเคษลโหะ 11 องศา

รูปที่ 4.40(ก),(ข) การวิเคราะห์แรงตัดพลวัตจากการแปลงเวฟเลท แกน F_y แรงป้อนตัดในโดเมนเวลา จาก เงื่อนไขการตัดที่ ที่ความเร็วตัด 100 ม./นาที อัตราป้อนตัด 0.2 มม. ความลึกตัด 0.5 มม. รัศมีจุกมีด 0.4 มม. และมุ่มคายนเคษลโหะ 11 องศา



มุมมองเศษโลหะ -6 องศา



มุมมองเศษโลหะ 11 องศา

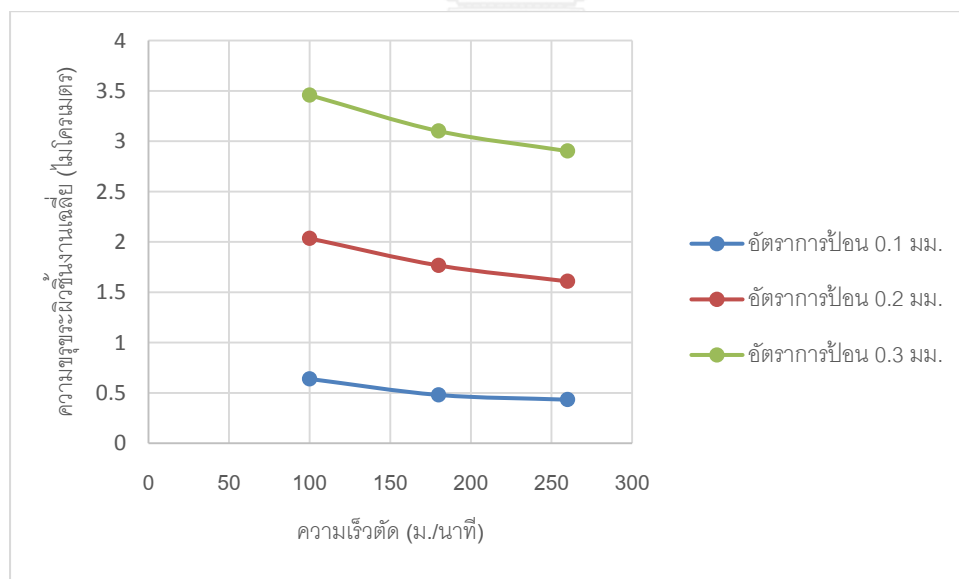
รูปที่ 4.41(ก),(ข) การวิเคราะห์แรงตัดพลวัตจากการแปลงเวฟเลท แกน F_y แรงป้อนตัดในโดเมนเวลา จาก เงื่อนไขการตัดที่เงื่อนไขการตัดที่ ที่ความเร็วตัด 100 ม./นาที อัตราป้อนตัด 0.2 มม. ความลึกตัด 0.5 มม. รัศมีจุมุมมีด 0.4 มม. และมุมมองเศษโลหะ 11 องศา

จากรูปที่ 4.41 พบว่าความถี่ระหว่างสัญญาณแรงตัดพลวัตจากการแปลงเวฟเลขในโดเมนความถี่ กับสัญญาณความขรุขระผิวจากการแปลงฟูเรียร์ในโดเมนความถี่ มีความสอดคล้องกันที่การแปลงเวฟเลขในระดับที่ 5 ดังนั้น สามารถนำแรงตัดพลวัตจากการแปลงเวฟเลขในโดเมนเวลาระดับที่ 5 มาประมาณหาค่าความขรุขระผิวจากพื้นที่ได้กราฟซึ่งมีความแม่นยำสูงกว่าการคำนวณหาพื้นที่ที่ได้กราฟวิธีการแปลงฟูเรียร์ เพราะสามารถคำนวณหาค่าความขรุขระผิวจากพื้นที่ได้กราฟของเงื่อนไขการเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องได้

4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการตัด ความขรุขระผิว และ อัตราส่วนของแรง กับ ปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อค่าความขรุขระผิว

4.5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (R_a) ,ความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (R_z) , อัตราส่วนของแรงกับความเร็วตัด ในอัตราการป้อนตัดที่แตกต่างกัน

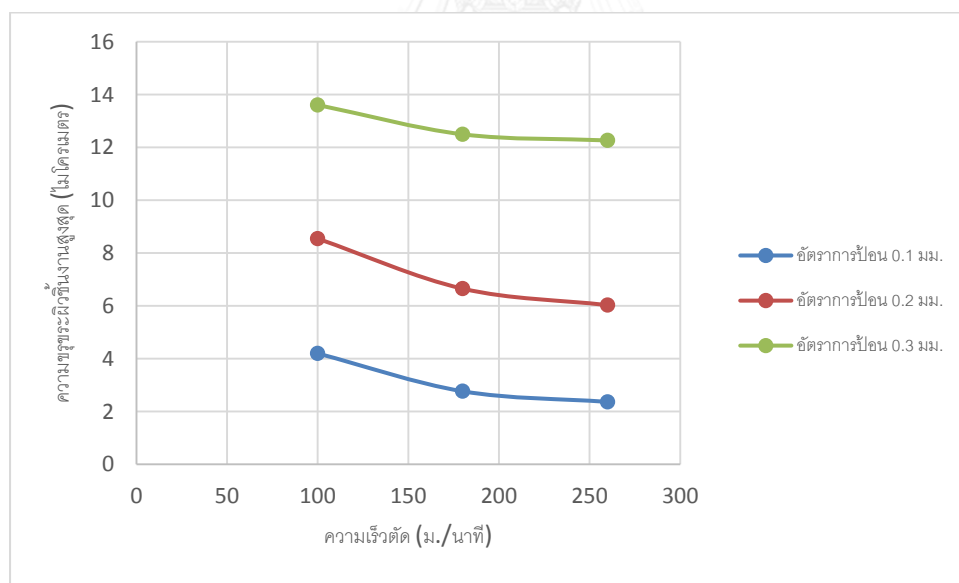
4.5.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (R_a) กับความเร็วตัด (ม./นาที) ในค่าอัตราการป้อนตัดที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (R_a) กับความเร็วตัดในแต่ละค่าที่ 100,180 และ 260 ม./นาที โดยมีอัตราการป้อนตัดที่แตกต่างกัน คือ 0.1 , 0.2, 0.3 มม./รอบ ความลึกตัด 0.5 มม. รัศมีจุกมุกมีด 0.8มม มุมคายเศษโลหะ 11

แสดงให้เห็นถึง ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (Ra) กับความเร็วตัดที่ 100,180 และ 260 ม./นาที โดยมีอัตราการป้อนตัดที่แตกต่างกัน 0.1 , 0.2, 0.3 มม./รอบ โดยมีความลึกตัดรัศมีจุมุมมีด มุมคายโลหะที่เท่ากัน พบว่าที่ความเร็วตัดสูงขึ้นจะให้ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยที่ลดลง หรือความเรียบผิวที่ดีขึ้น เนื่องจากการใช้ความเร็วในการตัดที่สูงส่งผลให้อุณหภูมิในการตัดสูง วัสดุที่มีความอ่อนนุ่ม และการตัดโดยใช้ความเร็วตัดที่สูงนั้นยังทำให้ใช้แรงในการตัดน้อยลง โอกาสที่ชิ้นงานจะเกิดการสั่นสะเทือนต่ำ วัสดุจึงมีความเรียบผิวสูง ในทางกลับกันอัตราการป้อนตัดที่เพิ่ม ส่งผลให้ความขรุขระผิวเฉลี่ยเพิ่มขึ้นในแต่ละความเร็วตัดที่เท่ากัน เนื่องจากตามทฤษฎีของอัตราการป้อนตัด การใช้อัตราการป้อนมากเป็นผลให้ต้องใช้แรงในการตัดที่เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน ส่งผลให้ผิวของวัสดุมีความขรุขระมากขึ้น ดังนั้น การใช้ความเร็วตัดที่มากและอัตราการป้อนที่ต่ำนั้นจะทำให้ได้ผิวของวัสดุที่มีความเรียบผิวที่ดี

4.5.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (Rz) กับความเร็วตัด (ม./นาที) ในค่าอัตราการป้อนตัดที่แตกต่างกัน

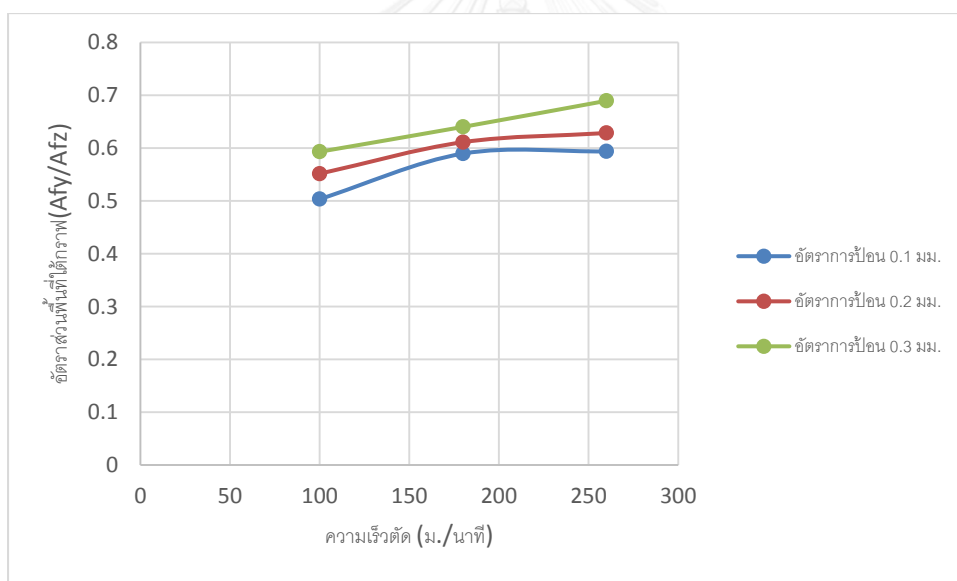


รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (Rz) กับความเร็วตัดในแต่ละค่าที่ 100,180 และ 260 ม./นาที โดยมีอัตราการป้อนตัดที่แตกต่างกัน คือ 0.1, 0.2, 0.3 มม./รอบ ความลึกตัด 0.5 มม. รัศมีจุมุมมีด 0.8 มม มุมคายเศษโลหะ 11

แสดงให้เห็นถึง ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (Rz) กับความเร็วตัดที่ 100,180 และ 260 ม./นาที โดยมีอัตราการป้อนตัดที่แตกต่างกัน คือ 0.1, 0.2, 0.3 มม./รอบ โดย

มีความลึกตัด รัศมีจุมกมิด มุมคายโลหะที่เท่ากัน พบว่าที่ความเร็วตัดสูงขึ้นจะให้ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยที่ลดลงหรือความเรียบผิวที่ดีขึ้น เนื่องจากการใช้ความเร็วในการตัดที่สูงส่งผลให้อุณหภูมิในการตัดสูง ผิววัสดุมีความอ่อนนุ่ม และการตัดโดยใช้ความเร็วตัดที่สูงนั้นยังทำให้ใช้แรงในการตัดน้อยลง โอกาสที่ชิ้นงานจะเกิดการสั่นสะเทือนต่ำ วัสดุจึงมีความเรียบผิวสูง ในทางกลับกัน อัตราการป้อนตัดที่เพิ่ม ส่งผลให้ความขรุขระผิวเฉลี่ยเพิ่มขึ้นในแต่ละความเร็วตัดที่เท่ากัน เนื่องจากตามทฤษฎีของอัตราการป้อนตัด การใช้อัตราการป้อนมากเป็นผลให้ต้องใช้แรงในการตัดที่เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน ส่งผลให้ผิวของวัสดุมีความขรุขระมากขึ้น ดังนั้น การใช้ความเร็วตัดที่มากและอัตราการป้อนที่ต่ำนั้นจะทำให้ได้ผิวของวัสดุที่มีความเรียบผิวที่ดี

4.5.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟของแรงพลวัต (AF_y/AF_z) กับความเร็วตัดในค่าอัตราการป้อนตัดที่แตกต่างกัน

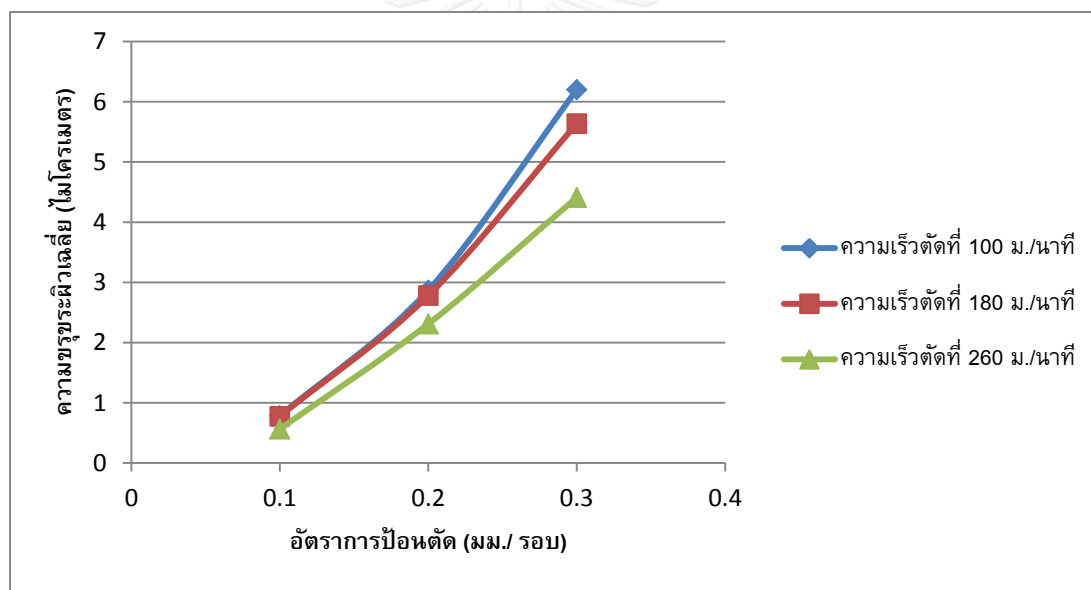


รูปที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟของแรงพลวัต (AF_y/AF_z) กับความเร็วตัดในแต่ละค่าที่ 100, 180 และ 260 ม./นาที โดยมีอัตราการป้อนตัดที่แตกต่างกัน คือ 0.1, 0.2, 0.3 มม./รอบ ความลึกตัด 0.5 มม. รัศมีจุมกมิด 0.8 มม มุมคายโลหะ 11 แสดงให้เห็นถึง ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟของแรงพลวัต (AF_y/AF_z) กับความเร็วตัดที่ 100, 180 และ 260 ม./นาที โดยมีอัตราการป้อนตัดที่แตกต่างกัน คือ 0.1, 0.2, 0.3 มม./รอบ โดยมีความลึกตัด รัศมีจุมกมิด มุมคายโลหะที่เท่ากัน นั้น พบว่าความเร็วตัดที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าของอัตราส่วนแรงพลวัตเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากความเร็วตัดที่มากขึ้นเป็นผลให้แรง

ในแนวแกนตัดหลัก F_z มีค่าต่ำกว่าแรงในแนวแกนป้อนตัด F_y ดังนั้น ค่าอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟแรงพลวัต (AF_y/AF_z) จึงมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่เดียวกันอัตราการป้อนตัดที่เพิ่มขึ้นทำให้อัตราส่วนของแรงพลวัตมีค่าเพิ่มขึ้นในแต่ละความเร็วตัดที่เท่ากัน เนื่องจากพื้นที่ของแรงป้อนตัดมากกว่าพื้นที่ของแรงตัดหลัก โดยที่แรงตัดแปรผันตรงกับพื้นที่ในการตัด ดังนั้น การใช้ความเร็วตัดที่สูงและอัตราการป้อนที่สูงนั้นจะทำให้ได้ค่าอัตราส่วนของแรงพลวัตมาก

4.5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (R_a) ,ความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (R_z) , อัตราส่วนของแรงกับอัตราการป้อนตัด โดยมีค่าความเร็วในการตัดที่แตกต่างกัน

4.5.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (R_a) กับอัตราการป้อนตัด โดยใช้ค่าความเร็วในการตัดที่แตกต่างกัน

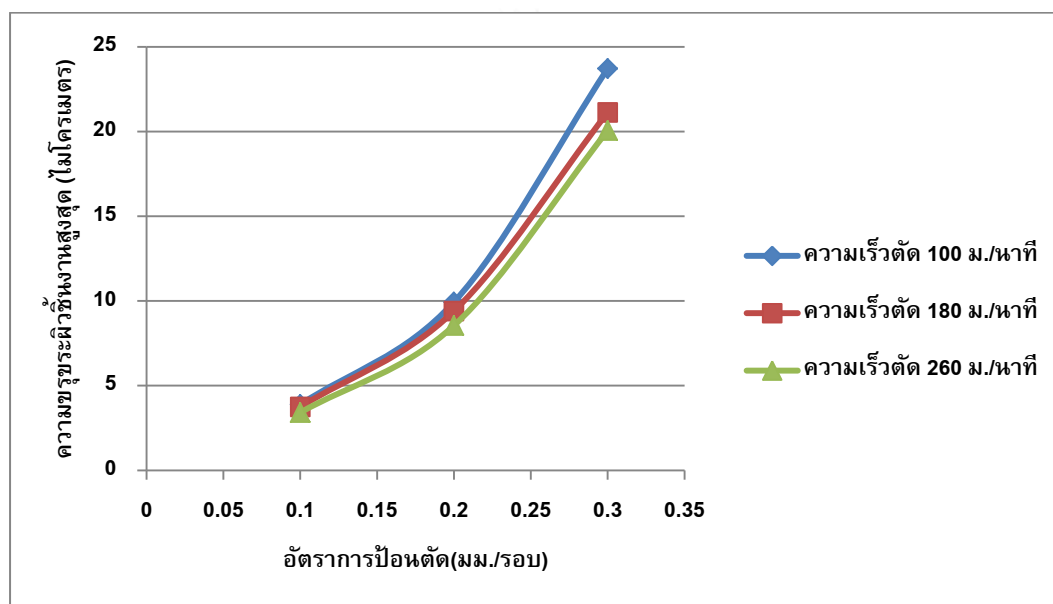


รูปที่ 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (R_a) กับอัตราการป้อนตัดในแต่ละค่าที่ 0.1 , 0.2 , 0.3 มม./รอบ โดยมีค่าความเร็วตัดที่แตกต่างกัน คือ 100 , 180 และ 260 ม./นาที ความลึกตัด 0.8 มม. รัศมีจุมุมมีด 0.4 มม มุมคายเศษโลหะ 11

แสดงให้เห็นถึง ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (R_a) กับอัตราการป้อนตัดที่ 0.1 , 0.2 , 0.3 มม./รอบ โดยมีค่าความเร็วตัดที่แตกต่างกัน คือ 100 , 180 และ 260 ม./นาที โดยมี ความลึกตัด รัศมีจุมุมมีด มุมคายเศษโลหะที่เท่ากัน นั้น พบว่าที่อัตราการป้อนสูงนั้นจะให้ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากตามทฤษฎีของอัตราการป้อนตัด การใช้อัตราการป้อนมากเป็น

ผลให้ต้องใช้แรงในการตัดที่เพิ่มมากขึ้นเช่นกันอันจะส่งผลให้ผิวของวัสดุมีความขรุขระมากขึ้น และความเร็วตัดที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้เกิดความขรุขระผิวเฉลี่ยที่ลดลงในแต่ละอัตราการป้อนที่เท่ากัน เนื่องจากการใช้ความเร็วในการตัดที่สูงส่งผลให้อุณหภูมิในการตัดจึงสูงขึ้นส่งผลให้ผิววัสดุอ่อนนุ่มและการตัดโดยใช้ความเร็วตัดที่สูงนั้นเป็นผลให้ใช้แรงในการตัดน้อยลงทำให้โอกาสที่ชิ้นงานจะเกิดการสั่นสะเทือนต่ำจึงทำให้วัสดุมีความเรียบผิวสูง ดังนั้น การใช้อัตราการป้อนที่ต่ำนั้นและความเร็วตัดที่สูงจะทำให้ได้ผิวของวัสดุที่มีความเรียบผิวมากขึ้น

4.5.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (R_z) กับอัตราการป้อนตัด โดยใช้ค่าความเร็วในการตัดที่แตกต่างกัน

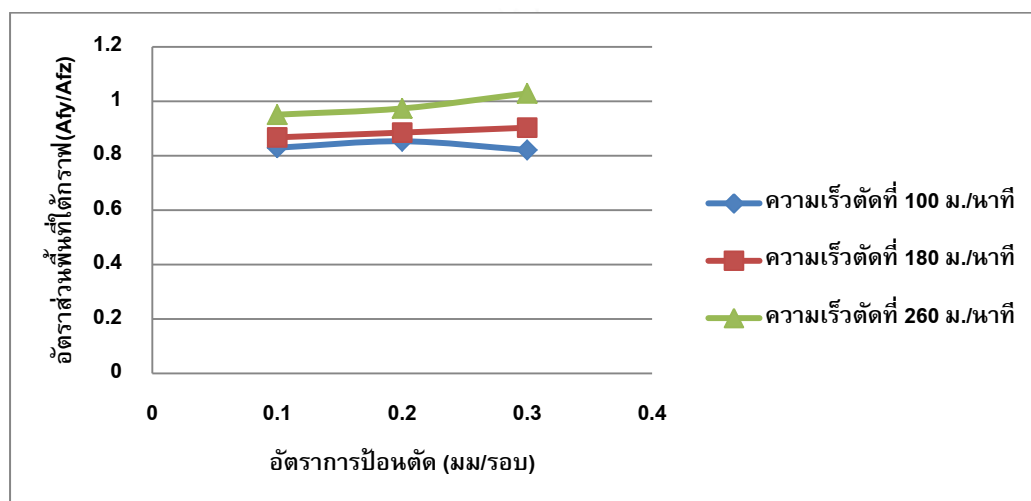


รูปที่ 4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (R_z) กับอัตราการป้อนตัดในแต่ละค่าที่ 0.1 , 0.2 , 0.3 มม./รอบ โดยมีค่าความเร็วตัดที่แตกต่างกัน คือ 100 , 180 และ 260 ม./นาที โดยมีความลึกตัด 0.8 มม. รัศมีจมูกมีด 0.4 มม มุมคายเศษโลหะ 11

แสดงให้เห็นถึง ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (R_z) กับอัตราการป้อนตัด 0.1 , 0.2 , 0.3 มม./รอบ โดยมีค่าความเร็วตัดที่แตกต่างกัน คือ 100 , 180 และ 260 ม./นาที โดยมีความลึกตัด รัศมีจมูกมีด มุมคายเศษโลหะที่เท่ากัน นั้น พบว่าที่อัตราการป้อนสูงนั้นจะให้ค่าความขรุขระผิวสูงสุดที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากตามทฤษฎีของอัตราการป้อนตัด การใช้อัตราการป้อนมากเป็นผลให้ต้องใช้แรงในการตัดที่เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน อันจะส่งผลให้ผิวของวัสดุมีความขรุขระมากขึ้น

และความเร็วตัดที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้เกิดความขรุขระผิวสูงสุดลดลงในแต่ละอัตราการป้อนที่เท่ากัน เนื่องจากการใช้ความเร็วในการตัดที่สูงส่งผลให้อุณหภูมิในการตัดจึงสูงขึ้นส่งผลให้ผิววัสดุอ่อนนุ่มและการตัดโดยใช้ความเร็วตัดที่สูงนั้นเป็นผลให้ใช้แรงในการตัดน้อยลงทำให้โอกาสที่ชิ้นงานจะเกิดการสั่นสะเทือนต่ำจึงทำให้วัสดุมีความเรียบผิวสูง ดังนั้น การใช้อัตราการป้อนที่ต่ำนั้นและความเร็วตัดที่สูงจะทำให้ได้ผิวของวัสดุที่มีความเรียบผิวมากขึ้น

4.5.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟ (AFy/AFz) กับอัตราการป้อนตัด โดยใช้ค่าความเร็วในการตัดที่แตกต่างกัน



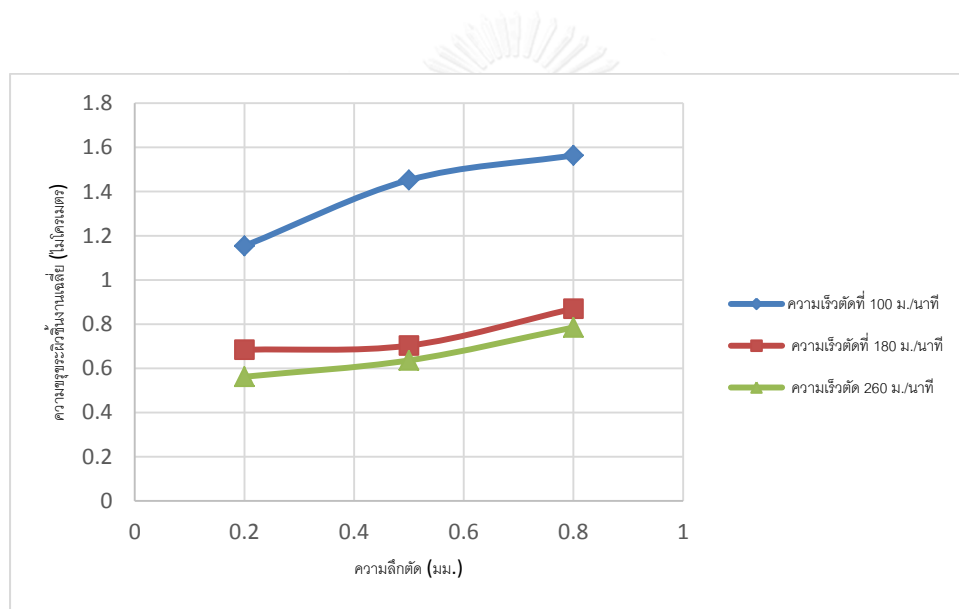
รูปที่ 4.47 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟ (AFy/AFz) กับอัตราการป้อนตัดในแต่ละค่าที่ 0.1 , 0.2 , 0.3 มม./รอบโดยมีค่าความเร็วตัดที่แตกต่างกัน คือ 100 , 180 และ 260 ม./นาที โดยมีความลึกตัด 0.8 มม. รัศมีจุมุกมีด 0.4 มม มุมคายเศษโลหะ 11

แสดงให้เห็นถึง ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟ (AFy/AFz)กับอัตราการป้อนตัดที่ 0.1 , 0.2 , 0.3 มม./รอบ โดยมีค่าความเร็วตัดที่แตกต่างกัน คือ 100 , 180 และ 260 ม./นาที โดยมีความลึกตัด รัศมีจุมุกมีด มุมคายเศษโลหะที่เท่ากัน นั้น พบว่าที่อัตราการป้อนตัดที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้อัตราส่วนแรงเพิ่มขึ้น เนื่องจากพื้นที่ของแรงป้อนตัด AFyมากกว่าพื้นที่ของแรงตัดหลัก AFz โดยที่แรงตัดแปรผันตรงกับพื้นที่ในการตัด ความเร็วที่เพิ่มขึ้นจะให้ค่าของอัตราส่วนแรงเพิ่มขึ้น

ตาม และความเร็วตัดที่มากขึ้นส่งผลให้อัตราส่วนแรงเพิ่มขึ้น ที่อัตราการป้อนเท่ากัน เนื่องจากแรงในแนวแกนตัดหลัก F_z มีค่าต่ำกว่าแรงในแนวแกนป้อนตัด F_y ทำให้ค่าอัตราส่วนของแรง (AF_y/AF_z) มีค่าเพิ่มมากขึ้น ดังนั้น การใช้อัตราการป้อนที่สูงและความเร็วตัดที่สูงนั้นจะทำให้ได้ค่าอัตราส่วนของแรงสูงขึ้น

4.5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (R_a) ,ความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (R_z) , อัตราส่วนของแรงกับความลึกตัด โดยมีค่าความเร็วในการตัดที่แตกต่างกัน

4.5.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (R_a) กับความลึกตัด โดยใช้ค่าความเร็วในการตัดที่แตกต่างกัน

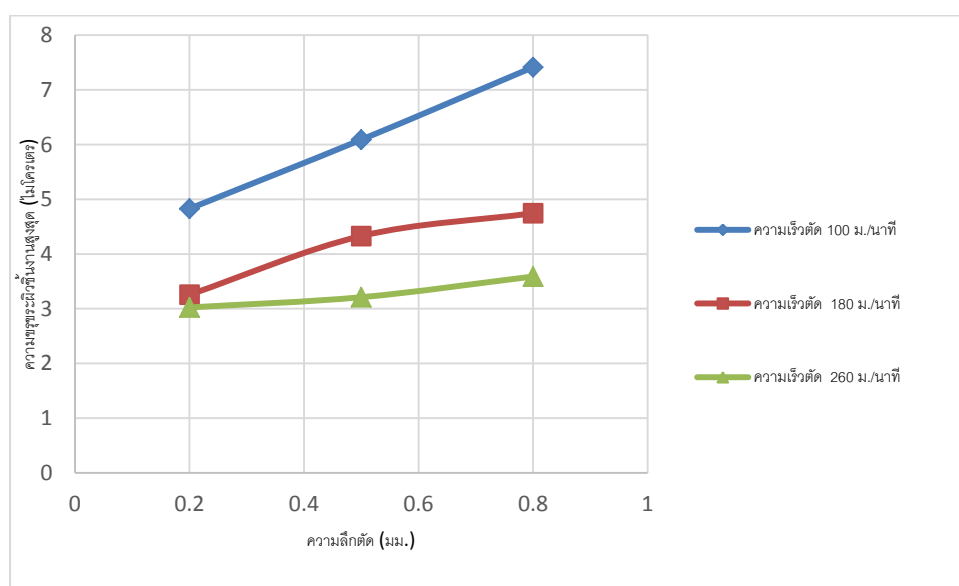


รูปที่ 4.48 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (R_a) กับความลึกตัดในแต่ละค่าที่ 0.1 , 0.5 และ 0.8 มม. โดยมีค่าความเร็วตัดที่แตกต่างกัน คือ 100 , 180 และ 260 ม./นาที อัตราการป้อน 0.1 ม./นาที รัศมีจุมุมมีด 0.4 มม มุมคายเศษโลหะ 11

แสดงให้เห็นถึง ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (R_a) กับความลึกตัดในแต่ละค่าที่ 0.1 , 0.5 และ 0.8 มม. โดยมีค่าความเร็วตัดที่แตกต่างกัน คือ 100 , 180 และ 260 ม./นาที โดยมีอัตราการป้อน รัศมีจุมุมมีด มุมคายเศษโลหะที่เท่ากัน นั้น พบว่าที่ค่าความลึกตัดที่สูงขึ้นนั้นจะให้ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากความลึกตัดที่เพิ่มมากขึ้นทำให้พื้นที่ในการตัดรวมถึงใช้แรงในการตัดที่มากขึ้น ก่อให้เกิดโอกาสในการสั่นสะเทือนในกระบวนการตัดสูงทำให้ความขรุขระของผิวชิ้นงานมากขึ้น และความเร็วตัดที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้เกิดความขรุขระผิวเฉลี่ยที่

ลดลงในแต่ละความลึกตัดที่เท่ากัน เนื่องจากการใช้ความเร็วในการตัดที่สูงส่งผลให้อุณหภูมิในการตัดจึงสูงขึ้นส่งผลให้ผิววัสดุอ่อนนุ่มและการตัดโดยใช้ความเร็วตัดที่สูงนั้นเป็นผลให้ใช้แรงในการตัดน้อยลงทำให้โอกาสที่ชิ้นงานจะเกิดการสั่นสะเทือนต่ำจึงทำให้วัสดุมีความเรียบผิวสูง ดังนั้น การใช้ความลึกตัดที่ต่ำและความเร็วตัดที่สูงจะทำให้ได้ผิวของวัสดุที่มีความเรียบผิวมากขึ้น

4.5.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (Rz) กับความลึกตัด โดยใช้ค่าความเร็วในการตัดที่แตกต่างกัน

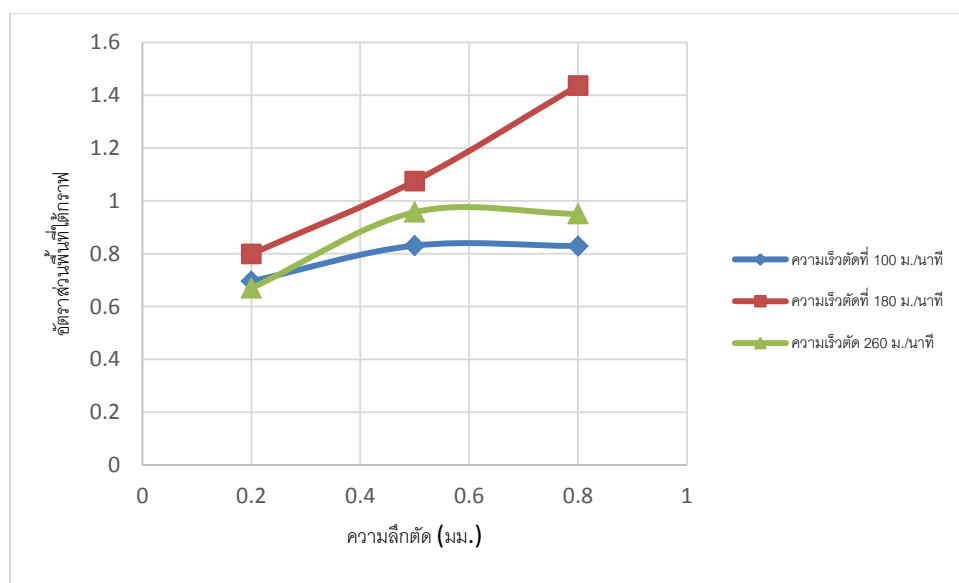


รูปที่ 4.49 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (Rz) กับความลึกตัดที่ 0.1 0.5 และ 0.8 มม. โดยมีค่าความเร็วตัด 100, 180, 260 ม./นาที อัตราการป้อน 0.1 ม./นาที รัศมีงูมมิต 0.4 มม มุมคายเศษโลหะ 11

แสดงให้เห็นถึง ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (Rz) กับความลึกตัดในแต่ละค่าที่ 0.1 ,0.5 และ 0.8 มม. โดยมีค่าความเร็วตัดที่แตกต่างกัน คือ 100 , 180 และ 260 ม./นาที โดยมีอัตราการป้อน รัศมีงูมมิต มุมคายเศษโลหะที่เท่ากัน นั้น พบว่าที่ค่าความลึกตัดที่สูงขึ้นนั้นจะให้ค่าความขรุขระผิวสูงสุดเพิ่มขึ้น เนื่องจากความลึกตัดที่เพิ่มมากขึ้นทำให้พื้นที่ในการตัดรวมถึงใช้แรงในการตัดที่มากขึ้น ก่อให้เกิดโอกาสในการสั่นสะเทือนในกระบวนการตัดสูงทำให้ความขรุขระของผิวชิ้นงานมากขึ้น และความเร็วตัดที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้เกิดความขรุขระผิวสูงสุดที่ลดลงในแต่ละความลึกตัดที่เท่ากัน เนื่องจากการใช้ความเร็วในการตัดที่สูงส่งผลให้อุณหภูมิในการตัดจึงสูงขึ้นส่งผลให้ผิววัสดุอ่อนนุ่มและการตัดโดยใช้ความเร็วตัดที่สูงนั้นเป็นผลให้ใช้แรงใน

การตัดน้อยลงทำให้โอกาสที่ชิ้นงานจะเกิดการสั่นสะเทือนต่ำจึงทำให้วัสดุมีความเรียบผิวสูง ดังนั้น การใช้ความลึกตัดที่ต่ำและความเร็วตัดที่สูงจะทำให้ได้ผิวของวัสดุที่มีความเรียบผิวมากขึ้น

4.5.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟ (AFy/AFz) กับความลึกตัด โดยใช้ค่าความเร็วในการตัดที่แตกต่างกัน

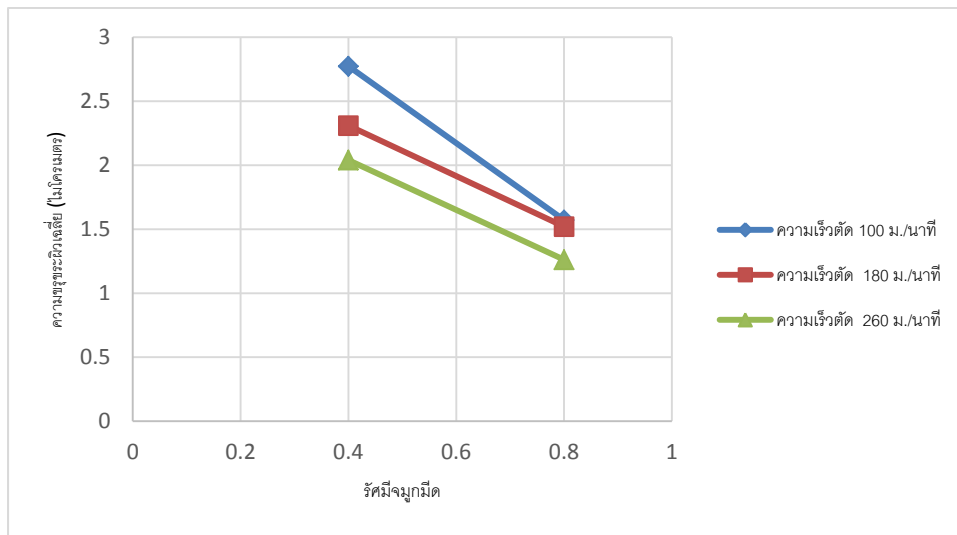


รูปที่ 4.50 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟ (AFy/AFz) กับความลึกตัดที่ 0.1 0.5 และ 0.8 มม. โดยมีค่าความเร็วตัด 100, 180, 260 ม./นาที อัตราการป้อน 0.1 ม./นาที รัศมีจุมุมมีด 0.4 มม มุมคายเศษโลหะ 11

แสดงให้เห็นถึง ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟ (AFy/AFz) กับความลึกตัดในแต่ละค่าที่ 0.1 ,0.5 และ 0.8 มม. โดยมีค่าความเร็วตัดที่แตกต่างกัน คือ 100 , 180 และ 260 ม./นาที โดยมีอัตราการป้อน รัศมีจุมุมมีด มุมคายเศษโลหะที่เท่ากัน นั้น พบว่าที่ค่าความลึกตัดที่สูงขึ้นนั้นจะให้ค่าอัตราส่วนของแรงที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากความลึกตัดที่เพิ่มขึ้น ใช้พื้นที่ในการตัดมากขึ้นส่งผลให้ต้องใช้แรงป้อนตัด Fy ที่มากขึ้น จึงทำให้อัตราส่วนของแรงมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน และความเร็วตัดที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าอัตราส่วนของแรงที่เพิ่มขึ้นในแต่ละความลึกตัดที่เท่ากัน เนื่องจากแรงในแนวแกนตัดหลัก Fz มีค่าต่ำกว่าแรงในแนวแกนป้อนตัด Fy ทำให้ค่าอัตราส่วนของแรง (AFy/AFz) มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้น การใช้ความลึกตัดสูงและความเร็วตัดสูงจะทำให้ค่าอัตราส่วนแรงสูงขึ้น

4.5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (Ra) ,ความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (Rz) , อัตราส่วนของแรงกับรัศมีจุมูกมีด โดยมีค่าความเร็วในการตัดที่แตกต่างกัน

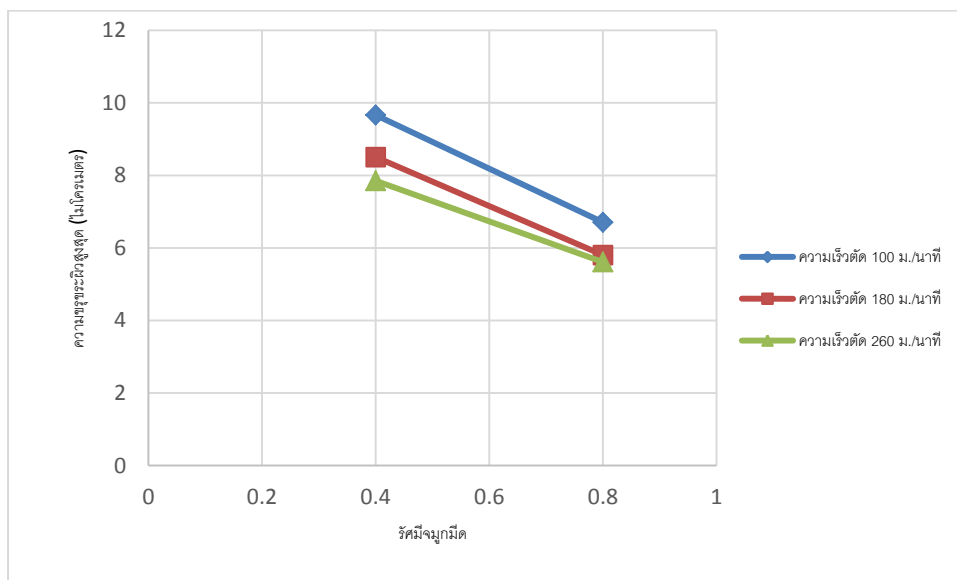
4.5.4.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (Ra) กับรัศมีจุมูกมีด โดยใช้ค่าความเร็วในการตัดที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.51 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (Ra) กับรัศมีจุมูกมีดที่ 0.4 และ 0.8 มม. โดยมีค่าความเร็วตัดที่ 100, 180, 260 ม./นาที อัตราการป้อน 0.2 ม./นาที ความลึกตัด 0.2 mm. มุมคายเศษโลหะ 11

แสดงให้เห็นถึง ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (Ra) กับรัศมีจุมูกมีดที่ 0.4 และ 0.8 มม. โดยมีค่าความเร็วตัดที่แตกต่างกัน คือ 100 , 180 และ 260 ม./นาที โดยมีอัตราการป้อน ความลึกตัด มุมคายเศษโลหะที่เท่ากัน พบว่าที่ค่ารัศมีจุมูกมีดที่ต่ำนั้นจะให้ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากรัศมีจุมูกมีดที่มากจะช่วยลดรอยป้อนตัดส่งผลให้ความขรุขระผิวดลดลงตาม ทฤษฎี และความเร็วตัดที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้เกิดความขรุขระผิวเฉลี่ยที่ลดลงในแต่ละรัศมีจุมูกมีด ที่เท่ากัน เนื่องจากการใช้ความเร็วในการตัดที่สูงส่งผลให้อุณหภูมิในการตัดจึงสูงขึ้นส่งผลให้ผิว วัสดุอ่อนนุ่มและการตัดโดยใช้ความเร็วตัดที่สูงนั้นเป็นผลให้ใช้แรงในการตัดน้อยลงทำให้โอกาสที่ ชิ้นงานจะเกิดการสั่นสะเทือนต่ำจึงทำให้วัสดุมีความเรียบผิวสูง ดังนั้น การใช้รัศมีจุมูกมีดที่สูงและ ความเร็วตัดที่สูงจะทำให้ได้ผิวของวัสดุที่มีความเรียบผิวมากขึ้น

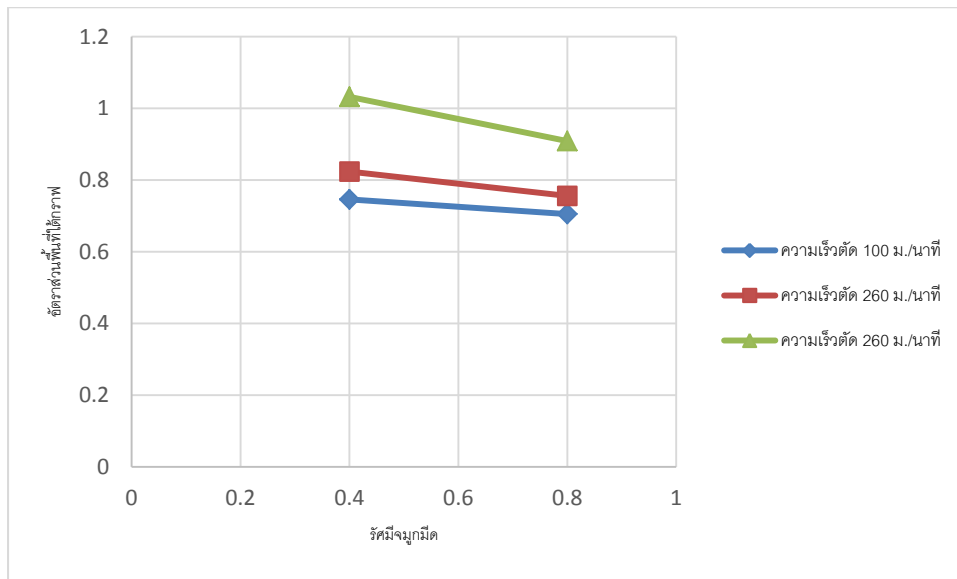
4.5.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (Rz) กับรัศมีจุมูกมีด โดยใช้ค่าความเร็วในการตัดที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.52 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (Rz) กับรัศมีจุมูกมีดที่ 0.4 และ 0.8 มม. โดยมีค่าความเร็วตัดที่ 100, 180, 260 ม./นาที อัตราการป้อน 0.2 ม./นาที ความลึกตัด 0.2 mm. มุมคายเศษโลหะ 11

แสดงให้เห็นถึง ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (Rz) กับรัศมีจุมูกมีดที่ 0.4 และ 0.8 มม. โดยมีค่าความเร็วตัดที่แตกต่างกัน คือ 100 , 180 และ 260 ม./นาที โดยมีอัตราการป้อน ความลึกตัด มุมคายเศษโลหะที่เท่ากัน พบว่าที่ค่ารัศมีจุมูกมีดที่ต่ำนั้นจะให้ค่าความขรุขระผิวสูงสุดที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากรัศมีจุมูกมีดที่มากจะช่วยบรอบยป้อนตัดส่งผลให้ความขรุขระผิวลดลงตาม ทฤษฎี และความเร็วตัดที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้เกิดความขรุขระผิวสูงสุดที่ลดลงในแต่ละรัศมีจุมูกมีดที่เท่ากัน เนื่องจากการใช้ความเร็วในการตัดที่สูงส่งผลให้อุณหภูมิในการตัดจึงสูงขึ้นส่งผลให้ผิววัสดุอ่อนนุ่มและการตัดโดยใช้ความเร็วตัดที่สูงนั้นเป็นผลให้ใช้แรงในการตัดน้อยลงทำให้โอกาสที่ชิ้นงานจะเกิดการสั่นสะเทือนต่ำจึงทำให้วัสดุมีความเรียบผิวสูง ดังนั้น การใช้รัศมีจุมูกมีดที่สูงและ ความเร็วตัดที่สูงจะทำให้ได้ผิวของวัสดุที่มีความเรียบผิวมากขึ้น

4.5.4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟ (AFy/AFz) กับรัศมีจุมูกมีด โดยใช้ค่าความเร็วในการตัดที่แตกต่างกัน

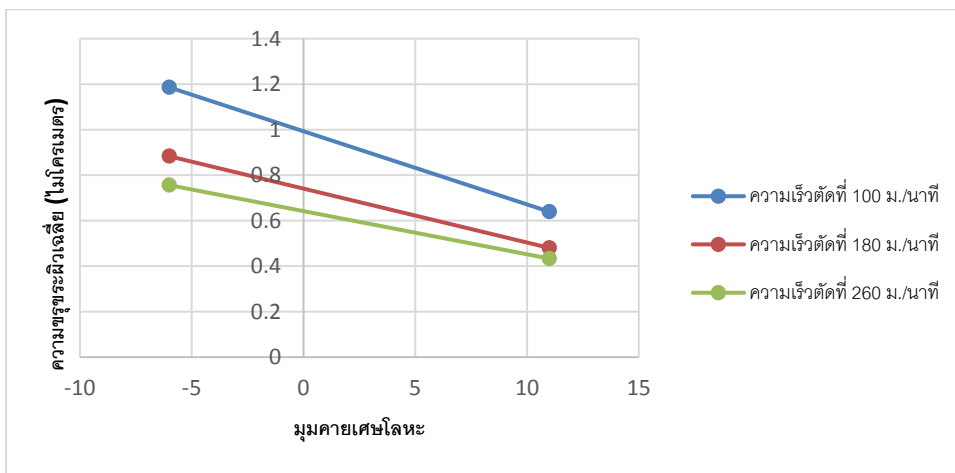


รูปที่ 4.53 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟ (AFy/AFz) กับรัศมีจุ่มกมิตที่ 0.4 และ 0.8 มม. โดยมีค่าความเร็วตัดที่ 100, 180, 260 ม./นาที อัตราการป้อน 0.2 ม./นาที ความลึกตัด 0.2 mm. มุมคายเศษโลหะ 11

แสดงให้เห็นถึง ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟ (AFy/AFz) กับรัศมีจุ่มกมิตที่ 0.4 และ 0.8 มม. โดยมีค่าความเร็วตัดที่แตกต่างกัน คือ 100 , 180 และ 260 ม./นาที โดยมีอัตราการป้อน ความลึกตัด มุมคายเศษโลหะที่เท่ากัน พบว่าที่ค่ารัศมีจุ่มกมิตที่สูงนั้นจะให้ค่าอัตราส่วนแรงลดลง เนื่องจากรัศมีจุ่มกมิตเพิ่มขึ้นทำให้เพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างมีดตัดและชิ้นงานมากขึ้นส่งผลให้แรงตัดหลัก Fz เพิ่มขึ้น ดังนั้นอัตราส่วนแรง AFy/AFz จึงมีค่าลดลง และความเร็วตัดที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่าอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟเพิ่มขึ้นในแต่ละรัศมีจุ่มกมิตที่เท่ากัน เนื่องจากแรงในแนวแกนตัดหลัก Fz มีค่าต่ำกว่าแรงในแนวแกนป้อนตัด Fy ทำให้ค่าอัตราส่วนของแรง (AFy/AFz) มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้น การใช้รัศมีจุ่มกมิตที่ต่ำและความเร็วตัดที่สูงจะทำให้อัตราส่วนพื้นที่ของแรงมีค่าเพิ่มขึ้น

4.5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (Ra) ,ความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (Rz) , อัตราส่วนของแรงกับมุมคายเศษโลหะ โดยมีค่าความเร็วในการตัดที่แตกต่างกัน

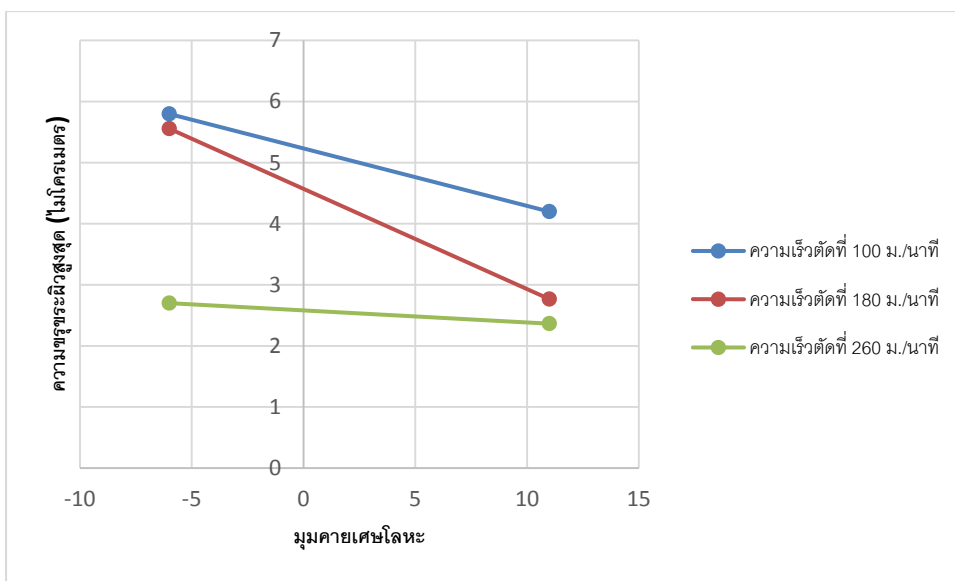
4.5.5.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (Ra) กับมุมคายเศษโลหะโดยใช้ค่าความเร็วในการตัดที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.54 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (R_a) กับมุมคายเศษโลหะ ที่ -6 และ 11 องศา โดยมีค่าความเร็วตัดที่ 100, 180, 260 ม./นาที และอัตราการป้อน 0.1 ม./นาที ความลึกตัด 0.5 มม. รัศมีจุมกมีด 0.8

แสดงให้เห็นถึง ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (R_a) กับมุมคายเศษโลหะ ที่ -6 และ 11 องศา โดยมีค่าความเร็วตัดที่แตกต่างกัน คือ 100, 180, 260 ม./นาที โดยมีอัตราการป้อน ความลึกตัด รัศมีจุมกมีดที่เท่ากัน พบว่าที่มุมคายโลหะที่ต่ำนั้นจะให้ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากมุมคายเศษโลหะมากทำให้ความต้านทานการเคลื่อนที่ของมีดตัดลดลง จึงใช้แรงตัดที่ต่ำให้ความเรียบผิวที่ดีขึ้น ในทางกลับกันการใช้มุมคายโลหะต่ำจะทำให้เกิดความต้านทานการเคลื่อนที่สูง ใช้แรงในการตัดมาก จึงทำให้ผิวชิ้นงานมีความขรุขระสูง และความเร็วตัดที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้เกิดความขรุขระผิวเฉลี่ยที่ลดลงในแต่ละมุมคายโลหะที่เท่ากัน เนื่องจากการใช้ความเร็วในการตัดที่สูงส่งผลให้อุณหภูมิในการตัดจึงสูงขึ้นส่งผลให้ผิววัสดุอ่อนนุ่มและการตัดโดยใช้ความเร็วตัดที่สูงนั้นเป็นผลให้ใช้แรงในการตัดน้อยลงทำให้โอกาสที่ชิ้นงานจะเกิดการสั่นสะเทือนต่ำจึงทำให้วัสดุมีความเรียบผิวสูง ดังนั้น การใช้มุมคายโลหะที่สูงและความเร็วตัดที่สูงจะทำให้ได้ผิวของวัสดุที่มีความเรียบผิวมากขึ้น

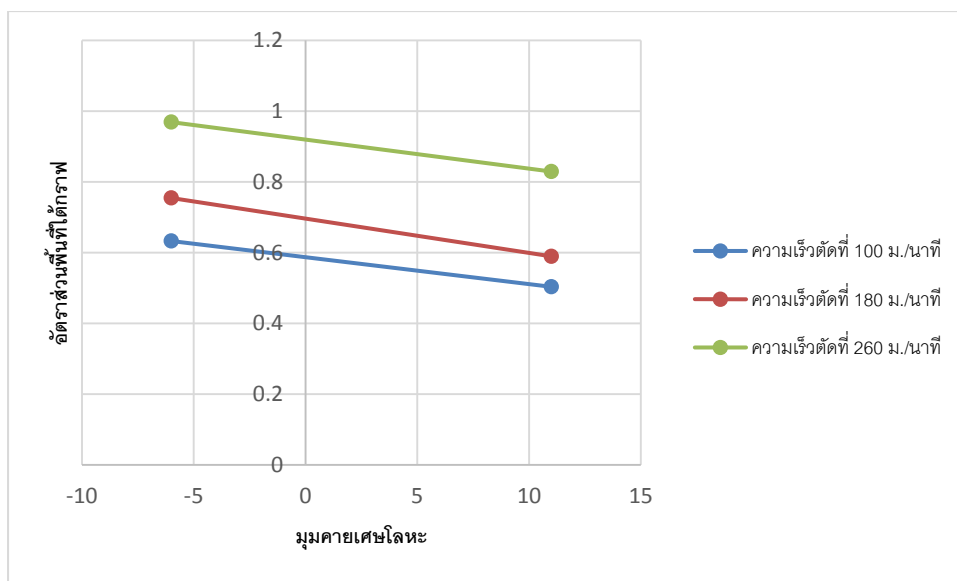
4.5.5.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (R_z) กับมุมคายเศษโลหะโดยใช้ค่าความเร็วในการตัดที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.55 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (Rz) กับมุมคายเศษโลหะ ที่ -6 และ 11 องศา โดยมีค่าความเร็วตัดที่ 100, 180, 260 ม./นาที และอัตราการป้อน 0.1 ม./นาที ความลึกตัด 0.5 มม. รัศมีจุมุมมีด 0.8

แสดงให้เห็นถึง ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (Rz) กับมุมคายเศษโลหะ ที่ -6 และ 11 องศา โดยมีค่าความเร็วตัดที่แตกต่างกัน คือ 100, 180, 260 ม./นาที โดยมีอัตราการป้อน ความลึกตัด รัศมีจุมุมมีดที่เท่ากัน พบว่าที่มุมคายโลหะที่ต่ำนั้นจะให้ค่าความขรุขระผิวสูงสุดเพิ่มขึ้น เนื่องจากมุมคายเศษโลหะมากทำให้ความต้านทานการเคลื่อนที่ของมีดตัดลดลง จึงใช้แรงตัดที่ต่ำให้ความเรียบผิวที่ดีขึ้น ในทางกลับกันการใช้มุมคายโลหะต่ำจะทำให้เกิดความต้านทานการเคลื่อนที่สูง ใช้แรงในการตัดมาก จึงทำให้ผิวชิ้นงานมีความขรุขระสูง และความเร็วตัดที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้เกิดความขรุขระผิวสูงสุดลดลงในแต่ละมุมคายโลหะที่เท่ากัน เนื่องจากการใช้ความเร็วในการตัดที่สูงส่งผลให้อุณหภูมิในการตัดจึงสูงขึ้นส่งผลให้ผิววัสดุอ่อนนุ่มและการตัดโดยใช้ความเร็วตัดที่สูงนั้นเป็นผลให้ใช้แรงในการตัดน้อยลงทำให้โอกาสที่ชิ้นงานจะเกิดการสั่นสะเทือนต่ำจึงทำให้วัสดุมีความเรียบผิวสูง ดังนั้น การใช้มุมคายโลหะที่สูงและความเร็วตัดที่สูงจะทำให้ได้ผิวของวัสดุที่มีความเรียบผิวมากขึ้น

4.5.5.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟ (AFy/AFz) กับมุมคายเศษโลหะ โดยใช้ค่าความเร็วในการตัดที่แตกต่างกัน



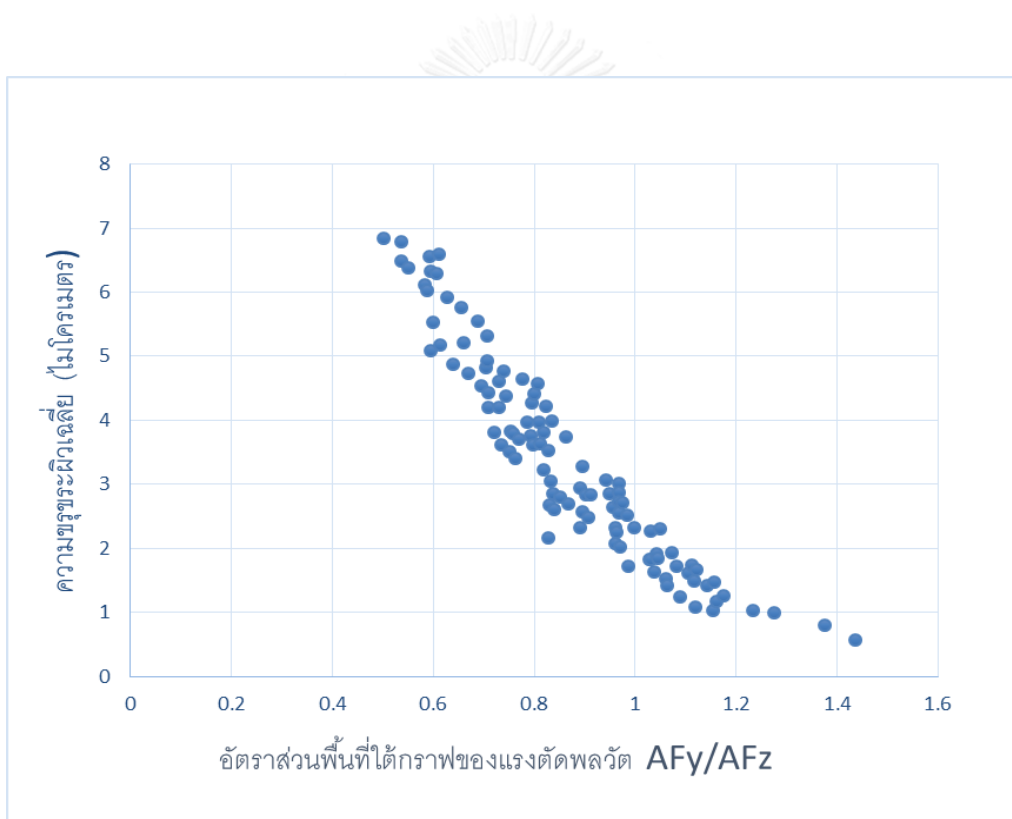
รูปที่ 4.56 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพื้นที่ใต้กราฟ (AFy/AFz) กับมุมคายเศษโลหะ ที่ -6 และ 11 องศา โดยมีค่าความเร็วตัดที่ 100, 180, 260 ม./นาที และอัตราการป้อน 0.1 ม./นาที ความลึกตัด 0.5 มม. รัศมีจุมกมีด 0.8

แสดงให้เห็นถึง ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพื้นที่ใต้กราฟ (AFy/AFz) กับมุมคายเศษโลหะ ที่ -6 และ 11 องศา โดยมีค่าความเร็วตัดที่แตกต่างกัน คือ 100, 180, 260 ม./นาที โดยมีอัตราการป้อน ความลึกตัด รัศมีจุมกมีดที่เท่ากัน พบว่าที่มุมคายเศษโลหะที่ต่ำนั้นจะให้ค่าอัตราส่วนแรงที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากมุมคายเศษโลหะต่ำทำให้เกิดความต้านทานการเคลื่อนที่ของมีดตัดมาก ต้องใช้แรงในการตัดมาก ส่งผลให้อัตราส่วนแรง (AFy/AFz) มากขึ้น และความเร็วตัดที่เพิ่มมากขึ้นจะให้ค่าอัตราส่วนแรงที่เพิ่มขึ้น ในแต่ละมุมคายเศษโลหะที่เท่ากัน เนื่องจากแรงในแนวแกนตัดหลัก Fz มีค่าต่ำกว่าแรงในแนวแกนป้อนตัด Fy ทำให้ค่าอัตราส่วนของแรง (AFy/AFz) มีค่าเพิ่มขึ้นดังนั้น การใช้มุมคายเศษโลหะที่ต่ำและความเร็วตัดที่สูงจะทำให้ค่าอัตราส่วนพื้นที่ของแรงมีค่าเพิ่มขึ้น

4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขรุขระผิวชิ้นงานและอัตราส่วนพื้นที่ใต้กราฟของแรงตัดพลวัตในโดเมนเวลา

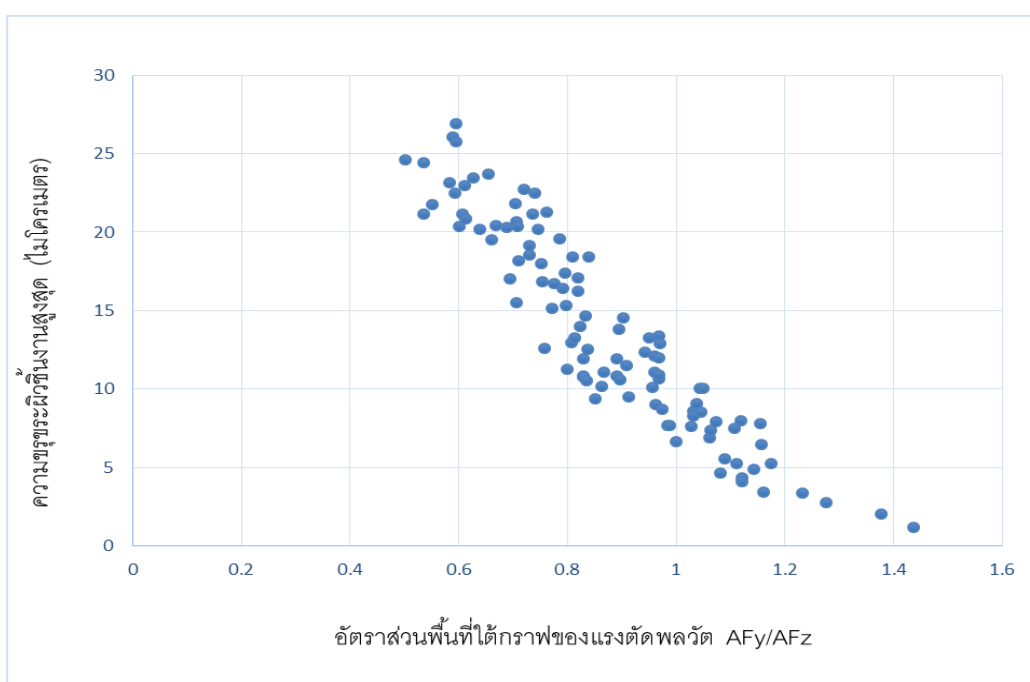
จากการทดลองที่ผ่านมาการการประยุกต์ใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal rule) ในการหาอัตราส่วนพื้นที่ที่แรงตัดพลวัตสามารถนำเงื่อนไขการตัดที่ให้เศษโลหะทั้งเป็นแบบต่อเนื่องได้เท่านั้น แต่ไม่สามารถนำเงื่อนไขการตัดที่ให้เศษโลหะแบบแตกหักมาพิจารณาได้ เนื่องจากสัญญาณของแรงตัดพลวัตที่ถูกตรวจจับไม่สามารถระบุได้ว่าสัญญาณแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นนั้น เป็นสัญญาณ

ของการแตกหักของเศษโลหะหรือสัญญาณของแรงพลวัตที่ใช้ในการตัด ดังนั้นจึงไม่สามารถนำเงื่อนไขการตัดที่ให้เศษโลหะแบบแตกหักมาคำนวณค่าอัตราส่วนพื้นที่แรงตัดพลวัตได้ งานวิจัยนี้ได้พัฒนาขึ้นโดยนำวิธีการแปลงเวฟเลทมาประยุกต์ใช้เพื่อแยกสัญญาณของการแตกหักของเศษโลหะหรือสัญญาณของแรงพลวัตที่ใช้ในการตัด ดังนั้น อัตราส่วนพื้นที่แรงตัด (AFy/AFz) จึงสามารถอธิบายความขรุขระผิวได้ทั้งเงื่อนไขการตัดที่ให้เศษโลหะแบบต่อเนื่องและแบบแตกหักอย่างแม่นยำในทุกกรณี โดยเมื่ออัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟแรงตัดพลวัตที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความขรุขระผิวชิ้นงานมีค่าลดลง เนื่องจาก แรงตัดหลักพลวัต (Fz) ได้รับอิทธิพลมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแรงป้อนตัดพลวัต (Fy) ดังนั้นอัตราส่วนแรงตัดจึงมีค่าลดลง



รูปที่ 4.57 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ยและอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟของแรงตัดพลวัต (AFy/AFz)

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ยและอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟของแรงตัดพลวัต (AFy/AFz) พบว่าเมื่ออัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟของแรงตัดพลวัต (AFy/AFz) มีค่าเพิ่มขึ้นความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ยจะมีค่าลดลง เนื่องจากเมื่ออัตราส่วนแรงเพิ่มขึ้น แรงตัดหลัก (AFz) มีค่าเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าแรงป้อนตัด (AFy) ซึ่งแรงป้อนตัดส่งผลกระทบต่อความขรุขระผิวเฉลี่ยมากที่สุด ดังนั้นเมื่ออัตราส่วนแรงป้อนตัดน้อยลงส่งผลให้ความขรุขระเฉลี่ยผิวมีแนวโน้มลดลงตามไปด้วย



รูปที่ 4.58 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุดและอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟของแรงตัดพลวัต (AFy/AFz)

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุดและอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟของแรงตัดพลวัต (AFy/AFz) พบว่าเมื่ออัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟของแรงตัดพลวัต (AFy/AFz) มีค่าเพิ่มขึ้นความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุดจะมีค่าลดลง เนื่องจากเมื่ออัตราส่วนแรงเพิ่มขึ้น แรงตัดหลักพลวัต (Fz) มีค่าเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าแรงป้อนตัดพลวัต (Fy) ซึ่งแรงป้อนตัดส่งผลกระทบต่อความขรุขระผิวสูงสุดมากที่สุด ดังนั้นเมื่ออัตราส่วนแรงป้อนตัดน้อยลงส่งผลให้ความขรุขระสูงสุดผิวมีแนวโน้มลดลงตามไปด้วย

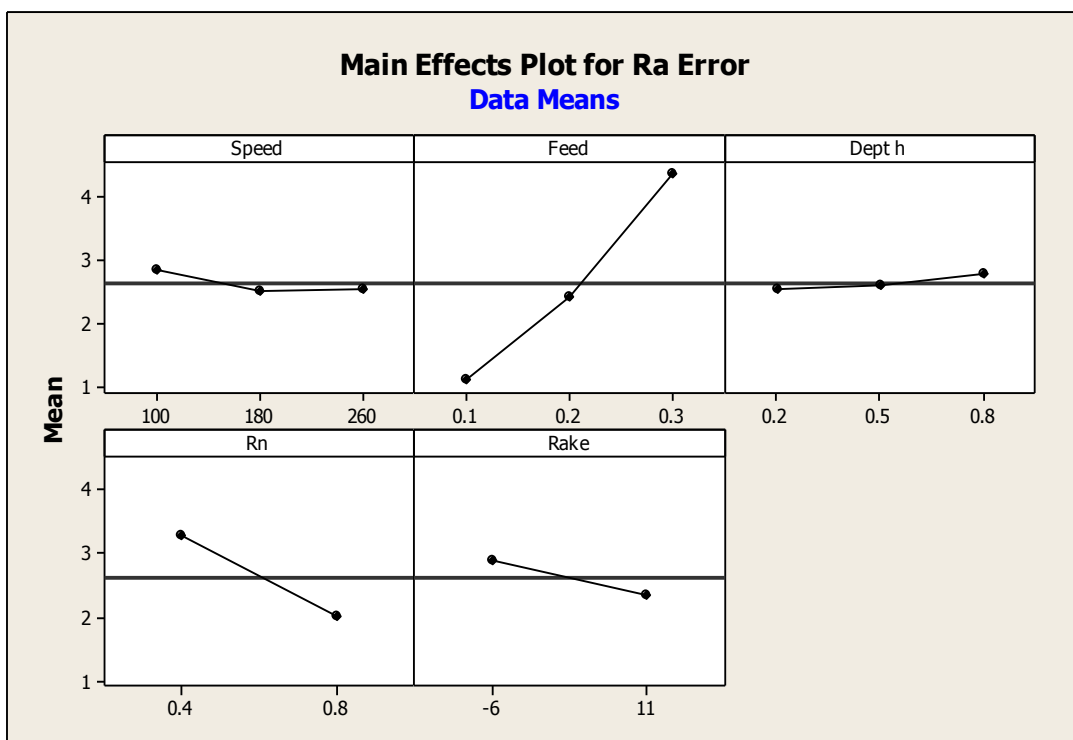
4.7 การวิเคราะห์ผลการทดลอง



รูปที่ 4.59 กราฟแสดงอันตรกิริยาระหว่างความขรุขระผิวเฉลี่ยและปัจจัยต่างๆในการทดลอง กราฟแสดงอันตรกิริยาแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวเฉลี่ยและปัจจัยต่างๆในการทดลอง หากเส้นกราฟเกิดจุดตัดกันสามารถบ่งชี้ว่าแต่ละปัจจัยมีอันตรกิริยาต่อกัน แต่หากเส้นกราฟไม่มีจุดตัดซึ่งกันและกันสามารถบ่งชี้ว่าแต่ละปัจจัยนั้นไม่มีอันตรกิริยาต่อกัน โดยจากรูป 4.59 แสดงให้เห็นว่าความขรุขระผิวเฉลี่ยที่เกิดในแต่ละความเร็วตัดมีค่าที่แตกต่างกันในแต่ละระดับปัจจัยต่างๆ โดยความเร็วตัดมีอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ อัตราการป้อน ความลึกตัด รัศมีจุมุมมีด และมุมคายเศษโลหะ



รูปที่ 4.60 กราฟแสดงอันตรกิริยาระหว่างความขรุขระผิวสูงสุดและปัจจัยต่างๆในการทดลอง
กราฟแสดงอันตรกิริยาแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวสูงสุดและปัจจัยต่างๆในการทดลอง หากเส้นกราฟเกิดจุดตัดกันสามารถชี้บ่งว่าแต่ละปัจจัยมีอันตรกิริยาต่อกัน แต่หากเส้นกราฟไม่มีจุดตัดซึ่งกันและกันสามารถชี้บ่งว่าแต่ละปัจจัยนั้นไม่มีอันตรกิริยาต่อกัน โดยจากรูป 4.60 แสดงให้เห็นว่าความขรุขระผิวสูงสุดที่เกิดในแต่ละความเร็วตัดมีค่าที่แตกต่างกันในแต่ละระดับปัจจัยต่างๆ โดยความเร็วตัดมีอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ อัตราการป้อน ความลึกตัด รัศมีจุมุมมีด และมุมคายเศษโลหะ



รูปที่ 4.61 ปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อผลหลักของความขรุขระผิวเฉลี่ยและปัจจัยในการทดลอง จากการวิเคราะห์ปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อความขรุขระผิวเฉลี่ยและปัจจัยในการทดลอง สามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

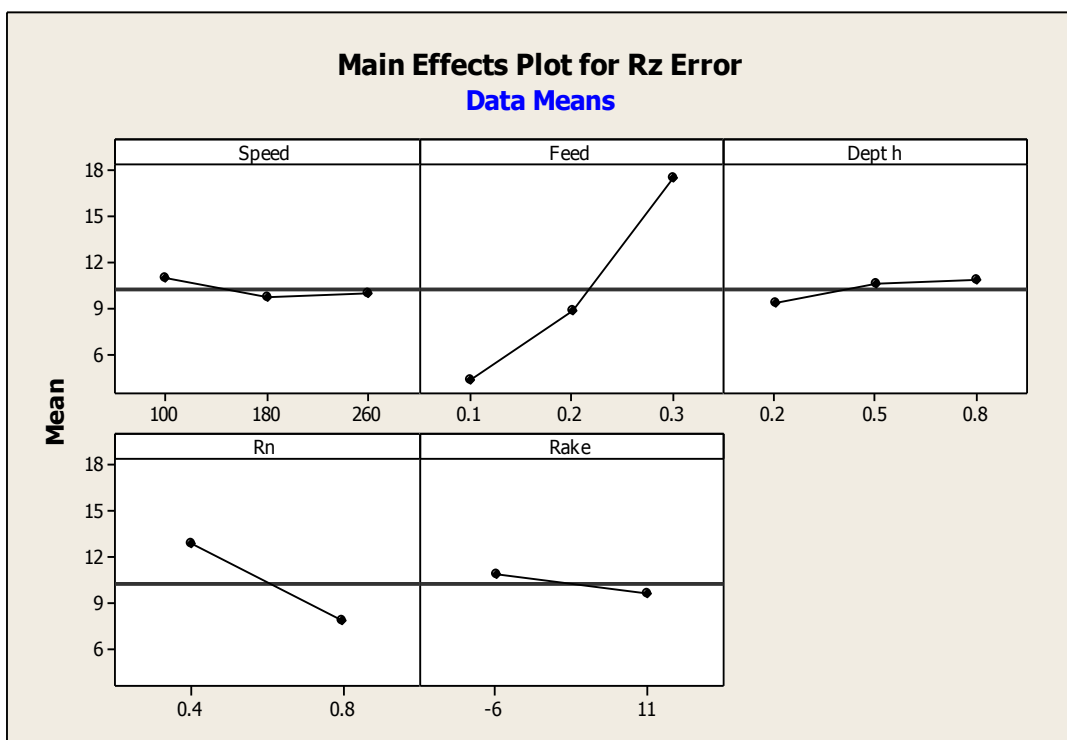
ความเร็วตัดที่เพิ่มขึ้นทำให้ความขรุขระผิวเฉลี่ยมีค่าลดลง เนื่องจากความเร็วตัดที่เพิ่มขึ้นนั้นทำให้ อุณหภูมิการตัดสูง วัสดุอ่อนนุ่ม ใช้แรงตัดน้อยลง ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยต่ำ

อัตราการป้อนตัดที่เพิ่มขึ้นทำให้ความขรุขระผิวเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากการเพิ่ม อัตราการป้อนตัด ส่งผลให้ใช้พื้นที่การตัดเพิ่ม ใช้แรงในการตัดเพิ่ม ส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือน ขณะตัด ความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ยจึงมีค่าเพิ่มขึ้น

ความลึกตัดที่เพิ่มขึ้นทำให้ความขรุขระผิวเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากการเพิ่มความลึก ตัดทำให้ใช้พื้นที่ในการตัดเพิ่ม ใช้แรงในการตัดเพิ่ม ส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนขณะตัด ความ ขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ยจึงมีค่าเพิ่มขึ้น

รัศมีจุมูกมิดที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความขรุขระผิวเฉลี่ยมีค่าลดลง เนื่องจากการเพิ่มขนาดรัศมีจุมูกมิด จะทำให้ใช้พื้นที่การตัดน้อยลง ใช้แรงตัดต่ำ ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยต่ำ

มุมคายเศษโลหะเพิ่มขึ้น จะทำให้ความขรุขระผิวเฉลี่ยมีค่าลดลง เนื่องจากมุมคายเศษโลหะที่เพิ่มขึ้นจะช่วยลดการต้านทานการเคลื่อนที่ของเศษโลหะ ใช้แรงในการตัดต่ำ ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยต่ำ



รูปที่ 4.62 ปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อผลหลักของความขรุขระผิวสูงสุดและปัจจัยในการทดลอง จากการวิเคราะห์ปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อความขรุขระผิวสูงสุดและปัจจัยในการทดลอง สามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

ความเร็วตัดที่เพิ่มขึ้นทำให้ความขรุขระผิวสูงสุดมีค่าลดลง เนื่องจากความเร็วตัดที่เพิ่มขึ้นนั้นทำให้อุณหภูมิการตัดสูง วัสดุอ่อนนุ่ม ใช้แรงตัดน้อยลง ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวสูงสุดต่ำ อัตราการป้อนตัดที่เพิ่มขึ้นทำให้ความขรุขระผิวสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากการเพิ่มอัตราการป้อนตัด ส่งผลให้ใช้พื้นที่การตัดเพิ่ม ใช้แรงในการตัดเพิ่ม ส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนขณะตัด ความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุดจึงมีค่าเพิ่มขึ้น

ความลึกตัดที่เพิ่มขึ้นทำให้ความขรุขระผิวสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากการเพิ่มความลึกตัดทำให้ใช้พื้นที่ในการตัดเพิ่ม ใช้แรงในการตัดเพิ่ม ส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนขณะตัด ความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุดจึงมีค่าเพิ่มขึ้น

รัศมีจุมกมีดที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความขรุขระผิวสูงสุดมีค่าลดลง เนื่องจากการเพิ่มขนาดรัศมีจุมกมีดจะทำให้ใช้พื้นที่การตัดน้อยลง ใช้แรงตัดต่ำ ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวสูงสุดต่ำ

มุมคายเศษโลหะเพิ่มขึ้น จะทำให้ความขรุขระผิวสูงสุดมีค่าลดลง เนื่องจากมุมคายเศษโลหะที่เพิ่มขึ้นจะช่วยลดการต้านทานการเคลื่อนที่ของเศษโลหะ ใช้แรงในการตัดต่ำ ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวสูงสุดต่ำ

4.7.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) โดยการทดสอบข้อมูลและวิเคราะห์ผลการทดลองของความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (R_a) และความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (R_z) กำหนดสมมติฐานให้ข้อมูลผิดพลาดแบบสุ่ม เป็นตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงปกติ และเป็นอิสระด้วยค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และมีความแปรปรวนที่มีค่าคงตัวแต่ไม่ทราบค่า โดยทำการทดสอบตามลำดับดังนี้

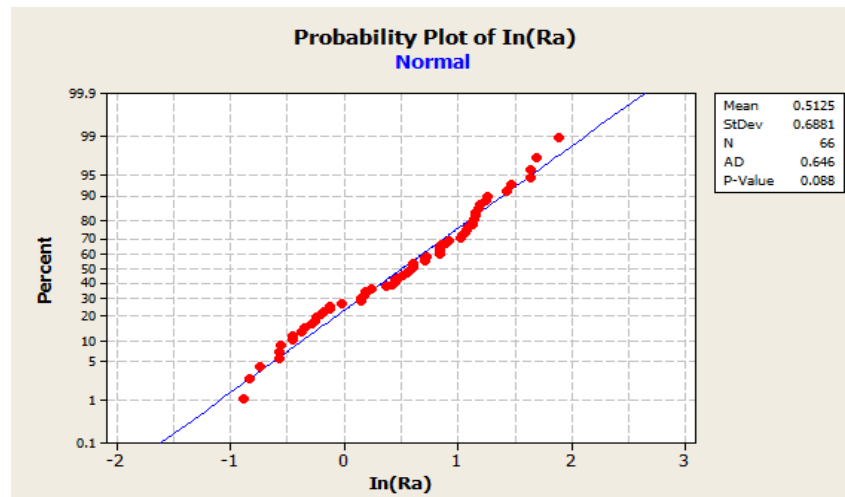
- 1) การทดสอบการกระจายแบบปกติ
- 2) การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล
- 3) การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวน

4.7.2 การทดสอบการกระจายแบบปกติ

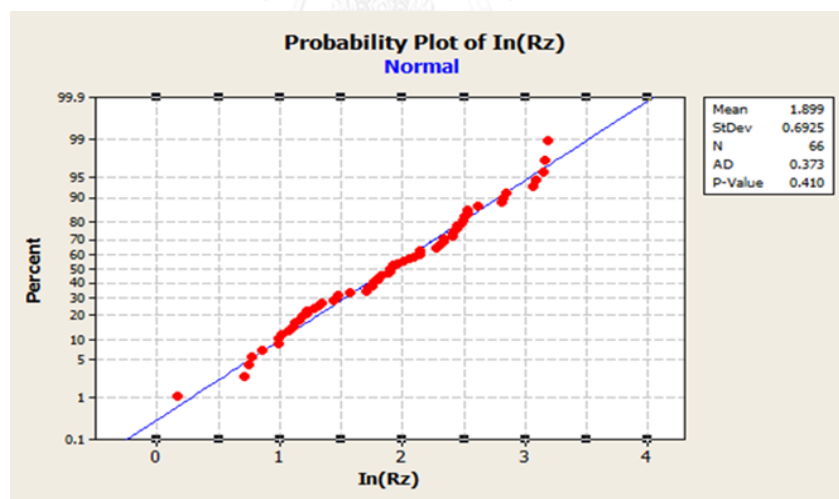
การทดสอบการกระจายตัวแบบปกติ Normal Probability Plot ของค่าความคลาดเคลื่อน (Residual) โดยตั้งสมมติฐานการตรวจสอบ ดังนี้

H_0 : ข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ

H_a : ข้อมูลไม่มีการกระจายตัว



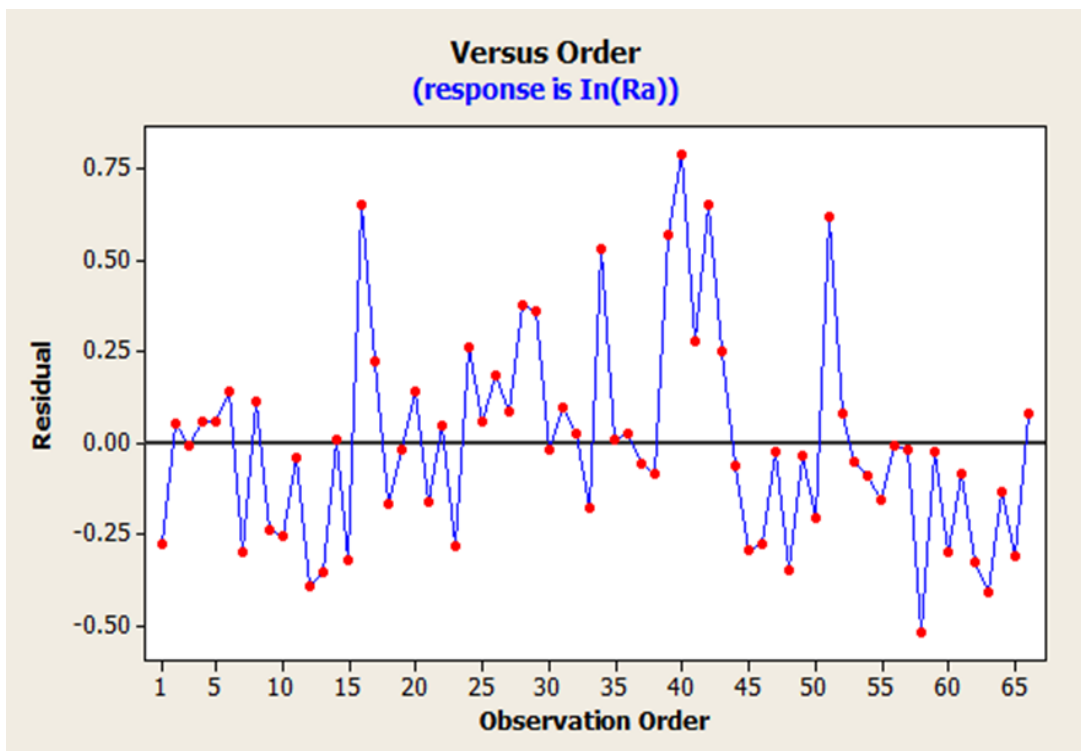
รูปที่ 4.63 Normal Probability Plot ของข้อมูลความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra) จากการทดสอบการกระจายแบบปกติของค่าคลาดเคลื่อน (Residual) ของความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra) พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น มีแนวโน้มเป็นเส้นตรง และมีค่า P-value เท่ากับ 0.088 โดยกำหนดให้ยอมรับความผิดพลาดที่ 5 % ($\alpha=0.05$) ดังนั้นเมื่อ $P\text{-Value} > \alpha$ จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ สรุปได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงเป็นแบบปกติ



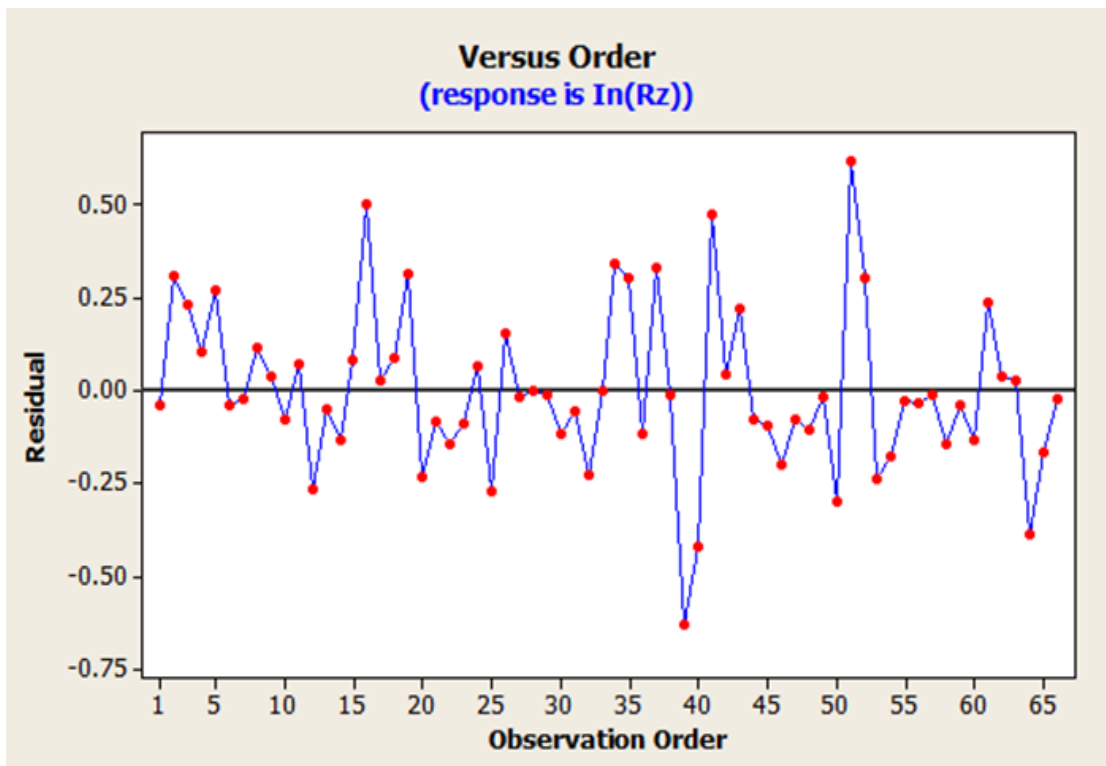
รูปที่ 4.64 Normal Probability Plot ของข้อมูลความขรุขระผิวสูงสุด (Rz) การทดสอบการกระจายแบบปกติของค่าคลาดเคลื่อน (Residual) ของความขรุขระผิวสูงสุด (Rz) พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง และมีค่า P-value เท่ากับ 0.410 โดยกำหนดให้ยอมรับความผิดพลาดที่ 5 % ($\alpha=0.05$) ดังนั้นเมื่อ $P\text{-Value} > \alpha$ จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ สรุปได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงเป็นแบบปกติ

4.7.3 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลได้แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนกับลำดับข้อมูลของความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (R_a) และความขรุขระผิวสูงสุด (R_z) ได้พบว่าค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนั้น มีลักษณะกระจายกันอยู่รอบศูนย์ และไม่เป็นวัฏจักร เพราะฉะนั้นสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้มีความเป็นอิสระต่อกัน



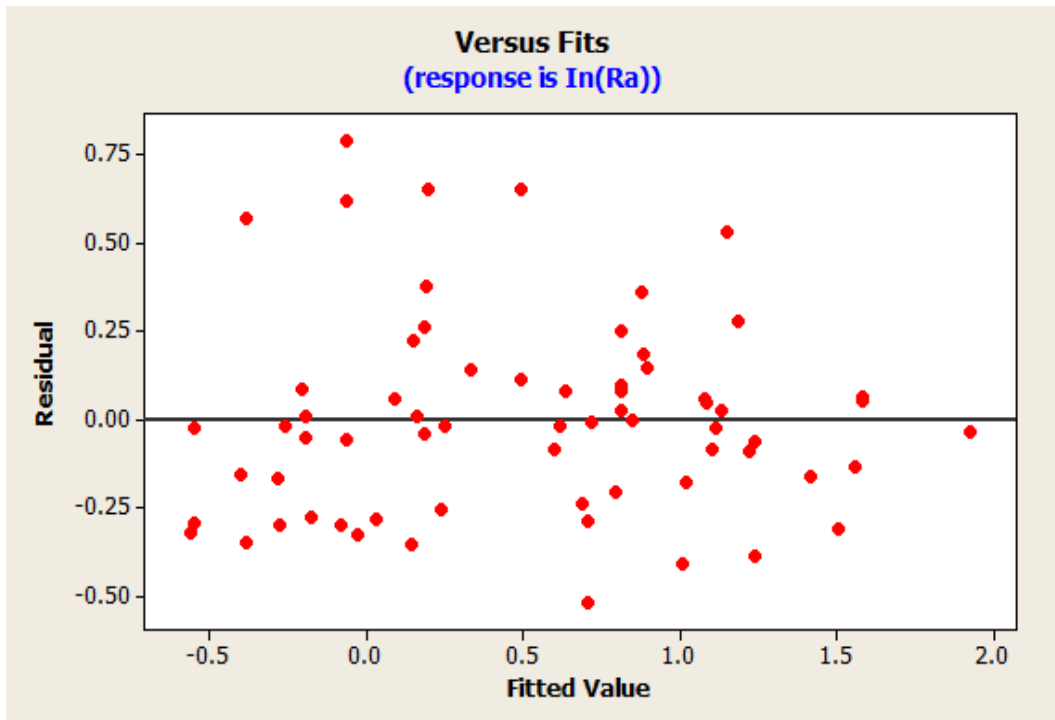
จากรูปที่ 4.65 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนกับลำดับข้อมูลของความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (R_a) ได้พบว่าค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนั้น มีลักษณะกระจายกันอยู่รอบศูนย์ และไม่เป็นวัฏจักร เพราะฉะนั้นสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้มีความเป็นอิสระต่อกัน



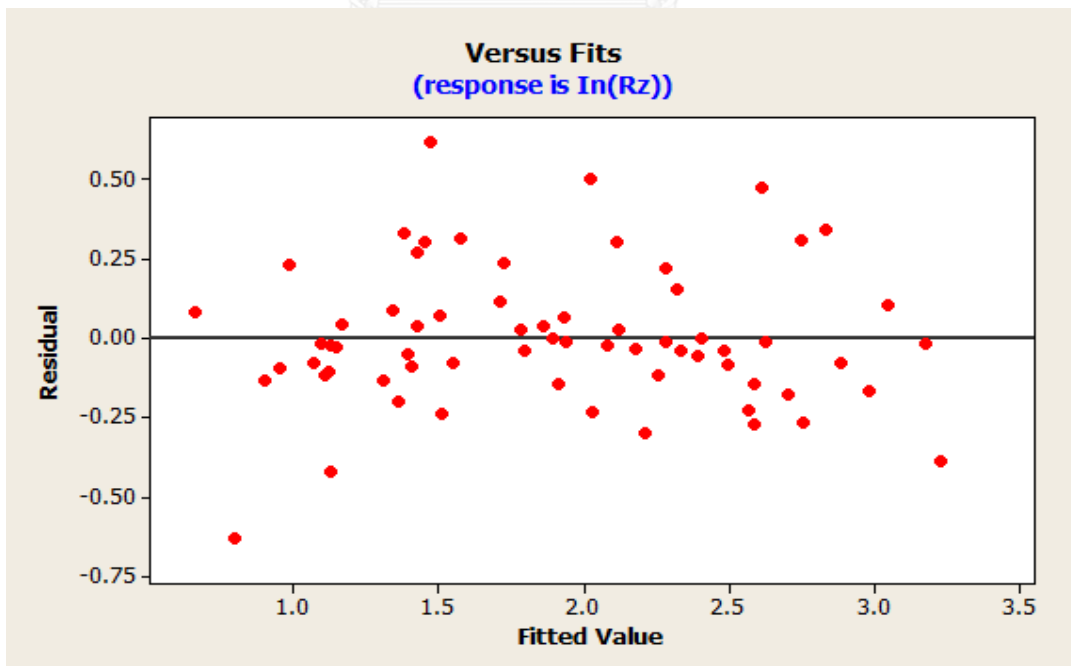
จากรูปที่ 4.66 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนกับลำดับข้อมูลของความขรุขระผิวสูงสุด (Rz) ได้พบว่าคุณค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนั้น มีลักษณะกระจายกันอยู่รอบศูนย์ และไม่ เป็นวัฏจักร เพราะฉะนั้นสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้มีความเป็นอิสระต่อกัน

4.7.4 การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวน

การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (Ra) และความขรุขระผิวสูงสุด (Rz) โดยการตรวจสอบความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของข้อมูล พบว่าคุณค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลมีการกระจายตัวอยู่รอบศูนย์ ไม่มีลักษณะเป็นรูปแบบใดแบบหนึ่ง ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าความแปรปรวนของชุดข้อมูลมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง



จากรูปที่ 4.67 การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (R_a) โดยการตรวจสอบความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของข้อมูล พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลมีการกระจายตัวอยู่รอบศูนย์ ไม่มีลักษณะเป็นรูปแบบใดแบบหนึ่ง ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าความแปรปรวนของชุดข้อมูลมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง



จากรูปที่ 4.68 การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนความขรุขระผิวสูงสุด (R_z) โดยการตรวจสอบความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของข้อมูล พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลมี

การกระจายตัวอยู่รอบศูนย์ ไม่มีลักษณะเป็นรูปแบบใดแบบหนึ่ง ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าความแปรปรวนของชุดข้อมูลมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง

4.8 สมการทำนายความชรุขระของผิวชิ้นงาน

จากการทดลองตัดกลึงชิ้นงานตามเงื่อนไขต่างๆในตารางที่ 4.1 โดยมีปัจจัยเกี่ยวข้องซึ่งได้แก่ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมุมมีด มุมคายเศษโลหะ และอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟแรงตัดพลวัต โดยนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองนั้นมาพิจารณาด้วยกระบวนการวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุคูณ (Multiple linear regression analysis) เพื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการทำนายความชรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ยและสมการทำนายความชรุขระผิวชิ้นงานสูงสุดได้ดังสมการ 4.1 และ 4.2

สมการทำนายความชรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย

$$\ln R_a = 3.90 - 0.411 \ln V + 0.209 \ln f + 1.05 \ln D - 0.510 \ln R_n - 0.0188 \gamma - 6.44 \ln \left(\frac{AF_y}{AF_z} \right) \quad (4.1)$$

สมการทำนายความชรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด

$$\ln R_z = 6.06 - 0.359 \ln V + 1.30 \ln f + 0.312 \ln D - 0.709 \ln R_n - 0.0143 \gamma - 0.571 \ln \left(\frac{AF_y}{AF_z} \right) \quad (4.2)$$

โดยที่

R_a คือ ความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (ไมโครเมตร)

R_z คือ ความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุดเฉลี่ย (ไมโครเมตร)

V คือ ความเร็วตัดชิ้นงาน (เมตรต่อนาที)

f คือ อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)

D คือ ค่าความลึกตัด (มิลลิเมตร)

R_n คือ ค่ารัศมีจุกมิด (มิลลิเมตร)

γ คือ ค่ามุมคายเศษโลหะ (องศา)

$\frac{AF_y}{AF_z}$ คือ อัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟระหว่างแรงป้อนตัดพลวัตและแรงตัดหลักพลวัต

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.8.1 การทดสอบสัมประสิทธิ์การถดถอยทีละตัว

เป็นการทดสอบตัวแปรอิสระในสมการ ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุกมิด มุมคายเศษโลหะ และอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟ ซึ่งสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของความขรุขระผิวของชิ้นงานหรือไม่ ตามสมมติฐานดังต่อไปนี้

$$H_0 : \beta_j = 0$$

$$H_1 : \beta_j \neq 0$$

The regression equation is

$$\ln(Ra) = 3.90 - 0.411 \ln(\text{Speed}) + 0.209 \ln(\text{Feed}) + 1.05 \ln(\text{Depth}) \\ - 0.510 \ln(Rn) - 0.0188 \text{ Rake} - 6.44 \ln(\text{Afy}/\text{Afz})$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	3.8957	0.5987	6.51	0.000
ln(Speed)	-0.41134	0.09294	-4.43	0.000
ln(Feed)	0.20922	0.06657	3.14	0.003
ln(Depth)	1.04727	0.09564	10.95	0.000
ln(Rn)	-0.5103	0.1105	-4.62	0.000
Rake	-0.018777	0.004565	-4.11	0.000
ln(Afy/Afz)	-6.443	2.724	-2.37	0.021

S = 0.292020 R-Sq = 83.7% R-Sq(adj) = 82.0%

รูปที่ 4.69 การทดสอบสัมประสิทธิ์การถดถอยทีละตัวสำหรับความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย Ra พบว่าค่า P-Value ของตัวแปรอิสระทุกตัวมีค่าน้อยกว่า α โดยกำหนดให้ยอมรับความผิดพลาดได้ที่ 5% ($\alpha = 0.05$) จึงทำการปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าตัวแปรอิสระทุกตัวในสมการใช้ทำนายค่าความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ยได้อย่างมีนัยสำคัญ

The regression equation is

$$\ln(Rz) = 6.06 - 0.359 \ln(\text{Speed}) + 1.30 \ln(\text{Feed}) + 0.312 \ln(\text{Depth}) - 0.709 \ln(\text{Rn}) - 0.0143 \text{ Rake} - 0.571 \ln(\text{Afy}/\text{Afz})$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	6.0622	0.3963	15.30	0.000
ln(Speed)	-0.35928	0.07266	-4.94	0.000
ln(Feed)	1.30370	0.06403	20.36	0.000
ln(Depth)	0.31157	0.05843	5.33	0.000
ln(Rn)	-0.70860	0.08826	-8.03	0.000
Rake	-0.014277	0.003692	-3.87	0.000
ln(Afy/Afz) 2	-0.5711	0.2373	-2.41	0.019

S = 0.231810 R-Sq = 89.8% R-Sq(adj) = 88.8%

รูปที่ 4.70 การทดสอบสัมประสิทธิ์การถดถอยที่ละตัวสำหรับความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย Rz พบว่าค่า P-Value ของตัวแปรอิสระทุกตัวมีค่าน้อยกว่า α โดยกำหนดให้ยอมรับความผิดพลาดได้ที่ 5% ($\alpha = 0.05$) จึงทำการปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าตัวแปรอิสระทุกตัวในสมการใช้ทำนายค่าความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุดได้อย่างมีนัยสำคัญ

จากตารางการแสดงผลการทดสอบสัมประสิทธิ์การถดถอยที่ละตัวของความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ยและความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุดพบว่าสัมประสิทธิ์การถดถอยค่าบวกและค่าลบนั้น สามารถอธิบายความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นได้ โดยค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่เป็นเครื่องหมายบวกจะแสดงถึงความสัมพันธ์แบบแปรผันตรง และค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่เป็นเครื่องหมายลบจะแสดงถึงความสัมพันธ์แบบแปรผกผัน รวมถึงขนาดของค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยในสมการสามารถอธิบายผลต่อความขรุขระผิวได้ดังต่อไปนี้

ความเร็วตัด มีค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยเป็นลบ แสดงให้เห็นว่าเมื่อความเร็วตัดเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานมีแนวโน้มที่ลดลง เนื่องจากการใช้ความเร็วในการตัดที่สูงส่งผลให้อุณหภูมิในการตัดจึงสูงขึ้นส่งผลให้ผิววัสดุอ่อนนุ่มและการตัดโดยใช้ความเร็วตัดที่สูงนั้นเป็นผลให้ใช้แรงในการตัดน้อยลงทำให้โอกาสที่ชิ้นงานจะเกิดการสั่นสะเทือนต่ำจึงทำให้วัสดุมีความเรียบผิวสูง

อัตราป้อนตัด มีค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยเป็นบวก แสดงให้เห็นว่าอัตราการป้อนตัดที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากตามทฤษฎีของอัตราการป้อนตัด การใช้อัตราการป้อนมากเป็นผลให้ต้องใช้แรงในการตัดที่เพิ่มมากขึ้นเช่นกันอันจะส่งผลให้ผิวของวัสดุมีความขรุขระมากขึ้น

ความลึกตัด มีค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยเป็นบวก แสดงให้เห็นว่าความลึกตัดที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วยเนื่องจากความลึกตัดที่เพิ่มมากขึ้นทำให้พื้นที่ในการตัดรวมถึงใช้แรงในการตัดที่มากขึ้น ก่อให้เกิดโอกาสในการสั่นสะเทือนในกระบวนการตัดสูงทำให้ความขรุขระของผิวชิ้นงานมากขึ้น

รัศมีจุมุกมีด มีค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยเป็นลบ แสดงให้เห็นว่ารัศมีจุมุกมีดเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานมีแนวโน้มที่ลดลง เนื่องจากรัศมีจุมุกมีดที่มากจะช่วยบรรเทาป้อนตัดส่งผลให้ความขรุขระผิวลดลงตามทฤษฎี อีกทั้งยังลดพื้นที่ในการตัดทำให้ใช้แรงในการตัดที่น้อยลงจึงส่งผลให้ชิ้นงานมีความเรียบผิวที่ดี

มุมคายเศษโลหะ มีค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยเป็นลบ แสดงให้เห็นว่ามุมคายเศษโลหะที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานมีแนวโน้มที่ลดลง เนื่องจากมุมคายเศษโลหะมากทำให้ความต้านทานการเคลื่อนที่ของมีดตัดลดลง เกิดการสั่นสะเทือนในกระบวนการตัดที่น้อย จึงใช้แรงตัดที่ต่ำให้ความเรียบผิวที่ดี

อัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟแรงตัดพลวัต (AFy/AFz) มีค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยเป็นลบ แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟแรงตัดพลวัตที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานมีแนวโน้มที่ลดลง เนื่องจากเมื่ออัตราส่วนแรงเพิ่มขึ้น แรงตัดหลัก (AFz) มีค่าเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าแรงป้อนตัด (AFy) ซึ่งแรงป้อนตัดส่งผลกระทบต่อความขรุขระผิวสูงสุดมากที่สุด ดังนั้นเมื่ออัตราส่วนแรงป้อนตัดน้อยลงส่งผลให้ความขรุขระสูงสุดผิวมีแนวโน้มลดลงตามไปด้วย

จากการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย พบว่าตัวแปรทุกตัวในสมการ สามารถอธิบายความสัมพันธ์และทำนายค่าความขรุขระผิวชิ้นงานได้อย่างมีนัยสำคัญ

4.8.2 การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

จากการวิเคราะห์การถดถอยสมการทำนายค่าความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (R_a) จากรูปที่ 4.69 พบว่า $R^2 = 83.7\%$ แสดงให้เห็นว่าตัวแปรอิสระ (ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมกมีด มุมคายเศษโลหะ และอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟ) สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าตอบสนองหรือความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ยได้อย่างเหมาะสม เนื่องจากผลการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การตัดสินใจให้ค่า R^2 มากกว่า 80% ดังนั้นสามารถเสนอสมการทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ยในรูปเอกซ์โปเนนเชียลด้วยการแปลงลอการิทึม ได้ดังนี้

$$R_a = e^{3.90} \cdot V^{-0.411} \cdot f^{0.209} \cdot D^{1.05} \cdot R_n^{-0.510} \cdot e^{-0.0188\gamma} \cdot \left(\frac{AF_y}{AF_z}\right)^{-6.44} \quad (4.3)$$

จากการวิเคราะห์การถดถอยสมการทำนายค่าความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (R_z) จากรูปที่ 4.70 พบว่า $R^2 = 89.8\%$ แสดงให้เห็นว่าตัวแปรอิสระ (ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมกมีด มุมคายเศษโลหะ และอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟ) สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าตอบสนองหรือความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุดได้อย่างเหมาะสม เนื่องจากผลการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การตัดสินใจให้ค่า R^2 มากกว่า 80% ดังนั้นสามารถเสนอสมการทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุดในรูปเอกซ์โปเนนเชียลด้วยการแปลงลอการิทึม ได้ดังนี้

$$R_z = e^{6.06} \cdot V^{-0.359} \cdot f^{1.30} \cdot D^{0.312} \cdot R_n^{-0.709} \cdot e^{-0.0143\gamma} \cdot \left(\frac{AF_y}{AF_z}\right)^{-0.571} \quad (4.4)$$

โดยที่

R_a คือ ความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (ไมโครเมตร)

R_z คือ ความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุดเฉลี่ย (ไมโครเมตร)

V คือ ความเร็วตัดชิ้นงาน (เมตรต่อนาที)

f คือ อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)

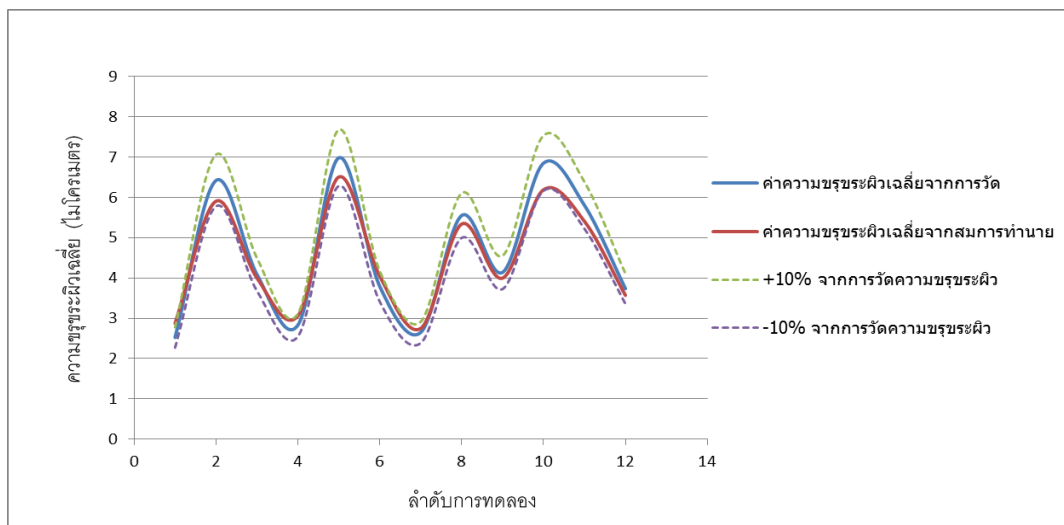
D คือ ค่าความลึกตัด (มิลลิเมตร)

R_n คือ ค่ารัศมีจุ่มกมิต (มิลลิเมตร)

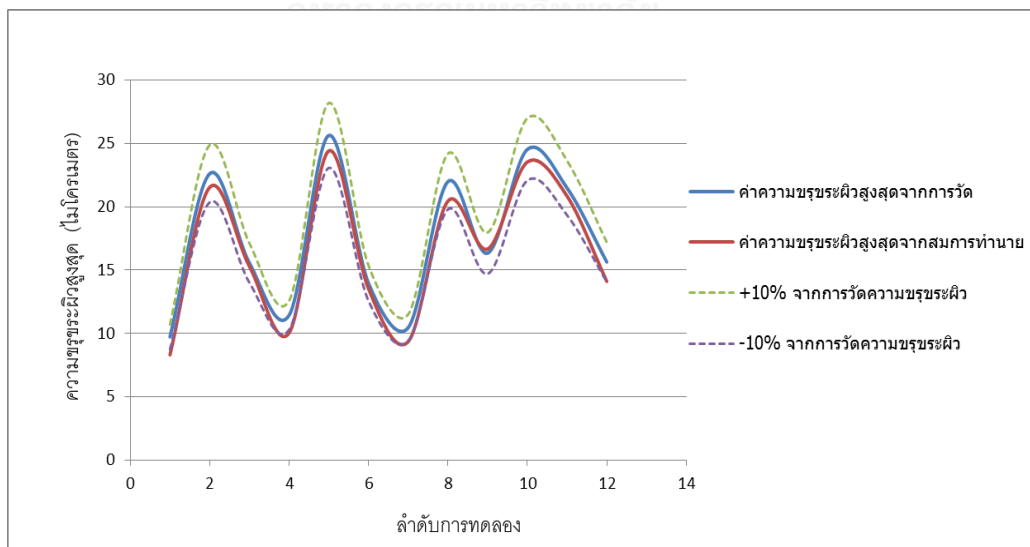
γ คือ ค่ามุมคายเศษโลหะ (องศา)

$\frac{AF_y}{AF_z}$ คือ อัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟระหว่างแรงป้อนตัดพลวัตและแรงตัดหลักพลวัต

จากตาราง 4.2 เพื่อทดสอบความแม่นยำของสมการทำนายความขรุขระผิวเฉลี่ย พบว่าความขรุขระผิวชิ้นงานแบบเฉลี่ย (Ra) ที่วัดได้จริงกับความขรุขระผิวที่คำนวณได้จากสมการทำนายค่าความขรุขระผิวตามสมการที่ 4.3 และ ความขรุขระผิวชิ้นงานแบบสูงสุด (Rz) ที่วัดได้จริงกับความขรุขระผิวที่คำนวณได้จากสมการทำนายค่าความขรุขระผิวตามสมการที่ 4.4 นั้น มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่ง แสดงถึงความแม่นยำของสมการในเงื่อนไขการตัดต่างๆ แสดงได้ดังรูป 4.71 และ 4.72



รูปที่ 4.71 การทดสอบความแม่นยำของสมการทำนายความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra)



รูปที่ 4.72 การทดสอบความแม่นยำของสมการทำนายความขรุขระผิวสูงสุด (Rz)

การคำนวณหาค่าความแม่นยำของสมการ ทำได้โดยการคำนวณหาค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน} = \frac{100\%}{n} \sum_{t=1}^n \frac{f_t - a_t}{a_t} \quad (4.5)$$

f คือ ความขรุขระผิวที่ได้จากสมการทำนายความขรุขระผิว

a_t คือ ค่าความขรุขระผิวจริงจากการวัด

t คือ ข้อมูลที่ 1 ถึง n

จากการคำนวณค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนของสมการทำนายความขรุขระผิวเฉลี่ย (R_a) มีค่าเท่ากับ 7.22 % และ สมการทำนายความขรุขระผิวสูงสุด (R_z) มีค่าเท่ากับ 6.54 % หมายความว่า สมการทำนายความขรุขระผิวเฉลี่ย (R_a) มีค่าความแม่นยำเท่ากับ 92.78% และสมการทำนายความขรุขระผิวสูงสุด (R_z) มีค่าความแม่นยำเท่ากับ 93.46% ซึ่งงานวิจัยนี้ได้พัฒนาสมการทำนายค่าความขรุขระผิวขึ้นงานที่ให้ค่าความแม่นยำระดับสูงมากขึ้น

โดยงานวิจัยนี้ให้ค่าความแม่นยำที่สูงกว่าสมการทำนายค่าความขรุขระผิวขึ้นงานด้วยวิธีการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาสามารถทำนายค่าความขรุขระผิวได้เฉพาะเงื่อนไขการเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องเท่านั้น โดยสมการทำนายความขรุขระผิวเฉลี่ยของ มีค่าความแม่นยำเท่ากับ 91.89% และสมการทำนายความขรุขระผิวเฉลี่ยมีค่าความแม่นยำเท่ากับ 91.97% ดังนั้นการนำเวฟเลทมาประยุกต์ใช้ในการแยกสัญญาณความขรุขระผิวขึ้นงานสำหรับเงื่อนไขการตัดที่ให้เศษโลหะแบบแตกหักนั้น สามารถนำมาพัฒนาสมการทำนายความขรุขระผิวขึ้นงานได้แม่นยำยิ่งขึ้นและยังสามารถทำนายความขรุขระผิวขึ้นงานได้ในทุกเงื่อนไขการตัดไม่ว่าเงื่อนไขการตัดนั้นจะเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องหรือแตกหักก็ตาม [16]

4.10 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

จากตารางที่ 4.2 ได้นำผลการทดลองซึ่งประกอบด้วย เงื่อนไขการตัดทั้งหมดจำนวน 12 ข้อมูล อัตราส่วนแรงตัดพลวัต รวมถึงค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการวัดจริง และค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการ มาทำการทดสอบความแม่นยำของสมการ พบว่าสมการทำนายความขรุขระผิวขึ้นงานมีความแม่นยำในระดับสูงและเป็นที่ยอมรับได้ โดยที่สมการทำนายความขรุขระผิวเฉลี่ย (R_a) มีค่าความแม่นยำเท่ากับ 92.78% และสมการทำนายความขรุขระผิวสูงสุด (R_z) มีค่าความแม่นยำเท่ากับ 93.46%

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อแยกสัญญาณแรงตัดพลวัตที่เกิดจากการแตกหักของเศษโลหะและสัญญาณรบกวนอื่นออกจากสัญญาณแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้น เพื่อทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานในขณะกลึง โดยประยุกต์การแปลงเวฟเลท โดยเวฟเลทชนิดดอเบซีส์เป็นที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณเชิงกล และให้ผลที่ดีกว่า การแปลงฟูเรียร์(Fourier transform) แบบเดิม โดยผลการแปลงเวฟเลทของสัญญาณแรงตัดพลวัตสามารถอธิบายการเกิดเศษโลหะแบบแตกหักและเศษโลหะแบบต่อเนื่องรวมถึงความขรุขระผิวชิ้นงานจากแรงตัดพลวัตได้ทั้งในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ รวมถึงความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและปัจจัยต่างๆ เช่น ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมุมมีด มุมคายเศษโลหะได้ถูกนำวิเคราะห์ร่วมด้วย จากการทดลองนี้ได้นำไปพัฒนาสมการทำนายค่าความขรุขระผิวชิ้นงานในกระบวนการตัดให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้นโดยการแยกสัญญาณแรงตัดพลวัตของเศษโลหะแบบแตกหักและสัญญาณรบกวนอื่นออกจากแรงตัดพลวัต

5.1 สรุปผลการวิจัย

สมการทำนายความขรุขระผิวได้ถูกพัฒนาขึ้น โดยคำนึงถึงเงื่อนไขในการตัด อาทิเช่น ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมุมมีด มุมคายเศษโลหะ รวมถึงแรงตัดพลวัตที่วัดได้ในขณะกลึงตัดด้วยไดนาโมมิเตอร์ จากการทดลองนี้สามารถพิสูจน์ได้ว่า แรงป้อนตัด(Feed force: F_y) เป็นแรงที่ส่งผลกระทบต่อความขรุขระผิวชิ้นงานมากที่สุด ในขณะที่เงื่อนไขการตัดนั้นมีอิทธิพลต่อแรงตัดหลัก (Main force: F_z) ดังนั้นแรงตัดหลักและแรงป้อนตัด จึงถูกนำมาใช้ในการทำนายค่าความขรุขระผิวชิ้นงานในขณะกลึงชิ้นงาน โดยพบว่าเมื่ออัตราส่วนแรงป้อนตัด(Feed force: F_y) กับแรงตัดหลัก (Main force: F_z) ที่เพิ่มขึ้นนั้น ทำให้ความขรุขระผิวของชิ้นงานมีค่าลดลง รวมถึงแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นขณะกลึงตัดที่มีเงื่อนไขการกลึงที่เกิดเศษโลหะแบบแตกหักนั้น จะมีความถี่ที่สูงกว่าการกลึงตัดที่เกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่อง โดยความถี่ที่ได้จากการเก็บสัญญาณแรงตัดพลวัตของเงื่อนไขการกลึงตัดที่เกิดเศษโลหะแบบแตกหักนั้นจะมีความถี่ของความขรุขระผิวและความถี่

ของการแตกหักของโลหะปะปนอยู่ ซึ่งจากผลการทดลองในการแยกสัญญาณแรงตัดพลวัตขณะที่เกิดเศษโลหะแบบแตกหักพบว่า การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform) ไม่สามารถวิเคราะห์หาสัญญาณความถี่ความถี่ของกระบวนการตัดที่ให้เศษโลหะแบบแตกหักได้ เนื่องจากมีสัญญาณการแตกหักเศษโลหะและสัญญาณรบกวนอื่นเกิดขึ้นร่วมกับสัญญาณแรงตัดพลวัตของความถี่สูงชันงาน

งานวิจัยนี้ได้นำแนวคิดการแปลงเวฟเลทแบบดอเบซีส์มาแบ่งแยกย่อยสัญญาณออกเป็นหลายๆ ระดับ (Level) สามารถแยกสัญญาณความถี่ความถี่สูงชันงานในแรงตัดพลวัตออกจากสัญญาณความถี่อื่นที่เกิดจากการแตกหักของเศษโลหะขณะตัดได้ถึงที่ระดับ 5 ซึ่งสามารถนำสัญญาณความถี่สูงชันงานที่ได้ไปพัฒนาสมการทำนายความถี่สูงชันงานให้มีความแม่นยำยิ่งขึ้น ไม่ว่าจะเงื่อนไขการตัดจะเปลี่ยนไปอย่างไรก็ตามโดยไม่มีสัญญาณรบกวนอื่นปะปน

การวิเคราะห์สมการเอกซ์โปเนนเชียลแบบถดถอยพหุคูณในการหาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยแบบจำลอง เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการตัด แรงตัด และความถี่สูงชันงาน พบว่าปัจจัยที่ใช้สำหรับการพัฒนาสมการทำนายความถี่สูงชันงานสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของความถี่สูงชันงานอย่างมีนัยสำคัญ โดยจากสมการทำนายความถี่สูงชันงานในรูปแบบสมการเอกซ์โปเนนเชียล สมการที่ 4.1 และ 4.2 จะเห็นได้ว่า การใช้ความเร็วตัดที่มากขึ้น การใช้อัตราการป้อนตัดต่ำ การใช้ความลึกตัดที่ลดลง การเพิ่มขนาดของรัศมีจุมกมิด และใช้มุมคายเศษโลหะที่มีค่ามากจะทำให้ได้ค่าความถี่สูงชันงานที่ลดลง รวมถึงจากสมการดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความถี่สูงชันงานมากที่สุด คือ อัตราส่วนของแรงตัดพลวัต (AFy/AFz)

จากการทดสอบความแม่นยำของสมการภายใต้เงื่อนไขที่อยู่ในขอบเขตงานวิจัยนี้ แสดงให้เห็นว่าสมการทำนายความถี่สูงชันงานที่ได้ มีความแม่นยำในระดับสูงถึง 92.78% และ 93.46% ซึ่งเป็นที่ยอมรับได้ และยังอธิบายความถี่สูงชันงานได้เป็นอย่างดี

5.2 อภิปรายผลการวิจัย

1. การแปลงเวฟเลทสามารถแยกสัญญาณแรงตัดพลวัตของเศษโลหะแบบแตกหักออกจากสัญญาณรบกวนอื่นๆ ได้ในทุกกรณี ไม่ว่าจะเงื่อนไขในการตัดจะเกิดเศษโลหะแบบแตกหัก หรือ

แบบต่อเนื่องก็ตาม และสามารถนำมาใช้ทำนายสมการความขรุขระผิวชิ้นงานได้อย่างแม่นยำยิ่งขึ้น

2. สมการทำนายความขรุขระผิวได้นำปัจจัยดังต่อไปนี้ คือ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีงูมกมิต มุมคายเศษโลหะ และอัตราส่วนของแรงตัดพลวัต (AFy/AFz) ซึ่งสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าความขรุขระผิวแม้ว่าเงื่อนไขการตัดจะเปลี่ยนไปอย่างมีนัยสำคัญ

3. ความคลาดเคลื่อนในการทดลองจากการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การตัดสั่นใจจากการวัดค่าความขรุขระผิว อาจเกิดจากการกำหนดจุดอ้างอิงที่ใช้ในการลากเส้นวัดความขรุขระกับจุดที่เริ่มทำการกลึงตัด เนื่องจกตำแหน่งการวางชิ้นงานบนเครื่องวัดความขรุขระผิวแต่ละครั้งอาจก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้ และองศาของมีดตัดอาจเกิดจากเศษโลหะตกค้างอยู่บริเวณด้ามวางมีด รวมถึงการขันน็อตระหว่างด้ามวางมีดและมีดตัดที่ไม่ได้ระดับ จึงควรเป่าลมเพื่อไล่เศษโลหะก่อนวางมีดตัด

5.3 ข้อจำกัดและอุปสรรคในงานวิจัย

การใช้งานในแต่ละครั้งจำเป็นต้องติดตั้งไดนาโมมิเตอร์ใหม่ทุกครั้ง ทำให้ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องไดนาโมมิเตอร์ในการทดลองแต่ละครั้งเกิดความคลาดเคลื่อนได้

5.4 ข้อเสนอแนะ

สามารถนำเวฟเลขแฟมิลี่ อื่นๆ มาวิเคราะห์เพื่อแยกสัญญาณการแตกหักของเศษโลหะออกจากสัญญาณของแรงตัดพลวัต

สามารถนำสารหล่อเย็นมาพิจารณาเพิ่มอีกปัจจัยหนึ่ง เนื่องจากสารหล่อเย็นสามารถลดอุณหภูมิขณะทำการกลึงตัด ทำให้ชิ้นงานมีความขรุขระผิวลดลง คุณภาพผิวดีขึ้น

ควรพิจารณาถึงรูปทรงของเม็ดมีดตัด และการสึกหรอของมีดตัด ซึ่งล้วนส่งผลต่อค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน

รายการอ้างอิง

1. Cakir, Ensarioglu, and Demirayak, *Mathematical models of surface roughness for evaluating the effects cutting parameters and coating materials*. Journal of materials processing technology, 2009.
2. Feng, C.X., and X.F. Wang, *Surface roughness predictive modeling : neural networks versus regression*. IIE Transactions, 2003.
3. Fnides B., Aouici H., and Yallese, *Cutting forces and surface roughness in hard turning of hot work steel X38CrMoV5-1 using mixed ceramic*. Journal of Mechanika, 2008.
4. Groover and M.P, *Fundamentals of Modern Manufacturing*, ed. U.J.W.S. 2nd Edition. 2004.
5. Huang L , and Chen, and J.C.A, *Multiple regression model to predict in-process surface roughness in turning operation via accelerometer*. Journal of IndustrialTechnology, 2001.
6. J., K., *Application of wavelet transform technique to detect tool failure in turning operations*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2005.
7. Kyocera, *CA6515/25 and PR1125 for Stainless Steel Machining*. 2014.
8. S, T., *Development of Intelligent Identification of Cutting States by Spectrum Analysis for CNC turning*. Journal of Advanced Mechanical Design, System, and Manufacturing 2008.
9. Salah Hamed Ramadan Ali, H.H. Mohamad, and M.K. Bedewy, *Identifying cylinder linear wear using precision coordinate measurement*. Journal of precision engineering and manufacturing, 2009.
10. Shawky A.M. and M.A. Elbestawi, *In-process evaluation of workpiece geometrical tolerances in bar turning*. Journal of Machine Tools and Manufacture, 1996.

11. Tangjitsitcharoen S, P. Tangpornprasert, and C.V.a. N.Rojanarowan, *In-process monitoring and control of microassembly by utilizing force sensor*. Journal of achievements in materials and manufacturing engineering, 2008.
12. Tangjitsitcharoen S and M. T, *Intelligent monitoring and identification of cutting states of chips and force on CNC turning machine*. Journal of Manufacturing Processes, 2008.
13. Tangjitsitcharoen, S., *Advanced prediction of surface roughness by monitoring of dynamic cutting force in CNC process*. Journal of Applied Mechanics and Materials, 2013.
14. Tangjitsitcharoen, S., T. Saksri, and S. Ratanakuakangwan, *Advance in chatter detection in ball end milling process by utilizing wavelet transform*. Journal of Intellegent Manufacturing, 2013.
15. Venkataramaiah P, K. DharmaReddy, and P.Meramma, *Analysis on influence of feed rate and tool geometry on cutting force in turning using Taguchi method and Fuzzy logic*. International Conference on Advances in Manufacturing and Materials Engineering, 2014.
16. Xiaoli and Zhejun, *Discrete wavelet transform for tool breakage monitoring*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1999.
17. Yaldiz S and F. Unsacar, *Design development and testing of a turning dynamometer for cutting force measurement*. Materials and Design 2006.
18. Zhang, J.Z, and C. J.C, *The development of an in-process surface roughness adaptive control system in end milling operations*. Advance Manufacturing Technology, 2007.
19. กลิ่งผล, ก., การพัฒนาตรวจจับการแตกหักเศษโลหะโดยใช้สัญญาณแรงตัดและอุณหภูมิ, in สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์. 2554, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
20. จันทรษ์ผ่อง, ศ., การพยากรณ์ความขรุขระผิวสำเร็จชิ้นงานเหล็กกล้าในกระบวนการกลึงที่เย็นช้ำด้วยวิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง, in สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ 2554, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

21. จันทลักขณา, ก., การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (FFT) และการประยุกต์ใช้เพื่อวินิจฉัยสภาพเครื่องจักร ตอนที่ 1 แกนอ้างอิงเทียบทางความถี่ด้วยการวิเคราะห์แบบฟูเรียร์. วารสารพัฒนาเทคนิคศึกษา สจพ, 2545.
22. ชูติมา, ป., การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. 2545, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
23. ตั้งจิตสิตเจริญ, ส., ระบบการตรวจจับการแตกหักของเศษโลหะเชิงปัญญา. การประชุมวิชาการ ข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม, 2548.
24. ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา and พ. เหลืองไพฑูริย์, การออกแบบและการวิเคราะห์การทดลอง. 2545, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ท้อป.
25. ศิริธรรมปิติ, ป., การศึกษาพารามิเตอร์ของกระบวนการกลึงเหล็กกล้าคาร์บอนบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี โดยการประยุกต์ใช้วิธีปริมาณสารหล่อเย็นน้อยที่สุด, in สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรมภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ 2550, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
26. ตั้งจิตสิตเจริญ, ส., วิศวกรรมการผลิตขั้นสูง. 2555, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
27. สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ , ศักดิ์ดา ศรีอนุศาสตร์ , and ด. ละเอียดดี, การพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานขณะตัดสำหรับกระบวนการกลึงซีเอ็นซีด้วยอัตราส่วนแรงตัด. วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2553.
28. สมานมิตร, ก., การทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานในกระบวนการโดยการประยุกต์ใช้แรงตัดพลวัตในการกลึงเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C ด้วยใบมีดคาร์ไบด์เคลือบผิว, in สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์. 2556, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาคผนวก ก

โปรแกรมการแปลงเวฟเลขชนิดดอเบชีส์สำหรับวิเคราะห์ความขรุขระผิว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

โปรแกรมการแปลงเวฟเลทชนิดดอเบซีส์ สำหรับวิเคราะห์ความขรุขระผิว

```

force = textread('n56_6.txt');
l_x1 = length(force);
fx = force(:,1); fy = force(:,2); fz = force(:,3);
[N,n]=size(force);
samp = N;
t=1/samp;
tt=(0:t*(N-1));
f=(0:N-1)/N*samp;
freq1 = f(1:N/2);

[cAx1,cDx1] = dwt(forceroughness(:,1),'db2');
[cAy1,cDy1] = dwt(forceroughness(:,2),'db2');
[cAz1,cDz1] = dwt(forceroughness(:,3),'db2');

[cAx2,cDx2] = dwt(cAx1,'db2');
[cAx3,cDx3] = dwt(cAx2,'db2');
[cAx4,cDx4] = dwt(cAx3,'db2');
[cAx5,cDx5] = dwt(cAx4,'db2');

[cAy2,cDy2] = dwt(cAy1,'db2');
[cAy3,cDy3] = dwt(cAy2,'db2');
[cAy4,cDy4] = dwt(cAy3,'db2');
[cAy5,cDy5] = dwt(cAy4,'db2');

```

$[cAz2, cDz2] = \text{dwt}(cAz1, 'db2');$

$[cAz3, cDz3] = \text{dwt}(cAz2, 'db2');$

$[cAz4, cDz4] = \text{dwt}(cAz3, 'db2');$

$[cAz5, cDz5] = \text{dwt}(cAz4, 'db2');$

$Dx1 = \text{upcoef}('d', cDx1, 'db2', 1, l_x1);$

$Dx2 = \text{upcoef}('d', cDx2, 'db2', 2, l_x1);$

$Dx3 = \text{upcoef}('d', cDx3, 'db2', 3, l_x1);$

$Dx4 = \text{upcoef}('d', cDx4, 'db2', 4, l_x1);$

$Dx5 = \text{upcoef}('d', cDx5, 'db2', 5, l_x1);$

$Ax1 = \text{upcoef}('a', cAx1, 'db2', 1, l_x1);$

$Ax2 = \text{upcoef}('a', cAx2, 'db2', 2, l_x1);$

$Ax3 = \text{upcoef}('a', cAx3, 'db2', 3, l_x1);$

$Ax4 = \text{upcoef}('a', cAx4, 'db2', 4, l_x1);$

$Ax5 = \text{upcoef}('a', cAx5, 'db2', 5, l_x1);$

$Dy1 = \text{upcoef}('d', cDy1, 'db2', 1, l_x1);$

$Dy2 = \text{upcoef}('d', cDy2, 'db2', 2, l_x1);$

$Dy3 = \text{upcoef}('d', cDy3, 'db2', 3, l_x1);$

$Dy4 = \text{upcoef}('d', cDy4, 'db2', 4, l_x1);$

$Dy5 = \text{upcoef}('d', cDy5, 'db2', 5, l_x1);$

$Ay1 = \text{upcoef}('a', cAy1, 'db2', 1, l_x1);$

$Ay2 = \text{upcoef}('a', cAy2, 'db2', 2, l_x1);$

```
Ay3 = upcoef('a',cAy3,'db2',3,l_x1);
Ay4 = upcoef('a',cAy4,'db2',4,l_x1);
Ay5 = upcoef('a',cAy5,'db2',5,l_x1);
```

```
Dz1 = upcoef('d',cDz1,'db2',1,l_x1);
Dz2 = upcoef('d',cDz2,'db2',2,l_x1);
Dz3 = upcoef('d',cDz3,'db2',3,l_x1);
Dz4 = upcoef('d',cDz4,'db2',4,l_x1);
Dz5 = upcoef('d',cDz5,'db2',5,l_x1);
```

```
Az1 = upcoef('a',cAz1,'db2',1,l_x1);
Az2 = upcoef('a',cAz2,'db2',2,l_x1);
Az3 = upcoef('a',cAz3,'db2',3,l_x1);
Az4 = upcoef('a',cAz4,'db2',4,l_x1);
Az5 = upcoef('a',cAz5,'db2',5,l_x1);
```

```
time = 0.001:0.001:l_x1/1000;
```

```
t = 1/samp;
```

```
time = (0:t*(N-1));
```

```
max_TD = 100;
```

```
min_TD = -1*max_TD;
```

```
figure(1);
```

```
subplot(6,1,1);
```

```
plot(time,forceroughness(:,1));
```

```
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.)');ylabel('Force x (N)');title('Original Signal');ylim([-20 20]);
```

```

subplot(6,1,2)
plot(time,Dx1)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force x (N)');title('Detail Signal D1'); ylim([-5 5]);
subplot(6,1,3)
plot(time,Dx2)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force x (N)');title('Detail Signal D2'); ylim([-5 5]);
subplot(6,1,4)
plot(time,Dx3)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force x (N)');title('Detail Signal D3'); ylim([-5 5]);
subplot(6,1,5)
plot(time,Dx4)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force x (N)');title('Detail Signal D4');ylim([-5 5]);
subplot(6,1,6)
plot(time,Dx5)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force x (N)');title('Detail Signal D5');ylim([-5 5]);

figure(2);
subplot(6,1,1);
plot(time,forceroughness(:,2));
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force y (N)');title('Original Signal');ylim([-15 15]);
subplot(6,1,2)
plot(time,Dy1)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force y (N)');title('Detail Signal D1'); ylim([-5 5]);
subplot(6,1,3)
plot(time,Dy2)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force y (N)');title('Detail Signal D2'); ylim([-5 5]);
subplot(6,1,4)
plot(time,Dy3)

```

```

grid;zoom on ;xlabel('Time (s.)');ylabel('Force y (N)');title('Detail Signal D3'); ylim([-5 5]);
subplot(6,1,5)
plot(time,Dy4)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.)');ylabel('Force y (N)');title('Detail Signal D4');ylim([-5 5]);
subplot(6,1,6)
plot(time,Dy5)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.)');ylabel('Force y (N)');title('Detail Signal D5');ylim([-5 5]);

figure(3);
subplot(6,1,1);
plot(time,forceroughness(:,3));
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.)');ylabel('Force z (N)');title('Original Signal'); ylim([-15 15]);
subplot(6,1,2)
plot(time,Dz1)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.)');ylabel('Force z (N)');title('Detail Signal D1'); ylim([-5 5]);
subplot(6,1,3)
plot(time,Dz2)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.)');ylabel('Force z (N)');title('Detail Signal D2'); ylim([-5 5]);
subplot(6,1,4)
plot(time,Dz3)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.)');ylabel('Force z (N)');title('Detail Signal D3'); ylim([-5 5]);
subplot(6,1,5)
plot(time,Dz4)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.)');ylabel('Force z (N)');title('Detail Signal D4'); ylim([-5 5]);
subplot(6,1,6)
plot(time,Dz5)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.)');ylabel('Force z (N)');title('Detail Signal D5'); ylim([-5 5]);

```

```

%Fourier Transform%
[N1,M1] = size(Dx1);
[N2,M2] = size(Dx2);
[N3,M3] = size(Dx3);
[N4,M4] = size(Dx4);
[N5,M5] = size(Dx5);
%[N6,M6] = size(Dx6);
%[N7,M7] = size(Dx7);
%[N8,M8] = size(Dx8);

sample = N;
t = 1/sample;
tt = (0:t*(N-1));
f = (0:N-1)/N*sample;
freq = f(1:N/2);

fx0 = fft(forceroughness(:,1))/N*2;
fx1 = fft(Dx1)/N*2;
fx2 = fft(Dx2)/N*2;
fx3 = fft(Dx3)/N*2;
fx4 = fft(Dx4)/N*2;
fx5 = fft(Dx5)/N*2;
%fx6 = fft(Dx6)/N*2;
%fx7 = fft(Dx7)/N*2;
%fx8 = fft(Dx8)/N*2;

fx0abs = abs(fx0(1:N1/2));
fx1abs = abs(fx1(1:N1/2));
fx2abs = abs(fx2(1:N2/2));

```




```

fx3abs = abs(fx3(1:N3/2));
fx4abs = abs(fx4(1:N4/2));
fx5abs = abs(fx5(1:N5/2));
%fx6abs = abs(fx6(1:N6/2));
%fx7abs = abs(fx7(1:N7/2));
%fx8abs = abs(fx8(1:N8/2));

```

```

fx0abs2 = fx0abs.^2;
fx1abs2 = fx1abs.^2;
fx2abs2 = fx2abs.^2;
fx3abs2 = fx3abs.^2;
fx4abs2 = fx4abs.^2;
fx5abs2 = fx5abs.^2;
%fx6abs2 = fx6abs.^2;
%fx7abs2 = fx7abs.^2;
%fx8abs2 = fx8abs.^2;

```

```

fy0 = fft(forceroughness(:,2))/N*2;
fy1 = fft(Dy1)/N*2;
fy2 = fft(Dy2)/N*2;
fy3 = fft(Dy3)/N*2;
fy4 = fft(Dy4)/N*2;
fy5 = fft(Dy5)/N*2;
%fy6 = fft(Dy6)/N*2;
%fy7 = fft(Dy7)/N*2;
%fy8 = fft(Dy8)/N*2;

```

```

fy0abs = abs(fy0(1:N1/2));
fy1abs = abs(fy1(1:N1/2));

```



```

fy2abs = abs(fy2(1:N2/2));
fy3abs = abs(fy3(1:N3/2));
fy4abs = abs(fy4(1:N4/2));
fy5abs = abs(fy5(1:N5/2));
%fy6abs = abs(fy6(1:N6/2));
%fy7abs = abs(fy7(1:N7/2));
%fy8abs = abs(fy8(1:N8/2));

```

```

fy0abs2 = fy0abs.^2;
fy1abs2 = fy1abs.^2;
fy2abs2 = fy2abs.^2;
fy3abs2 = fy3abs.^2;
fy4abs2 = fy4abs.^2;
fy5abs2 = fy5abs.^2;
%fy6abs2 = fy6abs.^2;
%fy7abs2 = fy7abs.^2;
%fy8abs2 = fy8abs.^2;

```



```

fz0 = fft(forceroughness(:,3))/N*2;
fz1 = fft(Dz1)/N*2;
fz2 = fft(Dz2)/N*2;
fz3 = fft(Dz3)/N*2;
fz4 = fft(Dz4)/N*2;
fz5 = fft(Dz5)/N*2;
%fz6 = fft(Dz6)/N*2;
%fz7 = fft(Dz7)/N*2;
%fz8 = fft(Dz8)/N*2;

```

```

fz0abs = abs(fz0(1:N1/2));

```

```

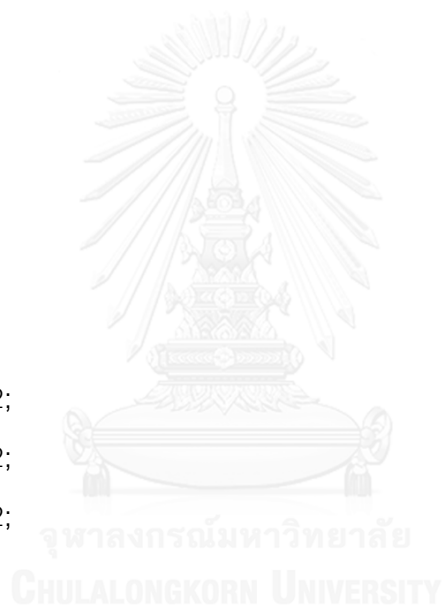
fz1abs = abs(fz1(1:N1/2));
fz2abs = abs(fz2(1:N2/2));
fz3abs = abs(fz3(1:N3/2));
fz4abs = abs(fz4(1:N4/2));
fz5abs = abs(fz5(1:N5/2));
%fz6abs = abs(fz6(1:N6/2));
%fz7abs = abs(fz7(1:N7/2));
%fz8abs = abs(fz8(1:N8/2));

```

```

fz0abs2 = fz0abs.^2;
fz1abs2 = fz1abs.^2;
fz2abs2 = fz2abs.^2;
fz3abs2 = fz3abs.^2;
fz4abs2 = fz4abs.^2;
fz5abs2 = fz5abs.^2;
%fz6abs2 = fz6abs.^2;
%fz7abs2 = fz7abs.^2;
%fz8abs2 = fz8abs.^2;

```



```

figure(4);
subplot(6,1,1);
plot(fx0abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum x');title('Original Signal');
xlim([0 500]); ylim([0 0.5]);
subplot(6,1,2);
plot(fx1abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum x');title('Detail Signal D1');
xlim([0 500]); ylim([0 0.1]);
subplot(6,1,3);
plot(fx2abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum x');title('Detail Signal D2');
xlim([0 500]); ylim([0 0.1]);

```

```

subplot(6,1,4);
plot(fx3abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum x');title('Detail Signal D3');
xlim([000 500]); ylim([0 0.1]);
subplot(6,1,5);
plot(fx4abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum x');title('Detail Signal D4');
xlim([000 500]); ylim([0 0.3]);
subplot(6,1,6);
plot(fx5abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum x');title('Detail Signal D5');
xlim([000 500]); ylim([0 0.1]);

figure(5);
subplot(6,1,1);
plot(fy0abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum y');title('Original Signal');
xlim([000 500]); ylim([0 5]);
subplot(6,1,2);
plot(fy1abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum y');title('Detail Signal D1');
xlim([000 500]); ylim([0 0.1]);
subplot(6,1,3);
plot(fy2abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum y');title('Detail Signal D2');
xlim([000 500]); ylim([0 0.1]);
subplot(6,1,4);
plot(fy3abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum y');title('Detail Signal D3');
xlim([000 500]); ylim([0 0.5]);
subplot(6,1,5);
plot(fy4abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum y');title('Detail Signal D4');
xlim([000 500]); ylim([0 0.3]);
subplot(6,1,6);
plot(fy5abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum y');title('Detail Signal D5');
xlim([000 500]); ylim([0 0.5]);

```

```
figure(6);
subplot(6,1,1);
plot(fz0abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum z');title('Original Signal');
xlim([000 500]); ylim([0 2]);
subplot(6,1,2);
plot(fz1abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum z');title('Detail Signal D1');
xlim([000 500]); ylim([0 0.1]);
subplot(6,1,3);
plot(fz2abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum z');title('Detail Signal D2');
xlim([000 500]); ylim([0 0.1]);
subplot(6,1,4);
plot(fz3abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum z');title('Detail Signal D3');
xlim([000 500]); ylim([0 0.5]);
subplot(6,1,5);
plot(fz4abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum z');title('Detail Signal D4');
xlim([000 500]); ylim([0 1]);
subplot(6,1,6);
plot(fz5abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum z');title('Detail Signal D5');
xlim([000 500]); ylim([0 1]);
```

ภาคผนวก ข

โปรแกรมการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วสำหรับวิเคราะห์ความขรุขระผิว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

โปรแกรมการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว สำหรับวิเคราะห์ความขรุขระผิว

```

clear;

samp = 1000;           %Sampling Frequency
fname1 = 'd27';       % ชื่อ ไฟล์ที่ต้องการเปิด
ext1 = '.txt';        % ชื่อ สกุลไฟล์
filename = [fname1,ext1]; % รวมชื่อไฟล์กับสกุลไฟล์
load (filename);      % เรียกไฟล์
eval(['data1=',[fname1],';']); %
[N1,n1]=size(data1); % เก็บค่าขนาดของข้อมูล โดย N เป็นจำนวนแถวและ n เป็น
                    % จำนวนคอลัมน์
fname2 = 'n27';       % ชื่อ ไฟล์ที่ต้องการเปิด
ext2 = '.txt';        % ชื่อ สกุลไฟล์
filename = [fname2,ext2]; % รวมชื่อไฟล์กับสกุลไฟล์
load (filename);      % เรียกไฟล์
eval(['data2=',[fname2],';']); %
[N2,n2]=size(data2); % เก็บค่าขนาดของข้อมูล โดย N เป็นจำนวนแถว และ n เป็น
                    % จำนวนคอลัมน์

t=1/samp;
tt=(0:t*(N2-1));      %Using plot graph __ time domain
f=(0:N1-1)/N1*samp;
freq=f(1:N1/2);      %Using plot graph __ frequency domain

FX=fft(data1(:,1))/(N1*2); % column 1 _ take FFT of Fx
absFX=abs(FX(1:N1/2));
PabsFX=absFX.^2;

FY=fft(data1(:,2))/(N1*2); % column 2 _ take FFT of Fy

```

```

absFY=abs(FY(1:N1/2));
PabsFY=absFY.^2;

FZ=fft(data1(:,3))/(N1*2);    % column 3 _ take FFT of Fz
absFZ=abs(FZ(1:N1/2));
PabsFZ=absFZ.^2;

figure(102);
subplot(3,1,1);plot(freq,PabsFX);grid;zoom on ;xlabel('Frequency Hz');ylabel('PSD of Fx
N^2');
axis([0 500 0*10^-3 1000*10^-3])
subplot(3,1,2);plot(freq,PabsFY);grid;zoom on ;xlabel('Frequency Hz');ylabel('PSD of Fy
N^2');
axis([0 500 0*10^-3 1500*10^-3])
subplot(3,1,3);plot(freq,PabsFZ);grid;zoom on ;xlabel('Frequency Hz');ylabel('PSD of Fz
N^2');
axis([0 500 0*10^-3 1500*10^-3])

figure(103);
subplot(3,1,1);plot(tt,data2(:,1));grid;zoom on ;xlabel('Time sec');ylabel('Dynamic radial
force(N)');
axis([0 1 -55 55])
subplot(3,1,2);plot(tt,data2(:,2));grid;zoom on ;xlabel('Time sec');ylabel('Dynamic feed
force(N)');
axis([0 1 -55 55])
subplot(3,1,3);plot(tt,data2(:,3));grid;zoom on ;xlabel('Time sec');ylabel('Dynamic main
force(N)');
axis([0 1 -55 55])

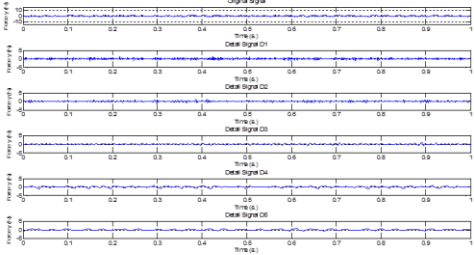
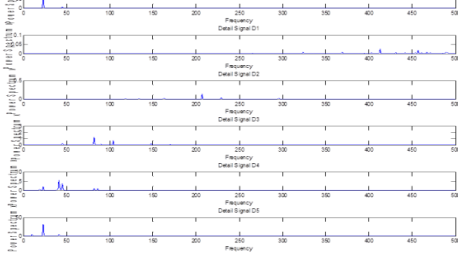
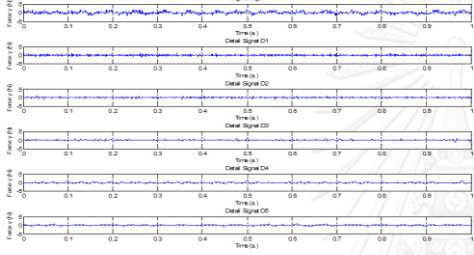
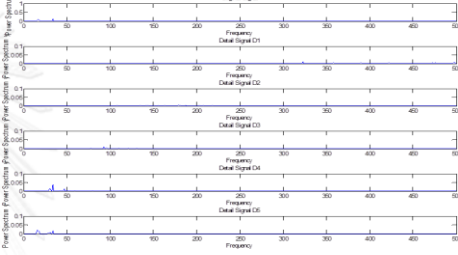
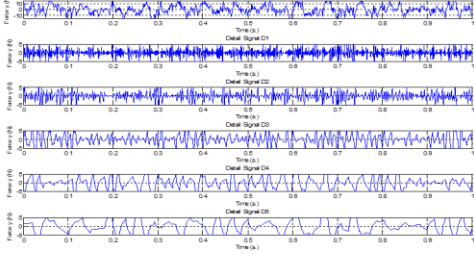
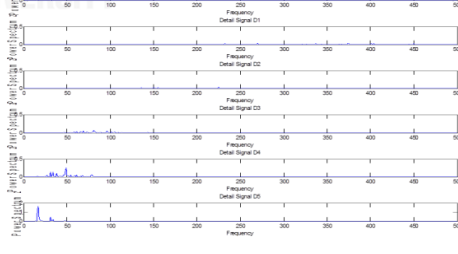
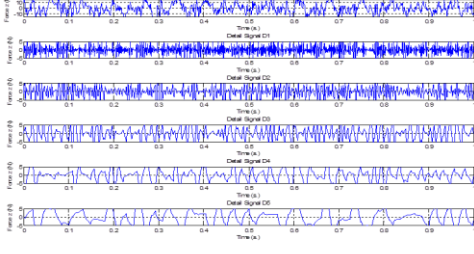
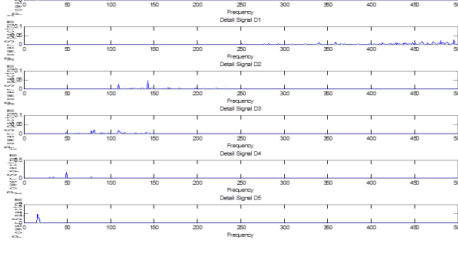
```

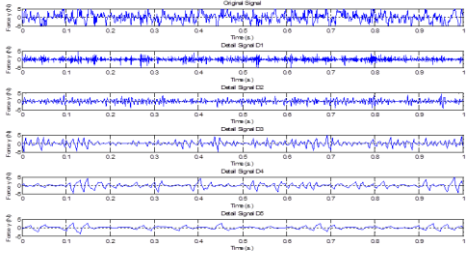
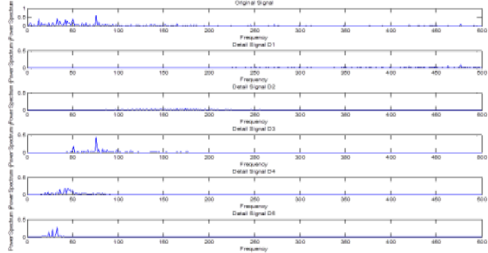
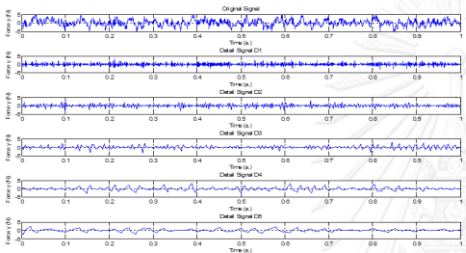
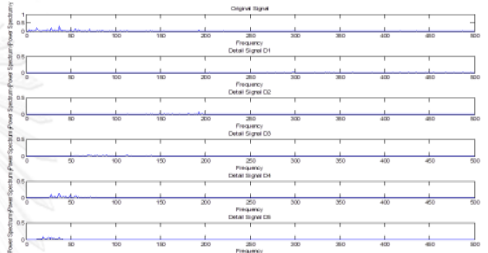
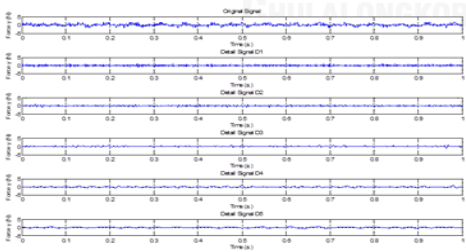
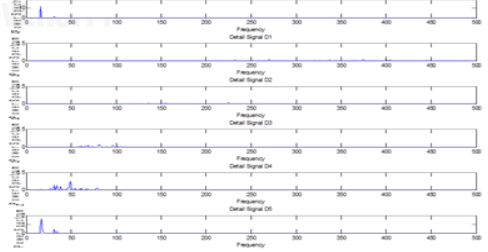
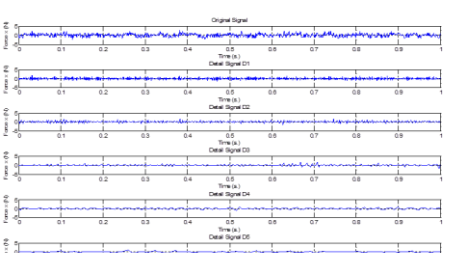
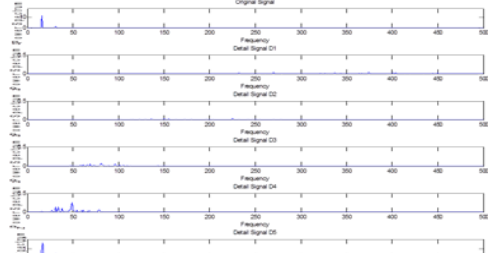

ภาคผนวก ค

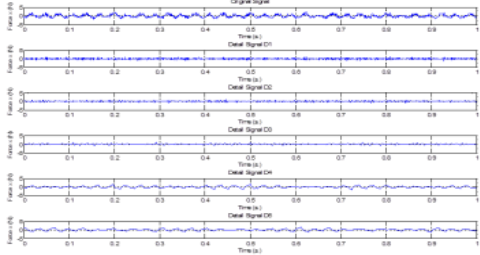
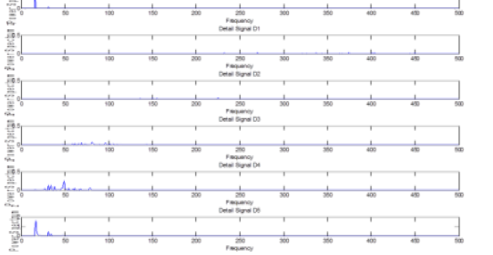

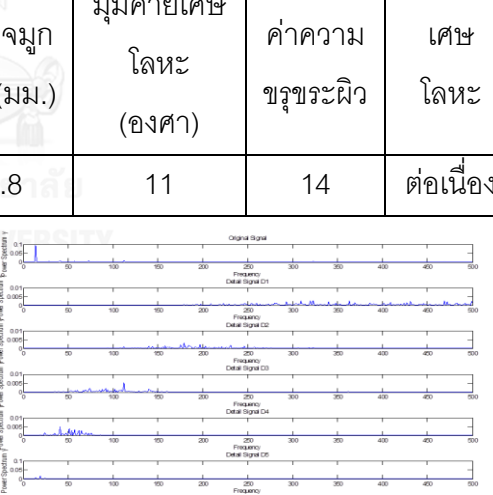
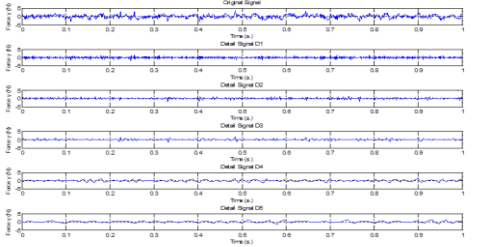
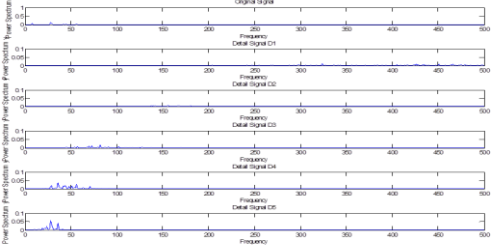
การวิเคราะห์ความซรุขระผิวโดยการแปลงเวฟเลขสำหรับเงื่อนไขการตัดต่างๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

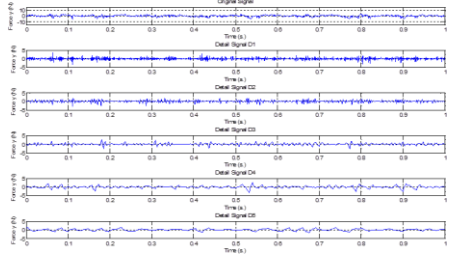
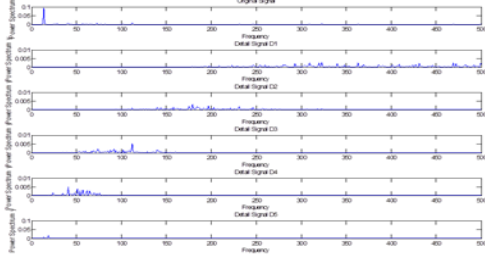
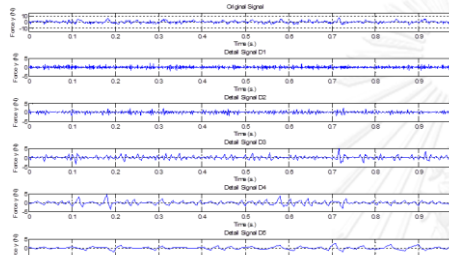
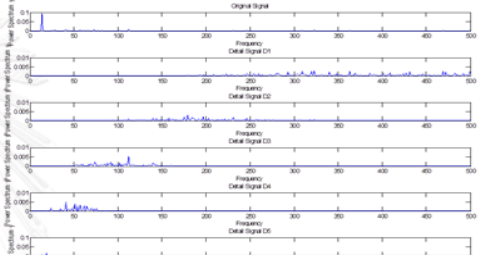
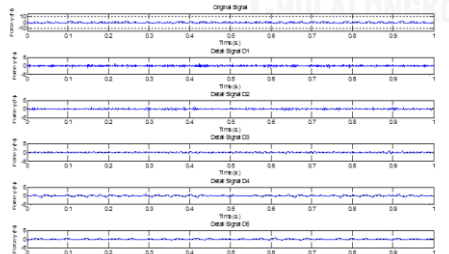
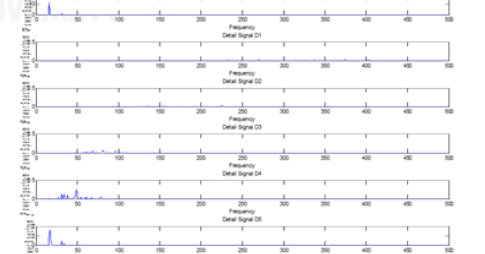
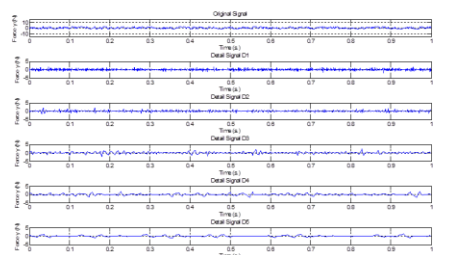
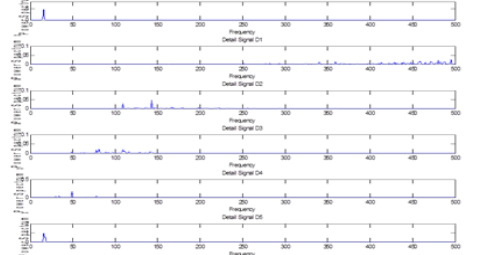
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
1	180	0.2	0.2	0.8	11	24	ต่อเนื่อง
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
2	180	0.2	0.8	0.4	11	22	แตกหัก

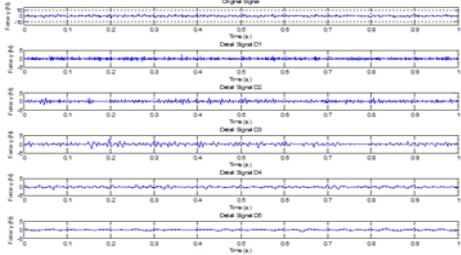
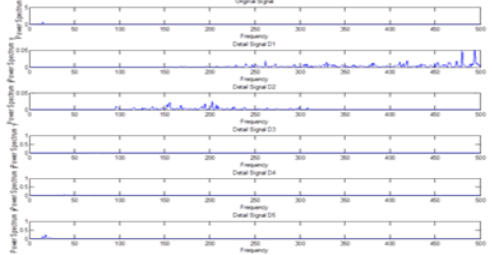
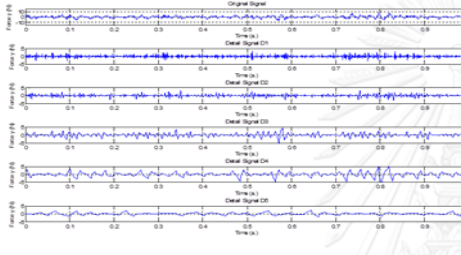
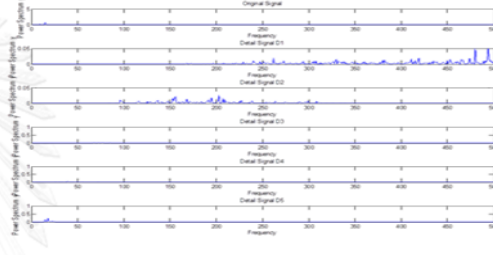
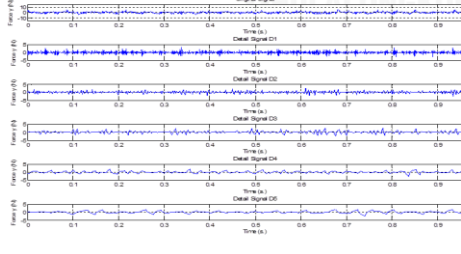
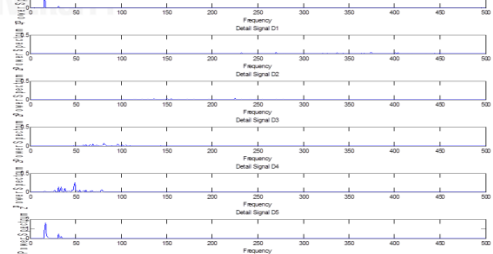
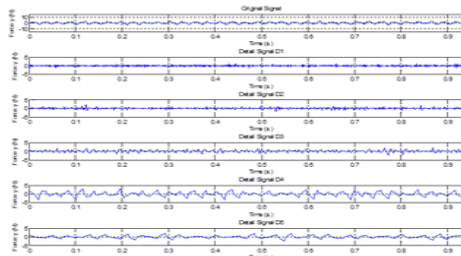
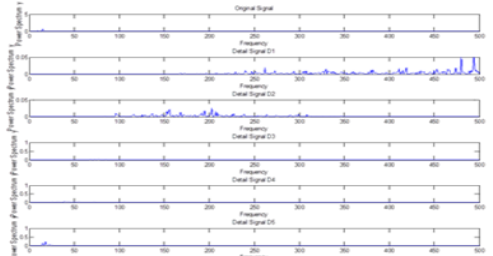
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
3	180	0.3	0.2	0.4	11	24	ต่อเนื่อง
							
							
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
4	100	0.1	0.8	0.8	-6	12	แตกหัก
							
							

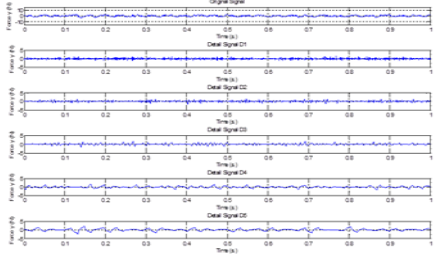
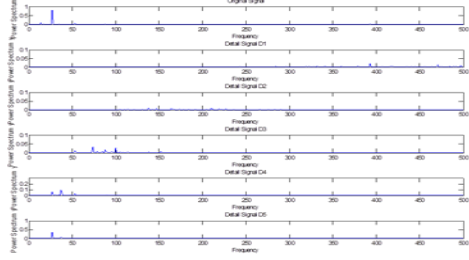
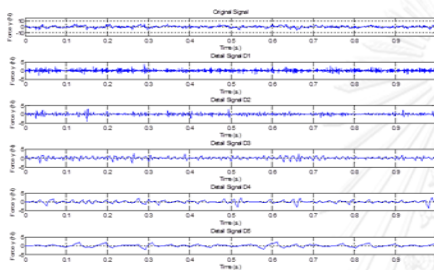
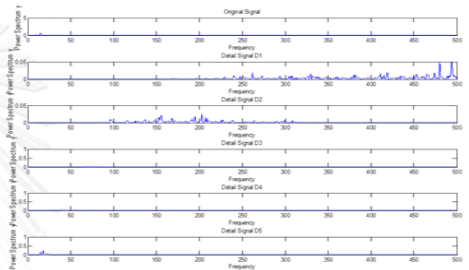
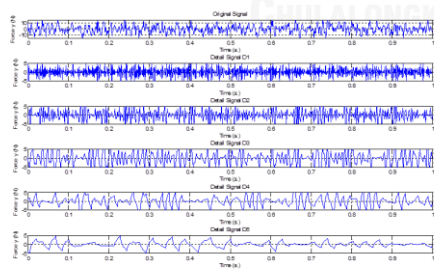
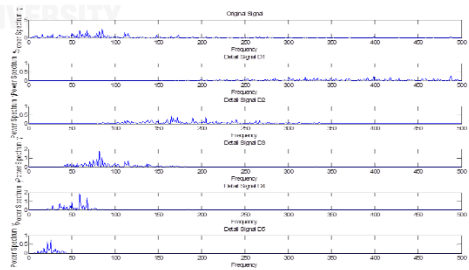
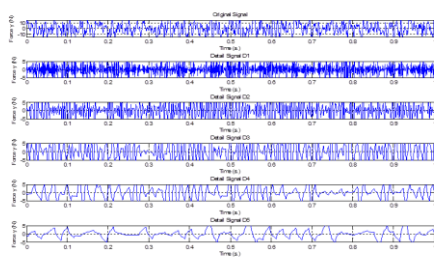
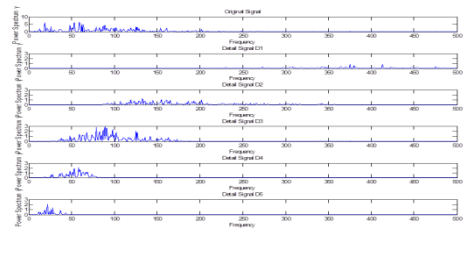
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
5	180	0.2	0.8	0.8	11	25	แตกหัก
							
							
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
6	100	0.1	0.2	0.8	11	14	ต่อเนื่อง
							
							

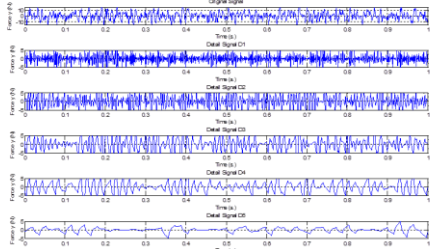
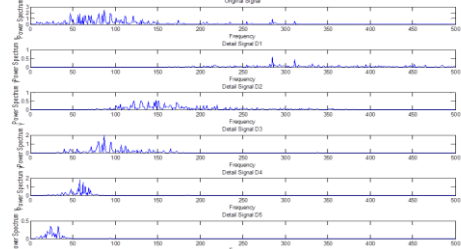
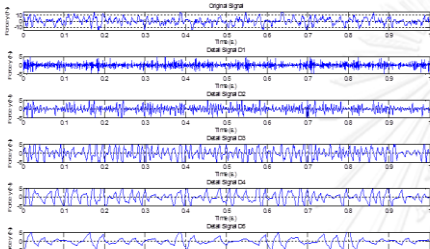
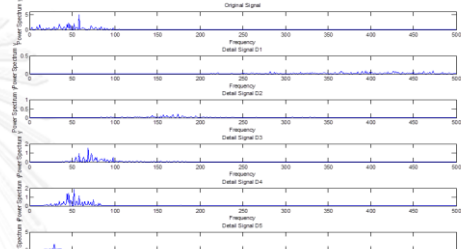
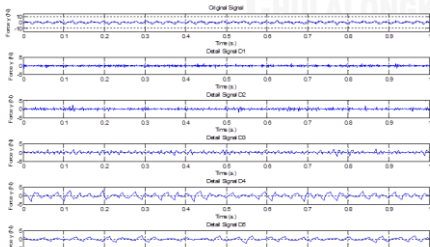
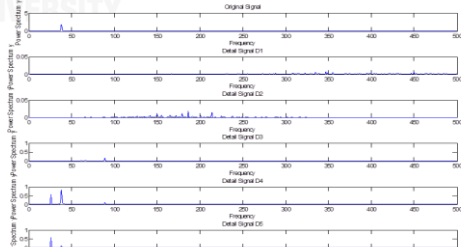
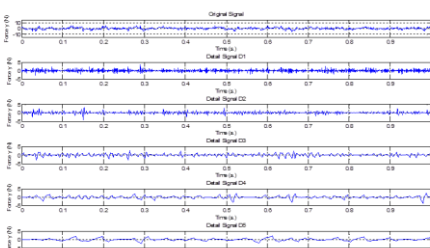
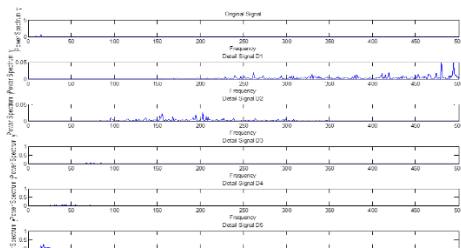
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุก มีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)	ค่าความ ขรุขระผิว	เศษ โลหะ
7	180	0.3	0.5	0.4	11	22	ต่อเนื่อง
							
8	100	0.1	0.8	0.8	11	14	ต่อเนื่อง
							
							

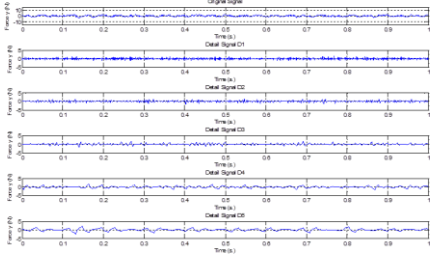
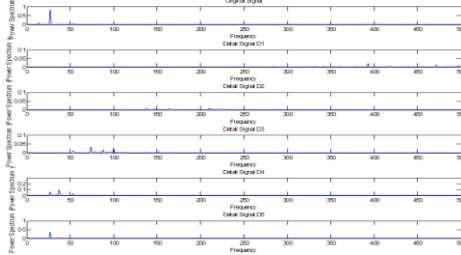
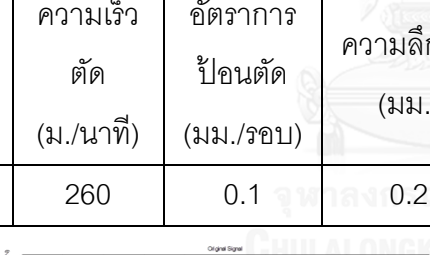

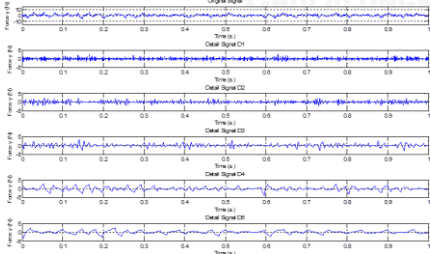
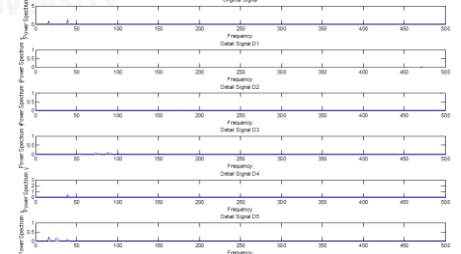
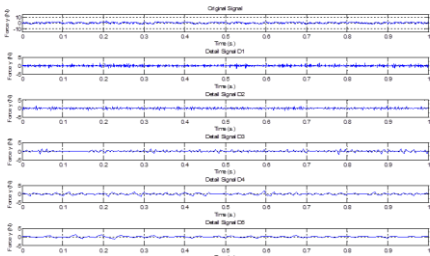
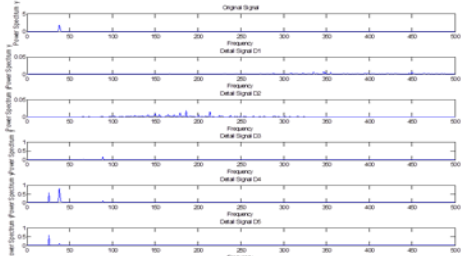
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุก มีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)	ค่าความ ขรุขระผิว	เศษ โลหะ
9	260	0.2	0.5	0.4	11	31	ต่อเนื่อง
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุก มีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)	ค่าความ ขรุขระผิว	เศษ โลหะ
10	260	0.1	0.2	0.4	11	31	ต่อเนื่อง

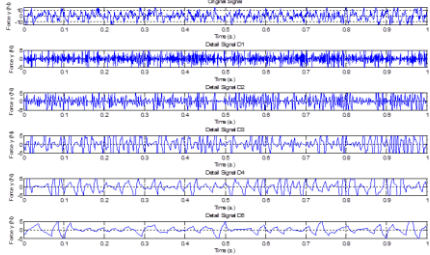
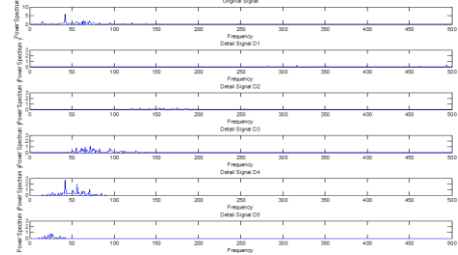
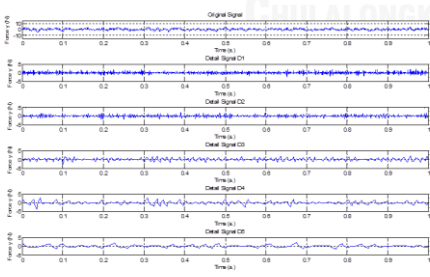
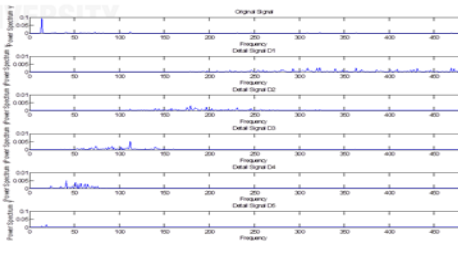
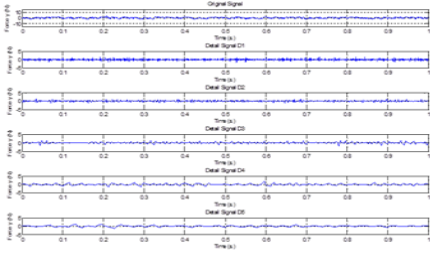
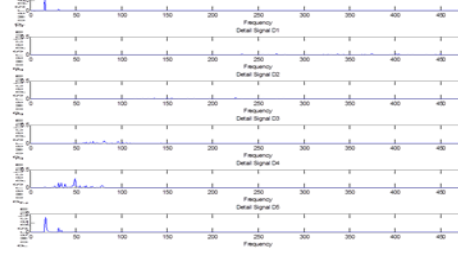
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
11	100	0.1	0.2	0.4	-6	14	ต่อเนื่อง
							
							
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
12	100	0.2	0.2	0.8	11	14	ต่อเนื่อง
							
							

No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุก มีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)	ค่าความ ขรุขระผิว	เศษ โลหะ
13	180	0.1	0.2	0.4	-6	25	ต่อเนื่อง
							
							
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุก มีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)	ค่าความ ขรุขระผิว	เศษ โลหะ
14	100	0.1	0.2	0.4	11	13	ต่อเนื่อง
							
							

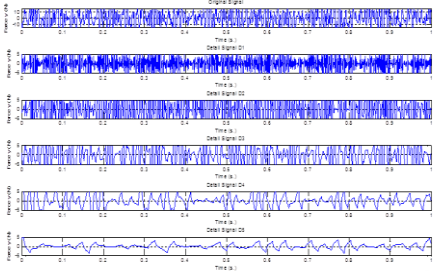
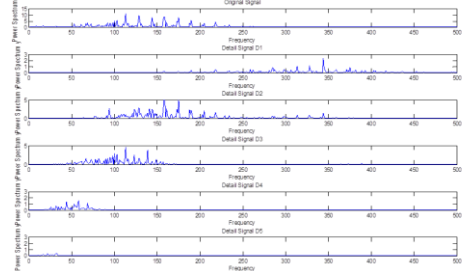
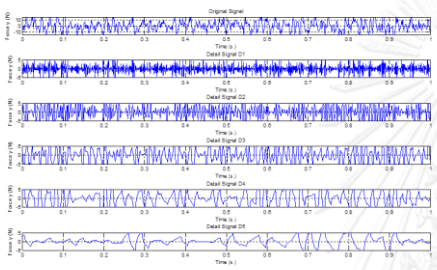
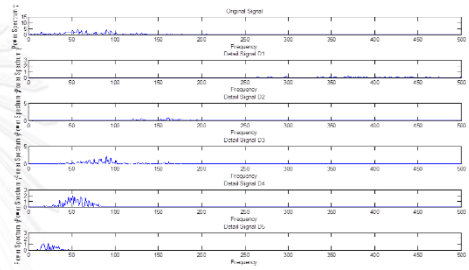
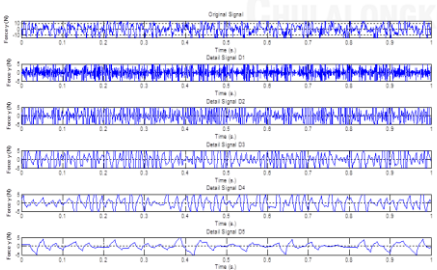
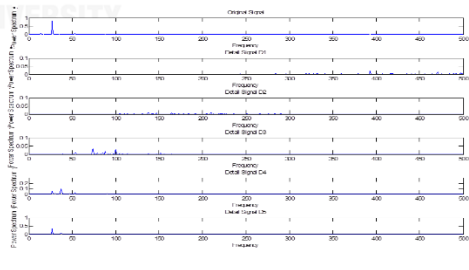
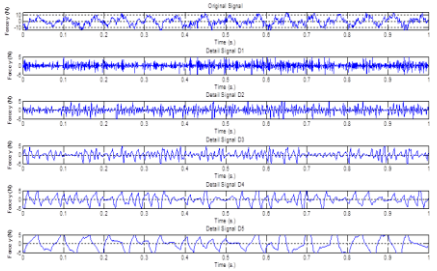
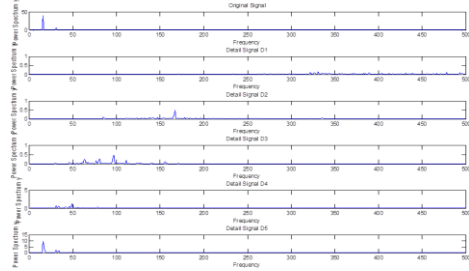
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
15	180	0.3	0.5	0.8	-6	25	ต่อเนื่อง
							
							
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
16	260	0.1	0.8	0.4	-6	35	แตกหัก
							
							

No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
17	260	0.2	0.8	0.8	-6	35	แตกหัก
							
							
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
18	260	0.1	0.2	0.4	-6	35	ต่อเนื่อง
							
							

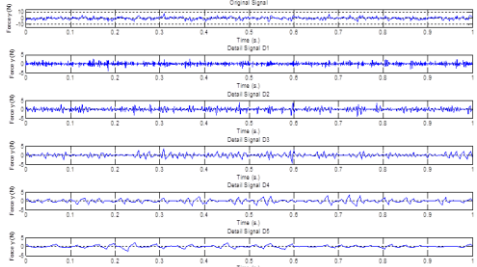
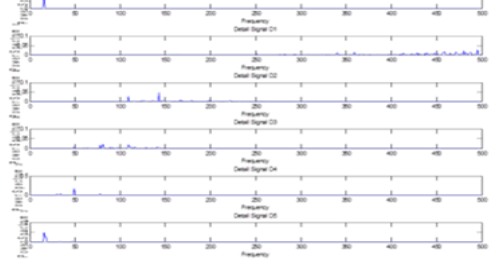
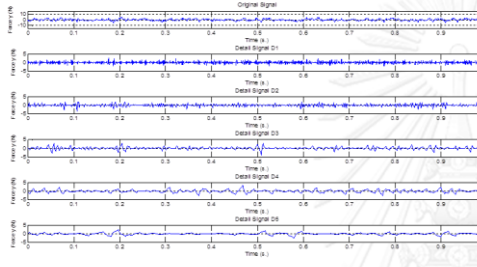
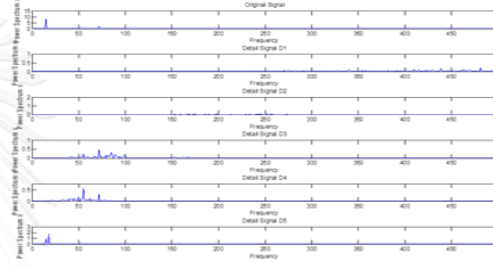
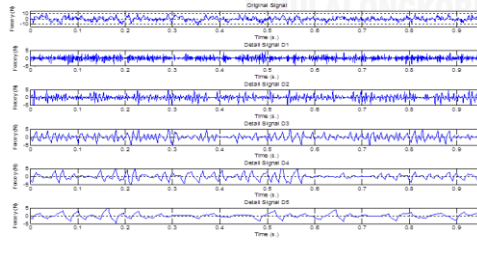
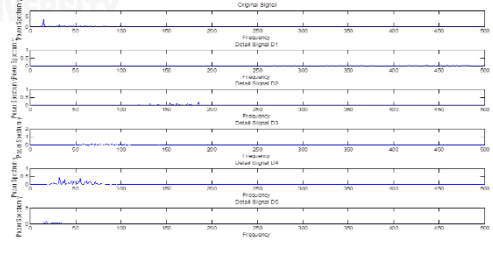
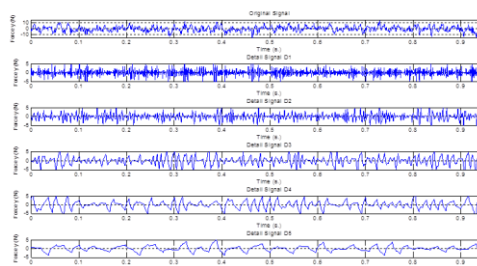
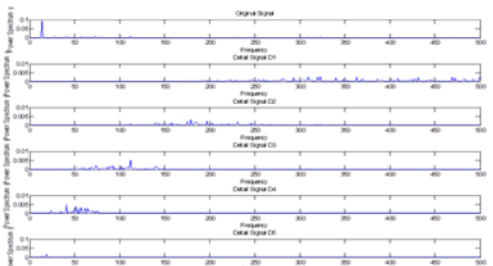
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
19	260	0.1	0.2	0.8	-6	36	ต่อเนื่อง
							
20	260	0.1	0.2	0.8	11	35	ต่อเนื่อง
							
							
							

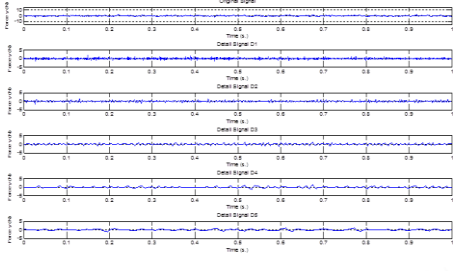
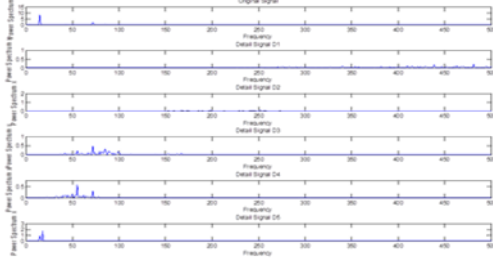
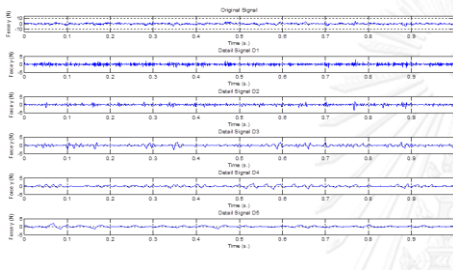
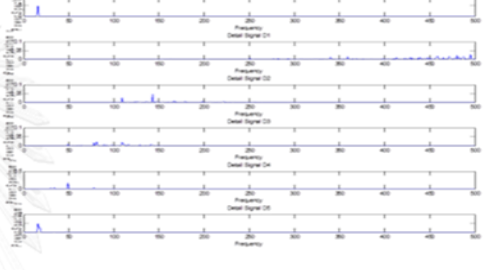
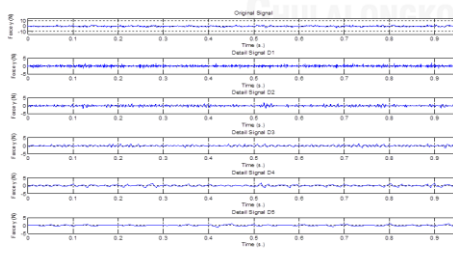
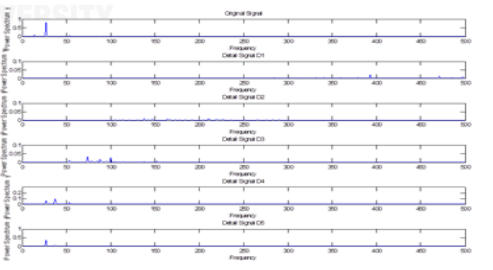
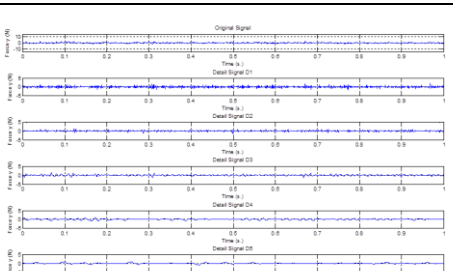
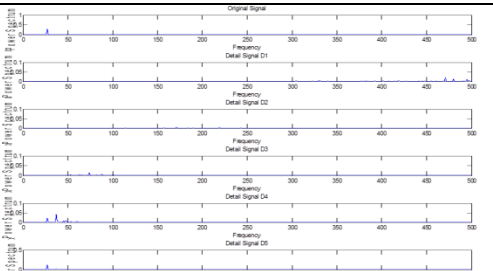
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุก มีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)	ค่าความ ขรุขระผิว	เศษ โลหะ
21	180	0.3	0.5	0.4	-6	25	แตกหัก
							
22	100	0.1	0.5	0.4	-6	14	ต่อเนื่อง
							
							

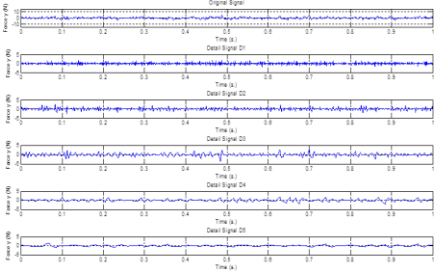
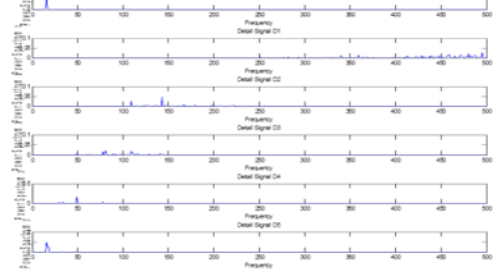
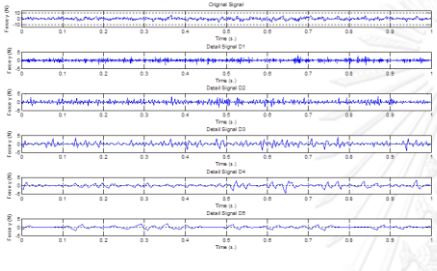
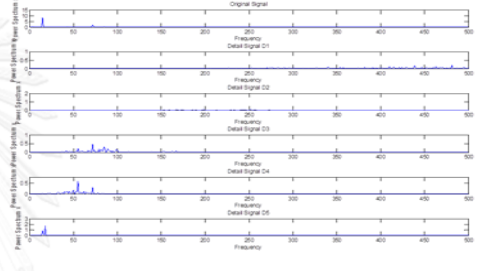
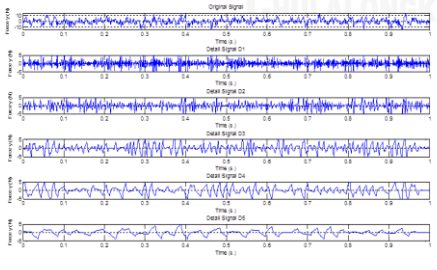
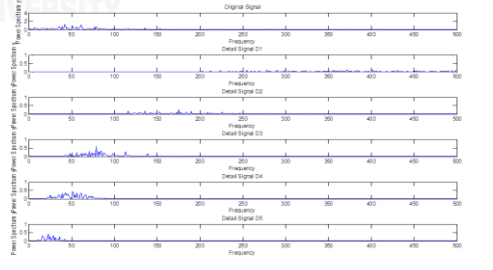
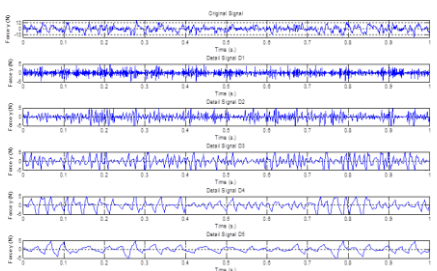
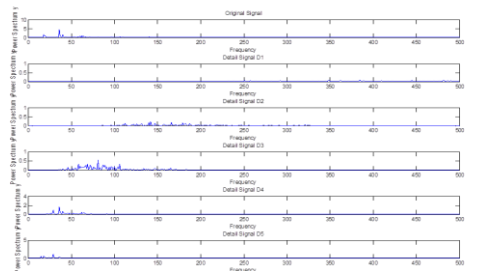
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
23	100	0.1	0.5	0.4	11	13	ต่อเนื่อง
24	100	0.3	0.2	0.8	-6	14	แตกหัก

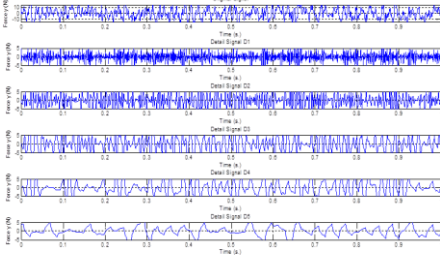
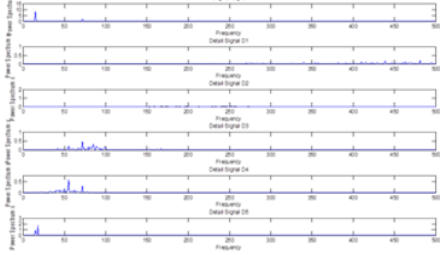
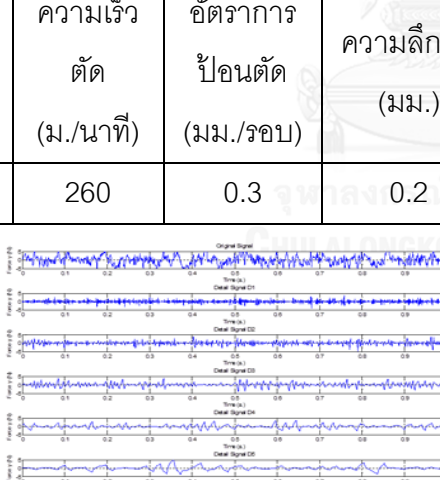

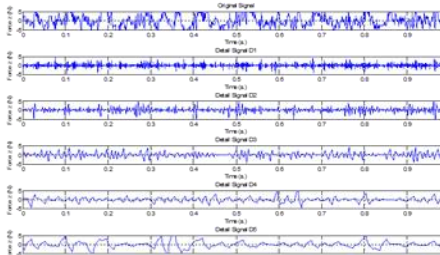
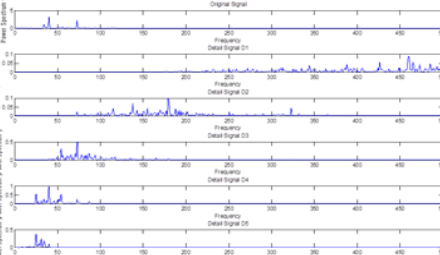
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
25	180	0.2	0.5	0.4	-6	25	แตกหัก
							
							
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
26	260	0.2	0.5	0.4	-6	32	แตกหัก
							
							

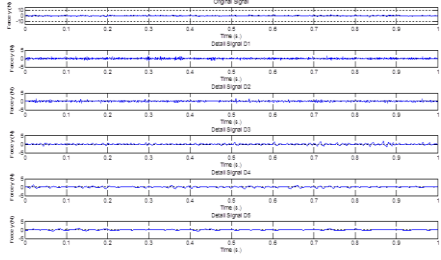
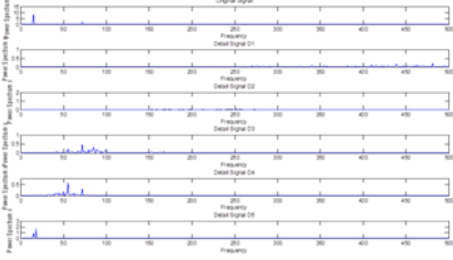
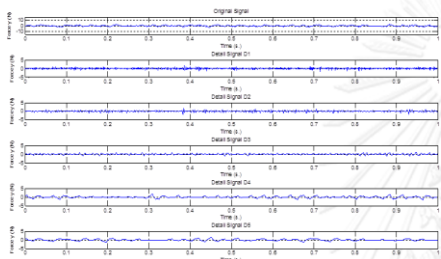
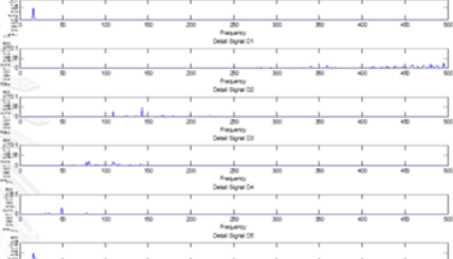
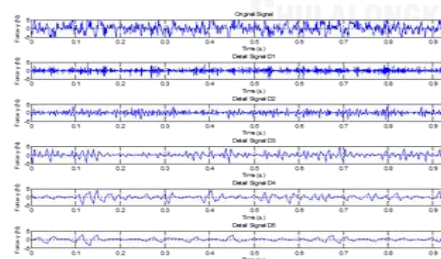
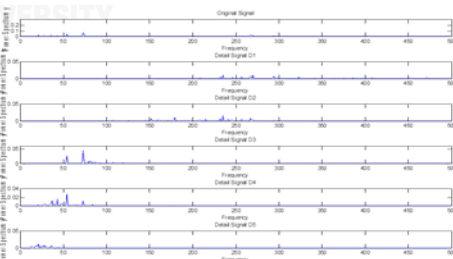
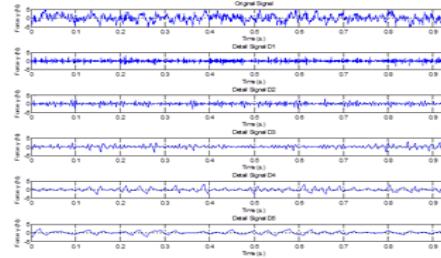
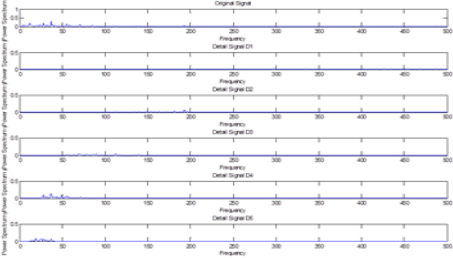
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
27	100	0.1	0.5	0.8	11	14	ต่อเนื่อง
28	260	0.2	0.2	0.8	11	35	ต่อเนื่อง

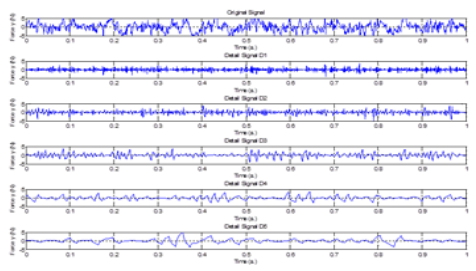
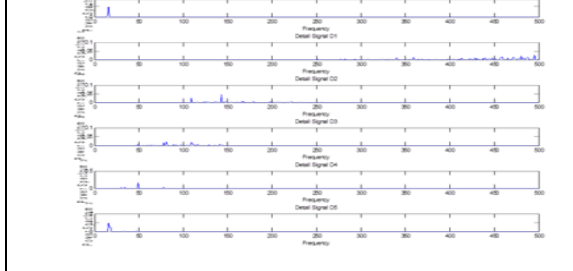
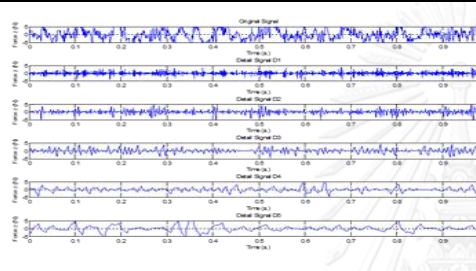
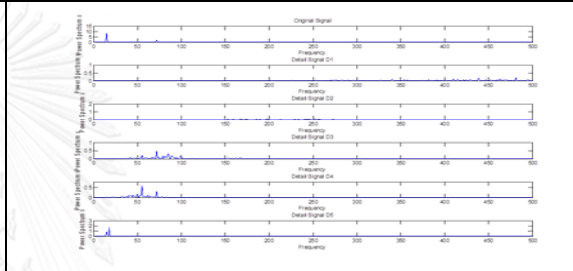
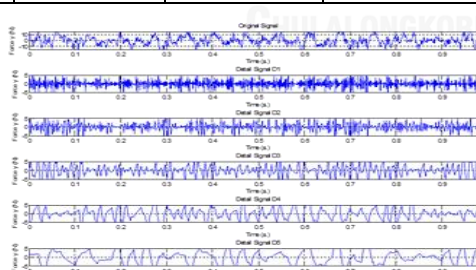
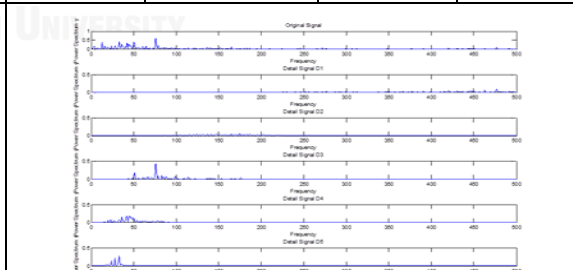
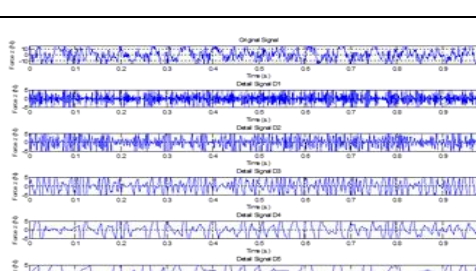
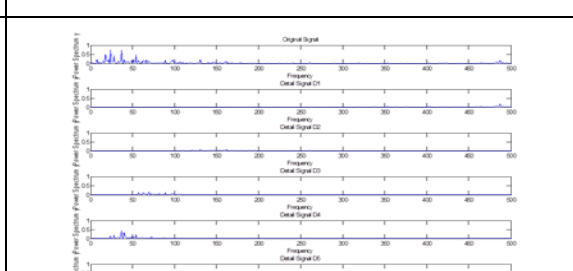
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
29	180	0.2	0.5	0.8	11	25	ต่อเนื่อง
							
							
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
30	100	0.2	0.8	0.8	-6	14	แตกหัก
							
							

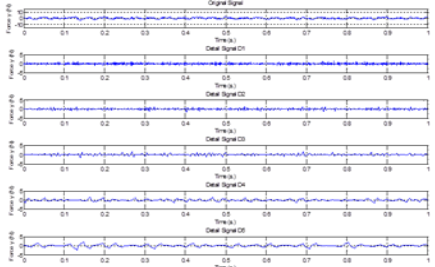
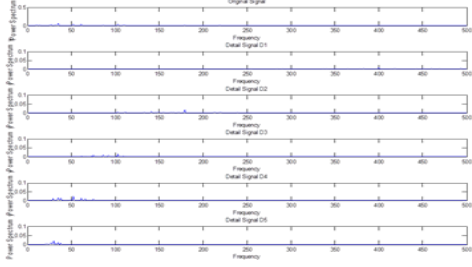
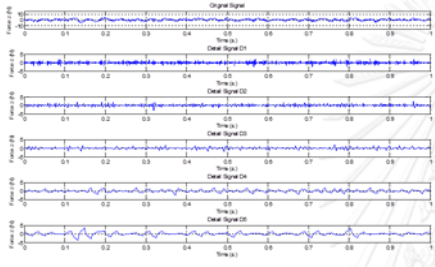
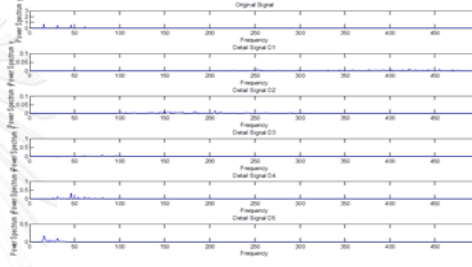
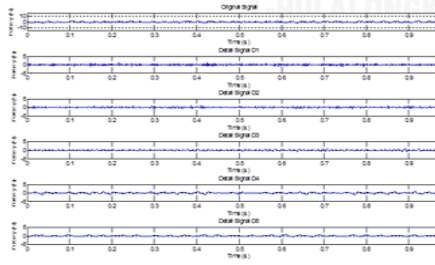
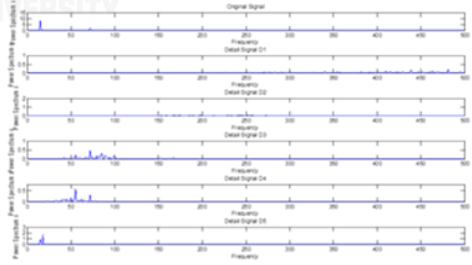
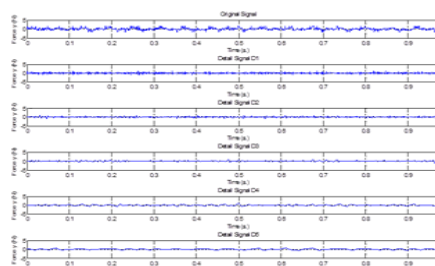
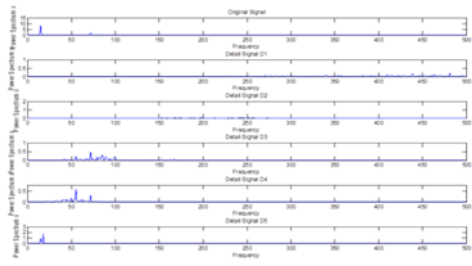
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
31	100	0.2	0.2	0.4	-6	14	ต่อเนื่อง
							
							
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
32	260	0.3	0.5	0.8	-6	35	ต่อเนื่อง
							
							

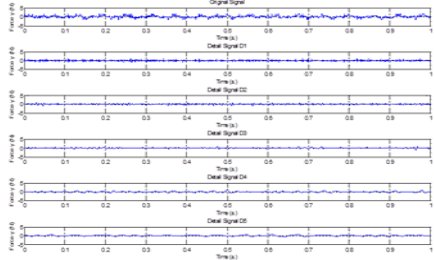
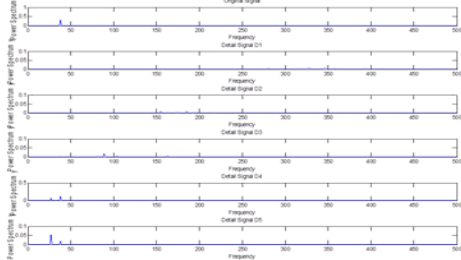
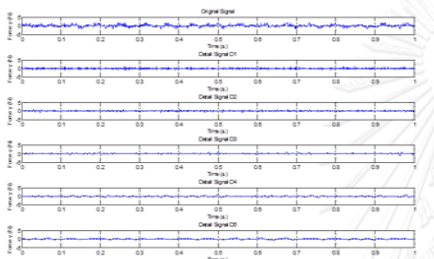
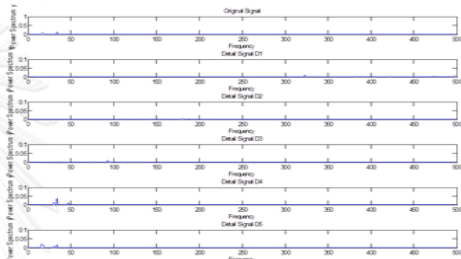
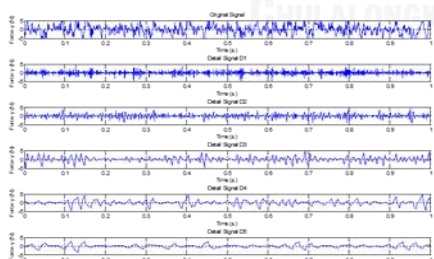
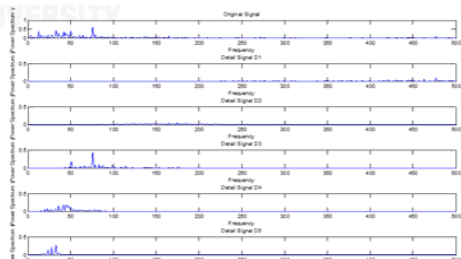
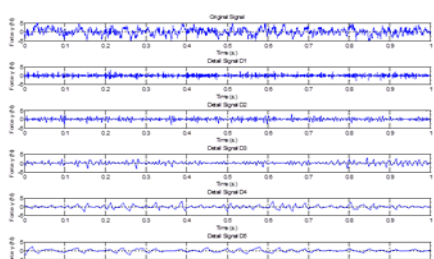
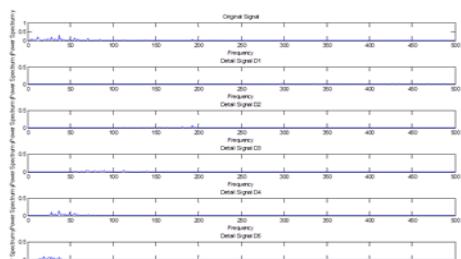
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
33	180	0.1	0.8	0.4	11	22	ต่อเนื่อง
							
							
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
34	260	0.3	0.8	0.4	-6	32	แตกหัก
							
							

No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุก มีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)	ค่าความ ขรุขระผิว	เศษ โลหะ
35	180	0.3	0.8	0.8	-6	25	แตกหัก
							
36	260	0.3	0.2	0.8	-6	35	แตกหัก
							
							

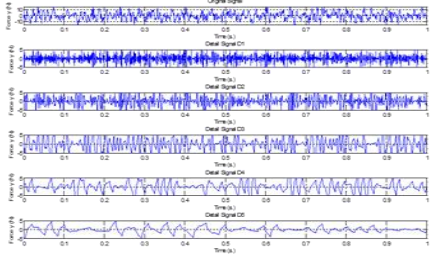
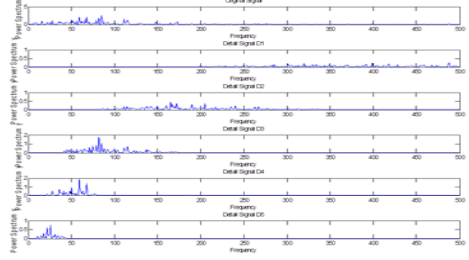
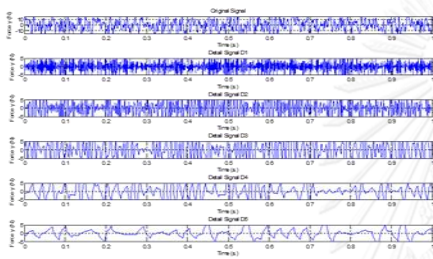
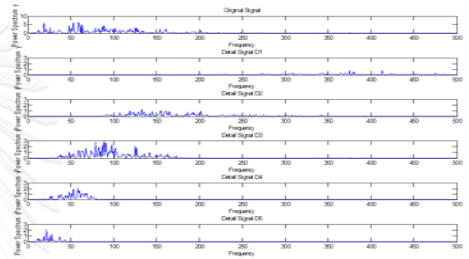
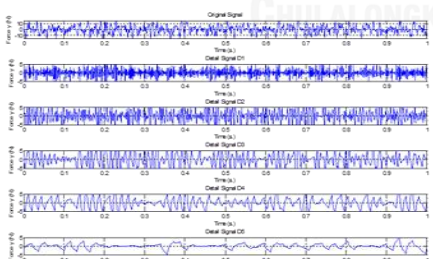
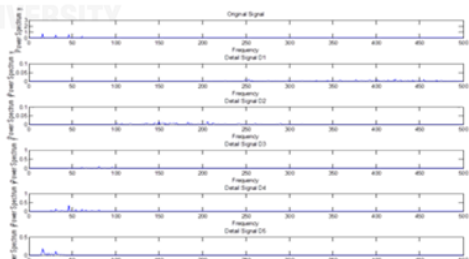
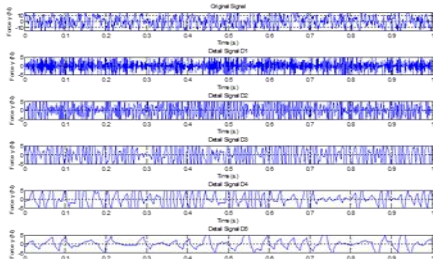
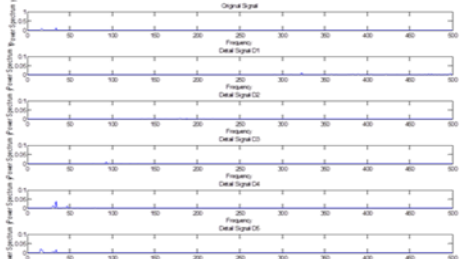
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุ่มกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
37	100	0.1	0.8	0.4	11	13	ต่อเนื่อง
							
							
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุ่มกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
38	100	0.3	0.8	0.4	11	13	แตกหัก
							
							

No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
39	260	0.3	0.8	0.8	11	14	แตกหัก
							
							
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
40	100	0.1	0.8	0.4	-6	35	แตกหัก
							
							

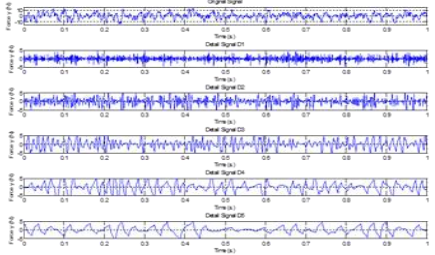
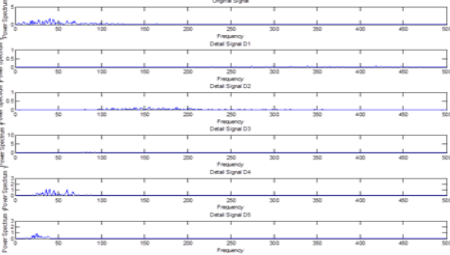
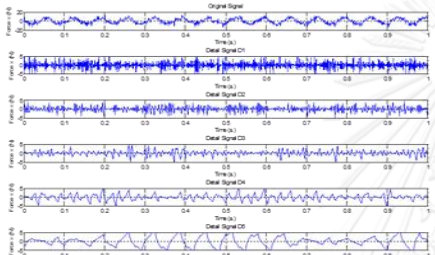
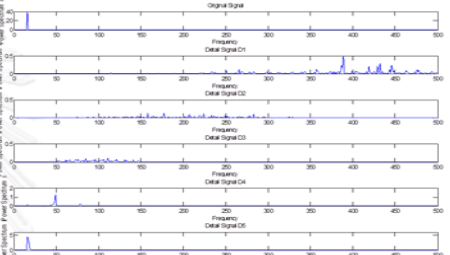
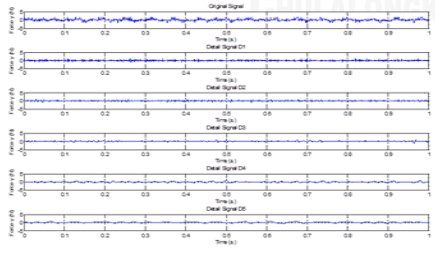
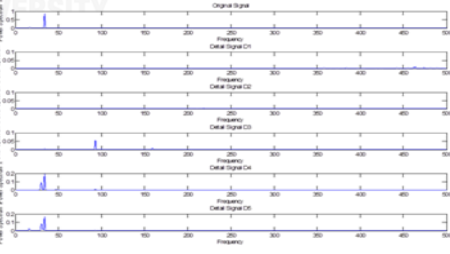
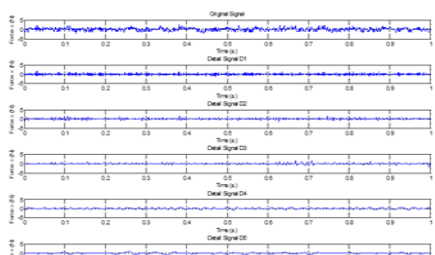
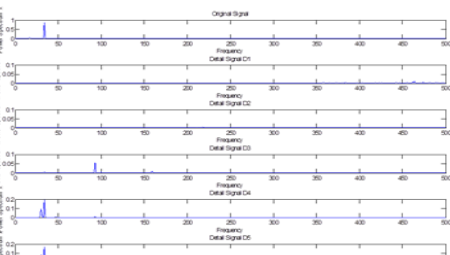
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุมก มีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)	ค่าความ ขรุขระผิว	เศษ โลหะ
41	100	0.2	0.5	0.4	11	13	ต่อเนื่อง
							
							
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุมก มีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)	ค่าความ ขรุขระผิว	เศษ โลหะ
42	180	0.3	0.2	0.8	11	25	ต่อเนื่อง
							
							

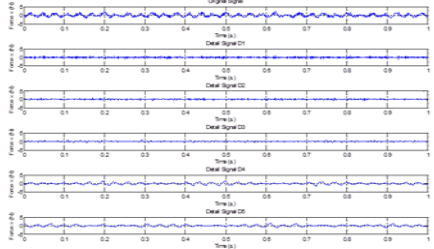
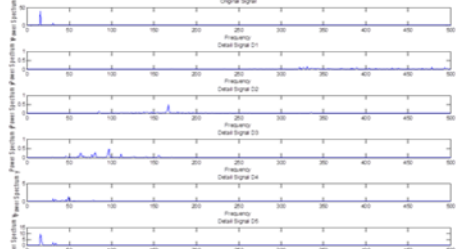
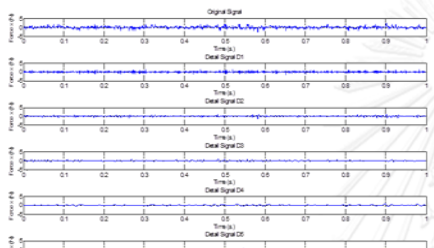
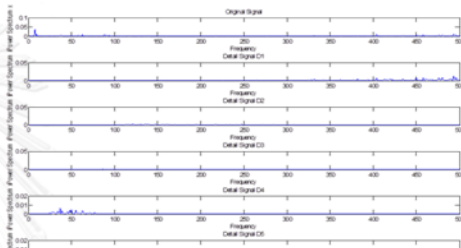
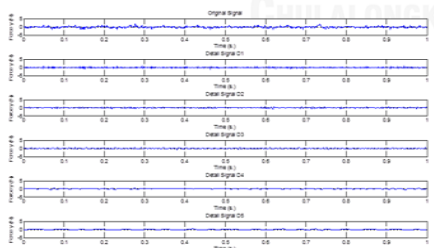
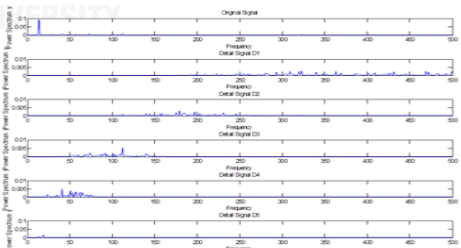
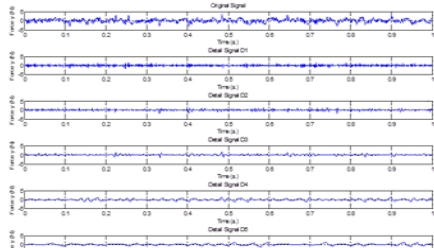
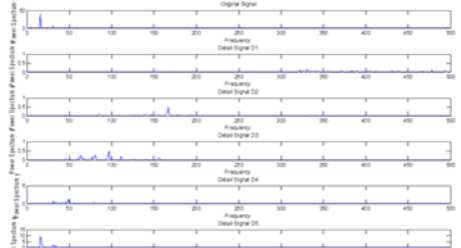
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุ่มกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
43	260	0.1	0.8	0.8	-6	35	ต่อเนื่อง
							
							
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุ่มกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
44	260	0.2	0.8	0.8	11	35	แตกหัก
							
							

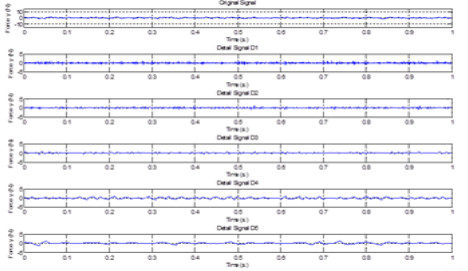
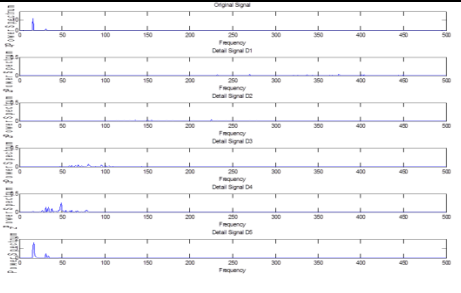
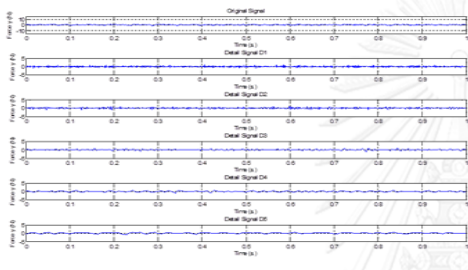
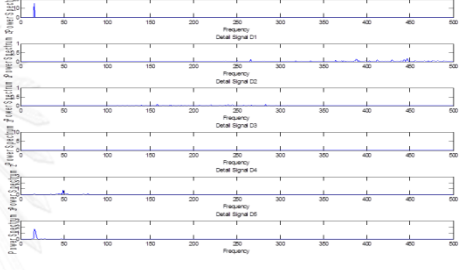
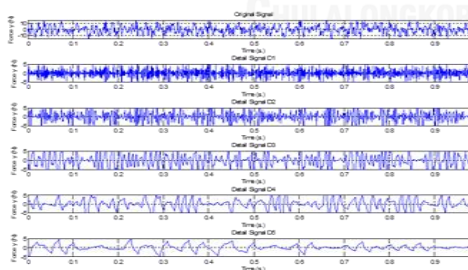
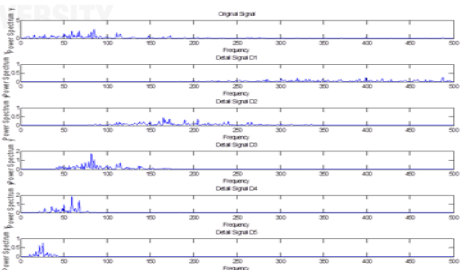
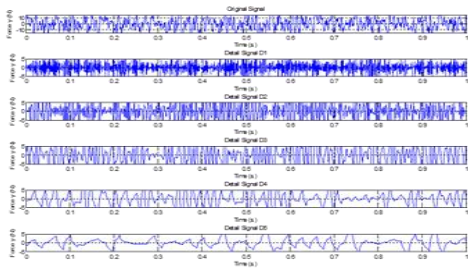
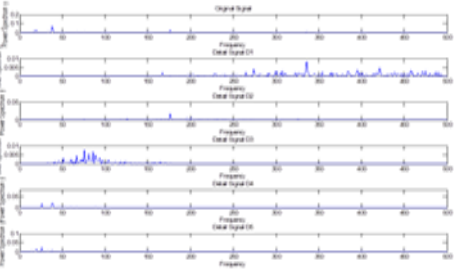
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
45	260	0.2	0.5	0.8	11	35	ต่อเนื่อง
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
46	180	0.3	0.5	0.8	11	25	ต่อเนื่อง

No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
47	260	0.3	0.8	0.4	11	31	แตกหัก
							
							
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
48	100	0.3	0.5	0.4	-6	14	แตกหัก
							
							

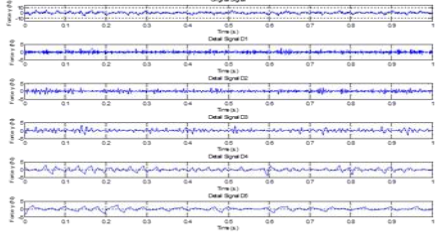
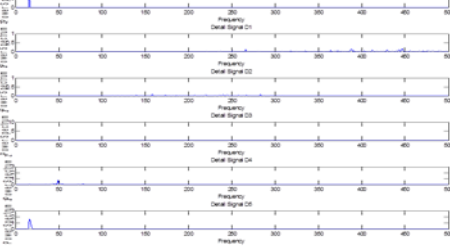
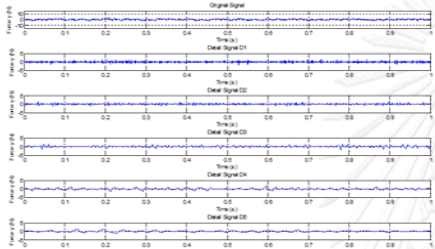
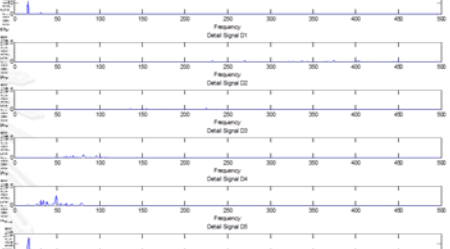
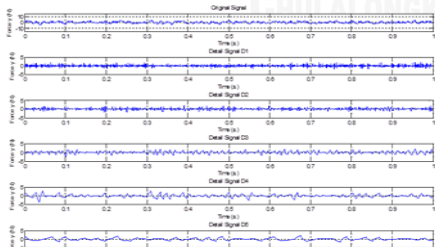
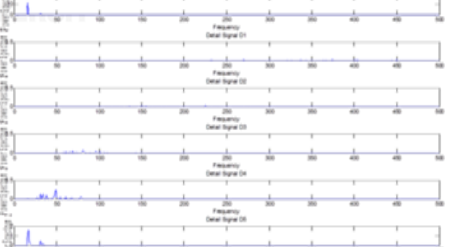
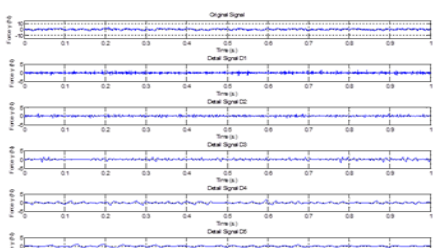
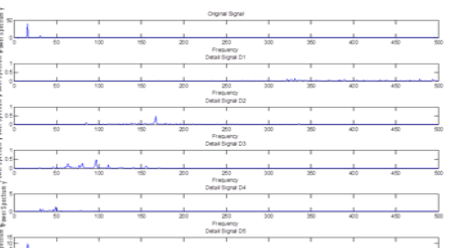
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
49	260	0.2	0.8	0.4	-6	32	แตกหัก
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
50	260	0.2	0.8	0.4	11	31	แตกหัก

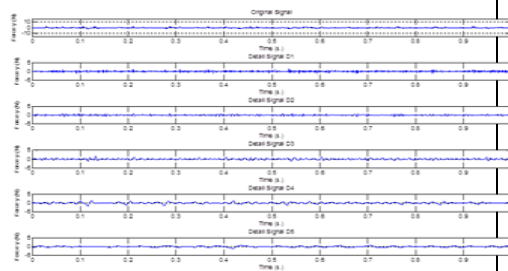
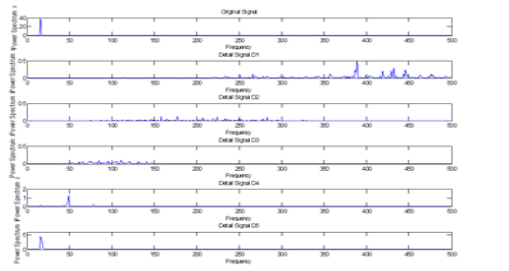
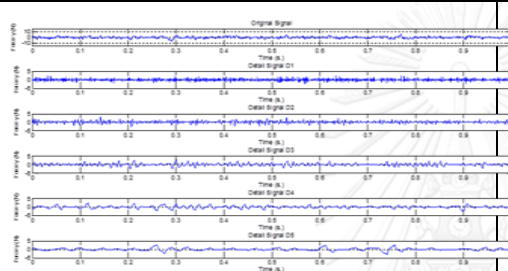
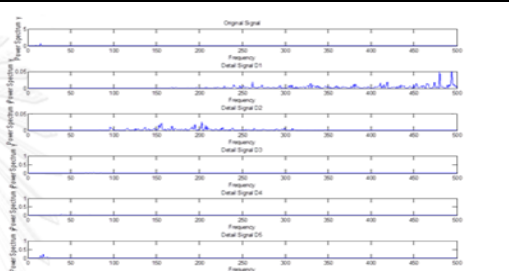
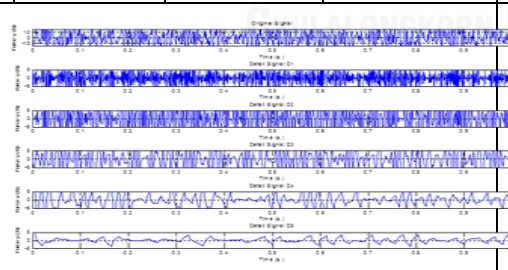
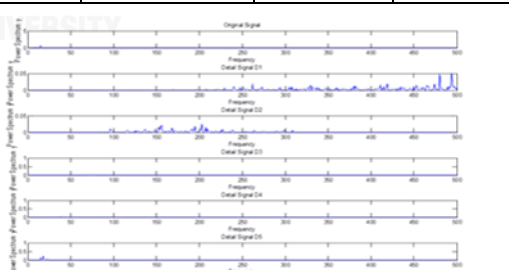
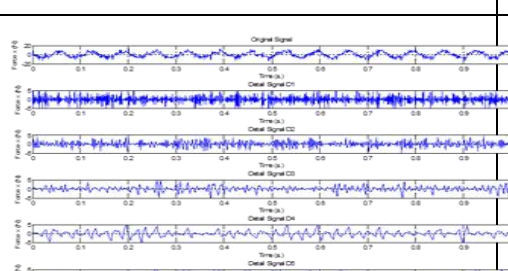
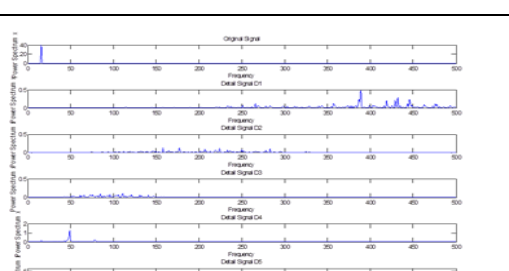
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
51	180	0.2	0.8	0.4	-6	25	แตกหัก
							
							
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
52	260	0.1	0.5	0.8	-6	35	ต่อเนื่อง
							
							

No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุก มีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)	ค่าความ ขรุขระผิว	เศษ โลหะ
53	180	0.2	0.5	0.4	11	24	ต่อเนื่อง
							
							
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุก มีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)	ค่าความ ขรุขระผิว	เศษ โลหะ
54	180	0.2	0.2	0.4	-6	22	ต่อเนื่อง
							
							

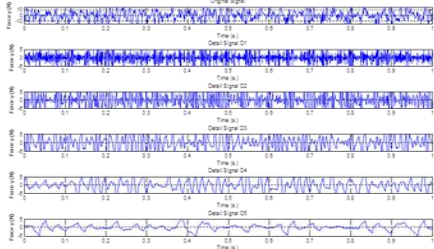
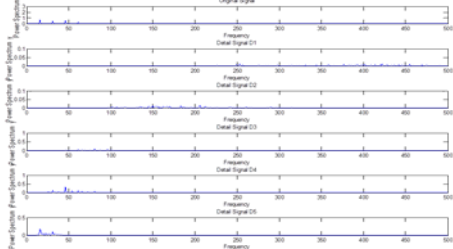
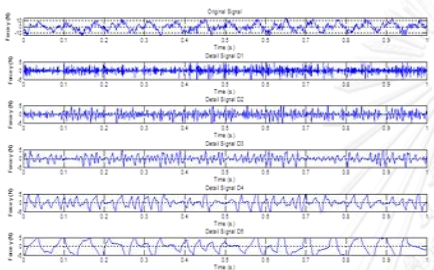
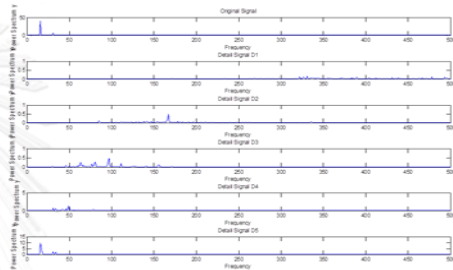
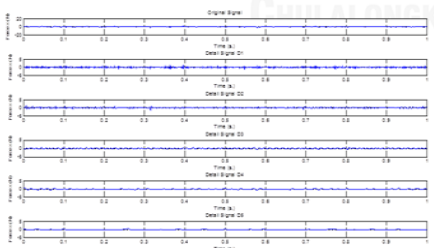
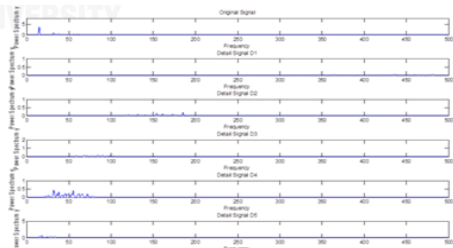
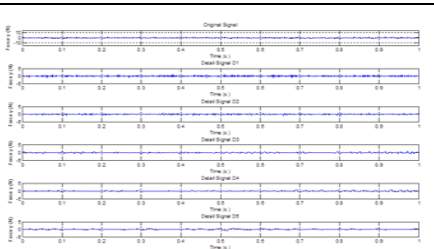
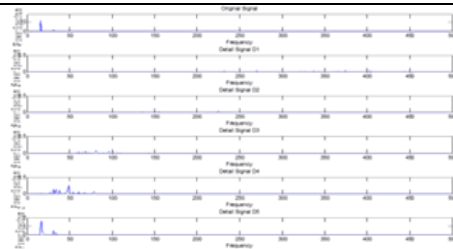
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
55	100	0.2	0.5	0.8	-6	14	ต่อเนื่อง
							
							
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
56	260	0.3	0.2	0.4	-6	32	แตกหัก
							
							

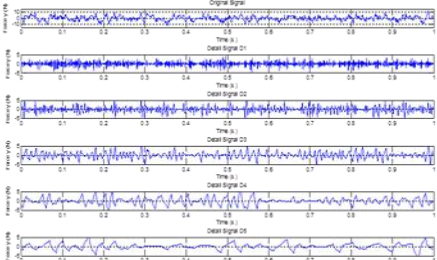
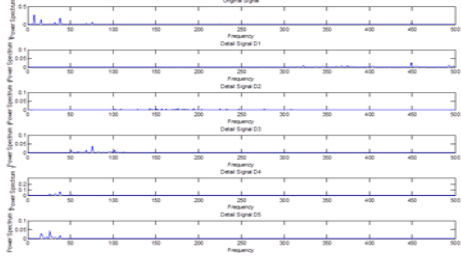
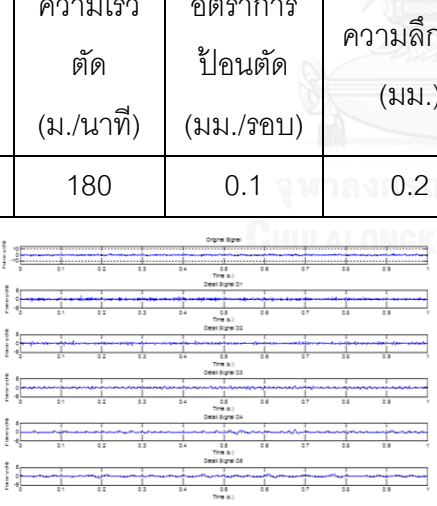
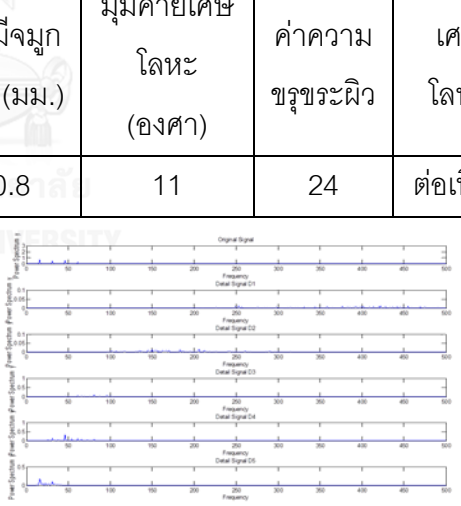
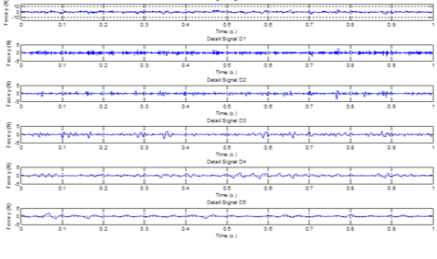
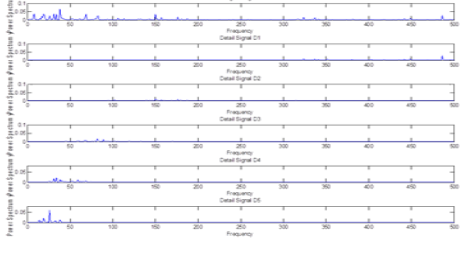
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
57	180	0.3	0.2	0.8	-6	25	แตกหัก
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
58	260	0.3	0.5	0.4	11	25	ต่อเนื่อง

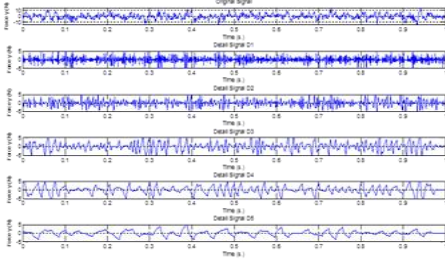
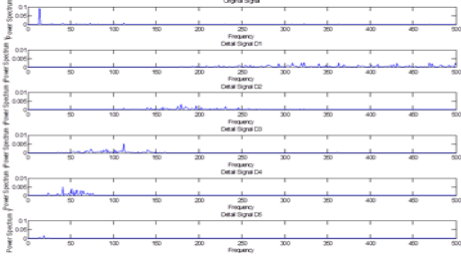
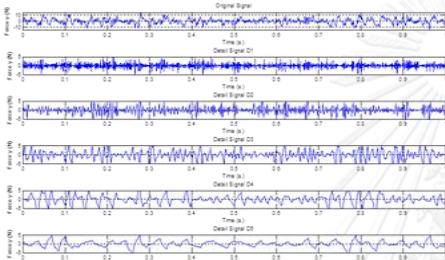
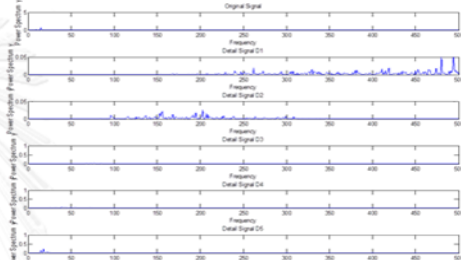
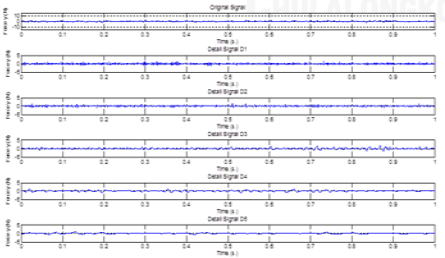
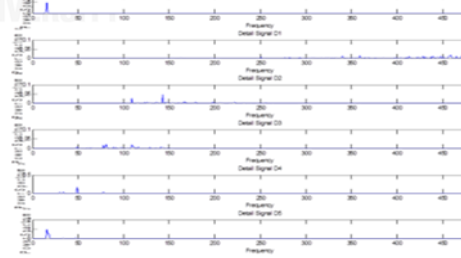
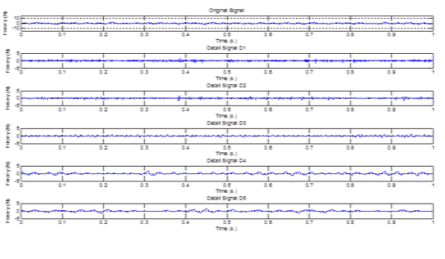
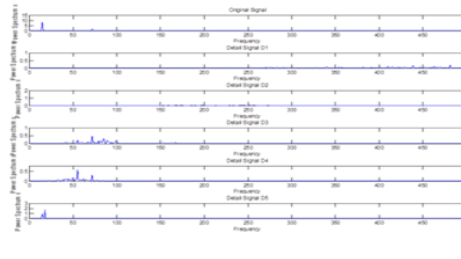
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุมก มีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)	ค่าความ ขรุขระผิว	เศษ โลหะ
59	100	0.1	0.5	0.8	-6	15	ต่อเนื่อง
							
							
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุมก มีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)	ค่าความ ขรุขระผิว	เศษ โลหะ
60	180	0.2	0.2	0.4	11	22	ต่อเนื่อง
							
							

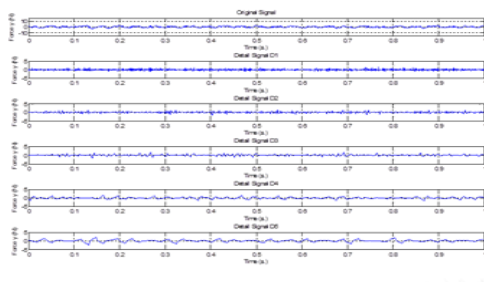
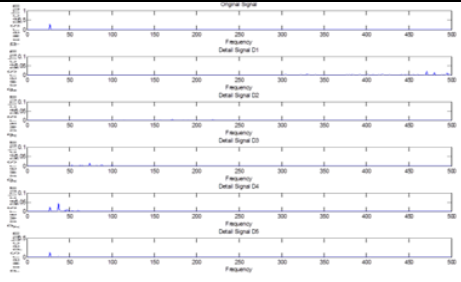
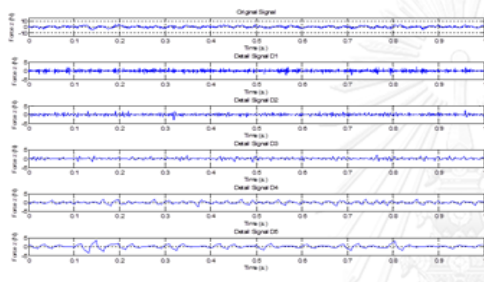
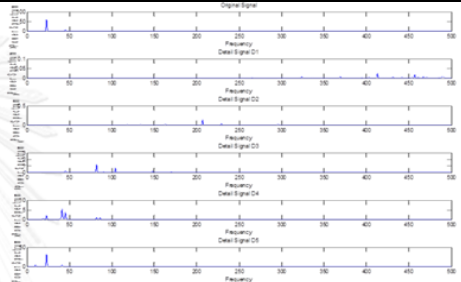
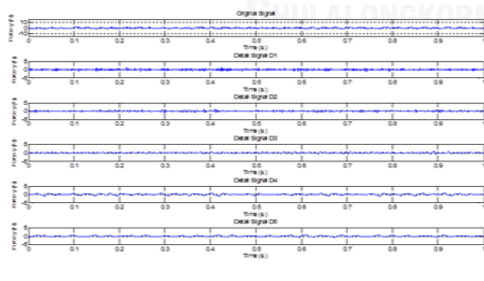
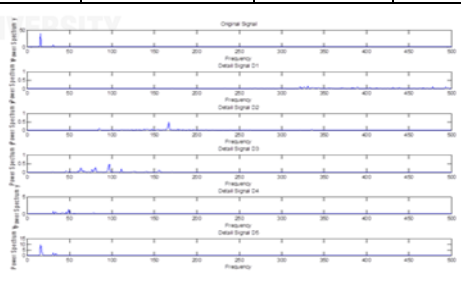
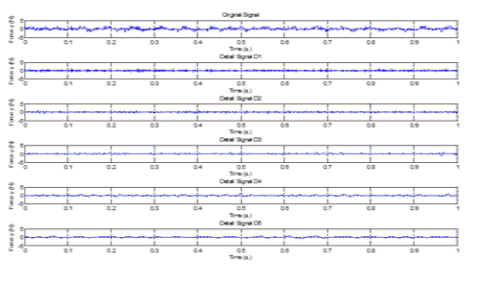
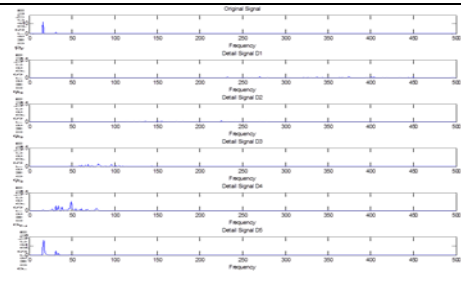
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุก มีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)	ค่าความ ขรุขระผิว	เศษ โลหะ
61	180	0.1	0.5	0.8	-6	25	ต่อเนื่อง
							
							
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุก มีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)	ค่าความ ขรุขระผิว	เศษ โลหะ
62	180	0.3	0.8	0.4	11	22	แตกหัก
							
							

No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
63	100	0.2	0.8	0.4	11	13	แตกหัก
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
63	100	0.2	0.8	0.4	11	13	แตกหัก

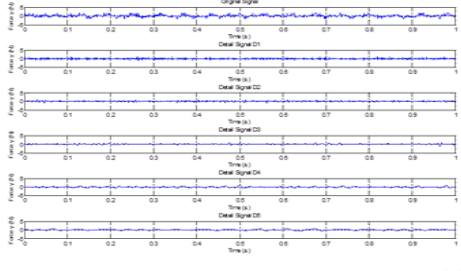
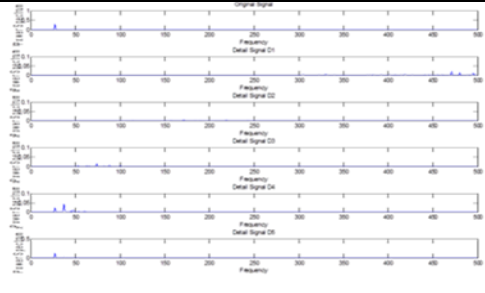
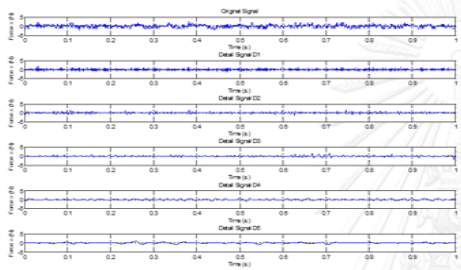
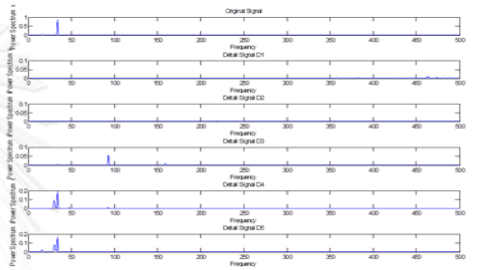
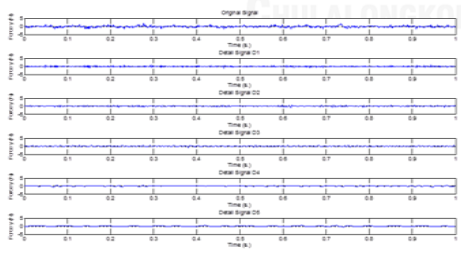
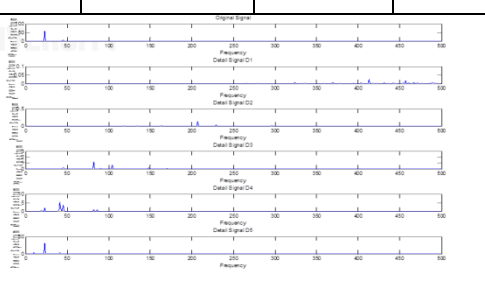
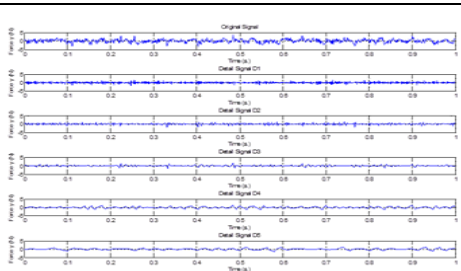
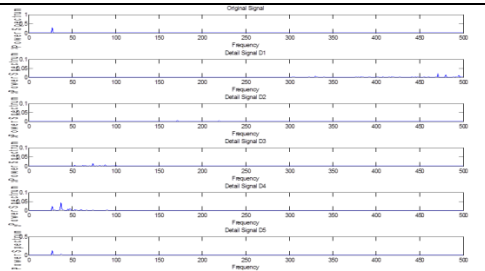
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุ่มกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
64	180	0.2	0.8	0.8	-6	25	แตกหัก
							
							
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุ่มกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
65	100	0.2	0.2	0.4	11	13	ต่อเนื่อง
							
							

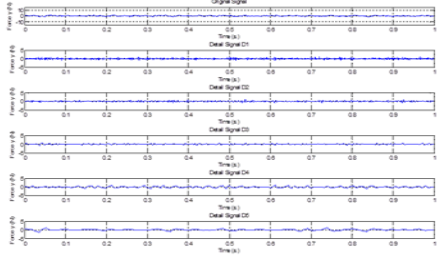
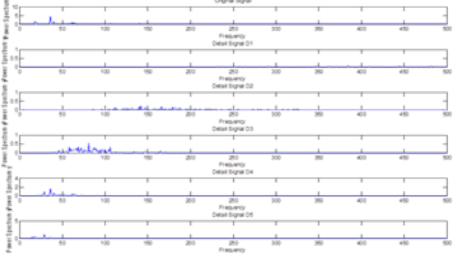
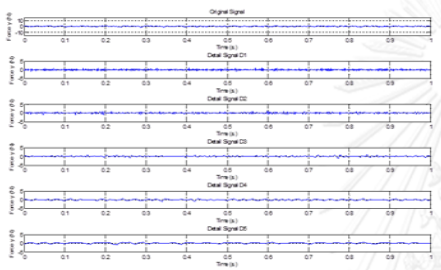
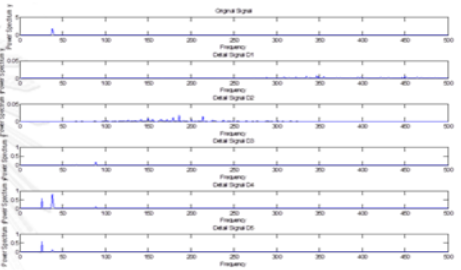
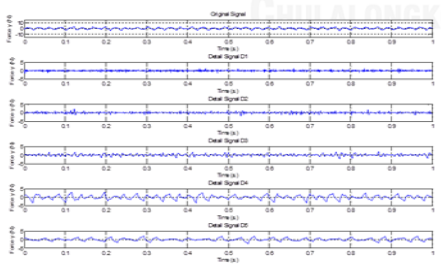
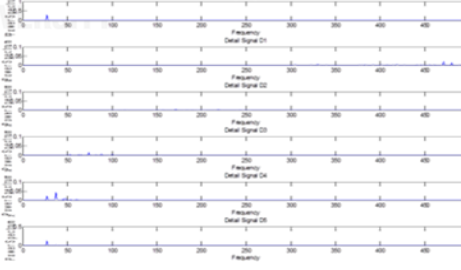
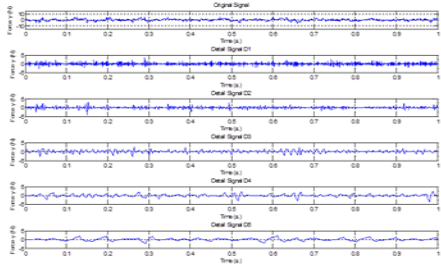
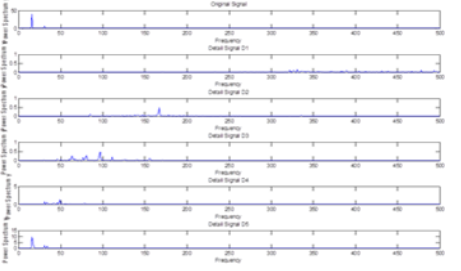
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุ่มกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
66	260	0.3	0.5	0.4	-6	32	แตกหัก
							
67	180	0.1	0.2	0.8	11	24	ต่อเนื่อง
							
							

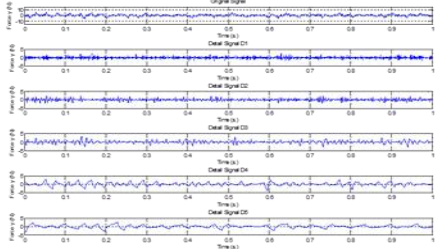
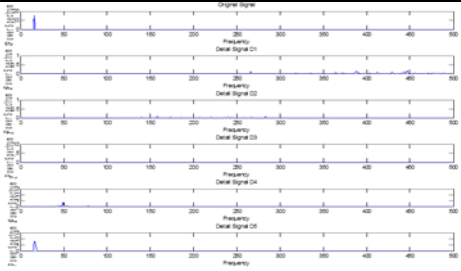
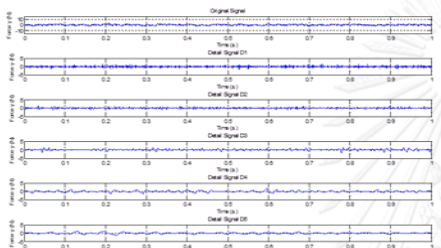
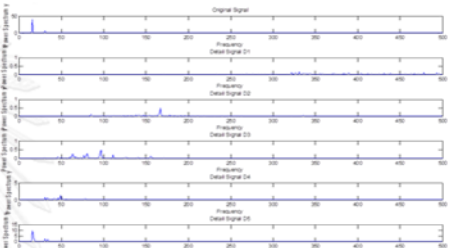
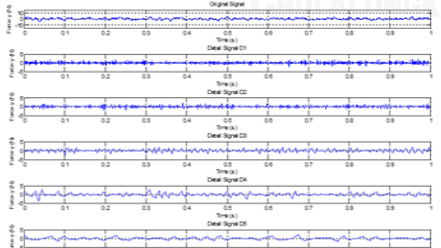
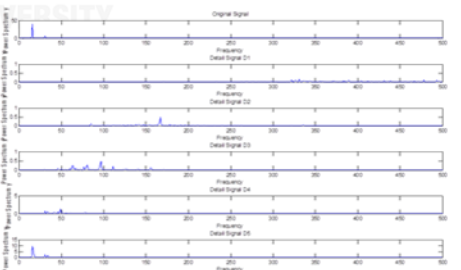
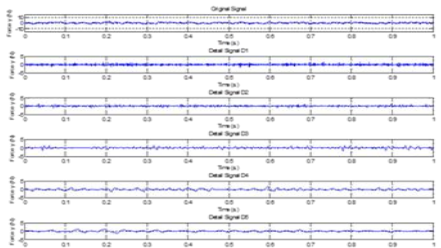
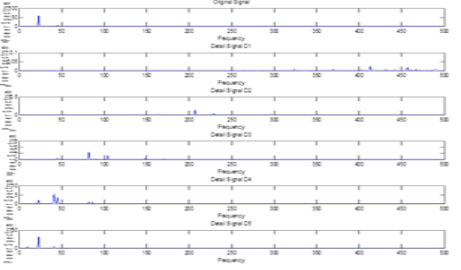
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุก มีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)	ค่าความ ขรุขระผิว	เศษ โลหะ
68	100	0.3	0.8	0.8	-6	14	แตกหัก
							
							
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุก มีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)	ค่าความ ขรุขระผิว	เศษ โลหะ
69	180	0.1	0.2	0.8	-6	25	ต่อเนื่อง
							
							

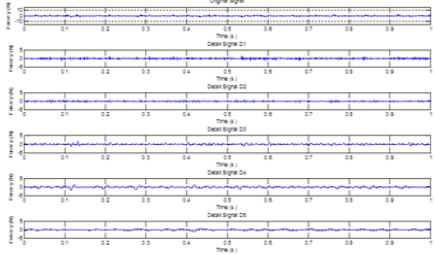
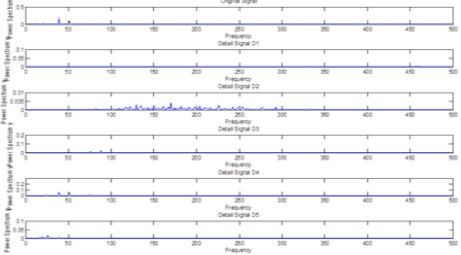
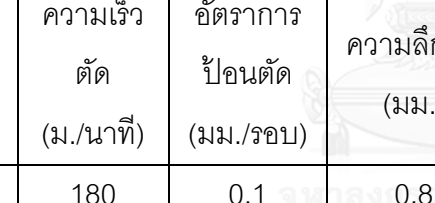
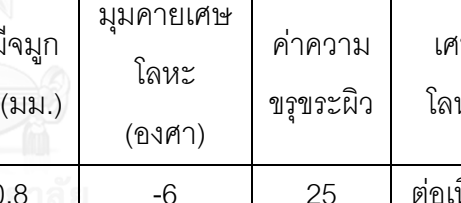
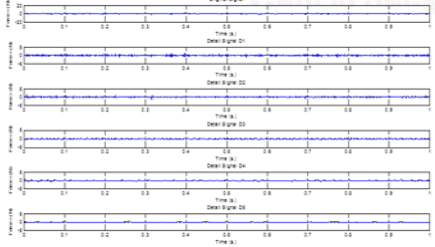
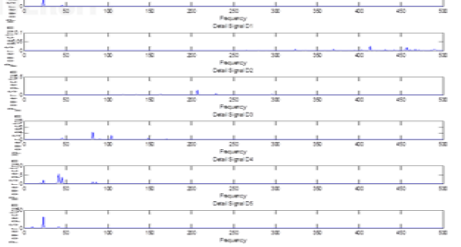
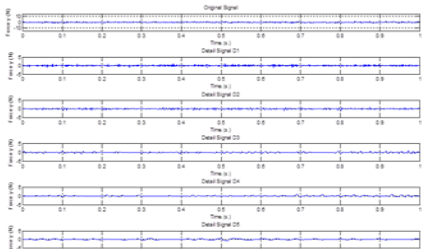
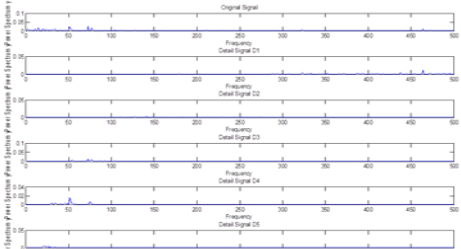
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุก มีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)	ค่าความ ขรุขระผิว	เศษ โลหะ
70	260	0.3	0.2	0.4	11	31	ต่อเนื่อง
							
							
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุก มีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)	ค่าความ ขรุขระผิว	เศษ โลหะ
71	100	0.1	0.2	0.8	-6	15	ต่อเนื่อง
							
							

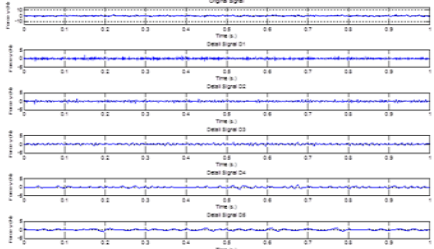
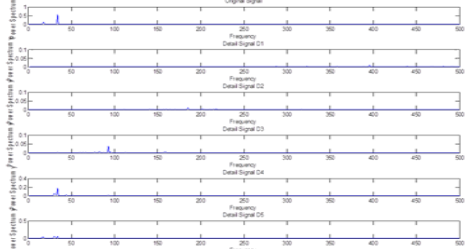
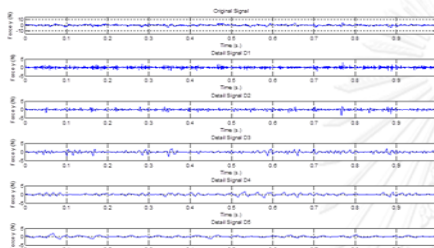
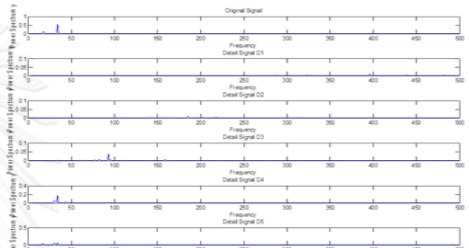
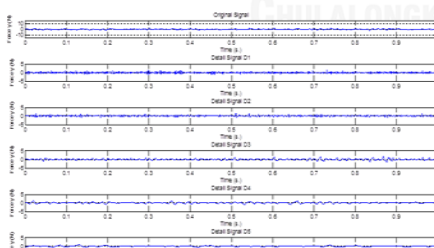
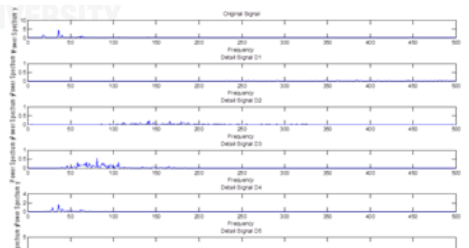
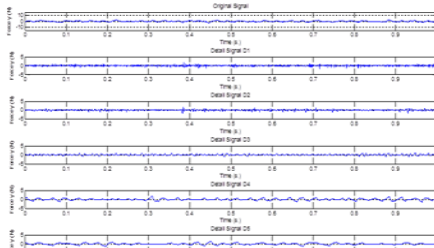
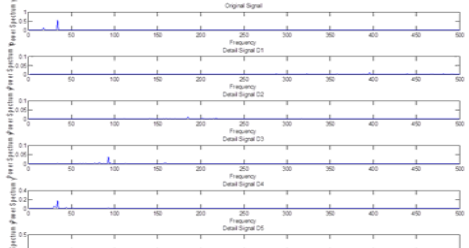
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
72	260	0.3	0.5	0.8	11	35	ต่อเนื่อง
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
73	100	0.3	0.8	0.8	11	15	ต่อเนื่อง

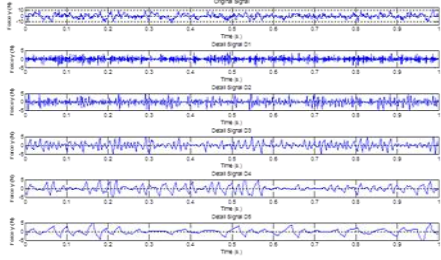
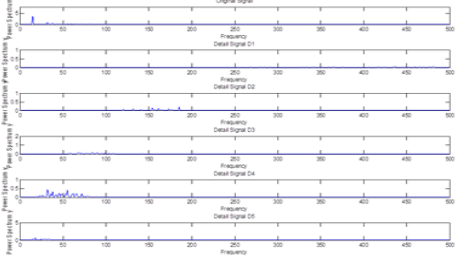
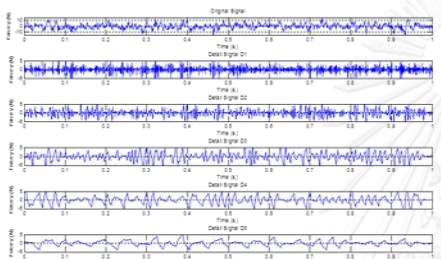
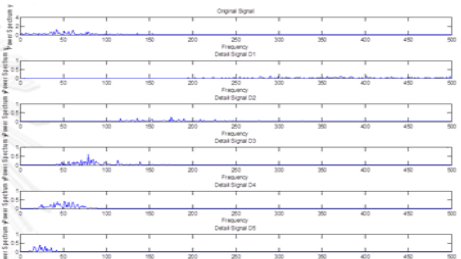
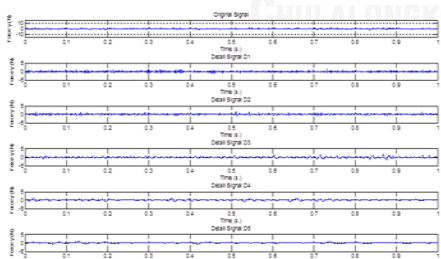
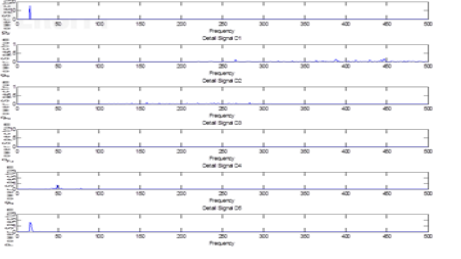
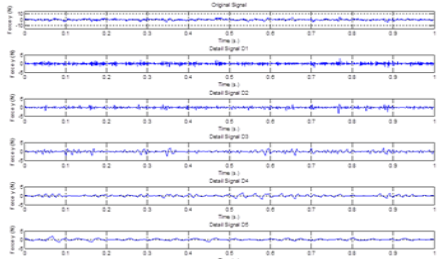
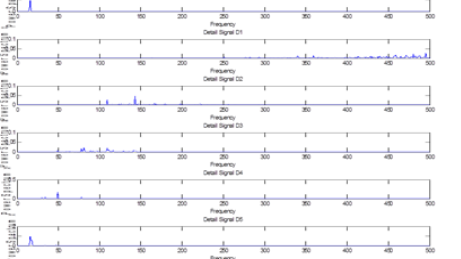
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุมก มีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)	ค่าความ ขรุขระผิว	เศษ โลหะ
74	260	0.1	0.5	0.8	11	35	ต่อเนื่อง
							
							
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุมก มีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)	ค่าความ ขรุขระผิว	เศษ โลหะ
75	260	0.1	0.5	0.4	11	31	ต่อเนื่อง
							
							

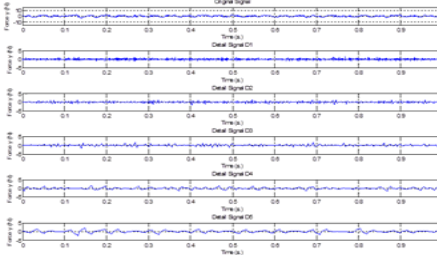
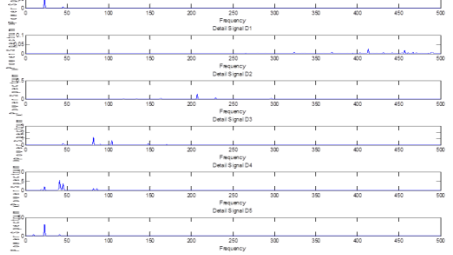
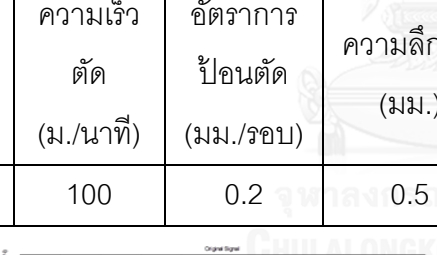
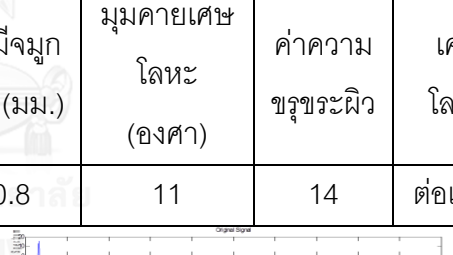
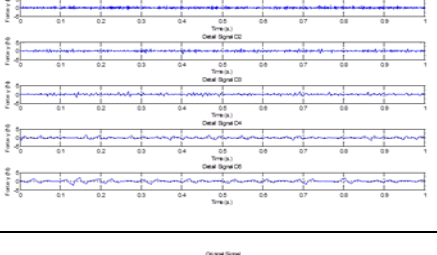
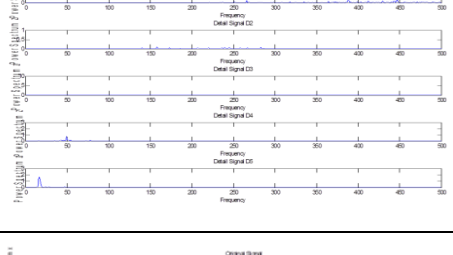
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจมูก มีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)	ค่าความ ขรุขระผิว	เศษ โลหะ
76	260	0.1	0.8	0.8	11	35	ต่อเนื่อง
							
							
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจมูก มีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)	ค่าความ ขรุขระผิว	เศษ โลหะ
77	180	0.1	0.5	0.8	11	25	ต่อเนื่อง
							
							

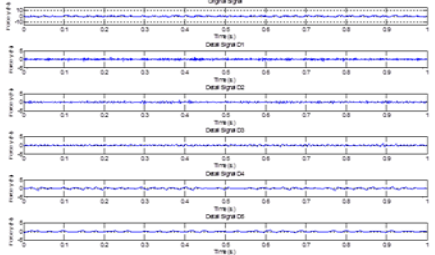
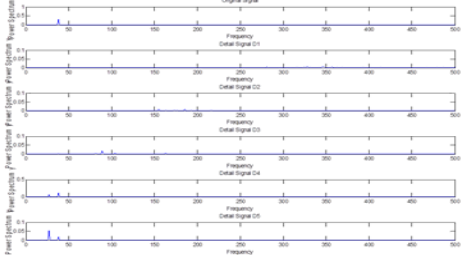
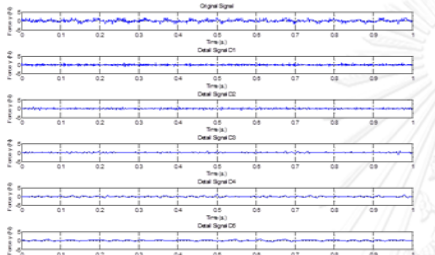
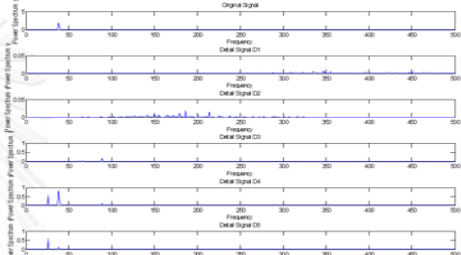
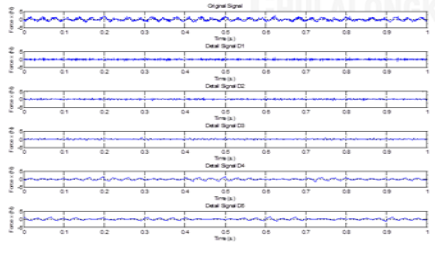
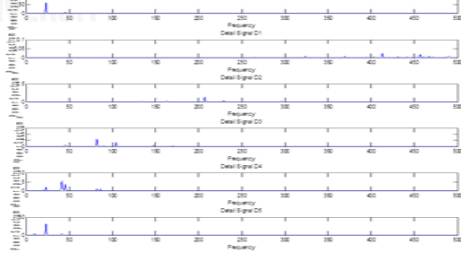
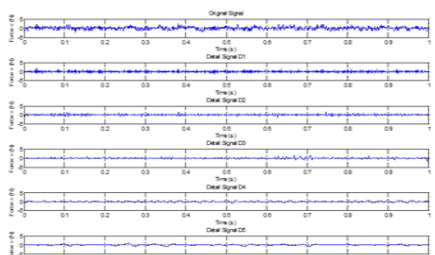
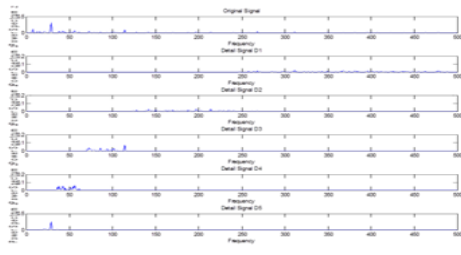
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุ่มกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
78	100	0.3	0.2	0.4	-6	14	ต่อเนื่อง
							
							
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุ่มกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
79	180	0.2	0.5	0.8	-6	25	ต่อเนื่อง
							
							

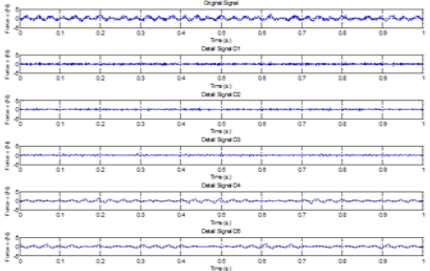
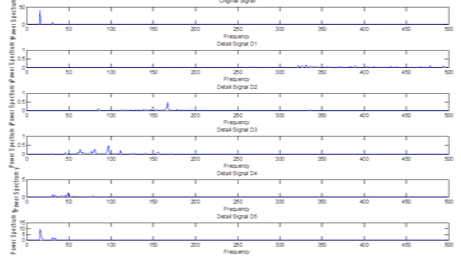
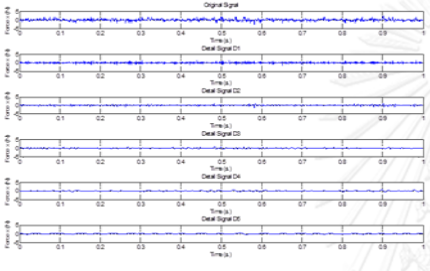
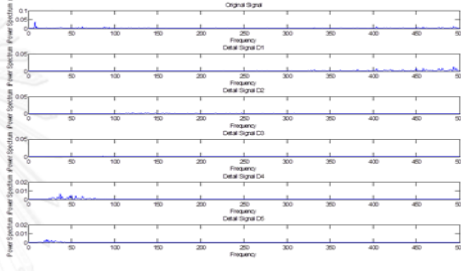
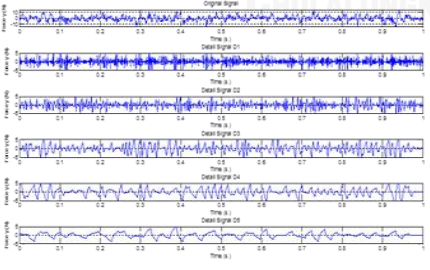
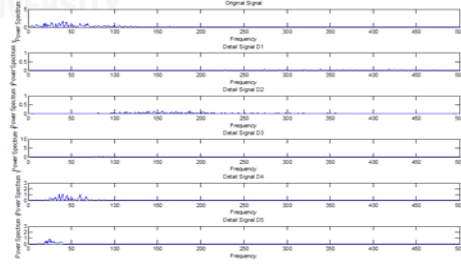
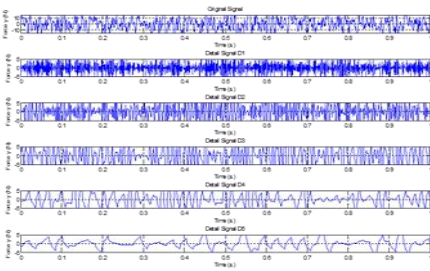
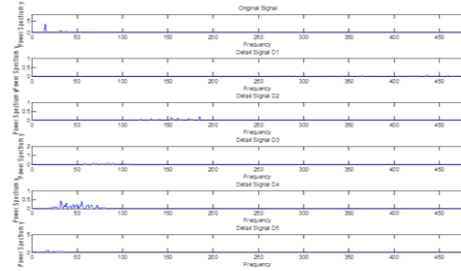
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
80	180	0.1	0.8	0.4	-6	35	ต่อเนื่อง
							
81	180	0.1	0.8	0.8	-6	25	ต่อเนื่อง
							
							
							

No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุก มีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)	ค่าความ ขรุขระผิว	เศษ โลหะ
82	260	0.3	0.2	0.8	11	35	ต่อเนื่อง
							
							
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุก มีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)	ค่าความ ขรุขระผิว	เศษ โลหะ
83	260	0.1	0.8	0.4	11	31	ต่อเนื่อง
							
							

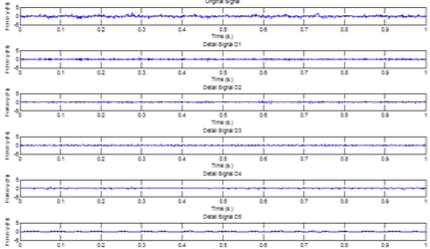
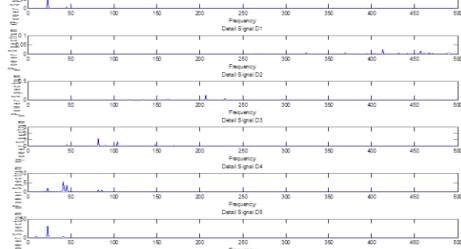
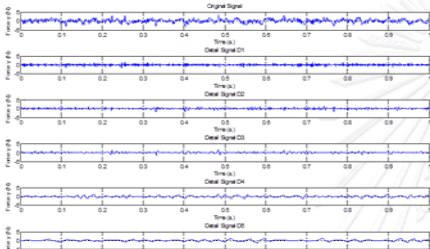
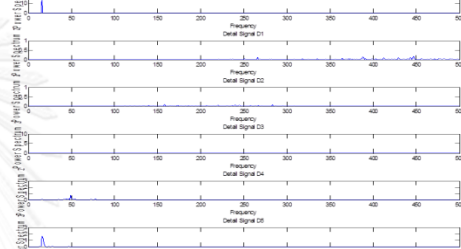
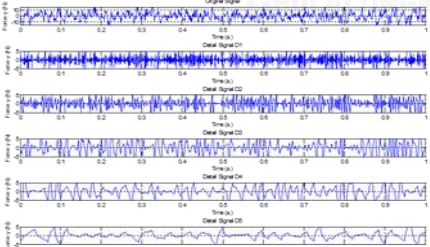
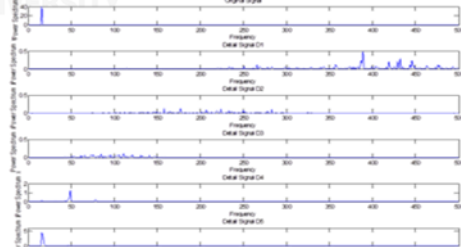
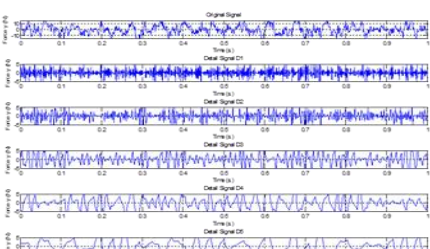
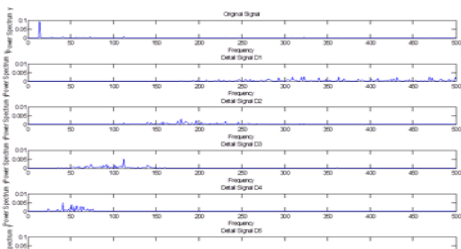
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
84	100	0.3	0.8	0.4	-6	14	แตกหัก
							
							
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
85	100	0.3	0.5	0.8	11	14	ต่อเนื่อง
							
							

No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุก มีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)	ค่าความ ขรุขระผิว	เศษ โลหะ
86	180	0.1	0.8	0.8	11	25	ต่อเนื่อง
							
87	100	0.2	0.5	0.8	11	14	ต่อเนื่อง
							
							

No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
88	260	0.2	0.5	0.8	-6	35	ต่อเนื่อง
							
							
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
89	180	0.2	0.2	0.8	-6	25	ต่อเนื่อง
							
							

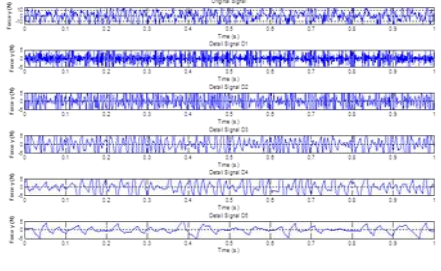
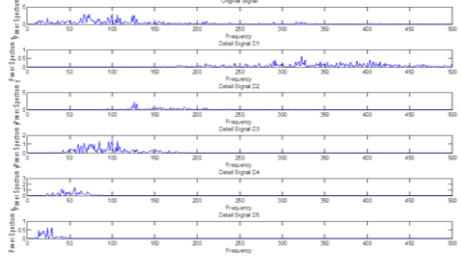
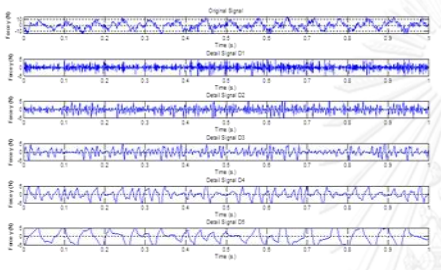
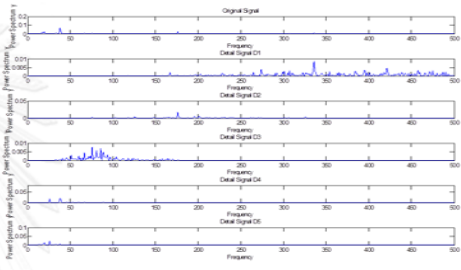
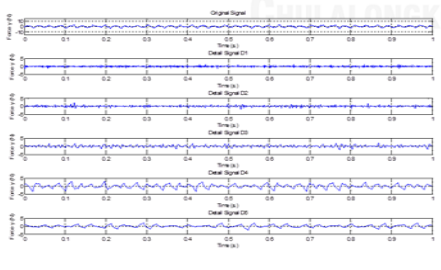
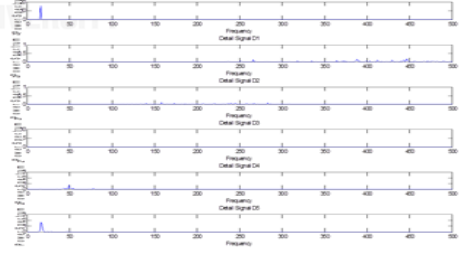
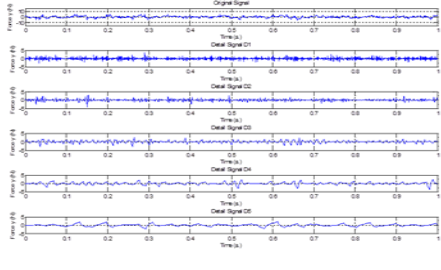
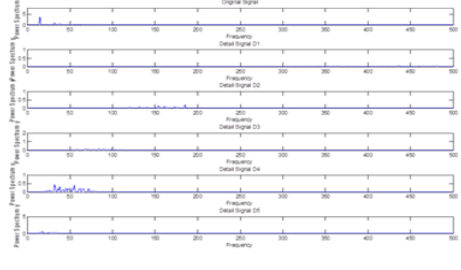
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุก มีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)	ค่าความ ขรุขระผิว	เศษ โลหะ
90	100	0.3	0.2	0.8	11	14	ต่อเนื่อง
							
							
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุก มีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)	ค่าความ ขรุขระผิว	เศษ โลหะ
91	180	0.1	0.5	0.4	-6	25	แตกหัก
							
							

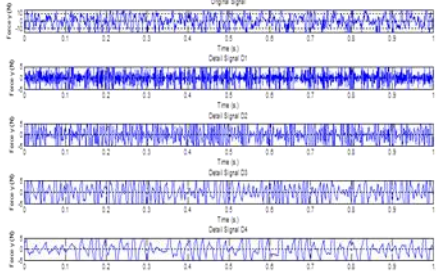
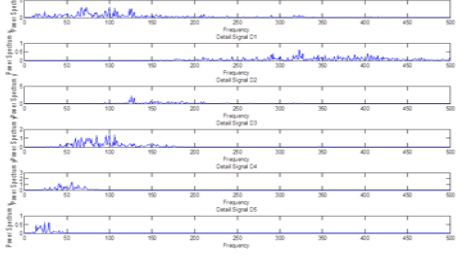
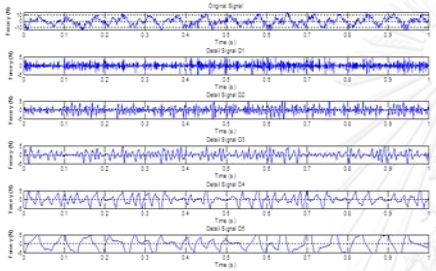
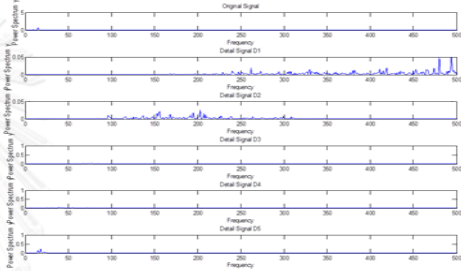
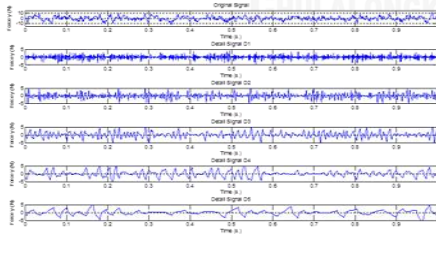
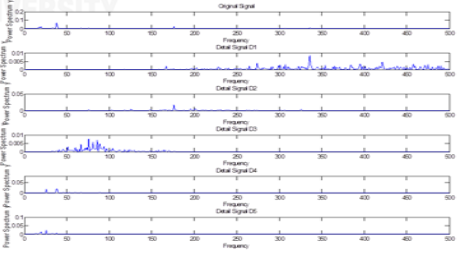
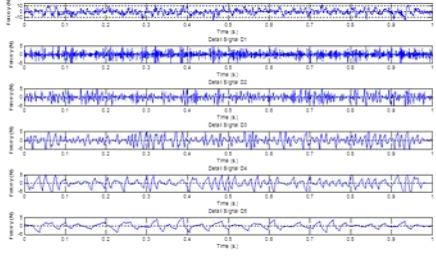
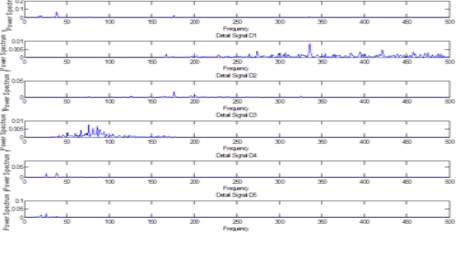
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
92	180	0.3	0.2	0.4	-6	24	ต่อเนื่อง
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
93	260	0.3	0.8	0.8	-6	35	แตกหัก

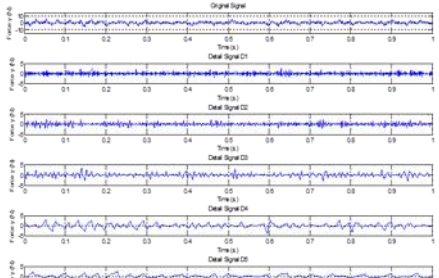
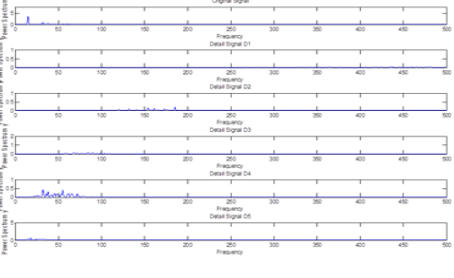
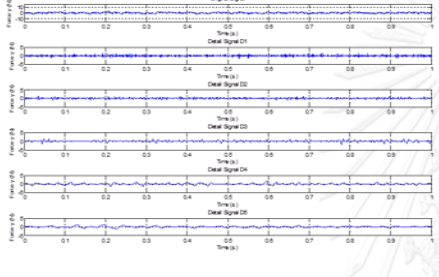
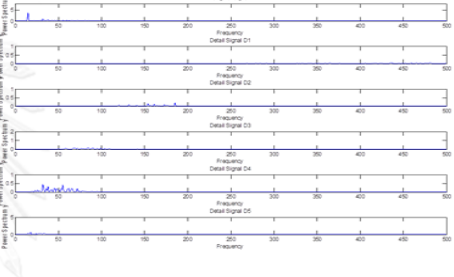
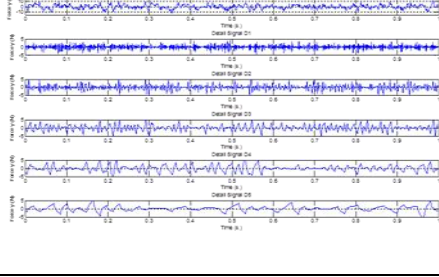
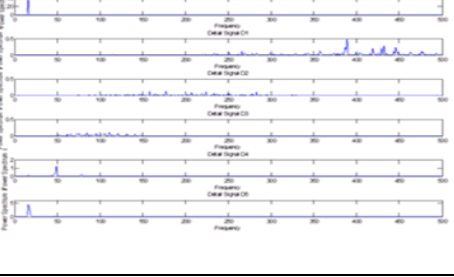
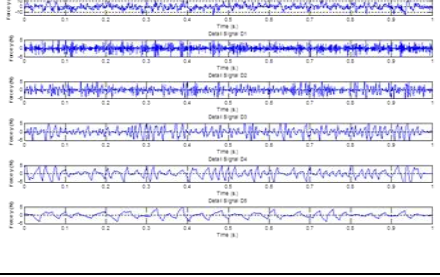
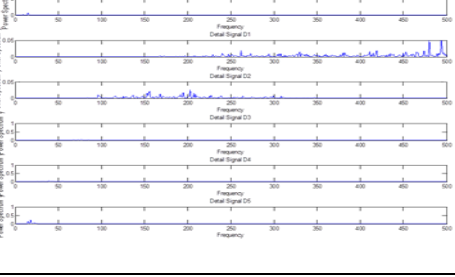
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
94	180	0.1	0.2	0.4	11	22	ต่อเนื่อง
							
							
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
95	100	0.2	0.8	0.8	11	14	แตกหัก
							
							

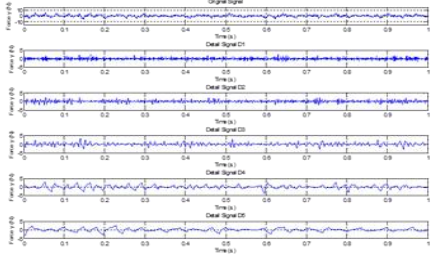
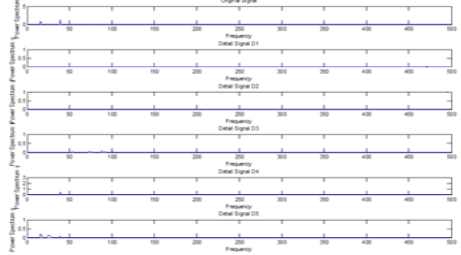
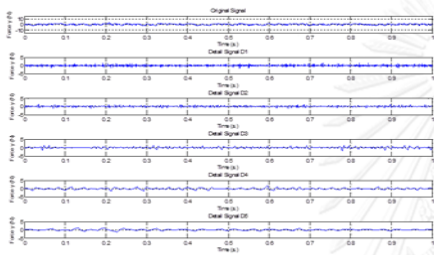
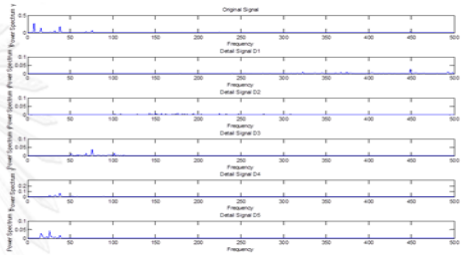
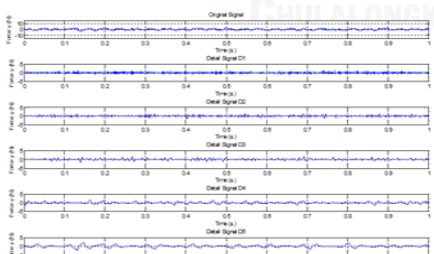
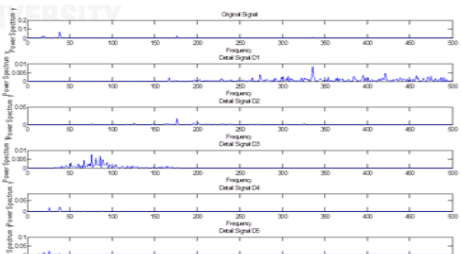
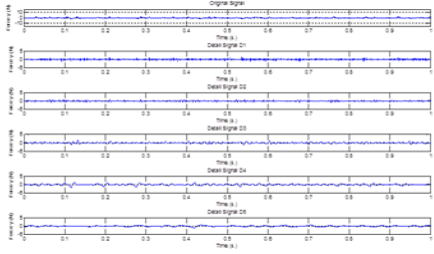
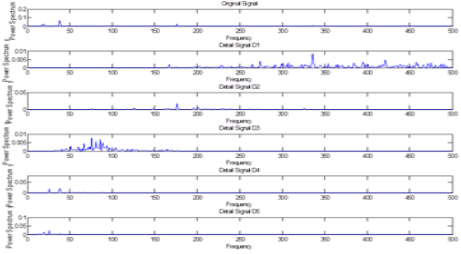
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
96	100	0.2	0.8	0.4	-6	21	แตกหัก
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
97	260	0.2	0.2	0.8	-6	35	ต่อเนื่อง

No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
98	180	0.1	0.5	0.4	11	24	ต่อเนื่อง
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
99	180	0.3	0.8	0.4	-6	25	แตกหัก

No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
100	180	0.3	0.8	0.8	11	25	แตกหัก
							
							
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
101	100	0.2	0.2	0.8	-6	15	ต่อเนื่อง
							
							

No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
102	100	0.3	0.2	0.4	11	13	แตกหัก
							
							
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
103	260	0.1	0.5	0.4	-6	35	แตกหัก
							
							

No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุมกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
104	100	0.3	0.5	0.4	11	13	ต่อเนื่อง
							
							
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุมกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
105	100	0.2	0.5	0.4	-6	14	แตกหัก
							
							

No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
106	100	0.3	0.5	0.8	-6	14	ต่อเนื่อง
							
							
No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
107	260	0.2	0.2	0.4	-6	32	แตกหัก
							
							

No.	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุ่มกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ค่าความขรุขระผิว	เศษโลหะ
108	260	0.2	0.2	0.4	11	31	ต่อเนื่อง
