

การพยากรณ์การสึกหรอของเม็ดมีดในกระบวนการกลึงซีเอ็นซีโดยใช้การแปลงเวฟเล็ต



นางสาวภทร ไชยวงศ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 2560

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREDICTION OF TOOL WEAR IN CNC TURNING PROCESS BY UTILIZING WAVELET
TRANSFORM

Miss Phathara Chaiyawong



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 2017

Copyright of Chulalongkorn University

5770950721 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORDS: TOOL WEAR / TURNING PROCESS / WAVELET TRANSFORM / CUTTING FORCE RATIO

PHATHARA CHAIYAWONG: PREDICTION OF TOOL WEAR IN CNC TURNING PROCESS BY UTILIZING WAVELET TRANSFORM. ADVISOR: ASSOC. PROF. SOMKIAT TANGJITSITCHAROEN, 266 pp.

The objective of this research is to study the relation between tool flank wear and dynamic cutting force ratio in turning process with steel S45C. Cutting tool is utilized CVD coated (TiCN+Al₂O₃TiN) insert. The wavelet transform is utilized for dynamic cutting force analysis where obtained cutting force signal base on tool wear signal by filter noise. The Box-Behnken design of experiment is selected for design experimental with 4 factors 3 levels. There are 4 factors including cutting speed 150, 200 and 250 m/min feed rate 0.1, 0.15 and 0.2 mm/rev depth of cut 1, 1.2 and 1.4 mm and nose radius 0.4, 0.8 and 1.2 mm. The results of experiment show that the fastest of tool wear rate came from the cutting condition including cutting speed 250 m/min, feed rate 0.2 mm/rev, depth of cut 1.2 mm and nose radius 0.8 mm. The dynamic cutting force ratio has significantly associated with the tool flank wear. The dynamic cutting force ratio is decreased when the tool wear is big. Trend of dynamic cutting force is not changed even through the cutting condition is changed. Hence, the dynamic cutting force is provided for developed tool wear prediction model which applied exponential function with 95% significant. The multiple regression analysis is utilized for found out coefficient of factor by least mean square method. The tool wear prediction model provided coefficient of determination (R^2) equal to 86.45% and coefficient of each factor show that the most influential factor on tool wear is dynamic cutting force ration followed by cutting speed, feed rate, depth of cut and nose radial respectively. Accordingly, the tool wear prediction model is verified and accuracy equal to 93.85%.

Department: Industrial Engineering Student's Signature

Field of Study: Industrial Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2017

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี เนื่องจากความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากรองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ คำปรึกษาและตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่และเป็นแบบอย่างที่ดียิ่งให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความทุ่มเทและตั้งใจจริงของอาจารย์เป็นอย่างยิ่ง พร้อมกันนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์เป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชาย พัวจินดาเนตร ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ สมชาย พวงเพิกศึกษ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ภายนอกมหาวิทยาลัย ที่ได้กรุณาสละเวลาและให้เกียรติเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมทั้งได้ให้ข้อเสนอแนะอันมีค่าและเป็นประโยชน์ต่อการปรับปรุงแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น อนึ่ง ผู้วิจัยหวังว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะมีประโยชน์แก่ผู้อ่านไม่มากนักน้อย ผู้วิจัยจึงขอมอบความดีทั้งหมดแก่คณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้แก่ผู้วิจัยตลอดระยะเวลาที่ได้ศึกษาในสถาบันแห่งนี้ และขอขอบคุณพี่ๆ น้องๆ ประจำห้องปฏิบัติการวิศวกรรมศาสตร์ชั้นสูงที่คอยช่วยเหลือ ให้คำแนะนำและเป็นกำลังใจที่ดี รวมทั้งเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่อำนวยความสะดวกในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วง

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ผู้ให้กำเนิดสติปัญญาและปลูกฝังความใฝ่รู้ ความพากเพียรในการศึกษา ขอขอบคุณพี่ๆ น้องๆ และเพื่อนๆ ที่คอยให้กำลังใจให้ความรักความห่วงใยและสนับสนุนผู้วิจัยอย่างดียิ่งเสมอมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 กรอบแนวคิดในการทำวิจัย.....	17
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	17
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	18
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	19
1.6 ขั้นตอนการดำเนินงาน	19
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	21
2.1 ภาพรวมของเทคโนโลยีกระบวนการกัด [19].....	21
2.2 เครื่องมือตัด (Cutting tool) [19].....	22
2.3 เงื่อนไขการตัด (Cutting condition) [19, 20].....	23
2.4 กระบวนการกลึง (Turning process) [5].....	25
2.5 การเกิดเศษโลหะ (Chip formation) [5, 19, 21].....	27
2.6 แรงในการตัด (Cutting force) [19].....	30
2.7 ค่าเฉลี่ยความแปรปรวนและอัตราส่วนแรงตัดพลวัต [22-24].....	32
2.8 การสึกหรอของมีดตัด (Tool wear) [19].....	34
2.9 อายุการใช้งานของมีดตัดและสมการการสึกหรอของเทย์เลอร์ [19].....	36
2.10 การแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform) [25].....	38

2.11 การแปลงเวฟเล็ต (Wavelet transform) [26]	40
2.11.1 เวฟเล็ตดอเบชีส์ (Daubechies Wavelets)	43
2.12 การออกแบบการทดลองแบบ (Design of Experiment) [27].....	44
2.12.1 ขั้นตอนในการออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	44
2.12.2 การออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Design)	45
2.12.3 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design)	46
2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	48
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	55
3.1 การออกแบบการทดลอง	55
3.1.1 ปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง	55
3.1.2 ระดับที่ใช้ในการทดลอง	55
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	58
3.2.1 ชิ้นงาน (Work piece)	58
3.2.2 เม็ดมีดกลึง (Insert).....	58
3.2.3 ด้ามมีด (Tool holder)	59
3.2.4 เครื่องกลึงซีเอ็นซี (CNC turning machine)	59
3.2.5 เซนเซอร์วัดแรงหรือไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer)	60
3.2.6 เครื่องขยายสัญญาณแรงตัด (Charge amplifier).....	60
3.2.7 ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)	60
3.2.8 กล้องไมโครสโคป (Microscope).....	61
3.3 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	61
3.3.1 ติดตั้งอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการทดลอง	61
3.3.2 เตรียมขึ้นก่อนการเริ่มต้นการทดลองจริง	62

3.3.3 เริ่มต้นการทดลองตัดจริง.....	63
3.3.4 การเก็บรวบรวมข้อมูล	65
3.3.4.1 การวัดขนาดการสึกหรอด้านข้างของเม็ดมีด (Flank wear, V_b).....	65
3.3.4.2 การเก็บข้อมูลสัญญาณแรงตัด	67
3.4 การวิเคราะห์แรงตัดพลวัตโดยใช้การแปลงเวฟเล็ต	68
3.4.1 การคัดแยกสัญญาณแรงตัดพลวัต	68
3.4.2 การวิเคราะห์ความหนาแน่นพาวเวอร์สเปกตรัม (PSD) ในโดเมนความถี่.....	76
3.5 การพัฒนาสมการทำนายการสึกหรอของเม็ดมีด.....	84
3.6 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ.....	85
3.6.1 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์ข้อมูล [28].....	85
3.6.2 การวิเคราะห์ข้อมูลจากตารางการออกแบบการทดลอง [28].....	85
3.6.3 การตรวจสอบความเพียงพอของเพื่อสร้างแบบจำลองสมการทำนายขนาดการสึกหรอ ของเม็ดมีด (Model adequacy checking) [28].....	86
3.6.3.1 การทดสอบการกระจายตัวของข้อมูลแบบแจกแจงปกติ	86
3.6.3.2 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล	86
3.6.3.3 การทดสอบความเสถียรภาพของความแปรปรวน	87
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	88
4.1 ผลการทดลอง	88
4.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแรงตัดพลวัตกับขนาดการสึกหรอของเม็ดมีด.....	88
4.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแรงตัดพลวัตกับขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดใน ทุกเงื่อนไขการตัด	111
4.4 การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ	112
4.4.1 การทดสอบการกระจายตัวของข้อมูลแบบแจกแจงปกติ.....	112
4.4.2 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล	113

4.4.3 การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของขนาดการสึกหรอด้านข้าง	114
4.5 สมการพยากรณ์ขนาดการสึกหรอของเม็ดมีด.....	115
4.5.1 การทดสอบนัยสำคัญของการถดถอย	116
4.5.2 การทดสอบสัมประสิทธิ์ของการถดถอยทีละตัว	116
4.5.3 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2).....	117
4.6 การทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้องของสมการพยากรณ์ขนาดการสึกหรอ	119
4.6.1 ผลการทดลองนอกช่วงการทดลองเดิมเพื่อทดสอบความถูกต้องของสมการ พยากรณ์.....	119
4.6.2 ผลการทดลองเพื่อทดสอบความถูกต้องของสมการพยากรณ์เทียบกับเวลาในการตัด	127
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	133
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	133
5.2 อภิปรายผลการวิจัย	134
5.3 ข้อจำกัดและอุปสรรค.....	135
5.3.1 ข้อจำกัดและอุปสรรคด้านเครื่องมือและอุปกรณ์.....	135
5.3.2 ข้อจำกัดและอุปสรรคด้านวิธีการทดลอง	136
5.4 ข้อเสนอแนะ	137
รายการอ้างอิง	139
ภาคผนวก ก	143
ภาคผนวก ข.....	162
ภาคผนวก ค	247
ภาคผนวก ง.....	251
ภาคผนวก จ.....	262
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	266

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 เปรียบเทียบงานวิจัยในอดีตที่ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการสีกหรือของมีดตัดกับ แรงตัด.....	9
ตารางที่ 1.2 ความแตกต่างระหว่างการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วและการแปลงเวฟเล็ต	17
ตารางที่ 2.1 การออกแบบบ็อกซ์-เบนห์เคนที่มี 3 ตัวแปร[28].....	47
ตารางที่ 3.1 ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง.....	56
ตารางที่ 3.2 ตารางการทดลองจากการออกแบบบ็อกซ์-เบนห์เคน.....	56
ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด JIS S45C.....	58
ตารางที่ 3.4 เม็ดมีดกลึงที่ใช้ในการทดลอง	59
ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขการตัดใหม่นอกช่วงการทดลองเดิม	119
ตารางที่ 4.2 จำนวนการทดลองใหม่นอกช่วงการทดลองเดิม.....	119
ตารางที่ 5.1 แนวทางการเลือกปัจจัยและระดับสำหรับการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสม กลาง.....	138

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 กราฟแสดงมูลค่ารวมภายในประเทศและการส่งออกของอุตสาหกรรมในประเทศไทย [2] 1

รูปที่ 1.2 ชิ้นส่วนในระบบเครื่องยนต์ (Engine system) [3]..... 2

รูปที่ 1.3 การพัฒนาเทคโนโลยีของกระบวนการผลิตอัจฉริยะ [5] 5

รูปที่ 1.4 ระบบการทำงานของเครื่องจักรกลอัจฉริยะ [5]..... 6

รูปที่ 1.5 เซนเซอร์สำหรับการตรวจติดตามในเครื่องจักรกล [5] 7

รูปที่ 1.6 แรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นในกระบวนการกลึง [7]..... 8

รูปที่ 1.7 ตัวอย่างการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (FFT) ของสัญญาณแรงตัดที่เกิดการสีกหรือของเม็ด มีด 0.21 มิลลิเมตร อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที และความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร [6].....12

รูปที่ 1.8 ตัวอย่างการแปลงเวฟเล็ตสัญญาณแรงตัด F_x ในโดเมนเวลา อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที และความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร [6].....14

รูปที่ 1.9 ตัวอย่างการแปลงเวฟเล็ตสัญญาณแรงตัด F_x ในโดเมนความถี่ อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที และความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร [6].....14

รูปที่ 1.10 ตัวอย่างการแปลงเวฟเล็ตสัญญาณแรงตัด F_y ในโดเมนเวลา อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที และความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร [6].....15

รูปที่ 1.11 ตัวอย่างการแปลงเวฟเล็ตสัญญาณแรงตัด F_y ในโดเมนความถี่ อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที และความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร [6].....15

รูปที่ 1.12 ตัวอย่างการแปลงเวฟเล็ตสัญญาณแรงตัด F_z ในโดเมนเวลา อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที และความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร [6].....16

รูปที่ 1.13 ตัวอย่างการแปลงเวฟเล็ตสัญญาณแรงตัด F_z ในโดเมนความถี่ อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที และความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร [6].....16

รูปที่ 2.1 ประเภทของกระบวนการกัดที่ใช้กันทั่วไป [19]22

รูปที่ 2.2 (ก) ภาพตัดขวางของกระบวนการกลึง (ข) มัดตัดที่มีมุมหลบ [19].....22

รูปที่ 2.3 มีดคมตัดเดี่ยว (Single-point tool) และมีดตัดหลายคม (Multiple cutting edge).....	23
รูปที่ 2.4 เรขาคณิตของกระบวนการกลึง [5].....	25
รูปที่ 2.5 เรขาคณิตของมีดกลึง [5].....	26
รูปที่ 2.6 การเกิดเศษโลหะ [19].....	28
รูปที่ 2.7 ประเภทของการเกิดเศษโลหะในกระบวนการตัด [19].....	28
รูปที่ 2.8 การแบ่งลักษณะรูปแบบของเศษโลหะ [21].....	29
รูปที่ 2.9 แรงในการตัด (ก) แรงกระทำโดยใช้แบบจำลองการตัดฉาก และ (ข) แรงกระทำบนมีดตัดที่สามารถวัดได้	30
รูปที่ 2.10 ตัวอย่างค่าเฉลี่ยความแปรปรวน (average variance) ของแรงตัดพลวัต F_x , F_y , F_z ที่ความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตร [22].....	33
รูปที่ 2.11 ลักษณะตำแหน่งและการสึกหรอของมีดตัด [19].....	35
รูปที่ 2.12 การสึกหรอแบบหลุมแอ่ง (Crater wear) [19].....	35
รูปที่ 2.13 การสึกหรอด้านข้าง (Flank wear) [19].....	35
รูปที่ 2.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดรอยสึกหรอด้านข้างและเวลาที่ใช้ในการตัด [19].....	37
รูปที่ 2.15 อิทธิพลของความเร็วตัดต่อการสึกหรอด้านข้าง (Flank wear) [19].....	38
รูปที่ 2.16 (ก) ข้อมูลเทียบในโดเมนเวลา (ข) ข้อมูลเทียบในโดเมนความถี่ [25]	39
รูปที่ 2.17 ข้อมูลที่ไม่มีรูปแบบแน่นอน [25].....	39
รูปที่ 2.18 เกิดแซตเตอร์ที่ความเร็วตัด 6000 รอบต่อนาที ความลึกตัด 2 มิลลิเมตร อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตร.....	40
รูปที่ 2.19 สัญญาณเวฟเล็ทในแต่ละแอมป์ลี [26].....	41
รูปที่ 2.20 ลักษณะของเวฟเล็ทที่ค่า a และ b ต่างกัน [26].....	42
รูปที่ 2.21 การแยกย่อยสัญญาณของการแปลงเวฟเล็ท 3 ระดับ [26].....	43
รูปที่ 2.22 รูปแบบทางเรขาคณิตสำหรับแผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน [28].....	47

รูปที่ 3.1 เหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C.....	58
รูปที่ 3.2 ด้ามมีดที่ใช้ในการทดลอง.....	59
รูปที่ 3.3 เครื่องกลึงซีเอ็นซีที่ใช้ในการทดลอง	59
รูปที่ 3.4 ไดนาโมมิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง.....	60
รูปที่ 3.5 เครื่องขยายสัญญาณแรงตัดที่ใช้ในการทดลอง.....	60
รูปที่ 3.6 ออสซิลโลสโคปที่ใช้ในการทดลอง.....	61
รูปที่ 3.7 กล้องไมโครสโคปที่ใช้ในการทดลอง.....	61
รูปที่ 3.8 การเชื่อมต่อสายสัญญาณจากไดนาโมมิเตอร์เข้ากับเครื่องขยายสัญญาณ	62
รูปที่ 3.9 การเชื่อมต่อสัญญาณ Fx, Fy และ Fz จากเครื่องขยายสัญญาณแรงเข้ากับ ออสซิลโลสโคป	62
รูปที่ 3.10 ขั้นตอนการทดลอง	64
รูปที่ 3.11 ตัวอย่างภาพการสึกหรอของมีดมีดด้านข้าง (Flank wear) ด้วยกำลังขยาย 20x0.4 เท่า.....	65
รูปที่ 3.12 การวางมีดมีดให้ขนานกับสเกลในเลนส์ตา	66
รูปที่ 3.13 การปรับค่าจุดอ้างอิง X,Y สำหรับเริ่มต้นการวัด	66
รูปที่ 3.14 การเลื่อนตำแหน่งจุดอ้างอิง X,Y ไปยังจุดกว้างสุดของรอยสึก.....	67
รูปที่ 3.15 ค่าแนวแกน Y คือขนาดการสึกหรอด้านข้าง (Flank wear, V_b) เท่ากับ 0.0893 มม.....	67
รูปที่ 3.16 ตัวอย่างสัญญาณแรงรัศมีพลวัต (dFx) ในโดเมนเวลาตั้งแต่ระดับต้นกำเนิดถึงระดับที่ 8 ด้วยความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 1.2 มิลลิเมตร และรัศมีงูมมีด 1.2 มิลลิเมตร ขนาดการสึกหรอ 0.1331 มิลลิเมตร	69
รูปที่ 3.17 ตัวอย่างสัญญาณแรงป้อนตัดพลวัต (dFy) ในโดเมนเวลาตั้งแต่ระดับต้นกำเนิดถึง ระดับที่ 8 ด้วยความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 1.2 มิลลิเมตร และรัศมีงูมมีด 1.2 มิลลิเมตร ขนาดการสึกหรอ 0.1331 มิลลิเมตร	70

รูปที่ 3.18 ตัวอย่างสัญญาณแรงตัดหลักพลวัต (dFz) ในโดเมนเวลาตั้งแต่ระดับต้นกำเนิดถึงระดับที่ 8 ด้วยความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 1.2 มิลลิเมตร และรัศมีงูมมีด 1.2 มิลลิเมตร ขนาดการสึกหรอ 0.1331 มิลลิเมตร	71
รูปที่ 3.19 ตัวอย่างสัญญาณแรงรัศมีพลวัต (dFx) ในโดเมนความถี่ตั้งแต่ระดับต้นกำเนิดถึงระดับที่ 8 ด้วยความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 1.2 มิลลิเมตร และรัศมีงูมมีด 1.2 มิลลิเมตร ขนาดการสึกหรอ 0.1331 มิลลิเมตร	72
รูปที่ 3.20 ตัวอย่างสัญญาณแรงป้อนตัดพลวัต (dFy) ในโดเมนความถี่ตั้งแต่ระดับต้นกำเนิดถึงระดับที่ 8 ด้วยความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 1.2 มิลลิเมตร และรัศมีงูมมีด 1.2 มิลลิเมตร ขนาดการสึกหรอ 0.1331 มิลลิเมตร	73
รูปที่ 3.21 ตัวอย่างสัญญาณแรงตัดหลักพลวัต (dFz) ในโดเมนความถี่ตั้งแต่ระดับต้นกำเนิดถึงระดับที่ 8 ด้วยความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 1.2 มิลลิเมตร และรัศมีงูมมีด 1.2 มิลลิเมตร ขนาดการสึกหรอ 0.1331 มิลลิเมตร	74
รูปที่ 3.22 ตัวอย่างเศษโลหะแบบผสมที่ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 1.2 มิลลิเมตร และรัศมีงูมมีด 1.2 มิลลิเมตร ขนาดการสึกหรอ 0.1331 มิลลิเมตร	76
รูปที่ 3.23 ตัวอย่างการเปรียบเทียบความหนาแน่นพาวเวอร์สเปกตรัม (PSD) ระดับชั้นที่ 8 ภายใต้ความเร็วตัด 250 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 1.4 มิลลิเมตร และรัศมีงูมมีด 0.8 มิลลิเมตร ที่ขนาดการสึกหรอต่างกัน	77
รูปที่ 3.24 ตัวอย่างการเปรียบเทียบความหนาแน่นพาวเวอร์สเปกตรัม (PSD) ระดับชั้นที่ 8 ภายใต้อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 1.2 มิลลิเมตร และรัศมีงูมมีด 0.4 มิลลิเมตร ขนาดการสึกหรอ (V_b) 0.17 มิลลิเมตร ที่ความเร็วตัดต่างกัน	78
รูปที่ 3.25 ตัวอย่างการเปรียบเทียบความหนาแน่นพาวเวอร์สเปกตรัมระดับชั้นที่ 8 ภายใต้ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที ความลึกตัด 1.2 มิลลิเมตร และรัศมีงูมมีด 1.2 มิลลิเมตร ขนาดการสึกหรอ (V_b) 0.16 มิลลิเมตร ที่อัตราการป้อนตัดต่างกัน	79
รูปที่ 3.26 ตัวอย่างการเปรียบเทียบความหนาแน่นพาวเวอร์สเปกตรัมระดับชั้นที่ 8 ภายใต้ความเร็วตัด 250 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ รัศมีงูมมีด 1.2 มิลลิเมตร และขนาดการสึกหรอ (V_b) 0.14 มิลลิเมตร ที่ความลึกตัดต่างกัน	81

รูปที่ 3.27 ตัวอย่างการเปรียบเทียบความหนาแน่นพาวเวอร์สเปกตรัมระดับชั้นที่ 8 ภายใต้ ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 1.2 มิลลิเมตร และขนาดการสึกหรอ (V_b) 0.14 มิลลิเมตร ที่รัศมีจุมกมีดต่าง	82
รูปที่ 3.28 ตัวอย่างการค่าเฉลี่ยความแปรปรวนของแรงป้อนตัดพลวัต (dF_y) ที่ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 1.2 มิลลิเมตร และรัศมีจุมกมีด 1.2 มิลลิเมตร ขนาดการสึกหรอ 0.1331 มิลลิเมตร	83
รูปที่ 3.29 ตัวอย่างการหาค่าเฉลี่ยความแปรปรวนของแรงตัดหลัก (dF_z) ที่ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 1.2 มิลลิเมตร และรัศมีจุมกมีด 1.2 มิลลิเมตร ขนาดการสึกหรอ 0.1331 มิลลิเมตร	84
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้าง (V_b) กับอัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dF_y/dF_z) ที่อัตราการป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 1.2 มิลลิเมตร และรัศมี จุมกมีด 0.8 มิลลิเมตร ที่ความเร็วตัดต่างกัน	88
รูปที่ 4.2 ทิศทางของแรงตัดหลักพลวัต (dF_z)	89
รูปที่ 4.3 การสึกหรอของเม็ดมีดเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างชิ้นงานกับคมตัด	89
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้าง (V_b) กับอัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dF_y/dF_z) ที่อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 1.0 มิลลิเมตร และรัศมี จุมกมีด 0.8 มิลลิเมตร ที่ความเร็วตัดต่างกัน	90
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้าง (V_b) กับอัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dF_y/dF_z) ที่อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 1.2 มิลลิเมตร และรัศมี จุมกมีด 0.4 มิลลิเมตร ที่ความเร็วตัดต่างกัน	91
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้าง (V_b) กับอัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dF_y/dF_z) ที่อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 1.2 มิลลิเมตร และรัศมี จุมกมีด 1.2 มิลลิเมตร ที่ความเร็วตัดต่างกัน	92
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้าง (V_b) กับอัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dF_y/dF_z) ที่อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 1.0 มิลลิเมตร และรัศมี จุมกมีด 0.8 มิลลิเมตร ที่ความเร็วตัดต่างกัน	93

รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้าง (V_b) กับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) ที่ความเร็วตัด 250 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ และความลึกตัด 1.2 มิลลิเมตร ที่รัศมีงูมกมีดต่างกัน.....	110
รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงตัดพลวัตกับขนาดการสึกหรอด้านข้างของเม็ดมีดของทุกเงื่อนไขการตัด.....	111
รูปที่ 4.29 กราฟการแจกแจงแบบปกติของข้อมูลอัตราส่วนแรงตัด (dF_y/dF_z).....	112
รูปที่ 4.30 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลขนาดการสึกหรอด้านข้าง (V_b).....	113
รูปที่ 4.31 การทดสอบความสม่ำเสมอของข้อมูลขนาดการสึกหรอด้านข้าง (V_b).....	114
รูปที่ 4.32 การวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณของการแปลงลอการิทึมด้วยโปรแกรม Minitab	115
รูปที่ 4.33 การวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยโปรแกรม Minitab.....	116
รูปที่ 4.34 ค่าสัมประสิทธิ์ของการถดถอยด้วยโปรแกรม Minitab.....	117
รูปที่ 4.35 กราฟผลการทดลองที่ 1 ทดสอบความแม่นยำสมการพยากรณ์ขนาดการสึกหรอด้านข้างภายใต้ ความเร็วตัด 260 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร และรัศมีงูมกมีด 0.8 มิลลิเมตร.....	120
รูปที่ 4.36 กราฟผลการทดลองที่ 2 ทดสอบความแม่นยำสมการพยากรณ์ขนาดการสึกหรอด้านข้างภายใต้ ความเร็วตัด 140 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.05 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร และรัศมีงูมกมีด 0.8 มิลลิเมตร.....	121
รูปที่ 4.37 กราฟผลการทดลองที่ 3 ทดสอบความแม่นยำสมการพยากรณ์ขนาดการสึกหรอด้านข้างภายใต้ ความเร็วตัด 260 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.05 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.6 มิลลิเมตร และรัศมีงูมกมีด 0.8 มิลลิเมตร.....	122
รูปที่ 4.38 กราฟผลการทดลองที่ 4 ทดสอบความแม่นยำสมการพยากรณ์ขนาดการสึกหรอด้านข้างภายใต้ ความเร็วตัด 260 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.6 มิลลิเมตร และรัศมีงูมกมีด 0.8 มิลลิเมตร.....	123
รูปที่ 4.39 กราฟผลการทดลองที่ 5 ทดสอบความแม่นยำสมการพยากรณ์ขนาดการสึกหรอด้านข้างภายใต้ ความเร็วตัด 140 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.05 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.6 มิลลิเมตร และรัศมีงูมกมีด 0.8 มิลลิเมตร.....	124

- รูปที่ 4.49 กราฟผลการทดลองที่ 7 ทดสอบความแม่นยำสมการพยากรณ์ขนาดการสึกหรอ
ด้านข้างเทียบกับเวลาในการตัดภายใต้ ความเร็วตัด 260 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.05
มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร และรัศมีจุมุมมีด 0.8 มิลลิเมตร131
- รูปที่ 4.50 กราฟผลการทดลองที่ 8 ทดสอบความแม่นยำสมการพยากรณ์ขนาดการสึกหรอ
ด้านข้างคมตัด (Vb) เทียบกับเวลาในการตัดภายใต้ ความเร็วตัด 140 เมตร/นาที อัตราการป้อน
ตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร และรัศมีจุมุมมีด 0.8 มิลลิเมตร131

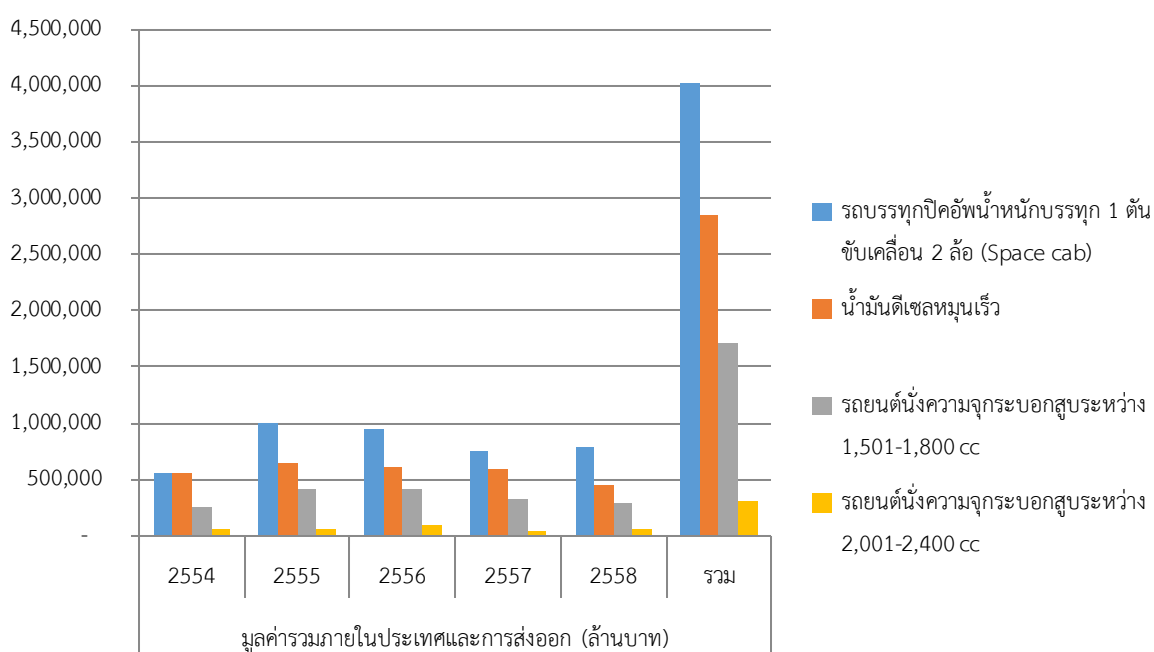


บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตถือเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่ขับเคลื่อนและพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศไทยซึ่งสามารถสร้างมูลค่าเพิ่มคิดเป็นร้อยละ 9 ของผลิตภัณฑ์มวลรวมภายในประเทศภาคการผลิต โดยสัดส่วนมูลค่าผลผลิตอุตสาหกรรมต่อผลิตภัณฑ์มวลรวมภายในประเทศ[1] และมูลค่าการส่งออกสินค้าอุตสาหกรรมต่อมูลค่าการส่งออกรวมนั้นมีอัตราการขยายตัวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งกลุ่มสินค้าอุตสาหกรรมที่ต้องใช้เทคโนโลยีระดับกลางและสูง เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ เป็นต้น



รูปที่ 1.1 กราฟแสดงมูลค่ารวมภายในประเทศและการส่งออกของอุตสาหกรรมในประเทศไทย [2]

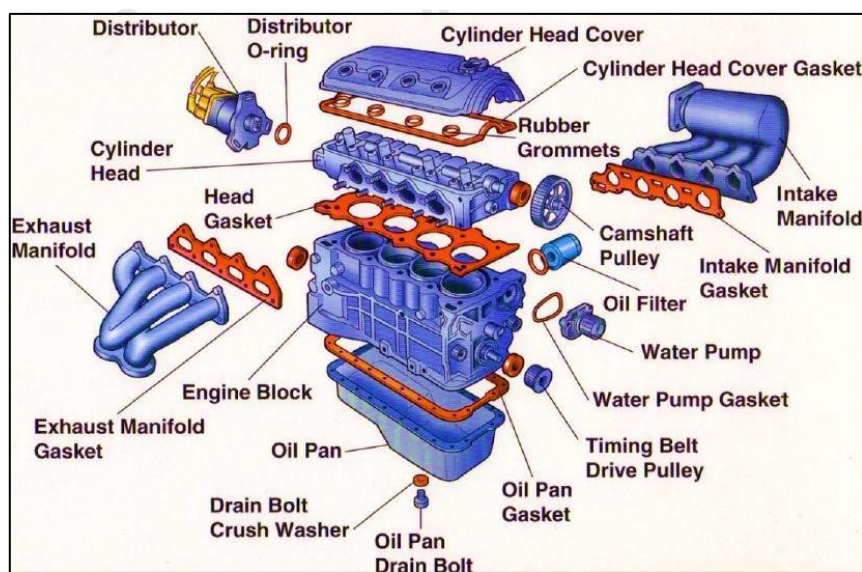
อุตสาหกรรมยานยนต์ถือเป็นอุตสาหกรรมที่มีมูลค่ารวมภายในประเทศและการส่งออกสูงเป็นอันดับต้น จากรูปที่ 1.1 จะเห็นได้ว่าตั้งแต่ปี พ.ศ.2554 จนถึงปี พ.ศ.2558 อุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์นั้นเป็นอันดับหนึ่งมาโดยตลอด ซึ่งมูลค่ารวมอันดับหนึ่ง คือ รถยนต์ประเภทรถบรรทุกทุกปีคัพ

น้ำหนักบรรทุกทุก 1 ตัน ขับเคลื่อน 2 ล้อ มีมูลค่าเท่ากับ 4,024,710 ล้านบาท ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลต่อการเติบโตของอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์

นอกจากนี้กลุ่มอุตสาหกรรมยานยนต์และชิ้นส่วนยังถูกคัดเลือกให้เป็นอุตสาหกรรมนำร่องในการพัฒนาอุตสาหกรรมของประเทศไทยในแผนแม่บทการพัฒนาอุตสาหกรรมไทย พ.ศ.2555-2575 จะเห็นได้ว่าอุตสาหกรรมกลุ่มนี้ควรได้รับการพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีการผลิตเพื่อเพิ่มผลิตภาพ (Productivity)

อุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ถือเป็นส่วนสนับสนุนอุตสาหกรรมยานยนต์ ซึ่งสามารถจัดโครงสร้างได้เป็น 2 ระดับ [3] คือ ระดับที่ 1 ชิ้นส่วนหลัก และระดับที่ 2 ชิ้นส่วนย่อย นอกจากนี้ชิ้นส่วนหลักสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 กลุ่ม คือ 1) กลุ่มระบบช่วงล่าง (Suspension) 2) กลุ่มระบบส่งกำลัง (Powertrain) 3) กลุ่มไฟฟ้า (Electrical and electronic) 4) กลุ่มตัวถัง (Body) และ 5) กลุ่มอื่นๆ

ชิ้นส่วนยานยนต์กลุ่มระบบส่งกำลัง (Power train) เช่น ลูกสูบ (Piston) ก้านสูบ (Connecting rod) เพลาข้อเหวี่ยง (Crankshaft) และเพลาลูกเบี้ยว (Camshaft) เป็นต้น ซึ่งเป็นส่วนประกอบหนึ่งในระบบเครื่องยนต์ (Engine system) แสดงดังรูปที่ 1.2 โดยส่วนมากจะผลิตจากวัสดุที่เป็นโลหะ เนื่องจากต้องการคุณสมบัติทางกล ด้านทนทานต่อความร้อนสูง มีความแข็งแรงทนทานต่อแรงบิด ทนทานต่อความล้า และการเสียดสี ฉะนั้นเหล็กกล้าคาร์บอนเป็นวัสดุที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเป็นชิ้นส่วน



รูปที่ 1.2 ชิ้นส่วนในระบบเครื่องยนต์ (Engine system) [3]

เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางเกรด JIS S45C ถูกเลือกใช้เป็นวัสดุในการขึ้นรูปชิ้นส่วนในระบบเครื่องยนต์อย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นกลุ่มเหล็กที่มีคุณสมบัติที่ดีในหลายด้าน ทั้งความแข็งแรง ความเหนียว ความทนทานต่อการเสียดสีและยังสามารถอบชุบเพื่อเพิ่มความแข็งได้อีกด้วย ชิ้นส่วนในเครื่องยนต์ที่ขึ้นรูปต้องมีความเที่ยงตรงของขนาด สามารถควบคุมผิวสำเร็จได้ อีกทั้งยังต้องมีความรวดเร็วในการผลิตเพื่อตอบสนองความต้องการ ดังนั้นกระบวนการผลิตที่เหมาะสม คือ กระบวนการตัด (Machining) ซึ่งเป็นกระบวนการกำจัดเศษโลหะส่วนที่ไม่ต้องการออก และในปัจจุบันเครื่องจักรซีเอ็นซีถูกนำมาใช้ในกระบวนการนี้เพื่อลดเวลาในการผลิตและควบคุมคุณภาพของชิ้นงานให้ดียิ่งขึ้น ซึ่งเครื่องจักรซีเอ็นซีถือว่ามียุทธศาสตร์ต่ออุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์เป็นอย่างมาก

หนึ่งในกระบวนการกำจัดเศษโลหะที่ไม่ต้องการออก คือ กระบวนการกลึง (Turning) คือ กระบวนการที่ทำให้ชิ้นงานเกิดเป็นรูปร่างโดยการใช้อุปกรณ์ตัดหรือเม็ดตัดเข้าไปตัดเฉือนชิ้นงานที่กำลังหมุนอยู่ เพื่อกำจัดวัสดุส่วนเกินออก วัสดุส่วนที่เหลือจะมีรูปร่างตามที่ต้องการ ในระหว่างกระบวนการกลึงจะเกิดการเสียดสีระหว่างผิวสัมผัสที่มีดกลึงกับเศษโลหะ เมื่อดึงไปได้สักระยะจะให้เกิดความร้อนสะสม ซึ่งส่งผลต่อการสึกหรอของเม็ดตัด (Tool wear) และความขรุขระผิวชิ้นงาน (Roughness) เหล่านี้มีผลกระทบโดยตรงต่อต้นทุนการผลิต เนื่องจากต้องเปลี่ยนเม็ดตัดใหม่หรือเกิดของเสียจากผิวชิ้นงานที่มีความเรียบผิวเกินมาตรฐาน วิธีการหนึ่งที่จะสามารถลดอัตราการสึกหรอของเม็ดกลึงและลดค่าความขรุขระผิวได้นั้น คือ การใช้สารหล่อเย็น (Cutting fluid) แต่การใช้สารหล่อเย็นก่อให้เกิดผลกระทบโดยตรงด้านสิ่งแวดล้อม เป็นอันตรายต่อมนุษย์เมื่อสูดดมสารระเหยจากสารหล่อเย็น และเป็นการเพิ่มต้นทุนการผลิต จึงมีการวิจัยเพื่อลดการใช้สารหล่อเย็นให้น้อยที่สุด [4] พบว่าเงื่อนไขการตัดที่ดีที่สุดที่ทำให้อายุของเม็ดตัดยาวนานที่สุด และค่าความขรุขระอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้โดยการใช้สารหล่อเย็นที่น้อยที่สุด คือเงื่อนไขการตัดแบบไม่ใช้สารหล่อเย็น (Dry cutting) จึงเริ่มมีการใช้เงื่อนไขการตัดในลักษณะนี้มากขึ้นในปัจจุบัน

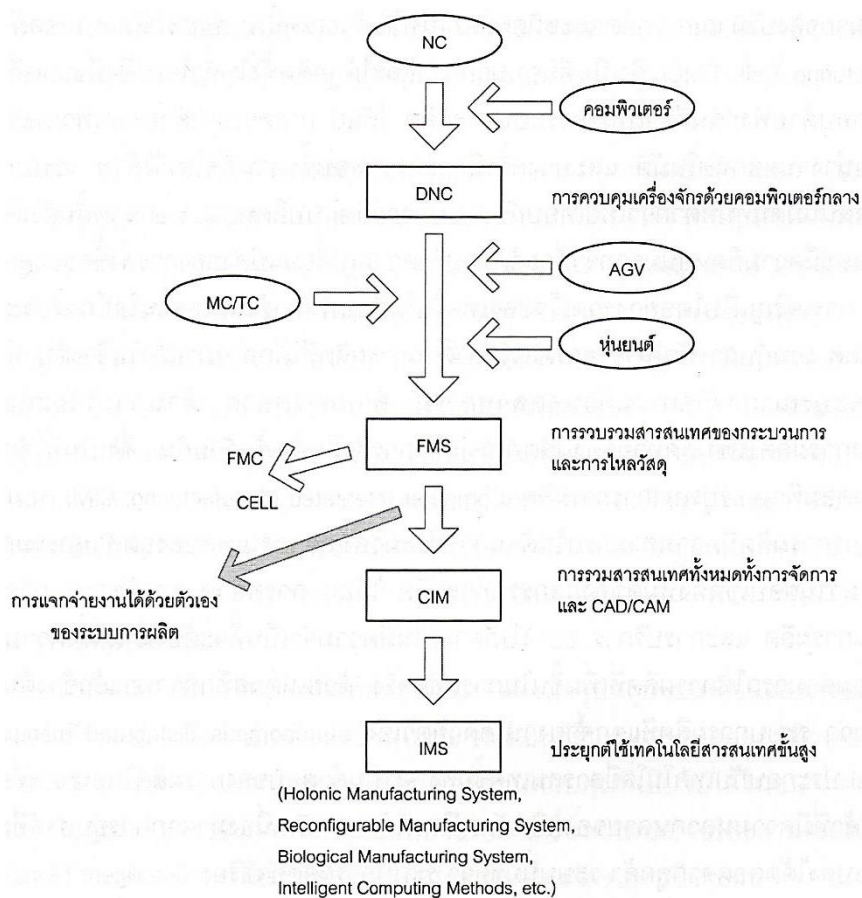
อย่างไรก็ตามปัญหาเรื่องการสึกหรอของเม็ดตัดยังคงเป็นปัญหาสำคัญในกระบวนการตัด เนื่องจากค่าเครื่องมือตัดเป็นส่วนประกอบสำคัญในต้นทุนการผลิต เม็ดตัดบางชนิดมีราคาแพง ต้นทุนค่าเครื่องมือตัดในกระบวนการจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอายุการใช้งานของเครื่องมือตัดที่สามารถผลิตชิ้นงานได้จนถึงอายุการใช้งาน และอายุการใช้งานยังขึ้นอยู่กับข้อกำหนดเงื่อนไขการตัดอันประกอบไปด้วย ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด เป็นต้น นอกจากนี้การเลือกใช้มุมคายเศษ

โลหะและขนาดของรัศมีจุมกมิตก็มีผลต่อการสึกหรอของเม็ดมิตเช่นกัน กล่าวคือเมื่อมุมคายเศษโลหะมีค่าเป็นบวกจะทำให้ระนาบเฉือนน้อยลง เศษโลหะมีความบาง แรงเฉือนที่เกิดขึ้นมีค่าน้อย ฉะนั้นแนวโน้มการสึกหรอของเครื่องมือตัดจะเกิดขึ้นช้าลง ส่วนรัศมีจุมกมิตที่มีขนาดเล็กจะทำให้เกิดพื้นผิวสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับเม็ดมิตน้อย ดังนั้นจึงเกิดการเสียดสีกันน้อย ทำให้การสึกหรอเกิดขึ้นช้าลงเช่นกัน

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นทำให้ทราบว่า การกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมมีส่วนสำคัญในการช่วยยืดอายุการใช้งานของเครื่องมือตัด จึงมีความจำเป็นต้องศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอของเม็ดมิตกับเงื่อนไขการตัดต่างๆ โดยใช้เครื่องมือทางสถิติและการทดลองเพื่อให้ทราบถึงอิทธิพลของแต่ละพารามิเตอร์ต่อการสึกหรอของเม็ดมิตที่จะนำไปสู่การพัฒนาสมการสำหรับพยากรณ์การสึกหรอของเม็ดมิตต่อไป

1.1.1 การพัฒนาเครื่องจักรอัจฉริยะในอุตสาหกรรมการผลิต

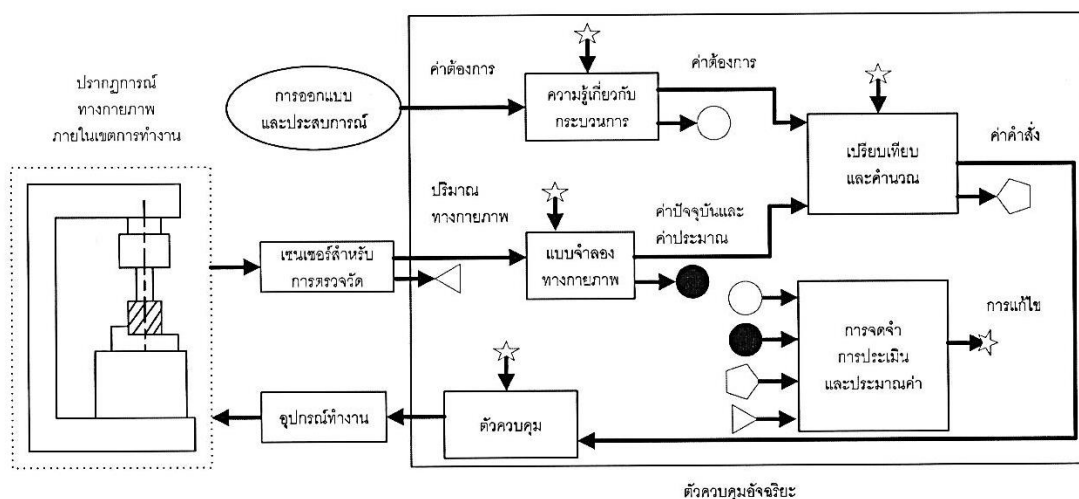
เนื่องจากการแข่งขันในอุตสาหกรรมสูงขึ้น ผู้ผลิตที่สามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้ดี คือผู้ผลิตที่ไม่เพียงแต่สามารถส่งมอบสินค้าได้ทันเวลา มีคุณภาพสูง หากยังต้องมีการใช้นวัตกรรมของเทคโนโลยีระดับนาโนเมตรเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขัน ระบบการผลิตอัจฉริยะ (Intelligent Manufacturing System, IMS) จึงถูกพัฒนาขึ้นให้สามารถควบคุมและตรวจสอบตัวเองได้เพื่อผลิตชิ้นงานที่เป็นไปตามข้อกำหนดของการออกแบบ ดังแสดงในรูปที่ 1.2 ระบบการผลิตนั้นถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยเริ่มต้นระบบอัตโนมัติและการจัดระบบการผลิตสมัยใหม่ โดยมีการสร้างเครื่องจักรกลควบคุมเชิงตัวเลข (Numerical Control, NC) ต่อมาถูกพัฒนาให้มีหน่วยควบคุมกลางจากคอมพิวเตอร์เพื่อควบคุมเครื่องจักรกลควบคุมเชิงตัวเลขหลายๆเครื่องพร้อมกัน เรียกว่า ระบบการควบคุมเชิงตัวเลขทางตรง (Direct NC, DNC) หลังจากนั้นมีการรวมระบบควบคุมการไหลของวัสดุและชิ้นงาน (Automated Guide Vehicle, AGVs) ระบบเทคโนโลยีสารสนเทศเข้ากับระบบการผลิต และเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ (CNC Machining Center, NC) เครื่องกลึงซีเอ็นซีเซ็นเตอร์ (CNC Turning Center, TC) เรียกว่า ระบบการผลิตแบบยืดหยุ่น (Flexible Manufacturing System, FMS) เนื่องจากระบบการผลิตแบบยืดหยุ่นมีการลงทุนสูงจึงได้รับความนิยมในช่วงสั้น จึงมีการนำระบบผลิตแบบเซลล์ (Flexible Manufacturing Cell, FMC) ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าซึ่งได้รับความนิยมมาก



รูปที่ 1.3 การพัฒนาเทคโนโลยีของกระบวนการผลิตอัจฉริยะ [5]

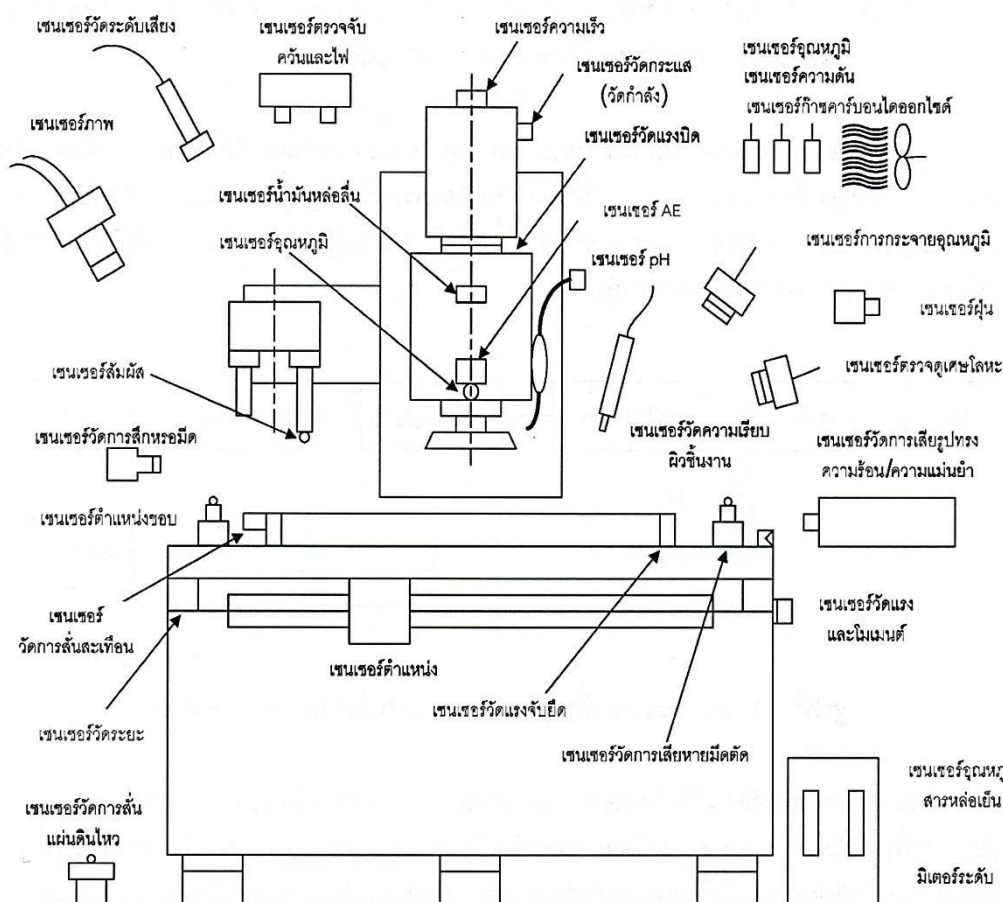
ต่อมาการพัฒนาโดยใช้ระบบคอมพิวเตอร์ในการประมวลผลสารสนเทศอุตสาหกรรมการผลิตหรือที่เรียกว่า คอมพิวเตอร์บูรณาการการผลิต (Computer Integrated Manufacturing, CIM) มีความสามารถในการประมวลผลการออกแบบผลิตภัณฑ์โดยใช้คอมพิวเตอร์ (Computer Aid Design, CAD) และยังสามารถนำ CAD ไปประมวลผลทางด้านกระบวนการผลิตด้วยคอมพิวเตอร์ (Computer Aid Manufacturing, CAM) และซอฟต์แวร์ สำหรับเป็นตัวขับเคลื่อนและควบคุมเครื่องจักรกล ซึ่งระบบ CIM นั้นยังไม่มีคามยืดหยุ่น ดังนั้นระบบการผลิตที่แจกจ่ายงานด้วยตัวเอง (Autonomous Distributed Manufacturing System) ร่วมกับเทคโนโลยีสารสนเทศขั้นสูงเหล่านี้ เรียกว่า ระบบการผลิตอัจฉริยะ (Intelligent Manufacturing) ซึ่งสามารถตอบโจทย์ทางด้านความหลากหลายในการผลิตผลิตภัณฑ์ใหม่ตามอุปสงค์ของลูกค้าที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ด้วยเหตุนี้ จึงมีการพัฒนาเครื่องจักรกลอัจฉริยะให้สามารถปรับเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมได้ด้วยตัวเอง ผ่านตัว

ควบคุมอัจฉริยะ โดยการจดจำ ประเมิน และประมาณค่า ซึ่งข้อมูลจะถูกส่งมาจากเซนเซอร์ที่ถูกติดตั้งอยู่ในตำแหน่งต่างของเครื่องจักรกล แสดงดังรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 ระบบการทำงานของเครื่องจักรกลอัจฉริยะ [5]

ดังที่กล่าวข้างต้น เซนเซอร์จะถูกใช้เพื่อทำหน้าที่รับรู้สัญญาณและส่งต่อไปยังตัวควบคุม ปัจจุบันการวัดสัญญาณมีด้วยกัน 6 แบบ คือ สัญญาณรังสี สัญญาณทางกล สัญญาณความร้อน สัญญาณทางไฟฟ้า สัญญาณแม่เหล็ก และสัญญาณเคมี โดยเซนเซอร์จะต้องถูกติดตั้งอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการตรวจจับแสดงดังรูปที่ 1.5 โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกระบวนการกลึงด้วยเครื่องกลึงซีเอ็นซี

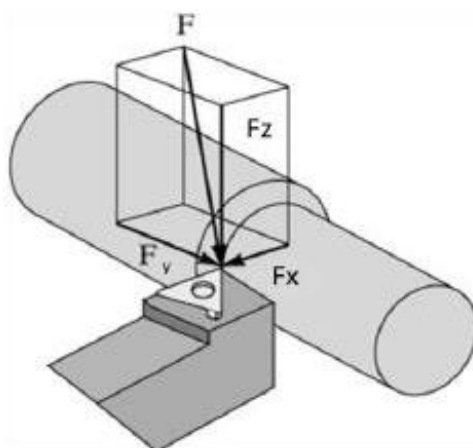


รูปที่ 1.5 เซนเซอร์สำหรับการตรวจติดตามในเครื่องจักรกล [5]

1.1.2 การตรวจติดตามและทำนายการสึกหรอของเครื่องมือตัด

จากทฤษฎีการสึกหรอของเครื่องมือตัดและแรงตัดในกระบวนการกลึง อัตราการสึกหรอของมีดตัดขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ไม่ว่าจะเป็นเงื่อนไขการตัด ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด มุมคายเศษโลหะ รัศมีงูมมีด วัสดุของชิ้นงาน และการใช้สารหล่อเย็น เคยมีการวิจัยก่อนหน้านี้ได้ทำการศึกษาอิทธิของแรงตัดพลวัตกับการสึกหรอของมีดมีดคาร์ไบด์เคลือบผิว [6] พบว่า เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการตัด แรงตัดพลวัตจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปอย่างมีนัยสำคัญ และแรงตัดพลวัตที่ในกระบวนการตัดประกอบด้วย 3 ส่วน คือ 1) แรงป้อนตัดพลวัต (Feed force, F_y) 2) แรงตัดหลักพลวัต (Main force, F_z) และ 3) แรงรุนพลวัต (Thrust force, F_x) แสดงดังรูปที่ 1.6 แต่ในกระบวนการกลึง (Turning process) เราจะสนใจเฉพาะแรงป้อนตัดพลวัตและแรงตัดหลักพลวัต เนื่องจากแรงป้อนตัดพลวัตมีค่าแปรผันตรงกับค่าความขรุขระผิวของชิ้นงาน และความขรุขระผิวมีค่า

แปรผันตรงต่อขนาดการสึกหรอเม็ดมีดเช่นกัน กล่าวคือ แรงป้อนตัดพลวัตจะมีค่ามากเมื่อขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดมาก ในส่วนของแรงตัดหลักพลวัตซึ่งมีทิศทางตามการหมุนของชิ้นงาน ดังนั้นจึงแปรผันตรงกับปริมาณเศษโลหะ (MRR) ชนิดของวัสดุ และการสั่นสะเทือน เป็นสาเหตุของการสึกหรอของเม็ดมีด ดังนั้นการใช้แรงป้อนตัดพลวัตและแรงตัดหลักพลวัต มาทำอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (F_y/F_z) เพื่อใช้ประมาณค่าการสึกหรอของเม็ดมีดตัดสามารถทำได้ โดยกำจัดอิทธิพลเนื่องจากเงื่อนไขการตัดต่างๆที่เปลี่ยนแปลงไป ส่วนแรงตัดพลวัตในแนวรัศมีของชิ้นงานหรือแรงรูนพลวัต (Thrust force, F_x) มีปริมาณน้อยมากซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับการสึกหรอของเม็ดมีดจึงไม่ถูกนำมาพิจารณา



รูปที่ 1.6 แรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นในกระบวนการกลึง [7]

การประมาณค่าความสึกหรอของเม็ดมีดด้านข้างโดยการตรวจติดตามสัญญาณแรงตัดที่ได้จากไดนาโมมิเตอร์เป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมมากที่สุด [8] มีหลายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำนายการสึกหรอของเครื่องมือตัด โดยใช้การตรวจจับแรงตัดและหาความสัมพันธ์ของเงื่อนไขการตัด แรงตัด และการสึกหรอของเครื่องมือตัด ดังตารางที่ 1.1 ดังนี้

ตารางที่ 1.1 เปรียบเทียบงานวิจัยในอดีตที่ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอของมีดตัดกับ
แรงตัด

งานวิจัย	รายละเอียด	เงื่อนไขการตัด	ข้อจำกัด
[9]	การประมาณการสึกหรอของมีดกัดหัวบอลคาร์ไบด์เคลือบผิวด้วยไทเทเนียมอลูมิเนียมไนไตรต์ในกระบวนการกัดชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S50C โดยใช้ในการตรวจจับสัญญาณแรงตัดสถิต ของขนาดการสึกหรอที่ศูนย์กลาง (Central wear) แรงตัดสถิตที่วัดนั้นมาจาก 2 ทิศทาง คือ แรงที่เกิดขึ้นตรงบริเวณคมตัด (Fx) และแรงที่เกิดจากพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับมีดกัด (Fz) ทำการวิเคราะห์ถดถอยเชิงพหุนามเพื่อหาสมการความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแรงเงื่อนไขการตัด ต่อค่าความสึกหรอของมีดกัด	<ul style="list-style-type: none"> ● ความเร็วตัด ● อัตราการป้อนตัด ● ความลึกตัด ● ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัด 	การตรวจจับแรงตัดสถิตนั้นไม่ได้ให้ที่แรงแท้จริงในขณะตัด
[6]	การทำนายการสึกหรอของมีดกลึงคาร์ไบด์เคลือบผิวด้วยไททาเนียมคาร์บอนไนไตรด์กับอะลูมิเนียมออกไซด์ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiCN+Al ₂ O ₃ TiN) ในกระบวนการกลึงชิ้นงานเหล็กกล้า S45C โดยใช้ในการตรวจจับสัญญาณแรงตัดพลวัต ของขนาดการสึกหรอด้านข้าง (Flank wear) แรงตัดพลวัต 3 ทิศทาง คือ แรงที่เกิดในทิศการป้อนตัด (dFy) แรงตัดหลัก (dFz) และแรงตัดในแนวทึร์ศมีชิ้นงาน (dFx) จากนั้นวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอกับอัตราส่วนแรงตัด dFy/dFz และวิเคราะห์ถดถอยเชิงพหุนามเพื่อสร้างสมการทำนายการสึกหรอของมีดตัด	<ul style="list-style-type: none"> ● ความเร็วตัด ● อัตราการป้อนตัด ● ความลึกตัด ● รัศมีจุมุมมีด ● มุมคายเศษโลหะ 	สมการทำนายที่ได้จากการวิจัยไม่รวมถึงรัศมีจุมุมมีดและมุมคายเศษโลหะ เนื่องจากเป็นตัวแปรที่กำหนดเป็นค่าคงที่ในการตัด

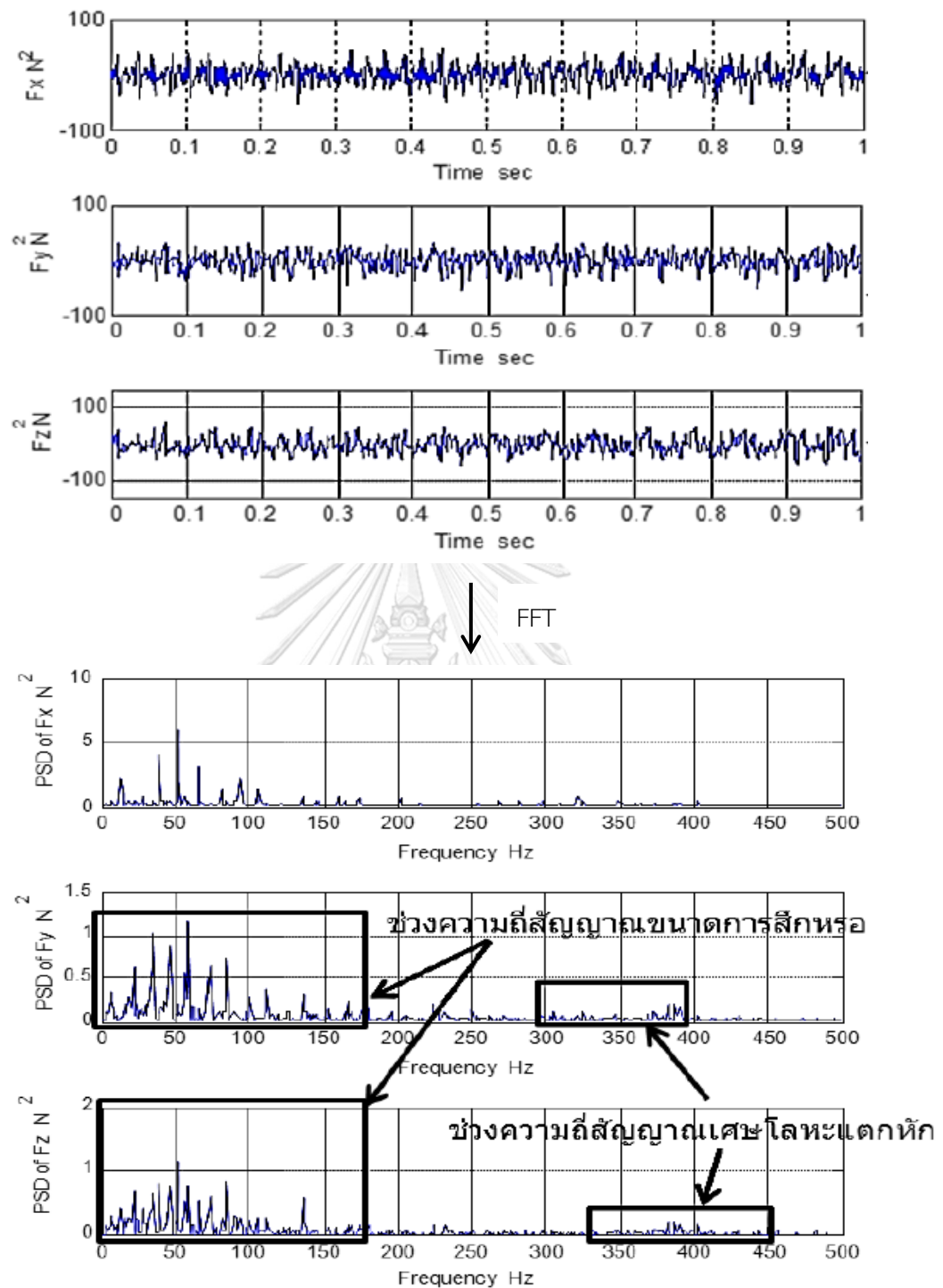
ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบงานวิจัยในอดีตที่ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอของมีดตัดกับแรง
ตัด (ต่อ)

[10]	<p>การประมาณการสึกหรอของมีดมีดกลึงซีเมนต์คาร์ไบด์เคลือบด้วยไทเทเนียมไนไตรด์ โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมในกระบวนการกลึงเหล็กกล้าเครื่องมือเกรด JIS SKS3 และเกรด JIS SKD11 โดยทำการเก็บค่าขนาดการสึกหรอของมีดมีดแนวเส้นยาวตามคมตัด (Flank wear) และอัตราการกำจัดเนื้อวัสดุ (MRR) จากนั้นทำการทำนายค่าการสึกหรอด้วย Multilayer perceptron network ของโปรแกรม MATLAB ปรากฏว่าสมการประมาณการสึกหรอสำหรับเกรด SKS3 และ SKD11 มีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยเท่ากับ 1.68% และ 2.84% ตามลำดับ</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● ความเร็วตัด ● อัตราการป้อนตัด ● ความลึกตัด 	<p>งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงความแม่นยำในการทำนายผลค่าการสึกหรอโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมแต่สามารถใช้ได้เฉพาะกับเหล็กกล้าเกรดที่อยู่ในการทดลองเท่านั้น ไม่มีการนำอัตราส่วนแรงตัดมาพิจารณาเพื่อกำจัดอิทธิของวัสดุในขณะตัด</p>
[11]	<p>การทำนายแรงตัด การสึกหรอของมีดกัดและความขรุขระผิวของอะลูมิเนียม (Al6061) ในกระบวนการกัดด้วยมีดมีดทั้งสเตนคาร์ไบด์ ทำการเก็บค่าแรงตัดในแนว Fx และ Fz ด้วยการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว เก็บค่าความขรุขระผิว Ra และขนาดการสึกหรอมีดกัด จากนั้นวิเคราะห์ด้วยวิธีการพื้นผิวสนองตอบ จึงทราบว่าเงื่อนไขการตัดทุกปัจจัยมีอิทธิพลต่อค่า Fx, Fz, Tw และ Ra ในกระบวนการตัดอย่างมีนัยสำคัญ เช่น แรงตัด Fz ได้รับอิทธิพลมากกว่าแรงตัด Fx อย่างชัดเจน อัตราการสึกหรอของมีดกัดเพิ่มขึ้นเมื่อลดความเร็วตัดลงและยังทำให้เกิดเส้นที่ผิวชิ้นงาน เป็นต้น</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● ความเร็วตัด ● อัตราการป้อนตัด ● ความลึกตัด ● รัศมีงมูมมีด 	<p>งานวิจัยมุ่งเน้นที่กระบวนการกัดของอะลูมิเนียม Al6061 ตรวจสอบอิทธิพลของเงื่อนไขการตัดที่มีผลต่อแรงตัด ความขรุขระผิวชิ้นงานและการสึกหรอมีดกัด แต่ไม่มีการพัฒนาโมเดลเพื่อทำนายขนาดการสึกหรอมีดกัดและค่าความขรุขระผิว</p>

อย่างไรก็ตามปัญหาการสึกหรอของเม็ดมีดยังคงเป็นปัญหาสำคัญ เนื่องจากส่งผลกระทบต่อโดยตรงต่อต้นทุนการผลิตและคุณภาพของชิ้นงาน เป็นเหตุให้เกิดงานวิจัยที่พยายามอธิบายอิทธิพลของเงื่อนไขการตัดต่างๆ ต่ออัตราการสึกหรอของเม็ดมีด เพื่อพัฒนาสมการประมาณค่าการสึกหรอและอายุการใช้งานของมีดตัดด้วยวิธีการต่างๆ ซึ่งสามารถนำไปใช้เพื่อพัฒนาเครื่องจักรอัจฉริยะต่อไป จากการทำทบทวนงานวิจัยดังตารางที่ 1.1 พบว่าบางงานวิจัยยังมีข้อจำกัดทางด้านเงื่อนไขการตัดที่นำมาทำการทดลอง วิธีการตรวจติดตามสัญญาณแรงตัด และการพัฒนาสมการพยากรณ์การสึกหรอ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เงื่อนไขการตัดให้ครอบคลุมมากขึ้น รวมถึงวิธีการตรวจติดตามสัญญาณแรงตัดให้มีความแม่นยำมากขึ้น นำไปสู่การพัฒนาสมการพยากรณ์ขนาดการสึกหรอของเครื่องมือตัดที่แม่นยำมากขึ้นเช่นกัน

1.1.3 การตรวจติดตามสัญญาณแรงตัดโดยการแปลงเวฟเล็ต

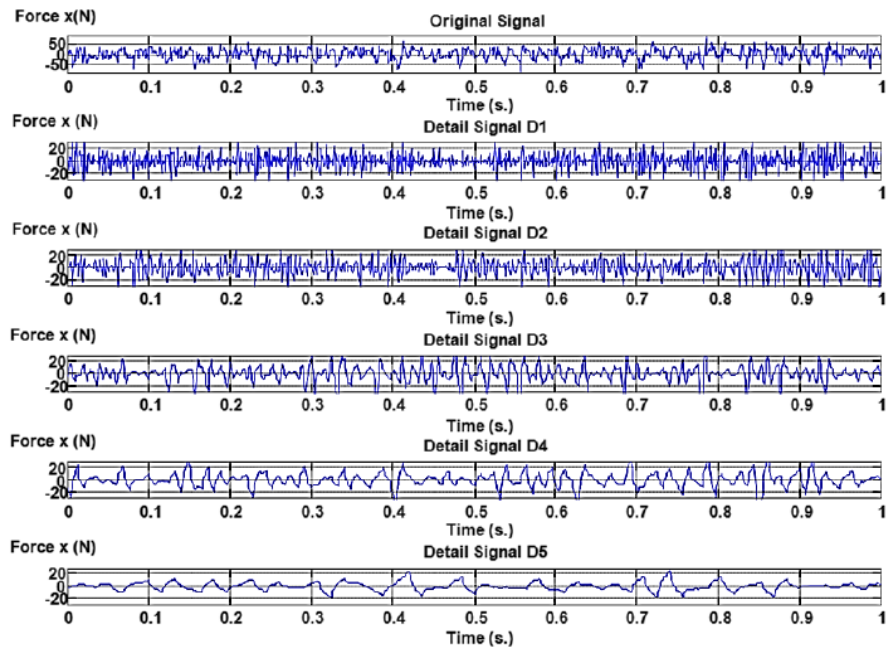
ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดต่อการสึกหรอของเม็ดมีด เพื่อให้เกิดความแม่นยำในการเลือกค่าสัญญาณแรงตัดมาทำการวิเคราะห์ มีหลายงานวิจัยได้นำวิธีการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform) [12-14] มาเป็นเครื่องมือสำหรับติดตามสถานการณ์ตัดด้วยการจำแนกสัญญาณแรงตัดที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการตัด สามารถจำแนกได้โดยการแปลงสัญญาณในโดเมนเวลาเป็นโดเมนความถี่ ในกระบวนการตัดนั้นจะมีความปะปนกันของหลายสัญญาณแรง เช่น สัญญาณแรงตัดเนื่องจากการแตกหักของเศษโลหะ ซึ่งการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วสามารถจำแนกแยกสัญญาณเศษโลหะแต่ละประเภทที่มีช่วงความถี่แตกต่างกันได้ดียิ่งขึ้น [15] หรือแม้กระทั่งสัญญาณแรงตัดเนื่องจากการสึกหรอของเครื่องมือตัดนั้นก็ยังสามารถแยกสัญญาณแรงตัดที่มีความปะปนกันของสัญญาณแรงตัดจากการแตกของเศษโลหะ (Broken chips) ได้ แสดงดังรูปที่ 1.7



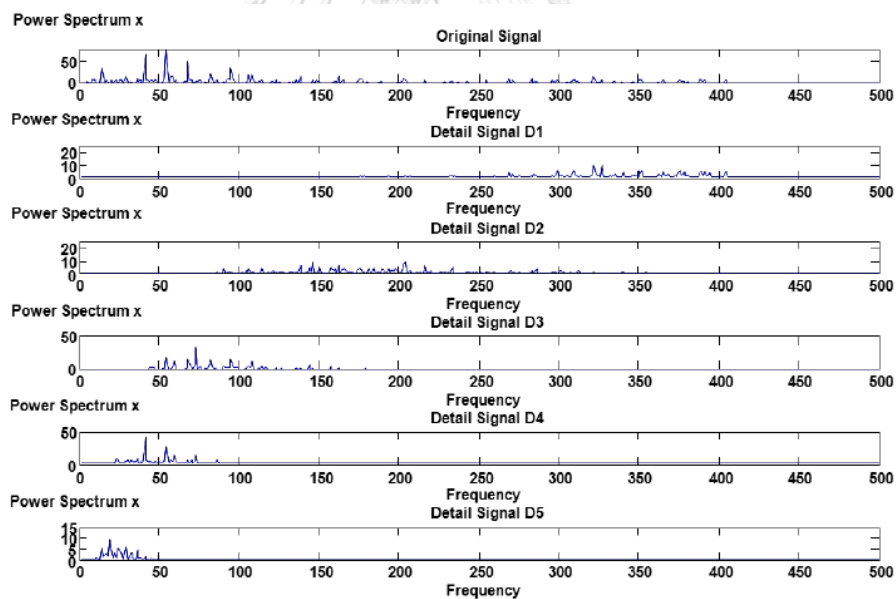
รูปที่ 1.7 ตัวอย่างการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (FFT) ของสัญญาณแรงตัดที่เกิดการสั่นหรือของเม็ดมีด 0.21 มิลลิเมตร อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที และความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร [6]

จากรูปที่ 1.7 จะเห็นได้ว่าในโดเมนความถี่แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างช่วงความถี่สัญญาณเศษโลหะแตก (Broken chip) กับช่วงความถี่สัญญาณการสีกหรืออย่างเห็นได้ชัด ซึ่งความถี่ของสัญญาณเศษโลหะมีค่าสูงกว่าความถี่สัญญาณขนาดการสีกหรือ สังกเกตได้จากสัญญาณการสีกหรือขนาดค่าความหนาแน่นของพาวเวอร์สเปกตรัมสะสม (Power spectrum of density, PSD) เป็นบริเวณกว้างและค่าแอมพลิจูดที่สูง เนื่องจากเมื่อเม็ดมีดเกิดการสีกหรือจะทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับเม็ดมีดมากขึ้น แรงที่ใช้ในการตัดจึงเพิ่มขึ้น จึงมีแนวโน้มในการเกิดแชตเตอร์ (Chatter) หรือการสั่นสะเทือนทำให้เศษโลหะแตกหักแบบผสม อย่างไรก็ตามความถี่ของสัญญาณขนาดการสีกหรือยังมีความถี่ของเศษโลหะแตกหักบางส่วนปะปนอยู่ ในงานวิจัยจำเป็นต้องกำจัดสัญญาณแรงตัดในช่วงความถี่ที่ไม่เกี่ยวข้องกับการสีกหรือออกเพื่อให้เกิดความแม่นยำในการวิเคราะห์หรือการสร้างตัวแบบต่อไป

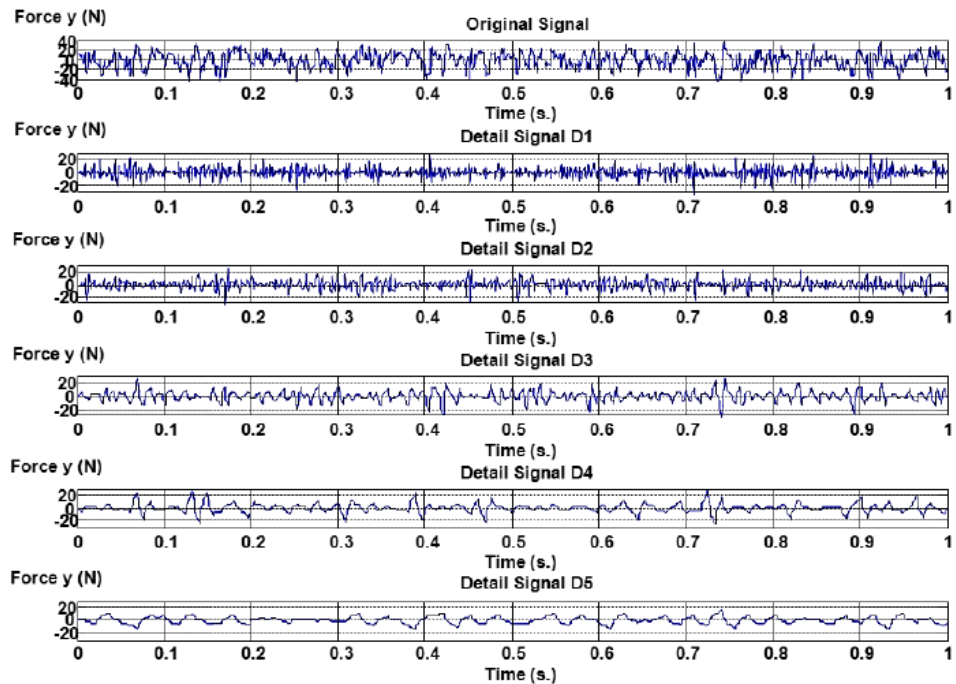
ต่อมาภายหลังจึงมีการพัฒนาวิธีการแปลงเวฟเล็ตและนำมาใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณแรงตัด เพื่อแยกสัญญาณความถี่ออกจากกันได้เป็นอย่างดี [13, 16-18] ดังตัวอย่างในรูปที่ 1.8 – 1.13 จะเห็นได้ว่าการแปลงเวฟเล็ตจะทำการแปลงสัญญาณแรงตัดในแนวแกน F_x , F_y และ F_z โดยแยกย่อยสัญญาณแรงตัดออกเป็นระดับชั้นในแต่ละช่วงความถี่ ทั้งในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ จากระดับสัญญาณความถี่สูงลงไปยังสัญญาณความถี่ต่ำ กล่าวคือระดับชั้นที่ต่ำจะแสดงสัญญาณความถี่สูง และระดับชั้นที่สูงจะแสดงสัญญาณความถี่ต่ำ ดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้นว่า ความถี่สัญญาณเศษโลหะแตกหัก (Broken chip) มีค่าสูงกว่าความถี่สัญญาณขนาดการสีกหรือ ดังนั้นสัญญาณแรงตัดเนื่องจากการสีกหรือจะปรากฏในระดับชั้นที่สูงกว่า



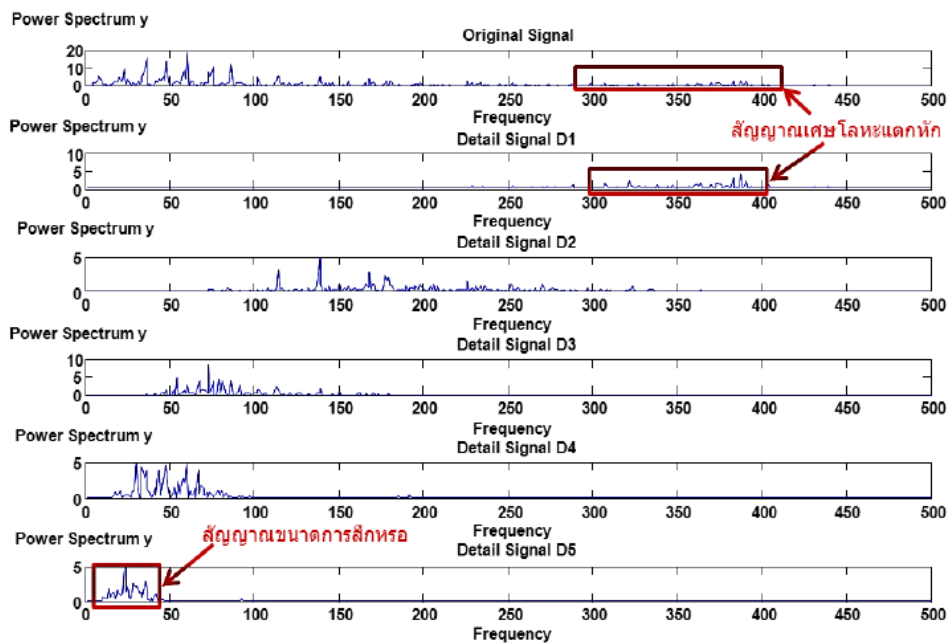
รูปที่ 1.8 ตัวอย่างการแปลงเวฟเล็ตสัญญาณแรงตัด F_x ในโดเมนเวลา อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที และความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร [6]



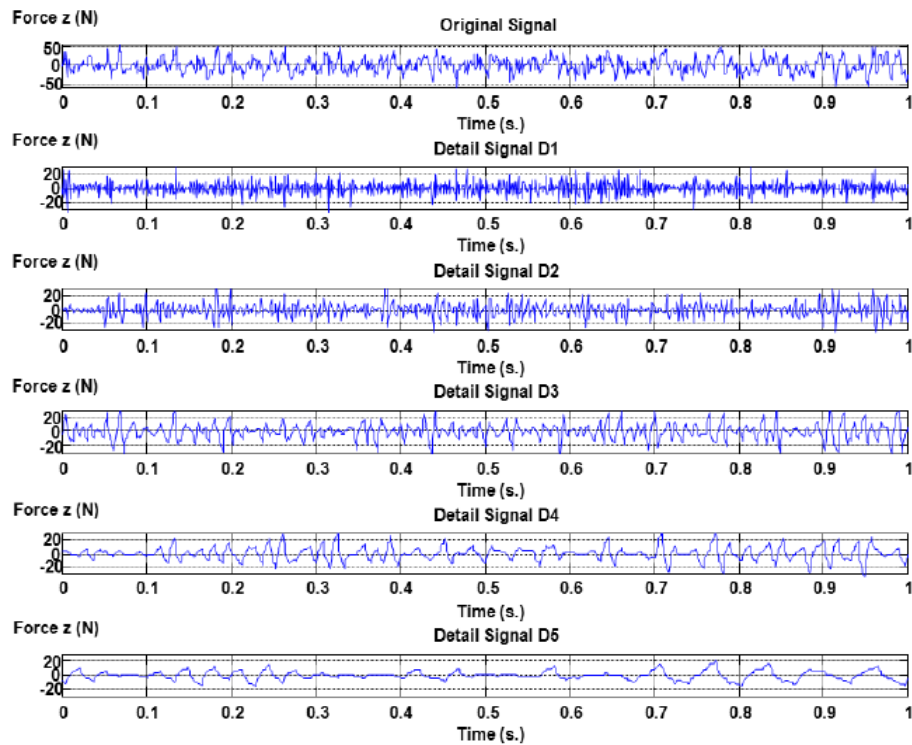
รูปที่ 1.9 ตัวอย่างการแปลงเวฟเล็ตสัญญาณแรงตัด F_x ในโดเมนความถี่ อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที และความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร [6]



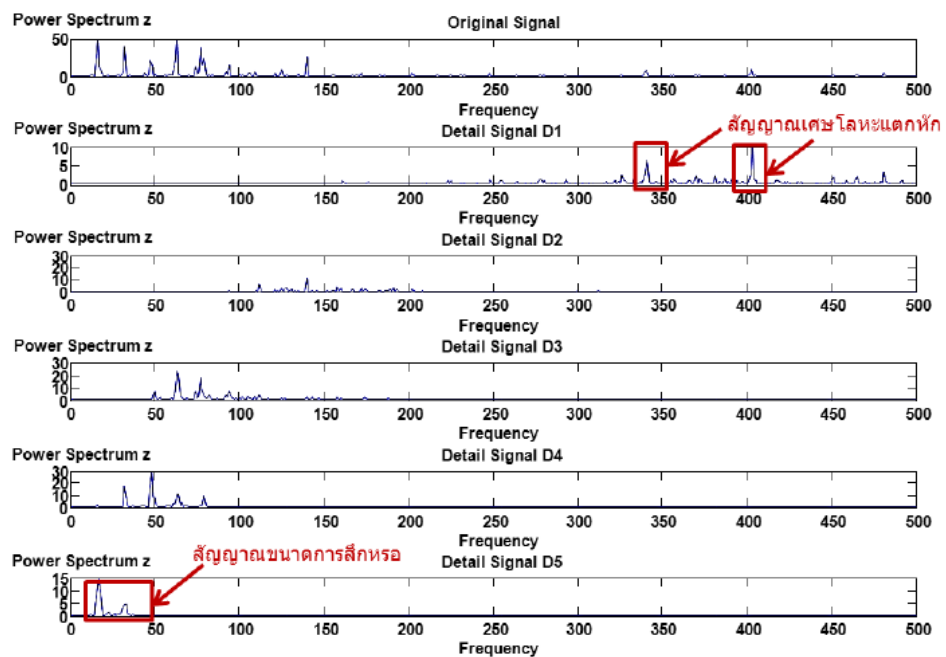
รูปที่ 1.10 ตัวอย่างการแปลงเวฟเล็ตสัญญาณแรงตัด F_y ในโดเมนเวลา อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที และความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร [6]



รูปที่ 1.11 ตัวอย่างการแปลงเวฟเล็ตสัญญาณแรงตัด F_y ในโดเมนความถี่ อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที และความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร [6]



รูปที่ 1.12 ตัวอย่างการแปลงเวฟเล็ตสัญญาณแรงตัด F_z ในโดเมนเวลา อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที และความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร [6]



รูปที่ 1.13 ตัวอย่างการแปลงเวฟเล็ตสัญญาณแรงตัด F_z ในโดเมนความถี่ อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที และความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร [6]

สามารถสรุปความแตกต่างระหว่างการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (FFT) และการแปลงเวฟเล็ต (Wavelet transform) ได้ดังตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.2 ความแตกต่างระหว่างการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วและการแปลงเวฟเล็ต

	การแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว	การแปลงเวฟเล็ต
1	ไม่สามารถแยกย่อยสัญญาณได้	สามารถแยกย่อยสัญญาณเป็นระดับชั้น
2	ไม่สามารถคัดกรองเป็นระดับชั้น	สามารถคัดกรองได้หลายระดับชั้น ตามที่ ต้องการ
3	แปลงสัญญาณได้เฉพาะจากโดเมนเวลาเป็น โดเมนความถี่	แปลงสัญญาณทั้งโดเมนเวลาและความถี่
4	เหมาะสำหรับการวิเคราะห์สัญญาณต้น กำเนิดที่มีความปะปนไม่มากนัก	เหมาะสำหรับการวิเคราะห์สัญญาณต้น กำเนิดที่มีความซับซ้อน

ในงานวิจัยนี้จึงเลือกการแปลงเวฟเล็ตในการตรวจจับสัญญาณแรงตัด เพื่อทำการคัดกรองสัญญาณแรงตัดเนื่องจากการสีกหรือออกจากสัญญาณรบกวน (Noise) ที่ไม่เกี่ยวข้องออกไป เป็นผลให้การวิเคราะห์อัตราส่วนแรงตัดพลวัตจากสัญญาณแรงตัด และสมการพยากรณ์การสีกหรือของเม็ดมีดมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

1.2 กรอบแนวคิดในการทำวิจัย

นำแรงตัดพลวัตจากการวิเคราะห์สัญญาณแรงตัดโดยการแปลงเวฟเล็ตเพื่อเลือกสัญญาณแรงตัดในช่วงการสีกหรือของเม็ดมีดกลึงที่แท้จริงมาทำอัตราส่วนแรงตัดพลวัตเพื่อกำจัดอิทธิพลจากเงื่อนไขการตัดและชนิดวัสดุของชิ้นงาน เนื่องจากอัตราส่วนแรงตัดพลวัตไม่ขึ้นกับเงื่อนไขการตัดและชนิดของวัสดุ ซึ่งอัตราส่วนแรงตัดสามารถนำมาใช้ในการพยากรณ์ค่าความเรียบผิวของชิ้นงานได้ โดยการสีกหรือของเม็ดมีดตัดนั้นส่งผลทางตรงต่อค่าความเรียบผิว [12] ดังนั้นอัตราส่วนแรงตัดพลวัตจึงสามารถใช้ในการพยากรณ์การสีกหรือของเม็ดมีดกลึงได้เช่นกัน อีกทั้งการแปลงเวฟเล็ตยังช่วยเพิ่มความแม่นยำให้กับสมการพยากรณ์อีกด้วย

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อหาความสัมพันธ์ของขนาดการสีกหรือของเม็ดมีดกลึงเคลือบผิวด้วยคาร์ไบด์กับอัตราส่วนแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นภายใต้เงื่อนไขต่างๆที่กำหนดโดยใช้การแปลงเวฟเล็ต

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. ใช้กระบวนการกัดแบบไม่ใช้สารหล่อเย็น (Dry cutting) บนเครื่องกลึงซีเอ็นซี 4 แกน
2. กำหนดปัจจัยอิสระของกระบวนการ 4 ปัจจัย คือ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด และรัศมีงูมมีต โดยใช้การออกแบบการทดลองบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken) และกำหนดระดับของแต่ละปัจจัยที่ 3 ระดับ ได้แก่

ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	150	200	250
อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	0.10	0.15	0.20
ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	1.0	1.2	1.4
รัศมีงูมมีต (มิลลิเมตร)	0.4	0.8	1.2

3. กำหนดมุมคายเศษโลหะเท่ากับ -6 องศา
4. วัสดุของชิ้นงานเป็นเหล็กกล้าคาร์บอน (S45C) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 120 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าความแข็งเท่ากับ 200 HB
5. เม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์เคลือบผิวด้วยไททาเนียมคาร์บอนไนไตรด์กับอะลูมิเนียมออกไซด์ ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiCN+Al₂O₃TiN) รูปทรงสามเหลี่ยม 60° มุมหลบ 0° ขนาดรัศมีงูมมีต 0.4, 0.8 และ 1.2 มม.
6. ด้ามยึดเม็ดมีดโดยมีมุมคายด้านข้าง (Side rake angle) -6 องศา และค่าเอียง (Angle of inclination) -6 องศา
7. การสึกหรอของมีดกัดจะกำหนดการสึกหรอบนเม็ดมีดกลึงด้านข้าง (Flank wear) ที่ขนาดของการสึกหรอต่างๆโดยไม่เกิน 0.2 มิลลิเมตร (ตามมาตรฐาน ANSI/ASME B94.55-1985) โดยทำการวัดแรงที่เกิดขึ้นในขณะตัด
8. กำหนดค่าเครื่องออสซิลโลสโคป โดยตั้งค่าต่างๆ ดังนี้
 - Low pass filter bandwidth = 500 Hz
 - Sampling rate = 1 kS/s, 1s/div, Record length = 10k
9. ตัวชี้วัดผลลัพธ์โดยสร้างโมเดลสมการการทำนายขนาดความสึกหรอของเม็ดมีดกลึงจะอยู่ในช่วง $\pm 10\%$ ของค่าวัดขนาดความสึกหรอจริง

10. สมการต้นแบบทำนายขนาดความสึกหรอของเม็ดมีดกลึงเคลือบคาร์ไบด์ ที่ประกอบไปด้วย ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด รัศมีงูมมิต และอัตราส่วนแรงตัดที่เกิดขึ้นจริงในขณะตัด ชิ้นงาน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. พัฒนาเทคโนโลยีการตรวจติดตามโดยการตรวจจับสัญญาณแรงพลวัตที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการตัดด้วยเซนเซอร์วัดแรง
2. สามารถทำนายอายุการใช้งานของมีดกัดด้วยสมการแบบจำลอง เพื่อใช้สำหรับการยืดอายุการใช้งานของเครื่องตัด โดยกำหนดเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมระหว่างกระบวนการตัดซึ่งเป็นการลดต้นทุนในกระบวนการผลิตอีกทางหนึ่ง
3. เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องจักรอัจฉริยะ เกี่ยวกับการประมาณค่าความสึกหรอของเครื่องมือตัดแบบอื่น

1.6 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษา ค้นคว้าทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง รวมถึงทบทวนงานวิจัยต่างๆ เพื่อสำรวจปัจจัยในกระบวนการกลึงเหล็กกล้าที่คาดว่าจะส่งผลต่อการสึกหรอของเม็ดมีด รวมถึงวิธีในการใช้เครื่องกลึงซีเอ็นซี วิธีการติดตั้งอุปกรณ์ วิธีการวัดขนาดการสึกหรอด้านข้าง (Flank wear)
2. กำหนดเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสม ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken) โดยกำหนดค่าความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีงูมมิต และระดับปัจจัย ที่มีผลต่อการสึกหรอของเม็ดมีดกลึง และเหมาะสมต่อการทดลอง
3. ทำการทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการสึกหรอของเม็ดมีดกลึง และอัตราส่วนแรงตัดสำหรับเงื่อนไขการตัดแบบแห้ง (Dry cutting) บนเครื่องกลึงซีเอ็นซี สำหรับชิ้นงานเหล็กกล้า
4. วัดขนาดของแรงตัดพลวัตและตรวจสอบขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดกลึง (Flank wear)
5. วิเคราะห์สัญญาณแรงตัดพลวัตในโดเมนเวลาและความถี่โดยการแปลงเวฟเล็ต (Wavelet transform)
6. วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นขณะตัดกับขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดที่เงื่อนไขการตัดต่างๆ

7. วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองเพื่อสร้างแบบจำลองทางสถิติด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least square method)
8. ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือในการทำนายขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดกลึงเคลือบผิวคาร์ไบด์ด้วยแรงตัดพลวัต
9. สรุปผลที่ได้จากงานวิจัยและข้อเสนอแนะ



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ภาพรวมของเทคโนโลยีกระบวนการกัด [19]

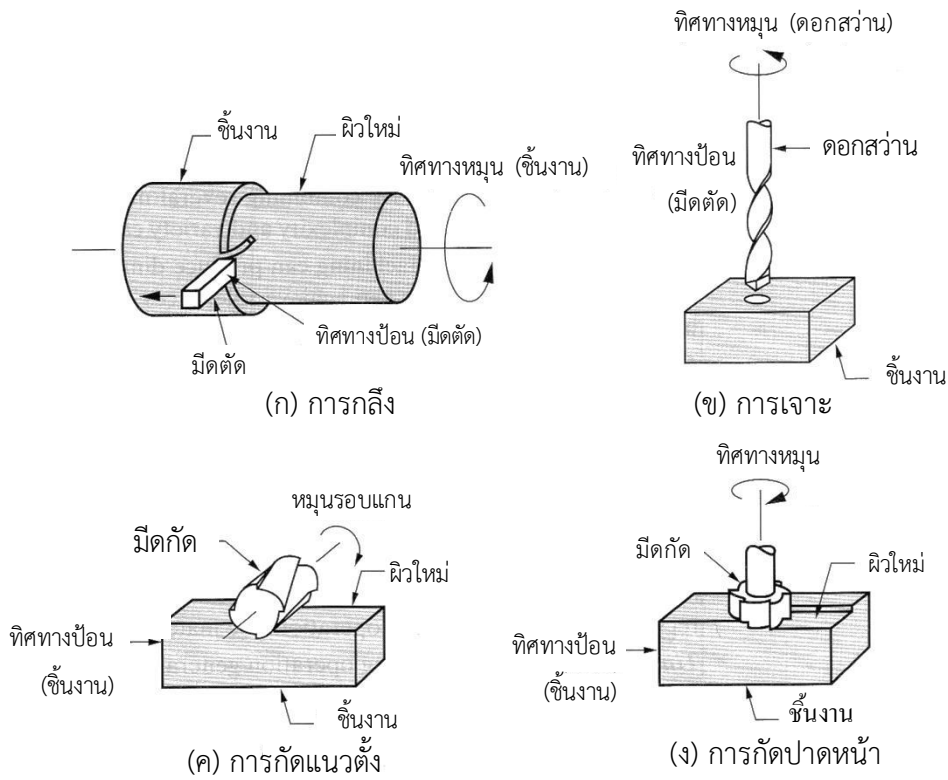
กระบวนการกัด (Machining) ไม่ได้เกิดขึ้นจากกระบวนการเดียว แต่เกิดจากหลายกระบวนการ รูปแบบโดยทั่วไปคือการใช้เครื่องมือตัดหรือมีดตัด (Cutting tool) สร้างเศษโลหะ (Chip) ซึ่งถูกกำจัดออกจากชิ้นงาน ซึ่งอาศัยการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ (Relative motion) ระหว่างเครื่องมือตัดกับชิ้นงาน การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ประกอบไปด้วย การเคลื่อนที่หลัก (Primary motion) ที่เรียกว่า ความเร็วตัด (Cutting speed) และการเคลื่อนที่รอง (Secondary motion) ที่เรียกว่า การป้อน (Feed) รูปร่างของเครื่องมือตัดและลักษณะการกัดผิวของชิ้นงานประกอบกับการเคลื่อนที่ดังกล่าว ทำให้ได้รูปร่างและผิวของชิ้นงานตามที่ต้องการ

กระบวนการกัดมีหลายประเภท แต่ละประเภทจะให้รูปร่างชิ้นงานและลักษณะของผิวที่แตกต่างกัน ปัจจุบันกระบวนการกัดที่ใช้กันทั่วไปประกอบด้วย 3 ประเภท ได้แก่ การกลึง (Turning) กระบวนการเจาะ (Drilling) และกระบวนการกัด (Milling) แสดงดังรูปที่ 2.1

การกลึง มีดตัดเป็นแบบคมตัดเดี่ยว (Single cutting edge) ใช้สำหรับการกำจัดเนื้อวัสดุจากการหมุนของชิ้นงานทำให้เกิดลักษณะรูปทรงกระบอก แสดงดังรูปที่ 2.1 (ก) ทิศทางหมุนของการกลึงเกิดจากการหมุนรอบแกนของชิ้นงาน และทิศทางการป้อนเกิดจากการเคลื่อนที่ของมีดกัดอย่างช้าๆ ในแนวขนานกับแกนหมุนของชิ้นงาน

การเจาะ ใช้สำหรับทำรูกลม ซึ่งเกิดจากการหมุนของมีดกัดสองคมตัด (Two cutting edge) มีดกัดถูกป้อนในแนวขนานกับแกนหมุนของชิ้นงานที่จะทำให้เกิดรูกลม แสดงดังรูปที่ 2.1 (ข)

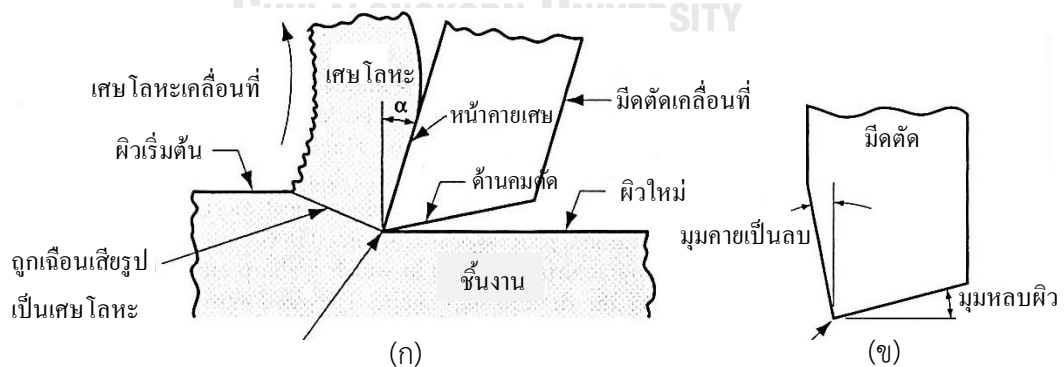
การกัด การหมุนของมีดกัดหลายคมตัด (Multiple cutting edge) ซึ่งเคลื่อนที่อย่างช้าๆ และสัมผัสชิ้นงานทำให้เกิดระนาบหรือผิวตรง ทิศทางการป้อนจะตั้งฉากกับแกนหมุนของมีดกัด ความเร็วตัดเกิดจากการหมุนรอบแกนของมีดกัด รูปแบบพื้นฐานของการกัดมีด้วยกัน 2 ชนิด คือ การกัดแนวตั้ง (Peripheral milling) และการกัดปาดหน้า (Face milling) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (ค) และ (ง)



รูปที่ 2.1 ประเภทของกระบวนการกัดที่ใช้กันทั่วไป [19]

2.2 เครื่องมือตัด (Cutting tool) [19]

เครื่องมือตัดอาจจะมีหนึ่งหรือหลายคมตัดที่ใช้ในการกำจัดเศษตัดออกจากชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 2.2 ผิวหน้ามีดมี 2 ส่วน คือ หน้าคายเศษโลหะ (Rake face) และด้านคมตัด (Flank)

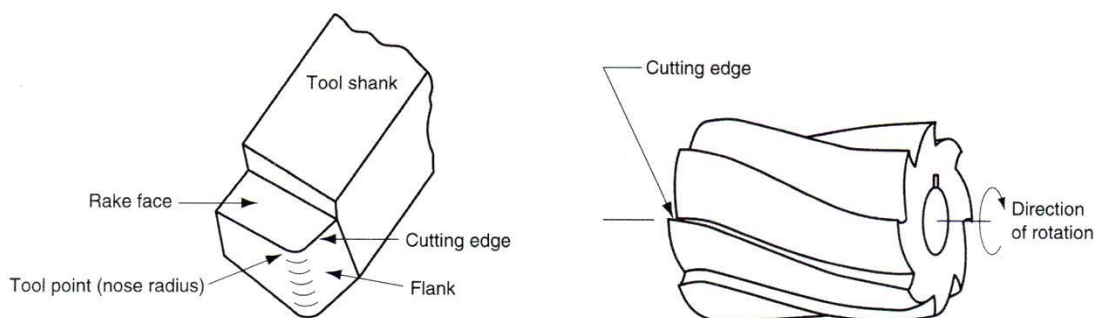


รูปที่ 2.2 (ก) ภาพตัดขวางของกระบวนการกลึง (ข) มีดตัดที่มีมุมหลบ [19]

ผิวคายเศษโลหะ (Rake face) คือ ผิวหน้ามีดบริเวณที่ระบายหรือคายเศษตัดออกจากชิ้นงาน และอยู่ในตำแหน่งที่ทำมุมกับระนาบที่ตั้งฉากกับผิวหน้าของชิ้นงานเท่ากับ α โดยเรียกมุมนี้

ว่า มุมคายเศษโลหะ (Rake angle) ซึ่งมุมนี้สามารถเป็นค่าบวก (Positive angle) แสดงดังรูปที่ 2.2 (ก) หรือค่าลบ (Negative angle) แสดงดังรูปที่ 2.2(ข)

ผิวด้านคมตัด (Flank) คือ ผิวหน้ามีดบริเวณที่ทำให้เกิดช่องว่าง (Clearance) ระหว่างมีดตัดกับผิวหน้างานที่เกิดขึ้นใหม่ ซึ่งช่องว่างนี้จะป้องกันผิวงานจากการขัดถูกับมีดตัดอันจะเป็นผลให้คุณภาพของผิวงานเสียไป ผิวหน้ามีดส่วนนี้จะอยู่ในตำแหน่งที่ทำมุมกับผิวหน้างานใหม่ด้วยมุมที่เรียกว่า มุมหลบผิว (Relief angle) โดยมุมนี้ต้องมีขนาดโตพอที่จะไม่ทำให้ผิวหน้างานใหม่สัมผัสกับมีดตัดการออกแบบรูปร่างและขนาดของมีดตัดรวมถึงการเลือกวัสดุที่ใช้ทำมีดตัดซึ่งต้องมีความแข็งกว่าวัสดุที่ถูกตัดถือว่ามีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพของงานตัด เครื่องมือตัดส่วนใหญ่มีรูปร่างซับซ้อนกว่าในรูปที่ 2.2 มีดตัดทั่วไปสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ 1) มีดตัดคมเดียว (Single-point tools) และ 2) มีดตัดหลายคม (Multiple-cutting-edge) แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 มีดคมตัดเดี่ยว (Single-point tool) และ มีดตัดหลายคม (Multiple cutting edge)

2.3 เงื่อนไขการตัด (Cutting condition) [19, 20]

การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างเครื่องมือตัดและชิ้นงานในกระบวนการกัดนั้นประกอบไปด้วย การเคลื่อนที่หลัก (Primary motion) คือ ความเร็วตัด (Cutting speed, V) การเคลื่อนที่รอง (Secondary motion) คือ การป้อน (Feed, f) และระยะระหว่างผิวเริ่มต้นจนถึงขนาดที่ได้หลังการตัด คือ ความลึกตัด (Depth of cut, d) ความเร็วตัด การป้อน และความลึกตัด เรียกว่า เงื่อนไขการตัด

$$V_c = \frac{V}{\cos\theta} \quad (2.2-1)$$

โดยที่ V_c = ความเร็วตัด (เมตร/นาที)

V = ความเร็วผิว (เมตร/นาที)

θ = มุมระหว่างความเร็วตัดและความเร็วผิวของชิ้นงาน (องศา)

แต่ความเร็วที่เกิดขึ้นจากการป้อนมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับความเร็วผิวของชิ้นงาน จึงทำให้ $\cos\theta \rightarrow 1$ จึงสามารถประมาณได้ว่า

$$V_c = V \quad (2.2-2)$$

และความสัมพันธ์ของความเร็วตัดและความเร็วรอบ (Spindle speed) แสดงได้ดังนี้

$$V = \frac{\pi D N_w}{1000} \quad (2.2-3)$$

โดยที่ D = เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน (มิลลิเมตร)

N_w = ความเร็วรอบของชิ้นงาน (รอบ/นาที)

ในกระบวนการกัดแต่ละวิธีจะมีการกำหนดเงื่อนไขการตัดที่แตกต่างกันไป โดยทั่วไปวิธีการกัดด้วยมีดตัดคมเดียวสามารถคำนวณหาอัตราการกำจัดวัสดุได้ดังนี้

$$MRR = Vfd \quad (2.2-4)$$

โดยที่ MRR = อัตราการกำจัดวัสดุ (ลูกบาศก์มิลลิเมตร/วินาที)

V = ความเร็วตัด (เมตร/วินาที)

f = การป้อน (มิลลิเมตร)

d = ความลึกตัด (มิลลิเมตร)

สำหรับอัตราการป้อนตัด เมื่อกำหนดให้มีมุมข้างคมตัด (Side cutting edge angle) เท่ากับ θ_s และกำลังเคลื่อนที่ด้วยอัตราการป้อนตัด f สามารถคำนวณหาความหนาของเศษวัสดุก่อนตัด f_a และความกว้างของการตัด b ได้จาก

$$f_a = f \cos\theta_s \quad (2.2-5)$$

$$b = \frac{d}{\cos\theta_s} \quad (2.2-6)$$

โดยที่ f = อัตราการป้อน (มิลลิเมตร/รอบ)

d = ความลึกในการตัด (มิลลิเมตร)

ความเร็วป้อน (Feed speed) คือ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของมีดตัด คำนวณได้จาก

$$V_f = f N_w \quad (2.2-7)$$

โดยที่ V_f = ความเร็วป้อน (มิลลิเมตร/นาที)

เวลาในการตัด (Cutting time) คือ เวลาที่เครื่องมือตัดใช้ในการเคลื่อนย้ายจากจุดตำแหน่งเริ่มต้นไปยังตำแหน่งสุดท้ายของการตัด สามารถคำนวณได้จาก

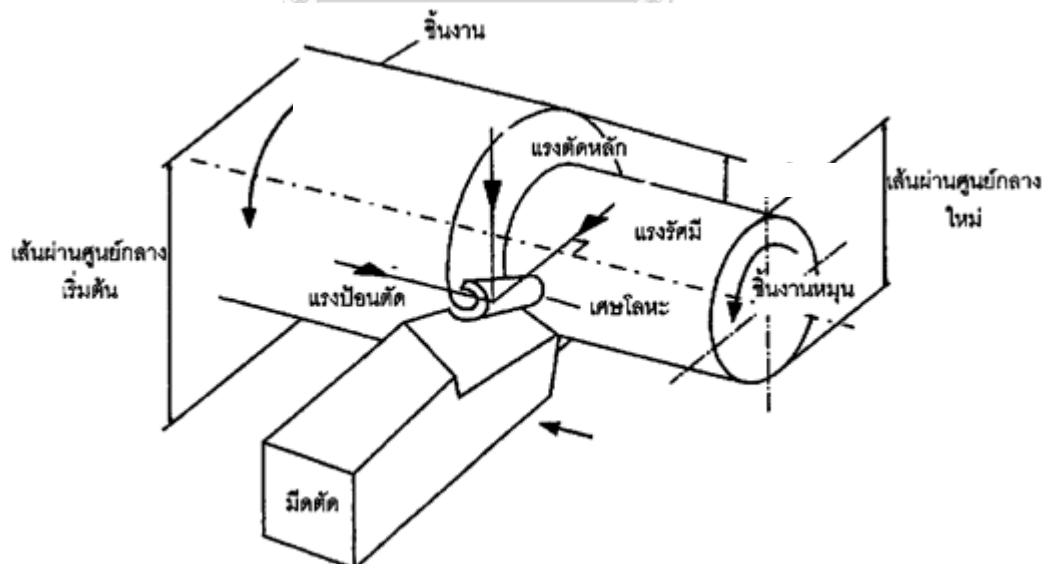
$$T_m = \frac{L}{V_t} \quad (2.2-8)$$

โดยที่ T_m = เวลาในการตัด (นาที)

L = ความยาวของส่วนที่ต้องการกลึง (มิลลิเมตร)

2.4 กระบวนการกลึง (Turning process) [5]

กระบวนการกลึงเป็นกระบวนการตัดแบบต่อเนื่อง (Continuous cut) มีดตัดจะเคลื่อนที่ขนานไปกับแกนหมุนและตัดผิวด้านนอกออก ลดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง เรขาคณิตของกระบวนการกลึงแสดงดังรูป 2.4 ตัวแปรทางเรขาคณิตที่สำคัญบนมีดตัด คือ รัศมีงมมิด (Nose radius) ด้านข้างงมคาย (Side rake) ด้านหลังงมคาย (Back rake) และด้านข้างของงมตัด (Side cutting edge angle) เศษโลหะจะไหลออกมาที่หน้างมคาย (Rake face) ของมีดตัด ด้านข้างงมคายจะเอียงออกจากหน้าของงมตัด ส่วนด้านหลังงมคายจะเอียงจากปลายของมีดตัดที่ตั้งฉากกับผิวหน้าชิ้นงานที่ทำการกลึง

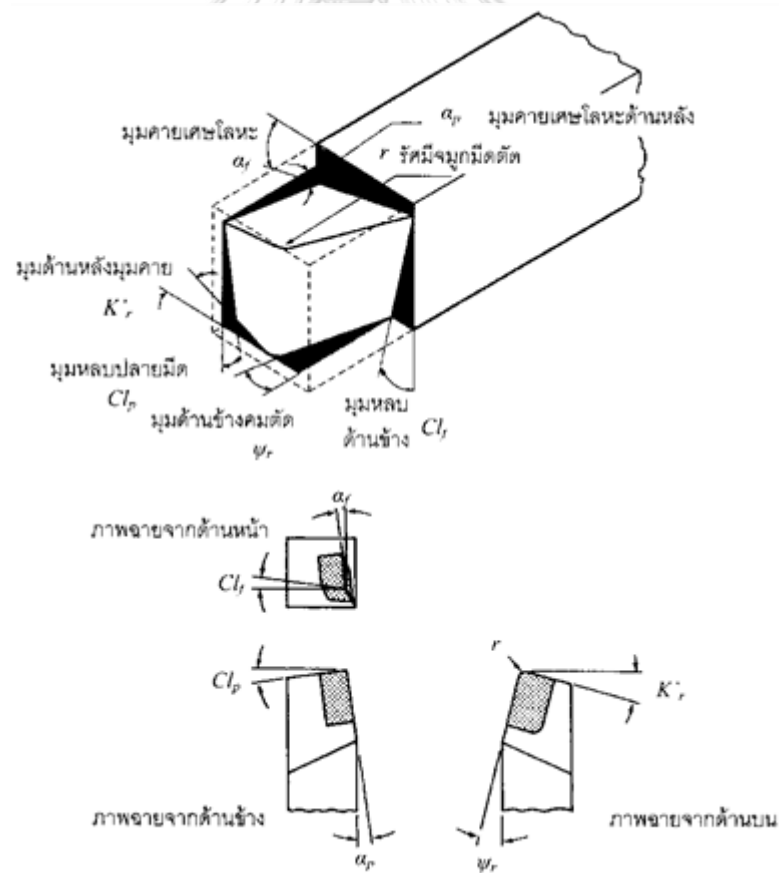


รูปที่ 2.4 เรขาคณิตของกระบวนการกลึง [5]

ลักษณะการตัดที่ด้านหลังของมุมคายเอียงเท่ากับศูนย์ ค่าเอียงของมุมคายด้านข้าง (Side rake) มีดตัดจะเรียกว่า มีดมุมคายบวก (Positive) เป็นกลาง (Neutral) เมื่อค่ามุมคายเป็นศูนย์ หรือเป็นลบ (Negative) โดยจะอ้างอิงจากมุมคายด้านข้าง

มุมคายที่เป็นบวก (Positive rake angle) จะให้มุมเฉือนที่มากกว่า ซึ่งจะช่วยให้ลดแรงในการตัดลงได้ และยังทำให้ผิวของชิ้นงานสำเร็จดีกว่าด้วย เนื่องจากทำให้เศษโลหะไหลออกจากชิ้นงานได้ดี มีดตัดที่เป็นลบ (Negative) แรงตัดที่เกิดขึ้นจะสูงกว่ามีดตัดแบบเป็นบวกสำหรับการตัดแบบเดียวกัน เพราะว่ามีดตัดที่เป็นลบจะลดมุมเฉือนลง

โดยทั่วไปเมื่อมีดที่ใช้ตัดจะทำมาจากวัสดุประเภท คาร์ไบด์ เซรามิก เพชร หรือ CBN (Cubic Boron Nitride) ซึ่งจะถูกยึดบนด้ามมีดตัดดังแสดงในรูปที่ 2.5 มีดตัดที่มีรัศมีมุมมีดที่ใหญ่จะช่วยลดรอยตักค้างจากการป้อนตัดบนผิวหน้าชิ้นงานได้ดีกว่า แต่รัศมีมุมมีดที่ใหญ่มากเกินไปจะไม่เหมาะในการตัด เพราะจะทำให้เกิดการสั่นในขณะตัดงานและส่งผลกระทบต่อผิวงานที่ได้



รูปที่ 2.5 เรขาคณิตของมีดกลึง [5]

แม้มุมของมีดตัดมีค่ากำจัดความที่หลากหลาย แต่อย่างไรก็ตาม มุมของมีดตัดเหล่านั้นก็แปลงมาจากด้านหลังของมุมคายและด้านข้างของมุมคาย โดยจะสามารถวิเคราะห์รูปร่างลักษณะของรูปร่างการตัดได้ดังนี้

$$\tan\alpha_0 = \tan\alpha_f \cos\phi_r + \tan\alpha_p \sin\phi_r \quad (2.2-9)$$

$$\tan i = \tan\alpha_p \cos\phi_r + \tan\alpha_f \sin\phi_r \quad (2.2-10)$$

$$\tan\alpha_n = \tan\alpha_0 \cos i \quad (2.2-11)$$

โดยที่ i , ϕ_r , α_0 และ α_n คือ ค่ามุมเอียง มุมข้างคมตัด ค่ากลาง และค่าคายปกติ ตามลำดับ ค่ามุมเอียง (i) และค่ามุมคายปกติ (Normal rake angle : α_n) จะต้องถูกคำนวณหาค่าก่อนเพื่อใช้คำนวณค่าแรงตัด โดยสมมติให้มุมการไหลของเศษโลหะเท่ากับมุมเอียง

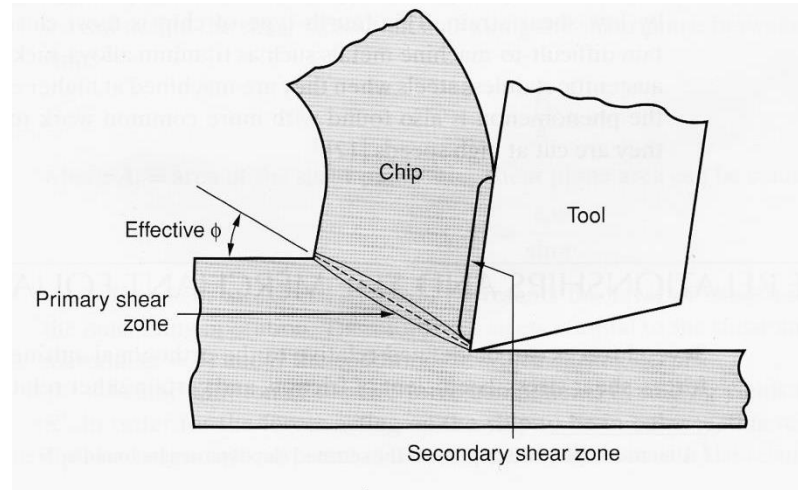
2.5 การเกิดเศษโลหะ (Chip formation) [5, 19, 21]

การตัดวัสดุชิ้นงาน จะรับแรงกระทำจากเครื่องมือตัดผ่านทางคมตัด ซึ่งจะมีผลให้ชิ้นงานเกิดความเค้นขึ้นในหลายลักษณะ ซึ่งในกระบวนการตัดที่เกิดขึ้นจริงจะเป็นการตัดในลักษณะสามมิติ ซึ่งสามารถอธิบายกลไกการเกิดเศษตัดได้ยากเนื่องจากมีความซับซ้อน โดยส่วนมากจึงนิยมอธิบายลักษณะการเกิดเศษโลหะในรูปแบบสองมิติ หรือที่เรียกว่า กระบวนการตัดฉาก (Orthogonal Cutting) สามารถแบ่งได้เป็น 3 ลักษณะ ดังนี้

ลักษณะที่ 1 การเปลี่ยนรูปโดยการเฉือนไม่ได้เกิดแค่ตามแนวระนาบเฉือน เพราะหากการเฉือนเกิดขึ้นผ่านแนวระนาบนั้นหมายความว่า การเฉือนนั้นเกิดขึ้นอย่างฉับพลัน แต่ในสภาพความเป็นจริงการเปลี่ยนรูปโดยการเฉือนต้องอาศัยช่วงเวลาสั้นๆ และเกิดขึ้นภายในพื้นที่การเฉือน (Shear Zone) บางๆ มากกว่าที่จะเป็นในระนาบเฉือนที่มีความหนาเท่ากับศูนย์ ลักษณะการเฉือนที่เกิดขึ้นจริงในทางปฏิบัติแสดงได้ดังรูปที่ 2.6 จากการทดลองในงานตัดโลหะพบว่าความหนาของพื้นที่เฉือนนั้นจะมีขนาดเล็กมากประมาณ 0.001 นิ้ว ดังนั้นการพิจารณาการเฉือนในแนวระนาบจึงไม่มีผลต่อความถูกต้องในการคำนวณมากนัก

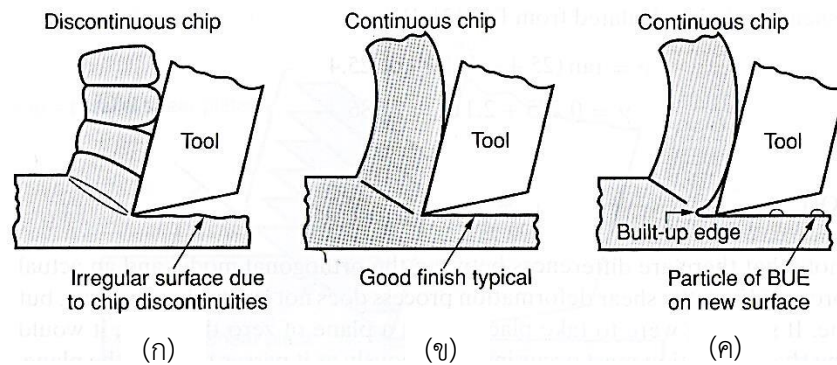
ลักษณะที่ 2 นอกเหนือจากการเฉือนเกิดขึ้นตามโซนเฉือนที่เรียกว่า Primary shear แล้วในการกัดจริงยังมีการพิจารณาการเฉือนหลังการเกิดขึ้นของเศษตัดที่เรียกว่า Secondary shear การเฉือนนี้เกิดขึ้นเนื่องจากความเสียดทาน (Friction) ระหว่างเศษตัดกับคมมีดตัดในขณะที่เศษตัด

ไหลไปตามแนวหน้าคายเศษโลหะ (Rake face) ของมีดตัด โชนการเฉือนทั้งสองแบบแสดงได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การเกิดเศษโลหะ [19]

ลักษณะที่ 3 การเกิดขึ้นของเศษตัด (Formation of the chip) ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ถูกกัดและเงื่อนไขการตัดโดยเศษตัดสามารถแยกได้เป็น 3 ประเภท ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ประเภทของการเกิดเศษโลหะในกระบวนการตัด [19]

(ก) เศษโลหะแตกหักแบบไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous chip)

เกิดขึ้นในกรณีวัสดุเปราะ (Brittle materials) เช่น เหล็กหล่อ (Cast irons) ถูกตัดในเงื่อนไขการตัดที่มีความเร็วการตัดต่ำ เศษตัดที่เกิดขึ้นจะแยกตัวเป็นส่วนๆ (Separated segments) อันเป็นสาเหตุของความไม่เรียบของผิวสำเร็จของชิ้นงาน เศษตัดชนิดนี้เกิดขึ้นได้ง่ายกรณีที่ความเสียดทานระหว่างมีดตัดกับชิ้นงานมีค่าสูง (High tool-chip friction) และกรณีที่ขนาดของการป้อนและความลึกการตัดมีค่าสูง

(ข) เศษโลหะแตกหักแบบต่อเนื่อง (Continuous chip)

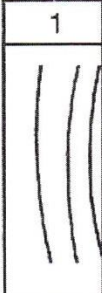





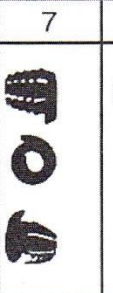
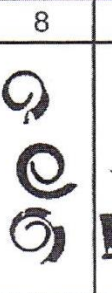


เกิดขึ้นในกรณีที่วัสดุเหนียว (Ductile materials) ถูกตัดด้วยความเร็วสูงและมีขนาดของอัตรา

การป้อนและความลึกการตัดค่อนข้างต่ำ เศษตัดจะมีลักษณะยาวต่อเนื่องกันและมีผิวสำเร็จของชิ้นงานที่เรียบ เศษตัดชนิดนี้มักเกิดขึ้นในกรณีที่มีดัดมีความคม (Sharp cutting edge) และมีความเสียดทานระหว่างมีดตัดและชิ้นงานต่ำ

(ค) เศษโลหะแตกหักแบบต่อเนื่องและการพอกที่คมตัด (Continuous chip with built-up edge)

เกิดขึ้นในกรณีที่วัสดุเหนียวถูกตัดด้วยความเร็วต่ำถึงปานกลาง ความเสียดทานระหว่างมีดตัดและชิ้นงานทำให้เนื้อวัสดุบางส่วนเกาะติดกับหน้าคายเศษโลหะ (Rake face) ของมีดตัดใกล้ๆ บริเวณคมตัด ลักษณะที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า Built-up edge (BUE) ซึ่ง BUE ส่วนใหญ่จะถูกกำจัดออกไปกับเศษตัดแต่ส่วนที่เหลืออยู่และเกาะติดกับผิวหน้าของชิ้นงานจะทำให้ผิวสำเร็จของชิ้นงานมีลักษณะขรุขระ

เศษโลหะที่เกิดขึ้นในกระบวนการกลึงอาจเป็นแบบริบบิ้น (Ribbon chips) หยิกหยอย (Tangled chips) หรือแบบเกลียว (Corkscrew chips) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งเป็นแบบที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นในการตัด เศษโลหะนั้นอาจเสียดสีผิวหน้าชิ้นงานที่ตัดแล้วอีกครั้งหรือเกิดการพันยุ่งเหยิงกับมีดตัด และยากต่อการนำเศษโลหะเหล่านั้นออกจากเครื่องตัด ซึ่งลักษณะของเศษโลหะแบบนี้จะเกิดอันตรายกับพนักงานที่ปฏิบัติงานอยู่ด้วย ผลผลิตภาพของการทำงานไม่ดีจะทำให้ผิวชิ้นงานเสียหาย และเศษโลหะก็จะไปรวมและเกาะติดอยู่ที่มุมของมีดตัด

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
									
ribbon chips	tangled chips	corkscrew chips	helical chips	long tubular chips	short tubular chips	spiral tubular chips	spiral chips	long comma chips	short comma chips

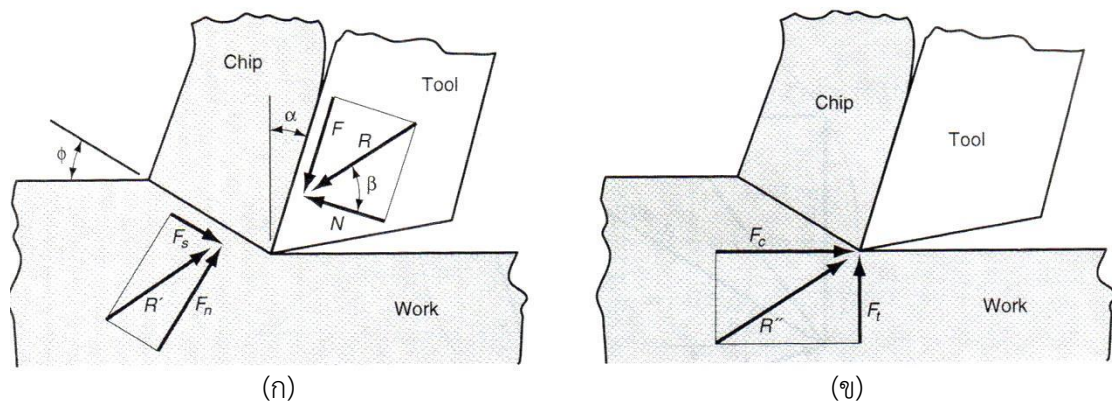
รูปที่ 2.8 การแบ่งลักษณะรูปแบบของเศษโลหะ [21]

ปัจจัยพื้นฐานที่เกี่ยวกับการเกิดเศษโลหะคือ วัสดุชิ้นงาน เรขาคณิตของมีดตัด สารหล่อเย็น การเคลื่อนที่ทางพลศาสตร์ของเครื่องกลึง และเงื่อนไขการตัด ตัดหักเศษโลหะ (Chip breaker) จะ

ถูกยึดอยู่บนหน้ามคมคายของมีดตัด หรือเป็นร่องโค้งที่มากับเม็ดมีดเลย ใช้เพื่อทำเศษโลหะแตกหัก ตัวทำให้เศษโลหะแตกหักจะวางอยู่กับทิศทางการไหลของเศษโลหะ โดยที่เศษโลหะจะถูกบังคับให้โค้งไปชนชิ้นงานหรือมีดตัด และจะให้เกิดความเค้นดึงในเศษโลหะและเกิดการแตกหัก

2.6 แรงในการตัด (Cutting force) [19]

เมื่อพิจารณาแรงที่เกิดขึ้นในการตัดเศษโลหะโดยใช้แบบจำลองของการตัดฉาก (Orthogonal cutting) แสดงดังรูปที่ 2.9 แรงที่ถูกใช้ในการตัดเศษโลหะโดยมีดตัดประกอบได้ด้วย 2 ส่วน ในแนวตั้งฉากกัน คือ แรงเสียดทาน (Friction force, F) และแรงในแนวตั้งฉากกับแรงเสียดทาน (Normal force to friction, N)



รูปที่ 2.9 แรงในการตัด (ก) แรงกระทำโดยใช้แบบจำลองการตัดฉาก และ (ข) แรงกระทำบนมีดตัดที่สามารถวัดได้

แรงทั้งสองส่วนนี้สามารถนำไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Coefficient of friction, μ) ระหว่างมีดตัดและเศษโลหะ ดังนี้

$$\mu = \frac{F}{N} \quad (2.5-1)$$

แรงเสียดทานและแรงตั้งฉากนี้สามารถเขียนเป็นเวกเตอร์เพื่อหาแรงลัพธ์ (Resultant force, R) ซึ่งทำมุมเบต้า (β) เรียกว่ามุมเสียดทาน ซึ่งมุมเสียดทานสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ดังนี้

$$\mu = \tan\beta \quad (2.5-2)$$

นอกจากแรงกระทำต่อเศษโลหะโดยมีดตัดยังมีแรงอีกสองส่วนที่กระทำต่อเศษโลหะโดยชิ้นงานคือแรงเฉือน (Shear force, F_s) และแรงในแนวตั้งฉากกับแรงเฉือน (Shear normal force

to shear, F_n) จากแรงเฉือนนั้นเราสามารถหาค่าความเค้นเฉือน (Shear stress, τ) ที่เกิดขึ้นตามแนวระนาบเฉือนระหว่างชิ้นงานกับเศษโลหะ ดังนี้

$$\tau = \frac{F_s}{A_s} \quad (2.5-3)$$

เมื่อ A_s เท่ากับ พื้นที่ตามแนวระนาบเฉือน ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$A_s = \frac{t_0 w}{\sin \phi} \quad (2.5-4)$$

ค่าความเค้นเฉือนที่คำนวณโดยสมการที่ 2.5-3 แสดงถึงระดับความเค้นที่ต้องการในกระบวนการกัด โดยหลักการแล้วความเค้นเฉือนนี้มีค่าเท่ากับกำลังวัสดุที่เกิดขึ้นในขณะตัด เมื่อเขียนเวกเตอร์ที่เกิดจากแรง F_s และ F_n จะได้เวกเตอร์ลัพธ์ R' ซึ่งมีขนาดเท่ากับเวกเตอร์ R แต่มีทิศทางตรงกันข้าม

โดยปกติแรงย่อยทั้งสิ้น ได้แก่ F , N , F_s และ F_n ไม่สามารถวัดได้โดยตรงในกระบวนการกัด เนื่องจากทิศทางของแรงจะเปลี่ยนแปลงไปตามเรขาคณิตมีดตัดและเงื่อนไขการตัด อย่างไรก็ตามมีความเป็นไปได้ในการติดตั้งเครื่องมือวัดขนาดของแรงที่เรียกว่า ไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer) เข้ากับมีดตัด ซึ่งจะช่วยให้ได้ค่าแรงย่อย 2 แรงที่ด้านการทำงานของมีดตัด ได้แก่ แรงที่เกิดขึ้นในทิศทางการตัด (Cutting force, F_c) ซึ่งมีทิศทางเดียวกับความเร็วตัด และแรงที่เกิดขึ้นในทิศตั้งฉากกับแรงในทิศทางการตัด (Thrust force, F_t) ซึ่งสัมพันธ์กับความหนาของเศษโลหะก่อนตัด t_0 แรงทั้งสองแสดงดังรูปที่ 2.9 (ข) แสดงแรงที่เกิดขึ้นในทิศทางการตัด (Cutting force, F_c) แรงที่เกิดขึ้นในทิศตั้งฉากกับแรงในทิศทางการตัด (Thrust force, F_t) ร่วมกับแรงลัพธ์ R'' แรงย่อยสองแรงนี้สามารถวัดได้โดยไดนาโมมิเตอร์ และสามารถใช้ในการคำนวณแรงย่อยทั้งสิ้นแรงข้างต้นจากสมการ

$$F = F_c \sin \alpha + F_t \cos \alpha \quad (2.5-5)$$

$$N = F_c \cos \alpha - F_t \sin \alpha \quad (2.5-6)$$

$$F_s = F_c \cos \phi - F_t \sin \phi \quad (2.5-7)$$

$$F_n = F_c \sin \phi + F_t \cos \phi \quad (2.5-8)$$

จะเห็นว่าในบางกรณีหากมุมคายเศษโลหะ (Rake angle) เป็นศูนย์ ($\alpha = 0$) สมการที่ 2.5-5 และ 2.5-6 จะลดรูปเหลือ $F = F_t$ และ $N = F_c$ ตามลำดับ ดังนั้นในกรณีนี้แรงเสียดทาน (Friction force) และแรงตั้งฉาก (Normal force) จะสามารถวัดโดยตรงได้จากไดนาโมมิเตอร์

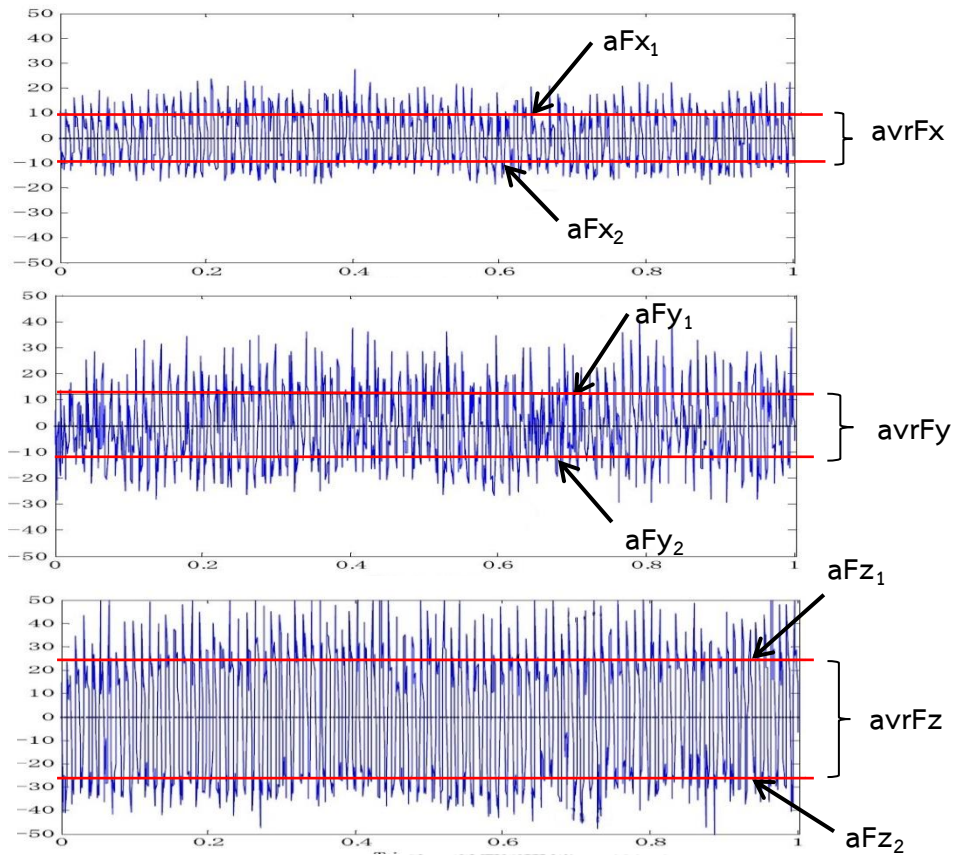
2.7 ค่าเฉลี่ยความแปรปรวนและอัตราส่วนแรงตัดพลวัต [22-24]

สามารถประมาณค่าแรงตัดพลวัตที่เกิดในกระบวนการตัดได้จากการหาค่าเฉลี่ยความแปรปรวน ของแรงตัดพลวัตทั้ง 3 แนวแกน คือ แรงรัศมีพลวัต (Dynamic thrust force) แรงป้อนตัดพลวัต (Dynamic feed force) และแรงตัดหลักพลวัต (Dynamic main force) กล่าวคือ การนำข้อมูลสัญญาณแรงตัดพลวัตในโดเมนเวลามาพิจารณาเพื่อหาค่าเฉลี่ยของแอมพลิจูดตั้งแต่ 0 ถึง 1 วินาที แสดงในรูปที่ 2.10 และนำมาหาค่าผลรวมสัมบูรณ์แรงตัดพลวัต เนื่องจากสัญญาณแรงตัดพลวัตที่ปรากฏมีทั้งค่าในทางบวกและทางลบ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.6-1 ถึง 2.6-3

$$avrF_x = aF_{x_1} - (-aF_{x_2}) \quad (2.6-1)$$

$$avrF_y = aF_{y_1} - (-aF_{y_2}) \quad (2.6-2)$$

$$avrF_z = aF_{z_1} - (-aF_{z_2}) \quad (2.6-3)$$



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างค่าเฉลี่ยความแปรปรวน (average variance) ของแรงตัดพลวัต F_x , F_y , F_z ที่ความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตร

[22]

- โดยที่ $avrFx$ คือ ค่าเฉลี่ยความแปรปรวนของแรงรัศมีพลวัต (dFx)
 $avrFy$ คือ ค่าเฉลี่ยความแปรปรวนของแรงป้อนตัดพลวัต (dFy)
 $avrFz$ คือ ค่าเฉลี่ยความแปรปรวนของแรงตัดหลักพลวัต (dFz)
 aF_{x1} คือ ค่าเฉลี่ยแรงรัศมีพลวัตทางบวก
 aF_{x2} คือ ค่าเฉลี่ยแรงรัศมีพลวัตทางลบ
 aF_{y1} คือ ค่าเฉลี่ยแรงป้อนตัดพลวัตทางบวก
 aF_{y2} คือ ค่าเฉลี่ยแรงป้อนตัดพลวัตทางลบ
 aF_{z1} คือ ค่าเฉลี่ยแรงตัดหลักพลวัตทางบวก
 aF_{z2} คือ ค่าเฉลี่ยแรงตัดหลักพลวัตทางลบ

การหาค่าอัตราส่วนแรงตัด คือ การนำค่าเฉลี่ยความแปรปรวนของแรงตัดพลวัต 2 ส่วน มาทำอัตราส่วนกันเพื่อหาค่าดัชนีสำหรับใช้เป็นตัวแปรในการบ่งบอกสถานะการตัดในกระบวนการกลึง

[24] อันที่จริงค่าของแรงตัดพลวัตจะเปลี่ยนแปลงไปตามเงื่อนไขการตัด เช่น ความเร็วตัด ความลึกตัด และประเภทของวัสดุ ดังนั้น ค่าเฉลี่ยของแปรปรวนของแรงตัดพลวัตจึงจำเป็นต้องใช้ได้ไม่ว่าเงื่อนไขการตัดจะเปลี่ยนไปอย่างไร ในกระบวนการกลึงเหล็กกล้าคาร์บอน S45C แรงตัดพลวัตที่พิจารณามี 2 ส่วน คือ แรงตัดป้อนตัดพลวัต (dF_y) และแรงตัดหลักพลวัต (dF_z) ดังนั้น ค่าอัตราส่วนแรงตัดพลวัตเท่ากับ ค่าเฉลี่ยความแปรปรวนของแรงป้อนตัดพลวัตส่วนด้วยค่าเฉลี่ยความแปรปรวนของแรงตัดหลักพลวัต ($avrF_y/avrF_z$)

2.8 การสึกหรอของมีดตัด (Toolwear) [19]

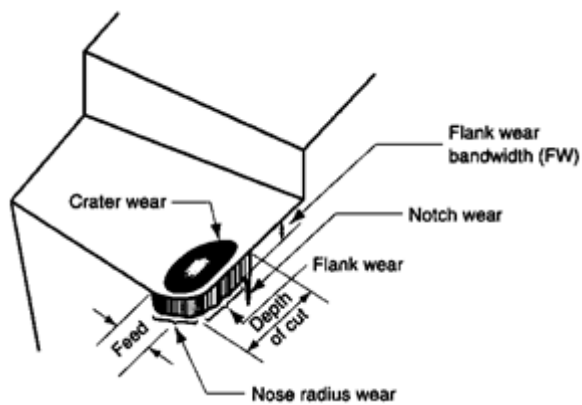
มีความเป็นไปได้ที่จะทำให้มีดตัดเสียหายในกระบวนการตัด 3 รูปแบบ คือ

1. ความเสียหายเนื่องจากการแตกร้าว ความเสียหายรูปแบบนี้เกิดขึ้นเมื่อแรงขณะตัดที่เครื่องมือตัดนั้นมีมากเกินไป เป็นสาเหตุให้เกิดการแตกแบบเปราะ
2. ความเสียหายเนื่องจากอุณหภูมิ เกิดจากอุณหภูมิขณะตัดสูงเกินไปสำหรับวัสดุของเครื่องมือตัด เป็นเหตุให้วัสดุของเครื่องมือตัดเกิดความอ่อนตัว ซึ่งนำไปสู่การเสียรูปแบบพลาสติกและสูญเสียความคม
3. ความเสียหายเนื่องจากการสึกหรอ การสึกหรอของคมตัดเป็นสาเหตุของการเสียรูปร่าง ประสิทธิภาพในการตัดลดลง อัตราการสึกหรอที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และความเสียหายสุดท้ายจะคล้ายคลึงกับการเสียหายเนื่องจากอุณหภูมิ

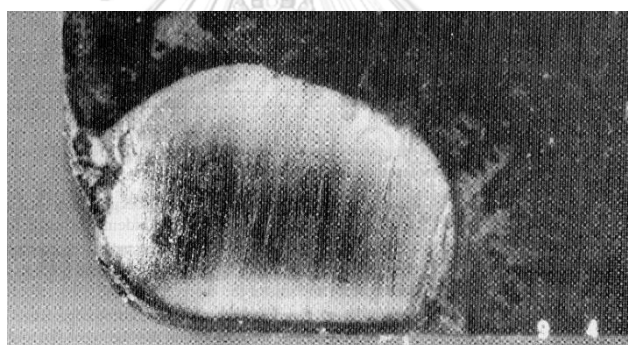
ความเสียหายเนื่องจากการแตกร้าวและอุณหภูมิที่ทำให้เครื่องมือตัดเสียก่อนกำหนด เป็นสิ่งที่ไม่พึงปรารถนา ความเสียหายเนื่องจากการสึกหรอเป็นหนึ่งในสามที่ถูกให้ความสำคัญมากเนื่องจากนำไปสู่การใช้งานเครื่องมือตัดให้ยาวนานที่สุดที่เกี่ยวข้องกับเศรษฐศาสตร์ ประโยชน์จากการใช้งานที่ยาวนานขึ้น

คุณภาพของชิ้นงานจะต้องพิจารณาเมื่อมีการพยายามที่จะควบคุมรูปแบบการเกิดความเสียหายของเครื่องมือตัด เมื่อเครื่องมือตัดเกิดความเสียหายอย่างฉับพลันในระหว่างการตัดซึ่งจะนำไปสู่สาเหตุของความเสียหายที่ผิวชิ้นงาน ความเสียหายนี้ต้องนำกลับมาแก้ไขหรือกำจัดชิ้นงานออกจากกระบวนการอย่างใดอย่างหนึ่ง ซึ่งสามารถหลีกเลี่ยงได้โดยการเลือกเงื่อนไขการตัดที่จะนำไปสู่ความเสียหายจากการสึกหรอมากกว่าความเสียหายจากการแตกร้าวและอุณหภูมิ และการเปลี่ยนเครื่องมือตัดก่อนการสูญเสียของคมตัดสุดท้าย

การสึกหรอของมีดตัดสามารถเกิดขึ้นได้ 2 ตำแหน่ง คือ ส่วนบนของด้านผิวคายเศษโลหะ และ ด้านคมตัด การสึกหรอทั้งสองลักษณะนี้สามารถเรียกได้อีกอย่างหนึ่งว่า การสึกหรอแบบหลุมแฉ่ง (Crater wear) และการสึกหรอด้านข้าง (Flank wear) แสดงดังรูปที่ 2.11 - 2.13



รูปที่ 2.11 ลักษณะตำแหน่งและการสึกหรอของมีดตัด [19]



รูปที่ 2.12 การสึกหรอแบบหลุมแฉ่ง (Crater wear) [19]



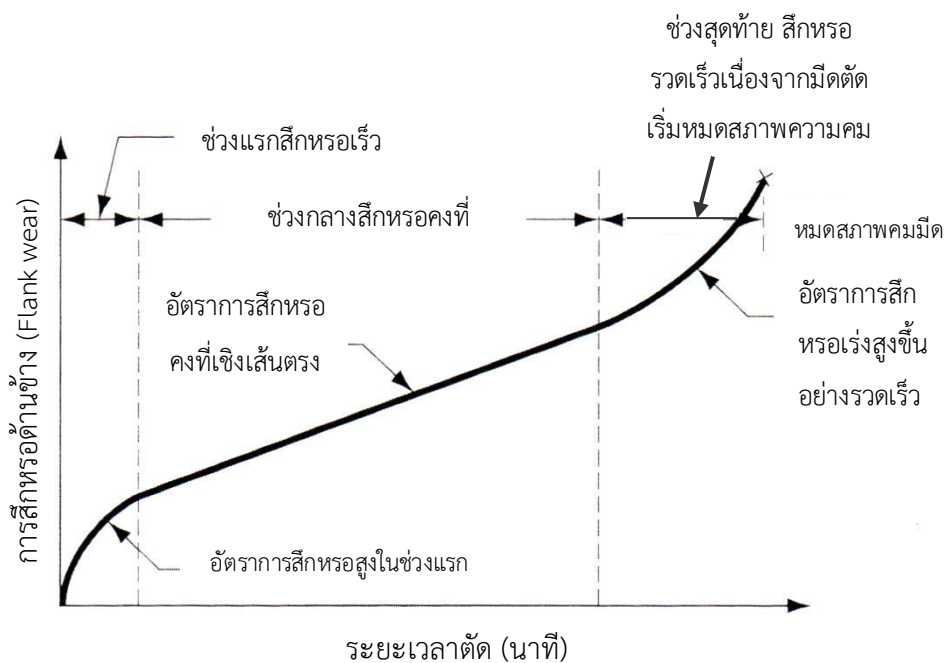
รูปที่ 2.13 การสึกหรอด้านข้าง (Flank wear) [19]

กลไกการสึกหรอระหว่างผิวสัมผัสของเครื่องมือตัดกับเศษโลหะและระหว่างผิวสัมผัสของเครื่องมือตัดกับชิ้นงานนั้นสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

- การขูดขีด เป็นการสึกหรอทางกลที่เกิดขึ้นจากความแข็งของวัสดุของชิ้นงานที่ขัดสี และทำให้เกิดการหลุดออกเป็นส่วนเล็กของมีดตัด การขูดขีดในลักษณะนี้จะเกิดขึ้นทั้งการสึกหรอด้านข้าง (Flank wear) และการสึกหรอแบบหลุมแอ่ง (Crater wear)
- การยึดติด เมื่อโลหะสองชนิดมีแรงกระทำต่อกันที่หน้าสัมผัสภายใต้ความดันและอุณหภูมิสูง การยึดติดหรือการหลอมติดระหว่างกันจะเกิดขึ้น ลักษณะเช่นนี้จะสังเกตเห็นได้ระหว่างเศษโลหะกับผิวคายของมีดตัด เมื่อเศษโลหะเคลื่อนผ่านหน้ามีดจะทำให้วัสดุทั้งสองที่ติดกันหลุดออกไปทำให้อด้านหน้ามีดสึกหรอ
- การแพร่ เป็นกระบวนการแลกเปลี่ยนอะตอมระหว่างผิวสัมผัสของวัสดุสองชนิด ในกรณีที่เกิดการสึกหรอของมีดตัดการแพร่จะเกิดขึ้นระหว่างเศษโลหะกับมีดตัด โดยผิวหน้าของมีดตัดจะสูญเสียอะตอมซึ่งทำให้ความแข็งแรงลดลง เมื่อเกิดการกระบวนการนี้อย่างต่อเนื่องทำให้เกิดการสึกหรอแบบการขูดขีดและการยึดติดเกิดง่ายขึ้น เชื่อว่าการแพร่เป็นกลไกหลักของการสึกหรอแบบหลุมแอ่ง (Crater wear)
- ปฏิกริยาเคมี อุณหภูมิสูงและผิวหน้าที่สะอาดอันเนื่องมาจากการใช้ความเร็วตัดสูง ในกระบวนการตัดสามารถทำให้เกิดปฏิกริยาเคมี เกิดการออกซิเดชันระหว่างผิวคายกับมีดตัด ซึ่งผิวของมีดตัดชั้นที่ถูกออกซิเดชันจะมีความอ่อนนุ่มมากกว่าและถูกดึงออกไป จากนั้นผิวใหม่จะเข้ามาแทนที่และเกิดปฏิกริยาซ้ำ
- การเสีรูปร่างพลาสติก เกิดการเปลี่ยนรูปร่างถาวรคมมีดตัด เนื่องจากแรงตัดที่กระทำต่อคมมีดที่อุณหภูมิสูง คมมีดเสีรูปร่างถาวรและส่วนใหญ่มีผลจากการขูดขีด

2.9 อายุการใช้งานของมีดตัดและสมการการสึกหรอของเทย์เลอร์ [19]

กระบวนการตัดมีกลไกการเกิดหลายรูปแบบ ระดับการเพิ่มขึ้นของการสึกหรอของมีดตัดความสัมพันธ์โดยทั่วไประหว่างการสึกหรอของมีดตัดกับระยะเวลาตัดแสดงดังรูปที่ 2.14 ซึ่งแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของการสึกหรอด้านข้าง (Flank wear) ในขณะที่ความสัมพันธ์ของการสึกหรอแบบหลุมแอ่ง (Crater wear) เกิดขึ้นในทำนองเดียวกัน โดยสามารถแบ่งช่วงของการสึกหรอได้ 3 ช่วง

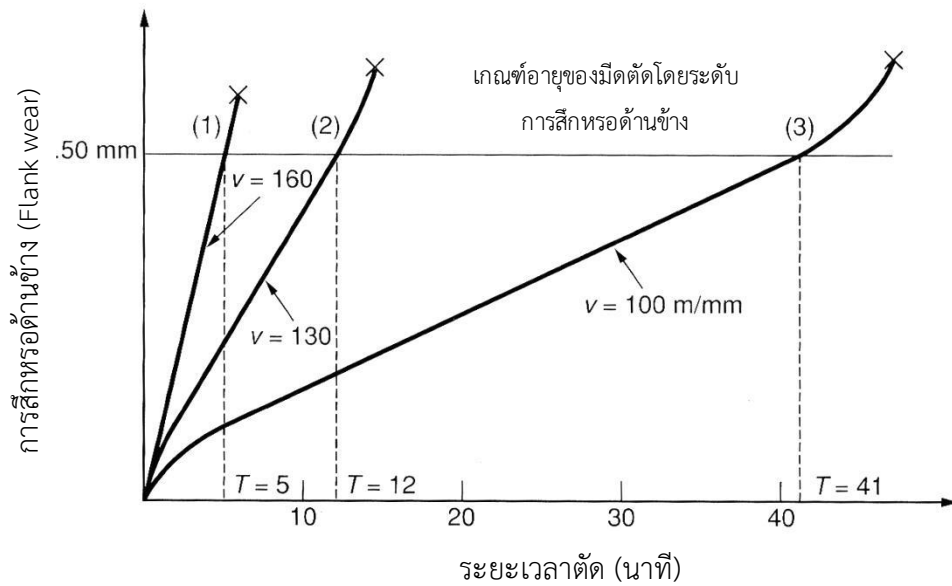


รูปที่ 2.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดรอยสึกหรอด้านข้างและเวลาที่ใช้ในการตัด [19]

จากรูปที่ 2.14 จะเห็นได้ว่าการสึกหรอแบ่งออกเป็น 3 ช่วงของเครื่องมือตัด

1. ช่วงแรกในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการตัดชิ้นงาน ในช่วง 2 ถึง 3 นาทีแรก ของการตัด ในช่วงนี้คมของมีดตัดจะสึกหรออย่างรวดเร็ว เนื่องจากแรงกระแทกของมีดตัด ต่อชิ้นงานที่กำลังหมุนด้วยความเร็วตัด
2. ช่วงกลาง กราฟขนาดการสึกหรอมีเกิดมากขึ้นแต่จะมีลักษณะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆในเชิงเส้นตรง แสดงให้เห็นว่าอัตราการสึกหรอเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ
3. ช่วงสุดท้ายมีอัตราการสึกหรอจะเกิดขึ้นสูงมาก มีดสึกหรอเร็วมาก เนื่องจากคมมีดตัดหมดสภาพ ตัดชิ้นงานลำบาก เกิดการสั่นสะเทือน ถ้ายังใช้งานมีดตัดต่อจะเกิดการพังของมีดตัด

ความชันของเส้นการสึกหรอในช่วงกลางที่อัตราการสึกหรอคงที่ได้รับอิทธิพลจากวัสดุของชิ้นงานและเงื่อนไขการตัด ชิ้นงานที่มีความแข็งแรงมากกว่าจะทำให้อัตราการสึกหรอเพิ่มมากขึ้น การเพิ่มขึ้นของความเร็วดัด อัตราป้อน และความลึกในการตัดมีอิทธิพลคล้ายคลึงกัน และความเร็วดัดถือเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุด กราฟการสึกหรอถูกพล็อตในความเร็วตัดที่แตกต่างกันแสดงดังรูปที่ 2.15 เมื่อความเร็วตัดเพิ่มขึ้น อัตราการสึกหรอจะเพิ่มขึ้นตาม ดังนั้นระดับการสึกหรอที่เท่ากันจะเพิ่มขึ้นโดยใช้ระยะเวลาตัดที่น้อยกว่า

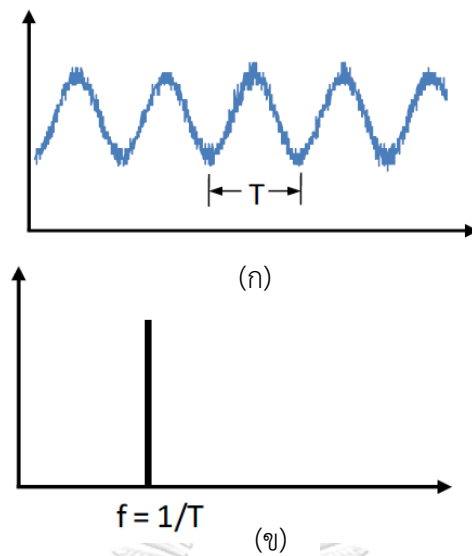


รูปที่ 2.15 อิทธิพลของความเร็วตัดต่อการสึกหรอด้านข้าง (Flank wear) [19]

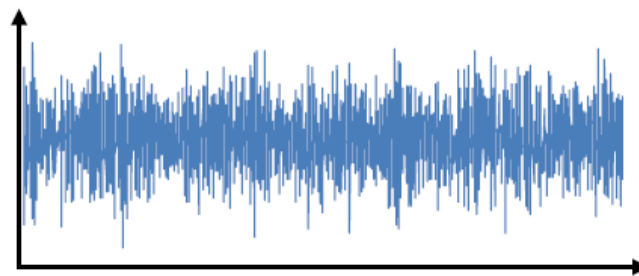
2.10 การแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform) [25]

ข้อมูลโดยทั่วไปที่อยู่ในโดเมนเวลา (Time domain) สามารถแสดงในโดเมนความถี่ (frequency domain) ได้โดยการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว เช่น ข้อมูลของความขรุขระผิวเมื่อนำมาพล็อตเทียบกับเวลาจะได้รูปแบบของข้อมูลที่อยู่ในลักษณะของคลื่นไซน์ (Sine wave) ดังแสดงในรูปที่ 2.16 (ก) จะเห็นได้ว่าข้อมูลความขรุขระผิวนี้จะเกิดการแกว่งขึ้นลงเป็นรูปแบบซ้ำๆ โดยรูปแบบที่แกว่งขึ้นลงครบหนึ่งรอบใช้เวลา T ซึ่งเรียกว่าคาบ คาบมีความสัมพันธ์กับความถี่คือ $f = 1/T$ คือจำนวนของคาบคลื่นใน 1 วินาที ข้อมูลดังกล่าวสามารถวิเคราะห์ในเชิงความถี่ได้ดังในรูปที่ 2.16 (ข) อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงส่วนใหญ่ข้อมูลที่เก็บมานั้นมักไม่ได้มีรูปแบบที่สามารถคำนวณได้ง่าย ซึ่งข้อมูลที่เก็บมามีสัญญาณรบกวน (Noise) ปะปนมาด้วยเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 2.17 ดังนั้นวิธีการที่ใช้ในการแยกองค์ประกอบทางความถี่ของข้อมูลที่ซับซ้อนออกมาได้ คือ การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว โดยมีฟังก์ชัน $F(t)$ ดังสมการที่ 2.9-1

$$F(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-2\pi f j t} dt \quad (2.9-1)$$

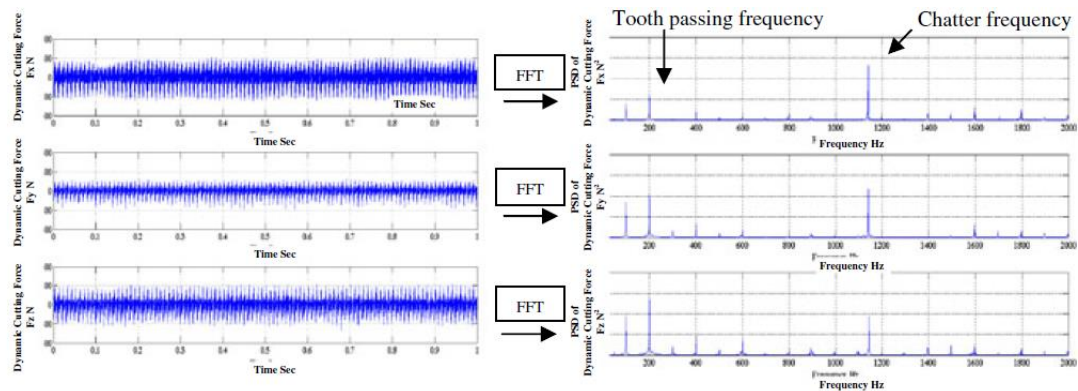


รูปที่ 2.16 (ก) ข้อมูลเทียบในโดเมนเวลา (ข) ข้อมูลเทียบในโดเมนความถี่ [25]



รูปที่ 2.17 ข้อมูลที่ไม่มีรูปแบบแน่นอน [25]

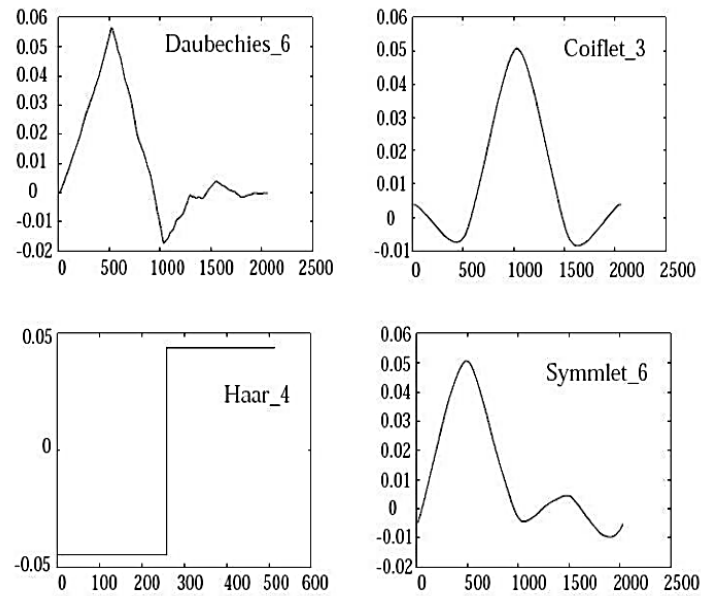
การแปลงฟูรีเยร์แบบเร็ว (FFT) ถูกนำไปใช้ในงานวิจัยที่ต้องการจำแนกสถานะระหว่างการตัดโดยอาศัยความแตกต่างของสัญญาณความถี่ของแรงตัดพลวัต มิงานวิจัยใช้การแปลงฟูรีเยร์แบบเร็วในการตรวจจับการเกิดแซตเตอร์ในกระบวนการกลึงด้วยมีดกัดหัวบอล [14] เนื่องจากสัญญาณแรงตัดพลวัตในโดเมนเวลาไม่สามารถแยกความแตกต่างของสัญญาณจากมีดกัดและสัญญาณแซตเตอร์ได้ อาจทำให้เกิดความผิดพลาดของเครื่องจักรกลในการตรวจจับ ค่าความถี่ของแซตเตอร์มีค่าสูงกว่าความถี่ของมีดกัด ดังนั้นเมื่อแปลงค่าสัญญาณเป็นโดเมนความถี่จะทำให้เห็นความแตกต่างอย่างชัดเจน แสดงดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 เกิด chatter ที่ความเร็วตัด 6000 รอบต่อนาที ความลึกตัด 2 มิลลิเมตร อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตร

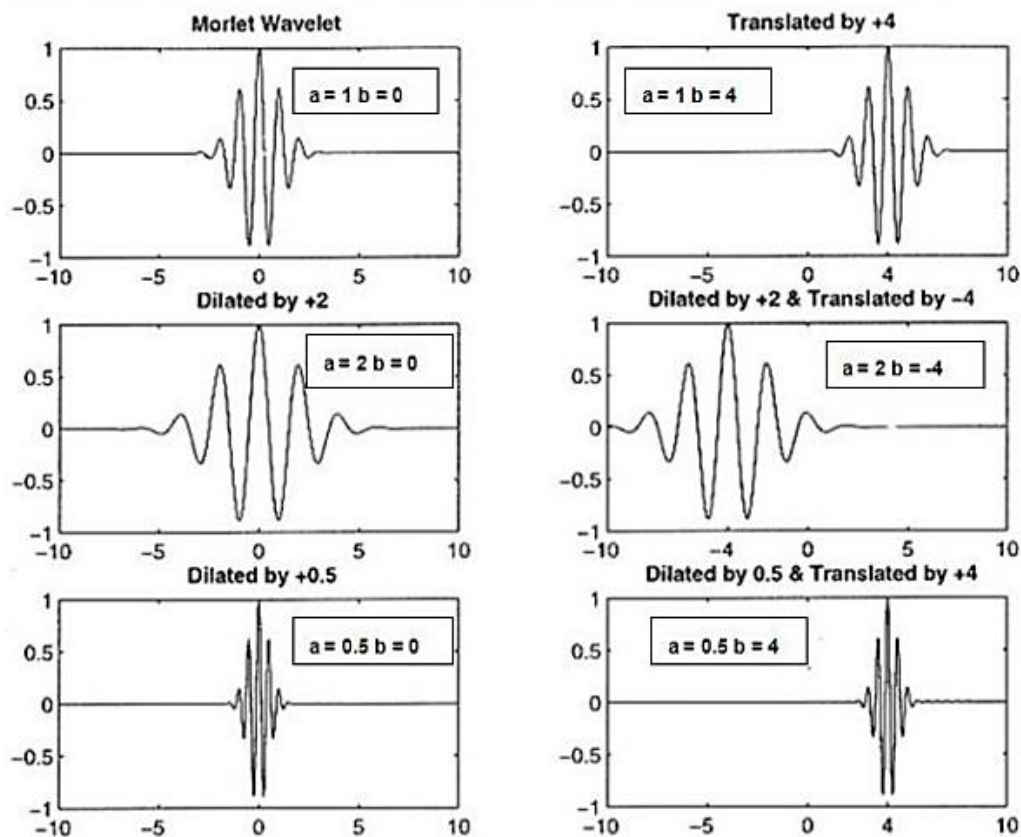
2.11 การแปลงเวฟเล็ต (Wavelet transform) [26]

การแปลงเวฟเล็ตนั้นเป็นเครื่องมือที่ถูกพัฒนาขึ้น และถูกนำไปประยุกต์ใช้ ในหลายๆด้าน เช่น การประมวลผลสัญญาณ (Signal Processing) และการประมวลผลภาพ (Image processing) เวฟเล็ตเป็นคลื่นรูปแบบหนึ่งที่มีช่วงเวลาที่จำกัดและมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ โดยเวฟเล็ตถูกแบ่งออกเป็นหลายลักษณะ โดยถูกเรียกลักษณะต่างๆนี้ว่า แฟมิลี (Family) ซึ่งแต่ละแฟมิลีนั้นก็จะมีลักษณะและรูปแบบที่แตกต่างกันออกไป เช่น Daubechies, Symlet, Haar, Coiflet เป็นต้น ดังนั้นในการแปลงเวฟเล็ต ผู้ใช้ก็ควรเลือกใช้แฟมิลีที่เหมาะสมกับสัญญาณที่ต้องการวิเคราะห์ให้มากที่สุด ในการวิเคราะห์สัญญาณนั้น เวฟเล็ตได้ถูกนำมาใช้ในการแบ่งสัญญาณหรือฟังก์ชันออกเป็นส่วนๆที่มีความสัมพันธ์กัน หลังจากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการวิเคราะห์สัญญาณอาจสามารถทำได้ในรูปของการวิเคราะห์ในเชิงเวลาและการวิเคราะห์ในเชิงความถี่ แต่เดิมนั้นนิยมใช้วิธี การแปลงฟูเรียร์ (Fourier transform) ในการวิเคราะห์สัญญาณ อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์สัญญาณด้วยวิธีดังกล่าว สามารถวิเคราะห์ได้เฉพาะสัญญาณความถี่เท่านั้น แต่ในขณะที่การแปลงเวฟเล็ตนั้นสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงเวลาและเชิงความถี่ของสัญญาณ จึงอาจเรียกได้ว่าเป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ในเชิงเวลา-ความถี่ (Time-Frequency Domain) นั่นเอง



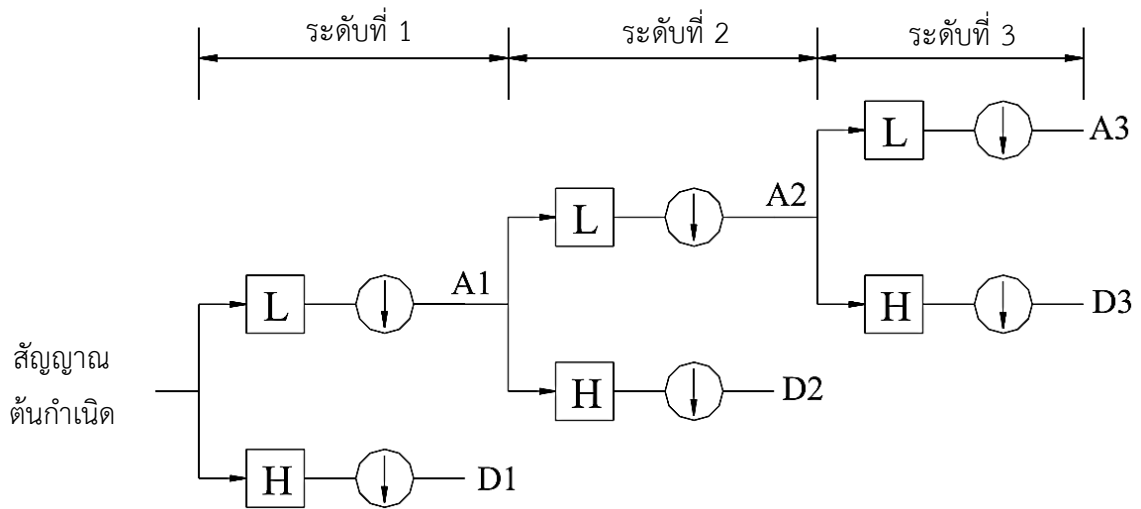
รูปที่ 2.19 สัญญาณเวฟเล็ตในแต่ละแฟมิลี [26]

เวฟเล็ตในแต่ละแฟมิลีนั้นก็อาจมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไปหลายๆลักษณะอีกเช่นกัน โดยมีพารามิเตอร์ 2 ตัว คือ การย่อหรือขยาย (Scaling, a) และการเลื่อนตำแหน่ง (Translation or shifting, b) โดยที่การย่อหรือขยายเป็นการเปลี่ยนความถี่ของเวฟเล็ตนั่นเอง และการเลื่อนตำแหน่งหมายถึงการเลื่อนตำแหน่งการเกิดของคลื่นเวฟเล็ตบนแกนเวลา ดังแสดงในรูปที่ 2.20 ซึ่งสังเกตว่าเวฟเล็ตแต่ละคลื่นนั้นมีลักษณะใกล้เคียงกันแตกต่างกันเพียงความถี่และตำแหน่งของการเกิดเท่านั้น



รูปที่ 2.20 ลักษณะของเวฟเล็ตที่ค่า a และ b ต่างกัน [26]

ทฤษฎีเวฟเล็ตนั้นถูกใช้ในการอธิบายสัญญาณหนึ่ง ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบย่อยๆ หลายๆ ส่วนที่ มีความสัมพันธ์กัน องค์ประกอบย่อยๆ เหล่านี้ อยู่ในรูปของเวฟเล็ตที่ถูกย่อหรือขยาย และเลื่อนตำแหน่ง โดยมีกระบวนการในการแยกย่อยสัญญาณนี้ ซึ่งถูกเรียกว่า เวฟเล็ต ดีคอมโพสิชัน (Wavelet decomposition) ซึ่งสัญญาณที่ต้องการวิเคราะห์ (Original signal) นั้นสามารถแบ่งออกได้เป็นสัญญาณ 2 ประเภทด้วยกัน คือ สัญญาณประมาณ (Approximation signal) และสัญญาณรายละเอียด (Detail signal) โดยที่สัมประสิทธิ์การประมาณ (Approximation coefficient) นั้นเป็นองค์ประกอบของสัญญาณ $f(t)$ ที่มีค่าความถี่ต่ำขณะที่สัมประสิทธิ์ รายละเอียด (Detailed coefficient) เป็นองค์ประกอบของสัญญาณ $f(t)$ ที่มีค่าความถี่สูงและในการแยกย่อยสัญญาณสามารถทวนซ้ำไปได้เรื่อยๆ ตามจำนวนระดับที่ต้องการ สัญญาณที่ต้องการวิเคราะห์นั้นในระดับที่ 1 สามารถแบ่งออกได้เป็นสัญญาณ A1 และ D1 ต่อจากนั้นในระดับที่ 2 สัญญาณ A1 ถูกแบ่งย่อยออกเป็นสัญญาณ A2 และ D2 ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงระดับที่กำหนดไว้ ดังแสดงในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 การแยกย่อยสัญญาณของการแปลงเวฟเล็ต 3 ระดับ [26]

2.11.1 เวฟเล็ตตอเบชีส์ (Daubechies Wavelets)

เวฟเล็ตตอเบชีส์เป็นแฟมิลี (Family) หนึ่งที่นิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์สัญญาณเชิงกล โดยเวฟเล็ตตอเบชีส์นั้นมียู่ด้วยกันหลายประเภท ขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์หรือที่เรียกว่า Scale Coefficient ที่แตกต่างกันไป ตัวอย่างเช่น D4 โดยที่ 'D' หมายถึง แฟมิลีของเวฟเล็ต และ '4' หมายถึง จำนวนสัมประสิทธิ์ (Scale coefficient) ที่มีค่าไม่เท่ากับ 0 นั้นเอง สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การประมาณ (Approximation coefficient) ค่าสัมประสิทธิ์รายละเอียด (Detailed coefficient) ได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$S_{m+1,n} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{k=0}^{N_k-1} c_k S_{m,2n+k} \quad (2.10-1)$$

$$T_{m+1,n} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{k=0}^{N_k-1} b_k S_{m,2n+k} \quad (2.10-2)$$

$S_{m,n}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การประมาณในระดับที่ m ตำแหน่งที่ n

$T_{m,n}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์รายละเอียดในระดับที่ m ตำแหน่งที่ n

N_k คือ จำนวน Scale of coefficient

c_k คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ k

b_k คือ Reconfigured Coefficient ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$b_k = (-1)^k c_{N_k-1-k} \quad (2.10-3)$$

2.12 การ ออกแบบการทดลองแบบ (Design of Experiment) [27]

แบบการทดลองแบบ DOE นั้นมีหลายแบบซึ่งสามารถจัดเป็นประเภทใหญ่ๆได้ 2 ประเภท ตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง

1) ประเภทที่ 1 เป็นการออกแบบการทดลองที่ใช้สำหรับทดสอบเพื่อหาว่าปัจจัยใดมีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเป็นแบบการทดลองที่มีการทดสอบแต่ละปัจจัยที่สองระดับเท่านั้น เพื่อประหยัดจำนวนการทดลอง แบบการทดลองในประเภทนี้ได้แก่ แบบการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูป (Full Factorial Design) และแบบการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน (Fractional Factorial Design) เป็นต้น

2) ประเภทที่ 2 เป็นแบบการทดลองที่ใช้สำหรับทดสอบเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่ทำให้ตัวแปรตอบสนองมีค่าที่ต้องการ ซึ่งแบบการทดลองที่ใช้เพื่อจุดประสงค์ในการหาค่าที่เหมาะสมนี้ แต่ละปัจจัยต้องถูกทดสอบที่มากกว่า 2 ระดับ แบบการทดลองในประเภทนี้ได้แก่ แบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design : CCD) และแบบการทดลองบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken) เป็นต้น

2.12.1 ขั้นตอนในการออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

1) ระบุวัตถุประสงค์ของการทำการทดลอง ได้แก่ การกำหนดตัวแปรตอบสนองและปัจจัยที่จะศึกษา และการกำหนดว่าจะศึกษาเพื่อทดสอบความมีนัยสำคัญของปัจจัย หรือจะศึกษาเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัย

2) ออกแบบการทดลอง

2.1) กำหนดแบบการทดลองที่จะใช้ โดยพิจารณาตามวัตถุประสงค์ของการศึกษาว่าต้องการศึกษาเพื่อทดสอบความมีนัยสำคัญของปัจจัย หรือจะศึกษาเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัย ซึ่งจะใช้การทดลองที่แตกต่างกันดังกล่าวข้างต้น นอกจากนั้นการกำหนดแบบการทดลองที่จะใช้ยังต้องพิจารณาจากจำนวนปัจจัย จำนวนของครั้งการทดลองที่สามารถทำได้ และคุณภาพของผลสรุปที่จะได้จากแบบการทดลองอีกด้วย

2.2) การเขียนเมทริกซ์การออกแบบ

2.3) กำหนดค่าของแต่ละปัจจัยที่จะทำการทดสอบ

2.4) กำหนดตัวแปรอื่นๆ ที่อาจจะมีผลต่อตัวแปรตอบสนอง เพื่อทำการควบคุมตัวแปรเหล่านั้น

3) ทำการทดลองตามที่ออกแบบไว้

4) วิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1) ตรวจสอบสมมติฐานว่าข้อมูลมีลักษณะที่เหมาะสมที่จะใช้เทคนิคการวิเคราะห์ทางสถิติ ได้แก่ การวิเคราะห์ความถดถอย (Analysis of Variance : ANOVA) หรือการทดสอบแบบ t ในการทดสอบความมีนัยสำคัญของปัจจัยได้หรือไม่ โดยการวิเคราะห์ค่าเรซิดิวล (Residuals) ซึ่งเป็นค่าความผิดพลาดหรือค่าความคลาดเคลื่อนหรือค่าที่สังเกตได้กับค่าพิทหรือค่าที่ประมาณได้จากสมการความสัมพันธ์ ซึ่งจะกล่าวถึงวิธีในการตรวจสอบสมมติฐานต่อไป

4.2) พิจารณากราฟผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยและกราฟผลกระทบหลักของปัจจัยว่าปัจจัยมีผลต่อตัวแปรตอบสนองในทิศทางใด

5) คำนวณค่าผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยและผลกระทบหลักระหว่างปัจจัย

6) ทดสอบความมีนัยสำคัญของผลกระทบของปัจจัยด้วยวิธีการทดสอบสมมติฐานทางสถิติ (Hypothesis testing)

7) การปรับปรุงแบบจำลอง (ถ้าจำเป็น) เช่น ทำการลดรูปแบบจำลอง

8) สรุปสมการความสัมพันธ์ระหว่างเทอมของปัจจัยที่มีนัยสำคัญและตัวแปรตอบสนอง

9) หาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่ทำให้ตัวแปรตอบสนองมีค่าที่ต้องการ ด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสม (optimization technique)

10) สรุปผลการทดลอง

2.12.2 การออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Design)

แบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบใช้สำหรับวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่ทำให้ตัวแปรตอบสนองมีค่าที่ต้องการ ซึ่งแบบการทดลองที่ใช้เพื่อจุดประสงค์ในการหาค่าที่เหมาะสมนี้ แต่ละปัจจัยต้องถูกทดสอบมากกว่า 2 ระดับ แบบการทดลองในประเภทนี้ได้แก่ แบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design : CCD) และแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบนห์นเคน (Box-Behnken)

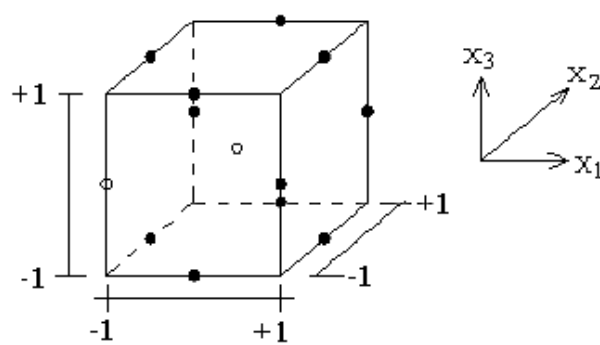
2.12.3 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) [27, 28]

การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนเป็นการออกแบบการทดลองสำหรับจำนวนปัจจัย 3 ปัจจัยขึ้นไป โดยปัจจัยใดๆ จะถูกทดลองที่ 3 ระดับ โดยจะสร้างตัวแบบที่มีลักษณะเป็นโพลีโนเมียลกำลังสอง ซึ่งคอมบินเนชันของการทดลองจะประกอบด้วย การทดลองที่จุดกึ่งกลาง (Midpoints) ของแต่ละด้านและที่จุดศูนย์กลางของตัวแบบ นอกจากนี้การทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken) ยังใช้จำนวนการทดลองที่น้อยกว่าแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง แต่สำหรับกรณีศึกษาปัจจัยตั้งแต่ 4 ปัจจัยขึ้นไป จะส่งผลให้ประสิทธิภาพของแผนการทดลองนี้ดีกว่าการทดลองแบบส่วนประสมกลาง

การออกแบบบ็อกซ์ -เบห์นเคน (Box-Behnken Design) เป็นการออกแบบสามระดับสำหรับพหุคูณผลตอบ การออกแบบนี้ถูกสร้างขึ้นจากการรวมการออกแบบแฟกทอเรียล 2^k กับการออกแบบบล็อกไม่บริบูรณ์ ผลของการออกแบบ ลักษณะนี้มีประสิทธิภาพมากในด้านจำนวนของการรันที่ต้องการ และการออกแบบนี้ยังมีความสามารถในการหมุนหรือเกือบหมุนได้อีก ด้วย 2^k จากตารางที่ 2.1 แสดงการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนที่มีตัวแปร 3 ตัว รูปทางเรขาคณิต ของการออกแบบแสดงในรูปที่ 2.22 โดยการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนเป็นการออกแบบรูปทรงกลมที่ทุกจุดวางอยู่บนรูปทรงกลมรัศมี นอกจากนั้นการออกแบบบ็อกซ์ -เบห์นเคนไม่ได้รวม เอาจุดใดๆที่เป็นจุดยอดของรูปลูกบาศก์ที่สร้างขึ้นจากขีดจำกัดบนและล่างของแต่ละตัวแปรเอาไว้ การออกแบบลักษณะ นี้เป็นประโยชน์อย่างมากเมื่อจุดที่อยู่บนมุมของลูกบาศก์ คือ การรวมของปัจจัยระดับ (Factor-Level Combination) ที่แพงมากหรือเป็นไปได้ที่จะทำการทดลอง เนื่องจากข้อจำกัดในด้านกายภาพของกระบวนการ

ตารางที่ 2.1 การออกแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนที่มี 3 ตัวแปร[28]

Run	X_1	X_2	X_3
1	-1	-1	0
2	-1	1	0
3	1	-1	0
4	1	1	0
5	-1	0	-1
6	-1	0	1
7	1	0	-1
8	1	0	1
9	0	-1	-1
10	0	-1	1
11	0	1	-1
12	0	1	1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0



รูปที่ 2.22 รูปแบบทางเรขาคณิตสำหรับแผนการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน [28]

2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Chawalit Wongtangthinthan (2014) [6] ได้นำเสนองานวิจัยในการพัฒนาสมการทำนายการสึกหรอของเม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์เคลือบผิวด้วยไทเทเนียมคาร์บอนไนไตรด์กับอะลูมิเนียมออกไซด์ ไทเทเนียมไนไตรด์ ($TiCN+Al_2O_3TiN$) ในกระบวนการกลึงเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C โดยสมการทำนายถูกพัฒนาขึ้นจากฟังก์ชันเอ็กโปเนนเชียลจากการทดลองกลึงชิ้นงานที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% กับปัจจัย 4 ปัจจัย คือ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกตัดและอัตราส่วนแรงตัดพลวัต อัตราส่วนแรงตัดพลวัตถูกนำมาใช้ในการทำนายขนาดการสึกหรอด้านข้าง (Flank wear) ของเม็ดมีดกลึงเพื่อกำจัดอิทธิพลของเงื่อนไขการตัดต่างๆ โดยอัตราส่วนแรงพลวัตนั้นได้มาจากการแรงตัดพลวัตเฉลี่ยในทิศการป้อนตัดต่อแรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ยในทิศความเร็วตัดที่เกิดขึ้นจริงขณะตัด จากการทดลองทำให้ทราบว่าความเร็วในการตัดที่เพิ่มขึ้นทำให้แรงตัดหลักพลวัตเพิ่มขึ้นตามไปด้วยจึงมีผลทำให้ค่าอัตราส่วนแรงตัดพลวัตลดลง และมีผลทำให้ขนาดการสึกหรอใหญ่ขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าอัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีแนวโน้มลดลงเมื่อขนาดการสึกหรอเพิ่มมากขึ้น โดยสมการทำนายการสึกหรอของเม็ดมีดกลึงถูกตรวจสอบความถูกต้องและให้ค่าความแม่นยำเท่ากับ 93.50%

Thanathip Jatinandana (2013) [9] ได้นำเสนองานวิจัยในการพัฒนาสมการประมาณขนาดการสึกหรอของเม็ดกัดคาร์ไบด์เคลือบผิวด้วยไทเทเนียมอะลูมิเนียมไนไตรด์ ($TiAlN$) ชนิดหัวบอล ในกระบวนการกัดชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S50C โดยสมการการประมาณการสึกหรอถูกพัฒนาขึ้นจากฟังก์ชันเอ็กโปเนนเชียลที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% จากการทดลองกัดชิ้นงานกับปัจจัย 5 ปัจจัย คือ ความเร็วในการกัด อัตราการป้อนกัด ความลึกในการกัด เส้นผ่านศูนย์กลางเม็ดกัด และอัตราส่วนแรงตัดสถิต อัตราส่วนแรงตัดสถิตถูกนำมาใช้ในการประมาณค่าการสึกหรอ central wear ของเม็ดกัดหัวบอลเพื่อกำจัดอิทธิพลของเงื่อนไขการตัดต่างๆ โดยอัตราส่วนแรงตัดสถิตนั้นได้มาจากการแรงตัดสถิตตามแนวแกน (Axial force) ต่อแรงตัดสถิตในแนวสัมผัส (Tangential force) ออกแบบการทดลองด้วยการทดลองแบบแฟคทอเรียล เพื่อวิเคราะห์ผลตอบของค่าความสึกหรอของเม็ดกัด จากผลการทดลองพบว่าแรงที่เกิดขึ้นในขณะกัดสามารถนำมาประมาณการขนาดการสึกหรอของเม็ดกัดได้ในรูปแบบของอัตราส่วนแรงตัด ซึ่งอัตราส่วนแรงตัดนั้นแปรผันตามขนาดการสึกหรอของเม็ดกัดที่เปลี่ยนแปลงไป ไม่ว่าเงื่อนไขการตัดอื่นจะเปลี่ยนไปอย่างไร โดยสมการประมาณการสึกหรอของเม็ด

กัถูกทดสอบความถูกต้องด้วยเงื่อนไขการตัดที่อยู่นอกเหนือการทดลอง พบว่าให้ค่าความแม่นยำเท่ากับ 95.2%

S. Tangjitsitcharoen, P. Thesniyom, and S. Ratanakuakangwan (2014) [12] ได้นำเสนองานวิจัยในการสร้างโมเดลสำหรับพยากรณ์ความขรุขระผิวขณะตัดระหว่างกระบวนการกัดด้วยหัวบอลคาร์ไบด์เคลือบผิวด้วยไทเทเนียมอะลูมิเนียมไนไตรด์ (TiAlN) ขนาด 6 มม. และ 10 มม. โดยใช้ชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด AISI 1050 โดยใช้อัตราส่วนแรงตัดพลวัต โมเดลนี้ถูกพัฒนาด้วยการทดลองเพื่อหาผลลัพธ์โดยนำฟังก์ชันเอ็กโปเนนเชียลกับ 5 ปัจจัย คือ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกการตัด เส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัด และอัตราส่วนแรงตัดพลวัต จากการทดลองให้ผลลัพธ์ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความถี่ของแรงตัดพลวัตสอดคล้องกับความถี่ของค่าความขรุขระในช่วงความถี่ (frequency domain) ด้วยเหตุนี้ค่าอัตราส่วนของแรงตัดพลวัตที่นำเสนอจะไม่คำนึงถึงเงื่อนไขการตัด เพื่อพยากรณ์ค่าความขรุขระโดยหาอัตราส่วนแรงตัดพลวัตในแนวแกน X และแกน Y สมการถดถอยพหุคูณถูกนำมาใช้เพื่อคำนวณหาความสัมพันธ์ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ได้ทำการทดลองโมเดลเพื่อตรวจสอบความถูกต้องด้วยเงื่อนไขการตัดใหม่ เป็นที่ทราบกันดีว่าการพัฒนาโมเดลหาค่าความขรุขระผิวนั้นสามารถใช้ในการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวด้วยความแม่นยำสูงที่ค่าเฉลี่ยของค่าความขรุขระผิวเท่ากับ 98.82% และค่าความขรุขระเท่ากับ 91.54%

S. Tangjitsitcharoen, T. Saksri and S. Ratanakuakangwan (2013) [13] ได้นำเสนองานวิจัยสำหรับการตรวจจับแฉดเตอร์ในกระบวนการกัดหัวบอลคาร์ไบด์เคลือบผิวด้วยไทเทเนียมอะลูมิเนียมไนไตรด์ (TiAlN) บนชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด AISI 1050 แรงตัดพลวัตถูกตรวจติดตามโดยใช้วิธีการแปลงเวฟเล็ท เสนอพารามิเตอร์ใหม่ 3 ตัวสำหรับจำแนกการเกิดแฉดเตอร์ด้วยการคำนวณค่าอัตราส่วนค่าเฉลี่ยความแปรปรวนของแรงตัดพลวัต เวฟเล็ทแบบดอแบชีส์ ถูกนำมาใช้วิเคราะห์การเกิดแฉดเตอร์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าคลื่นความถี่ของการเกิดแฉดเตอร์มีระดับที่แตกต่างกันของเวฟเล็ทขึ้นอยู่กับความแตกต่างของกระบวนการกัด แอลกอริทึมใหม่ถูกพัฒนาเพื่อตรวจจับการเกิดแฉดเตอร์ระหว่างกระบวนการกัด สิ่งที่ได้จากการทดลองคือสามารถตรวจจับการเกิดแฉดเตอร์ได้ง่ายขึ้นด้วยพารามิเตอร์ที่กำหนดภายใต้การเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการกัด

Thongphannarai Maiyachote (2015) [16] ได้นำเสนองานวิจัยเพื่อพัฒนาความขรุขระผิวของชิ้นงานในกระบวนการกลึงเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด JIS S45C โดยใช้เม็ดมีดคาร์ไบด์เคลือบผิวด้วยไททาเนียมคาร์บอนไนไตรด์กับอะลูมิเนียมออกไซด์ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiCN+Al₂O₃TiN) ที่มีมุมคาย

เศษโลหะเท่ากับ -6° และ 11° โดยทำการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าความขรุขระผิวกับอัตราส่วนแรงตัดพลวัตที่เงื่อนไขการตัดต่างๆ ทั้งนี้อัตราส่วนแรงตัดพลวัตถูกนำเสนอเพื่อปัจจัยที่ใช้ในการทดลองประกอบไปด้วย ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีงูมกมิต และมุมคายเศษโลหะ จากนั้นเก็บค่าสัญญาณแรงตัดพลวัตในทิศทางแนวป้อนตัด (AFy) ทิศทางความเร็วตัด (AFz) และทิศทางในแนวรัศมีของชิ้นงาน (AFx) ปรากฏว่า แรงในแนว AFy และ AFz มีค่ามากที่สุดจึงนำแรงตัดพลวัตทั้งสองมาทำการคำนวณค่าแรงตัดในงานวิจัย และทำการคัดกรองสัญญาณด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง พบว่าการแปลงเวฟเล็ตสามารถแยกสัญญาณแรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่ของความขรุขระผิวออกจากสัญญาณแรงตัดพลวัตที่เกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องและแบบแตกหักอยู่ในระดับที่ 5 ซึ่งมีความถี่ต่ำ จากผลการทดลองพบว่า ความเร็วตัดและอัตราการป้อนตัดมีผลต่อค่าความขรุขระผิวเป็นอย่างมาก ฟังก์ชันเอ็กโปเนนเชียลถูกนำมาใช้ในการพัฒนาสมการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานเฉื่อยและสมการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวสูงสุดเฉื่อยที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และวิเคราะห์แบบถดถอยพหุคูณ โดยใช้การประมาณค่าด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด นอกจากนี้ยังได้ทำการทดลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของสมการ พบว่ามีค่าความแม่นยำของสมการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวเฉื่อยและความขรุขระผิวสูงสุดเท่ากับ 92.78% และ 93.46% ตามลำดับ

Thararath Shansungnoen (2014) [29] ได้นำเสนองานวิจัยเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความตรงของชิ้นงานกับอัตราส่วนแรงตัดพลวัตในกระบวนการกลึงด้วยเครื่องซีเอ็นซี เม็ดมีดกลึงมุมคายเศษโลหะ -6° และ $+11^{\circ}$ ชนิดคาร์ไบด์เคลือบผิวด้วยอะลูมิเนียมออกไซด์กับไทเทเนียมคาร์บอนไนไตรด์และไทเทเนียมไนไตรด์ (Al_2O_3 TiCN+TiN) ชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45S โดยได้ทำการทดลองด้วยวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลเพื่อพัฒนาสมการความสัมพันธ์สำหรับ 6 ปัจจัย คือ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีงูมกมิต มุมคายเศษโลหะและอัตราส่วนแรงตัดพลวัตต่อความตรงของชิ้นงาน ระหว่างการทดลองจะทำการเก็บค่าความตรงของชิ้นงานและสัญญาณแรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่ (Frequency domain) โดยการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform) พบว่า ความถี่ของแรงป้อนตัดพลวัตนั้นตรงกับค่าความถี่ของข้อมูลความตรงคือมีค่าเท่ากับ 30 Hz จากนั้นคำนวณอัตราส่วนแรงตัดพลวัตระหว่างแรงในทิศทางป้อนตัด (dFy) ส่วนด้วยแรงในทิศความเร็วตัดหรือแรงตัดหลัก (dFz) จากการทดลองพบว่า อัตราป้อนตัดและรัศมีงูมกมิตมีผลต่อความตรงของชิ้นงานมากที่สุด ฟังก์ชันเอ็กโปเนนเชียลถูกนำมาใช้ในการพัฒนา

สมการพยากรณ์ความตรงของชิ้นงานที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และวิเคราะห์แบบถดถอยพหุคูณ ซึ่งสมการทำนายความตรงให้ค่าความแม่นยำเท่ากับ 91.85% งานวิจัยนี้ยังได้เสนอแนะการวิเคราะห์สัญญาณแรงตัดพลวัตในกรณีที่เกิดเศษโลหะแบบแตกหักโดยวิธีการแปลงเวฟเล็ตแบบดอเบชีส์เพื่อแยกสัญญาณแรงตัดจริงกับสัญญาณแรงตัดที่เกิดจากเศษโลหะแตกหัก พบว่า สัญญาณแรงตัดจริงอยู่ในระดับที่ 8 การทำเช่นนี้จะส่งผลให้สามารถนำค่าแรงตัดพลวัตมาประมาณค่าความตรงได้แม่นยำยิ่งขึ้น

T. Moriwaki, T. Shibasaka, S. Tangjitsitcharoen (2004) [30] ได้เสนองานวิจัยพัฒนาระบบตรวจติดตามการสึกหรอของมีดกลึงคาร์ไบด์เคลือบผิวในกระบวนการกลึงชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด JIS S45C และเหล็กกล้าประสมเกรด JIS SNCM420 ด้วยเครื่องซีเอ็นซี ฟังก์ชันเอ็กโปเนนเชียลถูกนำมาใช้ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การต้านทานการตัดกับอัตราป้อนตัดดัชนีค่า a ในฟังก์ชันเอ็กโปเนนเชียลใช้แทนค่าประมาณการสึกหรอด้านข้าง (Flank wear) ซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราการเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์การต้านทานการสึกหรอที่อัตราป้อนตัดเป็นศูนย์เทียบกับอัตราป้อนตัดก่อนหน้า เนื่องจากค่า a ได้มาจากการเพิ่มจำนวนรอบการตัดที่ถูกเสนอขึ้นเพื่อปรับอัตราการป้อนตัดระหว่างการตัดแบบปกติแล้วทำการวัดค่าแรงตัดและกำหนดอัตราป้อนที่เพิ่มขึ้นด้วยค่าสัมประสิทธิ์การต้านทานการตัดที่น้อยกว่าอัตราป้อนตัด อนุกรมการทดลองถูกประมาณค่าความสึกหรอด้านข้าง (Flank wear) และยังพิสูจน์ได้ว่า ดัชนีที่ถูกกล่าวไว้ข้างต้นสามารถขนาดความสึกหรอของเม็ดมีดได้เป็นอย่างดี รวมถึงความลึกตัด ความเร็วตัด และเม็ดตัดในกระบวนการตัดที่ชิ้นงานมีวัสดุต่างอีกด้วย

R. Suresh, S. Basavarajappa (2014) [31] ได้เสนองานวิจัยเพื่อหาอิทธิพลของพารามิเตอร์ในกระบวนการที่มีผลต่อการสึกหรอของเม็ดมีดกลึงเซรามิกเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมคาร์บอนไนไตรด์ (TiCN) โดยใช้ชิ้นงานเหล็กกล้าชุบแข็งเกรด AISI H13 และความขรุขระผิว งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองโดยใช้การออกแบบการทดลองพื้นผิวสองตอ (RSM) ด้วยวิธีส่วนประสมกลาง (CCD) โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองได้แก่ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด และความเร็วตัด และได้ทำการวัดค่าความขรุขระผิวและค่าความสึกหรอด้านข้าง (Flank wear) สมการพยากรณ์ถูกวิเคราะห์ด้วยสมการถดถอยพื้นผิวสองตอที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จากผลการทดลองพบว่า ความเร็วตัดเป็นพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อความสึกหรอของมีดกลึงมากที่สุดประมาณ 47.4% รองลงมาคืออัตราการป้อนตัดประมาณ 28.15% และลำดับสุดท้ายคือความลึกตัดประมาณ 15.8% รวมถึงอัตราการป้อน

ตัดเป็นพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อค่าความขรุขระผิวมากที่สุดประมาณ 49.55% รองลงมาคือความเร็วตัดประมาณ 40.3% ลำดับสุดท้ายคือความลึกตัดประมาณ 8.8% ซึ่งมีผลโดยตรงต่อผิวสำเร็จของชิ้นงาน

C. Klaynil, P. Leetrakul and P. Ratchapakdee (2012) [10] ได้นำเสนองานวิจัยเพื่อพัฒนาสมการทำนายการสึกหรอของเม็ดมีดกลึงซีเมนต์คาร์ไบด์เคลือบผิวด้วยไททาเนียมไนไตรด์ในการกลึงเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นเกรด JIS SKD11 และ JIS SKS3 โดยใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมชนิด Multilayer perceptron network ด้วยโปรแกรม MATLAB ออกแบบการทดลองโดยใช้การออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลของ 3 ปัจจัย คือ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด และความลึกตัด ระหว่างการทดลองแต่ละเงื่อนไขมีการวัดขนาดความสึกหรอของเม็ดมีดด้านข้าง (Flank wear) รวมถึงการคำนวณอัตราการจำกัดวัสดุ (MRR) จากนั้นนำมาวิเคราะห์ผลทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่าจากการเปรียบเทียบเหล็กทั้งสองเกรดมีแนวโน้มที่เหมือนกันคือ ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสึกหรอด้านข้างมากที่สุด ได้แก่ ความเร็วตัด รองลงมาคือ อัตราป้อนตัด การใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายผลความสึกหรอของเม็ดมีดด้านข้างในการตัดเหล็กเกรด JIS SKS3 และ เกรด JIS SKD11 นั้นให้ค่าความแม่นยำเท่ากับ 98.32% และ 97.16% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับการทดลองจริง

R.A. Rahman Rashid, S. Palanisary, S. Sun, and M.S. Dargusch (2015) [32] ได้นำเสนองานวิจัยเพื่อศึกษากลไกการสึกหรอของเม็ดมีดกลึงรวมถึงการเสียรูปแบบหลุมแฉ่งในเม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์ไม่เคลือบผิวในกระบวนการกลึงชิ้นงานไททาเนียมอัลลอยเกรด Ti6Al4 ในการทดลองได้กำหนดพารามิเตอร์ 3 พารามิเตอร์ คือ ความเร็วตัดเท่ากับ 150 ม./นาที อัตราการป้อนตัดเท่ากับ 0.214 มม./รอบ และความลึกตัดเท่ากับ 1 มม. ด้วยกระบวนการตัดแบบแห้ง หลังจากนั้นทำการศึกษาการสึกหรอของเม็ดมีดกลึงเมื่อทำการกลึงชิ้นงานไปได้ 180 วินาที และเกิดการสึกหรอด้านข้าง (Flank wear) เท่ากับ 600 ไมโครเมตร ซึ่งมากที่สุดตามมาตรฐาน ISO 3685 และเมื่อทำการศึกษาที่หน้าผิวคายด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าขนาดการสึกหรอแบบหลุมแฉ่ง (crater wear) มีความกว้างประมาณ 150 มม. และลึก 500 ไมโครเมตร กลไกการสึกหรอแบบหลุมแฉ่ง (crater wear) เกิดจากเกิดความเค้นทางกลสูงในพื้นที่การตัดซึ่งนำไปสู่การชุบขีดที่ผิวหน้าของเม็ดมีด อีกทั้งเมื่อเกิดอุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดการแพร่ของอนุภาคเคมีของคาร์บอนและทั้งสเดนของเม็ดมีดเกาะยึดกับไทเทเนียมของชิ้นงานได้ดีขึ้น นอกจากนี้พลังงานจลน์ความร้อนยังเป็นตัวเร่งให้เกิดการสึกหรอของเม็ดมีด การเสียรูปแบบพลาสติกของคมตัด

M.A. Shalaby, M.A.El Hakim, Magdy M.Abdelhameed, J.E. Krzanowski, S.C. Veldhuis, G.K. Dosbaeva (2013) [33] ได้เสนองานวิจัยเพื่อการศึกษาเชิงประจักษ์ของสมรรถนะของวัสดุ 3 ชนิด คือ Polycrystalline Cubic Boron Nitride (PCBN), PCBN เคลือบผิวด้วยไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) และเซรามิกเคลือบผิวด้วยอะลูมิเนียมออกไซด์และไทเทเนียมคาร์บอน (Al_2O_3+TiC) ที่ใช้สำหรับการผลิตเม็ดมีดกลึงในกระบวนการกลึงเหล็กกล้าคาร์บอนและโครเมียมสูงเกรด AISI D2 งานวิจัยนี้ได้พิจารณาสมรรถนะของวัสดุใน 4 ด้าน คือ อายุการใช้งานของเม็ดมีด กลไกการสึกหรอของเม็ดมีด แรงตัดที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการกลึง และลักษณะของเศษโลหะที่ถูกกำจัดด้วยอัตราส่วนการอัดเศษโลหะ (Chip compression ratio) จากการทดลองพบว่า เซรามิก (Al_2O_3+TiC) มีอายุการใช้งานยาวที่สุด เนื่องจากให้อัตราการสึกหรอด้าน (Flank wear) ข้างที่ 0.2 มิลลิเมตร ที่น้อยกว่า รองลงมาคือ PCBN และ PCBN (TiN) ตามลำดับ อีกทั้งไม่พบการสึกหรอแบบหลุมแอ่ง (Crater wear) ในเซรามิก (Al_2O_3+TiC) นอกจากนี้แรงตัดในทุกแนวแกนที่เกิดขึ้นระหว่างการตัดยังน้อยที่สุด ซึ่งส่งผลให้เกิดความเสถียรทางด้านเคมีและอุณหภูมิ และเมื่ออุณหภูมิในการตัดสูงขึ้นจะมีการสร้าง Tribo-film ที่ชั้นผิวของเม็ดมีดเซรามิก (Al_2O_3+TiC) จึงทำกลไกการสึกหรอเกิดการยากขึ้น ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า เม็ดมีดกลึงเซรามิก (Al_2O_3+TiN) เป็นตัวเลือกที่ดีที่สุดสำหรับกระบวนการกลึงเหล็กกล้าคาร์บอนและโครเมียมสูงเกรด AISI D2 รองลงมาคือ PCBN

R. Meyer, J. Kohler and B. Denkena (2011) [34] ได้นำเสนองานวิจัยเพื่อศึกษาอิทธิพลของรัศมีของมุมเม็ดมีดกลึงต่อการสึกหรอของเม็ดมีดกลึงและแรงระหว่างกระบวนการกลึงเหล็กกล้าชุบแข็งเกรด AISI 5115 (16MnCrS5) ด้วยเม็ดมีดกลึงทำจากวัสดุ WBN560 ผสมกับคิวบิกโบรอนไนไตรด์ (CBN) 56% ในการทดลองปัจจัยที่ถูกกำหนดเป็นค่าคงที่ ได้แก่ องศาหมุนคายเท่ากับ -30° องศาบากเท่ากับ -24° และความเร็วตัดเท่ากับ 150 เมตร/นาที ปัจจัยที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าคือ รัศมีของมุมเม็ดมีดขนาด 100 ไมโครเมตร, 400 ไมโครเมตร, 800 ไมโครเมตร และ 1200 ไมโครเมตร ระหว่างการทดลองมีการวัดค่าแรงตัดทั้ง 3 แกน ในโดเมนความถี่ด้วยไดนามิเตอร์ และวัดขนาดความกว้างของความสึกหรอด้านข้าง (Flank wear) ด้วยกล้องไมโครสโคป จากการทดลองพบว่า ขนาดของรัศมีของมุมเม็ดมีดมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการสึกหรอของเม็ดมีดอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือเมื่อใช้รัศมีของมุมเม็ดมีดขนาดเล็ก ทำให้อัตราการสึกหรอมากกว่าการใช้รัศมีของมุมเม็ดมีดกลึงขนาดใหญ่ ซึ่งนำไปสู่อายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น ส่วนการวิเคราะห์ขนาดของแรงตัดและทิศทางของแรงตัดนั้นได้รับอิทธิพลจากขนาดของรัศมีมุมเม็ดมีด กล่าวคือแรงตัดหลักจะได้รับอิทธิพลมากที่สุด ซึ่งขนาดของแรง

ตัดหลักที่มากเกิดจากขนาดพื้นที่หน้าตัดของเศษโลหะที่ยังไม่เสียรูปมีขนาดใหญ่อันเนื่องมาจากรัศมีของมุมตัดมีขนาดใหญ่

Somchart Arayaphitaya (2009) [35] ได้นำเสนองานวิจัยเพื่อหาเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการกลึงด้วยการตัดแบบแห้ง โดยใช้เม็ดมิดคาร์ไบด์เคลือบผิวด้วยอะลูมิเนียมออกไซด์กับไทเทเนียมคาร์บอนไนไตรด์และไทเทเนียมไนไตรด์ (Al_2O_3 TiCN+TiN) ตัดชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด JIS S45C โดยใช้รูปแบบการทดลองพื้นผิวผลตอบ แบบบล็อกซ์-เบห์นเคน สำหรับ 3 ปัจจัย ที่ 3 ระดับ ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด และความลึกตัด จึงทำให้เกิดจำนวนการทดลอง 15 การทดลอง ในการทดลองกลึงตัดชิ้นงานเหล็กกลางคาร์บอนเกรด S45C แต่ละเงื่อนไขการตัดจะมีการเก็บค่าผลตอบ 3 ค่า คือ อัตราส่วนแรงตัดพลวัต ค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน และอุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างการตัดที่ปริมาตรเศษโลหะ 500, 1000, 1500 และ 2000 ลูกบาศก์เซนติเมตร จากนั้นนำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ พบว่า อัตราป้อนตัดเป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่าผลตอบมากที่สุด นอกจากนี้ยังพัฒนาสมการทำนายค่าความขรุขระผิวที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทำให้ทราบว่าเมื่อกำหนดเงื่อนไขการตัด ความเร็วตัด 350 มิลลิเมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบและความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร จะทำให้ชิ้นงานมีค่าความเรียบผิวที่ดีที่สุด ใช้แรงตัดน้อยที่สุดและเกิดความร้อนต่ำที่สุด นอกจากนี้ยังมีการเก็บค่าความสึกหรอของเม็ดมิดด้านข้าง พบว่า อัตราส่วนแรงตัดพลวัตจะมีค่าลดลงเมื่อขนาดความสึกหรอของเม็ดมิดเพิ่มขึ้น และค่าความขรุขระผิวได้รับอิทธิพลจากการสึกหรอของเม็ดมิดอีกด้วย

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การออกแบบการทดลอง

งานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบนห์นเคน (Box-Behnken) เนื่องจากสามารถใช้วิเคราะห์ปัจจัยตั้งแต่ 2 ระดับขึ้นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถลดจำนวนการทดลองจากวิธีการออกแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ 4 ปัจจัย 3 ระดับ เท่ากับ 81 การทดลอง เหลือเพียง 27 การทดลองเท่านั้น อีกทั้งยังสามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายและเวลาที่ใช้ในการทดลองได้อีกด้วย

3.1.1 ปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาตามตารางที่ 1.1 พบว่างานวิจัยส่วนใหญ่ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่อการสึกหรอของมีดตัดด้วย 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเร็วตัด (Cutting speed, V) อัตราการป้อนตัด (Feed rate, f) และความลึกตัด (Depth of cut, d) ซึ่งปัจจัยเหล่านี้คือเงื่อนไขการตัด โดยทั่วไปแล้วจะถูกกำหนดค่าในเครื่องจักรระหว่างกระบวนการตัด แต่ยังไม่มีการนำรัศมีจมูกมีดเข้ามาพิจารณาร่วมด้วย ดังนั้นงานวิจัยนี้จะใช้ทั้งหมด 4 ปัจจัยอิสระ ได้แก่ ความเร็วตัด (Cutting speed, V) อัตราการป้อนตัด (Feed rate, f) ความลึกตัด (Depth of cut, d) และรัศมีจมูก (Nose radius, R_n) ในการทดลอง

3.1.2 ระดับที่ใช้ในการทดลอง

การกำหนดระดับปัจจัย 3 ระดับ ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมจากคู่มือผู้ผลิตเครื่องมือตัดและให้แต่ละระดับชั้นมีความห่างเท่าๆกับ ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัยอิสระ	สัญลักษณ์	ระดับ		
		-1	0	1
ความเร็วตัด (เมตร/นาที)	v	150	200	250
อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	f	0.10	0.15	0.20
ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	d	1.0	1.2	1.4
รัศมีจุมุมมีด (มิลลิเมตร)	Rn	0.4	0.8	1.2

นอกจากนี้ยังกำหนดปัจจัยคงที่ ได้แก่ มุมคายเศษโลหะ (rake angle) เท่ากับ -6° เพื่อช่วยเร่งให้เกิดแรงตัดที่มากขึ้นระหว่างกระบวนการตัดเนื่องจากมุมคายเศษโลหะที่เป็นลบทำให้การคายเศษโลหะเป็นไปได้ยาก

จากที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้ได้จำนวนการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.2 โดยใช้โปรแกรม Minitab อีกทั้งลำดับการทดลองเป็นแบบสุ่ม (Random) เพื่อลดความเอนเอียง (Bias) ระหว่างการทดลอง

ตารางที่ 3.2 ตารางการทดลองจากการออกแบบบล็อกซ์-เบนห์นเคน

Std. Order	Run Order	ความเร็วตัด (เมตร/นาที) V	อัตราการป้อนตัด (มม/รอบ) f	ความลึกตัด (มม) d	รัศมีจุมุมมีด (มม) Rn	ขนาดความลึกหรือ (มม) V _b	อัตราส่วนแรงตัด dFy/dFz
17	1	150	0.15	1	0.8		
19	2	150	0.15	1.4	0.8		
27	3	200	0.15	1.2	0.8		
21	4	200	0.1	1.2	0.4		
20	5	250	0.15	1.4	0.8		
24	6	200	0.2	1.2	1.2		
6	7	200	0.15	1.4	0.4		
9	8	150	0.15	1.2	0.4		

ตารางที่ 3.2 ตารางการทดลองจากการออกแบบบ็อกซ์-เบนห์นเคน (ต่อ)

Std. Order	Run Order	ความเร็วตัด (เมตร/นาที) V	อัตราการป้อนตัด (มม/รอบ) f	ความลึกตัด (มม) d	รัศมีจุ่มกมิต (มม) Rn	ขนาดความลึกหรือ (มม) V _b	อัตราส่วนแรงตัด dFy/dFz
15	9	200	0.1	1.4	0.8		
25	10	200	0.15	1.2	0.8		
14	11	200	0.2	1	0.8		
16	12	200	0.2	1.4	0.8		
4	13	250	0.2	1.2	0.8		
23	14	200	0.1	1.2	1.2		
8	15	200	0.15	1.4	1.2		
18	16	250	0.15	1	0.8		
22	17	200	0.2	1.2	0.4		
26	18	200	0.15	1.2	0.8		
1	19	150	0.1	1.2	0.8		
2	20	250	0.1	1.2	0.8		
5	21	200	0.15	1	0.4		
13	22	200	0.1	1	0.8		
7	23	200	0.15	1	1.2		
11	24	150	0.15	1.2	1.2		
12	25	250	0.15	1.2	1.2		
10	26	250	0.15	1.2	0.4		
3	27	150	0.2	1.2	0.8		

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 ชิ้นงาน (Work piece)

ชิ้นงานที่ใช้เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด JIS S45C ทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 120 มิลลิเมตร และมีความยาว 300 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และคุณสมบัติของวัสดุซึ่งอ้างอิงตามมาตรฐาน JIS G4051 ดังตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.1 เหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด JIS S45C

ส่วนประกอบทางเคมี	C	Mn	P	S	Si
	0.42-0.48	0.60-0.90	0.03	0.035	0.15-0.35
คุณสมบัติทางกล	Density (kg/m)	Young's modulus (GPa)	Tensile strength (Mpa)	Yield strength (Mpa)	Poisson's ratio
	7700-8030	190-210	569	343	0.27-0.30
ความแข็งของวัสดุ (HB)	160 – 220				
จุดหลอมเหลว (°C)	~1520				

3.2.2 เม็ดมีดกลึง (Insert)

เม็ดมีดเซรามิกเคลือบผิวด้วยคาร์ไบด์เคลือบผิวด้วยไททาเนียมคาร์บอนไนไตรด์กับอะลูมิเนียมออกไซด์ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiCN+Al₂O₃TiN) ยี่ห้อ KYCERA โดยใช้ทั้งหมด 3 รหัส ขึ้นอยู่กับรัศมีจุมกัด ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 เม็ดมีดกลึงที่ใช้ในการทดลอง

รหัสเม็ดมีดกลึง	รูปร่าง	ขนาด (มม.)				
		รัศมี จุมกมีด	I.C.	ความ หนา	รู	มุมคาย เศษโลหะ
TNMG160404HQ CA5525		0.4	9.525	4.76	3.81	ลบ (Negative)
TNMG160408HQ CA5525		0.8				
TNMG160412HQ CA5525		1.2				

3.2.3 ด้ามมีด (Tool holder)

ด้ามมีดยี่ห้อ KYOCERA รหัส WTJNR2525M-16N มีมุมคายเศษโลหะเท่ากับ -6 องศา



รูปที่ 3.2 ด้ามมีดที่ใช้ในการทดลอง

3.2.4 เครื่องกลึงซีเอ็นซี (CNC turning machine)

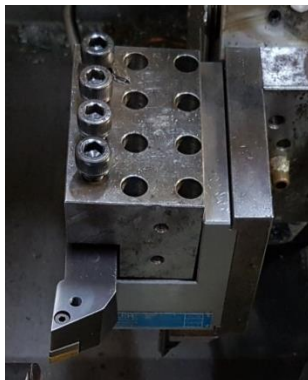
ยี่ห้อ MAZAK รุ่น Quick turn NEXUS 200MY/MSY



รูปที่ 3.3 เครื่องกลึงซีเอ็นซีที่ใช้ในการทดลอง

3.2.5 เซนเซอร์วัดแรงหรือไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer)

ยี่ห้อ KISTLER รุ่น 9121 ใช้สำหรับวัดสัญญาณแรงตัดขณะกลิ้ง



รูปที่ 3.4 ไดนาโมมิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.6 เครื่องขยายสัญญาณแรงตัด (Charge amplifier)

ยี่ห้อ KRITLER รุ่น 5038 สำหรับขยายสัญญาณแรงตัดทั้งสามแนวแกน



รูปที่ 3.5 เครื่องขยายสัญญาณแรงตัดที่ใช้ในการทดลอง

3.2.7 ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)

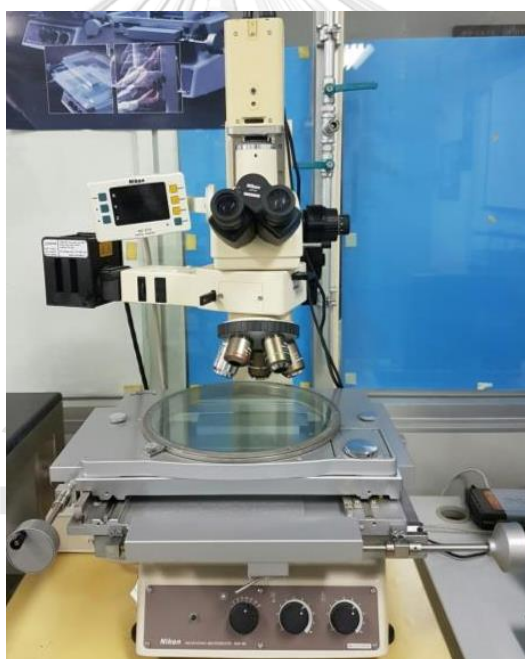
ยี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น DL750 ใช้สำหรับแสดงผลและบันทึกข้อมูลแรงตัดในขณะกลิ้ง แสดงดังรูปที่ 3.6 โดยมีการตั้งค่าดังต่อไปนี้ 1) Low pass filter bandwidth เท่ากับ 500 Hz 2) Sampling rate เท่ากับ 1 KS/s, 1s/div และ 3) Record length เท่ากับ 10k



รูปที่ 3.6 ออสซิลโลสโคปที่ใช้ในการทดลอง

3.2.8 กล้องไมโครสโคป (Microscope)

ยี่ห้อ NIKON รุ่น MM-60 ใช้สำหรับดูรูปร่างและวัดขนาดการสึกหรอของเม็ดมิด



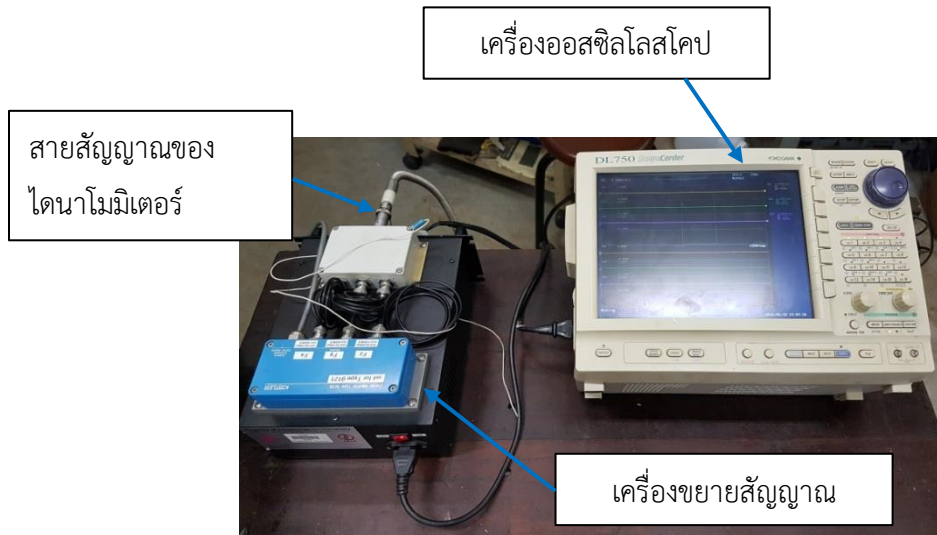
รูปที่ 3.7 กล้องไมโครสโคปที่ใช้ในการทดลอง

3.3 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

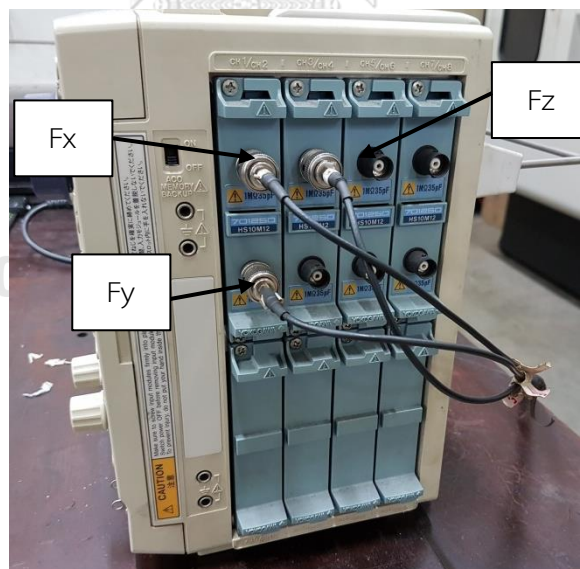
3.3.1 ติดตั้งอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการทดลอง

- 1) ติดตั้งไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer) เข้ากับป้อมมิด (Turret) หมายเลข 2 ของเครื่องซีเอ็นซี
- 2) ติดตั้งด้ามมิด (Tool holder) เข้ากับไดนาโมมิเตอร์

3) เชื่อมต่อสายสัญญาณของไดนาโมมิเตอร์เข้ากับเครื่องขยายสัญญาณแรงตัด (Charge amplifier) จากนั้นเชื่อมต่อสายสัญญาณของเครื่องขยายสัญญาณแรงตัดทุกแนวแกน Fx, Fy และ Fz เข้ากับออสซิลโลสโคปช่องสัญญาณ Ch1, Ch2 และ Ch3 ตามลำดับ แสดงดังในรูปที่ 3.8 – 3.9 เพื่อแสดงผลและบันทึกข้อมูลแรงตัดขณะกึ่ง



รูปที่ 3.8 การเชื่อมต่อสายสัญญาณจากไดนาโมมิเตอร์เข้ากับเครื่องขยายสัญญาณ



รูปที่ 3.9 การเชื่อมต่อสัญญาณ Fx, Fy และ Fz จากเครื่องขยายสัญญาณแรงเข้ากับออสซิลโลสโคป

3.3.2 เตรียมขึ้นก่อนการเริ่มต้นการทดลองจริง

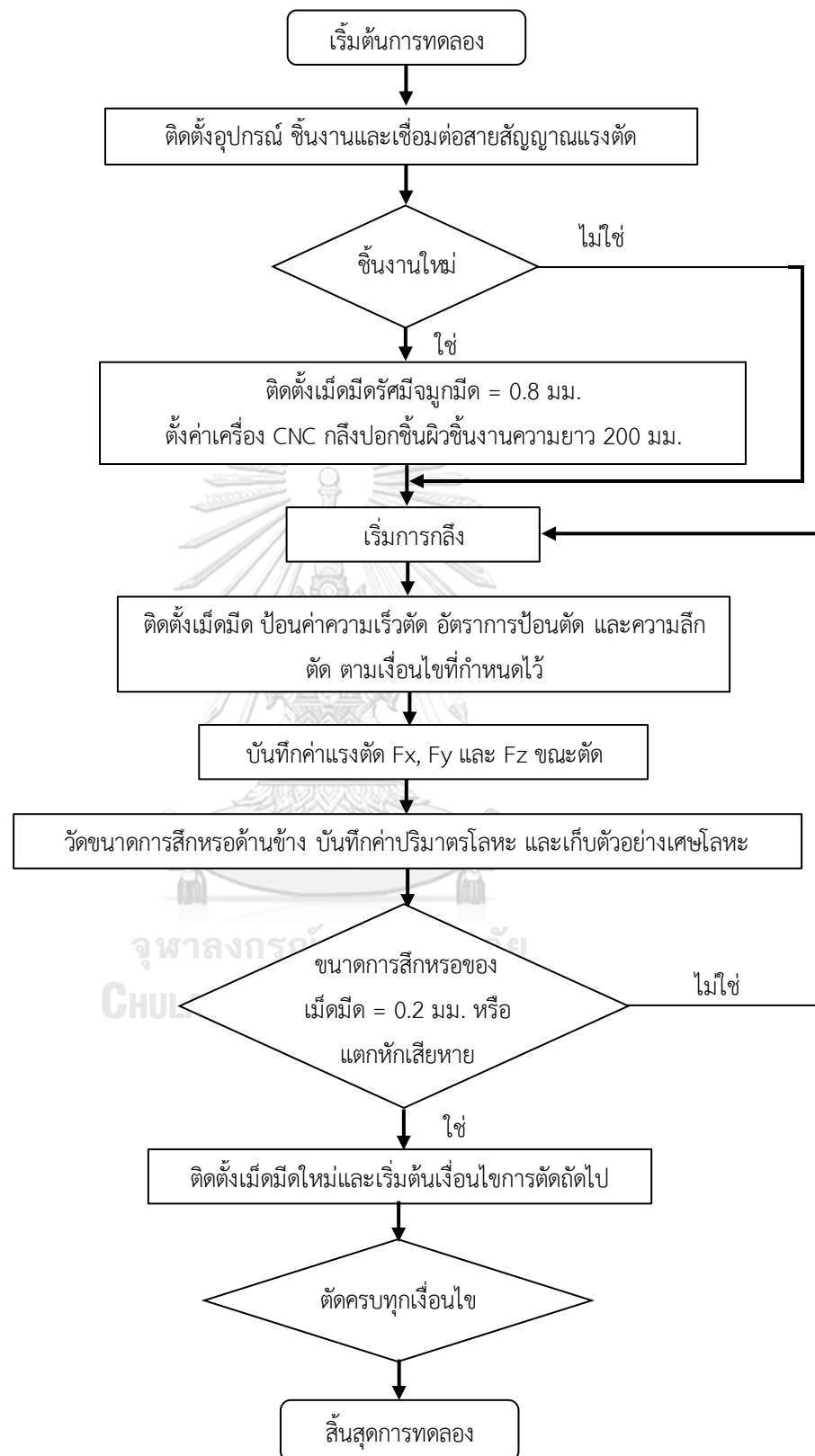
เพื่อหลีกเลี่ยงสนิมเหล็กออกให้ผิวชิ้นงานเรียบ มีความกลมที่สม่ำเสมอตลอดทั้งความยาว เพื่อช่วยให้แรงตัดพลวัตในระยะการกึ่งตัดเริ่มต้นเกิดความเสถียร โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) ติดตั้งชิ้นงานเข้ากับเครื่องกลึงซีเอ็นซีและเม็ดมีดเข้ากับด้ามมีด
- 2) ตั้งค่ามีดตัดให้อยู่ในเริ่มต้น
- 3) ป้อนค่าเงื่อนไขการตัดให้กับเครื่องซีเอ็นซี ดังต่อไปนี้
 - ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที
 - อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ
 - ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร
 - รัศมีจุมมีด 0.8 มม.
- 4) กลึงปอกชิ้นงานแบบแห้งให้ได้ความยาวเท่ากับ 200 มม.

3.3.3 เริ่มต้นการทดลองตัดจริง

โดยใช้เงื่อนไขการตัดตามตารางที่ 3.2 โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

- 1) ติดตั้งเม็ดมีดอันใหม่ตามเงื่อนไขการตัดที่กำหนดไว้
- 2) ป้อนโปรแกรมให้กับเครื่องซีเอ็นซีตามตารางที่ 3.2
- 3) กลึงปอกชิ้นงาน
- 4) บันทึกข้อมูลแรงตัดพร้อมกับวัดขนาดการสึกหรออย่างสม่ำเสมอ เก็บตัวอย่างเศษโลหะ และบันทึกปริมาตรเศษโลหะ (Chip volume) ในทุกๆช่วงของขนาดการสึกหรอ
- 5) กลึงปอกชิ้นงานจนกว่าขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดเท่ากับ 0.2 มม. ให้ทำการเปลี่ยนเม็ดมีดแล้วเริ่มต้นการทดลองโดยใช้เงื่อนไขการตัดลำดับถัดไป ในกรณีที่เม็ดมีดเกิดความเสียหายแตกหักก่อนให้ทำการเปลี่ยนเม็ดมีดใหม่แล้วเริ่มต้นการทดลองโดยใช้เงื่อนไขการตัดเดิม
- 6) นำข้อมูลแรงตัดและขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงตัดและขนาดการสึกหรอ ขั้นตอนการทดลองทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 3.10



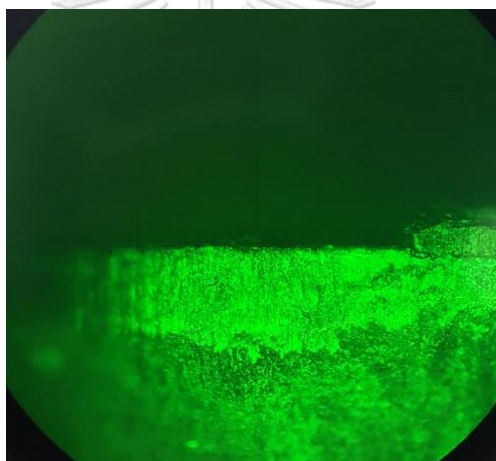
รูปที่ 3.10 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.4 การเก็บรวบรวมข้อมูล

ข้อมูลแรงตัดพลวัตและขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดด้านข้าง (ที่ได้จากการทดลองเป็นการเก็บข้อมูลแบบสุ่ม กล่าวคือในระหว่างการทดลองจะไม่มีกำหนดช่วงเวลาสำหรับการเก็บบันทึกข้อมูลในแต่ละครั้ง เนื่องจากการสึกหรอของเม็ดมีดจะช้าหรือเร็วขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการตัด

3.3.4.1 การวัดขนาดการสึกหรอด้านข้างของเม็ดมีด (Flank wear, V_b)

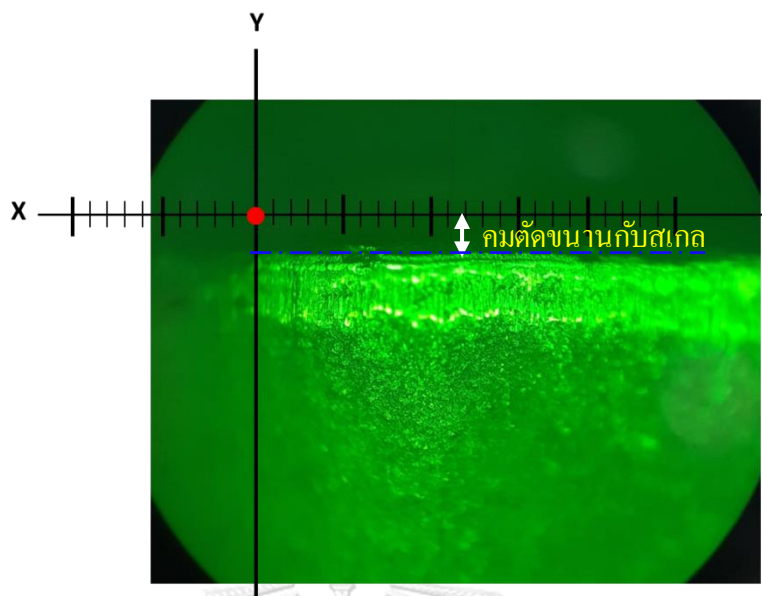
การสึกหรอด้านข้างคมตัด (Flank wear, V_b) จะสามารถวัดได้จากความกว้างมากที่สุดของแนวการสึกหรอและอ่านค่าจาก โดยเริ่มวัดจากขอบคมตัดซึ่งใช้เป็นจุดอ้างอิง (0,0) จนถึงจุดต่ำสุดของรอยสึก ระยะความกว้างที่ได้เกิดจากเส้นแนววางชิ้นงานในแนวแกน Y ของกล้องไมโครสโคปและใช้กำลังขยาย 5x0.1 เท่า ภาพที่ได้จากการส่องด้วยกล้องไมโครสโคป แสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ตัวอย่างภาพการสึกหรอของเม็ดมีดด้านข้าง (Flank wear) ด้วยกำลังขยาย 20x0.4 เท่า

ขั้นตอนการวัดขนาดการสึกหรอด้วยกล้องไมโครสโคป NIKON MM-60 มีดังต่อไปนี้

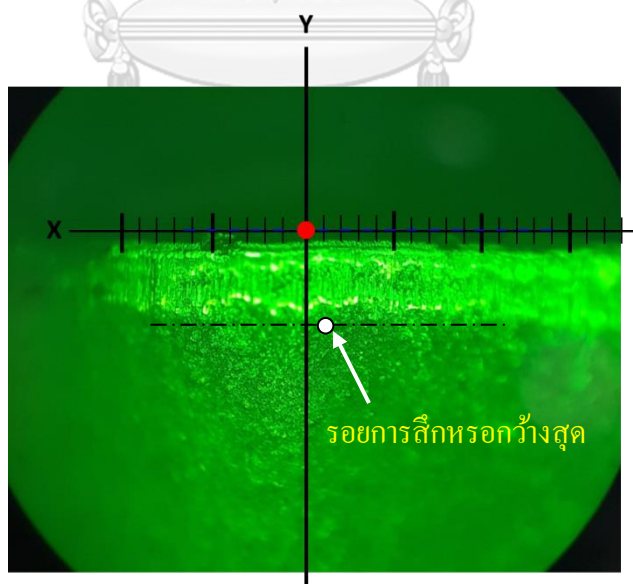
- 1) วางเม็ดมีดที่แทนวางชิ้นงาน (Stage) โดยให้ขอบคมตัดขนานกับเส้นสเกลที่เลนส์ตา (Eye pieces) แสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 การวางเมตมิตให้ขนานกับสเกลในเลนส์ตา

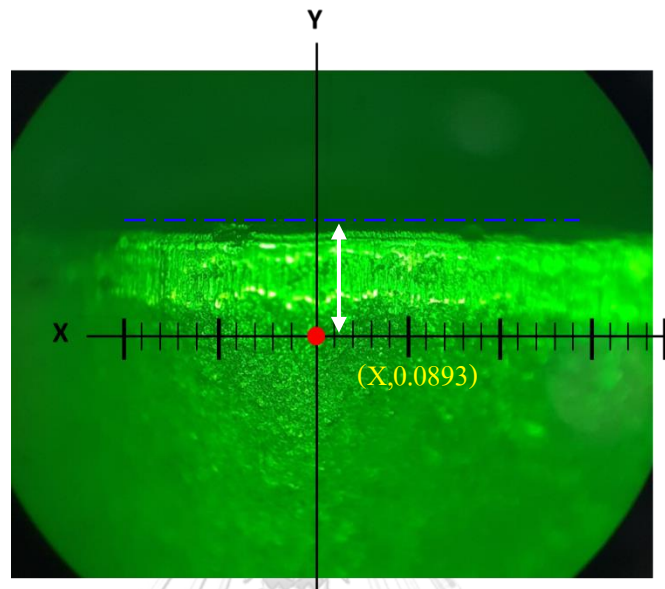
2) เลื่อนแท่นวางชิ้นงาน (Stage) ให้จุดอ้างอิง X,Y อยู่ตรงแนวแกน Y เดียวกับที่ร้อย สีกหอกกว้างที่สุด แสดงดังรูปที่ 3.13

3) กดปุ่ม Reset ตรงแกนเตอร์ (Counter) เฉพาะแกน Y เพื่อปรับค่า ให้กลายเป็น ศูนย์ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นการวัดขนาด

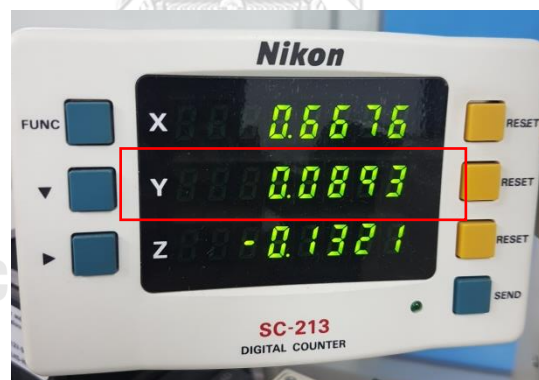


รูปที่ 3.13 การปรับค่าจุดอ้างอิง X,Y สำหรับเริ่มต้นการวัด

4) เลื่อนแท่นวางชิ้นงานเฉพาะแนวแกน Y จนกว่าจุดอ้างอิง X,Y จะถึงตำแหน่งรอยสึกกว้างสุด จากนั้นอ่านค่าตัวเลขเฉพาะแนวแกน Y ที่ปรากฏบนคอนโทรล แสดงดังรูปที่ 3.14 – 3.15



รูปที่ 3.14 การเลื่อนตำแหน่งจุดอ้างอิง X,Y ไปยังจุดกว้างสุดของรอยสึก



รูปที่ 3.15 ค่าแนวแกน Y คือขนาดการสึกหรอดังข้าง (Flank wear, V_b) เท่ากับ 0.0893 มม.

5) ทำการวัดขนาดซ้ำกัน 3 ครั้ง จากนั้นหาค่าเฉลี่ยเพื่อลดความแปรปรวนของการวัด
ลง

3.3.4.2 การเก็บข้อมูลสัญญาณแรงตัด

ข้อมูลแรงตัดพลวัต (Dynamic cutting force) ได้มาจากการบันทึกของเครื่องออสซิลโลสโคปในขณะตัด ซึ่งจะได้ข้อมูลทั้งหมด 10,000 ข้อมูล/วินาที เนื่องมาจากการตั้งค่า Record length = 10k ในทุกแนวแกน F_x , F_y และ F_z นอกจากนี้ค่าสัญญาณแรงที่ได้จากการวัดค่า

ของไดนามิเตอร์มีหน่วยทางไฟฟ้าหรือโวลต์ (Volt) จึงต้องแปลงค่าให้เป็นหน่วยแรงหรือนิวตัน (N) โดยนำค่าแรงทั้งหมดคูณด้วยค่าความไว (sensitivity) ของเครื่องขยายสัญญาณแรงตัดดังต่อไปนี้

- ขนาดแรงตัดพลวัตแนวแกน d Fx หน่วยนิวตัน (N) = Vx (Volt) X 600 (N/Volt)
- ขนาดแรงตัดพลวัตแนวแกน dFy หน่วยนิวตัน (N) = Vy (Volt) X 600 (N/Volt)
- ขนาดแรงตัดพลวัตแนวแกน dFz หน่วยนิวตัน (N) = Vz (Volt) X 1200 (N/Volt)

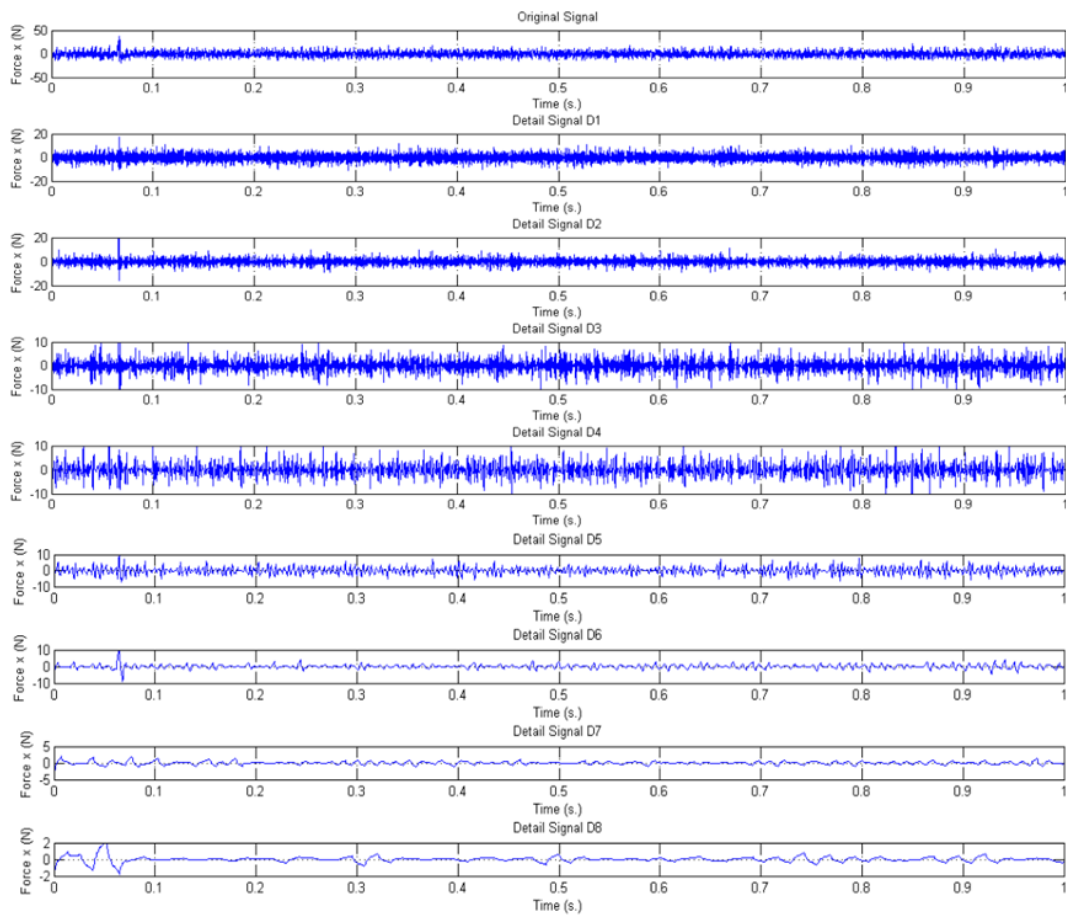
เมื่อแปลงข้อมูลแรงตัดพลวัตเป็นหน่วยแรงแล้ว หลังจากนั้นจะข้อมูลไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Matlab โดยการใช้การแปลงเวฟเล็ทซึ่งจะอธิบายในหัวข้อต่อไป

3.4 การวิเคราะห์แรงตัดพลวัตโดยใช้การแปลงเวฟเล็ท

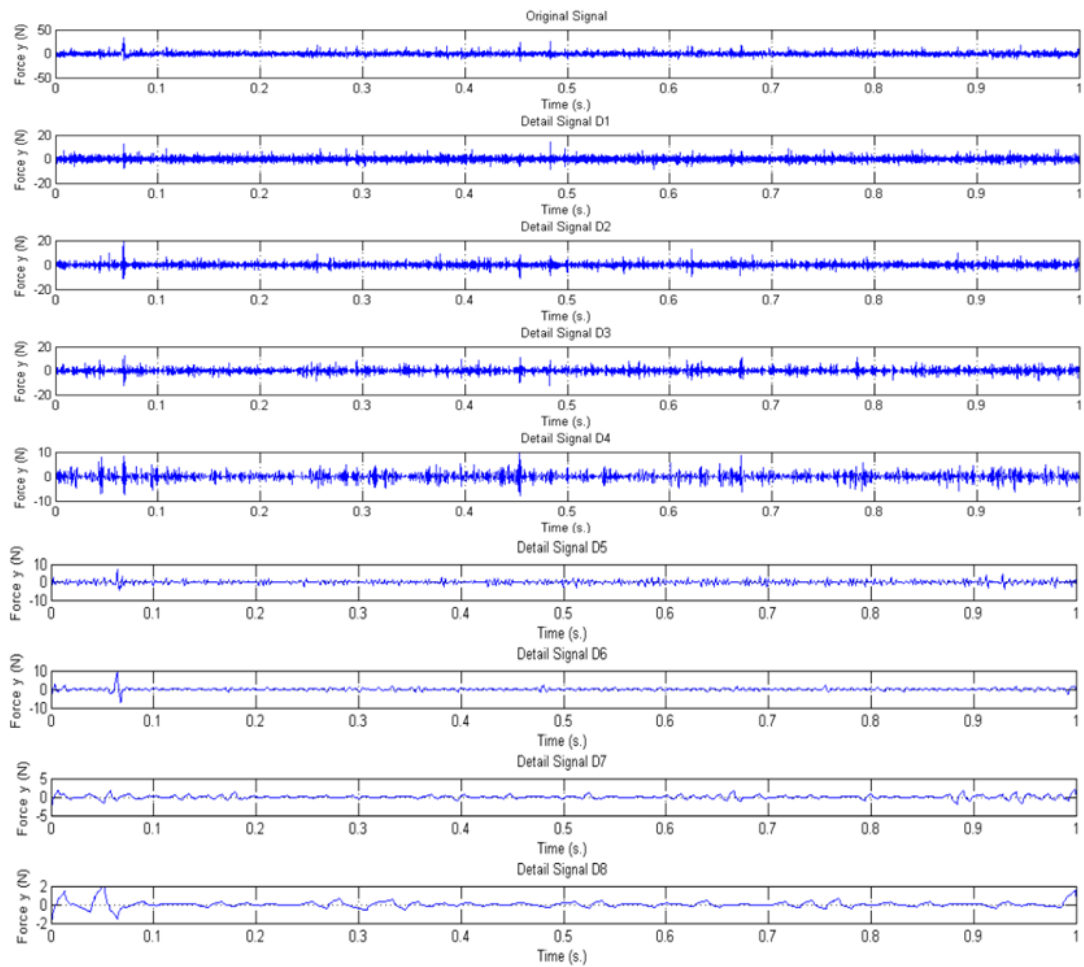
3.4.1 การคัดแยกสัญญาณแรงตัดพลวัต

จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมา [13, 16, 18, 26] พบว่าการแปลงเวฟเล็ทสามารถช่วยในการคัดกรองสัญญาณรบกวน (Noise) ออกจากสัญญาณแรงตัดที่แท้จริงได้เป็นอย่างดี งานวิจัยนี้จึงเลือกวิธีการแปลงเวฟเล็ทเพื่อเลือกสัญญาณแรงตัดพลวัตอันเนื่องมาจากการสึกหรอของมีดตัด โดยดูจากความถี่ของสัญญาณในโดเมนความถี่แต่ละระดับชั้น อันที่จริงแล้วในการทดลองแต่ละเงื่อนไขการตัด ก่อให้เกิดสัญญาณแรงตัดขึ้นในหลายช่วงความถี่ที่เกิดจากลักษณะการแตกหักเศษโลหะในระหว่างการตัด นอกจากนี้ความยาวของเศษโลหะยังสอดคล้องกับสัญญาณความถี่ที่เกิดขึ้นด้วย จากการแปลงเวฟเล็ทจึงทำให้ทราบว่าความถี่ของสัญญาณแรงตัดอันเนื่องมาจากการสึกหรอของมีดตัดของงานวิจัยนี้ปรากฏในระดับชั้นที่ 8 แอมพลิจูดของแรงตัดหลักพลวัตและแรงป้อนตัดพลวัต จะมีขนาดเล็กและความหนาแน่นของพาวเวอร์สเปกตรัมจะมีขนาดใหญ่ในช่วงความถี่ต่ำกว่า 50 Hz ทั้งนี้ระดับชั้นของสัญญาณการสึกหรอไม่จำเป็นต้องเกิดขึ้นในระดับชั้นที่ 8 เสมอไปขึ้นอยู่กับปัจจัยทางด้านเงื่อนไขการตัดและวัสดุของชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองด้วย

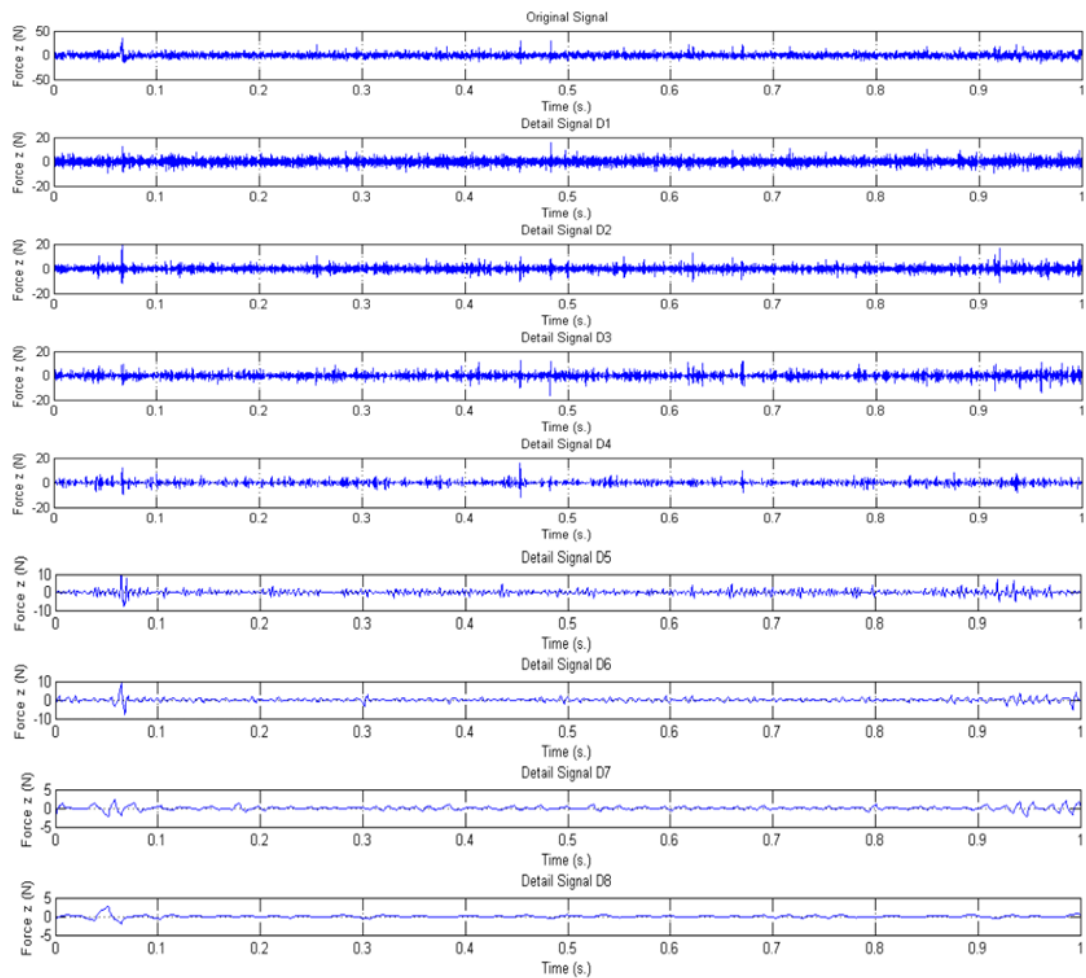
โดยปกติแล้วการแปลงเวฟเล็ทเป็นการแปลงสัญญาณแรงตัดของทั้ง 3 แนวแกน จากโดเมนเวลาเป็นโดเมนความถี่ออกเป็นระดับชั้น ระดับชั้นที่ต่ำจะปรากฏสัญญาณแรงตัดที่มีความถี่สูง ในทางกลับกันระดับชั้นที่สูงขึ้นสัญญาณความถี่ที่ปรากฏจะต่ำลงดังรูปที่ 3.16-3.21 วิธีการแยกสัญญาณแรงตัดพลวัตจะพิจารณาสัญญาณแรงตัดในโดเมนความถี่เพื่อทำการคัดเลือกระดับชั้นที่ปรากฏสัญญาณการสึกหรอเท่านั้น ในการทดลองจริงสัญญาณแรงตัดที่เกิดขึ้นมีความหลากหลายขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการตัดที่ใช้ ลักษณะการแตกหักของเศษโลหะรวมไปถึงการเกิดแชนเตอร์ระหว่างการผลิต



รูปที่ 3.16 ตัวอย่างสัญญาณแรงรบกวน (dFx) ในโดเมนเวลาตั้งแต่ระดับต้นกำเนิดถึงระดับที่ 8 ด้วยความเร็วตัด 200 เมตร/นาที่ อัตราการป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 1.2 มิลลิเมตร และรัศมีจุมุมิต 1.2 มิลลิเมตร ขนาดการสึกหรอ 0.1331 มิลลิเมตร

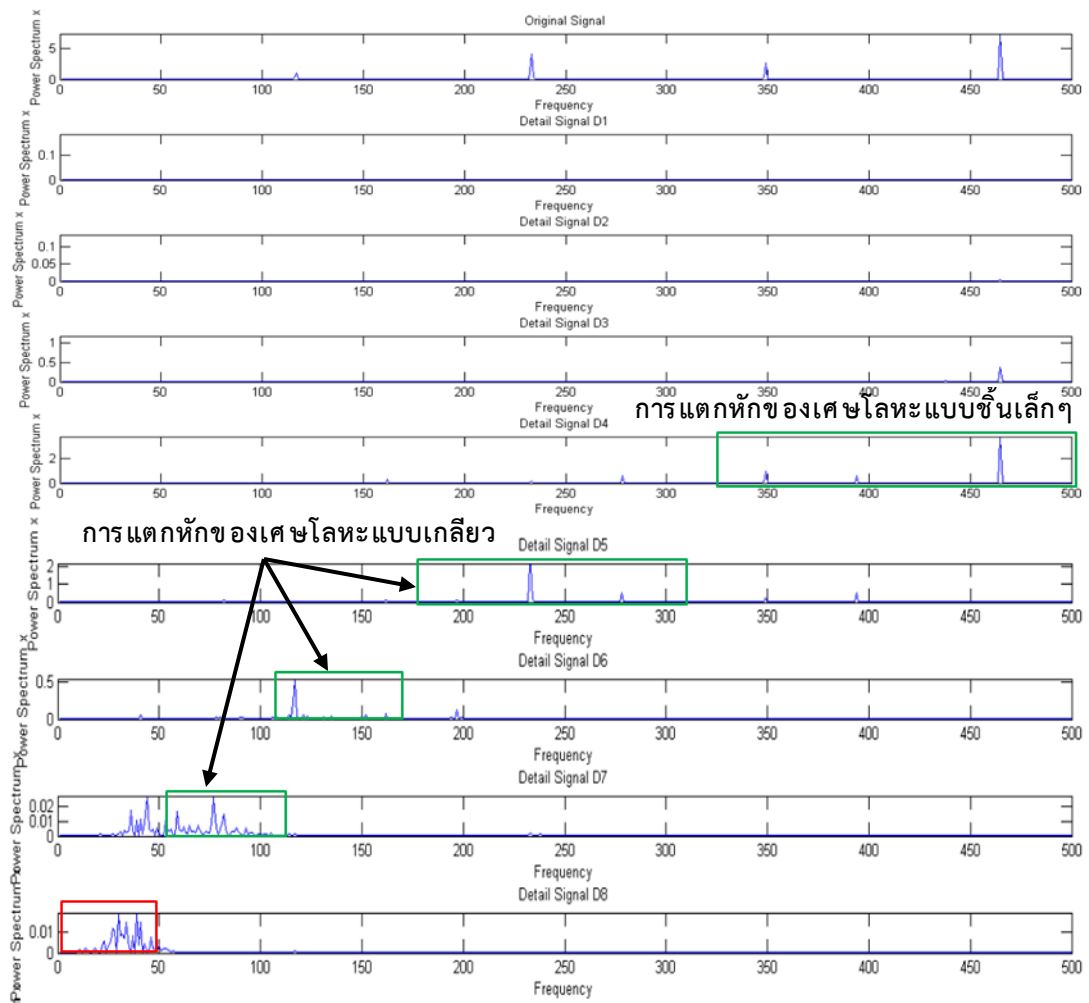


รูปที่ 3.17 ตัวอย่างสัญญาณแรงป้อนตัดพลวัต (dFy) ในโดเมนเวลาตั้งแต่ระดับต้นกำเนิดถึงระดับที่ 8 ด้วยความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 1.2 มิลลิเมตร และรัศมีจุ่มมีด 1.2 มิลลิเมตร ขนาดการสึกหรอ 0.1331 มิลลิเมตร

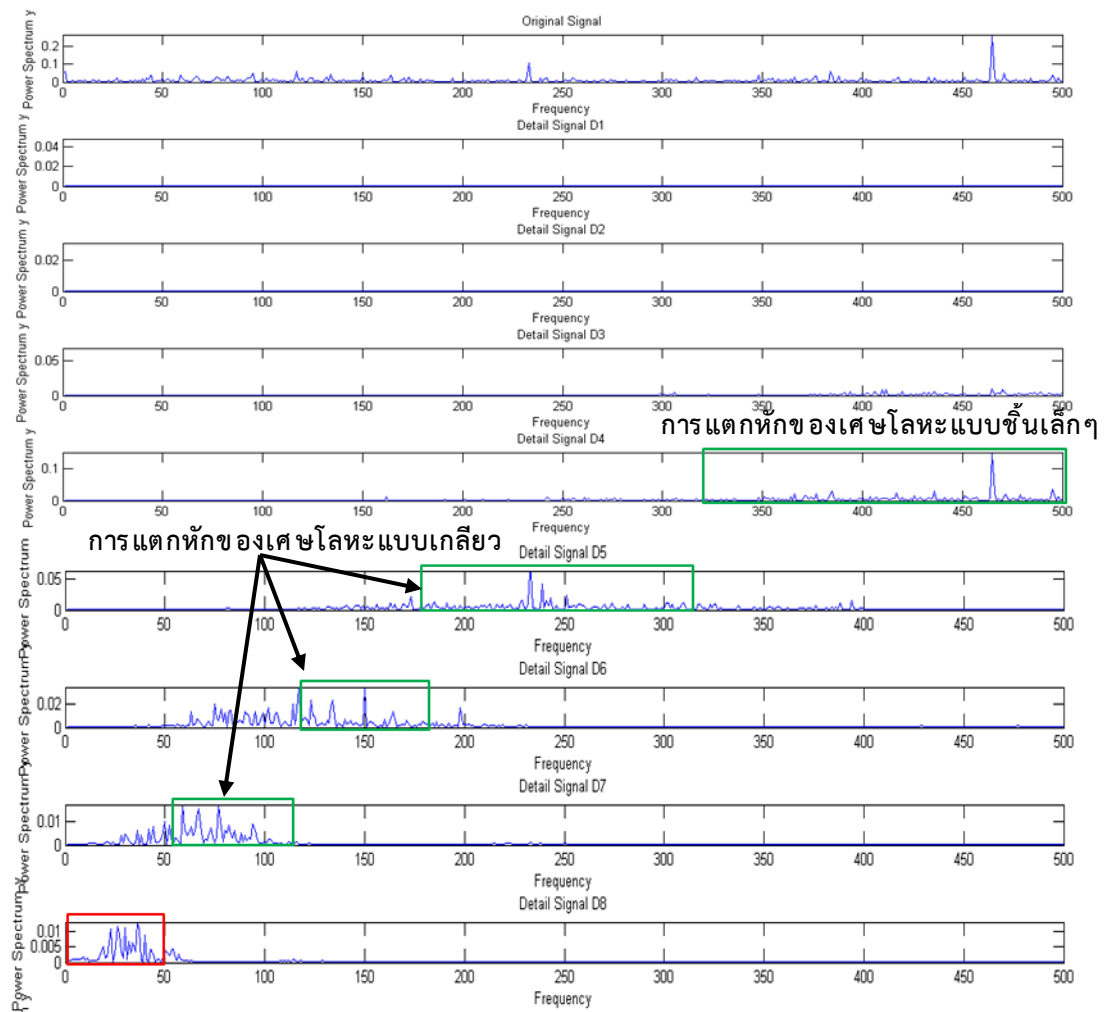


รูปที่ 3.18 ตัวอย่างสัญญาณแรงตัดหลักพลวัต (dFz) ในโดเมนเวลาตั้งแต่ระดับต้นกำเนิดถึงระดับที่ 8 ด้วยความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 1.2 มิลลิเมตร และรัศมีจุ่มกมิต 1.2 มิลลิเมตร ขนาดการสึกหรอ 0.1331 มิลลิเมตร

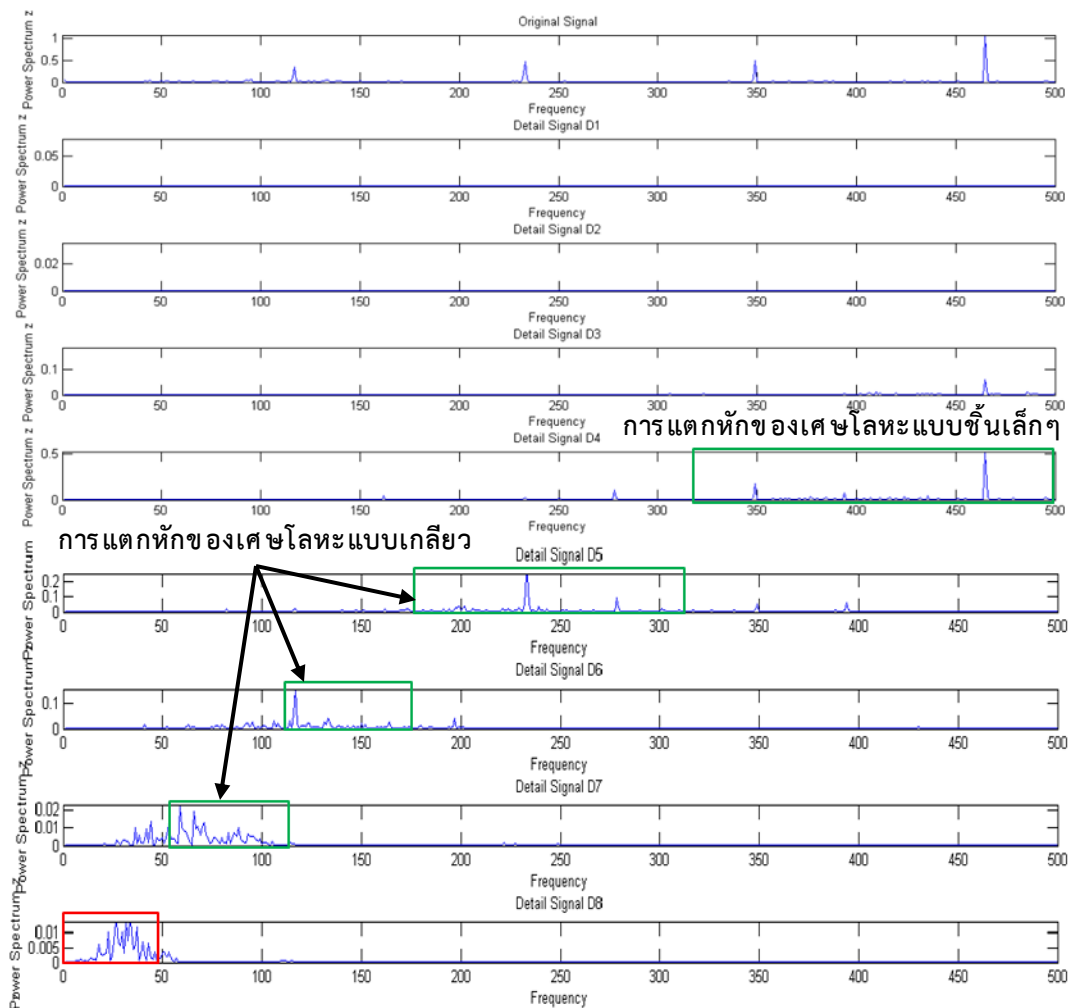
จากรูปที่ 3.16-3.18 ตัวอย่างของสัญญาณแรงตัดพลวัต 3 แนวแกนในโดเมนเวลาตั้งแต่ระดับต้นกำเนิดถึงระดับชั้นที่ 8 จะเห็นได้ว่า ในโดเมนเวลาสามารถดูขนาดแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นได้จากแอมพลิจูดในแต่ละระดับชั้นภายใน 1 วินาที แต่ไม่สามารถแสดงความแตกต่างของสัญญาณแต่ละช่วงความถี่ได้ ดังนั้นจึงต้องพิจารณาที่โดเมนความถี่แสดงดังรูปที่ 3.19-3.21



รูปที่ 3.19 ตัวอย่างสัญญาณแรงรัศมีพลวัต (dFx) ในโดเมนความถี่ตั้งแต่ระดับต้นกำเนิดถึงระดับที่ 8 ด้วยความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 1.2 มิลลิเมตร และรัศมีมุมมีด 1.2 มิลลิเมตร ขนาดการสึกหรอ 0.1331 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.20 ตัวอย่างสัญญาณแรงป้อนตัดพลวัต (dFy) ในโดเมนความถี่ตั้งแต่ระดับต้นกำเนิดถึงระดับที่ 8 ด้วยความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 1.2 มิลลิเมตร และรัศมีมุมมีด 1.2 มิลลิเมตร ขนาดการสึกหรอ 0.1331 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.21 ตัวอย่างสัญญาณแรงตัดหลักพลวัต (dFz) ในโดเมนความถี่ตั้งแต่ระดับต้นกำเนิดถึงระดับที่ 8 ด้วยความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 1.2 มิลลิเมตร และรัศมีจุ่มกมิต 1.2 มิลลิเมตร ขนาดการสึกหรอ 0.1331 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 3.19-3.21 แสดงให้เห็นถึงสัญญาณแรงตัดพลวัตทั้ง 3 แนวแกนในโดเมนความถี่ แต่แต่ละระดับชั้นจะปรากฏแอมพลิจูดและความหนาแน่นของค่าพาวเวอร์สเปกตรัมที่ต่างกัน ระดับชั้นที่ต่ำขนาดแอมพลิจูดของแรงตัดพลวัตจะมีขนาดสูงและค่าความหนาแน่นของพาวเวอร์สเปกตรัมจะมีขนาดใหญ่ในช่วงความถี่สูง ในทางกลับกันระดับชั้นที่สูงขึ้น ขนาดแอมพลิจูดของแรงตัดพลวัตจะมีขนาดเล็กและความหนาแน่นของพาวเวอร์สเปกตรัมจะมีขนาดใหญ่ในช่วงความถี่ที่ต่ำลง อย่างไรก็ตามแรงป้อนตัดพลวัตจะมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการแตกหักของเศษโลหะมากที่สุดจากทั้ง 3 แนวแกน เนื่องจากการแตกหักของเศษโลหะแบบขั้นเล็กๆมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงป้อน

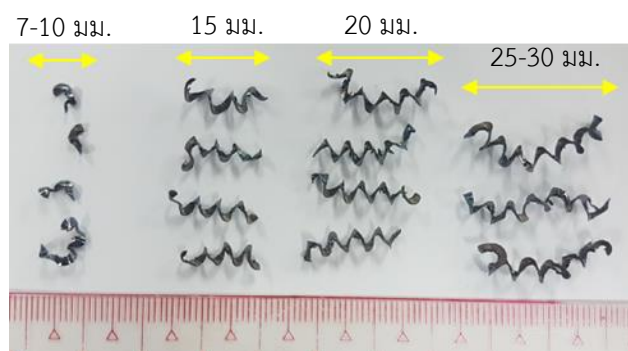
ตัดพลวัตมากที่สุด [15, 36] ดังนั้น ในการคัดแยกสัญญาณแรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่จะพิจารณาจากแรงป้อนตัดพลวัตเป็นหลัก

เมื่อพิจารณารูปที่ 3.20 ตัวอย่างสัญญาณแรงป้อนตัดพลวัตในโดเมนความถี่ แสดงให้เห็นว่า ระดับชั้นที่ต่ำจะแสดงสัญญาณความถี่สูง ระดับชั้นที่สูงจะแสดงสัญญาณความถี่ต่ำ สัญญาณการแตกหักของเศษโลหะแบบชิ้นเล็กๆปรากฏอยู่ในระดับชั้นที่ 4 (D4) มีค่าความถี่ตั้งแต่ 330 Hz ขึ้นไป ส่วนสัญญาณการแตกหักของเศษโลหะแบบเกลียวปรากฏอยู่ในระดับชั้นที่ 5 ถึง 7 (D5-D7) ที่ค่าความถี่ตั้งแต่ 60 – 300 Hz ดังนั้น ระดับชั้นที่ 8 (D8) จึงสัญญาณแรงป้อนตัดพลวัตอันเนื่องมาจากสีกหรือที่ค่าความถี่ต่ำกว่า 50 Hz ที่เกิดขึ้นระหว่างการตัด

นอกจากนี้ตัวอย่างเศษโลหะแสดงดังรูปที่ 3.22 ที่เกิดขึ้นจริงในการตัดซึ่งมีลักษณะการแตกหักของเศษโลหะแบบผสมนั้นมีความสอดคล้องกับสัญญาณความถี่ที่ปรากฏ ความยาวของเศษโลหะแต่ละลักษณะสามารถนำมาคำนวณเป็นค่าความถี่ของการแตกหักได้ ตัวอย่างเช่น ความยาวของเศษโลหะที่แตกหักแบบชิ้นเล็กๆประมาณ 7-10 มิลลิเมตร สามารถคำนวณหาค่าความถี่ของการแตกหักได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{เมื่อ } \text{ความยาวของเศษโลหะ} &= 7 \text{ มิลลิเมตร} \\
 \text{ความเร็วตัด} &= 200 \text{ เมตร/นาที} \\
 \text{ความถี่ของการแตกหัก (Hz)} &= \frac{\text{ความเร็วตัด} \left(\frac{\text{เมตร}}{\text{นาที}} \right) \times 1000 \text{ (มิลลิเมตร)}}{\text{ความยาวของเศษโลหะ (มิลลิเมตร)} \times 60 \text{ วินาที}} \\
 &= \frac{200 \text{ (เมตร/นาที)} \times 1000 \text{ (มิลลิเมตร)}}{7 \text{ (มิลลิเมตร)} \times 60 \text{ วินาที}} \\
 &= 476 \text{ Hz}
 \end{aligned}$$

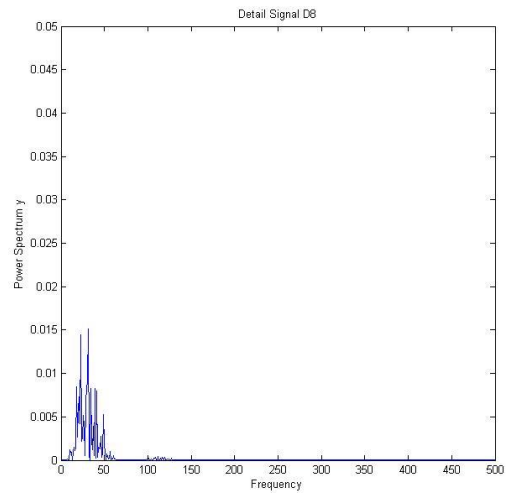
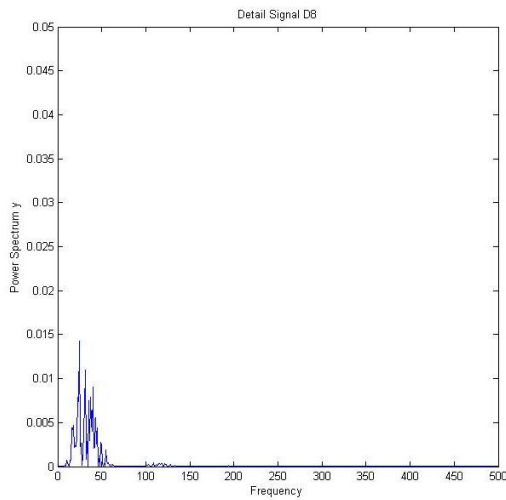
ดังนั้นความถี่การแตกหักของความยาวเศษโลหะ 7-10 มิลลิเมตร ประมาณ 333 Hz - 476 Hz ซึ่งสอดคล้องกับสัญญาณแรงตัดที่ปรากฏในระดับชั้นที่ 4 กล่าวคือ เมื่อความยาวของเศษโลหะที่มีขนาดสั้นจะทำให้ความถี่ในการแตกหักมีค่าสูง และค่าความถี่ของการแตกหักก็คือค่าความถี่ที่ปรากฏในสัญญาณแรงตัดในโดเมนความถี่แต่ละระดับชั้นนั่นเอง



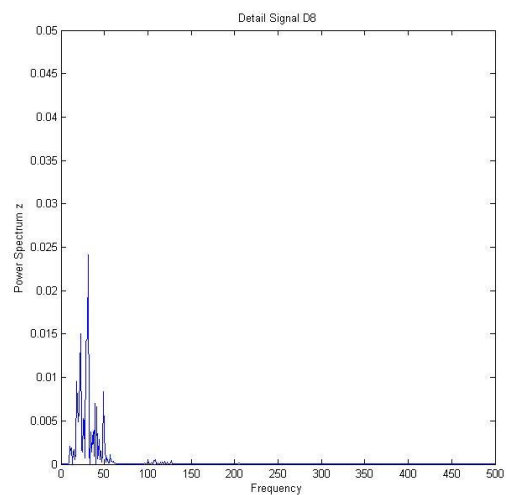
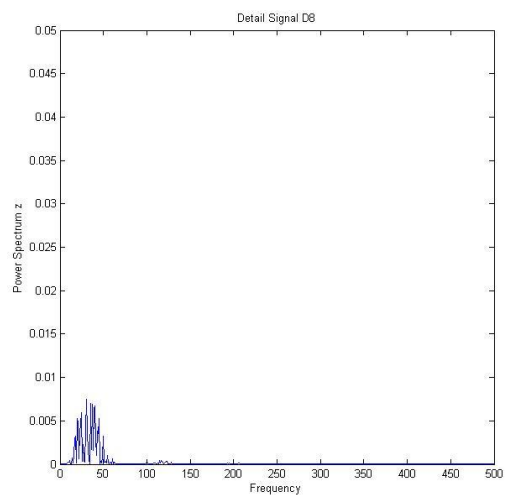
รูปที่ 3.22 ตัวอย่างเศษโลหะแบบผสมที่ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 1.2 มิลลิเมตร และรัศมีงูมมีด 1.2 มิลลิเมตร ขนาดการสึกหรอ 0.1331 มิลลิเมตร

3.4.2 การวิเคราะห์ความหนาแน่นพาวเวอร์สเปกตรัม (PSD) ในโดเมนความถี่

แรงตัดพลวัตที่ผ่านการแปลงเวฟเว็ทสามารถวิเคราะห์สัญญาณแรงตัดได้ทั้งโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ไปพร้อมๆกัน ด้วยเหตุนี้จึงทำให้สามารถแยกแยะสัญญาณในแต่ละย่านความถี่โดยอาศัยผลที่ได้จากเมนความถี่ จากการตรวจสอบลักษณะการแตกหัก ความยาว และความถี่การแตกหักของเศษโลหะที่เกิดขึ้นจริงเทียบกับความถี่สัญญาณแรงตัดในโดเมนความถี่พบว่า สัญญาณแรงตัดพลวัตของการสึกหรอปรากฏขึ้นในระดับขั้นที่ 8 นอกจากนี้การนำค่าความหนาแน่นพาวเวอร์สเปกตรัมที่ได้จากโดเมนความถี่ระดับขั้นที่ 8 มาวิเคราะห์จะทำให้เห็นถึงความสอดคล้องกันของค่าพาวเวอร์สเปกตรัม ขนาดการสึกหรอ และเงื่อนไขการตัดที่ใช้ ถูกอธิบายดังรูปที่ 3.23 – 3.27



(ก) แรงป้อนตัดพลวัต (dFy) ที่ขนาดการสึกหรอ $(V_b) = 0.0409$ มม. (ข) แรงป้อนตัดพลวัต (dFy) ที่ขนาดการสึกหรอ $(V_b) = 0.1969$ มม.

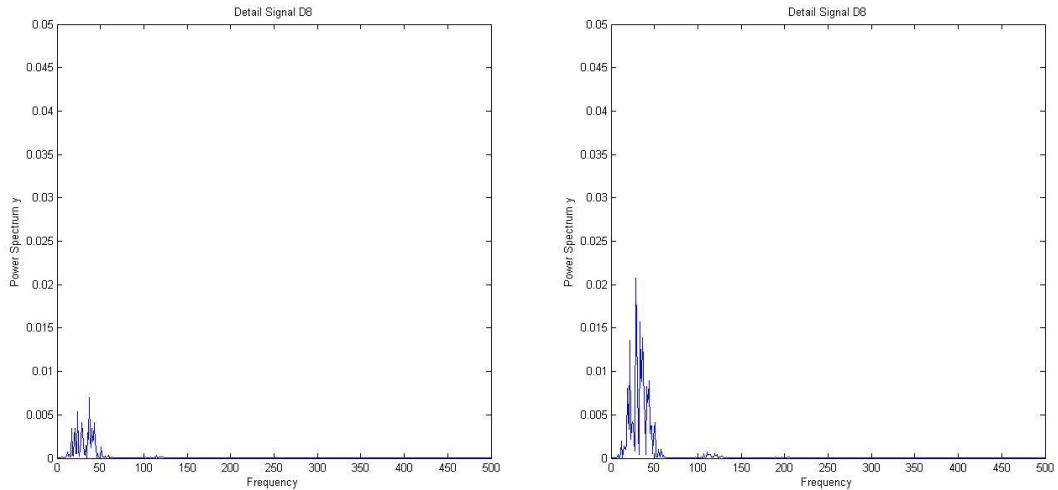


แรงแค) แรงตัดหลักพลวัต (dFz) ที่ขนาดการสึกหรอ $(V_b) = 0.0409$ มม. (ง) แรงตัดหลักพลวัต (dFz) ที่ขนาดการสึกหรอ $(V_b) = 0.1969$ มม.

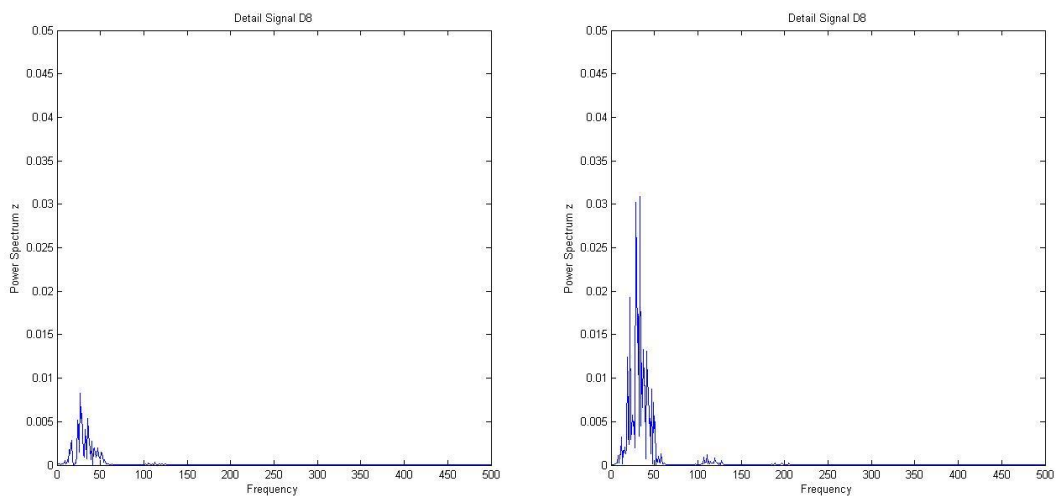
รูปที่ 3.23 ตัวอย่างการเปรียบเทียบความหนาแน่นพาวเวอร์สเปกตรัม (PSD) ระดับชั้นที่ 8 ภายใต้ความเร็วตัด 250 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 1.4 มิลลิเมตร และรัศมีจุ่มมีด 0.8 มิลลิเมตร ที่ขนาดการสึกหรอต่างกัน

จากรูปที่ 3.23 เป็นการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นพาวเวอร์สเปกตรัม (PSD) ในโดเมนความถี่ของแรงป้อนตัดพลวัต (dFy) และแรงตัดหลักพลวัต (dFz) ที่ขนาดการสึกหรอต่างกัน พบว่าเมื่อขนาดการสึกหรอมีขนาดเพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นของพาวเวอร์สเปกตรัมจะเพิ่มขึ้นในช่วงความถี่

ที่ต่ำกว่า 50 Hz จึงทำให้มั่นใจได้ว่า สัญญาณแรงตัดพลวัตอันเนื่องจากการสีกหรือของมิตตัดคือ สัญญาณที่ปรากฏในระดับชั้นที่ 8 อีกทั้งการสีกหรือมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงตัดพลวัตด้วย



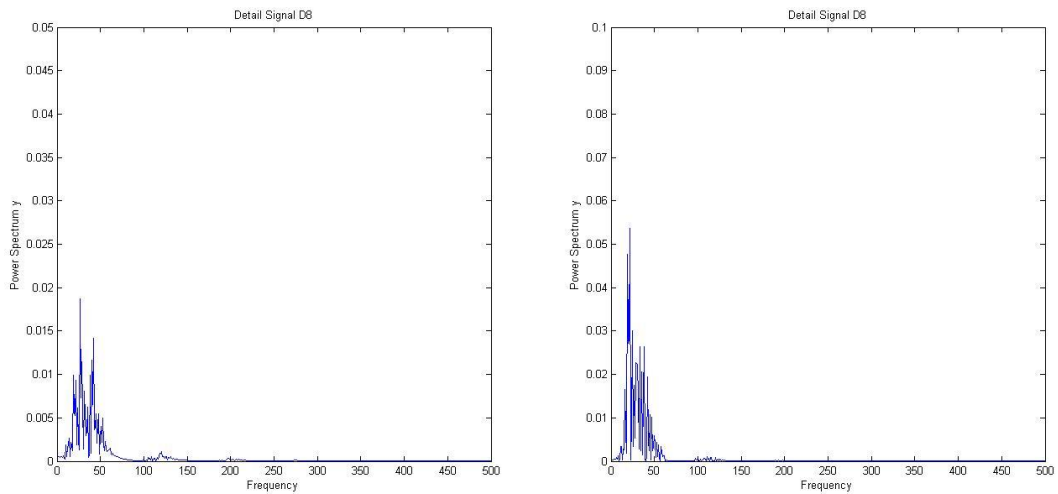
(ก) แรงป้อนตัดพลวัต (dFy) ที่ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที (ข) แรงป้อนตัดพลวัต (dFy) ที่ความเร็วตัด 250 เมตร/นาที



(ค) แรงตัดหลักพลวัต (dFz) ที่ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที (ง) แรงตัดหลักพลวัต (dFz) ที่ความเร็วตัด 250 เมตร/นาที

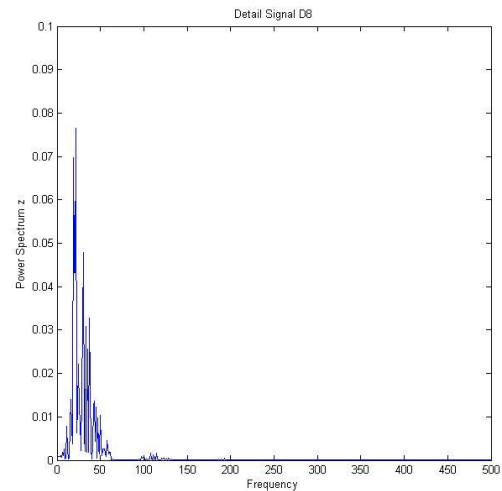
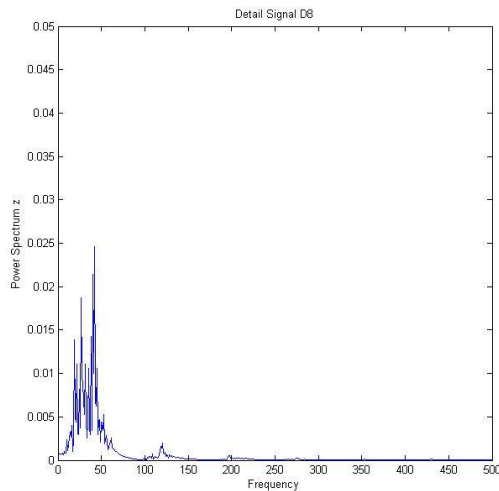
รูปที่ 3.24 ตัวอย่างการเปรียบเทียบความหนาแน่นพาวเวอร์สเปกตรัม (PSD) ระดับชั้นที่ 8 ภายใต้ อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 1.2 มิลลิเมตร และรัศมีงูมกมิต 0.4 มิลลิเมตร ขนาดการสีกหรือ (V_b) 0.17 มิลลิเมตร ที่ความเร็วตัดต่างกัน

เมื่อพิจารณารูปที่ 3.24 (ก) เทียบกับรูปที่ 3.23 (ข) ค่าความหนาแน่นพาวเวอร์สเปกตรัม (PSD) ของแรงป้อนตัดพลวัตเปลี่ยนแปลงตามความเร็วตัด เมื่อเพิ่มความเร็วตัดให้สูงขึ้นค่าความหนาแน่นพาวเวอร์สเปกตรัมจะมีขนาดใหญ่ขึ้นที่ความถี่ไม่เกิน 50 Hz ในกรณีของค่าความหนาแน่นพาวเวอร์สเปกตรัมของแรงตัดหลักพลวัตแสดงดังรูปที่ 3.24 (ค) และ (ง) มีลักษณะไม่ต่างกัน หมายความว่า ความเร็วตัดมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงตัดพลวัตทั้ง 2 แนวแกน ซึ่งสาเหตุนั้นจะอธิบายต่อไปในบทที่ 4



(ก) แรงป้อนตัดพลวัต (dFy) ที่อัตราการป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตร/รอบ (ข) แรงป้อนตัดพลวัต (dFy) ที่อัตราการป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตร/รอบ

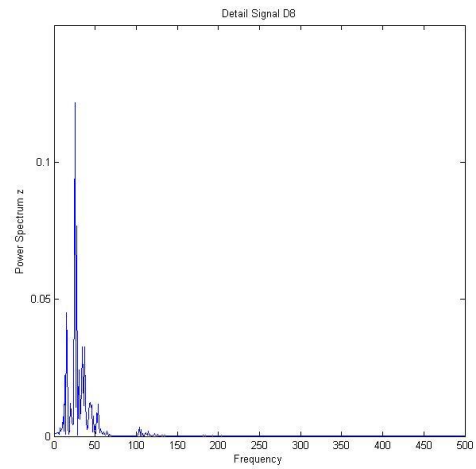
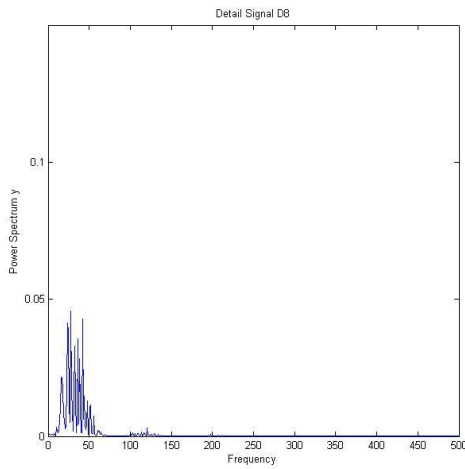
รูปที่ 3.25 ตัวอย่างการเปรียบเทียบความหนาแน่นพาวเวอร์สเปกตรัมระดับขั้นที่ 8 ภายใต้ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที ความลึกตัด 1.2 มิลลิเมตร และรัศมีงูมกมิต 1.2 มิลลิเมตร ขนาดการสึกหรอ (V_b) 0.16 มิลลิเมตร ที่อัตราการป้อนตัดต่างกัน



(ค) แรงตัดหลักพลวัต (dFz) ที่อัตราการป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตร/รอบ (ง) แรงตัดหลักพลวัต (dFz) ที่อัตราการป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตร/รอบ

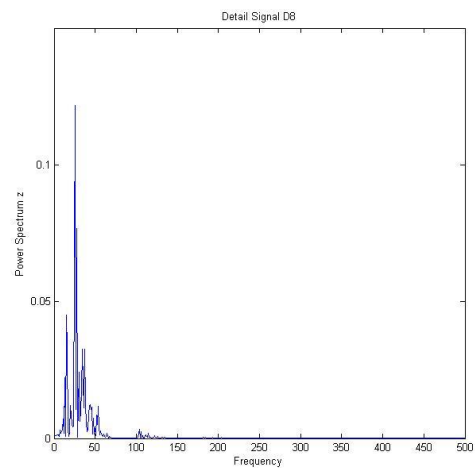
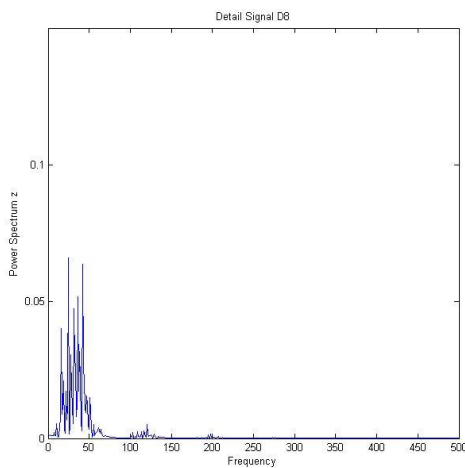
รูปที่ 3.25 ตัวอย่างการเปรียบเทียบความหนาแน่นพาวเวอร์สเปกตรัมระดับชั้นที่ 8 ภายใต้ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที ความลึกตัด 1.2 มิลลิเมตร และรัศมีจุมุมกัด 1.2 มิลลิเมตร ขนาดการสึกหรอ (V_b) 0.16 มิลลิเมตร ที่อัตราการป้อนตัดต่างกัน (ต่อ)

จากรูปที่ 3.25 พบว่าค่าพาวเวอร์สเปกตรัมของแรงตัดพลวัตทั้ง 2 แนวแกนมีการเปลี่ยนแปลงตามอัตราการป้อนตัด เมื่อใช้อัตราการป้อนตัดที่เร็วขึ้นจะทำให้ค่าความหนาแน่นพาวเวอร์สเปกตรัมมีขนาดใหญ่ขึ้นในช่วงความถี่ 0 – 50 Hz แสดงให้เห็นว่าอัตราการป้อนตัดมีผลต่อแรงตัดพลวัตเช่นเดียวกับความเร็วตัด



(ก) แรงป้อนตัดพลวัต (dFy) ที่ความลึกตัด 1 มิลลิเมตร

(ข) แรงป้อนตัดพลวัต (dFy) ที่ความลึกตัด 1.4 มิลลิเมตร



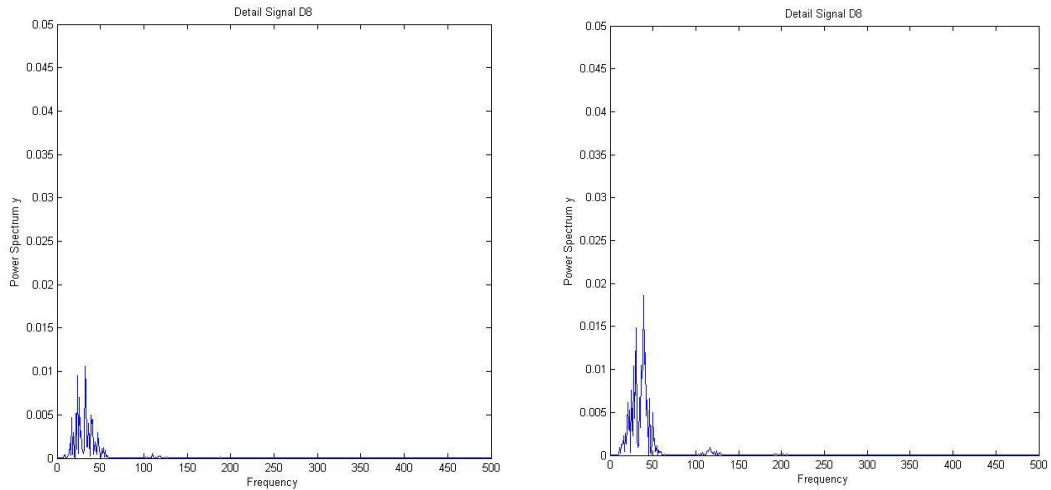
(ค) แรงตัดหลักพลวัต (dFz) ที่ความลึกตัด 1 มิลลิเมตร

(ง) แรงตัดหลักพลวัต (dFz) ที่ความลึกตัด 1.4 มิลลิเมตร

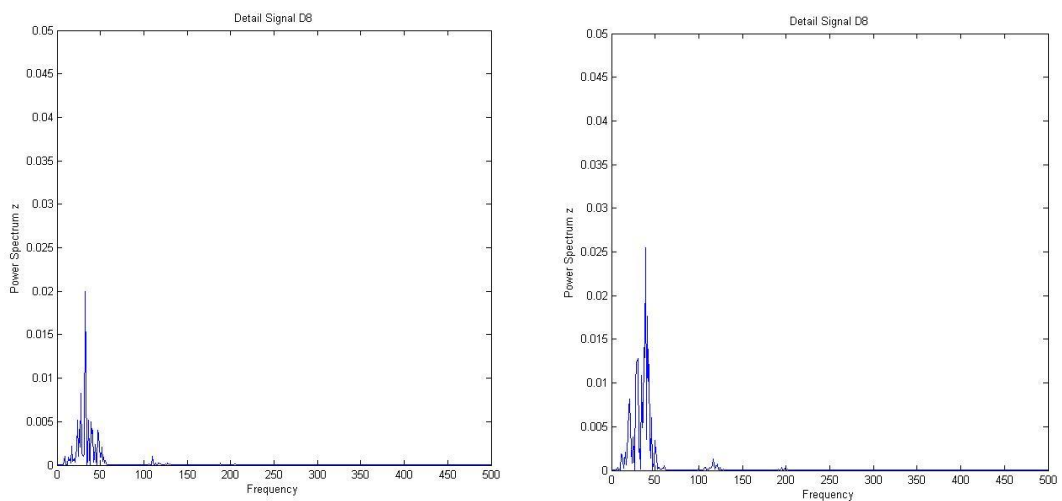
รูปที่ 3.26 ตัวอย่างการเปรียบเทียบความหนาแน่นพาวเวอร์สเปกตรัมระดับชั้นที่ 8 ภายใต้ความเร็วตัด 250 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ รัศมีจุมุมมีด 1.2 มิลลิเมตร และขนาดการสึกหรอ (V_b) 0.14 มิลลิเมตร ที่ความลึกตัดต่างกัน

ในส่วนของความลึกตัดนั้นก็ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพาวเวอร์สเปกตรัมเช่นกัน กล่าวคือ การใช้ความลึกตัดที่มากจะทำให้ค่าความหนาแน่นของแรงป้อนตัดพลวัต (dFy) มีขนาดใหญ่ขึ้นในช่วงความถี่ต่ำกว่า 50 Hz สังเกตได้จากรูปที่ 3.26 (ก) และ (ข) รวมไปถึงค่าความ

หนาแน่นพาวเวอร์สเปกตรัมของแรงตัดหลักพลวัตก็จะมีขนาดใหญ่ตามความลึกตัดที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน แสดงดังรูปที่ 3.26 (ค) และ (ง)



(ก) แรงป้อนตัดพลวัต (dFy) ที่รัศมีจุมูกมีด 0.4 มิลลิเมตร (ข) แรงป้อนตัดพลวัต (dFy) ที่รัศมีจุมูกมีด 1.2 มิลลิเมตร

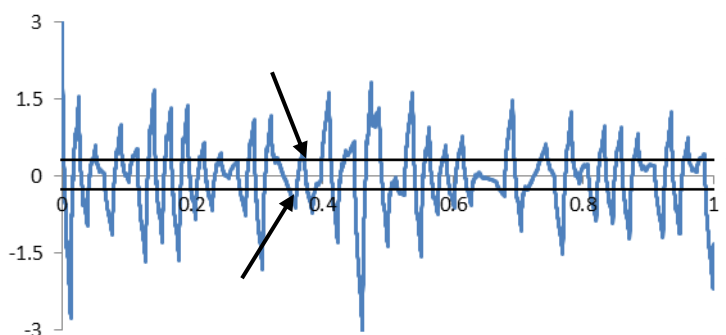


(ค) แรงตัดหลักพลวัต (dFz) ที่รัศมีจุมูกมีด 0.4 มิลลิเมตร (ง) แรงตัดหลักพลวัต (dFz) ที่รัศมีจุมูกมีด 1.2 มิลลิเมตร

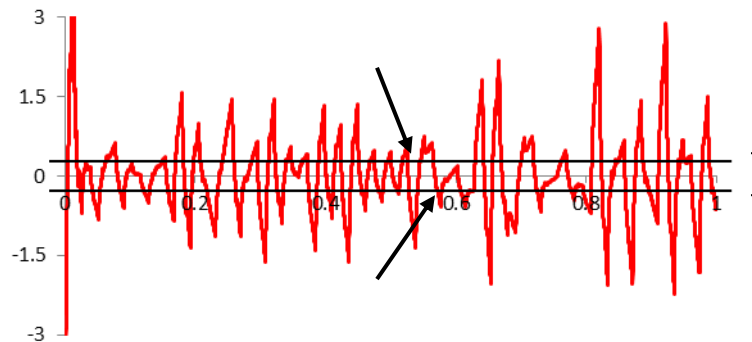
รูปที่ 3.27 ตัวอย่างการเปรียบเทียบความหนาแน่นพาวเวอร์สเปกตรัมระดับชั้นที่ 8 ภายใต้ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 1.2 มิลลิเมตร และขนาดการสึกหรอ (Vb) 0.14 มิลลิเมตร ที่รัศมีจุมูกมีดต่าง

จากรูปที่ 3.27 แสดงให้เห็นว่าการทดลองด้วยรัศมีจุกมิดที่แตกต่างกันทำให้ค่าความหนาแน่นพาวเวอร์สเปกตรัมเปลี่ยนแปลงไป รูปที่ 3.27 (ก)และ(ค) การทดลองโดยใช้รัศมีจุกมิด 0.4 มิลลิเมตร ค่าความหนาแน่นพาวเวอร์สเปกตรัมของแรงตัดป้อนตัดพลวัตและแรงตัดหลักพลวัตมีขนาดเล็กกว่า รูปที่ 3.27 (ข)และ(ง) การทดลองโดยใช้รัศมีจุกมิด 1.4 มิลลิเมตร ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า

สรุปคือ สัญญาณจากการสีกหรือของเม็ดมีดปรากฏในระดับชั้นที่ 8 (D8) ของโดเมนความถี่ ค่าความถี่อยู่ในช่วงไม่เกิน 50 Hz และเงื่อนไขการตัดมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงตัดพลวัต จากนั้นจะทำการการเลือกค่าแรงตัดพลวัตในโดเมนเวลาของระดับชั้นที่ 8 ไปทำการหาอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) [37] โดยจะพิจารณาแรงตัดพลวัตเฉพาะแรงป้อนตัดพลวัต (F_y) ในทิศทางการป้อนตัด และแรงตัดหลักพลวัต (F_z) ในทิศทางการหมุนของชิ้นงาน ซึ่งแรงตัดพลวัตทั้งสองจะถูกนำไปคำนวณหาค่าเฉลี่ยความแปรปรวนหรือค่าสมบูรณ์เฉลี่ยเสียก่อน เนื่องจากค่าแรงตัดพลวัตที่ได้มีทั้งค่าในทางบวก ($+aF_y, +aF_z$) และค่าในทางลบ ($-aF_y, -aF_z$) จากนั้นนำค่าเฉลี่ยความแปรปรวนของแรงป้อนตัดพลวัต (dF_y) หารด้วยค่าเฉลี่ยความแปรปรวนของแรงตัดหลักพลวัต (dF_z) แสดงดังรูปที่ 3.28 และรูปที่ 3.29



รูปที่ 3.28 ตัวอย่างการค่าเฉลี่ยความแปรปรวนของแรงป้อนตัดพลวัต (dF_y) ที่ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที่ อัตราการป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 1.2 มิลลิเมตร และรัศมีจุกมิด 1.2 มิลลิเมตร ขนาดการสีกหรือ 0.1331 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.29 ตัวอย่างการหาค่าเฉลี่ยความแปรปรวนของแรงตัดหลัก (dFz) ที่ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที่ อัตราการป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 1.2 มิลลิเมตร และรัศมีจุกมีด 1.2 มิลลิเมตร ขนาดการสึกหรอ 0.1331 มิลลิเมตร

3.5 การพัฒนาสมการทำนายการสึกหรอของเม็ดมีด

จากงานวิจัยที่ผ่านมา [9, 16, 29, 37, 38] พบว่าได้มีการนำฟังก์ชันเอ็กซ์โปเนนเชียลมาใช้ในการพัฒนาสมการพยากรณ์เพื่อทำนายขนาดการสึกหรอของเม็ดมีด ความขรุขระ ความตรงและความกลมของชิ้นงานซึ่งสามารถให้ความแม่นยำได้เป็นอย่างดี และถ้าพิจารณาถึงการทำนายการสึกหรอของเม็ดมีด การใช้ฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลนั้นสอดคล้องกับสมการการสึกหรอของเทย์เลอร์ [19] แสดงให้เห็นว่าอัตราการสึกหรอด้านข้าง (Flank wear) ไม่คงที่ตลอดทั้งช่วง อีกทั้งยังได้รับอิทธิพลจากเงื่อนไขการตัด ด้วยเหตุนี้จึงมีงานวิจัยก่อนหน้า [37] พัฒนาสมการทำนายการสึกหรอของเม็ดมีดในรูปแบบเอกซ์โพเนนเชียลโดยใช้ 4 ตัวแปร ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด และอัตราส่วนแรงตัดพลวัต แต่ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของปัจจัยในการทดลอง และแรงตัดพลวัตนั้นได้มาจากการวิเคราะห์ฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงพัฒนาสมการพยากรณ์ขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดจากอิทธิพลของเงื่อนไขการตัดและอัตราส่วนแรงตัดพลวัตที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยการแปลงเวฟเล็ต ในรูปแบบฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลดังนี้

$$V_b = C_1 \cdot V^{C_2} \cdot f^{C_3} \cdot d^{C_4} \cdot Rn^{C_5} \cdot \left(\frac{dFy}{dFz}\right)^{C_6} \quad (3.1-1)$$

โดยที่	V_b	= ขนาดการสึกหรอของเม็ดมีด (มิลลิเมตร)
	V	= ความเร็วตัด (เมตร/นาที่)
	f	= อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)
	d	= ความลึกตัด (มิลลิเมตร)

Rn = รัศมีจุมกมิต (มิลลิเมตร)

dFy = ค่าเฉลี่ยความแปรปรวนของแรงป้อนตัดพลวัต (นิวตัน)

dFz = ค่าเฉลี่ยความแปรปรวนของแรงตัดหลักพลวัต (นิวตัน)

$C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ = ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการ

จากสมการแบบไม่เชิงเส้น 3.1-1 ถูกแปลงและนำเสนอในรูปสมการถดถอยพหุคูณด้วยการแปลงลอการิทึม ดังนี้

$$\ln V_b = \ln C_1 \cdot \ln V^{C_2} \cdot \ln f^{C_3} \cdot \ln d^{C_4} \cdot \ln Rn^{C_5} \cdot \ln \left(\frac{dFy}{dFz} \right)^{C_6} \quad (3.1-2)$$

จากสมการถดถอยพหุคูณสามารถเขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้ดังนี้

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_5 x_5 \quad (3.1-3)$$

โดยที่

$$y = \ln V_b$$

$$x_1 = \ln V$$

$$x_2 = \ln f$$

$$x_3 = \ln d$$

$$x_4 = \ln Rn$$

$$x_5 = \ln \left(\frac{dFy}{dFz} \right)$$

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$ แทนค่า สัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการที่ได้จากการวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณ โดยการใช้การประมาณค่ากำลังสองน้อยสุด (Least mean square)

3.6 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

3.6.1 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์ข้อมูล [28]

ข้อมูลที่เกี่ยวข้องมาถูกออกแบบการทดลอง และวิเคราะห์โดยโปรแกรมทางสถิติชื่อ มินิแท็บ (Minitab) ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในงานวิจัยต่างๆ เพราะมีรูปแบบการใช้งานที่เข้าใจง่ายและสามารถตอบสนองต่อการวิเคราะห์ข้อมูลได้ดี

3.6.2 การวิเคราะห์ข้อมูลจากตารางการออกแบบการทดลอง [28]

จากตารางการออกแบบการทดลองทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ที่มีผลต่อปัจจัยตัวแปรตอบสนองในงานวิจัยนี้เลือกใช้โปรแกรมสถิติคำนวณค่า P-Value ซึ่งเป็นระดับนัยสำคัญ

ที่น้อยที่สุดที่จะปฏิเสธสมมติฐานหลักซึ่งกล่าวได้ว่า ปัจจัยตัวนั้นมีผลต่อตัวแปรตอบสนอง โดยทำการเปรียบเทียบค่า P-Value ของทุกปัจจัยกับระดับนัยสำคัญหรือ α ถ้าค่า P-Value ของปัจจัยตัวนั้นๆ มีค่าน้อยกว่า α แสดงว่าสมมติฐานหลักถูกปฏิเสธ ซึ่งหมายความว่าปัจจัยตัวนั้นมีผลต่อตัวแปรตอบสนอง โดยงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ระดับนัยสำคัญหรือ α เท่ากับ 0.05

3.6.3 การตรวจสอบความเพียงพอของเพื่อสร้างแบบจำลองสมการถาานายขนาดลึกหรือของเม็ตมีต (Model adequacy checking) [28]

ผลข้อมูลที่ถูกเก็บรวบรวมมาไว้ในของตารางการออกแบบผลการทดลอง จะต้องผ่านการทดสอบ ตามเงื่อนไขการออกแบบการทดลอง จึงจะสามารถสรุปผลการวิเคราะห์ได้อย่างสมบูรณ์ โดยจะต้องผ่านการทดสอบข้อกำหนดเกี่ยวกับส่วนตกค้างของข้อมูล (Residual) คือ การทดสอบแจกแจงแบบปกติ การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล และการทดสอบความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน

3.6.3.1 การทดสอบการกระจายตัวข้อมูลแบบแจกแจงปกติ

เป็นการตรวจสอบการแจกแจงของข้อมูลว่าเป็นการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) หรือไม่ โดยการใช้ค่าส่วนตกค้าง (Residual) ที่ถูกเรียงลำดับจากน้อยไปหามาก กับค่าความน่าจะเป็นสะสม นามาสร้างกราฟการแจกแจงแบบปกติ (Normality plot) ของค่าส่วนตกค้าง กับความน่าจะเป็นสะสม โดยที่ค่าความน่าจะเป็นสะสมอยู่บนแกนตั้ง ส่วนแกนนอนจะเป็นค่าส่วนตกค้าง แล้วพิจารณาการกระจายตัวของข้อมูล การกระจายตัวควรอยู่ตามเส้นตรง หรือแนวโน้มเป็นเส้นตรง ข้อมูลจึงมีการกระจายตัวแบบปกติ

3.6.3.2 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

เป็นการตรวจสอบข้อมูลว่ามีความเป็นอิสระต่อกันหรือไม่ เป็นการทดลองสุ่มที่เหมาะสม เพื่อหากราฟความสัมพันธ์ของค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้งและลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลอยู่บนแกนนอน แต่ละค่าส่วนตกค้างต้องเป็นอิสระต่อกัน เพื่อให้มั่นใจได้ว่า ข้อมูลมีความเป็นอิสระ และน่าเชื่อถือ หากข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกันแล้ว กราฟความสัมพันธ์จะมีการกระจายตัวไม่เกิดเป็นแนวโน้ม นั่นก็คือข้อมูลมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ต่อไป

3.6.3.3 การทดสอบความเสถียรภาพของความแปรปรวน

เป็นการทดสอบความเสถียรภาพของความแปรปรวนของข้อมูลที่เกิดขึ้นมา เพื่อให้มั่นใจได้ว่า ข้อมูลมีความน่าเชื่อถือ โดยสร้างกราฟการกระจายของส่วนตกค้าง (Residual) ในแกนตั้ง กับค่าที่ถูกฟิต (Fitted Value) ในแกนนอน การกระจายไม่ควรมีลักษณะเป็นแนวโน้ม หรือมีการกระจายตัวที่มีรูปแบบตรง หรือกรวยปากเปิด จึงจะถือว่ามีความเสถียรภาพของความแปรปรวน และข้อมูลจะมีการกระจายตัวแบบสม่ำเสมอและไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรอื่นๆ ถ้าลักษณะกราฟที่ได้มีลักษณะเพิ่มขึ้นหรือลดลง แสดงว่าข้อมูลที่เกิดขึ้นนั้นไม่มีความเสถียรภาพของความแปรปรวน



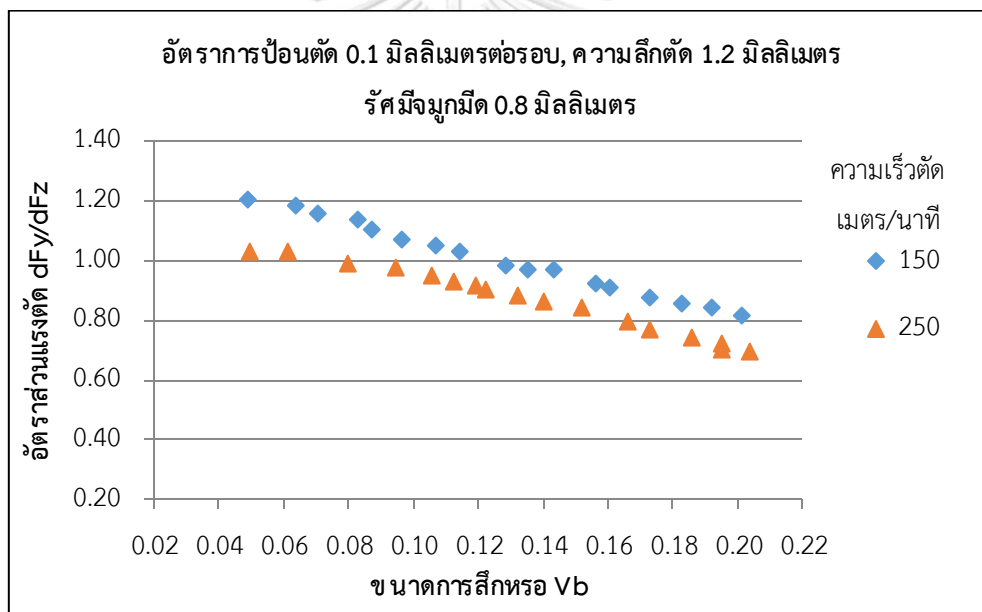
บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลอง

การวิเคราะห์เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงตัดพลวัตกับขนาดการสึกหรอของเม็ดมีด โดยใช้วิธีการเปรียบเทียบเงื่อนไขการตัดที่ระดับสูงสุดและระดับต่ำสุด เนื่องจาก งานวิจัยนี้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken) จึงทำให้คอมบินชันของการทดลองประกอบด้วยจุดกึ่งกลาง (Midpoint) ของแต่ละด้านและจุดศูนย์กลางของตัวแบบ

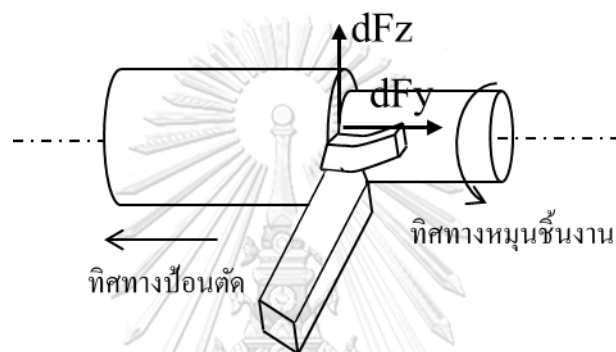
4.2 การ วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแรงตัดพลวัตกับขนาดการสึกหรอของ เม็ดมีด



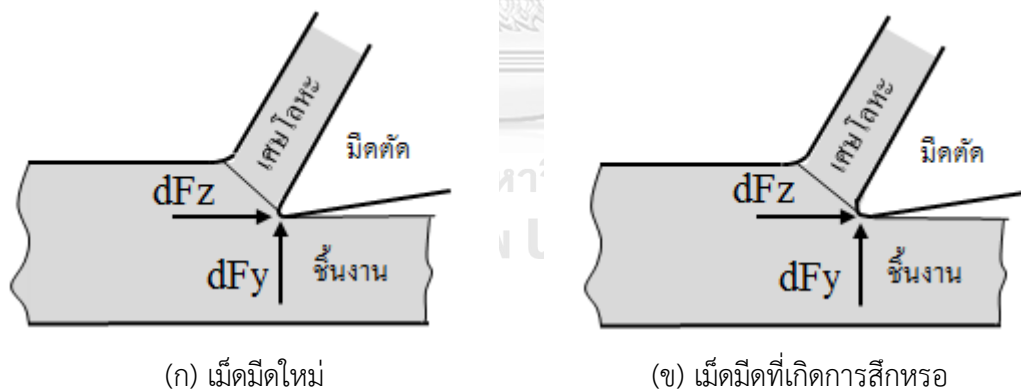
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้าง (V_b) กับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) ที่อัตราการป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 1.2 มิลลิเมตร และรัศมีจุมุมมีด 0.8 มิลลิเมตร ที่ความเร็วตัดต่างกัน

จากรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่า ที่ความเร็วตัด 250 เมตร/นาที และ 150 เมตร/นาที แนวโน้มของอัตราส่วนแรงตัดพลวัตไม่แตกต่างกัน กล่าวคือ อัตราส่วนแรงตัดพลวัตจะลดลงเรื่อยๆ เมื่อขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดมีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจาก อัตราส่วนแรงตัดพลวัตเกิดจาก แรงป้อนตัดพลวัต (dF_y) ส่วนด้วยแรงตัดหลักพลวัต (dF_z) และแรงตัดหลักพลวัตมีทิศทางเดียวกับความเร็ว

ตัดหรือทิศทางการหมุนของชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 4.2 ดังนั้น จึงได้รับอิทธิพลจากความเร็วตัดเป็นอย่างมาก เมื่อการสึกหรอมีขนาดเพิ่มขึ้นจะทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับเม็ดมีดเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.3 ทำให้เกิดแรงเสียดทานเพิ่มขึ้นตาม การตัดเป็นไปได้อย่างยากและนำไปสู่แนวโน้มการสั่นสะเทือนของมีดตัดและชิ้นงาน แรงตัดที่ใช้จึงมากขึ้น ด้วยเหตุนี้ จึงทำให้ค่าของแรงตัดพลวัตทั้งสองเพิ่มมากขึ้น แต่การเพิ่มขึ้นของแรงตัดหลักพลวัต (dF_z) มีค่ามากกว่าแรงป้อนตัดพลวัต (dF_y) อย่างมาก จึงทำให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีค่าน้อยลง

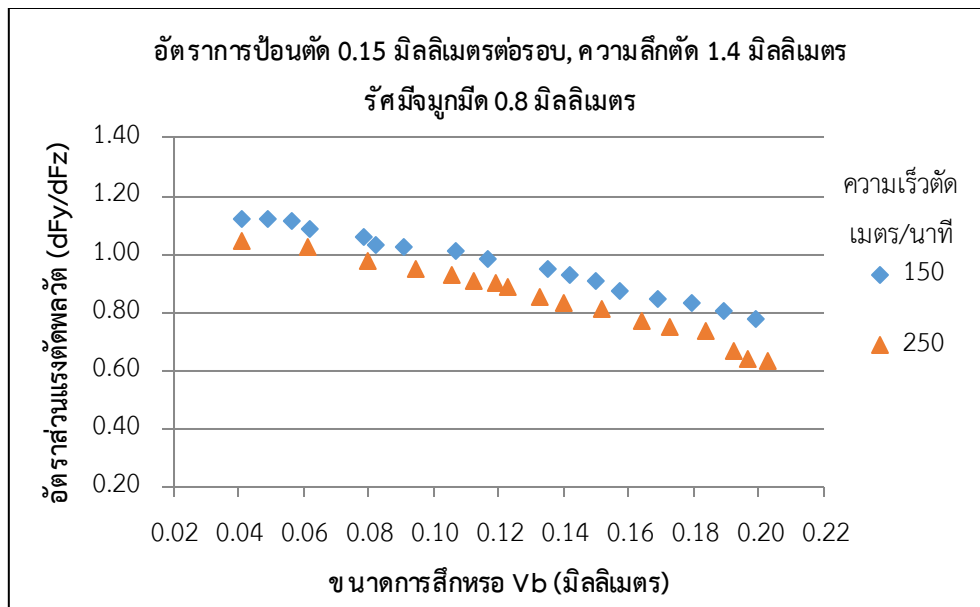


รูปที่ 4.2 ทิศทางของแรงตัดหลักพลวัต (dF_z)



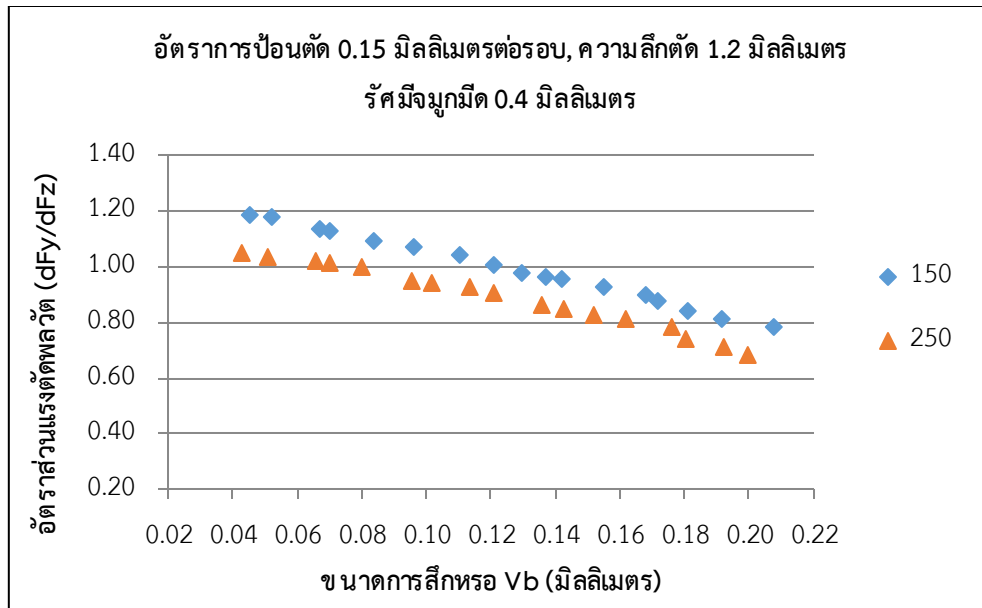
รูปที่ 4.3 การสึกหรอของเม็ดมีดเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างชิ้นงานกับคมตัด

เมื่อพิจารณาความเร็วตัด พบว่า ความเร็วตัดที่สูงกว่าอัตราส่วนแรงตัดพลวัตจะน้อยกว่าสังเกตได้จาก เส้นแนวโน้มภายใต้ความเร็วตัด 250 เมตร/นาที อยู่ต่ำกว่าเส้นแนวโน้มภายใต้ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที เนื่องจากอิทธิพลความเร็วตัดต่อแรงตัดหลักพลวัต (dF_z) ดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น



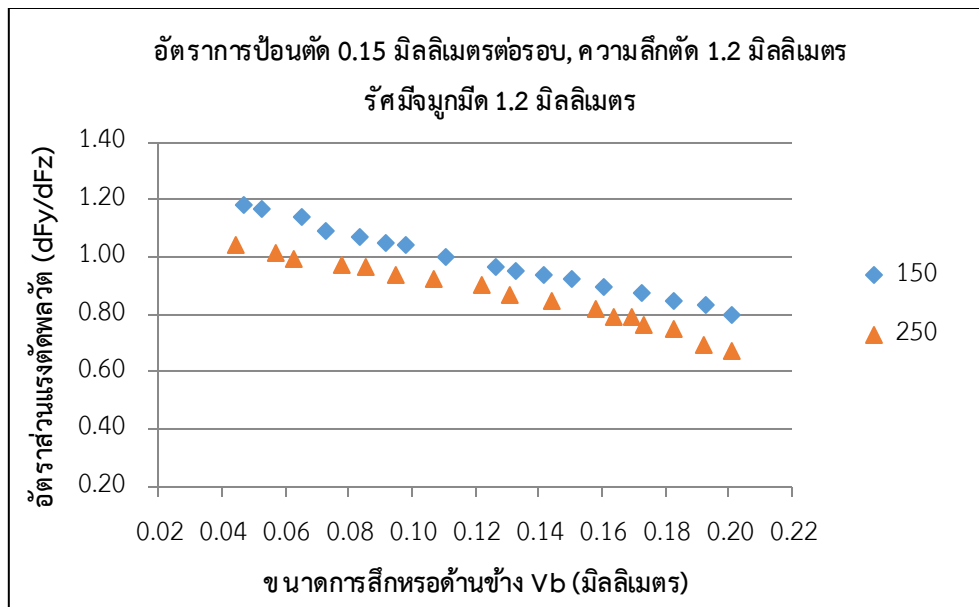
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้าง (V_b) กับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) ที่อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 1.0 มิลลิเมตร และรัศมีจุมุมมีด 0.8 มิลลิเมตร ที่ความเร็วตัดต่างกัน

จากรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่า ที่ความเร็วตัด 250 เมตร/นาทีก่อน และ 150 เมตร/นาทีก่อน แนวโน้มของอัตราส่วนแรงตัดมีค่าลดลงเมื่อขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดเพิ่มมากขึ้น ในช่วงการตัดเริ่มต้นเม็ดมีดยังไม่ค่อยเกิดการสึกหรอ จึงทำให้แรงที่ใช้ในการตัดมีปริมาณน้อย แต่เมื่อตัดไปได้สักระยะ เม็ดมีดเกิดการสึกหรอเพิ่มขึ้น จึงทำให้แรงที่ใช้ในการตัดเพิ่มมากขึ้นตาม ประกอบกับแรงตัดหลักพลวัต (dF_z) ได้รับอิทธิพลจากความเร็วตัดและการสึกหรอของเม็ดมีดมากกว่าแรงป้อนตัดพลวัต (dF_y) จึงทำให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีค่าลดลงตามไปด้วย สามารถสรุปได้ว่า ไม่ว่าจะความเร็วตัดจะเปลี่ยนแปลงอย่างไร แนวโน้มของอัตราส่วนแรงตัดพลวัตยังคงเหมือนเดิม



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้าง (Vb) กับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) ที่อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 1.2 มิลลิเมตร และรัศมีจุมุมมีด 0.4 มิลลิเมตร ที่ความเร็วตัดต่างกัน

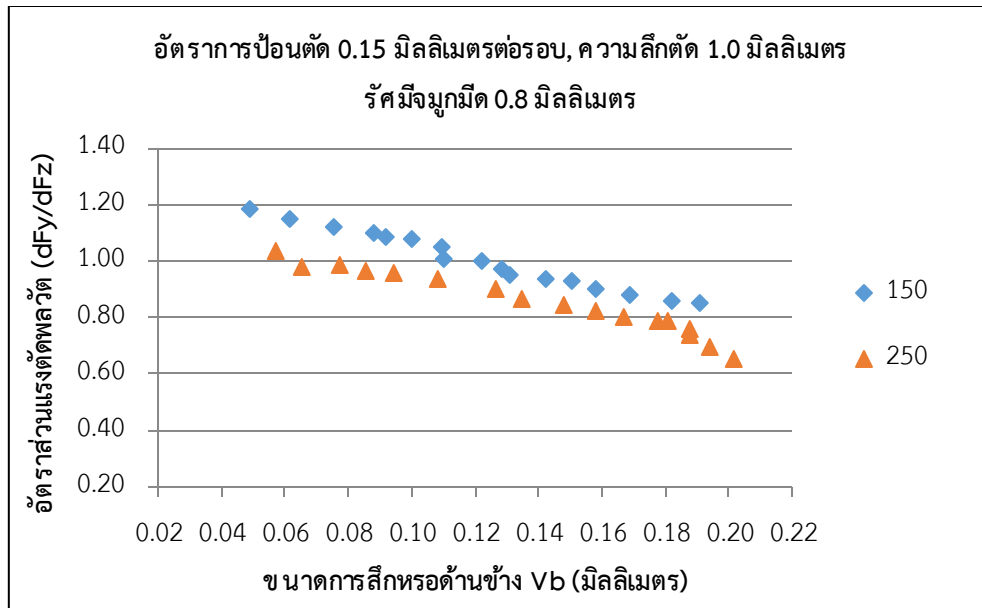
จากรูปที่ 4.5 ผลที่ได้จากการทดลองมีลักษณะเหมือนกันกับ รูปที่ 4.4 คือ อัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีค่าลดลงเมื่อการสึกหรอของเม็ดมีดมีขนาดเพิ่มมากขึ้น เนื่องจาก เม็ดมีดเกิดการสึกหรอจะทำให้ผิวเกิดความขรุขระส่งผลต่อความสามารถในการตัดเฉือนน้อยลง จึงต้องใช้แรงในการตัดเพิ่มขึ้น แต่แรงตัดหลักพลวัต (dFz) เพิ่มขึ้นมากกว่าแรงป้อนตัดพลวัต (dFy) ดังนั้น อัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีค่าน้อยลง จะเห็นได้ว่า เมื่อกำหนดให้เงื่อนไขการตัด อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 1.2 มิลลิเมตร และรัศมีจุมุมมีด 1.2 มิลลิเมตร คงที่ แต่เปลี่ยนแปลงความเร็วตัด อัตราส่วนแรงตัดพลวัตยังคงมีพฤติกรรมเช่นเดิม



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้าง (Vb) กับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) ที่อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 1.2 มิลลิเมตร และรัศมีจุมุมมีด 1.2 มิลลิเมตร ที่ความเร็วตัดต่างกัน

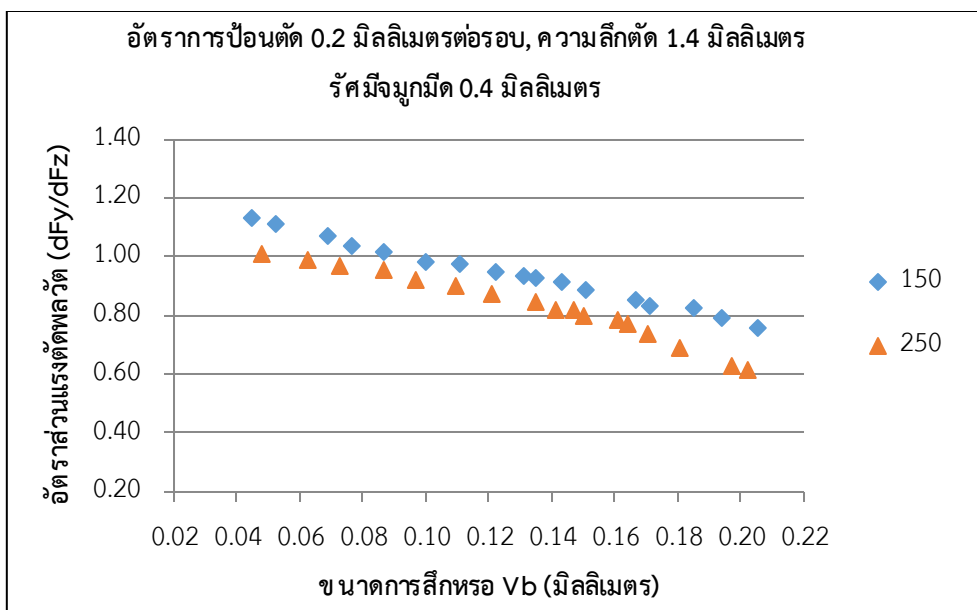
จากรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่า เมื่อขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดเพิ่มมากขึ้น จะทำให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีค่าน้อยลง การคงที่เงื่อนไขการตัดอื่นๆ และเปลี่ยนแปลงความเร็วตัดไม่ส่งผลต่อแนวโน้มของอัตราการส่วนแรงตัดพลวัต โดยที่การสึกหรอของเม็ดมีดจะส่งผลต่อแรงตัดพลวัตทั้งสองแกน แต่จะส่งผลต่อแรงตัดหลักพลวัต (dFz) มากกว่าแรงป้อนตัดพลวัต (dFy) จึงทำให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีค่าน้อยลง เมื่อสังเกตแนวโน้มของเส้นความเร็วตัด 150 เมตร/นาที และ 200 เมตร/นาที มีลักษณะเหมือนกัน ดังนั้น การเปลี่ยนความเร็วตัดไม่มีผลต่อแนวโน้มของอัตราส่วนแรงพลวัต

นอกจากนี้แนวโน้มของเส้นความเร็วตัดที่สูงจะอยู่ต่ำกว่าแนวโน้มของเส้นความเร็วตัดต่ำ เนื่องจากอิทธิพลของความเร็วตัดต่อแรงตัดหลักพลวัต (dFz) ซึ่งมีทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้าง (Vb) กับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) ที่อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 1.0 มิลลิเมตร และรัศมีจุมุมมีด 0.8 มิลลิเมตร ที่ความเร็วตัดต่างกัน

จากรูปที่ 4.7 ลักษณะของแนวโน้มอัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีค่าลดลงเรื่อยๆ เมื่อขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดใหญ่ขึ้น การสึกหรอของเม็ดมีดมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของแรงตัดพลวัตทั้ง 2 แนวแกน แต่แรงป้อนตัดพลวัต (dFy) จะมีค่าน้อยกว่าแรงตัดหลักพลวัต (dFz) จึงทำให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีค่าน้อยลง อีกทั้งการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วตัดไม่ส่งผลต่อแนวโน้มของอัตราส่วนแรงตัดพลวัต

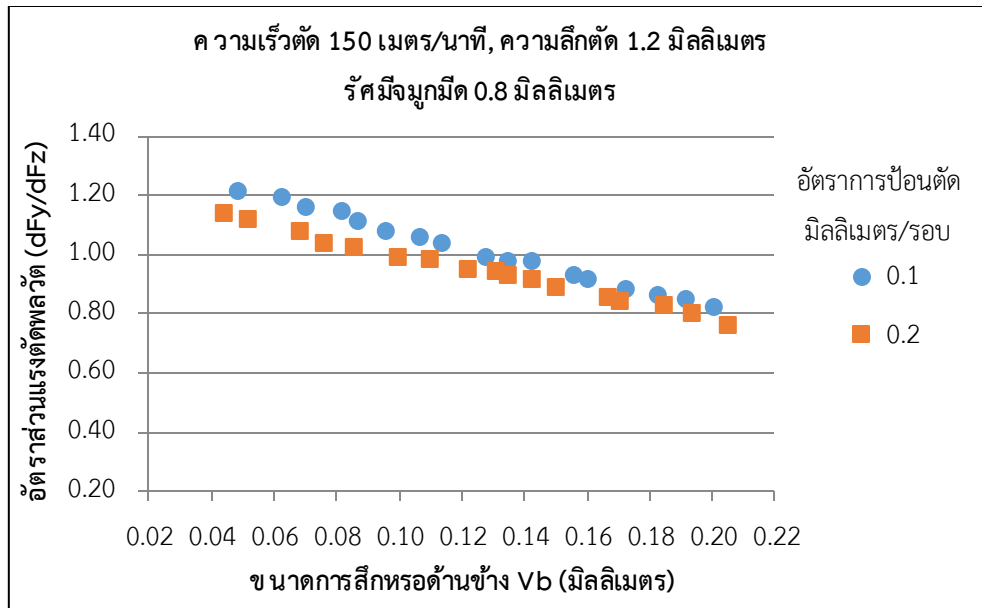


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้าง (V_b) กับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) ที่อัตราการป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 1.4 มิลลิเมตร และรัศมีจุมุมมีด 0.4 มิลลิเมตร ที่ความเร็วตัดต่างกัน

จากรูปที่ 4.8 แนวโน้มของอัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีลักษณะเหมือนกับการทดลองอื่น กล่าวคือ อัตราส่วนแรงตัดพลวัตจะมีค่าน้อยลงเรื่อยๆ เมื่อขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงความเร็วตัดตั้งแต่รูปที่ 4.1 ถึง 4.8 จะเห็นว่า แนวโน้มของอัตราส่วนแรงตัดพลวัตไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปภายใต้การเปลี่ยนแปลงความเร็วตัด อัตราส่วนแรงตัดจะเปลี่ยนแปลงตามขนาดการสึกหรอ

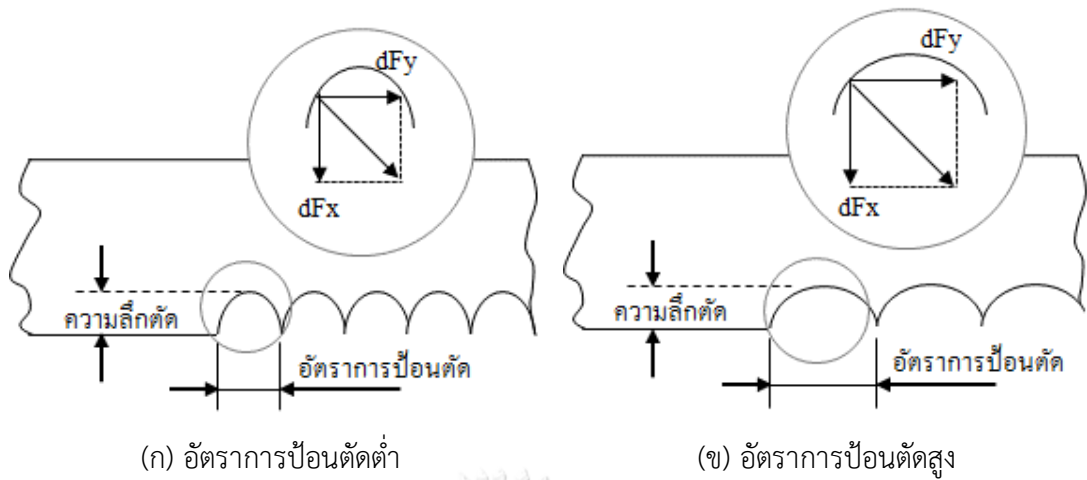
ต่อไปจะเป็นผลการทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแรงตัดพลวัตภายใต้การเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนตัด



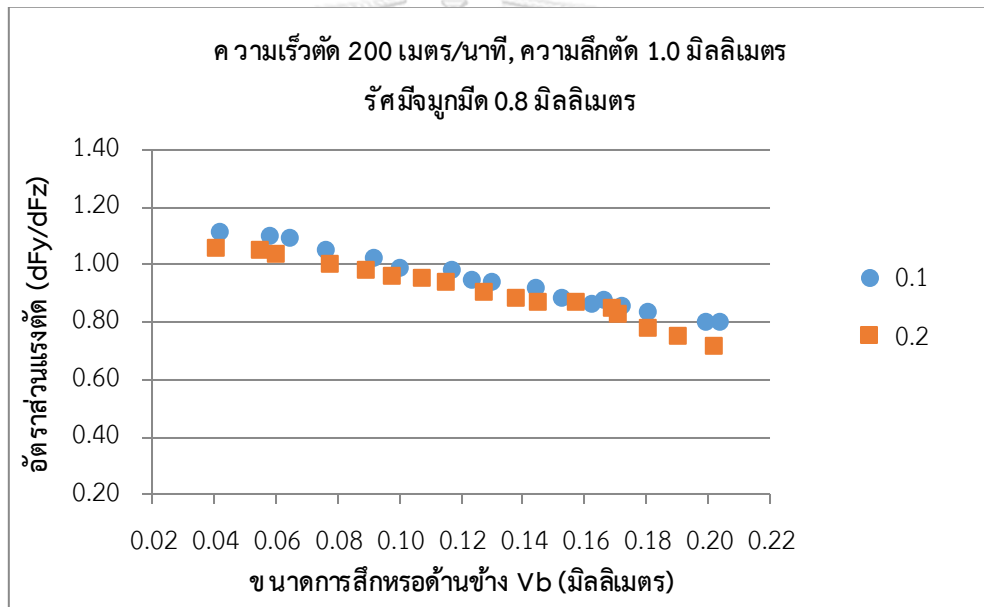
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้าง (V_b) กับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) ที่ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที ความลึกตัด 1.2 มิลลิเมตร และรัศมีงูมมีด 0.8 มิลลิเมตร ที่อัตราการป้อนตัดต่างกัน

จากรูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่า แนวโน้มของอัตราส่วนแรงตัดพลวัตลดลงเรื่อยๆ เมื่อขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดมีขนาดเพิ่มมากขึ้น การตัดชิ้นงานในระยะเริ่มต้นเม็ดมีดยังไม่ค่อยสึกหรอแต่เมื่อตัดไปได้สักระยะเกิดความร้อนสะสมที่ชิ้นงานและเม็ดมีดนำไปสู่การสึกหรอที่เพิ่มมากขึ้น ผิวของเม็ดมีดเริ่มขรุขระ การตัดเป็นไปได้อย่างขึ้นและเกิดการสั่นสะเทือนที่ชิ้นงานและเม็ดมีดตัด จึงทำให้ต้องใช้แรงในการตัดเฉือนชิ้นงานทั้งแรงตัดหลักพลวัต (dF_z) และแรงป้อนตัดพลวัต (dF_y) มากขึ้น นอกจากนี้อัตราการป้อนตัดที่สูงกว่าทำให้พื้นที่การตัดใหญ่ขึ้น มีผลทำให้แรงป้อนตัดพลวัต (dF_y) และแรงรัศมีพลวัต (dF_x) เพิ่มขึ้นอีกทางหนึ่ง แสดงดังรูปที่ 4.10 แต่ในงานวิจัยนี้จะไม่นำแรงรัศมีพลวัต (dF_x) มาพิจารณาตามที่กล่าวไปแล้วในบทที่ 1 ถึงแม้ว่าแรงป้อนพลวัตจะเพิ่มสูงขึ้นแต่ก็ยังมีค่าน้อยกว่าแรงตัดหลักพลวัต จึงทำให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีค่าน้อยลง

การทดลองโดยใช้เงื่อนไขการตัดอื่นๆ คงที่ และเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนตัดไม่ได้ทำให้แนวโน้มของอัตราส่วนแรงตัดเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

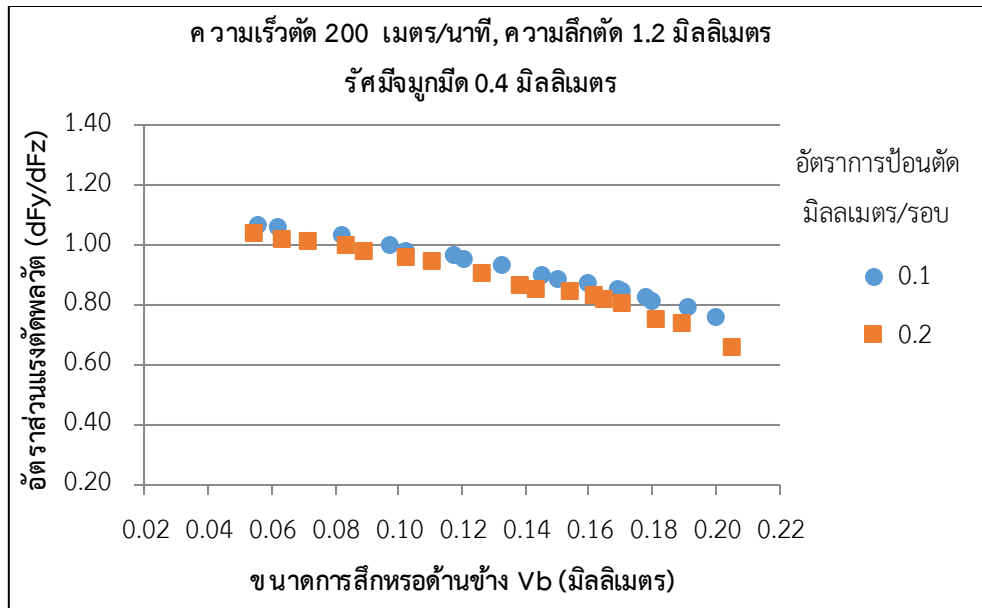


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดพลวัตและอัตราการป้อนตัด



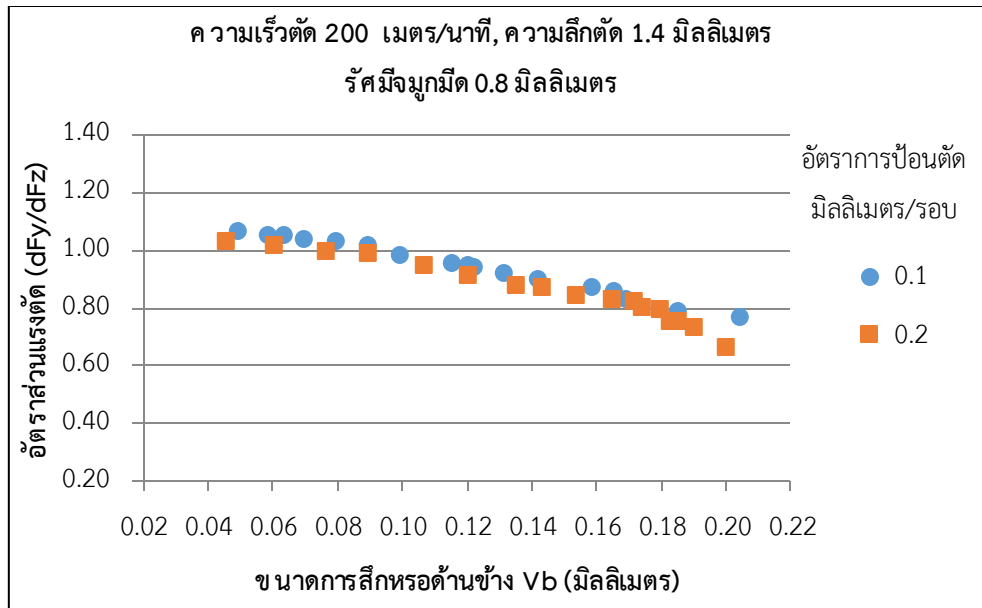
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้าง (Vb) กับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) ที่ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที ความลึกตัด 1.0 มิลลิเมตร และรัศมีจุมุมมีด 0.8 มิลลิเมตร ที่อัตราการป้อนตัดต่างกัน

จากรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่า แนวโน้มของอัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีค่าลดลงเมื่อขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดมีค่าเพิ่มขึ้น ขนาดการสึกหรอที่น้อยอัตราส่วนแรงตัดก็จะมีค่ามาก ในทางกลับกัน เมื่อขนาดการสึกหรอโตมากขึ้นอัตราส่วนแรงตัดพลวัตก็จะน้อยลง การทดลองโดยใช้เงื่อนไขการตัดอื่นๆคงที่ และเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนตัดไม่มีผลต่อแนวโน้มของอัตราส่วนแรงตัดพลวัต



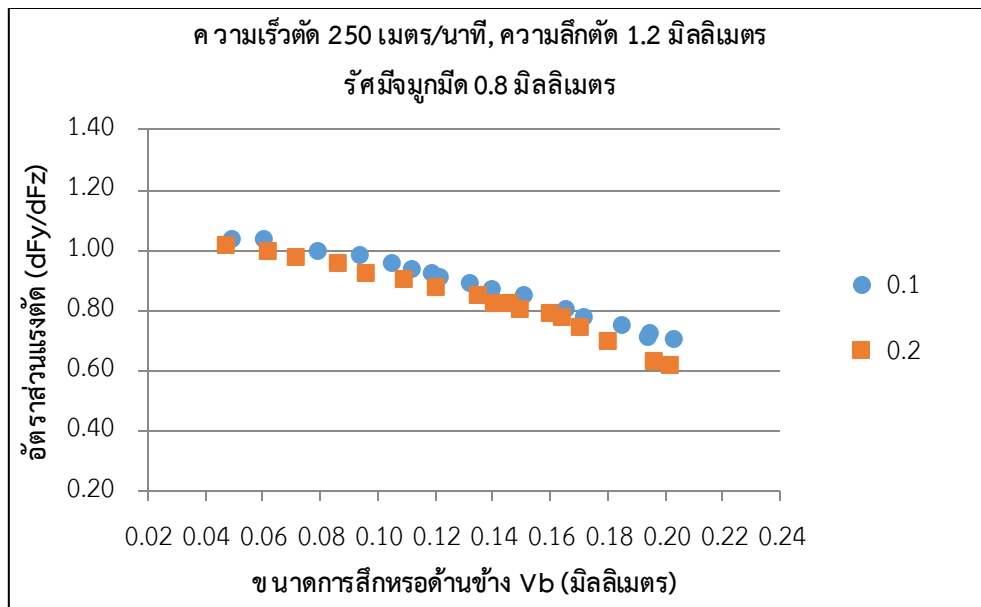
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้าง (V_b) กับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) ที่ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที ความลึกตัด 1.2 มิลลิเมตร และรัศมีจุมุมมีด 0.4 มิลลิเมตร ที่อัตราการป้อนตัดต่างกัน

จากรูปที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่า ผลของการทดลองมีลักษณะที่เหมือนกันกับการทดลองก่อนหน้า กล่าวคือ แนวโน้มอัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีค่าลดลงเมื่อขนาดการสึกหรอโตขึ้น และการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนตัดไม่ว่าจะเร็วหรือช้า ไม่มีผลกระทบต่อแนวโน้มของอัตราส่วนแรงตัดพลวัต



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้าง (V_b) กับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) ที่ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที ความลึกตัด 1.4 มิลลิเมตร และรัศมีจุมุมมีด 0.8 มิลลิเมตร ที่อัตราการป้อนตัดต่างกัน

จากรูปที่ 4.13 จะเห็นได้ว่า การทดลองตัดภายใต้อัตราการป้อนตัดที่ต่างกัน แนวโน้มของอัตราส่วนแรงตัดพลวัตไปในทิศทางเดียวกัน ในช่วงการตัดระยะแรกอัตราส่วนแรงตัดมีค่ามากเมื่อขนาดการสึกหรอมีค่าน้อย หลังจากนั้นจะลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อขนาดการสึกหรอใหญ่ขึ้น แสดงให้เห็นว่า แนวโน้มของอัตราส่วนแรงตัดพลวัตไม่เปลี่ยนแปลงถึงแม้เงื่อนไขการตัดจะเปลี่ยนไปอย่างไรก็ตาม

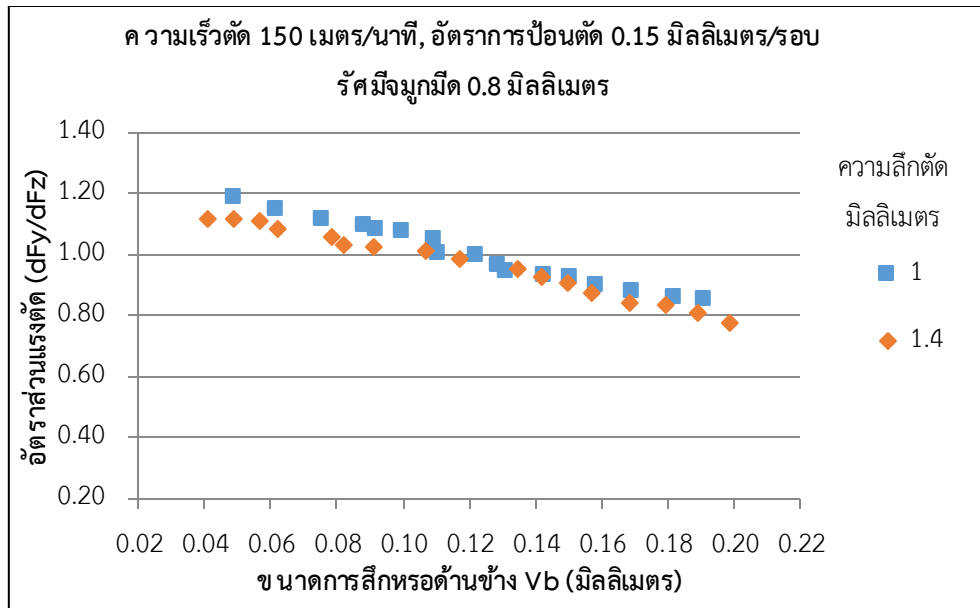


รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้าง (Vb) กับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) ที่ความเร็วตัด 250 เมตร/นาที ความลึกตัด 1.2 มิลลิเมตร และรัศมีงูมกมิต 0.8 มิลลิเมตร ที่อัตราการป้อนตัดต่างกัน

จากรูปที่ 4.14 แสดงผลการทดลองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนตัดที่ 0.1 มิลลิเมตร/รอบ และ 0.2 มิลลิเมตร/รอบ พบว่าอัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีค่ามากเมื่อขนาดการสึกหรอมีค่าน้อย และจะมีค่าน้อยลงเมื่อขนาดการสึกหรอเพิ่มขึ้น อีกทั้งแนวโน้มของอัตราส่วนแรงตัดพลวัตไม่มีความแตกต่างในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนตัด

เมื่อพิจารณาผลการทดลองจากรูปที่ 4.9 ถึง 4.14 เป็นการทดลองเปลี่ยนแปลงค่าเงื่อนไขการตัด โดยให้ความเร็วตัด ความลึกตัด และรัศมีงูมกมิตคงที่ ส่วนอัตราการป้อนตัดมีการเปลี่ยนแปลงค่าตั้งแต่ระดับต่ำ (-1) 0.1 มิลลิเมตร/รอบ จนถึงระดับสูง (1) 0.2 มิลลิเมตร/รอบ พบว่า แนวโน้มของอัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีลักษณะไม่แตกต่างกัน คือมีแนวโน้มลดลงตามการโตของขนาดการสึกหรอ สามารถสรุปได้ว่า การเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนตัดไม่มีผลต่อแนวโน้มของอัตราส่วนแรงตัดพลวัต

ต่อไปจะเป็นผลการทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแรงตัดพลวัตกับขนาดการสึกหรอของมิตตัดเมื่อเปลี่ยนความลึกตัด

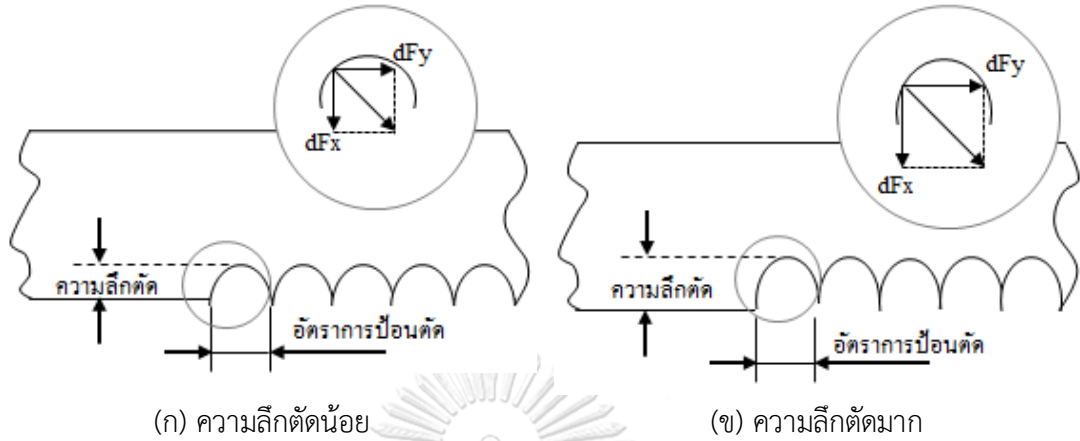


รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้าง (Vb) กับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) ที่ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ และรัศมีจุมูกมีด 0.8 มิลลิเมตร ที่ความลึกตัดต่างกัน

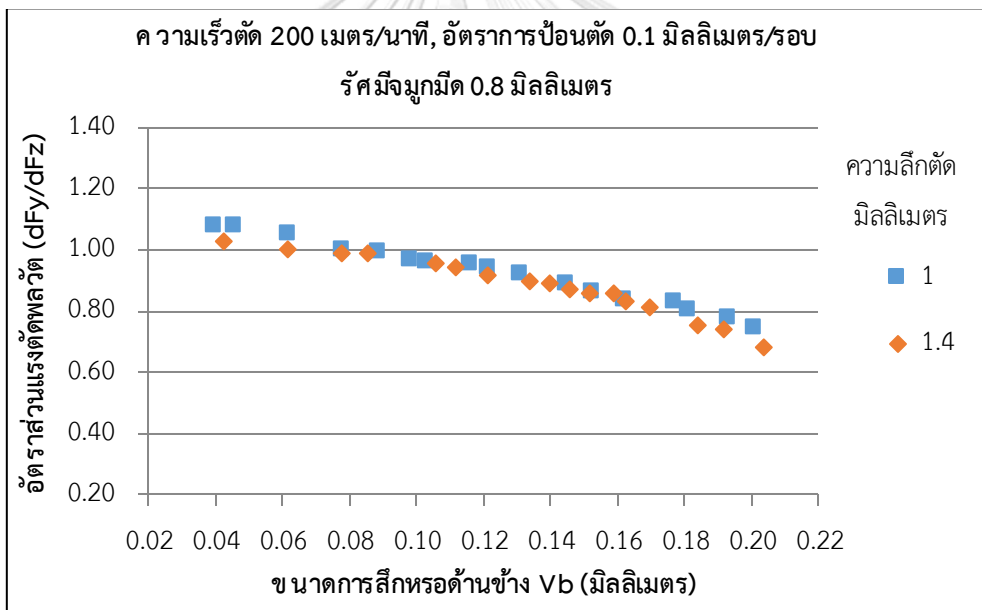
จากรูปที่ 4.15 จะเห็นว่า อัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีค่ามากเมื่อการสึกหรอมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นจะน้อยลงเมื่อขนาดการสึกหรอใหญ่ขึ้น เนื่องจากในการตัดช่วงแรกเม็ดมีดยังไม่ค่อยสึกหรอ การตัดเป็นไปได้ง่าย แต่เมื่อตัดไปได้สักระยะจะเกิดความร้อนสะสมเนื่องจากการเสียดสีระหว่างชิ้นงานกับเม็ดมีด นำไปสู่การสึกหรอโดยผิวของเม็ดมีดจะถูกดึงให้หลุดออกด้วยเศษโลหะ เกิดความขรุขระที่ผิวด้านข้างคมตัด จึงทำให้การตัดเป็นไปได้อย่างขึ้น แรงตัดพลวัตทั้ง 2 แกน ได้แก่ แรงป้อนตัดพลวัต (dFy) และแรงตัดหลักพลวัต (dFz) ที่ใช้จะมากขึ้น มีแนวโน้มที่จะเกิดการสั่นสะเทือนของเม็ดมีดและชิ้นงาน ส่งผลให้ความเรียบผิวของชิ้นงานจะด้อยลง ขรุขระมาก นอกจากนี้ค่าความลึกตัดยังมีอิทธิพลต่อแรงป้อนตัดพลวัต (dFy) อีกด้วย กล่าวคือ ค่าความลึกตัดที่สูงจะทำให้พื้นที่การตัดเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นแรงที่ใช้ในการตัดจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แสดงดังรูปที่ 4.16 แรงตัดที่เกิดขึ้นจะประกอบไปด้วย แรงรัศมีพลวัต (dFx) และแรงป้อนตัดพลวัต (dFy) แต่งานวิจัยนี้ไม่นำแรงรัศมีพลวัต (dFx) มาพิจารณา

ถึงแม้ว่าแรงป้อนตัดพลวัตจะได้รับอิทธิพลทั้งจากการสึกหรอของเม็ดมีดและความลึกตัด แต่แรงตัดหลักพลวัตได้รับอิทธิพลจากการสึกหรอของเม็ดมีดเป็นอย่างมาก แรงตัดหลักพลวัต (dFz) จะ

เพิ่มขึ้นมากกว่าแรงป้อนตัดพลวัต (dF_y) ด้วยเหตุนี้อัตราส่วนแรงตัดพลวัตจึงมีค่าน้อยลงเมื่อขนาดการสีกหรือเพิ่มขึ้น

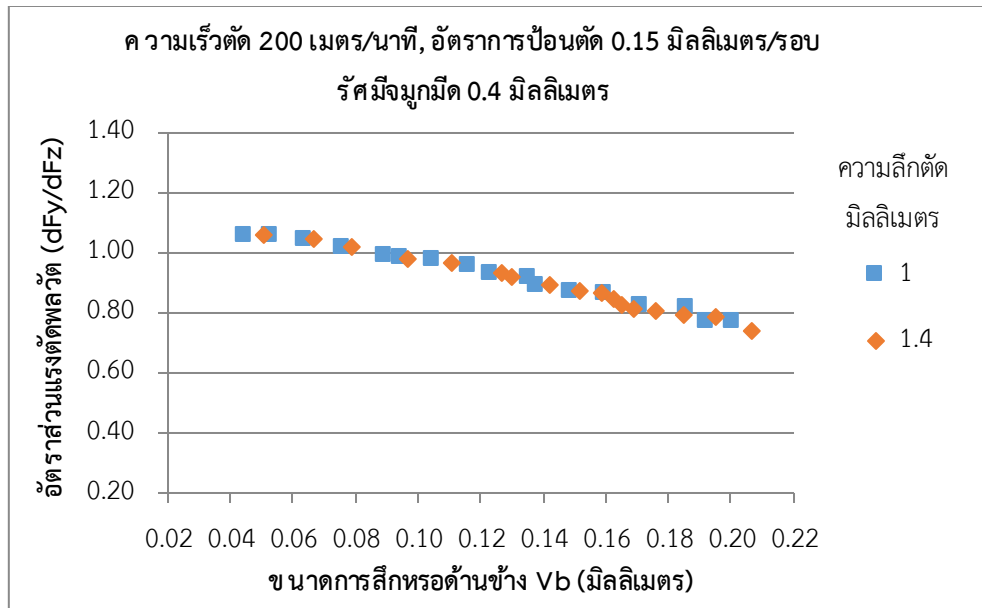


รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดพลวัตกับความลึกตัด



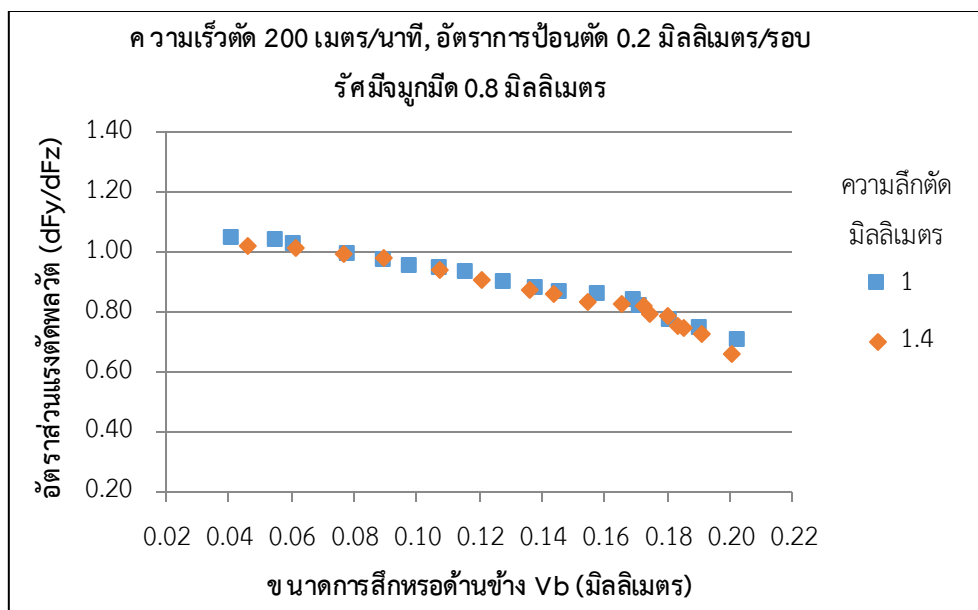
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสีกหรือด้านข้าง (V_b) กับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) ที่ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตร/รอบ และรัศมีจุกมีด 0.8 มิลลิเมตร ที่ความลึกตัดต่างกัน

จากรูปที่ 4.17 แสดงให้เห็นว่า อัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีค่ามากเมื่อขนาดการสีกหรือมีค่าน้อย และลดลงเมื่อการสีกหรือมีขนาดใหญ่ขึ้น แนวโน้มของอัตราส่วนพลวัตที่ความลึกตัดเท่ากับ 1 มิลลิเมตร ไม่มีความแตกต่างจากแนวโน้มของอัตราส่วนแรงตัดพลวัตที่ความลึกตัดเท่ากับ 1.4 มิลลิเมตร



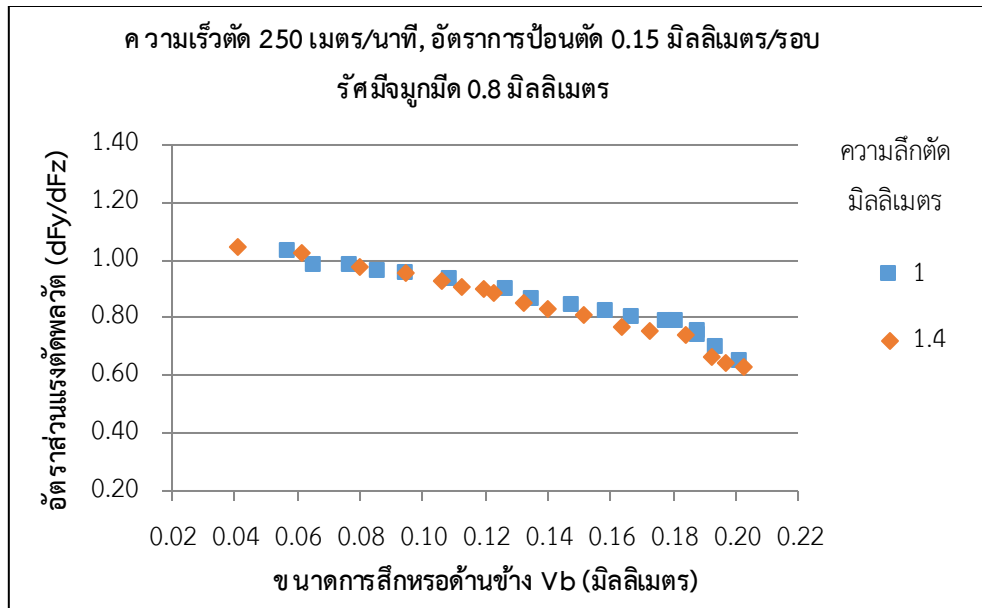
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้าง (Vb) กับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) ที่ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ และรัศมีจุมุมิต 0.4 มิลลิเมตร ที่ความลึกตัดต่างกัน

จากรูปที่ 4.18 แสดงให้เห็นว่า แนวโน้มของอัตราส่วนแรงตัดพลวัตจะมีค่าลดลงเมื่อขนาดการสึกหรอมีค่าเพิ่มขึ้น ในช่วงการตัดระยะเริ่มต้นเม็ดมีดยังไม่ค่อยเกิดการเกิดสึกหรอ แรงที่ใช้ในการตัดน้อย อัตราส่วนแรงตัดจึงมาก เมื่อตัดไปได้สักระยะเม็ดมีดเริ่มเกิดการสึกหรอ แรงที่ใช้ในการตัดจึงเพิ่มขึ้น อัตราส่วนแรงตัดน้อยลง และไม่ว่าความลึกตัดจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร แนวโน้มของอัตราส่วนแรงตัดพลวัตยังคงเหมือนเดิม



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้าง (Vb) กับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) ที่ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตร/รอบ และรัศมีจุมุมิต 0.8 มิลลิเมตร ที่ความลึกตัดต่างกัน

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.19 พบว่า ผลการทดลองมีลักษณะเหมือนกับผลการทดลองก่อนหน้า อัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีค่ามากเมื่อขนาดการสึกหรอมีค่าน้อย และอัตราส่วนแรงตัดพลวัตจะน้อยลงเรื่อยๆเมื่อขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดใหญ่ขึ้น นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงความลึกตัดไม่ได้ทำให้แนวโน้มของอัตราส่วนแรงตัดพลวัตเปลี่ยนตามไปด้วย

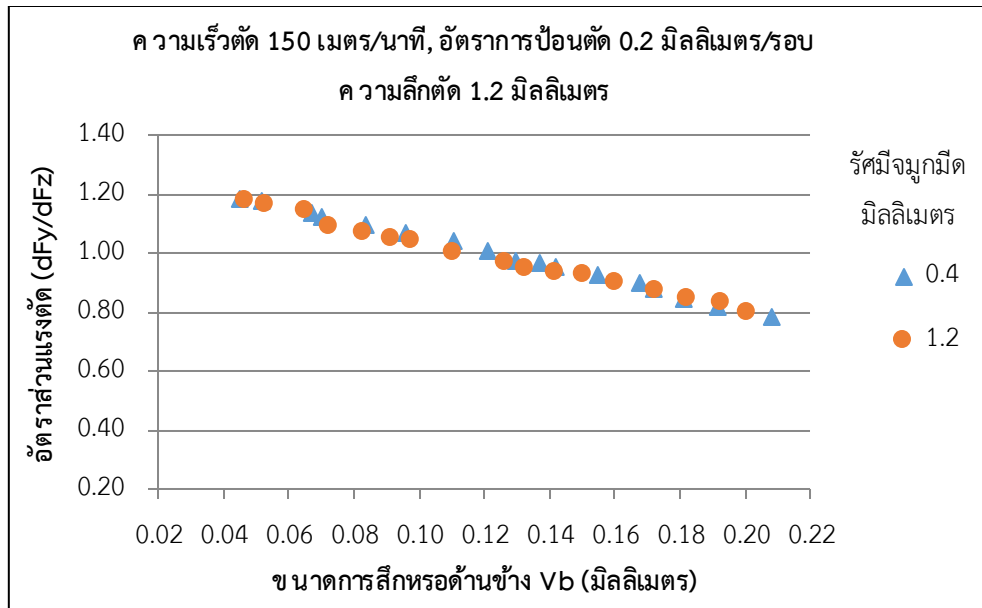


รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสีกหรือด้านข้าง (Vb) กับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) ที่ความเร็วตัด 250 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ และรัศมีจุมุมิต 0.8 มิลลิเมตร ที่ความลึกตัดต่างกัน

จากรูปที่ 4.20 แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีแนวโน้มลดลงเมื่อการสีกหรือมีขนาดเพิ่มมากขึ้น และการเปลี่ยนแปลงความลึกตัดไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงแนวโน้มของอัตราส่วนแรงตัดพลวัต สังเกตได้จากเส้นแนวโน้มอัตราส่วนแรงตัดพลวัตที่ความลึกตัด 1 มิลลิเมตร ไม่ต่างจากเส้นแนวโน้มอัตราส่วนแรงตัดพลวัตที่ความลึกตัด 1.4 มิลลิเมตร

จากผลการทดลองโดยการเปลี่ยนแปลงความลึกตัดทั้งหมด (รูปที่ 4.15 ถึง รูปที่ 4.20) สามารถสรุปได้ว่า การสีกหรือของเม็ดมีดที่สูงมีผลต่อแรงตัดที่มากขึ้น อัตราส่วนแรงตัดจะน้อยลง และการเปลี่ยนแปลงความลึกตัดไม่มีผลต่อแนวโน้มของอัตราส่วนแรงตัดพลวัต

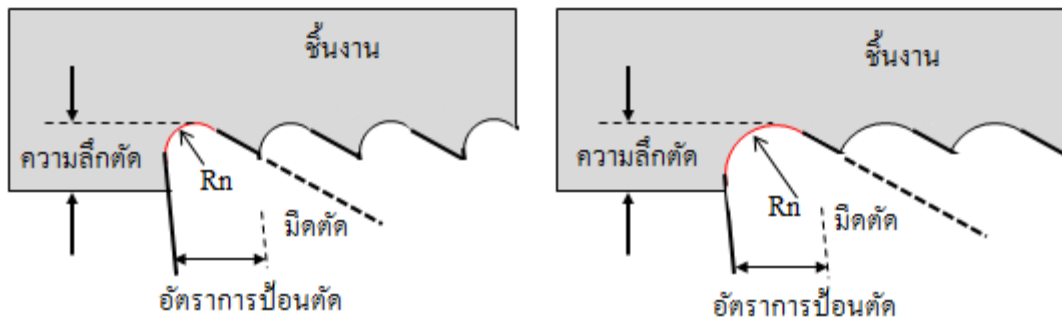
ต่อไปจะเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแรงตัดกับขนาดการสีกหรือของเม็ดมีด ภายใต้การเปลี่ยนแปลงของรัศมีจุมุมิต ซึ่งผลการทดลองแสดงดังรูปที่



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้าง (V_b) กับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) ที่ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตร/รอบ และความลึกตัด 1.2 มิลลิเมตร ที่รัศมีจุมูกมีดต่างกัน

จากรูปที่ 4.21 แสดงให้เห็นว่า อัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีค่ามากเมื่อขนาดการสึกหรอมีค่าน้อย จากนั้นอัตราส่วนแรงตัดพลวัตจะมีค่าน้อยลงเมื่อขนาดการสึกหรอใหญ่ขึ้น เนื่องจากการตัดชิ้นงานระยะแรกเม็ดมีดยังไม่เกิดการสึกหรอ แรงตัดที่ใช้มีค่าน้อย อัตราส่วนแรงตัดพลวัตจึงมากในทางกลับกัน เมื่อตัดไปได้สักระยะ เกิดความร้อนสะสมจากการเสียดสีระหว่างชิ้นงานกับเม็ดมีด ทำให้ผิวของเม็ดมีดเริ่มเกิดการสึกหรอรวมไปถึงพื้นที่ของรัศมีจุมูกมีดด้วย การตัดเป็นไปได้อย่างขึ้น แรงตัดที่ใช้จึงมีปริมาณมากขึ้น อัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีค่าน้อยลง และการสึกหรอของรัศมีจุมูกมีดยังนำไปสู่การเพิ่มความขรุขระของผิวชิ้นอีกด้วย นอกจากนี้ ขนาดของรัศมีจุมูกมีดยังมีอิทธิพลต่อแรงตัดพลวัต แสดงดังรูปที่ 4.22 ขนาดรัศมีจุมูกมีดที่ใหญ่จะทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับเม็ดมีดมากขึ้น มีโอกาสเกิดการสั่นสะเทือนสูง แรงตัดพลวัตทั้ง 2 แกน เพิ่มขึ้น

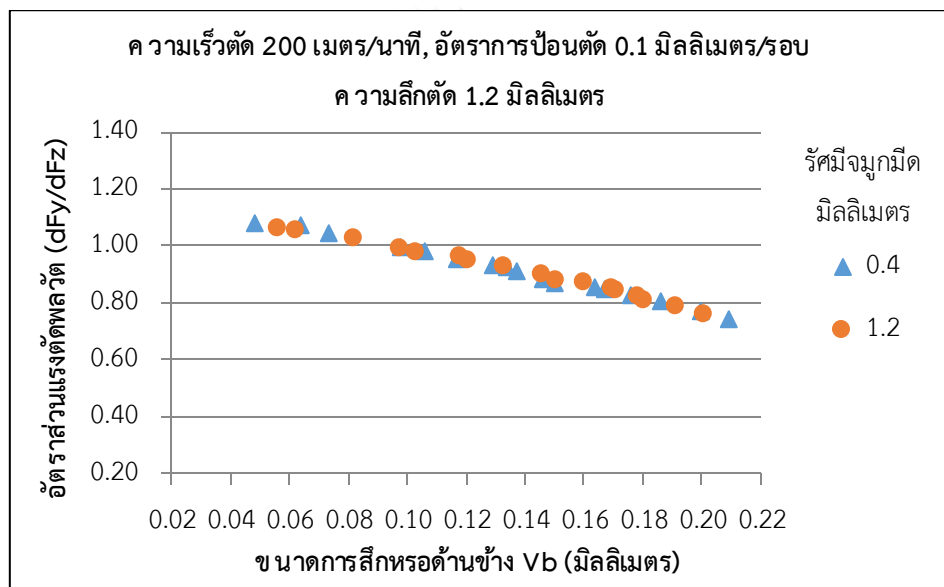
อย่างไรก็ตาม การสึกหรอของเม็ดมีดมีอิทธิพลต่อแรงตัดหลักพลวัต (dF_z) มากกว่าแรงป้อนตัดพลวัต (dF_y) จึงทำให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีค่าลดลง และเมื่อพิจารณาแนวโน้มของอัตราส่วนแรงตัดพลวัตระหว่างการใช้รัศมีจุมูกมีดขนาด 0.4 มิลลิเมตร และ 1.2 มิลลิเมตร ปรากฏว่าเส้นแนวโน้มไม่มีความแตกต่างกัน



(ก) รัศมีจุมุมมีด (Rn) เล็ก

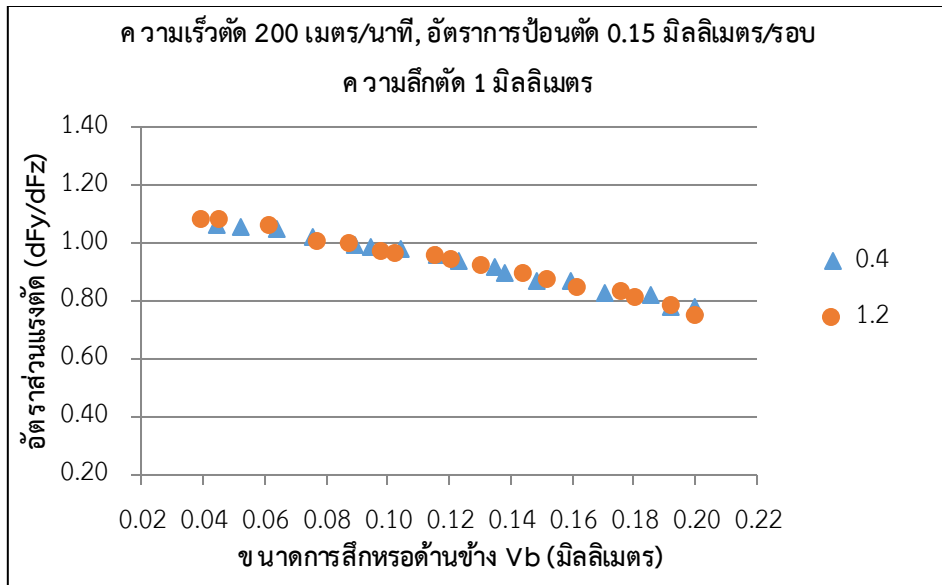
(ข) รัศมีจุมุมมีด (Rn) ใหญ่

รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดพลวัตกับรัศมีจุมุมมีด (Rn)



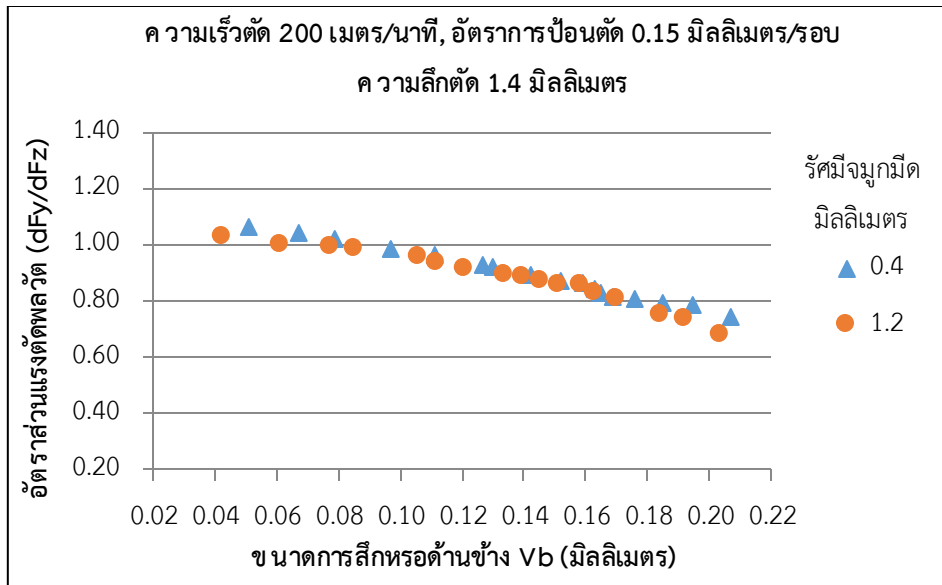
รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้าง (Vb) กับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) ที่ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตร/รอบ และความลึกตัด 1.2 มิลลิเมตร ที่รัศมีจุมุมมีดต่างกัน

จากรูปที่ 4.23 แสดงให้เห็นว่า อัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีค่ามากเมื่อขนาดการสึกหรอมีค่าน้อย และอัตราส่วนแรงตัดพลวัตจะมีค่าน้อยลงเมื่อขนาดการสึกหรอใหญ่ขึ้น การทดลองโดยการเปลี่ยนแปลงขนาดรัศมีจุมุมมีดและคงที่เงื่อนไขการตัดอื่น ปรากฏว่า แนวโน้มของอัตราส่วนแรงตัดพลวัตของทั้ง 2 เงื่อนไขการตัด ไม่มีความแตกต่างกัน



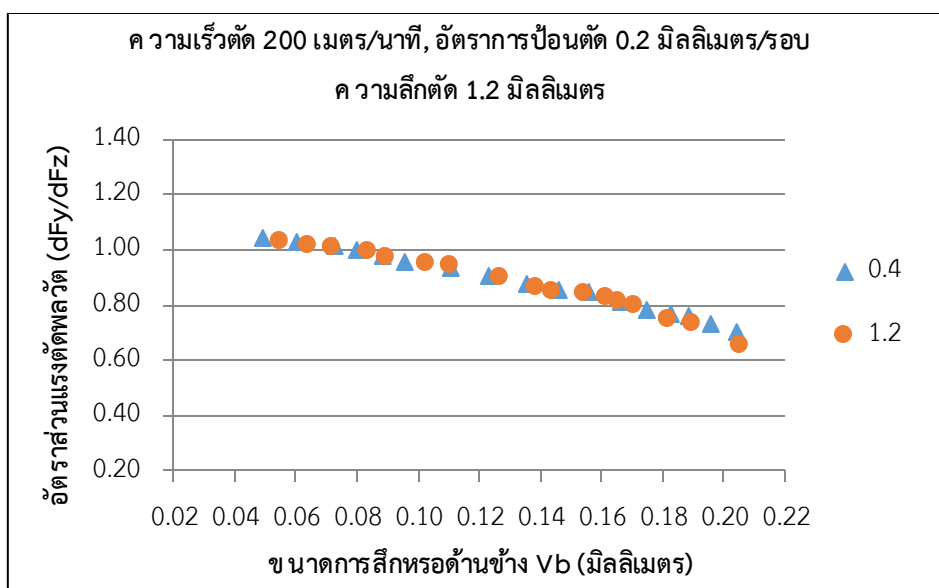
รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้าง (Vb) กับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) ที่ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ และความลึกตัด 1 มิลลิเมตร ที่รัศมีจุมุกมีดต่างกัน

จากรูปที่ 4.24 แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของอัตราส่วนแรงตัดพลวัตเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดรัศมีจุมุกมีดโดยที่เงื่อนไขการตัดอื่นคงที่ อัตราส่วนแรงตัดพลวัตยังคงลักษณะเช่นเดิมไม่ว่ารัศมีจุมุกมีดมีขนาด 0.4 มิลลิเมตรหรือ 1.2 มิลลิเมตรก็ตาม อัตราส่วนแรงตัดพลวัตจะมีค่าลดลงเมื่อขนาดการสึกหรอของมีดมีดโตขึ้น



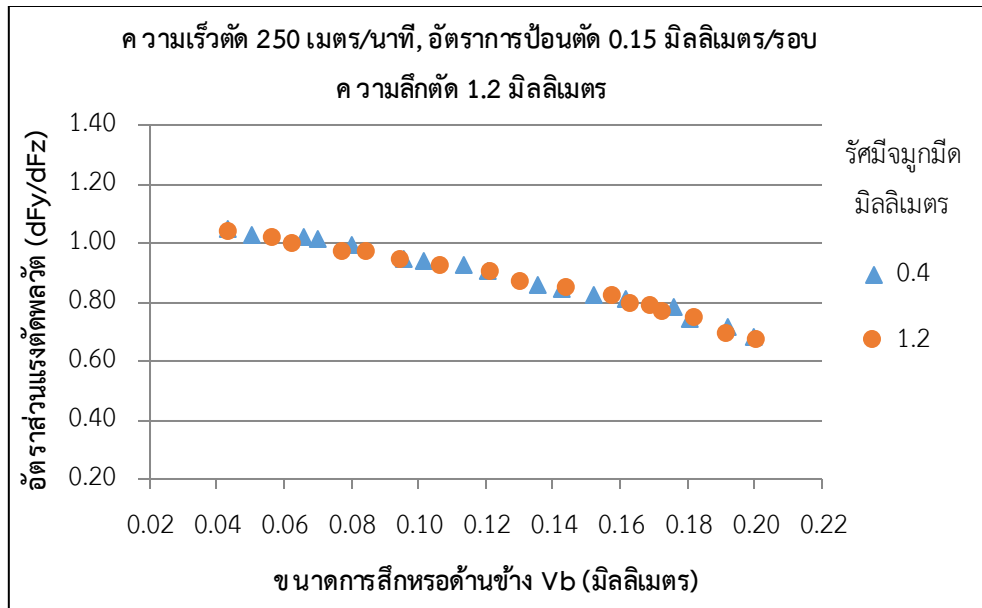
รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้าง (V_b) กับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) ที่ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ และความลึกตัด 1.4 มิลลิเมตร ที่รัศมีจุมุมิตต่างกัน

จากรูปที่ 4.25 เป็นผลการทดลองภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดรัศมีจุมุมิตโดยคงความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด และความลึกตัด ปรากฏว่า แนวโน้มอัตราส่วนแรงตัดพลวัตไม่มีความแตกต่างกัน ช่วงการตัดระยะแรกการสึกหรอของเม็ดมีดมีขนาดเล็ก แรงตัดที่ใช้จึงน้อยทำให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีค่ามาก แต่เมื่อขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดเริ่มใหญ่ขึ้น แรงตัดที่ใช้มากขึ้นทำให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีค่าน้อยลง



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้าง (Vb) กับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) ที่ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตร/รอบ และความลึกตัด 1.2 มิลลิเมตร ที่รัศมีจุมุมิตต่างกัน

จากรูปที่ 4.26 แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีค่ามากในช่วงเริ่มต้น เนื่องจากการสึกหรอของเม็ดมีดมีขนาดเล็ก แต่เมื่อตัดชิ้นงานไปได้สักระยะการสึกหรอของเม็ดมีดเพิ่มมากขึ้น อัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีค่าน้อยลง เพราะแรงที่ใช้ในการตัดเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ การเปลี่ยนแปลงขนาดรัศมีจุมุมิตไม่มีผลต่อแนวโน้มของอัตราส่วนแรงตัดพลวัต



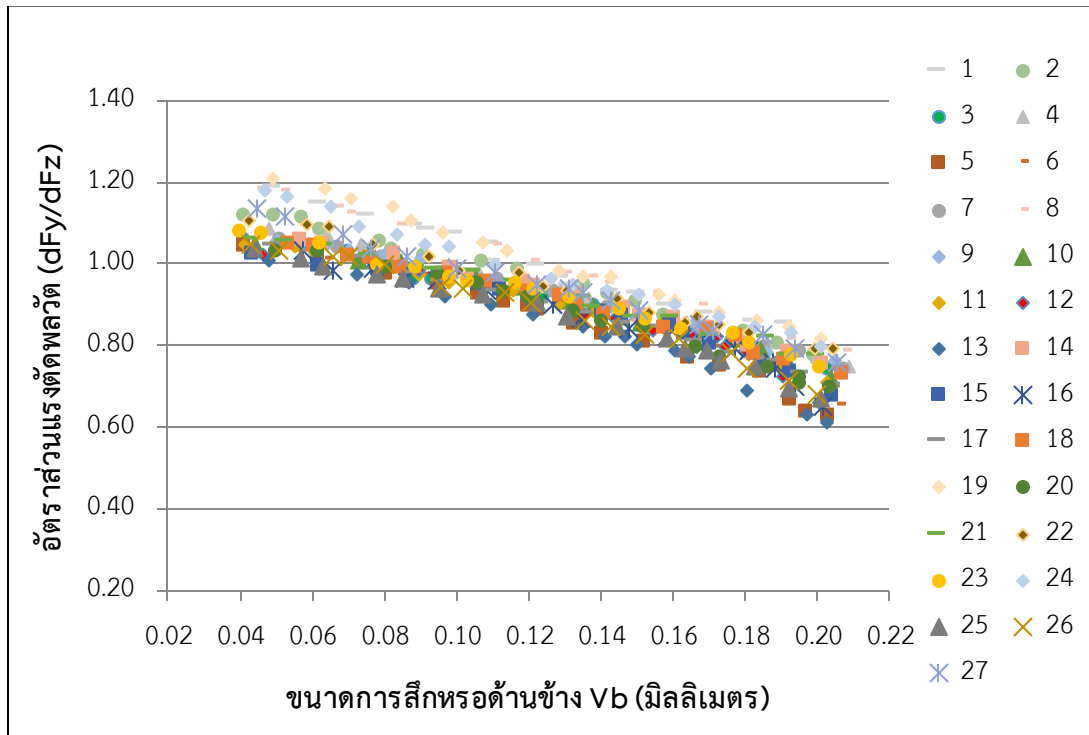
รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสีกหรือด้านข้าง (Vb) กับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) ที่ความเร็วตัด 250 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ และความลึกตัด 1.2 มิลลิเมตร ที่รัศมีจุมูกมีตต่างกัน

จากรูปที่ 4.27 แสดงให้เห็นว่าแนวโน้มของอัตราส่วนแรงตัดมีค่าลดลงเรื่อยเมื่อขนาดการสีกหรือเพิ่มขึ้น และการเปลี่ยนแปลงขนาดรัศมีจุมูกมีตในการทดลองไม่ส่งผลต่อแนวโน้มของอัตราส่วนแรงตัดพลวัต สังเกตได้จากเส้นแนวโน้มอัตราส่วนแรงตัดพลวัตที่รัศมีจุมูกมีตขนาด 0.4 มิลลิเมตรและ 1.2 มิลลิเมตร อยู่ในแนวเดียวกัน

พิจารณาผลการทดลองโดยการคงที่เงื่อนไขการตัด ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด และความลึกตัด และเปลี่ยนแปลงขนาดรัศมีจุมูกมีตจากระดับต่ำสุด 0.4 มิลลิเมตร ไปยังระดับสูงสุด 1.2 มิลลิเมตร สามารถสรุปได้ว่า การเปลี่ยนแปลงขนาดรัศมีจุมูกมีตไม่มีผลต่อแนวโน้มของอัตราส่วนแรงตัดพลวัต

จากการผลการทดลองทั้งหมด 27 เงื่อนไขการตัด ทำให้ทราบว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อแรงตัดพลวัตคือการสีกหรือของเม็ดมีต ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการตัดไม่มีอิทธิพลต่อแนวโน้มของอัตราส่วนแรงตัดพลวัต จึงสามารถนำอัตราส่วนแรงตัดพลวัตมาพยากรณ์ขนาดการสีกหรือของเม็ดมีตได้

4.3 การ วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแรงตัดพลวัตกับขนาดการสึกหรอ ของเม็ดมีดในทุกเงื่อนไขการตัด



รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงตัดพลวัตกับขนาดการสึกหรอด้านข้างของเม็ดมีดของทุกเงื่อนไขการตัด

จากรูปที่ 4.28 แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) มีค่ามากเมื่อขนาดการสึกหรอด้านข้าง (V_b) มีค่าน้อยและมีแนวโน้มลดลงเมื่อขนาดการสึกหรอด้านข้าง (V_b) มีขนาดโตขึ้น ทั้งนี้ทุกการทดลองพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีลักษณะเดียวกัน กล่าวคือ ไม่ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการตัดไปอย่างไรไม่ได้ส่งผลต่อแนวโน้มของอัตราส่วนแรงตัดพลวัต จึงสามารถสรุปได้ว่า อัตราส่วนแรงตัดพลวัตได้รับอิทธิพลจากขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดโดยตรง และยังสามารถใช้อัตราส่วนแรงตัดพลวัตในการพยากรณ์ขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดโดยจำกัดอิทธิพลของเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไป

จากผลการทดลองข้างต้นทำให้นักวิจัยนี้สามารถพัฒนาสมการพยากรณ์ขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดจากอัตราส่วนแรงตัดพลวัตในกระบวนการกลึงได้

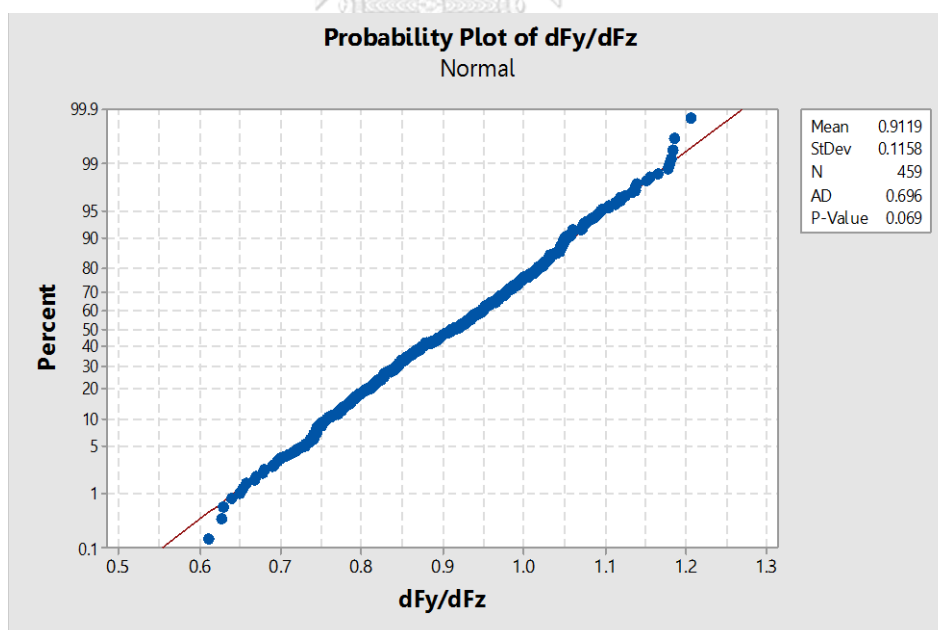
4.4 การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ

การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยหรือตัวแปรอิสระ ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด และรัศมีงูมกมิต กับตัวแปรสนองตอบ ได้แก่ ขนาดการสึกหรอด้านข้างของเม็ดมีด ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการทดลองจำเป็นถูกทดสอบเพื่อหาความเหมาะสมเสียก่อนจึงจะสามารถนำไปวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณได้ โดยหัวข้อที่จะทำการทดสอบมีดังนี้

- 1) การทดสอบการกระจายตัวของข้อมูลแบบแจกแจงปกติ
- 2) การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล
- 3) การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของขนาดการสึกหรอด้านข้าง

4.4.1 การทดสอบการกระจายตัวของข้อมูลแบบแจกแจงปกติ

ก่อนที่จะนำข้อมูลอัตราส่วนแรงตัดเข้ามาพิจารณาในสมการพยากรณ์ จำเป็นต้องทดสอบว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองนั้นมีการแจกแจงแบบปกติ โดยนำข้อมูลมาสร้างกราฟการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability Plot) โดยให้แกนนอนเป็นส่วนตกค้าง (Residual) โดยเรียงจากค่าน้อยไปหามาก และแกนตั้งเป็นค่าความน่าจะเป็นสะสม



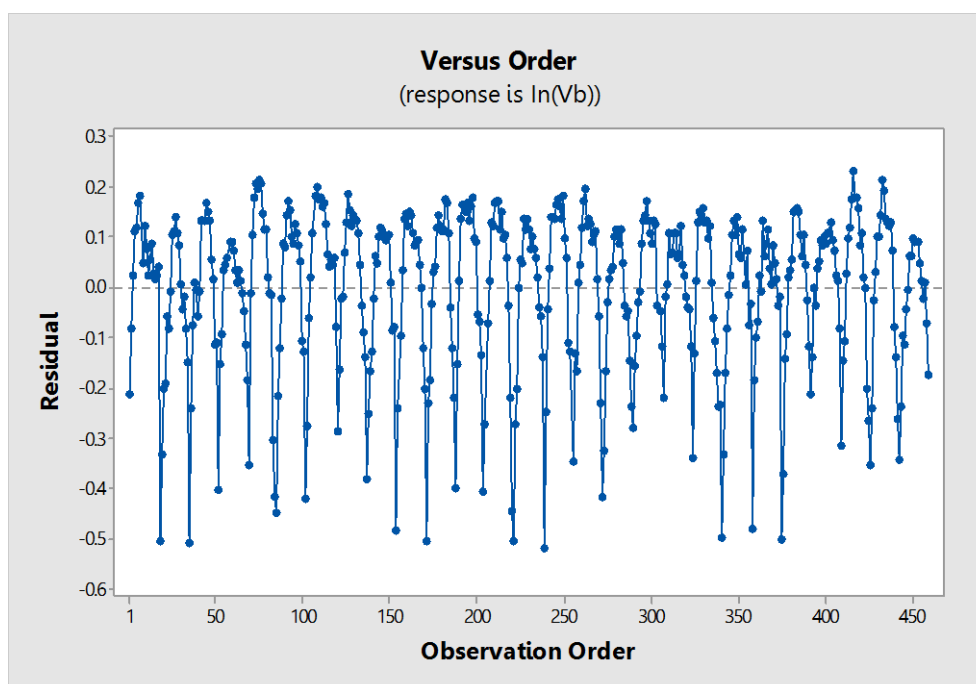
รูปที่ 4.29 กราฟการแจกแจงแบบปกติของข้อมูลอัตราส่วนแรงตัด (dFy/dFz)

จากรูป 4.29 จะเห็นได้ว่าข้อมูลมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง ไม่เกาะกลุ่ม แต่ละจุดอยู่ไกลเคียงกันเป็นส่วนใหญ่ และเมื่อพิจารณาค่า P-value จากการทดสอบความเป็นปกติ (Normality test) มี

ค่าเท่ากับ 0.069 ซึ่งมีความมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงสามารถสรุปได้ว่า ข้อมูลอัตราส่วนแรงตัด (dF_y/dF_z) มีการแจกแจงแบบเป็นปกติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

4.4.2 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

เป็นการทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับลำดับในการทดลอง ค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้งและค่าลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลขนาดความลึกหรือด้านข้าง (V_b) อยู่บนแกนนอน



รูปที่ 4.30 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลขนาดการลึกหรือด้านข้าง (V_b)

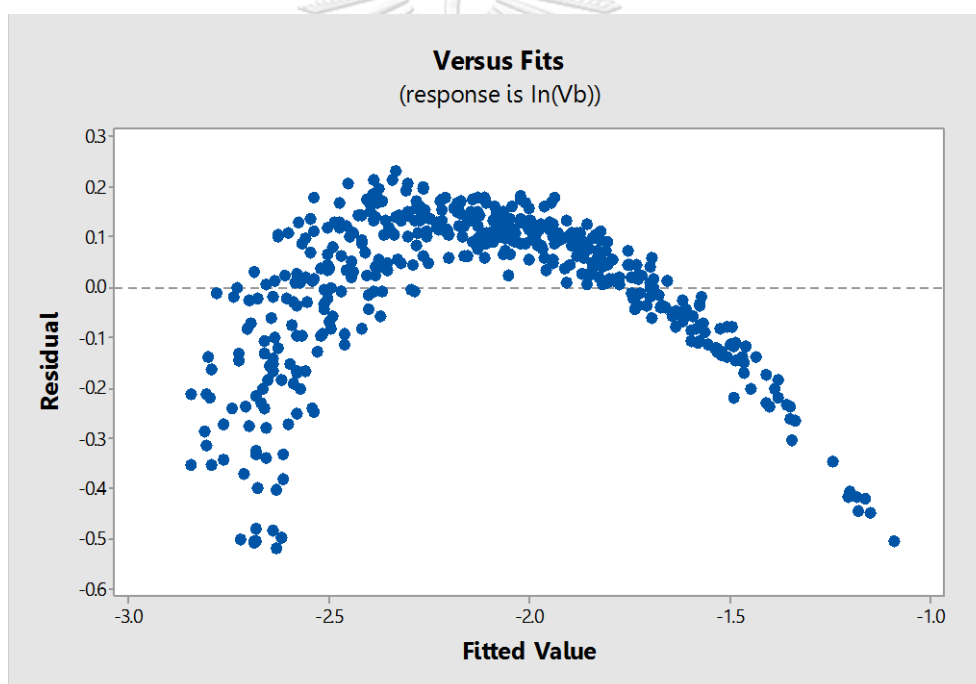
จากรูปที่ 4.30 จะเห็นได้ว่าค่าส่วนตกค้างกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ ค่าส่วนตกค้างส่วนมากกระจายตัวเหนือเส้นศูนย์ ส่วนค่าตกค้างส่วนที่อยู่ต่ำกว่าเส้นศูนย์ เนื่องจากในการทดลองจริงการเก็บข้อมูลขนาดการลึกหรือด้านข้างไม่ได้ขึ้นอยู่กับเวลา ประกอบกับอัตราการลึกหรือของเม็ดมีดในช่วงต้นมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นตรง มีการลึกหรือที่ไวมากจึงทำให้สามารถวัดขนาดการลึกหรือได้ไม่มากนัก หลังจากนั้นอัตราการลึกหรือในช่วงกลางเริ่มคงที่มีลักษณะเชิงเส้นตรง จึงทำให้สามารถเก็บข้อมูลได้ถี่มากขึ้นมีความสม่ำเสมอ แต่ทั้งนี้ยังปัจจัยอื่นที่ทำให้ค่าขนาดการลึกหรือมีความแปรปรวน คือ ในการวัดแต่ละครั้งผู้ทดลองจำเป็นต้องถอดเม็ดมีดออกจากด้ามมีดทุกครั้งจึงอาจทำให้รอยของการลึก

หรือมีการคลาดเคลื่อน ด้วยเหตุนี้เองจึงทำให้ข้อมูลการวัดขนาดการสึกหรอด้านข้างส่วนใหญ่ตกอยู่เหนือเส้นศูนย์

อย่างไรก็ตามแนวโน้มของค่าส่วนตกค้างไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงไป ยังคงมีค่าส่วนตกค้างส่วนใหญ่อยู่เหนือเส้นศูนย์ตลอดทั้งการทดลอง จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลขนาดการสึกหรอด้านข้าง (V_b) ของเม็ดมีดมีความเป็นอิสระ

4.4.3 การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของขนาดการสึกหรอด้านข้าง

เพื่อทดสอบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอไม่มีลักษณะเอียงไปทิศทางใด จึงถือว่ามีความสม่ำเสมอของความแปรปรวน ข้อมูลต้องกระจายตัวรอบค่าศูนย์ที่เส้นกลาง โดยที่แกนนอนเป็นค่าเป็นค่าที่ถูกฟิต (Fitted valued) ส่วนแกนตั้งเป็นค่าส่วนตกค้าง (Residual)



รูปที่ 4.31 การทดสอบความสม่ำเสมอของข้อมูลขนาดการสึกหรอด้านข้าง (V_b)

จากรูที่ 4.31 ข้อมูลขนาดการสึกหรอด้านข้างค่อนข้างมีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอรอบเส้นศูนย์ ทั้งนี้ความแปรปรวนที่เกิดขึ้นมีเหตุผลเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.30 ในการทดลองจะต้องมีการถอดและใส่เม็ดมีดทุกครั้งที่จะทำการวัดขนาดการสึกหรอ จะส่งผลให้ตำแหน่งการสึกหรอด้านข้างคลาดเคลื่อนไปจากตำแหน่งก่อนหน้า ทั้งนี้ตามทฤษฎีแล้วการสึกหรอของเม็ดมีดมีความสัมพันธ์ต่อ

ปัจจัยหรือตัวแปรอิสระ ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมกมิต และอัตราส่วนแรงตัด อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อที่ 4.5.2 ต่อไป

4.5 สมการพยากรณ์ขนาดการสึกหรอของเม็ดมีด

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองทั้งหมด 459 ข้อมูล (แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ก) ซึ่งมีตัวแปรอิสระ 5 ตัว ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมกมิต และอัตราส่วนแรงตัดพลวัต มาทำการวิเคราะห์เพื่อสร้างสมการพยากรณ์ขนาดการสึกหรอด้านข้างเม็ดมีด (Flank wear) ด้วยวิธีการถดถอยแบบพหุคูณ (Multiple linear regression) โดยใช้โปรแกรม Minitab แสดงดังรูปที่ 4.32 จากการวิเคราะห์ทำให้ได้สมการถดถอยในรูปแบบลอการิทึม ดังนี้

$$\ln V_b = 1.119 - 0.7662 \ln V - 0.2540 \ln f - 0.2271 \ln d - 0.0399 \ln R_n - 3.3491 \ln \left(\frac{dF_y}{dF_z} \right) \quad (4.1-1)$$

Regression Analysis: InVb versus InV, Inf, Ind, InRn, In(dFy/dFz)					
Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	5	73.2012	14.6402	585.64	0.000
InV	1	6.8418	6.8418	273.69	0.000
Inf	1	1.5740	1.5740	62.96	0.000
Ind	1	0.2963	0.2963	11.85	0.001
InRn	1	0.1016	0.1016	4.07	0.044
In(dFy/dFz)	1	72.8717	72.8717	2915.01	0.000
Error	453	11.3245	0.0250		
Total	458	84.5257			
Model Summary					
	S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)	
	0.158110	86.60%	86.45%	86.19%	
Coefficients					
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	1.119	0.248	4.51	0.000	
InV	-0.7662	0.0463	-16.54	0.000	1.15
Inf	-0.2540	0.0320	-7.93	0.000	1.02
Ind	-0.2271	0.0659	-3.44	0.001	1.01
InRn	-0.0399	0.0198	-2.02	0.044	1.00
In(dFy/dFz)	-3.3491	0.0620	-53.99	0.000	1.18
Regression Equation					
In(Vb) = 1.119 - 0.7662 InV - 0.2540 Inf - 0.2271 Ind - 0.0399 InRn - 3.3491 In(dFy/dFz)					

รูปที่ 4.32 การวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณของการแปลงลอการิทึมด้วยโปรแกรม Minitab

4.5.1 การทดสอบนัยสำคัญของการถดถอย

เป็นการทดสอบเพื่อพิสูจน์ว่าตัวแปรอิสระ (ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมูกมิต และอัตราส่วนแรงตัดพลวัต) มีความสัมพันธ์กับตัวแปรสนองตอบ (ขนาดการสึกหรอ ด้านข้าง) อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือค่าคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.05 โดยจะใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน สมมติฐานคือ

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta_5 = 0$$

$$H_1: \beta_j \text{ อย่างน้อยหนึ่งตัวไม่เท่ากับศูนย์}$$

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	5	73.2012	14.6402	585.64	0.000
InV	1	6.8418	6.8418	273.69	0.000
Inf	1	1.5740	1.5740	62.96	0.000
Ind	1	0.2963	0.2963	11.85	0.001
InRn	1	0.1016	0.1016	4.07	0.044
In(dFy/dFz)	1	72.8717	72.8717	2915.01	0.000
Error	453	11.3245	0.0250		
Total	458	84.5257			

รูปที่ 4.33 การวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยโปรแกรม Minitab

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยโปรแกรม Minitab พบว่า ค่า P-value ของสมการถดถอยนั้นมีค่าเท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่าค่าวิกฤติจึงทำการปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) ดังนั้นสมการถดถอยที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นสมการพยากรณ์ขนาดการสึกหรอด้านข้างของเม็ดมิตได้

4.5.2 การทดสอบสัมประสิทธิ์ของการถดถอยทีละตัว

เป็นการทดสอบเพื่อพิสูจน์ว่าตัวแปรอิสระ (ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมูกมิต และอัตราส่วนแรงตัดพลวัต) มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงตัวแปรสนองตอบอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95% หรือค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.05 โดยดูจากค่าสัมประสิทธิ์ว่ามีความแตกต่างกับศูนย์หรือไม่ สมมติฐานคือ

$$H_0: \beta_j = 0$$

$$H_1: \beta_j \neq 0$$

Coefficients						
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF	
Constant	1.119	0.248	4.51	0.000		
InV	-0.7662	0.0463	-16.54	0.000	1.15	
Inf	-0.2540	0.0320	-7.93	0.000	1.02	
Ind	-0.2271	0.0659	-3.44	0.001	1.01	
InRn	-0.0399	0.0198	-2.02	0.044	1.00	
In(dFy/dFz)	-3.3491	0.0620	-53.99	0.000	1.18	

รูปที่ 4.34 ค่าสัมประสิทธิ์ของการถดถอยด้วยโปรแกรม Minitab

จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficient) ของทุกตัวแปรอิสระไม่เท่ากับศูนย์ จึงปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) ดังนั้น ตัวแปรอิสระทุกตัวมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรสนองตอบและไม่สามารถตัดใดตัวหนึ่งออกจากสมการถดถอยได้

4.5.3 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2)

จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R-sq เท่ากับ 86.60% ซึ่งมีค่าค่อนข้างสูงและ R-sq(adj) เท่ากับ 86.45% ซึ่งมีความมากกว่า 80% หมายความว่าตัวแปรอิสระ ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีงมูก และอัตราส่วนแรงตัดพลวัต ในสมการถดถอยสามารถเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรตอบสนอง ได้แก่ ขนาดการสึกหรอด้านข้าง ได้เป็นอย่างดี อีกทั้งยังสามารถอธิบายถึงความสามารถของสมการถดถอย โดยที่ค่า P-value < 0.05 หรือที่ความเชื่อมั่น 95% พบว่าสมการถดถอยที่ได้มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้สำหรับพยากรณ์ขนาดการสึกหรอด้านข้าง

สามารถแปลงรูปสมการพยากรณ์ขนาดการสึกหรอด้านข้างจากรูปแบบลอการิทึมให้อยู่ในรูปของสมการเอกซ์โพเนนเชียลได้ดังนี้

$$V_b = 3.0618 \cdot V^{-0.7662} \cdot f^{-0.2540} \cdot d^{-0.2271} \cdot R_n^{-0.0399} \cdot \left(\frac{dFy}{dFz}\right)^{-3.3491} \quad (4.1-2)$$

จากสมการที่ 4.1-2 ทำให้ทราบว่า การสึกหรอจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด และรัศมีงมูกมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสังเกตได้จากค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระแต่ละตัว (ความเร็วตัด : V , อัตราการป้อนตัด : f , ความลึกตัด : d , รัศมีงมูกมีด : R_n และอัตราส่วนแรงตัด : $\frac{dFy}{dFz}$) ในสมการที่ 4.1-2 ค่าสัมประสิทธิ์อยู่ในรูปแบบเลขยกกำลัง และค่าสัมประสิทธิ์นี้แสดงถึงอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนอง (ขนาดการสึกหรอด้านข้าง : V_b) ทั้งทางด้านปริมาณและทิศทาง ค่า

สัมบูรณ์ของสัมประสิทธิ์จะบอกถึงปริมาณอิทธิพลของตัวแปรอิสระต่อตัวแปรสนองตอบ และเครื่องหมายของเลขยกกำลังจะบอกถึงทิศทาง กล่าวคือ ค่าสัมบูรณ์สัมประสิทธิ์ของอัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีค่ามากที่สุด (3.3491) หมายความว่าเป็นตัวแปรอิสระที่มีอิทธิพลเยอะที่สุดต่อค่าขนาดการสึกหรอด้านข้าง ในทางกลับกันค่าสัมบูรณ์สัมประสิทธิ์ของรัศมีจุมกมีค่าน้อยที่สุด (0.0399) หมายความว่าเป็นตัวแปรอิสระที่มีอิทธิพลน้อยสุดต่อขนาดการสึกหรอด้านข้าง

อย่างไรก็ตาม ค่าสัมประสิทธิ์ของทุกตัวแปรอิสระมีค่าเป็นลบ สามารถอธิบายโดยแยกพิจารณาได้ดังนี้

1) ความเร็วตัดที่เพิ่มขึ้น โดยที่อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด และรัศมีจุมกมีค่าคงที่ คงที่ ส่งผลให้แรงตัดหลักพลวัตมีค่ามากขึ้น เนื่องจากแรงตัดหลักพลวัตมีทิศทางเดียวกับความเร็วตัดหรือการหมุนของชิ้นงาน ดังนั้นอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) จึงมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบค่ายกกำลังสัมบูรณ์ของอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (3.3491) กับค่ายกกำลังสัมบูรณ์ของความเร็วตัด (0.7662) ทำให้ทราบว่าขนาดการสึกหรอเปลี่ยนแปลงไปตามความเร็วตัด แต่อิทธิพลยังคงน้อยกว่าอัตราส่วนแรงตัดพลวัต

2) อัตราการป้อนตัดที่เพิ่มขึ้น โดยที่ความเร็วตัด ความลึกตัด และรัศมีจุมกมีค่าคงที่ คงที่ พื้นที่การตัดเพิ่มขึ้น เป็นเหตุให้การตัดเป็นไปได้อย่าง เกิดแนวโน้มของการสั่นสะเทือน ผิวชิ้นงานมีความหยาบมากขึ้น ส่งผลให้แรงตัดพลวัตที่ใช้เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามแรงป้อนตัดพลวัตมีค่าเพิ่มขึ้นน้อยกว่าแรงตัดหลักพลวัต ดังนั้นอัตราส่วนแรงตัดพลวัตจึงมีค่าลดลง

3) ความลึกตัดที่เพิ่มขึ้น โดยที่ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด และรัศมีจุมกมีค่าคงที่ คงที่ พื้นที่การตัดมาก การตัดจึงยากขึ้น เกิดการสั่นสะเทือนของชิ้นงานและเม็ดมีด นำไปสู่ผิวชิ้นงานมีความขรุขระมากขึ้น ดังนั้นแรงที่ใช้ในการตัดจึงเพิ่มขึ้น โดยที่แรงป้อนตัดพลวัตเพิ่มขึ้นแต่มีค่าน้อยกว่าแรงตัดหลักพลวัต จึงทำให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีค่าน้อยลง

4) รัศมีจุมกมีค่าใหญ่ขึ้น โดยที่ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด และความลึกตัดถูกควบคุมให้คงที่ จะทำให้พื้นที่สัมผัสระหว่างชิ้นงานกับเม็ดมีดเพิ่มขึ้น การตัดเป็นไปได้อย่าง แรงตัดที่ใช้เพิ่มขึ้น แรงตัดหลักพลวัตมีค่ามากกว่าแรงป้อนตัดพลวัต ดังนั้นอัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีค่าน้อยลง อย่างไรก็ตาม ค่ายกกำลังสัมบูรณ์ของรัศมีจุมกมีค่าน้อยมาก (0.0399) เมื่อเทียบกับตัวแปรอื่น แต่ก็ยังคงมีอิทธิพลต่อการสึกหรออย่างมีนัยสำคัญ

4.6 การทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้องของสมการพยากรณ์ขนาดการสึกหรอ

เพื่อทดสอบความแม่นยำของสมการพยากรณ์ที่ได้และกำหนดให้สามารถมีค่าความคลาดเคลื่อนได้ $\pm 10\%$ โดยทำการทดลองใหม่โดยใช้เงื่อนไขการตัดนอกช่วงการทดลองเดิม ดังตารางที่ 4.1 ทำให้ได้จำนวนการทดลองทั้งหมด 8 การทดลอง ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขการตัดใหม่นอกช่วงการทดลองเดิม

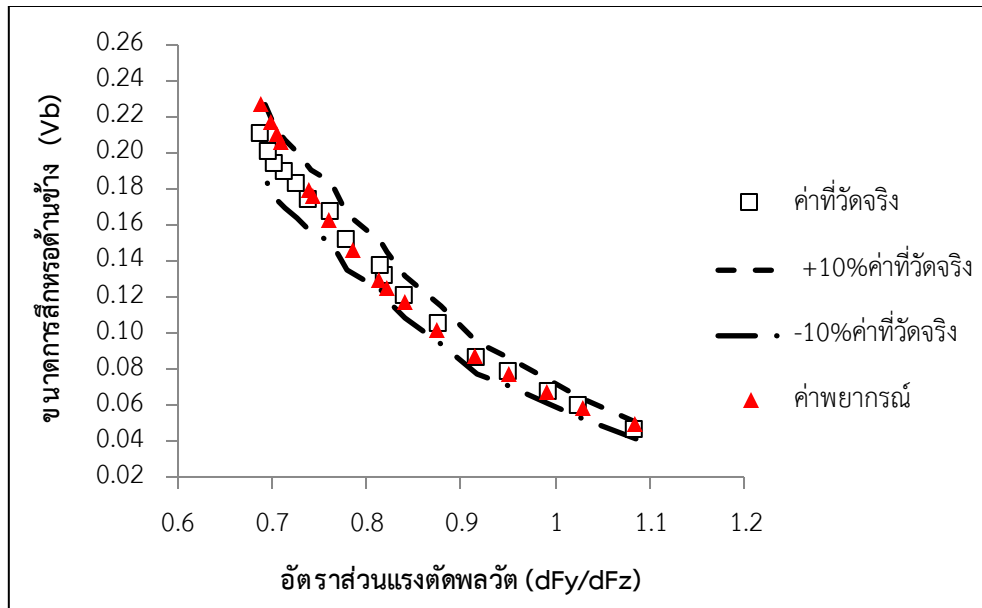
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	140	260
อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	0.05	0.25
ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	0.8	1.6
รัศมีจุมุมมีด (มิลลิเมตร)	0.8	

ตารางที่ 4.2 จำนวนการทดลองใหม่นอกช่วงการทดลองเดิม

ลำดับ	ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีจุมุมมีด (มิลลิเมตร)
1	260	0.25	0.8	0.8
2	140	0.05	0.8	0.8
3	260	0.05	1.6	0.8
4	260	0.25	1.6	0.8
5	140	0.05	1.6	0.8
6	140	0.25	1.6	0.8
7	260	0.05	0.8	0.8
8	140	0.25	0.8	0.8

4.6.1 ผลการทดลองนอกช่วงการทดลองเดิมเพื่อทดสอบความถูกต้องของสมการพยากรณ์

ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองโดยใช้เงื่อนไขการตัดใหม่ตามตารางที่ 4.2 และไม่มีการเปลี่ยนแปลงวิธีดำเนินการทดลองอื่นๆ สามารถอธิบายได้จากรูปที่ 4.30 ถึง 4.37



รูปที่ 4.35 กราฟผลการทดลองที่ 1 ทดสอบความแม่นยำสมการพยากรณ์ขนาดการสีกหรือด้านข้าง ภายใต้ ความเร็วตัด 260 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร และรัศมีงูมูกมีด 0.8 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 4.35 เส้นค่าพยากรณ์ขนาดการสีกหรือด้านข้างได้มาจากการคำนวณด้วย สมการพยากรณ์ (4.1-2) โดยการป้อนค่าเงื่อนไขการตัด ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด และรัศมีงูมูกมีด ตามตารางการทดลองที่ 4.2 ลำดับที่ 1 และค่าอัตราส่วนแรงตัด ส่วนเส้นค่าที่วัดจริง ได้มาจากการทดลองตัดและวัดขนาดการสีกหรือด้านข้างด้วยกล้องไมโครสโคป จากนั้นนำมาคำนวณค่าความคลาดเคลื่อน $\pm 10\%$ และนำมาเปรียบเทียบขอบเขต จะเห็นได้ว่า ค่าพยากรณ์ขนาดการสีกหรือด้านข้างนั้นตกอยู่ในขอบเขตความคลาดเคลื่อน นอกจากนี้ยังสามารถค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (MAPE) ได้จากสมการที่ 4.2-1

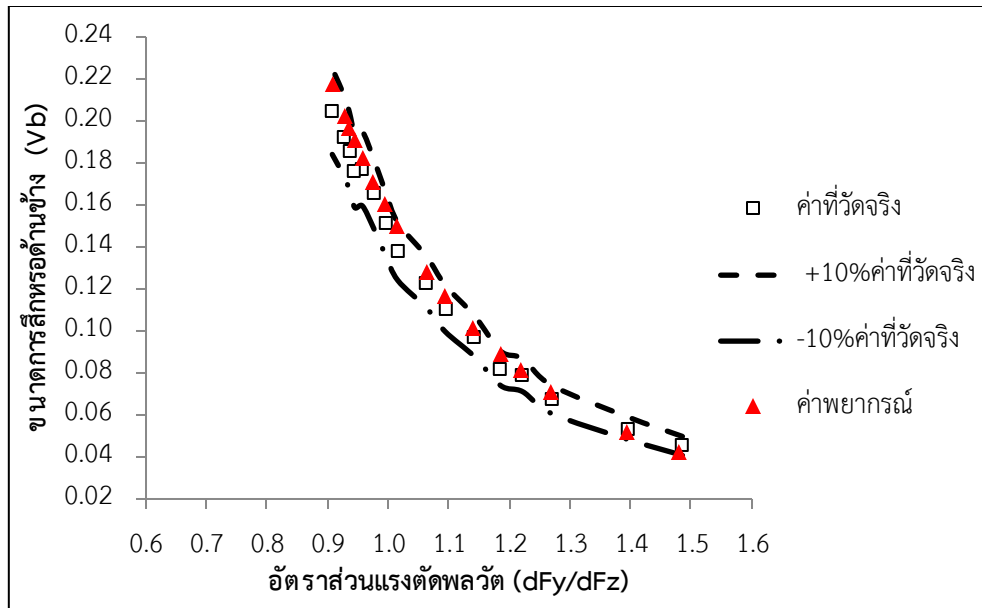
$$MAPE = \left(\frac{100}{n}\right) \sum_{t=1}^n \left| \frac{A_t - F_t}{A_t} \right| \quad (4.2-1)$$

โดยที่ n คือ จำนวนข้อมูลที่เก็บทั้งหมด

A_t คือ ค่าขนาดการสีกหรือด้านข้างที่วัดจริง

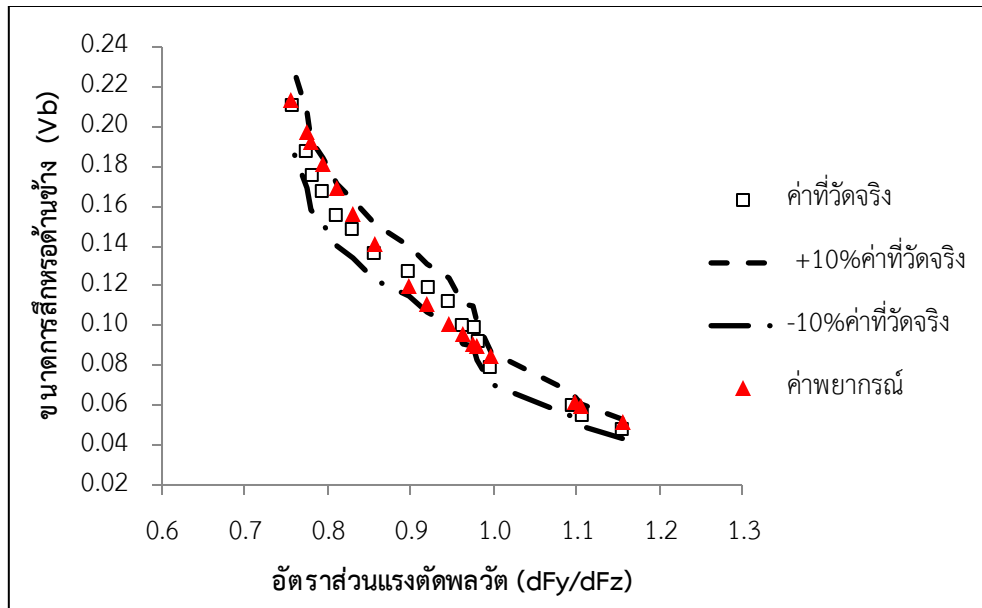
F_t คือ ค่าขนาดการสีกหรือด้านข้างที่ได้จากสมการพยากรณ์

ดังนั้น ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของการทดลองที่ 1 เท่ากับ 4.14% กล่าวคือ ความแม่นยำเฉลี่ยเท่ากับ 95.86%



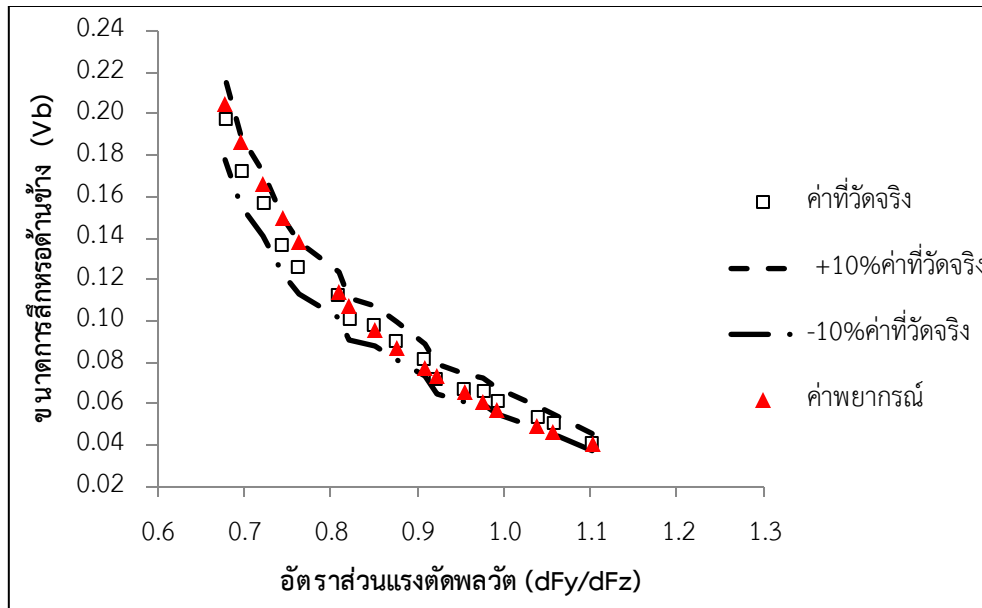
รูปที่ 4.36 กราฟผลการทดลองที่ 2 ทดสอบความแม่นยำสมการพยากรณ์ขนาดการสีกหรือด้านข้างภายใต้ ความเร็วตัด 140 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.05 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร และรัศมีจุมุมมีด 0.8 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 4.36 เมื่อเทียบค่าจากสมการพยากรณ์กับค่าขนาดการสีกหรือด้านข้างที่วัดจริงพบว่า ค่าที่คำนวณได้จากสมการยังอยู่ในขอบเขตความคลาดเคลื่อน $\pm 10\%$ ของค่าที่วัดจริง และค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของการทดลองที่ 2 เท่ากับ 5.42% หรือมีความแม่นยำเฉลี่ยเท่ากับ 94.58%



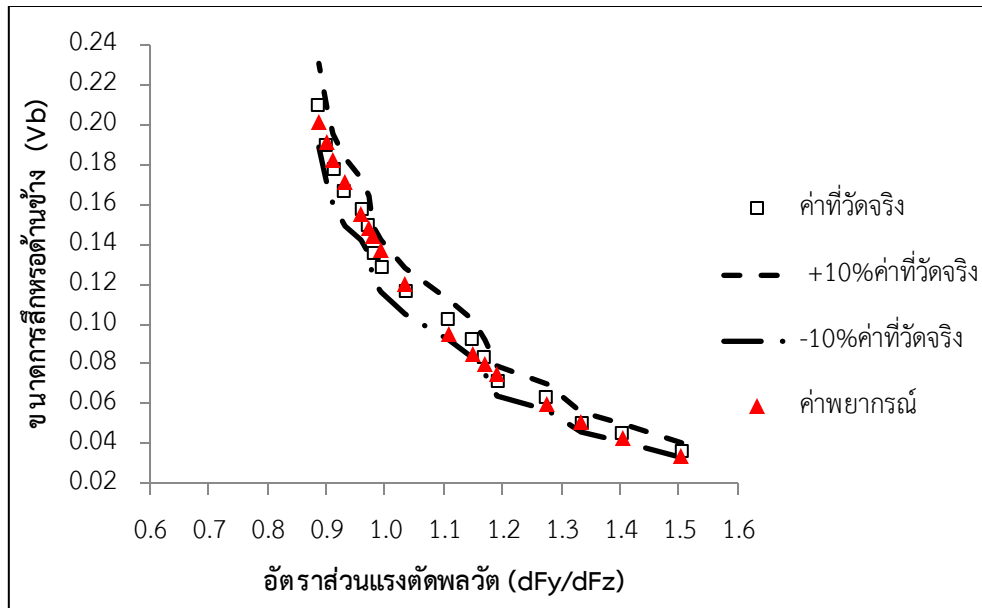
รูปที่ 4.37 กราฟผลการทดลองที่ 3 ทดสอบความแม่นยำสมการพยากรณ์ขนาดการสีกหรือด้านข้าง ภายใต้ ความเร็วตัด 260 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.05 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.6 มิลลิเมตร และรัศมีงูมิต 0.8 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 4.37 พบว่าค่าที่ได้จากสมการพยากรณ์ยังคงอยู่ในขอบเขตของค่าคลาดเคลื่อน $\pm 10\%$ ของค่าขนาดการสีกหรือด้านข้างที่ได้จากการทดลองตัดชิ้นงานจริง ตลอดช่วงของอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) และมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 6.15% หรือมีค่าความแม่นยำเฉลี่ยเท่ากับ 93.85%



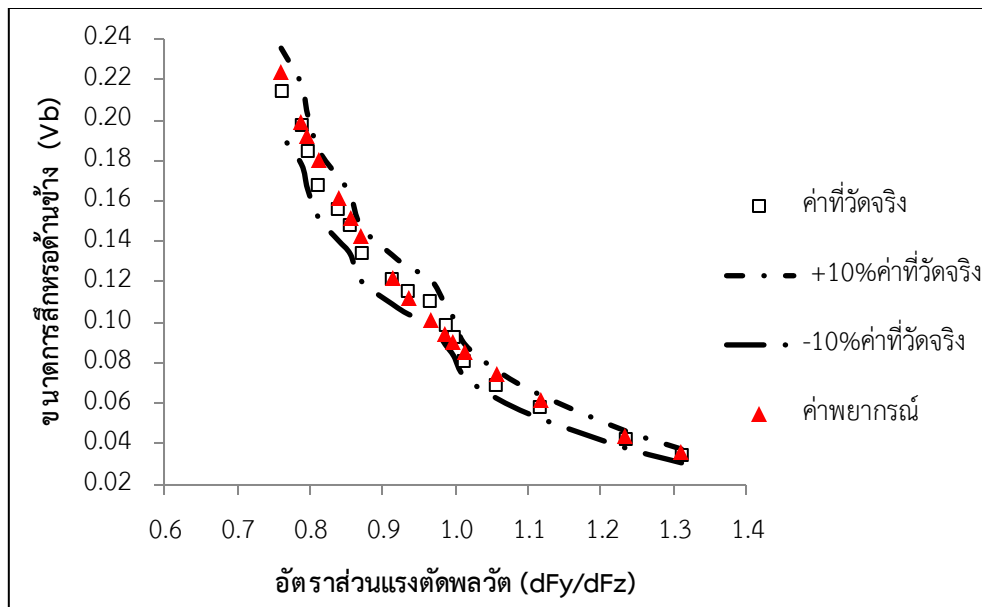
รูปที่ 4.38 กราฟผลการทดลองที่ 4 ทดสอบความแม่นยำสมการพยากรณ์ขนาดการสีกหรือด้านข้าง ภายใต้ ความเร็วตัด 260 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.6 มิลลิเมตร และรัศมีงูมมีด 0.8 มิลลิเมตร

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.38 พบว่าค่าขนาดการสีกหรือด้านข้างที่ได้จากสมการพยากรณ์อยู่ในขอบเขตค่าความคลาดเคลื่อน $\pm 10\%$ ของค่าที่วัดได้จากการทดลองตัดชิ้นงานจริง ตลอดช่วงอัตราส่วนแรงตัดพลวัต และค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 5.57% หรือมีค่าความแม่นยำเท่ากับ 94.43%



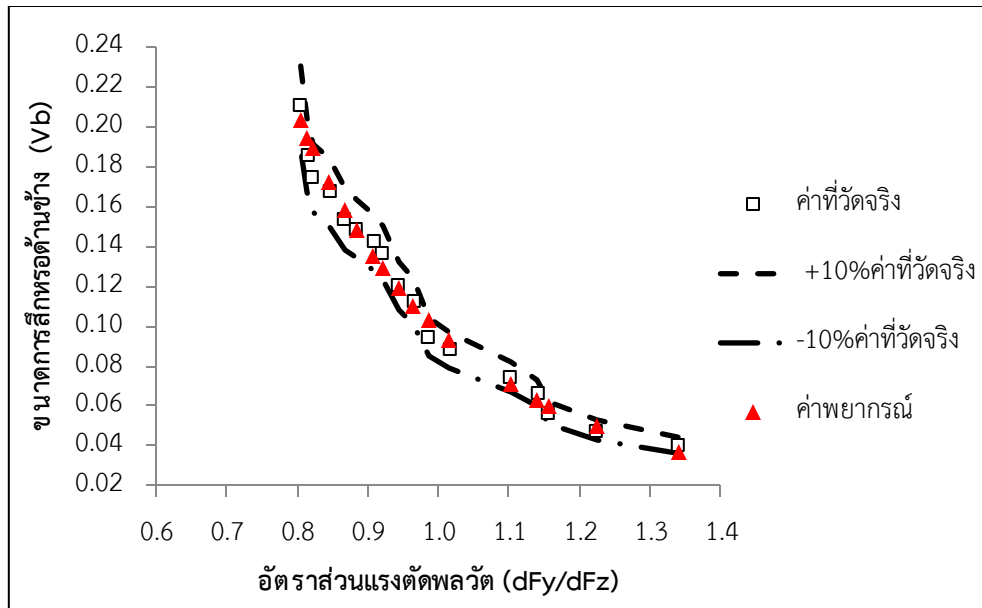
รูปที่ 4.39 กราฟผลการทดลองที่ 5 ทดสอบความแม่นยำสมการพยากรณ์ขนาดการสีกหรือด้านข้าง ภายใต้ ความเร็วตัด 140 เมตร/นาที่ อัตราการป้อนตัด 0.05 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.6 มิลลิเมตร และรัศมีงูมมีด 0.8 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 4.39 พบว่าค่าขนาดการสีกหรือด้านข้างที่ได้จากสมการพยากรณ์ตกอยู่ในขอบเขตของค่าความคลาดเคลื่อน $\pm 10\%$ ของค่าขนาดการสีกหรือที่วัดได้จากการทดลองตัดชิ้นงานจริงตลอดช่วงอัตราส่วนแรงตัด และค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 4.27% หรือค่าความแม่นยำเท่ากับ 95.73%



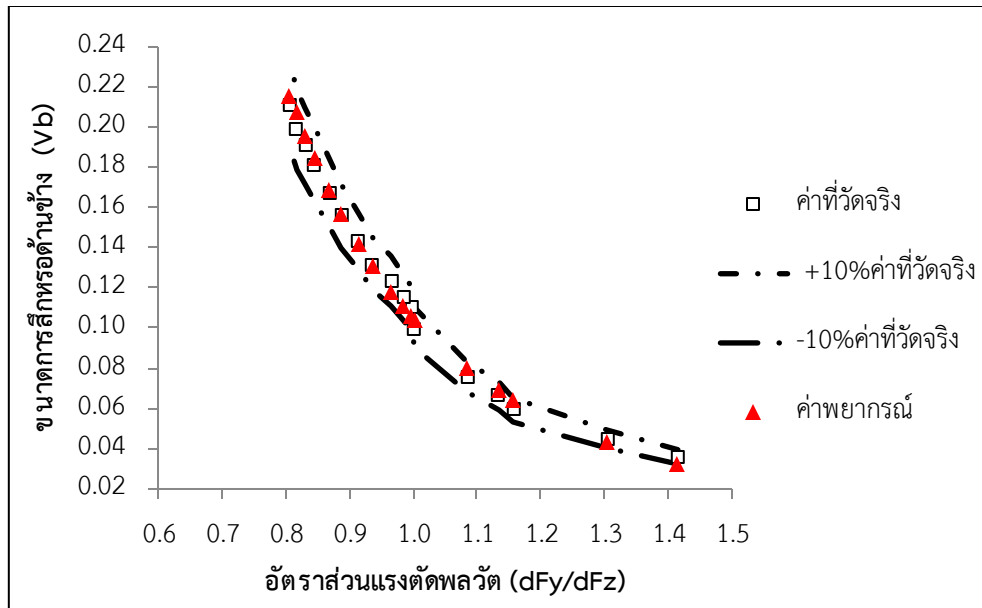
รูปที่ 4.40 กราฟผลการทดลองที่ 6 ทดสอบความแม่นยำสมการพยากรณ์ขนาดการสีกหรือด้านข้าง ภายใต้ ความเร็วตัด 140 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.6 มิลลิเมตร และรัศมีงูมิต 0.8 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 4.40 พบว่าค่าขนาดการสีกหรือด้านข้างที่คำนวณได้จากสมการพยากรณ์ตกอยู่ในช่วงค่าความคลาดเคลื่อน $\pm 10\%$ ของค่าขนาดการสีกหรือด้านข้างที่วัดได้จากการทดลองตัดจริง และค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 4.59% หรือค่าความแม่นยำเท่ากับ 95.41%



รูปที่ 4.41 กราฟผลการทดลองที่ 7 ทดสอบความแม่นยำสมการพยากรณ์ขนาดการสีกหรือด้านข้าง ภายใต้ ความเร็วตัด 260 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.05 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร และรัศมีงูมิต 0.8 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 4.41 พบว่าค่าขนาดการสีกหรือด้านข้างที่คำนวณได้จากสมการพยากรณ์ตกอยู่ในช่วงค่าความคลาดเคลื่อน $\pm 10\%$ ของค่าขนาดการสีกหรือด้านข้างที่ได้จากการทดลองตัดชิ้นงานจริงตลอดทั้งช่วงอัตราส่วนแรงตัด และค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 4.76% หรือค่าความแม่นยำเฉลี่ยเท่ากับ 95.24%



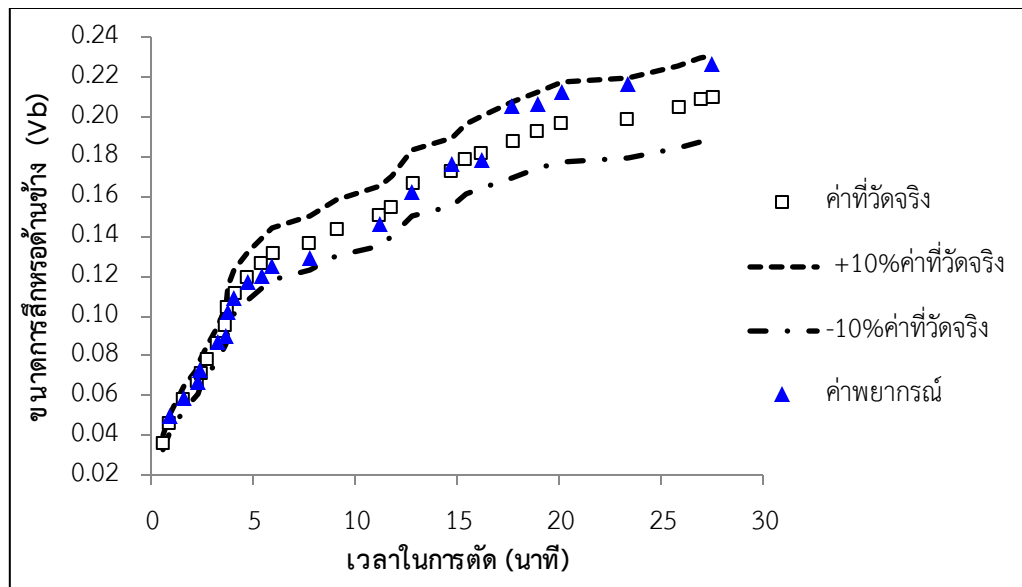
รูปที่ 4.42 กราฟผลการทดลองที่ 8 ทดสอบความแม่นยำสมการพยากรณ์ขนาดการสีกหรือด้านข้าง ภายใต้ ความเร็วตัด 140 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร และรัศมีงูมูกมีด 0.8 มิลลิเมตร

ผลของการทดลองที่ 8 แสดงให้เห็นว่า ค่าขนาดการสีกหรือด้านข้างที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการพยากรณ์ตกอยู่ในขอบเขตค่าความคลาดเคลื่อน $\pm 10\%$ ของค่าการสีกหรือด้านข้างที่วัดได้จากการทดลองตัดจริง และค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 3.72% หรือค่าความแม่นยำเท่ากับ 96.28%

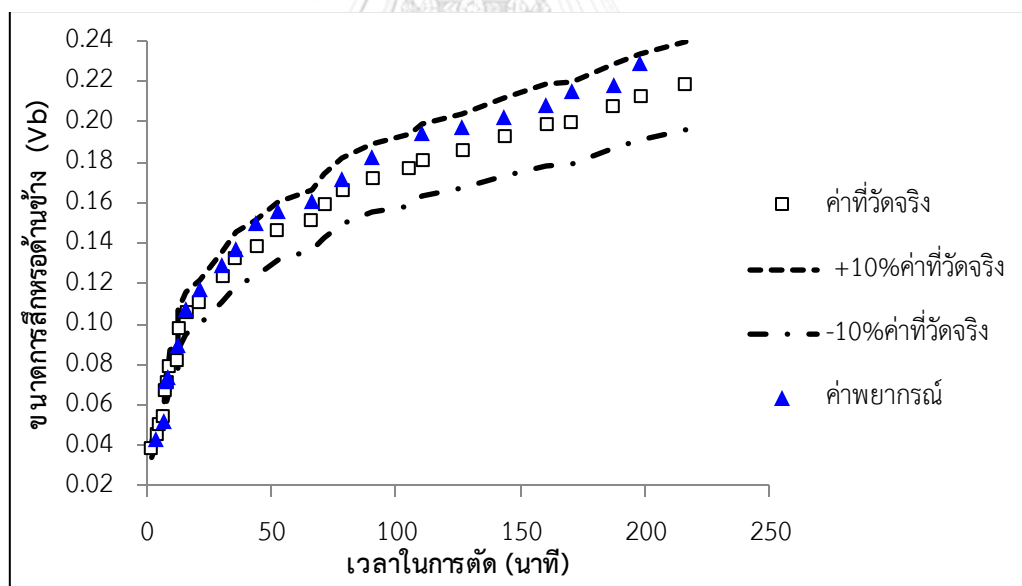
จากรูปที่ 4.35 ถึง 4.42 ผลการทดลองตัดชิ้นงานนอกช่วงการทดลองเดิม สามารถสรุปได้ว่า สมการพยากรณ์ขนาดการสีกหรือด้านข้าง (Vb) ที่ได้มีความเหมาะสมและสามารถให้ความแม่นยำมากกว่า 90% โดยที่ค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน $\pm 10\%$ ต่อไปจะเป็นการทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้องของสมการพยากรณ์ขนาดการสีกหรือด้านข้าง (Vb) เทียบกับเวลาในการตัด

4.6.2 ผลการทดลองเพื่อทดสอบความถูกต้องของสมการพยากรณ์เทียบกับเวลาในการตัด

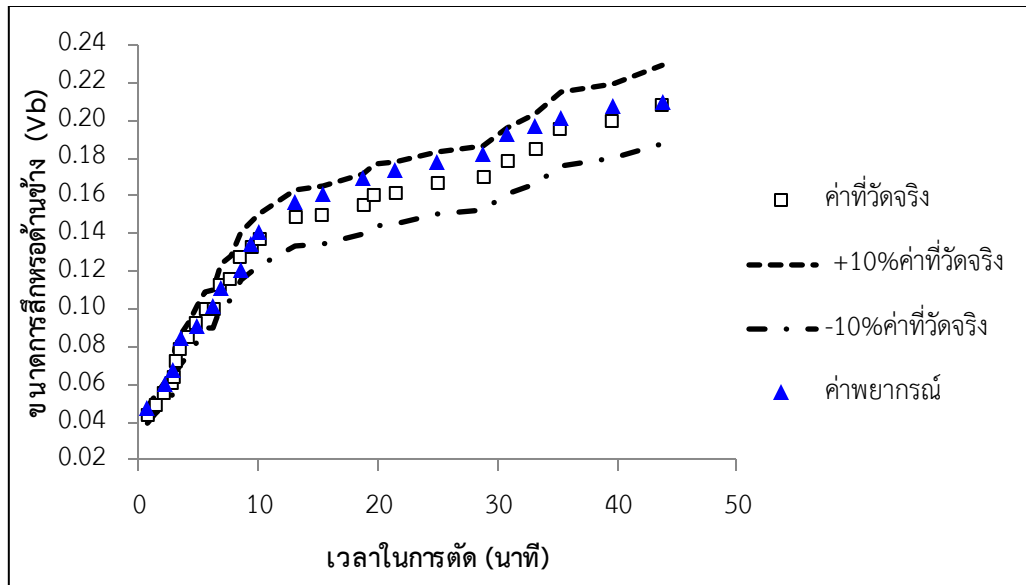
ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองโดยใช้เงื่อนไขการตัดใหม่ตามตารางที่ 4.2 และไม่มีมีการเปลี่ยนแปลงวิธีดำเนินการทดลองอื่นๆ สามารถอธิบายได้จากรูปที่ 4.42 ถึงรูปที่ 4.49



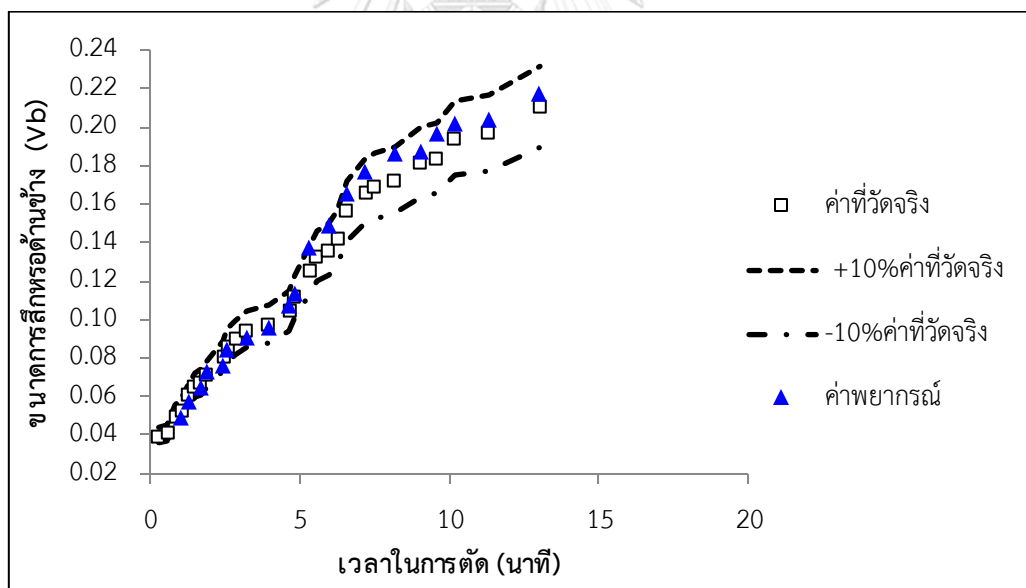
รูปที่ 4.43 กราฟผลการทดลองที่ 1 ทดสอบความแม่นยำสมการพยากรณ์ขนาดการสึกหรอด้านข้าง เทียบกับเวลาในการตัดภายใต้ ความเร็วตัด 260 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร และรัศมีงูมมีด 0.8 มิลลิเมตร



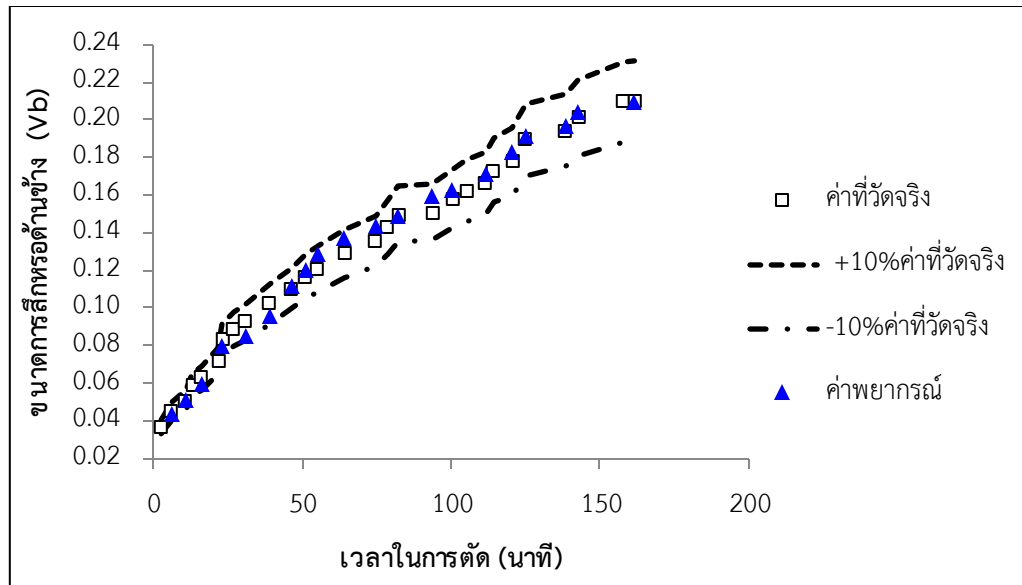
รูปที่ 4.44 กราฟผลการทดลองที่ 2 ทดสอบความแม่นยำสมการพยากรณ์ขนาดการสึกหรอด้านข้าง เทียบกับเวลาในการตัดภายใต้ ความเร็วตัด 140 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.05 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร และรัศมีงูมมีด 0.8 มิลลิเมตร



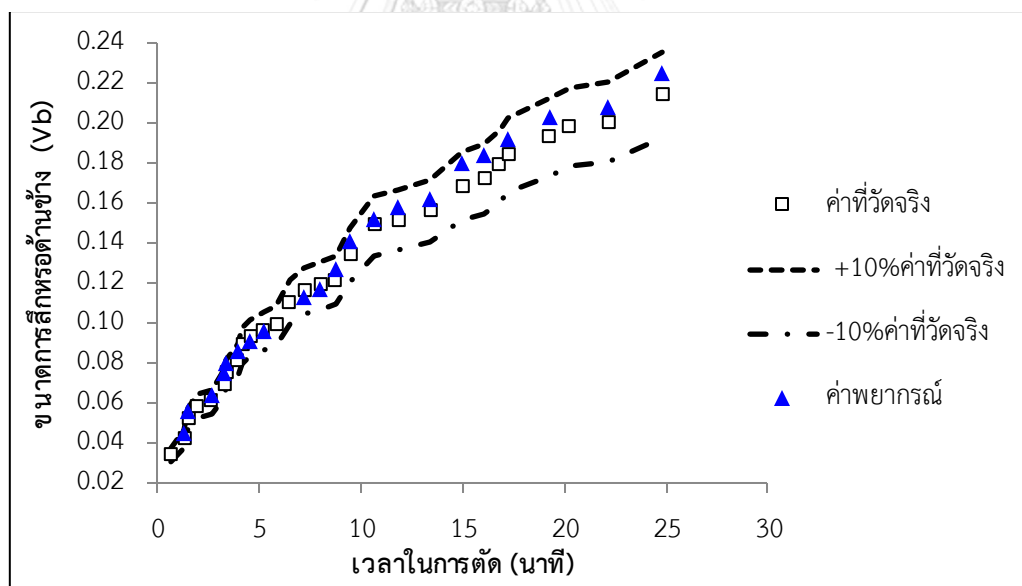
รูปที่ 4.45 กราฟผลการทดลองที่ 3 ทดสอบความแม่นยำสมการพยากรณ์ขนาดการสึกหรอด้านข้าง เทียบกับเวลาในการตัดภายใต้ ความเร็วตัด 260 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.05 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.6 มิลลิเมตร และรัศมีจุมุมมีด 0.8 มิลลิเมตร



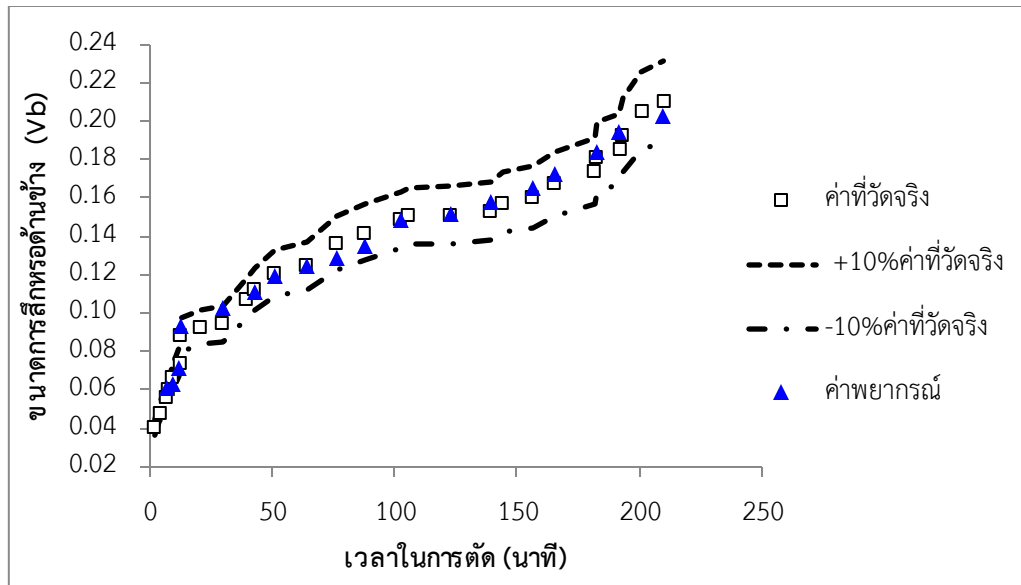
รูปที่ 4.46 กราฟผลการทดลองที่ 4 ทดสอบความแม่นยำสมการพยากรณ์ขนาดการสึกหรอด้านข้าง เทียบกับเวลาในการตัดภายใต้ ความเร็วตัด 260 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.6 มิลลิเมตร และรัศมีจุมุมมีด 0.8 มิลลิเมตร



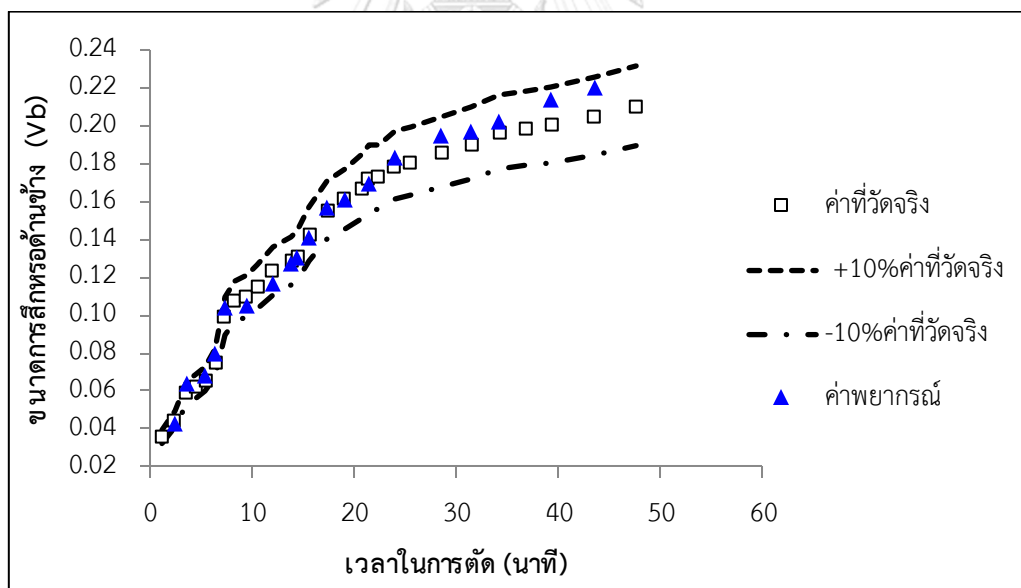
รูปที่ 4.47 กราฟผลการทดลองที่ 5 ทดสอบความแม่นยำสมการพยากรณ์ขนาดการลิกหรือด้านข้าง เทียบกับเวลาในการตัดภายใต้ ความเร็วตัด 140 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.05 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.6 มิลลิเมตร และรัศมีงูมมีด 0.8 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.48 กราฟผลการทดลองที่ 6 ทดสอบความแม่นยำสมการพยากรณ์ขนาดการลิกหรือด้านข้าง เทียบกับเวลาในการตัดภายใต้ ความเร็วตัด 140 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.6 มิลลิเมตร และรัศมีงูมมีด 0.8 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.49 กราฟผลการทดลองที่ 7 ทดสอบความแม่นยำสมการพยากรณ์ขนาดการสึกหรอด้านข้าง
เทียบกับเวลาในการตัดภายใต้ ความเร็วตัด 260 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.05 มิลลิเมตรต่อ
รอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร และรัศมีงูมมีด 0.8 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.50 กราฟผลการทดลองที่ 8 ทดสอบความแม่นยำสมการพยากรณ์ขนาดการสึกหรอด้านข้าง
คมตัด (Vb) เทียบกับเวลาในการตัดภายใต้ ความเร็วตัด 140 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.25
มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร และรัศมีงูมมีด 0.8 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 4.43 ถึง 4.50 เป็นการนำขนาดการสึกหรอด้านข้างคมตัด (Vb) เทียบกับเวลาใน
การตัด พบว่า ค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการพยากรณ์ขนาดการสึกหรอดอกอยู่ในขอบเขตค่า ความ

คลาดเคลื่อน $\pm 10\%$ ของค่าที่ได้จากการทดลองตัดชิ้นงานจริงเช่นเดียวกับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสมการพยากรณ์ขนาดการสึกหรอที่ได้จากงานวิจัย สามารถใช้ในการพยากรณ์ได้อย่างแม่นยำไม่ว่าจะมีการเปลี่ยนเงื่อนไขการตัดไปอย่างไรก็ตาม

นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่า อัตราการสึกหรอด้านข้างคมตัด (V_b) มีลักษณะไม่คงที่ ซึ่งสามารถสังเกตได้จากระยะเวลาในการตัดที่ทำให้ขนาดการสึกหรอด้านข้างคมตัดเท่ากับ 0.2 มิลลิเมตร ของแต่ละการทดลองไม่เท่ากัน ตัวอย่างเช่น เมื่อพิจารณารูปที่ 4.44 การทดลองที่ 2 มีอัตราการสึกหรอช้าที่สุด โดยขนาดการสึกหรอด้านข้างคมตัดเท่ากับ 0.2 มิลลิเมตร ที่ระยะเวลาในการตัดเท่ากับ 188 นาที และรูปที่ 4.46 การทดลองที่ 4 มีอัตราการสึกหรอด้านข้างคมตัดเร็วที่สุด โดยขนาดการสึกหรอด้านข้างคมตัดเท่ากับ 0.2 มิลลิเมตร ที่ระยะเวลาในการตัดเท่ากับ 13 นาที



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความสัมพันธ์ของขนาดการสีกหรือด้านข้างคมตัด (Flank wear, V_b) ของเม็ดมีดเคลือบผิวคาร์ไบด์กับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) ที่เกิดขึ้นภายใต้เงื่อนไขการตัดต่างๆ ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด และรัศมีงูมมีด ที่กำหนดโดยใช้การเปลี่ยนเวฟเล็ต (Wavelet) สำหรับเลือกสัญญาณแรงตัดในช่วงของการสีกหรือ อีกทั้งอัตราส่วนแรงตัดพลวัตยังสามารถใช้สำหรับการพยากรณ์ขนาดการสีกหรือของเม็ดมีดได้ ยิ่งไปกว่านั้นการแปลงเวฟเล็ต ยังเพิ่มความแม่นยำให้สมการพยากรณ์ขนาดการสีกหรืออีกทางหนึ่ง

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองตัดชิ้นงาน 27 การทดลอง โดยใช้ปัจจัยทั้งหมด 4 ตัว ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด และรัศมีงูมมีด ในกระบวนการกลึงแบบแห้ง ขณะที่ทำการกลึงแรงตัดพลวัตถูกวัดค่าไปพร้อมกับการวัดขนาดการสีกหรือด้านข้างคมตัดอย่างต่อเนื่อง สามารถสรุปได้ว่าอัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีความสัมพันธ์กับขนาดการสีกหรือด้านข้างคมตัด อัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีค่าน้อยลงเมื่อขนาดการสีกหรือด้านข้างตัดใหญ่มากขึ้น ซึ่งมีสาเหตุจาก เมื่อเม็ดมีดเริ่มเกิดการสีกหรือทำให้ผิวเม็ดมีดเกิดความขรุขระ คมตัดเริ่มทื่อ จึงทำให้ผิวสัมผัสระหว่างเม็ดมีดกับชิ้นเพิ่มขึ้น การตัดทำได้ยากขึ้น นำไปสู่การสั่นสะเทือน (Chatter) แรงตัดพลวัตที่ใช้จึงมากขึ้น โดยเฉพาะแรงตัดหน้าพลวัต (dF_z) และแรงป้อนตัดพลวัต (dF_y) แต่แรงตัดหลักพลวัตได้รับอิทธิพลมากกว่าแรงป้อนตัดพลวัต ดังนั้น อัตราส่วนแรงตัดพลวัตจึงลดลง นอกจากนี้ปัจจัยที่ใช้ในการทดลองแต่ละตัวมีอิทธิต่ออัตราการสีกหรือไม่เท่ากัน ความเร็วตัดเป็นปัจจัยที่มีผลต่อขนาดการสีกหรือเป็นอย่างมากรองจากอัตราส่วนแรงตัดพลวัต ความเร็วตัดที่สูง ทำให้แรงตัดหลักพลวัตมีค่าสูง เพราะแรงตัดหลักพลวัตมีทิศทางเดียวกับความเร็วตัดหรือการหมุนของชิ้นงาน ช่วยเร่งอัตราการสีกหรือให้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่วนอัตราการป้อนตัดเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลรองลงมาจกความเร็วตัด อัตราการป้อนตัดที่สูงช่วยเพิ่มพื้นที่การตัด แรงที่ใช้จึงมีค่าสูง การสีกหรือของเม็ดมีดมากขึ้น มีแนวโน้มที่จะเกิดการสั่นสะเทือนสูง ส่งผลให้ผิวสำเร็จของชิ้นงานมีความขรุขระ ปัจจัยต่อไปที่มีอิทธิพลรองลงมาคือความลึกตัด ความลึกตัดที่มาก ทำให้พื้นที่การตัดเพิ่มขึ้น การตัดเป็นไปได้อย่าง แรงตัดจึงต้องสูงขึ้น การสีกหรือเกิดได้ไวขึ้น

ปัจจัยตัวสุดท้ายที่มีอิทธิพลต่อการสึกหรอและแรงตัดพลวัตน้อยที่สุดคือรัศมีจุมกมิต เมื่อรัศมีจุมกมิต มีขนาดใหญ่ทำให้พื้นที่การตัดเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อแรงตัดพลวัตที่ใช้มากตามไปด้วย การสึกหรอจึงเพิ่มขึ้น

จากการเปรียบเทียบแนวโน้มอัตราส่วนแรงตัดพลวัตของปัจจัยที่มีการเปลี่ยนแปลงไป พบว่า แนวโน้มของอัตราส่วนแรงตัดพลวัตไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามปัจจัยหรือเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนไป ฉะนั้นอัตราส่วนแรงตัดพลวัตจึงสามารถนำไปพยากรณ์ขนาดการสึกหรอด้านข้างคมตัดได้

การสร้างสมการพยากรณ์ขนาดการสึกหรอด้านข้างคมตัดโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่าง ขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดกับตัวแปรอิสระ ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมกมิต และอัตราส่วนแรงตัดพลวัต ที่พัฒนาขึ้นโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณเพื่อวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละปัจจัย รูปแบบของสมการประยุกต์ฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential) เนื่องจากอัตราการสึกหรอของเม็ดมีดไม่เป็นเชิงเส้นตรงตามทฤษฎีสมการการสึกหรอของเทย์เลอร์ [19] สมการพยากรณ์ขนาดการสึกหรอด้านข้างของเม็ดมีดที่ได้จากงานวิจัยนี้ ได้แก่

$$V_b = 3.0618 \cdot V^{-0.7662} \cdot f^{-0.2540} \cdot d^{-0.2271} \cdot R_n^{-0.0399} \cdot \left(\frac{dFy}{dFz}\right)^{-3.3491} \quad (5.1-1)$$

จากสมการ 5.1-1 แรงตัดพลวัตมีค่าสัมประสิทธิ์มากที่สุด รองลงมาคือความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกตัดและรัศมีจุมกมิต จากนั้นสมการพยากรณ์ขนาดการสึกหรอด้านข้างถูกนำไปทดสอบเพื่อหาค่าแม่นยำโดยทำการทดลองตัดชิ้นงานใหม่และใช้เงื่อนไขการตัดนอกช่วง ผลปรากฏว่า ค่าขนาดการสึกหรอที่ได้จากการพยากรณ์ทุกการทดลองตกอยู่ในค่าความคลาดเคลื่อน $\pm 10\%$ ของค่าการตัดจริง ค่าความแม่นยำเฉลี่ยต่ำที่สุดเท่ากับ 93.85% ภายใต้เงื่อนไขการตัดที่ ความเร็วตัด 260 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.05 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.6 มิลลิเมตร และรัศมีจุมกมิต 0.8 มิลลิเมตร

5.2 อภิปรายผลการวิจัย

ตัวแปรอิสระที่ใช้ในการพัฒนาสมการพยากรณ์ขนาดการสึกหรอของเม็ดมีด ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมกมิต และอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) สามารถใช้อธิบายขนาดการสึกหรอเมื่อเงื่อนไขการตัดเปลี่ยนแปลงไปอย่างมีนัยสำคัญ จากผลการทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้างกับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต ประกอบกับผลการ

วิเคราะห์ถดถอยพหุคูณ ทำให้ทราบว่าปัจจัยอิสระที่มีผลต่อขนาดการสึกหรอมากที่สุด คือ อัตราส่วนแรงตัดพลวัต ดังนั้น อัตราส่วนแรงตัดพลวัตจึงถูกนำมาเป็นส่วนหนึ่งในสมการพยากรณ์

งานวิจัยนี้ได้นำการออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบท์เคนมาใช้เพื่อลดจำนวนการทดลองลงเหลือ 27 การทดลอง จากแฟคทอเรียล 81 การทดลอง ตามทฤษฎีแล้วการใช้การออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบท์เคนสามารถให้ประสิทธิภาพได้เท่าเทียมกับแฟคทอเรียล [28] แต่เฉพาะกรณี 3 ปัจจัยเท่านั้น งานวิจัยนี้ใช้ปัจจัยในการทดลองทั้งหมด 4 ปัจจัย ดังนั้น การใช้การออกแบบบล็อกซ์-เบท์เคนจึงมีส่วนทำให้ผลการทดลองมีค่าความแม่นยำน้อยลง แต่การใช้การวิเคราะห์แรงตัดพลวัตด้วยการแปลงเวฟเว็ตสามารถเสริมค่าความแม่นยำให้เพิ่มมากขึ้นได้

การวิเคราะห์แรงตัดพลวัตโดยการแปลงเวฟเว็ตสามารถเพิ่มความแม่นยำให้กับสมการพยากรณ์ได้มากขึ้นโดยดูจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) (86.45%) แต่ยังคงมีค่าความคลาดเคลื่อน (13.55%) อาจเกิดจากการถอดเม็ดเม็ดเข้า-ออกบ่อยครั้ง อุณหภูมิของชิ้นงานและเม็ดเม็ดที่เพิ่มสูงขึ้นขณะตัดจึงทำให้ชิ้นงานอ่อนนุ่ม ส่งผลต่อแรงตัดที่ใช้จะน้อยกว่า การตัดในอุณหภูมิปกติ รวมไปถึงการวัดขนาดรอยสึกด้วยกล้องไมโครสโคปผ่านเลนส์ตา ดังนั้น จึงมีการตรวจสอบความถูกต้องและความแม่นยำของสมการพยากรณ์โดยใช้เงื่อนไขการตัดนอกช่วง ปรากฏว่า ค่าที่คำนวณได้จากสมการพยากรณ์ขนาดการสึกหรอตกอยู่ในช่วงค่าความคลาดเคลื่อน $\pm 10\%$ ของค่าการทดลองตัดจริง ทั้งหมด แสดงให้เห็นว่า สมการพยากรณ์ที่ได้มีความถูกต้องและแม่นยำอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

5.3 ข้อจำกัดและอุปสรรค

5.3.1 ข้อจำกัดและอุปสรรคด้านเครื่องมือและอุปกรณ์

1. อุปกรณ์สำหรับส่องเพื่อวัดขนาดการสึกหรอของเม็ดเม็ดในงานวิจัยนี้ใช้กล้องไมโครสโคปรุ่น NIKON MM-60 ซึ่งไม่สามารถส่งสัญญาณภาพจากกล้องวิดีโอไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ได้ เนื่องจากเกิดการขำรุดและไม่สามารถซ่อมได้เพราะปัจจุบันผู้ผลิตได้เลิกผลิตอะไหล่ อีกทั้งการซื้อกล้องวิดีโอตัวใหม่มาทดแทนมีราคาสูงมาก จึงทำให้ผู้วิจัยใช้วิธีการวัดโดยส่องภาพเลนส์ตาและวัดระยะโดยการเลื่อนแท่นวางชิ้นงานจากนั้นอ่านค่าที่เคาน์เตอร์ เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ค่าขนาดการสึกหรอเกิดความคลาดเคลื่อน

2. ด้ามมีดเกิดการชำรุดแตกหักระหว่างการทดลอง เนื่องจากผู้วิจัยตั้งค่าเครื่องซีเอ็นซีผิดพลาดเป็นเหตุให้มีดตัดวิ่งไปชนกับชิ้นงาน จึงต้องทำการสั่งซื้อด้ามมีดใหม่ทำให้เสียเวลาและเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น

3. บางครั้งเครื่องซีเอ็นซีไม่สามารถใช้งานได้ชั่วคราวและมีข้อความเตือนขึ้นว่า ความดันตก (Pressure drop) จึงทำให้ผู้วิจัยต้องทำการตรวจสอบเครื่องควบคุมปั๊มลม จากนั้นทำการ Reset เครื่องใหม่ จึงทำให้เสียเวลาในการทดลอง

5.3.2 ข้อจำกัดและอุปสรรคด้านวิธีการทดลอง

1. ผลการทดลองและสมการพยากรณ์ขนาดการสึกหรอด้านข้างที่ได้จากงานวิจัยนี้ใช้สำหรับกระบวนการกลึงด้วยเม็ดมีดคาร์ไบด์เคลือบผิวและ ชิ้นงานเหล็กกล้าเกรด S45C ในการตัดแบบแห้ง ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงชนิดของเม็ดมีดหรือวัสดุของชิ้นงานควรมีการทดลองและพัฒนาสมการพยากรณ์ใหม่

2. การออกแบบการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์เคน(Box-Behken) อาจไม่ครอบคลุมทุกเงื่อนไขการตัด และมีค่าต่ำกว่าการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (CCD) ในกรณีที่มีปัจจัยอิสระมากกว่า 4 ตัว แต่ในการทดลองจริงไม่สามารถนำการทดลองแบบส่วนประสมกลางมาใช้ได้ เนื่องจากต้องเพิ่มระดับของปัจจัยที่ $+\alpha$ และ $-\alpha$ ซึ่งจะไม่สามารถหาขนาดรัศมีงูมิตของเม็ดมีดเคลือบผิวคาร์ไบด์ที่ระดับเหล่านี้ได้

3. ในการทดลองจำเป็นต้องติดตั้งไดนามิเตอร์ ออสซิลโลสโคป เครื่องขยายสัญญาณแรงตัดใหม่ทุกวันที่ทำการทดลอง อีกทั้งการติดตั้งไดนาโมมิเตอร์มีความยุ่งยากเนื่องจากผู้วิจัยต้องถอดปากกาจับป้อมมีดทั้งหมด 3 ตัว ได้แก่ เบอร์ 1,2 และ 12 ของเครื่องซีเอ็นซีออกก่อนจึงจะสามารถติดตั้งไดนาโมมิเตอร์เข้าแทนที่ปากกาจับป้อมมีดเบอร์ 1 ได้ จึงทำให้ผู้วิจัยต้องเผื่อเวลาไว้ประมาณ 1 ชั่วโมงก่อนเริ่มการทดลองจริง

4. การวัดขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดผู้วิจัยจำเป็นต้องถอดเม็ดมีดจากด้ามมีดทุกครั้งเนื่องจากกล้องไมโครสโคปติดตั้งไว้อีกห้องทดลอง หลังจากวัดขนาดเรียบร้อยแล้วนำเม็ดมีดมาใส่ จากนั้นต้องทำการเซตศูนย์มีดตัดใหม่ทุกครั้ง เป็นสาเหตุให้รอยสึกไม่อยู่ในตำแหน่งเดิมส่งผลให้ขนาดการสึกหรอด้านข้างที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อนและใช้เวลาเป็นอย่างมาก

5. บางเงื่อนไขการทดลองที่ใช้ความเร็วตัดไม่สูง อัตราการป้อนตัดต่ำ ประกอบกับความลึกตัดที่น้อย ทำให้เกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่อง ในขณะที่การทดลองเศษโลหะไม่ขาดออกจากกันทำให้เศษ

โลหะเหล่านั้นไปพันชิ้นงานและด้ามมีดจึงทำให้ผู้วิจัยต้องหยุดเครื่องซีเอ็นซีชั่วคราวเพื่อเอาเศษโลหะ ออกบ่อยครั้ง

5.4 ข้อเสนอแนะ

1. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองมีน้ำหนักมาก ดังนั้นผู้วิจัยควรดูแลร่างกายให้แข็งแรงและขณะตัดชิ้นงานหรือเดินเครื่องจักรจะต้องอยู่หน้าเครื่องตลอดเวลา เมื่อเกิดเหตุฉุกเฉิน ควรกดปุ่ม Emergency stop ทันที และไม่ควรทำการทดลองเมื่อรู้สึกอ่อนล้า ไม่สบายหรือมีอาการ รับประทานยาที่ทำให้รู้สึกง่วงนอน

2. ควรทำความสะอาดเครื่องมือและอุปกรณ์อยู่เสมอ ก่อนการติดตั้งไดนาโมมิเตอร์ควรใช้ลม เป่าเอาเศษโลหะตรงป้อมมีดออกก่อน ในขณะที่ทำการทดลองไม่ควรปล่อยให้เศษโลหะติดที่ไดนาโม มิเตอร์ เซนเซอร์ของเครื่องซีเอ็นซีเพราะจะทำให้ผลการทดลองคลาดเคลื่อนได้

3. สมการพยากรณ์ขนาดการสึกหรอที่ได้จากงานวิจัยนี้ถูกเพิ่มความแม่นยำโดยใช้การ วิเคราะห์แรงตัดพลวัตด้วยการแปลงเวฟเล็ต (Wavelet) สำหรับกระบวนการกลึง ฉะนั้นแนวทางการ วิจัยต่อไปสามารถนำการแปลงเวฟเว็ตไปใช้วิเคราะห์แรงตัดได้กับกระบวนการกัด (Milling)

4. ในการวิจัยครั้งต่อไปควรลองนำวิธีออกแบบการทดลองส่วนประสมกลาง (CCD) เพื่อลด จำนวนการทดลองสำหรับตัวแปรอิสระหรือเงื่อนไขการตัดที่มากกว่า 4 ปัจจัยขึ้นไป เพื่อเพิ่มความ แม่นยำจากการวิเคราะห์ผล ทั้งนี้จะต้องพิจารณาปัจจัยที่สามารถใช้ระดับในการทดลองได้ครอบคลุมถึง $-\alpha$ และ $+\alpha$ ยกตัวอย่างในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 แนวทางการเลือกปัจจัยและระดับสำหรับการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสม
กลาง

	-2 ($-\alpha$)	-1	0	1	2 ($+\alpha$)
ความเร็วตัด (เมตร/นาที)	100	150	200	250	300
อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25
ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	0.8	1	1.2	1.4	1.8
รัศมีงูมมีต (มิลลิเมตร)	0.4	0.8	1.2	1.6	2.0

หมายเหตุ เม็ดมีดที่ใช้รหัส TNMG 1604XX CA55055

5. กรณีที่ไม่สามารถเลือกปัจจัยที่สามารถครอบคลุมทุกระดับของการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (CCD) ได้ให้เลือกใช้วิธีออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเพื่อพัฒนาสมการพยากรณ์ขนาดของเม็ดมีดให้มีความแม่นยำมากขึ้น

6. ในอนาคตงานวิจัยสำหรับการพยากรณ์การสึกหรอควรพิจารณาค่าความขรุขระผิวชิ้นงานควบคู่ไปด้วย เนื่องจากค่าความขรุขระผิวของชิ้นงานส่วนได้รับผลกระทบจากการสึกหรอของเม็ดมีด

รายการอ้างอิง

- [1] สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. แผนแม่บทการพัฒนาอุตสาหกรรมไทย พ.ศ. 2555-2574. 2554 [cited 2559 4 กุมภาพันธ์]; Available from: <http://www.oie.go.th/academic/แผนแม่บทพัฒนาอุตสาหกรรมไทย-พศ-2555-2574>.
- [2] สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. ดัชนีผลผลิตอุตสาหกรรม (ถ่วงน้ำหนักมูลค่าผลผลิต). 2554 [cited 2559 24 มีนาคม]; Available from: <http://www.oie.go.th/academic/index>.
- [3] สถาบันยานยนต์. รายงานการศึกษาโครงสร้างการผลิตชิ้นส่วนของอุตสาหกรรมยานยนต์ไทย. โครงการสารสนเทศยานยนต์ปี 2557 2557; Available from: www.thaiauto.or.th.
- [4] สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ, ศักดิ์คา ศรีอนุศาสตร์, and ปิยะ ศิริธรรมปิติ, การตรวจติดตามกระบวนการกลึงเหล็กกล้าคาร์บอนโดยการใช้สารหล่อเย็นน้อยที่สุด. Proceedings of NAC2007, NSTDA Annual Conference, 2007.
- [5] สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ, วิศวกรรมการผลิตขั้นสูง. 1st ed. 2555, กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 80-85.
- [6] ขวลิต วงศ์ตั้งถิ่นฐาน, การทำนายขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดคาร์ไบด์เคลือบผิวในการกลึงเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C. 2557, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [7] S., K. and S. S., *Manufacturing Engineering and Technology*, ed. 5. 2006, Singapore : Pearson Prentice Hall.
- [8] Siddhpura, A. and R. Paurobally, *A review of flank wear prediction methods for tool condition*. Springer-Verlag London Limited, 2012.
- [9] ธนาธิป, ช., การประมาณขนาดการสึกหรอของเม็ดกัดหัวบอลในกระบวนการกัด. 2556, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [10] เฉลิมพล คล้ายนิล, พงศกร หลีตระกูล, and พงษ์พันธ์ ราชภัคดี, การประมาณการสึกหรอของเม็ดมีดกลึงด้วยโครงข่ายประสาทเทียม. การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม, 2555.
- [11] Jeyakumar, S., K. Marimuthu, and T. Ramachandran, *Prediction of cutting force, tool wear and surface roughness of Al6061/SiC composite for end milling operations using RSM*. Journal of Mechanical Science and Technology, 2013. 27(9): p. 2813-2822.

- [12] Tangjitsitcharoen, S., P. Thesniyom, and S. Ratanakuakangwan, *Prediction of surface roughness in ball-end milling process by utilizing dynamic cutting force ratio*. Journal of Intelligent Manufacturing, 2014.
- [13] Tangjitsitcharoen, S., T. Saksri, and S. Ratanakuakangwan, *Advance in chatter detection in ball end milling process by utilizing wavelet transform*. Journal of Intelligent Manufacturing, 2013. 26(3): p. 485-499.
- [14] Tangjitsitcharoen, S. and N. Pongsathornwiwat, *Development of chatter detection in milling processes*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012. 65(5-8): p. 919-927.
- [15] Somkait, T., *Development of Intelligent Monitoring and Identification of Cutting States by Spectrum Analysis for CNC Turning* Journal of Advance Mechanical Design, System, and Manufacturing 2008. 2(3): p. 366-377.
- [16] ทองพรรณราย มัยโชติ, การทำนายความขรุขระของผิวชิ้นงานในกระบวนการกลึงโดยการประยุกต์การแปลงเวฟเลทของแรงตัดพลวัต. 2558, วิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [17] Scheffer C, et al., *Development of tool wear-monitoring system for hard turning*. Int J Mach Tool Manuf, 2003. 43: p. 973-985.
- [18] Zhu K, Wong YS, and Hong GS, *Wavelet analysis of sensor signals for tool condition monitoring : a review and some new results*. Int J Mach Tool Manuf, 2009. 49: p. 537-553.
- [19] Mikell, P.G., *FUNDAMENTALS OF MODERN MANUFACTURING*. Third ed. Materials, Processes, and Systems, ed. P.o.l.a.S.E.L. University. 2007, Asia: John Wiley & Sons (Asian) Pte Ltd.
- [20] Azmi Mohamed, Abdul Halim Esa, and M.A. Ayub, *Roundness Measurement of Cylindrical Part by Machine Vision, in International Conference on Electrical Control and Computer Engineering Pahang, Malaysia, 2011*.
- [21] Altintas, Y., *Manufacturing Automation : Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design*. 2000: Cambridge University Press.
- [22] Tangjitsitcharoen, S., *Advance in detection system to improve the stability and capability of CNC turning process*. Journal of Intelligent Manufacturing, 2009. 22(6): p. 843-852.

- [23] เดือนพรรณ จันทนา, การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความกลมของชิ้นงานในกระบวนการกลึงกับแรงตัด. 2557: ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [24] Tangjitsitcharoen, S. and T. Moriwaki, *Intelligent identification of turning process based on pattern recognition of cutting states*. Journal of Materials Processing Technology, 2007. 192-193: p. 491-496.
- [25] จักร จันทลักษณ์, การแปลงฟูริเยร์อย่างรวดเร็ว (FFT) และการประยุกต์ใช้เพื่อวินิจฉัยสภาพเครื่องจักร ตอนที่ 1 : แกนอ้างอิงเทียบทางความถี่ด้วยการวิเคราะห์แบบฟูริเยร์. วารสารพัฒนาเทคนิค 15, 2545: p. 17-22.
- [26] J.K., *Application of wavelet transform technique to detect tool failure in turning operations*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2005.
- [27] นภัสสวงศ์ โอสถศิลป์, เอกสารประกอบการสอนวิชาการปรับปรุงคุณภาพรหัสวิชา 2104516.2558, กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [28] ปารเมศ ชูติมา, การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. 2545, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [29] ธารรัตน์ ชาญสูงเนิน, การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความตรงของชิ้นงานกับแรงตัดในกระบวนการกลึง. 2557, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [30] Moriwaki, T., T. Shibusaka, and S. Tangjitsitcharoen, *Development of in-process Tool Wear Monitoring System for CNC Turning*. JSME International Journal, 2004. 47.
- [31] Suresh, R. and S. Basavarajappa, *Effect of Process Parameters on Tool Wear and Surface Roughness during Turning of Hardened Steel with Coated Ceramic Tool*. Procedia Materials Science, 2014. 5: p. 1450-1459.
- [32] Rahman Rashid, R.A., et al., *Tool wear mechanisms involved in crater formation on uncoated carbide tool when machining Ti6Al4V alloy*. Springer-Verlag London, 2015.

- [33] Shalaby, M.A., et al., *Wear mechanisms of several cutting tool materials in hard turning of high carbon–chromium tool steel*. Tribology International, 2014. 70: p. 148-154.
- [34] Meyer, R., J. Köhler, and B. Denkena, *Influence of the tool corner radius on the tool wear and process forces during hard turning*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011. 58(9-12): p. 933-940.
- [35] สมชาติ อารยพิทยา, การสืบหาเงื่อนไขการตัดโลหะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการตัดแบบแห้ง. 2552, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [36] Somkait, T., *In-process monitoring and detection of chip formation and chatter for CNC turning*. Journal of Materials Processing Technology, 2009. 209: p. 4682-4688.
- [37] Wongtangthinthan, C. and S. Tangjitsitcharoen, *A study of relation between tool wear and dynamic cutting force ratio in CNC turning process*, in *Industrial Engineering Network Conference*. 30-31 October 2014.
- [38] กัญยกานต์ สมานมิตร, การทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานในกระบวนการโดยการประยุกต์ใช้แรงตัดพลวัตในการกลึงเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C ด้วยใบมีดคาร์ไบด์เคลือบผิว. 2556: ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

ตารางผลการทดลองทั้งหมด ของการสึกหรอด้านข้างและอัตราส่วนแรงตัดของทุกเงื่อนไขการตัด

ลำดับ	ความเร็ว ตัด (เมตร/ นาที)	อัตราการ ป้อนตัด (มิลลิเมตร/ รอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงมูก มีด (มิลลิเมตร)	ขนาดการ สึกหรอ ด้านข้าง (มิลลิเมตร)	อัตราส่วน แรงตัด พลังวัต
1	150	0.15	1	0.8	0.0490	1.1872
2	150	0.15	1	0.8	0.0618	1.1517
3	150	0.15	1	0.8	0.0753	1.1203
4	150	0.15	1	0.8	0.0883	1.0966
5	150	0.15	1	0.8	0.0921	1.0851
6	150	0.15	1	0.8	0.0998	1.0753
7	150	0.15	1	0.8	0.1096	1.0501
8	150	0.15	1	0.8	0.1104	1.0061
9	150	0.15	1	0.8	0.1221	0.9989
10	150	0.15	1	0.8	0.1288	0.9696
11	150	0.15	1	0.8	0.1312	0.9485
12	150	0.15	1	0.8	0.1426	0.9339
13	150	0.15	1	0.8	0.1503	0.9284
14	150	0.15	1	0.8	0.1583	0.8982
15	150	0.15	1	0.8	0.1690	0.8778
16	150	0.15	1	0.8	0.1820	0.8605
17	150	0.15	1	0.8	0.1909	0.8528
18	150	0.15	1.4	0.8	0.0410	1.1205
19	150	0.15	1.4	0.8	0.0491	1.1188
20	150	0.15	1.4	0.8	0.0567	1.1136
21	150	0.15	1.4	0.8	0.0620	1.0878
22	150	0.15	1.4	0.8	0.0783	1.0563

ลำดับ	ความเร็ว ตัด (เมตร/ นาที)	อัตราการ ป้อนตัด (มิลลิเมตร/ รอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูม มีด (มิลลิเมตร)	ขนาดการ สึกหรอ ด้านข้าง (มิลลิเมตร)	อัตราส่วน แรงตัด พลังวัตต์
23	150	0.15	1.4	0.8	0.0820	1.0345
24	150	0.15	1.4	0.8	0.0910	1.0243
25	150	0.15	1.4	0.8	0.1070	1.0094
26	150	0.15	1.4	0.8	0.1170	0.9853
27	150	0.15	1.4	0.8	0.1350	0.9516
28	150	0.15	1.4	0.8	0.1420	0.9288
29	150	0.15	1.4	0.8	0.1498	0.9072
30	150	0.15	1.4	0.8	0.1571	0.8741
31	150	0.15	1.4	0.8	0.1687	0.8431
32	150	0.15	1.4	0.8	0.1796	0.8340
33	150	0.15	1.4	0.8	0.1890	0.8059
34	150	0.15	1.4	0.8	0.1990	0.7780
35	200	0.15	1.2	0.8	0.0410	1.0596
36	200	0.15	1.2	0.8	0.0550	1.0511
37	200	0.15	1.2	0.8	0.0696	1.0300
38	200	0.15	1.2	0.8	0.0760	1.0281
39	200	0.15	1.2	0.8	0.0810	1.0053
40	200	0.15	1.2	0.8	0.0880	0.9651
41	200	0.15	1.2	0.8	0.0930	0.9628
42	200	0.15	1.2	0.8	0.1050	0.9691
43	200	0.15	1.2	0.8	0.1120	0.9504
44	200	0.15	1.2	0.8	0.1240	0.9219
45	200	0.15	1.2	0.8	0.1340	0.9106
46	200	0.15	1.2	0.8	0.1380	0.8974
47	200	0.15	1.2	0.8	0.1410	0.8872

ลำดับ	ความเร็ว ตัด (เมตร/ นาที)	อัตราการ ป้อนตัด (มิลลิเมตร/ รอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมมิต (มิลลิเมตร)	ขนาดการ สึกหรอ ด้านข้าง (มิลลิเมตร)	อัตราส่วน แรงตัด พลังวัต
48	200	0.15	1.2	0.8	0.1520	0.8478
49	200	0.15	1.2	0.8	0.1680	0.8136
50	200	0.15	1.2	0.8	0.1890	0.7555
51	200	0.15	1.2	0.8	0.2030	0.7404
52	200	0.1	1.2	0.4	0.0481	1.0837
53	200	0.1	1.2	0.4	0.0640	1.0729
54	200	0.1	1.2	0.4	0.0736	1.0477
55	200	0.1	1.2	0.4	0.0980	0.9983
56	200	0.1	1.2	0.4	0.1060	0.9789
57	200	0.1	1.2	0.4	0.1171	0.9537
58	200	0.1	1.2	0.4	0.1290	0.9358
59	200	0.1	1.2	0.4	0.1340	0.9247
60	200	0.1	1.2	0.4	0.1370	0.9139
61	200	0.1	1.2	0.4	0.1460	0.8862
62	200	0.1	1.2	0.4	0.1500	0.8728
63	200	0.1	1.2	0.4	0.1640	0.8563
64	200	0.1	1.2	0.4	0.1670	0.8465
65	200	0.1	1.2	0.4	0.1760	0.8267
66	200	0.1	1.2	0.4	0.1860	0.8048
67	200	0.1	1.2	0.4	0.1998	0.7725
68	200	0.1	1.2	0.4	0.2090	0.7462
69	250	0.15	1.4	0.8	0.0409	1.0441
70	250	0.15	1.4	0.8	0.0613	1.0250
71	250	0.15	1.4	0.8	0.0800	0.9795
72	250	0.15	1.4	0.8	0.0948	0.9526

ลำดับ	ความเร็ว ตัด (เมตร/ นาที)	อัตราการ ป้อนตัด (มิลลิเมตร/ รอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมมิต (มิลลิเมตร)	ขนาดการ สึกหรอ ด้านข้าง (มิลลิเมตร)	อัตราส่วน แรงตัด พลวัต
65	200	0.1	1.2	0.4	0.1760	0.8267
66	200	0.1	1.2	0.4	0.1860	0.8048
67	200	0.1	1.2	0.4	0.1998	0.7725
68	200	0.1	1.2	0.4	0.2090	0.7462
69	250	0.15	1.4	0.8	0.0409	1.0441
70	250	0.15	1.4	0.8	0.0613	1.0250
71	250	0.15	1.4	0.8	0.0800	0.9795
72	250	0.15	1.4	0.8	0.0948	0.9526
65	200	0.1	1.2	0.4	0.1760	0.8267
66	200	0.1	1.2	0.4	0.1860	0.8048
67	200	0.1	1.2	0.4	0.1998	0.7725
68	200	0.1	1.2	0.4	0.2090	0.7462
69	250	0.15	1.4	0.8	0.0409	1.0441
70	250	0.15	1.4	0.8	0.0613	1.0250
71	250	0.15	1.4	0.8	0.0800	0.9795
72	250	0.15	1.4	0.8	0.0948	0.9526
73	250	0.15	1.4	0.8	0.1059	0.9291
74	250	0.15	1.4	0.8	0.1127	0.9087
75	250	0.15	1.4	0.8	0.1194	0.8987
76	250	0.15	1.4	0.8	0.1226	0.8892
77	250	0.15	1.4	0.8	0.1325	0.8539
78	250	0.15	1.4	0.8	0.1401	0.8316
79	250	0.15	1.4	0.8	0.1518	0.8119
80	250	0.15	1.4	0.8	0.1639	0.7710
81	250	0.15	1.4	0.8	0.1727	0.7520
82	250	0.15	1.4	0.8	0.1839	0.7376

ลำดับ	ความเร็ว ตัด (เมตร/ นาที)	อัตราการ ป้อนตัด (มิลลิเมตร/ รอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมกมิต (มิลลิเมตร)	ขนาดการ สึกหรอ ด้านข้าง (มิลลิเมตร)	อัตราส่วน แรงตัด พลวัต
83	250	0.15	1.4	0.8	0.1921	0.6675
84	250	0.15	1.4	0.8	0.1969	0.6405
85	250	0.15	1.4	0.8	0.2025	0.6297
86	200	0.2	1.2	1.2	0.0550	1.0309
87	200	0.2	1.2	1.2	0.0640	1.0142
88	200	0.2	1.2	1.2	0.0720	1.0078
89	200	0.2	1.2	1.2	0.0840	0.9952
90	200	0.2	1.2	1.2	0.0900	0.9727
91	200	0.2	1.2	1.2	0.1030	0.9520
92	200	0.2	1.2	1.2	0.1110	0.9383
93	200	0.2	1.2	1.2	0.1270	0.8972
94	200	0.2	1.2	1.2	0.1390	0.8594
95	200	0.2	1.2	1.2	0.1440	0.8467
96	200	0.2	1.2	1.2	0.1547	0.8382
97	200	0.2	1.2	1.2	0.1620	0.8232
98	200	0.2	1.2	1.2	0.1657	0.8111
99	200	0.2	1.2	1.2	0.1710	0.7964
100	200	0.2	1.2	1.2	0.1820	0.7453
101	200	0.2	1.2	1.2	0.1900	0.7311
102	200	0.2	1.2	1.2	0.2060	0.6542
103	200	0.15	1.4	0.4	0.0510	1.0612
104	200	0.15	1.4	0.4	0.0670	1.0438
105	200	0.15	1.4	0.4	0.0790	1.0177
106	200	0.15	1.4	0.4	0.0970	0.9823
107	200	0.15	1.4	0.4	0.1110	0.9649
108	200	0.15	1.4	0.4	0.1270	0.9318

ลำดับ	ความเร็ว ตัด (เมตร/ นาที)	อัตราการ ป้อนตัด (มิลลิเมตร/ รอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมกมิต (มิลลิเมตร)	ขนาดการ สึกหรอ ด้านข้าง (มิลลิเมตร)	อัตราส่วน แรงตัด พลังวัต
109	200	0.15	1.4	0.4	0.1300	0.9188
110	200	0.15	1.4	0.4	0.1420	0.8953
111	200	0.15	1.4	0.4	0.1520	0.8731
112	200	0.15	1.4	0.4	0.1590	0.8633
113	200	0.15	1.4	0.4	0.1630	0.8461
114	200	0.15	1.4	0.4	0.1650	0.8284
115	200	0.15	1.4	0.4	0.1690	0.8158
116	200	0.15	1.4	0.4	0.1762	0.8094
117	200	0.15	1.4	0.4	0.1850	0.7950
118	200	0.15	1.4	0.4	0.1950	0.7858
119	200	0.15	1.4	0.4	0.2070	0.7408
120	150	0.15	1.2	0.4	0.0453	1.1834
121	150	0.15	1.2	0.4	0.0520	1.1777
122	150	0.15	1.2	0.4	0.0670	1.1389
123	150	0.15	1.2	0.4	0.0700	1.1255
124	150	0.15	1.2	0.4	0.0840	1.0939
125	150	0.15	1.2	0.4	0.0960	1.0707
126	150	0.15	1.2	0.4	0.1105	1.0445
127	150	0.15	1.2	0.4	0.1210	1.0062
128	150	0.15	1.2	0.4	0.1300	0.9756
129	150	0.15	1.2	0.4	0.1374	0.9658
130	150	0.15	1.2	0.4	0.1420	0.9542
131	150	0.15	1.2	0.4	0.1550	0.9284
132	150	0.15	1.2	0.4	0.1680	0.9003
133	150	0.15	1.2	0.4	0.1720	0.8773
134	150	0.15	1.2	0.4	0.1812	0.8425

ลำดับ	ความเร็ว ตัด (เมตร/ นาที)	อัตราการ ป้อนตัด (มิลลิเมตร/ รอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมมีด (มิลลิเมตร)	ขนาดการ สึกหรอ ด้านข้าง (มิลลิเมตร)	อัตราส่วน แรงตัด พลังวัต
135	150	0.15	1.2	0.4	0.1920	0.8157
136	150	0.15	1.2	0.4	0.2080	0.7848
137	200	0.1	1.4	0.8	0.0500	1.0580
138	200	0.1	1.4	0.8	0.0590	1.0476
139	200	0.1	1.4	0.8	0.0640	1.0482
140	200	0.1	1.4	0.8	0.0700	1.0321
141	200	0.1	1.4	0.8	0.0800	1.0240
142	200	0.1	1.4	0.8	0.0900	1.0140
143	200	0.1	1.4	0.8	0.1000	0.9788
144	200	0.1	1.4	0.8	0.1160	0.9508
145	200	0.1	1.4	0.8	0.1210	0.9434
146	200	0.1	1.4	0.8	0.1230	0.9373
147	200	0.1	1.4	0.8	0.1320	0.9144
148	200	0.1	1.4	0.8	0.1427	0.8922
149	200	0.1	1.4	0.8	0.1590	0.8655
150	200	0.1	1.4	0.8	0.1660	0.8552
151	200	0.1	1.4	0.8	0.1700	0.8251
152	200	0.1	1.4	0.8	0.1860	0.7808
153	200	0.1	1.4	0.8	0.2050	0.7605
154	200	0.15	1.2	0.8	0.0439	1.0455
155	200	0.15	1.2	0.8	0.0620	1.0144
156	200	0.15	1.2	0.8	0.0731	1.0079
157	200	0.15	1.2	0.8	0.0848	1.0031
158	200	0.15	1.2	0.8	0.1053	0.9692
159	200	0.15	1.2	0.8	0.1157	0.9452
160	200	0.15	1.2	0.8	0.1213	0.9254

ลำดับ	ความเร็ว ตัด (เมตร/ นาที)	อัตราการ ป้อนตัด (มิลลิเมตร/ รอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมิต (มิลลิเมตร)	ขนาดการ สึกหรอ ด้านข้าง (มิลลิเมตร)	อัตราส่วน แรงตัด พลวัต
161	200	0.15	1.2	0.8	0.1315	0.9107
162	200	0.15	1.2	0.8	0.1379	0.8959
163	200	0.15	1.2	0.8	0.1459	0.8718
164	200	0.15	1.2	0.8	0.1511	0.8564
165	200	0.15	1.2	0.8	0.1697	0.8292
166	200	0.15	1.2	0.8	0.1780	0.8182
167	200	0.15	1.2	0.8	0.1809	0.8025
168	200	0.15	1.2	0.8	0.1844	0.7870
169	200	0.15	1.2	0.8	0.1920	0.7505
170	200	0.15	1.2	0.8	0.2039	0.7192
171	200	0.2	1	0.8	0.0412	1.0488
172	200	0.2	1	0.8	0.0552	1.0439
173	200	0.2	1	0.8	0.0608	1.0281
174	200	0.2	1	0.8	0.0783	0.9970
175	200	0.2	1	0.8	0.0899	0.9749
176	200	0.2	1	0.8	0.0979	0.9540
177	200	0.2	1	0.8	0.1076	0.9491
178	200	0.2	1	0.8	0.1155	0.9358
179	200	0.2	1	0.8	0.1282	0.9012
180	200	0.2	1	0.8	0.1383	0.8783
181	200	0.2	1	0.8	0.1457	0.8659
182	200	0.2	1	0.8	0.1577	0.8609
183	200	0.2	1	0.8	0.1694	0.8411
184	200	0.2	1	0.8	0.1716	0.8230
185	200	0.2	1	0.8	0.1810	0.7748
186	200	0.2	1	0.8	0.1907	0.7444

ลำดับ	ความเร็ว ตัด (เมตร/ นาที)	อัตราการ ป้อนตัด (มิลลิเมตร/ รอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมิต (มิลลิเมตร)	ขนาดการ สึกหรอ ด้านข้าง (มิลลิเมตร)	อัตราส่วน แรงตัด พลังวัต
187	200	0.2	1	0.8	0.2028	0.7101
188	200	0.2	1.4	0.8	0.0461	1.0229
189	200	0.2	1.4	0.8	0.0612	1.0120
190	200	0.2	1.4	0.8	0.0768	0.9933
191	200	0.2	1.4	0.8	0.0898	0.9839
192	200	0.2	1.4	0.8	0.1074	0.9409
193	200	0.2	1.4	0.8	0.1210	0.9073
194	200	0.2	1.4	0.8	0.1359	0.8733
195	200	0.2	1.4	0.8	0.1438	0.8635
196	200	0.2	1.4	0.8	0.1545	0.8356
197	200	0.2	1.4	0.8	0.1653	0.8262
198	200	0.2	1.4	0.8	0.1724	0.8201
199	200	0.2	1.4	0.8	0.1746	0.7975
200	200	0.2	1.4	0.8	0.1802	0.7886
201	200	0.2	1.4	0.8	0.1833	0.7511
202	200	0.2	1.4	0.8	0.1855	0.7453
203	200	0.2	1.4	0.8	0.1908	0.7244
204	200	0.2	1.4	0.8	0.2005	0.6581
205	250	0.2	1.2	0.8	0.0481	1.0078
206	250	0.2	1.2	0.8	0.0628	0.9882
207	250	0.2	1.2	0.8	0.0725	0.9705
208	250	0.2	1.2	0.8	0.0868	0.9526
209	250	0.2	1.2	0.8	0.0968	0.9202
210	250	0.2	1.2	0.8	0.1095	0.8993
211	250	0.2	1.2	0.8	0.1210	0.8737
212	250	0.2	1.2	0.8	0.1352	0.8448

ลำดับ	ความเร็ว ตัด (เมตร/ นาที)	อัตราการ ป้อนตัด (มิลลิเมตร/ รอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมกมิต (มิลลิเมตร)	ขนาดการ สึกหรอ ด้านข้าง (มิลลิเมตร)	อัตราส่วน แรงตัด พลังวัต
213	250	0.2	1.2	0.8	0.1412	0.8202
214	250	0.2	1.2	0.8	0.1470	0.8187
215	250	0.2	1.2	0.8	0.1502	0.8007
216	250	0.2	1.2	0.8	0.1608	0.7869
217	250	0.2	1.2	0.8	0.1645	0.7710
218	250	0.2	1.2	0.8	0.1708	0.7405
219	250	0.2	1.2	0.8	0.1808	0.6896
220	250	0.2	1.2	0.8	0.1970	0.6281
221	250	0.2	1.2	0.8	0.2026	0.6119
222	200	0.1	1.2	1.2	0.0565	1.0603
223	200	0.1	1.2	1.2	0.0625	1.0511
224	200	0.1	1.2	1.2	0.0825	1.0266
225	200	0.1	1.2	1.2	0.0981	0.9913
226	200	0.1	1.2	1.2	0.1031	0.9752
227	200	0.1	1.2	1.2	0.1182	0.9606
228	200	0.1	1.2	1.2	0.1213	0.9475
229	200	0.1	1.2	1.2	0.1331	0.9274
230	200	0.1	1.2	1.2	0.1461	0.8962
231	200	0.1	1.2	1.2	0.1509	0.8771
232	200	0.1	1.2	1.2	0.1602	0.8682
233	200	0.1	1.2	1.2	0.1697	0.8471
234	200	0.1	1.2	1.2	0.1713	0.8404
235	200	0.1	1.2	1.2	0.1785	0.8206
236	200	0.1	1.2	1.2	0.1808	0.8032
237	200	0.1	1.2	1.2	0.1919	0.7848
238	200	0.1	1.2	1.2	0.2010	0.7557

ลำดับ	ความเร็ว ตัด (เมตร/ นาที)	อัตราการ ป้อนตัด (มิลลิเมตร/ รอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมมีด (มิลลิเมตร)	ขนาดการ สึกหรอ ด้านข้าง (มิลลิเมตร)	อัตราส่วน แรงตัด พลัง
239	200	0.15	1.4	1.2	0.0428	1.0268
240	200	0.15	1.4	1.2	0.0616	0.9986
241	200	0.15	1.4	1.2	0.0778	0.9901
242	200	0.15	1.4	1.2	0.0855	0.9867
243	200	0.15	1.4	1.2	0.1059	0.9536
244	200	0.15	1.4	1.2	0.1118	0.9388
245	200	0.15	1.4	1.2	0.1211	0.9157
246	200	0.15	1.4	1.2	0.1337	0.8958
247	200	0.15	1.4	1.2	0.1399	0.8866
248	200	0.15	1.4	1.2	0.1456	0.8729
249	200	0.15	1.4	1.2	0.1516	0.8563
250	200	0.15	1.4	1.2	0.1587	0.8557
251	200	0.15	1.4	1.2	0.1627	0.8287
252	200	0.15	1.4	1.2	0.1700	0.8079
253	200	0.15	1.4	1.2	0.1843	0.7502
254	200	0.15	1.4	1.2	0.1920	0.7370
255	200	0.15	1.4	1.2	0.2037	0.6783
256	250	0.15	1	0.8	0.0573	1.0319
257	250	0.15	1	0.8	0.0655	0.9818
258	250	0.15	1	0.8	0.0771	0.9852
259	250	0.15	1	0.8	0.0856	0.9654
260	250	0.15	1	0.8	0.0946	0.9573
261	250	0.15	1	0.8	0.1085	0.9334
262	250	0.15	1	0.8	0.1266	0.8984
263	250	0.15	1	0.8	0.1347	0.8627
264	250	0.15	1	0.8	0.1479	0.8428

ลำดับ	ความเร็ว ตัด (เมตร/ นาที)	อัตราการ ป้อนตัด (มิลลิเมตร/ รอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมมีด (มิลลิเมตร)	ขนาดการ สึกหรอ ด้านข้าง (มิลลิเมตร)	อัตราส่วน แรงตัด พลังวัต
265	250	0.15	1	0.8	0.1583	0.8231
266	250	0.15	1	0.8	0.1669	0.8012
267	250	0.15	1	0.8	0.1774	0.7901
268	250	0.15	1	0.8	0.1809	0.7874
269	250	0.15	1	0.8	0.1877	0.7568
270	250	0.15	1	0.8	0.1881	0.7401
271	250	0.15	1	0.8	0.1939	0.6964
272	250	0.15	1	0.8	0.2016	0.6508
273	200	0.2	1.2	0.4	0.0494	1.0447
274	200	0.2	1.2	0.4	0.0604	1.0308
275	200	0.2	1.2	0.4	0.0731	1.0151
276	200	0.2	1.2	0.4	0.0802	1.0002
277	200	0.2	1.2	0.4	0.0886	0.9767
278	200	0.2	1.2	0.4	0.0957	0.9558
279	200	0.2	1.2	0.4	0.1106	0.9326
280	200	0.2	1.2	0.4	0.1234	0.9057
281	200	0.2	1.2	0.4	0.1356	0.8789
282	200	0.2	1.2	0.4	0.1464	0.8536
283	200	0.2	1.2	0.4	0.1558	0.8452
284	200	0.2	1.2	0.4	0.1662	0.8128
285	200	0.2	1.2	0.4	0.1752	0.7802
286	200	0.2	1.2	0.4	0.1831	0.7652
287	200	0.2	1.2	0.4	0.1888	0.7602
288	200	0.2	1.2	0.4	0.1957	0.7301
289	200	0.2	1.2	0.4	0.2045	0.7014
290	200	0.15	1.2	0.8	0.0531	1.0505

ลำดับ	ความเร็ว ตัด (เมตร/ นาที)	อัตราการ ป้อนตัด (มิลลิเมตร/ รอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมมีด (มิลลิเมตร)	ขนาดการ สึกหรอ ด้านข้าง (มิลลิเมตร)	อัตราส่วน แรงตัด พลัง
291	200	0.15	1.2	0.8	0.0605	1.0481
292	200	0.15	1.2	0.8	0.0696	1.0228
293	200	0.15	1.2	0.8	0.0756	1.0186
294	200	0.15	1.2	0.8	0.0842	0.9928
295	200	0.15	1.2	0.8	0.0970	0.9783
296	200	0.15	1.2	0.8	0.1082	0.9604
297	200	0.15	1.2	0.8	0.1193	0.9352
298	200	0.15	1.2	0.8	0.1285	0.9229
299	200	0.15	1.2	0.8	0.1336	0.9018
300	200	0.15	1.2	0.8	0.1404	0.8817
301	200	0.15	1.2	0.8	0.1571	0.8474
302	200	0.15	1.2	0.8	0.1695	0.8396
303	200	0.15	1.2	0.8	0.1774	0.8271
304	200	0.15	1.2	0.8	0.1823	0.7815
305	200	0.15	1.2	0.8	0.1905	0.7691
306	200	0.15	1.2	0.8	0.2066	0.7348
307	150	0.1	1.2	0.8	0.0490	1.2062
308	150	0.1	1.2	0.8	0.0635	1.1851
309	150	0.1	1.2	0.8	0.0706	1.1571
310	150	0.1	1.2	0.8	0.0826	1.1380
311	150	0.1	1.2	0.8	0.0875	1.1046
312	150	0.1	1.2	0.8	0.0963	1.0746
313	150	0.1	1.2	0.8	0.1071	1.0530
314	150	0.1	1.2	0.8	0.1142	1.0326
315	150	0.1	1.2	0.8	0.1286	0.9830
316	150	0.1	1.2	0.8	0.1351	0.9700

ลำดับ	ความเร็ว ตัด (เมตร/ นาที)	อัตราการ ป้อนตัด (มิลลิเมตร/ รอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมมิต (มิลลิเมตร)	ขนาดการ สึกหรอ ด้านข้าง (มิลลิเมตร)	อัตราส่วน แรงตัด พลังวัต
317	150	0.1	1.2	0.8	0.1431	0.9695
318	150	0.1	1.2	0.8	0.1562	0.9229
319	150	0.1	1.2	0.8	0.1608	0.9094
320	150	0.1	1.2	0.8	0.1728	0.8792
321	150	0.1	1.2	0.8	0.1831	0.8588
322	150	0.1	1.2	0.8	0.1921	0.8456
323	150	0.1	1.2	0.8	0.2011	0.8161
324	250	0.1	1.2	0.8	0.0499	1.0297
325	250	0.1	1.2	0.8	0.0613	1.0300
326	250	0.1	1.2	0.8	0.0800	0.9939
327	250	0.1	1.2	0.8	0.0948	0.9782
328	250	0.1	1.2	0.8	0.1059	0.9519
329	250	0.1	1.2	0.8	0.1127	0.9323
330	250	0.1	1.2	0.8	0.1194	0.9205
331	250	0.1	1.2	0.8	0.1226	0.9058
332	250	0.1	1.2	0.8	0.1325	0.8857
333	250	0.1	1.2	0.8	0.1401	0.8618
334	250	0.1	1.2	0.8	0.1518	0.8477
335	250	0.1	1.2	0.8	0.1659	0.7982
336	250	0.1	1.2	0.8	0.1727	0.7721
337	250	0.1	1.2	0.8	0.1859	0.7451
338	250	0.1	1.2	0.8	0.1951	0.7210
339	250	0.1	1.2	0.8	0.1949	0.7071
340	250	0.1	1.2	0.8	0.2035	0.6982
341	200	0.15	1	0.4	0.0443	1.0603
342	200	0.15	1	0.4	0.0526	1.0581

ลำดับ	ความเร็ว ตัด (เมตร/ นาที)	อัตราการ ป้อนตัด (มิลลิเมตร/ รอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมิต (มิลลิเมตร)	ขนาดการ สึกหรอ ด้านข้าง (มิลลิเมตร)	อัตราส่วน แรงตัด พลวัต
343	200	0.15	1	0.4	0.0638	1.0482
344	200	0.15	1	0.4	0.0757	1.0223
345	200	0.15	1	0.4	0.0893	0.9936
346	200	0.15	1	0.4	0.0943	0.9883
347	200	0.15	1	0.4	0.1046	0.9823
348	200	0.15	1	0.4	0.1159	0.9604
349	200	0.15	1	0.4	0.1232	0.9354
350	200	0.15	1	0.4	0.1350	0.9193
351	200	0.15	1	0.4	0.1379	0.8937
352	200	0.15	1	0.4	0.1487	0.8718
353	200	0.15	1	0.4	0.1596	0.8683
354	200	0.15	1	0.4	0.1707	0.8240
355	200	0.15	1	0.4	0.1859	0.8190
356	200	0.15	1	0.4	0.1923	0.7763
357	200	0.15	1	0.4	0.2002	0.7761
358	200	0.1	1	0.8	0.0423	1.1055
359	200	0.1	1	0.8	0.0586	1.0953
360	200	0.1	1	0.8	0.0649	1.0898
361	200	0.1	1	0.8	0.0768	1.0465
362	200	0.1	1	0.8	0.0924	1.0170
363	200	0.1	1	0.8	0.1007	0.9819
364	200	0.1	1	0.8	0.1174	0.9785
365	200	0.1	1	0.8	0.1238	0.9434
366	200	0.1	1	0.8	0.1304	0.9353
367	200	0.1	1	0.8	0.1446	0.9146

ลำดับ	ความเร็ว ตัด (เมตร/ นาที)	อัตราการ ป้อนตัด (มิลลิเมตร/ รอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมมีด (มิลลิเมตร)	ขนาดการ สึกหรอ ด้านข้าง (มิลลิเมตร)	อัตราส่วน แรงตัด พลวัต
368	200	0.1	1	0.8	0.1532	0.8782
369	200	0.1	1	0.8	0.1632	0.8541
370	200	0.1	1	0.8	0.1669	0.8681
371	200	0.1	1	0.8	0.1727	0.8500
372	200	0.1	1	0.8	0.1809	0.8309
373	200	0.1	1	0.8	0.1997	0.7936
374	200	0.1	1	0.8	0.2042	0.7927
375	200	0.15	1	1.2	0.0398	1.0789
376	200	0.15	1	1.2	0.0458	1.0763
377	200	0.15	1	1.2	0.0618	1.0532
378	200	0.15	1	1.2	0.0779	0.9979
379	200	0.15	1	1.2	0.0884	0.9932
380	200	0.15	1	1.2	0.0982	0.9669
381	200	0.15	1	1.2	0.1028	0.9601
382	200	0.15	1	1.2	0.1161	0.9526
383	200	0.15	1	1.2	0.1215	0.9404
384	200	0.15	1	1.2	0.1310	0.9203
385	200	0.15	1	1.2	0.1449	0.8912
386	200	0.15	1	1.2	0.1526	0.8658
387	200	0.15	1	1.2	0.1621	0.8400
388	200	0.15	1	1.2	0.1768	0.8283
389	200	0.15	1	1.2	0.1812	0.8076
390	200	0.15	1	1.2	0.1928	0.7763
391	200	0.15	1	1.2	0.2007	0.7465
392	150	0.15	1.2	1.2	0.0471	1.1808
393	150	0.15	1.2	1.2	0.0528	1.1657

ลำดับ	ความเร็ว ตัด (เมตร/ นาที)	อัตราการ ป้อนตัด (มิลลิเมตร/ รอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมมิต (มิลลิเมตร)	ขนาดการ สึกหรอ ด้านข้าง (มิลลิเมตร)	อัตราส่วน แรงตัด พลังวัต
394	150	0.15	1.2	1.2	0.0654	1.1403
395	150	0.15	1.2	1.2	0.0729	1.0918
396	150	0.15	1.2	1.2	0.0833	1.0723
397	150	0.15	1.2	1.2	0.0915	1.0475
398	150	0.15	1.2	1.2	0.0978	1.0403
399	150	0.15	1.2	1.2	0.1108	0.9984
400	150	0.15	1.2	1.2	0.1265	0.9651
401	150	0.15	1.2	1.2	0.1326	0.9476
402	150	0.15	1.2	1.2	0.1418	0.9342
403	150	0.15	1.2	1.2	0.1507	0.9232
404	150	0.15	1.2	1.2	0.1604	0.8971
405	150	0.15	1.2	1.2	0.1727	0.8718
406	150	0.15	1.2	1.2	0.1828	0.8443
407	150	0.15	1.2	1.2	0.1928	0.8285
408	150	0.15	1.2	1.2	0.2012	0.7957
409	250	0.15	1.2	1.2	0.0442	1.0380
410	250	0.15	1.2	1.2	0.0568	1.0132
411	250	0.15	1.2	1.2	0.0628	0.9941
412	250	0.15	1.2	1.2	0.0777	0.9713
413	250	0.15	1.2	1.2	0.0853	0.9652
414	250	0.15	1.2	1.2	0.0952	0.9399
415	250	0.15	1.2	1.2	0.1072	0.9219
416	250	0.15	1.2	1.2	0.1222	0.9018
417	250	0.15	1.2	1.2	0.1308	0.8695
418	250	0.15	1.2	1.2	0.1443	0.8446

ลำดับ	ความเร็ว ตัด (เมตร/ นาที)	อัตราการ ป้อนตัด (มิลลิเมตร/ รอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมมิต (มิลลิเมตร)	ขนาดการ สึกหรอ ด้านข้าง (มิลลิเมตร)	อัตราส่วน แรงตัด พลังวัต
419	250	0.15	1.2	1.2	0.1582	0.8166
420	250	0.15	1.2	1.2	0.1637	0.7911
421	250	0.15	1.2	1.2	0.1697	0.7880
422	250	0.15	1.2	1.2	0.1733	0.7632
423	250	0.15	1.2	1.2	0.1828	0.7460
424	250	0.15	1.2	1.2	0.1922	0.6924
425	250	0.15	1.2	1.2	0.2009	0.6700
426	250	0.15	1.2	0.4	0.0431	1.0478
427	250	0.15	1.2	0.4	0.0508	1.0319
428	250	0.15	1.2	0.4	0.0657	1.0189
429	250	0.15	1.2	0.4	0.0701	1.0155
430	250	0.15	1.2	0.4	0.0800	0.9974
431	250	0.15	1.2	0.4	0.0957	0.9456
432	250	0.15	1.2	0.4	0.1019	0.9394
433	250	0.15	1.2	0.4	0.1137	0.9284
434	250	0.15	1.2	0.4	0.1208	0.9063
435	250	0.15	1.2	0.4	0.1358	0.8609
436	250	0.15	1.2	0.4	0.1428	0.8458
437	250	0.15	1.2	0.4	0.1522	0.8282
438	250	0.15	1.2	0.4	0.1619	0.8145
439	250	0.15	1.2	0.4	0.1761	0.7815
440	250	0.15	1.2	0.4	0.1806	0.7415
441	250	0.15	1.2	0.4	0.1923	0.7143
442	250	0.15	1.2	0.4	0.2000	0.6809
443	150	0.2	1.2	0.8	0.0448	1.1330

ลำดับ	ความเร็ว ตัด (เมตร/ นาที)	อัตราการ ป้อนตัด (มิลลิเมตร/ รอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีจมูกมีด (มิลลิเมตร)	ขนาดการ สึกหรอ ด้านข้าง (มิลลิเมตร)	อัตราส่วน แรงตัด พลังวัตต์
444	150	0.2	1.2	0.8	0.0526	1.1144
445	150	0.2	1.2	0.8	0.0687	1.0733
446	150	0.2	1.2	0.8	0.0764	1.0347
447	150	0.2	1.2	0.8	0.0865	1.0175
448	150	0.2	1.2	0.8	0.1003	0.9854
449	150	0.2	1.2	0.8	0.1106	0.9763
450	150	0.2	1.2	0.8	0.1226	0.9466
451	150	0.2	1.2	0.8	0.1314	0.9373
452	150	0.2	1.2	0.8	0.1352	0.9272
453	150	0.2	1.2	0.8	0.1431	0.9111
454	150	0.2	1.2	0.8	0.1508	0.8864
455	150	0.2	1.2	0.8	0.1671	0.8502
456	150	0.2	1.2	0.8	0.1714	0.8353
457	150	0.2	1.2	0.8	0.1852	0.8241
458	150	0.2	1.2	0.8	0.1941	0.7926
459	150	0.2	1.2	0.8	0.2055	0.7562

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างรายละเอียด ขนาดแรงตัดพลวัต อัตราส่วนแรงตัดพลวัต รูปขนาดการสึกหรอด้านข้างคมตัด
ของเม็ดมีดกลึงที่เงื่อนไขการตัดต่างๆ

ผลการทดลอง	เงื่อนไขการตัด	ช่วงการสึกหรอ	ความเร็วตัด (เมตร/นาาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีจุมุมมีด (มิลลิเมตร)
1	1	ช่วงต้น	150	0.15	1	0.8
2	1	ช่วงกลาง	150	0.15	1	0.8
3	1	ช่วงปลาย	150	0.15	1	0.8
4	2	ช่วงต้น	150	0.15	1.4	0.8
5	2	ช่วงกลาง	150	0.15	1.4	0.8
6	2	ช่วงปลาย	150	0.15	1.4	0.8
7	3	ช่วงต้น	200	0.15	1.2	0.8
8	3	ช่วงกลาง	200	0.15	1.2	0.8
9	3	ช่วงปลาย	200	0.15	1.2	0.8
10	4	ช่วงต้น	200	0.1	1.2	0.4
11	4	ช่วงกลาง	200	0.1	1.2	0.4
12	4	ช่วงปลาย	200	0.1	1.2	0.4
13	5	ช่วงต้น	250	0.15	1.4	0.8
14	5	ช่วงกลาง	250	0.15	1.4	0.8
15	5	ช่วงปลาย	250	0.15	1.4	0.8
16	6	ช่วงต้น	200	0.2	1.2	1.2
17	6	ช่วงกลาง	200	0.2	1.2	1.2
18	6	ช่วงปลาย	200	0.2	1.2	1.2
19	7	ช่วงต้น	200	0.15	1.4	0.4
20	7	ช่วงกลาง	200	0.15	1.4	0.4
21	7	ช่วงปลาย	200	0.15	1.4	0.4
22	8	ช่วงต้น	150	0.15	1.2	0.4

ผลการทดลอง	เงื่อนไขการตัด	ช่วงการสึกหรอ	ความเร็วตัด (เมตร/นาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีจุ่มมีด (มิลลิเมตร)
23	8	ช่วงกลาง	150	0.15	1.2	0.4
24	8	ช่วงปลาย	150	0.15	1.2	0.4
25	9	ช่วงต้น	200	0.1	1.4	0.8
26	9	ช่วงกลาง	200	0.1	1.4	0.8
27	9	ช่วงปลาย	200	0.1	1.4	0.8
28	10	ช่วงต้น	200	0.15	1.2	0.8
29	10	ช่วงกลาง	200	0.15	1.2	0.8
30	10	ช่วงปลาย	200	0.15	1.2	0.8
31	11	ช่วงต้น	200	0.2	1	0.8
32	11	ช่วงกลาง	200	0.2	1	0.8
33	11	ช่วงปลาย	200	0.2	1	0.8
34	12	ช่วงต้น	200	0.2	1.4	0.8
35	12	ช่วงกลาง	200	0.2	1.4	0.8
36	12	ช่วงปลาย	200	0.2	1.4	0.8
37	13	ช่วงต้น	250	0.2	1.2	0.8
38	13	ช่วงกลาง	250	0.2	1.2	0.8
39	13	ช่วงปลาย	250	0.2	1.2	0.8
40	14	ช่วงต้น	200	0.1	1.2	1.2
41	14	ช่วงกลาง	200	0.1	1.2	1.2
42	14	ช่วงปลาย	200	0.1	1.2	1.2
43	15	ช่วงต้น	200	0.15	1.4	1.2
44	15	ช่วงกลาง	200	0.15	1.4	1.2
45	15	ช่วงปลาย	200	0.15	1.4	1.2
46	16	ช่วงต้น	250	0.15	1	0.8
47	16	ช่วงกลาง	250	0.15	1	0.8

ผลการทดลอง	เงื่อนไขการตัด	ช่วงการสึกหรอ	ความเร็วตัด (เมตร/นาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีจุ่มมีด (มิลลิเมตร)
48	16	ช่วงปลาย	250	0.15	1	0.8
49	17	ช่วงต้น	200	0.2	1.2	0.4
50	17	ช่วงกลาง	200	0.2	1.2	0.4
51	17	ช่วงปลาย	200	0.2	1.2	0.4
52	18	ช่วงต้น	200	0.15	1.2	0.8
53	18	ช่วงกลาง	200	0.15	1.2	0.8
54	18	ช่วงปลาย	200	0.15	1.2	0.8
55	19	ช่วงต้น	150	0.1	1.2	0.8
56	19	ช่วงกลาง	150	0.1	1.2	0.8
57	19	ช่วงปลาย	150	0.1	1.2	0.8
58	20	ช่วงต้น	250	0.1	1.2	0.8
59	20	ช่วงกลาง	250	0.1	1.2	0.8
60	20	ช่วงปลาย	250	0.1	1.2	0.8
61	21	ช่วงต้น	200	0.15	1	0.4
62	21	ช่วงกลาง	200	0.15	1	0.4
63	21	ช่วงปลาย	200	0.15	1	0.4
64	22	ช่วงต้น	200	0.1	1	0.8
65	22	ช่วงกลาง	200	0.1	1	0.8
66	22	ช่วงปลาย	200	0.1	1	0.8
67	23	ช่วงต้น	200	0.15	1	1.2
68	23	ช่วงกลาง	200	0.15	1	1.2
69	23	ช่วงปลาย	200	0.15	1	1.2
70	24	ช่วงต้น	150	0.15	1.2	1.2
71	24	ช่วงกลาง	150	0.15	1.2	1.2
72	24	ช่วงปลาย	150	0.15	1.2	1.2

ผลการทดลอง	เงื่อนไขการตัด	ช่วงการสึกหรอ	ความเร็วตัด (เมตร/นาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีจุมุมมีด (มิลลิเมตร)
73	25	ช่วงต้น	250	0.15	1.2	1.2
74	25	ช่วงกลาง	250	0.15	1.2	1.2
75	25	ช่วงปลาย	250	0.15	1.2	1.2
76	26	ช่วงต้น	250	0.15	1.2	0.4
77	26	ช่วงกลาง	250	0.15	1.2	0.4
78	26	ช่วงปลาย	250	0.15	1.2	0.4
79	27	ช่วงต้น	150	0.2	1.2	0.8
80	27	ช่วงกลาง	150	0.2	1.2	0.8
81	27	ช่วงปลาย	150	0.2	1.2	0.8

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 1

เงื่อนไขการตัดที่ 1 (ช่วงต้น)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมกมิด (มิลลิเมตร)
150	0.15	1	0.8
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.0560		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.0458		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.1019		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.0438		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.0421		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.0858		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
1.1872	0.0490		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 2

เงื่อนไขการตัดที่ 1 (ช่วงกลาง)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมมิด (มิลลิเมตร)
150	0.15	1	0.8
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.0517		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.0458		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.0975		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.0508		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.0469		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.0976		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ (มิลลิเมตร)	รูปการสีกหรือ	
0.9989	0.1221		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 3

เงื่อนไขการตัดที่ 1 (ช่วงปลาย)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมกมิด (มิลลิเมตร)
150	0.15	1	0.8
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.0569		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.0592		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.1161		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.0667		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.0694		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.1361		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
0.8528	0.1909		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 4

เงื่อนไขการตัดที่ 2 (ช่วงต้น)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมกมิด (มิลลิเมตร)
150	0.15	1.4	0.8
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.0882		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.0722		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.1604		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.0730		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.0702		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.1432		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
1.1205	0.0410		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 5

เงื่อนไขการตัดที่ 2 (ช่วงกลาง)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีจุกมีด (มิลลิเมตร)
150	0.15	1.4	0.8
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.0883		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.0722		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.1605		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.0819		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.0810		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.1629		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
0.9853	0.1170		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 6

เงื่อนไขการตัดที่ 2 (ช่วงปลาย)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมกมิต (มิลลิเมตร)
150	0.15	1.4	0.8
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.0730		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.0597		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.1327		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.0870		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.0836		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.1706		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
0.7780	0.1990		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 7

เงื่อนไขการตัดที่ 3 (ช่วงต้น)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมมิด (มิลลิเมตร)
200	0.15	1.2	0.8
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.2396		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.1961		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.4357		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.2097		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.2015		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.4112		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรอ (มิลลิเมตร)		
1.0596	0.0410		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 8

เงื่อนไขการตัดที่ 3 (ช่วงกลาง)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมมิด (มิลลิเมตร)
200	0.15	1.2	0.8
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.3015		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.2783		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.5798		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.3112		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.2989		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.6101		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ (มิลลิเมตร)	รูปการสีกหรือ	
0.9504	0.1120		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 9

เงื่อนไขการตัดที่ 3 (ช่วงปลาย)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมมิด (มิลลิเมตร)
200	0.15	1.2	0.8
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.2828		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.2314		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.5142		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.3542		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.3403		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.6945		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ (มิลลิเมตร)	รูปการสีกหรือ	
0.7404	0.2030		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 10

เงื่อนไขการตัดที่ 4 (ช่วงต้น)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมกมิต (มิลลิเมตร)
200	0.1	1.2	0.4
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.2145		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.2100		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.4245		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.1915		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.2002		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.3917		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
1.0837	0.0481		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 11

เงื่อนไขการตัดที่ 4 (ช่วงกลาง)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมมิด (มิลลิเมตร)
200	0.1	1.2	0.4
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.2502		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.2450		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.4952		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.2650		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.2765		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.5419		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรอ (มิลลิเมตร)		
0.9139	0.1370		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 12

เงื่อนไขการตัดที่ 4 (ช่วงปลาย)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมมิด (มิลลิเมตร)
200	0.1	1.2	0.4
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.2346		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.2297		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.4643		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.3043		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.3179		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.6222		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
0.7462	0.2090		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 13

เงื่อนไขการตัดที่ 5 (ช่วงต้น)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมกมิด (มิลลิเมตร)
250	0.15	1.4	0.8
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.1880		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.1799		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.3680		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.1781		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.1743		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.3524		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
1.0441	0.0409		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 14

เงื่อนไขการตัดที่ 5 (ช่วงกลาง)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมมิด (มิลลิเมตร)
250	0.15	1.4	0.8
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.1642		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.1572		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.3214		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.1920		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.1862		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.3764		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
0.8316	0.1401		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 15

เงื่อนไขการตัดที่ 5 (ช่วงปลาย)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมกมิด (มิลลิเมตร)
250	0.15	1.4	0.8
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.1282		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.1227		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.2510		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.2014		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.1971		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.3985		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
0.6297	0.2025		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 16

เงื่อนไขการตัดที่ 6 (ช่วงต้น)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมมิด (มิลลิเมตร)
200	0.2	1.2	1.2
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.1903		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.1911		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.3813		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.1824		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.1875		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.3699		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
1.0309	0.0550		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 17

เงื่อนไขการตัดที่ 6 (ช่วงกลาง)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมกมิด (มิลลิเมตร)
200	0.2	1.2	1.2
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.1816		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.1823		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.3640		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.2088		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.2147		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.4235		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
0.8594	0.1390		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 18

เงื่อนไขการตัดที่ 6 (ช่วงปลาย)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีจุกมีด (มิลลิเมตร)
200	0.2	1.2	1.2
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.1536		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.1542		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.3079		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.2320		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.2386		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.4706		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
0.6542	0.2060		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 19

เงื่อนไขการตัดที่ 7 (ช่วงต้น)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีจุกมีด (มิลลิเมตร)
200	0.15	1.4	0.4
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.2058		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.2098		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.4157		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.1955		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.1962		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.3917		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
1.0612	0.0510		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 20

เงื่อนไขการตัดที่ 7 (ช่วงกลาง)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีจูนุกมีด (มิลลิเมตร)
200	0.15	1.4	0.4
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.2371		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.2360		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.4731		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.2751		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.2704		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.5419		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
0.8731	0.1520		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 21

เงื่อนไขการตัดที่ 7 (ช่วงปลาย)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมกมิด (มิลลิเมตร)
200	0.15	1.4	0.4
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.2312		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.2298		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.4609		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.3092		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.3130		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.6222		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ (มิลลิเมตร)	รูปการสีกหรือ	
0.7408	0.2070		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 22

เงื่อนไขการตัดที่ 8 (ช่วงต้น)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมมิด (มิลลิเมตร)
150	0.15	1.2	0.4
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.0472		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.0481		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.0953		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.0402		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.0403		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.0805		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
1.1834	0.0453		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 23

เงื่อนไขการตัดที่ 8 (ช่วงกลาง)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีจุ่มมีด (มิลลิเมตร)
150	0.15	1.2	0.4
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.0858		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.0875		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.1734		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.0887		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.0890		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.1777		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
0.9756	0.1300		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 24

เงื่อนไขการตัดที่ 8 (ช่วงปลาย)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมมีด (มิลลิเมตร)
150	0.15	1.2	0.4
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.0907		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.0924		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.1831		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.1164		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.1169		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.2333		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
0.7848	0.2080		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 25

เงื่อนไขการตัดที่ 9 (ช่วงต้น)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมกมิด (มิลลิเมตร)
200	0.1	1.4	0.8
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.1217		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.1226		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.2443		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.1152		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.1157		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.2309		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
1.0580	0.0500		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 26

เงื่อนไขการตัดที่ 9 (ช่วงกลาง)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมมิด (มิลลิเมตร)
200	0.1	1.4	0.8
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.1268		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.1258		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.2526		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.1336		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.1342		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.2678		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ (มิลลิเมตร)	รูปการสีกหรือ	
0.9434	0.1210		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 27

เงื่อนไขการตัดที่ 9 (ช่วงปลาย)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีจุกมีด (มิลลิเมตร)
200	0.1	1.4	0.8
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.1204		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.1194		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.2398		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.1611		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.5142		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.1353		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
0.7605	0.2050		

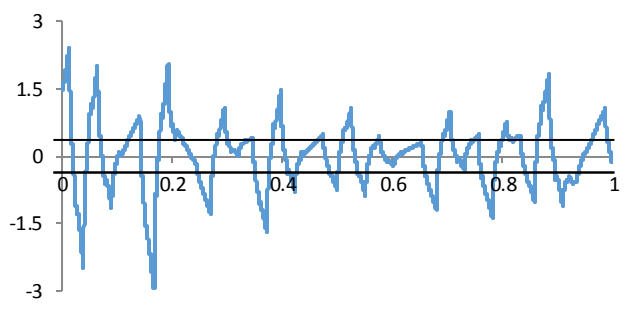
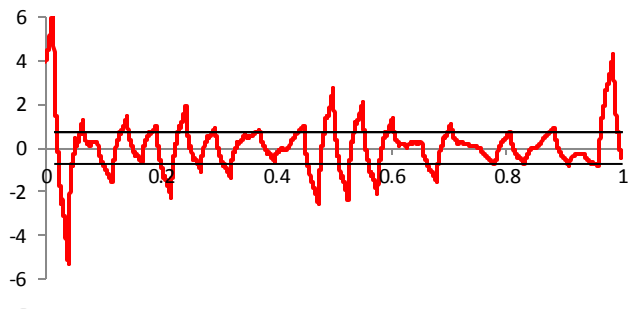
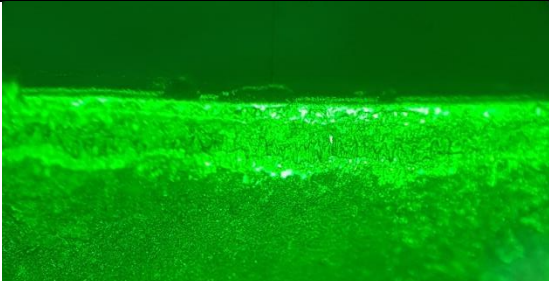
ผลการทดลองตัวอย่างที่ 28

เงื่อนไขการตัดที่ 10 (ช่วงต้น)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมมิด (มิลลิเมตร)
200	0.15	1.2	0.8
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.2458		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.2506		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.4964		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.2369		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.2379		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.4748		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
1.0455	0.0439		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 29

เงื่อนไขการตัดที่ 10 (ช่วงกลาง)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมกมิด (มิลลิเมตร)
200	0.15	1.2	0.8
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.2813		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.2799		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.5612		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.3138		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.3126		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.6264		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
0.8959	0.1379		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 30

เงื่อนไขการตัดที่ 10 (ช่วงปลาย)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมกมิด (มิลลิเมตร)
200	0.15	1.2	0.8
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.2380		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.2366		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.4747		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.3280		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.3320		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.6600		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
0.7192	0.2039		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 31

เงื่อนไขการตัดที่ 11 (ช่วงต้น)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีจุกมีด (มิลลิเมตร)
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.1543		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.1573		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.3116		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.1453		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.1518		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.2971		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
1.0488	0.0412		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 32

เงื่อนไขการตัดที่ 11 (ช่วงกลาง)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมมีด (มิลลิเมตร)
200	0.2	1	0.8
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.1544		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.1574		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.3118		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.1727		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.1733		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.3460		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
0.9012	0.1282		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 33

เงื่อนไขการตัดที่ 11 (ช่วงปลาย)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมกมิด (มิลลิเมตร)
200	0.2	1	0.8
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.1312		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.1338		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.2650		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.1862		
แรงลบ (เฉลี่ย)	0.1870		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.3732		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ (มิลลิเมตร)	รูปการสีกหรือ	
0.7101	0.2028		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 34

เงื่อนไขการตัดที่ 12 (ช่วงต้น)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมมิด (มิลลิเมตร)
200	0.2	1.4	0.8
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.0735		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.0740		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.1474		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.0722		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.0719		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.1441		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
1.0229	0.0461		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 35

เงื่อนไขการตัดที่ 12 (ช่วงกลาง)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมมิด (มิลลิเมตร)
200	0.2	1.4	0.8

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)		
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.0727	
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.0721	
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.1448	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.0887	
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.0846	
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.1733	
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)	
0.8356	0.1545	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 36

เงื่อนไขการตัดที่ 12 (ช่วงปลาย)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมมิด (มิลลิเมตร)
200	0.2	1.4	0.8
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.0667		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.0662		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.1329		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.1012		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.1008		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.2020		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
0.6581	0.2005		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 37

เงื่อนไขการตัดที่ 13 (ช่วงต้น)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมกมิด (มิลลิเมตร)
250	0.2	1.2	0.8
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.3794		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.3867		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.7661		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.3793		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.3809		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.7602		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
1.0078	0.0481		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 38

เงื่อนไขการตัดที่ 13 (ช่วงกลาง)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมกมิด (มิลลิเมตร)
250	0.2	1.2	0.8
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.4404		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.4383		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.8786		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.5367		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.5346		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	1.0713		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
0.8202	0.1412		

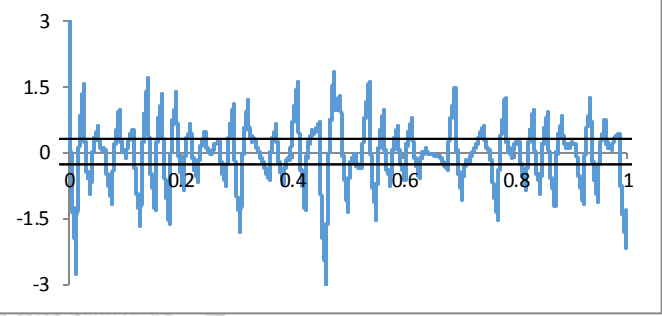
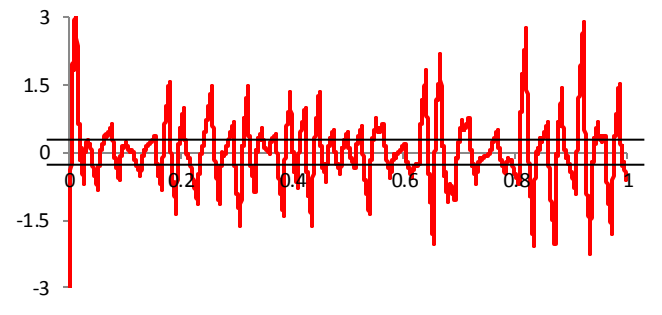
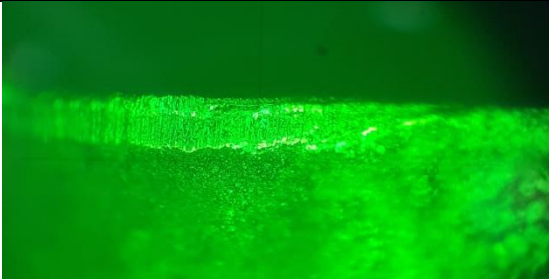
ผลการทดลองตัวอย่างที่ 39

เงื่อนไขการตัดที่ 13 (ช่วงปลาย)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมมีด (มิลลิเมตร)
250	0.2	1.2	0.8
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.3703		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.3681		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.7384		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.5997		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.6070		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	1.2067		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
0.6581	0.2026		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 40

เงื่อนไขการตัดที่ 14 (ช่วงต้น)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมกมิด (มิลลิเมตร)
200	0.1	1.2	1.2
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.2699		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.2751		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.5451		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.2514		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.2627		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.5141		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
1.0603	0.0565		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 41

เงื่อนไขการตัดที่ 14 (ช่วงกลาง)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมกมิด (มิลลิเมตร)
200	0.1	1.2	1.2
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.2398		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.2445		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.4843		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.2697		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.2707		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.5404		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
0.9274	0.1331		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 42

เงื่อนไขการตัดที่ 14 (ช่วงปลาย)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมกมิด (มิลลิเมตร)
200	0.1	1.2	1.2
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.2341		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.2386		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.4728		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.3122		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.3134		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.6256		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
0.7557	0.2010		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 43

เงื่อนไขการตัดที่ 15 (ช่วงต้น)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมกมิด (มิลลิเมตร)
200	0.15	1.4	1.2
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.0534		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.0538		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.1072		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.0523		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.0521		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.1044		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
1.0268	0.0428		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 44

เงื่อนไขการตัดที่ 15 (ช่วงกลาง)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมมิด (มิลลิเมตร)
200	0.15	1.4	1.2
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.1118		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.1109		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.2226		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.1286		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.1225		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.2511		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ (มิลลิเมตร)	รูปการสีกหรือ	
0.8866	0.1399		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 45

เงื่อนไขการตัดที่ 15 (ช่วงปลาย)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมมิด (มิลลิเมตร)
200	0.15	1.4	1.2
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.0991		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.0983		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.1974		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.1458		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.1452		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.2910		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึก หรือ รูปการสึกหรือ (มิลลิเมตร)		
0.6783	0.2037		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 46

เงื่อนไขการตัดที่ 16 (ช่วงต้น)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมกมิด (มิลลิเมตร)
250	0.15	1.4	1.2
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.2331		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.2376		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.4708		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.2276		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.2286		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.4562		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ (มิลลิเมตร)	รูปการสีกหรือ	
1.0319	0.0573		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 47

เงื่อนไขการตัดที่ 16 (ช่วงกลาง)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมกมิด (มิลลิเมตร)
250	0.15	1.4	1.2
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.2084		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.2074		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.4708		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.2276		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.2286		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.4562		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
0.8428	0.1479		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 48

เงื่อนไขการตัดที่ 16 (ช่วงปลาย)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีจุกมีด (มิลลิเมตร)
250	0.15	1.4	1.2
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.1799		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.1788		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.3587		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.2739		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.2773		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.5512		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ (มิลลิเมตร)	รูปการสีกหรือ	
0.6508	0.2016		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 49

เงื่อนไขการตัดที่ 17 (ช่วงต้น)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีจุกมีด (มิลลิเมตร)
200	0.2	1.2	0.4
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลังค์เฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.0324		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.0331		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลังค์	0.0655		
แรงตัดหลักพลังค์เฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.0307		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.0320		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลังค์	0.0627		
อัตราส่วนแรงตัด พลังค์ (dFy/dFz)	ขนาดการสึก หรือ รูปการสึกหรือ (มิลลิเมตร)		
1.0447	0.0494		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 50

เงื่อนไขการตัดที่ 17 (ช่วงกลาง)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมกมิต (มิลลิเมตร)
200	0.2	1.2	0.4
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.2268		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.2321		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.4581		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.2601		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.2611		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.5212		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
0.8789	0.1356		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 51

เงื่อนไขการตัดที่ 17 (ช่วงปลาย)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมมิด (มิลลิเมตร)
200	0.2	1.2	0.4
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.1977		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.2010		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.3982		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.2833		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.2844		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.5677		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
0.7014	0.2045		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 52

เงื่อนไขการตัดที่ 18 (ช่วงต้น)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมกมิด (มิลลิเมตร)
200	1.5	1.2	0.8
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.1121		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.1128		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.2249		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.1073		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.1068		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.2141		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
1.0505	0.0531		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 53

เงื่อนไขการตัดที่ 18 (ช่วงกลาง)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมมิด (มิลลิเมตร)
200	1.5	1.2	0.8
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.3192		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.1381		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.2772		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.1538		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.1466		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.3004		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
0.9229	0.1285		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 54

เงื่อนไขการตัดที่ 18 (ช่วงปลาย)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมกมิด (มิลลิเมตร)
200	1.5	1.2	0.8
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.1357		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.1346		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.2703		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.1843		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.1835		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.3678		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
0.7348	0.2066		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 55

เงื่อนไขการตัดที่ 19 (ช่วงต้น)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมกมิด (มิลลิเมตร)
150	0.1	1.2	0.8
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.2399		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.2446		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.4845		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.2004		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.2004		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.4017		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
1.2062	0.0490		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 56

เงื่อนไขการตัดที่ 19 (ช่วงกลาง)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมมิด (มิลลิเมตร)
150	0.1	1.2	0.8
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.2720		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.2707		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.5427		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.2766		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.2755		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.5521		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
0.9830	0.1286		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 57

เงื่อนไขการตัดที่ 19 (ช่วงปลาย)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมกมิต (มิลลิเมตร)
150	0.1	1.2	0.8
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.2427		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.2413		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.4840		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.2948		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.2983		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.5931		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
0.8161	0.2011		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 58

เงื่อนไขการตัดที่ 20 (ช่วงต้น)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมกมิด (มิลลิเมตร)
250	0.1	1.2	0.8
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.0917		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.0935		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.1815		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.0879		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.0919		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.1798		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
1.0297	0.0499		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 59

เงื่อนไขการตัดที่ 20 (ช่วงกลาง)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีจุกมีด (มิลลิเมตร)
250	0.1	1.2	0.8
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.1233		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.1257		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.2490		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.1403		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.1408		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.2811		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ (มิลลิเมตร)	รูปการสีกหรือ	
0.8857	0.1325		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 60

เงื่อนไขการตัดที่ 20 (ช่วงปลาย)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมกมิด (มิลลิเมตร)
250	0.1	1.2	0.8
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.1226		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.1250		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.2476		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.1769		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.1777		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.3546		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
0.6982	0.2035		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 61

เงื่อนไขการตัดที่ 21 (ช่วงต้น)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมมิด (มิลลิเมตร)
200	0.15	1	0.4
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.0658		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.0663		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.1321		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.0624		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.0622		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.1246		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
1.0603	0.0443		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 62

เงื่อนไขการตัดที่ 21 (ช่วงกลาง)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมมิด (มิลลิเมตร)
200	0.15	1	0.4
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.0754		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.0748		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.1502		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.0822		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.0784		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.1606		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
0.9354	0.1232		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 63

เงื่อนไขการตัดที่ 21 (ช่วงปลาย)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมมิด (มิลลิเมตร)
200	0.15	1	0.4
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.9090		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.0902		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.1811		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.1169		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.1165		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.2334		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
0.7761	0.2002		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 64

เงื่อนไขการตัดที่ 22 (ช่วงต้น)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมมิด (มิลลิเมตร)
200	0.1	1	0.8
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.2728		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.2781		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.5509		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.2487		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.2496		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.4983		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
1.1055	0.0423		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 65

เงื่อนไขการตัดที่ 22 (ช่วงกลาง)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมกมิต (มิลลิเมตร)
200	0.1	1	0.8
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.2716		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.2703		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.5419		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.2903		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.2891		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.5794		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
0.9353	0.1304		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 66

เงื่อนไขการตัดที่ 22 (ช่วงปลาย)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมมีด (มิลลิเมตร)
200	0.1	1	0.8
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.2474		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.2403		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.4933		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.3093		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.3130		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.6223		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึก หรือ รูปการสึกหรือ (มิลลิเมตร)		
0.7027	0.2042		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 67

เงื่อนไขการตัดที่ 23 (ช่วงต้น)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีจุกมีด (มิลลิเมตร)
200	0.15	1	1.2
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.0347		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.0354		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.0701		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.0318		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.0332		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.0650		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
1.0789	0.0398		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 68

เงื่อนไขการตัดที่ 23 (ช่วงกลาง)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมมิด (มิลลิเมตร)
200	0.15	1	1.2
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.0626		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.0638		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.1265		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.0671		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.0674		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.1345		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
0.9404	0.1215		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 69

เงื่อนไขการตัดที่ 23 (ช่วงปลาย)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมกมิด (มิลลิเมตร)
200	0.15	1	1.2
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.0856		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.0873		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.1729		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.1156		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.1160		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.2316		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
0.7465	0.2007		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 70

เงื่อนไขการตัดที่ 24 (ช่วงต้น)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีจุมุมมีด (มิลลิเมตร)
150	0.15	1.2	1.2
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.1364		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.1373		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.2737		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.1161		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.1157		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.2318		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
1.1808	0.0471		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 71

เงื่อนไขการตัดที่ 24 (ช่วงกลาง)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมกมิด (มิลลิเมตร)
150	0.15	1.2	1.2
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.1414		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.1403		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.2817		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.1495		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.1424		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.2919		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
0.9651	0.1265		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 72

เงื่อนไขการตัดที่ 24 (ช่วงปลาย)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมกมิด (มิลลิเมตร)
150	0.15	1.2	1.2
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.1367		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.1356		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.2724		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.1715		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.1708		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.3423		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
0.7951	0.2012		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 73

เงื่อนไขการตัดที่ 25 (ช่วงต้น)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมกมิด (มิลลิเมตร)
250	0.15	1.2	1.2
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.5236		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.5338		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	1.0574		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.5083		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.5104		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	1.0187		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
1.0380	0.0442		

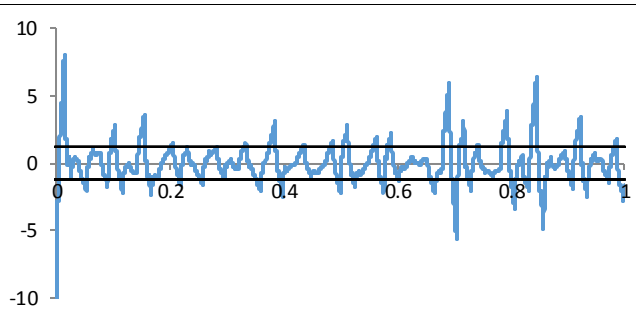
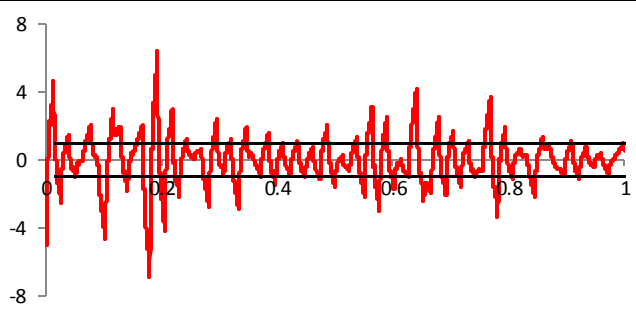
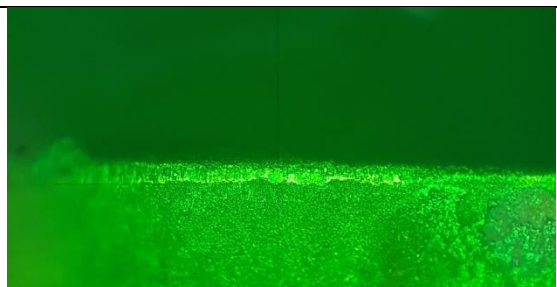
ผลการทดลองตัวอย่างที่ 74

เงื่อนไขการตัดที่ 25 (ช่วงกลาง)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมกมิด (มิลลิเมตร)
250	0.15	1.2	1.2
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.4895		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.4871		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.9766		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.5627		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.5604		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	1.1231		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
0.8695	0.1308		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 75

เงื่อนไขการตัดที่ 25 (ช่วงปลาย)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมกมิด (มิลลิเมตร)
250	0.15	1.2	1.2
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.0638		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.0636		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.1275		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.0946		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.0957		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.1903		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
0.6700	0.2009		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 76

เงื่อนไขการตัดที่ 26 (ช่วงต้น)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมกมิด (มิลลิเมตร)
250	0.15	1.2	0.4
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.4681		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.4772		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.9457		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.4411		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.4610		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.0.933		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
1.0478	0.0431		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 77

เงื่อนไขการตัดที่ 26 (ช่วงกลาง)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมมิด (มิลลิเมตร)
250	0.15	1.2	0.4
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.4233		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.4315		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.8549		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.4707		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.4725		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.1487		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
0.9063	0.1208		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 78

เงื่อนไขการตัดที่ 26 (ช่วงปลาย)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมมิด (มิลลิเมตร)
250	0.15	1.2	0.4
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.4222		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.4304		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.8526		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.6248		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.4971		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	1.2522		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
0.6809	0.2000		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 79

เงื่อนไขการตัดที่ 27 (ช่วงต้น)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมมิด (มิลลิเมตร)
150	0.2	1.2	0.8
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.0527		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.0530		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.1057		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.0407		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.0466		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.0933		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
1.1330	0.0448		

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 80

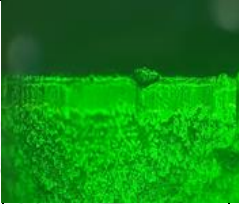



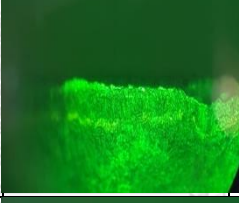



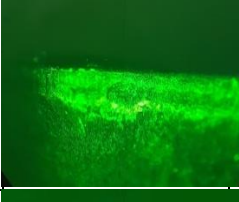

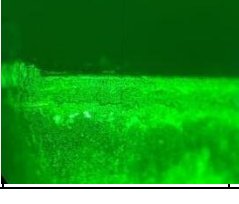

เงื่อนไขการตัดที่ 27 (ช่วงกลาง)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมมิด (มิลลิเมตร)
150	0.2	1.2	0.8
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.0699		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.0694		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.1393		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.0761		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.0725		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.1487		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
0.9373	0.1314		

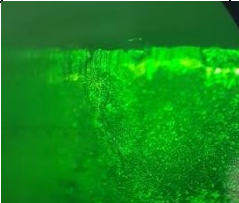
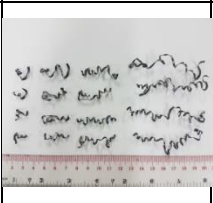
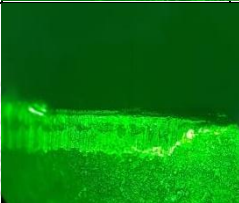


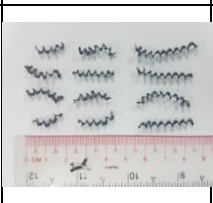
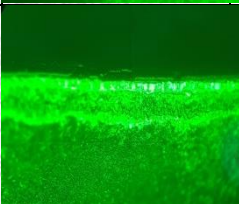
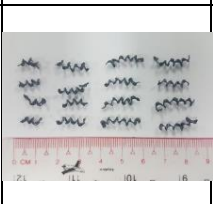
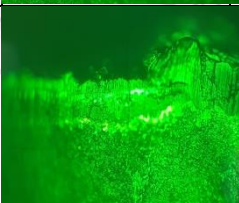
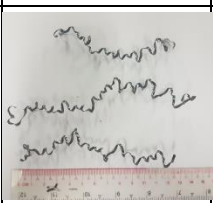
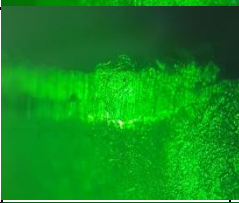

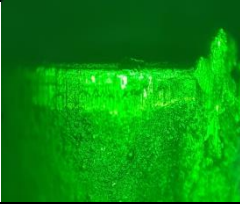

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 81

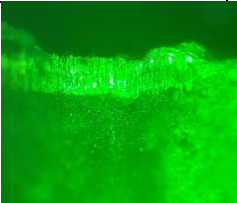

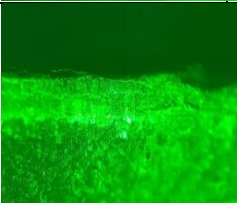

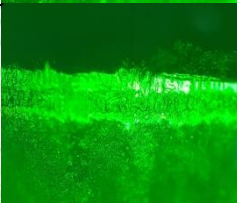

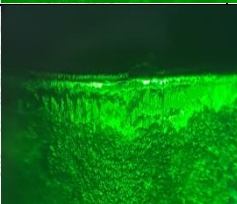
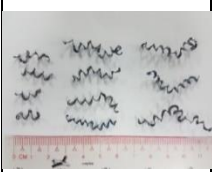
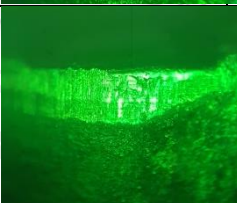
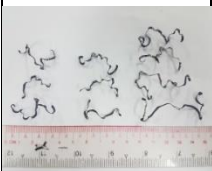
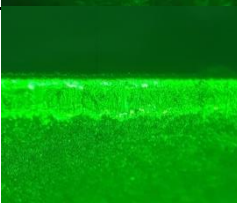

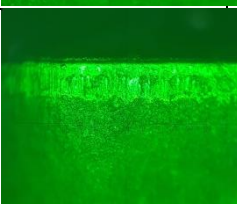

เงื่อนไขการตัดที่ 27 (ช่วงปลาย)			
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมมิด (มิลลิเมตร)
150	0.2	1.2	0.8
ผลการทดลอง			
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.0699		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.0694		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.1393		
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)			
แรงบวก (เฉลี่ย)	0.0761		
แรงลบ (เฉลี่ย)	-0.0725		
ความแปรปรวนเฉลี่ย แรงป้อนตัดพลวัต	0.1921		
อัตราส่วนแรงตัด พลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ รูปการสีกหรือ (มิลลิเมตร)		
0.7562	0.2055		

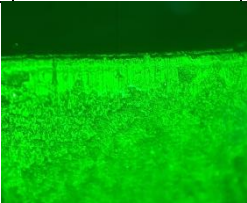
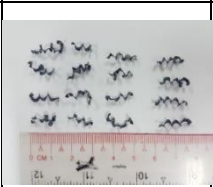
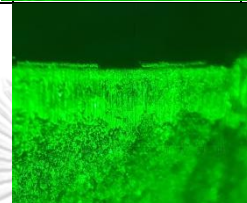

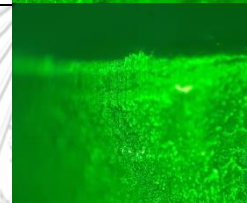


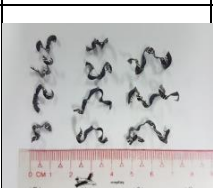
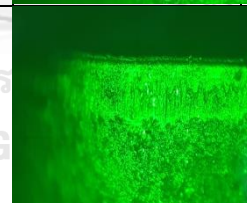

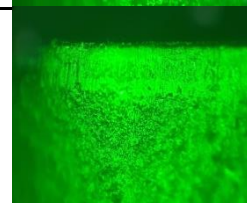

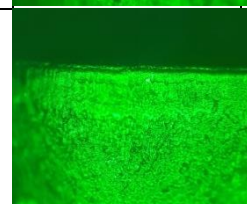

ภาคผนวก ค

ตารางแสดงเงื่อนไขของภาพเศษโลหะ ที่มีขนาดการสึกหรอมีดกลึง 0.19 มิลลิเมตร

ลำดับ ที่	V (m/min)	f (mm /rev)	d (mm)	Rn (mm)	ภาพขนาดการสึก (Flank wear, Vb)	Vb (mm)	ภาพเศษโลหะ	ลักษณะ ของเศษ โลหะ
1	150	0.15	1	0.8		0.19		แบบต่อเนื่อง
2	150	0.15	1.4	0.8		0.19		แบบผสม
3	200	0.15	1.2	0.8		0.19		แบบแตกหัก
4	200	0.1	1.2	0.4		0.19		แบบผสม
5	250	0.15	1.4	0.8		0.19		แบบผสม
6	200	0.2	1.2	1.2		0.19		แบบผสม

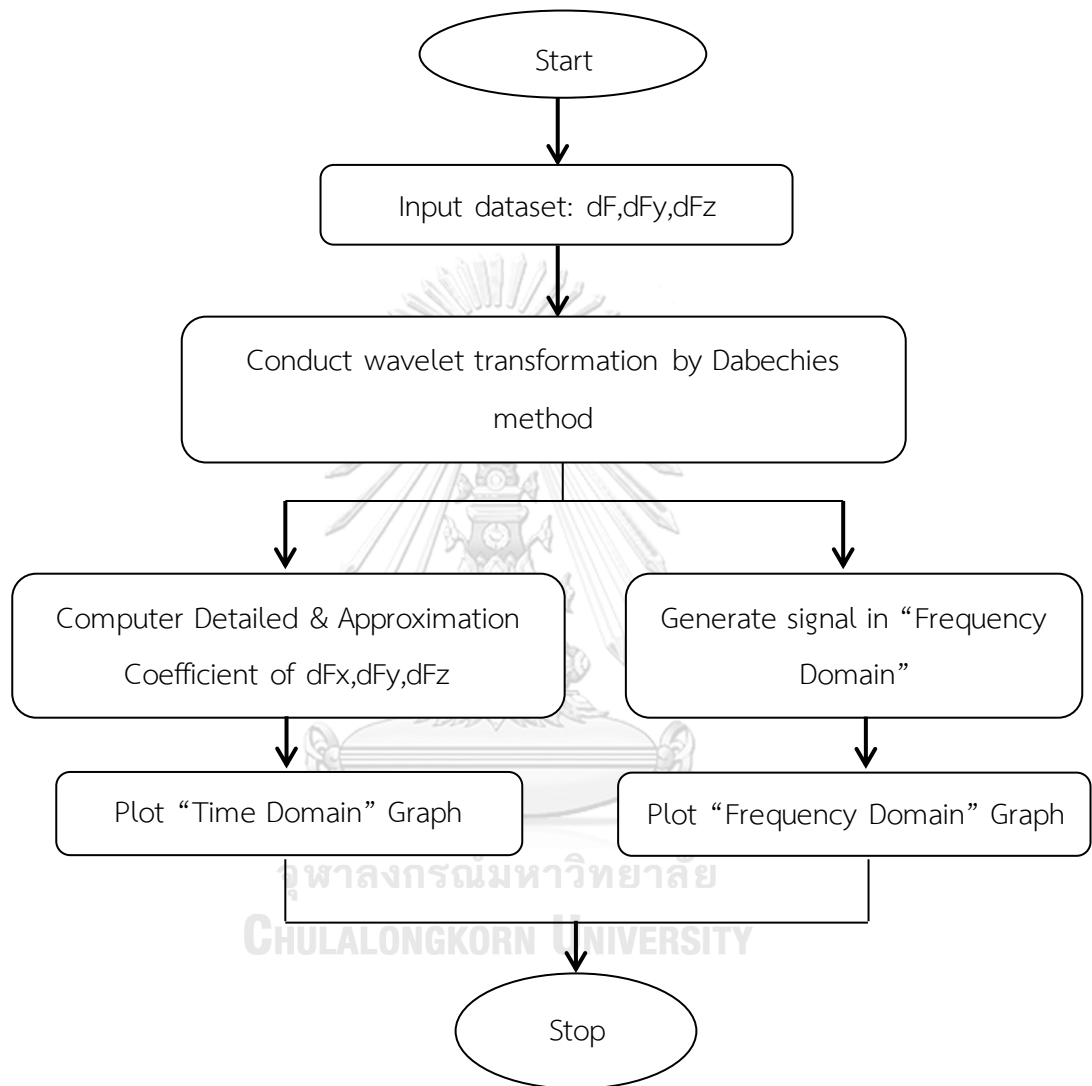
ลำดับที่	V (m/min)	f (mm/rev)	d (mm)	รัศมีจุ่มมีด	ภาพขนาดการสึก (Flank wear, Vb)	Vb (mm)	ภาพเศษโลหะ	ลักษณะของเศษโลหะ
7	200	0.15	1.4	0.4		0.19		แบบผสม
8	150	0.15	1.2	0.4		0.19		แบบผสม
9	200	0.1	1.4	0.8		0.19		แบบผสม
10	200	0.15	1.2	0.4		0.19		แบบผสม
11	200	0.2	1	0.8		0.19		แบบต่อเนื่อง
12	200	0.2	1.4	0.8		0.19		แบบผสม
13	250	0.2	1.2	0.8		0.19		แบบต่อเนื่อง

ลำดับ ที่	V (m/min)	f (mm /rev)	d (mm)	รัศมี จุ่ม มีด	ภาพขนาดการสึก (Flank wear, Vb)	Vb (mm)	ภาพเศษโลหะ	ลักษณะ ของเศษ โลหะ
14	200	0.1	1.2	1.2		0.19		แบบผสม
15	200	0.15	1.4	1.2		0.19		แบบต่อเนื่อง
16	250	0.15	1	0.8		0.19		แบบแตกหัก
17	200	0.2	1.2	0.4		0.19		แบบผสม
18	200	0.15	1.2	0.8		0.19		แบบผสม
19	150	0.1	1.2	0.8		0.19		แบบผสม
20	250	0.1	1.2	0.8		0.19		แบบผสม

ลำดับ ที่	V (m/min)	f (mm /rev)	d (mm)	รัศมี จุ่ม มีด	ภาพขนาดการสึก (Flank wear, Vb)	Vb (mm)	ภาพเศษโลหะ	ลักษณะ ของเศษ โลหะ
21	200	0.15	1	0.4		0.19		แบบผสม
22	200	0.1	1	0.8		0.19		แบบผสม
23	200	0.15	1	1.2		0.19		แบบต่อเนื่อง
24	150	0.15	1.2	1.2		0.19		แบบผสม
25	250	0.15	1.2	1.2		0.19		แบบ แตกหัก
26	250	0.15	1.2	0.4		0.19		แบบผสม
27	150	0.2	1.2	0.8		0.19		แบบผสม

ภาคผนวก ง

แสดงการแปลงเวฟเล็ตด้วยโปรแกรม Matlab



โปรแกรม MATLAB

% โหลดข้อมูลแรงตึงในแกน dFx,dFy,dFz เข้าสู่โปรแกรม %

```
forceroughness = textread('10.txt');l_x1 = length(forceroughness)
fx = forceroughness(:,1); fy = forceroughness(:,2); fz = forceroughness(:,3);
[N,n]=size(forceroughness);
samp = 10000;
t=1/samp;
tt=(0:t*(N-1));
f=(0:N-1)/N*samp;
freq1 = f(1:N/2);
```

%แปลงสัญญาณ เวฟเล็ต แบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform) โดยใช้การแปลง

แบบดอเบชีส์

```
[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');
[cAx6,cDx6] = dwt(cAx5,'db2');
[cAx7,cDx7] = dwt(cAx6,'db2');
[cAx8,cDx8] = dwt(cAx7,'db2');
```

```
[cAy2,cDy2] = dwt(cAy1,'db2');
[cAy3,cDy3] = dwt(cAy2,'db2');
[cAy4,cDy4] = dwt(cAy3,'db2');
[cAy5,cDy5] = dwt(cAy4,'db2');
[cAy6,cDy6] = dwt(cAy5,'db2');
[cAy7,cDy7] = dwt(cAy6,'db2');
[cAy8,cDy8] = dwt(cAy7,'db2');
```

```
[cAz2,cDz2] = dwt(cAz1,'db2');
[cAz3,cDz3] = dwt(cAz2,'db2');
[cAz4,cDz4] = dwt(cAz3,'db2');
[cAz5,cDz5] = dwt(cAz4,'db2');
[cAz6,cDz6] = dwt(cAz5,'db2');
```



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

```
[cAz7,cDz7] = dwt(cAz6,'db2');
```

```
[cAz8,cDz8] = dwt(cAz7,'db2');
```

%สร้างสัมประสิทธิ์ในแบบDetail Coefficients ของสัญญาณแรงตัดพลวัต dFx

```
Dx1 = upcoef('d',cDx1,'db2',1,l_x1);
```

```
Dx2 = upcoef('d',cDx2,'db2',2,l_x1);
```

```
Dx3 = upcoef('d',cDx3,'db2',3,l_x1);
```

```
Dx4 = upcoef('d',cDx4,'db2',4,l_x1);
```

```
Dx5 = upcoef('d',cDx5,'db2',5,l_x1);
```

```
Dx6 = upcoef('d',cDx6,'db2',6,l_x1);
```

```
Dx7 = upcoef('d',cDx7,'db2',7,l_x1);
```

```
Dx8 = upcoef('d',cDx8,'db2',8,l_x1);
```

%สร้างสัมประสิทธิ์ในแบบ Approximation Coefficients ของสัญญาณแรงตัดพลวัต dFx

```
Ax1 = upcoef('a',cAx1,'db2',1,l_x1);
```

```
Ax2 = upcoef('a',cAx2,'db2',2,l_x1);
```

```
Ax3 = upcoef('a',cAx3,'db2',3,l_x1);
```

```
Ax4 = upcoef('a',cAx4,'db2',4,l_x1);
```

```
Ax5 = upcoef('a',cAx5,'db2',5,l_x1);
```

```
Ax6 = upcoef('a',cAx6,'db2',6,l_x1);
```

```
Ax7 = upcoef('a',cAx7,'db2',7,l_x1);
```

```
Ax8 = upcoef('a',cAx8,'db2',8,l_x1);
```

%สร้างสัมประสิทธิ์ในแบบDetail Coefficients ของสัญญาณแรงตัดพลวัต dFy

```
Dy1 = upcoef('d',cDy1,'db2',1,l_x1);
```

```
Dy2 = upcoef('d',cDy2,'db2',2,l_x1);
```

```
Dy3 = upcoef('d',cDy3,'db2',3,l_x1);
```

```
Dy4 = upcoef('d',cDy4,'db2',4,l_x1);
```

```
Dy5 = upcoef('d',cDy5,'db2',5,l_x1);
```

```
Dy6 = upcoef('d',cDy6,'db2',6,l_x1);
```

```
Dy7 = upcoef('d',cDy7,'db2',7,l_x1);
```

```
Dy8 = upcoef('d',cDy8,'db2',8,l_x1);
```

%สร้างสัมประสิทธิ์ในแบบ Approximation Coefficients ของสัญญาณแรงตัดพลวัต dFy

```
Ay1 = upcoef('a',cAy1,'db2',1,l_x1);
```

```
Ay2 = 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);
```

```
Ay6 = upcoef('a',cAy6,'db2',6,l_x1);
Ay7 = upcoef('a',cAy7,'db2',7,l_x1);
Ay8 = upcoef('a',cAy8,'db2',8,l_x1);
```

%สร้างสัมประสิทธิ์ในแบบ Detail Coefficients ของสัญญาณแรงตัดพลวัต dFz

```
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);
Dz6 = upcoef('d',cDz6,'db2',6,l_x1);
Dz7 = upcoef('d',cDz7,'db2',7,l_x1);
Dz8 = upcoef('d',cDz8,'db2',8,l_x1);
```

%สร้างสัมประสิทธิ์ในแบบ Approximation Coefficients ของสัญญาณแรงตัดพลวัต dFz

```
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);
Az6 = upcoef('a',cAz6,'db2',6,l_x1);
Az7 = upcoef('a',cAz7,'db2',7,l_x1);
Az8 = upcoef('a',cAz8,'db2',8,l_x1);
```

%สร้างกราฟในโดเมนเวลา

```
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(5,1,1);
plot(time,forceroughness(:,1));
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force x (N)');title('Original Signal');ylim([-20 20]);
subplot(5,1,2)
plot(time,Dx1)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force x (N)');title('Detail Signal D1'); ylim([-10 10]);
subplot(5,1,3)
plot(time,Dx2)
```



```

grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force x (N)');title('Detail Signal D2');ylim([-10 10]);
subplot(5,1,4)
plot(time,Dx3)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force x (N)');title('Detail Signal D3');ylim([-10 10]);
subplot(5,1,5)
plot(time,Dx4)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force x (N)');title('Detail Signal D4');ylim([-10 10]);

figure(2);
subplot(4,1,1)
plot(time,Dx5)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force x (N)');title('Detail Signal D5');ylim([-10 10]);
subplot(4,1,2)
plot(time,Dx6)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force x (N)');title('Detail Signal D6');ylim([-5 5]);
subplot(4,1,3)
plot(time,Dx7)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force x (N)');title('Detail Signal D7');ylim([-2 2]);
subplot(4,1,4)
plot(time,Dx8)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force x (N)');title('Detail Signal D8');ylim([-2 2]);

figure(3);
subplot(5,1,1);
plot(time,forceroughness(:,2));
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force y (N)');title('Original Signal');ylim([-20 20]);
subplot(5,1,2)
plot(time,Dy1)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force y (N)');title('Detail Signal D1');ylim([-20 20]);
subplot(5,1,3)
plot(time,Dy2)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force y (N)');title('Detail Signal D2');ylim([-20 20]);
subplot(5,1,4)
plot(time,Dy3)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force y (N)');title('Detail Signal D3');ylim([-20 20]);
subplot(5,1,5)
plot(time,Dy4)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force y (N)');title('Detail Signal D4');ylim([-10 10]);

```

```

figure(4);
subplot(4,1,1)
plot(time,Dy5)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force y (N)');title('Detail Signal D5');ylim([-10 10]);
subplot(4,1,2)
plot(time,Dy6)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force y (N)');title('Detail Signal D6');ylim([-10 10]);
subplot(4,1,3)
plot(time,Dy7)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force y (N)');title('Detail Signal D7');ylim([-5 5]);
subplot(4,1,4)
plot(time,Dy8)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force y (N)');title('Detail Signal D8');ylim([-2 2]);

```

```

figure(5);
subplot(5,1,1);
plot(time,forceroughness(:,3));
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force z (N)');title('Original Signal'); ylim([-20 20]);
subplot(5,1,2)
plot(time,Dz1)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force z (N)');title('Detail Signal D1'); ylim([-20 20]);
subplot(5,1,3)
plot(time,Dz2)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force z (N)');title('Detail Signal D2'); ylim([-20 20]);
subplot(5,1,4)
plot(time,Dz3)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force z (N)');title('Detail Signal D3'); ylim([-20 20]);
subplot(5,1,5)
plot(time,Dz4)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force z (N)');title('Detail Signal D4'); ylim([-20 20]);

```

```

figure(6);
subplot(4,1,1)
plot(time,Dz5)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force z (N)');title('Detail Signal D5'); ylim([-10 10]);
subplot(4,1,2)
plot(time,Dz6)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force z (N)');title('Detail Signal D6'); ylim([-5 5]);
subplot(4,1,3)
plot(time,Dz7)

```

```

grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force z (N)');title('Detail Signal D7'); ylim([-5 5]);
subplot(4,1,4)
plot(time,Dz8)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force z (N)');title('Detail Signal D8'); ylim([-2 2]);

```

%สร้างสัญญาณในรูปโดเมนความถี่

```
%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 = 10000;
```

```
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;
```



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

```
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;
```

```
% สร้างกราฟในรูปแบบโดเมนความถี่
```

```
figure(7);
```

```
subplot(5,1,1);
```

```
plot(fx0abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum x');title('Original Signal'); xlim([000 500]); ylim([0 inf]);
```

```
subplot(5,1,2);
```

```
plot(fx1abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum x');title('Detail Signal D1'); xlim([000 500]); ylim([0 inf]);
```

```
subplot(5,1,3);
```

```
plot(fx2abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum x');title('Detail Signal D2'); xlim([000 500]); ylim([0 inf]);
```



```

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

figure(8);
subplot(4,1,1);
plot(fx5abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum x');title('Detail Signal D5'); xlim([000 500]); ylim([0 inf]);
subplot(4,1,2);
plot(fx6abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum x');title('Detail Signal D6'); xlim([000 500]); ylim([0 inf]);
subplot(4,1,3);
plot(fx7abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum x');title('Detail Signal D7'); xlim([000 500]); ylim([0 inf]);
subplot(4,1,4);
plot(fx8abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum x');title('Detail Signal D8'); xlim([000 500]); ylim([0 inf]);

figure(9);
subplot(5,1,1);
plot(fy0abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum y');title('Original Signal'); xlim([000 500]); ylim([0 inf]);
subplot(5,1,2);
plot(fy1abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum y');title('Detail Signal D1'); xlim([000 500]); ylim([0 inf]);
subplot(5,1,3);
plot(fy2abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum y');title('Detail Signal D2'); xlim([000 500]); ylim([0 inf]);
subplot(5,1,4);
plot(fy3abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum y');title('Detail Signal D3'); xlim([000 500]); ylim([0 inf]);
subplot(5,1,5);
plot(fy4abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum y');title('Detail Signal D4'); xlim([000 500]); ylim([0 inf]);

figure(10);
subplot(4,1,1);
plot(fy5abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum y');title('Detail Signal D5'); xlim([000 500]); ylim([0 inf]);
subplot(4,1,2);
plot(fy6abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum y');title('Detail Signal D6'); xlim([000 500]); ylim([0 inf]);
subplot(4,1,3);
plot(fy7abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum y');title('Detail Signal D7'); xlim([000 500]); ylim([0 inf]);
subplot(4,1,4);
plot(fy8abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum y');title('Detail Signal D8'); xlim([000 500]); ylim([0 inf]);

figure(11);
subplot(5,1,1);
plot(fz0abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum z');title('Original Signal'); xlim([000 500]); ylim([0 inf]);

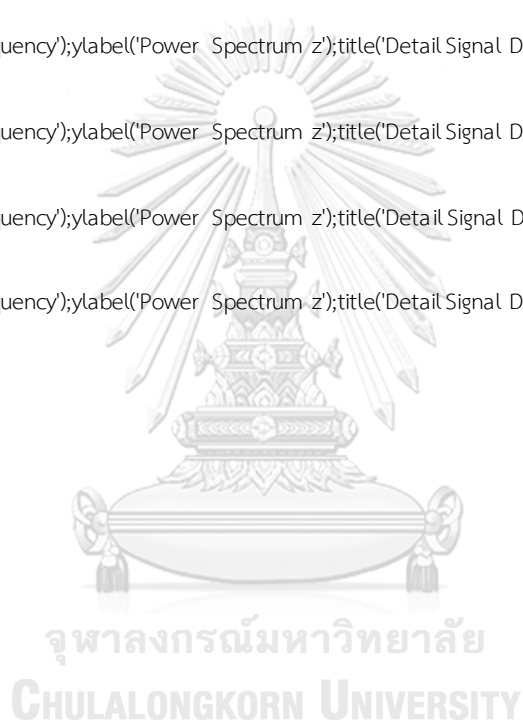
```

```

subplot(5,1,2);
plot(fz1abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum z');title('Detail Signal D1'); xlim([000 500]); ylim([0 inf]);
subplot(5,1,3);
plot(fz2abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum z');title('Detail Signal D2'); xlim([000 500]); ylim([0 inf]);
subplot(5,1,4);
plot(fz3abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum z');title('Detail Signal D3'); xlim([000 500]); ylim([0 inf]);
subplot(5,1,5);
plot(fz4abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum z');title('Detail Signal D4'); xlim([000 500]); ylim([0 inf]);

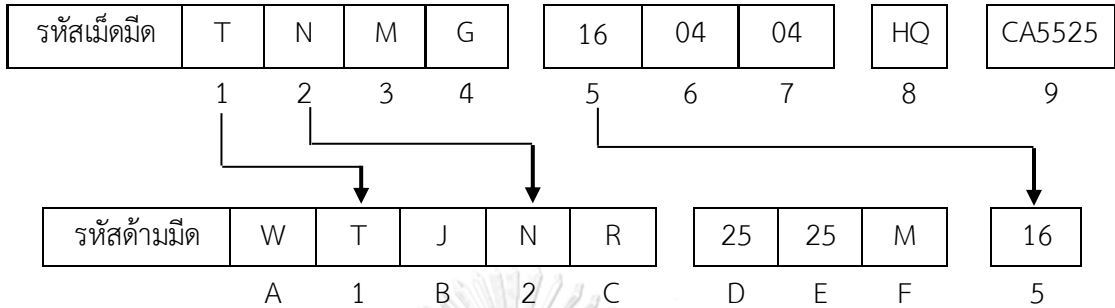
figure(12);
subplot(4,1,1);
plot(fz5abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum z');title('Detail Signal D5'); xlim([000 500]); ylim([0 inf]);
subplot(4,1,2);
plot(fz6abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum z');title('Detail Signal D6'); xlim([000 500]); ylim([0 inf]);
subplot(4,1,3);
plot(fz7abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum z');title('Detail Signal D7'); xlim([000 500]); ylim([0 inf]);
subplot(4,1,4);
plot(fz8abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum z');title('Detail Signal D8'); xlim([000 500]); ylim([0 inf]);

```



ภาคผนวก จ

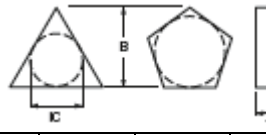
รหัสมาตรฐานเม็ตมีดและด้ามมีด







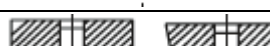



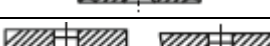
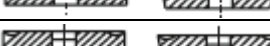











ความหมายของสัญลักษณ์ตามมาตรฐาน ISO 1832-1991

1 : รูปทรงของเม็ตมีด		2 : มุมหลบ		3 : ค่าพิคัดเพื่อ			
สัญลักษณ์	รูปทรง	สัญลักษณ์	รูปทรง				
H	120° Hexagon	A	3°	Class	B	IC	T
O	135° Octagon	B	5°		(+/-)	(+/-)	(+/-)
P	108° Pentagon	C	7°	A	.005	.025	.025
S	90° Square	D	15°	B	.005	.025	.13
T	60° Triangle	E	20°	C	.013	.025	.025
C	80° Rhombic	F	25°	D	.013	.025	.13
E	75° Rhombic	G	30°	E	.025	.025	.025
F	50° Rhombic	N	0°	F	.005	.013	.025
M	86° Rhombic	P	11°	G	.025	.025	.013
V	35° Rhombic			H	.013	.013	.025
W	80° Trigon			J*	.005	.05-.15	.025
L	90° Rectangle			K*	.013	.05-.15	.025
A	85° Parallelogram			L*	.025	.05-.15	.025
				M*	.08-.20	.05-.15	.025

1 : รูปทรงของเม็ดมีด	
สัญลักษณ์	รูปทรง
B	82°Parallelogram
K	55° Parallelogram
R	Round

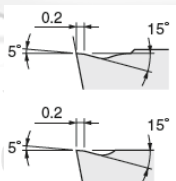
3 : ค่าพิคัดเผื่อ			
			
Class	B	IC	T
	(+/-)	(+/-)	(+/-)
N*	.08-.20	.05-.15	.025
U*	.13-.38	.08-.25	.13

4 : รู/การหักเศษโลหะ				
สัญลักษณ์	รู	รูปร่าง	ตัวหักเศษโลหะ	รูปร่าง
N	ไม่มี	-	ไม่มี	
R			1 ด้าน	
F			2 ด้าน	
A	มีรู	มีรู	ไม่มี	
M			1 ด้าน	
G			2 ด้าน	
W		มีรูและคว้าน1ด้าน	ไม่มี	
T		40°-60°	1 ด้าน	
Q		มีรูและคว้าน2ด้าน	ไม่มี	
U		40°-60°	2 ด้าน	
B		มีรูและคว้าน1ด้าน	ไม่มี	
H		40°-60°	1 ด้าน	
C		มีรูและคว้าน2ด้าน	ไม่มี	
J	40°-60°	2 ด้าน		
X	-	-	-	-

5 : ความยาวขอบ							
							IC (mm)
03	04		03	06			3.97
04	05		04	08	08		4.76
		05					5
05	06		05	09		03	5.56
		06					6
06	07		06	11	11	04	6.35
08	09		07	13		05	7.94
		08					8
09	11	09	09	16	16	06	9.525
	12	10					10
		12					12
12	15	12	12	22	22	08	12.7
16	19	15	15	27	27	10	15.875
		16					16
19	23	19	19	33	33	13	19.05
		20					20
22	27		22	38			22.225
		25					25
25	31	25	25	44	44	17	25.4
32	38	31	31	54	54	21	31.75
		32					32

6 : ความหนา	
mm	สัญลักษณ์
1.59	01
2.38	02
2.78	T2
3.18	03
3.97	T3
4.76	04
5.56	05
6.35	06
7.94	07
9.525	09

7 : รัศมีจุกมิด	
mm	สัญลักษณ์
ขอบแหลม	00
0.03	003
0.1	01
0.2	02
0.4	04
0.8	08
1.2	12
1.6	16
2.0	20
2.4	24
2.8	28
3.2	32

8 : ลักษณะพิเศษ		
รหัส	การออกแบบ	ประโยชน์
HQ		ตัวหักเศษโลหะอนเนกประสงค์เหมาะสำหรับการตัดปานกลาง

9 : ผิวเคลือบเม็ดมิด			
รหัส	สี	ส่วนประกอบหลักของสารเคลือบ	ประโยชน์
CA5525	ทอง	Micro columnar (TiCN+Al ₂ O ₃ TiN)	ปรับปรุงความเหนียวและต้านทานการสึกหรอ

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว ภัทร ไชยวงศ์ เกิดเมื่อวันที่ 27 ตุลาคม 2529 ที่กรุงเทพมหานคร ต่อมาสำเร็จ การศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนสตรีวิทยา 2 จังหวัดกรุงเทพมหานคร หลังจากนั้น ได้เข้าศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล จังหวัดนครปฐม และสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2552 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2557

