

การศึกษาความซรุขระผิวและแรงต้วร่วมกับอุณหภูมิในการตัดสำหรับกระบวนการกัดหัวบอลโดยการ  
ประยุกต์ใช้วิธีการพ่นผิวตอบสนอง

นางสาวพรรณรวิทย์ ไยสุข

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MONITORING OF SURFACE ROUGHNESS BASED ON CUTTING FORCE AND CUTTING  
TEMPERATURE IN BALL-END MILLING PROCESS BY UTILIZING  
RESPONSE SURFACE ANALYSIS

Miss Panrawee Yaisuk



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 2014  
Copyright of Chulalongkorn University



พรรณรวีร์ ไยสุข : การศึกษาความขรุขระผิวและแรงตัดร่วมกับอุณหภูมิในการตัดสำหรับกระบวนการกัดหัวบอลโดยการประยุกต์ใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (MONITORING OF SURFACE ROUGHNESS BASED ON CUTTING FORCE AND CUTTING TEMPERATURE IN BALL-END MILLING PROCESS BY UTILIZING RESPONSE SURFACE ANALYSIS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ, 156 หน้า.

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาความขรุขระผิว แรงตัดและอุณหภูมิในการตัดภายใต้เงื่อนไขการตัดสำหรับกระบวนการกัดเหล็กกล้าคาร์บอน S50C ด้วยมีดกัดหัวบอล โดยการประยุกต์ใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนองด้วยการออกแบบการทดลองแบบบล็อก-เบห์นเคน และมีเงื่อนไขการตัด ได้แก่ ความเร็วรอบที่ 8000, 10000 และ 12000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัดที่ 0.02, 0.04 และ 0.06 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัดที่ 0.5, 0.7 และ 0.9 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดตัดหัวบอล 6, 8 และ 10 มิลลิเมตร

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอและพัฒนาแบบจำลองของความขรุขระผิว อัตราส่วนแรงตัดและอุณหภูมิตัด จากผลการทดลองพบว่าแนวโน้มการเพิ่มของสัดส่วนแรงตัดและอุณหภูมิการตัดนั้นสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของค่าความขรุขระผิว ซึ่งการเพิ่มขึ้นของเงื่อนไขต่างๆ ทั้งความเร็วรอบตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด จะส่งผลให้ความขรุขระผิว อัตราส่วนแรง และอุณหภูมิในกระบวนการตัดเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดตัดหัวบอลนั้น กลับส่งผลให้อุณหภูมิขณะตัดลดลง สำหรับเงื่อนไขการตัดที่ดีที่สุดจะพิจารณาจากค่าความขรุขระผิวที่น้อยที่สุดซึ่งค่าความขรุขระผิวที่ดีที่สุดที่น้อยที่สุดจากผลการทดลองนี้คือ 0.0443 ไมครอน ที่ความเร็วรอบ 8000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดตัดหัวบอล 6 มิลลิเมตร จากการตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมา นั้นแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทั้งหมดสามารถนำไปทำนายความขรุขระผิว สัดส่วนแรงตัด และอุณหภูมิในการตัดได้ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ปีการศึกษา 2557

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 5470977421 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORDS: BALL-END MILLING, SURFACE ROUGHNESS, RESPONSE SURFACE ANALYSIS , BOX-BEHNKEN DESIGN , CUTTING FORCE, 156 TEMPERATURE

PANRAWEE YAISUK: MONITORING OF SURFACE ROUGHNESS BASED ON CUTTING FORCE AND CUTTING TEMPERATURE IN BALL-END MILLING PROCESS BY UTILIZING RESPONSE SURFACE ANALYSIS. ADVISOR: ASSOC. PROF. SOMKIAT TANGJITSITCHAROEN, D.Eng., pp.

The surface roughness, the cutting force and the cutting temperature are monitored in the ball-end milling process for the plain carbon steel (S50C) under the various cutting conditions. The response surface analysis with the Box-Behnken design is utilized for the cutting tests and the cutting conditions are the cutting speeds of 8000, 10000, 12000 rev/min, the feed rates of 0.02, 0.04, 0.06 mm/rev, the depth of cuts of 0.5, 0.7, 0.9 mm and the tool diameters of 6, 8, 10 mm. The models of the surface roughness, the cutting force ratio and the cutting temperature are proposed and developed based on the experimental results. It can be explained that the increasing trends of the cutting force ratio and the cutting temperature correspond to the surface roughness. An increase in cutting speed, feed rate and depth of cut causes the higher surface roughness. While the tool diameter increases, the cutting temperature decreases. The optimum cutting condition is obtained referring to the minimum surface roughness that is 0.0443  $\mu\text{m}$  at the cutting speed of 8000 rev/min, the feed rate of 0.02 mm/rev, the depth of cut of 0.5 mm and the tool diameter of 6 mm. The model verification has showed that the experimentally obtained surface roughness model is reliable and accurate to estimate the surface roughness at the 95% confident level.

Department: Industrial Engineering

Student's Signature .....

Field of Study: Industrial Engineering

Advisor's Signature .....

Academic Year: 2014

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำขอขอบพระคุณ ท่านรองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูงที่ให้โอกาส แนะนำความรู้ ชี้แนะแนวทางการดำเนินการ ตลอดจนให้แนวทางในการแก้ไขปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นในการทำงานวิจัยจนสามารถทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ได้เสนอแนะข้อคิดต่างๆพร้อมทั้งตรวจแก้ไขข้อบกพร่องในการเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนถูกต้องสมบูรณ์

ขอขอบคุณ นายสมชาติ อารยพิทยา และนายชาญณรงค์ รุ่งเรือง ที่ได้แนะนำวิธีการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือในการทดลอง รวมถึงช่วยแก้ไขแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างทำการทดลองจนทำให้งานวิจัยสำเร็จตามเป้าหมาย

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณครอบครัว และเพื่อนๆทุกคนสำหรับความช่วยเหลือ และคอยให้กำลังใจแก่ผู้จัดทำ จนทำให้งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จ

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฉ
บทนำ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	5
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
1.6 ขั้นตอนการทำการวิจัย.....	7
บทที่ 2.....	8
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 กระบวนการตัด [9].....	8
2.2 กระบวนการกัด.....	8
2.3 เงื่อนไขการตัด.....	13
2.4 แรงที่ทำให้ในการตัด (Cutting Force) [10].....	15
2.5 ความเรียบผิวหรือความขรุขระผิว (Surface Roughness)[11].....	16
ความเรียบผิวสำเร็จ (Surface Finish).....	17
2.6 อุณหภูมิการตัด (Cutting Temperature)[12, 13].....	18
การวัดอุณหภูมิบนมีดตัด (Measurement temperature on Cutting Tool).....	20

2.7 วิธีการประมาณด้วยสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Method)[14] .....	20
2.8 การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม [15].....	22
2.8.1 การออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบสนอง [4].....	23
2.8.2 การออกแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน [15].....	25
2.9 การวิเคราะห์ผล [15].....	27
2.9.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	27
2.9.2 การทดสอบสมมุติฐาน .....	28
2.9.3 ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) .....	29
2.9.4 การใช้ P-Value ในการทดสอบสมมุติฐาน .....	30
2.9.5 การทดสอบความเหมาะสมของสมการแบบจำลอง .....	31
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	32
บทที่ 3.....	37
วิธีดำเนินการวิจัย .....	37
3.1 การออกแบบการทดลอง.....	37
3.2 การกำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง.....	37
3.2.1 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความขรุขระผิวของชิ้นงาน.....	37
3.2.2 ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง .....	37
3.3 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดลอง.....	38
3.4 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	42
3.5 การออกแบบการทดลอง.....	45
3.6 การเก็บรวบรวมข้อมูล .....	47
3.6.1 ความขรุขระผิวหรือความเรียบผิว .....	47
3.6.2 แรงที่ใช้ในการตัด .....	47



3.6.3 อุณหภูมิตัด.....	48
3.7 การวิเคราะห์ข้อมูล .....	53
3.7.1 โปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลการทดลอง .....	53
3.7.2 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองเพื่อใช้ในการออกแบบรูปแบบการทดลอง .....	53
3.7.3 การตรวจสอบค่าความเพียงพอของแบบจำลอง .....	53
บทที่ 4.....	55
ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	55
4.1 การบันทึกผลแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้น.....	55
4.2 ผลการทดลอง.....	56
4.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าความขรุขระผิว .....	63
4.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง .....	64
4.4.1 การวิเคราะห์ผลการทดลองของความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra).....	64
4.4.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองสำหรับความขรุขระผิวเฉลี่ย .....	68
4.4.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองของอัตราส่วนแรงตัด $F_x/F_z$ .....	71
4.4.4 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองอัตราส่วนแรงตัด ( $F_x/F_z$ ).....	75
4.4.5 การวิเคราะห์ผลการทดลองของอุณหภูมิตัด.....	78
4.4.6 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองสำหรับอุณหภูมิตัด .....	82
4.5 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิว อัตราส่วนแรงตัด และอุณหภูมิในการตัด .....	85
4.6 การวิเคราะห์เงื่อนไขการตัดที่เหมาะสม .....	88
4.7 การทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลอง.....	91
4.7 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างเศษโลหะ เงื่อนไขการตัด ความขรุขระผิว สัดส่วนแรงตัด และอุณหภูมิในการตัด.....	104
บทที่ 5.....	112

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	112
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	112
5.2 อภิปรายผลการวิจัย.....	113
5.3 ข้อจำกัดและอุปสรรคในงานวิจัย.....	115
5.4 ข้อเสนอแนะ.....	115
รายการอ้างอิง.....	116
ภาคผนวก.....	111
ภาคผนวก ก.....	112
การเข้าโปรแกรมการใช้งานสำหรับเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ.....	112
ภาคผนวก ข.....	117
ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของการทดลองสำหรับผลตอบต่างๆ.....	117
ภาคผนวก ค.....	124
เศษโลหะเงื่อนไขการตัดต่างๆ.....	124
ภาคผนวก ง.....	128
ผลการทดลองแรงตัดและอุณหภูมิจากเงื่อนไขการตัดต่างๆ.....	128
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	156

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 1	สินค้าออกสำคัญ 10 อันดับแรกของไทย ปี 2553-2556 .....	2
ตารางที่ 2	ข้อจำกัดของงานวิจัยต่างๆ .....	4
ตารางที่ 3	ตัวอย่างการออกแบบออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนที่มี 3 ตัวแปร .....	26
ตารางที่ 4	ระดับของแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง.....	45
ตารางที่ 5	รูปแบบการออกแบบการทดลองบ็อกซ์-เบห์นเคน 4 ปัจจัย .....	46
ตารางที่ 6	ตารางการเก็บข้อมูลในการทดลอง .....	51
ตารางที่ 7	ตารางบันทึกผลการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน 4 ปัจจัย .....	56
ตารางที่ 8	ค่าประมาณสัมประสิทธิ์การวิเคราะห์การถดถอยของความขรุขระผิวเฉลี่ย .....	65
ตารางที่ 9	การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของความขรุขระผิวเฉลี่ย .....	67
ตารางที่ 10	ค่าสัมประสิทธิ์แต่ละปัจจัยแบบถดถอยของความขรุขระผิวเฉลี่ย.....	68
ตารางที่ 11	ค่าประมาณพารามิเตอร์การวิเคราะห์การถดถอยสำหรับอัตราส่วนแรงตัด .....	72
ตารางที่ 12	การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับอัตราส่วนแรงตัด (Fx/Fz).....	74
ตารางที่ 13	ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระแบบถดถอยสำหรับอัตราส่วนแรงตัด .....	75
ตารางที่ 14	ค่าประมาณสัมประสิทธิ์ของการวิเคราะห์การถดถอยสำหรับอุณหภูมิตัด .....	79
ตารางที่ 15	การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับอุณหภูมิตัด .....	81
ตารางที่ 16	ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระแบบถดถอยสำหรับอุณหภูมิตัด .....	82
ตารางที่ 17	เงื่อนไขการตัดที่เหมาะสม .....	89
ตารางที่ 18	ข้อมูลที่ได้จากการทดลองเพื่อยืนยันผล .....	93

## สารบัญรูป

รูปที่ 1	กระบวนการกลึง การเจาะ และการกัดขึ้นรูป [9].....	8
รูปที่ 2	ประเภทของเครื่องกัด (a) เครื่องกัดแนวอน (b) เครื่องกัดแนวตั้ง[9] .....	9
รูปที่ 3	ทิศทางการกัด (a) การกัดขึ้น (b) การกัดลง[9] .....	10
รูปที่ 4	การกัดแบบต่างๆ[9].....	10
รูปที่ 5	ระยะการเคลื่อนที่ของเครื่องมือตัดในกระบวนการกัดแบบสแลป[9] .....	12
รูปที่ 6	การกัดแบบปาดหน้า[9] .....	13
รูปที่ 7	แรงที่เกิดในการตัด [10].....	15
รูปที่ 8	แรงในการกัดที่เกิดขึ้นในแนวแกน X.....	16
รูปที่ 9	ลักษณะความเรียบของผิวชิ้นงาน[11].....	17
รูปที่ 10	ค่าประมาณของการเกิดความร้อน ของ 3 โชน คือ .....	19
รูปที่ 11	a)ประมาณพื้นที่ได้โค้งด้วยสามเหลี่ยม b)แบ่งพื้นที่ได้โค้งเป็นสี่เหลี่ยมคางหมู.....	21
รูปที่ 12	การหาค่าปริพันธ์ด้วยวิธีสี่เหลี่ยมคางหมู .....	21
รูปที่ 13	รูปแบบระบบการทดลองทั่วไป[15].....	23
รูปที่ 14	กราฟรูปพื้นผิวตอและเส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอสนอง [15] .....	25
รูปที่ 15	ลักษณะทางเรขาคณิตการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน [15] .....	27
รูปที่ 16	ชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนที่ใช้ในการทดลอง .....	38
รูปที่ 17	มีดตัดแบบหัวบอล ( Ball End- Milling ).....	38
รูปที่ 18	เครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ชนิด 5 แกน .....	39
รูปที่ 19	ไดนาโมมิเตอร์สำหรับวัดแรงตัด .....	39
รูปที่ 20	ชาร์จแอมป์ลิไฟเออร์สำหรับขยายสัญญาณแรงตัด .....	39
รูปที่ 21	ออสซิลโลสโคปสำหรับแสดงผลและบันทึกค่าแรงตัด .....	40
รูปที่ 22	เครื่องวัดความขรุขระผิวชิ้นงาน .....	40

รูปที่ 23 เครื่องไมโครสโคป .....	41
รูปที่ 24 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบไม่สัมผัส .....	41
รูปที่ 25 การติดตั้งเซนเซอร์วัดแรง และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ .....	42
รูปที่ 26 การติดตั้งเครื่องออสซิลอสโคปกับเครื่องขยายสัญญาณ .....	43
รูปที่ 27 การปรับตั้งระยะโฟกัส .....	43
รูปที่ 28 การต่อเชื่อมสายวัดอุณหภูมิเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ .....	44
รูปที่ 29 การติดตั้งชิ้นงาน .....	44
รูปที่ 30 การหาค่าด้วยวิธีพื้นที่ด้วยกฎสี่เหลี่ยมคางหมู .....	47
รูปที่ 31 ตัวอย่างการคำนวณแรงตัดพลวัต $F_x$ จากเงื่อนไขการตัดที่ 12000_0.06_0.9_6 .....	48
รูปที่ 32 ตัวอย่างการคำนวณอุณหภูมิจากเงื่อนไขการตัดที่ 12000_0.06_0.7_8 .....	48
รูปที่ 33 ตัวอย่างการหาพื้นที่ใต้กราฟของแรงตัดในทิศทางการป้อนตัดแกน X ที่ 10000_0.06_0.7_6 .....	55
รูปที่ 34 กราฟความสัมพันธ์ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยกับความขรุขระผิวสูงสุด .....	63
รูปที่ 35 Normal Probability Plot ของข้อมูลความขรุขระผิวเฉลี่ย .....	69
รูปที่ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวเฉลี่ยและลำดับการทดลอง .....	70
รูปที่ 37 ความสัมพันธ์ Residual ของค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกพิตสำหรับค่าความขรุขระผิว เฉลี่ย .....	71
รูปที่ 38 Normal Probability Plot ของข้อมูลอัตราส่วนแรงตัด .....	76
รูปที่ 39 ความสัมพันธ์ Residual ของข้อมูลอัตราส่วนแรงตัดกับลำดับการทดลอง .....	77
รูปที่ 40 ความสัมพันธ์ Residual ของค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกพิตสำหรับค่าอัตราส่วนแรงตัด .....	77
รูปที่ 41 Normal Probability Plot ของข้อมูลอุณหภูมิตัด .....	83
รูปที่ 42 ความสัมพันธ์ข้อมูลอุณหภูมิตัดกับลำดับการทดลอง .....	84
รูปที่ 43 ความสัมพันธ์ค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกพิตสำหรับค่าอุณหภูมิตัด .....	85
รูปที่ 44 พื้นผิวผลตอบสำหรับความขรุขระผิว อัตราส่วนแรงตัด และอุณหภูมิตัด .....	86

รูปที่ 45	เส้นโครงร่างสำหรับความขรุขระผิว(Ra) อัตราส่วนแรงตัด(Fx/Fy) และอุณหภูมิตัด(T)....	87
รูปที่ 46	ค่าความขรุขระผิวที่ได้จากผลการทดลองเปรียบเทียบกับค่าความขรุขระผิวจากค่าการคำนวณของสมการแบบจำลองที่ (a) อัตราป้อนตัดต่างๆ (b) ความลึกตัดต่างๆ (c) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดตัดหัวบอลต่างๆ.....	95
รูปที่ 47	พื้นที่ผิวสัมผัสที่เพิ่มขึ้นจากอัตราป้อนตัดที่เพิ่มขึ้น.....	96
รูปที่ 48	พื้นที่ผิวสัมผัสที่เพิ่มขึ้นจากความลึกตัดที่เพิ่มขึ้น .....	96
รูปที่ 49	พื้นที่ผิวสัมผัสที่เพิ่มขึ้นจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัดหัวบอลที่เพิ่มขึ้น .....	97
รูปที่ 50	พื้นที่ผิวสัมผัสที่เพิ่มขึ้นจากการสั่นสะเทือน.....	97
รูปที่ 51	อัตราส่วนแรงตัดจากผลการทดลองจริงกับอัตราส่วนแรงตัดจากการคำนวณสมการแบบจำลองที่ (a) อัตราป้อนตัดต่างๆ (b) ความลึกตัดต่างๆ (c) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดตัดหัวบอลต่างๆ.....	98
รูปที่ 52	ทิศทางตามแนวแกน.....	99
รูปที่ 53	(a) พื้นที่ผิวสัมผัสตามทิศทางแรงป้อนตัดFx และ (b) พื้นที่ผิวสัมผัสตามแนวตั้งฉากกับชิ้นงาน Fz.....	100
รูปที่ 54	อุณหภูมิตัดจากผลการทดลองจริงเปรียบเทียบกับอุณหภูมิตัดจากการคำนวณสมการแบบจำลองที่(a) อัตราป้อนตัดต่างๆ (b) ความลึกตัดต่างๆ (c) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดตัดหัวบอลต่างๆ .....	101
รูปที่ 55	ขนาดพื้นที่ผิวสัมผัสในเงื่อนไขการตัดระหว่าง f=0.02 และ f=0.06 mm/rev .....	102
รูปที่ 56	ขนาดพื้นที่ผิวสัมผัสในเงื่อนไขการตัดระหว่าง d=0.5 และ d=0.9 mm .....	103
รูปที่ 57	ขนาดพื้นที่ผิวสัมผัสในเงื่อนไขการตัดระหว่าง D= 10 และ D= 6 mm.....	103
รูปที่ 58	ลักษณะเศษโลหะที่จากเงื่อนไขการตัด 12000_0.04_0.5_8 (a) ภาพที่ถ่ายจากกล้องปกติ (b) ภาพที่ถ่ายด้วยกล้องที่มีกำลังขยาย 100X.....	104
รูปที่ 59	เศษโลหะที่เงื่อนไขการตัด (a) 8000_0.02_0.7_8 (b) 12000_0.02_0.7_8.....	105
รูปที่ 60	พื้นที่สัมผัสเพิ่มมากขึ้น เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น .....	106
รูปที่ 61	เศษโลหะที่เงื่อนไขการตัด (a) 10000_0.02_0.7_6 (b) 10000_0.06_0.7_6.....	106
รูปที่ 62	พื้นที่สัมผัสเพิ่มมากขึ้น เมื่อความอัตราป้อนตัดเพิ่มขึ้น.....	107

รูปที่ 63 เศษโลหะที่เงื่อนไขการตัด (a) 10000\_0.04\_0.5\_10 (b) 10000\_0.04\_0.9\_10 ..... 108

รูปที่ 64 พื้นที่สัมผัสเพิ่มมากขึ้น เมื่อความลึกตัดเพิ่มขึ้น..... 109

รูปที่ 65 เศษโลหะที่เงื่อนไขการตัด (a) 10000\_0.06\_0.7\_6 (b) 10000\_0.06\_0.7\_10 ..... 109

รูปที่ 66 พื้นที่สัมผัสเพิ่มมากขึ้น เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดตัดหัวบอลเพิ่มขึ้น..... 110

รูปที่ 67 พื้นที่การเกิดเศษโลหะของแต่ละเงื่อนไข ..... 111



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการผลิตภาคอุตสาหกรรมของไทยมีเปลี่ยนแปลงจากเดิมไปอย่างมากทั้งในรูปแบบผลิตภัณฑ์ และอุตสาหกรรม แต่สาขาของอุตสาหกรรมนั้นได้มีการพัฒนาขึ้นมากทั้งเพื่อตลาดส่งออกและตลาดภายในประเทศ อีกทั้งยังเป็นการผลิตสินค้าอุปโภคบริโภคเป็นส่วนใหญ่จึงทำให้มีการนำเข้าสินค้าทุน โดยเฉพาะเครื่องจักรกลและอุปกรณ์การผลิตในภาคอุตสาหกรรมจากประเทศที่พัฒนาแล้วอยู่มาก การผลิตอุตสาหกรรมเครื่องจักรกลในประเทศส่วนใหญ่จะเป็นการผลิตชิ้นส่วนอุปกรณ์ของเครื่องกลและบริการซ่อมบำรุงเครื่องจักรกลมากกว่าลักษณะการผลิตเครื่องจักรกลเต็มรูปแบบ อย่างไรก็ตาม ประเทศไทยมีโรงงานหลายแห่งที่มีความสามารถผลิตเครื่องจักรกลอุตสาหกรรมสำหรับตลาดภายในประเทศ และการส่งออก

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา ปัญหาที่เกิดขึ้นกับการผลิตของประเทศอุตสาหกรรมที่เจริญแล้ว (Development Countries) คือต้นทุนในการผลิตชิ้นส่วนต่างๆ ของเครื่องจักรสูงขึ้นเป็นอย่างมาก และการผลิตต้องการความละเอียดหรือความแม่นยำของขนาดชิ้นส่วนสูง ทำให้ต้องการเครื่องมือกลที่สามารถทำงานได้ละเอียดสูงและมีกำลังอัตราการผลิตสูง (High Productive and Precise Machine Tools) ฉะนั้นอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องมือกลจึงต้องนำเทคโนโลยีที่ก้าวหน้ามาใช้ในการออกแบบและการผลิตเครื่องมือกลมากยิ่งขึ้น อาจกล่าวได้ว่าประเทศที่มีอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องมือกลโดยใช้เทคโนโลยีที่ก้าวหน้าและได้มาตรฐานจะเป็นเครื่องบ่งชี้ถึงคุณภาพ (Productivity) ของอุตสาหกรรม Manufacturing และอุตสาหกรรมเครื่องจักรกลของประเทศ

จากการผลิตในรูปแบบเดิมที่เป็นการผลิตเครื่องจักรหรือชิ้นส่วนครั้งละหลายๆ (Mass Production) เพื่อต้องการให้ต้นทุนผลิตต่ำลง แต่การผลิตครั้งละหลายๆมีผลทำให้ความยืดหยุ่น (Flexibility) ในการผลิตสินค้าลดลง การผลิตในปัจจุบันกำลังเปลี่ยนไปเป็นการผลิตที่ต้องการความยืดหยุ่นมาก คือมีผลิตภัณฑ์หลากหลายประเภท โดยแต่ละผลิตภัณฑ์มีปริมาณน้อยลง จึงเกิดการผลิตในระบบใหม่ที่เรียกว่า “Flexible Manufacturing System” ฉะนั้นการออกแบบเครื่องจักรกลสำหรับการผลิตดังกล่าวต้องใช้เทคโนโลยีที่ก้าวหน้ายิ่งขึ้นไปอีก[1]

อุตสาหกรรมเครื่องจักรกลในที่นี่จะเน้นที่สาขาเครื่องจักรอุตสาหกรรม (Industrial Machinery) อันเป็นเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตสำหรับอุตสาหกรรมต่างๆ และสาขาเครื่องมือกล (Machine Tools) อันเป็นอุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในการผลิตเครื่องจักรต่างๆ รวมถึงการผลิตเครื่องมือกลเองด้วย ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่ต้องใช้เทคโนโลยีสูงในการออกแบบและการผลิต ทำให้ขีด



ความสามารถทางเทคโนโลยีของอุตสาหกรรมเป็นตัววัดระดับการพัฒนาเทคโนโลยีของประเทศว่ามีมากน้อยเพียงใด

ผลิตภัณฑ์ที่ทำการผลิตในสาขาเครื่องจักรอุตสาหกรรมที่สำคัญในไทย ได้แก่ การผลิตเครื่องจักรกลที่ใช้ในอุตสาหกรรมเกษตร อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมอาหาร และอุตสาหกรรมเซรามิก ซึ่งสินค้าส่งออกที่สำคัญของประเทศไทย แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สินค้าออกสำคัญ 10 อันดับแรกของไทย ปี 2553-2556

ชื่อสินค้า	มูลค่า : ล้านบาท				
	2553	2554	2555	2555 (ม.ค.-ธ.ค.)	2556 (ม.ค.-ธ.ค.)
1 รถยนต์ อุปกรณ์และส่วนประกอบ	561,108.8	511,503.6	707,712.2	707,712.2	738,113.4
2 เครื่องคอมพิวเตอร์ อุปกรณ์และส่วนประกอบ	596,677.7	513,710.1	588,398.7	588,398.7	537,049.3
3 น้ำมันสำเร็จรูป	245,996.2	303,794.8	397,858.7	397,858.7	386,002.8
4 อัญมณีและเครื่องประดับ	366,818.3	371,239.3	408,040.2	408,040.2	305,838.4
5 เคมีภัณฑ์	182,464.7	250,053.8	263,027.9	263,027.9	274,939.1
6 เม็ดพลาสติก	200,326.0	265,381.6	263,587.2	263,587.2	270,792.0
7 ผลิตภัณฑ์ยาง	203,428.1	253,054.9	259,768.0	259,768.0	257,204.5
8 ยางพารา	249,262.5	382,903.5	270,153.8	270,153.8	249,296.4
9 แผงวงจรไฟฟ้า	255,322.1	238,173.4	206,462.1	206,462.1	218,088.0
10 เครื่องจักรกลและส่วนประกอบของเครื่องจักรกล	154,486.5	184,492.1	192,682.7	192,682.7	205,043.4
รวม 10 รายการ	3,015,891.0	3,274,307.0	3,557,691.4	3,557,691.4	3,442,367.4

ที่มา : ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร สำนักงานปลัดกระทรวงพาณิชย์ [2]

จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นได้ว่าการเติบโตของอุตสาหกรรมชิ้นส่วนและอุปกรณ์รถยนต์มีอยู่มากหลากหลาย ทำให้มีผู้ประกอบการหรือผู้ผลิตเกิดขึ้น เพื่อการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ ทำให้อุตสาหกรรมนี้มีความเจริญก้าวหน้าเป็นอย่างมาก อีกทั้งมีการใช้เครื่องมือกลที่มีความละเอียดสูงมาร่วมใช้ โดยการใช้เครื่องมือกลที่ควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ ปัจจุบันได้เรียกว่าระบบการผลิตที่เป็นลักษณะ CIM (Computer Integrated Manufacturing) และระบบการผลิตที่เป็นแบบยืดหยุ่นมาใช้

การทำแม่พิมพ์เพื่อนำมาใช้ขึ้นรูปในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์จะมีการใช้กระบวนการกัดขึ้นรูปเป็นส่วนใหญ่ เป็นการพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีการผลิตกระบวนการตัดให้เป็นกระบวนการผลิตที่เป็นระบบอัจฉริยะ โดยเพิ่มความสามารถที่ช่วยในการตรวจสอบติดตามกระบวนการผลิตอย่างรวดเร็ว มีการตรวจสอบและสามารถควบคุมตนเองได้ ซึ่งจะมีเซนเซอร์หลายๆชนิดที่มีบทบาททำให้กระบวนการมีสมรรถนะเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากกระบวนการการผลิตชิ้นส่วนนั้นมีความต้องการคุณสมบัติด้านการรับแรง และอายุการใช้งานมากขึ้น และความขรุขระผิวนั้นส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของชิ้นงานโดยตรง ซึ่งชิ้นงานที่มีความขรุขระผิวมากหรือความเรียบผิวน้อยนั้นจะทำให้ชิ้นงานเกิดอัตราการสึกหรอ การกัดกร่อน และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมากกว่าชิ้นงานที่มีความขรุขระผิวน้อยหรือความเรียบผิวที่มากกว่า ชิ้นงานที่ต้องการความละเอียดมากนั้นจะมีความต้องการความแม่นยำสูง โดยเฉพาะงานสวมประกอบ เพราะอาจจะทำให้ชิ้นงานประกอบกันไม่ได้หรืออาจจะมีปัญหาเรื่องการใช้งาน รวมถึงชิ้นงานที่มีขนาดเล็กมากยิ่งระดับไมโครเมตร หรือนาโนเมตร จะมีผลกระทบต่อชิ้นงานเป็นอย่างมาก ความขรุขระผิวจึงเป็นตัวชี้วัดคุณภาพของชิ้นงานที่สำคัญตัวหนึ่งในการตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์

ดังนั้นจึงมีการวิจัยด้านนี้อย่างแพร่หลาย และมีพัฒนาขึ้นเรื่อยๆ โดยงานวิจัยที่ส่วนใหญ่ได้มีการพัฒนาสมการแบบจำลองการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานโดยใช้เซนเซอร์วัดแรงในงานกัดโลหะของเครื่องกัดซีเอ็นซี เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขของการตัดและความขรุขระผิว และยังมีเพียงแต่งานวิจัยที่มีการวิเคราะห์ความขรุขระผิวชิ้นงานโดยใช้เซนเซอร์วัดแรงร่วมกับเซนเซอร์วัดอุณหภูมิในงานกลึงโลหะอย่างงานวิจัยของสมชาติ[3] และศิริวัลย์[4]เท่านั้น อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ผ่านมา นั้น ยังไม่มีการพิจารณาในส่วนของการขึ้นนิ่งเช่นเตอร์และศึกษาผลกระทบจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดตัด และอุณหภูมิ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกปัจจัยในการตัด คือ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดกัด เพื่อศึกษาอิทธิพลที่มีต่อความขรุขระผิว แรงตัด และอุณหภูมิตัดของเครื่องกัดซีเอ็นซี เพื่อใช้พัฒนาแบบจำลองในหาเงื่อนไขในการตัดที่เหมาะสมที่สุดที่ให้ความขรุขระผิวน้อยที่สุด

ตารางที่ 2 ข้อจำกัดของงานวิจัยต่างๆ

งานวิจัย	เงื่อนไขการตัด	รายละเอียด	ข้อจำกัด
[3]	ความเร็ว อัตราป้อน ความลึก	ศึกษาความสัมพันธ์ของเงื่อนไขการตัดที่มีผลต่อความขรุขระผิวของชิ้นงาน แรงตัด และอุณหภูมิในการตัด โดยใช้วิธีพื้นผิวผลตอบสนอง	ใช้สำหรับเครื่องกลึงซีเอ็นซี
[4]	ความเร็ว อัตราป้อน ความลึก รัศมีงูมิต	ตรวจติดตามและพยากรณ์ความขรุขระผิวของชิ้นงานที่เครื่องกลึงขณะตัดวิเคราะห์หาเงื่อนไขที่เหมาะสม ที่มีผลต่อความเรียบผิว	ใช้สำหรับเครื่องกลึงซีเอ็นซี
[5]	ความเร็ว อัตราป้อน ความลึก สารหล่อเย็น	การควบคุมเงื่อนไขในการกัดแบบหัวบอลเพื่อศึกษาอายุมีดกัดและความขรุขระผิวของชิ้นงานสัมพันธ์กับเงื่อนไขการกัด	-ไม่สามารถอธิบายปรากฏการณ์ขณะตัดของแรงกับอุณหภูมิได้ -ไม่มีเงื่อนไขขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดกัด
[6]	ความเร็ว อัตราป้อน ความลึก	การศึกษาความเรียบผิวสำเร็จของกระบวนการกลึงจากเงื่อนไขการตัด ได้ศึกษาความเหมาะสมของการใช้เทคนิคการทดลองต่างๆ โดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง	-ใช้สำหรับเครื่องกลึงซีเอ็นซี -ไม่สามารถอธิบายปรากฏการณ์ขณะตัดของแรงกับอุณหภูมิได้

ตารางที่ 2 ข้อจำกัดของงานวิจัยต่างๆ (ต่อ)

งานวิจัย	เงื่อนไขการตัด	รายละเอียด	ข้อจำกัด
[7]	ความเร็ว อัตราป้อน ความลึก อุณหภูมิ	ศึกษาอุณหภูมิที่กระบวนการกัด ในรูปแบบการทำงานโมเดลที่เป็น 3 มิติ ที่เกิดขึ้นกับเครื่องมือตัด เศษโลหะ และชิ้นงาน ตามทฤษฎีการตัด เพื่อดูความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการตัดต่างๆ	-ไม่มีการตรวจสอบคุณภาพของผิวชิ้นงาน -ไม่มีสมการแบบจำลองความขรุขระผิว
[8]	ความเร็ว อัตราป้อน ความลึก	ทำการศึกษาเพื่อพัฒนาตัวแบบสำหรับการพยากรณ์ความเรียบผิวของชิ้นงานในงานกัดผิวในงานอะลูมิเนียม	-มีดกัดเป็นแบบ end-milling -ไม่มีกลไกแสดงการเกิดของตัดของแรงกับอุณหภูมิ

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขงานกัดต่างๆ ทั้งแรง และอุณหภูมิ สำหรับใช้อธิบายปรากฏการณ์ในการวิเคราะห์ค่าความขรุขระผิว
2. เพื่อหาค่าของเงื่อนไขในงานกัดที่เหมาะสมที่สุดที่ให้ความขรุขระผิวน้อยสุดก่อนทำการตัดจริงสำหรับเหล็กกล้าคาร์บอน S50C กับมีดกัดหัวบอลในช่วงค่าที่กำหนด

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. การตัดแบบแห้ง (Dry Cutting) บนเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ชนิด 5 แกน ยี่ห้อ Mazak รุ่น Variaxis 500-5X

โดยเงื่อนไขการตัดออกแบบเป็นไปตาม Box-Benhken Design

ความเร็วรอบการตัด(รอบต่อนาที)	8000	10000	12000
อัตราการป้อนตัด(มิลลิเมตรต่อรอบ)	0.02	0.04	0.06
ความลึกตัด(มิลลิเมตร)	0.5	0.7	0.9
เส้นผ่านศูนย์กลางของมีดกัด(มิลลิเมตร)	6	8	10

2. วัสดุชิ้นงานเป็นเหล็กกล้าคาร์บอน (S50C) ขนาดความกว้าง 64 มิลลิเมตร ยาว 64 มิลลิเมตร และสูง 45 มิลลิเมตรซึ่งมีความแข็งไม่เกิน 235 HB

3. มีดกัดที่ใช้เป็นมีดกัดแบบหัวบอล (Ball End Milling) ชนิดคมมีดคาร์ไบด์เคลือบผิวด้วยไทเทเนียมออกไซด์ไนไตรด์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6, 8 และ 10 มิลลิเมตร

4. เซนเซอร์วัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด(Infrared Thermometer)ยี่ห้อ Raytek รุ่น RAYFA2BCF

5. การกำหนดค่าของเครื่องออสซิลโลสโคป

5.1 Low-pass filter = 500 Hz.

5.2 Sampling rate = 1 kS/s

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. อัตราการผลิตของงานการกัดเพิ่มขึ้น คุณภาพของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น และของเสียจากการผลิตน้อยลงทำให้ต้นทุนที่จะทำการผลิตลดลง
2. ประสิทธิภาพของเครื่องเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์เพิ่มขึ้นสามารถรองรับระบบการผลิตอัจฉริยะในอนาคตได้
3. เป็นแนวทางสำหรับพัฒนาระบบการตรวจติดตามความขรุขระผิวในขณะตัดสำหรับการตรวจเพื่อการติดตามระบบเครื่องจักรกลอัจฉริยะ

## 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

สมการแบบจำลองที่แสดงเงื่อนไขงานกัดที่เหมาะสมที่สุดที่ให้ค่าความขรุขระผิวน้อยที่สุดสำหรับเหล็กกล้าคาร์บอน S50C กับเม็ดกัดหัวบอลภายในช่วงค่าที่ทำการทดลอง

## 1.6 ขั้นตอนการทำงานวิจัย

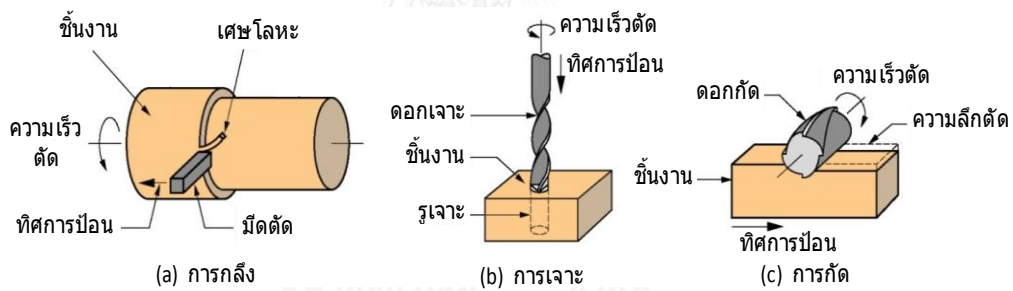
1. ทำการศึกษาและค้นคว้าเกี่ยวกับทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยและสำรวจงานวิจัยทั้งหมด รวมทั้งตรวจสอบปัจจัยในกระบวนการกัดเหล็กกล้าที่คาดว่าจะส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงาน
2. ทำการศึกษาอุปกรณ์ เครื่องมือวัด และเครื่องจักรที่ใช้ในการทดลอง วิธีการใช้งาน เครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ การติดตั้งอุปกรณ์ร่วมหรือเซนเซอร์ การเก็บข้อมูลของความขรุขระผิว แรงตัด และอุณหภูมิในการตัด
3. การออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน พร้อมทั้งกำหนดเงื่อนไขต่างๆ
4. เริ่มดำเนินการทดลองตามรูปแบบที่ศึกษาและวิเคราะห์ผลการตัดของเงื่อนไขที่ได้กำหนดไว้
5. ตรวจสอบข้อมูลที่เก็บรวบรวมได้ทั้งความขรุขระผิว แรงตัด และอุณหภูมิในการตัด
6. วิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบสนอง และทำการสร้างสมการแบบจำลองเพื่อหาเงื่อนไขการตัดที่ดีที่สุดที่ให้ความขรุขระผิวน้อยที่สุด
7. ทำการตรวจสอบความน่าเชื่อถือของสมการแบบจำลองที่ได้พัฒนาขึ้นมาด้วยวิธีทางสถิติ
8. สรุปผลการทดลองทั้งหมด พร้อมทั้งอุปสรรคในการดำเนินการและข้อเสนอแนะที่ได้จากงานวิจัย
9. จัดทำเล่มวิทยานิพนธ์

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กระบวนการตัด [9]

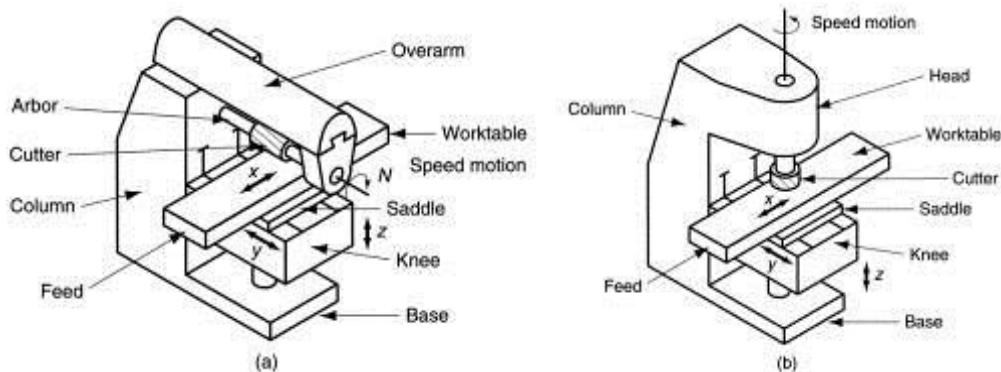
หมายถึง กระบวนการขึ้นรูปการผลิตที่ใช้เครื่องมือหรือมีดตัดเพื่อใช้กำจัดเนื้อวัสดุส่วนเกินที่ไม่ต้องการของชิ้นงานออก โดยที่ชิ้นงานส่วนที่คงเหลือจะคงไว้ให้มีลักษณะรูปร่างตามที่ต้องการ ซึ่งขั้นตอนส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนรูปชิ้นงานโดยการตัดเฉือน ทำให้เกิดเศษวัสดุ หรือชิ้นส่วนที่ไม่ต้องการหลุดออกมา หลังจากที่มีเศษตัดถูกตัดออก จึงจะได้ลักษณะของผิวชิ้นงานใหม่ ส่วนสำคัญสำหรับกระบวนการผลิตชิ้นงานโลหะให้มีรูปร่างต่างๆ ส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วย 3 วิธีการที่สำคัญ ดังนี้คือ การกลึง การเจาะ และการกัดขึ้นรูป



รูปที่ 1 กระบวนการกลึง การเจาะ และการกัดขึ้นรูป [9]

#### 2.2 กระบวนการกัด

ประกอบด้วยชุดหัวหมุนตัดและพื้นรองชิ้นงานสำหรับยึดตำแหน่งงานและป้อนชิ้นงานเข้าทำการกัด ซึ่งได้รับการออกแบบอย่างหลากหลายเพื่อให้เป็นไปตามความต้องการในการปฏิบัติการ ซึ่งชนิดของเครื่องกัดได้แบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ เครื่องกัดแนวนอนและเครื่องกัดแนวตั้ง โดยเครื่องกัดแนวนอนมีชุดหัวหมุนตัดในแนวราบเพื่อทำการกัดพื้นผิวภายนอกของชิ้นงานออก ส่วนเครื่องกัดแนวตั้งจะมีชุดหัวตัดในแนวตั้งใช้สำหรับ กัดผิวหน้า กัดส่วนตัดให้มน และการขัดผิวหน้าชิ้นงานแบน



รูปที่ 2 ประเภทของเครื่องกัด (a) เครื่องกัดแนวนอน (b) เครื่องกัดแนวตั้ง[9]

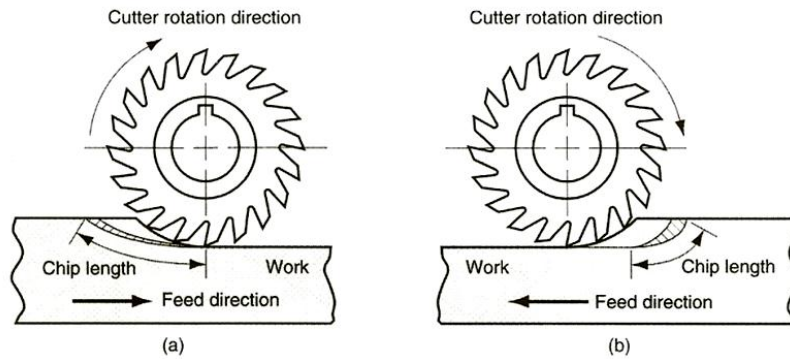
ในกรณีที่ใช้เครื่องกัดแนวนอนกระบวนการที่ใช้เป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์คือการกัดแบบสแลป (Slab milling) ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งเป็นการสร้างผิวระดับบนชิ้นงานการกัดแบบสแลปแบ่งเป็น 2 ชนิดคือการกัดขึ้น (Up milling) หมายถึงการกัดที่คมตัดจะตัดเนื้อวัสดุจากตำแหน่งที่บางที่สุดแล้วความหนาของเศษโลหะจึงเพิ่มขึ้นและการกัดแบบลง (Down milling) หมายถึงการกัดที่คมตัดจะตัดงานจากตำแหน่งที่ทำให้เศษโลหะมีความหนามากแล้วค่อยบางลงเรื่อยๆ การกัดขึ้น หรือ Up milling (Conventional milling)

- ทิศทางการเคลื่อนที่ของคมตัดตรงข้ามกับทิศทางการป้อนตัด
- เศษโลหะที่เกิดขึ้นจะเริ่มจากบางไปหนา
- ต้องมีการจับชิ้นงานเพื่อต่อต้านแรงยกให้แน่นกับโต๊ะ
- ทิศทางแรงในการตัดต้นขึ้นเศษโลหะจะถูกยกออกจากชิ้นงานโดยมีดตัด

การกัดแบบลง หรือ Down milling (Climb milling)

- ทิศทางในการเคลื่อนที่ทิศทางเดียวกันกับทิศทางการป้อนตัด
- เศษโลหะจะเริ่มจากหนาไปบาง
- ความยาวของเศษโลหะจะน้อยกว่าการตัดจะใช้เวลาน้อยสามารถตัดได้ปริมาณมากและช่วยเพิ่มอายุมีดตัดได้
- ทิศทางแรงในการตัดตกลง
- การกัดลงจะใช้มากในการทำการผลิต
- มีประสิทธิภาพมากกว่าเศษโลหะที่ถูกนำออกมีขนาดใหญ่กว่า และไม่มีโอกาสเกิดการสั่นในการตัด



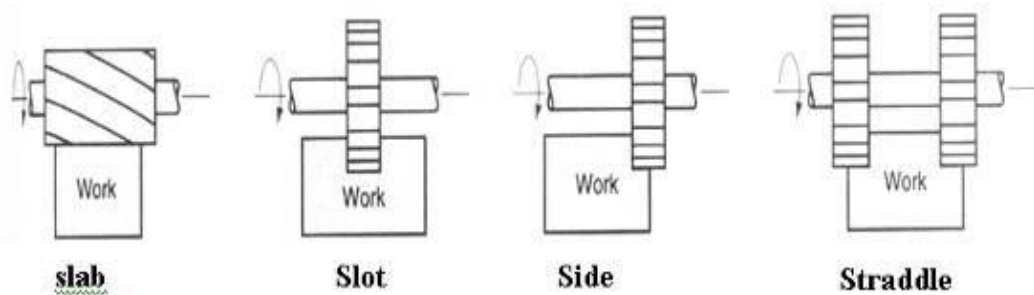


รูปที่ 3 ทิศทางการกัด (a) การกัดขึ้น (b) การกัดลง[9]

โดยทั่วไปการป้อนของการกัดนิยมบอกเป็นความเร็วของการเคลื่อนที่ของโต๊ะรับงานหรือบอกเป็นความเร็วป้อนนั่นเองดังนั้นจึงสามารถคำนวณการป้อนตามคำนิยามที่กล่าวว่าเป็นระยะเคลื่อนที่ของเครื่องมือตัดต่อรอบการหมุนได้จาก

$$f = \frac{V_f}{N_T} \quad (2.1)$$

โดยที่  $f$  = การป้อน (มิลลิเมตร/รอบ)  
 $V_f$  = ความเร็วป้อน (มิลลิเมตร/นาที)  
 $N_T$  = ความเร็วรอบของเครื่องมือตัด (รอบ/นาที)



รูปที่ 4 การกัดแบบต่างๆ[9]

จากรูปที่ 3 พบว่าความหนาของเศษโลหะมีค่าไม่คงที่ตลอดการตัดของคมตัดหนึ่งสามารถคำนวณความหนาสูงสุดของเศษโลหะได้จาก

$$a_c = \frac{V_f \sin \theta}{N_T n} \quad (2.2)$$

$$\cos \theta = 1 - \frac{2d}{D_r} \quad (2.3)$$

โดยที่  $a_c$  = ความหนาสูงสุดของเศษโลหะ

$n$  = จำนวนคมตัด

$d$  = ความลึกในการตัด (มิลลิเมตร)

$D_r$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องมือตัด

จาก

$$\begin{aligned} \sin \theta &= \sqrt{(1 - \cos^2 \theta)} \\ &= 2 \sqrt{\frac{d}{D_r} \left(1 - \frac{d}{D_r}\right)} \end{aligned} \quad (2.4)$$

แทนสมการที่ 2.4 ในสมการ 2.2 จะได้

$$a_c = \frac{2V_f}{N_T n} \sqrt{\frac{d}{D_r} \left(1 - \frac{d}{D_r}\right)} \quad (2.5)$$

โดยทั่วไปค่า  $\frac{d}{D_r}$  จะมีค่าน้อยจึงสามารถลดรูปสมการที่ 2.5 ได้เป็น

$$a_c = \frac{2V_f}{N_T n} \sqrt{\frac{d}{D_r}} \quad (2.6)$$

ในกรณีที่เครื่องมือตัดที่ใช้มีดคมตัดเอียงทำมุมกับแกนของเครื่องมือตัดสามารถคำนวณความหนาสูงสุดของเศษโลหะได้จาก

$$a_c = \frac{2V_f}{N_T n} \sqrt{\frac{d}{D_r} \cos \theta_n} \quad (2.7)$$

โดยที่  $\theta_n$  = มุมเอียงของคมตัด (องศา)

การประมาณค่าเวลาที่ใช้ในการตัดของการกัดแบบสแลประยะที่เครื่องมือตัดต้องเคลื่อนที่ทั้งหมดเป็นผลรวมของความยาวชิ้นงานกับระยะที่เครื่องมือตัดเริ่มสัมผัสกับชิ้นงานถึงจุดศูนย์กลางของเครื่องมือตัดหรือระยะ  $a_p$  ดังแสดงในรูปที่ 5 ระยะ  $a_p$  สามารถคำนวณได้จาก

$$a_p = \sqrt{\frac{D_r}{2} - \left(\frac{D_r}{2-d}\right)^2}$$

$$a_p = \sqrt{d(D_r - d)} \quad (2.9)$$

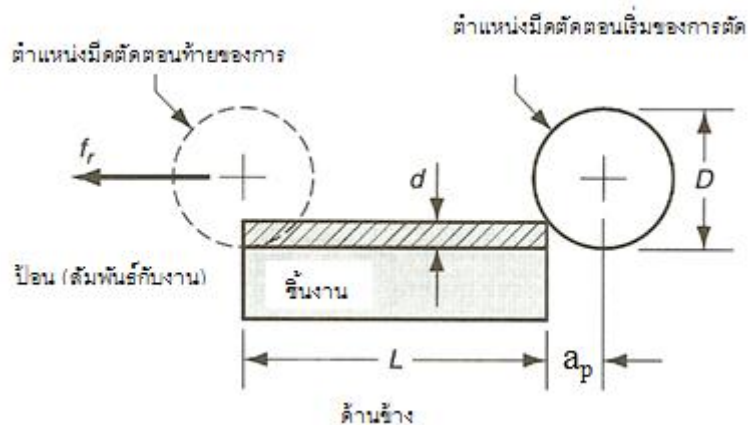
ดังนั้น

$$T_M = \frac{LW+a_p}{V_f} \quad (2.10)$$

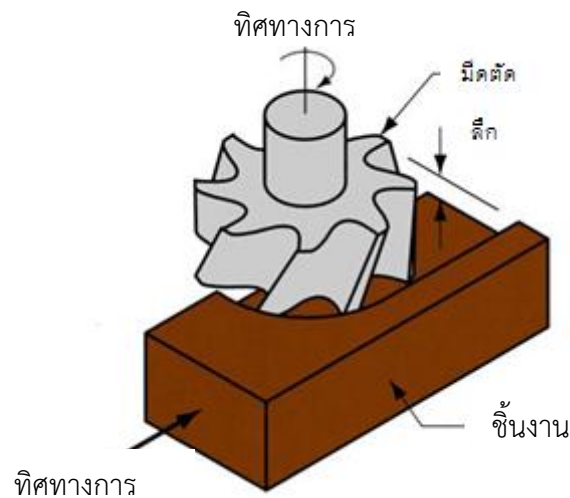
อัตราการกำจัดโลหะเมื่อเครื่องมือตัดทำงานสมบูรณ์ซึ่งหมายความว่าอัตราการกำจัดโลหะเมื่อจุดศูนย์กลางเครื่องมือตัดอยู่ภายในชิ้นงาน คำนวณหาค่าจากสมการที่ 2.11

$$Z_W = B_W d V_f \quad (2.11)$$

เครื่องกัดแนวตั้งสามารถสร้างผิวระนาบได้เช่นเดียวกับเครื่องกัดแนวอนแต่เครื่องมือตัดที่ใช้จะมีลักษณะแตกต่างจากเครื่องมือตัดที่ใช้กับเครื่องกัดแนวอนคือมีลักษณะคล้ายจาน แสดงตามรูปที่ 5 คือการกัดแบบปาดหน้า (Face milling)



รูปที่ 5 ระยะการเคลื่อนที่ของเครื่องมือตัดในกระบวนการกัดแบบสแลป[9]



รูปที่ 6 การกัดแบบปาดหน้า[9]

การคำนวณอัตราการกำจัดโลหะสามารถคำนวณได้จากสมการ 2.11 เช่นเดียวกับการกัดแบบสแลป แต่เมื่อพิจารณาระยะเคลื่อนที่ของเครื่องมือตัดเพื่อผลิตงานพบว่าเวลาที่ใช้ในการตัดจะเท่ากับความยาวของชิ้นงานรวมกับเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องมือตัด ดังนั้น

$$T_M = \frac{LW + D_r}{V_f} \quad (2.12)$$

เครื่องกัดทั้งชนิดแกนนอนและชนิดแกนตั้งสามารถใช้ผลิตชิ้นงานได้อีกมากมายทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของเครื่องมือตัดอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานความสามารถพิเศษของเครื่องกัดเช่นความสามารถในการเอียงโต๊ะรับงานหรือความสามารถในการเอียงแกนหมุนของเครื่องเป็นต้น

### 2.3 เงื่อนไขการตัด

การการขึ้นรูปโดยการกัดต้องอาศัยการเคลื่อนที่สัมพัทธ์(Relative movement) ระหว่างเครื่องมือตัดและชิ้นงาน ที่ต้องมีสามองค์ประกอบหลักมีใช้ในการเคลื่อนที่ คือ ความเร็วตัด, อัตราป้อนตัดและ ความลึกตัดโดยความเร็วตัดสำหรับงานกัด กรณีใช้มีดดอกกัดหัวบอล (Ball end milling) คำนวณค่าจากสมการที่ 2.13

$$N = \frac{1,000 \times V_c}{\pi \times D} \quad (2.13)$$

กำหนดให้	$N =$ ความเร็วรอบ	(รอบ/นาที)
	$D =$ เส้นผ่านศูนย์กลางของดอกกัด (มิลลิเมตร)	
	$V_c =$ ความเร็วตัด	(เมตร/นาที)

ส่วนอัตราป้อนชิ้นงานสามารถเปลี่ยนเป็นอัตราเร็วเชิงเส้นในหน่วย มิลลิเมตรต่อนาที ได้ดังสมการที่ 2.14

$$V_f = f_z \times Z \times N \quad (2.14)$$

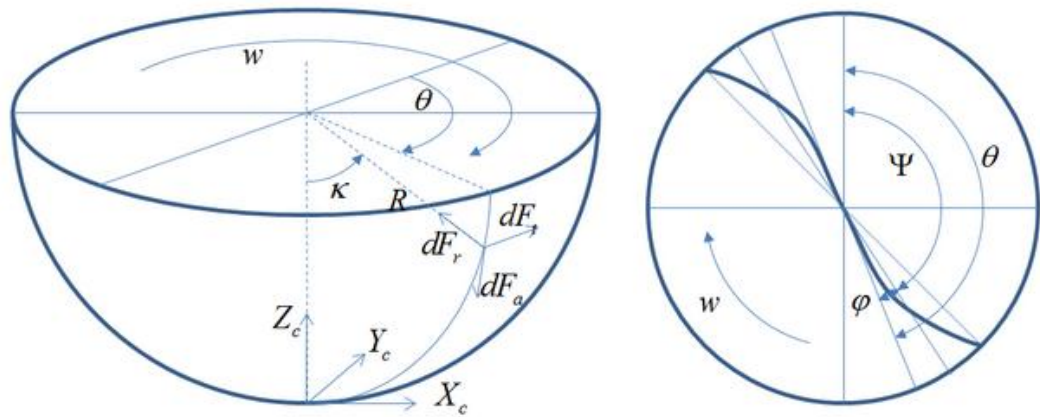
กำหนดให้	$V_f =$ อัตราป้อนชิ้นงาน	(มิลลิเมตร/นาที)
	$f_z =$ อัตราป้อนมีดตัด	(มิลลิเมตร/ฟัน)
	$Z =$ จำนวนฟัน	
	$N =$ ความเร็วรอบ	(รอบ/นาที)

อัตราการที่เนื้อวัสดุได้ถูกกำจัด หรือ MRR จะบอก ปริมาตรของเนื้อวัสดุของชิ้นงานที่ทดลองที่กำจัดออกไปต่อหน่วยเวลา โดยหน่วยนั้นคือ ลูกบาศก์เซนติเมตร/นาที คำนวณค่าจากสมการที่ 2.15

$$MRR = 0.001 \times a_r \times a_a \times V_f \quad (2.15)$$

กำหนดให้	$MRR =$ อัตราการกำจัดเนื้อวัสดุ	(ลูกบาศก์เซนติเมตร/นาที)
	$V_f =$ อัตราป้อนชิ้นงาน	(มิลลิเมตร/นาที)
	$a_r =$ ความกว้างตัด	(มิลลิเมตร)
	$a_a =$ ความลึกตัด	(มิลลิเมตร)

## 2.4 แรงที่ทำให้เกิดการตัด (Cutting Force) [10]



รูปที่ 7 แรงที่เกิดในการตัด [10]

แรงของกระบวนการตัดนั้นจะเกิดจากมีดตัดหัวบอลกับชิ้นงาน เกิดแรงตัดตามแนวแกน X, Y และ Z ดังนี้

$F_x$  คือ แรงตัดที่เกิดในแนวทิศทางการป้อน มีหน่วยเป็นนิวตัน

$F_y$  คือ แรงตัดที่เกิดในแนวตั้งฉากกับทิศทางการป้อน มีหน่วยเป็นนิวตัน

$F_z$  คือ แรงตัดที่เกิดในแนวตั้งฉากกับชิ้นงาน มีหน่วยเป็นนิวตัน

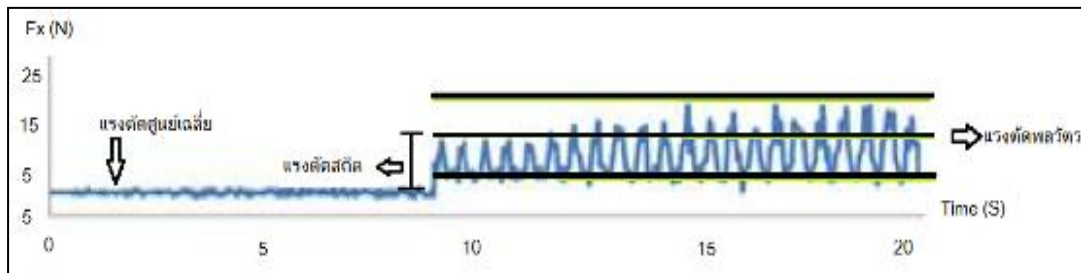
$$\varphi = \frac{z}{R_0} \tan i_0 \quad (2.16)$$

$$\Psi_j(z) = \theta - \varphi + (j-1) \frac{2\pi}{N_f} \quad (2.17)$$

เมื่อ  $R_0$  คือ รัศมีมีดตัด,  $\theta$  คือ มุมการหมุนของมีดตัด,  $N_f$  คือ จำนวนฟัน มุมเกลียวเท่ากับ  $i_0$  และมีตำแหน่งของฟันกัด คือ  $j$  ที่ความสูงตัดเท่ากับ  $z$  โดยแรงตัดที่เกิดขึ้นตามแนวแกน X, Y และ Z สามารถเขียนได้ในรูปของแรงตัดหลัก (Tangential cutting force:  $F_t$ ), แรงรัศมี (Radial cutting force:  $F_r$ ) และแรงตัดตามแนวแกน (Axial cutting force:  $F_a$ ) ดังนี้

$$\{dF_{x,y,z}\} = [T]\{dF_{r,t,a}\}$$

$$\begin{pmatrix} dF_x \\ dF_y \\ dF_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin K \sin \psi & -\cos \psi & -\cos K \sin \psi \\ -\sin K \cos \psi & \sin \psi & -\cos K \cos \psi \\ \cos K & 0 & -\sin K \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dF_r \\ dF_t \\ dF_a \end{pmatrix} \quad (2.18)$$



รูปที่ 8 แรงในการกัดที่เกิดขึ้นในแนวแกน X

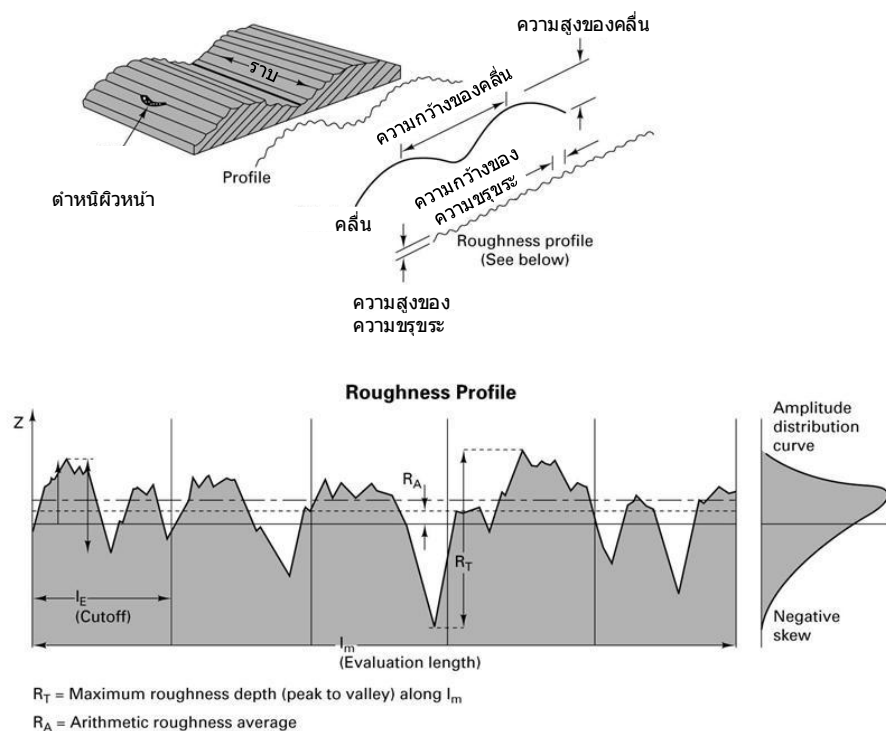
จากรูป 8 จะเห็นว่าแรงที่เกิดในการกัดนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ แรงตัดพลวัต และแรงตัดสถิต โดยแรงตัดพลวัตจะเกิดขึ้นขณะที่มีดตัดกินเนื้อวัสดุ ทำให้แรงตัดสูงกว่าแรงตัดสถิตที่เกิดขึ้นขณะที่มีดตัดกำลังทำงานแต่ไม่ได้เข้าตัดชิ้นงาน สามารถคิดคำนวณค่าจากผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยแรงตัดพลวัตกับแรงตัดศูนย์

## 2.5 ความเรียบผิวหรือความขรุขระผิว (Surface Roughness)[11]

สำหรับกระบวนการขึ้นรูปโดยการกัดนั้นถูกนำมาสำหรับเพื่อการผลิตชิ้นงานเพื่อให้เกิดลักษณะและขนาดตามความต้องการ โดยเริ่มจากการเอาเนื้อวัสดุของชิ้นงานออกจากชิ้นงานในรูปแบบของเศษโลหะ ซึ่งผิวชิ้นงานที่ได้นั้น จะมีขั้นตอนการเปลี่ยนลักษณะเป็นรูปแบบพลาสติกก่อน และจึงนำไปสู่การแผ่กระจายของรอยแตก (Plastic deformation and Crack Propagation) จนไปสู่ชิ้นงาน ทำให้ได้รับแรงเค้นและความร้อนจากมีดตัดโดยมีลักษณะคมตัด (Cutting edge) ที่แตกต่างกันไปตามคมตัดแต่ละชนิด จะทำให้เกิดรอยบนผิวชิ้นงาน จากนั้นชิ้นงาน มีดตัดและเครื่องมือตัด (Material, Cutting tool, Machine tool) จะเกิดการสั่นสะเทือนด้วย จากเหตุผลนี้จึงทำให้ผิวชิ้นงานเกิดความเสียหายในระดับหนึ่ง กระทบต่อความเรียบผิวและความสมบูรณ์ของชิ้นงาน (Surface finish and Surface integrity) แสดงได้จากระดับความเสียหายที่ได้กล่าวไปข้างต้น

## ความเรียบผิวสำเร็จ (Surface Finish)

ความขรุขระผิว หรือความเรียบผิว นั้นจะมีการประกอบด้วยช่องว่างขนาดเล็กๆและที่มีความละเอียดติดกันหลายๆช่อง โดยที่มีสาเหตุเกิดมาจากรอยที่เหลือทิ้งไว้หลังจากตัดชิ้นงานด้วยความสูงเฉื่อย และความลึกเฉื่อยบนผิวชิ้นงาน โดยการแสดงค่าความขรุขระผิวจะถูกวัดจากการกำหนดช่วงความยาวช่วงหนึ่ง ที่เรียกว่า ช่วงความยาวในการตัด สำหรับทำการวัดเพื่อคำนวณค่าความขรุขระของผิวชิ้นงานที่ได้



รูปที่ 9 ลักษณะความเรียบของผิวชิ้นงาน[11]

**คลื่น Waviness** : คลื่นนั้นประกอบด้วยรอยขรุขระหรือความไม่เรียบบนผิวชิ้นงาน จะมีขนาดใหญ่กว่าช่วงความยาวในการตัดประมาณ 1 ไมครอน เกิดขึ้นได้จากการสั่นสะเทือนหรือมีรอยตำหนิบนพื้นผิวชิ้นงานจากรับภาระ แรงและอุณหภูมิในการตัดที่มากเกินไป

**ราย Lay** : มีลักษณะเป็นรอยตำหนิที่มีทิศทางเป็นแนวยาว ส่วนใหญ่จะเกิดในทิศทางของชิ้นงานตามแนวของมีดตัด รวมทั้งการเคลื่อนที่ของชิ้นงานและเครื่องจักรด้วย

**ตำหนิผิวหน้า Surface Flaw** : มีลักษณะเป็นรอยตำหนิอันเกิดขึ้นเป็นแบบสุ่ม เริ่มเกิดมาจากรอยตำหนิเดิมที่มีมาอยู่ก่อนแล้ว เช่น รอยตำหนิที่เกิดจากฟองอากาศ



**ผิวหน้าสำเร็จ Surface finish** : ผิวหน้าสำเร็จหรือความเรียบผิวนั้นมีความสำคัญต่องานสวมประกอบ และการจัดวางของชิ้นส่วนต่างๆ จากการอาศัยการทาสี หรือรอยตำหนิ บางครั้งจะเป็นลักษณะของก๊าซ หรือของเหลวไหลผ่าน บางครั้งสามารถใช้สายตาดูจากการอาศัยความมันวาวของชิ้นงาน บางครั้งมีการใช้แสงซึ่งอาศัยคุณสมบัติการสะท้อนได้

### พารามิเตอร์ของความขรุขระผิว (Roughness Parameter)

พารามิเตอร์ที่การแสดงคุณภาพของผิวงานนั้นมีพารามิเตอร์หลายอย่างที่ใช้กัน ซึ่งหลักๆ แล้วจะมีดังนี้

- **ความหยาบเฉลี่ยของพื้นผิวตามอนุกรมเลขคณิต (Ra)**

ค่าเฉลี่ยค่านี้วัดได้จากกราฟความหยาบผิวที่อยู่บนเส้นอ้างอิง ซึ่งระยะค่าเฉลี่ยจะอยู่บนกราฟตามแนวแกน x ของเส้นอ้างอิง และแนวแกน y จะเป็นค่าขนาดความหยาบผิว โดยมีหน่วยเป็นไมครอน ( $\mu\text{m}$ ) เมื่อ  $y = (X)$

- **ค่าความหยาบสูงสุด (Ry)**

ค่าความหยาบสูงสุดนี้วัดได้จากกราฟความหยาบผิวซึ่งอยู่บนเส้นอ้างอิง เกิดจากระยะกราฟสูงสุดและต่ำสุด มีหน่วยเป็นไมครอน ( $\mu\text{m}$ )

- **ค่าเฉลี่ยความหยาบของพื้นผิวแบบสิบจุด (Rz)**

ค่าเฉลี่ยนี้วัดได้จากกราฟความหยาบผิวที่อยู่บนเส้นอ้างอิง คำนวณได้จากระยะของความสูงบนจุดยอดกราฟ 5 จุดบน และ 5 จุดล่างมารวมกัน พร้อมทั้งคำนวณหาค่าเฉลี่ยของความสูงทั้งหมด หน่วยเป็นไมครอน ( $\mu\text{m}$ )

## 2.6 อุณหภูมิการตัด (Cutting Temperature)[12, 13]

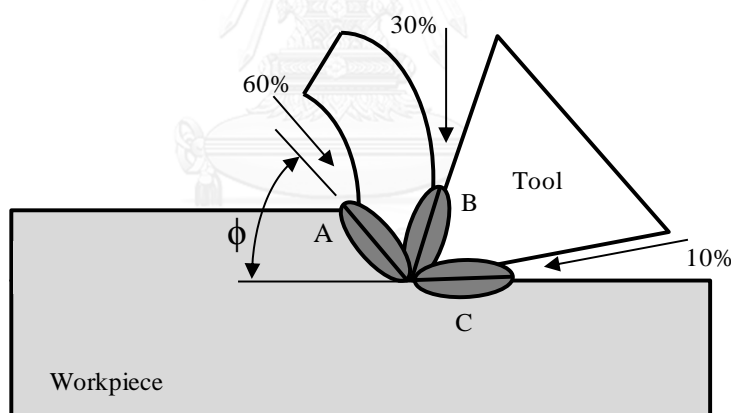
การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเกิดขึ้นได้จากการเคลื่อนไหว แหล่งการเกิดความร้อน และค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานของความร้อน สามารถวิเคราะห์ตามเงื่อนไขกระบวนการถ่ายโอนความร้อนกับเวลาเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ ได้ดังนี้

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} - \frac{h}{kw} T + \frac{g(r, t)}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.19)$$

โดยที่  $\eta = h / kw$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน,  $k$  คือ การนำความร้อน ของวัสดุ,  $w$  คือ ความหนาแน่นของวัสดุ,  $\alpha$  คือ ค่าการแผ่กระจายความร้อนของวัสดุ และ  $g(r, t)$  เป็น อัตราการเกิดความร้อนภายในต่อหน่วยปริมาตร โดยที่  $r$  คือ ระยะทางรัศมีจากแหล่งความร้อน

ในการตัดโลหะ กำลังของการตัด ( $F \times v$ ) โดยมากจะถูกเปลี่ยนให้เป็นความร้อน ทำให้มีการเพิ่มของอุณหภูมิของเศษโลหะชิ้นงานและมิตตัด มี 3 แหล่งกำเนิดความร้อนหลักที่ทำให้เกิดความร้อนในการตัด ซึ่งทั้งสามส่วนจะให้ความร้อนในปริมาณที่ไม่เท่ากัน โดยเรียงจาก

1. ความร้อนจากกระบวนการเฉือนเองเมื่อมีการเปลี่ยนรูปพลาสติกก็จะมีความร้อนเกิดขึ้น ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนหลัก ส่วนมากความร้อนจะไปอยู่ในตัวของเศษโลหะที่หลุดออกมา
2. ความร้อนที่เกิดที่ผิวหน้าสัมผัสของมิตตัดและเศษโลหะเมื่อมีการเปลี่ยนรูปพลาสติกของเศษโลหะทำให้มีการเกิดความร้อนขึ้นมา ซึ่งความร้อนจะมาจากการเสียดทานจากการไหลของเศษโลหะ
3. เกิดบนหน้ามุมหลบมิตตัด หลังจากการตัดชิ้นงานเสร็จสิ้น จะได้ผิวหน้าของชิ้นงานใหม่ โดยความร้อนนี้มาจากการขัดสีที่ผิวหน้าของชิ้นงานที่ได้จากการตัด



รูปที่ 10 ค่าประมาณของการเกิดความร้อน ของ 3 โซน คือ

A ระบายเฉือน B หน้ามุมคายกับเศษโลหะ C ผิวชิ้นงานกับหน้ามุมหลบ[11]

พลังงานที่ใช้ไปทั้งหมดในการกระบวนการตัดโลหะ 60% จะถูกใช้ในการเปลี่ยนรูปบริเวณ ระบายเฉือนและบนหน้ามุมคาย 30% จะเสียไปในรูปแรงเสียดทานที่เกิดบนหน้ามุมหลบ 10% สิ่งที่ทำให้อุณหภูมิของการตัดเป็นส่วนสำคัญที่ต้องพิจารณาเนื่องจาก

1. อุณหภูมิจะส่งผลกระทบต่อความแข็งแรง, ความแข็งและความทนต่อการสึกกร่อนของมิตตัด

2. ทำให้ได้ขนาดที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละชิ้นส่วนที่ทำการตัด ทำให้การควบคุมความถูกต้องแม่นยำของขนาดชิ้นงานนั้นเป็นไปได้ยาก

3. ขณะทำการตัดจะเกิดการทำลายกับผิวหน้าที่ได้เนื่องจากความร้อนในการตัด ส่งผลต่อคุณสมบัติของงานที่ได้เปลี่ยนไป เช่น อาจจะทำให้เกิดความเค้นตกค้าง จนทำให้คุณสมบัติที่ได้ต่ำกว่าคุณสมบัติที่ออกแบบเอาไว้ เป็นต้น

4. การตัดจะเกิดขึ้นบนระนาบเฉือน และหน้ามุมคาย ทำให้อุณหภูมิในขณะตัดมีค่าสูงบนระนาบเฉือนและระหว่างเศษโลหะกับหน้ามุมคายของมีดตัด และเมื่อถ้าเรามีการใช้มีดตัดที่สึก ความร้อนที่เกิดขึ้นก็จะเกิดมากขึ้นที่ผิวหน้า จากการขัดสีที่มากกว่าปกติเมื่อมุมเฉือนเพิ่มมากขึ้น เปอร์เซ็นต์ความร้อนที่เกิดขึ้นที่ระนาบเฉือนก็จะลดลง เนื่องจากพื้นที่การตัดของการไหลของเศษโลหะก็จะน้อยลง

มุมเฉือนสามารถที่จะเพิ่มโดยการใส่สารหล่อเย็น และลดความเสียหายของเศษโลหะกับมีดตัดได้เป็นอย่างดี โดยที่ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการศึกษาอุณหภูมิสูง คือ ความเร็วตัด และเมื่อต้องการเพิ่มอัตราการกำจัดเนื้อโลหะควรเพิ่มอัตราการป้อนตัด ซึ่งจะไม่มีการกระทบต่ออุณหภูมิในการตัดมากเท่ากับความเร็วตัด ซึ่งการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของชิ้นงานและเครื่องมือจะทำให้

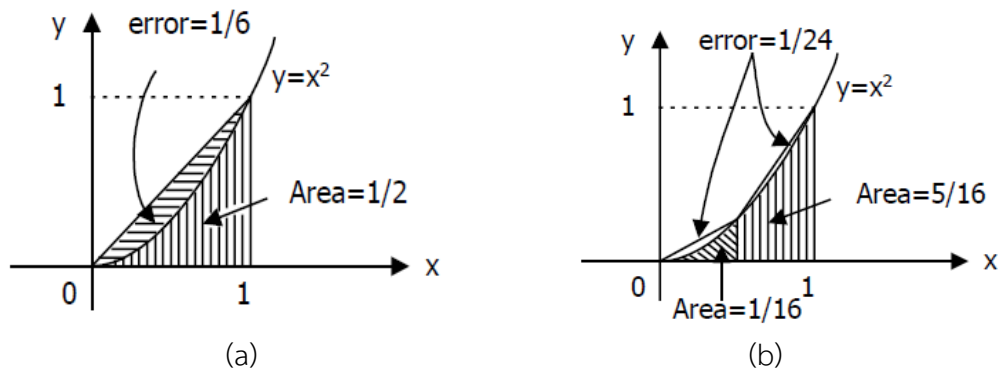
1. การสึกของมีดตัดในช่วงแรก ๆ เพิ่มขึ้น
2. ขนาดของผิวชิ้นงานที่ถูกตัดคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้น

### การวัดอุณหภูมิบนมีดตัด (Measurement temperature on Cutting Tool)

การพิจารณาการกระจายของอุณหภูมิบน rake face และในมีดตัดเป็นสิ่งสำคัญใช้เพื่อการทำนายความสึกหรอของมีดตัดรวมถึงอายุการใช้งานของมีดตัดด้วย มีเทคนิคหลาย ๆ อย่างที่ใช้เพื่อหาอุณหภูมิที่ถูกต้องบนจุดต่าง ๆ บนมีดตัด ตัวอย่างของเทคนิคที่ใช้ เช่น การใช้ photosensitive paints, thermocouple, infrared photographic และ infrared thermometer

### 2.7 วิธีการประมาณด้วยสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Method)[14]

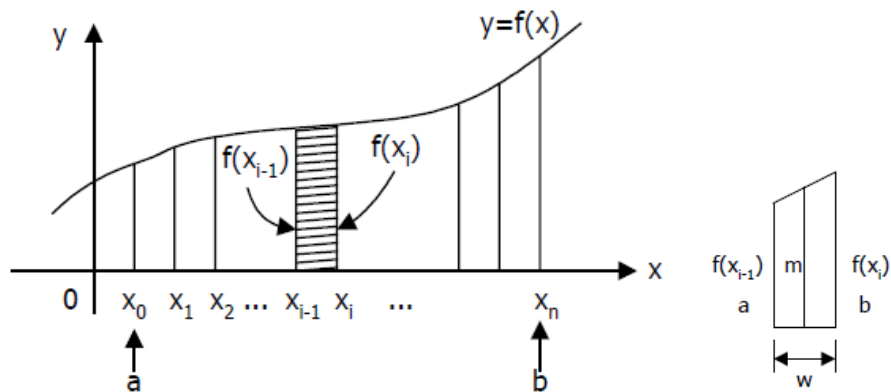
วิธีนี้จะหาพื้นที่ใต้โค้งโดยประมาณด้วยสี่เหลี่ยมคางหมูซึ่งได้จากการแบ่งพื้นที่ใต้โค้งออกเป็น ส่วนย่อย  $n$  ส่วนเท่าๆ กัน ดังรูปที่ 11 โดยการหาพื้นที่ของสี่เหลี่ยมคางหมูแต่ละรูปแล้วนำพื้นที่ของแต่ละรูปมารวมกันจะได้คำตอบเป็นค่าปริพันธ์ของฟังก์ชัน  $f(x)$  ในช่วงตัวแปร  $x$  เปลี่ยนแปลงจาก  $a$  ถึง  $b$  เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 11



รูปที่ 11 a) ประมาณพื้นที่ใต้โค้งด้วยสามเหลี่ยม b) แบ่งพื้นที่ใต้โค้งเป็นสี่เหลี่ยมคางหมู

ปกติเราจะประมาณค่าพื้นที่ใต้กราฟที่เป็นเส้นโค้งด้วยรูปสามเหลี่ยม ซึ่งอาจจะมีความคลาดเคลื่อนมากกว่าที่ควรเป็น ถ้าแบ่งพื้นที่ใต้โค้งเป็นสี่เหลี่ยมคางหมูตามรูปที่ 11 b) จะเห็นว่ามี ความต่างลดน้อยลง ดังนั้น ถ้าแบ่งพื้นที่ใต้โค้งออกเป็นส่วนย่อยๆ มากขึ้นจะทำให้มีความถูกต้อง ดีกว่า ในทางทฤษฎีจะคิดที่จำนวนเป็นอนันต์ เพื่อให้มีความถูกต้องที่สมบูรณ์ แต่ความคลาดเคลื่อน นั้นจะใช้การปิดค่าแทน แต่จะไม่กล่าวถึง

โดยทั่วไป การคำนวณค่าปริพันธ์ของฟังก์ชัน  $f(x)$  จาก  $x = a$  ถึง  $x = b$  ดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 การหาค่าปริพันธ์ด้วยวิธีสี่เหลี่ยมคางหมู

โดยใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมู เราจะแบ่งช่วงขีดจำกัดเริ่มจาก  $a$  ถึง  $b$  ออกเป็นส่วนย่อย  $n$  ส่วนเท่า ๆ กันจะได้สี่เหลี่ยมคางหมูที่มีขอบเขตของแต่ละส่วนอยู่ที่ตำแหน่ง  $x_0, x_1, x_2, \dots, x_n$  พิจารณาที่สี่เหลี่ยมลำดับที่  $i$  ซึ่งอยู่ระหว่าง  $x_{i-1}$  และ  $x_i$  จะมีความกว้าง ความสูงด้านซ้าย และความสูงด้านขวา เป็น  $w = (b-a)/n, f(x_{i-1})$  และ  $f(x_i)$  จะคำนวณหาพื้นที่ได้จากสมการ

$$A_i = \frac{w}{2}(f(x_{i-1})+f(x_i)) \tag{2.20}$$

ซึ่งได้มาจากสูตรการหาพื้นที่ของรูปสี่เหลี่ยมคางหมู พื้นที่ทั้งหมดของสี่เหลี่ยมคางหมูจำนวน  $n$  รูปจะใช้แทนเป็นค่าปริพันธ์ ดังนั้น เมื่อกำหนดให้  $T_n$  คือเป็นผลรวมของพื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมูแต่ละรูปจะได้

$$\begin{aligned} T_n &= A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_{n-1} + A_n \\ &= \frac{w}{2}[f(x_0) + f(x_1)] + \frac{w}{2}[f(x_1) + f(x_2)] + \frac{w}{2}[f(x_2) + f(x_3)] \\ &\quad + \dots + \frac{w}{2}[f(x_{n-2}) + f(x_{n-1})] + \frac{w}{2}[f(x_{n-1}) + f(x_n)] \\ &= \frac{w}{2}[f(x_0) + 2f(x_1) + 2f(x_2) + \dots + 2f(x_{n-1}) + f(x_n)] \end{aligned} \quad (2.21)$$

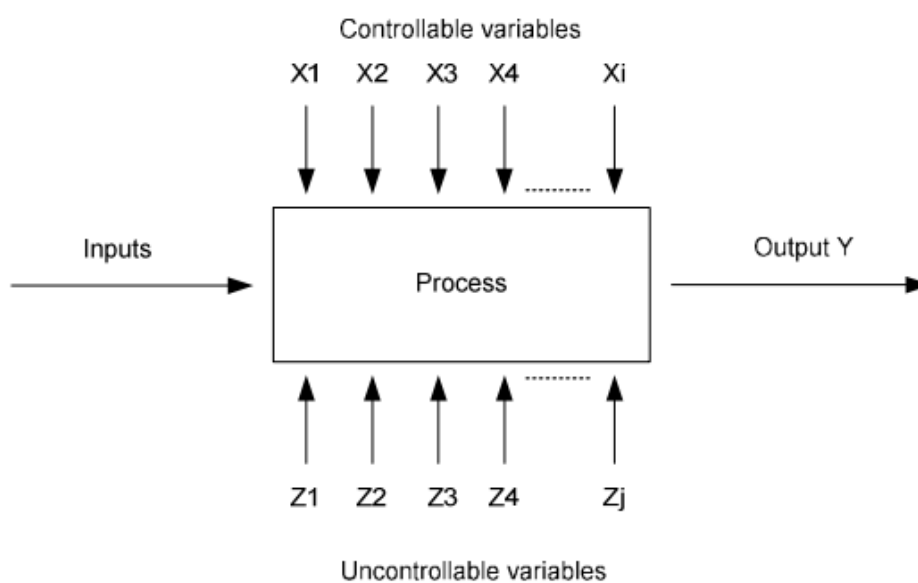
พิจารณาจากสมการจะเห็นว่าความถูกต้องของวิธีสี่เหลี่ยมคางหมูขึ้นอยู่กับจำนวนของสี่เหลี่ยมคางหมูที่ใช้ในการประมาณค่า และนอกจากนี้จะได้ว่าพื้นที่ใต้โค้งที่เป็นเส้นตรงจะสามารถใช้สี่เหลี่ยมคางหมูเพียงรูปเดียวได้ ขณะที่พื้นที่ภายใต้โค้งที่มีโค้งเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว หลายโค้ง นั้นต้องใช้สี่เหลี่ยมคางหมูหลายรูป

## 2.8 การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม [15]

การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ(Statistical Design of Experiment) หมายถึง กระบวนการในการวางแผนการทดลองเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีการทางสถิติซึ่งจะทำให้เราสามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลได้วิธีการออกแบบการทดลองในเชิงสถิติเป็นสิ่งที่จำเป็นถ้าเราสามารถหาข้อสรุปที่มีความหมายจากข้อมูลที่มีอยู่และถ้ายังปัญหาที่สนใจนั้นเกี่ยวข้องกับความต้องการหาข้อสรุปที่มีความหมายจากข้อมูลที่มีอยู่และถ้ายังปัญหาที่สนใจนั้นเกี่ยวข้องกับความผิดพลาดในการทดลอง (Experimental Error) วิธีการทางสถิติเป็นวิธีการเพียงอย่างเดียวเท่านั้นที่จะสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองนั้นได้ดังนั้นสิ่งสำคัญ 2 ประการสำหรับปัญหาที่เกี่ยวกับการทดลองก็คือการออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติซึ่งศาสตร์ทั้งสองนี้มีความเกี่ยวข้องกันอย่างมากทั้งนี้เพราะว่าวิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติที่เหมาะสมนั้นจะขึ้นกับการออกแบบการทดลองที่จะนำมาใช้โดยจะพบว่าในงานวิจัยต่างๆการ

ออกแบบการทดลองนั้นจะช่วยให้ผู้วิจัยสามารถหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับปัญหาซึ่งจะนำไปสู่การหาคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาต่อไป

กระบวนการ คือ การรวมเอาคนงาน เครื่องจักร วิธีการและทรัพยากรอื่นๆเข้าด้วยกัน เมื่อมีสิ่งป้อนเข้า (Input) เข้าสู่กระบวนการจะถูกเปลี่ยนเป็นผลลัพธ์ที่มีผลตอบออกมาในรูปแบบหนึ่งหรือมากกว่านอกจากนี้ในกระบวนการยังประกอบด้วยปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ (Controllable Factor) และปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factor)



รูปที่ 13 รูปแบบระบบการทดลองทั่วไป[15]

วัตถุประสงค์ของการทดลอง

1. หาตัวแปรที่มีผลมากที่สุดต่อค่าตอบสนอง  $y$
2. กำหนดค่าของ  $x$  ที่มีผลต่อค่าตอบสนอง  $y$  เพื่อให้ค่า  $y$  อยู่ในค่าที่ต้องการ
3. กำหนดค่าของ  $x$  ที่มีผลต่อค่าตอบสนอง  $y$  เพื่อให้ค่า  $y$  มีค่าน้อย
4. กำหนดค่าของ  $x$  ที่มีผลต่อค่าตอบสนอง  $y$  เพื่อให้ค่า  $y$  ให้ผลตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้มีค่าน้อยที่สุด

### 2.8.1 การออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบสนอง [4]

การวิเคราะห์โดยใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Analysis, RSA) เป็นการรวบรวมศาสตร์ทางด้านเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติ มีประโยชน์เป็นอย่างมากสำหรับการพัฒนาแบบจำลองขึ้น ทำให้สามารถวิเคราะห์ปัญหาได้ ซึ่งผลตอบที่เราสนใจนั้นจะขึ้นอยู่กับ

หลายๆ ปัจจัย สามารถที่จะหาค่าที่ดีที่สุดที่เหมาะสมที่สุดของผลตอบนี้ได้ โดยง่ายเช่น สมมติว่าวิศวกรเคมีคนหนึ่งต้องการหาระดับของอุณหภูมิ ( $X_1$ ) กับความดัน ( $X_2$ ) ที่จะทำให้ผลผลิตได้มากที่สุด โดยผลผลิตของกระบวนการผลิตนี้จะเป็นฟังก์ชันของระดับอุณหภูมิและความดัน สามารถเขียนสมการดังนี้

$$y = f(X_1, X_2) + \epsilon \quad (2.22)$$

กำหนดค่า  $\epsilon$  คือ ความผิดพลาดของผลตอบซึ่งแทนด้วย  $y$  มีผลมาจากทดลอง และให้  $E(y) = f(X_1, X_2) = f(X_1, X_2)$  เกิดเป็นสมการของพื้นผิวตอบ

$$\eta = f(X_1, X_2) \quad (2.23)$$

เรียกได้ว่าเป็นพื้นผิวตอบสนอง

ส่วนมากแล้วพื้นผิวตอบสนองนั้นจะออกมาอยู่ในลักษณะของรูปกราฟฟิก กำหนดให้  $\eta$  พล็อตกับระดับของ  $X_1$  และ  $X_2$  ทำให้สามารถมองรูปร่างของพื้นผิวตอบได้ดีขึ้น สำหรับเส้นโครงร่าง (Control Plot) ของพื้นผิวตอบ ดังในรูปที่ 14 นั้น รูปที่ได้จะให้เส้นที่มีค่าผลตอบคงที่อยู่บนระนาบ  $X_1$  กับ  $X_2$  ซึ่งเส้นโครงร่างแต่ละเส้นจะต้องมีความสูงของพื้นผิวตอบที่มีค่าเท่ากันอย่างน้อยหนึ่งค่า

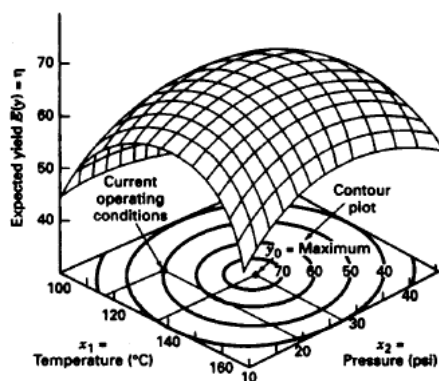
ปัญหาที่เกิดขึ้นในการสร้างพื้นผิวตอบสนองส่วนใหญ่ จะเกิดจากการไม่ทราบค่าของความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองและตัวแปรอิสระ ดังนั้นจึงต้องทำการหาค่าตัวประมาณที่เหมาะสมที่สุดสามารถ เพื่อใช้เป็นตัวแทนแสดงความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นจริงของ  $y$  และเซตตัวแปรอิสระ ซึ่งปกติการใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังต่ำๆ ภายใต้วแปรอิสระ ถ้าแบบจำลองของผลตอบนั้นมีความสัมพันธ์ที่เป็นลักษณะเชิงเส้นที่เป็นเส้นตรงกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันที่ใช้ประมาณความสัมพันธ์จึงสามารถพัฒนาได้จากแบบจำลองกำลังหนึ่ง ดังนี้

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \epsilon \quad (2.24)$$

สำหรับส่วนโค้งที่เกิดขึ้นในระบบ เกิดจากฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังมากขึ้น สามารถเขียนได้ดังนี้

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j}^k \beta_{ij} X_i X_j + \epsilon \quad (2.25)$$

ปัญหาที่ของการใช้วิธีพื้นผิวตอบสนองส่วนใหญ่ นั่น คือ ต้องใช้แบบจำลองแบบใดแบบหนึ่งตามที่กล่าวไว้ แต่แบบจำลองพหุนามที่ได้กล่าวไว้ นั้น ไม่สามารถประมาณความสัมพันธ์ได้ตลอดทั้งบนพื้นผิวของตัวแปรอิสระ แต่ถ้าพื้นผิวที่เราสนใจอยู่นั้นมีขนาดค่อนข้างน้อย จะสามารถใช้ได้ดี



รูปที่ 14 กราฟรูปพื้นผิวตอบสนองและเส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบสนอง [15]

สำหรับวิธีการกำลังสองที่น้อยสุด (Least Square Method) นั้นได้ถูกนำมาใช้เพื่อประมาณค่าของพารามิเตอร์ต่างๆในแบบจำลองแบบพหุนาม โดยที่การวิเคราะห์ของพื้นผิวตอบสนองนั้นเกิดขึ้นได้บนพื้นผิวที่ถูกสร้างมา เราสามารถประมาณค่าบนพื้นผิวที่สร้างขึ้นมาได้เป็นอย่างดี เริ่มจากการออกแบบการทดลองที่ใช้เก็บค่าให้ได้เหมาะสม ซึ่งการออกแบบเพื่อสร้างพื้นผิวตอบสนองจะเรียกว่า การออกแบบบนพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Design)

### 2.8.2 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน [15]

ในการทดลองการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) นั้นคือการออกแบบที่สามารถใช้ใช้ในการฟิตพื้นผิวตอบสนอง ซึ่งการออกแบบนั้นได้ถูกสร้างมาจากการรวมกันของการออกแบบแฟกทอเรียล  $2^k$  และการออกแบบบล็อกไม่บริบูรณ์ ผลจากการออกแบบนั้นจะมีประสิทธิภาพมากในแง่ของจำนวนของการรันของการทดลองที่ต้องการ อีกทั้งการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนนี้ มีความสามารถในการหมุนหรือเกือบหมุนได้ด้วย

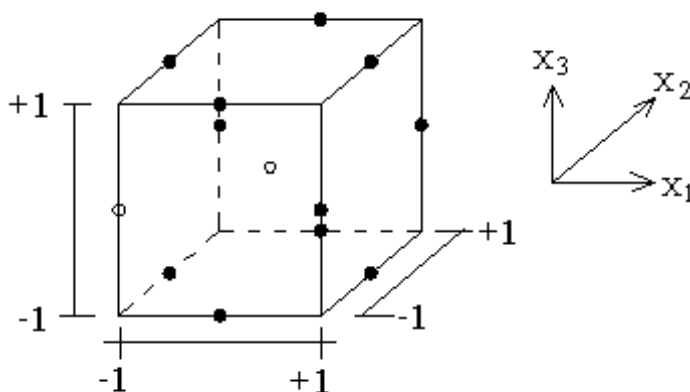
ตารางที่ 3 จะแสดงการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนในรูปแบบที่มีตัวแปรทั้งหมด 3 ตัว รูปทางเรขาคณิตของการออกแบบแสดงดังในรูปที่ 15 สังเกตได้ว่าการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนนั้นจะมีลักษณะการออกแบบเป็นรูปทรงกลม ที่ตรงทุกจุดวางอยู่บนทรงกลมรัศมีขนาด  $\sqrt{2}$  และการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนจะไม่ได้รวมจุดยอดของรูปทรงลูกบาศก์สี่เหลี่ยมที่ถูกสร้างมาจากขีดจำกัดบนและขีดจำกัดล่างของแต่ละตัวแปรอิสระ โดยการกระทำลักษณะนี้จะมีประโยชน์อย่างยิ่งในกรณีที่



จุดตรงที่อยู่บนมุมของลูกบาศก์สี่เหลี่ยมเป็นการรวมของปัจจัยระดับ (Factor-Level Combination) ที่มีมูลค่าแพงมากหรือไม่สามารถที่จะทำการทดลองได้จากสาเหตุทางด้านข้อจำกัดของด้านกายภาพในกระบวนการ

**ตารางที่ 3** ตัวอย่างการออกแบบแบบออกแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนที่มี 3 ตัวแปร

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 15 ลักษณะทางเรขาคณิตการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน [15]

## 2.9 การวิเคราะห์ผล [15]

### 2.9.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

การศึกษาการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของประชากรตั้งแต่ประชากรที่มี 2 ชุดขึ้นไป และทำการทดสอบเพียงครั้งเดียว จะสามารถทำการวิเคราะห์ได้ด้วยหลักการวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยมีประสิทธิภาพมากกว่าที่จะทำการทดสอบของทีละคู่ ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนนั้น (Analysis of variance, ANOVA) คือวิธีการพื้นฐานของทางสถิติที่ใช้เพื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่มาจากการออกแบบการทดลอง ซึ่งต้องวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าตอบสนองและลักษณะทางคุณภาพ เพื่อศึกษาผลลัพธ์ของกระบวนการหรือระบบ เพื่อให้สามารถแยกสาเหตุของความแตกต่างออกเป็น 2 ส่วนหลักๆได้ ดังนี้

1. ความแตกต่างที่สามารถอธิบายได้ (Explained variation) เป็นการเปลี่ยนแปลงหรือความแตกต่างซึ่งเกิดมาจากวิธีการปฏิบัติ ที่ถูกใช้ในการออกแบบการทดลอง โดยสามารถเรียกอีกชื่อหนึ่งได้ว่า ความแตกต่างระหว่างกลุ่ม (Between group variation)

2. ความแตกต่างที่ไม่สามารถอธิบายได้ (Unexplained variation) เป็นการเปลี่ยนแปลงหรือความแตกต่างซึ่งสามารถอธิบายไม่ได้ อาจจะเป็นเพราะยังไม่มีความรู้ หรือความรู้ที่มีอยู่เกี่ยวกับระบบนั้นๆยังไม่มากพอ ในบางกรณีนั้นที่ผู้ศึกษาอาจจะทราบว่าปัจจัยที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคืออะไร แต่ควบคุมไม่ได้ในขณะทำการทดลอง การวิเคราะห์ความแปรปรวนจะบ่งบอกลักษณะความแตกต่างนี้ในรูปแบบของความผิดพลาด หรือส่วนที่ไม่สามารถที่จะอธิบายได้ (Error or residual) เมื่อผู้ที่ทำการทดลองนั้นมีความรู้และความสามารถในการควบคุมการทดลองเพิ่มมากขึ้น ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนี้ก็จะลดลง

## 2.9.2 การทดสอบสมมุติฐาน

สำหรับการทดสอบสมมุติฐาน (Test of Hypothesis) นั้นคือกระบวนการที่ใช้ในการตัดสินใจเพื่อใช้ยืนยันความเชื่อมั่นของพารามิเตอร์ที่จะใช้อธิบายสภาพแวดล้อมที่เกิดขึ้นจริง และสามารถแสดงการแจกแจงความน่าจะเป็นของตัวแปรสุ่มอันได้แก่สภาวะที่เกิดขึ้นจริงจากสมมุติฐานเชิงสถิติ (Statistical Hypothesis) คือ สมมุติฐานหลัก (Null Hypothesis :  $H_0$ ) และสมมุติฐานอื่นๆ (Alternative Hypothesis :  $H_1$ ) ซึ่งสมมุติฐานหลักที่ใช้นั้นเป็นสมมุติฐานที่ถูกเชื่อว่าเป็นสภาพแวดล้อมที่เกิดขึ้นจริงและต้องทำการทดสอบเพื่อให้ทราบสาเหตุที่จะปฏิเสธสมมุติฐานนี้ได้ ในสมมุติฐานอื่นๆเป็นการต้องการยืนยันด้วยเหตุผลที่สามารถช่วยในการตัดสินใจ โดยแบบทดสอบสมมุติฐานนั้นจะมีลักษณะโอกาสการผิดพลาด 2 ชนิด ได้แก่

1. ความผิดพลาดแบบที่ 1 (Type I Error) เป็นการปฏิเสธสมมุติฐานหลักทั้งๆที่ในสภาวะความเป็นจริงแล้วสมมุติฐานหลักนั้นถูกต้อง สามารถเรียกความผิดพลาดนี้ว่า ระดับนัยสำคัญ (Significant Level) สามารถแทนสัญลักษณ์ด้วย  $\alpha$  กำหนดให้  $\alpha = P$  (ปฏิเสธ  $H_0$  เมื่อที่  $H_0$  เป็นจริง)

2. ความผิดพลาดแบบที่ 2 (Type II Error) เป็นการไม่ปฏิเสธสมมุติฐานหลักทั้งๆที่ในสภาวะความเป็นจริงแล้วสมมุติฐานหลักนั้นไม่ถูกต้อง กำหนดแทนด้วยสัญลักษณ์  $\beta$  สามารถเรียกความผิดพลาด  $1 - \beta$  นี้ว่า อำนาจในการทดสอบ (Power of Test) กำหนดให้ที่  $\beta = P$  (ยอมรับ  $H_0$  เมื่อที่  $H_0$  ไม่เป็นจริง)

การทดสอบสมมุติฐานควรจะต้องออกแบบวิธีการตัดสินใจให้มีระดับนัยสำคัญที่มีค่าคงที่และอยู่ในระดับต่ำ เช่น 0.05 และต้องเพิ่มอำนาจการทดสอบให้มีค่าสูงมากที่สุดเพื่อให้สามารถตัดสินใจเลือก  $H_1$  จะได้ทำอย่างมีเหตุมีผลสามารถยืนยันผลได้ชัดเจนจริงๆ สามารถเรียกได้ว่าเป็นการตัดสินใจแบบเพื่อยืนยัน (Strong Conclusion) ซึ่งการตัดสินใจโดยการทดสอบสมมุติฐานนี้จะดำเนินการตามขั้นตอนต่างๆได้ดังนี้

1. ตั้งสมมุติฐานขึ้นตามสิ่งที่ต้องการใช้ในการทดสอบ
2. กำหนดวิธีการที่ใช้ในตัดสินใจโดยเริ่มจากการพิจารณาตัวสถิติที่ใช้สำหรับทดสอบพารามิเตอร์แต่ละตัว รวมไปถึงการแจกแจงตัวสถิติเพื่อใช้อธิบายขนาดของความแปรผันที่ควบคุมไม่ได้ของเงื่อนไขในการทดลอง (Reproducibility) กับการกำหนดช่วงของการปฏิเสธและการยอมรับภายใต้เงื่อนไขของค่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดมา

3. เริ่มออกแบบการทดลองจากการกำหนดขนาดของตัวอย่าง ต้องกำหนดให้อำนาจในการทดสอบอยู่ในระดับที่สามารถยอมรับได้

4. ดำเนินการปฏิบัติการทดลองตามที่ได้ออกแบบการทดลองไว้

5. ทำการเลือกการตัดสินใจตามวิธีที่กำหนดเอาไว้แล้ว ถ้าข้อมูลนั้นตกอยู่ในช่วงของการยอมรับจะสามารถสรุปได้ว่าไม่มีเหตุผลที่จะใช้ปฏิเสธสมมุติฐาน เนื่องจากข้อมูลที่ทำการทดสอบนั้นตกอยู่ภายในช่วงความผันแปรอันเกิดจากปัจจัยทางธรรมชาติ แต่ถ้าข้อมูลนั้นๆตกอยู่ในช่วงของการปฏิเสธ ก็ต้องทำการปฏิเสธสมมุติฐานที่กำหนดไว้

### 2.9.3 ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

ความเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็นค่าวัดการกระจายที่ใช้กันมาก ซึ่งเป็นรากที่สองของความแปรปรวน หากมีการนำสิ่งตัวอย่างไปอนุมานประชากรแล้ว ค่าที่ควรจะเป็นก็จะ หมายถึง ค่าที่ควรจะเป็นของประชากร ( $\mu$ ) ดังนั้น

$$SS = \sum_{i=1}^n (y_i - \mu)^2 \quad (2.26)$$

แต่โดยที่  $\mu$  เป็นค่าคงที่ที่ไม่ทราบค่า จึงต้องทำการประมาณค่าด้วยค่าเฉลี่ยจากสิ่งตัวอย่าง ( $\bar{y}$ ) ซึ่งจะทำให้สูญเสียความเป็นอิสระของตัวแปรสุ่มในการประมาณค่าครั้งนี้ไปเท่ากับ 1 ตัว เนื่องจาก

$$\hat{\mu} = \bar{y} = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_{10}}{10} = \text{ค่าคงที่} \quad (2.27)$$

จากสมการที่ (2.27) จะพบว่า  $y_1$  ถึง  $y_{10}$  มีค่ามากมายหลายค่าตามกฎแห่งโอกาส จึงอาจสรุปได้ว่า หากมีข้อมูลจำนวน  $n$  ตัว จะมีข้อมูลที่มีอิสระเพียง  $n-1$  ตัวเท่านั้น และจะเรียกจำนวนข้อมูลที่มีอิสระนี้ว่า องศาแห่งความอิสระ (Degree of freedom) ซึ่งหมายถึงจำนวนข้อมูลที่มีสารสนเทศในการอนุมานค่าความเบี่ยงเบนของประชากรได้

ดังนั้น จึงอาจนิยามตัวสถิติสำหรับวัดค่าการกระจายต่อหน่วยในประชากร คือ

$$\text{ความแปรปรวน (Variance)} = \frac{\text{ผลรวมกำลังสอง (SS)}}{\text{องศาแห่งความอิสระ (df)}} \quad (2.28)$$

ในกรณีคิดผลรวมกำลังสองของความเบี่ยงเบนรอบค่าที่ควรจะเป็นของประชากรแล้ว  
จะได้ผลว่า

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1} \quad (2.29)$$

แต่อย่างไรก็ตาม ค่าความแปรปรวนที่ได้จะมีค่ามากกว่าความเป็นจริงเนื่องมาจากการ  
ยกกำลังสองของค่าความเบี่ยงเบน ดังนั้นจึงสามารถหาความเบี่ยงเบนที่แท้จริงได้ด้วยการถอดรากที่  
สองของค่าความแปรปรวน และจะเรียกค่านี้ว่า ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)  
แทนด้วย  $S$  ซึ่งเป็นค่าที่ใช้อนุมานความเบี่ยงเบนมาตรฐานของประชากร ดังนั้น

$$S = \sqrt{S^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}} \quad (2.30)$$

#### 2.9.4 การใช้ P-Value ในการทดสอบสมมติฐาน

วิธีการรายงานผลของการทดสอบสมมติฐานวิธีหนึ่งคือ การแสดงว่าสมมติฐานหลัก  
จะถูกปฏิเสธหรือไม่ที่ค่า  $\alpha$  หรือระดับนัยสำคัญที่กำหนด วิธีการของ P-Value ได้ถูกนำมาใช้อย่าง  
มากเพื่อหลีกเลี่ยงความยุ่งยาก P-Value คือ ความน่าจะเป็นที่ค่าทดสอบทางสถิติจะมีค่าเป็นอย่าง  
น้อยที่จะทำให้ค่านี้มีค่ามากเท่ากับค่าสังเกตในทางสถิติเมื่อสมมติฐานหลักเป็นจริง ดังนั้น P-Value นี้  
จะแสดงถึงน้ำหนักของหลักฐานที่จะใช้ในการปฏิเสธ  $H_0$  และผู้ตัดสินใจสามารถจัดทำข้อสรุปที่ระดับ  
นัยสำคัญอื่นๆ ได้ นอกจากนี้ยังสามารถนิยาม P-Value ว่าเป็นเหมือนกับค่าที่น้อยที่สุดของระดับ  
นัยสำคัญซึ่งนำไปสู่การปฏิเสธสมมติฐานหลัก  $H_0$  ก็ได้

โดยปกติแล้วนิยามที่จะบอกว่าค่าทดสอบทางสถิติมีนัยสำคัญก็ต่อเมื่อ สมมติฐานหลัก  
 $H_0$  ถูกปฏิเสธ ดังนั้นเราอาจจะพิจารณาค่า P-Value ว่าเป็น  $\alpha$  ที่น้อยที่สุดซึ่งทำให้ข้อมูลมีนัยสำคัญ  
เมื่อรู้ค่า P-Value แล้ว ผู้ตัดสินใจก็สามารถทราบว่าคุณมามีนัยสำคัญอย่างไร โดยไม่ต้องอาศัยการ  
วิเคราะห์ข้อมูลซึ่งมีการกำหนดระดับนัยสำคัญไว้ก่อน

### 2.9.5 การทดสอบความเหมาะสมของสมการแบบจำลอง

การทดสอบของความเหมาะสมของสมการแบบจำลอง ปกติมี 3 วิธี ได้แก่

#### 1) การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ )

คือตัวแปรอิสระในสมการถดถอย หรือเป็นค่าที่ใช้อธิบายความสามารถของสมการถดถอย ว่า จะสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงตัวแปรตามหรือค่าตอบสนองได้เป็นสัดส่วนเท่าใด ค่าการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจยิ่งมากเท่าไร สมการนั้นๆ ก็ยิ่งจะมีความเหมาะสมมากขึ้นเท่านั้น ซึ่งในทางปฏิบัติจะมีค่าความไวในการเปลี่ยนแปลง ดังนั้น เมื่อเพิ่มจำนวนของตัวแปรอิสระลงในสมการค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจ จึงต้องใช้ค่าที่ปรับค่าแล้ว ( $R^2_{adj}$ ) แทน

#### 2) การตรวจสอบการขาดความเหมาะสมของสมการ (Lack-of-Fit test, LOF)

สำหรับการตรวจสอบการขาดความเหมาะสมของสมการนั้น จะต้องดำเนินการพิจารณากรณีที่ต้องมีการเก็บข้อมูลซ้ำ เนื่องจากผลการทดลองที่ได้มามีค่าต่างกัน โดยปกติจะเป็นข้อมูลจากการออกแบบการทดลองที่กำหนดขึ้น ทำให้ต้องทำการเก็บค่าซ้ำตามที่ได้ออกแบบการทดลองไว้ โดยเปรียบเทียบค่าของ P-Value กับค่าของ  $\alpha$  ที่กำหนด ถ้ามีค่า P-Value มากกว่าค่า  $\alpha$  จึงถือได้ว่าสมการนั้นจะมีความเหมาะสมในการนำมาใช้

#### 3) การตรวจสอบนัยสำคัญของค่าสัมประสิทธิ์ในสมการถดถอย และการประมาณค่าแบบช่วง (Hypothesis testing)

การตรวจสอบนัยสำคัญของค่าสัมประสิทธิ์ในสมการถดถอยนั้น เป็นขั้นตอนสุดท้ายก่อนที่จะนำสมการที่พัฒนาขึ้นมาไปใช้ในการประมาณค่าผลตอบ โดยอาจจะใช้การค่าประมาณแบบจุดหรือช่วง ทำให้เกิดประโยชน์โดยการนำไปประยุกต์ใช้ในขณะที่ทราบค่าของความแปรปรวนของตัวประมาณแล้ว จึงเริ่มทำการดำเนินการทดสอบสมมติฐาน และมาทำการประมาณแบบช่วง การทดสอบสมมติฐานส่วนใหญ่จะทดสอบเฉพาะค่าสัมประสิทธิ์ของสมการถดถอย ทำให้ทราบว่าสมการถดถอยที่พัฒนาขึ้นมาสามารถสรุปได้หรือไม่ สำหรับการประมาณแบบช่วงนั้น การสร้างช่วงสำหรับค่าความชันที่เกิดขึ้นจะใช้ในการพยากรณ์ในกรณีที่ เป็นสมการถดถอยอย่างง่าย

## 2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### S.Tangjitsitcharoen, Somchat A. and Sirichan T.(2010)[3]

งานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจติดตามและทำการสร้างโมเดลการพยากรณ์ความขรุขระผิวของชิ้นงานที่เครื่องกลึงขณะตัด โดยใช้การวิเคราะห์การตอบสนองของผิวชิ้นงาน โดยการวิเคราะห์แรงที่ใช้ตัดอุณหภูมิขณะตัด และความเรียบผิว โดยใช้การเก็บข้อมูลแบบ Box-Behnken มีการติดตั้งไดนาโมมิเตอร์ในการวัดแรงตัด และติดตั้ง Infrared pyrometer เพื่อวัดอุณหภูมิที่ผิวชิ้นงานจากการทดลองทำให้ได้ข้อมูลที่จะนำไปพัฒนาโมเดลสมการเพื่อพยากรณ์ความขรุขระของผิวชิ้นงาน ด้วยความเชื่อมั่นที่ระดับ 95% ซึ่งความสัมพันธ์ของความขรุขระผิว อุณหภูมิในการตัด และอัตราส่วนของแรงในการตัดจะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสม คือ ความเร็วตัดที่ 350 m/min อัตราการป้อน 0.15 mm/rev และความลึกการตัดที่ 0.5 mm.

### S.Jungphong and S.Tangjitsitcharoen(2011)[4]

งานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจติดตามและทำการสร้างโมเดลพยากรณ์ความขรุขระผิวของชิ้นงานที่เครื่องกลึงขณะตัด โดยใช้การวิเคราะห์การตอบสนองของผิวชิ้นงาน โดยการวิเคราะห์หาเงื่อนไขที่เหมาะสมจากแรงที่ใช้ตัดอุณหภูมิขณะตัด และรัศมีจุมูกมีด ที่มีผลต่อความเรียบผิวโดยใช้การเก็บข้อมูลแบบ Box-Behnken มีการติดตั้งไดนาโมมิเตอร์ในการวัดแรงตัด และติดตั้ง Infrared pyrometer เพื่อวัดอุณหภูมิที่ผิวชิ้นงานจากการทดลองทำให้ได้ข้อมูลที่จะนำไปพัฒนาโมเดลสมการเพื่อพยากรณ์ความขรุขระของผิวชิ้นงาน และนำมาเปรียบเทียบกับทฤษฎีความขรุขระผิว จะพบว่าสมการที่พัฒนาขึ้นมีความแม่นยำกว่าเนื่องจากการนำความเร็วตัดและความลึกตัดด้วย โดยเงื่อนไขการตัดที่ดีที่สุดคือคือ ความเร็วตัดที่ 340 m/min อัตราการป้อน 0.15 mm/rev และความลึกการตัดที่ 0.2mm.และรัศมีจุมูกมีด 1.2 mm.

### S. Tangjitsitcharoen, C. Rungruang, D. Laiaddee (2010)[5]

งานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจติดตามคือ แบบแห้ง, แบบเปียก และแบบละอองสำหรับการตัดเหล็กกล้าคาร์บอนด้วย ball end milling ซึ่งจะพิจารณาจากความขรุขระผิวน้อยที่สุดและความลึกหรือของมีดตัดผิว วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของแรงในการตัด ความเร็วในการตัด เวลาในการตัด ความลึกตัด ความขรุขระผิวของชิ้นงาน อายุการใช้งานของมีดตัด และการใช้สารหล่อเย็น ด้วยการทดสอบโมเดลสมการจะมีความเชื่อมั่นอยู่ที่ระดับที่ 95%

จากผลการทดลองเงื่อนไขการตัดที่สภาวะเหมาะสมของเงื่อนไขการตัดแบบเปียก คือ ความเร็วรอบ 10,000 รอบต่อนาที, อัตราการป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ, และความลึกตัด 0.3 มิลลิเมตร การตัดแบบแห้ง คือ ความเร็วรอบ 8,000 รอบต่อนาที, อัตราการป้อนตัด 0.05 มิลลิเมตรต่อรอบ, และความลึกตัด 0.3 มิลลิเมตร และการใช้สเปรย์สารหล่อเย็น คือ ความเร็วรอบ 9,500 รอบต่อนาที, อัตราการป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ, และความลึกตัด 0.3 มิลลิเมตร

#### A.Doniavi, M.Eskandarzade and M. Tahmasebian (2007) [6]

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเรียบผิวสำเร็จของกระบวนการกลึงจากเงื่อนไขการตัด 3 พารามิเตอร์ คือ ความเร็วตัด อัตราการป้อน และความลึกตัด โดยได้ศึกษาความเหมาะสมของการใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองต่างๆ จึงเลือกใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเพื่อใช้ในการหาโมเดลที่เหมาะสมที่สุดในการหาความขรุขระผิว จากการทดลองพบว่าอัตราป้อนเป็นส่งผลกระทบต่อความเรียบผิว โดยเมื่ออัตราป้อนเพิ่มขึ้น ความขรุขระผิวก็จะเพิ่มขึ้น แต่ความขรุขระผิวจะลดลง เมื่อความเร็วตัดเพิ่มขึ้น แต่การวิเคราะห์ความแปรปรวนจะเห็นว่าความลึกตัดนั้นไม่มีนัยสำคัญ

#### AbdallahNasri, Mihed Ben Said, WassilaBouzidSai(2011) [7]

งานวิจัยนี้จะศึกษาอุณหภูมิที่กระบวนการกัดโดยการศึกษาค้นคว้าจากหลายๆงาน โดยการพยากรณ์อุณหภูมิในรูปแบบการทำงานโมเดลที่เป็น 3 มิติ ที่เกิดขึ้นกับเครื่องมือตัด เศษโลหะ และชิ้นงาน ตามทฤษฎีการตัด เพื่อดูความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการตัดต่างๆ ทั้งความเร็วการตัด อัตราการป้อน และรัศมีมีดตัด ซึ่งใช้วิธีการ FE โมเดล จากผลการทดลองแสดงการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเมื่อเพิ่มพารามิเตอร์ในกระบวนการตัด การใช้น้ำหล่อเย็นขณะตัดชิ้นงานจะช่วยให้อุณหภูมิลดลงมากกว่าการใช้ลมเป่า และการลดลงของรัศมีมีดตัดก็ทำให้อุณหภูมิลดลงด้วย ซึ่งผลการเปรียบเทียบแต่ละงานวิจัยในเงื่อนไขการตัดต่างๆกับอุณหภูมิมีความสอดคล้องกัน



Dr. Mike S. Lou, Dr. Joseph C. Chen & Dr. Caleb M. Li(1999) [8]

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเพื่อพัฒนาตัวแบบสำหรับการพยากรณ์ความเรียบผิวของชิ้นงานในงานกัดผิวโดยใช้ดอกกัดแบบ end-milling ตัดในงานอะลูมิเนียม 6061 ปัจจัยที่นำมาพิจารณาได้แก่ อัตราป้อนตัด ความลึกตัด และความเร็วยรอบ โดยใช้ SPSS มาวิเคราะห์ในสมการถดถอยศึกษาผลของปัจจัยที่ส่งผลต่อความเรียบผิวของชิ้นงาน จากการวิจัยพบว่าสมการตัวแบบความเรียบผิวที่ได้มีความแม่นยำอยู่ที่ความเชื่อมั่น 90.03% และปัจจัยที่มีผลต่อความเรียบผิวของชิ้นงานมากที่สุดคือ อัตราป้อนตัด

S. Bharathi Raja, N. Baskar (2012) [16]

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเรียบผิวจากการกัดปาดหน้าเพื่อศึกษาใช้เงื่อนไขการตัดต่างๆ แล้วใช้วิธีการทดลองแบบลองผิดลองถูกที่อาศัยประสบการณ์และการศึกษาจากตำราต่างๆ แล้วพัฒนาเทคนิคให้สามารถหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับความเรียบผิวในกระบวนการกัดของงานอะลูมิเนียมบนเครื่องกัด CNC ซึ่งการทดลองนี้จะใช้การออกแบบการทดลองแบบฟูลแฟกทอเรียลมีจำนวนการทดลอง 36 การทดลอง โดยใช้พารามิเตอร์ คือ ความเร็ว อัตราป้อน และความลึกตัด โมเดลที่ถูกประยุกต์นั้นจะใช้เทคนิค PSO ซึ่งเป็นพื้นฐานของการออกแบบการทดลอง แล้วทำการทดลองเพื่อหาผลลัพธ์มาประเมินผล จากผลการทดลองนั้นจะเห็นว่าโมเดลที่ได้นั้นมีความน่าเชื่อถืออยู่ที่ 85 %

S.Tangjitcharoen(2009)[17]

งานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจติดตามการตัดแบบแห้งและการตัดที่ใช้สารหล่อเย็นทั้งแบบเปียกและแบบฉีดพ่นในเครื่องกลึง เพื่อที่จะตรวจสอบเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมที่สุด โดยเปรียบเทียบจากความเรียบผิวของชิ้นงาน การเกิดเศษโลหะ อายุการใช้งานของมีดตัดและปริมาณการใช้สารหล่อเย็นในการทดลองผู้วิจัยได้ใช้เหล็กกล้าคาร์บอนเป็นชิ้นงานในการตัดและมีดตัดใช้แบบเคลือบคาร์ไบด์ โดยมีการติดตั้งไดนาโมมิเตอร์เข้ากับเครื่องจักรเพื่อให้แสดงแรงจริงที่เกิดขึ้นขณะตัด จากการทดลองจะพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างความเรียบผิวกับปริมาณของเศษโลหะความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเศษโลหะกับความเร็วในการตัด ความสัมพันธ์ระหว่างความเรียบผิวกับความเร็วในการตัด ความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอของมีดตัดกับปริมาณเศษโลหะทั้งหมดสอดคล้องกัน โดยการเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดจะขึ้นอยู่กับการใช้งานนั้นๆ

S.Tangjitsitcharoen (2010) [18]

งานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจติดตามแรงในขณะตัด เพื่อใช้พัฒนาประมาณค่าในการพยากรณ์ ความขรุขระผิว โดยมีเงื่อนไขการตัดต่างๆ ของกระบวนการกลึงของเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด AISI 1045 ด้วยมีดตัดคาร์ไบด์เคลือบผิว ซึ่งใช้แรงตัดเป็นปัจจัยในการพิจารณาหลักเพื่อทำการตรวจ ติดตามการทดลอง กระบวนการตัดชิ้นงานนั้น จะประกอบด้วยแรงอยู่ 2 ทิศทางตามการเคลื่อนที่ ของมีดตัด กำหนดให้ทิศทางหลักเป็นแนวการป้อนตัดหรือตามแนวแกน y และอีกทิศทางคือแนว ที่ตั้งฉากกับชิ้นงานหรือตามแนวแกน z จึงนำมาหารกันทำเป็นสัดส่วน คือ  $F_y/F_z$  หลังจากนั้นจึงทำ การพัฒนาสมการแบบจำลองความขรุขระผิวชิ้นงานที่ค่าปัจจัยที่กำหนดในการตัดต่างๆ คือ ความเร็ว ตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีงูมมีต และอัตราส่วนแรงตัด โดยทำการประยุกต์มาจากการ วิเคราะห์สมการการถดถอยพหุคูณ โดยมีการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์และเลขยกกำลังของแต่ละ เงื่อนไข ตามวิธีกำลังสองน้อยสุด ทำให้เกิดสมการแบบจำลองความขรุขระผิวชิ้นงาน คือ

$$Ra = 89.9(V)^{-0.342} (f)^{1.31} (R_n)^{-0.397} (D)^{0.221} \left(\frac{F_y}{F_z}\right)^{-0.439}$$

กำหนดความเชื่อมั่นอยู่ที่ระดับ 95% จากผลการทดลองบ่งชี้ว่า อัตราป้อนตัดส่งผลกระทบต่อความขรุขระผิวมากที่สุด และความลึกตัดจะส่งผลกระทบต่อความขรุขระผิวน้อยที่สุด โดยพิจารณา จากค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละปัจจัย สามารถอธิบายได้ว่าความขรุขระผิวของชิ้นงานจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มของอัตราป้อนตัด และความลึกตัด ส่วนของความเร็วตัด รัศมีงูมมีต และสัดส่วน แรงตัดนั้นเป็นลักษณะแปรผกผันกันนั้นคือทำให้มีแนวโน้มลดลง

#### S.Tangjitsitcharoen (2011)[19]

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเพื่อตรวจติดตามอัตราของแรงในการตัดและศึกษาความสัมพันธ์ ของเงื่อนไขในการตัด แรงในการตัด และความขรุขระของผิวชิ้นงาน เพื่อสร้างโมเดลในการ พยากรณ์ความขรุขระของผิวสำหรับกระบวนการตัดเหล็กกล้าคาร์บอนด้วย ball end milling โดยใช้ อัตราส่วนของแรงที่เกิดขึ้นขณะกัดชิ้นงาน ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงตัดในแกน X กับแรงตัดในแกน Z โดยมีการติดตั้งไดนาโมมิเตอร์เพื่อวัดแรงในการตัด ความขรุขระผิวจะวัดในทิศทางของอัตราการ ป้อน โดยความสัมพันธ์ของอัตราส่วนของแรงในการตัด เงื่อนไขการตัด และความเรียบผิวจะพัฒนา เป็นโมเดลของความขรุขระของผิวชิ้นงานในขณะตัด ซึ่งดูจากอัตราส่วนของแรงในการตัดกับความลึก หรอของมีดตัด จากการทดลองพบว่าเมื่อความลึกหรือของมีดตัดเพิ่มขึ้น อัตราส่วนของแรงในการตัด จะลดลง จากการคำนวณสัมประสิทธิ์และเลขยกกำลังของแต่ละตัวแปรด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุด

(Least square method) และพัฒนาสมการแบบจำลองของความขรุขระผิวชิ้นงานด้วยรูปแบบฟังก์ชันเอ็กซ์โปเนนเชียล ทำให้ได้โมเดลคือ

$$Ra = 7.5(10)^{-6}(V)^{0.964}(f)^{0.195}(\theta)^{2.69}(D)^{0.917}\left(\frac{F_x}{F_z}\right)^{-2.6}$$

จากการใช้การพยากรณ์ที่ได้การวิเคราะห์ multiple regression เปรียบเทียบการทดลองการตัดจริงพบว่ามีค่าความใกล้เคียงกันของข้อมูลถึง 95% ซึ่งถือว่ามีความถูกต้องสูงมาก

#### K. Kadirgama, K. A. Abou-El-Hosseirr, B. Mohammad and H. Habeeb (2007)[20]

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อการพัฒนาความเรียบผิวโดยใช้โมเดลในการพยากรณ์จากหลักการทางสถิติสำหรับมีดกัดคาร์ไบด์ hastelloy C-22HS เคลือบผิวด้วย PVD และ CVD ภายใต้เงื่อนไขการตัดของพารามิเตอร์คืออัตราการป้อน ความเร็วในการตัดและความลึกตัด 3 ระดับ แล้วนำผลมาเปรียบเทียบระหว่างการพยากรณ์กับการทดลองจริงโดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง สามารถพัฒนาที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

จากผลการทดลองจะพบว่าอัตราการป้อน ความเร็วในการตัดและความลึกตัดจะเป็นไปโมเดลของความเรียบผิว โดยที่ความเรียบผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อลดความเร็วตัด โดยที่การเคลือบมีดตัดแบบ PVD จะให้ผิวที่ดีกว่าการเคลือบมีดตัดแบบ CVD ด้วยมีดตัด hastelloy C-22HS ซึ่งการตัดด้วยมีดตัดที่เคลือบแบบ PVD จะมีรูปแบบของเศษโลหะออกมาแบบไม่ต่อเนื่อง ส่วนแบบ CVD เป็นเศษโลหะแบบต่อเนื่อง

#### Xiaoxiao Chen, Jun Zhao, Yueen Li, Shiguo Han, Qingyuan Cao and Anhui Li (2011) [21]

งานวิจัยนี้จะมีการพิจารณาพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญต่อกระบวนการกัดชิ้นงาน ทั้งความเร็วในการตัด แรงในการตัด อุณหภูมิในการตัด และความเครียด โดยความเร็วตัดตามแนวมุมของทิศทางการป้อนมีส่งผลกระทบต่ออย่างมาก จำนวนการทดลองและวิธีการได้ถูกประยุกต์ในงานวิจัยนี้ให้ดีขึ้นในกระบวนการกัด การทดลองนี้ใช้มีดตัดคาร์ไบด์ตัดชิ้นงานเพื่อทำแม่พิมพ์โดยใช้วัสดุ P20 steel ซึ่งใช้มุมเอียงในทิศทางการป้อนใช้ตั้งแต่ 5°จนถึง 30° เพื่อใช้ลดแรงในการตัด แนวโน้มของอุณหภูมิชิ้นงานจะมีรูปร่างเป็นรูปโค้งงอขึ้น ขณะที่อุณหภูมิของเศษโลหะจะเพิ่มขึ้นเมื่อมุมเอียงในทิศทางการป้อนเพิ่มมากขึ้น เมื่อเพิ่มองศาความเอียงมากขึ้นจะทำให้แรงในการตัด อุณหภูมิในการตัดเพิ่มมากขึ้นด้วย

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 การออกแบบการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขงานกัดต่างๆ ทั้งแรงตัดและอุณหภูมิ สำหรับใช้อธิบายปรากฏการณ์ในการวิเคราะห์ค่าความขรุขระผิวจากการใช้ใบมีดตัดหัวบอล โดยใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบสนองด้วยการออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน เพื่อศึกษาหาปัจจัยในการตัดที่เหมาะสมที่สุดก่อนทำการปฏิบัติงานจริง

#### 3.2 การกำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

##### 3.2.1 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความขรุขระผิวของชิ้นงาน

ในกระบวนการผลิตที่ต้องขึ้นรูปชิ้นงานด้วยการกัด หลักเกณฑ์ที่สำคัญที่ใช้ในการประเมินคุณภาพของงานนั้นๆ คือ ความเรียบหรือความขรุขระบนผิวของงาน จากการค้นคว้าศึกษาในอดีตจะพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อความเรียบผิวโดยตรงจะประกอบด้วย ความเร็วรอบ, ความลึกตัด อัตราการป้อน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัด รวมถึงอุณหภูมิ ในขณะที่ตัดจะเกิดความร้อนที่สูงซึ่งเมื่อเราตรวจวัดอุณหภูมิในขณะที่ตัดก็จะสามารถอธิบายแนวโน้มของความเรียบผิวที่จะเกิดขึ้นได้นั้นเอง งานวิจัยนี้จึงขอทำการศึกษาความสัมพันธ์ของเงื่อนไขการตัดและอุณหภูมิขณะทำการทดลอง

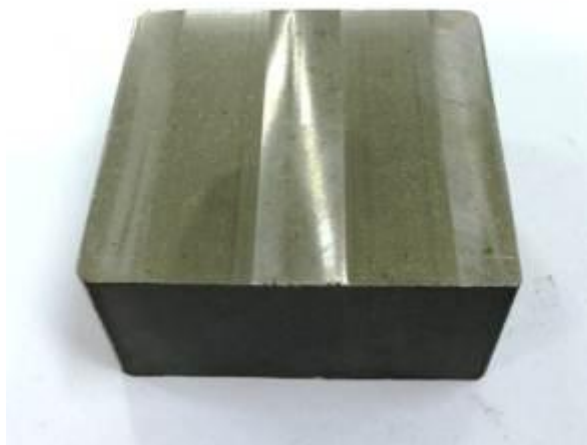
##### 3.2.2 ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ระดับปัจจัยที่ถูกกำหนดจะเป็นแบบค่าคงที่ โดยแต่ละปัจจัยจะแบ่งออกเป็น 3 ระดับ อ้างอิงตามข้อมูลทางด้านเทคนิคของบริษัทผู้ผลิตมีดตัดที่แนะนำจากคู่มือการใช้งานมีดตัด โดยกำหนดดังนี้

1. ความเร็วรอบการตัด เลือกใช้ที่ระดับ 8,000 10,000 และ 12,000 รอบต่อนาที
2. ความลึกตัด เลือกใช้ที่ระดับ 0.5, 0.7 และ 0.9 มิลลิเมตร
3. อัตราการป้อนตัด เลือกใช้ที่ระดับ 0.02, 0.04 และ 0.06 มิลลิเมตรต่อรอบ
4. เส้นผ่านศูนย์กลางของมีดตัดหัวบอล เลือกใช้ที่ 6,8 และ 10 มิลลิเมตร

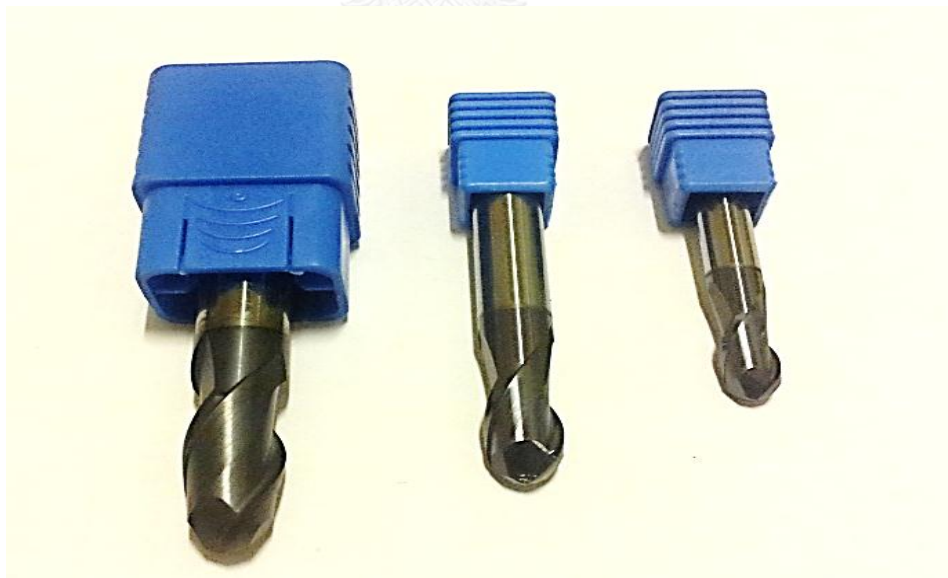
### 3.3 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดลอง

1. ชิ้นงานที่ใช้นั้นเป็นเหล็กกล้าคาร์บอน (S50C) มีขนาดความกว้าง 64 มิลลิเมตร ยาว 64 มิลลิเมตร และสูง 45 มิลลิเมตร



รูปที่ 16 ชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนที่ใช้ในการทดลอง

2. มีดตัดเป็นมีดตัดแบบหัวบอลเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมอะลูมิเนียมไนไตรด์ ชนิดคาร์ไบด์ 2 ฟันกัด มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง คือ 6, 8 และ 10 มิลลิเมตร



รูปที่ 17 มีดตัดแบบหัวบอล ( Ball End- Milling )

3. เครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ชนิด 5 แกน ยี่ห้อ Mazak รุ่น Variaxis 500-5X ใช้ในการทำารทดลองตัดชิ้น



รูปที่ 18 เครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ชนิด 5 แกน

4. ไดนาโมมิเตอร์ ยี่ห้อ Kistler รุ่น 9257B สำหรับวัดแรงตัด



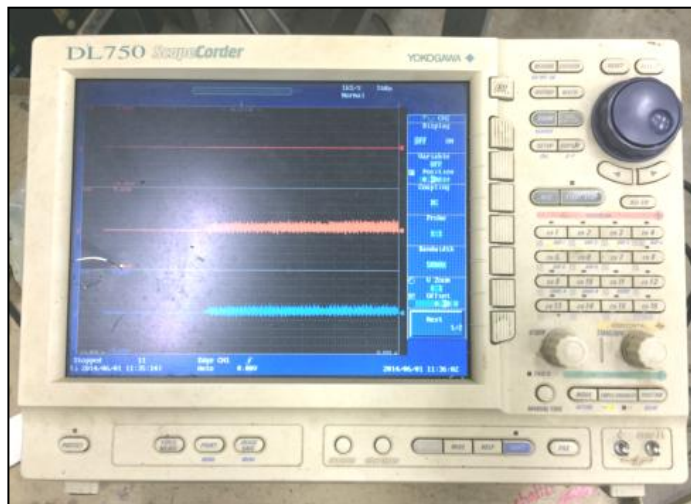
รูปที่ 19 ไดนาโมมิเตอร์สำหรับวัดแรงตัด

5. ชาร์จแอมพลิไฟเออร์ ยี่ห้อ Kistler รุ่น 5070A สำหรับขยายสัญญาณแรงตัด



รูปที่ 20 ชาร์จแอมพลิไฟเออร์สำหรับขยายสัญญาณแรงตัด

6. ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) ยี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น DL 750 ใช้สำหรับแสดงค่าสัญญาณและบันทึกค่าที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการตัด



รูปที่ 21 ออสซิลโลสโคปสำหรับแสดงผลและบันทึกค่าแรงตัด

7. เครื่องวัดความขรุขระผิวชิ้นงาน (Roughness tester) ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น SJ-400 ใช้สำหรับวัดค่าความขรุขระผิวชิ้นงานที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 22 เครื่องวัดความขรุขระผิวชิ้นงาน

8. เครื่องไมโครสโคป (Microscope) ยี่ห้อKeyence รุ่น VHX 600 ใช้วัดขนาดของเศษโลหะ



รูปที่ 23 เครื่องไมโครสโคป

9. เครื่องวัดอุณหภูมิแบบไม่สัมผัส (Infrared Pyrometer) ยี่ห้อ Raytek รุ่น RAYFA2BCF13 ใช้วัดอุณหภูมิขณะทำการทดลอง

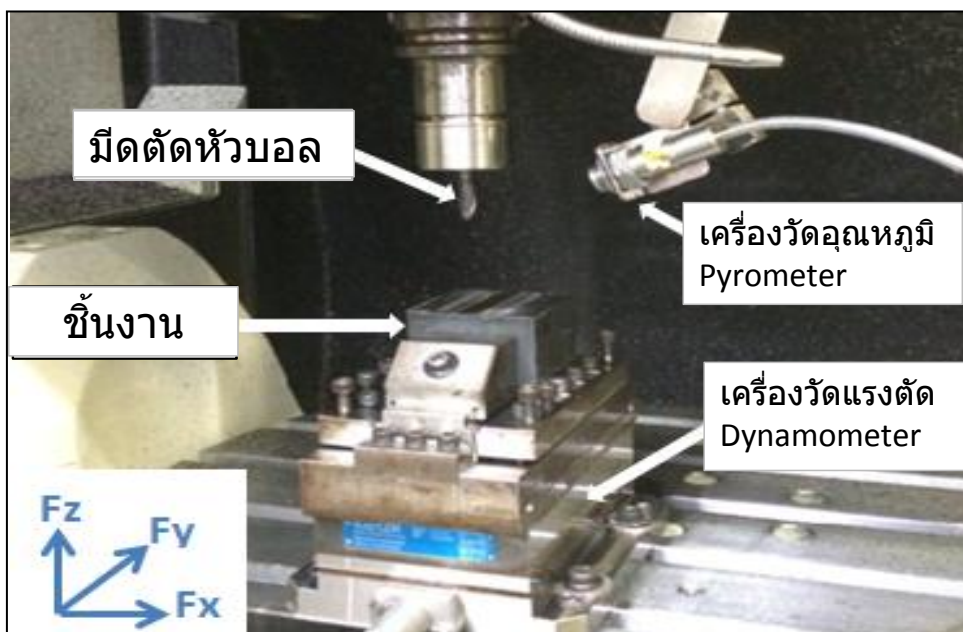


รูปที่ 24 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบไม่สัมผัส



### 3.4 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

#### 1) การติดตั้งเซนเซอร์ที่ใช้วัดแรง และเซนเซอร์ที่วัดอุณหภูมิ



รูปที่ 25 การติดตั้งเซนเซอร์วัดแรง และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ

#### 1.1) การทำการติดตั้งเซนเซอร์วัดแรง Dynamometer

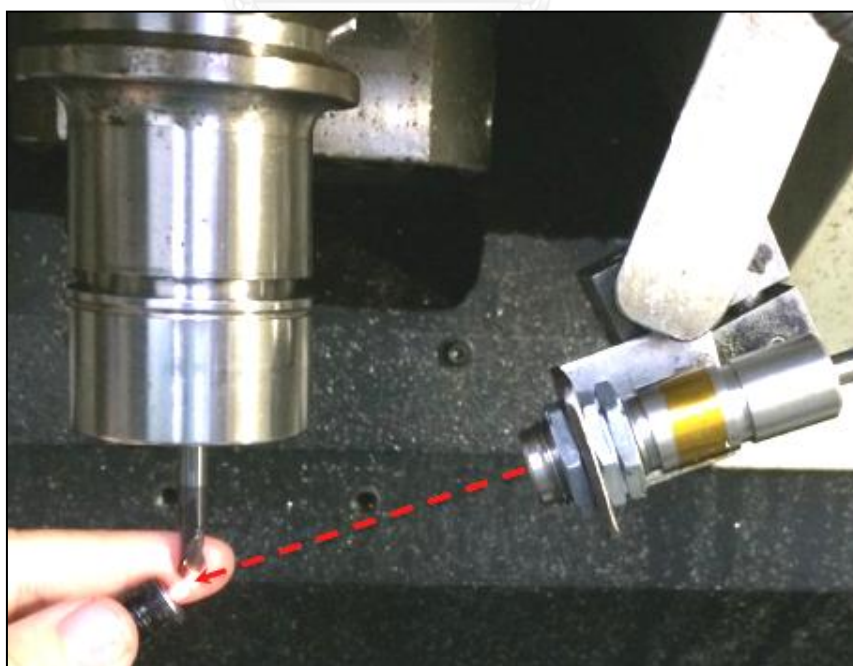
- ทำการติดตั้งเซนเซอร์วัดแรงเข้ากับชุดจับยึดชิ้นงานบนแท่นวางชิ้นงานในเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ 5 แกน
- ทำการเชื่อมต่อสายเซนเซอร์วัดแรงตัดกับเครื่องขยายสัญญาณ Charge Amplifier เพื่อใช้ขยายสัญญาณของแรงตัดในขณะที่ทำการตัด แล้วต่อสายเครื่องขยายสัญญาณกับเครื่องออสซิลอสโคป
- ทำการติดตั้งมิดดัดหั่วบอลเข้ากับหัวจับยึด แล้วนำไปใส่เข้ากับชุดจับยึดในเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ 5 แกน
- ทำการปรับตั้งค่าบนเครื่องออสซิลอสโคป โดยกำหนดให้
  - Low-Pass Filter : 500 kHz
  - Sampling Rate : 1 ks/s



รูปที่ 26 การติดตั้งเครื่องออสซิลโคสโคปกับเครื่องขยายสัญญาณ

### 1.2 การติดตั้งเซนเซอร์ที่ใช้วัดอุณหภูมิ Infrared Pyrometer

- ทำการติดตั้งเครื่องวัดอุณหภูมิ โดยยึดหัววัดอุณหภูมิด้วยจิ๊กที่ถูกยึดด้วยน็อตหกเหลี่ยม
- ทำการจัดตำแหน่งปรับตั้งระยะโฟกัสของเซนเซอร์วัดอุณหภูมิให้ได้ค่าระยะโฟกัสประมาณ 102 มิลลิเมตรกับมีดตัดหัวบอล



รูปที่ 27 การปรับตั้งระยะโฟกัส

- ทำการต่อเชื่อมสายวัดอุณหภูมิเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์



รูปที่ 28 การต่อเชื่อมสายวัดอุณหภูมิเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์

- 1.2) การเตรียมชิ้นงาน โดยนำเหล็กกล้าคาร์บอนทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์วางบนแท่น  
ในเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ 5 แกน
- 1.3) ทำการปรับตั้งมิดตัดหัวบอลเข้ากับหัวจับยึด
- 1.4) ทำการปรับค่าโปรแกรมตามเงื่อนไขการทดลองบนเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์
- 1.5) ทำการบันทึกค่าแรงตัด และอุณหภูมิในขณะที่ตัดที่ละเงื่อนไข
- 1.6) นำชิ้นงานที่ถูกตัดเสร็จเรียบร้อยแล้วตามเงื่อนไขการตัดที่กำหนดออกจากเครื่องซีเอ็นซีแมชชีน  
นิ่งเซ็นเตอร์ 5 แกน มาความวัดขนาดและผิวบนชิ้นงาน
- 1.7) บันทึกค่าผลการทดลองต่างๆลงในตารางที่ 5



รูปที่ 29 การติดตั้งชิ้นงาน

### 3.5 การออกแบบการทดลอง

ในงานวิจัยนี้จะมีโปรแกรมคอมพิวเตอร์ชื่อ Minitab ที่นำมาช่วยออกแบบการทดลอง เพื่อสร้างตารางรูปแบบการทดลอง โดยลำดับการทดลองแบบสุ่มทำให้การทดลองที่เกิดขึ้นไม่เป็นแบบลำดับ จะได้มีความมีความเป็นอิสระ (Independent) ต่อกัน ปัจจัยที่ถูกกำหนดมาในการทดลองนี้จะแบ่งออกทั้งหมดเป็น 4 ปัจจัย ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกกัด และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดตัดหัวบอล ในแต่ละปัจจัยนั้นจะประกอบด้วย 3 ระดับ ได้แก่ ต่ำ กลาง สูง หรือแสดงเป็นรหัสคือ -1, 0 และ 1 ตามลำดับ ดังแสดงตามตารางที่ 4 โดยเป็นวิธีการออกแบบการทดลองบล็อกซ์-เบห์นเคน จะทำให้มีรูปแบบการทดลองทั้งหมดจำนวน 27 การทดลอง สำหรับ 1 เรพลิเคต แสดงดังตารางที่ 4 ดังนี้

ตารางที่ 4 ระดับของแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัยการตัด	หน่วย	ระดับของปัจจัย			กำหนดตัวแปร
		ต่ำ	กลาง	สูง	
		(-1)	(0)	(+1)	
ความเร็วตัด (v)	(เมตรต่อนาที)	8000	10000	12000	$X_1$
อัตราป้อนตัด (f)	(มิลลิเมตรต่อรอบ)	0.02	0.04	0.06	$X_2$
ความลึกกัด (d)	(มิลลิเมตร)	0.5	0.7	0.9	$X_3$
ขนาดมีดตัด (D)	(มิลลิเมตร)	6	8	10	$X_4$

ตารางที่ 5 รูปแบบการออกแบบการทดลองบล็อกซ์-เบห์นเคนน 4 ปัจจัย

Std Order	Run Order	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
22	1	10000	0.06	0.7	6
23	2	10000	0.02	0.7	10
14	3	10000	0.06	0.5	8
21	4	10000	0.02	0.7	6
7	5	10000	0.04	0.5	10
1	6	8000	0.02	0.7	8
6	7	10000	0.04	0.9	6
27	8	10000	0.04	0.7	8
11	9	8000	0.04	0.7	10
2	10	12000	0.02	0.7	8
18	11	12000	0.04	0.5	8
13	12	10000	0.02	0.5	8
8	13	10000	0.04	0.9	10
16	14	10000	0.02	0.9	8
4	15	8000	0.04	0.5	8
3	16	10000	0.04	0.7	8
15	17	12000	0.04	0.7	10
17	18	12000	0.04	0.9	8
25	19	8000	0.04	0.9	8
12	20	10000	0.06	0.7	10
20	21	10000	0.04	0.7	8
19	22	10000	0.04	0.5	6
24	23	12000	0.04	0.7	6
26	24	8000	0.04	0.7	6
5	25	8000	0.06	0.7	8
10	26	10000	0.02	0.9	8
9	27	8000	0.06	0.7	8

### 3.6 การเก็บรวบรวมข้อมูล

#### 3.6.1 ความขรุขระผิวหรือความเรียบผิว

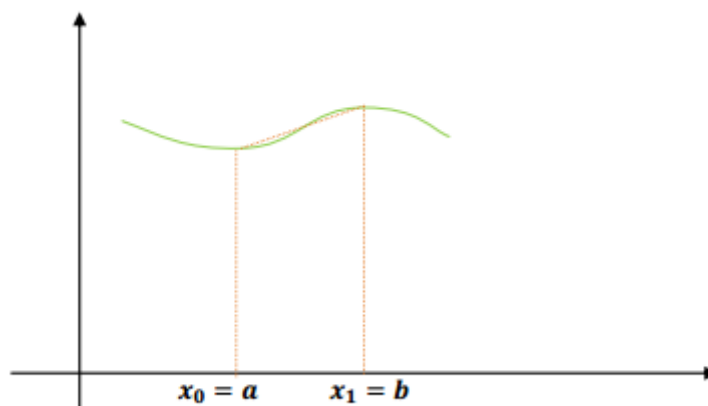
หลังจากที่ทำการทดลองโดยการตัดชิ้นงานเสร็จสิ้นตามเงื่อนไขการตัดในตารางที่ถูกออกแบบการทดลองเรียบร้อยแล้ว จากนั้นให้นำชิ้นงานนั้นมาทำการวัดความขรุขระผิวด้วยเครื่องวัดความขรุขระผิวแล้วบันทึกค่าลงในตารางการเก็บข้อมูลที่ 6 และทำการปรับตั้งค่าช่วงความยาวที่ถูกจำกัด หรือ Cut off length ของเครื่องวัดความขรุขระผิวให้ได้ค่า 2.5 มิลลิเมตร

#### 3.6.2 แรงที่ใช้ในการตัด

สำหรับค่าแรงในการตัดที่ได้จากผลการทดลองจะออกมาอยู่ในรูปของหน่วยโวลต์ เราจึงต้องแปลงหน่วย ตามค่า Sensitivity ดังนี้

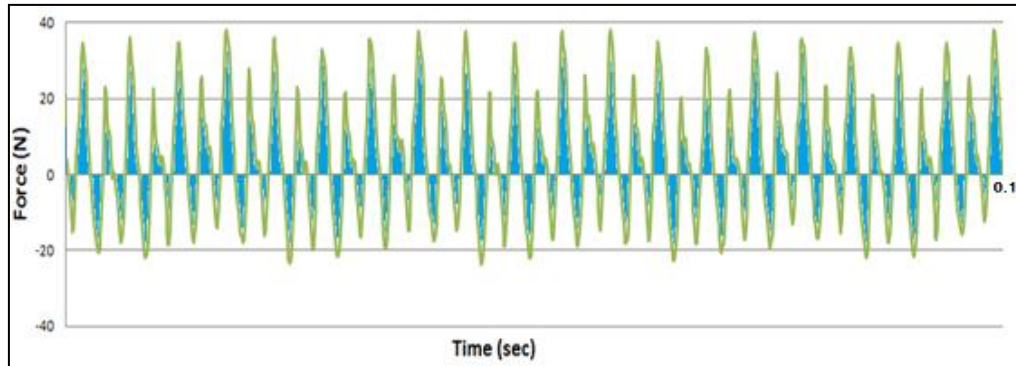
- แรงที่ใช้ตัดในแนวทิศทางแกน X ( $F_x$  (N)) เท่ากับ  $V_x$  (Volt) x 200 (N/Volt)
- แรงที่ใช้ตัดในแนวทิศทางแกน Y ( $F_y$  (N)) เท่ากับ  $V_y$  (Volt) x 200 (N/Volt)
- แรงที่ใช้ตัดในแนวทิศทางแกน Z ( $F_z$  (N)) เท่ากับ  $V_z$  (Volt) x 200 (N/Volt)

จากผลการทดลอง งานวิจัยนี้จะใช้การวิเคราะห์โดยใช้พื้นที่ใต้กราฟของแรงตัดพลวัตในโดเมนเวลาด้วยกฎสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal rule) ซึ่งแสดงตามสมการที่ 4.3



รูปที่ 30 การหาค่าด้วยวิธีพื้นที่ด้วยกฎสี่เหลี่ยมคางหมู

$$\frac{1}{2} d (f(a) + 2f(x_1) + 2f(x_2) + \dots + 2f(x_{n-1}) + f(b)) \quad (4.3)$$

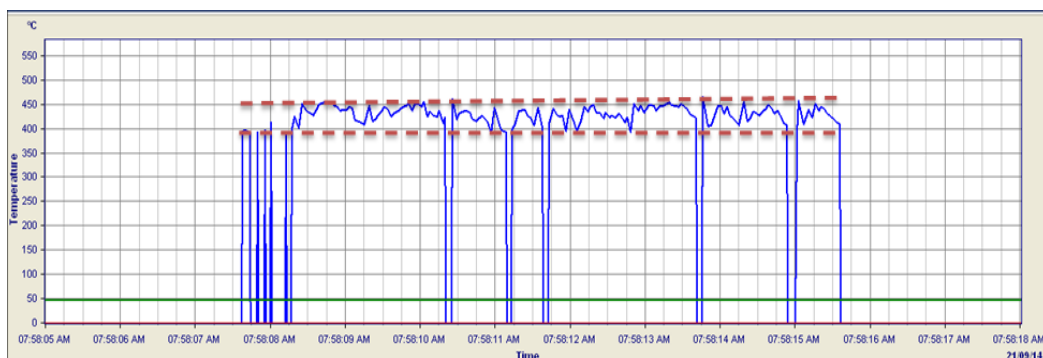


รูปที่ 31 ตัวอย่างการคำนวณแรงตัดพลวัต  $F_x$  จากเงื่อนไขการตัดที่ 12000\_0.06\_0.9\_6

เนื่องจากขนาดของแรงตัดพลวัตนั้นจะเปลี่ยนแปลงตามเงื่อนไขการตัดที่ถูกเลือกใช้ เมื่อนำพื้นที่ใต้กราฟของแรงตัดพลวัตทั้งแรงในแนวทิศทางการป้อน ( $F_x$ ) แรงในแนวตั้งฉากกับชิ้นงาน ( $F_z$ ) ที่เกิดขึ้นมาหารกันเป็นอัตราส่วน ( $F_x/F_z$ ) และนำค่าที่ได้ไปใช้เป็นตัวแปรในการสร้างสมการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิว จะทำให้สมการที่สร้างขึ้น สามารถใช้ได้ในทุกกรณีโดยไม่คำนึงถึงอิทธิพลของเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไป

### 3.6.3 อุณหภูมิตัด

ข้อมูลที่เก็บได้จากการทดลองมีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส ( $^{\circ}\text{C}$ ) โดยอุณหภูมิทั้งหมดจะนำมาหาค่าเฉลี่ยกัน แล้วบันทึกผลลงตารางที่ 6



รูปที่ 32 ตัวอย่างการคำนวณอุณหภูมิจากเงื่อนไขการตัดที่ 12000\_0.06\_0.7\_8

ตารางที่ 6 ตารางการเก็บข้อมูลในการทดลอง

Run Order	Std Order	Cutting speed	Feed rate	Depth of cut	Tool Diameter	Fx/Fz	Temp. (°C)	Ra (μm)	Rz (μm)
1	22	10000	0.06	0.7	6				
2	23	10000	0.02	0.7	10				
3	14	10000	0.06	0.5	8				
4	21	10000	0.02	0.7	6				
5	7	10000	0.04	0.5	10				
6	1	8000	0.02	0.7	8				
7	6	10000	0.04	0.9	6				
8	27	10000	0.04	0.7	8				
9	11	8000	0.04	0.7	10				
10	2	12000	0.02	0.7	8				
11	18	12000	0.04	0.5	8				
12	13	10000	0.02	0.5	8				
13	8	10000	0.04	0.9	10				
14	16	10000	0.06	0.9	8				



ตารางที่ 6 ตารางการเก็บข้อมูลในการทดลอง (ต่อ)

Run Order	Std Order	Cuttin g speed	Fee d rate	Dept h of cut	Tool Diamet er	Fx/F z	Tem p. (°C)	Ra ( $\mu$ m )	Rz ( $\mu$ m )
15	4	8000	0.06	0.7	8				
16	3	10000	0.02	0.9	8				
17	15	8000	0.04	0.5	8				
18	17	10000	0.04	0.7	8				
19	25	12000	0.04	0.7	10				
20	12	12000	0.04	0.9	8				
21	20	8000	0.04	0.9	8				
22	19	10000	0.06	0.7	10				
23	24	10000	0.04	0.7	8				
24	26	10000	0.04	0.5	6				
25	5	12000	0.04	0.7	6				
26	10	8000	0.04	0.7	6				
27	9	8000	0.06	0.7	8				

### 3.7 การวิเคราะห์ข้อมูล

#### 3.7.1 โปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลการทดลอง

การวิเคราะห์ข้อมูลในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ชื่อ Minitab มาใช้เพื่อช่วยในการประมวลผล โดยใช้วิธีพื้นผิวผลตอบสนองด้วยการออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน ด้วยเหตุผลจากที่โปรแกรมนี้สามารถใช้วิเคราะห์ตามเงื่อนไขที่กำหนดได้อย่างเหมาะสม และมีการใช้อย่างแพร่หลายในงานวิจัยต่างๆ

#### 3.7.2 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองเพื่อใช้ในการออกแบบรูปแบบการทดลอง

การวิเคราะห์ข้อมูลจะใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน หรือ ANOVA เพื่อพิจารณาตัวสถิติที่ใช้ในการทดสอบตามเงื่อนไขการตัดต่างๆ ด้วยระดับนัยสำคัญที่ยอมรับได้ โดยทำการทดสอบที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% กำหนดค่า P-Value เท่ากับ 0.05 เมื่อคำนวณค่าจากสมการที่ถูกพัฒนามามีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าปัจจัยที่ถูกเลือกนำมาใช้นั้นมีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ แล้วนำข้อมูลมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-square) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจปรับค่า (Adjusted R-squared) มาเปรียบเทียบกัน ถ้าค่าทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกันและมีค่ามาก แสดงว่าตัวแปรที่ใช้ในสมการนั้นมีความเหมาะสม จากนั้นจึงนำมาทดสอบสัมประสิทธิ์โดยตั้งสมมติฐาน ดังนี้

$$H_0 : \beta_i = 0 \text{ ของพารามิเตอร์ทุกตัว}$$

$$H_1 : \beta_i \neq 0 \text{ อย่างน้อยมี 1 พารามิเตอร์}$$

ถ้าทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ปัจจัยแล้วมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าปัจจัยนั้นส่งผลตอบอย่างมีนัยสำคัญต่อสมการที่ถูกพัฒนามา

#### 3.7.3 การตรวจสอบค่าความเพียงพอของแบบจำลอง

ในการทำการสรุปผลการวิเคราะห์ผลการทดลองนั้นต้องทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง โดยเริ่มจากการตรวจสอบคุณสมบัติของข้อมูลจากผลการทดลองที่ทำการทดสอบนั้นมีความถูกต้องตามเงื่อนไขที่ทำการออกแบบการทดลอง หรือ  $NID(0, \sigma^2)$  หรือไม่ ถึงจะสรุปผลการวิเคราะห์ของการทดลองนั้นได้อย่างสมบูรณ์แบบ จากการทดสอบข้อกำหนดเกี่ยวกับส่วนตกค้าง (Residual) ซึ่งได้แก่ การแจกแจงแบบปกติ ความเป็นอิสระของข้อมูล และความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน

### 3.6.3.1 การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ

การทดสอบของสมมติฐานการแจกแจงปกตินั้นจะใช้การพิจารณาจากการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างของตัวแปรผลตอบแต่ละตัวว่ามีแนวโน้มเป็นอย่างไร มีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่สามารถทำได้โดยการนำส่วนตกค้างมาสร้าง Normal Probability Plot ในพิจารณาจากการกระจายตัว โดยแนวโน้มของการกระจายตัวนั้นต้องเป็นแนวโน้มเส้นตรงจึงสามารถบอกได้ว่าเป็นการแจกแจงปกติ

### 3.6.3.2 การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระของข้อมูล

การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระของข้อมูล จะพิจารณาตรวจสอบทิศทางและแนวโน้มของส่วนตกค้างของตัวแปรผลตอบแต่ละตัวว่ามีความเกี่ยวข้องกันหรือไม่ โดยการพล็อตข้อมูลส่วนตกค้างกับลำดับเวลาในการเก็บข้อมูล ซึ่งของค่าส่วนตกค้างนั้นจะต้องไม่มีแนวโน้มไปในทิศทางเพิ่มขึ้น ลดลง หรือมีการเปลี่ยนแปลงเป็นรอบ จึงสามารถบอกได้ว่าข้อมูลนั้นๆมีความเป็นอิสระต่อกัน

### 3.6.3.3 การทดสอบความมีเสถียรภาพของความแปรปรวน

การทดสอบความมีเสถียรภาพของความแปรปรวน จะใช้ในการตรวจสอบความสม่ำเสมอของการกระจายส่วนตกค้างของข้อมูลกับค่าที่ถูกฟิตขึ้นมา ซึ่งจะพิจารณาจากแนวโน้มการกระจายตัวของข้อมูลที่ถูกล็อตว่าต้องไม่มีลักษณะหรือรูปแบบที่เป็นรอบ แนวโน้ม ทิศทางไม่มีแน่นอน หรือมีการกระจายตัวที่มีเป็นแบบกรวยปากเปิด ทำให้สามารถบ่งชี้ได้ว่าข้อมูลที่นำมาตรวจสอบนั้นมีความเสถียรภาพของความแปรปรวน

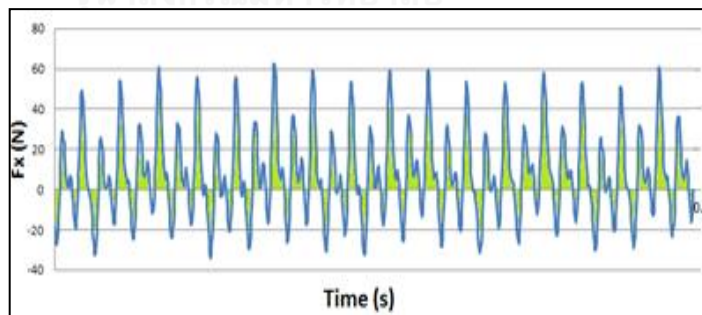
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลองตามรูปแบบตารางที่ถูกออกแบบไปแล้วข้างต้น โดยผลการทดลองที่จะทำการเก็บข้อมูลมาเพื่อทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระที่มีต่อตัวแปรผลตอบสนอง ประกอบด้วยตัวแปรอิสระ ประกอบด้วย ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด และขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดตัดหัวบอล ส่วนตัวแปรผลตอบสนองนั้นจะประกอบด้วย ความขรุขระผิว อัตราส่วนแรงในการตัด และอุณหภูมิในการตัด ซึ่งการวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อพัฒนาเป็นสมการแบบจำลองในการหาค่าที่ใช้ในการพยากรณ์ความขรุขระผิว อัตราส่วนแรงในการตัด และอุณหภูมิในการตัด อีกทั้งในการหาเงื่อนไขการตัดที่ดีที่สุดและเหมาะสมที่สุดที่ถูกวิเคราะห์ด้วยความสัมพันธ์ของค่าความขรุขระผิวที่เกิดจากผลในการทดลอง ของการวิเคราะห์ผลตอบและความสัมพันธ์ของความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย การวิเคราะห์ผลตอบอัตราส่วนแรงในตัด การวิเคราะห์ผลตอบอุณหภูมิในตัด และสุดท้ายการทดสอบเพื่อที่จะใช้ยืนยันผลการทดลอง

#### 4.1 การบันทึกผลแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้น

จากผลการทดลองนั้นจะทำการวิเคราะห์แรงตัดพลวัตซึ่งจะบันทึกค่าแรงตัดในขณะที่มีดกัดกินเนื้อวัสดุโดยอาศัยหลักการของการหาพื้นที่ใต้กราฟด้วยกฎสี่เหลี่ยมคางหมู ดังตัวอย่างนี้



รูปที่ 33 ตัวอย่างการหาพื้นที่ใต้กราฟของแรงตัดในทิศทางการป้อนตัดแกน X ที่

10000\_0.06\_0.7\_6

โดยมีสูตรคำนวณพื้นที่ดังนี้

กำหนดให้  $X_0$  คือ ค่าที่เริ่มต้นของสี่เหลี่ยมคางหมูในแนวแกน x แทนด้วย a

และ  $X_1$  คือ ค่าที่สิ้นสุดของสี่เหลี่ยมคางหมูในแนวแกน x แทนด้วย b

$$\int_a^b \{f[x_0] + f[x_0, x_1](x - x_0)\} dx = \left[ f[a]x + \frac{f[a, b]}{2}(x - a)^2 \right]_a^b \quad (4.1)$$

แต่จากการที่เงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไปจะส่งผลต่อขนาดของแรงตัดพลวัตด้วย ดังนั้น จึงต้องนำค่าของพื้นที่ใต้กราฟทั้งแรงตัดในทิศทางกรบ่อนตัด และในทิศทางแนวตั้งฉากกับชิ้นงาน ทำเป็นอัตราส่วนโดยการนำมาหารกัน ( $F_x/F_z$ ) แล้วจึงนำตัวแปรที่คำนวณได้มาพัฒนาเป็นสมการการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิว เพื่อให้สามารถนำมาใช้ได้โดยไม่ต้องพิจารณาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขในการตัด

## 4.2 ผลการทดลอง

จากการดำเนินการทดลองตามรูปแบบแผนการทดลองจนกระทั่งเสร็จสิ้นเรียบร้อยแล้ว ข้อมูลจากผลของตัวแปรผลตอบในการทดลองนั้นจะถูกรวบรวมไว้ดังตารางที่เคยออกแบบไว้ที่บทที่ 3 และผลการทดลองทั้งหมดจะแสดงตามภาคผนวก ก โดยข้อมูลที่เก็บมานั้นจะถูกแปลงค่าเป็นข้อมูลที่สามารถใช้วิเคราะห์ผลได้ทันที ซึ่งค่าของความขรุขระผิวเฉลี่ย ( $R_a$ ) และค่าความขรุขระผิวสูงสุด ( $R_z$ ) นั้นอยู่ในรูปของค่าเฉลี่ย แรงในการตัดแต่ละแกน คือ แรงตัดในแนวรัศมี ( $F_x$ ) แรงบ่อนตัด ( $F_y$ ) และแรงตัดหลัก ( $F_z$ ) ได้จากการหาพื้นที่ใต้กราฟของแรงตัดพลวัต โดยการประมาณค่าด้วยกฎสี่เหลี่ยมคางหมู และนำค่าพื้นที่ใต้กราฟของแรงตัดในแนวรัศมี ( $F_x$ )และแรงตัดหลัก ( $F_z$ ) มาทำการหารกัน จะได้อัตราส่วนแรงตัด  $F_x/F_z$  ส่วนของอุณหภูมิตัด ( $T$ ) นั้นเกิดจากการหาค่าเฉลี่ยของข้อมูลอุณหภูมิทั้งหมด ซึ่งข้อมูลตัวแปรผลตอบจะใช้สำหรับใช้ในการวิเคราะห์ผลจะถูกบันทึกลงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ตารางบันทึกผลการทดลองแบบบล็อกซ์-เป็นแกน 4 ปัจจัย

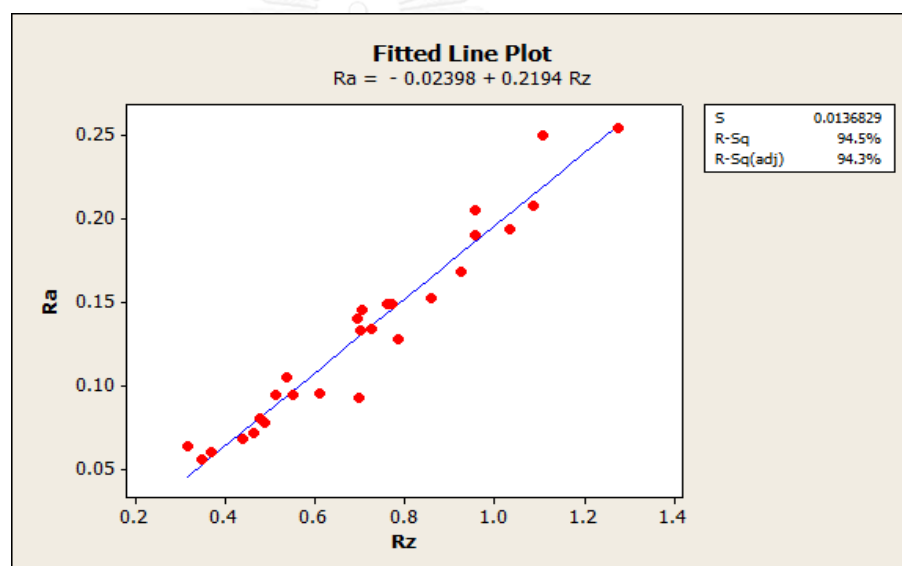
Std Order	Run Order	Cutting speed	Feed rate	Depth of cut	Tool Diameter	$F_x/F_z$	Temp. (°C)	$R_a$ (μm)	$R_z$ (μm)
1	22	10000	0.06	0.7	6	3.0426	434.167	0.145	0.707
2	23	10000	0.02	0.7	10	2.0312	403.000	0.08	0.478
3	14	10000	0.06	0.5	8	2.4250	412.082	0.094	0.552
4	21	10000	0.02	0.7	6	1.9066	428.400	0.068	0.439
5	7	10000	0.04	0.5	10	2.4666	389.600	0.105	0.538

ตารางที่ 7 ตารางบันทึกผลการทดลองแบบบล็อกซ์-เป็นแกน 4 ปัจจัย (ต่อ)

Std Order	Run Order	Cutting speed	Feed rate	Depth of cut	Tool Diameter	Fx/Fz	Temp. (°C)	Ra (μm)	Rz (μm)
6	1	8000	0.02	0.7	8	1.4683	390.143	0.056	0.317
7	6	10000	0.04	0.9	6	3.2018	446.167	0.168	0.927
8	27	10000	0.04	0.7	8	2.8250	401.250	0.108	0.608
9	11	8000	0.04	0.7	10	2.9232	386.200	0.133	0.703
10	2	12000	0.02	0.7	8	2.1179	426.137	0.078	0.489
11	18	12000	0.04	0.5	8	2.7124	416.471	0.094	0.513
12	13	10000	0.02	0.5	8	1.5575	398.000	0.051	0.371
13	8	10000	0.04	0.9	10	3.6841	408.200	0.208	1.087
14	16	10000	0.06	0.9	8	4.1713	425.344	0.254	1.275
15	4	12000	0.06	0.7	8	3.5833	430.513	0.194	1.035
16	3	8000	0.06	0.7	8	2.9729	398.000	0.134	0.480
17	15	10000	0.02	0.9	8	2.3639	409.000	0.081	0.658
18	17	8000	0.04	0.5	8	1.8686	378.667	0.064	0.347
19	25	10000	0.04	0.7	8	2.8250	400.700	0.108	0.604
20	12	12000	0.04	0.7	10	3.5824	408.500	0.19	0.958
21	20	12000	0.04	0.9	8	4.1207	419.031	0.205	0.956
22	19	8000	0.04	0.9	8	2.9980	392.286	0.14	0.860
23	24	10000	0.06	0.7	10	3.9696	406.875	0.25	1.108
24	26	10000	0.04	0.7	8	2.8250	404.250	0.108	0.595
25	5	10000	0.04	0.5	6	1.9219	396.400	0.072	0.465
26	10	12000	0.04	0.7	6	3.6425	437.450	0.128	0.785
27	9	8000	0.04	0.7	6	2.8510	411.125	0.095	0.838

### 4.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าความขรุขระผิว

ในการทดลองมีตัวแปรผลตอบของค่าความขรุขระผิวอยู่ 2 ค่า ได้แก่ ความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra) และความขรุขระผิวสูงสุด (Rz) แสดงในกราฟที่ 34 ซึ่งการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของผลตอบทั้งสอง นั้นจะพิจารณาจากการวิเคราะห์ของค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Sq) ถ้าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ได้นั้นมีค่าสูง จะแสดงให้เห็นว่าค่าของความขรุขระผิวเฉลี่ย และความขรุขระผิวสูงสุดนั้นมีความสัมพันธ์กัน สามารถวิเคราะห์ค่าตัวแปรผลตอบตัวใดตัวหนึ่งแทนได้ เพราะตัวแปรผลตอบอีกตัว จะสามารถให้ผลการวิเคราะห์ไปในทิศทางแนวเดียวกัน แต่ถ้าเกิดว่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ได้นั้นมีค่าต่ำ ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยและความขรุขระผิวสูงสุดนั้นจะไม่มีความสัมพันธ์กัน จึงต้องทำการวิเคราะห์ผลตอบของทั้งสองค่า



รูปที่ 34 กราฟความสัมพันธ์ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยกับความขรุขระผิวสูงสุด

จากรูปที่ 34 จะเห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra) และความขรุขระผิวสูงสุด (Rz) มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจแบบปรับค่า R-Sq (adj) อยู่ที่ 94.3% แสดงให้เห็นว่าความขรุขระผิวเฉลี่ยและความขรุขระผิวสูงสุดนั้นมีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกัน อาจจะกล่าวได้ว่าค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยมีการแนวโน้มและทิศทางการเปลี่ยนไปทางใด ค่าความขรุขระผิวสูงสุดก็จะเปลี่ยนไปทิศทางในแนวโน้มเดียวกันกับค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย หรือไม่ว่าค่าความขรุขระผิวสูงสุดจะเปลี่ยนไปทิศทางไหน ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยนั้นก็จะเป็นไปในทิศทางแนวทางเดียวกันเช่นกัน จึงสามารถทำ

การตรวจสอบค่าตัวแปรผลตอบเพียงตัวเดียวมาทำการวิเคราะห์แทนได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกความชรุขระผิวเฉลี่ย ( $R_a$ ) มาใช้วิเคราะห์ค่าความชรุขระผิวในการทดลอง

#### 4.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

##### 4.4.1 การวิเคราะห์ผลการทดลองของความชรุขระผิวเฉลี่ย ( $R_a$ )

จากผลการทดลองตารางที่ 8 นั้นจะใช้ความสัมพันธ์อันดับสอง (Second-Order Model) ในการประมาณพื้นผิวผลตอบสนองสำหรับความชรุขระผิวเฉลี่ย ( $R_a$ ) ดังนี้

$$R_a = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_1^2 + \beta_6 X_2^2 + \beta_7 X_3^2 + \beta_8 X_4^2 + \beta_9 X_1 X_2 + \beta_{10} X_1 X_3 + \beta_{11} X_1 X_4 + \beta_{12} X_2 X_3 + \beta_{13} X_2 X_4 + \beta_{14} X_3 X_4 \quad (4.2)$$

กำหนดให้  $\beta$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์ และให้  $X_1, X_2, X_3$  และ  $X_4$  เป็นตัวแปรอิสระของแต่ละปัจจัยที่ถูกเข้ารหัสแทนด้วยปัจจัยต่างๆ คือ ความเร็วตัด ( $X_1$ ) อัตราป้อนตัด ( $X_2$ ) ความลึกตัด ( $X_3$ ) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดตัดหัวบอล ( $X_4$ )

ตัวแปรอิสระ หรือปัจจัย ทั้ง 4 นั้นจะอยู่ในรูปของตัวแปรที่ถูกเข้ารหัสมาทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์สมการการถดถอย เพื่อทำการหาค่าประมาณสัมประสิทธิ์ของพารามิเตอร์แบบจำลองสมการการถดถอยที่ถูกพัฒนาขึ้นได้ ดังตารางที่ 8



ตารางที่ 8 ค่าประมาณสัมประสิทธิ์การวิเคราะห์การถดถอยของความขรุขระผิวเฉลี่ย

Response Surface Regression: Ra versus V, f, d, D				
The analysis was done using coded units.				
Estimated Regression Coefficients for Ra				
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.146000	0.005000	29.201	0.000
V	0.021250	0.002500	8.500	0.000
f	0.053000	0.002500	21.201	0.000
d	0.049250	0.002500	19.701	0.000
D	0.024167	0.002500	9.667	0.000
V*V	-0.012625	0.003750	-3.367	0.006
f*f	-0.014750	0.003750	-3.934	0.002
d*d	-0.006875	0.003750	-1.833	0.092
D*D	0.002250	0.003750	0.600	0.560
V*f	0.009500	0.004330	2.194	0.049
V*d	0.005750	0.004330	1.328	0.209
V*D	0.006000	0.004330	1.386	0.191
f*d	0.031750	0.004330	7.333	0.000
f*D	0.023250	0.004330	5.370	0.000
d*D	0.001750	0.004330	0.404	0.693
S = 0.00865985 PRESS = 0.00499398				
R-Sq = 98.94% R-Sq(pred) = 94.13% R-Sq(adj) = 97.71%				

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าค่าประมาณสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระหรือปัจจัยต่างๆ สามารถนำมาพัฒนาเป็นสมการแบบจำลองสำหรับพยากรณ์ความขรุขระผิวเฉลี่ย Ra โดยการอ้างอิงการวิเคราะห์การถดถอย คือ

$$\begin{aligned}
 R_s = & 0.146 + 0.02125v + 0.05300f + 0.04925d + 0.024167D - 0.012625v^2 - 0.01475f^2 \\
 & - 0.006875d^2 + 0.00225D^2 + 0.0095vf + 0.00575vd + 0.006vD + 0.03175fd \\
 & + 0.02325fD + 0.00175dD
 \end{aligned}
 \tag{4.3}$$

ตารางที่ 8 ทำการแสดงค่าสถิติ T ที่ใช้ในการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ในสมการการถดถอยรายตัว จะพบว่า เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Sq) นั้นมีค่าเท่ากับ 98.94% สามารถบ่งบอกได้ว่าค่าความแปรปรวนที่อธิบายไม่ได้ด้วยสมการนั้นมีแค่เพียง 1.16% แต่เนื่องจากยังมีบางปัจจัยซึ่งอาจจะส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความขรุขระผิวเฉลี่ยของชิ้นงาน แรงในการตัด และอุณหภูมิที่ใช้ในการตัด อย่างไม่อย่างหนึ่ง หรืออาจจะส่งผลกับทั้ง 3 ผลตอบ ทำให้ต้องทำการพิจารณาทุกๆ ปัจจัยของแต่ละความสัมพันธ์

สมการการพยากรณ์ของความขรุขระผิวเฉลี่ยที่ 4.3 ที่ถูกพัฒนาขึ้นมา จะสามารถบ่งบอกได้ว่าพารามิเตอร์แต่ละตัวนั้นมีค่าสัมประสิทธิ์เป็นอย่างไร โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ของพารามิเตอร์แต่ละตัวนั้นบอกได้ทั้งขนาด ทิศทางและแนวโน้มในการส่งผลต่อค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยที่เกิดขึ้นของพารามิเตอร์นั้นๆ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละปัจจัยที่มีค่าเป็นด้านบวก แสดงว่าปัจจัยนั้นๆจะส่งผลต่อความขรุขระผิวเฉลี่ยในรูปแบบแปรผันตรง ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยไหนมีค่าเป็นลบ จะสามารถบอกได้ว่าปัจจัยนั้นๆจะส่งผลต่อความขรุขระผิวเฉลี่ยในรูปแบบที่เป็นการแปรผกผัน ซึ่งค่าสัมบูรณ์ของค่าสัมประสิทธิ์แต่ละพารามิเตอร์นั้น ทำให้สามารถรู้ถึงปริมาณในการส่งผลต่อค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย โดยถ้าพารามิเตอร์ไหนมีค่าสัมบูรณ์มากแล้ว ก็จะทำให้ส่งผลต่อค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยที่เพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งเป็นตามหลักการทดสอบทางสถิติในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ว่าแต่ละตัวนั้นมีผลอย่างมีนัยสำคัญ โดยที่ค่าพารามิเตอร์ที่มีค่าสัมบูรณ์ของค่าสัมประสิทธิ์ที่น้อย จะบ่งบอกถึงว่าพารามิเตอร์นั้นๆส่งผลต่อความขรุขระผิวเฉลี่ยนี้หรือไม่มีการส่งผลต่อค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญในการทดสอบทางสถิติ ซึ่งสมการที่ 4.2 จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์ของความเร็วในการตัดนั้นมีค่าเป็นบวก สามารถอธิบายได้ว่าเพิ่มความเร็วดัดขึ้นแล้วค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยนั้นก็จะมีแนวโน้มที่มากขึ้น ด้วยสาเหตุจากความเร็วในตัดสูงนั้นมีผลทำให้อุณหภูมิในขณะตัดสูงมากขึ้น ที่ผิวสัมผัสของชิ้นงานมีการเสียดสีและมีการสั่นสะเทือนอย่างรวดเร็ว จึงทำให้ความขรุขระผิวเฉลี่ยเพิ่มมากขึ้น จากสมการที่ 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการป้อนตัดนั้นก็มีค่าเป็นบวก อธิบายได้ว่าอัตราการป้อนตัดที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าของความขรุขระผิวเฉลี่ยนั้นเพิ่มมากขึ้นตาม ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ของความลึกตัดก็เป็นบวก อธิบายได้ว่าความลึกตัดที่เพิ่มมากขึ้น ความขรุขระผิวเฉลี่ยนั้นจะเพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน ผลจากความลึกตัดที่เพิ่มมากขึ้นนั้น ทำให้พื้นที่ผิวหน้าสัมผัสระหว่างเนื้อวัสดุของชิ้นงานและเม็ดตัดหัวบอลนั้นมีมากขึ้น จึงทำให้เกิดการกินเนื้อวัสดุมากขึ้น พื้นที่สัมผัสที่มาก มีผลให้ความขรุขระผิวมากขึ้น และค่าสัมประสิทธิ์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเม็ดตัดหัวบอลมีค่าเป็นบวก ก็จะอธิบายได้ไปในแนวเดียวกันที่ว่าเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเม็ดตัดหัวบอลมีขนาดใหญ่มากขึ้นก็จะส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยเพิ่มมากขึ้น และค่าสัมบูรณ์ของค่าสัมประสิทธิ์แต่ละพารามิเตอร์นั้น แสดงให้เห็นถึงปริมาณที่ส่งผล โดยอัตราการป้อนตัดนั้นส่งผลต่อค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยมากที่สุดตามลำดับ

เมื่อได้สมการที่จะมาใช้ในการประมาณพื้นผิวผลตอบสนองด้วยวิธีการวิเคราะห์สมการการถดถอยแล้ว จึงนำมาทดสอบสมมติฐาน ดังนี้

1. ตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์ของสมการมีค่าเป็นศูนย์หรือไม่ ดังนี้

$$H_0 : \beta_i = 0 \text{ ทุกพารามิเตอร์}$$

$$H_1 : \beta_i \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 พารามิเตอร์}$$

ตัวสถิติทดสอบ คือ  $F = MSR/MSE$

โดยตารางที่ 9 จะตรวจสอบการวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ค่าสถิติ F คือ 80.15 นั้นมีค่ามากกว่า  $F_{0.05,14,12}$  ที่มีค่าเท่ากับ 2.64 ทำให้ปฏิเสธสมมติฐานหลัก จะได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ของสมการนั้นไม่เท่ากับศูนย์ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ( $P < 0.05$ )

2. ทำการตรวจสอบสมการที่ได้ว่ามีความเหมาะสมกับข้อมูลหรือไม่ มีสมมติฐานดังนี้

$$H_0 : \text{สมการที่ได้มีความเหมาะสมกับข้อมูล}$$

$$H_1 : \text{สมการที่ได้ไม่เหมาะสมกับข้อมูล}$$

ตัวสถิติทดสอบ คือ  $F = MS_{LOF}/MS_{PE}$

โดยตารางที่ 9 ค่าสถิติ F ที่ได้คือ 3.13 มีค่าน้อยกว่าค่าของ  $F_{0.05,10,2}$  ที่มีค่าเท่ากับ 19.40 ทำให้ต้องยอมรับ  $H_0$  สามารถสรุปได้ว่า ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 สมการที่พัฒนาได้มีความเหมาะสมกับข้อมูล

ตารางที่ 9 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของความขรุขระผิวเฉลี่ย

Analysis of Variance for Ra						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	14	0.084155	0.084155	0.006011	80.15	0.000
Linear	4	0.075242	0.075242	0.018810	250.83	0.000
Square	4	0.002069	0.002069	0.000517	6.90	0.004
Interaction	6	0.006844	0.006844	0.001141	15.21	0.000
Residual Error	12	0.000900	0.000900	0.000075		
Lack-of-Fit	10	0.000846	0.000846	0.000085	3.13	0.266
Pure Error	2	0.000054	0.000054	0.000027		
Total	26	0.085055				

การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของความขรุขระผิวดังสมการที่ 4.3 จากตารางที่ 9 แสดงว่าสมการถดถอยกำลังสองที่ถูกพัฒนาขึ้นมานั้น ค่า P-Value ที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่า 0.05 ทำให้บ่งบอกได้ว่าความเร็วในการตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกในการตัด และขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดตัดหัวบอลนั้นมีความสัมพันธ์กับค่าของความขรุขระผิวอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% นอกจากนี้ค่าของ Lack of fit ยังมี P-Value คือ 3.13 มากกว่าค่า 0.05 จะทำให้สามารถบ่งบอกได้ว่าสมการที่ถูกพัฒนามานี้มีความน่าเชื่อถือเพียงพอที่จะใช้ในการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวที่จะเกิดขึ้น

เนื่องจากการใช้สมการที่ 4.3 ประมาณการค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยนั้น ต้องมีการใช้ตัวแปรอิสระหรือปัจจัยที่ถูกเข้ารหัสให้ใช้เพื่อการคำนวณโดยสามารถแทนค่าตัวแปรอิสระแบบตัวแปรตามธรรมชาติได้ จะต้องทำการแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละปัจจัยตามที่ได้จากผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 10 ซึ่งจะให้ได้สมการที่พัฒนาขึ้นใหม่ตามสมการที่ 4.4

ตารางที่ 10 ค่าสัมประสิทธิ์แต่ละปัจจัยแบบถอดรหัสของความขรุขระผิวเฉลี่ย

Estimated Regression Coefficients for Ra using data in uncoded units	
Term	Coef
Constant	-0.00976042
V	4.21875E-05
f	-6.98125
d	-0.00937500
D	-0.0382292
V*V	-3.15625E-09
f*f	-36.8750
d*d	-0.171875
D*D	0.000562500
V*f	0.000237500
V*d	1.43750E-05
V*D	1.50000E-06
f*d	7.93750
f*D	0.581250
d*D	0.00437500

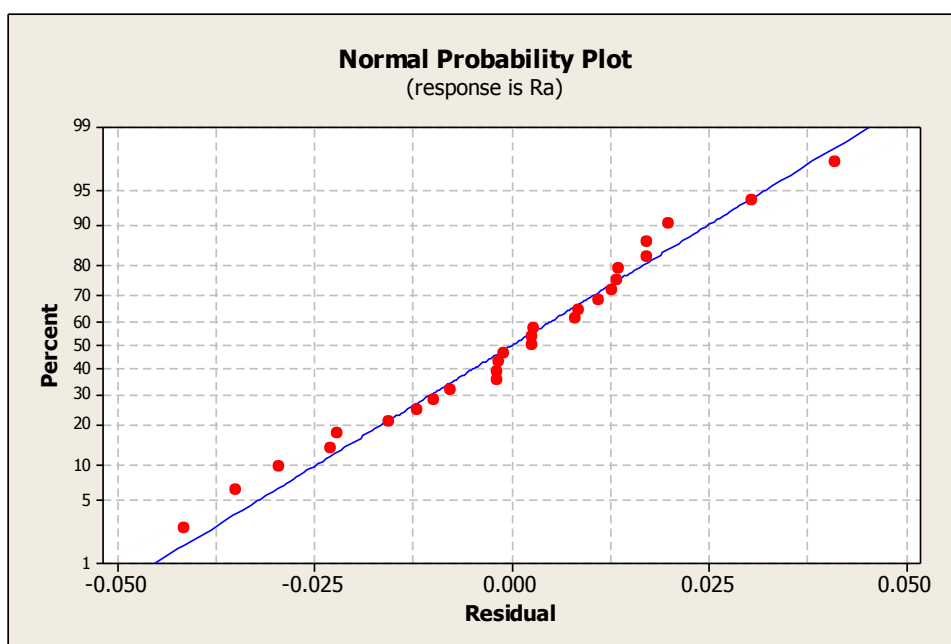
$$R_a = -0.00976 + 0.000042v - 6.98125f - 0.009375d - 0.038229D - 0.000000003v^2 - 36.875f^2 - 0.171875d^2 + 0.0005625D^2 + 0.0002375vf + 0.000014vd + 0.0000015vD + 7.9375fd + 0.58125fD + 0.004375dD \quad (4.4)$$

#### 4.4.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองสำหรับความขรุขระผิวเฉลี่ย

ในการทำการสรุปผลการวิเคราะห์ผลการทดลองนั้นต้องทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง โดยเริ่มจากการตรวจสอบคุณสมบัติของข้อมูลจากผลการทดลองที่ทำการทดสอบนั้นมีความถูกต้องตามเงื่อนไขที่ทำการออกแบบการทดลอง หรือ  $NID(0, \sigma^2)$  หรือไม่ ถึงจะสรุปผลการวิเคราะห์ของการทดลองนั้นได้อย่างสมบูรณ์แบบ จากการทดสอบข้อกำหนดเกี่ยวกับส่วนตกค้างทั้ง 3 การทดสอบ ซึ่งได้แก่ การแจกแจงแบบปกติ ความเป็นอิสระของข้อมูล และความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน

#### 4.4.2.1 การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ

ในการทดสอบของสมมติฐานการแจกแจงปกตินั้นจะใช้การพิจารณาจากการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างของตัวแปรผลตอบแต่ละตัวว่ามีแนวโน้มเป็นอย่างไร มีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่ สามารถทำได้โดยการนำส่วนตกค้างมาสร้าง Normal Probability Plot ในพิจารณาจากการกระจายตัว โดยแนวโน้มของการกระจายตัวนั้นต้องเป็นแนวโน้มเส้นตรงจึงสามารถบอกได้ว่าเป็นการแจกแจงปกติ โดยสร้าง Normal Probability Plot แสดงได้ตามรูปที่ 35

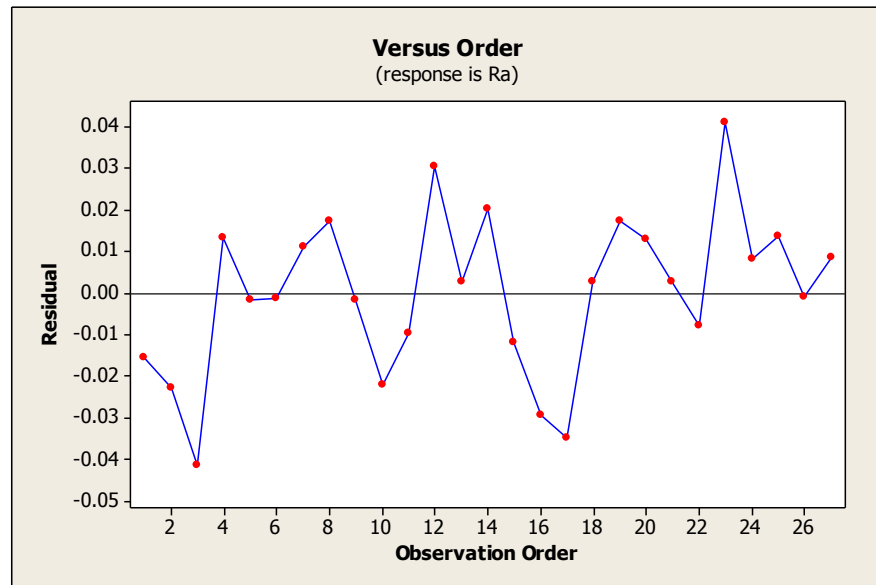


รูปที่ 35 Normal Probability Plot ของข้อมูลความขรุขระผิวเฉลี่ย

จากรูปที่ 35 พบว่าส่วนตกค้างมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง ทำให้สรุปได้ว่าข้อมูลจากผลการทดลองนั้นเป็นไปตามสมมติฐานของการแจกแจงปกติ การทดสอบการกระจายแบบปกติของความขรุขระผิวเฉลี่ยและความขรุขระผิวสูงสุดเป็นข้อมูลที่สามารถเชื่อถือได้

#### 4.4.2.2 การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระ

ในการทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระของข้อมูล จะพิจารณาตรวจสอบทิศทางและแนวโน้มของส่วนตกค้างของตัวแปรผลตอบแต่ละตัวว่ามีความเกี่ยวข้องกันหรือไม่ โดยการพล็อตข้อมูลส่วนตกค้างกับลำดับเวลาในการเก็บข้อมูล ซึ่งของค่าส่วนตกค้างนั้นจะต้องไม่มีแนวโน้มไปในทิศทางเพิ่มขึ้น ลดลง หรือมีการเปลี่ยนแปลงเป็นรอบ จึงสามารถบอกได้ว่าข้อมูลนั้นๆมีความเป็นอิสระต่อกัน การพล็อตกราฟส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล แสดงได้ตามรูปที่ 36

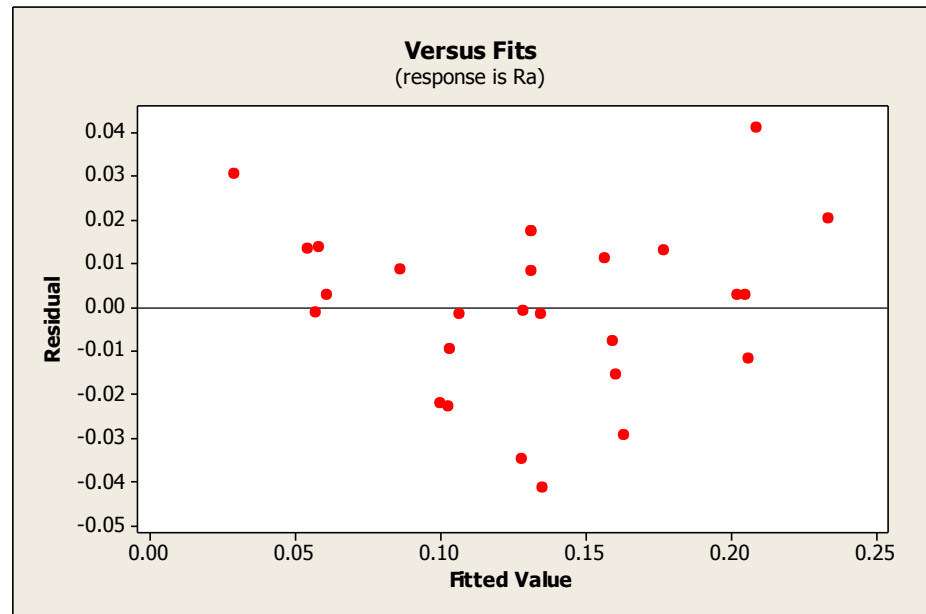


รูปที่ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวเฉลี่ยและลำดับการทดลอง

เมื่อพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลการทดลองนี้ พบว่าค่าส่วนตกค้างไม่มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น ลดลง หรือมีการเปลี่ยนแปลงที่เป็นรอบ ทำให้สรุปได้ว่าข้อมูลเป็นไปตามสมมติฐานของมีความเป็นอิสระ

#### 4.4.2.3 การทดสอบความมีเสถียรภาพของความแปรปรวน

ในการทดสอบความมีเสถียรภาพของความแปรปรวนนั้น จะพิจารณาในการทดสอบความสม่ำเสมอในการกระจายของส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกพิตขึ้นมา ซึ่งแนวโน้มการกระจายตัวของข้อมูลต้องไม่มีลักษณะที่เป็นรอบ แนวโน้ม ไม่มีทิศทางแน่นอน หรือมีการกระจายตัวที่มีรูปแบบกรวยปากเปิด จึงสามารถจะบอกได้ว่าการทดสอบนั้นๆมีเสถียรภาพของความแปรปรวน



รูปที่ 37 ความสัมพันธ์ Residual ของค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิตสำหรับค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย

เมื่อพิจารณาค่าส่วนตกค้างและค่าที่ถูกฟิตจากรูปแล้วพบว่าค่าส่วนตกค้างไม่มีรูปแบบใดๆ และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ทำให้สามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีเสถียรภาพของความแปรปรวน

#### 4.4.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองของอัตราส่วนแรงตัด $F_x/F_z$

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.1 สามารถนำมาประมาณพื้นผิวผลตอบสนองสำหรับอัตราส่วนแรงตัด ( $F_x/F_z$ ) โดยใช้ตัวแบบความสัมพันธ์อันดับสอง ตามสมการที่ 4.4

$$\begin{aligned} \frac{F_x}{F_z} = & \beta_{15} + \beta_{16}X_1 + \beta_{17}X_2 + \beta_{18}X_3 + \beta_{19}X_4 + \beta_{20}X_1^2 + \beta_{21}X_2^2 + \beta_{22}X_3^2 + \beta_{23}X_4^2 + \beta_{24}X_1X_2 \\ & + \beta_{25}X_1X_3 + \beta_{26}X_1X_4 + \beta_{27}X_2X_3 + \beta_{28}X_2X_4 + \beta_{29}X_3X_4 \end{aligned} \quad (4.5)$$

กำหนดให้ที่  $\beta$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์ ให้  $X_1, X_2, X_3$  และ  $X_4$  เป็นตัวแปรอิสระของแต่ละปัจจัยที่ถูกเข้ารหัสแทนด้วยปัจจัยต่างๆ อันได้แก่ ความเร็วตัด ( $X_1$ ) อัตราป้อนตัด ( $X_2$ ) ความลึกตัด ( $X_3$ ) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดตัดหัวบอล ( $X_4$ )

ตัวแปรอิสระ หรือปัจจัย ทั้ง 4 นั้นจะอยู่ในรูปของตัวแปรที่ถูกเข้ารหัสมาทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์สมการการถดถอย เพื่อทำการหาค่าประมาณสัมประสิทธิ์ของพารามิเตอร์แบบจำลองสมการการถดถอยที่ถูกพัฒนาขึ้นได้ ดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ค่าประมาณพารามิเตอร์การวิเคราะห์การถดถอยสำหรับอัตราส่วนแรงตัด

Response Surface Regression: Fx/Fz versus V, f, d, D				
The analysis was done using coded units.				
Estimated Regression Coefficients for Fx/Fz				
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	2.82500	0.12282	23.002	0.000
V	0.38977	0.06141	6.347	0.000
f	0.72661	0.06141	11.832	0.000
d	0.63232	0.06141	10.297	0.000
D	0.17422	0.06141	2.837	0.015
V*V	0.12668	0.09211	1.375	0.194
f*f	-0.27721	0.09211	-3.009	0.011
d*d	-0.04200	0.09211	-0.456	0.657
D*D	0.17447	0.09211	1.894	0.083
V*f	-0.00980	0.10636	-0.092	0.928
V*d	0.06972	0.10636	0.656	0.524
V*D	-0.03308	0.10636	-0.311	0.761
f*d	0.23497	0.10636	2.209	0.047
f*D	0.20060	0.10636	1.886	0.084
d*D	-0.01560	0.10636	-0.147	0.886
S = 0.212724 PRESS = 3.12777				
R-Sq = 96.44% R-Sq(pred) = 79.52% R-Sq(adj) = 92.30%				

เมื่อนำตัวแปรอิสระ คือ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดตัดหัวบอล ที่อยู่ในรูปของตัวแปรที่เข้ารหัส (Coded variable) มาวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) จะได้ค่าประมาณสัมประสิทธิ์สำหรับพารามิเตอร์ของแบบจำลองการถดถอยในตารางที่ 11

จากผลที่แสดงในตารางที่ 11 ค่าประมาณสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระที่ใช้การวิเคราะห์การถดถอยจะสามารถพัฒนาสมการแบบจำลองสำหรับพยากรณ์อัตราส่วนแรงตัด ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{F_x}{F_z} = & 2.825 + 0.38977v + 0.72661f + 0.63232d + 0.17422D + 0.12668v^2 - 0.27721f^2 \\ & - 0.042d^2 + 0.17447D^2 - 0.0098vf + 0.006972vd - 0.03308vD + 0.23497fd \\ & + 0.2006fD - 0.0156dD \end{aligned} \quad (4.6)$$



จากตารางที่ 11 ได้แสดงค่าสถิติ T ที่ใช้ตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยรายตัว จะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์เชิงเส้น (Linear coefficient) คือ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดตัดหัวบอล มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Sq) เท่ากับ 96.44% นั่นคือความแปรปรวนที่ไม่สามารถอธิบายได้ด้วยสมการมีเพียง 3.56% เท่านั้น

จากสมการพยากรณ์อัตราส่วนแรงตัดที่ 4.6 สังเกตได้ว่าแต่ละพารามิเตอร์มีค่าสัมประสิทธิ์ที่แตกต่างกัน โดยค่าสัมประสิทธิ์จะสามารถบ่งบอกได้ทั้งขนาดและทิศทางในการส่งผลต่อค่าอัตราส่วนแรงตัดสำหรับพารามิเตอร์แต่ละตัว โดยสัมประสิทธิ์ที่มีค่าบวกจะหมายความว่าพารามิเตอร์ของปัจจัยนั้นส่งผลต่ออัตราส่วนแรงตัดในลักษณะแปรผันตรง ในขณะที่ถ้าค่าสัมประสิทธิ์พารามิเตอร์ของปัจจัยนั้นมีค่าลบก็จะส่งผลต่ออัตราส่วนแรงตัดในลักษณะที่แปรผกผัน ค่าสัมบูรณ์ของสัมประสิทธิ์ก็จะบ่งบอกถึงขนาดในการส่งผลต่ออัตราส่วนแรงตัด ถ้ามีค่าสัมบูรณ์มากก็จะส่งผลต่อค่าอัตราส่วนแรงตัดมาก เป็นไปในทำนองเดียวกันกับการทดสอบทางสถิติว่าพารามิเตอร์ของปัจจัยนั้นมีผลอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนพารามิเตอร์ของปัจจัยที่มีค่าสัมบูรณ์ของสัมประสิทธิ์น้อย สามารถจะบอกได้ว่าปัจจัยนั้นส่งผลต่ออัตราส่วนแรงตัดน้อยหรือไม่ส่งผลต่ออัตราส่วนแรงตัดอย่างมีนัยสำคัญในการทดสอบทางสถิติ จากสมการจะแสดงให้เห็นว่าสัมประสิทธิ์ของความเร็วตัดมีค่าเป็นบวก สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อเพิ่มความเร็วตัดขึ้นอัตราส่วนแรงตัดมีแนวโน้มมากขึ้นด้วย สัมประสิทธิ์ของอัตราป้อนตัดก็มีค่าเป็นบวก จะบ่งบอกว่าเมื่ออัตราป้อนตัดเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าอัตราส่วนแรงตัดเพิ่มขึ้นด้วย และเมื่อเพิ่มความลึกตัดมากขึ้นจะมีผลให้อัตราส่วนแรงตัดเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากพื้นที่หน้าสัมผัสระหว่างมีดตัดหัวบอลและเนื้อวัสดุชิ้นงานสัมผัสกันมากขึ้น และสัมประสิทธิ์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัดหัวบอลมีค่าเป็นบวก สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัดหัวบอลมีขนาดใหญ่ขึ้น จะส่งผลให้อัตราส่วนแรงตัดมากขึ้น จากการมีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก มีผลให้แรงป้อนตัดเพิ่ม อัตราส่วนแรงตัดเพิ่ม จากสมการจะเห็นได้ว่า อัตราป้อนตัด ส่งผลต่อความขรุขระผิวเฉลี่ยมากที่สุด รองลงมาคือ ความลึกตัด ความเร็วตัด และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดตัดหัวบอลตามลำดับ

เมื่อได้สมการที่ใช้ประมาณพื้นผิวผลตอบสนองด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอย จะต้องมีการทดสอบสมมติฐาน ดังต่อไปนี้

1. ตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์ของสมการมีค่าเป็นศูนย์หรือไม่ สมมติฐานดังนี้

$H_0 : \beta_i = 0$  ของพารามิเตอร์ทุกตัว

$H_1 : \beta_i \neq 0$  อย่างน้อยมี 1 พารามิเตอร์

ตัวสถิติทดสอบ คือ  $F = MSR/MSE$

จากข้อมูลในตารางที่ 11 การวิเคราะห์ความแปรปรวนจะได้ค่าสถิติ F คือ 23.25 มีค่ามากกว่า  $F_{0.05,14,12}$  ที่มีค่าเท่ากับ 2.64 ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ของสมการไม่เท่ากับศูนย์ ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ( $P < 0.05$ )

2. ตรวจสอบสมการที่ได้มีความเหมาะสมกับข้อมูลหรือไม่ สมมติฐานดังนี้

$H_0$  : สมการมีความเหมาะสมกับข้อมูล

$H_1$  : สมการไม่มีความเหมาะสมกับข้อมูล

ตัวสถิติทดสอบ คือ  $F = MS_{LOF}/MS_{PE}$

จากตารางที่ 12 ได้ค่าสถิติ F เท่ากับ 2.20 ซึ่งน้อยกว่าค่า  $F_{0.05,10,2}$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ 19.40 นั่นคือไม่สามารถปฏิเสธ  $H_0$  ได้ ทำให้ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 สามารถสรุปได้ว่าสมการที่ได้มีความเหมาะสมกับข้อมูล

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของอัตราส่วนแรงตัดของสมการที่ 4.6 ดังแสดงได้ดังตารางที่ 12 แสดงให้เห็นว่าสมการถดถอยกำลังสองมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 บ่งบอกได้ว่าความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัดหัวบอลมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนแรงตัดอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% อีกทั้ง Lack of fit มีค่า P-Value เท่ากับ 0.115 ซึ่งมากกว่า 0.05 นั้นหมายถึงว่าสมการที่ได้มีความแม่นยำเพียงพอในการพยากรณ์อัตราส่วนแรงตัด

**ตารางที่ 12** การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับอัตราส่วนแรงตัด ( $F_x/F_z$ )

Analysis of Variance for $F_x/F_z$						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	14	14.7280	14.7280	1.05200	23.25	0.000
Linear	4	13.3207	13.3207	3.33017	73.59	0.000
Square	4	1.0003	1.0003	0.25008	5.53	0.009
Interaction	6	0.4070	0.4070	0.06783	1.50	0.259
Residual Error	12	0.5430	0.5430	0.04525		
Lack-of-Fit	10	0.5430	0.5430	0.05430	2.20	0.115
Pure Error	2	0.0000	0.0000	0.00000		
Total	26	15.2710				

แต่สมการที่ 4.6 ที่ใช้ในการพยากรณ์อัตราส่วนแรงตัดจะต้องใช้ตัวแปรอิสระที่ถูกเข้ารหัสในการคำนวณ เพื่อให้สามารถแทนค่าตัวแปรอิสระแบบปกติที่เป็นตัวแปรตามธรรมชาติ (Natural variable) สมการที่ 4.6 สามารถแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละตัวแปรอิสระดังตารางที่ 13 ทำให้สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 4.7

ตารางที่ 13 ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระแบบถอครหัสสำหรับอัตราส่วนแรงตัด

Estimated Regression Coefficients for Fx/Fz using data in uncoded units	
Term	Coef
Constant	4.34002
V	-4.84581E-04
f	12.9815
d	0.850562
D	-0.701367
V*V	3.16698E-08
f*f	-693.021
d*d	-1.04990
D*D	0.0436167
V*f	-2.45000E-04
V*d	0.000174312
V*D	-8.26875E-06
f*d	58.7437
f*D	5.01500
d*D	-0.0390000

$$\frac{F_x}{F_z} = 4.34002 - 0.000486v + 12.9815f + 0.850562d - 0.701367D + 0.00000003v^2 - 693.021f^2 - 1.04990d^2 + 0.0436167D^2 - 0.000245vf + 0.000174vd - 0.000008vD + 58.7437fd + 5.015fD - 0.039dD \quad (4.7)$$

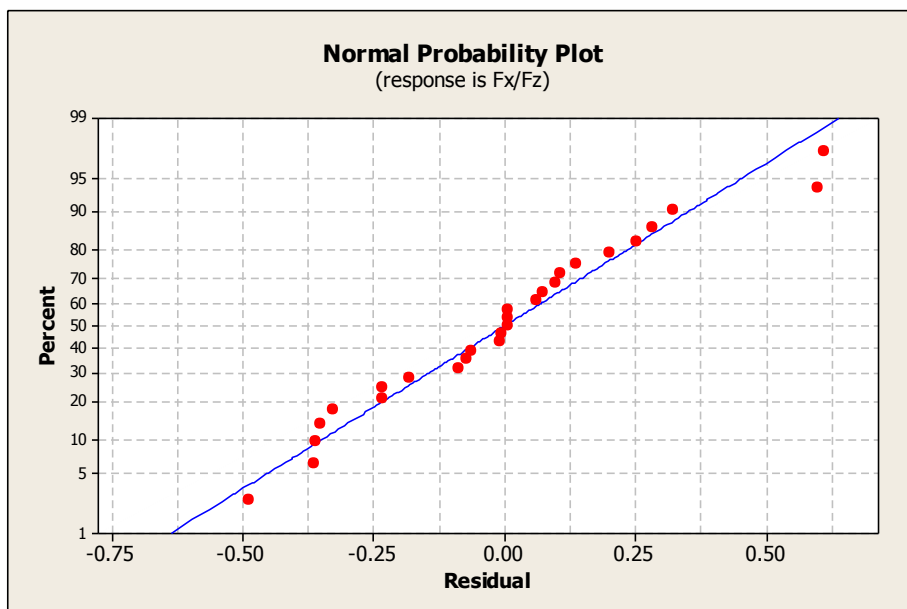
#### 4.4.4 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองอัตราส่วนแรงตัด (Fx/Fz)

ในการทำการสรุปผลการวิเคราะห์ผลการทดลองนั้นต้องทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง โดยเริ่มจากการตรวจสอบคุณสมบัติของข้อมูลจากผลการทดลองที่ทำการทดสอบนั้นมีความถูกต้องตามเงื่อนไขที่ทำการออกแบบการทดลอง หรือ  $NID(0, \sigma^2)$  หรือไม่ ถึงจะสรุปผลการวิเคราะห์ของการทดลองนั้นได้อย่างสมบูรณ์แบบ จากการทดสอบข้อกำหนดเกี่ยวกับส่วนตกค้างทั้ง 3 การทดสอบซึ่งได้แก่ การแจกแจงแบบปกติ ความเป็นอิสระของข้อมูล และควมมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน ดังนี้

##### 4.4.4.1 การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ

ในการทดสอบของสมมติฐานการแจกแจงปกตินั้นจะใช้การพิจารณาจากการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างของตัวแปรผลตอบแต่ละตัวว่ามีแนวโน้มเป็นอย่างไร มีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่ สามารถทำได้โดยการนำส่วนตกค้างมาสร้าง Normal Probability Plot ในพิจารณาจากการ

กระจายตัว โดยแนวโน้มของการกระจายตัวนั้นต้องเป็นแนวโน้มเส้นตรงจึงสามารถบอกได้ว่าเป็นการแจกแจงปกติ โดยสร้าง Normal Probability Plot แสดงได้ตามรูปที่ 38



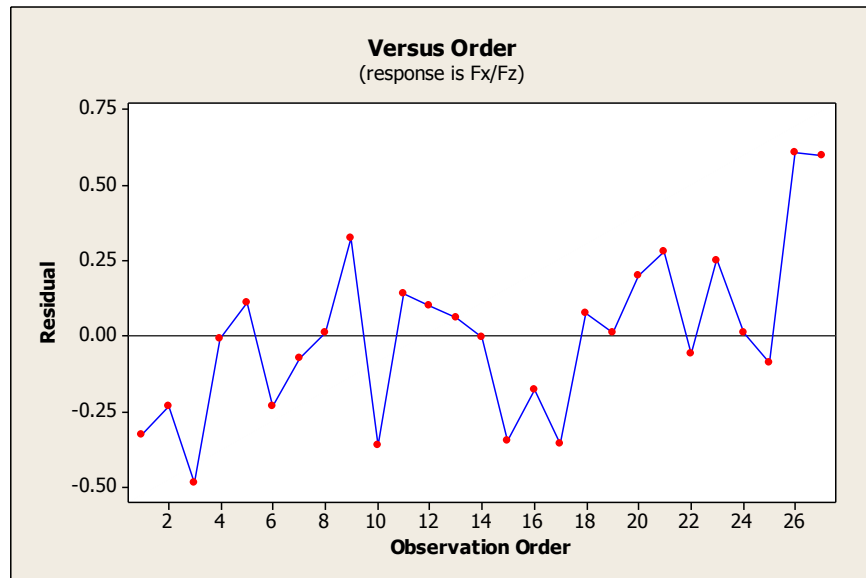
รูปที่ 38 Normal Probability Plot ของข้อมูลอัตราส่วนแรงตัด

จากรูปที่ 38 พบว่าส่วนตกค้างมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง ทำให้สรุปได้ว่าข้อมูลจากผลการทดลองนั้นเป็นไปตามสมมติฐานของการแจกแจงปกติ เป็นข้อมูลที่สามารถเชื่อถือได้

#### 4.4.4.2 การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระ (Independent)

ในการทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระของข้อมูล จะพิจารณาตรวจสอบทิศทางและแนวโน้มของส่วนตกค้างของตัวแปรผลตอบแต่ละตัวว่ามีความเกี่ยวข้องกันหรือไม่ โดยการพล็อตข้อมูลส่วนตกค้างกับลำดับเวลาในการเก็บข้อมูล ซึ่งของค่าส่วนตกค้างนั้นจะต้องไม่มีแนวโน้มไปในทิศทางเพิ่มขึ้น ลดลง หรือมีการเปลี่ยนแปลงเป็นรอบ จึงสามารถบอกได้ว่าข้อมูลนั้นๆมีความเป็นอิสระต่อกัน การพล็อตกราฟส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล แสดงได้ตามรูปที่ 38

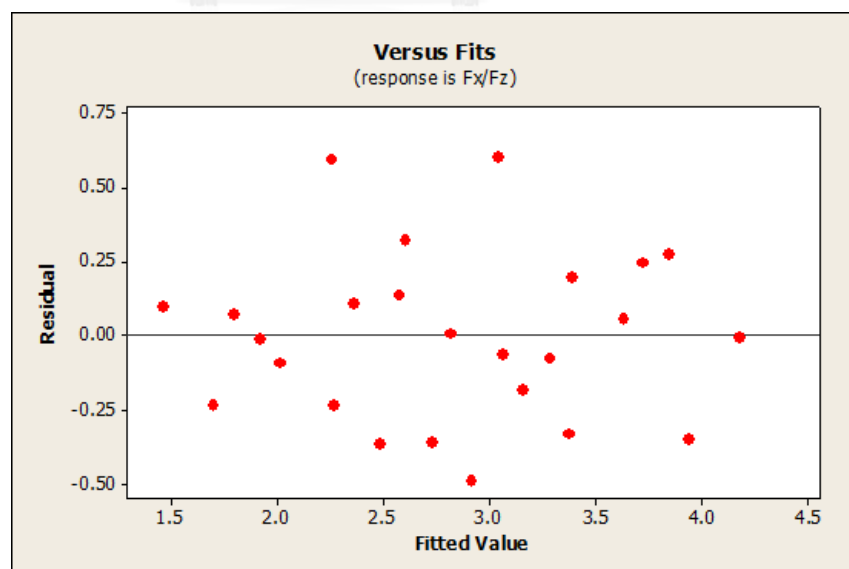
เมื่อพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลการทดลองนี้ พบว่าค่าส่วนตกค้างไม่มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น ลดลง หรือมีการเปลี่ยนแปลงเป็นรอบ ทำให้สามารถสรุปได้ว่าข้อมูลเป็นไปตามสมมติฐานของมีความเป็นอิสระ



รูปที่ 39 ความสัมพันธ์ Residual ของข้อมูลอัตราส่วนแรงตัดกับลำดับการทดลอง

#### 4.4.4.3 การทดสอบความมีเสถียรภาพของความแปรปรวน

ในการทดสอบความมีเสถียรภาพของความแปรปรวนนั้น จะพิจารณาในการทดสอบความสม่ำเสมอในการกระจายของส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิตขึ้นมา ซึ่งแนวโน้มการกระจายตัวของข้อมูลต้องไม่มีลักษณะที่เป็นแนวโน้ม หรือต้องไม่มีทิศทางแน่นอน หรือมีการกระจายตัวที่มีรูปแบบกรวยปากเปิด จึงสามารถจะบอกได้ว่าการทดสอบนั้นๆมีเสถียรภาพของความแปรปรวน



รูปที่ 40 ความสัมพันธ์ Residual ของค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิตสำหรับค่าอัตราส่วนแรงตัด

จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกพิตนี้ไม่พบว่าค่าส่วนตกค้างมีรูปแบบหรือโครงสร้างใดๆ และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีเสถียรภาพของความแปรปรวน

#### 4.4.5 การวิเคราะห์ผลการทดลองของอุณหภูมิตัด

จากผลการทดลองที่ได้ในตารางที่ 4.1 สามารถนำมาประมาณพื้นผิวผลตอบสนองสำหรับอุณหภูมิตัด โดยใช้ตัวแบบความสัมพันธ์อันดับสอง (Second-Order Model) ดังสมการที่ 4.8

$$T = \beta_{30} + \beta_{31}X_1 + \beta_{32}X_2 + \beta_{33}X_3 + \beta_{34}X_4 + \beta_{35}X_1^2 + \beta_{36}X_2^2 + \beta_{37}X_3^2 + \beta_{38}X_4^2 + \beta_{39}X_1X_2 + \beta_{40}X_1X_3 + \beta_{41}X_1X_4 + \beta_{42}X_2X_3 + \beta_{43}X_2X_4 + \beta_{44}X_3X_4 \quad (4.8)$$

กำหนดให้ที่  $\beta$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์ ให้  $X_1, X_2, X_3$  และ  $X_4$  เป็นตัวแปรอิสระของแต่ละปัจจัยที่ถูกเข้ารหัสแทนด้วยปัจจัยต่างๆ อันได้แก่ ความเร็วตัด ( $X_1$ ) อัตราป้อนตัด ( $X_2$ ) ความลึกตัด ( $X_3$ ) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดตัดหัวบอล ( $X_4$ )

ตัวแปรอิสระ หรือปัจจัย ทั้ง 4 นั้นจะอยู่ในรูปของตัวแปรที่ถูกเข้ารหัสมาทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์สมการการถดถอย เพื่อทำการหาค่าประมาณสัมประสิทธิ์ของพารามิเตอร์แบบจำลองสมการการถดถอยที่ถูกพัฒนาขึ้นได้ ดังตารางที่ 14

ตารางที่ 14 ค่าประมาณสัมประสิทธิ์ของการวิเคราะห์การถดถอยสำหรับอุณหภูมิตัด

Response Surface Regression: T versus V, f, d, D				
The analysis was done using coded units.				
Estimated Regression Coefficients for T				
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	402.067	3.868	103.937	0.000
V	15.140	1.934	7.828	0.000
f	4.358	1.934	2.253	0.044
d	9.067	1.934	4.688	0.001
D	-12.611	1.934	-6.520	0.000
V*V	0.292	2.901	0.101	0.921
f*f	8.684	2.901	2.993	0.011
d*d	-0.117	2.901	-0.040	0.968
D*D	7.987	2.901	2.753	0.018
V*f	-0.870	3.350	-0.260	0.799
V*d	-2.765	3.350	-0.825	0.425
V*D	-1.006	3.350	-0.300	0.769
f*d	0.566	3.350	0.169	0.869
f*D	-0.473	3.350	-0.141	0.890
d*D	-7.792	3.350	-2.326	0.038
S = 6.70023    PRESS = 3077.38				
R-Sq = 92.75%    R-Sq(pred) = 58.59%    R-Sq(adj) = 84.29%				

จากตารางที่ 14 ค่าประมาณสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระในการวิเคราะห์การถดถอยจะสามารถแบบจำลองสำหรับพยากรณ์อุณหภูมิตัด คือ

$$\begin{aligned}
 T = & 402.067 + 15.140v + 4.358f + 9.067d - 12.611D + 0.292v^2 + 8.684f^2 \\
 & - 0.117d^2 + 7.987D^2 - 0.870vf - 2.765vd - 1.006vd + 0.566fd \\
 & - 0.473fD - 7.792dD
 \end{aligned}
 \tag{4.9}$$

จากข้อมูลในตารางที่ 14 ได้แสดงค่าสถิติ T ที่ใช้ตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยรายตัวของค่าสัมประสิทธิ์เชิงเส้น (Linear coefficient) คือ ความเร็วตัด ความลึกตัด และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัดหัวบอล พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Sq) มีค่าคือ 92.75% หมายถึงความแปรปรวนที่ไม่สามารถอธิบายได้ด้วยสมการนั้นมีเพียงแค่ 7.25%

โดยสมการพยากรณ์อุณหภูมิตัดที่ 4.9 จะบ่งบอกได้ว่าแต่ละพารามิเตอร์นั้นมีค่าสัมประสิทธิ์แตกต่างกัน สามารถอธิบายได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์สามารถบ่งบอกได้ทั้งขนาดและทิศทางใน

การส่งผลต่อค่าอุณหภูมิตัดสำหรับพารามิเตอร์นั้นๆ โดยสัมประสิทธิ์ที่มีค่าบวกจะมีผลทำให้พารามิเตอร์นั้นส่งผลต่ออุณหภูมิตัดในรูปแบบแปรผันตรง แต่ถ้าสัมประสิทธิ์ของพารามิเตอร์นั้นมีค่าลบก็จะส่งผลต่ออุณหภูมิตัดในรูปแบบแปรผกผัน ค่าสัมบูรณ์ของสัมประสิทธิ์จะสามารถบ่งบอกถึงขนาดที่จะส่งผลต่ออุณหภูมิตัด ถ้ามีค่ามากก็จะส่งผลต่อค่าอุณหภูมิตัดมาก เป็นไปในทำนองเดียวกับการทดสอบทางสถิติว่าพารามิเตอร์ของปัจจัยนั้นมีผลอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนพารามิเตอร์ที่มีค่าสัมบูรณ์ของสัมประสิทธิ์น้อย จะบ่งบอกว่าส่งผลต่ออุณหภูมิตัดน้อยหรือไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิตัดอย่างมีนัยสำคัญในการทดสอบทางสถิติ จากสมการจะอธิบายได้ว่าสัมประสิทธิ์ของทั้งความเร็วตัด อัตราป้อนตัด และความลึกตัด มีค่าเป็นบวก อธิบายได้ว่าเมื่อเพิ่มพารามิเตอร์เหล่านี้จะมีผลทำให้อุณหภูมิตัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากการเพิ่มความเร็วตัดเป็นเหตุให้เกิดการเสียดสีและการสั่นสะเทือนระหว่างมีดตัดและเนื้อวัสดุชิ้นงานมากขึ้น มีผลให้อุณหภูมิตัดสูงขึ้น การเพิ่มความเร็วตัด อัตราป้อนตัดและความลึกตัดทำให้พื้นที่การตัดมากขึ้น ทำให้เมื่อเกิดกระบวนการแปรรูปจึงมีการปลดปล่อยพลังงานความร้อนออกมามาก ในขณะที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดตัดหัวบอลมีค่าเป็นลบ จะหมายความว่าถ้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดตัดหัวบอลเพิ่มขึ้น อุณหภูมิจะลดลง จะเห็นได้ว่าความเร็วตัด ส่งผลต่ออุณหภูมิตัดมากที่สุด รองลงมาคือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัดหัวบอล ความลึกตัด และ อัตราป้อน ตามลำดับ นอกนั้นไม่มีผลต่ออุณหภูมิตัดอย่างมีนัยสำคัญ หรือมีผลน้อยมาก

เมื่อพัฒนาสมการที่ใช้ประมาณพื้นผิวผลตอบสนองด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยแล้วต้องมีการทดสอบสมมติฐาน ดังนี้

1. ตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์ของสมการมีค่าเป็นศูนย์หรือไม่ มีสมมติฐานดังนี้

$$H_0 : \beta_i = 0 \text{ ของพารามิเตอร์ทุกตัว}$$

$$H_1 : \beta_i \neq 0 \text{ อย่างน้อยมี 1 พารามิเตอร์}$$

ตัวสถิติทดสอบ คือ  $F = MSR/MSE$

จากตารางผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนได้ค่าสถิติ F เท่ากับ 10.97 มีค่ามากกว่า  $F_{0.05,14,12}$  ที่มีค่าเท่ากับ 2.64 ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ของสมการไม่เท่ากับศูนย์ ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ( $P < 0.05$ )

2. ตรวจสอบสมการที่ได้มีความเหมาะสมกับข้อมูลหรือไม่ โดยมีสมมติฐานดังนี้

$$H_0 : \text{สมการมีความเหมาะสมกับข้อมูล}$$

$$H_1 : \text{สมการไม่เหมาะสมกับข้อมูล}$$

สถิติทดสอบ คือ  $F = MS_{LOF}/MS_{PE}$



จากตารางที่ 15 ได้ค่าสถิติ F เท่ากับ 14.56 ซึ่งน้อยกว่าค่า  $F_{0.05,10,2}$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ 19.40 นั่นคือไม่สามารถปฏิเสธ  $H_0$  ได้ ดังนั้นที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 สามารถสรุปได้ว่าตัวแบบที่ได้มีความเหมาะสมกับข้อมูล

ตารางที่ 15 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับอุณหภูมิตัด

Analysis of Variance for T						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	14	6892.48	6892.48	492.32	10.97	0.000
Linear	4	5873.71	5873.71	1468.43	32.71	0.000
Square	4	736.11	736.11	184.03	4.10	0.025
Interaction	6	282.66	282.66	47.11	1.05	0.442
Residual Error	12	538.72	538.72	44.89		
Lack-of-Fit	10	531.42	531.42	53.14	14.56	0.066
Pure Error	2	7.30	7.30	3.65		
Total	26	7431.20				

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของอุณหภูมิตัดที่ได้จากสมการที่ 4.9 ดังตารางที่ 15 แสดงให้เห็นว่าสมการถดถอยกำลังสองมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 หมายความว่าความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดตัดหับบอลมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิตัดอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% อีกทั้ง Lack of fit มีค่า P-Value เท่ากับ 0.066 มากกว่า 0.05 นั่นหมายถึงว่าสมการที่ได้มีความแม่นยำเพียงพอในการพยากรณ์อุณหภูมิตัด

อย่างไรก็ตามในสมการที่ 4.9 ในการพยากรณ์อุณหภูมิตัดจะต้องใช้ตัวแปรอิสระที่ถูกเข้ารหัสในการคำนวณ ดังนั้นเพื่อให้สามารถแทนค่าตัวแปรอิสระแบบปกติที่เป็นตัวแปรตามธรรมชาติ (Natural variable) สมการที่ 4.9 สามารถแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละตัวแปรอิสระกลับมาได้ดังตารางที่ 16 ดังนั้นสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 4.10

ตารางที่ 16 ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระแบบถอทรหัสสำหรับอุณหภูมิตัด

Estimated Regression Coefficients for T using data in uncoded units	
Term	Coef
Constant	318.642
V	0.0138302
f	-1305.75
d	268.735
D	-21.6306
V*V	7.30286E-08
f*f	21710.9
d*d	-2.93400
D*D	1.99682
V*f	-0.0217571
V*d	-0.00691128
V*D	-2.51562E-04
f*d	141.382
f*D	-11.8250
d*D	-19.4792

$$\begin{aligned}
 T = & 318.642 + 0.0138302v - 1305.75f + 268.735d - 21.6306D + 0.00000073v^2 + 21710.9f^2 \\
 & - 2.93400d^2 + 1.99682D^2 - 0.0217571vf - 0.00691128vd - 0.000251562vD + 141.382fd \\
 & - 11.8250fD - 19.4792dD
 \end{aligned} \tag{4.10}$$

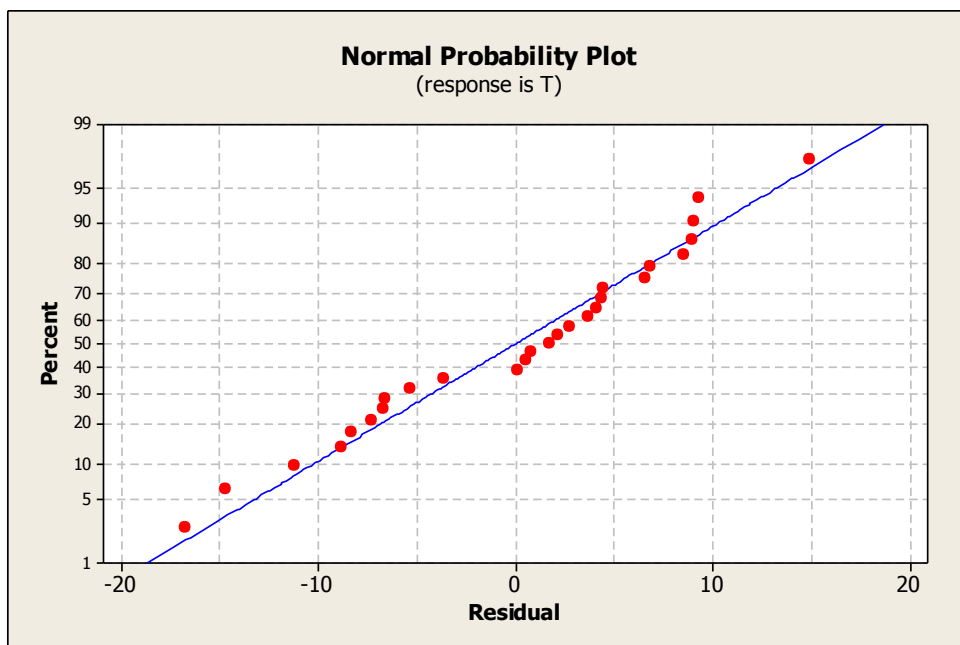
#### 4.4.6 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองสำหรับอุณหภูมิตัด

ในการทำการสรุปผลการวิเคราะห์ผลการทดลองนั้นต้องทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง โดยเริ่มจากการตรวจสอบคุณสมบัติของข้อมูลจากผลการทดลองที่ทำการทดสอบนั้นมีความถูกต้องตามเงื่อนไขที่ทำการออกแบบการทดลอง หรือ  $NID(0, \sigma^2)$  หรือไม่ ถึงจะสรุปผลการวิเคราะห์ของการทดลองนั้นได้อย่างสมบูรณ์แบบ จากการทดสอบข้อกำหนดเกี่ยวกับส่วนตกค้างทั้ง 3 การทดสอบ ซึ่งได้แก่ การแจกแจงแบบปกติ ความเป็นอิสระของข้อมูล และความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน

##### 4.4.6.1 การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ

ในการทดสอบของสมมติฐานการแจกแจงปกตินั้นจะใช้การพิจารณาจากการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างของตัวแปรผลตอบแต่ละตัวว่ามีแนวโน้มเป็นอย่างไร มีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่ สามารถทำได้โดยการนำส่วนตกค้างมาสร้าง Normal Probability Plot ในพิจารณาจากการ

กระจายตัว โดยแนวโน้มของการกระจายตัวนั้นต้องเป็นแนวโน้มเส้นตรงจึงสามารถบอกได้ว่าเป็นการแจกแจงปกติ โดยสร้าง Normal Probability Plot แสดงได้ตามรูปที่ 41

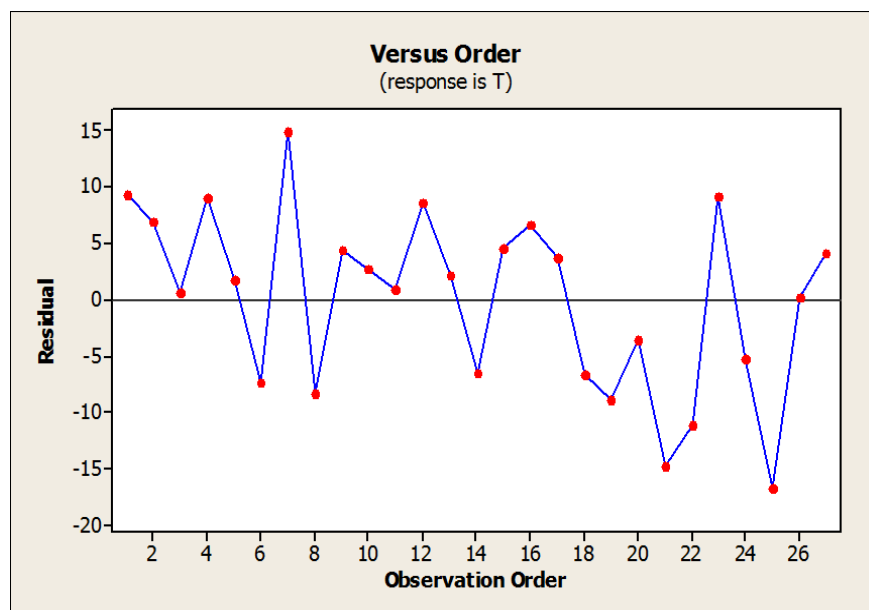


รูปที่ 41 Normal Probability Plot ของข้อมูลอุณหภูมิตัด

จากผลการทดลองจะพบว่าส่วนตกค้างมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง ทำให้สามารถสรุปได้ว่าข้อมูลเป็นไปตามสมมติฐานของการแจกแจงปกติ

#### 4.4.6.2 การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระ

ในการทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระของข้อมูล จะพิจารณาตรวจสอบทิศทางและแนวโน้มของส่วนตกค้างของตัวแปรผลตอบแต่ละตัวว่ามีความเกี่ยวข้องกันหรือไม่ โดยการพล็อตข้อมูลส่วนตกค้างกับลำดับเวลาในการเก็บข้อมูล ซึ่งของค่าส่วนตกค้างนั้นจะต้องไม่มีแนวโน้มไปในทิศทางเพิ่มขึ้น ลดลง หรือมีการเปลี่ยนแปลงเป็นรอบ จึงสามารถบอกได้ว่าข้อมูลนั้นๆมีความเป็นอิสระต่อกัน การพล็อตกราฟส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล แสดงได้ตามรูปที่ 42

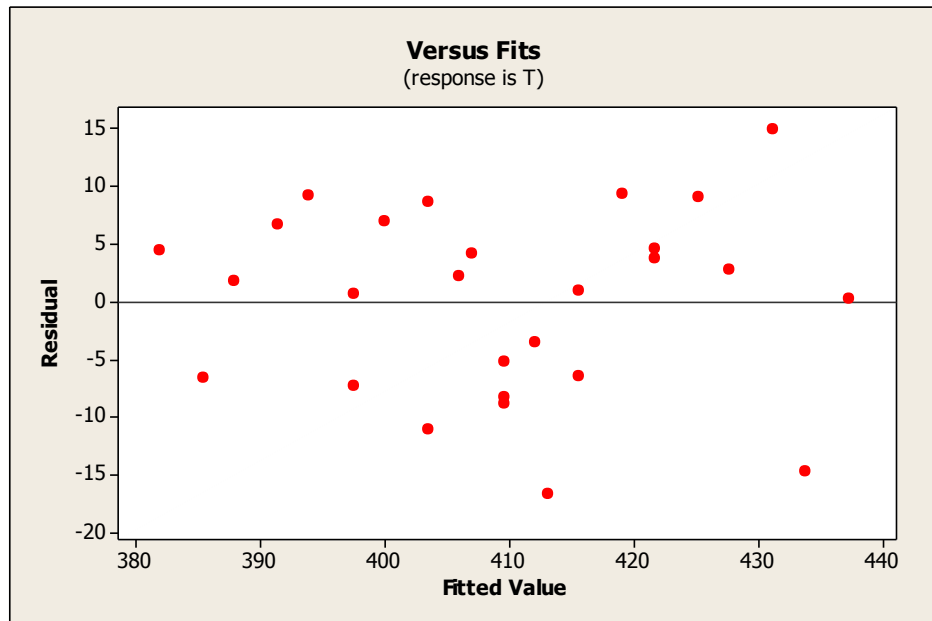


รูปที่ 42 ความสัมพันธ์ข้อมูลอุณหภูมิติดกับลำดับการทดลอง

เมื่อพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลนี้ พบว่าค่าส่วนตกค้างไม่มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น ลดลง หรือมีการเปลี่ยนแปลงเป็นรอบ ทำให้สามารถสรุปได้ว่าข้อมูลเป็นไปตามสมมติฐานของมีความเป็นอิสระ

#### 4.4.6.3 การทดสอบความมีเสถียรภาพของความแปรปรวน

ในการทดสอบความมีเสถียรภาพของความแปรปรวนนั้น จะพิจารณาในการทดสอบความสม่ำเสมอในการกระจายของส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกพิชิตขึ้นมา ซึ่งแนวโน้มการกระจายตัวของข้อมูลต้องไม่มีลักษณะที่เป็นแนวโน้ม หรือต้องไม่มีทิศทางแน่นอน หรือมีการกระจายตัวที่มีรูปแบบกรวยปากเปิด จึงสามารถจะบอกได้ว่าการทดสอบนั้นๆมีเสถียรภาพของความแปรปรวน

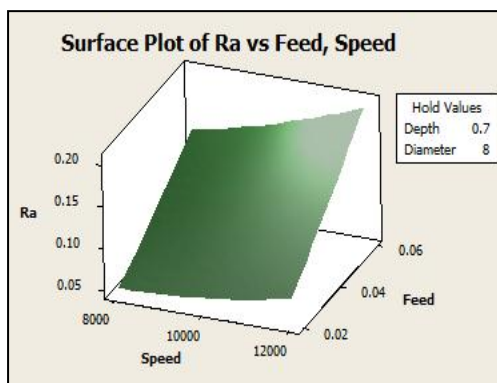


รูปที่ 43 ความสัมพันธ์ค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิตสำหรับค่าอุณหภูมิตัด

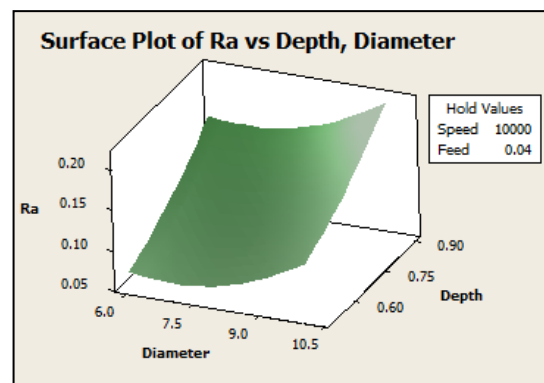
เมื่อพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิตจากการทดลองนี้แล้ว พบว่าค่าส่วนตกค้างไม่มีรูปแบบ หรือโครงสร้างใดๆ และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ทำให้สามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีเสถียรภาพของความแปรปรวน

#### 4.5 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิว อัตราส่วนแรงตัด และอุณหภูมิในการตัด

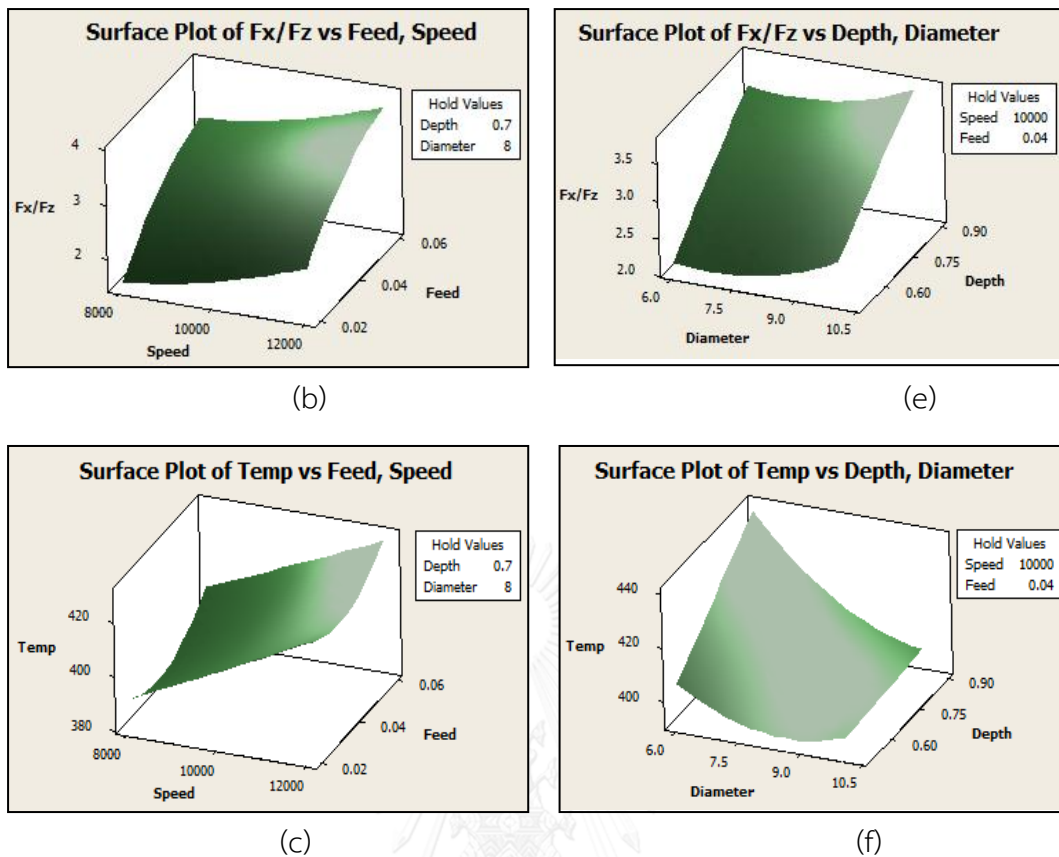
จากสมการที่ 4.4, 4.7 และ 4.10 สามารถแสดงได้ในลักษณะของพื้นผิวผลตอบสนอง (Response surface) ในรูปที่ 44 และเส้นโครงร่าง (Contour plot) ในรูปที่ 45



(a)

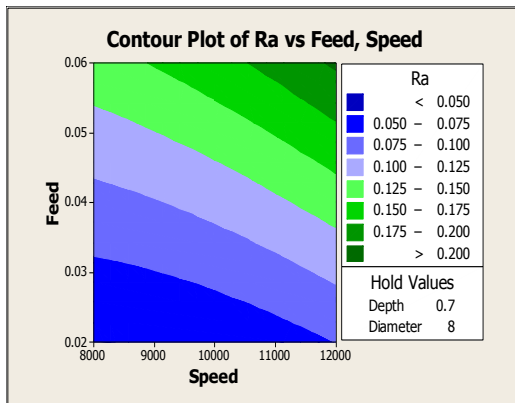


(d)

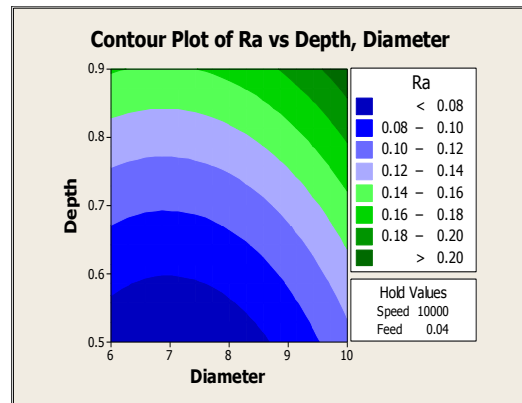


รูปที่ 44 พื้นผิวผลตอบสำหรับความขรุขระผิว อัตราส่วนแรงตัด และอุณหภูมิตัด

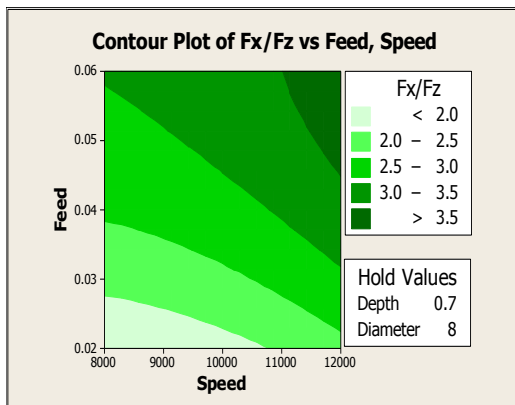
รูปที่ 44 แสดงพื้นผิวผลตอบของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับความขรุขระผิว (Ra), อัตราส่วนแรงตัด (Fx/Fz) และอุณหภูมิตัด (T) พื้นผิวผลตอบในรูปที่ 44(a)-44(c) แสดงตัวแปรของผลตอบที่อยู่ในฟังก์ชันของความเร็วตัด (V) และอัตราป้อนตัด (f) โดยคงค่าความลึกตัด (d) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดตัดหัวบอล (D) ไว้ที่ระดับกลาง เป็นเช่นเดียวกันกับพื้นผิวผลตอบในรูปที่ 44(d)-44(f) ที่แสดงตัวแปรของผลตอบที่อยู่ในฟังก์ชันของความลึกตัด (d) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดตัดหัวบอล (D) โดยคงค่าความเร็วตัด (V) และอัตราป้อนตัด (f) ไว้ที่ระดับกลาง ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรผลตอบทั้งหมดข้างต้นแสดงให้เห็นเป็นแนวโน้มเดียวกันกับที่แสดงดังในสมการที่ 4.4, 4.7 และ 4.10 ตามลำดับ



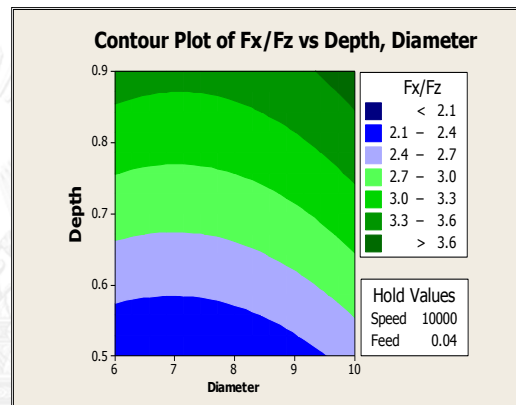
(a)



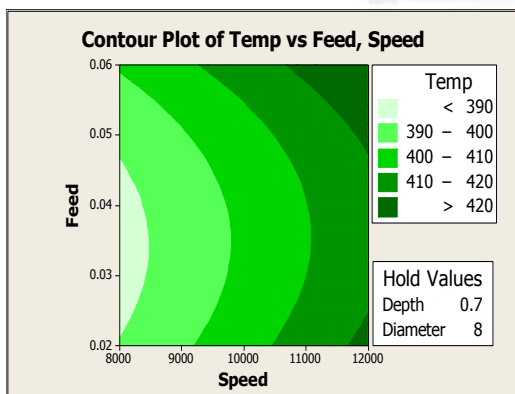
(d)



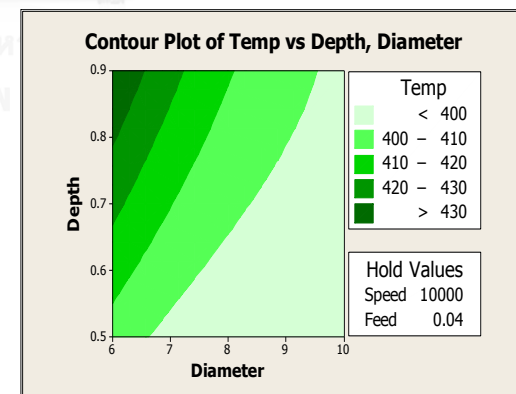
(b)



(e)



(c)



(f)

รูปที่ 45 เส้นโครงร่างสำหรับความขรุขระผิว(Ra) อัตราส่วนแรงตัด(Fx/Fy) และอุณหภูมิตัด(T)

เส้นโครงร่างในรูปที่ 45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับความขรุขระผิว อัตราส่วนแรงตัด (Fx/Fz) และอุณหภูมิตัด(T) เส้นโครงร่างในรูป 46(a)-(c) แสดงตัวแปรผลตอบที่อยู่ในฟังก์ชันของความเร็วตัด(V)และอัตราป้อนตัด(f) โดยคงค่าความลึกตัด(d)และขนาดเส้นผ่าน

ศูนย์กลางของมิตัดหัวบอล(D)ไว้ที่ระดับกลาง เช่นเดียวกับกับเส้นโครงร่างตามรูปที่ 45(d)-(f) ที่แสดงตัวแปรของผลตอบให้อยู่ในฟังก์ชันของความลึกตัด(d)และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมิตัดหัวบอล(D) โดยคงค่าความเร็วตัด(V)และอัตราป้อนตัด(f)ไว้ที่ระดับกลาง ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับตัวแปรผลตอบทั้งหมดแสดงแนวโน้มเดียวกันกับสมการที่ 4.4, 4.7 และ 4.10 ตามลำดับ และแสดงในพื้นผิวผลตอบดังรูปที่ 45

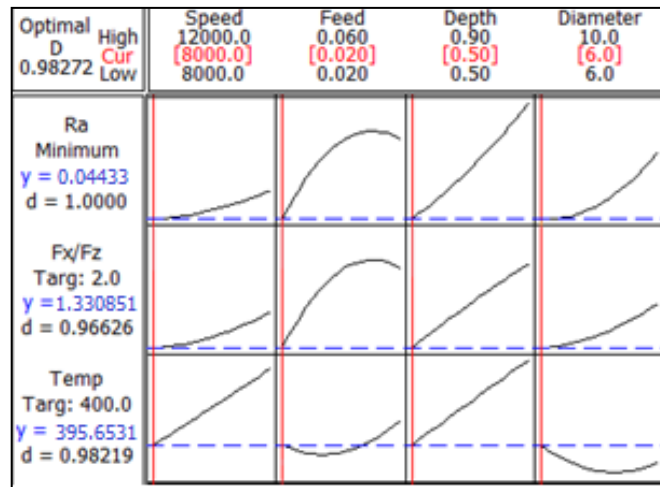
จากรูปดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าเมื่อลดอัตราป้อนตัดจะส่งผลให้ความขรุขระผิวน้อยลง และเมื่อเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมิตัดหัวบอลให้มากขึ้นก็จะส่งผลให้ความขรุขระผิวมากขึ้นเช่นกัน โดยความเร็วตัดที่เพิ่มขึ้นนั้นมีผลให้อุณหภูมิตัดเพิ่มขึ้น และอัตราส่วนแรงตัดก็เพิ่มขึ้น ในขณะที่การเพิ่มอัตราป้อนตัดให้มากขึ้น อัตราส่วนแรงตัดก็มากขึ้นด้วย สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนตัด ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น อัตราส่วนแรงตัดจึงมากขึ้น ดังรูปที่ 45(b) และเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมิตัดหัวบอลเพิ่มขึ้น ทำให้พื้นที่สัมผัสมีมากขึ้นเช่นกัน ส่งผลให้แรงป้อนตัดเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นอัตราส่วนแรงตัดจึงมากขึ้น อัตราส่วนแรงตัดเพิ่มขึ้นเมื่อความลึกตัดเพิ่มขึ้นนั้นเนื่องจากพื้นที่หน้าสัมผัสระหว่างมิตัดหัวบอลและเนื้อวัสดุชิ้นงานมากขึ้นเช่นกัน ซึ่งจะเป็นไปในแนวโน้มเดียวกับดังแสดงในรูปพื้นผิวผลตอบที่ 45

#### 4.6 การวิเคราะห์เงื่อนไขการตัดที่เหมาะสม

ในการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดสำหรับงานวิจัยนี้จะพิจารณาที่ค่าความขรุขระผิวน้อยที่สุดเป็นหลักโดยไม่ได้คำนึงถึงต้นทุนการผลิต ด้วยการใช้หลักการ Optimization ฟังก์ชัน Response optimization ของโปรแกรม Minitab โดยในการพิจารณาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมนี้ก็จะพิจารณาผลลัพธ์ของตัวแปรตอบสนองอัตราส่วนแรงตัด ( $F_x/F_z$ ) และผลลัพธ์ของตัวแปรตอบสนองอุณหภูมิ (T) ประกอบไปด้วย



ตารางที่ 17 เงื่อนไขการตัดที่เหมาะสม



สำหรับการหาเงื่อนไขการตัดที่ดีที่สุดที่ให้ความขรุขระผิวน้อยที่สุดแสดงตารางเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมในตารางที่ 17 จะพบว่าความขรุขระผิวที่น้อยที่สุดเกิดขึ้นเมื่อความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดตัดหัวบอลอยู่ในระดับต่ำ ให้ความขรุขระผิวที่น้อยที่สุดอยู่ที่ประมาณ 0.04433 ไมโครเมตร ที่ระดับปัจจัยความเร็วตัดต่ำสุด 8000 รอบต่อนาที อัตราการป้อนต่ำสุด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ระยะลึกตัดต่ำสุด 0.5 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของใบมีดตัดต่ำสุด 6 มิลลิเมตร โดยมีระดับความพึงพอใจโดยรวมอยู่ที่ 98.27%

จากตารางที่ 17 จะสามารถอธิบายได้ตามเงื่อนไขต่างๆได้ดังนี้

ความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้นนั้นจะสังเกตเห็นว่าความขรุขระผิว อัตราส่วนแรงตัด และอุณหภูมิในการตัดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นด้วย เนื่องจากการเคลื่อนที่ของมีดกัดหัวบอลอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนของมีดตัด ขณะที่มีดตัดเคลื่อนที่เข้ากัดกินเนื้อของชิ้นงานจึงทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก อุณหภูมิของมีดตัดจึงสูงขึ้น อัตราสัดส่วนแรงตัดจึงเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ความขรุขระผิวแย่ง

อัตราป้อนตัดที่เพิ่มขึ้นจะสังเกตเห็นว่าความขรุขระผิว อัตราส่วนแรงตัด และอุณหภูมิขณะตัดมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากพื้นที่หน้าสัมผัสของมีดกัดหัวบอลในการกัดบนผิวชิ้นงานเพิ่ม ทำให้ความขรุขระผิวเพิ่มขึ้น ต้องใช้แรงตัดมากขึ้น ทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น แต่ที่อัตราป้อนตัดสูงสุดอาจจะเกิดความร้อนที่สูงขึ้น ทำให้ชิ้นงานอ่อนนุ่มลง มีดกัดหัวบอลจึงสามารถกัดกินชิ้นงานได้ง่ายขึ้น สัดส่วนแรงตัดและค่าความขรุขระผิวจึงน้อยลง

ความลึกตัดที่เพิ่มขึ้นจะสังเกตเห็นว่าความขรุขระผิว อัตราส่วนแรงตัด และอุณหภูมิในการตัดมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากพื้นที่หน้าสัมผัสของมีดตัดหัวบอลจะกัดกินชิ้นงานในทิศทางแกนรัศมีของตัดมากขึ้น ต้องใช้แรงตัดมาก เกิดอุณหภูมิที่สูงขึ้น ให้ความขรุขระผิวแย่ง

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดตัดที่เพิ่มขึ้นจะสังเกตเห็นว่าความขรุขระผิว และอัตราส่วนแรงตัดนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากการเพิ่มของขนาดเม็ดตัดหัวบอลที่มากขึ้นพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเม็ดกัดกับชิ้นงานก็จะเพิ่มมากขึ้น ทำให้อัตราส่วนแรงตัดเพิ่ม ส่งผลให้ความขรุขระผิวแย่งส่วนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดตัดกับอุณหภูมินั้นจะเห็นว่ามีความโน้มถ่วงลดลง เนื่องจากเม็ดตัดที่ใหญ่ขึ้นมีการระบายความร้อนที่ดีกว่าขนาดเล็ก จึงทำให้อุณหภูมิลดต่ำลง แต่ในช่วงของขนาดของเม็ดตัดหัวบอลของสูงสุดที่นั้นอาจจะส่งผลต่ออุณหภูมิน้อยกว่าปัจจัยร่วมอื่นๆที่เพิ่มขึ้นมา ทำให้มีความโน้มถ่วงกลับมาเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

แต่เมื่อพิจารณาจากผลตอบหลัก หรือ ความขรุขระผิว จะได้ดังนี้

ความขรุขระผิวน้อยที่สุดเกิดขึ้นที่ความเร็วตัดที่ต่ำ เนื่องจากความเร็วตัดที่สูง เกิดการเสียดสีระหว่างผิวหน้าอย่างรวดเร็ว ทำให้อุณหภูมิเม็ดตัดสูง ส่งผลให้เนื้อวัสดุชิ้นงานหลอมละลายติดปลายคมของใบมีด ทำให้ต้องใช้แรงตัดมากขึ้น ความขรุขระผิวจึงน้อยลง

ความขรุขระผิวมีค่ามากขึ้นเมื่ออัตราการป้อนตัดเพิ่มขึ้น จากพื้นที่ผิวสัมผัสในการตัดเพิ่มขึ้น อุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น ใช้แรงตัดมากขึ้น ความขรุขระผิวจึงมากขึ้นด้วย

ความขรุขระผิวจะมีค่ามากขึ้น ขณะที่เพิ่มความลึกตัด เนื่องจากพื้นที่สัมผัสของเม็ดตัดหัวบอลและเนื้อวัสดุชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น อัตราส่วนแรงตัดจึงเพิ่มขึ้น ความขรุขระผิวมากขึ้นด้วย

ความขรุขระผิวที่มากขึ้น ขณะที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดตัดหัวบอลเพิ่มขึ้น จากการที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสในการตัดเพิ่มขึ้น แต่อุณหภูมิในการตัดจะต่ำลง เนื่องจากมีพื้นที่ผิวในการระบายความร้อนเพิ่มมากขึ้นในช่วงแรก

ดังนั้น ความขรุขระผิวที่ดีที่สุดของการทดลองนี้ เกิดขึ้นจากความเร็วตัดที่ต่ำ ทำให้อัตราส่วนแรงตัดน้อยลง อัตราป้อนตัดที่เพิ่มมากขึ้นก็จะส่งผลให้ความขรุขระผิวมากด้วย โดยการเพิ่มขึ้นของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดตัดหัวบอลส่งผลให้ความขรุขระผิวมากขึ้น เมื่อความลึกตัดน้อยที่สุดจะทำให้เกิดค่าความขรุขระผิวที่ดีที่สุด เนื่องจากยิ่งความลึกตัดมากจะทำให้แรงตัดมากขึ้นจากการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส จึงส่งผลให้ความขรุขระผิวมากขึ้น

#### 4.7 การทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลอง

แผนการทดลองใหม่ได้ถูกกำหนดขึ้นเพื่อใช้ทดสอบสมการพยากรณ์ความขรุขระผิว (Ra) อัตราส่วนแรงตัด(Fx/Fz) และอุณหภูมิตัด(T) โดยกำหนดให้อยู่ภายใต้ขอบเขตของแต่ละปัจจัยการตัด ดังแสดงได้ในตารางที่ 18

จากรูปที่ 46(a) ถึง 46(c) แสดงค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการทดลองกับค่าความขรุขระผิวที่ได้จากสมการแบบจำลองที่ขนาดอัตราป้อนตัด ความลึกตัด และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดตัด หัวบอลต่างๆ กันตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าความขรุขระผิวที่ได้จากสมการที่ 4.4 และค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการทดลองมีความใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าสมการแบบจำลองที่พัฒนามาสำหรับการพยากรณ์ความขรุขระผิวนั้น สามารถใช้ประมาณความขรุขระผิวได้เป็นอย่างดีภายใต้เงื่อนไขการตัดที่ถูกกำหนดแตกต่างกันไป

โดยรูปที่ 51(a) ถึง 51(c) แสดงอัตราส่วนแรงตัดที่ได้จากการทดลองกับอัตราส่วนแรงตัดที่ได้จากสมการแบบจำลองที่ขนาดอัตราป้อนตัด ความลึกตัด และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดตัด หัวบอลต่างๆ ตามลำดับ พบว่าอัตราส่วนแรงตัดที่ได้จากสมการที่ 4.7 และอัตราส่วนแรงตัดที่ได้จากการทดลองมีความใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าสมการแบบจำลองที่พัฒนามาสำหรับการพยากรณ์อัตราส่วนแรงตัดนั้นสามารถใช้ประมาณอัตราส่วนแรงตัดได้เป็นอย่างดีภายใต้เงื่อนไขการตัดที่ถูกกำหนดแตกต่างกันไป

และรูปที่ 54(a) ถึง 54(c) แสดงอุณหภูมิตัดที่ได้จากการทดลองกับอุณหภูมิตัดที่ได้จากสมการแบบจำลองที่ถูกพัฒนามา กำหนดขนาดอัตราป้อนตัด ความลึกตัด และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดตัดหัวบอลต่างๆ ตามลำดับ พบว่าอุณหภูมิตัดที่ได้จากสมการที่ 4.10 กับอุณหภูมิตัดที่ได้จากการทดลองนั้นมีความใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าสมการแบบจำลองที่พัฒนามาสำหรับการพยากรณ์อุณหภูมิตัดนั้นสามารถใช้ในการประมาณอุณหภูมิตัดได้เป็นอย่างดีภายใต้เงื่อนไขการตัดที่กำหนดแตกต่างกันไป

จากผลการทดลองรูปที่ 46, 51 และ 54 แสดงให้เห็นว่าความขรุขระผิว อัตราส่วนแรงตัด และอุณหภูมิตัดนั้นมีความสัมพันธ์กัน โดยที่ความขรุขระผิวจะดีขึ้นเมื่อความเร็วตัดน้อย เนื่องจากถ้าเพิ่มความเร็วตัดที่ขึ้น จะส่งผลให้อุณหภูมิตัดสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิตัดสูงขึ้น ทำให้อัน্নิวัสคูลอมละลายติดกับคมมีดตัดหัวบอล อัตราส่วนแรงตัดจึงเพิ่มขึ้น

ความขรุขระผิวเพิ่มขึ้น ที่ความลึกตัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากถ้าความลึกตัดมาก จะทำให้มีดตัดหัวบอลกินเนื้อชิ้นงานมากขึ้น พื้นหน้าสัมผัสระหว่างมีดตัดหัวบอลและเนื้อวัสดุชิ้นงานจึงมากขึ้น ส่งผลให้ความขรุขระผิวเพิ่มมากขึ้น แสดงดังในรูปที่ 47 และ 48

การเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดตัดหัวบอล ส่งผลต่อความขรุขระผิวเพิ่มขึ้น เนื่องจากพื้นที่หน้ามีดตัดหัวบอลที่มากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 49 อัตราส่วนแรงตัด จึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย

ซึ่งความสัมพันธ์ของทั้งสามผลตอบ คือ ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวกับความเร็วในการตัด ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขณะตัดกับความเร็วตัด และความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงตัดกับความเร็วในการตัด แสดงแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน แม้ว่าความลึกตัดและอัตราป้อนตัดจะแตกต่างกันไป นั้นหมายความว่าสัดส่วนแรงตัดสามารถใช้ประมาณความขรุขระผิวได้ เนื่องจากทั้งอัตราส่วนแรงตัด อุณหภูมิตัด และความขรุขระผิวนั้นมีความสัมพันธ์กัน

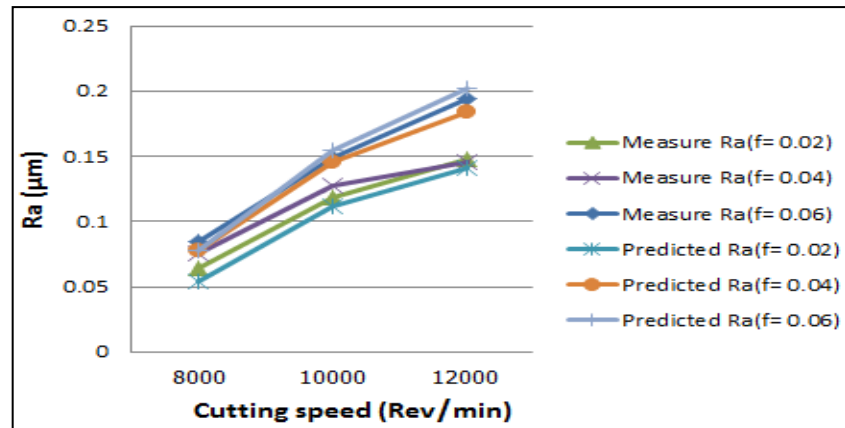


ตารางที่ 18 ข้อมูลที่ได้จากการทดลองเพื่อยืนยันผล

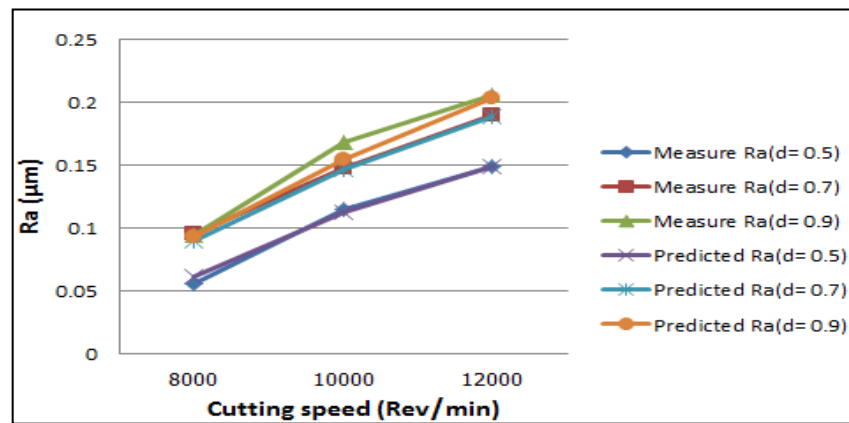
No.	Cutting speed	Feed rate	Depth of cut	Tool Diameter	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Fx/Fz	Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )
1	8000	0.02	0.7	8	0.052	1.4683	399.94
2	8000	0.04	0.7	8	0.075	2.851	402.09
3	8000	0.06	0.7	8	0.084	2.9729	407.54
4	10000	0.02	0.7	8	0.118	1.9066	412.76
5	10000	0.04	0.7	8	0.138	2.825	430.92
6	10000	0.06	0.7	8	0.149	3.0426	434.19
7	12000	0.02	0.7	8	0.148	2.1179	426.46
8	12000	0.04	0.7	8	0.175	3.6425	443.63
9	12000	0.06	0.7	8	0.194	3.5833	443.81
10	8000	0.04	0.5	8	0.056	1.8686	396.62
11	8000	0.04	0.7	8	0.095	2.851	407.7
12	8000	0.04	0.9	8	0.094	2.998	423.13
13	10000	0.04	0.5	8	0.115	1.9219	407.63
14	10000	0.04	0.7	8	0.148	2.825	419.56

ตารางที่ 18 ข้อมูลที่ได้จากการทดลองเพื่อยืนยันผล (ต่อ)

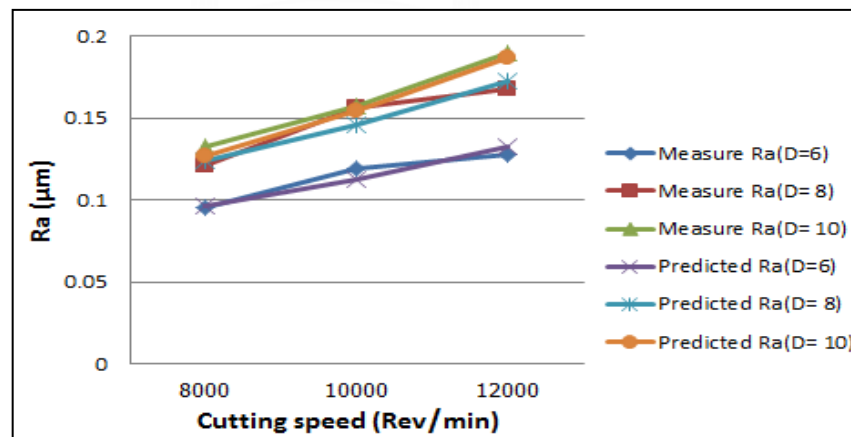
No.	Cutting speed	Feed rate	Depth of cut	Tool Diameter	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Fx/Fz	Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )
15	10000	0.04	0.9	8	0.168	3.2018	430.92
16	12000	0.04	0.5	8	0.149	2.7124	414.96
17	12000	0.04	0.7	8	0.189	3.6425	429.91
18	12000	0.04	0.9	8	0.205	4.1207	433.5
19	8000	0.04	0.7	6	0.095	2.851	407.63
20	8000	0.04	0.7	8	0.121	2.825	393
21	8000	0.04	0.7	10	0.133	2.9232	391.91
22	10000	0.04	0.7	6	0.119	2.825	427.96
23	10000	0.04	0.7	8	0.156	2.9232	406.97
24	10000	0.04	0.7	10	0.157	3.2501	401.36
25	12000	0.04	0.7	6	0.128	3.6425	442.6
26	12000	0.04	0.7	8	0.168	3.5833	419.93
27	12000	0.04	0.7	10	0.19	3.5824	414.3



(a)



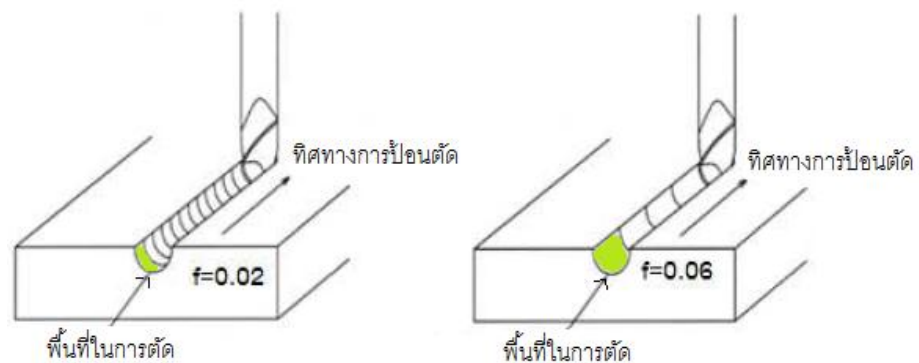
(b)



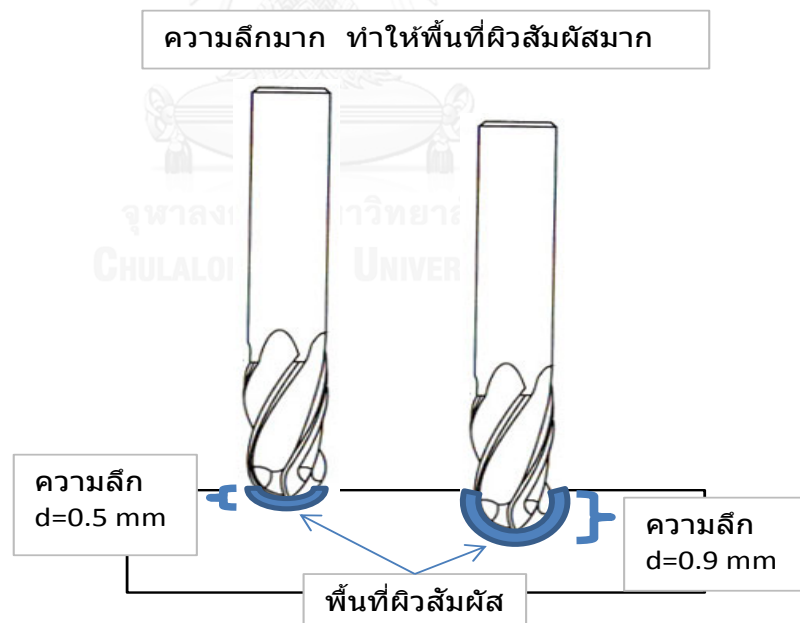
(c)

รูปที่ 46 ค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับค่าความขรุขระผิวจากการคำนวณของสมการแบบจำลองที่ (a) อัตราป้อนตัดต่างๆ (b) ความลึกตัดต่างๆ (c) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดตัดหัวบอลต่างๆ

จากรูปที่ 46 แสดงการเปรียบเทียบความขรุขระผิวจากสมการแบบจำลองที่พัฒนามากับผลการทดลองจริงกับความเร็วตัดที่อัตราป้อนตัด (a) ความลึกตัด(b) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดตัดหัวบอลต่างๆ(c) พบว่าเมื่อความเร็วตัดเพิ่มขึ้นจะทำให้ความขรุขระผิวเพิ่มขึ้น ทั้งหมด 3 ปัจจัย โดยที่การเพิ่มขึ้นของแต่ละปัจจัยนั้นจะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในการตัดชิ้นงาน ทำให้ต้องใช้แรงในขณะตัดที่เพิ่มมากขึ้น เมื่อเกิดแรงในการตัดเพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนบริเวณหัวมีดตัดที่มากขึ้น จากการหมุนของใบมีดตัดที่แรงขึ้นดังรูปที่ 47 ความขรุขระผิวของชิ้นงานจึงเพิ่มขึ้น

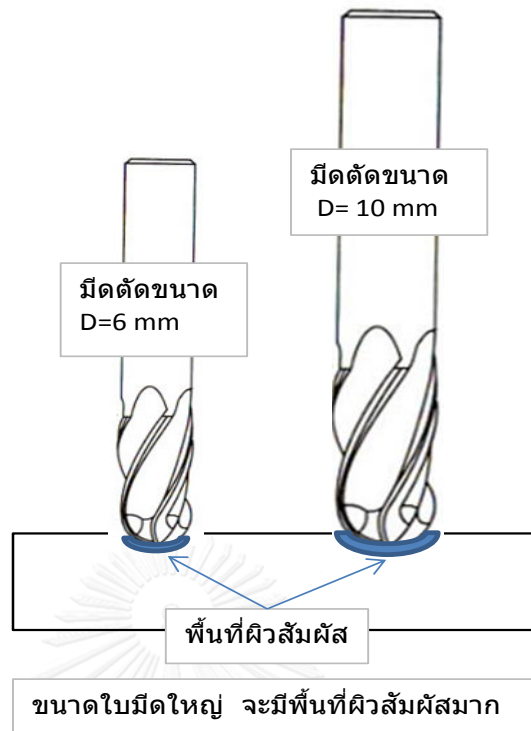


รูปที่ 47 พื้นที่ผิวสัมผัสที่เพิ่มขึ้นจากอัตราป้อนตัดที่เพิ่มขึ้น

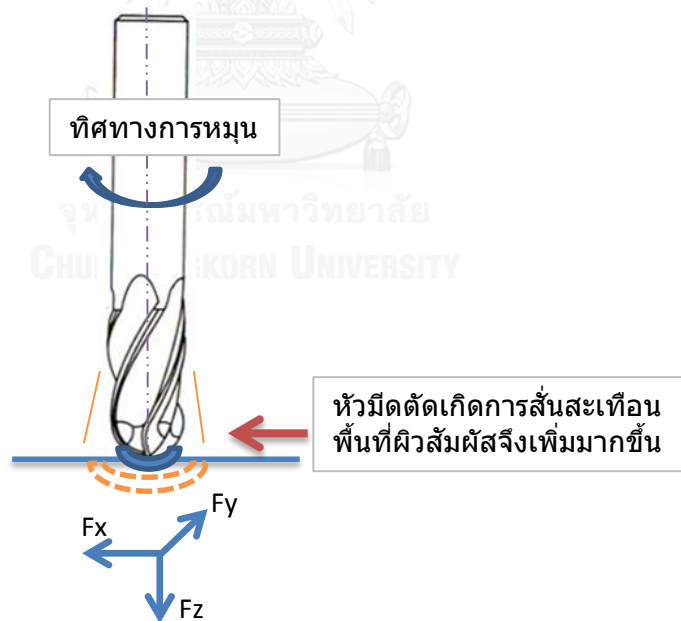


รูปที่ 48 พื้นที่ผิวสัมผัสที่เพิ่มขึ้นจากความลึกตัดที่เพิ่มขึ้น

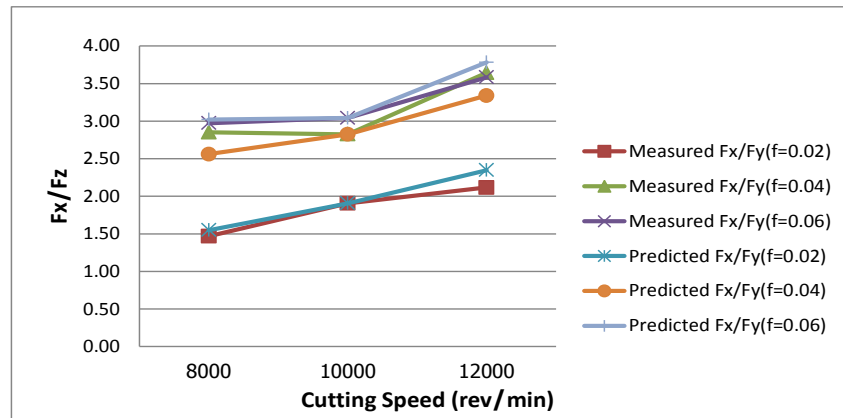




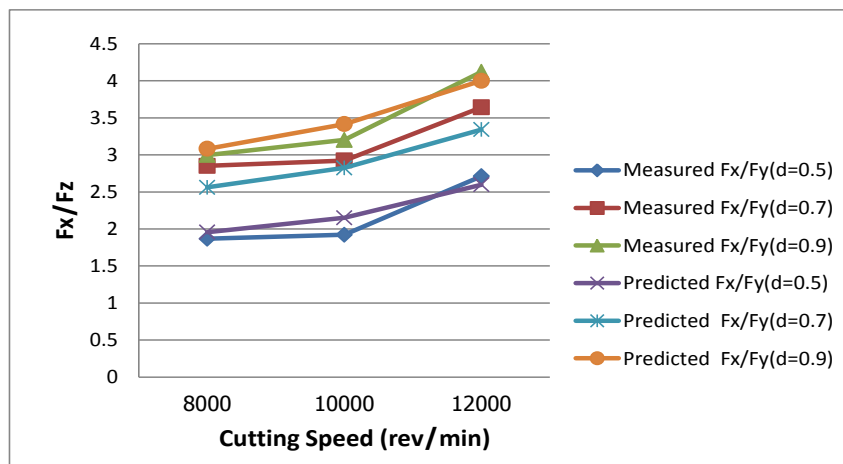
รูปที่ 49 พื้นที่ผิวสัมผัสที่เพิ่มขึ้นจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัดหัวบอลที่เพิ่มขึ้น



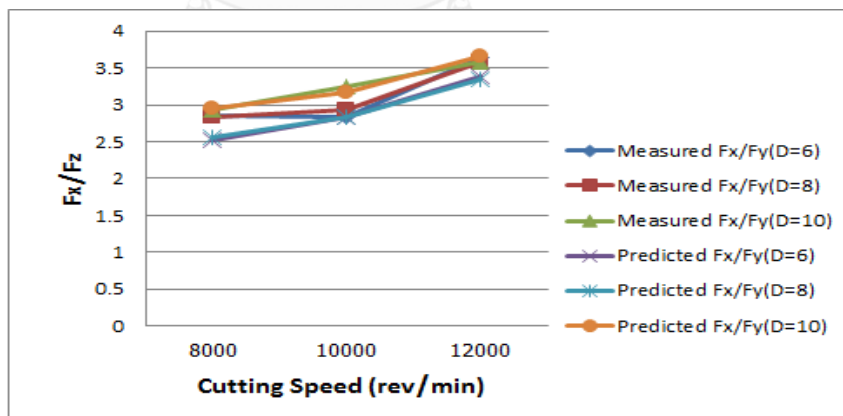
รูปที่ 50 พื้นที่ผิวสัมผัสที่เพิ่มขึ้นจากการสั่นสะเทือน



(a)



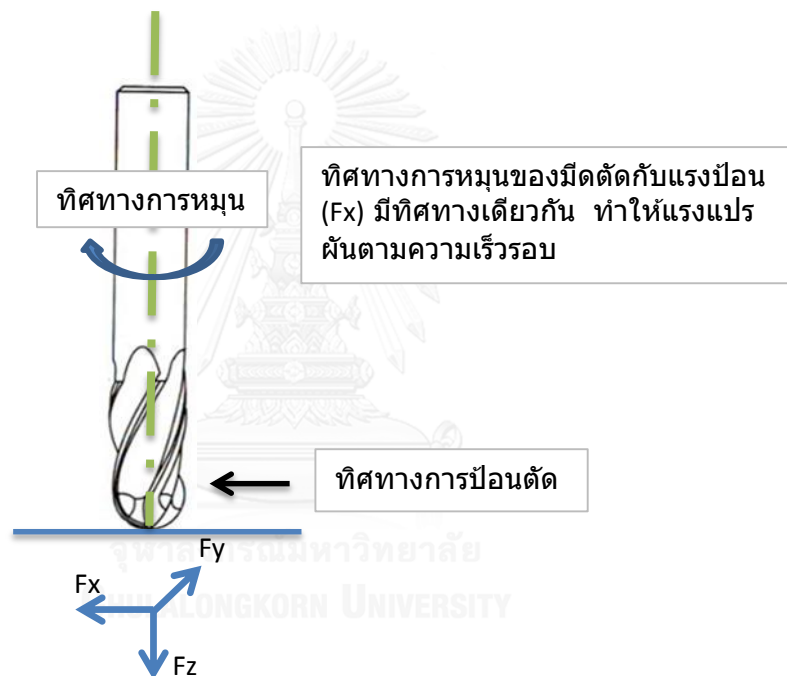
(b)



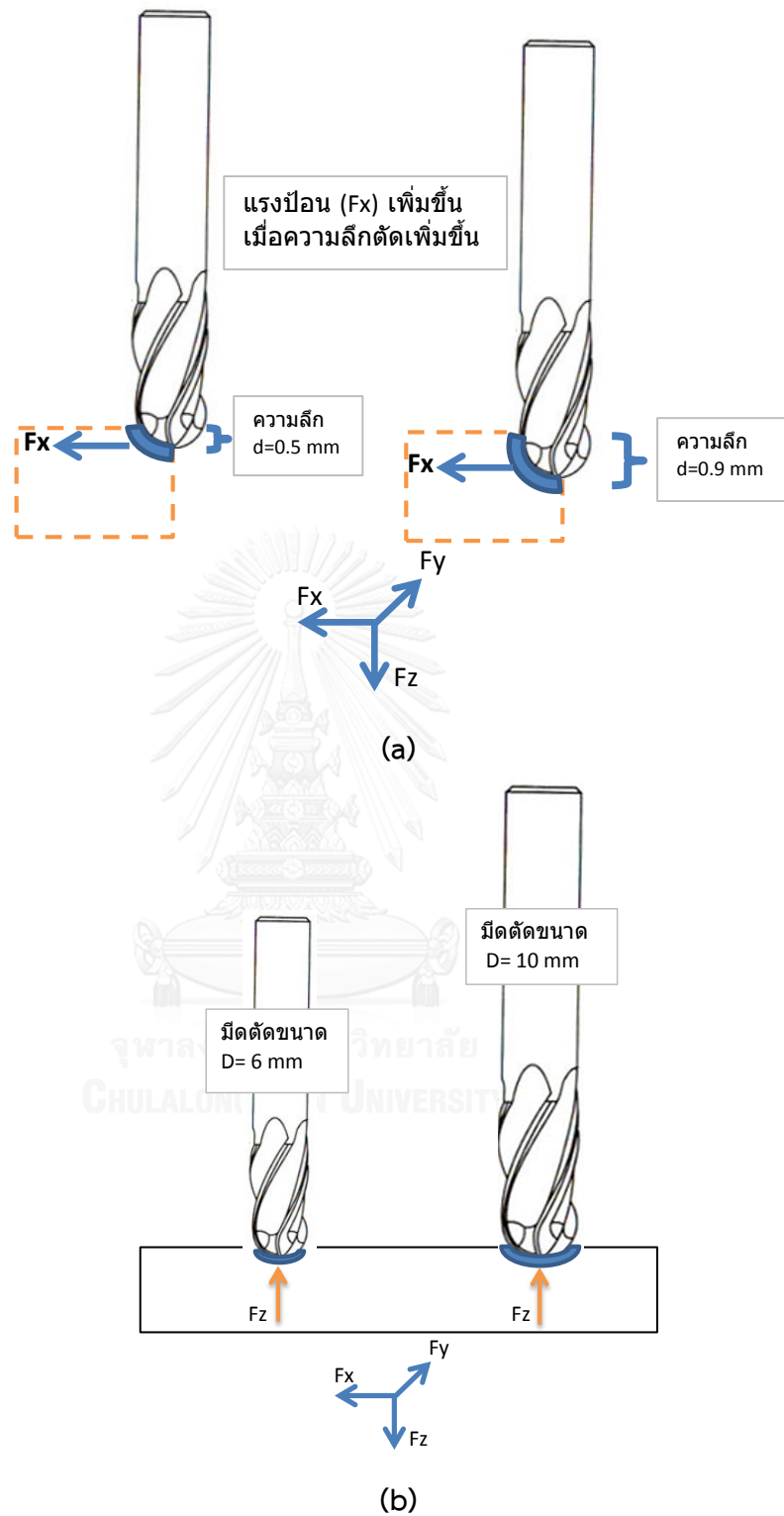
(c)

รูปที่ 51 อัตราส่วนแรงตัดจากผลการทดลองจริงกับอัตราส่วนแรงตัดจากการคำนวณ สมการแบบจำลองที่ (a) อัตราป้อนตัดต่างๆ (b) ความลึกตัดต่างๆ (c) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ มีดตัดหัวบอลต่างๆ

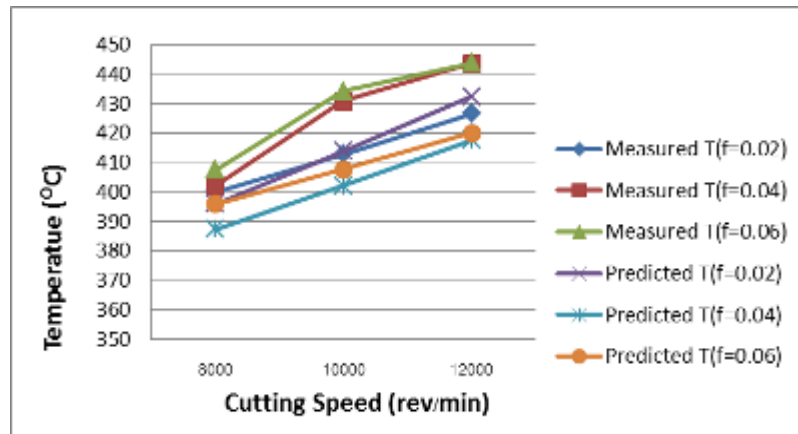
จากรูปที่ 51 แสดงการเปรียบเทียบอัตราส่วนแรงตัดจากสมการแบบจำลองที่ถูกพัฒนามา กับผลการทดลองจริงกับความเร็วดัดที่อัตราการป้อนตัด (a) ความลึกตัด(b) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดตัดหัวบอลต่างๆ(c) พบว่าที่ความเร็วดัดเพิ่มขึ้นนั้นจะส่งผลให้อัตราส่วนแรงเพิ่มขึ้นทั้งหมด 3 ปัจจัย โดยที่เมื่อเพิ่มค่าของแต่ละปัจจัย จะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในการตัดชิ้นงาน ทำให้ต้องใช้แรงในขณะตัดที่เพิ่มมากขึ้น การเกิดแรงในการตัดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การสั่นสะเทือนบริเวณหัวมีดตัดเพิ่มขึ้นจากการหมุนของมีดตัดหัวบอลที่แรงขึ้น ชิ้นงานถูกตัดในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ขนาดของแรงตามแนวแกนป้อน ( $F_x$ ) มีค่าเพิ่มมากขึ้นและเพิ่มมากกว่าแรงในแนวตั้งฉากกับชิ้นงาน ( $F_z$ ) ดังนั้นจึงส่งผลให้อัตราส่วนของแรงมีค่าเพิ่มมากขึ้น



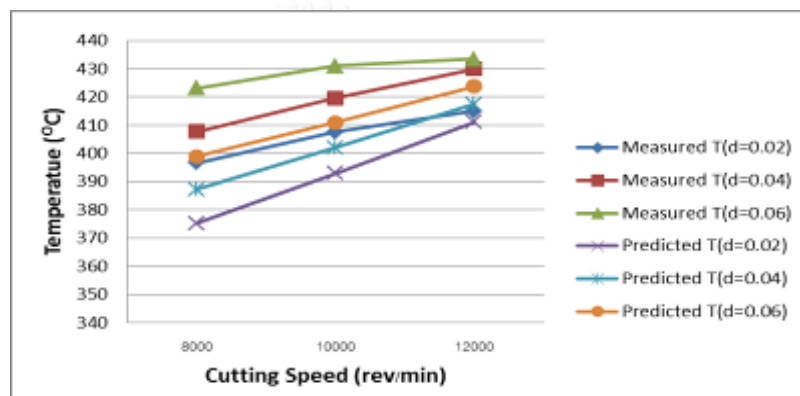
รูปที่ 52 ทิศทางตามแนวแกน



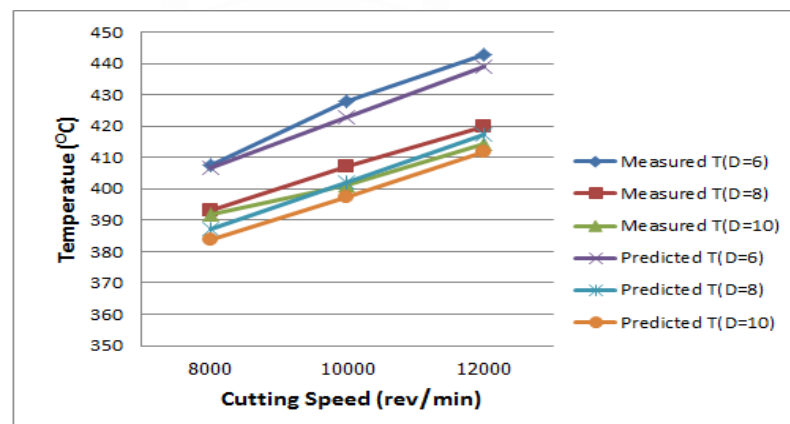
รูปที่ 53 (a) พื้นที่ผิวสัมผัสตามทิศทางแรงป้อนตัด  $F_x$  และ (b) พื้นที่ผิวสัมผัสตามแนวตั้งฉากกับชิ้นงาน  $F_z$



(a)



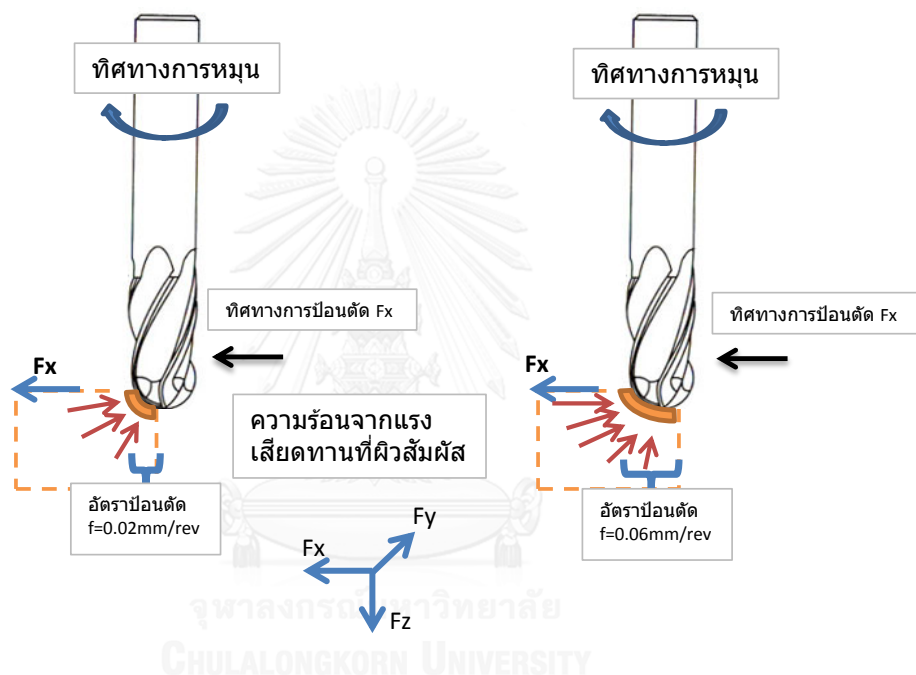
(b)



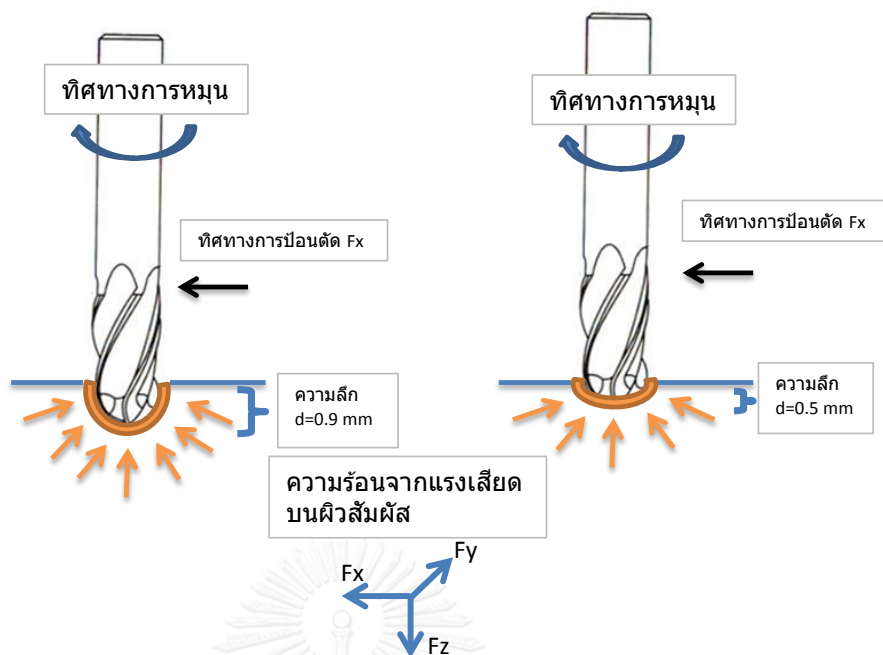
(c)

รูปที่ 54 อุณหภูมิตัดจากผลการทดลองจริงเปรียบเทียบกับอุณหภูมิตัดจากการคำนวณ  
 สมการแบบจำลองที่ (a) อัตราป้อนตัดต่างๆ (b) ความลึกตัดต่างๆ (c) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีด  
 ตัดหัวบอลต่างๆ

จากรูปที่ 54 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิจากสมการแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมากับผลการทดลองจริงที่อัตราการป้อนตัด (a) ความลึกตัด(b) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดตัดหัวบอลต่างๆ(c) พบว่าที่ความเร็วตัดเพิ่มขึ้น การเพิ่มอัตราการป้อนตัด และความลึกตัด จะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในการตัดกินชิ้นงาน ทำให้ต้องใช้แรงในขณะตัดที่มากขึ้น เกิดการสั่นสะเทือนและความร้อนบริเวณหัวมีดตัด ทำให้อุณหภูมิที่หัวมีดตัดจึงสูงขึ้น ในขณะที่ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัดหัวบอลที่เพิ่มขึ้นนั้นจะทำให้มีพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อนบนมีดตัดมากขึ้น ส่งผลให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัดที่มีขนาดใหญ่กว่าจึงมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กกว่า

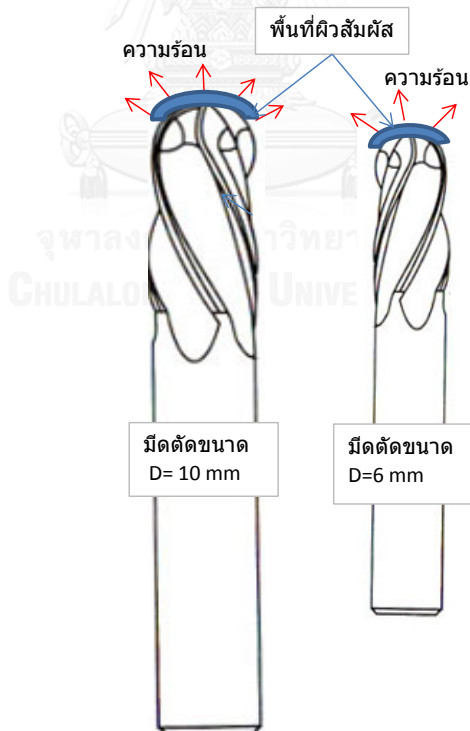


รูปที่ 55 ขนาดพื้นที่ผิวสัมผัสในเงื่อนไขการตัดระหว่าง  $f=0.02$  และ  $f=0.06$  mm/rev



รูปที่ 56 ขนาดพื้นที่ผิวสัมผัสในเงื่อนไขการตัดระหว่าง  $d=0.5$  และ  $d=0.9$  mm

ขนาดใบมีดใหญ่ จะมีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก ระบายความร้อนได้ดี



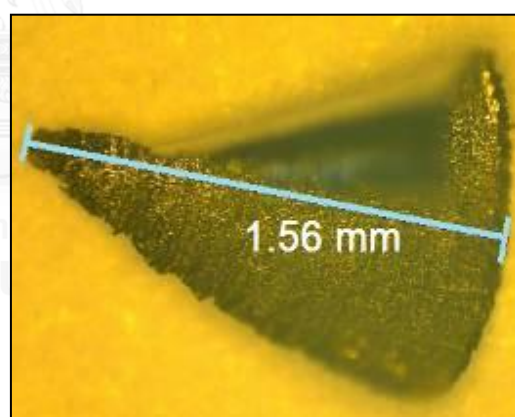
รูปที่ 57 ขนาดพื้นที่ผิวสัมผัสในเงื่อนไขการตัดระหว่าง  $D=10$  และ  $D=6$  mm.

#### 4.7 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างเศษโลหะ เงื่อนไขการตัด ความขรุขระผิว ลัดส่วนแรงตัด และอุณหภูมิในการตัด

เศษโลหะนั้นเกิดจากเนื้อวัสดุของชิ้นงานที่ถูกตัดออกด้วยมีดตัดเฉือนเพื่อให้ได้ลักษณะของชิ้นงานตามที่ต้องการ ซึ่งรูปร่างของเศษโลหะจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับอิทธิพลของหลายตัวแปร เช่น ชนิดของวัสดุของชิ้นงาน ลักษณะของมีดตัด รวมถึงเงื่อนไขที่นำมาทำการทดลองในงานวิจัยนี้ด้วย ทั้งความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดตัดหัวบอล อุณหภูมิในขณะตัด และแรงที่เกิดขึ้นในขณะตัด จากผลการทดลองที่เกิดขึ้น เมื่อมองด้วยตาเปล่าเศษโลหะที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นเศษผงดังรูปที่ 58 (a) ซึ่งเกิดจากเนื้อวัสดุที่มีความเหนียวในระดับหนึ่ง เมื่อใช้กล้องที่มีกำลังขยาย 100X ส่องที่เศษผงนั้นจะเห็นลักษณะแต่ละชิ้นคล้ายรูปกรวยสามเหลี่ยมดังรูปที่ 58 (b) เกิดจากลักษณะใบมีดตัดที่มีลักษณะเป็นโค้งเป็นทรงกลมหรือเป็นแบบหัวบอล เมื่อตัดเฉือนบนผิวชิ้นงานจึงมีลักษณะโค้งรับกับผิวหน้าของคมตัด โดยจะมีขนาดความกว้าง ความหนา และความยาว ที่แตกต่างกันไปในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง



(a)

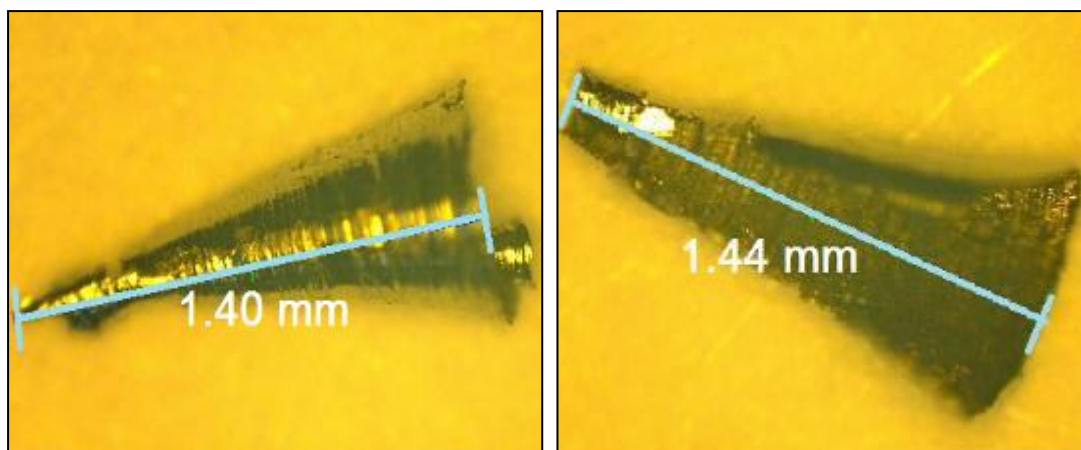


(b)

**รูปที่ 58** ลักษณะเศษโลหะที่จากเงื่อนไขการตัด 12000\_0.04\_0.5\_8 (a) ภาพที่ถ่ายจากกล้องปกติ (b) ภาพที่ถ่ายด้วยกล้องที่มีกำลังขยาย 100X

รูปที่ 58 เป็นการตัดที่เงื่อนไขการตัดที่ความเร็วตัด 12000 รอบต่อนาที, อัตราการป้อนตัดที่ 0.04 มิลลิเมตรต่อรอบ, ความลึกตัดที่ 0.5 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดตัดหัวบอล 6 มิลลิเมตร





(a) 8000\_0.02\_0.7\_8

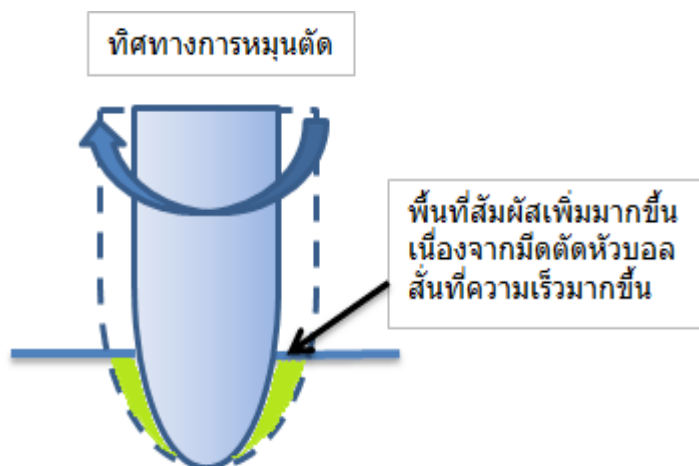
(b) 12000\_0.02\_0.7\_8

รูปที่ 59 เศษโลหะที่เงื่อนไขการตัด (a) 8000\_0.02\_0.7\_8 (b) 12000\_0.02\_0.7\_8

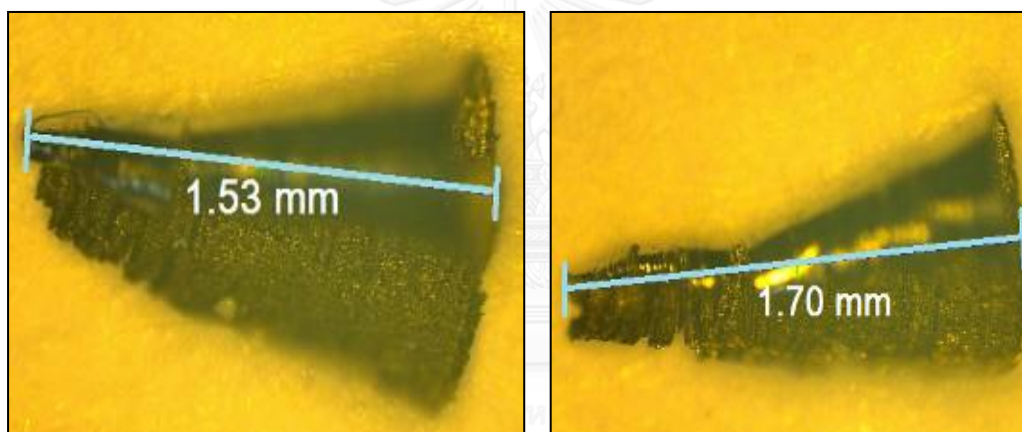
รูปที่ 59 (a) เป็นเศษโลหะที่มาจากการตัดด้วยเงื่อนไขที่ ความเร็วตัด 8000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.7 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัด 8 มิลลิเมตร และรูปที่ 59 (b) เป็นเศษโลหะที่มาจากการตัดด้วยเงื่อนไขที่ ความเร็วตัด 12000 รอบต่อนาที, อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ, ความลึกตัด 0.7 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัดหัวบอล 8 มิลลิเมตร

เศษโลหะที่มาจากการตัดด้วยเงื่อนไขทั้งสอง ทำให้เกิดเศษโลหะที่มีความยาวและความหนาแตกต่างกันเล็กน้อย โดยรูปที่ 59 (a) และ 59 (b) มีความแตกต่างกันที่เร็วตัด ซึ่งจะสามารถอธิบายได้ว่าที่ความเร็วตัดน้อยนั้น ลักษณะเศษโลหะจะม้วนเป็นกรวยและบางมากกว่าที่ความเร็วตัดมาก เนื่องจากที่ความเร็วตัดมากทำให้เกิดการแตกหักที่ดีกว่า อันเป็นผลมาจากความร้อนที่มีมากกว่า และการเกิดสะเก็ดที่เอนมากก็มีผลส่งผลให้มีดตัดหัวบอลและชิ้นงานมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้นจึงทำให้ความยาว ความหนาของเศษโลหะ และความขรุขระผิวที่เกิดขึ้นของเงื่อนไขการตัด (b) จึงมีค่ามากกว่าเงื่อนไขการตัด (a) ตามผลการทดลอง โดยที่เงื่อนไข (a) จะมีค่าความขรุขระผิวอยู่ที่  $0.056 \mu\text{m}$  ในขณะที่เงื่อนไขการตัด (b) มีค่าอยู่ที่  $0.078 \mu\text{m}$

ดังนั้น จากเศษโลหะที่เกิดขึ้นดังรูป 59 สามารถอธิบายได้ว่า เมื่อเพิ่มความเร็ว (V) แล้วทำให้ความยาวของเศษโลหะยาวมากขึ้น เนื่องจากความเร็ว (V) เพิ่มขึ้น เกิดการสะเก็ดที่เอนมากขึ้น พื้นที่สัมผัสในการตัดมากขึ้น ทำให้แรงตัดมากขึ้น อุณหภูมิจึงเพิ่มมากขึ้น ดังรูปที่ 60 ทำให้ค่าความเรียบผิวน้อยลง ดังแสดงได้ตามรูปพื้นผิวตอและเส้นโครงร่างในรูปที่ 44 และ 45 ตามลำดับ



รูปที่ 60 พื้นที่สัมผัสเพิ่มมากขึ้น เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น



(a) 10000\_0.02\_0.7\_6 (b) 10000\_0.06\_0.7\_6

รูปที่ 61 เศษโลหะที่เจือปนไขการตัด (a) 10000\_0.02\_0.7\_6 (b) 10000\_0.06\_0.7\_6

รูปที่ 61 (a) เป็นเศษโลหะที่มาจากการตัดด้วยเงื่อนไขที่ ความเร็วตัด 10000 มิลลิเมตรต่อรอบ อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.7 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัด 6 มิลลิเมตร และรูปที่ 61 (b) ความเร็วตัด 10000 รอบต่อนาที, อัตราป้อนตัด 0.06 มิลลิเมตรต่อรอบ, ความลึกตัด 0.7 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัด 6 มิลลิเมตร

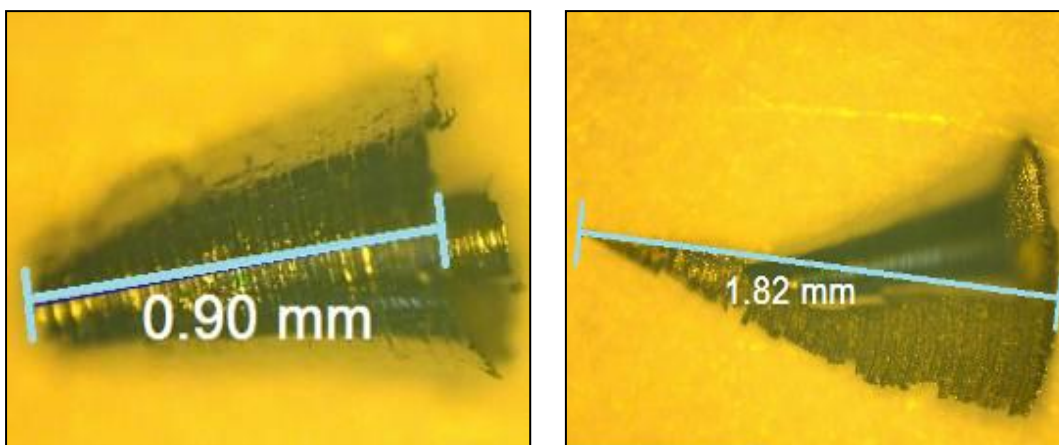
เศษโลหะที่มาจากการตัดด้วยเงื่อนไขทั้งสอง ทำให้เกิดเศษโลหะที่มีลักษณะความยาว ความหนาและความกว้างแตกต่างกัน โดยรูปที่ 61 (a) และ (b) มีความแตกต่างกันที่อัตราป้อนตัด สามารถอธิบายได้ว่าที่อัตราการป้อนตัดส่งผลโดยตรงกับความหนาและความยาวของเศษโลหะ เนื่องจากทิศทางการป้อนตัดเป็นทิศทางเดียวกันกับเศษโลหะที่เกิดขึ้น โดยที่อัตราการป้อนตัดมาก จะ

กินเนื้อของวัสดุทางด้านแกนป้อนตัด  $F_x$  มาก ทำให้เกิดความหนาและความยาวของเศษโลหะมาก เนื่องจากพื้นที่หน้าสัมผัสของมีดตัดกับชิ้นงานมาก และเกิดแรงต้านบนผิวมากด้วย ส่งผลให้ขนาดรูปทรงกรวยของเศษโลหะที่มีอัตราป้อนมากมีลักษณะแคบกว่าที่อัตราการป้อนตัดน้อยจากแรงที่บีบอัด ความขรุขระผิวที่เกิดขึ้นของเงื่อนไขการตัด (b) จึงมีค่ามากกว่าเงื่อนไขการตัด (a) มาก ดังผลการทดลอง โดยที่เงื่อนไขการตัด (b) มีค่าความขรุขระผิวเท่ากับ  $0.145 \mu\text{m}$  ซึ่งมากกว่าเงื่อนไขการตัด (a) ที่มีค่าเท่ากับ  $0.068 \mu\text{m}$  อยู่มาก

ดังนั้น สรุปได้ว่าเศษโลหะที่เกิดขึ้นดังรูป 61 สามารถอธิบายได้ว่า เมื่อเพิ่มอัตราป้อนตัด (f) แล้ว ทำให้ความหนา และความยาวของเศษโลหะมากขึ้น เนื่องจากอัตราป้อนตัด (f) เพิ่ม ขนาดพื้นที่สัมผัสในการตัดจึงมากขึ้น ทำให้แรงตัดมากขึ้น อุณหภูมิเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ดังรูปที่ 62 ทำให้ค่าความเรียบผิวน้อยลง ดังแสดงได้ตามรูปพื้นผิวดอปและเส้นโครงร่างในรูปที่ 44 และ 45 ตามลำดับ



รูปที่ 62 พื้นที่สัมผัสเพิ่มมากขึ้น เมื่อความอัตราป้อนตัดเพิ่มขึ้น



(a) 10000\_0.04\_0.5\_10

(b) 10000\_0.04\_0.9\_10

รูปที่ 63 เศษโลหะที่เจือไนเซียมการตัด (a) 10000\_0.04\_0.5\_10 (b) 10000\_0.04\_0.9\_10

รูปที่ 63 (a) เป็นเศษโลหะที่มาจาก การตัดด้วยเจือไนเซียมที่ ความเร็วตัด 10000 รอบต่อนาที, อัตราป้อนตัด 0.04 มิลลิเมตรต่อรอบ, ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัด 10 มิลลิเมตร และรูปที่ 63 (b) เป็นการตัดด้วยเจือไนเซียมการตัด คือ ความเร็วตัด 10000 รอบต่อนาที, อัตราป้อนตัด 0.04 มิลลิเมตรต่อรอบ, ความลึกตัด 0.9 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัด 10 มิลลิเมตร

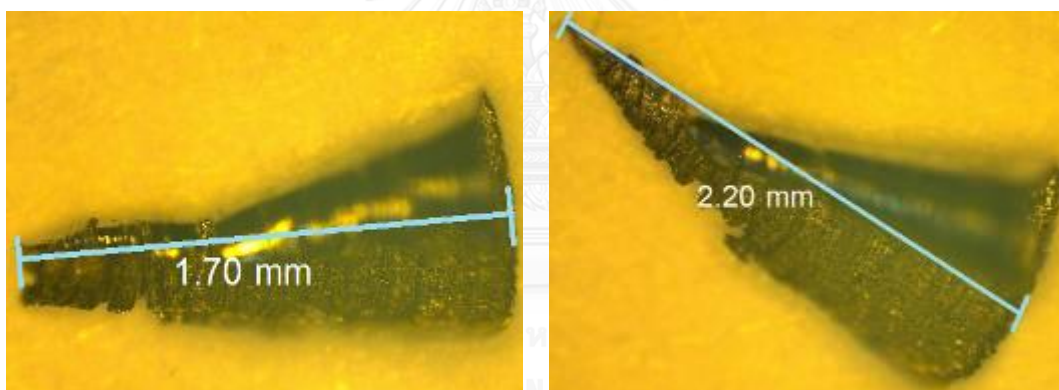
เศษโลหะที่มาจาก การตัดด้วยเจือไนเซียมทั้งสอง ทำให้เกิดเศษโลหะที่มีความหนาและความยาวแตกต่างกันเป็นอย่างมาก โดยรูปที่ 63 (a) และ 63 (b) มีความแตกต่างกันที่ความลึกตัดสามารถอธิบายได้ว่าที่ความลึกตัดสูง จะกินเนื้อชิ้นงานในแนวแกน Z ทำให้แรงกดไปที่หน้าสัมผัสผิวชิ้นงาน มีผลต่อความเรียบผิวโดยตรง เกิดเศษโลหะที่มีความหนาและความยาวมากกว่า เนื่องจากความลึกตัดมีทิศทางเดียวกันกับแรงตัดหลักที่กินเนื้อของชิ้นงาน ความลึกตัดที่สูงนั้นจะทำให้เกิดความร้อนในขณะตัดที่สูงด้วย การแตกหักจึงดีกว่าที่ความลึกตัดต่ำ ที่ความลึกตัดต่ำจึงมีลักษณะเป็นกรวยซ้อนกันหลายชั้นและมีความขรุขระผิวน้อยกว่าตามผลการทดลอง จึงเห็นว่าค่าความขรุขระผิวของเจือไนเซียมการตัด (a) มีค่าความขรุขระผิวเท่ากับ  $0.105 \mu\text{m}$  ในขณะที่เจือไนเซียมการตัด (b) มีค่าอยู่ที่  $0.208 \mu\text{m}$

ดังนั้น สรุปได้ว่าเศษโลหะที่เกิดขึ้นดังรูป 63 สามารถอธิบายได้ว่า เมื่อเพิ่มความลึกตัดแล้ว ทำให้ความหนา และความยาวของเศษโลหะมากขึ้น เนื่องจากความลึกตัดเพิ่มขึ้น (d) ขนาดพื้นที่สัมผัสในการตัดจึงมากขึ้น เกิดแรงตัดมากขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น ดังรูปที่ 64 ทำให้ค่าความเรียบผิวน้อยลง ดังแสดงได้ตามรูปพื้นผิวตอและเส้นโครงร่างในรูปที่ 44 และ 45 ตามลำดับ



ความเสียดมาก ทำให้พื้นที่สัมผัสมาก

รูปที่ 64 พื้นที่สัมผัสเพิ่มมากขึ้น เมื่อความเสียดเพิ่มมากขึ้น



(a) 10000\_0.06\_0.7\_6

(b) 10000\_0.06\_0.7\_10

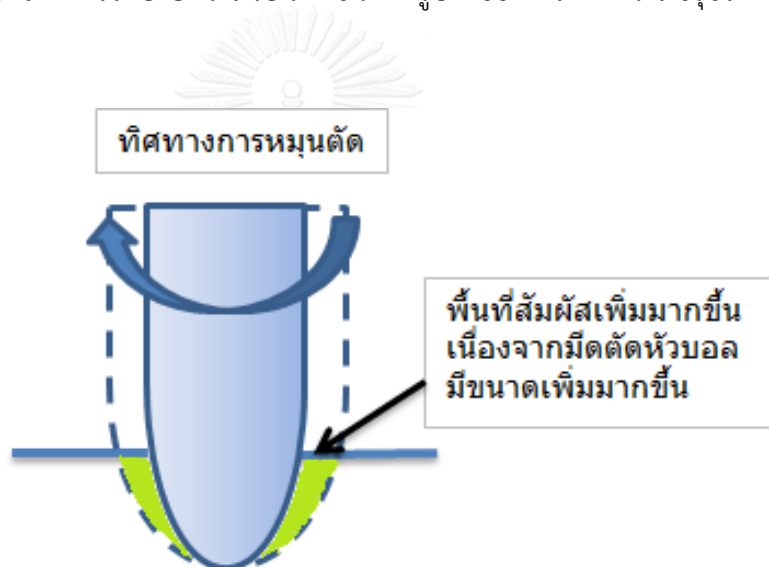
รูปที่ 65 เศษโลหะที่เงื่อนไขการตัด (a) 10000\_0.06\_0.7\_6 (b) 10000\_0.06\_0.7\_10

รูปที่ 65 (a) เป็นเศษโลหะที่มาจาก การตัดด้วยเงื่อนไข ที่ความเร็วตัดเท่ากับ 10000 รอบต่อนาที, อัตราป้อนตัด 0.06 มิลลิเมตรต่อรอบ, ความเสียดตัด 0.7 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดตัด 6 มิลลิเมตร และรูปที่ 65 (b) เป็นการตัดด้วยเงื่อนไขการตัด คือ ความเร็วตัด 10000 รอบต่อนาที, อัตราป้อนตัด 0.06 มิลลิเมตรต่อรอบ, ความเสียดตัด 0.7 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดตัดหัวบอล 10 มิลลิเมตร

เศษโลหะที่มาจาก การตัดด้วยเงื่อนไขทั้งสอง ทำให้เกิดเศษโลหะที่มีความหนาและความยาวแตกต่างกันเล็กน้อย โดยรูปที่ 65 (a) และ 65 (b) มีความแตกต่างกันที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดตัดหัวบอล สามารถบอกได้ว่าที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดตัดที่น้อยจะมีความร้อน

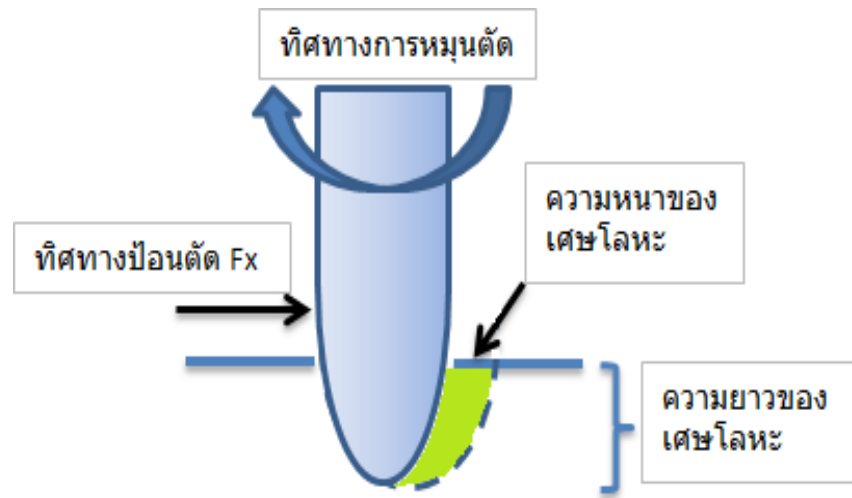
มากกว่าเนื่องจากพื้นที่ผิวของมีดตัดมีน้อยกว่ามีดตัดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่ การระบายความร้อนจึงน้อยกว่า ทำให้เศษโลหะเกิดการแตกหักง่ายกว่า จากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัดที่มากจะเกิดพื้นที่ผิวสัมผัสในการกินเนื้อชิ้นงานที่มากกว่า ทำให้มีความยาวมากกว่า เกิดความขรุขระผิวมากกว่าจากผลการทดลอง จะเห็นว่าเงื่อนไขการตัด (a) จะมีค่าความขรุขระผิวอยู่ที่  $0.145 \mu\text{m}$  ในขณะที่เงื่อนไขการตัด (b) มีค่าอยู่ที่  $0.25 \mu\text{m}$

ดังนั้น สรุปได้ว่าเศษโลหะที่เกิดขึ้นดังรูป 65 สามารถอธิบายได้ว่า เมื่อเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัดหัวบอล (D) แล้ว ทำให้ความยาวของเศษโลหะยาวมากขึ้น เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัดหัวบอล (D) เพิ่ม ขนาดพื้นที่สัมผัสในการตัดจึงมากขึ้น เกิดแรงตัดมากขึ้น อุณหภูมิมีน้อยลงเนื่องจากการระบายความร้อนที่ดีขึ้น ดังรูปที่ 66 ทำให้ค่าความขรุขระผิวมากขึ้นดังแสดงได้ในรูป



รูปที่ 66 พื้นที่สัมผัสเพิ่มมากขึ้น เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดตัดหัวบอลเพิ่มขึ้น

จากการวิเคราะห์เศษโลหะจากเงื่อนไขในการตัดต่างๆ เมื่อพิจารณาจากผลตอบทั้งสาม คือ ความเรียบผิว สัดส่วนแรงตัด และอุณหภูมิในการตัด จะสรุปได้ว่าเมื่อเพิ่มปัจจัยในการตัดทั้งความเร็วตัด (V) อัตราป้อนตัด (f) ความลึกตัด (d) จะส่งผลให้พื้นที่ผิวสัมผัสเพิ่มมากขึ้น ทำให้ความขรุขระผิว (Ra) สัดส่วนแรงตัด ( $F_x/F_z$ ) และอุณหภูมิ (T) เพิ่มมากขึ้น ยกเว้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดตัดหัวบอล (D) เท่านั้นที่เมื่อมีขนาดใหญ่ขึ้น พื้นที่ผิวสัมผัสเพิ่มขึ้น ทำให้ความขรุขระผิว และแรงตัดเพิ่มมากขึ้น แต่อุณหภูมิจะลดลงจากการระบายความร้อนที่ดีกว่าบนผิวสัมผัสที่มากกว่า โดยที่ขนาดความหนาของเศษโลหะจะขึ้นกับอัตราป้อนตัด และความยาวของเศษโลหะก็จะขึ้นกับความลึกตัดโดยตรง แสดงดังรูปที่ 67



รูปที่ 67 พื้นที่การเกิดเศษโลหะของแต่ละเส้นไข





## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ คือ การศึกษาความขรุขระผิวและแรงตัดร่วมกับอุณหภูมิในการตัดเหล็กกล้า S50C สำหรับกระบวนการกัดด้วยมีดตัดหัวบอล โดยการประยุกต์ใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขงานกัดต่างๆ ทั้งแรงตัด และอุณหภูมิ สำหรับใช้อธิบายปรากฏการณ์ในการวิเคราะห์ค่าความขรุขระผิว และสามารถหาค่าของเงื่อนไขงานกัดที่เหมาะสมที่สุดที่ให้ความขรุขระผิวน้อยสุดก่อนทำการตัดจริงสำหรับเหล็กกล้าคาร์บอน S50C กับมีดกัดหัวบอลในช่วงค่าที่กำหนด ด้วยการสร้างสมการความขรุขระผิวขึ้นมาประมาณค่า

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากข้อมูลที่ได้ทำการบันทึกนั้นจะมีด้วยกันอยู่ 3 ผลตอบ ทั้งความขรุขระผิวเฉลี่ย, อัตราส่วนแรงตัด, และอุณหภูมิในการตัด โดยที่ความขรุขระผิวนั้นเกิดจากการวัดหาค่าเฉลี่ยของความขรุขระบนพื้นผิวชิ้นงานหลังจากทำการกัด ส่วนอัตราส่วนแรงตัดจะเกิดจากการคำนวณพื้นที่ใต้กราฟของแรงตัดในทิศทางการป้อนตัดมาหารด้วยค่าพื้นที่ใต้กราฟในทิศทางตั้งฉากกับชิ้นงาน และสุดท้ายคือค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในขณะกัดชิ้นงาน แล้วจึงสร้างสมการเพื่อประมาณค่าของทั้ง 3 ผลตอบก่อนเริ่มการปฏิบัติงานจริงทำให้เกิดสมการที่พัฒนาขึ้นมาในงานวิจัยนี้ 3 สมการ โดยกระบวนการกัดด้วยมีดตัดหัวบอลบนเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซนเตอร์ ด้วยการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนและประยุกต์ใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบสนองนี้ สมการที่ถูกพัฒนาขึ้นจะเป็นฟังก์ชันของปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการตัด ทั้งความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดตัดหัวบอล โดยมีการติดตั้งไดนาโมมิเตอร์สำหรับเพื่อวัดแรงตัดในขณะตัด และไพโรมิเตอร์สำหรับใช้เพื่อวัดอุณหภูมิขณะตัด แล้วจึงทำการศึกษาความสัมพันธ์ของความขรุขระผิวและเงื่อนไขที่ใช้ในการตัด ทำให้ได้สมการของผลตอบทั้ง 3 สมการ ดังนี้

$$\begin{aligned} R_a = & -0.00976 + 0.000042v - 6.98125f - 0.009375d - 0.038229D - 0.000000003v^2 \\ & - 36.875f^2 - 0.171875d^2 + 0.0005625D^2 + 0.0002375vf + 0.000014vd \\ & + 0.0000015vD + 7.9375fd + 0.58125fD + 0.004375dD \end{aligned} \quad (5.1)$$



$$\frac{F_x}{F_z} = 4.34002 - 0.000486v + 12.9815f + 0.850562d - 0.701367D + 0.00000003v^2 - 693.021f^2 - 1.04990d^2 + 0.0436167D^2 - 0.000245vf + 0.000174vd - 0.000008vD + 58.7437fd + 5.015fD - 0.039dD \quad (5.2)$$

$$T = 318.642 + 0.0138302v - 1305.75f + 268.735d - 21.6306D + 0.000000073v^2 + 21710.9f^2 - 2.93400d^2 + 1.99682D^2 - 0.0217571vf - 0.00691128vd - 0.000251562vD + 141.382fd - 11.8250fD - 19.4792dD \quad (5.3)$$

จากผลการทดลองจะเห็นว่า อัตราป้อนตัด นั้นมีอิทธิพลต่อความขรุขระผิวมากกว่าของทุกปัจจัย โดยความขรุขระผิวดีจะเกิดขึ้นเมื่ออัตราป้อนตัดลดลง หรือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดตัดหัวบอลลดลง การที่จะเพิ่มความเร็วดัดส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วของมีดตัดหัวบอลทำให้อุณหภูมิในขณะตัดเพิ่มขึ้น โดยที่อัตราส่วนแรงตัดจะเพิ่มขึ้นจากการที่มีพื้นที่ของหน้าสัมผัสระหว่างมีดหัวบอลและเนื้อวัสดุของชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น ความลึกตัดจึงเพิ่มขึ้น และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดตัดหัวบอลที่มากขึ้นจะส่งผลให้อุณหภูมิของการตัดน้อยลง แต่อัตราส่วนแรงตัดและความขรุขระผิวเพิ่มมากขึ้น เนื่องมาจากพื้นที่สัมผัสเพิ่มมากขึ้น

ทั้งนี้ในตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองที่ถูกสร้างขึ้นมาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองนี้มีความน่าเชื่อถือและให้ความแม่นยำสูง

## 5.2 อภิปรายผลการวิจัย

จากผลการทดลองจะแสดงให้เห็นว่า ความขรุขระผิวจะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อความเร็วดัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัดอยู่ในระดับต่ำ ความลึกตัดที่น้อยจะทำให้ความขรุขระผิวที่ดี เนื่องจากถ้าความลึกตัดมาก แรงตัดมาก เกิดความร้อนในการตัดชิ้นงานสูง เพราะพื้นที่ผิวสัมผัส และการเสียดสีที่มีมาก ส่งผลให้ความขรุขระผิวมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้แล้วก็ยังส่งผลต่อความสึกหรอของมีดตัดด้วย ส่วนขนาดของใบมีดที่ใหญ่ขึ้นก็ทำให้ความขรุขระผิวมากขึ้น เพราะพื้นที่ผิวสัมผัสที่มากขึ้นเช่นกัน แต่ความร้อนที่เกิดบนใบมีดนั้นจะน้อยลงตามขนาดของใบมีดที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการที่มีพื้นที่สัมผัสมาก ทำให้การระบายความร้อนดี จึงเกิดความร้อนสะสมน้อยกว่าขนาดใบมีดที่น้อยกว่า

เมื่อทำการวิเคราะห์เงื่อนไขการตัดต่างๆทั้งความเร็วรอบ อัตราป้อนตัด ความลึกในการตัด และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดกัดหัวบอลที่เพิ่มขึ้น ค่าความขรุขระผิวที่เกิดขึ้นนั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อาจกล่าวได้ว่าการตรวจสอบค่าที่ดีที่สุดของความขรุขระผิวโดยพิจารณาจากค่าความขรุขระผิวน้อยที่สุดแล้ว ปัจจัยของการตัดแต่ละค่าจึงอยู่ในระดับที่ต่ำที่สุดของขอบเขตที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ นั่นคือ เงื่อนไขการตัดที่ความเร็วรอบ 8000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดกัดหัวบอล 6 มิลลิเมตร จะให้ค่าความขรุขระผิว 0.0443 ไมครอน

ความแตกต่างของการทดลองและการปฏิบัติจริงนั้นจะขึ้นอยู่กับความต้องการความเรียบผิวของแต่ละชิ้นงาน โดยปกติการทดลองนั้นจะเน้นตามทฤษฎีที่ประเมินค่าได้จากตัวเลข ซึ่งการทดลองนี้จะใช้พิจารณาจากค่าความขรุขระผิวน้อยที่สุด ทำให้เกิดความเรียบผิวที่ดีที่สุด

สำหรับการปฏิบัติงานจริง ค่าความขรุขระผิวที่ต้องการอาจจะไม่ใช่ค่าความขรุขระผิวน้อยที่สุดก็ได้ แต่จะต้องพิจารณาเลือกค่าความขรุขระผิวที่ยอมรับได้ในแต่ละงานตัด เพื่อให้ชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูปมานั้นมีความเหมาะสม โดยอาจจะดูข้อจำกัดของแต่ละปัจจัย ว่าสามารถทำได้เท่าไร อย่างเช่น การทดลองนี้จะพบว่าในงานกัดเหล็กกล้าคาร์บอน S50C นั้น ปัจจัยที่ส่งผลต่อความขรุขระผิวมากที่สุดคือ อัตราการป้อนตัด ดังนั้น ในการปฏิบัติจริงนั้น ถ้าเราเพิ่มความเร็วตัด ความลึกตัด และใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดหัวบอล กับอัตราการป้อนตัดที่น้อยที่สุด ก็จะกระทบต่อความขรุขระผิวน้อยลง แต่ชิ้นงานที่ได้มานั้นจะใช้เวลาในการขึ้นรูปน้อยลง ทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องจักรกลเพิ่มมากขึ้น

อย่างไรก็ตาม กระบวนการกัดอาจจะมีปัจจัยอื่นเพิ่มขึ้นหรืออาจจะมีข้อจำกัดหลายอย่าง ทั้งเรื่องของต้นทุนการผลิต เวลาในการผลิต รวมถึงคุณภาพของชิ้นงาน จึงอาจจะต้องยอมรับในการเพิ่มค่าของแต่ละปัจจัยในการตัด เพื่อให้กระบวนการผลิตมีผลผลิตที่เพิ่มมากขึ้นในเวลาที้น้อยลง และตอบสนองได้ตามความต้องการ แต่ต้องให้อยู่ในข้อจำกัดที่สามารถยอมรับได้ ซึ่งจากการทดลองนี้ สามารถคำนวณค่าความขรุขระผิวจากสมการณัพยากรณ์ที่ถูกพัฒนามาเบื้องต้นได้จากปัจจัยที่จะใช้ในการตัด เพื่อใช้ในการตรวจสอบค่าความขรุขระผิวที่จะได้ก่อนการตัดชิ้นงานว่าสามารถยอมรับได้หรือไม่

### 5.3 ข้อจำกัดและอุปสรรคในงานวิจัย

1. สมการที่พัฒนามาสำหรับการพยากรณ์ความขรุขระผิว อัตราส่วนแรงตัด และ อุณหภูมิตัด จากการทดลองในงานวิจัยนี้ จะต้องใช้สำหรับชิ้นงานในการตัดเหล็กกล้าคาร์บอน (S50C) ด้วยใบมีดตัดหัวบอลเท่านั้น
2. การติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ หรือไพโรมิเตอร์ต้องใช้เวลาค่อนข้างนาน เพื่อปรับระดับให้ได้ตามโฟกัสที่เซนเซอร์สามารถวัดได้ถูกต้องแม่นยำที่สุด
3. การติดตั้งเซนเซอร์วัดแรงและเครื่องขยายสัญญาณ เนื่องจากเป็นเครื่องมือวัดที่มีการเสียบสายเชื่อมต่อมากหลายจุด และใช้ร่วมกันหลายการทดลอง ทำให้ต้องมีการเคลื่อนย้ายและ ถอดเข้า – ออกบ่อยครั้ง ทำให้เครื่องวัดเกิดความเสียหาย ต้องสูญเสียเวลาในการรอซ่อมแซม
4. ในขั้นตอนการวัดความขรุขระผิว ที่ยึดจับชิ้นงานบนเครื่องมีขนาดเล็กเกินไป ไม่สามารถยึดจับได้ จึงต้องเสียเวลาทำการแก้ไขใหม่

### 5.4 ข้อเสนอแนะ

1. ควรเพิ่มเงื่อนไขของการตัดมากขึ้น เช่น จำนวนฟันของมีดตัด หรือทิศทางในการตัด และเปลี่ยนวัสดุที่ทำการทดลอง เพื่อให้การพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวมีความหลากหลาย และ ถูกต้องแม่นยำมากขึ้น
2. การติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ ที่ใช้ระยะเวลาการปรับค่อนข้างนาน อาจมีการ ออกแบบจี้กรองรับเพื่อให้ปรับติดตั้งได้ง่ายขึ้น
3. การติดตั้งเซนเซอร์วัดแรงและเครื่องขยายสัญญาณ ควรแยกเครื่องจักรที่ทำการ ทดลองแต่ละเครื่อง เพื่อไม่ให้เกิดการกระทบกระเทือนระหว่างเคลื่อนย้าย และไม่ต้องถอดสาย บ่อยครั้ง
4. เนื่องจากขอบเขตของงานวิจัยนั้นถูกกำหนดด้วยการออกแบบบ็อกซ์-เบนท์เคน ซึ่งมี ช่วงค่ากำหนดที่แคบเกินไป จึงอาจทำให้ไม่ครอบคลุมแนวโน้มของผลตอบทั้ง 3 ค่า ทั้งความขรุขระ ผิว อัตราส่วนแรงตัด และอุณหภูมิในขณะตัด ตามรูปพื้นผิวตบที่แสดงออกมา ดังนั้นจึงควรเพิ่ม ช่วงการทดลองให้มากขึ้น

## รายการอ้างอิง

- [1] สมาคมอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย, "โครงการศึกษาการจัดทำแผนแม่บทอุตสาหกรรมเครื่องจักรกล " 2547.
- [2] ศ. สำนักงานปลัดกระทรวงพาณิชย์. สินค้าส่งออก 10 อันดับแรกของไทยรายประเทศ ปี 2553-2556 [Online]. Available: [http://www.ops3.moc.go.th/infor/db\\_sql/gp\\_web\\_export1.asp](http://www.ops3.moc.go.th/infor/db_sql/gp_web_export1.asp)
- [3] สมชาติ อารยพิทยา, "การสืบหาเงื่อนไขการตัดโลหะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการตัดแบบแห้ง," วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
- [4] ศิริวัลย์ จันทร์ผ่อง, "การพยากรณ์ความขรุขระผิวสำหรับชิ้นงานเหล็กกล้าในกระบวนการกลึงซีเอ็นซีด้วยวิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง," วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554.
- [5] T. S., R. C., and a. L. D., "Cutting and applications of cutting fluid for ball-end milling," *10th Asia Pacific Industrial Engineering & Management Systems Conference*, pp. 108-115, 2009.
- [6] A.Doniavi, M.Eskandarzade, and M. Tahmasebian, "Empirical Modeling of Surface Roughness in turning process of 1060 steel using Factorial Design Methodology," *Journal of Applied Science* 7(17), pp. 2509-2513, 2007.
- [7] AbdallahNasri, M. B. Said, and WassilaBouzidSai, "FE Thermal analysis of 3D ball end milling model based on analytical study of oblique cutting," *Emirates Journal for Engineering Research* 16 (2), pp. 67-78, 2011.
- [8] D. M. S. Lou, D. J. C. Chen, and D. C. M. Li, "Surface Roughness Prediction Technique For CNC End-Milling," *Journal of Industrial Technology* ,Volume 15, Number 1, 1999.
- [9] M. P. Groover, *Fundamentals of Modern Manufacturing. 2nd Edition*, 2004.
- [10] M. A., K. J., C. F., and Z. U., "Genetic equation for the cutting force in ball-end milling," *J Mater Process Tech* 164, pp. 1554-1560, 2005.

- [11] J. B.L. and S. G.S., *Fundamentals of Metal Cutting and Machine Tool 1st Edition*, 1987.
- [12] สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ, เอกสารประกอบการสอนวิชาการตัดโลหะ, 2551.
- [13] สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ, วิศวกรรมการผลิตขั้นสูง. กรุงเทพฯ สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555.
- [14] สุชาติ จันทร์จรมานิตย์, ระเบียบวิธีเชิงเลขสำหรับงานวิศวกรรม. กรุงเทพมหานคร: ศูนย์คัมภีร์ไฟฟ้า, 2552.
- [15] ปารเมศ ชูติมา, การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- [16] S. B. Raja and N. Baskar, "Application of Particle Swarm Optimization technique for achieving desired milled surface roughness in minimum machining time," *Expert Systems with Applications* 39, pp. 5982–5989, 2012.
- [17] S.Tangjitsitcharoen, "Monitoring of dry cutting and applications of cutting fluid," *Journal of Engineering Tribology* 224, pp. 209-219, 2010.
- [18] S. Tangjitsitcharoen, "In-process monitoring and prediction of surface roughness in CNC turning process," *Advanced Materials Research*, vol. 199-200, pp. 1958-1966, 2011.
- [19] T. S., "Intelligent monitoring and Prediction of surface roughness in ball-end milling process," *Applied mechanics and materials* 121-126, pp. 2059-2063, 2011.
- [20] K. Kadirgama, K. A. Abou-El-Hosseirr, B. Mohammad, and H. Habeeb, "Statistical model to determine surface roughness when milling hastelloy C-22HS," *Journal of Mechanical Science and Technology* 21, pp. 1651-1655, 2007.
- [21] X. Chen, J. Zhao, Y. Li, S. Han, Q. Cao, and A. Li, "Investigation on ball end milling of P20 die steel with cutter orientation," *Int J AdvManufTechnol* 59, pp. 885–898, 2011.



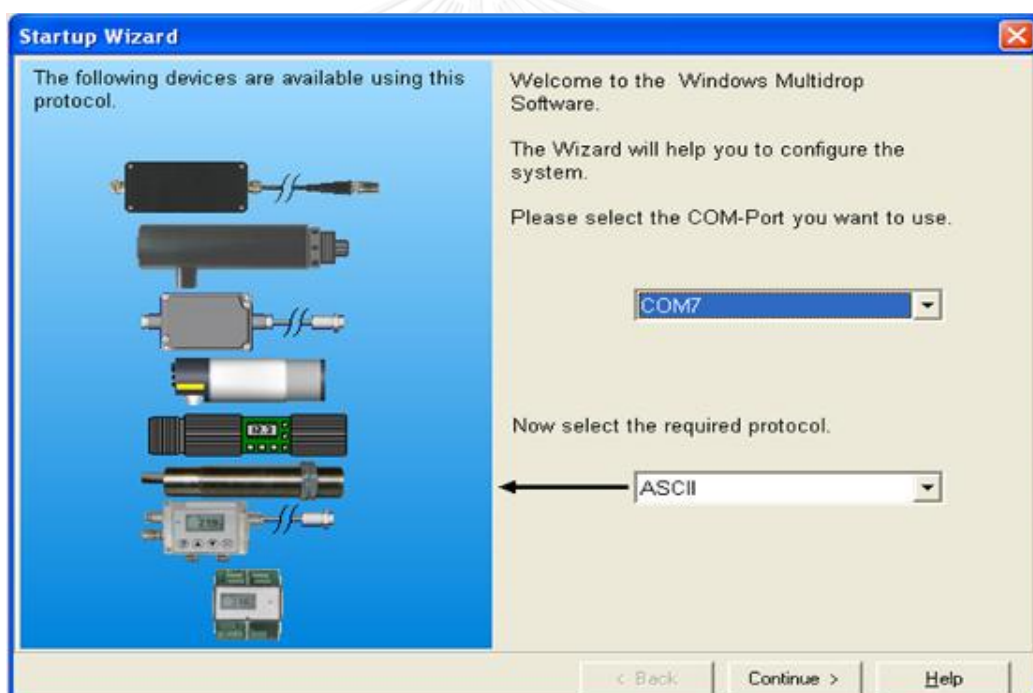


## ขั้นตอนการเข้าโปรแกรมการวัดอุณหภูมิ

1. ดับเบิลคลิกที่ไอคอนโปรแกรมการวัดอุณหภูมิบน Desk top

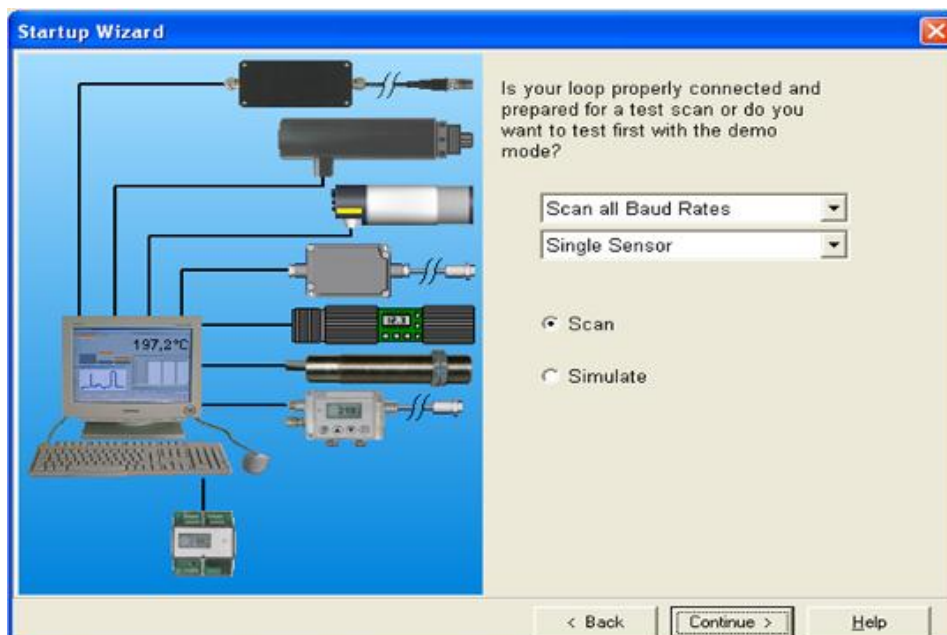


2. เลือก port ที่จะใช้ในการเชื่อมต่อ แล้วคลิก Continue

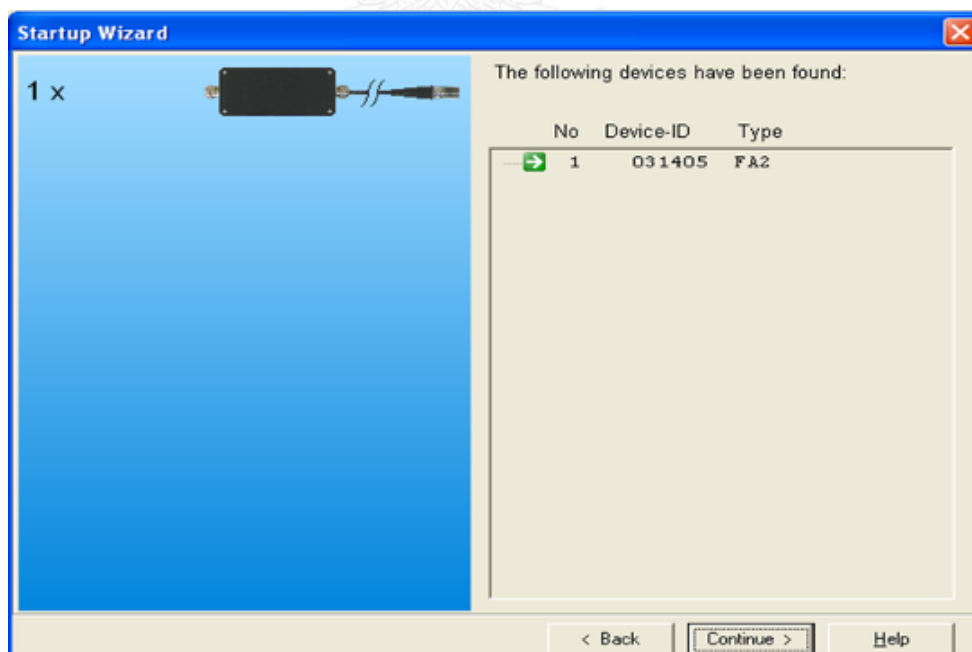




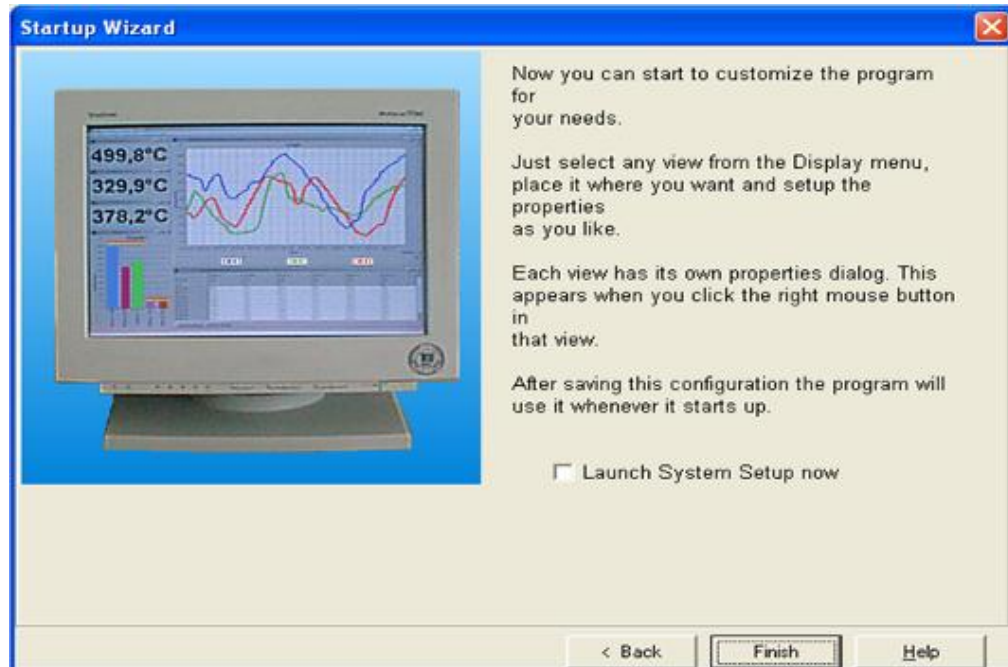
3. เลือก scan เพื่อให้โปรแกรมจับสัญญาณการเชื่อมต่อกับเซนเซอร์ แล้วคลิกที่ Continue



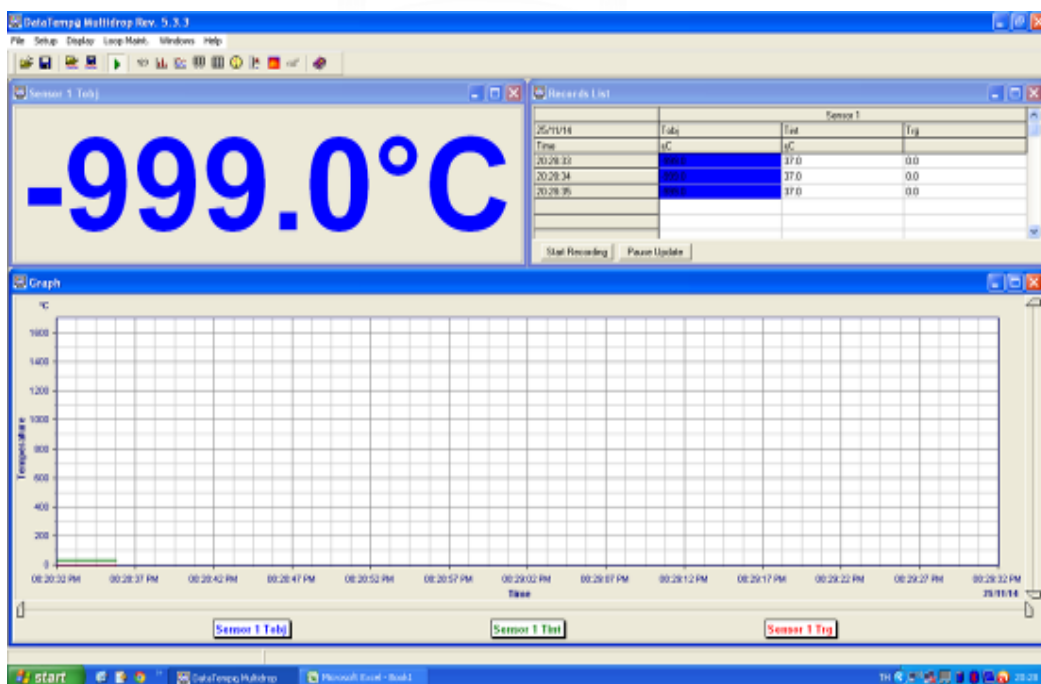
4. โปรแกรมจะประมวลผลการจับคู่เชื่อมต่อกับเซนเซอร์ จากนั้นคลิก Continue



5. เสร็จสิ้นการจับคู่สัญญาณ จากนั้นคลิก Finish




6. หน้าจอจะเข้าสู่โหมดเตรียมพร้อมแสดงผลการวัดอุณหภูมิ



ตารางที่ 1 แสดง Specification ของเครื่องวัดอุณหภูมิแบบไม่สัมผัส

<b>Measurement Specifications</b>	
Temperature Range	400°C to 1700°C
Spectral Response	1,6 μm (InGaAs detector)
System Accuracy	±(0,3% Tmeas + 2 C), Tmeas in C
Repeatability	±1 C
<b>Temperature Resolution</b>	
Current output	±0,05 C
Display and RS485	±1 C
Response Time	10 ms (95%), selectable to 10 s
Emissivity	0,10 to 1,00 in 0,01 increments
Signal Processing	Peak hold, valley hold, averaging
<b>Electrical Specifications</b>	
Outputs	0/4-20 mA; RS-485, 2-wire or 4-wire, networkable to 32 sensors
Relay	48 V, 300 mA, response time < 2 ms
Power Supply	24 VDC ±20%, 500 mA



ภาคผนวก ข

ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของการทดลองสำหรับผลตอบต่างๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูลความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra)

#### Response Surface Regression: Ra versus V, f, d, D

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for Ra

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.146000	0.005000	29.201	0.000
V	0.021250	0.002500	8.500	0.000
f	0.053000	0.002500	21.201	0.000
d	0.049250	0.002500	19.701	0.000
D	0.024167	0.002500	9.667	0.000
V*V	-0.012625	0.003750	-3.367	0.006
f*f	-0.014750	0.003750	-3.934	0.002
d*d	-0.006875	0.003750	-1.833	0.092
D*D	0.002250	0.003750	0.600	0.560
V*f	0.009500	0.004330	2.194	0.049
V*d	0.005750	0.004330	1.328	0.209
V*D	0.006000	0.004330	1.386	0.191
f*d	0.031750	0.004330	7.333	0.000
f*D	0.023250	0.004330	5.370	0.000
d*D	0.001750	0.004330	0.404	0.693

S = 0.00865985 PRESS = 0.00499398

R-Sq = 98.94% R-Sq(pred) = 94.13% R-Sq(adj) = 97.71%

#### Analysis of Variance for Ra

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	14	0.084155	0.084155	0.006011	80.15	0.000
Linear	4	0.075242	0.075242	0.018810	250.83	0.000
Square	4	0.002069	0.002069	0.000517	6.90	0.004
Interaction	6	0.006844	0.006844	0.001141	15.21	0.000
Residual Error	12	0.000900	0.000900	0.000075		
Lack-of-Fit	10	0.000846	0.000846	0.000085	3.13	0.266
Pure Error	2	0.000054	0.000054	0.000027		
Total	26	0.085055				

Estimated Regression Coefficients for Ra using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	-0.00976042
V	4.21875E-05
f	-6.98125
d	-0.00937500
D	-0.0382292
V*V	-3.15625E-09
f*f	-36.8750
d*d	-0.171875
D*D	0.000562500
V*f	0.000237500
V*d	1.43750E-05
V*D	1.50000E-06
f*d	7.93750
f*D	0.581250
d*D	0.00437500

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลความขรุขระผิวสูงสุด (Rz)

**Response Surface Regression: Rz versus V, f, d, D**

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for Rz

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.742667	0.03275	22.678	0.000
V	0.097833	0.01637	5.975	0.000
f	0.215000	0.01637	13.131	0.000
d	0.253917	0.01637	15.507	0.000
D	0.078250	0.01637	4.779	0.000
V*V	-0.040042	0.02456	-1.630	0.129
f*f	-0.049292	0.02456	-2.007	0.068
d*d	-0.007417	0.02456	-0.302	0.768
D*D	0.023333	0.02456	0.950	0.361
V*f	0.042000	0.02836	1.481	0.164
V*d	-0.025000	0.02836	-0.882	0.395
V*D	0.020000	0.02836	0.705	0.494
f*d	0.099000	0.02836	3.491	0.004
f*D	0.090500	0.02836	3.191	0.008
d*D	0.021750	0.02836	0.767	0.458

S = 0.0567212 PRESS = 0.210661  
R-Sq = 97.69% R-Sq(pred) = 87.39% R-Sq(adj) = 94.99%

## Analysis of Variance for Rz

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	14	1.63160	1.63160	0.116543	36.22	0.000
Linear	4	1.51672	1.51672	0.379179	117.86	0.000
Square	4	0.02987	0.02987	0.007468	2.32	0.116
Interaction	6	0.08501	0.08501	0.014169	4.40	0.014
Residual Error	12	0.03861	0.03861	0.003217		
Lack-of-Fit	10	0.03527	0.03527	0.003527	2.11	0.364
Pure Error	2	0.00334	0.00334	0.001669		
Total	26	1.67021				

## Estimated Regression Coefficients for Rz using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	-0.189938
V	0.000210875
f	-25.3167
d	0.729167
D	-0.232771
V*V	-1.00104E-08
f*f	-123.229
d*d	-0.185417
D*D	0.00583333
V*f	0.00105000
V*d	-6.25000E-05
V*D	5.00000E-06
f*d	24.7500
f*D	2.26250
d*D	0.0543750

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูลอัตราส่วนแรงตัด (Fx/Fz)

#### Response Surface Regression: Fx/Fz versus V, f, d, D

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for Fx/Fz

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	2.82500	0.12282	23.002	0.000
V	0.38977	0.06141	6.347	0.000
f	0.72661	0.06141	11.832	0.000
d	0.63232	0.06141	10.297	0.000
D	0.17422	0.06141	2.837	0.015
V*V	0.12668	0.09211	1.375	0.194
f*f	-0.27721	0.09211	-3.009	0.011
d*d	-0.04200	0.09211	-0.456	0.657
D*D	0.17447	0.09211	1.894	0.083
V*f	-0.00980	0.10636	-0.092	0.928
V*d	0.06972	0.10636	0.656	0.524
V*D	-0.03308	0.10636	-0.311	0.761
f*d	0.23497	0.10636	2.209	0.047
f*D	0.20060	0.10636	1.886	0.084
d*D	-0.01560	0.10636	-0.147	0.886

S = 0.212724 PRESS = 3.12777

R-Sq = 96.44% R-Sq(pred) = 79.52% R-Sq(adj) = 92.30%

#### Analysis of Variance for Fx/Fz

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	14	14.7280	14.7280	1.05200	23.25	0.000
Linear	4	13.3207	13.3207	3.33017	73.59	0.000
Square	4	1.0003	1.0003	0.25008	5.53	0.009
Interaction	6	0.4070	0.4070	0.06783	1.50	0.259
Residual Error	12	0.5430	0.5430	0.04525		
Lack-of-Fit	10	0.5430	0.5430	0.05430	2.20	0.115
Pure Error	2	0.0000	0.0000	0.00000		
Total	26	15.2710				



Estimated Regression Coefficients for Fx/Fz using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	4.34002
V	-4.84581E-04
f	12.9815
d	0.850562
D	-0.701367
V*V	3.16698E-08
f*f	-693.021
d*d	-1.04990
D*D	0.0436167
V*f	-2.45000E-04
V*d	0.000174312
V*D	-8.26875E-06
f*d	58.7437
f*D	5.01500
d*D	-0.0390000

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูลอุณหภูมิตัด (T)

#### Response Surface Regression: T versus V, f, d, D

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for T

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	402.067	3.868	103.937	0.000
V	15.140	1.934	7.828	0.000
f	4.358	1.934	2.253	0.044
d	9.067	1.934	4.688	0.001
D	-12.611	1.934	-6.520	0.000
V*V	0.292	2.901	0.101	0.921
f*f	8.684	2.901	2.993	0.011
d*d	-0.117	2.901	-0.040	0.968
D*D	7.987	2.901	2.753	0.018
V*f	-0.870	3.350	-0.260	0.799
V*d	-2.765	3.350	-0.825	0.425
V*D	-1.006	3.350	-0.300	0.769
f*d	0.566	3.350	0.169	0.869
f*D	-0.473	3.350	-0.141	0.890
d*D	-7.792	3.350	-2.326	0.038

S = 6.70023      PRESS = 3077.38

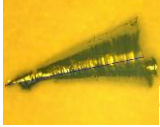

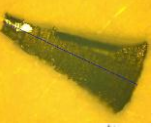

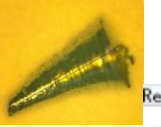

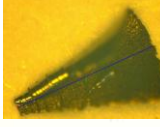

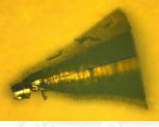

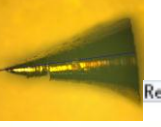

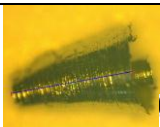

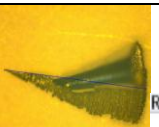

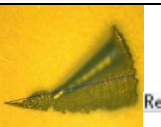

R-Sq = 92.75%    R-Sq(pred) = 58.59%    R-Sq(adj) = 84.29%

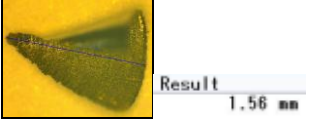
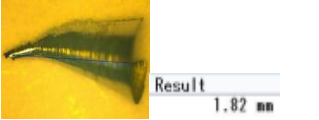




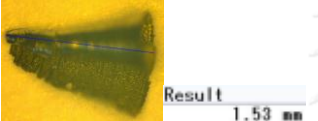




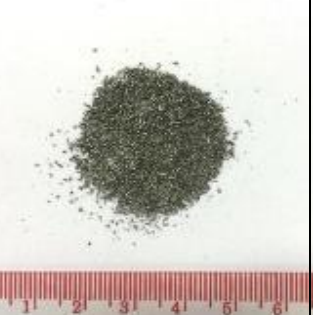


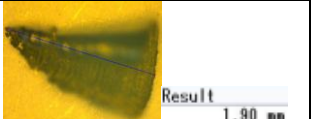



Analysis of Variance for T						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	14	6892.48	6892.48	492.32	10.97	0.000
Linear	4	5873.71	5873.71	1468.43	32.71	0.000
Square	4	736.11	736.11	184.03	4.10	0.025
Interaction	6	282.66	282.66	47.11	1.05	0.442
Residual Error	12	538.72	538.72	44.89		
Lack-of-Fit	10	531.42	531.42	53.14	14.56	0.066
Pure Error	2	7.30	7.30	3.65		
Total	26	7431.20				

Estimated Regression Coefficients for T using data in uncoded units	
Term	Coef
Constant	318.642
V	0.0138302
f	-1305.75
d	268.735
D	-21.6306
V*V	7.30286E-08
f*f	21710.9
d*d	-2.93400
D*D	1.99682
V*f	-0.0217571
V*d	-0.00691128
V*D	-2.51562E-04
f*d	141.382
f*D	-11.8250
d*D	-19.4792

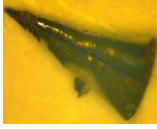

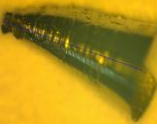

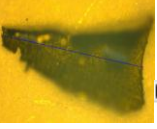

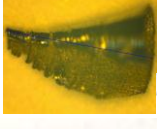

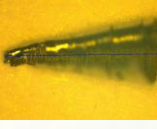
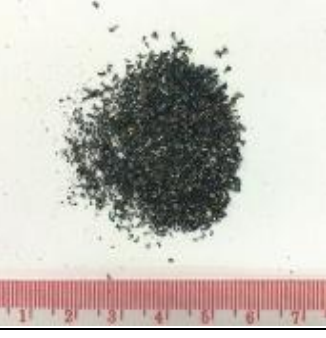
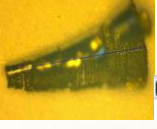



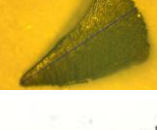





เศษโลหะจากเงื่อนไขการตัดต่างๆ

8000_0.02_0.7_8	12000_0.02_0.7_8	8000_0.06_0.7_8
 	 	 
12000_0.06_0.7_8	10000_0.04_0.5_6	10000_0.04_0.9_6
 	 	 
10000_0.04_0.5_10	10000_0.04_0.9_10	8000_0.04_0.5_8
 	 	 

12000_0.04_0.5_8	8000_0.04_0.9_8	10000_0.04_0.9_8
		
		
10000_0.02_0.7_6	10000_0.06_0.7_6	10000_0.02_0.7_10
		
		
10000_0.06_0.7_10	8000_0.04_0.7_6	12000_0.04_0.7_6
		
		

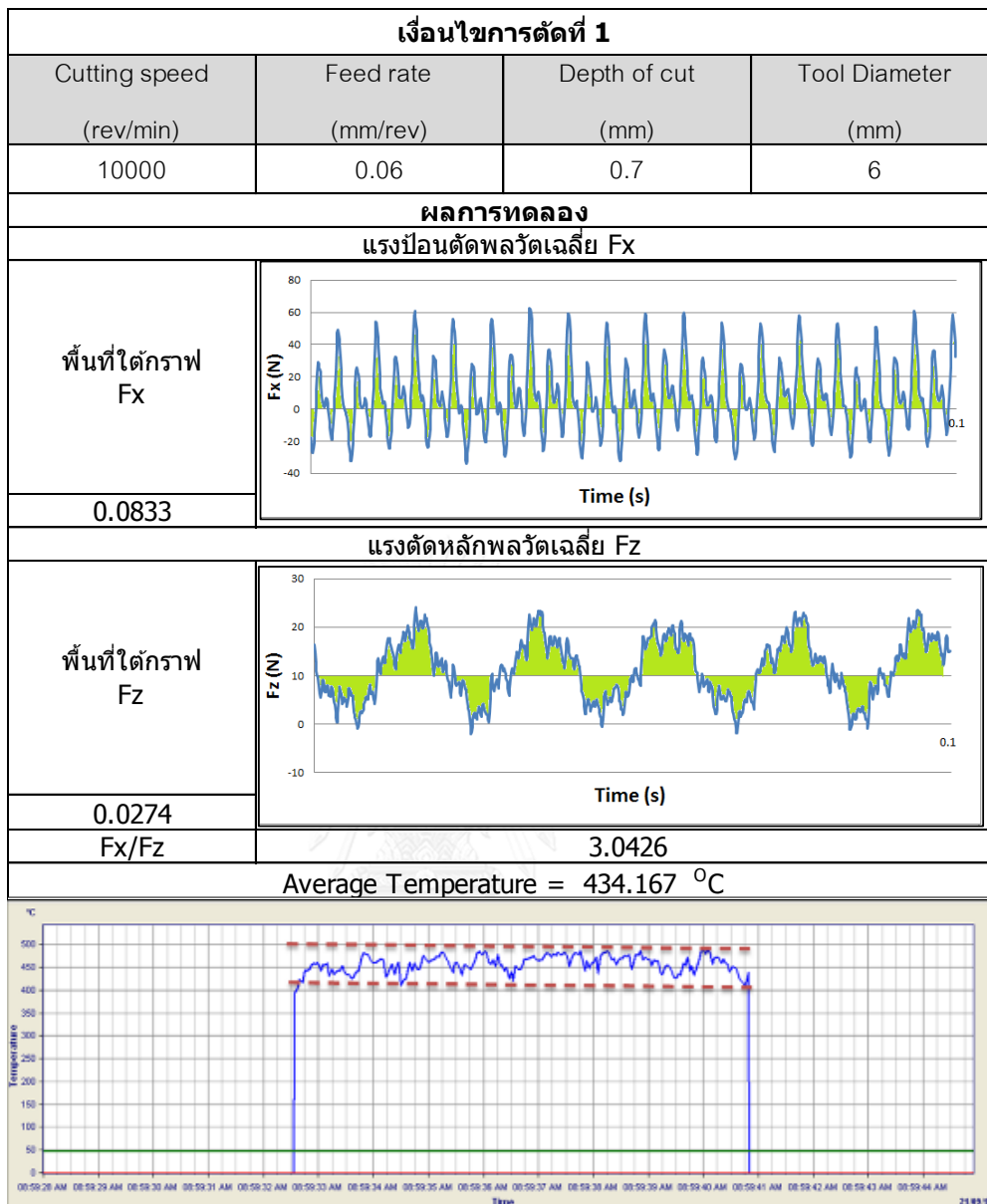


8000_0.04_0.7_10	12000_0.04_0.7_10	10000_0.02_0.5_8
 	 	 
10000_0.06_0.5_8	10000_0.02_0.9_8	10000_0.06_0.9_8
 	 	 
10000_0.04_0.7_8	10000_0.04_0.7_8	10000_0.04_0.7_8
 	 	 

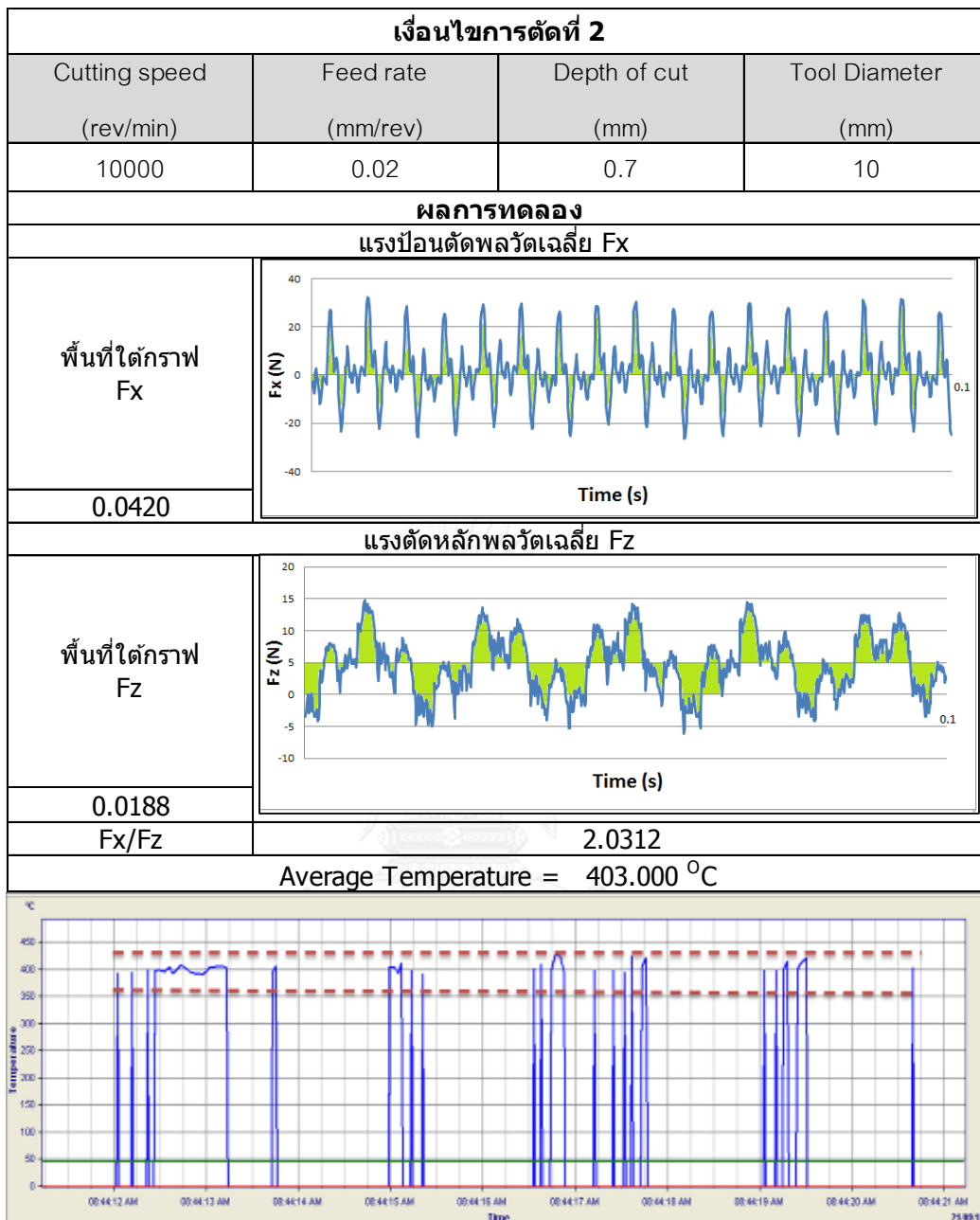
ภาคผนวก ง

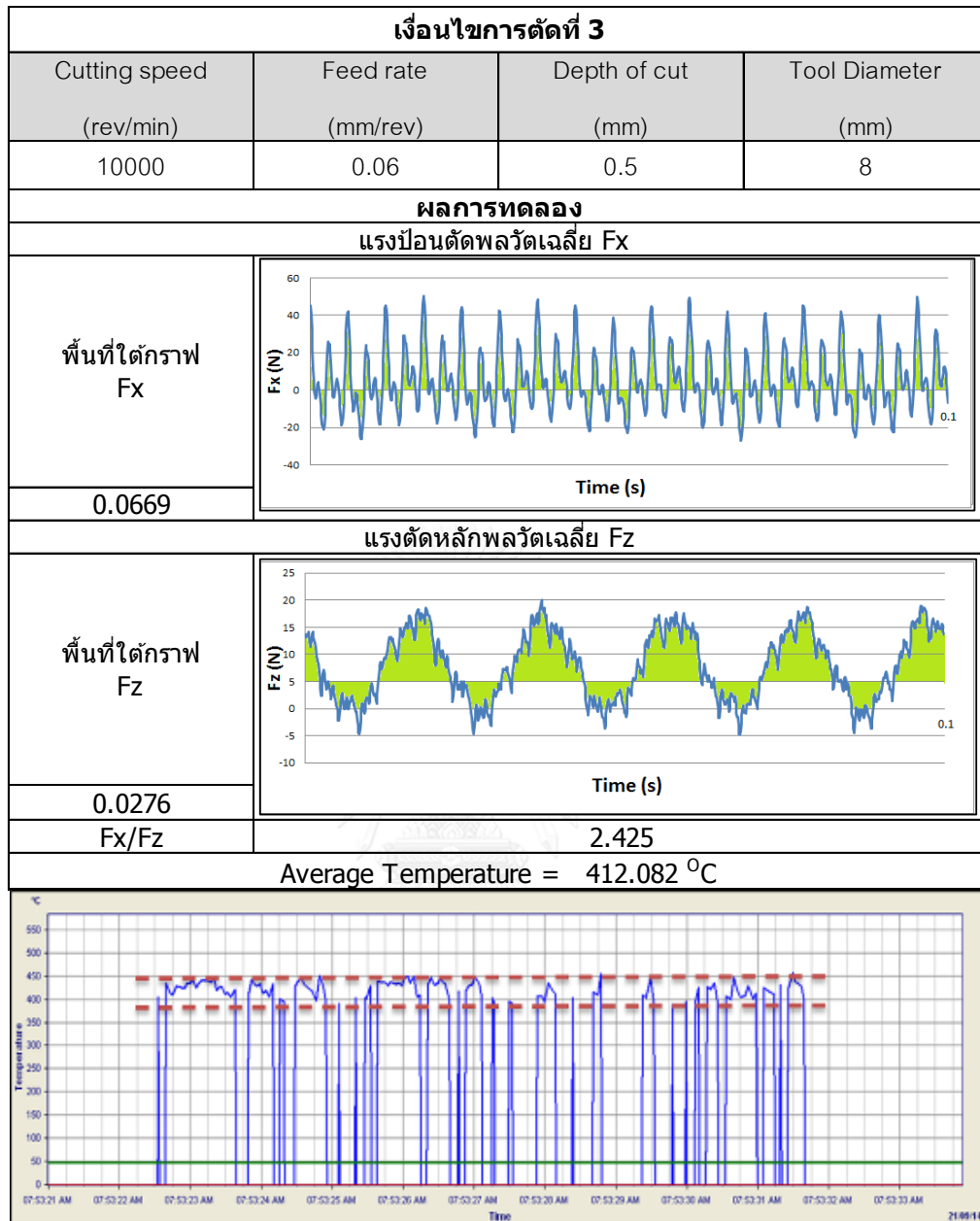
ผลการทดลองแรงตัดและอุณหภูมิจากเงื่อนไขการตัดต่างๆ

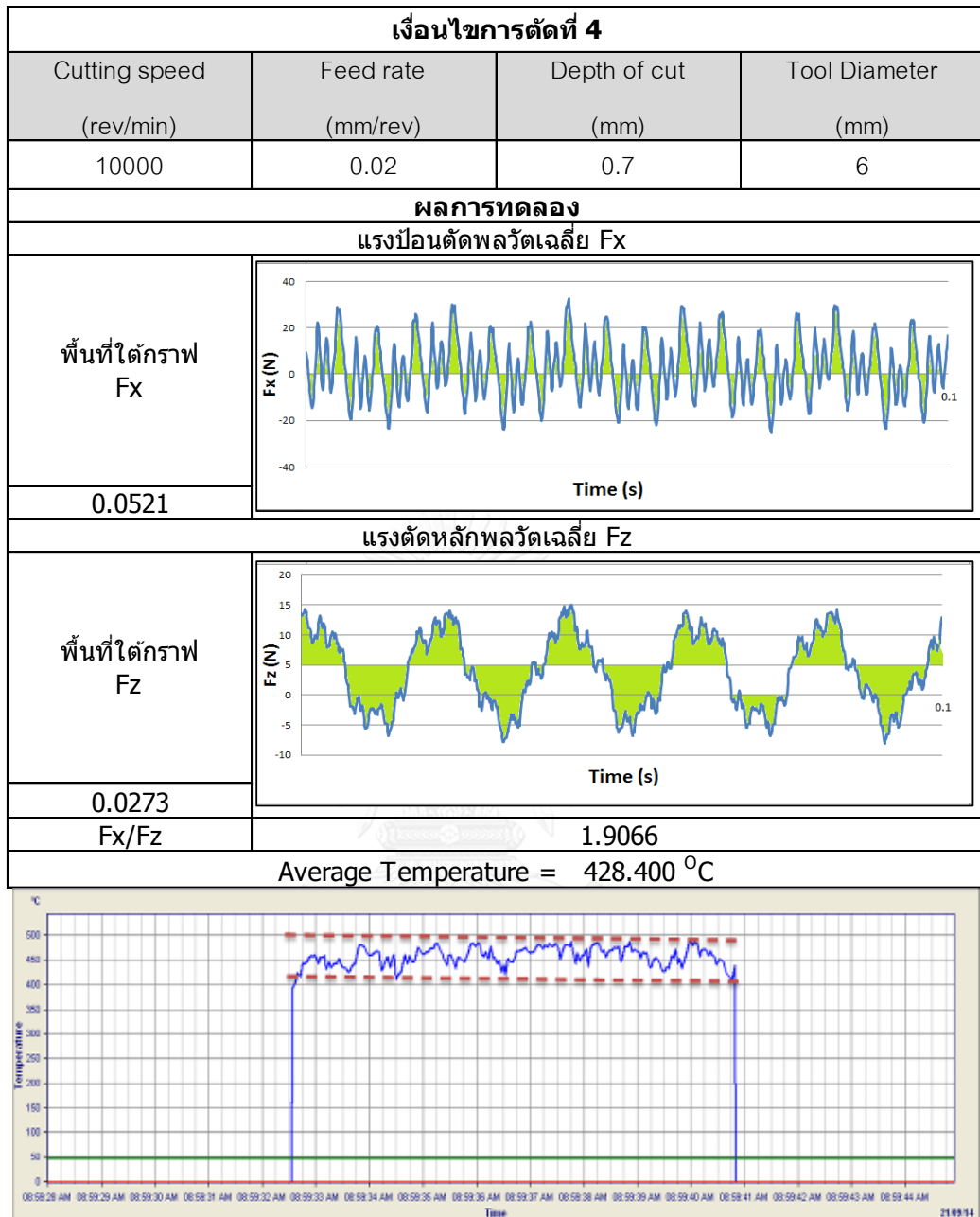
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

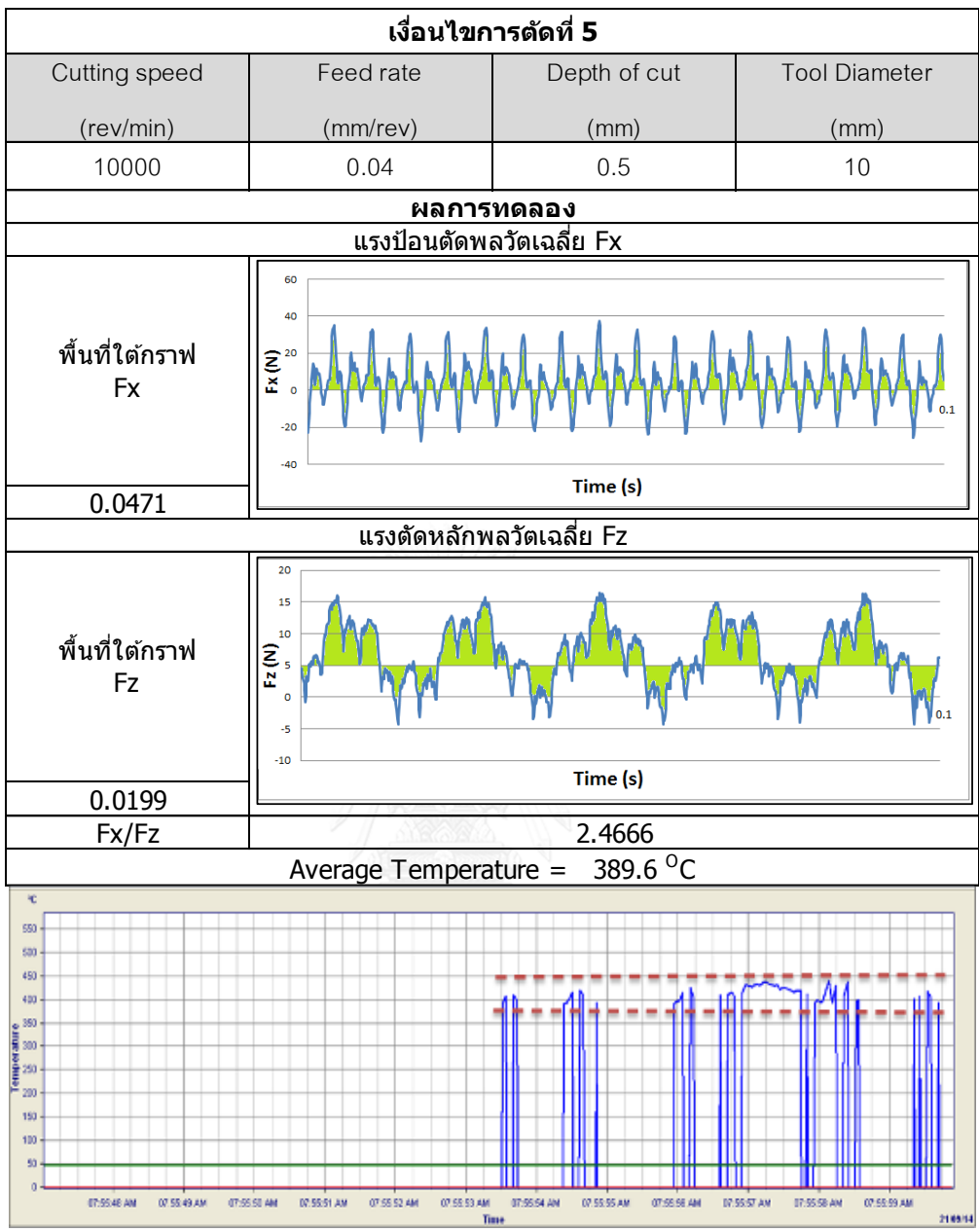


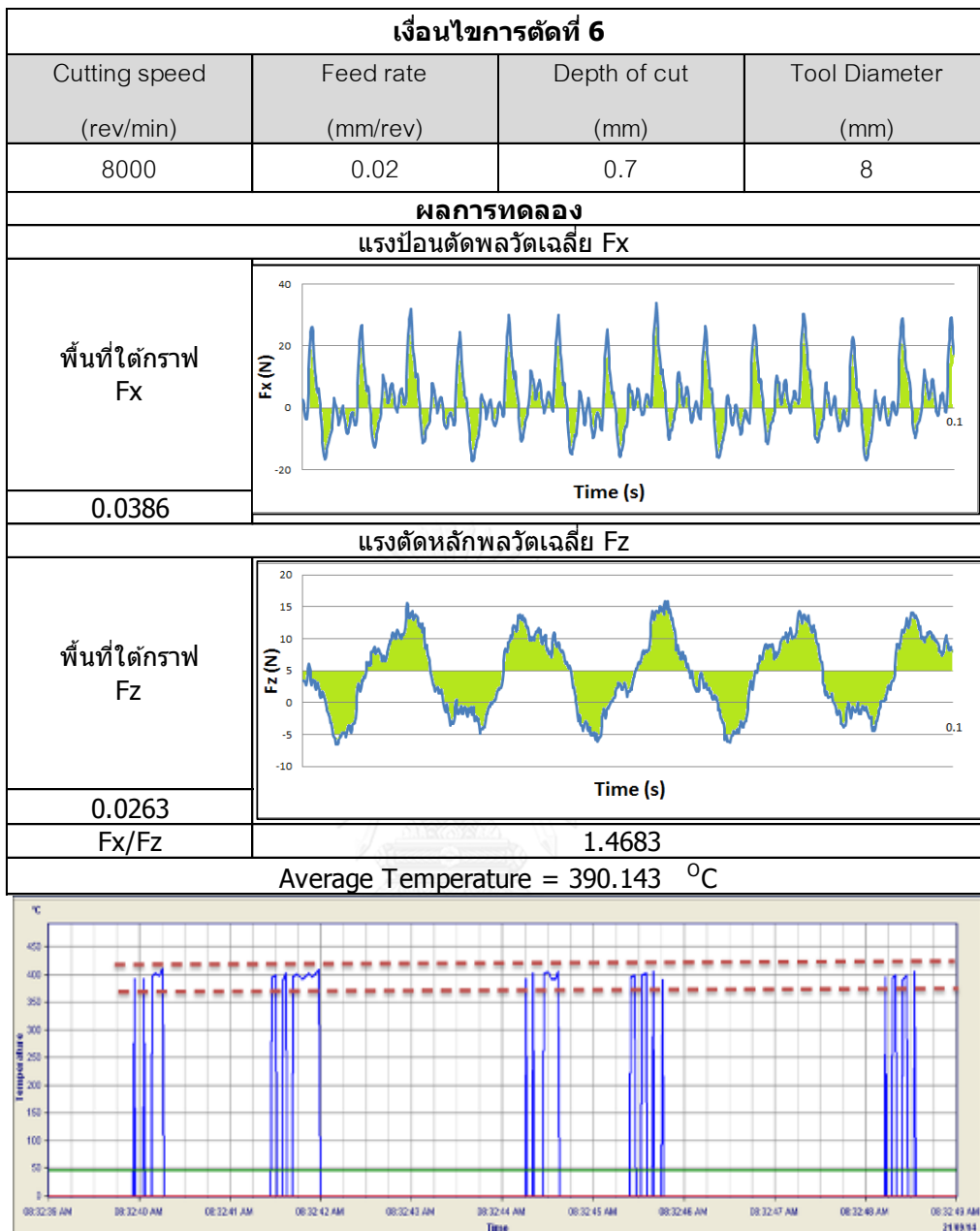


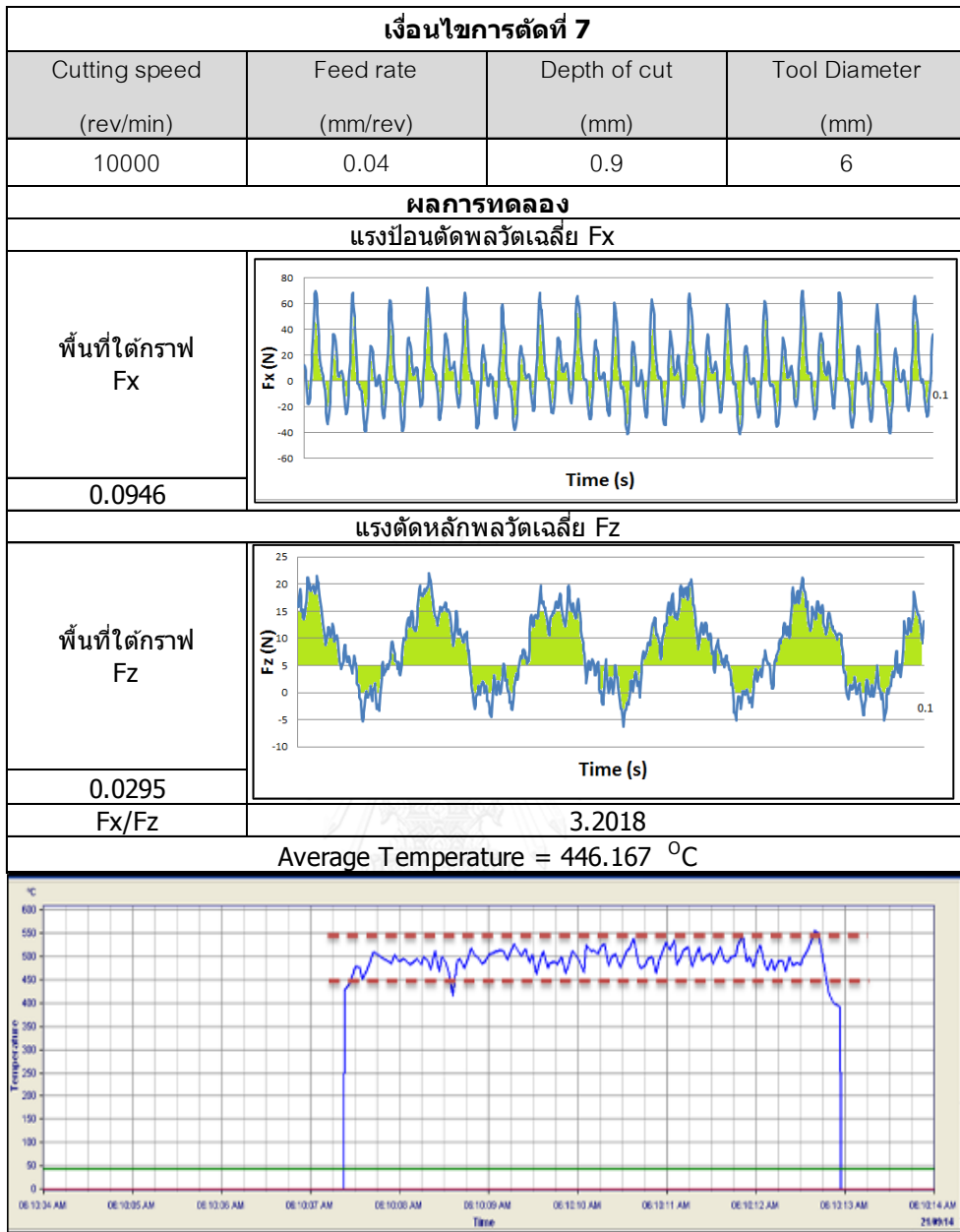


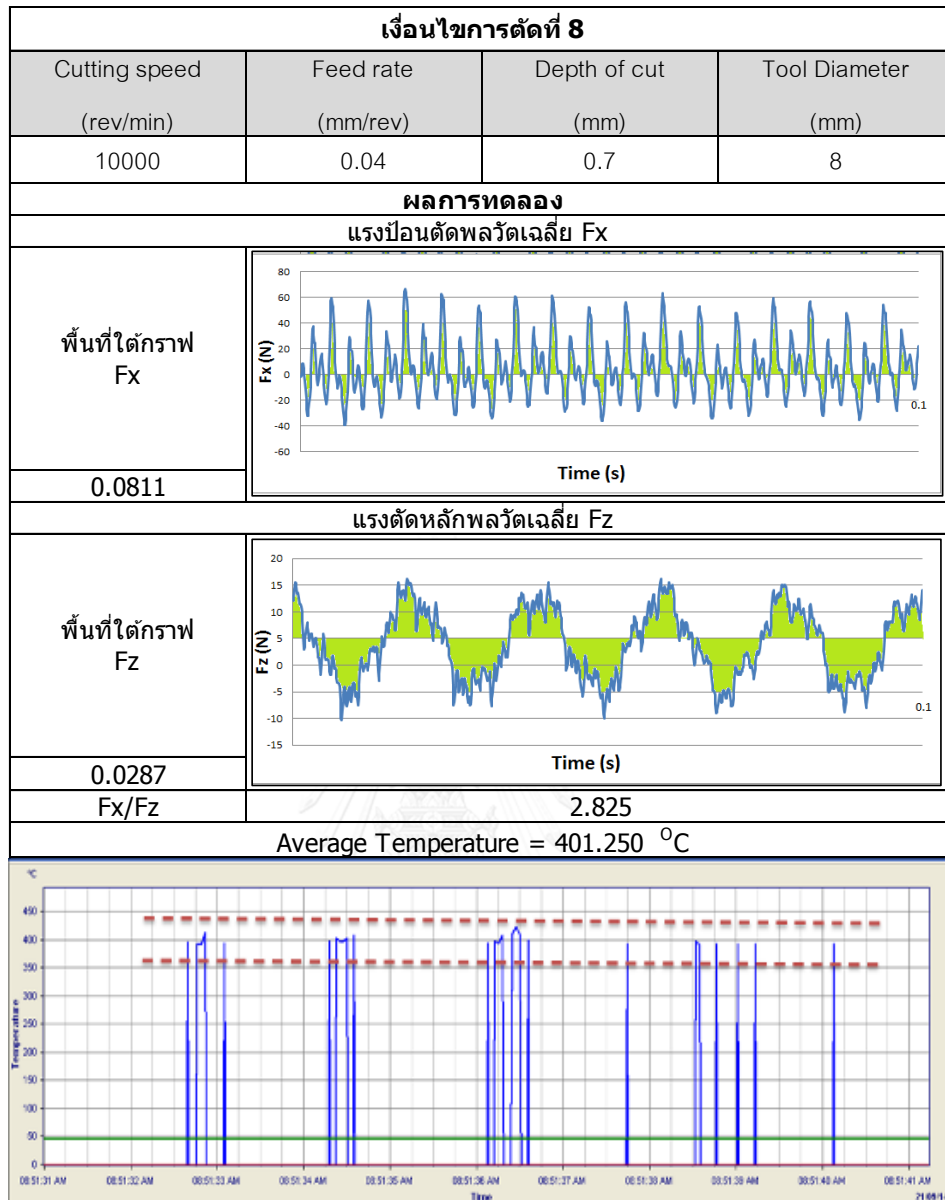


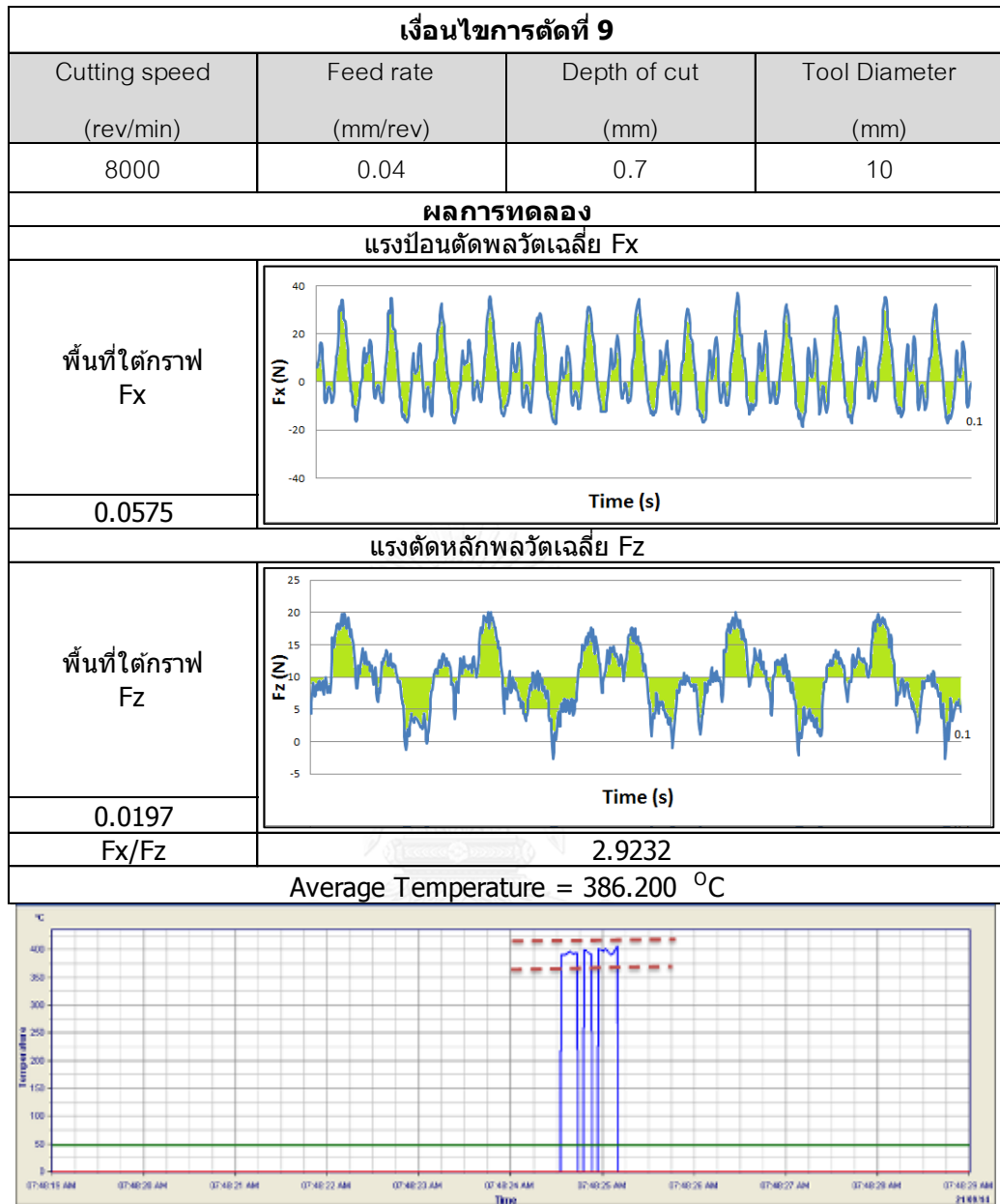




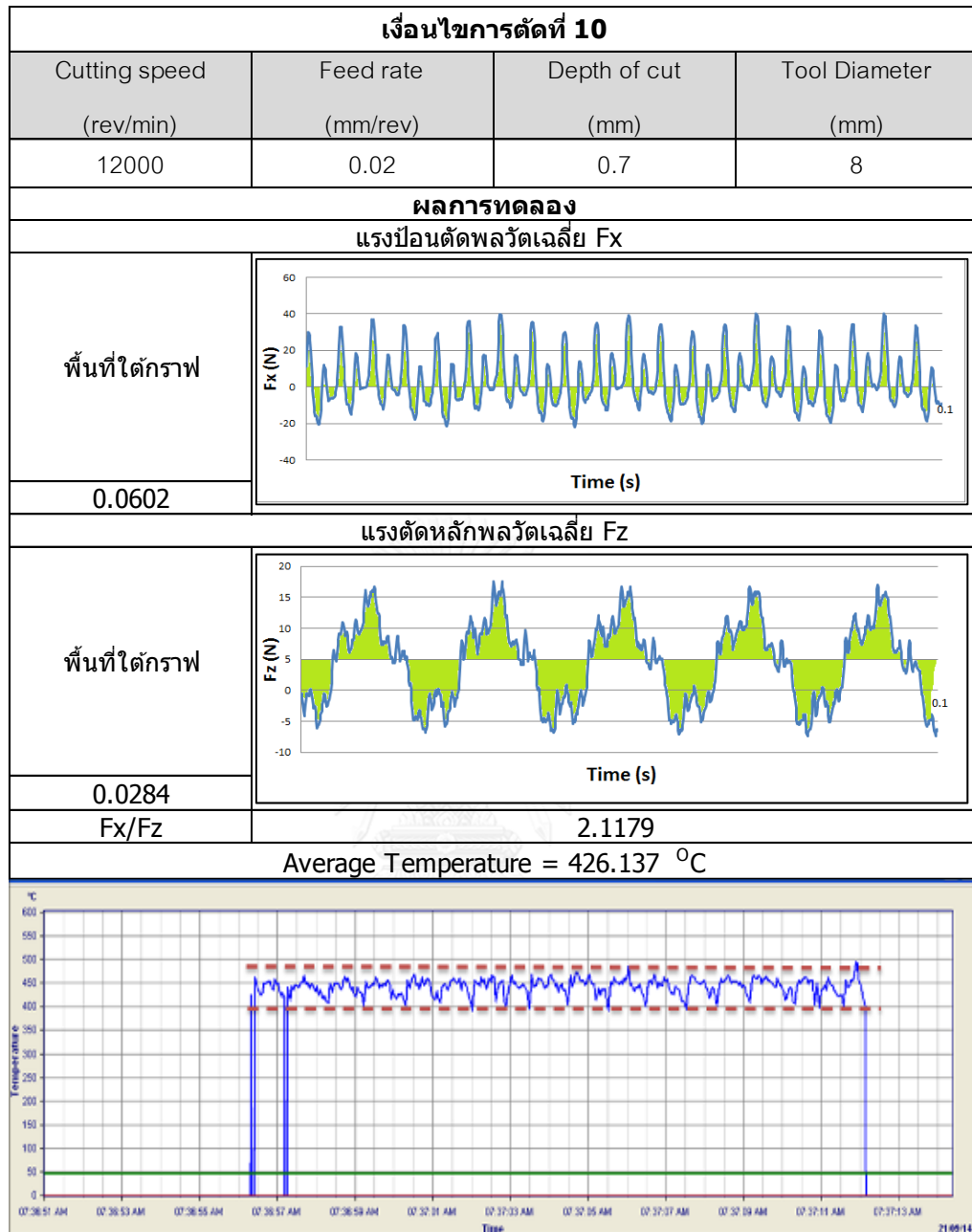


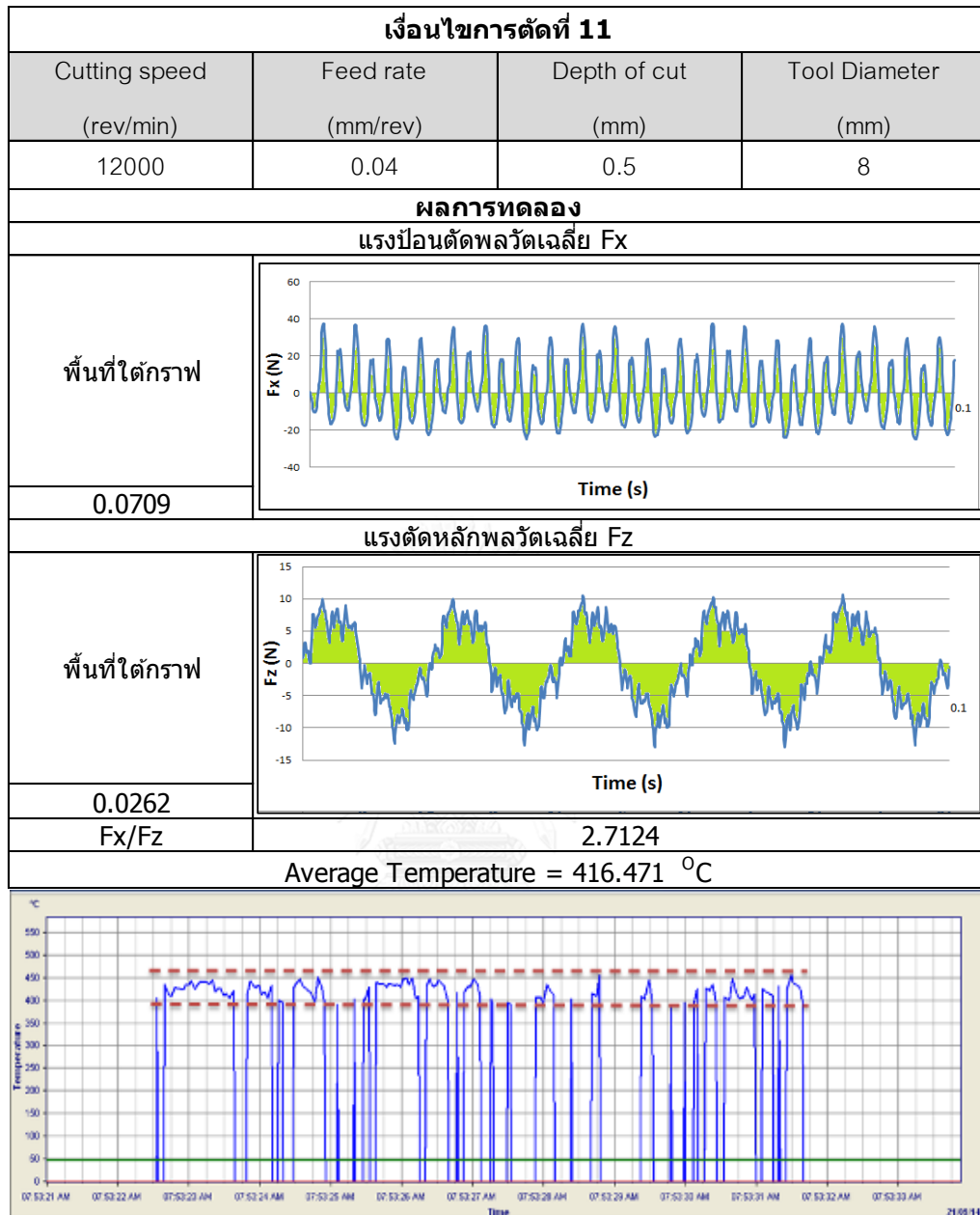


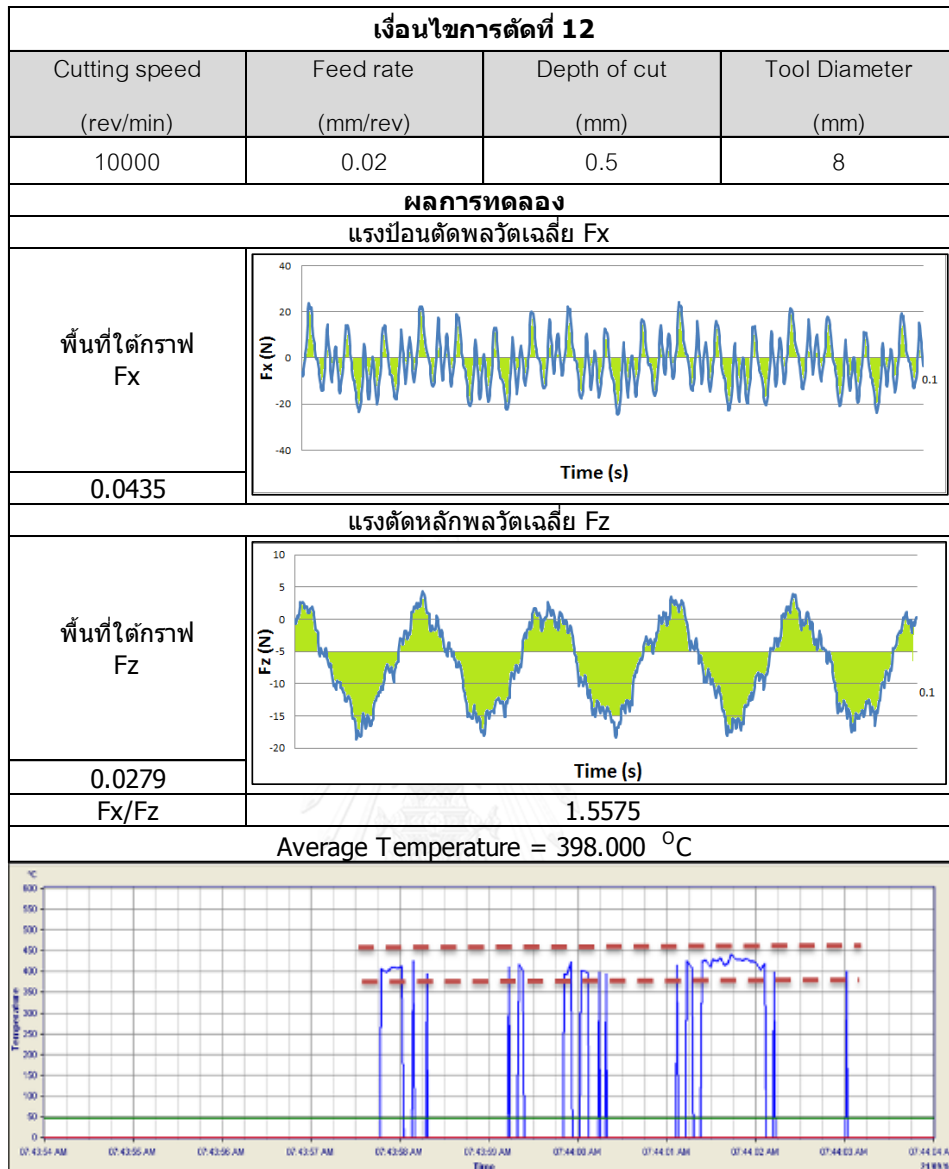


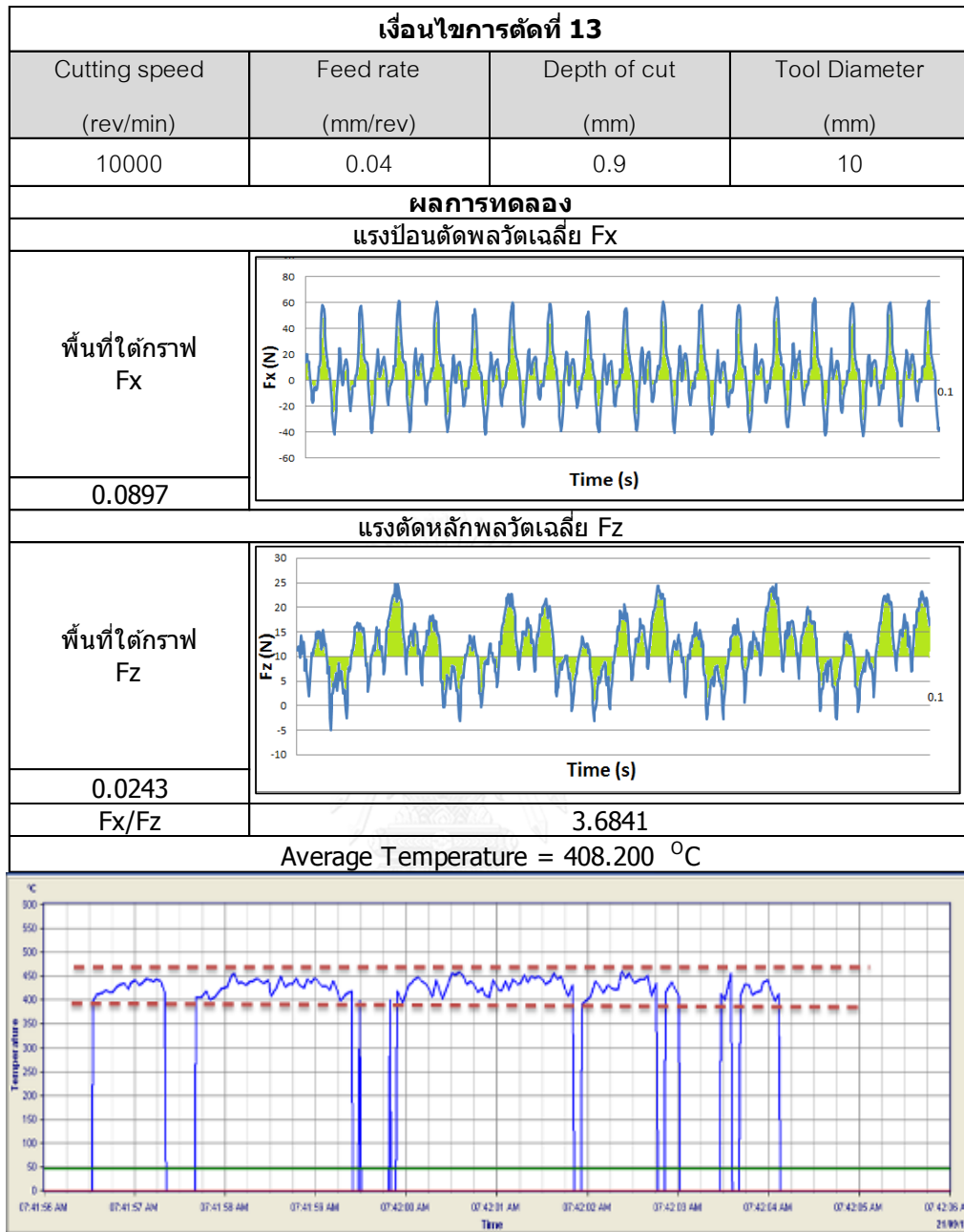


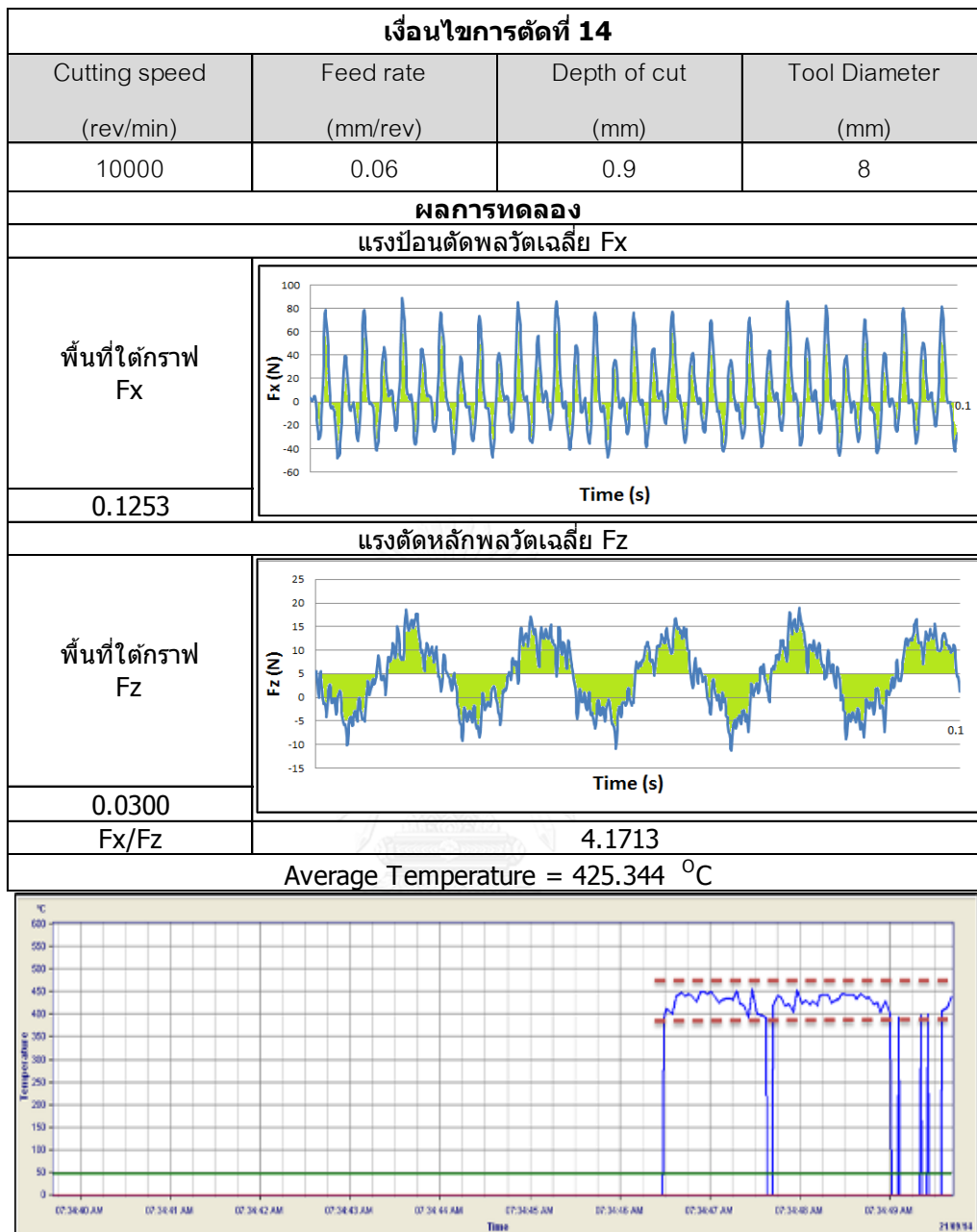


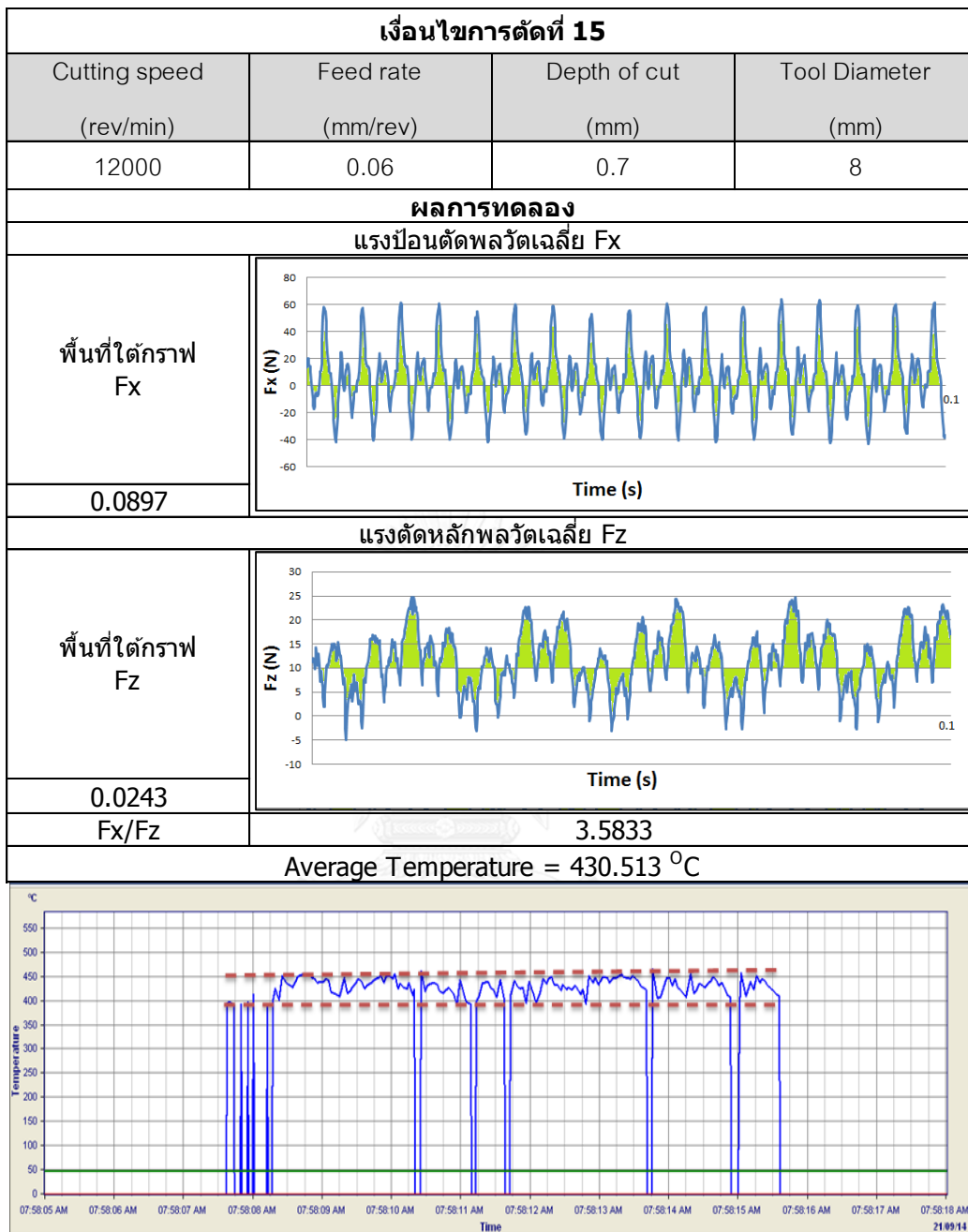


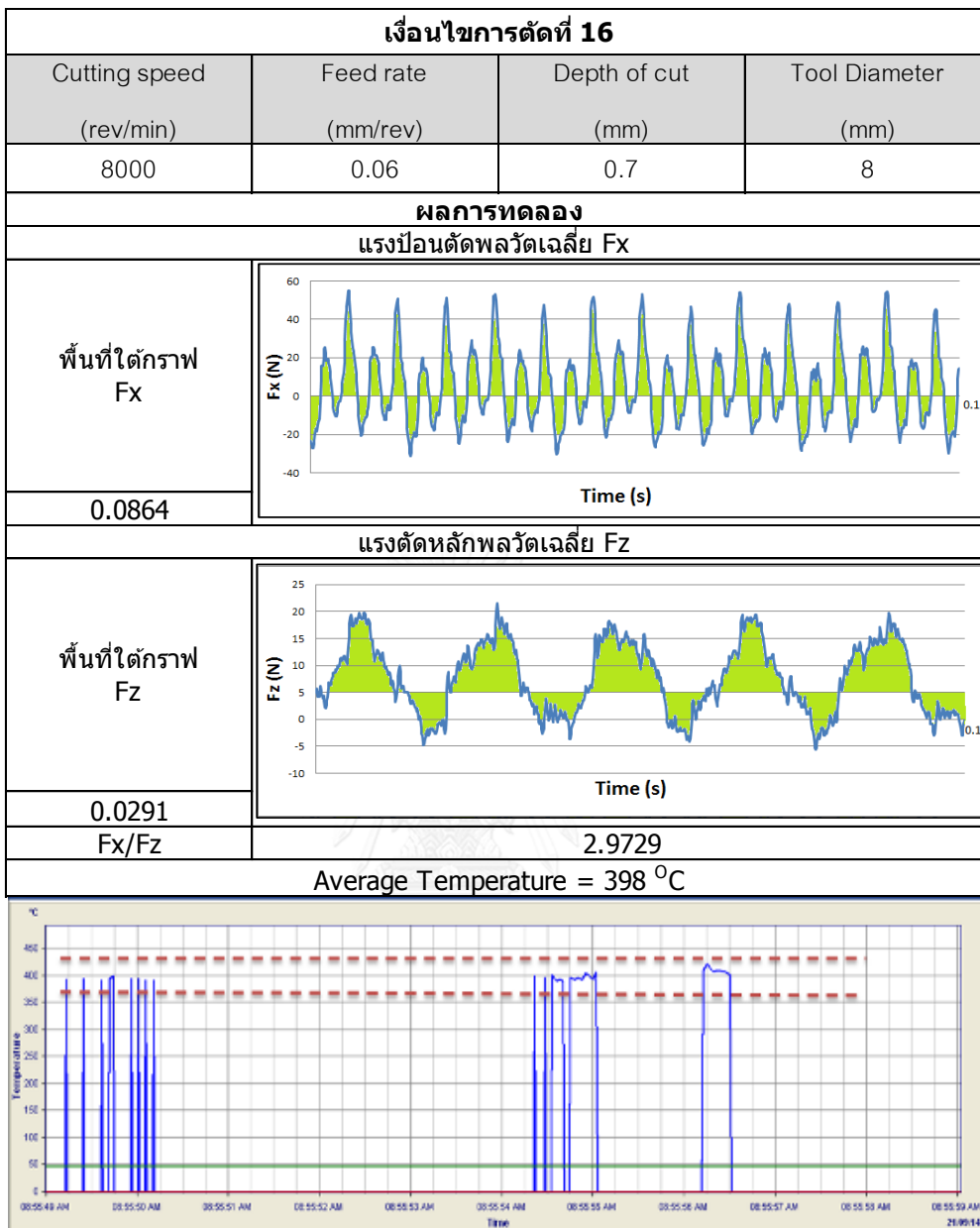


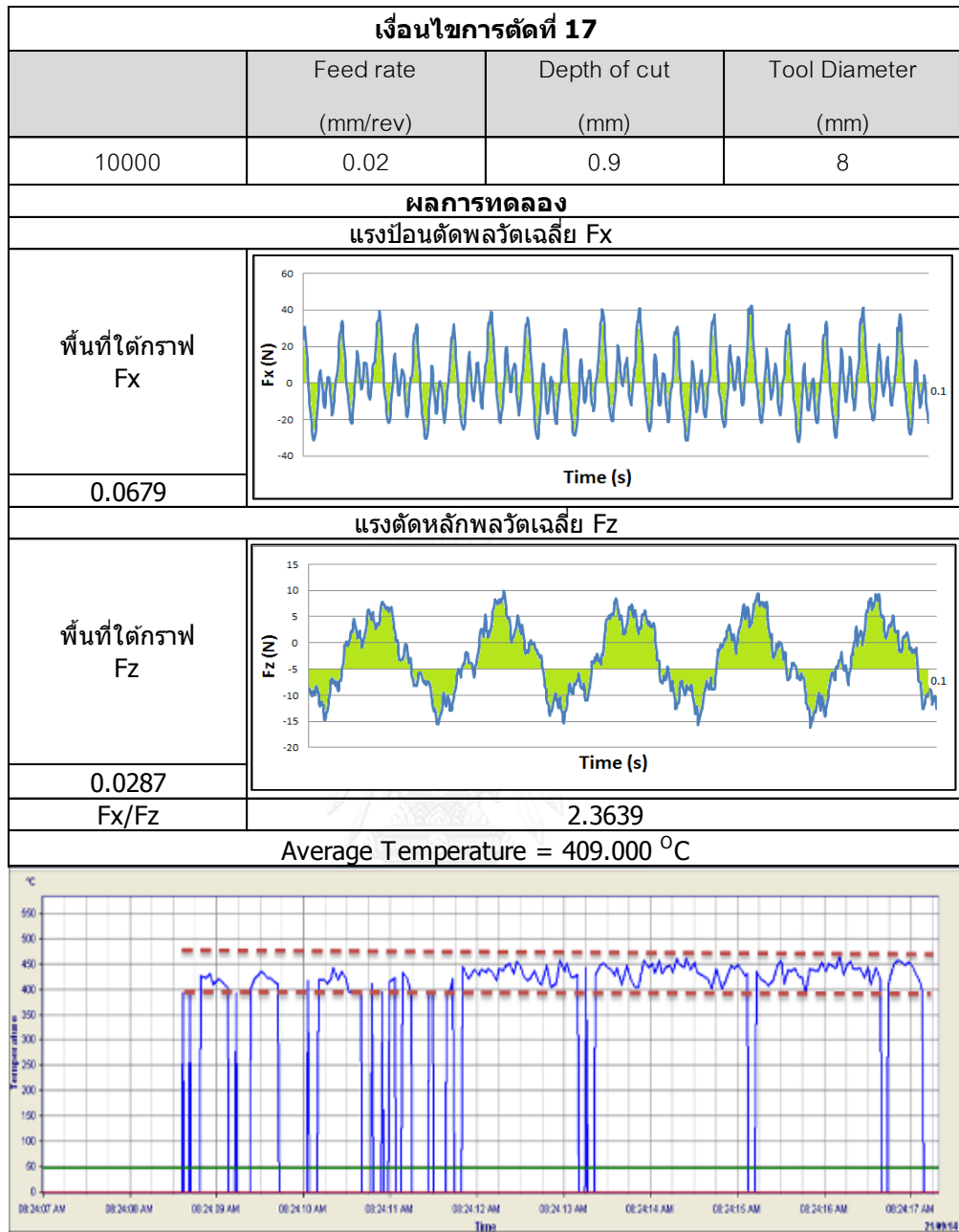




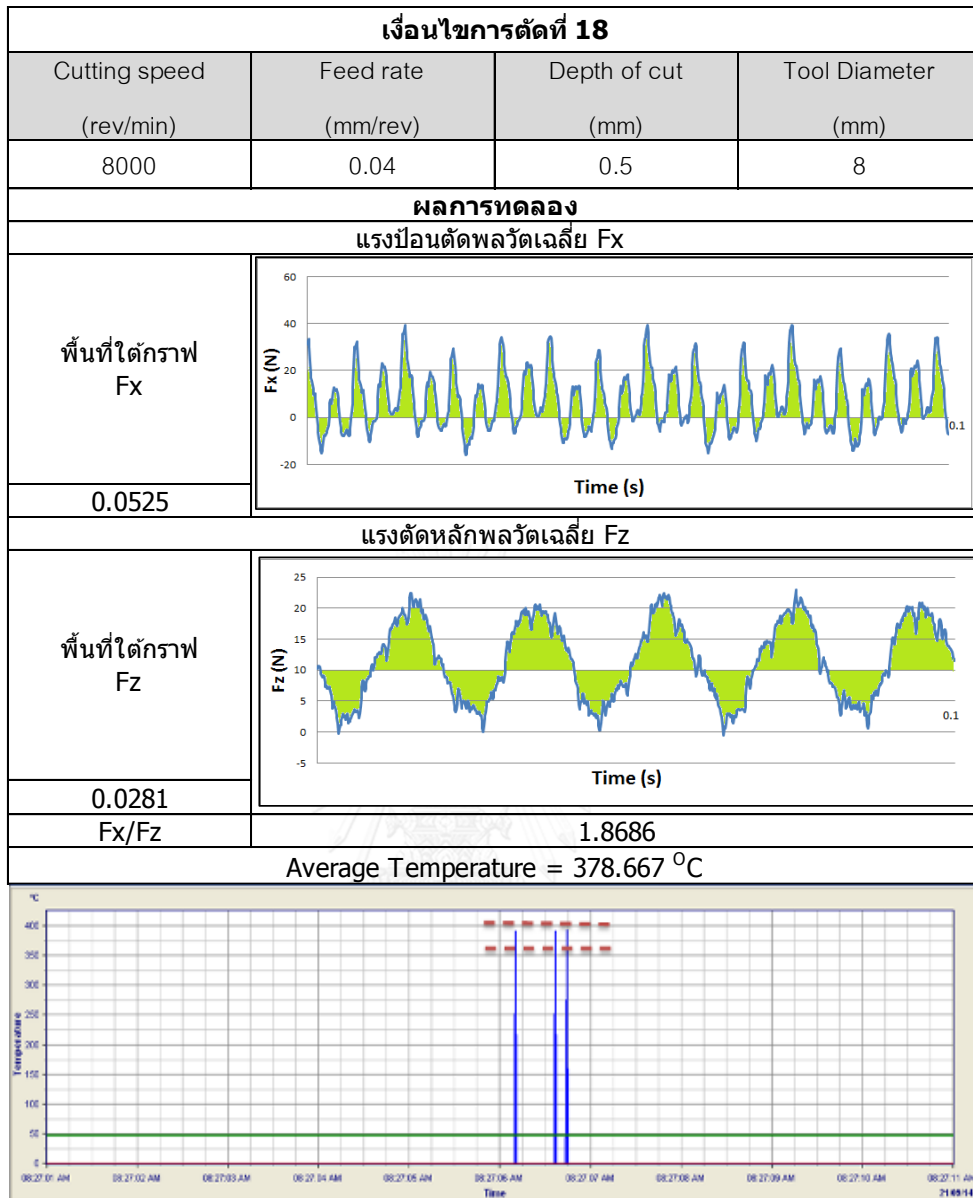


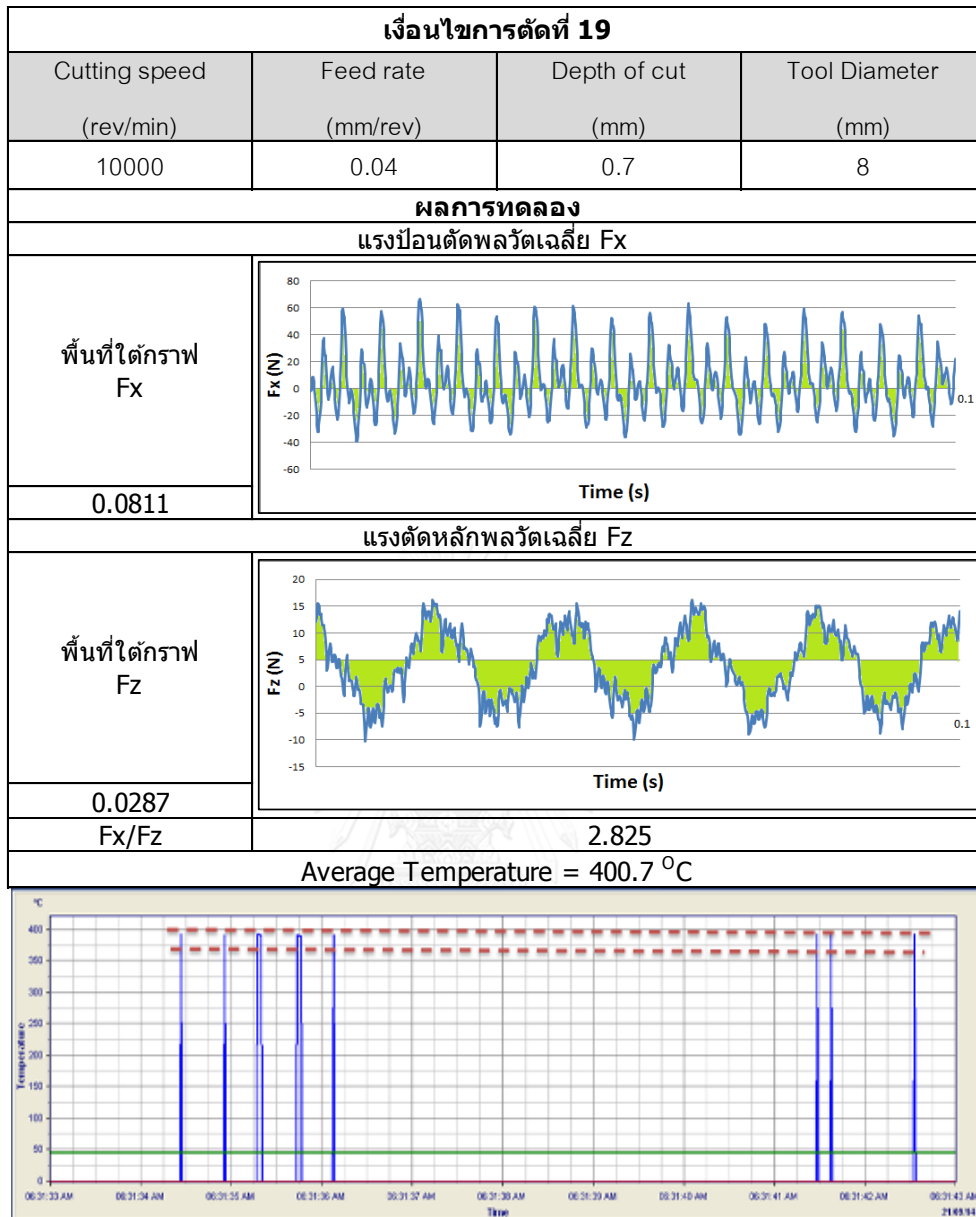


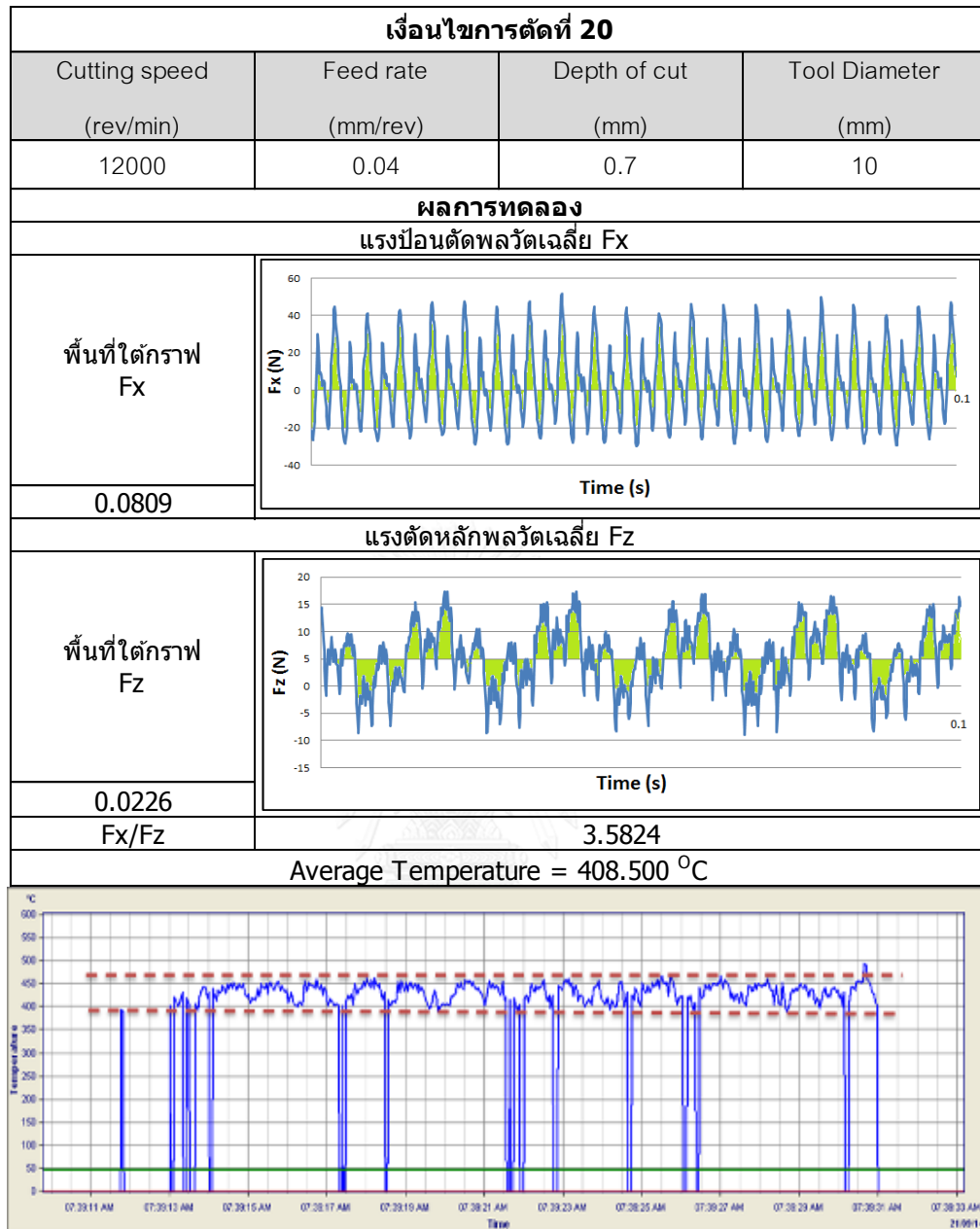


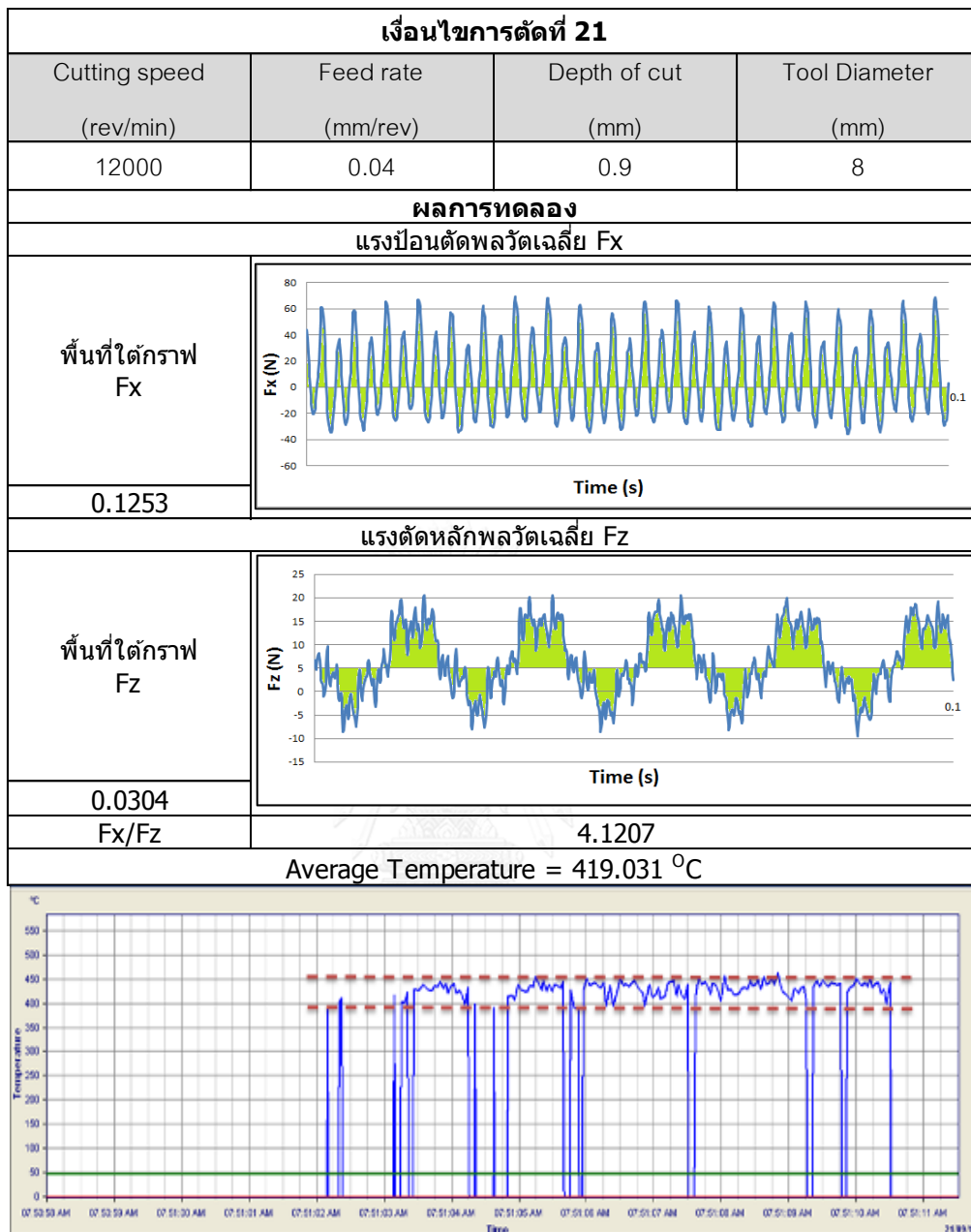


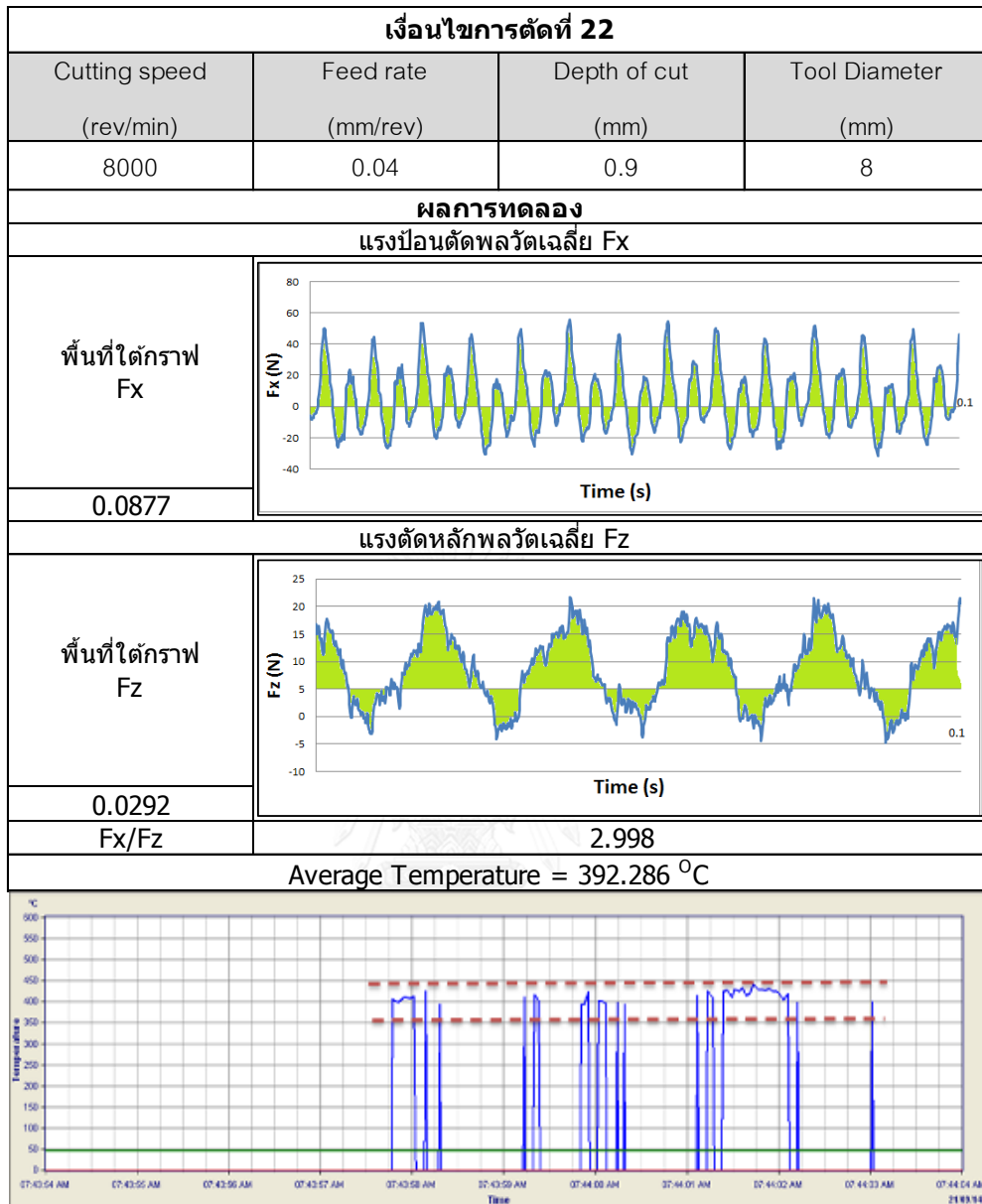


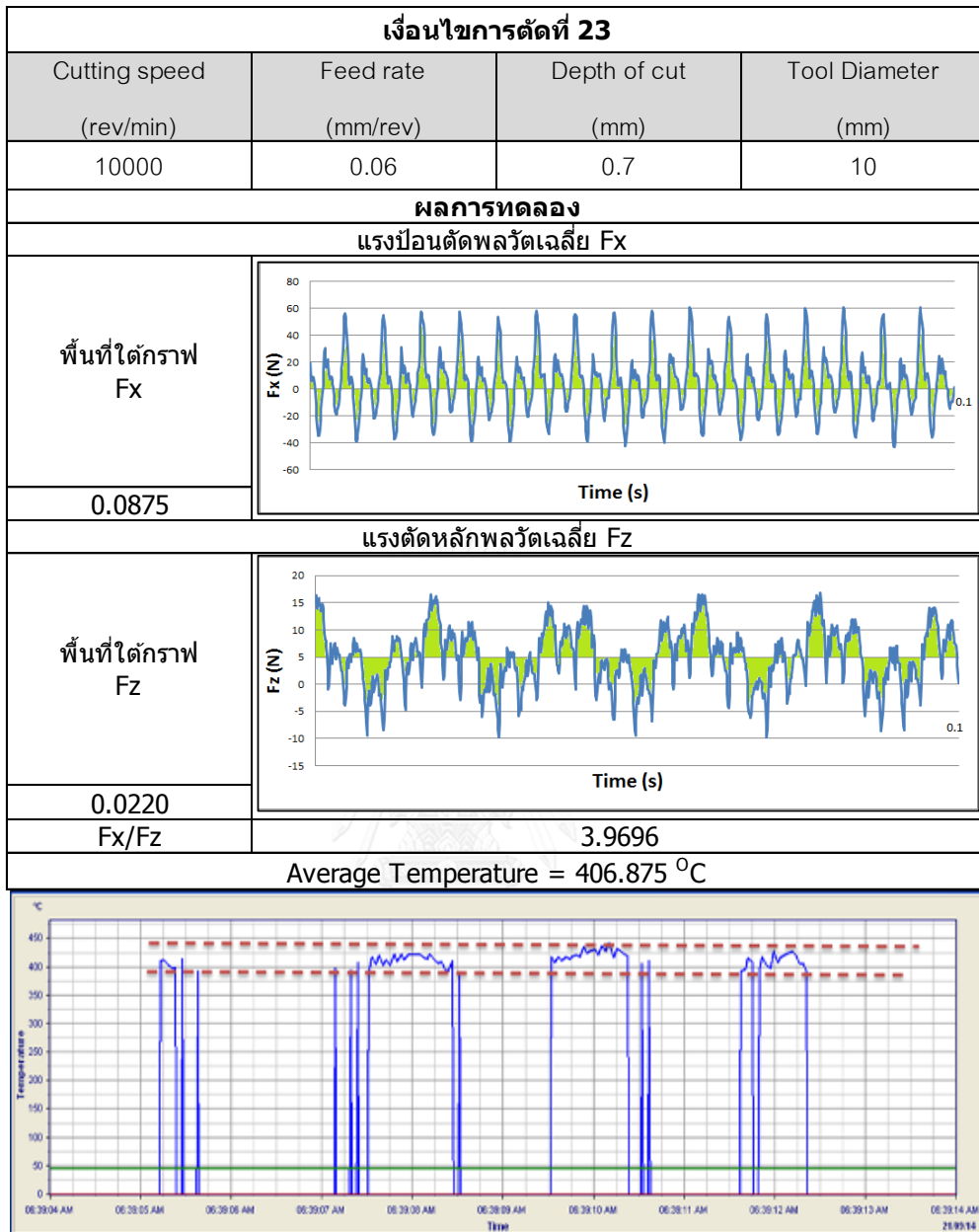


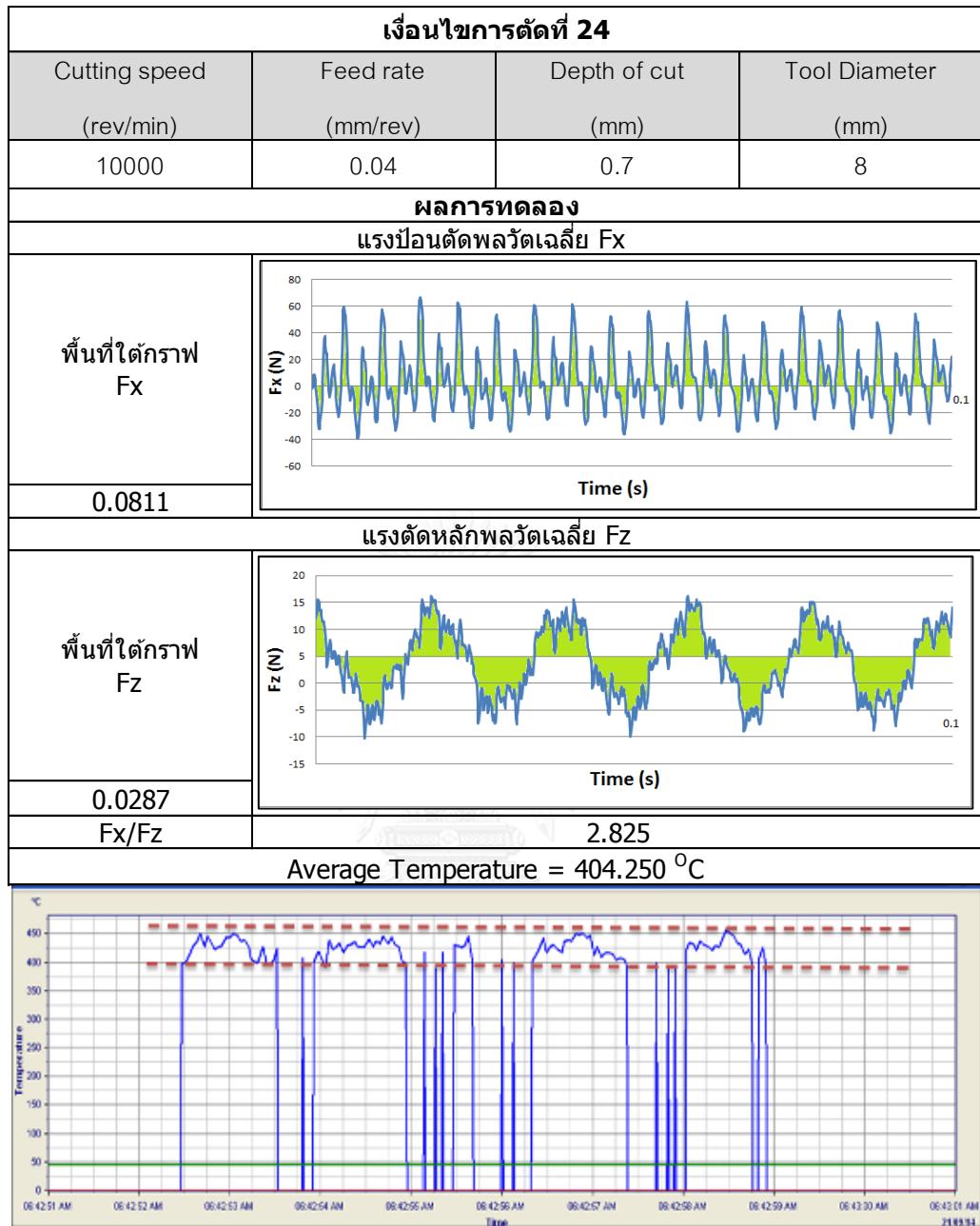






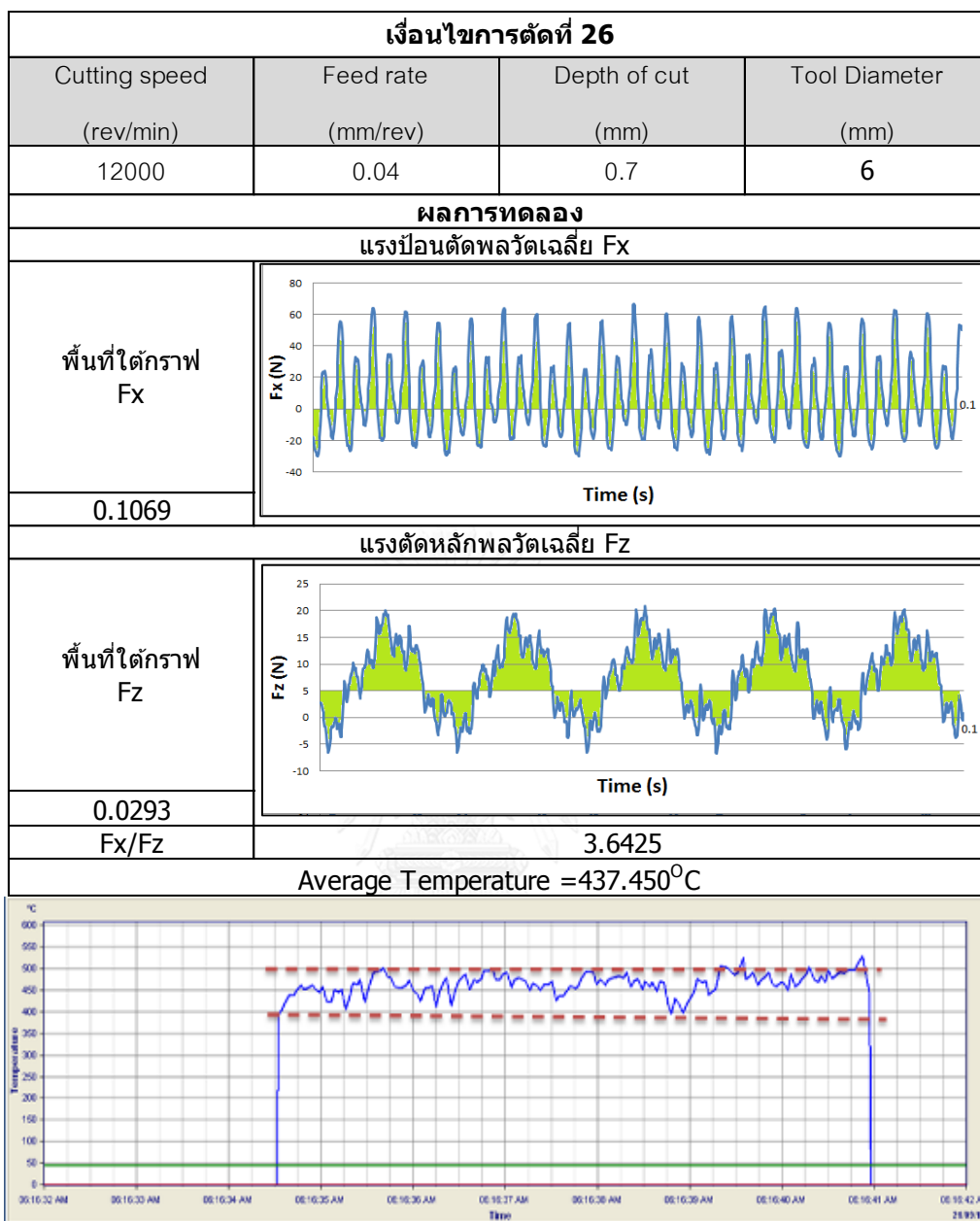


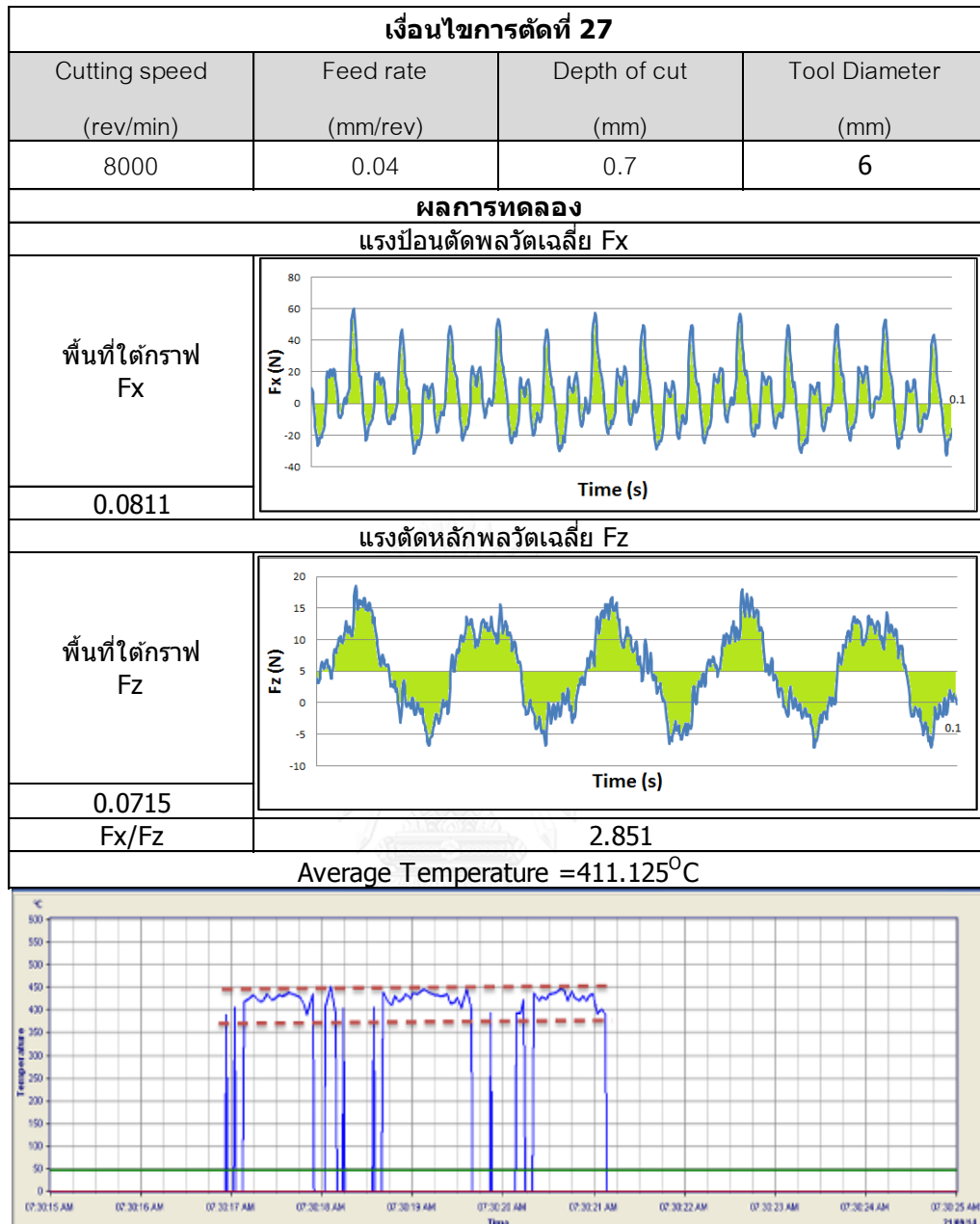












### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวพรรณรวิทย์ ไยสุข เกิดวันที่ 30 เมษายน พ.ศ. 2529 ที่จังหวัดลพบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ในปี การศึกษา 2550 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในภาคการศึกษาต้น ปีการศึกษา 2554

