

การพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานอลูมิเนียมในกระบวนการกัดแบบหัวบอลโดยการใช้ลมเป่า

นายเกียรติ คุรุณาสวัสดิ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 Graduate School.

PREDICTION OF SURFACE ROUGHNESS FOR ALUMINUM IN BALL-END MILLING
PROCESS BY USING AIR BLOW

Mr. Keerati Karunasawat

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

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพยากรณ์ความชุกของโรคพิษสุนัขบ้าใน
	กระบวนการกัดแบบหวับอดโดยการไล่ลมเป่า
โดย	นายเกียรติ คุรุณาสวัสดิ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตลิตเจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชุติมา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตลิตเจริญ)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ สมชาย พวงเพิกคี่ก)

บทคัดย่อภาษาไทย

กิริติ ครุณาสวัสดิ์ : การพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานอลูมิเนียมในกระบวนการกัดแบบหัวบอลโดยใช้ลมเป่า (PREDICTION OF SURFACE ROUGHNESS FOR ALUMINUM IN BALL-END MILLING PROCESS BY USING AIR BLOW)
 อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสถิตเจริญ, 165 หน้า.

วัตถุประสงค์ของ งานวิจัยนี้ เพื่อนำเสนอสมการการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานโดยใช้ลมเป่า การใช้ลมเป่าเป็นการรักษาสภาวะแวดล้อมโดยการลดการใช้สารหล่อเย็นในกระบวนการตัด และลดค่าใช้จ่ายจากการใช้สารหล่อเย็น งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้เทคนิคพื้นผิวผลตอบสนองกับการออกแบบการทดลองแบบบล็อก-เบห์นเคนในการพัฒนาสมการการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงาน โดยชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองคืออลูมิเนียม (Al 6063) และมีดตัดหัวบอลคาร์ไบด์เคลือบผิว (TiAlN)

สมการที่พัฒนาขึ้นอยู่ในรูปแบบของเอ็กโปเนนเชียลฟังก์ชัน ซึ่งประกอบด้วย 5 พารามิเตอร์คือ ความเร็วรอบตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด ขนาดหัวตัด และความดันลมเป่า โดยใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ แรงตัดที่เกิดขึ้นในกระบวนการกัดถูกวัดด้วยไดนาโมมิเตอร์ เพื่อนำมาวิเคราะห์หือทธิพลของพารามิเตอร์ต่างๆที่ส่งผลกระทบต่อความขรุขระผิวชิ้นงาน ซึ่งแรงตัดที่เกิดขึ้นมีความสอดคล้องกับผิวชิ้นงาน และสามารถนำมาอธิบายความขรุขระผิวชิ้นงานได้ เมื่อพารามิเตอร์เปลี่ยนไป

งานวิจัยยังได้เสนอช่วงการพยากรณ์ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 % ในการยืนยันผลการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานจากสมการ จากผลการทดลอง เงื่อนไขการตัดที่ดีที่สุด ด้ให้ความขรุขระผิวที่ต่ำที่สุด คือ ความความเร็วรอบ 2,600 รอบต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.75 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด 6 มิลลิเมตร และความดันลมเป่าที่ 0.3 เมกกะปาร์สคาล (3 บาร์)

ภาควิชา.....วิศวกรรมอุตสาหการ.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมอุตสาหการ.....
 ปีการศึกษา.....2554.....

ลายมือชื่อนิสิต.....
 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ

5270224321 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORDS : BALL END MILLING / AIR BLOW / SURFACE ROUGHNESS / CUTTING FORCE / BOX-BEHNKEN DESIGN

KEERATI KARUNASAWUT : PREDICTION OF SURFACE ROUGHNESS FOR ALUMINUM IN BALL-END MILLING PROCESS BY USING AIR BLOW.

ADVISOR : ASSOC.PROF.SOMKIAT TANGJITSITCHAROEN, D.Eng, 165 pp.

The objective of this research is to propose an equation of surface roughness prediction by using air blow. The use of air blow can preserve the environment and reduce the coolant cost. This research utilizes the response surface analysis with the Box-Behnken design to develop the predict surface roughness model. The aluminum (Al 6063) is employed for the cutting tests and the cutting tool is the coated carbide ball end mill (TiAlN).

The experimentally obtained surface roughness model in this research is developed and proposed by using the exponential, which is obtained by using the multiple linear regression analysis. The parameters in the model consist of the cutting speed, the feed rate, the depth of cut, the tool diameter and the air blow pressure. The cutting force is measured by employing the dynamometer during the process. The inprocess cutting forces showed the same trend with the surface roughness, which can help to analyse the effects of the parameters on the surface roughness. The prediction interval with 95% confident level is proposed to verify the predicted surface roughness from the model. The experimentally obtained results showed that the best cutting conditions are the cutting speed of 2,600 rpm, the feed rate of 0.02 mm/rev, the depth of cut of 0.75 mm, the tool diameter of 6 mm, and the air blow pressure of 3 bar.

Department :.....Industrial Engineering..... Student's Signature.....

Field of Study :.....Industrial Engineering..... Advisor's Signature.....

Academic Year :.....2011.....

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัย ฉบับนี้ ลุล่วงไปด้วยดี ผู้จัดทำขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ ตั้งจิตตติเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ ที่ช่วยให้คำแนะนำ โอกาส ความรู้ ความช่วยเหลือ ตลอดจนให้แนวทางในการแก้ปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นระหว่างการทำโครงการ

ขอขอบพระคุณ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดต่างๆ พร้อมทั้งตรวจแก้ไขข้อบกพร่องในการเขียนรายงานฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อังศุมาลิน เสนจันทร์มิไชย ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดต่างๆ เกี่ยวกับหลักสถิติ ในการเขียนรายงานฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงสมบูรณ์

ผู้จัดทำขอขอบพระคุณนาย ชาญณรงค์ รุ่งเรือง ที่ได้แนะนำวิธีการใช้อุปกรณ์ และเครื่องจักรในการทดลอง และถ่ายทอดประสบการณ์ของการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในการทำการทดลอง จนทำให้โครงการสำเร็จลุล่วงไปตามเป้าหมายได้เป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอขอบ พระคุณบิดา มารดา รวมถึงเพื่อนๆนิสิต ปริญญาโททุกคนที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และให้กำลังใจแก่ผู้จัดทำในครั้งนี้นับประสงความสำเร็จ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 บทนำ.....	1
1.2 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	7
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	10
1.4 ขอบเขตการดำเนินงาน	10
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	11
1.6 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย.....	11
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	12
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	12
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	37
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	42
3.1 การออกแบบการทดลอง	42
3.2 การกำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง.....	42
3.3 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	43
3.4 ขั้นตอน และวิธีการทดลอง	46
3.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล.....	47
3.6 เกณฑ์การเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสม	50

3.7 การออกแบบการทดลอง	51
3.8 การวิเคราะห์ข้อมูล	56
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล	58
4.1 ผลการทดลอง	59
4.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการทดลอง	60
4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน	65
4.4 สรุปผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน	82
4.5 เงื่อนไขการตัดที่เหมาะสม	84
4.6 การทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลอง	86
4.7 การสร้างเส้นขอบเขตการพยากรณ์	90
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	93
5.1 สรุปผลการวิจัย	93
5.2 อภิปรายผลการวิจัย	94
5.3 ข้อจำกัดและอุปสรรคในงานวิจัย	94
5.4 ข้อเสนอแนะ	95
รายการอ้างอิง	96
ภาคผนวก	99
ภาคผนวก ก ตารางแสดงผลการทดลองที่เงื่อนไขของการตัดต่างๆ	100
ภาคผนวก ข ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของการทดลองที่เงื่อนไขของ การตัดต่างๆ	113
ภาคผนวก ค รูปความขรุขระผิวเฉลี่ยของชิ้นงานที่ทำการทดลอง และนำมาหาค่าเฉลี่ย ของความขรุขระผิว	118
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	165

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 รูปแบบการชำรุดเสียหายของมีดตัด	24
ตารางที่ 2.2 กลไกการสึกหรอของมีดตัด	25
ตารางที่ 2.3 การออกแบบบอกรูปแบบบ็อกซ์ -เบิ้นเคนแบบ 3 ตัวแปร.....	36
ตารางที่ 3.1 ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง	52
ตารางที่ 3.2 เมตริกซ์การออกแบบการทดลองสำหรับการตัดแบบใช้ลมเป่า	53
ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองสำหรับเงื่อนไขการตัดแบบหวับอลโดยการใช้ลมเป่า	62
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของความขรุขระผิวเฉลี่ย	70
ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแรงในแนวแกน X (Fx)	77
ตารางที่ 4.4 ผลตอบของสมการเต็มรูปเปรียบเทียบกับสมการลดรูปของ การตัดแบบใช้ลมเป่า	83
ตารางที่ 4.5 สรุปผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนระหว่างผลตอบและปัจจัยต่างๆ ของการตัดแบบลมเป่า	84
ตารางที่ 4.6 ผลตอบของการทดลองด้วยเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมของ การตัดแบบใช้ลมเป่า.....	86
ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบด้วย T-TEST ของปัจจัยการตัดของการตัดด้วยเงื่อนไขต่างๆของ การตัดแบบลมเป่า	87
ตารางที่ 4.8 ค่าความผิดพลาดของค่าพยากรณ์กับค่าจริงของผลตอบจากค่าการตัดที่ เหมาะสม	87
ตารางที่ 4.9 ค่าความผิดพลาดของค่าพยากรณ์กับค่าจริงของความขรุขระผิวชิ้นงาน ผลตอบ	88
ตารางที่ 4.10 ค่าความผิดพลาดของค่าพยากรณ์กับค่าจริงของแรงตัดในแนวแกน X (Fx)ผล ตอบ	89
ตารางที่ 4.11 ปัจจัยในการทดลองเพื่อหาเส้นขอบเขตการพยากรณ์ของความขรุขระผิวเฉลี่ย	90
ตารางที่ 4.12 ปัจจัยในการทดลองเพื่อหาเส้นขอบเขตการพยากรณ์ของแรงตัดในแนวแกน X	91

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1.1 การพัฒนาเทคโนโลยีของระบบการผลิตเชิงกล	5
ภาพที่ 2.1 กระบวนการตัดแบบต่างๆที่เป็นพื้นฐานสำคัญ	12
ภาพที่ 2.2 กระบวนการกัด	13
ภาพที่ 2.3 การกัดแนวราบ	13
ภาพที่ 2.4 การกัดแนวตั้ง	14
ภาพที่ 2.5 ทิศทางการกัด	15
ภาพที่ 2.6 การตัดในกระบวนการกัด	16
ภาพที่ 2.7 การกัดแบบ SLAB MILLING	18
ภาพที่ 2.8 การตัดแนวตั้ง หรือ การกัดผิวหน้า	19
ภาพที่ 2.9 รายละเอียดผิวชิ้นงาน	20
ภาพที่ 2.10 ความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (RA)	22
ภาพที่ 2.11 ค่าความขรุขระผิวลึก (RZ).....	22
ภาพที่ 2.12 บริเวณที่เกิดความร้อนขณะตัด.....	23
ภาพที่ 2.13 สัดส่วนของความร้อนที่เกิดขณะตัด	26
ภาพที่ 2.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดรอยสึกหรอบนผิวคายและเวลาที่ใช้ในการตัด	27
ภาพที่ 2.15 การออกแบบส่วนประสมกลาง	34
ภาพที่ 2.16 การออกแบบบออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนแบบ 3 ตัวแปร	36
ภาพที่ 3.1 วัสดุชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง	43
ภาพที่ 3.2 มีดกัดแบบหัวบอล ยี่ห้อ 7-LEADERS.....	44
ภาพที่ 3.3 เครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ออร์ซินิด 5 แกน	44
ภาพที่ 3.4 ไดนาโมมิเตอร์	45
ภาพที่ 3.5 ชาร์จแอมป์ไฟเออร์	45
ภาพที่ 3.6 ออสซิลโลสโคป	45
ภาพที่ 3.7 เครื่องวัดความขรุขระผิวชิ้นงาน	46
ภาพที่ 3.8 ลักษณะการตัดแบบใช้ลมเป่า	46
ภาพที่ 3.9 การติดตั้งไดนาโมมิเตอร์หรือเซ็นเซอร์วัดแรง	47

ภาพที่ 3.10 การเชื่อมต่อสายไดนาโมวัตต์แรงเข้ากับเครื่องขยายสัญญาณและ เครื่องออสซิลโลสโคป	48
ภาพที่ 3.11 การเตรียมชิ้นงานและชิ้นงานที่ผ่านการปาดหน้าเรียบร้อยแล้ว	48
ภาพที่ 3.12 การคำนวณแรงตัดสถิติ.....	49
ภาพที่ 3.13 ความถี่ในการตัด	50
ภาพที่ 3.14 ความขรุขระผิวชิ้นงานสำหรับกระบวนการตัดต่างๆ.....	51
ภาพที่ 4.1 การเกิดการหลอมละลายเฉพาะโลหะติดที่เม็ดมีด และชิ้นงาน.....	59
ภาพที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง RA กับ RZ	61
ภาพที่ 4.3 NORMAL PROBABILITY PLOT ของข้อมูลความขรุขระผิวเฉลี่ย.....	66
ภาพที่ 4.4 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลความขรุขระผิวเฉลี่ย	67
ภาพที่ 4.5 กราฟทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความขรุขระผิวเฉลี่ย	68
ภาพที่ 4.6 กราฟคอนทัวร์แสดงระดับของความขรุขระผิวเฉลี่ย (RA)กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง หัวตัด (D) และความดันลมเป่า (A)	69
ภาพที่ 4.7 กราฟคอนทัวร์แสดงระดับของความขรุขระผิวเฉลี่ย (RA)กับความลึกกัด (D) และ ความดันลมเป่า (A)	71
ภาพที่ 4.8 กราฟ เซอร์เฟสแสดงระดับของความขรุขระผิวเฉลี่ย (RA) กับความเร็วรอบตัด (N) และ อัตราป้อนตัด (F)	72
ภาพที่ 4.9 กราฟเซอร์เฟสแสดงระดับของความขรุขระผิวเฉลี่ย (RA) กับความลึกกัด (D) และ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด (D).....	73
ภาพที่ 4.10 กราฟเซอร์เฟสแสดงระดับของความขรุขระผิวเฉลี่ย (RA) กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง กลางหัวตัด (D) และ ความดันลมเป่า (A).....	74
ภาพที่ 4.11 NORMAL PROBABILITY PLOT ของข้อมูลแรงตัดในแนวสัมผัส	75
ภาพที่ 4.12 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลแรงตัดในแนวสัมผัส.....	76
ภาพที่ 4.13 กราฟทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของข้อมูลแรงตัดในแนวสัมผัส ...	77
ภาพที่ 4.14 กราฟคอนทัวร์แสดงระดับของแรงในแนว X (Fx) กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด (D) และความดันลมเป่า (A)	78
ภาพที่ 4.15 กราฟคอนทัวร์แสดงระดับของแรงใน X (Fx) กับอัตราป้อนตัด (F) และความดัน ลมเป่า (A).....	79

ภาพที่ 4.16 กราฟเซอร์เฟสแสดงระดับของแรงตัดในแนวแกน X (Fx) กับความเร็วรอบตัด (N) และ อัตราป้อนตัด (F)	80
ภาพที่ 4.17 กราฟเซอร์เฟสแสดงระดับของแรงตัดในแนวแกน X (Fx) กับความลึกตัด (D) และ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด (D).....	81
ภาพที่ 4.18 กราฟเซอร์เฟสแสดงระดับของแรงตัดในแนวแกน X (Fx) กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด (D) และ ความดันลมเป่า (A).....	82
ภาพที่ 4.19 OPTIMIZATION PLOT ของเงื่อนไขการตัดแบบใช้ลมเป่า	85
ภาพที่ 4.20 ค่าความผิดพลาดของค่าพยากรณ์กับค่าความจริงของความขรุขระผิวชิ้นงานของผลตอบ	88
ภาพที่ 4.21 ค่าความผิดพลาดของค่าพยากรณ์กับค่าความจริงของค่าแรงในแนวแกน X (Fx) ของผลตอบ	89
ภาพที่ 4.22 เส้นขอบเขตการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย	91
ภาพที่ 4.23 เส้นขอบเขตการพยากรณ์ค่าแรงตัดในแนวแกน X.....	92

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำ

เนื่องจากปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตได้มีการเปลี่ยนแปลงและพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็ว และมีแนวโน้มที่จะขยายตัวเพิ่มขึ้น โดยสืบเนื่องมาจากสภาวะแวดล้อมของธุรกิจที่เปลี่ยนแปลงไป ตลอดเวลา ไม่ว่าจะเป็นการเปลี่ยนแปลงของอุปสงค์ตลาดจากราคาน้ำมันที่สูงขึ้น หรือ กระบวนการผลิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากยิ่งขึ้น ดังนั้นระบบการผลิตในอนาคตต้องมีสถานะที่สอดคล้องกับคล่องแคล่วอัจฉริยะ มีการตอบสนองที่รวดเร็ว ให้ผลิตภัณฑ์ที่ออกมามีคุณภาพสูง ตอบสนองความต้องการเฉพาะด้าน และตระหนักในสภาวะแวดล้อม โดยเฉพาะ ภาวะป้องกันภัย , การก่อสร้างอาคาร , เครื่องใช้ไฟฟ้า รวมทั้งชิ้นส่วนรถยนต์ เป็นต้น ซึ่งอุตสาหกรรมเหล่านี้จำเป็นต้องใช้วัตถุดิบเป็นปัจจัยพื้นฐานในการผลิต โดยวัตถุดิบสำคัญที่ใช้เป็นปัจจัยในการผลิตคือ วัสดุประเภทพอลิเมอร์ ระบบการผลิตที่สามารถตอบสนองต่อคุณลักษณะต่างๆตามที่ได้กล่าวมาคือ ระบบการผลิตอัจฉริยะ (Intelligent Manufacturing systems' IMS) ซึ่งได้มีการศึกษากันอย่างกว้างขวาง โดยระบบการผลิตอัจฉริยะเป็นระบบการผลิตที่สามารถควบคุมและตรวจสอบกระบวนการทำงานด้วยตัวเองได้ ซึ่งระบบการผลิตอัจฉริยะเป็นระบบการผลิตที่เกิดขึ้นจากการผสมผสานกันระหว่างเทคโนโลยีสารสนเทศขั้นสูงกับเครื่องจักรกลอัจฉริยะ เพื่อให้ระบบการผลิตสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงที่กล่าวมาข้างต้นได้

มีความพยายามอย่างมากที่จะทำให้การผลิตขึ้นส่วนต่าง ๆ มีคุณภาพและผลิตภาพที่สูงที่สุด แต่เนื่องจากการกำจัดเนื้อโลหะในกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีการกัดอย่างรวดเร็วทำให้เกิดปัญหาความร้อนสูงส่งผลให้เกิดปัญหาการสึกหรอของมีดตัดซึ่งนอกจากจะทำให้เกิดความขรุขระของผิวงานซึ่งเป็นสาเหตุของชิ้นงานที่มีคุณภาพต่ำกว่ากำหนด

วิธีการลดความร้อนระหว่างการตัดที่นิยมและใช้กันอย่างแพร่หลายได้แก่ การใช้สารหล่อเย็น โดยสารดังกล่าวจะช่วยลดอุณหภูมิกระบวนการตัด ลดอัตราการสึกหรอของมีดตัด นำมาซึ่งผิวชิ้นงานที่มีคุณภาพดีขึ้น และอายุการใช้งานของมีดตัดที่สูงขึ้น

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การตัดแบบเปียก สารหล่อเย็นช่วยลดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นและแรงต้านในการตัด ทำให้พื้นผิวที่ได้หลังการตัดมีความหยาบผิวดำกว่า นั่นคืองานที่ได้จะมีคุณภาพสูงกว่า และเมื่อพิจารณาการตัดแบบใช้ละอองสารหล่อเย็น พบว่าพื้นผิวที่ได้มีคุณภาพดีกว่าทั้งการตัดแบบลมเป่า และการตัดแบบเปียก สามารถอธิบายได้จากการใช้สารหล่อเย็นแบบละอองจะสามารถเข้าถึงพื้นผิวการตัดได้ดีกว่า และเกาะติดกับพื้นผิวการตัดได้ดีกว่าการตัดแบบเปียก

แต่ในการตัดที่ใช้สารหล่อเย็นนั้นจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้งแบบเปียก และแบบละออง โดยสารหล่อเย็นที่หมดอายุการใช้งานนั้นจะถูกนำไปทิ้ง ซึ่งการนำสารหล่อเย็นไปทิ้งนั้นจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งการใช้สารหล่อเย็นยังเป็นการเพิ่มต้นทุนให้กับกระบวนการตัด แม้ว่าจะสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ แต่ก็ยังมีอายุการใช้งานที่จำกัดทำให้ต้องทิ้งไปอยู่ดี

ในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะทำการตัดแบบลมเป่าที่มีการปรับแรงดันลมเป่าเพื่อหาความเหมาะสมของชิ้นงานให้ใกล้เคียงกับการตัดแบบเปียก และการตัดแบบละอองเพื่อจะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ซึ่งเป็นกาช่วยในการลดต้นทุนจากการใช้สารหล่อเย็น และเป็นการช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอันเนื่องจากการใช้สารหล่อเย็น

1.1.1. ภาพรวมของกระบวนการผลิต

การแข่งขันในทางธุรกิจมีความรุนแรงเพิ่มมากขึ้นตลอดเวลาในปัจจุบัน เพื่อที่จะอยู่รอดและดำเนินธุรกิจต่อไปได้ ดังนั้นการผลิตสินค้าจึงไม่ได้คำนึงถึงปริมาณเป็นหลักเพียงอย่างเดียว แต่จะต้องเป็นการผลิตที่ได้คุณภาพ มีความเที่ยงตรง และส่งมอบให้ทันเวลาที่กำหนดด้วย จากการศึกษาพบว่าประเทศอุตสาหกรรมชั้นนำของโลกได้หันมาลงทุนในประเทศไทยเพื่อเป็นฐานการผลิต ไม่ว่าจะเป็น อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ , อุตสาหกรรมก่อสร้างอาคาร , อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์เครื่องใช้ไฟฟ้า , อุตสาหกรรมผลิตรถยนต์ ซึ่งอุตสาหกรรมที่ได้กล่าวมานั้นมีการ

เจริญเติบโตมากขึ้นตลอดเวลา ตัวอย่างเช่น ยอดการส่งออกชิ้นส่วนยานยนต์ของประเทศไทยที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ที่ประเทศไทยได้ส่งออกไปยังตลาดโลก

เนื่องจากเครื่องจักรกลประเภทนี้มีความยืดหยุ่นในการทำงานที่สูงมาก และประกอบกับโดยส่วนใหญ่อุตสาหกรรมผลิตรถยนต์จะมีรูปร่างที่ซับซ้อนถ้าจะขึ้นรูปด้วยเครื่องจักรกลทั่วไปไม่สามารถทำได้ และเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์สามารถทำการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความซับซ้อนได้ตามรูปแบบที่ต้องการ อย่างไรก็ตามในปัจจุบันกระบวนการผลิตจะต้องพบกับความต้องการที่มีมากขึ้นในด้านต่างๆ เช่น คุณภาพของผลิตภัณฑ์ วงจรชีวิตของผลิตภัณฑ์ที่สั้นลง ความหลากหลายของผลิตภัณฑ์ การลดต้นทุนการผลิตเพื่อการแข่งขันในตลาด การมีส่วนร่วมของลูกค้า และการแข่งขันในตลาดโลกที่มีความรุนแรงมากขึ้นเรื่อยๆ ผู้ผลิตจึงหันมาใช้ระบบอัจฉริยะในการผลิตมากยิ่งขึ้น

1.1.2. เครื่องจักรกลอัจฉริยะ

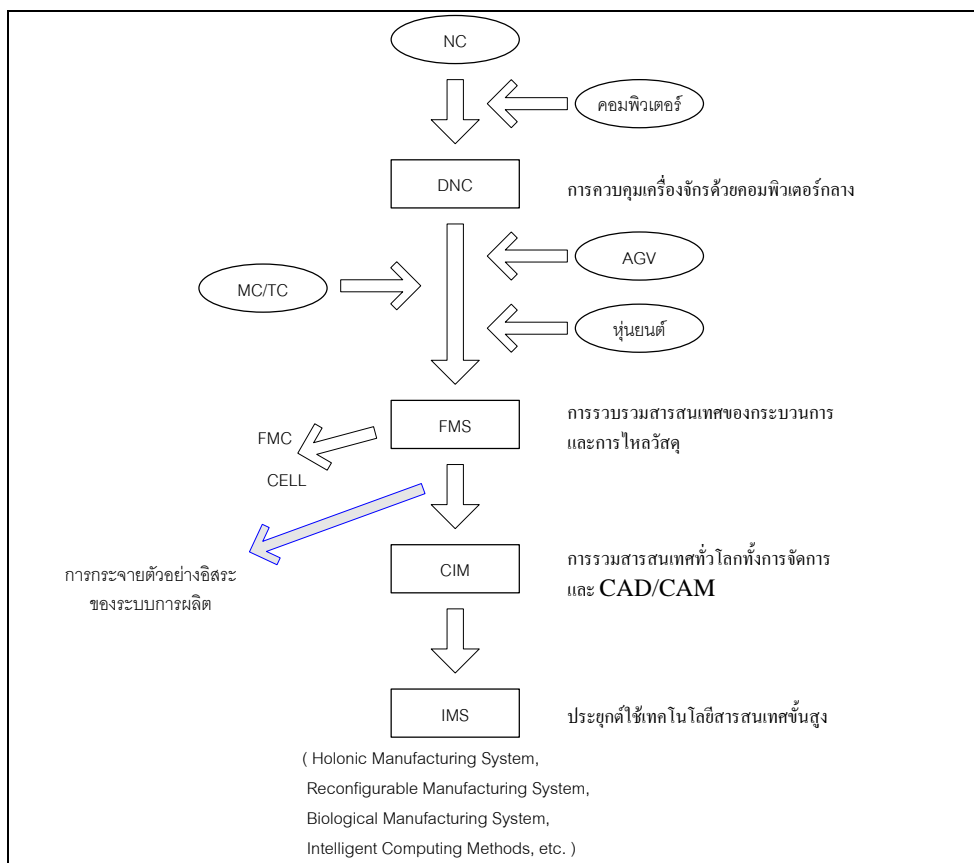
เพื่อที่จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ เครื่องจักรที่จะนำมาใช้ในการผลิตนั้นจำเป็นที่จะต้องมีการจัดการการผลิตที่อัจฉริยะ ด้วยเหตุนี้เครื่องจักรกลอัจฉริยะจึงได้ถูกวิจัย และพัฒนาขึ้นโดยมีวิวัฒนาการ เครื่องจักรกลที่มีความอัจฉริยะจะสามารถทำงานได้ด้วยตัวเอง สามารถทำงานร่วมกับเครื่องจักรอื่น ๆ และสิ่งอำนวยความสะดวกทางการผลิต ดังนั้นเครื่องจักรกลที่มีการทำงานร่วมกับเครื่องจักรอื่น และทำงานได้ด้วยตัวเองนี้ จะมีความอัจฉริยะที่สูงมาก โดยนวัตกรรมของเครื่องจักรกลอัจฉริยะเริ่มจากการนำเครื่องจักรกลซีเอ็นซีที่นิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบันมาทำการวิจัยและพัฒนาเพื่อปรับปรุงให้เป็นเครื่องจักรกลอัจฉริยะ ด้วยการเพิ่มระบบควบคุมให้กับเครื่องจักรกลซีเอ็นซีอีก 2 ระบบ คือ ระบบการควบคุมแบบปรับได้ และระบบของการส่งการ ซึ่งได้รับการป้อนกลับมาจากการวัดชิ้นงานที่ทำการผลิตเสร็จสิ้นแล้วเพื่อที่จะนำมาประเมินผลของการตัดในลำดับต่อไป

การผลิตเชิงกลด้วยระบบอัตโนมัติ มีจุดเริ่มต้นจากเครื่องจักรกลควบคุมเชิงตัวเลข (Numerical Control) ต่อมาถูกพัฒนามาเป็นระบบการควบคุมเชิงตัวเลขทางตรง (Direct NC,

DNC) โดยเครื่องจักรที่ควบคุมเชิงตัวเลขหลายๆ เครื่องจะถูกควบคุมโดยคอมพิวเตอร์กลาง โดยระบบดีเอ็นซีถูกบังคับในรูปแบบของผลลัพธ์ของไหลของสารสนเทศในระบบการผลิต ซึ่งก็คือระบบการผลิตแบบยืดหยุ่น (Flexible Manufacturing System, FMS) โดยชิ้นงานและเครื่องมือต่างๆ ได้ถูกขนส่งระหว่างคลังสินค้ากับเครื่องจักรอย่างอัตโนมัติโดยรถเอจีวี (Automated Guide Vehicles, AGVs) และทำการขนถ่ายโดยหุ่นยนต์อุตสาหกรรมและอื่นๆ ซึ่งระบบการผลิตแบบยืดหยุ่นจะก่อให้เกิดการกระจายตัวอย่างอิสระของระบบการผลิต แต่อย่างไรก็ตาม ระบบการผลิตแบบยืดหยุ่นต้องใช้งบการลงทุนสูงในการติดตั้งระบบ และในขณะเดียวกันก็ไม่ง่ายที่จะปรับเปลี่ยนโครงสร้างเพื่อที่จะจัดการกับการเปลี่ยนแปลงปริมาณการผลิตและชนิดของผลิตภัณฑ์ ด้วยเหตุนี้ระบบการผลิตแบบเซลล์ (Flexible Manufacturing Cell, FMC) จึงเข้ามาแทนที่ระบบการผลิตแบบยืดหยุ่น ซึ่งระบบการผลิตแบบเซลล์เป็นที่นิยมมากกว่า และบางครั้งการตรวจสอบชิ้นงานอัตโนมัติด้วยระบบการผลิตแบบเซลล์นั้นมีต้นทุนที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับระบบการผลิตแบบยืดหยุ่น นอกจากนี้ยังเดินเครื่องได้ง่ายและมีความยืดหยุ่นมากกว่าที่จะจัดการกับความเปลี่ยนแปลงของการสั่งซื้อของลูกค้า

การผลิตแบบผสมผสานด้วยคอมพิวเตอร์ (Computer Integrated Manufacturing, CIM) เป็นการนำความสามารถของคอมพิวเตอร์มาช่วยในการการประมวลผลสารสนเทศของระบบการผลิต โดยเพิ่มเข้ามาในขอบเขตของกิจกรรมการผลิตอันได้แก่ การตลาด การจัดการ การควบคุมกระบวนการผลิต และการบริการ แต่อย่างไรก็ตาม ไม่มีความจำเป็นที่จะต้องนำมาซึ่งความยืดหยุ่นและความสามารถในการผลิตที่เพิ่มขึ้นในการผลิตจริง ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น มีความคาดหวังว่าระบบการผลิตที่แจกจ่ายได้ด้วยตัวเอง (Autonomous distributed manufacturing systems) ที่ประกอบด้วยเทคโนโลยีสารสนเทศขั้นสูงจะเป็นคำตอบของการผลิตในอนาคตที่สามารถผลิตสินค้าที่มีความหลากหลายของผลิตภัณฑ์ใหม่ได้มากขึ้นอันเนื่องมาจากอุปสงค์ที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลาจากลูกค้า ระบบนี้มีชื่อว่ระบบการผลิตอัจฉริยะ (Intelligent Manufacturing System, IMS) เพื่อตอบสนองต่อระบบการผลิตอัจฉริยะ ดังนั้นเครื่องจักรกลอัจฉริยะจึงได้ถูกวิจัยและพัฒนาขึ้น โดยเครื่องจักรกลที่มีความอัจฉริยะอยู่ภายในจะ

สามารถทำงานได้ด้วยตัวเอง สามารถทำงานร่วมกับเครื่องจักรอื่นๆ และสิ่งอำนวยความสะดวก
ทางการผลิต



ภาพที่ 1.1 การพัฒนาเทคโนโลยีของระบบการผลิตเชิงกล[1]

ระบบควบคุมที่เพิ่มเติมเข้าไปในเครื่องจักรกลอัจฉริยะโดยส่วนมากแล้วจะประกอบไปด้วยเซนเซอร์หรือตัวตรวจวัดต่างมากมายติดตั้งอยู่เพื่อทำการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น ตัวอย่างเช่น ตัวตรวจการเปลี่ยนรูป (Deformation sensors) เพื่อที่จะวัดการเปลี่ยนรูปของเครื่องจักร เทอร์โมคอปเปิล (Thermocouple) เพื่อที่จะวัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ตัวตรวจจับการสั่นสะเทือน (vibration sensors) เพื่อลดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น หรืออาจจะเป็นตัวตรวจจับแรง (Force sensors) เพื่อทำการวัดแรงที่เกิดขึ้น เป็นต้น

การใช้เซนเซอร์ในกระบวนการผลิต และระบบการผลิตถูกนำมาใช้ในกระบวนการผลิตแบบดั้งเดิม โดยเซนเซอร์ที่ใช้กำลังกลายเป็นปัจจัยที่สำคัญ อันเนื่องมาจากการเป็นอุปสงค์ใหม่ที่

สามารถตรวจติดตามในกระบวนการผลิตได้ นอกจากนี้ยังสามารถนำมาใช้เพื่อพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพเทคโนโลยีการผลิต และการออกแบบเครื่องจักรกล เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ เช่น การตัดความเร็วสูง และการกลึงงานแข็ง เพื่อที่จะปรับปรุงอัตราผลิตภาพ เพิ่มคุณภาพ และความสม่ำเสมอของผลิตภัณฑ์ ลดรอบเวลาการผลิต และลดค่าแรงงาน เป็นต้น โดยเซนเซอร์จะทำหน้าที่รับรู้สัญญาณในตอนแรก และเปลี่ยนสัญญาณหรือพลังงานเข้าไปสู่สัญญาณหรือพลังงานออกในรูปแบบอื่นสำหรับการใช้งานต่อไป

ชนิดของเซนเซอร์ต่างๆ มากมายที่ใช้สำหรับการตรวจติดตามกระบวนการผลิตและสถานะการตัด เซนเซอร์ที่ใช้กันทั่วไปในสถานะการตัดทางอุตสาหกรรม คือ เซนเซอร์แรง เซนเซอร์กำลัง และเซนเซอร์อะคูสติกอิมิตชัน การออกแบบเซนเซอร์ขั้นสูงร่วมกับเทคโนโลยีกรรมวิธีสัญญาณทำให้เกิดการปรับปรุงสารสนเทศเกี่ยวกับสถานะของระบบเพื่อที่จะทำให้เกิดกระบวนการที่เหมาะสมที่สุดและควบคุมได้

การเลือกใช้เซนเซอร์แต่ละชนิดนั้นต้องคำนึงถึงความเหมาะสมและการติดตั้งในกระบวนการผลิตชนิดต่างๆ เช่นกัน

จากที่กล่าวมานั้นได้มีการศึกษาค้นคว้าและวิจัยเพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิต โดยการใช้เซนเซอร์ติดตั้งเพื่อทำงานกับเครื่องจักรในระหว่างกระบวนการผลิต ทำให้ทราบได้ว่าเกิดข้อผิดพลาดประการใดขึ้นบ้างในกระบวนการผลิต

สำหรับในกระบวนการกัดขึ้นรูปนั้นตัวแปรหลักที่มีผลต่อการผลิตนอกเหนือจากขนาดที่ถูกต้องแม่นยำแล้ว ความหยابของผิวของชิ้นงานก็มีความสำคัญมากต่อคุณภาพของชิ้นงานเช่นกัน ปกติแล้วการตรวจสอบคุณภาพผิวชิ้นงานสามารถทำได้หลังจากการผลิตชิ้นงานเสร็จสิ้นหรือไม่ก็อาจตรวจสอบโดยการอ้างอิงจากอายุการใช้งานของมีดตัด ซึ่งในบางครั้งมีดตัดอาจแตกหักโดยการกระแทกก่อนครบอายุงานมี ดตัดเอง สำหรับกรณีหลังนี้อาจเกิดผลเสียต่อกระบวนการผลิตมากเนื่องจากอาจมีชิ้นงานหลายชิ้นที่ผิวชิ้นงานไม่ผ่านเกณฑ์คุณภาพ เหตุผลดังที่ได้กล่าวมา งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาระบบตำรวจติดตามความขรุขระผิวชิ้นงานในกระบวนการกัดและเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องกัดซีเอ็นซีอัจฉริยะ ให้สามารถทำการ

ผลิตแบบการผลิตอัจฉริยะได้โดยระบบที่พัฒนาขึ้นจะทำการตรวจติดตามถึงคุณภาพผิวชิ้นงานในกระบวนการตัด เพื่อเป็นการลดปริมาณของเสียที่เกิดในกระบวนการตัดและเป็นการปรับปรุงอัตราผลิตภาพให้สูงขึ้นอีกทางหนึ่งด้วย

1.2. ความสำคัญ และที่มาของปัญหา

1.2.1 ปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมหรือความต้องการกระบวนการตัดที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

ในสภาพการปัจจุบันนั้นปัญหาเรื่องสิ่งแวดล้อมนับว่าเป็นเรื่องที่มีความสำคัญอย่างมากสำหรับกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม เนื่องจากในกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมนั้นจะมีของเสียที่ถูกปล่อยออกมาทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งในอุตสาหกรรมนั้นหากได้มีการแก้ปัญหาเรื่องสิ่งแวดล้อมให้ลดลงไปได้นั้นก็จะเป็นการช่วยลดเรื่องค่าใช้จ่ายในการบำบัดหรือฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมลงไปได้ ทำให้เราประหยัดต้นทุนในการกระบวนการผลิต และเมื่อประหยัดต้นทุนแล้วแน่นอนว่าผลกำไรในอุตสาหกรรมชนิดนั้นย่อมเพิ่มสูงขึ้นด้วย โดยของเสียที่งานวิจัยนี้จะกล่าวถึงเป็นของอันเนื่องมาจากกระบวนการตัดซึ่งอาจจะเกิดจากการที่ชิ้นงานนั้นตัดไม่ได้คุณภาพตามที่ต้องการ ซึ่งหากชิ้นงานที่ตัดนั้นได้คุณภาพตามที่ต้องการ ก็จะเป็นการลดของเสียอันเกิดจากการตัด อีกทั้งยังเป็นการลดต้นทุนในการตัดชิ้นงานใหม่อีกด้วย

1.2.2 ความต้องการเครื่องจักรกลอัจฉริยะ

จากหัวข้อ 1.2.1 ที่ได้กล่าวมานั้น เครื่องจักรซีเอ็นซีจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่ใช้ในการผลิตซึ่งเครื่องจักรซีเอ็นซีสามารถเพิ่มอัตราการผลิตและยังช่วยลดต้นทุนทางด้านค่าแรงด้วย โดยจะใช้จำนวนคนงานลดลง เครื่องกัดซีเอ็นซีเป็นเครื่องจักรกลซีเอ็นซีชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญสำหรับการผลิตชิ้นงานที่มีลักษณะซับซ้อน ซึ่งใช้เป็นชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมการผลิตต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมชิ้นส่วนรถยนต์ อุตสาหกรรมแม่พิมพ์ เป็นต้น ในการผลิตนั้นจำเป็นต้องใช้เครื่องจักรให้เต็มประสิทธิภาพ นั่นคือต้องทำการตัดชิ้นงานด้วยอัตราการป้อน ความเร็วตัด ความลึกตัดที่สูง เพื่อลดเวลาในการผลิตให้น้อยลง การตัดชิ้นงานโดยการที่มีตัดแบบห้วงบอลด้วยเงื่อนไขความเร็วที่สูงจะส่งผลให้ความขรุขระผิวในชิ้นงานนั้นดีขึ้น แต่หากตัดด้วยอัตราความเร็วตัดที่ต่ำลงก็จะส่งผล

ให้ความขรุขระผิวของชิ้นงานนั้นแฉ่ง การตัดที่อัตราการป้อนตัดที่ที่น้อยจะส่งผลให้ความขรุขระผิวของชิ้นงานดี และหากเพื่ออัตราการป้อนตัดที่มากขึ้นก็จะส่งผลให้ความขรุขระผิวของชิ้นงานนั้นแฉ่งลง ความลึกในการตัดนั้นหากยิ่งลึกมากก็จำทำให้ความขรุขระผิวของชิ้นงานดีขึ้น เนื่องมาจากการที่เม็ดมีดตกลงไปในชิ้นงานมากขึ้นนั้นจะทำให้อัตราการสิ้นของเม็ดมีดในการตัดชิ้นงานนั้นลดลง จึงทำให้ผิวของชิ้นงานมีความขรุขระผิวที่ดีมากขึ้นโดยปัจจัยที่กล่าวมานั้นจะส่งผลต่อความขรุขระผิว ซึ่งคุณภาพของผิวชิ้นงานจะมีผลกระทบต่ออัตราการผลิต และต้นทุน ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น หากไม่สามารถตรวจติดตามในระหว่างการผลิตว่าคุณภาพผิวชิ้นงานมีแนวโน้มไปในทิศทางใด จะส่งผลกระทบต่ออัตราการผลิตได้ เช่น การหยุดเครื่องเพื่อทำการเปลี่ยนมีดตัดโดยไม่จำเป็นทำให้เสียเวลา อีกประการหนึ่งคือการเสียหายอันเนื่องมาจากการไม่เปลี่ยนใบมีดตัด ซึ่งทำให้อัตราผลิตล่าช้า เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต นักวิจัยจำนวนมากได้พยายามที่จะพัฒนากระบวนการผลิตต่างๆให้เป็นกระบวนการผลิตแบบอัจฉริยะ (Intelligent Manufacturing) โดยกระบวนการผลิตอัจฉริยะนั้น จะสามารถตรวจติดตามในกระบวนการผลิตได้ และสามารถระบุว่ามีปัญหาเกิดขึ้นในกระบวนการผลิตหรือไม่ ทำให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถหยุดการผลิตได้อย่างทันท่วงที อีกทั้งยังลดจำนวนผู้ปฏิบัติงานทำให้ลดต้นทุนในการผลิตได้

จากเหตุผลที่ได้กล่าวมาข้างต้นจึงเกิดงานวิจัยจำนวนมากที่จะพยายามพัฒนาเทคนิคต่างๆ เพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตสำหรับงานกัดให้เป็นกระบวนการผลิตแบบอัจฉริยะ เพื่อที่จะตรวจติดตามในกระบวนการผลิตว่าควรหยุดการผลิตเพื่อเปลี่ยนมีดตัด เงื่อนไขการตัด หรือหยุดการผลิตในกรณีที่มีปัญหาเกิดขึ้นระหว่างการผลิตได้อย่างทันท่วงที เพื่อที่จะไม่ให้เกิดผลเสียต่อชิ้นงานที่ทำการผลิตทั้งในด้านขนาดชิ้นงานที่ถูกต้องและคุณภาพผิวชิ้นงานที่ดี ในการตรวจคุณภาพของผิวชิ้นงาน สำหรับกระบวนการผลิตแบบอัจฉริยะนั้นสามารถทำได้โดยการวิเคราะห์สัญญาณที่เกิดขึ้นในขณะขณะกัดชิ้นงาน โดยวิธีที่กำลังได้รับความนิยมในปัจจุบันคือการติดเซนเซอร์เข้าที่บริเวณด้ามมีดตัดหรือจิ๊กจับชิ้นงาน เพื่อตรวจจับสัญญาณที่เกิดขึ้นในขณะกัดชิ้นงาน เช่น การวิเคราะห์สัญญาณแรงตัด ที่เกิดขึ้นในระหว่างการกัดชิ้นงาน เป็นต้น โดยสัญญาณที่ได้นั้นสามารถนำมาหาความสัมพันธ์เพื่อที่สร้างรูปแบบสมการสำหรับการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานในกระบวนการกัดครั้งต่อไปได้ จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการสร้าง

รูปแบบการพยากรณ์ความขรุขระผิวของชิ้นงาน จากสัญญาณการสั่นสะเทือนทั้ง 3 แกน (แกน X, แกน Y, แกน Z) แต่ยังคงเกิดความผิดพลาดอันเนื่องมาจากการที่ไม่ได้คำนึงถึงเงื่อนไขที่เปลี่ยนแปลงไปของการตัด โดยจากแรงตัดที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลต่อความขรุขระผิวที่ได้ในขณะตัด แต่เนื่องจากแรงตัดขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในการตัด ดังนั้นอัตราส่วนของแรงตัดที่เกิดขึ้นในขณะตัดจะถูกนำมาพิจารณา เพื่อตัดอิทธิพลจากเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไป ทำให้สามารถพยากรณ์ความขรุขระผิวได้ในกระบวนการตัดจริง

ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการสำหรับการตรวจติดตามก่อนกระบวนการผลิตสำหรับการเครื่องกัดซีเอ็นซี เพื่อที่จะทราบถึงสาเหตุของปัญหาและสามารถแก้ไขได้อย่างถูกต้องและทันท่วงที ด้วยการวิเคราะห์แรงตัดที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการตัดด้วยเครื่องมือวัดแรงไดนามิเตอร์ และนำเสนอรูปแบบสมการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวของชิ้นงานตัด โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการตัดกับอัตราส่วนแรงตัดที่ได้ ซึ่งอัตราส่วนแรงตัดนี้จะเป็นตัวช่วยพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานได้เป็นอย่างดี ค่าที่วัดได้จะถูกนำมาพยากรณ์หาความขรุขระผิวชิ้นงานจากสมการต้นแบบการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานที่พัฒนาขึ้น เพื่อเป็นการสอบเทียบสมการต้นแบบการพยากรณ์ให้มีประสิทธิภาพและสามารถใช้งานได้อย่างจริง

ในการเลือกวัสดุชิ้นงานที่เลือกใช้อลูมิเนียม (AI 6063) เนื่องจากคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการกัด และสามารถเพิ่มคุณสมบัติความแข็งเมื่อผ่านกระบวนการทางความร้อน มีน้ำหนักเบา ทนทานต่อการผุกร่อน และไม่เป็นสนิม ทำให้ปัจจุบันในอุตสาหกรรมการผลิตกระป๋องเครื่องดื่ม , การก่อสร้างอาคาร , เครื่องใช้ไฟฟ้า และยังใช้ในชิ้นส่วนรถยนต์อย่างแพร่หลายเพื่อลดน้ำหนักของรถให้น้อยลง นำมาซึ่งการประหยัดเชื้อเพลิง ซึ่งกระบวนการขึ้นภาพที่ถูกนำมาใช้เพื่อให้ได้รูปร่างของชิ้นงานตามที่ต้องการก็คือกระบวนการกัด

โดยที่ในกระบวนการกัดนั้นจะมีสารหล่อเย็นเป็นปัจจัยอีกปัจจัยที่จะทำให้คุณภาพของชิ้นงานดีขึ้น โดยสารหล่อเย็นจะมีหน้าที่เข้าไปช่วยในการลดอุณหภูมิในกระบวนการตัด ลดอัตราการสึกหรอของมีดตัดนำมาซึ่งผิวของชิ้นงานที่ดี แต่สารหล่อเย็นนั้นเมื่อใช้ไปจนถึงอายุการใช้งานของมันก็จะจำเป็นที่จะต้องทิ้งไป ทำให้เกิดปัญหาในเรื่องสิ่งแวดล้อมขึ้น จึงทำให้เกิดการนำเอาลม

เป่าเข้ามาเพื่อใช้แทนสารหล่อเย็น เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการใช้สารหล่อเย็น อีกทั้งลมเป่ายังทำหน้าที่ในการลดอุณหภูมิในกระบวนการตัดเหมือนสารหล่อเย็น โดยชิ้นงานที่ได้ออกมานั้น จะมีคุณภาพใกล้เคียงกับการใช้สารหล่อเย็น อีกทั้งยังช่วยลดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมอันเกิดจากการใช้สารหล่อเย็น

มีดตัดที่จะใช้นั้นจะใช้มีดตัดแบบหัวบอล เนื่องจากมีดตัดชนิดนี้เป็นหัวตัดที่ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในการขึ้นรูปแม่พิมพ์ และผลิตภัณฑ์ต่างๆ เพราะมีดตัดแบบหัวบอลนั้นสามารถใช้ในการตัดชิ้นงานที่มีความสลับซับซ้อนของรูปร่างของชิ้นงานได้ดี จึงทำให้เป็นที่นิยมในการนำมาใช้ในอุตสาหกรรม

1.3. จุดประสงค์ของการวิจัย

เพื่อพัฒนาสมการต้นแบบการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานอลูมิเนียมในกระบวนการกัดแบบหัวบอลโดยการใช้ลมเป่า

1.4. ขอบเขตการดำเนินงาน

- 1) ทดลองการตัดในกระบวนการกัดบนเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ชนิด 5 แกน
- 2) วัสดุทดสอบเป็นอลูมิเนียม (Al 6063) ขนาดความกว้าง 64 มิลลิเมตร ยาว 64 มิลลิเมตร และสูง 45 มิลลิเมตร
- 3) เงื่อนไขการตัด ดังนี้
 - ความเร็วรอบตัด 1,800, 2,200, 2,600 รอบ/นาที
 - อัตราป้อนตัด 0.02, 0.03, 0.04 มิลลิเมตร/รอบ
 - ความลึกตัด 0.5, 0.75, 1 มิลลิเมตร
 - เส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด 6, 8, 10 มิลลิเมตร
 - ความดันลมเป่า 0.3, 0.5, 0.7 เมกกะปาสกาล (3, 5, 7 บาร์)
- 4) วิเคราะห์ผลด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบ (Response surface analysis)

- 5) ตัวชี้วัดผลลัพธ์วัดจาก ความซุขระมิวขึ้นงาน และแรงที่ใช้ในการตัด
- 6) เทียบความซุขระมิวขึ้นงานในระดับคุณภาพสูง
- 7) สมการต้นแบบค่าความซุขระมิวจะประกอบด้วยความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด ขนาดของหัวตัด ความดันลมเป่า

1.5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) พัฒนาสมการต้นแบบการพยากรณ์เพื่อพยากรณ์ความซุขระมิวขึ้นงานกััดก่อนกระบวนการตัดจริงโดยใช้ลมเป่าสำหรับอะลูมิเนียมเปรียบเทียบต้นทุนในการตัดแบบแบบลมเป่า แบบเปียก และแบบละออง
- 2) เป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องจักรอัจฉริยะและกระบวนการตัดที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม
- 3) สามารถหาเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมที่ให้ความซุขระมิวต่ำสุดในกระบวนการกััดแบบหัวบอล

1.6. ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1) ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยและสำรวจงานวิจัยต่างๆ รวมถึงตรวจสอบปัจจัยในกระบวนการกััดที่คาดว่าจะส่งผลต่อคุณภาพของขึ้นงาน
- 2) ออกแบบการทดลองและกำหนดเงื่อนไขในการตัดที่คาดว่าจะมีผลต่อคุณภาพของขึ้นงาน
- 3) ทำการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยและวิเคราะห์ผลการตัดสำหรับเงื่อนไขการตัดแบบลมเป่า (Air blow) บนเครื่องซีเอ็นซีแมชีนนิ่งเซ็นเตอร์
- 4) ตรวจสอบผิวสำเร็จของขึ้นงานและการสึกหรอของมีดตัด
- 5) วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองด้วยหลักการวิธีพื้นผิวผลตอบโดยเทคนิค Box Behnken
- 6) สรุปผลที่ได้จากงานวิจัยและข้อเสนอแนะ
- 7) จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 กระบวนการตัด (Machining process) [2]

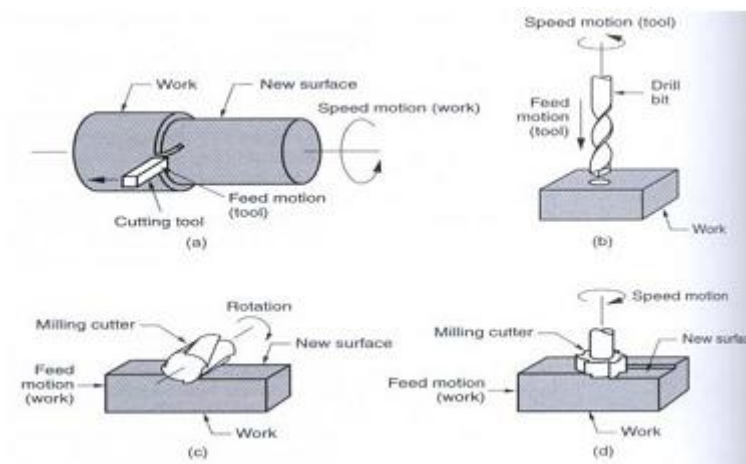
กระบวนการตัด หมายถึง การใช้เครื่องมือตัดเพื่อกำจัดส่วนเกินของเนื้อวัสดุเพื่อให้ได้ขนาดและรูปร่างของชิ้นงานตามที่ต้องการ กระบวนการตัดเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญทั้งเชิงพาณิชย์และเทคโนโลยี

ข้อดี

- 1) ใช้ได้กับวัสดุหลายประเภท
- 2) สร้างชิ้นงานขนาดและรูปร่างต่างๆ
- 3) มีความแม่นยำสูง
- 4) ผิวชิ้นงานสุดท้ายมีคุณภาพดี

ข้อเสีย

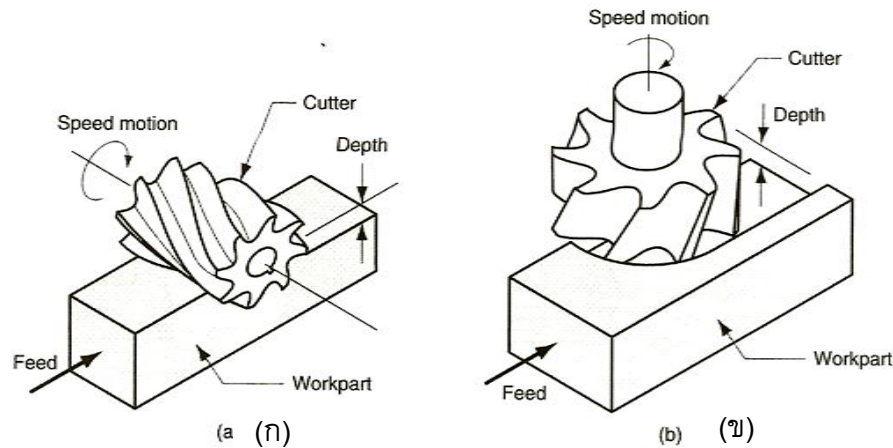
- 1) มีเศษวัสดุที่ต้องทิ้งมาก
- 2) ใช้เวลาในการตัดนาน



ภาพที่ 2.1 กระบวนการตัดต่างๆ ที่เป็นพื้นฐานสำคัญ [2]

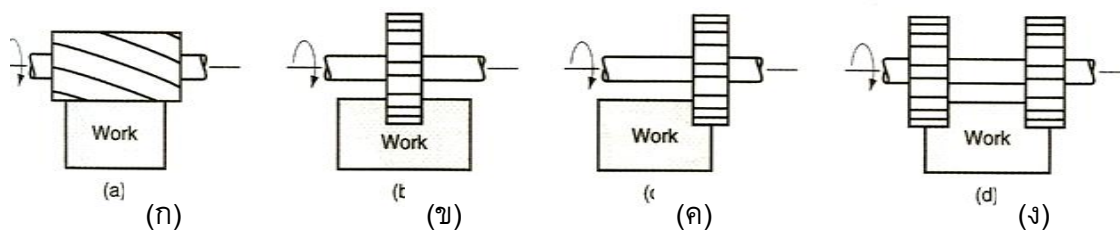
- ชนิดของกระบวนการกัด

ประกอบด้วย 2 ลักษณะ คือ การกัดแนวราบ และการกัดแนวตั้ง ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 กระบวนการกัด (ก) การกัดแนวราบ (ข) การกัดแนวตั้ง [2]

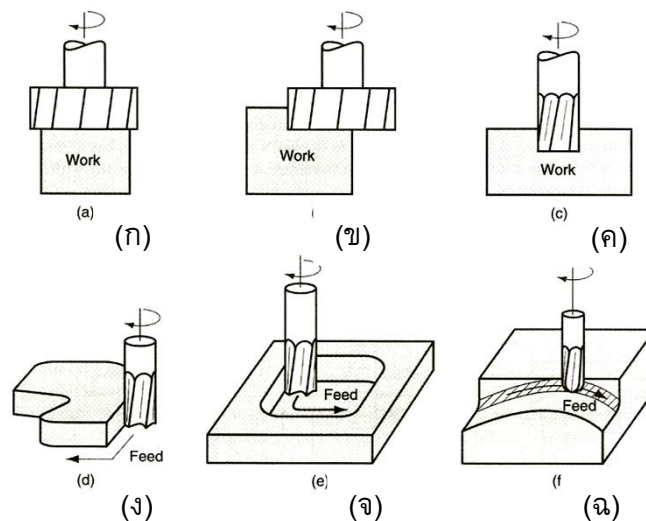
- การกัดแนวราบ (Peripheral milling or plain milling) คือ การกัดที่มีแกนหมุนขนานกับพื้นผิวชิ้นงาน และบริเวณตัด คือ ส่วนเส้นรอบวงของมีดตัด แบ่งออกเป็น
 - Slab milling การกัดแนวราบที่มีมีดตัดกว้างกว่าชิ้นงานทั้งสองด้าน
 - Slot milling การกัดแนวราบที่มีมีดตัดแคบกว่าชิ้นงาน ทำให้เกิดเป็นช่อง (Slot)
 - Side milling การกัดแนวราบที่มีมีดตัดตัดด้านข้างของชิ้นงาน
 - Straddle milling เหมือนกับการกัดด้านข้างแต่กระทำกับทั้งสองด้าน



ภาพที่ 2.3 การกัดแนวราบ (ก) Slab milling (ข) Slot milling (ค) Side milling (ง) Straddle milling [2]

- การกัดแนวตั้ง (Face milling or end milling) คือ การกัดที่มีแกนหมุนตั้งฉากกับพื้นผิวชิ้นงาน และกระบวนการกัดเกิดขึ้นบริเวณเส้นรอบวงของมีดตัด แบ่งออกเป็น

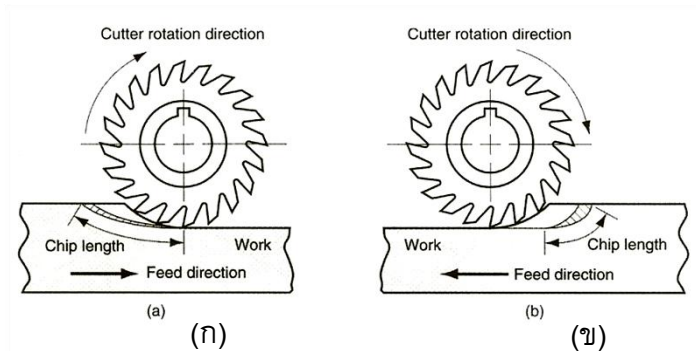
- Conventional face milling การกัดแนวตั้งที่มีตัดมีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าความกว้างชิ้นงาน
- Partial face milling การกัดแนวตั้งที่กระทำกับชิ้นงานเพียงด้านเดียว
- End milling การกัดแนวตั้งที่มีตัดมีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่าผิวชิ้นงาน
- Profile milling การกัดแนวตั้งที่มีตัดกระทำต่อขอบด้านนอกของชิ้นงาน
- Pocket milling การกัดแนวตั้งที่มีตัดเจาะรูและกัดชิ้นงานให้เรียบ
- Surface contouring การกัดแนวตั้งด้วยมีตัดหัวบอลกระทำผิวเกิดเป็นส่วนโค้งสามมิติ



ภาพที่ 2.4 การกัดแบบแนวตั้ง (ก) Conventional face milling (ข) Partial face milling (ค) End milling (ง) Profile milling (จ) Pocket milling (ฉ) Surface contouring [2]

2.1.2 ทิศทางการกัด

- 1) Up milling (Conventional milling): ทิศทางมีดตัดตรงข้ามกับทิศทางป้อนตัดซึ่งจะทำให้เกิดเศษโลหะลักษณะบางไปหนา ผิวชิ้นงานขรุขระน้อยกว่าการกัดลง
- 2) Down milling (Climb milling): ทิศทางมีดตัดไปทางเดียวกับทิศทางป้อนตัดซึ่งจะทำให้เกิดเศษโลหะลักษณะหนาไปบาง มีความขรุขระน้อยกว่าการกัดขึ้น



ภาพที่ 2.5 ทิศทางการกัด (ก) Up milling (ข) Down milling [2]

2.1.2 เงื่อนไขการตัด (Cutting conditions)

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น เครื่องกัดเป็นเครื่องมือกลพื้นฐานที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งในงานอุตสาหกรรม หากจะแบ่งประเภทของเครื่องกัดตามลักษณะแกนหมุนจะแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ เครื่องหมุนกัดแนวนอน (Horizontal milling machine) และเครื่องหมุนกัดแนวตั้ง (Vertical milling machine) ซึ่งเครื่องกัดทั้งสองชนิดนี้ มีความเหมาะสมกับประเภทของงานที่ต่างกัน ความเร็วตัดสำหรับงานกัดในกรณีดอกกัดทรงกลม (Ball-nose end milling)

ส่วนอัตราป้อนชิ้นงานสามารถที่จะเปลี่ยนเป็นอัตราเร็วเชิงเส้นในหน่วย มิลลิเมตร /นาที ได้ดังสมการที่ 2.1

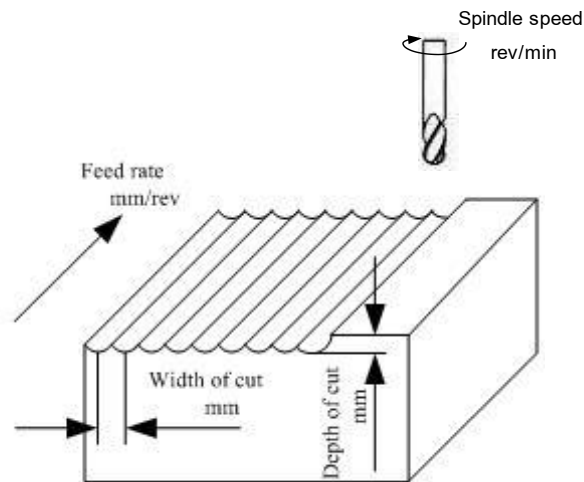
$$f_r = f \times z \times N \quad (2.1)$$

โดยที่ f_r คือ อัตราป้อนชิ้นงาน (มิลลิเมตรต่อนาที)

f คือ อัตราป้อนมีดตัด (มิลลิเมตร ต่อฟัน)

Z คือ จำนวนฟัน

N คือ ความเร็วรอบ (รอบ ต่อนาที)



ภาพที่ 2.6 การตัดในระบวนการกัด [3]

- 3) ความเร็วการตัด (Cutting speed, v) คำนวณได้จาก

$$v = \frac{\pi \times D \times N}{1000} \quad (2.2)$$

- เมื่อ v คือ ความเร็วการตัด (เมตรต่อนาที)
 D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของมีดกัด (มิลลิเมตร)
 N คือ ความเร็วรอบ ตัด (รอบต่อนาที)

- 4) ความเร็วรอบในการตัด (rotation speed, N) คำนวณได้จาก

$$N = \frac{1000v}{\pi \times D} \quad (2.3)$$

- เมื่อ N คือความเร็วรอบตัด (รอบต่อนาที)
 v คือ ความเร็วในการตัด (เมตรต่อนาที)
 D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของมีดกัด (มิลลิเมตร)

5) อัตราป้อน (Feed rate, f_r) คำนวณได้จาก

$$f_r = N \times n_t \times f \quad (2.4)$$

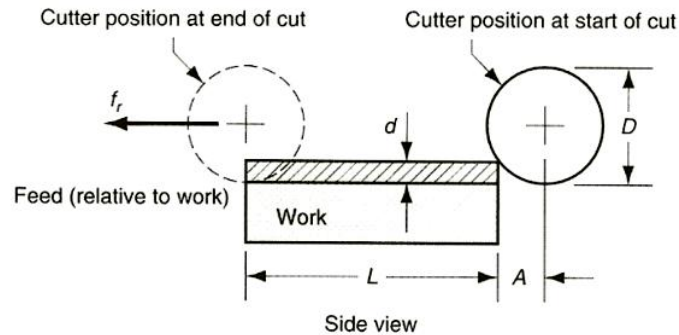
เมื่อ f_r คือ อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อนาที)
 N คือ ความเร็วรอบ ตัด (รอบต่อนาที)
 Z คือ จำนวนฟันของมีดตัด
 f คือ การป้อนกัดต่อฟัน (มิลลิเมตรต่อฟัน)

6) อัตราการกำจัดเนื้อโลหะในกระบวนการกัด (R_{MR}) แบบ Slab milling ดังภาพที่ 2.7 คำนวณได้จาก

$$R_{MR} = w \times d \times f_r \quad (2.5)$$

เมื่อ R_{MR} คือ อัตราการกำจัดเนื้อโลหะ (ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อนาที)
 w คือ ความกว้างของชิ้นงาน (มิลลิเมตร)
 d คือ ความลึกในการกัด (มิลลิเมตร)
 f_r คือ อัตราป้อน ตัด (มิลลิเมตรต่อนาที)

สมการที่ 2.4 สามารถปรับใช้กับ end milling, side milling, face milling และการกัดแบบอื่น โดยการคำนวณพื้นที่ผิวการตัด



ภาพที่ 2.7 การกัดแบบ Slab milling [2]

7) เวลาในการกัด (T_m)

7.1) สำหรับ Slab milling ต้องคำนวณระยะทางเข้าตัด (A) ที่จะเข้าถึงความลึกมีดทั้งหมดจากสมการ

$$A = \sqrt{d(D-d)} \quad (2.6)$$

เมื่อ A คือ ระยะทางเข้าตัด (มิลลิเมตร)

d คือ ความลึกในการตัด (มิลลิเมตร)

D คือ ผ่านศูนย์กลางของมีดกัด (มิลลิเมตร)

สามารถคำนวณเวลาที่ใช้ในการตัด (T_m) ได้จาก

$$T_m = \frac{L + A}{f_r} \quad (2.7)$$

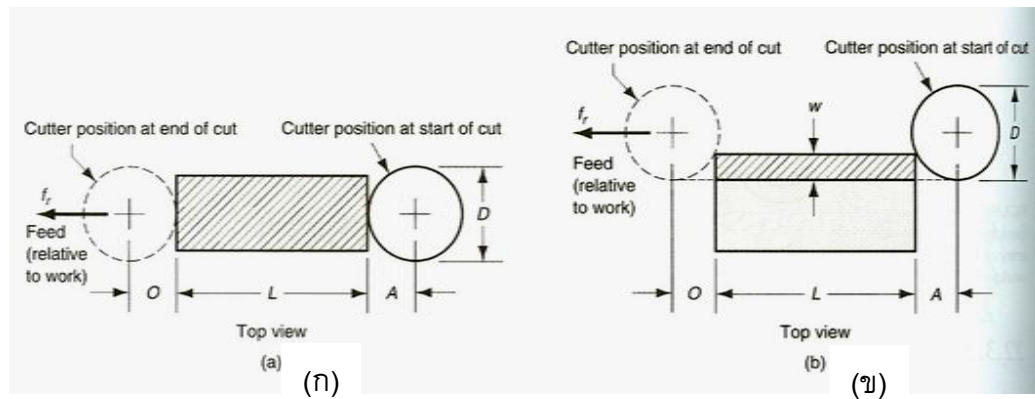
เมื่อ T_m คือ เวลาที่ใช้ในการตัด (นาที)

L คือ ความยาวของชิ้นงาน (มิลลิเมตร)

A คือ ระยะเข้าตัด (มิลลิเมตร)

f_r คือ อัตราป้อน (มิลลิเมตรต่อนาที)

7.2) สำหรับการตัดแนวตั้ง หรือการกัดผิวหน้า (Face milling) แยกได้เป็นสองกรณี ดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 การตัดแนวตั้ง หรือการกัดผิวหน้า (Face milling) (ก) กรณีที่ 1 (ข) กรณีที่ 2 [2]

กรณีที่ 1 ตำแหน่งศูนย์กลางของมีดตัดอยู่ในตำแหน่งกว้างกว่าชิ้นงาน (ระยะ A และ O มีขนาดเท่ากับครึ่งหนึ่งของเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัด) นั่นคือ

$$A = O = \frac{D}{2} \quad (2.8)$$

เมื่อ A คือ ระยะเข้าตัด (มิลลิเมตร)

D คือ ผ่านศูนย์กลางของมีดกัด (มิลลิเมตร)

กรณีที่ 2 เมื่อมีดตัดอยู่ในตำแหน่งที่เกินออกมาจากด้านหนึ่ง และตัดชิ้นงานลึกเข้าไป

(w) จะคำนวณระยะเข้า และออกของการตัดได้จาก

$$A = O = \sqrt{w(D - w)} \quad (2.9)$$

เมื่อ A คือ ระยะเข้าตัด (มิลลิเมตร)

D คือ ผ่านศูนย์กลางของมีดกัด (มิลลิเมตร)

w คือ ความกว้างการตัดชิ้นงาน (มิลลิเมตร)

สามารถคำนวณเวลาที่ใช้ในการตัด (T_m) ของทั้ง 2 กรณีได้จาก

$$T_m = \frac{L + 2A}{f_r} \quad (2.10)$$

T_m คือ เวลาที่ใช้ตัด (นาที)

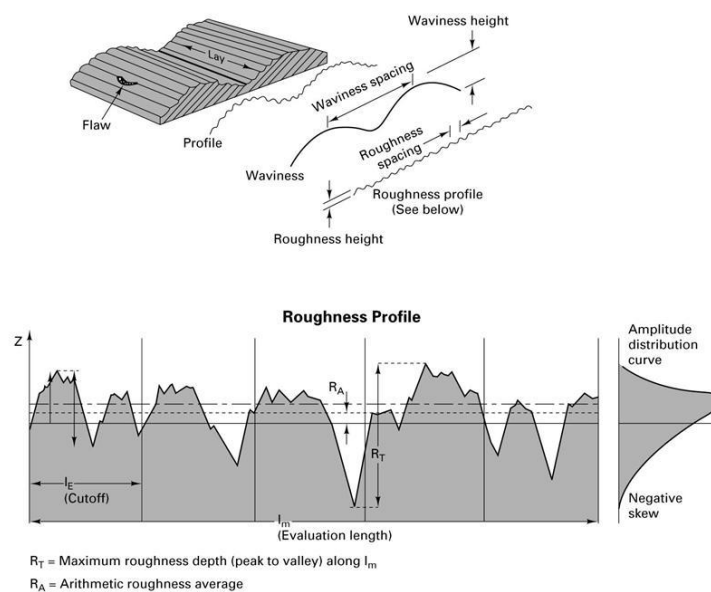
เมื่อ L คือ ความยาวของชิ้นงาน (มิลลิเมตร)

A คือ รัศมีเข้าตัด (มิลลิเมตร)

f_r คือ อัตราป้อน (มิลลิเมตรต่อนาที)

2.1.3 ความเรียบผิวสำเร็จ (Surface finish) [4]

กระบวนการตัดถูกนำมาใช้เพื่อผลิตชิ้นงานที่มีลักษณะและขนาดตามที่ต้องการ โดยการเอาเนื้อของชิ้นงานที่เกินจากที่ต้องการออกในรูปแบบของเศษโลหะ (Chip) ผิวชิ้นงานที่ได้จะมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไป ลักษณะของผิวสำเร็จจะแสดงในรูปของคุณสมบัติที่จะกล่าวดังต่อไปนี้ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 รายละเอียดของผิวชิ้นงาน [4]

ลักษณะของความเรียบผิว (Surface finish) จะแสดงในรูปของคุณสมบัติของผิวชิ้นงานที่จะกล่าวดังต่อไปนี้

- 1) ความขรุขระ (Roughness): จะประกอบไปด้วยช่องว่างขนาดเล็กและละเอียดที่ติดกันหลายๆช่อง สาเหตุหลักเกิดจากรอยที่เหลือไว้จากการทำตำหนิด้วยเครื่องมือตัด ความสูงเฉลี่ยหรือความลึกเฉลี่ยถูกวัดโดยกำหนดช่วงความยาวหนึ่งเรียกว่า “cutoff length” หรือ “roughness sampling length”
- 2) รอยคลื่น (Waviness): ประกอบไปด้วยรอยขรุขระบนชิ้นงานซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า “roughness sampling length” (ประมาณ 1 ไมครอน) สาเหตุเกิดจากการสั่นหรือมีรอยตำหนิบนชิ้นงานหรือ มีดตัดที่เกิดจากรับภาระในการตัดมากและอุณหภูมิในการตัด
- 3) รอยตำหนิยาว (Lay): เป็นรอยตำหนิที่เป็นทิศทางยาว มักจะขึ้นกับทิศทางของชิ้นงานและมีดตัด รวมทั้งการเคลื่อนที่ระหว่างชิ้นงานและเครื่องมือตัด
- 4) รอยตำหนิส้ม (Surface flaw): เป็นรอยตำหนิที่เกิดขึ้นแบบส้ม สาเหตุเกิดมาจากรอยตำหนิที่มีมาแต่แรกแล้ว เช่นรอยร้าว ฟองอากาศ
- 5) ความเรียบผิว (Surface finish) มีความสำคัญต่อการสวมประกอบและการจัดวางของชิ้นงาน การสวมประกอบและการจัดวางต่างๆจะเกิดขึ้นได้ก็ต้องอาศัยการทาสีหรือทำตำหนิเข้าช่วย บางทีก็ใช้เป็นลักษณะกาชหรือของไหลไหลผ่าน บางทีก็ใช้สายตาดูโดยอาศัยความมันวาวของชิ้นงาน บางทีก็ใช้แสงที่มีคุณสมบัติการสะท้อนได้สูง

ความเรียบผิวสำเร็จมีผลมาจากพารามิเตอร์ในการตัดหลายอย่างซึ่งรวมถึงรูปทรงของมีดตัด รูปทรงของชิ้นงาน ความแข็งแรงของเครื่องจักร วัสดุชิ้นงาน ปัจจัยในการตัด และวัสดุมีดตัดโดยทั่วไปแล้ว ค่าความหยาบผิวสามารถเขียนให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ของอัตราการป้อนตัดและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดกัดได้ ซึ่งค่าความ ขรุขระ ผิว (R_a) ทางทฤษฎีสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

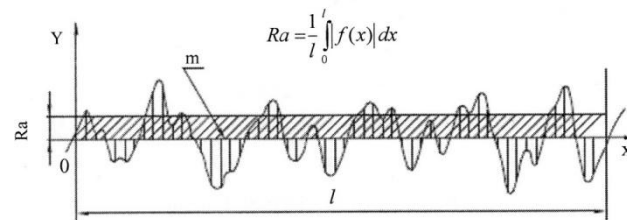
$$R_i = \frac{0.125 f^2}{\frac{D}{2} \pm \frac{f \times n}{\pi}} \quad (2.1) \quad 1)$$

เมื่อ R_i คือ ความขรุขระผิว (มิลลิเมตร)
 f คือ อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตร/ฟัน)
 D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดกัด (มิลลิเมตร)
 n คือ จำนวนฟันของดอกกัด

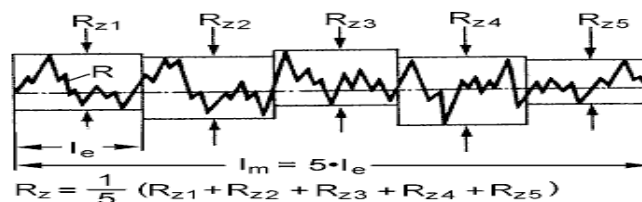
โดย เครื่องหมาย + หมายถึงการกัดแบบ Up milling
 เครื่องหมาย - หมายถึงการกัดแบบ Down milling

2.1.4 การวัดความขรุขระของพื้นผิว [5]

วิธีวัดค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย (Average surface roughness (Ra)) ซึ่งค่า Ra ที่คำนวณได้จากสมการดังภาพที่ 2.10 และวิธีการวัดความขรุขระผิวสูงสุด (Roughness depth (Rz)) ซึ่งค่า Rz คำนวณได้จากสมการดังภาพที่ 2.11



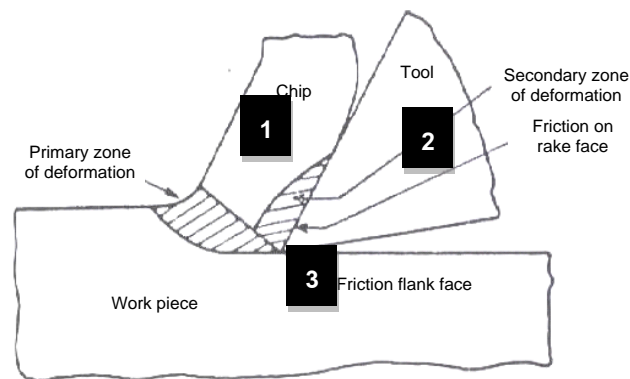
ภาพที่ 2.10 ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra) [6]



ภาพที่ 2.11 ค่าความขรุขระผิวลึก (Rz) [7]

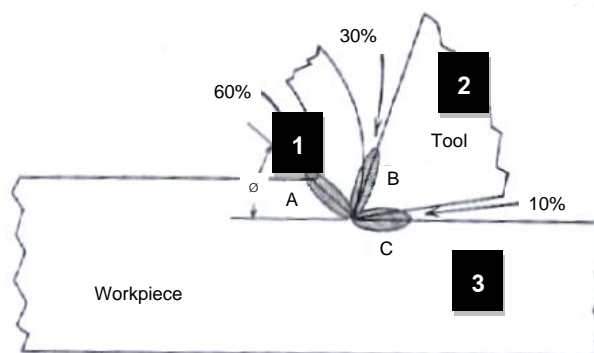
2.1.5 ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการตัด (Cutting temperature) [4], [7]

ในกระบวนการตัดโลหะทำให้บริเวณที่ 1 และ 2 ของการตัด เกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก (Plastic deformation) ผลจากการเปลี่ยนรูป จะทำให้เกิดความร้อนในบริเวณที่ 2 คือ การเสียดสีของเศษโลหะบนผิวคายของมีดตัด ส่วนบริเวณที่ 3 เป็นการเสียดสีระหว่างชิ้นงานกับผิวหลบ ดังภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.12 บริเวณที่เกิดความร้อนขณะตัด [7]

พลังงานในกระบวนการตัดโลหะ 60% จะถูกใช้ในการเปลี่ยนรูปบริเวณที่ 1 และอีก 30% จะถูกใช้ในการตัดบริเวณที่ 2 โดยจะสูญเสียพลังงานไปในรูปแรงเสียดทานที่บริเวณบนผิวคาย และ 10% ในบริเวณที่ 3 จะเสียรูปในรูปแรงเสียดทานที่เกิดบนผิวหลบ ดังภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.13 สัดส่วนความร้อนที่เกิดขณะตัด [4]

2.1.6 การสึกหรอของมีดตัด (Tool wear) [2]

ในการตัดนั้น มีดตัดชิ้นงานจำเป็นต้องมีสภาพที่ทนต่อแรงในการตัดและอุณหภูมิในการตัดได้สูง อันเนื่องมาจากแรงในการตัดชิ้นงานถ้ามากเกินไปก็จะทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกหักได้ และถ้าอุณหภูมิในการตัดสูงเกินไปก็จะส่งผลให้มีดตัดเกิดการอ่อนตัวลงและเสื่อมได้เร็ว เช่นเดียวกัน เทคโนโลยีด้านมีดตัดจะให้ความสำคัญกับประเด็นหลัก 2 ประเด็นคือ เรื่องวัสดุที่ใช้ทำมีดตัดและรูปร่างของมีดตัด เพื่อให้อายุการใช้งานของมีดตัดนานขึ้น ในด้านวัสดุของมีดตัดนั้น จะเกี่ยวข้องกับการพัฒนาวัสดุที่สามารถทนทานต่อแรง อุณหภูมิ และการสึกหรอในกระบวนการตัด ส่วนด้านรูปทรงของเครื่องมือตัดจะพัฒนาเกี่ยวกับการหารูปทรงที่เหมาะสมของมีดตัดสำหรับวัสดุของมีดตัด และสำหรับกระบวนการตัดความเสียหายของมีดตัดเกิดขึ้นได้ด้วยสาเหตุหลัก 3 อย่าง ดังตารางที่ 2.1 โดยทั่วไปแล้ว การสึกหรอของมีดตัดจะเป็นแบบค่อยเป็นค่อยไป (Gradual wear) ซึ่งกลไกต่างๆที่ทำให้เกิดการสึกหรอบริเวณผิวสัมผัสระหว่างมีดตัดกับเศษกลึงโลหะ และบริเวณผิวสัมผัสระหว่างมีดตัดกับผิวชิ้นงานในระหว่างการตัด

ตารางที่ 2.1 รูปแบบการชำรุดของมีดตัด [2], [8]

รูปแบบการชำรุด	สาเหตุ	ผลลัพธ์
1. Fracture failure	แรงในการตัดมากเกินไป	เครื่องมือตัดแตกทันที
2. Temperature failure	อุณหภูมิในการตัดสูง	เครื่องมือตัดจะอ่อนและเสียรูป จนทำให้ความคมของมีดตัดลดลง
3. Gradual wear	เกิดการสึกหรอของคมตัด	เนื้อมีดตัดจะหายไปบางส่วน ทำให้ประสิทธิภาพในการตัดลดลง เกิดการสึกหรออย่างรวดเร็ว สุดท้ายแล้วความเสียหายก็จะคล้ายกับความเสียหายเนื่องจากอุณหภูมิ

กลไกต่างๆ ที่ทำให้เกิดการสึกหรอบริเวณผิวสัมผัสระหว่างมีดตัดกับเศษโลหะ และบริเวณผิวสัมผัสระหว่างมีดตัดกับผิวชิ้นงานในระหว่างการตัด สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2 .2 ซึ่ง

กลไกการสึกหรอทั้ง 5 แบบจะเกิดได้เร็วยิ่งขึ้นในสภาวะที่ใช้ความเร็วในการตัดสูง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกลไกการสึกหรอแบบ Diffusion และ Chemical reaction จะยิ่งเกิดง่ายที่อุณหภูมิสูง

ตารางที่ 2.2 กลไกการสึกหรอของมีดตัด [2]

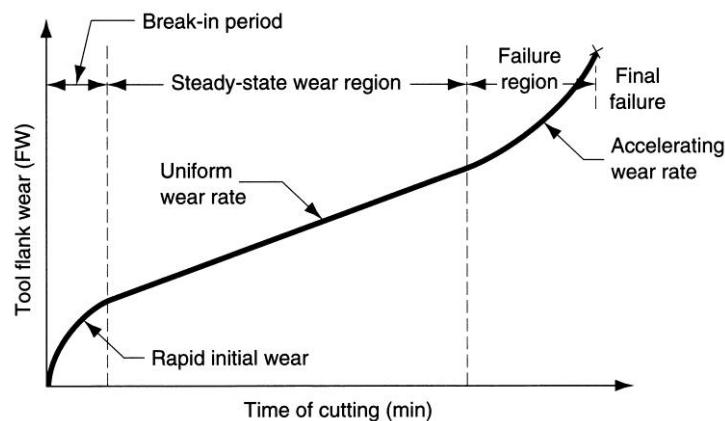
กลไก	สาเหตุ	ผล
Abrasion	อนุภาคที่แข็งของชิ้นงานจะทำให้บางส่วนเครื่องมือตัดค่อย ๆ หลุดติดออกมา	ทำให้เกิดรอยสึกหรอบนผิวหลบและผิวคาย
Adhesion	โลหะสองอย่างถูกทำให้ติดกันภายใต้ความดันและอุณหภูมิที่สูง	เกิดรอยสึกหรอบริเวณผิวคาย
Diffusion	เกิดการแลกเปลี่ยนอะตอมกันระหว่างผิวหน้าของวัสดุ 2 ชนิด อะตอมของมีดตัดจะหายไป ความแข็งแรงลดลง ทำให้ง่ายต่อการเกิดกลไก Abrasion และ Adhesion	เกิดรอยสึกหรอบริเวณผิวคาย
Chemical reaction	ความเร็วตัดสูงและอุณหภูมิที่สูงจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้เครื่องมือตัดอ่อนลง	เกิดรอยสึกหรอบริเวณผิวคาย
Plastic deformation	เกิดอุณหภูมิที่สูงบริเวณคมตัด คมตัดจะเริ่มเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก ทำให้ง่ายต่อการเกิดกลไก abrasion	เกิดรอยสึกหรอบริเวณผิวหลบ

2.1.7 อายุของมีดตัด (Tool life) [2]

อายุเครื่องมือตัด หมายถึง เวลาตัดโดยนับจากเครื่องมือเริ่มต้นใช้งานโดยที่เครื่องมือไม่เคยใช้งานมาก่อนบนชิ้นงานชนิดเดียวและในสภาวะเดียวกัน จนกระทั่งไม่สามารถใช้เครื่องมือตัดนั้นต่อไปได้ ในขณะที่กำลังทำการตัดจะเกิดกลไกการสึกหรอต่างๆ บนมีดตัด ซึ่งจะมีอัตราที่เพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอของมีดตัดกับระยะเวลาในการตัดแสดงดังภาพที่ 1 4 ซึ่ง

ความสัมพันธ์ในรูปจะแสดงถึงรอยสึกหรอบนผิวหอบ (Frank wear) ส่วนรอยสึกหรอบนผิวคาย (Crater wear) ก็เกิดขึ้นในลักษณะเดียวกัน ช่วงของการสึกหรอสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง ดังรูป

ในกระบวนการตัดจะพบว่าการใช้เครื่องมือตัดไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสียหาย แล้วค่อยนำกลับมาลับคมตัดใหม่เป็นสิ่งที่ไม่สมควรทำ เพราะถ้ามีดตัดแตกแล้วการลับคมตัดให้คมเหมือนเดิมจะทำได้ยากกว่าปกติ และคุณภาพของชิ้นงานก็จะออกมาไม่ดีด้วย ดังนั้นจึงได้ใช้เกณฑ์ในการตัดไว้ดังนี้คือ



ภาพที่ 2.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดรอยสึกหรอบนผิวคายและเวลาที่ใช้ในการตัด [2]

2.1.8 วัสดุที่ใช้ทำเครื่องมือตัด (Cutting material) [2]

1) เหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสมปานกลาง (Carbon and medium-alloy steels) เหล็กกล้าคาร์บอนเป็นวัสดุที่เก่าแก่ที่สุดและใช้มากในงานเจาะ ตีแป (Tapping) มีดตัดที่ทำจากเหล็กกล้าผสมปานกลางจะมีอายุมีดตัดจะนานกว่า ถึงแม้ว่าวัสดุนี้จะมีราคาถูกแล้วลับให้คมได้ง่าย แต่ความแข็งและการทนต่อการสึกหรอต่ำสำหรับการตัดที่ความเร็วสูง มีดตัดชนิดนี้จึงใช้กับงานตัดที่ความเร็วรอบต่ำ

- 2) เหล็กกล้ารอบสูง (High-speed steels) ใช้มากในงานตัดความเร็วรอบสูง ทนต่อการสึกหรอ และราคาไม่แพงมากเมื่อเทียบกับคุณสมบัติของมีดตัด เนื่องจากวัสดุประเภทนี้ทนต่อแรงกระแทกและการแตกหัก ดังนั้นจึงมักใช้ในงานตัดที่มีการสั่นสะเทือนได้ดี
- 3) โคบอลต์หล่อผสม (Cast-cobalt alloys) มีความแข็งสูง (58-64 HRC) ทนต่อการสึกหรอได้ดี มีความแข็งสูงแม้ว่าอุณหภูมิใช้งานจะสูงตาม วัสดุนี้ทนแรงกระแทกได้น้อย จึงไม่เหมาะจะใช้กับงานตัดรอบสูง ส่วนใหญ่ใช้กับงานตัดหยาบ
- 4) คาร์ไบด์ (Cemented or sintered carbide) มีความแข็งสูงทุกๆอุณหภูมิ โมดูลัสความยืดหยุ่นและนำความร้อนสูง แบ่งได้เป็น 2 กลุ่มหลัก ๆ คือ ทั้งสแตนคาร์ไบด์และไทเทเนียมคาร์ไบด์ การผสมโคบอลต์จะช่วยทำให้รับแรงกระแทกได้ดี แต่จะลดความแข็งและการทนต่อการสึกหรอ สามารถเพิ่มความแข็งและการทนต่อการสึกหรอได้ด้วยการผสมคาร์ไบด์ของไทเทเนียมและแทนทาลัม วัสดุประเภทนี้เหมาะกับการตัดที่ความเร็วรอบต่ำ เพราะไม่เหมาะต่อการสั่น มีดตัดชนิดนี้ใช้กับการตัดแบบลมเป่าได้
- 5) โคตต์ ทูล (Coated tools) ใช้กับงานตัดรอบสูง เพื่อลดเวลาในการทำงาน อายุมีดตัดนานกว่ามีดตัดที่ไม่ได้เคลือบสารถึง 10 เท่า วัสดุที่ใช้เคลือบมักจะเป็นพวกไทเทเนียมไนไตรด์ ไทเทเนียมคาร์ไบด์ และเซรามิก ความหนาชั้นเคลือบประมาณ 5-10 ไมครอน
- 6) เซรามิก (Ceramics) ทำจากอลูมิเนียมออกไซด์ที่มีความละเอียดและความบริสุทธิ์สูง วัสดุนี้ทนต่อการขัดสีได้สูง ทนความร้อนได้ดี ลดการติดของเศษโลหะบนชิ้นงานได้ ผิวชิ้นงานหลังตัดมีความเรียบสูง แต่ข้อเสียที่สำคัญคือมีดตัดชนิดนี้ไม่ทนต่อการกระแทก
- 7) คิวบิกโบรอนไนไตรด์ (Cubic boron nitride) เป็นวัสดุที่มีความแข็งมากที่สุด ทนต่อการสึกหรอและมีคมตัดที่แข็งแรง แต่เปราะ จึงไม่เหมาะต่องานที่มีการสั่นสะเทือน เหมาะต่อการตัดเหล็กที่มีความแข็งสูง
- 8) ไดมอนด์ (Diamond) ทนต่อการสึกหรอได้ดี ลับคมได้ง่ายใช้กับงานที่ต้องการความละเอียดสูง

2.1.9 การออกแบบการทดลอง [9], [10]

การออกแบบการทดลอง คือ การทดสอบเพียงครั้งเดียวหรือต่อเนื่อง โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรนำเข้า (Input variables) ในกระบวนการหรือกระบวนการที่สนใจศึกษา เพื่อที่จะทำให้สามารถสังเกตและชี้ถึงสาเหตุต่าง ๆ ที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ที่ได้ (Outputs or responses)

ตัวแปรที่นำเข้า (Input variables) สามารถแยกได้เป็น 2 กลุ่มคือ ตัวแปรที่ควบคุมได้ หรือ ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controlled variables or factors) หรือตัวแปรที่สามารถออกแบบได้ (Design variables) และตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ เรียกว่า ตัวแปรที่รบกวนระบบ (Uncontrollable or noise variables)

2.1.10 แนวทางการดำเนินโครงการตามวิธีการออกแบบการทดลอง [9]

การใช้วิธีการเชิงสถิติในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ทุกคนที่เกี่ยวข้องในการทดลองจะต้องมีความเข้าใจอย่างถ่องแท้ล่วงหน้าว่าเรากำลังศึกษาอะไร อยู่ จะเก็บข้อมูลได้อย่างไร และจะวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ได้นั้นอย่างไร ขั้นตอนในการดำเนินการ อาจจะทำได้ดังต่อไปนี้

1) การทำความเข้าใจถึงปัญหา (Problem Recognition & Statement) บางคนอาจคิดว่าขั้นตอนนี้ง่ายและตรงไปตรงมา แต่ในความเป็นจริงแล้วขั้นตอนนี้ไม่ได้ง่ายอย่างที่คิด ในขั้นตอนนี้เราจะต้องพยายามพัฒนาแนวความคิดเกี่ยวกับวัตถุประสงค์ของการทดลอง และบ่อยครั้งที่เราจะต้องหาข้อมูลอินพุตจากบุคคลหรือหน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น แผนกวิศวกรรมแผนกประกันคุณภาพ แผนกผลิต แผนกการตลาด ผู้บริหาร ลูกค้าและแผนกบุคคล ถ้อยแถลงของปัญหาที่มีความชัดเจนจะมีผลอย่างมากต่อความเข้าใจเกี่ยวกับปรากฏการณ์และคำตอบสุดท้ายของปัญหานั้นๆ ด้วยเหตุนี้เองการออกแบบการทดลองทุกครั้งควรมีการทำงานเป็นทีม

2) การเลือกตัวแปรผลตอบ (Choice of Response) ในการเลือกตัวแปรผลตอบ ผู้ทดสอบควรจะแน่ใจว่า ตัวแปรนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการที่กำลังศึกษาอยู่ บ่อยครั้งที่

ค่าเฉลี่ยหรือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (หรือทั้งคู่) ขอบกระบวนการจะเป็นตัวแปรผลตอบ เป็นไปได้ว่าในการทดลองหนึ่งอาจจะมีผลตอบหลายตัวและมีความจำเป็นอย่างมากที่เราจะต้องกำหนดให้ได้ว่า อะไรคือตัวแปรผลตอบ และจะวัดตัวแปรเหล่านี้ได้อย่างไร ก่อนที่จะเริ่มดำเนินการทดลองจริง

3) การเลือกการออกแบบการทดลอง (Choice of Experimental Design) ถ้ากิจกรรมการวางแผนก่อนการทดลองทำได้ถูกต้อง ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่ง่ายมาก การเลือกการออกแบบเกี่ยวข้องกับพิจารณาขนาดของตัวอย่าง (จำนวนเรปลิเคต) การเลือกลำดับที่เหมาะสมของการทดลองที่จะใช้ในการเก็บข้อมูล และการตัดสินใจว่า ควรจะใช้วิธีบล็อกหรือใช้การแรนดอมไมเซชันอย่างไรโดยหนึ่งหรือไม่ ในการเลือกการออกแบบ เราจำเป็นจะต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ของการทดลองอยู่ตลอดเวลา ในการทดลองทางวิศวกรรมส่วนมาก เราจะทราบตั้งแต่เริ่มต้นแล้วว่า ปัจจัยบางตัวจะมีผลต่อผลตอบที่เกิดขึ้น ดังนั้นเราจะหาว่าปัจจัยตัวใดที่ทำให้เกิดความแตกต่าง และประมาณขนาดของความแตกต่างที่เกิดขึ้น

4) การทำการทดลอง (Performing the Experiment) เมื่อทำการทดลองเราจะต้องติดตามดูกระบวนการทำงานอย่างระมัดระวัง เพื่อให้แน่ใจว่าการดำเนินการทุกอย่างเป็นไปตามแผน ถ้ามีอะไรผิดพลาดเกิดขึ้นเกี่ยวกับวิธีการทดลองในขั้นตอนนี้ จะทำให้การทดลองที่ทำนั้นใช้ไม่ได้ ดังนั้นการวางแผนในตอนแรกจะมีความสำคัญอย่างมากต่อความสำเร็จที่จะเกิดขึ้น

5) การเลือกปัจจัย ระดับ และขอบเขต (Choice of Factors and Levels) ผู้ทดลองต้องเลือกปัจจัยที่จะนำมาเปลี่ยนแปลงในระหว่างทำการทดลอง กำหนดขอบเขตที่ปัจจัยเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลง และกำหนดระดับ (Level) ที่จะเกิดขึ้นในการทดลอง จะต้องพิจารณาดูว่าจะควบคุมปัจจัยเหล่านี้ ณ จุดที่กำหนดให้อย่างไร และจะวัดผลตอบได้อย่างไร ดังนั้นในกรณีเช่นนี้ผู้ทดลองจะต้องมีความรู้เกี่ยวกับกระบวนการอย่างมากซึ่งความรู้นี้อาจจะได้มาจากประสบการณ์และความรู้จากทางทฤษฎี มีความจำเป็นที่เราจะต้องตรวจสอบดูว่า ปัจจัยที่กำหนดขึ้นมาทั้งหมดนี้มีความสำคัญหรือไม่ และเมื่อวัตถุประสงค์ของการทดลองคือการกรองปัจจัย (Screening) เราควรที่จะกำหนดให้ระดับต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองมีจำนวนน้อยๆ การเลือกขอบเขตของการทดลองก็มีความสำคัญเช่นกัน ในการทดลองเพื่อกรองปัจจัยเราควรที่จะเลือกขอบเขตให้มีความกว้างมากๆ หมายถึงว่าขอบเขตที่ปัจจัยแต่ละตัวจะเปลี่ยนแปลงได้ควรมีค่ากว้างๆ และเมื่อเราได้เรียนรู้เพิ่มขึ้นว่าตัวแปรใดมีความสำคัญและระดับใดที่ทำให้เกิดผลลัพธ์ที่ดีที่สุด เราอาจจะลดขอบเขตลงมาให้แคบลงได้

6) การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ (Statistical Analysis) เราควรจะนำเอาวิธีการทางสถิติ มาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อว่าผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้นจะเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการ ทดลอง ถ้าการทดลองได้ถูกออกแบบไว้เป็นอย่างดี และถ้าเราทำการทดลองตามที่ได้ออกแบบไว้ วิธีการทางสถิติที่จะนำมาใช้นั้นจะเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อน ข้อได้เปรียบของวิธีการทางสถิติคือ ทำให้ผู้ที่มิชำนาญในการตัดสินใจมีเครื่องมือช่วยที่มีประสิทธิภาพ และถ้าเรานำเอาวิธีการทางสถิติมา ผสมกับความรูทางวิศวกรรมความรู้เกี่ยวกับกระบวนการ และสามัญสำนึกจะทำให้ข้อสรุปที่ได้ ออกมานั้นมีเหตุผลสนับสนุนและมีความน่าเชื่อถือ

7) การสรุปและการทดสอบเพื่อยืนยันผล (Conclusion and Confirmation Tasting) เมื่อเราได้วิเคราะห์ข้อมูลเรียบร้อยแล้ว ผู้ทดลองจะต้องหาข้อสรุปในทางปฏิบัติและแนะนำ แนวทางกิจกรรมที่จะเกิดขึ้น ในขั้นตอนนี้เราจะนำเอาวิธีการทางกราฟเข้ามาช่วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเราต้องการนำเสนอผลงานนี้ให้ผู้อื่นฟัง นอกจากนี้แล้วการทำการทดลองเพื่อยืนยันผล (Confirmation Testing) ควรจะทำการขึ้นเพื่อที่จะตรวจสอบความถูกต้องของข้อสรุปที่เกิดขึ้นอีกด้วย

2.1.11 การทดสอบข้อสมมติในการวิเคราะห์การถดถอย (Test of assumption in regression) [10]

ข้อสมมติที่เกี่ยวกับการวิเคราะห์การถดถอยที่สำคัญมี 4 ประการคือ

- 1) ข้อมูลมีการแจกแจงปกติ
- 2) ค่าเฉลี่ยผิดพลาดเท่ากับศูนย์
- 3) ความแปรปรวนคงที่
- 4) ค่าผิดพลาดเป็นอิสระต่อกัน

ในการทดสอบข้อสมมติจะใช้กราฟที่แตกต่างกันดังนี้

- 1) กราฟความน่าจะเป็นเป็นการแจกแจงปกติ (Normal probability plot) ใช้ในการทดสอบ ข้อข้อที่ 1 ถ้ากราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรง หรือมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง ข้อสมมติที่ 1 ผ่าน

- 2) Residual plot ใช้ในการทดสอบข้อสมมติข้อที่ 2 และ 3 โดยพิจารณาว่าค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ (จุดกระจายรอบศูนย์ อย่างสมดุล) และความกว้างของแถบคงที่ (ความแปรปรวนคงที่) และกราฟกระจายอย่างสุ่มแสดงถึงความเป็นอิสระต่อกันของค่าผิดพลาด ตรวจสอบข้อสมมติที่ 4
- 3) Residual plot (ตัวแปรอิสระ) ใช้พิจารณาความเป็นอิสระต่อกัน ถ้ายังมีรูปแบบสัมพันธ์กัน แสดงว่าสมการถดถอยที่ใช้มีรูปแบบไม่เหมาะสม

2.1.12 การทดสอบความเหมาะสมของสมการต้นแบบ (Model adequacy checking) [10]

การทดสอบความเหมาะสมของสมการต้นแบบที่นิยมใช้มี 3 กรณี คือ

- 1) การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination; R^2)

เป็นค่าที่ใช้อธิบายความสามารถของสมการถดถอย หรือตัวแปรอิสระในสมการถดถอยว่า สามารถจะอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าตอบสนอง หรือตัวแปรตามได้ในสัดส่วนเท่าใด ค่า R^2 ยิ่งมากสมการก็ยิ่งมีความเหมาะสมมาก แต่ในทางปฏิบัติ เนื่องจากค่า R^2 มีความไวในการเปลี่ยนแปลง คือ เมื่อเพิ่มจำนวนตัวแปรอิสระในสมการค่า R^2 จะมีความสัมพันธ์ในการตัดสินใจ จึงใช้ค่าที่ทำการปรับค่าแล้ว (R^2_{adj}) แทน
- 2) การทดสอบการขาดความเหมาะสมของสมการ (Lack-of-Fit test; LOF)

การทดสอบนี้จะทำขึ้นเฉพาะกรณีที่มีการเก็บข้อมูลซ้ำ แต่ผลลัพธ์ที่ได้มีค่าต่างกัน มักจะเป็นข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลอง เนื่องจากต้องทำการเก็บค่าซ้ำ โดนพิจารณาจากค่า P-Value ของ LOF ถ้ามีค่ามากกว่าค่า α ที่กำหนดแล้ว สมการมีความเหมาะสม
- 3) การทดสอบนัยสำคัญของสัมประสิทธิ์ในสมการถดถอยและการประมาณค่าแบบช่วง (Hypothesis testing for regression coefficients and interval estimation)

การทดสอบนัยสำคัญของสัมประสิทธิ์ในสมการถดถอยจัดได้ว่าเป็นขั้นตอนสุดท้ายก่อนที่
จะนำสมการไปใช้ในการพยากรณ์ โดยจะทำการประมาณค่าพยากรณ์ที่ต้องการโดยใช้
ค่าประมาณแบบจุดและช่วงต่อไป เพื่อก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดในการนำไปประยุกต์ใช้เมื่อ
ทราบค่าประมาณความแปรปรวนของตัวประมาณดังกล่าวแล้ว จะสามารถดำเนินการทดสอบ
สมมติฐาน และการประมาณแบบช่วงได้ โดยทั่วไปมักนิยมทดสอบสมมติฐานเฉพาะค่าสม
ประสิทธิ์ในสมการถดถอยซึ่งจะทำให้ทราบว่าสมการถดถอยที่สร้างขึ้นจะสามารถลดรูปลงอีกได้
หรือไม่ สำหรับการประมาณแบบช่วงมักจะทำขึ้นเพื่อประโยชน์การพยากรณ์ กรณีสมการถดถอย
อย่างง่ายมักจะทำการสร้างช่วงสำหรับค่าความชัน

2.1.13 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ (Multiple linear regression analysis) [10]

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ คือ การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ
มากกว่าหนึ่งตัว หรือปัจจัยตั้งแต่สองตัวขึ้นไป กับตัวแปรตาม หรือค่าตอยสนอง มนทางปฏิบัติ
อาจเกิดความคลาดเคลื่อนในการประมาณความสัมพันธ์ สามารถเกิดได้หลายกรณี โดยสรุปแบ่ง
ได้เป็น 5 กรณี คือ

- 1) ค่าผิดพลาดจากการวัด (Measurement error or pure error) เกิดจากการคลาดเคลื่อน
ในการวัดค่า
- 2) ค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการละตัวแปรอิสระ (Omission error) เกิดจากการใส่ตัวแปรใน
สมการประมาณน้อยกว่าความสัมพันธ์ที่แท้จริง
- 3) ค่าผิดพลาดที่เกิดจากการเพิ่มตัวแปรอิสระ (Inclusion error) เกิดในกรณีใส่ตัวแปรอิสระ
ลงในสมการถดถอยมากเกินไปความสัมพันธ์ที่แท้จริง
- 4) ค่าผิดพลาดที่เกิดจากการเลือกรูปแบบสมการผิด (Functional form error) เกิดในกรณีที่
ผู้ศูกษากำหนดรูปแบบความสัมพันธ์ของตัวแปรตามและตัวแปรอิสระผิดไปจากที่ควรเป็น
- 5) ค่าผิดพลาดที่เกิดจากการเลือกวิธีการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ (Estimation error)

การสร้างสมการถดถอยเชิงพหุ สามารถพิจารณาได้ 3 วิธีคือ

- 1) วิธี Backward elimination เริ่มจากการสร้างสมการเต็มรูปแบบแล้วลดรูปโดยพิจารณาจากค่า P-Value ของตัวแปรอิสระ ที่มีค่า $P\text{-Value} > \alpha$ และมีค่าสูงสุดจะถูกเลือกออกจากสมการจนไม่สามารถลดรูปได้อีก
- 2) วิธี Forward elimination เริ่มจากสมการถดถอยอย่างง่ายและพิจารณาเพิ่มตัวแปรอิสระทีละตัว โดยดูจากค่านัยสำคัญ P-Value ที่น้อยที่สุดเป็นตัวเริ่ม แล้วเพิ่มจนกว่าจะเพิ่มไม่ได้ก็จึงหยุด
- 3) วิธี Stepwise selection เป็นวิธีที่นิยมใช้กันทั่วไป เนื่องจากเป็นหลักการของวิธี Backward elimination และ Forward elimination คู่กัน โดยทุกครั้งที่เลือกตัวแปรอิสระตัวใหม่เข้ามาในสมการจะทำการพิจารณาว่า ตัวแปรอิสระเดิมในสมการจะสามารถอยู่ในสมการได้ หรือควรตัดออกไป

2.1.14 การออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบ [9]

การทดลองนี้เป็นการทดลองที่มีประสิทธิภาพและนิยมใช้มากสำหรับกรณีศึกษาปัจจัยที่ 3 ระดับ (3 – level design) โดยเฉพาะกรณีที่ต้องการสร้างสมการตัวแปรเมื่อปัจจัยเป็นปัจจัยเชิงปริมาณ (Quantitative factors) เช่น เวลา ความดัน เป็นต้น โดยใช้หลักการของการทดลองของแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบบวกกับจุดกึ่งกลาง (Central points) รวมเข้าไป

วิธีการพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology, RSM) เป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหา โดยที่ผลตอบที่สนใจขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร และมีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบนี้ ซึ่งส่วนมากปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวผลตอบมักจะไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบและตัวแปรอิสระ ดังนั้นจึงต้องหาตัวแปรที่เหมาะสม เพื่อจะใช้เป็นตัวแทนในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบและเซตของตัวแปรอิสระ ตามปกติแล้วจะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังต่ำๆ ที่อยู่ภายใต้อาณาเขตบางส่วนของตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันที่ใช้ในการประมาณความสัมพันธ์นี้คือแบบจำลองหนึ่ง ดังสมการที่ 2.12

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (2.12)$$

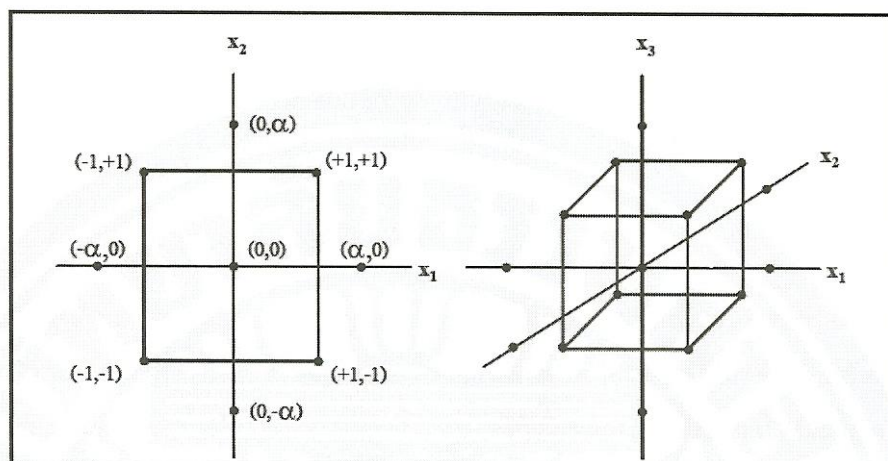
แต่ถ้ามีส่วนโค้งเข้ามาเกี่ยวข้องในระบบจะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังสูงขึ้น เช่น พหุนามกำลังสอง ดังสมการที่ 2.13

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2.13)$$

อย่างไรก็ตาม ผลตอบทุกค่าไม่จำเป็นต้องใช้สมการลำดับที่สองในการหาคำตอบเสมอไป ซึ่งโดยปกติจะถูกนำมาใช้เมื่อการหาคำตอบโดยสมการกำลังหนึ่งในขั้นตอนแรกถูกหยุด เนื่องจากไม่สามารถปรับปรุงค่าของผลตอบได้อีก

1) วิธีการออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design, CCD) [9]

วิธีการออกแบบส่วนผสมกลางหรือ CCD เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากในการพิตแบบจำลองลำดับที่สอง ซึ่งวิธีการนี้มักถูกนำมาใช้เมื่อคำตอบที่ได้จากการพิตแบบจำลองลำดับที่หนึ่งไม่มีหลักฐานเพียงพอที่จะถูกพัฒนาต่อไปได้ โดยวิธีการออกแบบส่วนประสมกลางนี้จะต้องการออกแบบพารามิเตอร์ 2 ตัวในการออกแบบ นั่นคือ ระยะทาง (α) ของการรันในแนวแกนจากจุดศูนย์กลางของการออกแบบ และจำนวนจุดศูนย์กลาง (n_c)



ภาพที่ 2.15 การออกแบบส่วนประสมกลาง [9]

สำหรับการออกแบบสมการพื้นผิวผลตอบลำดับที่สองนั้น ควรจะมีความสามารถในการหมุน (Rotatable) ซึ่งหมายความว่าจุด X ทุกจุดจะมีระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของการออกแบบเท่ากัน โดยการออกแบบ CCD นี้สามารถทำให้หมุนได้โดยการเลือกค่าของ α

2) วิธีการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) [9]

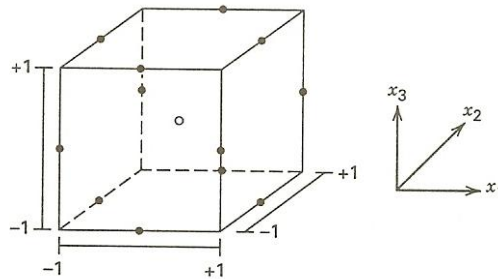
การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) เป็นการออกแบบสามระดับสำหรับพีตพื้นผิวผลตอบ การออกแบบนี้ถูกสร้างขึ้นจากรวมการออกแบบแฟกทอเรียล 2^k กับการออกแบบบล็อกไม่บริสุทธิ์ ผลของการออกแบบมีประสิทธิภาพมากในด้านจำนวนของการรันที่ต้องการ และการออกแบบนี้ยังมีความสามารถในการหมุนหรือเกือบหมุนได้อีกด้วย

ตารางที่ 2.3 การออกแบบแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนแบบ 3 ตัวแปร [9]

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

จากตารางที่ 2.3 แสดงให้เห็นถึงการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน ที่มีตัวแปร 3 ตัวแปร รูปทรงเรขาคณิตของการออกแบบแสดงให้เห็นถึงการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน ซึ่งการออกแบบแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน เป็นการออกแบบรูปทรงกลมที่ทุกจุดวางอยู่บนรูปทรงกลมรัศมี $\sqrt{2}$ นอกจากนั้น การออกแบบแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนไม่ได้รวมเอาจุดใดๆ ที่เป็นจุดยอดของรูปลูกบาศก์

ที่สร้างขึ้นจากขีดจำกัดบนและล่างของแต่ละตัวแปรเอาไว้ การกระทำเช่นนี้เป็นประโยชน์อย่างมากเมื่อจุดที่อยู่บนมุมของลูกบาศก์ คือ การรวมของปัจจัยระดับ (Factor-Level Combination) ที่แพงมากหรือเป็นไปได้ที่จะทำการทดลอง เนื่องจากข้อจำกัดในด้านกายภาพของกระบวนการ



ภาพที่ 2.16 การออกแบบแบบแฟกซ์-เบห์นเคนแบบ 3 ตัวแปร [9]

2.1.15 การพยากรณ์ค่าแบบช่วง(Prediction Interval) [11]

การพยากรณ์ค่าแบบช่วงเป็นการวิเคราะห์ความถดถอยเพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปร โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อนำมาใช้ในการกำหนดขอบเขตบนและขอบเขตล่างของค่าพยากรณ์ เมื่อมีการกำหนดค่าปัจจัยไว้แล้ว ซึ่งจะเป็นการพยากรณ์ค่าในอนาคต

การประมาณค่าช่วงของ Y เมื่อกำหนดให้ $X = x_0$ ที่ระดับความเชื่อมั่น $(1-\alpha)100\%$ คือ

$$\hat{y} \pm t_{\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\hat{\sigma}^2 (1 + x_0^T (x^T x)^{-1} x_0)} \quad (2.14)$$

- เมื่อ \hat{y} คือ ค่าการพยากรณ์
- $t_{\frac{\alpha}{2}}$ คือ ค่า t-test ที่ความเชื่อมั่น $\frac{\alpha}{2}$
- $\hat{\sigma}^2$ คือ ค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดยกกำลังสอง
- x_0 คือ ปัจจัยที่ต้องการการพยากรณ์นอกการออกแบบการทดลอง
- x คือ ปัจจัยที่ออกแบบในการทดลอง
- T คือ การทรานสโพส

โดยการพยากรณ์ค่าแบบช่วงจะอาศัยเส้นขอบเขตบนและขอบเขตล่างในการตรวจสอบ และควบคุมคุณภาพงาน โดยค่าจริงที่ได้จากการวัดและควบคุมควรจะต้องอยู่ในช่วงของเส้นขอบเขตบนและขอบเขตล่างของค่าพยากรณ์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสมการในการพยากรณ์มีความแม่นยำในการพยากรณ์ที่ระดับความเชื่อมั่น $(1-\alpha) \times 100\%$

2.2 ทบทวนวรรณกรรม

Tsai, Y.H., Chen, J.C., and Lou, S.J. (2542) [9] งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานภายในกระบวนการกัดแบบ End Milling โดยใช้ตัวแปร ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด และการสั่นสะเทือนเฉลี่ยต่อรอบ (Vibration average per revolution, VAPR) ผ่านวิธีการแบบ Artificial neural network model (ANN) และวิธี Multiple regression model ผลการศึกษาพบว่าวิธีการ ANN มีความแม่นยำมากที่สุดถึง 96-99% แต่ข้อด้อยของวิธีการดังกล่าวจำเป็นต้องใช้ข้อมูลจำนวนมาก ซึ่งเมื่อเงื่อนไขการตัดเปลี่ยนไป ก็จะต้องทำการเก็บข้อมูลจำนวนมากใหม่เพื่อที่จะพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวให้แม่นยำ และจำเป็นต้องใช้กำลังการคำนวณจำนวนมาก

ชาญณรงค์ รุ่งเรือง (2553) [12] งานวิจัยนี้เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของเงื่อนไขการตัดจากการประยุกต์ใช้สารหล่อเย็น ที่มีผลต่อความลึกหรือของมีดกัดแบบหัวบอล ความขรุขระผิวชิ้นงาน และแรงตัด และศึกษาหาสภาวะการตัดที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการกัดเหล็กกล้าด้วยมีดกัดแบบหัวบอลกับการใช้สารหล่อเย็นโดยการใช่วิธีการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบด้วยเทคนิคบ็อกซ์-เบห์นเคน และจากผลการศึกษาพบว่า อัตราป้อนตัด ความลึกในการตัด และความเร็วในการตัด ส่งผลต่อกรณีศึกษาจากมากไปน้อยตามลำดับ

จากการใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบในการสร้างสมการลำดับที่สองของความขรุขระผิวชิ้นงาน, ความลึกหรือของมีดกัด, และสัดส่วนการตัด พบว่า สมการสามารถนำไปพยากรณ์ผลตอบดังกล่าวได้ด้วยระดับความเชื่อมั่น 95% และได้เงื่อนไขการตัดที่สภาวะเหมาะสมของเงื่อนไขการตัดแบบเปียก ที่ระดับความพึงพอใจรวม 84.21% ,สภาวะที่เหมาะสมของเงื่อนไขการตัดแบบแห้งที่ระดับความพึงพอใจรวม 75.97%, และสภาวะที่เหมาะสมของเงื่อนไขการตัดแบบสเปรย์ที่ระดับความพึงพอใจรวม 85.65%

Lou, M.S., Chen, J.C., and Li, C.M. (2542) [13] งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิว (Surface Roughness) ของชิ้นงาน ในกระบวนการ CNC End-

Milling โดยใช้ Multiple Regression Prediction Model ซึ่งพารามิเตอร์ที่ใช้ในสมการคือ ความเร็วตัด อัตราการป้อน ความลึกตัด ซึ่งผลที่ได้จากการเปรียบเทียบค่าความขรุขระผิว พยากรณ์และค่าความขรุขระผิวจริงที่ได้จากการทดลองมีความแม่นยำ 90.03% ซึ่งข้อดีของวิธีการนี้คือไม่สามารถพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานในกระบวนการ (In-Process) ระหว่างที่ทำการตัดได้ ทำให้ไม่สามารถแก้ไขพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อความขรุขระผิวชิ้นงานได้อย่างทันท่วงที

Kadrigama, K., Noor, M.M., Zuki, N.M, Rahman, M.M., Rejab, M.R.M., Daud, R., and Abou-El-Hossein, K.A. (2552) [14] งานวิจัยนี้ได้ศึกษาหาค่าความขรุขระผิวชิ้นงานที่ดีที่สุดในการบวนการกัดของอลูมิเนียมอัลลอย AA6061-T6 ชุบคาไบต์ เพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายและเวลาในการผลิต โดยใช้วิธีการ Response Surface Method (RSM) และ Radian Basis Function Network (RBFN) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ได้ดีในงานวิจัยของ Tsoa and Hocheng ซึ่งได้ใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการพยากรณ์หาแรง Thrust Force และความขรุขระผิวชิ้นงานในกระบวนการเจาะ แต่งานวิจัยนี้ได้นำวิธีการดังกล่าวมาใช้เพื่อหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมและมีผลมากที่สุดได้แก่ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัดตามแนวแกน ความลึกตัดตามแนวรัศมี ผลการศึกษาจากวิธี Linear Regression อันดับหนึ่ง และวิธี RBFN พบว่าอัตราป้อนตัดเป็นตัวแปรที่มีผลต่อความขรุขระผิวมากที่สุด และวิธี RBFN สามารถพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวได้แม่นยำมากกว่าวิธี RSM ข้อดีของวิธีการนี้คือไม่สามารถใช้ได้กับเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไปได้

Tangitsitcharoen, S., Rungruang, C., and Laiaddee, D. (2553) [15] บทความนี้ได้ทำการศึกษาการตัดแบบแห้ง การตัดแบบเปียก และการตัดแบบสเปร์ย์ โดยใช้หัวตัดแบบหัวบอล โดยใช้ค่าเกณฑ์ความขรุขระผิวของชิ้นงาน อายุมีดตัด การใช้สารหล่อเย็น การกระจายตัวของอนุภาคสารหล่อเย็น และราคาใช้จ่ายในการตัด โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอกับความขรุขระผิว , การสึกหรอกับแรงตัด , และแรงตัดกับความขรุขระผิว ซึ่งผลที่ได้เป็นไปในแนวทางเดียวกัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าการตัดแบบสเปร์ย์ให้ค่าใช้จ่ายในการตัดที่ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับการตัดแบบอื่น

Bernardos, P.G., and Vosniakos, G.C. (2546) [16] บทความวิชาการนี้ได้รวบรวมงานวิจัยของการพยากรณ์หาค่าความขรุขระผิวชิ้นงานของกระบวนการทางกล จากอดีตจนถึงปัจจุบัน โดยได้สรุปแนวทางการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวเป็น 3 แนวทางคือ 1.วิธีพื้นฐานจากทฤษฎีทางกล (Machining theory based approach) ซึ่งข้อเสียของวิธีการนี้คือไม่สามารถครอบคลุมปัจจัยอื่นๆ ที่ส่งผลต่อความขรุขระผิวชิ้นงานได้ทั้งหมด เช่น การสึกหรอของมีดตัด อุณหภูมิที่เกิดขึ้นขณะตัด เป็นต้น 2.วิธีสืบค้นทางการทดลอง (Experimental investigation

approach) ข้อเสียของวิธีการนี้คือผลที่ได้ไม่สามารถนำมาใช้กับกรณีทั่วไปได้ และไม่สามารถคาดหวังผลที่เกิดหลังจากทดลองได้ เพราะมีปัจจัยต่างๆที่มากเกินไป เช่น อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง 3.วิธีออกแบบการทดลอง (Designed experiment approach) วิธีนี้เป็นวิธีที่สามารถนำมาใช้ในงานได้อย่างแพร่หลาย ซึ่งทำให้ลดจำนวนของปัจจัยต่างๆได้ 4.วิธีปัญญาประดิษฐ์ (Artificial intelligence approach) วิธีการนี้ได้รับความนิยมในช่วงไม่นานมานี้ ซึ่งนอกจากจะใช้โปรแกรมที่สามารถจัดการสิ่งรบกวนหรือข้อมูลที่ไม่สมบูรณ์แล้ว ยังไม่จำเป็นต้องกำหนดปัญหาให้แก่ตัวโครงข่ายประติษฐ์อีกด้วย แต่ข้อเสียคือไม่สามารถรับรองประสิทธิผลในการนำไปใช้งานได้ และต้องใช้กำลังการคำนวณมาก

Rashid, F.F.M., Gan, Y.S., and Muhammad, Y.N. (2552) [17] งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษารูปร่างสมการทางคณิตศาสตร์ในการพยากรณ์ความขรุขระผิว (Surface Roughness) ของชิ้นงานในกระบวนการ CNC End-Milling โดยใช้ Linear Regression Analysis ซึ่งพารามิเตอร์ที่ใช้ในสมการคือ ความเร็วตัด อัตราการป้อน ความลึกตัด ซึ่งผลที่ได้จากการเปรียบเทียบค่าความขรุขระผิวพยากรณ์และค่าความขรุขระผิวจริงที่ได้จากการทดลองมีความแม่นยำ 90% ข้อด้อยของวิธีการนี้คือไม่สามารถใช้ได้กับเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไปได้ ต้องหาค่าสัมประสิทธิ์ใหม่ทุกครั้งที่เงื่อนไขการตัดเปลี่ยนไป

Lee, K., and Dornfeld, D.A. (2547) [18] งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษารูปร่างสมการทางคณิตศาสตร์ในการพยากรณ์ความขรุขระผิว (Surface Roughness) ของกระบวนการ Micro-End-Milling โดยพารามิเตอร์ที่ใช้คือ ความเร็วตัด อัตราการป้อน ความลึกตัด แบบ Linear Model ซึ่งหลังจากพล็อตกราฟระหว่างอัตราป้อนตัดที่ระดับต่างๆ กับค่าความขรุขระผิว พบว่ามีความสัมพันธ์กันแบบไม่เป็น linear จึงปรับเปลี่ยนสมการเป็นแบบ Polynomial Model ซึ่งทำให้สมการพยากรณ์มีความใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากกว่า โดยมีช่วงความผิดพลาด +/- 10%

นอกจากนั้นในกระบวนการ Micro-End-Milling จะเกิดการส่ายของหัวตัดเกิดขึ้น เนื่องจากความไม่เป็นแนวตรงของเครื่องมือ ความไม่สมมาตรของเครื่องมือ และการสั่นสะเทือนของเครื่องมือในระหว่างทำงาน ทำให้ความขรุขระผิวชิ้นงานไม่เรียบเท่าที่ควร (run-out) ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่สำคัญต่อความขรุขระผิวชิ้นงาน ในกระบวนการกัดแบบ Micro-End-Milling

Tangjitsitharoen, S. (2552) [19] ได้ทำการศึกษาเพื่อหาสภาวะการกัดที่เหมาะสมสำหรับการกลึงเหล็กกล้า (Plain carbon steel) ด้วยมีดตัดคาร์ไบด์โดยการติดตั้งไดนาโมมิเตอร์เพื่อตรวจวัดแรงตัดภายในกระบวนการกัด ด้วยการประยุกต์ใช้วิธีปริมาณสารหล่อเย็นน้อยที่สุดใน

สภาวะการตัดแบบต่างๆ จากผลการศึกษพบว่า ความขรุขระผิวและการสึกหรอของมีดตัดสามารถอธิบายได้ด้วยแรงตัดที่เกิดขึ้น

Tangjitsitcharoen, S., Arayaphitaya, S. and Thongprasert, S. (2553) [20] งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ สืบหาเงื่อนไขการตัดโลหะที่เหมาะสม ของเหล็กกล้าคาร์บอน S45C กับมีดตัดคาร์ไบด์เคลือบผิวภายใต้เงื่อนไขการตัดที่แตกต่างกันโดย ศึกษาความสัมพันธ์ของเงื่อนไขการตัดที่มีผลต่ออัตราการสึกหรอของมีดตัด ความขรุขระผิวของชิ้นงาน แรงตัด และอุณหภูมิที่เกิดขึ้นโดยพิจารณาถึงค่าตัวแปรต่างๆที่มีอิทธิพลต่อการตัด ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design แรงตัดและอุณหภูมิในการตัด ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อการตรวจติดตามในกระบวนการตัดโดยไดนามิเตอร์และPyrometer ซึ่งติดตั้งบนเครื่องซีเอ็นซีเพื่อใช้วัดแรงและอุณหภูมิในขณะตัด

ค่าพารามิเตอร์ในการตัด ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราการป้อน และความลึกในการตัด เพื่อพยากรณ์ถึงความหยابผิวที่น้อยที่สุด จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอัตราการป้อนตัดส่งผลมากที่สุดต่อความหยابผิว โดยใช้เทคนิคพื้นผิวผลตอบ แบบ Box-Behnken Design

จากผลการทดลองพบว่าด้วยความเชื่อมั่นที่ระดับ 95% อัตราป้อนตัดและความเร็วตัด มีผลต่อผลตอบทั้ง 3 ตัว ซึ่งได้แก่ความหยابผิวชิ้นงาน สัดส่วนแรงตัด และอุณหภูมิในการตัด ส่วนความลึกตัดไม่มีผลต่อผลตอบทั้ง 3 ตัว เงื่อนไขการตัดที่ดีที่สุด คือ ความเร็วตัด 350 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ และความลึกการตัด 0.5 มิลลิเมตรและสมการความสัมพันธ์ที่หาได้จากการทดลองนี้ใช้เป็นแนวทางในการประยุกต์ต่อไป โดยใช้กำหนดค่าของปัจจัยต่างๆของกระบวนการกลึงจากสมการความสัมพันธ์นี้ เพื่อควบคุมความหยابผิวของชิ้นงานให้ได้ตามเป้าหมายที่กำหนด

นายพุทธิภูมิ วสินสันต์, นายสวภฏ กิจพิทยาฤทธิ์ , ชาญณรงค์ รุ่งเรือง, และดวงตา ละเอียดดี (2553) [21] จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อต้องการตรวจติดตามเงื่อนไขการตัดแบบลมเป่าความดัน 0.5 MPa แบบเปียก และแบบละลองของสารหล่อเย็นความดัน 0.5 MPa เพื่อหาเงื่อนไขการตัดอุณหภูมิที่เหมาะสมในกระบวนการกัดด้วยมีดกัดแบบหวับอล โดยการประยุกต์การใช้การวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบ

การติดตามภายในกระบวนการถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อวัดแรงตัดในขณะทำการตัดเฉือน เพื่อตรวจสอบและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของการสึกหรอของมีดตัด ความ ขรุขระผิว เงื่อนไข

การตัด และแรงตัด จากผลการทดลองความสัมพันธ์ของเงื่อนไขการตัด ความ ชรุขระผิว และแรง ตัด ที่ได้จากการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอพบมีแนวโน้มเป็นในทิศทางเดียวกัน ความ ชรุขระผิวและการ ลีกรของมีดตัดสามารถอธิบายได้ด้วยแรงตัดที่เกิดขึ้นในขณะตัด

เงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองโดยพิจารณาจากเกณฑ์ที่กำหนดและ ต้นทุนการตัดคือการตัดแบบลมเป่าความดัน 0.5 MPa ที่ความเร็วรอบ 2,178 รอบ/นาที อัตราการ ป้อน 0.01 มิลลิเมตร/รอบ และความลึก 1.5 มิลลิเมตร เมื่อเทียบกับเงื่อนไขการตัดแบบเปียก และ แบบละอองของสารหล่อเย็นความดัน 0.5 MPa

ศิริวัลย์ จันทรผ่อง (2554) [22] งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการพัฒนาสมการ พยากรณ์ความชรุขระผิวสำหรับชิ้นงานในการกลึงเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยมีดตัดคาร์ไบด์เคลือบผิว โดยใช้วิธีการพื้นผิวผลตอสนองด้วยการออกแบบการทดลองแบบบ็อก -เบห์นเคน เพื่อศึกษา ความสัมพันธ์ของปัจจัยการตัดที่มีผลต่อความชรุขระผิวของชิ้นงาน แรงตัดและอุณหภูมิในการตัด เพื่อหาเงื่อนไขการตัดที่ดีที่สุดที่ให้ความชรุขระผิวน้อยสุดภายในช่วงความชรุขระผิวที่ยอมรับได้ ตามมาตรฐาน JIS B0601(1982)

เงื่อนไขการตัดที่ดีที่สุดที่ให้ความชรุขระผิวน้อยสุดแสดงตารางเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสม ระดับปัจจัยความเร็วตัดสูงสุด 340 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนต่ำสุด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ ระยะลึกตัดต่ำสุด 0.2 มิลลิเมตร และรัศมีจุมกมีดสูงสุด 1.2 มิลลิเมตร

Tangjitsitcharoen, S. (2553) [23]

งานวิจัยนี้ศึกษาหาสภาวะการตัดที่เหมาะสมที่สุดจากการประยุกต์ใช้สารหล่อเย็นใน 3 รูปแบบ คือ การตัดแบบแห้ง การตัดแบบเปียก และ การตัดแบบใช้สเปรสารหล่อเย็น สำหรับการ กลึงเหล็กกล้าคาร์บอน JIS:S45C ด้วยมีดตัดคาร์ไบด์เคลือบผิว ในการทดลองได้กำหนด พารามิเตอร์ในการตัดดังนี้ คือ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด และศึกษาแรงตัดซึ่งเป็น พารามิเตอร์ภายในกระบวนการตัด เพื่อใช้ในวิเคราะห์และอธิบายความสัมพันธ์ต่ออุณหภูมิตัด ความชรุขระผิวของชิ้นงาน อัตราการลีกรของมีด และลักษณะการเกิดเศษ

จากการวิเคราะห์พบว่าสภาวะการตัดที่เหมาะสมที่สุดโดยพิจารณาจาก ความชรุขระผิว ของชิ้นงาน อายุมีดตัด และปริมาณการใช้สารหล่อเย็น คือการตัดแบบแห้ง ด้วยความเร็วตัดที่ 250 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกการตัด 0.5 มิลลิเมตร

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การออกแบบการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาค้นคว้าหาสมการทำนาย ความเรียบผิวชิ้นงาน และแรงตัดที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการตัด ของเงื่อนไขการตัด โดยใช้ลมเป่า และ ศึกษาหาสภาวะ การตัดที่เหมาะสมสำหรับ กระบวนการกัดอะลูมิเนียม ด้วยเม็ดเม็ดกัด แบบหัวบอลกับการใช้ ลมเป่า ดังนั้นการทดลองจะมีการแปรผันปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อผลตอบที่ต้องการศึกษา คือ ความเรียบผิวชิ้นงาน และแรงตัด โดยทำการออกแบบการทดลองเพื่อกำหนดสภาวะการตัดที่เหมาะสมใน กระบวนการกัดชิ้นงานอะลูมิเนียม

3.2 การกำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความเรียบผิวของชิ้นงาน

การผลิตชิ้นส่วนในกระบวนการกัดนั้นจะมีปัจจัยที่ใช้ในการพิจารณาคุณภาพของชิ้นงานคือ ความเรียบผิวของชิ้นงาน โดยแรงตัดในกระบวนการนั้นจะส่งผลโดยตรงกับความเรียบผิว จึงทำให้ต้องพิจารณาปัจจัยต่างๆที่ส่งผลกระทบกับทั้งแรงตัดและความเรียบผิว ซึ่งสามารถแยกเป็น 5 ปัจจัยหลักๆ ได้ดังนี้

1. ปัจจัยเนื่องจากคน (Man)
2. ปัจจัยเนื่องจากเครื่องจักร (Machine)
3. ปัจจัยเนื่องจากวัสดุดิบ (Material)
4. ปัจจัยเนื่องจากวิธีการ (Method)
5. ปัจจัยเนื่องจากสิ่งแวดล้อม (Environment)

โดยปัจจัยที่ได้กล่าวมานี้ในงานวิจัยนี้จะทำการกำหนดให้เป็นปัจจัยคงที่ ซึ่งสามารถควบคุมได้ ทั้งนี้เพื่อศึกษาถึงปัจจัยจากวิธีการเป็นหลัก ซึ่งเป็นตัวแปรหลักในการออกแบบการทดลองซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องในการกำหนดตัวแปรสำหรับการทดลอง (Cutting Parameter) ในกระบวนการกัดมีเงื่อนไขต่างๆที่ส่งผลต่อความเรียบผิวชิ้นงาน ก็คือ ความเร็ว รอบ, ความลึกในการตัด อัตราการป้อนตัด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเม็ดตัด และ

ความดันลมเป่า โดยปัจจัยหลักทั้ง 5 ปัจจัย จะส่งผลโดยตรงต่อ ความเรียบผิวของชิ้นงาน และ แรงตัด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ปัจจัยดังที่กล่าวมาทำการศึกษา

3.2.2 ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ระดับปัจจัยในการทดลอง (Level) จะกำหนดเป็นค่าคงที่ ซึ่งจะแบ่งปัจจัย ออกเป็น 3 ระดับ โดยอาศัยข้อมูลทางเทคนิคของบริษัทผู้ผลิตมีดตัดที่นำมาจากคู่มือการใช้งาน มีดตัดดังนี้

1. ความเร็วรอบ (N) เลือกใช้ที่ระดับ 1,800 2,200 และ 2,600 รอบต่อนาที
2. ความลึกตัด (d) เลือกใช้ที่ระดับ 0.5, 0.75 และ 1 มิลลิเมตร
3. อัตราการป้อนตัด (F) เลือกใช้ที่ระดับ 0.02, 0.03 และ 0.04 มิลลิเมตรต่อรอบ
4. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัด (Di) 6, 8 และ 10 มิลลิเมตร
5. ความดันลมเป่า (A) 0.3, 0.5 และ 0.7 เมกกะปาสคาล

เงื่อนไขการทดลองนี้จะทำการตัดซ้ำจำนวน 3 ครั้ง เพื่อความถูกต้องของผลการทดลองที่ได้ให้มากขึ้น

3.3 วัสดุชิ้นงานและอุปกรณ์ในการทดลอง

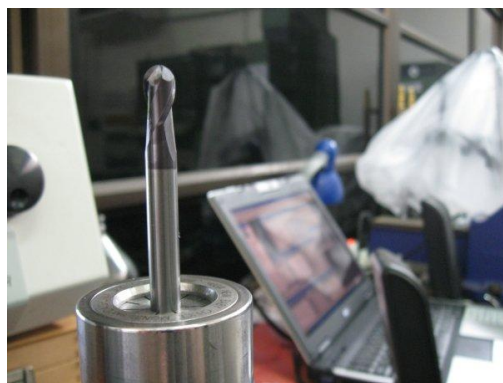
1. วัสดุชิ้นงาน ที่ใช้ในการทดลองเป็นอะลูมิเนียม (Al 6063) ซึ่งมีขนาด ความกว้าง 64 มิลลิเมตร ยาว 64 มิลลิเมตร และสูง 45 มิลลิเมตร



ภาพที่ 3.1 วัสดุชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ไม่ได้นำค่าความแข็งของวัสดุที่ใช้ทำชิ้นงานมาพิจารณา ดังนั้นอะลูมิเนียม (Al 6063) ที่ใช้ในการทำชิ้นงานในงานวิจัยนี้จึงถูกกำหนดให้ค่าความแข็งมีค่าเท่ากัน เพื่อเป็นการลดปัจจัยการศึกษาลง

มีดกัด เป็นมีดกัดแบบหัวบอล (Ball End Milling) ชนิดคมมีดคาร์ไบด์เคลือบผิวด้วย ไทเทเนียมออกไซด์เคลือบไนไตร แบบ 2 คมตัด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 6, 8 และ 10 มิลลิเมตร



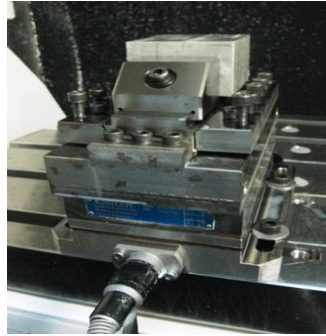
ภาพที่ 3.2 มีดกัดแบบหัวบอล ยี่ห้อ 7-Leaders

2. เครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ชนิด 5 แกน ยี่ห้อ Mazak รุ่น Variaxis 500-5X ใช้ในการทำการทดลองตัดชิ้นงาน



ภาพที่ 3.3 เครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ชนิด 5 แกน รุ่น Variaxis 500-5X

3. ไดนาโมมิเตอร์หรือเซ็นเซอร์วัดแรงตัด (Dynamometer or Force sensor) ยี่ห้อ Kister รุ่น 9257B สำหรับวัดแรงตัด ชาร์จแอมพลิไฟเออร์ (Charge Amplifier) ยี่ห้อ Kister type 5073 สำหรับขยายสัญญาณแรงตัด

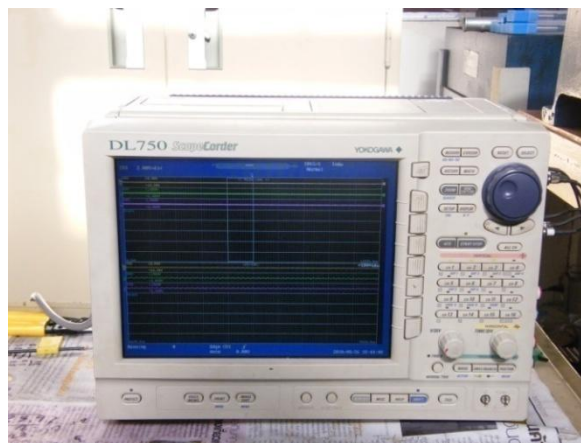


ภาพที่ 3.4 ไดนามิเตอร์ รุ่น 9257B



ภาพที่ 3.5 ชาร์จแอมป์ไฟเออร์ รุ่น 5073

4. ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) ยี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น DL 750 ใช้แสดงผลและบันทึกค่าแรงตักที่เกิดขึ้นในการตัด



ภาพที่ 3.6 ออสซิลโลสโคป รุ่น DL 750

5. เครื่องวัดความเรียบผิวชิ้นงาน (Roughness tester) ยี่ห้อ TSK รุ่น Surfcom 1400D ใช้วัดความเรียบผิวชิ้นงาน



ภาพที่ 3.7 เครื่องวัดความขรุขระผิวชิ้นงาน รุ่น Surfcom 1400D

3.4 ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้จะมีขั้นตอนการทดลองสำหรับเงื่อนไขการตัดต่างๆแบบใช้ลมเป่า ดังภาพที่ 3.8 ซึ่งเงื่อนไขในการตัดแบบใช้ลมเป่าจะใช้หัว nozzle ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร โดยที่หัว nozzle จะอยู่ห่างจากปลายมีดกัดประมาณ 25 มิลลิเมตร และทำมุม 30 องศา กับแนวราบ



ภาพที่ 3.8 ลักษณะการตัดแบบใช้ลมเป่า

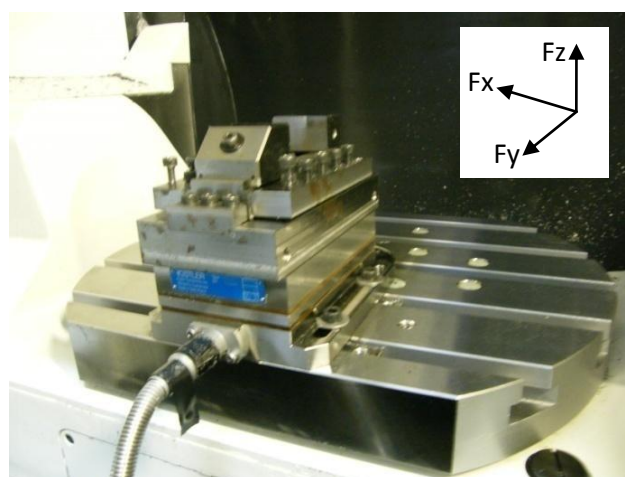
3.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล

ในการเก็บข้อมูลนั้นจะทำการเก็บข้อมูลจากชิ้นงานตัด โดยทำการเก็บค่าความเรียบผิวของชิ้นงาน และแรงตัด ตามเงื่อนไขของการตัด โดยจะเก็บค่าดังต่อไปนี้ แรงตัดในแนว X (F_x) แรงตัดในแนว Y (F_y) แรงตัดในแนว Z (F_z) ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (R_a) และค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน สูงสุด (R_z) โดยค่าที่เก็บได้ในรูปของแรงทั้ง 3 มีหน่วยเป็น นิวตัน (N) และค่าความขรุขระผิวชิ้นงานทั้ง 2 มีหน่วยเป็น ไมโครเมตร (μm) แล้วทำการหาความสัมพันธ์ของผลตอบ โดยการพิจารณาจากความสัมพันธ์ของค่าความขรุขระผิว (R_a) กับ แรงตัดในแนวสัมผัส (F_x) เมื่อได้สมการความสัมพันธ์ของปัจจัยทั้งสองแล้วก็ทำการกำหนดค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน (R_a) แล้วนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ไปทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติเพื่อหาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมนั้น จะทำการหาเงื่อนไขที่ความเรียบผิวชิ้นงาน (R_a) มีค่าไม่เกิน 0.9 ไมโครเมตร โดยจะยึดตามมาตรฐาน ISO 4287-1997 ซึ่งใช้เครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ชนิด 5 แกนทำการกัดชิ้นงาน และใช้เครื่องวัดความเรียบผิวชิ้นงาน (Roughness tester) เป็นเครื่องมือที่ในการวัดค่าความเรียบผิวชิ้นงาน

ในการเก็บข้อมูลก่อนนำมาวิเคราะห์เชิงสถิติด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จะมีวิธีการเก็บรวบรวมข้อมูลในแต่ละเงื่อนไขการตัด โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ในการวัดแรงตัดในการกัดชิ้นงานบนเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์นั้น จะต้องทำการติดตั้งไดนาโมมิเตอร์หรือเซ็นเซอร์วัดแรงเพื่อใช้ในการวัด แสดงดังภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.9 การติดตั้งไดนาโมมิเตอร์หรือเซ็นเซอร์วัดแรง

2. ทำการเชื่อมต่อไดนาโมมิเตอร์หรือเซ็นเซอร์วัดแรงกับเครื่องขยายสัญญาณ (Charge Amplifier) เพื่อขยายสัญญาณ ของแรงตดที่ได้ จากนั้นต่อเครื่องขยายสัญญาณเข้ากับ เครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) แสดงดังภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 การเชื่อมต่อสายไดนาโมวัดแรงกับเครื่องขยายสัญญาณและเครื่องออสซิลโลสโคป

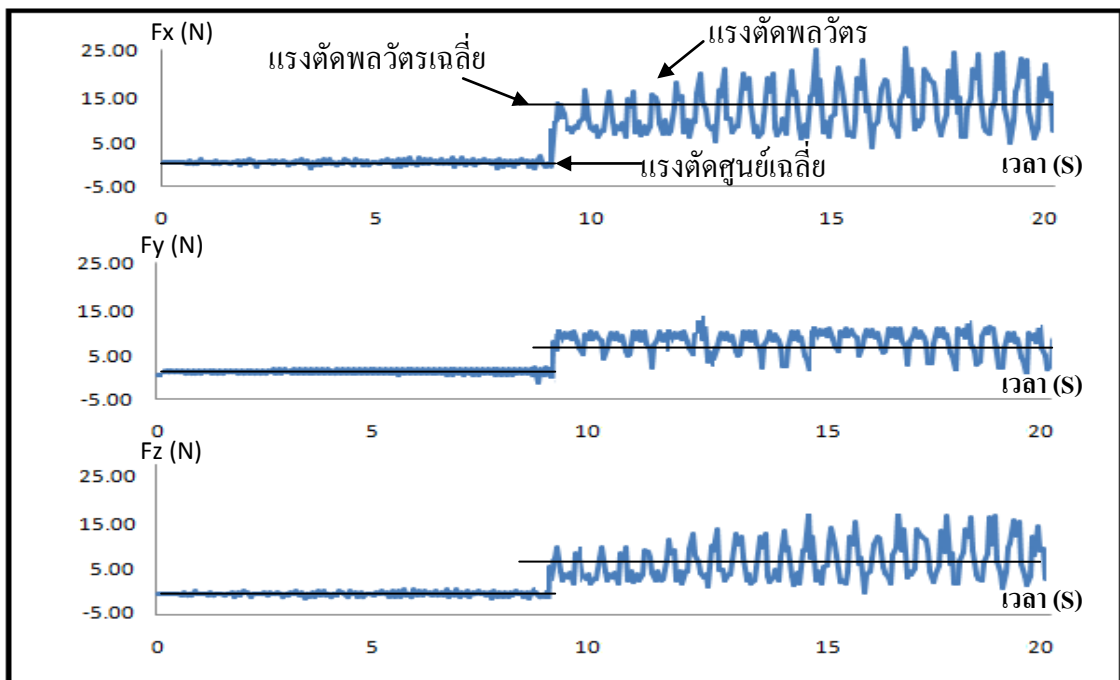
3. ปรับตั้งค่าเครื่องออสซิลโลสโคป โดยตั้งค่าต่างๆ ดังนี้
- Low-pass filter = 500 Hz.
 - Sampling rate = 1 kS/s
 - Record length = 100 K
4. นำชิ้นงานที่จะใช้ในการกัด จับบนปากกาซึ่งยึดอยู่บนโต๊ะงานของเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่ง เซ็นเตอร์ และทำการปาดหน้าชิ้นงานเพื่อให้ชิ้นงานได้ระนาบและมีความเรียบ แสดงดัง ภาพที่ 3.11



ภาพที่ 3.11 การเตรียมชิ้นงานและชิ้นงานที่ผ่านการปาดหน้าเรียบร้อยแล้ว

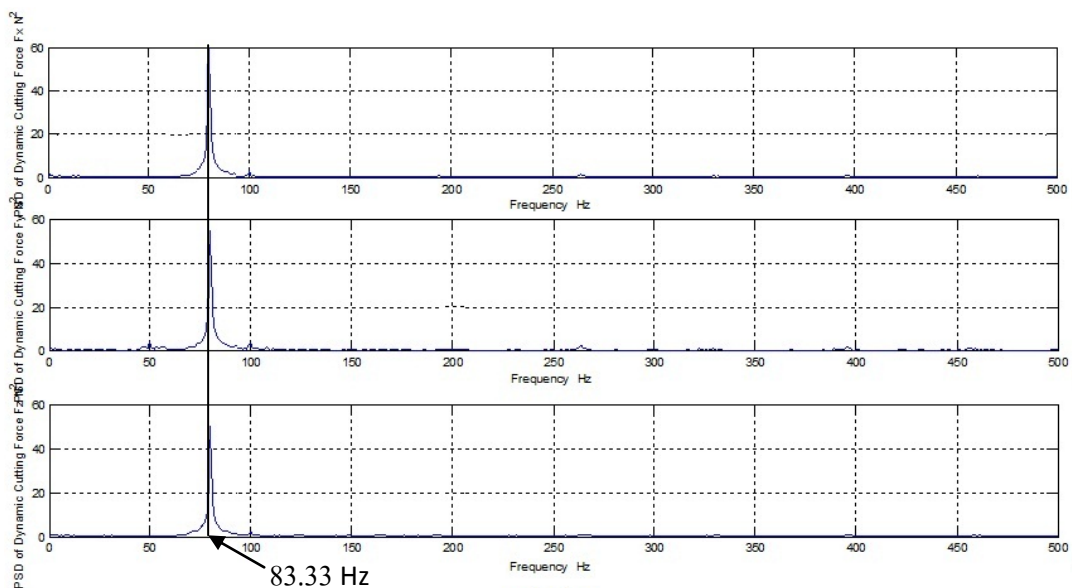
ในการทดลองนั้นชุดข้อมูลที่ได้ออกมาจะอยู่ในหน่วยโวลท์ และต้องทำการแปลงหน่วยในส่วน of สัญญาณแรงตัด ตามค่า sensitivity ได้ต่อไปนี้

- แรงตัดในแนวแกน X (F_x (N)) = V_x (Volt) x 200 (N/Volt)
- แรงตัดในแนวแกน Y (F_y (N)) = V_y (Volt) x 200 (N/Volt)
- แรงตัดในแนวแกน Z (F_z (N)) = V_z (Volt) x 200 (N/Volt)



ภาพที่ 3.12 การคำนวณแรงตัดสถิต

จากภาพที่ 3.12 แสดงตัวอย่างการคำนวณแรงตัดสถิตในการตัดชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน (S50C) โดยใช้ความเร็วรอบตัดที่ 2500 รอบ/นาที อัตราป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด 6 มิลลิเมตร ซึ่งผลการทดลองที่ได้จะมีทั้งแรงตัดพลวัต (Dynamic force) และแรงตัดศูนย์เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการตัด ในงานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์โดยใช้แรงตัดสถิต (Static force) ซึ่งเกิดจากการนำเอาค่าแรงตัดพลวัตเฉลี่ยมาลบกับแรงตัดศูนย์เฉลี่ย



ภาพที่ 3.13 แสดงพาวเวอร์สเปกตรัมของแรงตัด และความถี่ของการตัด

ภาพที่ 3.13 แสดงพาวเวอร์สเปกตรัมและเป็นการทดสอบความถี่ของการตัดที่เงื่อนไขของภาพที่ 3.12 เพื่อยืนยันความถูกต้อง โดยนำมาวิเคราะห์โดยอาศัยการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast flourier transform) เพื่อคำนวณหาความถี่ในการตัด โดยทำการเก็บข้อมูลแรงตัดพลวัตในเวลา 1 วินาที ซึ่งความถี่ในการตัดจากปัจจัยที่กำหนดในภาพที่ 3.12 จะได้ความถี่ในการตัดอยู่ที่ 83.33 เฮิรท์ ซึ่งตรงกับความเร็วตัดในรูปที่ 3.13 โดยคำนวณจาก

$$H_z = \frac{N}{60} \times 2 \quad (3.1)$$

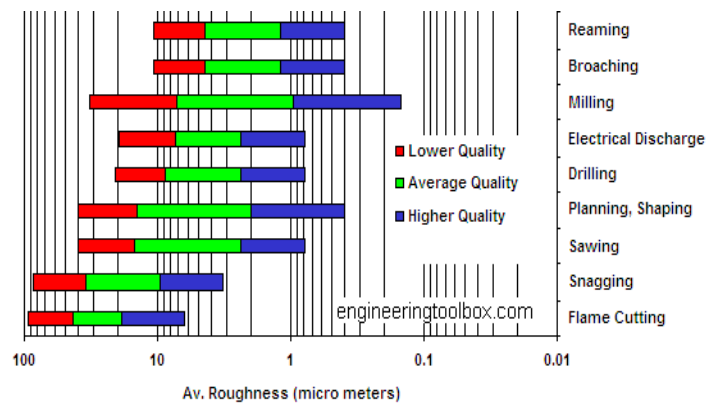
เมื่อ H_z คือ ความถี่ในการตัดในเวลา 1 วินาที (เฮิรท์)

N คือ ความเร็วรอบตัด (รอบต่อนาที)

วิธีคำนวณ $H_z = 2500/60 \times 2 = 83.33$ เฮิรท์

3.6 เกณฑ์การเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสม

เกณฑ์การเลือกเงื่อนไขการตัดจะเลือกจาก ภาพที่ 3.14 ที่ทำการกำหนดค่าความขรุขระผิวอยู่ที่ ไม่เกิน 0.9 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ISO 4287-1997 เนื่องจากเป็นค่าที่อยู่ในช่วงความขรุขระผิวที่มีคุณภาพสูง ซึ่งจะทำให้ผิวของชิ้นงานออกมาดีและนำไปใช้ในอุตสาหกรรมที่ต้องการความขรุขระผิวที่มีคุณภาพสูงได้



ภาพที่ 3.14 ความขรุขระของผิวสำหรับกระบวนการต่าง ๆ [20]

3.7 การออกแบบการทดลอง

ในการออกแบบการทดลองนั้นจำเป็นที่จะต้องกำหนดระดับของปัจจัยการทดลองก่อน และเมื่อกำหนดเรียบร้อยแล้วจึงนำปัจจัยดังกล่าวมาออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบ โดย Minitab ซึ่งใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง ทำให้ได้รูปแบบของการทดลอง ดังนี้

3.7.1 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box- Behnken Design)

ในการออกแบบบ็อกซ์ -เบห์นเคน เป็นการออกแบบสามระดับ (3-Level Design) สำหรับพื้นผิวผลตอบ การออกแบบนี้จะถูกสร้างขึ้นมาจากการรวมการออกแบบแฟกทอเรียล 2^k กับการออกแบบบล็อกไม่บริบูรณ์ ผลของการออกแบบมีประสิทธิภาพมากในด้านจำนวนของการทดลองที่ต้องการ

3.7.2 ระดับของปัจจัยในการทดลอง

ในการออกแบบการทดลองนี้ ได้ใช้โปรแกรม Minitab ช่วยในการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนซึ่งเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป โดยประกอบด้วยปัจจัยหลัก 5 ปัจจัย ในแต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ (แสดงดังตารางที่ 3.1) และเป็นการทำแบบสุ่มตามตารางที่ 3.2 โดยมีจำนวนในการทดลองทั้งหมด 46 การทดลอง โดยในแต่ละการทดลอง มีการบันทึกผลค่าความเรียบผิวของชิ้นงาน และแรงตัดที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการกัด โดยปัจจัยที่กำหนดมาคือความเร็วรอบตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด เส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด และความดันลมเป่า โดยที่ ความเร็วตัดที่ ความลึกตัด เส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด และความดันลมเป่าที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อความขรุขระผิวที่ลดลง ส่วนอัตราป้อนตัดที่ลดลงจะทำให้ความขรุขระผิวลดลงซึ่งปัจจัย

ที่กำหนดมาในการทดลองครั้งนี้จะมีผลต่อความขรุขระผิวของชิ้นงานโดยทำการเลือกปัจจัยที่ใช้ในการทดลองจากคู่มือปฏิบัติการของเครื่องมือตัดตัดยี่ห้อ 7- Leader

ตารางที่ 3.1 ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	ระดับของปัจจัย			สัญลักษณ์
	ต่ำ (-1)	กลาง (0)	สูง (1)	
1.ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	1,800	2,200	2,600	N
2.อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	0.02	0.03	0.04	F
3.ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	0.5	0.75	1.0	d
4.เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวตัด (มิลลิเมตร)	6	8	10	D
5.ความดันลมเป่า (เมกกะปาร์สกาล)	0.3	0.5	0.7	A

ตารางที่ 3.2 เมตริกซ์การออกแบบการทดลองสำหรับการตัดแบบใช้ลมเป่า

StdOrder	RunOrder	Spindle speed	Feedrate	Depth of cut	Tool diameter	Air blow pressure	Fx	Fy	Fz	Ra	Rz
38	1	2200	0.04	0.75	6	0.5					
6	2	2200	0.03	1	6	0.5					
35	3	1800	0.03	0.75	8	0.7					
11	4	2200	0.02	0.75	8	0.7					
2	5	2600	0.02	0.75	8	0.5					
31	6	2200	0.03	0.5	8	0.7					
13	7	1800	0.03	0.5	8	0.5					
9	8	2200	0.02	0.75	8	0.3					
23	9	2200	0.02	1	8	0.5					
15	10	1800	0.03	1	8	0.5					
34	11	2600	0.03	0.75	8	0.3					
4	12	2600	0.04	0.75	8	0.5					
18	13	2200	0.03	0.75	10	0.3					
24	14	2200	0.04	1	8	0.5					
36	15	2600	0.03	0.75	8	0.7					
40	16	2200	0.04	0.75	10	0.5					
41	17	2200	0.03	0.75	8	0.5					

16	18	2600	0.03	1	8	0.5					
17	19	2200	0.03	0.75	6	0.3					
14	20	2600	0.03	0.5	8	0.5					
12	21	2200	0.04	0.75	8	0.7					
43	22	2200	0.03	0.75	8	0.5					
26	23	2600	0.03	0.75	6	0.5					
27	24	1800	0.03	0.75	10	0.5					
19	25	2200	0.03	0.75	6	0.7					
39	26	2200	0.02	0.75	10	0.5					
33	27	1800	0.03	0.75	8	0.3					
7	28	2200	0.03	0.5	10	0.5					
30	29	2200	0.03	1	8	0.3					
20	30	2200	0.03	0.75	10	0.7					
29	31	2200	0.03	0.5	8	0.3					
28	32	2600	0.03	0.75	10	0.5					
22	33	2200	0.04	0.5	8	0.5					
42	34	2200	0.03	0.75	8	0.5					
25	35	1800	0.03	0.75	6	0.5					
10	36	2200	0.04	0.75	8	0.3					
37	37	2200	0.02	0.75	6	0.5					

21	38	2200	0.02	0.5	8	0.5					
46	39	2200	0.03	0.75	8	0.5					
44	40	2200	0.03	0.75	8	0.5					
45	41	2200	0.03	0.75	8	0.5					
8	42	2200	0.03	1	10	0.5					
3	43	1800	0.04	0.75	8	0.5					
5	44	2200	0.03	0.5	6	0.5					
1	45	1800	0.02	0.75	8	0.5					
32	46	2200	0.03	1	8	0.7					

3.8 การวิเคราะห์ข้อมูล

3.8.1 การวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

ในทางสถิติที่มีโปรแกรมที่ช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูลอยู่หลายโปรแกรม โดยที่ Minitab เป็นอีกโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล และเลือกใช้โปรแกรม Minitab เนื่องจากในการวิเคราะห์ชุดข้อมูลในงานวิจัยครั้งนี้โปรแกรม Minitab มีความเหมาะสมในการใช้งานสำหรับการออกแบบการทดลองด้วย วิธีพินผิวผลตอบ และมีการใช้งานโปรแกรม Minitab กันอย่างแพร่หลายในงานวิจัย

3.8.2 การวิเคราะห์ข้อมูลของการออกแบบการทดลอง

การวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนนี้ จะใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) โดยจะใช้โปรแกรม Minitab ซึ่งเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติคำนวณค่า P-Value ในการทดลองเพื่อพิจารณาถึงปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง โดยที่จะกำหนดค่า α ขึ้นมาเพื่อเปรียบเทียบกับค่า P-Value หากค่า P-Value มีค่าน้อยกว่า α จะแสดงว่าปัจจัยที่พิจารณานั้นมีผลต่อตัวแปรตอบสนอง โดยที่จะกำหนด α เท่ากับ 0.05 โดยพิจารณาที่อิทธิพลหลัก (Main Effect) และอันตรกิริยา (Interaction Effect) ว่ามีผลต่อตัวแปรตอบสนองหรือไม่

3.8.3 การตรวจสอบความอิสระของข้อมูล

ในการตรวจสอบนี้จะต้องทำการทดลองแบบสุ่มที่เหมาะสม และทำการพล็อตกราฟระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล โดยที่ความสัมพันธ์ของค่าส่วนตกค้าง (Residual) ควรเป็นอิสระซึ่งกันและกัน โดยที่ลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลอยู่บนแกนนอน และ ค่าส่วนตกค้าง (Residual) อยู่บนแกนตั้ง เพื่อความน่าเชื่อถือก่อนนำไปใช้งาน ซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมนั้นจะต้องมีการกระจายตัวของชุดข้อมูลที่ไม่เห็นแนวโน้มโดยจะกระจายตัวอยู่อย่างกระจัดกระจาย

3.8.4 การตรวจสอบการแจกแจงความเป็นปกติของข้อมูล

ในการตรวจสอบนี้จะทำให้ข้อมูลมีความน่าเชื่อถือก่อนนำไปใช้งาน โดยจะทำการพล็อตค่าของส่วนตกค้าง (Residual) กับค่าความน่าจะเป็นสะสม P_k ($P_k = (K-1/2)n$) ลงบนกราฟที่เรียกว่า Normal Probability Paper ซึ่งจะใช้ค่า $P_k \times 100$ อยู่บนแกนตั้ง และค่าส่วนตกค้าง (Residual) อยู่ในแกนนอน

3.8.5 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน

เป็นการทดสอบการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของข้อมูลเพื่อความเชื่อมั่นในการนำไปใช้งาน โดยพล็อตกราฟระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับค่าที่ถุกฟิต (Fitted

Value) โดยที่ค่าที่ถูกฟิต (Fitted Value) อยู่บนแกนนอน และค่าส่วนตกค้าง (Residual) อยู่บนแกนตั้ง ถ้าภาพที่พล็อตขึ้นมาจะกระจายตัวอย่างกระจัดกระจาย แสดงว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน และไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรอื่น และทดสอบโดยทำการพล็อตกราฟระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับระดับของปัจจัยแต่ละปัจจัยซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้ง และระดับของปัจจัยอยู่บนแกนนอน ถ้าหากภาพที่พล็อตขึ้นมาเป็นทรงกระบอก จะแสดงว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวนหรือมีความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล ถ้าข้อมูลนั้นไม่มีความเสถียรของความแปรปรวนหรือไม่มีความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล โดยภาพที่ออกมาจะมีลักษณะเป็นการเพิ่มขึ้นหรือลดลงเป็นลำดับ (Megaphone)

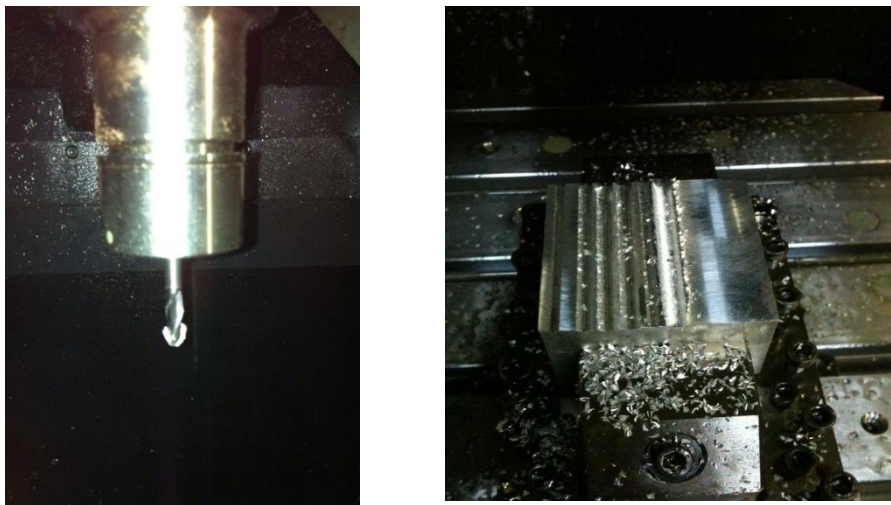
บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการต่อยอดงานวิจัยเรื่อง การศึกษาต้นทุนของกระบวนการกัด อลูมิเนียม 6063 ด้วยวิธีการกัดแบบลมเป่า แบบเปียก และแบบละออง และการหาเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมในกระบวนการกัดโดยใช้การวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบ [2] ของนายพุทธิวุฒิ วศินสันต์ และนายสวภูฏ กิจพิทยาฤทธิ์ ซึ่งในงานวิจัยที่กล่าวมาแล้วข้างต้นนี้จะทำการวิจัยและเคราะห์ของการตัดแบบ 3 ประเภท คือ การตัดแบบเปียก การตัดแบบสเปรย์ และการตัดแบบลมเป่า ซึ่งในการตัดแบบแห่งนี้จะมีการใช้ลมเป่าเข้ามาช่วยในการตัด แต่จะเป็นการใช้ลมเป่าที่ค่าความดันที่ 0.5 เมกกะปาร์สคาล (5 บาร์) ซึ่งในงานวิจัยที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นนี้ชี้ให้เห็นว่าการตัดแบบแห่งนี้ที่ใช้ค่าความดันลมเป่า 0.5 เมกกะปาร์สคาล (5 บาร์) นั้นมีเงื่อนไขในการตัดที่เหมาะสมที่สุดในการตัด เนื่องจากให้ค่าความขรุขระผิวที่อยู่ในเกณฑ์ระดับคุณภาพดี และมีต้นทุนในการตัดที่ต่ำที่สุด เพราะฉะนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการต่อยอดจากงานวิจัยที่ได้กล่าวมาแล้วเพื่อทำการพัฒนาสมการในการวิจัยให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยทำการตัดแบบใช้ลมเป่าโดยทำให้ความดันลมเป่าที่ใช้นั้นสามารถปรับเปลี่ยนได้ เพื่อให้ได้ค่าสมการที่ทำการวิเคราะห์ได้ใกล้เคียงค่าการตัดจริงมากที่สุด โดยการใช้นั้นจะทำเพื่อลดอุณหภูมิในการตัด ซึ่งอุณหภูมิในการตัดนั้นมีผลต่อแรงในการตัดและความขรุขระผิว โดยอุณหภูมิที่สูงจะทำให้วัสดุเกิดความอ่อนนุ่มและตัดได้ง่าย ทำให้ใช้แรงในการตัดที่น้อยและทำให้ความขรุขระผิวมีค่าที่น้อย [22] โดยอุณหภูมิที่มากกว่า 500 องศาเซลเซียสอาจจะทำให้เกิดอะลูมินาร์[24] และส่งผลต่อปัจจัยต่างๆในกระบวนการตัด

งานวิจัยนี้จะทำการทดลองบนชิ้นงานอะลูมิเนียม (Al6063) ซึ่งปัจจุบัน ได้ถูกผลิตเป็นชิ้นส่วนสำคัญต่างๆมากมาย โดยเฉพาะชิ้นส่วนรถยนต์ เช่น หัวเกียร์ ตัวครอบมอเตอร์ ชิ้นส่วนประกอบภายในเครื่องยนต์ต่างๆ ส่วนประกอบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก และชิ้นส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ เป็นต้น

ในการทำวิจัยนี้ได้ทำการทดลองตัดโดยใช้ทั้งแบบใช้ความดันลมเป่า และเป็นการตัดแบบแห้ง ซึ่งในการทดลองตัดแบบแห่งนี้จะทำให้เกิดการหลอมละลายของเศษโลหะมาเกาะติดที่เม็ดมีด (Build-up edge) ดังภาพที่ 4.1 ซึ่งการเกิดการหลอมละลายเศษโลหะติดที่เม็ดมีดนั้นจะทำให้ค่าความขรุขระของผิวชิ้นงานนั้นอยู่ในเกณฑ์คุณภาพที่ต่ำ และอาจไม่เป็นไปตามมาตรฐาน ISO 4287-1997 ที่วางไว้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดลองเฉพาะการตัดแบบที่มีความดันลมเป่าเท่านั้น เพื่อให้ได้ค่าความขรุขระของผิวชิ้นงานเป็นไปตามมาตรฐาน ISO 4287-1997



ภาพที่ 4.1 การเกิดการหลอมละลายเศษโลหะติดที่เม็ดมีด และชิ้นงาน

ในงานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์ผลการทดลองตามปัจจัยดังต่อไปนี้ ความเร็วรอบ อัตราป้อนตัด ความลึกตัด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด และความดันลมเป่า ซึ่งปัจจัยดังกล่าวมาข้างต้นจะส่งผลต่อความสามารถในการตัดโดยเฉพาะ ความขรุขระของผิวชิ้นงาน และแรงตัด โดยจะแยกการวิเคราะห์เป็นหัวข้อต่างๆดังต่อไปนี้

4.1 ผลการทดลอง

ผลการทดลองนี้จะทำการทดลองตามเงื่อนไขการตัดแบบลมเป่า ผลการทดลองทั้งหมดจะอยู่ในภาคผนวก ก. โดยจะทำการเลือกข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าความขรุขระผิว และข้อมูลที่ได้สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.2 โดยมีปัจจัยในการทดลองและผลตอบที่ทำการพิจารณาดังต่อไปนี้

ปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

1. ความเร็วรอบ (N) หน่วย รอบต่อนาที
2. อัตราป้อน (F) หน่วย มิลลิเมตรต่อรอบ
3. ความลึกตัด (d) หน่วย มิลลิเมตร
4. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัด (D) หน่วย มิลลิเมตร
5. ความดันลมเป่า (A) หน่วย เมกกะปาสคาล

ผลตอบในการทดลอง

1. ความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (R_a) หน่วย ไมโครเมตร
2. แรงตัดในแนว X (F_x)

โดยในที่นี้จะทำการวิเคราะห์ความขรุขระผิวชิ้นงานในรูปแบบของความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (R_a) โดยจะนำความขรุขระผิวชิ้นงานในแต่ละครั้งที่ทำการวัดมาทำการเฉลี่ยดังแสดงในภาคผนวก ค

ส่วนแรงตัดที่นำมาวิเคราะห์นั้นจะใช้แรงตัดในแนวแกน X (F_x) เนื่องจากแรงตัดในแนวแกน X นั้นมีทิศทางเดียวกับความเร็วรอบตัด และยังมีค่าที่มากกว่าแรงตัดในแนว Y (F_y) และแรงตัดในแนว Z (F_z) ซึ่งค่าแรงตัดทั้ง 2 แกนที่กล่าวมามีค่าน้อยมากจึงไม่เหมาะแก่การนำมาวิเคราะห์

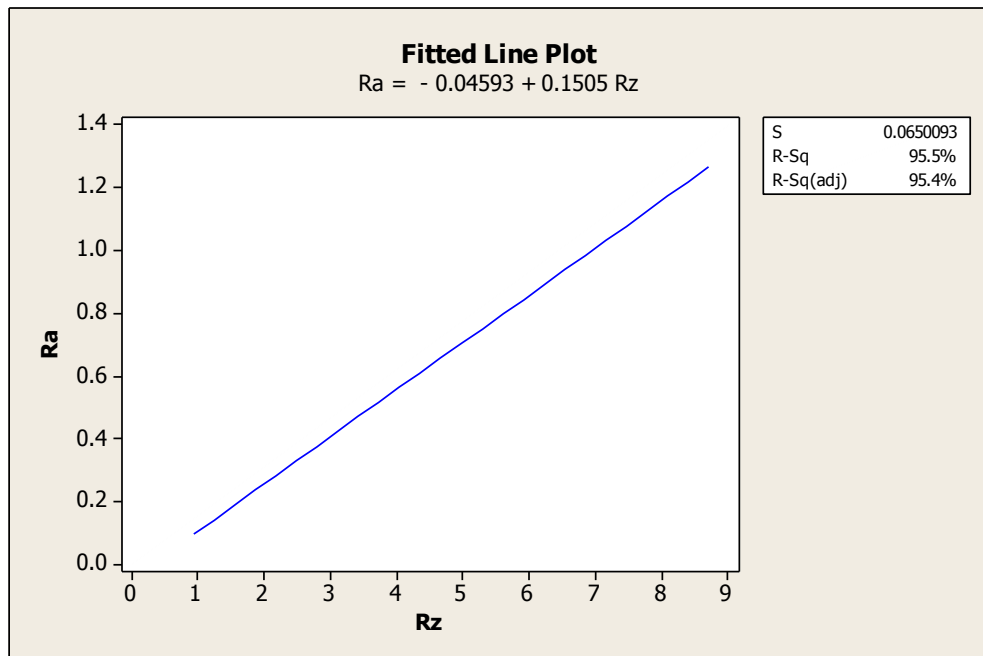
4.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการทดลอง

ในการวิเคราะห์ตัวแปรผลตอบของค่าความขรุขระผิวนั้นจำเป็นที่จะต้องวิเคราะห์ตัวแปรผลตอบของค่าความขรุขระผิวทั้ง 2 ค่า นั่นคือ R_a และ R_z แต่เนื่องจากตัวแปรผลตอบของความขรุขระผิวทั้ง 2 ค่าอาจจะมีความสัมพันธ์กันโดยดูได้จากค่า $R-Sq$ ถ้าค่า $R-Sq$ มีค่าที่สูงแสดงว่าตัวแปรผลตอบของค่าความขรุขระผิวนั้นมีความสัมพันธ์กัน ทำให้ไม่จำเป็นต้องทำการวิเคราะห์ค่าผลตอบของความขรุขระผิวทั้ง 2 ค่า และถ้าค่า $R-Sq$ มีค่าต่ำแสดงว่าตัวแปรผลตอบของค่าความขรุขระผิวนั้นไม่มีความสัมพันธ์กัน ทำให้ต้องต้องนำผลตอบทั้ง 2 ค่า มาทำการวิเคราะห์

The regression equation is

$$Ra = -0.0459 + 0.150 Rz$$

$$S = 0.0650093 \quad R\text{-Sq} = 95.5\% \quad R\text{-Sq}(\text{adj}) = 95.4\%$$



ภาพที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Ra กับ Rz

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Ra และ Rz โดยจะให้ค่า R-Sq (adj) เท่ากับ 95.4% ทำให้สามารถอธิบายได้ว่า Ra กับ Rz มีความสัมพันธ์กัน นั่นหมายถึง การที่ค่า Ra หรือ Rz เปลี่ยนแปลงไป ก็จะส่งผลให้ Rz หรือ Ra มีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วยเช่นกัน ดังนั้น จึง ทำให้ในการวิเคราะห์ตัวแปรผลตอบของค่าความขรุขระ ผิวจะทำการวิเคราะห์เพียงแค่ตัวใดตัวหนึ่ง เพราะมีตัวแปรผลตอบของค่าความขรุขระผิวมีความสัมพันธ์กัน

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองสำหรับเงื่อนไขการตัดแบบห้วงบอลโดยการใช้ลมเป่า

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	Spindle speed	Feed rate	Depth of cut	Tool diameter	Air blow pressure	Fx	Fy	Fz	Ra	Rz
38	1	2	1	2200	0.04	0.75	6	0.5	2.596985	0.642937	1.089867	0.1174	0.932
6	2	2	1	2200	0.03	1	6	0.5	2.224842	0.462266	0.801098	0.4469	3.5616
35	3	2	1	1800	0.03	0.75	8	0.7	2.26543	1.050769	1.147269	0.9431	6.1656
11	4	2	1	2200	0.02	0.75	8	0.7	2.196776	0.870604	1.00577	0.8506	4.7896
2	5	2	1	2600	0.02	0.75	8	5	1.947218	0.477709	0.872986	0.1958	1.4896
31	6	2	1	2200	0.03	0.5	8	0.7	2.295896	1.127345	1.253547	0.8384	5.5968
13	7	2	1	1800	0.03	0.5	8	0.5	2.310245	0.777964	1.12888	0.5493	4.2368
9	8	2	1	2200	0.02	0.75	8	0.3	2.163069	0.744351	0.862256	0.1703	1.632
23	9	2	1	2200	0.02	1	8	0.5	2.841985	1.108343	1.063444	0.465	3.4976
15	10	2	1	1800	0.03	1	8	0.5	2.472877	0.801641	1.065478	0.3178	3.0832
34	11	2	1	2600	0.03	0.75	8	0.3	3.145385	1.05318	1.240052	0.1825	2.1928
4	12	2	1	2600	0.04	0.75	8	0.5	3.896576	1.5796	1.655613	0.5547	4.376
18	13	2	1	2200	0.03	0.75	10	0.3	3.469416	1.90238	2.50963	0.8034	5.964
24	14	2	1	2200	0.04	1	8	0.5	3.532585	1.192625	1.393431	0.1243	0.9784
36	15	2	1	2600	0.03	0.75	8	0.7	2.117884	0.461129	1.167537	0.7095	4.7944
40	16	2	1	2200	0.04	0.75	10	0.5	4.352025	1.708344	2.304746	0.9022	6.9712
41	17	0	1	2200	0.03	0.75	8	0.5	2.030251	0.51869	0.914905	0.3482	2.3544

16	18	2	1	2600	0.03	1	8	0.5	3.719563	1.514998	1.391244	0.5361	3.8672
17	19	2	1	2200	0.03	0.75	6	0.3	2.9142	1.674895	2.228092	0.393	3.3112
14	20	2	1	2600	0.03	0.5	8	0.5	2.027866	0.38916	1.046756	0.3753	2.7304
12	21	2	1	2200	0.04	0.75	8	0.7	2.27462	0.814121	1.23535	0.6185	4.02
43	22	0	1	2200	0.03	0.75	8	0.5	2.15994	0.507233	0.945576	0.3118	2.4704
26	23	2	1	2600	0.03	0.75	6	0.5	1.855757	0.355978	0.743604	0.2464	2.8472
27	24	2	1	1800	0.03	0.75	10	0.5	3.847461	1.444578	1.983449	1.2746	8.7128
19	25	2	1	2200	0.03	0.75	6	0.7	2.0266	0.229096	0.934424	0.2072	1.0328
39	26	2	1	2200	0.02	0.75	10	0.5	2.567711	0.972347	1.31471	1.0135	7.9288
33	27	2	1	1800	0.03	0.75	8	0.3	3.397805	1.251733	1.406698	0.2553	2.1264
7	28	2	1	2200	0.03	0.5	10	0.5	2.915129	0.995263	1.578455	1.3002	8.4968
30	29	2	1	2200	0.03	1	8	0.3	3.435081	1.323588	1.355471	0.1946	1.708
20	30	2	1	2200	0.03	0.75	10	0.7	2.754801	0.985115	1.178671	0.8989	5.0064
29	31	2	1	2200	0.03	0.5	8	0.3	2.705058	0.843117	1.204194	0.3294	2.5272
28	32	2	1	2600	0.03	0.75	10	0.5	4.063118	1.651888	2.299439	1.2219	8.3856
22	33	2	1	2200	0.04	0.5	8	0.5	3.126992	1.030118	1.310581	0.5699	4.2336
42	34	0	1	2200	0.03	0.75	8	0.5	2.190116	0.555974	0.888951	0.359	2.5504
25	35	2	1	1800	0.03	0.75	6	0.5	1.989769	0.282754	0.695364	0.3422	2.7088
10	36	2	1	2200	0.04	0.75	8	0.3	4.104643	1.678986	1.791014	0.357	2.5808
37	37	2	1	2200	0.02	0.75	6	0.5	1.946013	0.227081	0.521819	0.3654	2.4056

21	38	2	1	2200	0.02	0.5	8	0.5	1.914962	0.518613	0.73011	0.4125	3.192
46	39	0	1	2200	0.03	0.75	8	0.5	2.801241	1.055213	1.187458	0.5316	3.9496
44	40	0	1	2200	0.03	0.75	8	0.5	3.2112	1.449413	1.726711	0.4875	3.3544
45	41	0	1	2200	0.03	0.75	8	0.5	2.599615	0.944492	1.088161	0.398	2.9352
8	42	2	1	2200	0.03	1	10	0.5	3.820604	1.502516	2.017082	0.5296	3.976
3	43	2	1	1800	0.04	0.75	8	0.5	2.986763	1.124742	1.325105	0.5441	3.6824
5	44	2	1	2200	0.03	0.5	6	0.5	1.439425	0.253217	0.704924	0.3354	2.7104
1	45	2	1	1800	0.02	0.75	8	0.5	2.425412	0.912639	0.94811	0.5443	3.8824
32	46	2	1	2200	0.03	1	8	0.7	2.034533	0.705338	1.066319	0.5355	3.644

4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

เมื่อได้ทำการเลือกปัจจัยต่างๆที่เหมาะสมกับการตัดแบบลมเป่าแล้วถึงได้ทำทดลองเพื่อเก็บข้อมูลต่างๆ ตามปัจจัยที่ได้กำหนด และนำข้อมูลมาทำการวิเคราะห์ โดยทำการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

1. การวิเคราะห์ผลตอบความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย Ra
2. การวิเคราะห์ผลตอบแรงในแนว X (Fx)

การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนที่นำเสนอขึ้นเป็นเพียงข้อมูลบางส่วนเท่านั้น โดยข้อมูลทั้งหมดจะอยู่ในภาคผนวก ข.

4.3.1 การวิเคราะห์ผลตอบความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย Ra

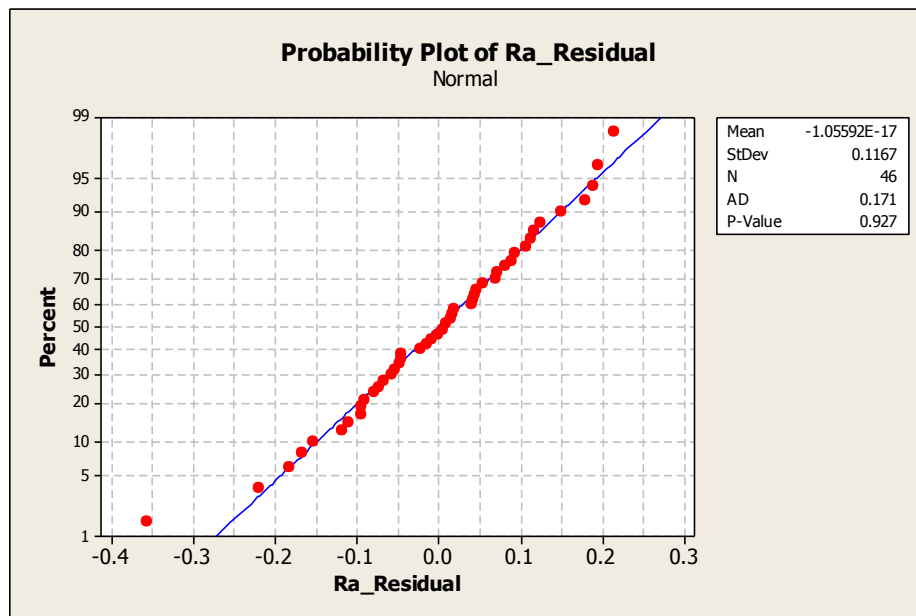
โดยในการทำการวิเคราะห์ความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ยในผลการทดลองนั้น จะทำการวิเคราะห์ด้วย ANOVA โดยจะทำการวิเคราะห์ค่าความเหมาะสมของข้อมูลก่อน แล้วค่อยทำการวิเคราะห์ด้วย ANOVA ซึ่งจะสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กรณี คือ

- 1) การทดสอบการกระจายแบบปกติ
- 2) การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล
- 3) การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความขรุขระผิวเฉลี่ย

4.3.1.1 การทดสอบการกระจายแบบปกติ

การทดสอบการกระจายแบบปกตินั้นเป็นการตรวจสอบเพื่อดูว่าข้อมูลที่ได้มานั้นเป็นการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) โดยนำมาสร้าง Normal Probability Plot ซึ่งจะกำหนดให้ค่าส่วนตกค้าง (Residual) อยู่ในแนวแกนนอน ซึ่งจะถูกเรียงลำดับจากค่าน้อยไปค่ามาก กับให้แกนตั้งค่าความน่าจะเป็นสะสม $P_k = (k-1/2)/n$ จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับค่าความน่าจะเป็นสะสม พบว่ามีแนวโน้มเป็นเส้นตรง จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ ดังที่แสดงในภาพที่ 4.3

จากภาพที่ 4.3 กราฟที่ได้จากการพล็อตข้อมูล ความขรุขระผิวเฉลี่ย โดยให้ค่า P-Value ที่มากกว่า 0.05 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แสดงได้ว่า ข้อมูลที่ทดลอง มีการกระจายแบบปกติ และเป็นข้อมูลที่เชื่อถือได้ โดยมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง

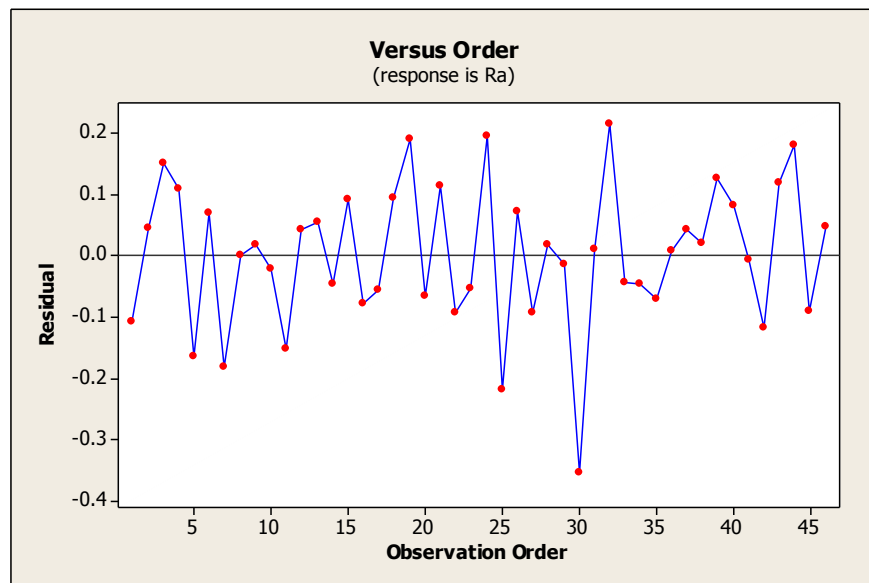


ภาพที่ 4.3 Normal Probability Plot ของข้อมูลความขรุขระผิวเฉลี่ย

4.3.1.2 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลนั้นเป็นการตรวจสอบเพื่อดูว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระซึ่งกันและกัน โดยการสร้าง กราฟ Residual โดยให้ค่าส่วนตกค้าง (Residual) เป็นแกนตั้ง และให้ค่าลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล (Observation Order) เป็นแกนนอน โดยการทดสอบนี้ไม่พบว่าค่าส่วนตกค้างมีทิศทางในการเพิ่มหรือลด และไม่มีการเปลี่ยนแปลงในรูปแบบของวัฏจักร ซึ่งจะสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระเพียงพอ พร้อมทั้งจะทำการวิเคราะห์ในลำดับถัดไป โดยจะแสดง กราฟของ Residual ไว้ในรูปกราฟที่ 4.4

จากภาพที่ 4.4 กราฟของ Residual ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงการ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอนหรือมีการกระจัดกระจาย ของข้อมูล โดยจะแปลความหมายของข้อมูลได้ว่า ข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน

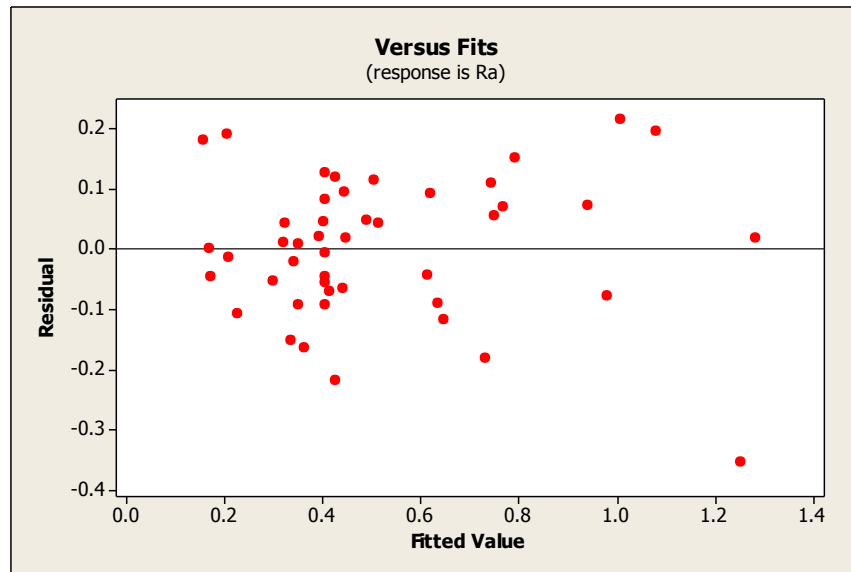


ภาพที่ 4.4 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลความขรุขระผิวเฉลี่ย

4.3.1.3 การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความขรุขระผิวเฉลี่ย

การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความขรุขระผิวเฉลี่ยนั้นเป็นการตรวจสอบเพื่อดูว่าข้อมูลมีความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของข้อมูล ซึ่งในการทดลองครั้งนี้จะทำการสร้างกราฟทำนายความขรุขระผิวเฉลี่ย (Response is Ra) โดยการให้ค่าส่วนตกค้าง (Residual) เป็นแกนในแนวนอน และให้ค่าที่ถูกฟิต (Fitted Value) เป็นแกนในแนวตั้ง เพื่อทดสอบความเป็นอิสระของความเรียบผิวเฉลี่ย ดังแสดงในภาพที่ 4.5 โดยในการทดลองนี้จะทำการพิจารณาค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับค่าที่ถูกฟิต (Fitted Value) โดยไม่พบว่าค่าส่วนตกค้างมีรูปแบบไปในทิศทางใดทิศทางใดทิศทางหนึ่งหรือเป็นรูปแบบใดรูปแบบหนึ่ง และไม่พบความสัมพันธ์กับเวลาที่ถูกทำนาย แต่พบว่าการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลนี้มีความแปรปรวนคงตัวสามารถนำไปทำการวิเคราะห์ต่อไปได้

จากภาพที่ 4.5 กราฟ (Response is Ra) จะแสดงให้เห็นถึงข้อมูลที่มีความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของข้อมูล โดยไม่ได้มีลักษณะที่แสดงว่ามีทิศทางไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง และไม่มีรูปแบบรูปแบบหนึ่งแสดงให้เห็น



ภาพที่ 4.5 กราฟทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความขรุขระผิวเฉลี่ย

4.3.1.4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลของความขรุขระผิวเฉลี่ย Ra

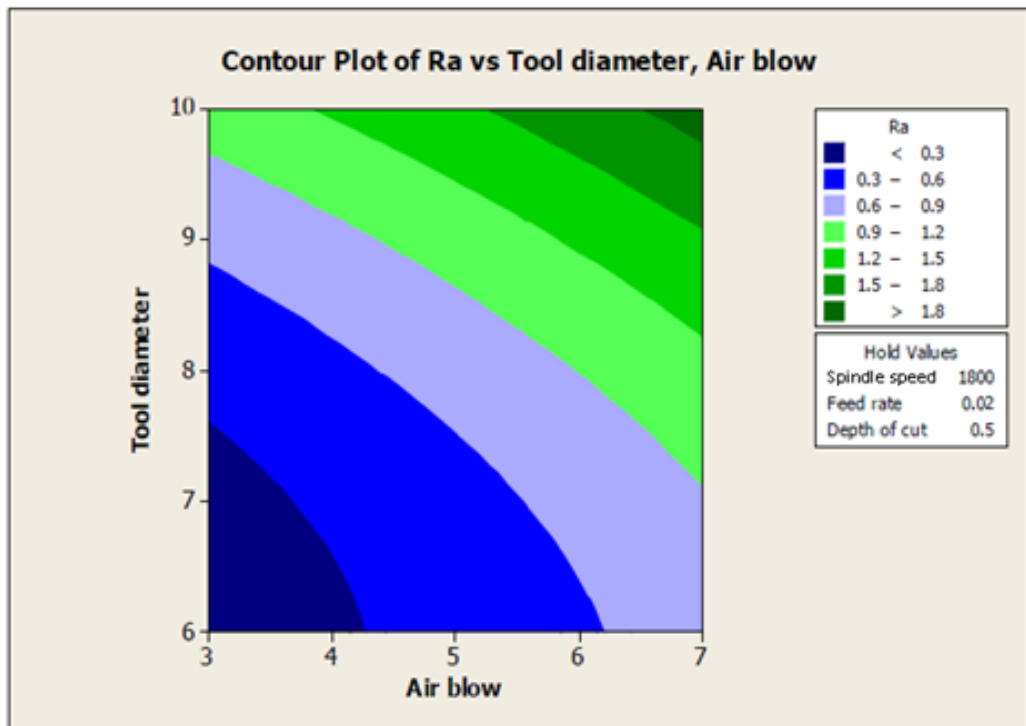
ในการวิเคราะห์ข้อมูล ของความขรุขระผิวเฉลี่ย Ra ในที่นี่จะทำการใช้โปรแกรม Minitab ในการวิเคราะห์ความแปรปรวน แล้วนำมาพิจารณาค่าประมาณสัมประสิทธิ์การถดถอย ของความขรุขระผิวเฉลี่ย ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม Minitab จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์ ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของความขรุขระผิวเฉลี่ย

Analysis of Variance for Ra						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	17	3.48630	3.48630	0.205076	9.36	0.000
Linear	5	2.60606	2.60606	0.521213	23.80	0.000
Square	3	0.47114	0.47114	0.157046	7.17	0.001
Interaction	9	0.40910	0.40910	0.045455	2.08	0.068
Residual Error	28	0.61329	0.61329	0.021903		
Lack-of-Fit	23	0.57639	0.57639	0.025060	3.40	0.089
Pure Error	5	0.03691	0.03691	0.007381		
Total	45	4.09959				

S = 0.147997 PRESS = 1.97576
 R-Sq = 85.04% R-Sq(adj) = 75.96%

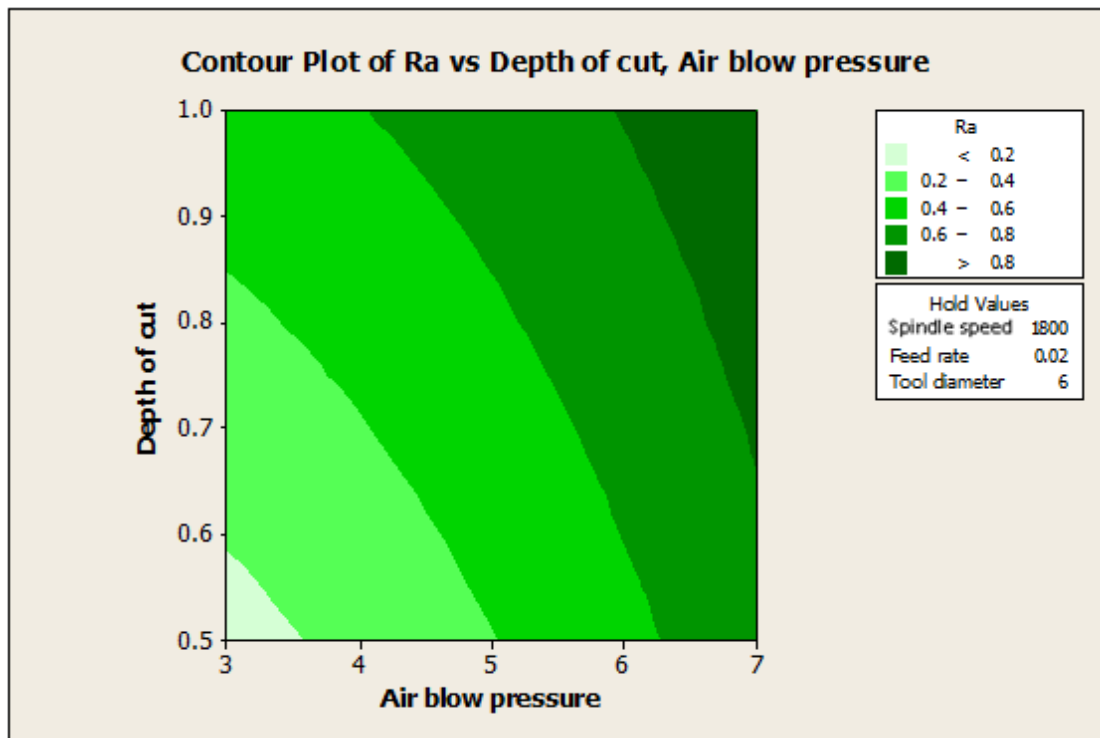
จากการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนตามตารางที่ 4.5 ซึ่งจะให้ค่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R-Sq = 85.05% โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Sq) เป็นค่าที่ใช้ในการอธิบายค่าความสามารถของตัวแปรอิสระในสมการถดถอยว่าสามารถที่จะเปลี่ยนแปลงค่าของผลตอบหรือตัวแปรตามได้ รวมทั้งยังสามารถอธิบายความสามารถของสมการถดถอยได้ โดยที่ค่า P-value ที่ได้นั้นจะต้องน้อยกว่า 0.05 นั่นคือได้ค่าที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 % และค่าการขาดความเหมาะสมของสมการ (Lack of fit) ที่จะต้องมีค่า P-value ที่มากกว่า 0.05 ซึ่งหมายถึงสมการมีความเหมาะสม จึงทำให้ได้ค่าสมการการถดถอย (Regression model) ที่ได้มีความเหมาะสมในการพิจารณาผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของความขรุขระผิวเฉลี่ยในงานวิจัยครั้งนี้



ภาพที่ 4.6 กราฟคอนทัวร์แสดงระดับของความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra) กับเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด (D) และความดันลมเป่า (A)

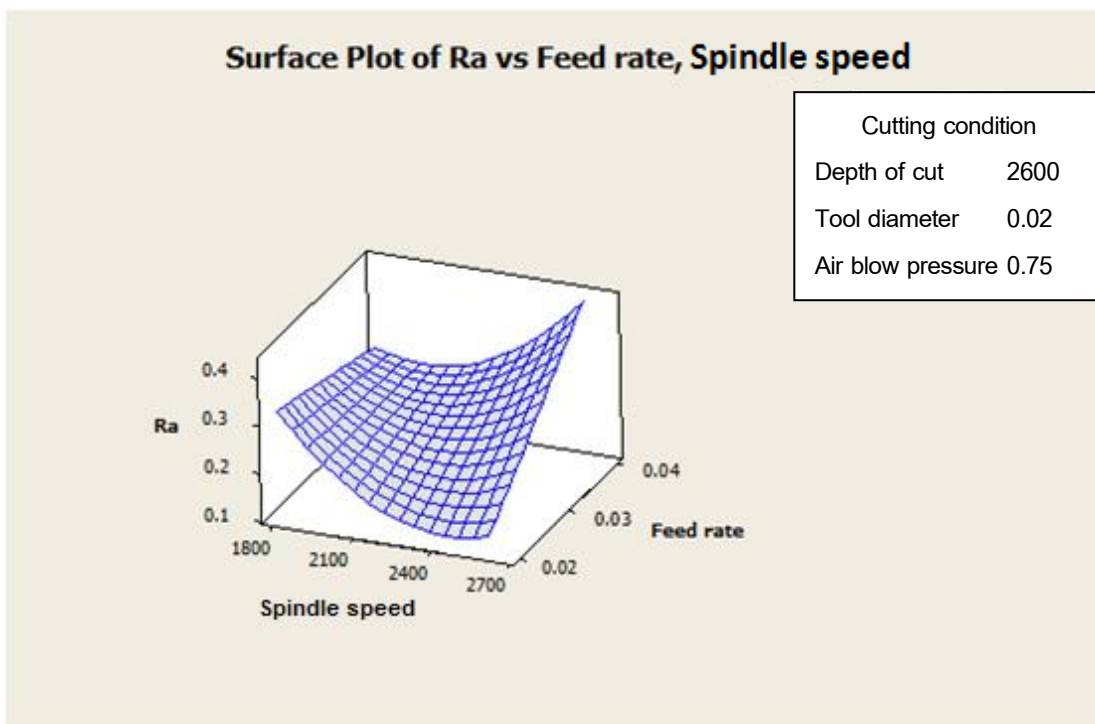
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัดที่เพิ่มมากขึ้น จะแปรผันตรงกับความขรุขระผิวชิ้นงานที่เพิ่มมากขึ้น นั่นหมายความว่า เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัดที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัดที่เพิ่มมากขึ้นนั้นจะส่งผลต่อพื้นที่ในการตัดที่เพิ่มมากขึ้น จากการศึกษาพื้นที่ในกาตัดที่เพิ่มมากขึ้นนั้นยังจะส่งผลต่อไปยังแรงในการตัดที่เพิ่มมากขึ้นด้วย เนื่องจากพื้นที่ในการตัดที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้การตัดนั้นจะต้องกินเนื้อของชิ้นงานในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งผลที่ได้คือ แรงในการตัดนั้นจะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย โดยแรงในการตัดที่เพิ่มมากขึ้นนั้น จะส่งผลกระทบต่อถึงความขรุขระของผิวชิ้นงานที่เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากความขรุขระของผิวชิ้นงานนั้นจะเพิ่มมากขึ้นตามแรงในการตัดที่เพิ่มมากขึ้น

ในเรื่องความดันลมเป่านั้น ความดันลมเป่าที่เพิ่มมากขึ้น จะแปรผันโดยตรงต่อความขรุขระของผิวชิ้นงาน นั่นหมายความว่า เมื่อความดันลมเป่าที่เพิ่มมากขึ้น ความขรุขระของผิวชิ้นงานนั้นก็จะต้องเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย โดยที่ความดันลมเป่านี้มีหน้าที่เพื่อทำการเอาเศษโลหะที่เกิดจากการตัดออก และทำการลดอุณหภูมิที่พื้นที่ที่เกิดการตัด ซึ่งจะช่วยให้อุณหภูมิในส่วน of พื้นที่ในการตัดนั้นมีอุณหภูมิลดลง และเมื่ออุณหภูมิลดลงจนเกิดจุดที่เกิดความเหมาะสมในการตัดนั้น ย่อมจะส่งผลให้แรงที่ใช้ในการตัดนั้นจะต้องเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิในการตัดที่ลดลงจนเกิดจุดเหมาะสมในการตัดนั้นจะทำให้ความอ่อนนุ่มของวัสดุที่ใช้เป็นชิ้นงานในการตัดนั้นลดลง จึงทำให้ในการตัดนั้นจำเป็นต้องใช้แรงในการตัดที่เพิ่มมากขึ้น และเมื่อแรงที่ใช้ในการตัดนั้นเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้ค่าความขรุขระของผิวชิ้นงานในการตัดนั้นเพิ่มมากขึ้นตามแรงที่ใช้ในการตัด



ภาพที่ 4.7 กราฟคอนทัวร์แสดงระดับของความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra) กับความลึกตัด (d) และความดันลมเป่า (A)

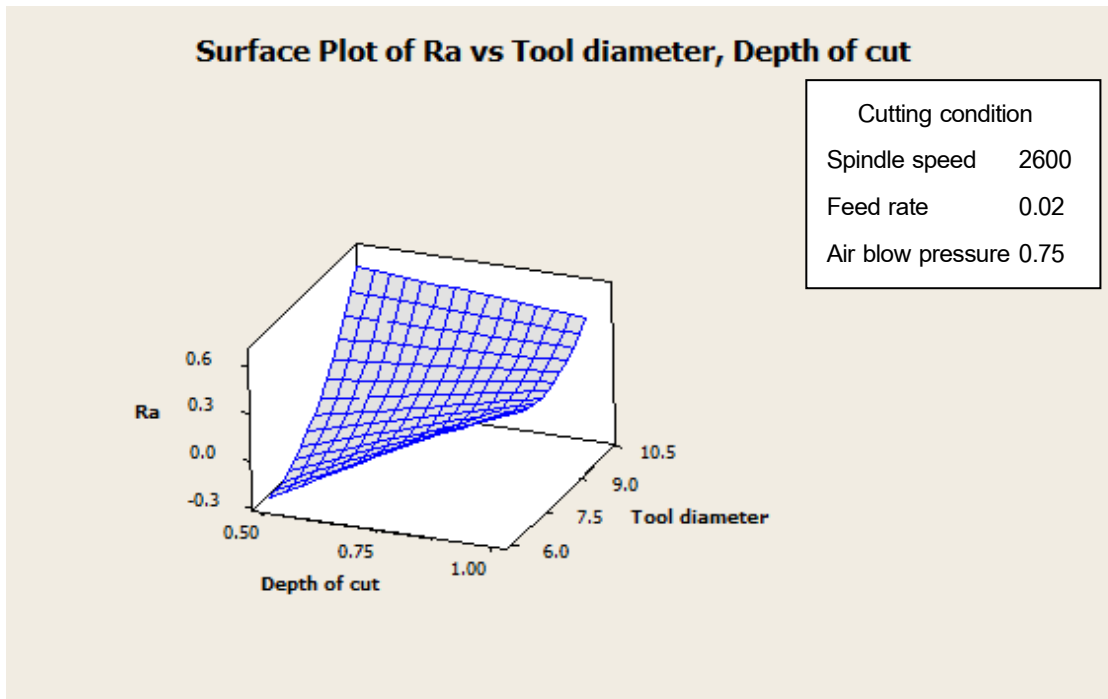
ความลึกตัดที่เพิ่มมากขึ้น จะแปรผันตรงกับความขรุขระผิวชิ้นงานที่เพิ่มมากขึ้น นั้นหมายความว่า เมื่อความลึกตัดเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากความลึกตัดที่เพิ่มมากขึ้นนั้นจะส่งผลต่อพื้นที่ในการตัดที่เพิ่มมากขึ้น จากการศึกษาพื้นที่ในการตัดที่เพิ่มมากขึ้นนั้นยังจะส่งผลต่อไปยังแรงในการตัดที่จะเพิ่มมากขึ้นด้วย เนื่องจากพื้นที่ในการตัดที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้การตัดนั้นจะต้องกินเนื้อของชิ้นงานในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งผลที่ได้คือ แรงในการตัดนั้นจะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย โดยแรงในการตัดที่เพิ่มมากขึ้นนั้น จะส่งผลต่อไปถึงความขรุขระของผิวชิ้นงานที่เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากความขรุขระของผิวชิ้นงานนั้นจะเพิ่มมากขึ้นตามแรงในการตัดที่เพิ่มมากขึ้น



ภาพที่ 4.8 กราฟเซอร์เฟสแสดงระดับของความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra) กับความเร็วรอบตัด (N) และ อัตราป้อนตัด (F)

ความเร็วรอบตัดที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลต่อความขรุขระผิวชิ้นงานที่ลดลง เนื่องจากความเร็วรอบตัดที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลต่อพื้นที่ในการตัดที่น้อยลงทำให้มีดกัดกินเนื้อชิ้นงานน้อย ส่งผลให้แรงในการตัดนั้นมีค่าที่น้อยลง เมื่อแรงในการตัดน้อยลงจึงทำให้ความขรุขระผิวชิ้นงานในการตัดน้อยลงตามแรงในการตัด

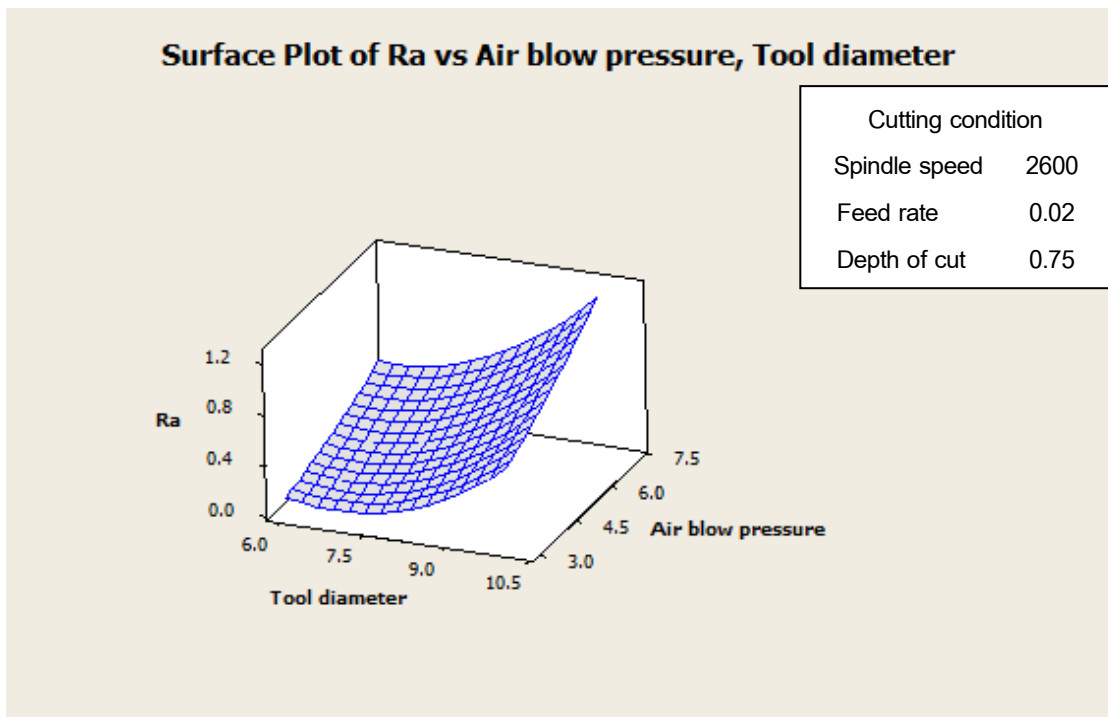
อัตราป้อนตัดที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลต่อความขรุขระผิวชิ้นงานที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราป้อนตัดที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลต่อพื้นที่ในการตัดที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้มีดกัดกินเนื้อชิ้นงานมากขึ้น ส่งผลต่อแรงในการตัดที่มีค่ามากขึ้น เมื่อแรงในการตัดเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้ความขรุขระผิวของชิ้นงานในการตัดมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามแรงในการตัด



ภาพที่ 4.9 กราฟเซอร์เฟสแสดงระดับของความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra) กับความลึกตัด (d) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด (D)

ความลึกตัดที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลต่อความขรุขระผิวชิ้นงานที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากความลึกตัดที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลต่อพื้นที่ในการตัดที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้มีดตัดกินเนื้อชิ้นงานมากขึ้น ส่งผลต่อแรงในการตัดที่มีค่ามากขึ้น เมื่อแรงในการตัดเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้ความขรุขระผิวของชิ้นงานในการตัดมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามแรงในการตัด

เส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัดที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลต่อความขรุขระผิวชิ้นงานที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัดที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลต่อพื้นที่ในการตัดที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้มีดตัดกินเนื้อชิ้นงานมากขึ้น ส่งผลต่อแรงในการตัดที่มีค่ามากขึ้น เมื่อแรงในการตัดเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้ความขรุขระผิวของชิ้นงานในการตัดมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามแรงในการตัด



ภาพที่ 4.10 กราฟเซอร์เฟสแสดงระดับของความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra) กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด (D) และความดันลมเป่า (A)

ความดันลมเป่าที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลต่อความขรุขระผิวชิ้นงานที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากความดันลมเป่าที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลต่ออุณหภูมิในการตัดที่ลดลง โดยอุณหภูมิที่มากขึ้นจะทำให้ชิ้นงานเกิดความอ่อนนุ่มสามารถตัดได้ง่าย จึงทำให้ความขรุขระผิวของชิ้นงานในการตัดมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามแรงในการตัด

4.3.2 การวิเคราะห์ผลตอบแรงในแนว X (Fx)

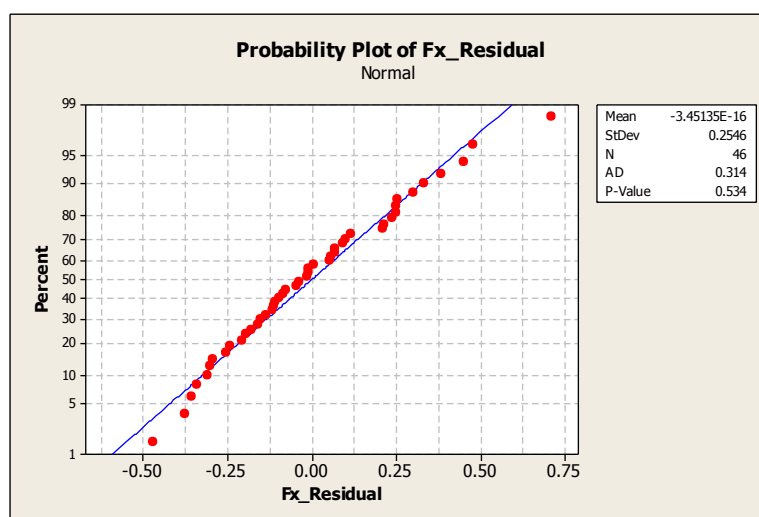
โดยในการทำการวิเคราะห์แรงในแนว X (Fx) ในผลการทดลองนั้น จะทำการวิเคราะห์ด้วย ANOVA โดยจะทำการวิเคราะห์ค่าความเหมาะสมของข้อมูลก่อน แล้วค่อยทำการวิเคราะห์ด้วย ANOVA ซึ่งจะสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กรณี คือ

- 1) การทดสอบการกระจายแบบปกติ
- 2) การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล
- 3) การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของแรงในแนว X (Fx)

4.3.2.1 การทดสอบการกระจายแบบปกติ

การทดสอบการกระจายแบบปกตินั้นเป็นการตรวจสอบเพื่อดูว่าข้อมูลที่ได้มานั้นเป็นการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) โดยนำมาสร้าง Normal Probability Plot ซึ่งจะกำหนดให้ค่าส่วนตกค้าง (Residual) อยู่ในแนวแกนนอน ซึ่งจะถูกเรียงลำดับจากค่าน้อยไปค่ามาก กับให้แกนตั้งค่าความน่าจะเป็นสะสม $P_k = (k-1/2)/n$ จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับค่าความน่าจะเป็นสะสม พบว่ามีแนวโน้มเป็นเส้นตรง จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ ดังที่แสดงในภาพที่ 4.11

จากภาพที่ 4.11 กราฟที่ได้จากการพล็อตข้อมูล ความขรุขระผิวเฉลี่ย โดยให้ค่า P-Value ที่มากกว่า 0.05 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แสดงได้ว่า ข้อมูลที่ทดลอง มีการกระจายแบบปกติ และเป็นข้อมูลที่เชื่อถือได้ โดยมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง

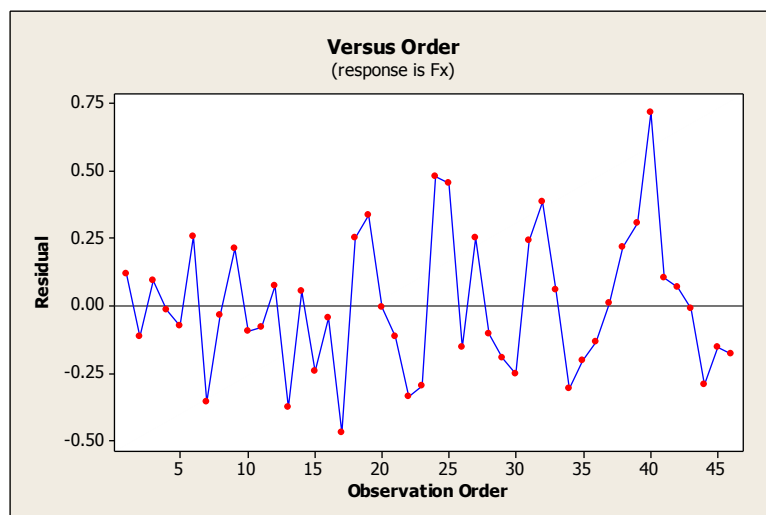


ภาพที่ 4.11 Normal Probability Plot ของข้อมูลแรงตัดในแนว X

4.3.2.2 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลนั้นเป็นการตรวจสอบเพื่อดูว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระซึ่งกันและกัน โดยการสร้าง กราฟ Residual โดยให้ค่าส่วนตกค้าง (Residual) เป็นแกนตั้ง และให้ค่าลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล (Observation Order) เป็นแกนนอน โดยการทดสอบนี้ไม่พบว่าค่าส่วนตกค้างมีทิศทางในการเพิ่มหรือลด และไม่มีการเปลี่ยนแปลงในรูปแบบของวัฏจักร ซึ่งจะสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระเพียงพอ พร้อมทั้งจะทำการวิเคราะห์ในลำดับถัดไป โดยจะแสดง กราฟของ Residual ไว้ในรูปกราฟที่ 4.12

จากภาพที่ 4.12 กราฟของ Residual ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงการ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอนหรือมีการกระจายตัวของข้อมูล โดยจะแปลความหมายของข้อมูลได้ว่า ข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน

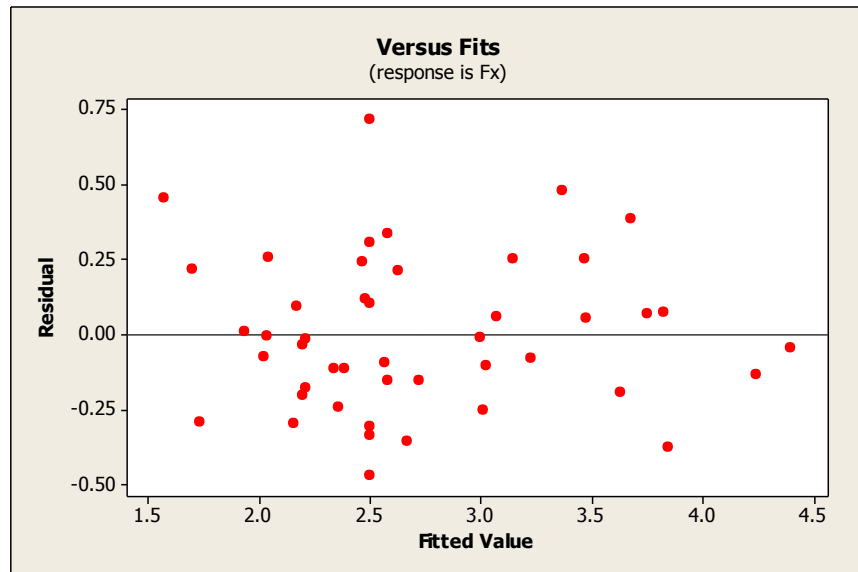


ภาพที่ 4.12 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลแรงตัดในแนว X

4.3.2.3 การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของของแรงในแนว X (Fx)

การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยนั้นเป็นการตรวจสอบเพื่อดูว่าข้อมูลมีความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของข้อมูล ซึ่งในการทดลองครั้งนี้จะทำการสร้างกราฟทำนายแรงในแนว X (Fx) (Response is Fx) โดยการให้ค่าส่วนตกค้าง (Residual) เป็นแกนในแนวตั้ง และให้ค่าที่ถูกฟิต (Fitted Value) เป็นแกนในแนวนอน เพื่อทดสอบความเป็นอิสระของ แรงในแนว X (Fx) ดังแสดงในภาพที่ 4.13 โดยในการทดลองนี้จะทำการพิจารณาค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับค่าที่ถูกฟิต (Fitted Value) โดยไม่พบว่าค่าส่วนตกค้างมีรูปแบบไปในทิศทางใดทิศทางใดทิศทางหนึ่งหรือเป็นรูปแบบใดรูปแบบหนึ่ง และไม่พบความสัมพันธ์กับเวลาที่ถูกทำนาย แต่ทว่ามีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลนี้มีความแปรปรวนคงตัวสามารถนำไปทำการวิเคราะห์ต่อไปได้

จากภาพที่ 4.13 กราฟทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของแรงตัดในแนว X จะแสดงให้เห็นถึง ข้อมูลที่มีความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของข้อมูล โดยไม่ได้มีลักษณะที่แสดงว่ามีทิศทางไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง และไม่มีรูปแบบรูปแบบหนึ่งแสดงให้เห็น



ภาพที่ 4.13 กราฟทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของแรงตัดในแนว X

4.3.2.4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลของแรงในแนว X (Fx)

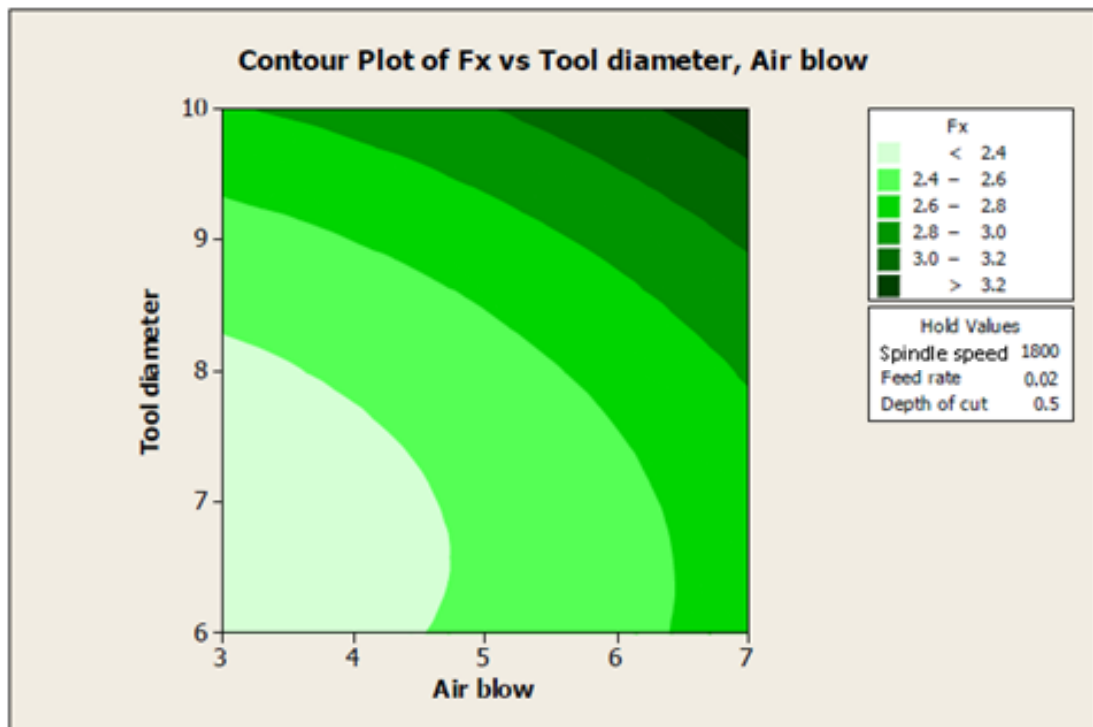
ในการวิเคราะห์ข้อมูล ของแรงในแนว X (Fx) ในที่นี่จะทำการใช้โปรแกรม Minitab ในการวิเคราะห์ความแปรปรวน แล้วนำมาพิจารณาค่าประมาณสัมประสิทธิ์การถดถอยของความขรุขระผิวเฉลี่ย ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม Minitab จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์ ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแรงในแนว X (Fx)

Analysis of Variance for Fx						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	17	20.6797	20.6797	1.21645	11.62	0.000
Linear	5	17.4529	17.4529	3.49057	33.35	0.000
Square	5	0.6270	0.6270	0.12539	1.20	0.336
Interaction	7	2.5999	2.5999	0.37141	3.55	0.007
Residual Error	28	2.9307	2.9307	0.10467		
Lack-of-Fit	23	1.8919	1.8919	0.08226	0.40	0.942
Pure Error	5	1.0388	1.0388	0.20776		
Total	45	23.6104				

S = 0.323526 PRESS = 7.31074
 R-Sq = 87.59% R-Sq(adj) = 80.05%

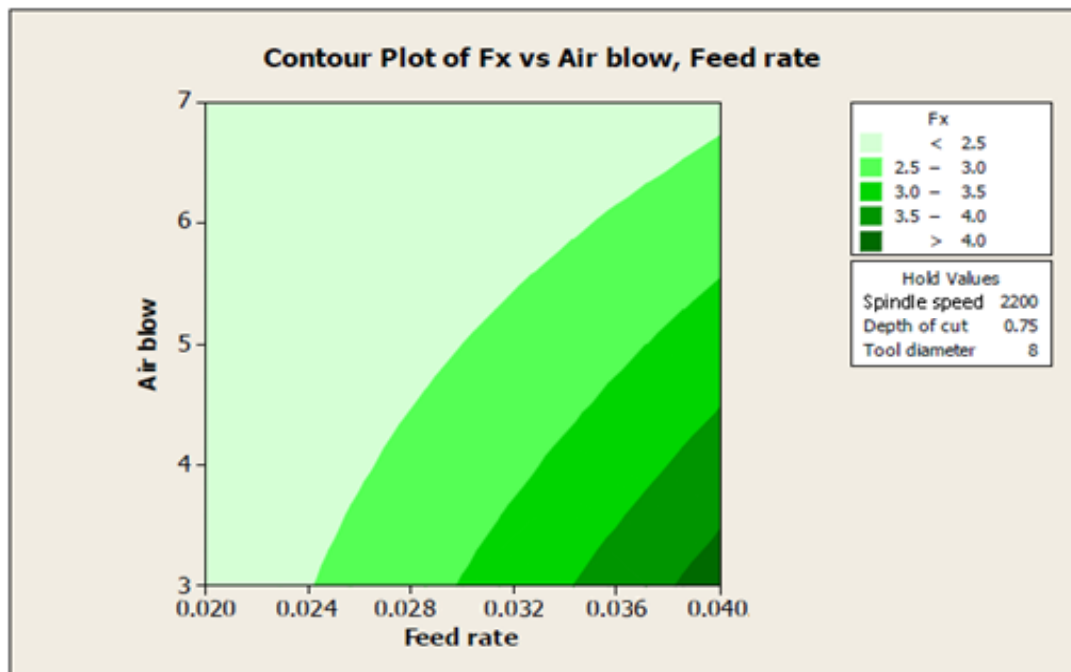
จากการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนตามตารางที่ 4.5 ซึ่งจะให้ค่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R-Sq = 87.65% โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Sq) เป็นค่าที่ใช้ในการอธิบายค่าความสามารถของตัวแปรอิสระในสมการถดถอยว่าสามารถที่จะเปลี่ยนแปลงค่าของผลตอบหรือตัวแปรตามได้ รวมทั้งยังสามารถอธิบายความสามารถของสมการถดถอยได้ โดยที่ค่า P-value ที่ได้นั้นจะค้อง น้อยกว่า 0.05 นั่นคือได้ค่าที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 % และค่าการขาดความเหมาะสมของสมการ (Lack of fit) ที่จะต้องมีค่า P-value ที่มากกว่า 0.05 ซึ่งหมายถึงสมการมีความเหมาะสม จึงทำให้ได้ค่าสมการการถดถอย (Regression model) ที่ได้มีความเหมาะสมในการพิจารณาผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของความขรุขระผิวเฉลี่ยในงานวิจัยครั้งนี้



ภาพที่ 4.14 กราฟคอนทัวร์แสดงระดับของแรงในแนว X (Fx) กับเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด (D) และความดันลมเป่า (A)

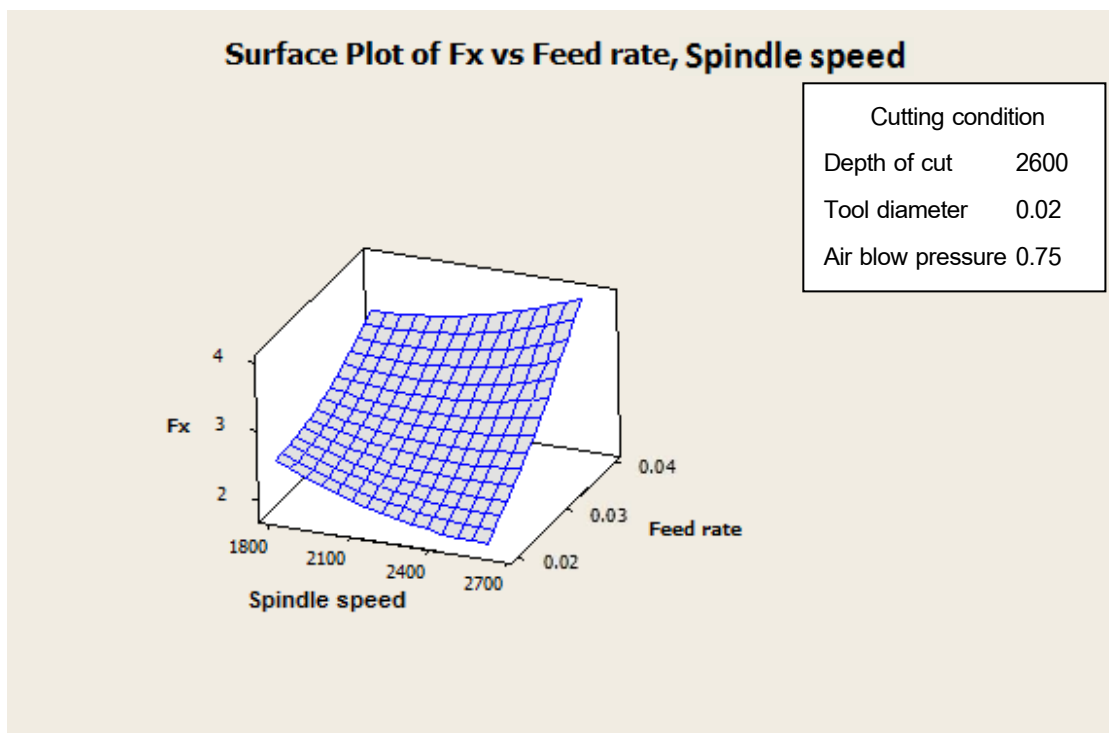
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัดที่เพิ่มมากขึ้น จะแปรผันตรงกับแรงที่ใช้ในการตัดชิ้นงานที่เพิ่มมากขึ้น นั้นหมายความว่า เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัดที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้แรงที่ใช้ในการตัดชิ้นงานมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัดที่เพิ่มมากขึ้นนั้นจะส่งผลต่อพื้นที่ในการตัดที่เพิ่มมากขึ้น จากพื้นที่ที่เพิ่มมากขึ้นนั้นยังจะส่งผลต่อไปยังแรงในการตัดที่จะเพิ่มมากขึ้นด้วย เนื่องจากพื้นที่ในการตัดที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้การตัดนั้นจะต้องกินเนื้อของชิ้นงานในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งผลที่ได้คือ แรงในการตัดนั้นจะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

ในเรื่องความดันลมเป่านั้น ความดันลมเป่าที่เพิ่มมากขึ้น จะแปรผันโดยตรงต่อความขรุขระของผิวชิ้นงาน นั้นหมายความว่า เมื่อความดันลมเป่าที่เพิ่มมากขึ้น แรงในการตัดนั้นก็จะต้องเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย โดยที่ความดันลมเป่านี้มีหน้าที่เพื่อทำการเอาเศษโลหะที่เกิดจากการตัดออก และทำการลดอุณหภูมิที่พื้นที่ที่เกิดการตัด ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิในส่วนของพื้นที่ในการตัดนั้นมีอุณหภูมิลดลง และเมื่ออุณหภูมิลดลงจนเกินจุดที่เกิดความเหมาะสมในการตัดนั้นย่อมจะส่งผลให้แรงที่ใช้ในการตัดนั้นจะต้องเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิในการตัดที่ลดลงจนเกิดจุดเหมาะสมในการตัดนั้นจะทำให้ความอ่อนนุ่มของวัสดุที่ใช้เป็นชิ้นงานในการตัดนั้นลดลง จึงทำให้ในการตัดนั้นจำเป็นต้องใช้แรงในการตัดที่เพิ่มมากขึ้น



ภาพที่ 4.15 กราฟคอนทัวร์แสดงระดับของแรงในแนว X (F_x) กับอัตราป้อนตัด (F) และความดันลมเป่า (A)

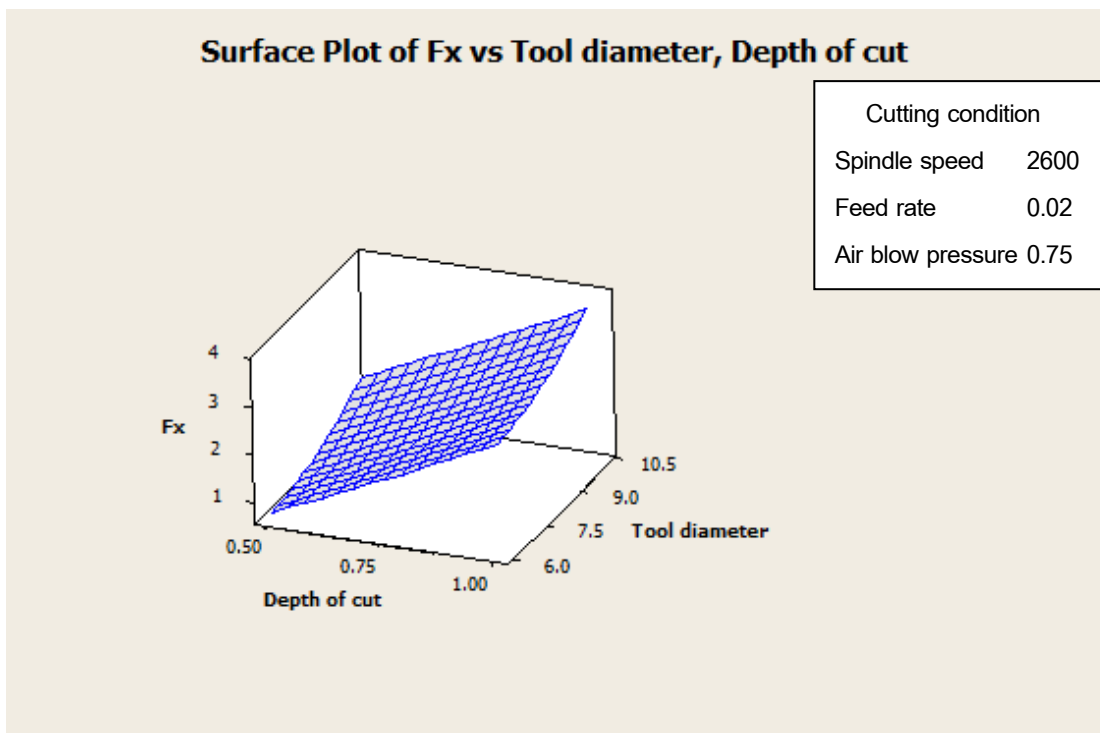
อัตราป้อนตัดที่เพิ่มมากขึ้น จะแปรผันตรงกับแรงที่ใช้ในการตัดชิ้นงานที่เพิ่มมากขึ้น นั้นหมายความว่า เมื่ออัตราป้อนตัดที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้แรงที่ใช้ในการตัดชิ้นงานมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากอัตราป้อนตัดที่เพิ่มมากขึ้นนั้นจะส่งผลต่อพื้นที่ในการตัดที่เพิ่มมากขึ้น จากการที่พื้นที่ในการตัดที่เพิ่มมากขึ้นนั้นยังจะส่งผลต่อไปยังแรงในการตัดที่จะเพิ่มมากขึ้นด้วย เนื่องจากพื้นที่ในการตัดที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้การตัดนั้นจะต้องกินเนื้อของชิ้นงานในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งผลที่ได้คือ แรงในการตัดนั้นจะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย



ภาพที่ 4.16 กราฟเซอร์เฟส แสดงระดับของ แรงตัดในแนวแกน X (F_x) กับความเร็วรอบตัด (N) และอัตราป้อนตัด (F)

ความเร็วรอบตัดที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลต่อความขรุขระผิวชิ้นงานที่ลดลง เนื่องจากความเร็วรอบตัดที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลต่อพื้นที่ในการตัดที่น้อยลงทำให้มีดกัดกินเนื้อชิ้นงานน้อย ส่งผลให้แรงในการตัดนั้นมีค่าที่น้อยลง

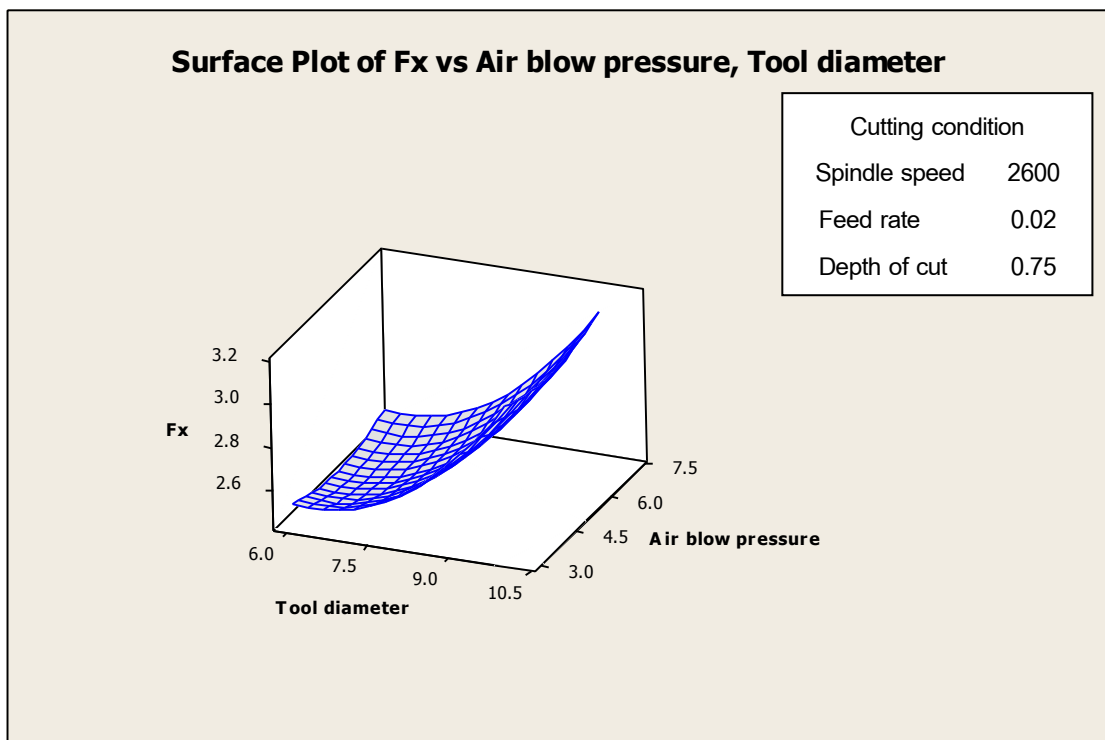
อัตราป้อนตัดที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลต่อความขรุขระผิวชิ้นงานที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราป้อนตัดที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลต่อพื้นที่ในการตัดที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้มีดกัดกินเนื้อชิ้นงานมากขึ้น ส่งผลต่อแรงในการตัดที่มีค่ามากขึ้น



ภาพที่ 4.17 กราฟเซอร์เฟสแสดงระดับของแรงตัดในแนวแกน X (F_x) กับความลึกตัด (d) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด (D)

ความลึกตัดที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลต่อความขรุขระผิวชิ้นงานที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากความลึกตัดที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลต่อพื้นที่ในการตัดที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้มีตัดกินเนื้อชิ้นงานมากขึ้น ส่งผลต่อแรงในการตัดที่มีค่ามากขึ้น

เส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัดที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลต่อความขรุขระผิวชิ้นงานที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัดที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลต่อพื้นที่ในการตัดที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้มีตัดกินเนื้อชิ้นงานมากขึ้น ส่งผลต่อแรงในการตัดที่มีค่ามาก



ภาพที่ 4.18 กราฟเซอร์เฟสแสดงระดับของแรงตัดในแนวแกน X (F_x) กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด (D) และความดันลมเป่า (A)

ความดันลมเป่าไม่ส่งผลต่อแรงในการตัด เนื่องจากอะลูมิเนียมเป็นวัสดุที่อ่อนนุ่มเนื่องจึงทำให้การใช้ความดันลมเป่าเข้ามาลดอุณหภูมินั้นไม่ส่งผลต่อแรงในการตัด แต่ ความดันลมเป่านั้นจะมีผลต่อความขรุขระผิวชิ้นงาน เนื่องจากอะลูมิเนียมเป็นวัสดุที่มีความอ่อนนุ่มจึงทำให้การตัดนั้นจำเป็นต้องลดอุณหภูมิลงเพื่อให้อะลูมิเนียมไม่หลอมละลายติดคมตัด จึงส่งผลต่อความขรุขระผิวชิ้นงานเนื่องจากชิ้นงานที่มีความอ่อนนุ่มลดลงจะตัดได้ยากขึ้นจึงทำให้ความขรุขระผิวชิ้นงานมากขึ้น

4.4 สรุปผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน

เนื่องจากต้นแบบสมการที่ได้จากการวิเคราะห์ทางสถิติยังมีปัจจัยที่ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อผลตอบที่ทำการศึกษา จึงต้องทำการลดรูปของสมการหรือทำการตัดปัจจัยที่ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญออก เพื่อให้สมการที่ได้นั้นมีความสมบูรณ์มากขึ้น ซึ่งผลตอบของสมการลดรูปเปรียบเทียบกับสมการเต็มรูปของเงื่อนไขการตัดแบบใช้ลมเป่า ซึ่งเงื่อนไขการตัดแบบใช้ลมเป่าที่เลือกใช้คือ ความเร็วรอบตัด (N) 2,200 รอบต่อนาที, อัตราการป้อนตัด (F) 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ

, ความลึกตัด (d) 0.75 มิลลิเมตร, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด (D) 8 มิลลิเมตร, ความดันลมเป่า (A) 0.3 เมกกะปาร์สคาล (3บาร์) ดังที่แสดงในตาราง 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลตอบของสมการเต็มรูปแบบเปรียบเทียบกับสมการลดรูปของการตัดแบบใช้ลมเป่า

		Predicted	Actual	%Error	R-sq	R-sq(adj)
Ra	Full Model	0.1696	0.1703	0.4206	85.05%	73.10%
	Reduced Model	0.1718	0.1703	-0.8732	85.04%	75.96%
Fx	Full Model	2.1999	2.1631	-1.7027	87.65%	77.76%
	Reduced Model	2.1998	2.1631	-1.6966	87.59%	80.05%

จากการพิจารณาตารางที่ 4.23 นั้นจะแสดงให้เห็นค่าความผิดพลาดของค่าผลตอบที่มีค่าที่ต่ำ โดยจะทำการเลือกค่าความผิดพลาดของผลตอบที่ต่ำก่อน แต่หากว่าค่าผิดพลาดผลตอบนั้นมีค่าไม่แตกต่างกันก็จะทำการเลือกพิจารณาที่ค่า R-Sq(adj) ที่มีค่าสูงกว่า ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทำให้ได้สมการแสดงความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อผลตอบด้วยเงื่อนไขการตัดแบบลมเป่า ดังต่อไปนี้

$$R_a = 4.05029 - (0.0034796)N - (1.89375)F + (2.89515)d - (0.492637)D + (0.186016)A + (5.01142 \times 10^{-7})N^2 + (0.0534894)D^2 + (0.00951027)A^2 + (0.0448875)NF + (0.00098075)Nd - (5.025 \times 10^{-5})NA - (99.62)Fd + (3.4175)FD - (10.47)FA - (0.44105)dD - (0.08405)dA + (0.0175212)DA \quad (4-1)$$

$$F_x = 19.0541 - (0.0106349)N - (421.459)F - (3.61949)d - (1.08158)D + (0.678318)A + (1.01354 \times 10^{-6})N^2 + (7837.34)F^2 + (0.0470984)D^2 + (0.0162097)A^2 + (0.173501)NF + (0.00382266)Nd + (0.000109271)ND - (104.286)Fd + (28.3335)FD - (46.5933)FA - (0.495693)dA \quad (4-2)$$

ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยต่างๆ โดยการทดลองทางสถิตินั้น จะทำให้ได้ปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อผลตอบของค่าความขรุขระผิว, และแรงในแนวแกน X ในกระบวนการตัด ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.5

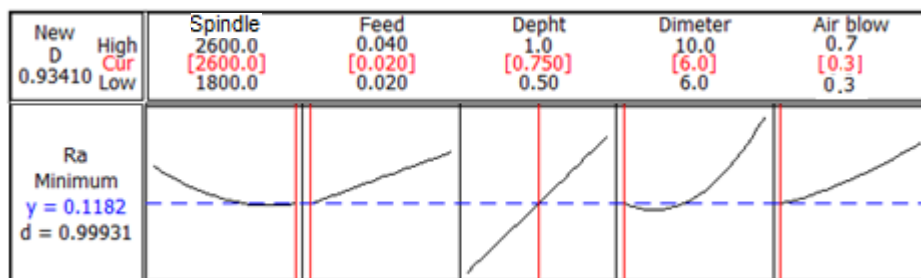
ตารางที่ 4.5 สรุปผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนระหว่างผลตอบและปัจจัยต่างๆ ของการตัดแบบลมเป่า

	ความขรุขระผิว	แรงตัดในแนว X
ความเร็วรอบ (N)	ไม่มีผล	ไม่มีผล
อัตราการป้อนตัด (F)	ไม่มีผล	มีผล
ความลึกตัด (d)	มีผล	มีผล
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด (D)	มีผล	มีผล
ความดันลมเป่า (A)	มีผล	มีผล

4.5 เงื่อนไขการตัดที่เหมาะสม

ความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ ในการตัดแบบใช้ลมเป่า สิ่งที่ส่งผลต่อผลตอบที่ทำการศึกษา สามารถอธิบายได้โดยใช้ฟังก์ชัน Response Optimization ซึ่งเป็นการใช้ฟังก์ชันในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยและ ยังเป็นการใช้ ฟังก์ชันที่วัดความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบ (Composite Desirability; D) โดยที่ค่าความพึงพอใจของผลตอบมีค่าอยู่ระหว่าง 0-1 ซึ่งถ้า D ให้ค่าเป็น 1 นั้นหมายความว่า ผลตอบนั้นได้รับความพึงพอใจอย่างสมบูรณ์ โดยในการพิจารณาเลือกเงื่อนไขการตัดจะเลือกจากเงื่อนไขที่ให้ค่า ความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบสูงสุด และความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อผลตอบในการตัดด้วยเงื่อนไขแบบใช้ลมเป่า

โดยจากภาพที่ 4.19 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ของเงื่อนไขการตัดกับผลตอบที่ทำการศึกษา ค่าความพึงพอใจ รวมของผลตอบ อยู่ที่ระดับ 93.41 % ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับที่สูงพอสมควร ระดับความพึงพอใจดังกล่าวทำให้ได้เงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมคือ ความเร็วรอบ 2,600 รอบต่อนาที, อัตราการป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ, ความลึกตัด 0.75 มิลลิเมตร, เส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด 0.6 มิลลิเมตร, และความดันลมเป่า 0.3 เมกกะปาร์สคาล (3บาร์)



ภาพที่ 4.19 Optimization plot ของเงื่อนไขการตัดแบบใช้ลมเป่า

เมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ส่งผลต่อผลตอบของความขรุขระผิวชิ้นงาน ที่ทำการศึกษา สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยได้ว่า เมื่อเพิ่มความเร็วรอบตัดที่สูงๆจะทำให้ค่าความขรุขระของผิวชิ้นงานลดลง เนื่องมาจากอุณหภูมิในการตัดจะสูงซึ่งง่ายแก่การตัดทำให้ค่าของแรงตัดในแนวสัมผัสมีค่าลดลง ส่งผลต่อค่าความขรุขระของผิวชิ้นงานซึ่งจะมีค่าลดลงเมื่อแรงตัดในแนวสัมผัสลดลง ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของการตัด โดยในที่นี้ค่าความสึกหรอของมีดตัดจะไม่ส่งผลเมื่อปรับเพิ่มความเร็วรอบตัดเนื่องมาจากชนิดของชิ้นงานที่ใช้เป็นอะลูมิเนียมซึ่งเป็นวัสดุชนิดอ่อนนุ่ม (Soft material)

การเพิ่มอัตราการป้อนตัดจะส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวของชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น เนื่องมาจากเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนตัดจะทำให้พื้นที่การตัดเพิ่มมากขึ้น โดยเมื่อพื้นที่ในการตัดเพิ่มมากขึ้นนั้นจะส่งผลต่อแรงตัดในแนวสัมผัสซึ่งจะเพิ่มมากขึ้นด้วย และเมื่อแรงในการตัดนั้นเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่าความขรุขระของผิวชิ้นงานเพิ่มขึ้นตาม ทำให้อัตราการป้อนตัดเป็นไปตามเป็นไปตามทฤษฎีการตัด

การเพิ่มความลึกตัดจะส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวของชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น เนื่องมาจากเมื่อเพิ่มความลึกตัดจะทำให้พื้นที่ในการตัดเพิ่มมากขึ้น เมื่อพื้นที่ในการตัดเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลต่อแรงตัดในแนว X ซึ่งจะเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้ค่าความขรุขระของผิวชิ้นงานเพิ่มขึ้นตามตามแรงในการตัด ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีการตัด

การเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวตัดจะส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวของชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น เนื่องมาจากเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวตัดเพิ่มขนาดใหญ่ขึ้น จะทำให้เกิดพื้นที่ในการตัดที่เพิ่มมากขึ้น โดยพื้นที่ในการตัดที่เพิ่มมากขึ้นนั้นจะส่งผลต่อแรงในแนวแกน X ที่เพิ่มมากขึ้น และเมื่อแรงในการตัดเพิ่มมากขึ้นนั้นจึงทำให้ค่าความขรุขระผิวของชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น

ความดันลมเป่าที่เพิ่มมากขึ้นหรือลดลงนั้นในที่นี้จะไม่ส่งผลต่อแรงในการตัดในแนวแกน X แต่จะส่งผลต่อความขรุขระผิวของชิ้นงาน โดยที่เมื่อเพิ่มความดันลมเป่าจะส่งผลให้อุณหภูมิในการตัดมีค่าลดลง ซึ่งอุณหภูมิในการตัดที่มีค่าลดลงนั้นจะส่งผลต่อความขรุขระผิวชิ้นงาน

เนื่องมาจากอุณหภูมิที่ลดลงมากเกินไปอุณหภูมิที่เหมาะสมในการตัดนั้นจะทำให้การตัดชิ้นงานยากมากขึ้น และเมื่อตัดได้ยากมากขึ้นมีผลมาจากวัสดุที่ไม่อ่อนนุ่มอันเป็นผลมาจากอุณหภูมิที่ไม่เหมาะสม จึงส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวของชิ้นงานที่เพิ่มสูงมากขึ้น จึงสรุปได้ว่าความดันลมเป่าที่เพิ่มมากขึ้นนั้นส่งผลต่อความขรุขระผิวของชิ้นงานที่เพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน

4.6 การทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลอง

เมื่อได้ค่าปัจจัยที่เหมาะสมจากสมการที่ทำนายได้แก่ เงื่อนไขการตัดแบบใช้ลมเป่าคือ ความเร็วรอบ 2,600 รอบต่อนาที, อัตราการป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ, ความลึกตัด 0.75 มิลลิเมตร, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด 6 มิลลิเมตร, และความดันลมเป่าที่ 0.3 เมกะปาสกาล (3บาร์) โดยจะนำเงื่อนไขการตัดดังกล่าวไปทำการตัดเพื่อยืนยันผลการทดลองโดยการทดลองซ้ำ 5 การทดลอง ซึ่งผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลตอบของการทดลองด้วยเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมของการตัดแบบใช้ลมเป่า

การทดลองครั้งที่	Ra	Fx
1	0.1122	1.8053
2	0.1208	1.8832
3	0.1155	1.8289
4	0.1088	1.7584
5	0.1269	1.9032

จากการทดลองยืนยันผลของ การทดลองตัดเมื่อนำมาทดสอบทางสถิติด้วยผลตอบที่ได้จากสมการทำนาย ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.7 มาทดสอบ T-test ซึ่งค่าเฉลี่ยของผลตอบที่ได้จากการทดสอบเมื่อเปรียบเทียบกับผลตอบที่ได้จากสมการทำนายจะต้องไม่มีความแตกต่างกัน นั่นคือต้องยอมรับสมมติฐานหลักด้วยนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 และที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ภายใตสมมติฐานที่ว่า

H_0 : ค่าเฉลี่ยของผลตอบที่ได้จากการทดลองไม่แตกต่างกับค่าของผลตอบจาก
สมการทำนาย

H_1 : ค่าเฉลี่ยของผลตอบที่ได้จากการทดลองแตกต่างกับค่าของผลตอบจากสมการ
ทำนาย

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบด้วย T-test ของปัจจัยการตัดด้วยเงื่อนไขต่างๆของการตัดแบบลม
เป่า

เงื่อนไขการตัด	ผลตอบ	N	Mean	StDev	SE Mean	T	P
การตัดแบบลมเป่า	Ra	5	0.11644	0.00730	0.00327	-0.54	0.619
	Fx	5	1.8358	0.0586	0.0262	1.03	0.363

ตารางที่ 4.8 ค่าความผิดพลาดของค่าพยากรณ์กับค่าจริงของผลตอบจากค่าการตัดที่เหมาะสม

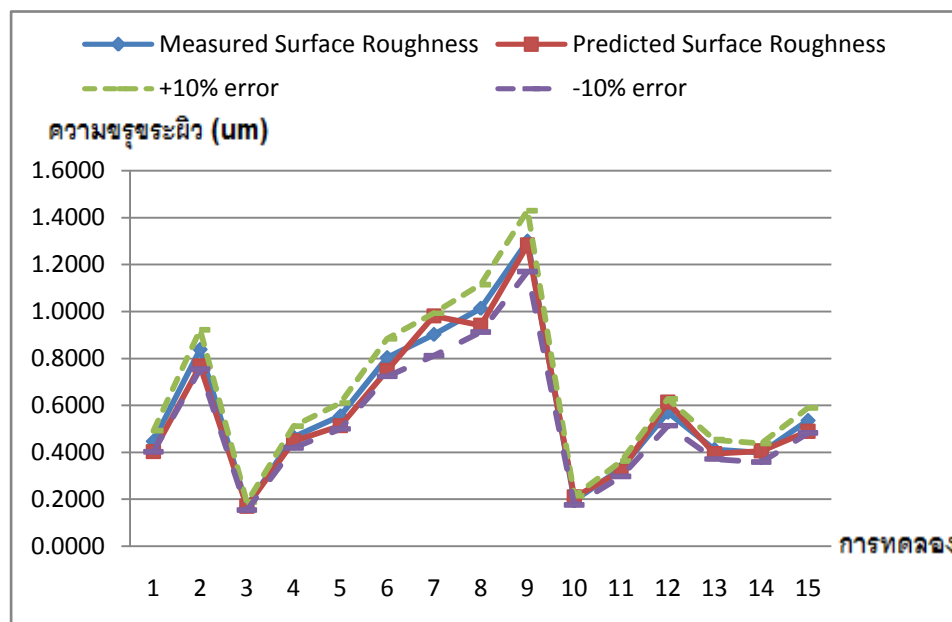
การตัดแบบใช้ลม เป่า	Ra		% ความผิดพลาด	Fx		% ความผิดพลาด
	ค่า พยากรณ์	ค่าจริง		ค่า พยากรณ์	ค่าจริง	
1	0.1182	0.1122	-5.08	1.8089	1.8053	0.20
2	0.1182	0.1208	2.20	1.8089	1.8832	-4.11
3	0.1182	0.1155	-3.98	1.8089	1.8289	-1.11
4	0.1182	0.1088	-7.95	1.8089	1.7584	2.79
5	0.1182	0.1269	7.36	1.8089	1.9032	-5.21

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าความผิดพลาดระหว่างค่าพยากรณ์กับค่าจริงที่ได้จากการทดลอง
ตัดซ้ำด้วยเงื่อนไขการตัดแบบใช้ลมเป่า ซึ่งค่าจริงเป็นที่ได้จากการตัดแบบใช้ลมเป่าซ้ำ 5 การ

ทดลอง ส่วนค่าพยากรณ์ได้มาจากค่า Optimization ในภาพที่ 4.19 ซึ่งจะพบว่าค่า % ค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วง $\pm 10\%$ ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ในการทดลอง

ตารางที่ 4.9 ค่าความผิดพลาดของค่าพยากรณ์กับค่าจริงของความขรุขระผิวชิ้นงานของผลตอบ

การทดลอง	ปัจจัยในการตัด					ความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (Ra)		
	N	F	d	D	A	Actual	Predicted	Error(%)
1	2200	0.015	1	6	0.5	0.4469	0.4025	9.93
2	2200	0.015	0.5	8	0.7	0.8384	0.7686	8.33
3	2200	0.01	0.75	8	0.3	0.1703	0.1696	0.42
4	2200	0.01	1	8	0.5	0.4650	0.4479	3.67
5	2600	0.02	0.75	8	0.5	0.5547	0.5130	7.51
6	2200	0.015	0.75	10	0.3	0.8034	0.7488	6.79
7	2200	0.02	0.75	10	0.5	0.9022	0.9811	-8.75
8	2200	0.01	0.75	10	0.5	1.0135	0.9414	7.11
9	2200	0.015	0.5	10	0.5	1.3002	1.2839	1.25
10	2200	0.015	1	8	0.3	0.1946	0.2090	-7.40
11	2200	0.015	0.5	8	0.3	0.3294	0.3200	2.85
12	2200	0.02	0.5	8	0.5	0.5699	0.6144	-7.80
13	2200	0.01	0.5	8	0.5	0.4125	0.3940	4.49
14	2200	0.015	0.75	8	0.5	0.3980	0.4060	-2.01
15	2200	0.015	1	8	0.7	0.5355	0.4895	8.60

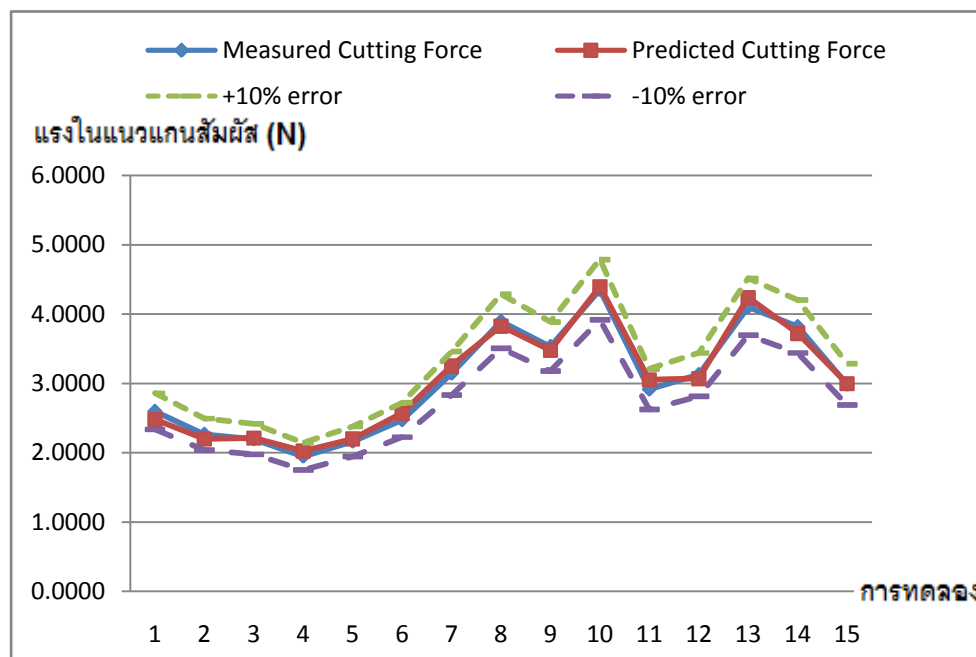


ภาพที่ 4.20 ค่าความผิดพลาดของค่าพยากรณ์กับค่าจริงของความขรุขระผิวชิ้นงานของผลตอบ

ตารางที่ 4.10 ค่าความผิดพลาดของค่าพยากรณ์กับค่าจริงของค่าแรงตัดในแนวแกน X (Fx) ของ

ผลตอบ

การทดลอง	ปัจจัยในการตัด					แรงในแนวแกน X (Fx)		
	N	F	d	D	A	Actual	Predicted	Error(%)
1	2200	0.02	0.75	6	0.5	2.5970	2.4791	4.54
2	1800	0.015	0.75	8	0.7	2.2654	2.1978	2.98
3	2200	0.01	0.75	8	0.7	2.1968	2.2106	-0.63
4	2600	0.01	0.75	8	0.5	1.9472	2.0229	-3.88
5	2200	0.01	0.75	8	0.3	2.1631	2.1998	-1.70
6	1800	0.015	1	8	0.5	2.4729	2.5699	-3.92
7	2600	0.015	0.75	8	0.3	3.1454	3.2535	-3.44
8	2600	0.02	0.75	8	0.5	3.8966	3.8254	1.83
9	2200	0.02	1	8	0.5	3.5326	3.4772	1.57
10	2200	0.02	0.75	10	0.5	4.3520	4.3954	-1.00
11	2200	0.015	0.5	10	0.5	2.9151	3.0522	-4.70
12	2200	0.02	0.5	8	0.5	3.1270	3.0696	1.84
13	2200	0.02	0.75	8	0.3	4.1046	4.2401	-3.30
14	2200	0.015	1	10	0.5	3.8206	3.7206	2.62
15	1800	0.02	0.75	8	0.5	2.9868	2.9967	-0.33



ภาพที่ 4.21 ค่าความผิดพลาดของค่าพยากรณ์กับค่าจริงของค่าแรงตัดในแนวแกน X (Fx) ของ

ผลตอบ

จากตารางที่ 4.9 - 4.10 ค่าความผิดพลาดของค่าพยากรณ์กับค่าจริงของความขรุขระผิวชิ้นงาน และค่าแรงตัดในแนวแกน X (Fx) ของผลตอบแบบสุ่มตามลำดับ ซึ่งจะพบว่าค่า % ค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วง $\pm 10\%$ ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ในการทดลอง และได้แสดงให้เห็นดังภาพที่ 4.20 และ 4.21

4.7 การพยากรณ์ค่าแบบช่วง (Prediction Interval)

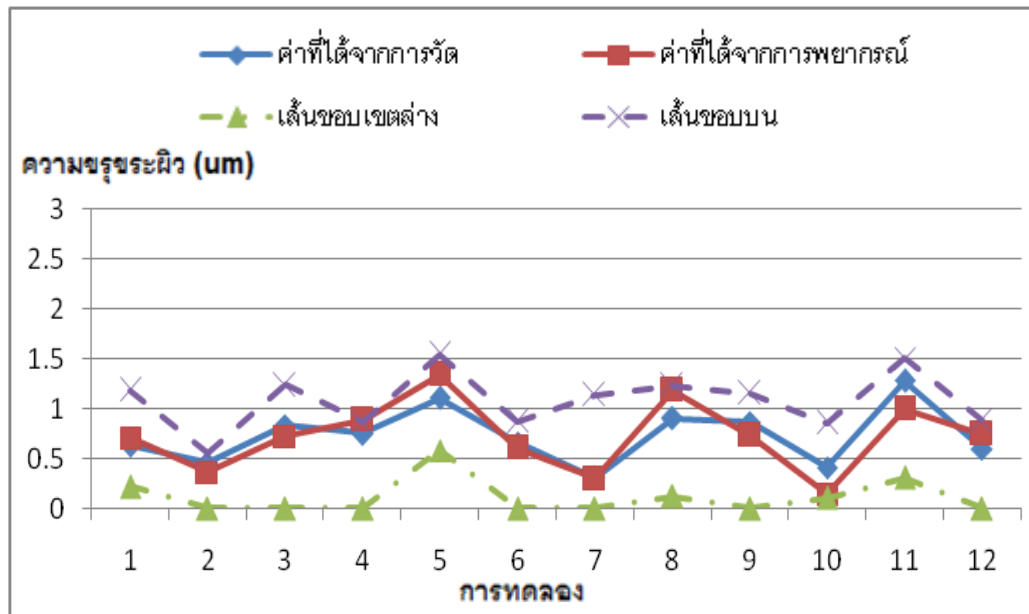
ในการทำการพยากรณ์ค่าแบบช่วง (Prediction Interval) จะทำเพื่อหาค่าจริงที่ได้กับค่าพยากรณ์ อยู่ในค่าการพยากรณ์แบบช่วงที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95%

จากภาพที่ 4.19 และ 4.20 พบว่าการพยากรณ์ด้วยสมการที่นำเสนอมีความแม่นยำ ในการพยากรณ์ความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra) และ แรงตัดในแนวแกน X (Fx) อยู่ที่ 85.04 % และ 87.59% ตามลำดับ จากความแม่นยำดังกล่าวสรุปได้ว่าสมการที่พัฒนาขึ้นสามารถนำมาใช้ในการพยากรณ์ความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra) และ แรงตัดในแนวแกน X (Fx) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

สมการที่ได้ถูกทดสอบและยืนยันด้วยเส้นขอบเขตการพยากรณ์ ซึ่งใช้ในการพยากรณ์ค่าแบบช่วง (Prediction Interval) เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของค่าความขรุขระผิวชิ้นงานที่ได้จากการตัดจริงในแต่ละการทดลองซึ่งพบว่าค่าที่ได้จากการวัดยังอยู่ในเส้นขอบเขตดังกล่าว ดังภาพที่ 4.22 และ 4.23

ตารางที่ 4.11 ปัจจัยในการทดลองเพื่อหาเส้นขอบเขตการพยากรณ์ของความขรุขระผิวเฉลี่ย

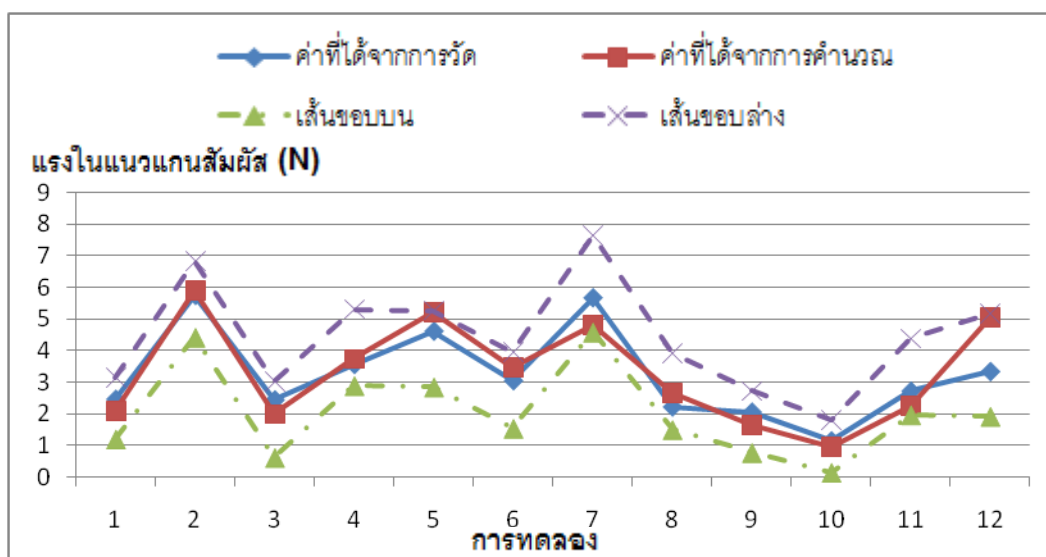
การทดลอง	ปัจจัยในการตัด					ความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (Ra)		
	N	F	d	D	A	Actual	Predicted	Error(%)
1	3000	0.01	0.5	10	0.3	0.63	0.71	-10.72
2	3000	0.03	1.5	6	0.7	0.46	0.36	25.45
3	3000	0.03	1.5	10	0.7	0.83	0.72	13.09
4	3000	0.01	1.5	10	0.3	0.75	0.89	-15.05
5	3000	0.01	0.5	10	0.7	1.11	1.35	-17.77
6	3000	0.03	1.5	10	0.3	0.66	0.61	8.78
7	1000	0.01	1.5	10	0.3	0.31	0.30	3.86
8	3000	0.01	1.5	10	0.7	0.91	1.19	-23.80
9	1000	0.03	0.5	6	0.7	0.87	0.73	19.03
10	3000	0.01	0.5	6	0.7	0.41	0.35	16.15
11	1000	0.01	1.5	10	0.7	1.28	1.00	27.91
12	3000	0.03	0.5	6	0.7	0.60	0.75	-20.34



ภาพที่ 4.22 เส้นขอบเขตการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย

ตารางที่ 4.12 ปัจจัยในการทดลองเพื่อหาเส้นขอบเขตการพยากรณ์ของแรงตัดในแนวแกน X

การทดลอง	ปัจจัยในการตัด					แรงในแนวแกน X (Fx)		
	N	F	d	D	A	Actual	Predicted	Error(%)
1	3000	0.01	0.5	10	0.7	2.46	2.10	14.65
2	1000	0.03	0.5	6	0.3	5.75	5.89	-2.46
3	1000	0.01	1.5	6	0.7	2.44	2.00	18.00
4	1000	0.01	1.5	10	0.3	3.56	3.73	-4.82
5	1000	0.03	0.5	10	0.7	4.61	5.19	-12.54
6	1000	0.01	1.5	6	0.3	3.05	3.48	-14.00
7	1000	0.03	1.5	10	0.3	5.67	4.79	15.60
8	1000	0.03	0.5	6	0.7	2.22	2.67	-20.35
9	3000	0.01	0.5	6	0.3	2.05	1.46	28.97
10	3000	0.01	0.5	6	0.7	1.14	0.97	15.60
11	1000	0.01	1.5	10	0.7	2.72	2.26	16.87
12	3000	0.03	0.5	6	0.7	3.34	5.05	-33.91



ภาพที่ 4.23 เส้นขอบเขตการพยากรณ์ค่าแรงตัดในแนวแกน X

จากตารางที่ 4.11 และ 4.12 จะพบว่าค่าความผิดพลาดที่ได้นั้นจะมีค่าที่มากกว่า $\pm 10\%$ เนื่องมาจากการพยากรณ์ที่นอกขอบเขตเงื่อนไขการทดลองที่พัฒนาจากสมการการพยากรณ์ จึงทำให้การพยากรณ์ค่าแบบช่วงจะต้องอยู่ในเงื่อนไขของสมการการพยากรณ์ที่กำหนดมิฉะนั้นจะทำให้ค่าความผิดพลาดที่ได้มีค่าเกิน $\pm 10\%$

จากภาพที่ 4.22 และ 4.23 เป็นการนำสมการการพยากรณ์เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการตัดจริง เส้นขอบเขตบนและขอบเขตล่างดังกล่าวสามารถนำมาใช้ในการตรวจสอบและควบคุมคุณภาพ ความซรุขระผิวชิ้นงานได้ โดยอ้างอิงเส้นขอบบนและเส้นขอบล่างจากการพยากรณ์ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % โดยค่าที่ได้จากการคำนวณและการวัดนั้นจะอยู่ในช่วงของเส้นขอบเขตบนและขอบเขตล่างในการพยากรณ์ ทำให้สมการความซรุขระผิวเฉลี่ย และแรงตัดในแนวแกน X มีความแม่นยำในการพยากรณ์แม้จะเปลี่ยนค่าปัจจัยการตัดไป

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของเงื่อนไขการตัดแบบใช้ความดันลมเป่าที่มีผลต่อแรงที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการตัด ความขรุขระผิวของชิ้นงาน และศึกษาหาสภาวะการตัดที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการกัดอลูมิเนียมด้วยเม็ดเม็ดกัดแบบหวับลดโดยใช้ความดันลมเป่าโดยการใช้วิธีการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบด้วยเทคนิคบ็อกซ์-เบห์นเคน

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาความสัมพันธ์ของเงื่อนไขการตัดโดยใช้ลมเป่า ที่มีอิทธิพลต่อความขรุขระผิวของชิ้นงาน และแรงตัดในแนวสัมผัส โดยปัจจัยที่ทำการศึกษา คือ ความเร็วรอบในการตัด, อัตราป้อนตัด, ความลึกตัด, เส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด, และความดันลมเป่า โดยสามารถสรุปได้ว่าความดันลมเป่า และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวตัดส่งผลต่อความขรุขระของผิวชิ้นงานสูงที่สุด และตามมาด้วยความลึกตัด ส่วนแรงในการตัดในแนวแกน X นั้นสามารถสรุปได้ว่าอัตราการป้อนตัด, ความลึกตัด, เส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด และความดันลมเป่า นั้นส่งผลต่อแรงตัดในแนวสัมผัสเท่ากัน

จากการใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบในการสร้างสมการกำลังสองของความขรุขระของผิวชิ้นงาน, และแรงตัดในแนวสัมผัส พบว่า สมการมีประสิทธิภาพและสามารถนำไปพยากรณ์ผลตอบดังกล่าวได้ด้วยระดับความเชื่อมั่น 95% และได้เงื่อนไขการตัดที่สภาวะเหมาะสมของเงื่อนไขการตัดโดยใช้ลมเป่า คือ ความเร็วรอบ 2,600 รอบต่อนาที, อัตราการป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ, ความลึกตัด 0.75 มิลลิเมตร, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด 6 มิลลิเมตร, และความดันลมเป่าที่ 0.3 เมกกะปาร์สคาล (3บาร์) โดยการพิจารณาจากเงื่อนไขที่มีค่าระดับความพึงพอใจรวมสูงสุดของผลตอบ ซึ่งเงื่อนไขการตัดโดยใช้ลมเป่ามี ค่าความพึงพอใจ รวมของผลตอบอยู่ที่ระดับ 93.41%

โดยที่ในการใช้ความดันลมเป่าเข้ามาในกระบวนการตัดนั้น จะเป็นการช่วยในการลดการใช้สารหล่อเย็นในกระบวนการตัด ซึ่งสารหล่อเย็นที่ใช้ในปัจจุบันนั้นเมื่อหมดอายุการใช้งาน จะนำไปทำลายทิ้ง ซึ่งจะส่งผลต่อสภาวะแวดล้อม ทำให้การใช้ความดันลมเป่าเข้ามาแทนที่นั้นจะช่วยให้การใช้สารหล่อเย็นน้อยลง และส่งผลดีต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องมาจากกระบวนการตัดไม่มีการใช้สารหล่อเย็น

5.2 อภิปรายผลการวิจัย

โดยการเลือกใช้แรงนั้นในงานวิจัยนี้จะทำการเลือกใช้แรงในแนว X (Fx) เนื่องจากชิ้นงานที่นำมาใช้ในการทดลองนั้นเป็นวัสดุชนิด Soft material จึงทำให้แรงที่ได้จากการทดลองนั้นมีค่าน้อยทุกค่า แต่ค่าแรงในแนวแกน X นั้นจะแสดงผลให้เห็นค่าที่มากที่สุด จึงทำให้นำค่าในแนวแกน X มาใช้ในการวิจัยครั้งนี้

เนื่องมาจากการใช้สารหล่อเย็นในกระบวนการตัดนั้นจะมีผลต่อมลภาวะในพื้นที่ทำงานในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการตัดโดยไม่ใช้สารหล่อเย็นในกระบวนการตัด แต่จะทำการลดอุณหภูมิการตัดด้วยการใช้ลมเป่าเข้ามาช่วย และในการใช้ลมเป่านั้นยังทำการทดลองที่ความดันลมเป่าที่แตกต่างกันเนื่องมาจากต้องการที่จะทราบว่าที่ความดันลมเป่าที่ระดับไหนถึงได้จะผิวชิ้นงานที่ดีที่สุด ซึ่งจะลดมลภาวะที่เกิดจากการใช้สารหล่อเย็นในกระบวนการตัด และช่วยในการลดของเสียที่เกิดจากการที่นำสารหล่อเย็นที่หมดอายุการใช้งานแล้วไปทิ้งด้วย

ในการทดลองนั้นจะทำการกำหนดค่าความขรุขระผิวชิ้นงานก่อน โดยการกำหนดค่าความขรุขระผิวชิ้นงานนั้นจะดูตามค่ามาตรฐาน ISO 4287-1997 โดยจะทำการดูที่กระบวนการตัด โดยในการทดลองนี้จะเป็นกระบวนการกัด แล้วจึงทำการทดลองตัดชิ้นงานเพื่อให้ได้ค่าความขรุขระของผิวชิ้นงานตามที่ต้องการแล้วจึงทำการเลือกเงื่อนไขในการตัด และนำผลที่ได้จากการทำการทดลองไปวิเคราะห์ผล

5.3 ข้อจำกัดและอุปสรรคในงานวิจัย

1. เนื่องจากมีดกัดหับบอล และชิ้นงานที่ใช้ทดลองนั้นมี ราคาต่อหน่วยที่ค่อนข้างสูง ทำให้เงื่อนไขของการตัดที่เลือกมาในงานวิจัยนี้ จำเป็นที่จะต้องใช้การออกแบบการทดลองแบบ Box Behnken เพื่อเป็นการลดจำนวนการทดลอง
2. เงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมที่วิเคราะห์ได้จากงานวิจัยนี้ เป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกัดอลูมิเนียม Al6063 ด้วยมีดกัดหับบอลชนิดเคลือบผิวด้วย ไทเทเนียมอลูมิเนียมไนไตรเท่านั้น หากมีการเปลี่ยนแปลงชนิดของมีดกัดหรือผิวเคลือบของมีดกัด ก็จำเป็นต้องมีการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกัดใหม่ เนื่องมาจากชนิดของมีดกัด และการเคลือบผิวของมีดกัด จะมีความแตกต่างกันในด้านคุณสมบัติ ทำให้สภาวะของการกัดงานต่างกันออกไป ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อผลตอบที่ต้องการศึกษา

3. ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองนั้นเป็นวัสดุ Soft material ทำให้ในการทำการทดลองนั้น ค่าแรงที่วัดได้จากการตัดจะมีค่าที่ค่อนข้างน้อย ทำให้ยากต่อการที่จะหาค่า ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแรง เลยใช้ค่าแรงในแนวแกน X ในการหาความสัมพันธ์แทน เนื่องมาจากค่าในแนวแกน X มีค่าที่ให้จากการทดลองมากที่สุด
4. เนื่องจากในการทดลองนั้นจะใช้ความดันลมเป่าเข้ามาด้วย จึงทำให้ต้องมีการติดตั้ง Nozzle และถอดออกเมื่อทำการใช้งานเสร็จ จึงเกิดความผิดพลาดในการตั้งให้ตรง ตำแหน่งเดิมของการตัด

5.4 ข้อเสนอนแนะ

1. ในการวัดสัญญาณแรงตัดนั้น มักเกิดสัญญาณรบกวนในขณะที่วัด จึงต้องทำการต่อสายดิน เพื่อทำการลดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น
2. เงื่อนไขในการตัดโดยใช้ความดันลมเป่านั้นจะต้องบางตัวอย่างการตัดที่ต้องใช้แรงลมเป่าที่มีค่าความดันสูงจึงจำเป็นที่จะต้องตรวจสอบว่าได้ความดันลมเป่าตามที่ต้องการ โดยการปล่อยลมออกจากแท็งก์ลมก่อน เพื่อให้มีลมทำการอัดความดันลมใหม่ จึงจะทำให้ความดันลมเป่าเป็นไปตามที่ต้องการ
3. การตัดโดยใช้ลมเป่านั้นเนื่องจากความดันลมเป่าที่มากจะทำให้อากาศที่นำมาใช้เป็นลมเป่า นั้นจะเกิดการกลายสภาพเป็นหยดน้ำ จึงต้องทำการติดตั้งอุปกรณ์กรองลมอัด (air filter) เพื่อทำการกรองเอาน้ำและสิ่งสกปรกออกจากลมที่นำมาใช้
4. การปรับตั้งค่าเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง เนื่องจากเครื่องซีเอ็นซี แมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ มีการใช้งานจากผู้ใช้งานหลายคน และทำการทดลองในพารามิเตอร์ที่ต่างกัน ดังนั้นในการใช้เครื่องจักรซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์นั้นจำเป็นที่จะต้องทำการตรวจสอบการปรับตั้งค่า เพื่อให้ตรงตามเงื่อนไขของงานวิจัย และเพื่อไม่ให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการทำงานวิจัยอันเนื่องมาจากการปรับตั้งค่าที่ผิดพลาด
5. แนวทางในการทำการวิจัยขั้นต่อไป ควรทำการทดลองโดยใช้มีดตัดรูปแบบต่างๆ หรือทำการเปลี่ยนสารหล่อเย็นโดยใช้สารหล่อเย็นที่มาจากน้ำมันพืชต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทำนายที่ได้จากการทดลอง และนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวางมากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] สมเกียรติ ตั้งจิตสถิตเจริญ, เอกสารประกอบการสอนวิชาวิศวกรรมการผลิตขั้นสูง. 2551.
- [2] Groover, M.P. Fundamentals of Modern Manufacturing. 2nd Edition, USA: John Wiley & Son, 2004.
- [3] Tangjitsitcharoen, S., and Senjuntichai, A. Intelligent monitoring and prediction of surface roughness in ball-end milling process. Applied Mechanics and Materials 121, (2010): 2059-2063.
- [4] Juneja, B. L., and Sekhon, G. S. Fundamentals of Metal Cutting and Machine Tool. 1st Edition, India: Wiley Eastern, 1987.
- [5] สุรศิษฐ์ ไรจนันต์, การศึกษาความเรียบผิวเปรียบเทียบระหว่างอิเล็กโทรดทองแดงจากระบวนการรีดและอิเล็กโทรดทองแดงจากระบวนการอิเล็กโตรฟอร์มในการสปาร์คด้วยอีดีเอ็ม, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 21 (2550): 546-550.
- [6] Brevier Technische Keramik, The Handbook for engineers and designer, 2004.
- [7] Ostwald, P., and Munoz, J. Manufacturing Process and System. 9th Edition, USA: John Wiley & Son, 1997.
- [8] ปิยะ ศิริธรรมปิติ. การศึกษาพารามิเตอร์ของกระบวนการกลึงเหล็กกล้าคาร์บอนบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีโดยการประยุกต์ใช้วิธีปริมาณสารหล่อเย็นน้อยที่สุด. วิทยานิพนธ์ ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรม อุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.
- [9] ปารเมศ ชูติมา . การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม . กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- [10] ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์ . การออกแบบและการวิเคราะห์การทดลอง. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ที่ออป, 2545.
- [11] กัลยา วาณิชย์ปัญญา. หลักสถิติ. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.

- [12] ชาญณรงค์ รุ่งเรือง, อิทธิพลของการใช้สารหล่อเย็นของกระบวนการตัดเหล็กกล้าโดยใช้ ใบมีดกัดหัวบอล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรม อุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.
- [13] Lou, M.S., Chen, J.C., and Li, C.M. Surface Roughness Prediction Technique For CNC End-Milling. Journal of Industrial Technology 15, (1999): 1-6.
- [14] Kadirgama, K., Noor, M.M., Zuki.N.M, N.M., Rahman, M.M., Rejab, M.R.M., Daud, R., and Abou-El-Hossein, K.A. Optimization of Surface Roughness in End Milling on Mould Aluminium Alloy (AA6061-T6) Using Response Surface Method and Radian Basis Function Network. Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering 2. (2008): 209-214.
- [15] Tangitsitcharoen, S., Rungruang, C., and Laiaddee, D. Monitoring of Dry Cutting and Applications of Cutting Fluid for Ball End Milling. Journal of Industrial Engineering and Management Systems 9. (2010): 242-250.
- [16] Bernardos, P.G., and Vosniakos, G.C. Predicting Surface Roughness in Machining: A Review. International Journal of Machine Tools & Manufacture 43 (2003): 833-844 .
- [17] Rashid, F.F.M., Gan, Y.S., and Muhammad, Y.N. Mathematical Modeling to Predict Surface Roughness in CNC Milling. Proceeding of world academy of science, engineering and technology 53 (2009): 393-396.
- [18] Lee, K., and Dornfeld, D.A. A Study of Surface Roughness in the Micro-End-Milling Process. Laboratory for Manufacturing and Sustainability UC Berkeley (2004): 1-8.
- [19] Tangjitsitcharoen, S. In-Process Investigation of Turning Process Applied With and Without Cutting Fluid. Journal of mechanical engineering 6 (2009): 85-102.
- [20] Tangjitsitcharoen, S., Arayaphitaya, S., and Thongprasert, S. In-Process Monitoring and Prediction of Surface Roughness on CNC Turning by using Response

Surface Analysis. Proceeding of the 36th International MATADOR Conference (2010): 213-216.

[21] นายพุทธิภูมิ วศินสันต์, นายสมภวัฏ กิจพิทยาฤทธิ์, ชาญณรงค์ รุ่งเรือง, และ ดวงตา ละเอียดดี, การศึกษาต้นทุนของกระบวนการกัดอลูมิเนียม 6063 ด้วยวิธีการกัดแบบลมเป่า แบบเปียก และแบบละออง และการหาเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมในกระบวนการกัดโดยใช้การวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบ , การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม (2553): 123.

[22] ศิริวัลย์ จันทร์ฝ่อง, การพยากรณ์ความขรุขระผิวสำหรับชิ้นงานเหล็กกล้าในกระบวนการกลึงซีเอ็นซีด้วยวิธีการพื้นผิวผลตอบตนเอง . วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554.

[23] Somkiat Tangjitsitcharoen. Monitoring of dry cutting and applications of cutting fluid. Journal of Engineering Tribology 224 (2010) : 209-219.

[24] Andersson, J.M., Wallin, E., Helmersson, U., Kreissig, U., and Munger, E.P. Phase Control of Al₂O₃ Thin Films Grown at Low Temperatures. ELSEVIER (2006): 57-59.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ตารางแสดงผลการทดลองที่เงื่อนไขต่างๆของการตัดแบบใช้ลมเป่า

ตารางที่ 1 ผลการทดลองครั้งที่ 1 สำหรับเงื่อนไขการตัดแบบแบบห้วงลโดยการใช้ลมเป่า

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	Spindle speed	Feed rate	Depth of cut	Tool diameter	Air blow pressure	Fx	Fy	Fz	Ra	Rz
38	1	2	1	2200	0.04	0.75	6	0.5	2.345685	0.580723	0.984404	0.1060	0.8418
6	2	2	1	2200	0.03	1	6	0.5	2.652431	0.551108	0.95506	0.5328	4.2461
35	3	2	1	1800	0.03	0.75	8	0.7	2.034659	0.943731	1.030401	0.8470	5.5375
11	4	2	1	2200	0.02	0.75	8	0.7	1.856582	0.899582	1.039247	0.8789	4.9490
2	5	2	1	2600	0.02	0.75	8	0.5	1.564321	0.383773	0.701324	0.1573	1.1967
31	6	2	1	2200	0.03	0.5	8	0.7	2.314153	1.136310	1.263516	0.8451	5.6413
13	7	2	1	1800	0.03	0.5	8	0.5	2.132546	0.718125	1.042049	0.5070	3.9109
9	8	2	1	2200	0.02	0.75	8	0.3	2.345672	0.807188	0.935046	0.1847	1.7698
23	9	2	1	2200	0.02	1	8	0.5	2.845714	1.109798	1.064839	0.4656	3.5022
15	10	2	1	1800	0.03	1	8	0.5	2.344163	0.759915	1.010019	0.3013	1.9748
34	11	2	1	2600	0.03	0.75	8	0.3	2.954628	0.989308	1.164847	0.1714	2.0598
4	12	2	1	2600	0.04	0.75	8	0.5	3.465851	1.404992	1.472603	0.4934	3.0028
18	13	2	1	2200	0.03	0.75	10	0.3	3.374970	1.850592	2.441311	1.4377	8.7200

24	14	2	1	2200	0.04	1	8	0.5	3.246718	1.096115	1.280671	0.1142	0.8992
36	15	2	1	2600	0.03	0.75	8	0.7	1.883427	0.477755	1.209632	0.7351	4.9673
40	16	2	1	2200	0.04	0.75	10	0.5	4.352116	1.708380	2.304794	0.9022	6.9713
41	17	0	1	2200	0.03	0.75	8	0.5	1.845624	0.471522	0.831705	0.3165	2.1403
16	18	2	1	2600	0.03	1	8	0.5	3.715465	1.513329	1.389711	0.5355	3.8629
17	19	2	1	2200	0.03	0.75	6	0.3	4.125654	1.765385	2.34847	0.4142	3.4901
14	20	2	1	2600	0.03	0.5	8	0.5	1.805657	0.406681	1.093882	0.3922	2.8533
12	21	2	1	2200	0.04	0.75	8	0.7	2.356976	0.843597	1.280078	0.6409	4.1656
43	22	0	1	2200	0.03	0.75	8	0.5	2.025561	0.475676	0.886748	0.2924	2.3167
26	23	2	1	2600	0.03	0.75	6	0.5	1.914588	0.367263	0.767178	0.2542	2.9375
27	24	2	1	1800	0.03	0.75	10	0.5	3.546794	1.331689	1.828449	1.1750	8.0319
19	25	2	1	2200	0.03	0.75	6	0.7	2.045689	0.220379	0.898868	0.1411	0.9935
39	26	2	1	2200	0.02	0.75	10	0.5	2.854697	1.081023	1.461652	1.5649	8.8150
33	27	2	1	1800	0.03	0.75	8	0.3	3.389562	1.248697	1.403285	0.2547	2.1212
7	28	2	1	2200	0.03	0.5	10	0.5	2.653415	0.905910	1.436744	1.1835	7.7340
30	29	2	1	2200	0.03	1	8	0.3	3.046579	1.173892	1.202169	0.1726	1.5148
20	30	2	1	2200	0.03	0.75	10	0.7	2.705643	0.967536	1.157638	0.8031	4.9171

29	31	2	1	2200	0.03	0.5	8	0.3	3.005646	0.936804	1.338005	0.3660	2.8080
28	32	2	1	2600	0.03	0.75	10	0.5	4.668143	1.767371	2.460192	1.3073	7.9019
22	33	2	1	2200	0.04	0.5	8	0.5	3.156478	1.039832	1.322939	0.5753	4.2735
42	34	0	1	2200	0.03	0.75	8	0.5	1.892045	0.480307	0.767967	0.3101	2.2033
25	35	2	1	1800	0.03	0.75	6	0.5	1.667954	0.279104	0.686387	0.3378	2.6738
10	36	2	1	2200	0.04	0.75	8	0.3	4.325140	1.648681	1.758686	0.3506	2.5342
37	37	2	1	2200	0.02	0.75	6	0.5	1.095047	0.216982	0.498612	0.3491	2.2986
21	38	2	1	2200	0.02	0.5	8	0.5	1.498712	0.513050	0.722279	0.4081	3.1578
46	39	0	1	2200	0.03	0.75	8	0.5	2.746129	1.034453	1.164096	0.5211	3.8719
44	40	0	1	2200	0.03	0.75	8	0.5	3.408455	1.448266	1.725344	0.4871	3.3517
45	41	0	1	2200	0.03	0.75	8	0.5	2.547146	0.925429	1.066199	0.3900	3.1699
8	42	2	1	2200	0.03	1	10	0.5	3.997151	1.571946	2.110289	0.5541	4.1597
3	43	2	1	1800	0.04	0.75	8	0.5	3.248743	1.223398	1.441335	0.5918	4.0054
5	44	2	1	2200	0.03	0.5	6	0.5	1.487158	0.261614	0.7283	0.3465	2.8003
1	45	2	1	1800	0.02	0.75	8	0.5	2.648137	0.996447	1.035174	0.5943	4.2389
32	46	2	1	2200	0.03	1	8	0.7	2.216078	0.768277	1.161469	0.5833	3.9692

ตารางที่ 2 ผลการทดลองครั้งที่ 2 สำหรับเงื่อนไขการตัดแบบแบบห้วงลโดยการใช้ลมเป่า

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	Spindle speed	Feed rate	Depth of cut	Tool diameter	Air blow pressure	Fx	Fy	Fz	Ra	Rz
38	1	2	1	2200	0.04	0.75	6	0.5	2.698693	0.668117	1.13255	0.1220	0.9685
6	2	2	1	2200	0.03	1	6	0.5	2.042219	0.424322	0.73534	0.4102	3.2693
35	3	2	1	1800	0.03	0.75	8	0.7	2.265946	1.051009	1.14753	0.9433	6.1670
11	4	2	1	2200	0.02	0.75	8	0.7	1.985647	0.962119	1.11149	0.9400	5.2931
2	5	2	1	2600	0.02	0.75	8	0.5	2.031756	0.498449	0.91089	0.2043	1.5543
31	6	2	1	2200	0.03	0.5	8	0.7	2.302451	1.130564	1.25713	0.8408	5.6128
13	7	2	1	1800	0.03	0.5	8	0.5	2.514658	0.846799	1.22876	0.5979	4.6117
9	8	2	1	2200	0.02	0.75	8	0.3	2.115484	0.727977	0.84329	0.1666	1.5961
23	9	2	1	2200	0.02	1	8	0.5	2.800145	1.092026	1.04779	0.4582	3.4461
15	10	2	1	1800	0.03	1	8	0.5	2.645218	0.857510	1.13973	0.3399	2.2284
34	11	2	1	2600	0.03	0.75	8	0.3	3.224135	1.079548	1.27110	0.1871	2.2477
4	12	2	1	2600	0.04	0.75	8	0.5	4.123615	1.671637	1.75208	0.5870	3.5727
18	13	2	1	2200	0.03	0.75	10	0.3	3.645597	1.998985	2.63707	1.5529	9.4192

24	14	2	1	2200	0.04	1	8	0.5	3.551423	1.198985	1.40086	0.1250	0.9836
36	15	2	1	2600	0.03	0.75	8	0.7	1.802213	0.457154	1.15747	0.7034	4.7531
40	16	2	1	2200	0.04	0.75	10	0.5	4.372565	1.716407	2.31562	0.9065	7.0041
41	17	0	1	2200	0.03	0.75	8	0.5	1.956421	0.499828	0.88163	0.3355	2.2688
16	18	2	1	2600	0.03	1	8	0.5	3.717564	1.514183	1.39050	0.5358	3.8651
17	19	2	1	2200	0.03	0.75	6	0.3	3.925462	1.679722	2.23451	0.3941	3.3207
14	20	2	1	2600	0.03	0.5	8	0.5	1.654879	0.372722	1.00254	0.3594	2.6151
12	21	2	1	2200	0.04	0.75	8	0.7	2.598462	0.930029	1.41123	0.7066	4.5923
43	22	0	1	2200	0.03	0.75	8	0.5	2.315461	0.543755	1.01366	0.3343	2.6483
26	23	2	1	2600	0.03	0.75	6	0.5	1.985467	0.380859	0.79558	0.2636	3.0462
27	24	2	1	1800	0.03	0.75	10	0.5	3.745693	1.406368	1.93099	1.2409	8.4823
19	25	2	1	2200	0.03	0.75	6	0.7	2.354826	0.253682	1.03470	0.1624	1.1436
39	26	2	1	2200	0.02	0.75	10	0.5	2.498560	0.946160	1.27930	1.3697	7.7153
33	27	2	1	1800	0.03	0.75	8	0.3	3.796513	1.398615	1.57176	0.2853	2.3759
7	28	2	1	2200	0.03	0.5	10	0.5	3.215467	1.097802	1.74108	1.4342	9.3722
30	29	2	1	2200	0.03	1	8	0.3	3.025646	1.165826	1.19391	0.1714	1.5044
20	30	2	1	2200	0.03	0.75	10	0.7	2.798454	1.000725	1.19735	0.8307	5.0857

29	31	2	1	2200	0.03	0.5	8	0.3	2.659801	0.829011	1.18405	0.3239	2.4849
28	32	2	1	2600	0.03	0.75	10	0.5	4.158712	1.574499	2.19171	1.1647	7.0396
22	33	2	1	2200	0.04	0.5	8	0.5	3.134563	1.032612	1.31375	0.5713	4.2439
42	34	0	1	2200	0.03	0.75	8	0.5	1.997417	0.507057	0.81074	0.3274	2.3260
25	35	2	1	1800	0.03	0.75	6	0.5	1.684569	0.281884	0.69322	0.3411	2.7005
10	36	2	1	2200	0.04	0.75	8	0.3	4.513684	1.720551	1.83535	0.3658	2.6447
37	37	2	1	2200	0.02	0.75	6	0.5	1.146589	0.227195	0.52208	0.3656	2.4068
21	38	2	1	2200	0.02	0.5	8	0.5	1.649135	0.564544	0.79477	0.4490	3.4747
46	39	0	1	2200	0.03	0.75	8	0.5	2.874102	1.082659	1.21834	0.5454	4.0523
44	40	0	1	2200	0.03	0.75	8	0.5	3.403467	1.446147	1.72282	0.4864	3.3468
45	41	0	1	2200	0.03	0.75	8	0.5	2.624108	0.953390	1.09841	0.4017	3.2657
8	42	2	1	2200	0.03	1	10	0.5	3.547120	1.394964	1.87270	0.4917	3.6914
3	43	2	1	1800	0.04	0.75	8	0.5	2.875104	1.082694	1.27557	0.5238	3.5447
5	44	2	1	2200	0.03	0.5	6	0.5	1.521433	0.267643	0.74509	0.3545	2.8648
1	45	2	1	1800	0.02	0.75	8	0.5	2.346361	0.882894	0.91721	0.5266	3.7559
32	46	2	1	2200	0.03	1	8	0.7	1.974016	0.684358	1.03460	0.5196	3.5356

ตารางที่ 3 ผลการทดลองครั้งที่ 3 สำหรับเงื่อนไขการตัดแบบแบบห้วงลโดยการใช้ลมเป่า

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	Spindle speed	Feed rate	Depth of cut	Tool diameter	Air blow pressure	Fx	Fy	Fz	Ra	Rz
38	1	2	1	2200	0.04	0.75	6	0.5	2.746577	0.679972	1.152645	0.1242	0.9857
6	2	2	1	2200	0.03	1	6	0.5	1.979876	0.411368	0.712893	0.3977	3.1695
35	3	2	1	1800	0.03	0.75	8	0.7	2.495686	1.157568	1.263876	1.0390	6.7923
11	4	2	1	2200	0.02	0.75	8	0.7	1.548100	0.750112	0.866570	0.7329	4.1267
2	5	2	1	2600	0.02	0.75	8	0.5	2.245576	0.550905	1.006748	0.2258	1.7178
31	6	2	1	2200	0.03	0.5	8	0.7	2.271084	1.115162	1.240000	0.8293	5.5363
13	7	2	1	1800	0.03	0.5	8	0.5	2.283531	0.768968	1.115826	0.5429	4.1878
9	8	2	1	2200	0.02	0.75	8	0.3	2.028052	0.697889	0.808434	0.1597	1.5301
23	9	2	1	2200	0.02	1	8	0.5	2.880096	1.123206	1.077705	0.4712	3.5445
15	10	2	1	1800	0.03	1	8	0.5	2.429250	0.787499	1.046681	0.3122	2.0464
34	11	2	1	2600	0.03	0.75	8	0.3	3.257393	1.090684	1.284210	0.1890	2.2709
4	12	2	1	2600	0.04	0.75	8	0.5	4.100262	1.662170	1.742158	0.5837	3.5525
18	13	2	1	2200	0.03	0.75	10	0.3	3.387682	1.857562	2.450506	1.4431	8.7528

24	14	2	1	2200	0.04	1	8	0.5	3.799613	1.282776	1.498761	0.1337	1.0524
36	15	2	1	2600	0.03	0.75	8	0.7	1.768013	0.448479	1.135508	0.6900	4.6629
40	16	2	1	2200	0.04	0.75	10	0.5	4.331393	1.700245	2.293820	0.8979	6.9382
41	17	0	1	2200	0.03	0.75	8	0.5	2.288708	0.584721	1.031375	0.3925	2.6541
16	18	2	1	2600	0.03	1	8	0.5	3.725659	1.517481	1.393524	0.5370	3.8735
17	19	2	1	2200	0.03	0.75	6	0.3	3.691426	1.579577	2.101291	0.3706	3.1228
14	20	2	1	2600	0.03	0.5	8	0.5	1.723062	0.388078	1.043845	0.3743	2.7228
12	21	2	1	2200	0.04	0.75	8	0.7	1.868422	0.668736	1.014743	0.5080	3.3021
43	22	0	1	2200	0.03	0.75	8	0.5	2.138799	0.502268	0.936321	0.3087	2.4462
26	23	2	1	2600	0.03	0.75	6	0.5	1.667217	0.319811	0.668056	0.2214	2.5579
27	24	2	1	1800	0.03	0.75	10	0.5	4.249896	1.595678	2.190913	1.4079	9.6241
19	25	2	1	2200	0.03	0.75	6	0.7	1.979308	0.213228	0.869701	0.1365	0.9613
39	26	2	1	2200	0.02	0.75	10	0.5	2.349877	0.889857	1.203176	1.2882	7.2562
33	27	2	1	1800	0.03	0.75	8	0.3	3.007340	1.107888	1.245045	0.2260	1.8820
7	28	2	1	2200	0.03	0.5	10	0.5	2.876506	0.982076	1.557541	1.2830	8.3842
30	29	2	1	2200	0.03	1	8	0.3	4.233019	1.631045	1.670334	0.2398	2.1048
20	30	2	1	2200	0.03	0.75	10	0.7	2.760307	0.987084	1.181027	0.8193	5.0164

29	31	2	1	2200	0.03	0.5	8	0.3	2.449727	0.763535	1.090530	0.2983	2.2887
28	32	2	1	2600	0.03	0.75	10	0.5	4.262498	1.613793	2.246410	1.1937	7.2153
22	33	2	1	2200	0.04	0.5	8	0.5	3.089935	1.017911	1.295049	0.5631	4.1834
42	34	0	1	2200	0.03	0.75	8	0.5	2.680885	0.680559	1.088151	0.4394	3.1219
25	35	2	1	1800	0.03	0.75	6	0.5	1.716784	0.287275	0.706482	0.3477	2.7521
10	36	2	1	2200	0.04	0.75	8	0.3	4.375106	1.667727	1.779003	0.3546	2.5635
37	37	2	1	2200	0.02	0.75	6	0.5	1.196404	0.237066	0.544764	0.3815	2.5114
21	38	2	1	2200	0.02	0.5	8	0.5	1.397039	0.478245	0.673279	0.3804	2.9435
46	39	0	1	2200	0.03	0.75	8	0.5	2.783492	1.048527	1.179934	0.5282	3.9246
44	40	0	1	2200	0.03	0.75	8	0.5	3.421541	1.453827	1.731969	0.4890	3.3646
45	41	0	1	2200	0.03	0.75	8	0.5	2.627591	0.954656	1.099872	0.4023	3.2700
8	42	2	1	2200	0.03	1	10	0.5	3.917540	1.540638	2.068259	0.5430	4.0769
3	43	2	1	1800	0.04	0.75	8	0.5	2.836441	1.068135	1.258413	0.5167	3.4971
5	44	2	1	2200	0.03	0.5	6	0.5	1.309685	0.230394	0.641387	0.3052	2.4661
1	45	2	1	1800	0.02	0.75	8	0.5	2.281738	0.858577	0.891947	0.5121	3.6524
32	46	2	1	2200	0.03	1	8	0.7	1.913504	0.663380	1.002887	0.5036	3.4272

ตารางที่ 4 ผลการทดลองเฉลี่ยสำหรับเงื่อนไขการตัดแบบแบบหัวบอลโดยการใช้ลมเป่า

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	Spindle speed	Feed rate	Depth of cut	Tool diameter	Air blow pressure	Fx	Fy	Fz	Ra	Rz
38	1	2	1	2200	0.04	0.75	6	0.5	2.596985	0.642937	1.089867	0.1174	0.932
6	2	2	1	2200	0.03	1	6	0.5	2.224842	0.462266	0.801098	0.4469	3.5616
35	3	2	1	1800	0.03	0.75	8	0.7	2.26543	1.050769	1.147269	0.9431	6.1656
11	4	2	1	2200	0.02	0.75	8	0.7	2.196776	0.870604	1.00577	0.8506	4.7896
2	5	2	1	2600	0.02	0.75	8	0.5	1.947218	0.477709	0.872986	0.1958	1.4896
31	6	2	1	2200	0.03	0.5	8	0.7	2.295896	1.127345	1.253547	0.8384	5.5968
13	7	2	1	1800	0.03	0.5	8	0.5	2.310245	0.777964	1.12888	0.5493	4.2368
9	8	2	1	2200	0.02	0.75	8	0.3	2.163069	0.744351	0.862256	0.1703	1.632
23	9	2	1	2200	0.02	1	8	0.5	2.841985	1.108343	1.063444	0.465	3.4976
15	10	2	1	1800	0.03	1	8	0.5	2.472877	0.801641	1.065478	0.3178	3.0832
34	11	2	1	2600	0.03	0.75	8	0.3	3.145385	1.05318	1.240052	0.1825	2.1928
4	12	2	1	2600	0.04	0.75	8	0.5	3.896576	1.5796	1.655613	0.5547	4.376
18	13	2	1	2200	0.03	0.75	10	0.3	3.469416	1.90238	2.50963	0.8034	5.964

24	14	2	1	2200	0.04	1	8	0.5	3.532585	1.192625	1.393431	0.1243	0.9784
36	15	2	1	2600	0.03	0.75	8	0.7	2.117884	0.461129	1.167537	0.7095	4.7944
40	16	2	1	2200	0.04	0.75	10	0.5	4.352025	1.708344	2.304746	0.9022	6.9712
41	17	0	1	2200	0.03	0.75	8	0.5	2.030251	0.51869	0.914905	0.3482	2.3544
16	18	2	1	2600	0.03	1	8	0.5	3.719563	1.514998	1.391244	0.5361	3.8672
17	19	2	1	2200	0.03	0.75	6	0.3	2.9142	1.674895	2.228092	0.393	3.3112
14	20	2	1	2600	0.03	0.5	8	0.5	2.027866	0.38916	1.046756	0.3753	2.7304
12	21	2	1	2200	0.04	0.75	8	0.7	2.27462	0.814121	1.23535	0.6185	4.02
43	22	0	1	2200	0.03	0.75	8	0.5	2.15994	0.507233	0.945576	0.3118	2.4704
26	23	2	1	2600	0.03	0.75	6	0.5	1.855757	0.355978	0.743604	0.2464	2.8472
27	24	2	1	1800	0.03	0.75	10	0.5	3.847461	1.444578	1.983449	1.2746	8.7128
19	25	2	1	2200	0.03	0.75	6	0.7	2.0266	0.229096	0.934424	0.2072	1.0328
39	26	2	1	2200	0.02	0.75	10	0.5	2.567711	0.972347	1.31471	1.0135	7.9288
33	27	2	1	1800	0.03	0.75	8	0.3	3.397805	1.251733	1.406698	0.2553	2.1264
7	28	2	1	2200	0.03	0.5	10	0.5	2.915129	0.995263	1.578455	1.3002	8.4968
30	29	2	1	2200	0.03	1	8	0.3	3.435081	1.323588	1.355471	0.1946	1.708
20	30	2	1	2200	0.03	0.75	10	0.7	2.754801	0.985115	1.178671	0.8989	5.0064

29	31	2	1	2200	0.03	0.5	8	0.3	2.705058	0.843117	1.204194	0.3294	2.5272
28	32	2	1	2600	0.03	0.75	10	0.5	4.063118	1.651888	2.299439	1.2219	8.3856
22	33	2	1	2200	0.04	0.5	8	0.5	3.126992	1.030118	1.310581	0.5699	4.2336
42	34	0	1	2200	0.03	0.75	8	0.5	2.190116	0.555974	0.888951	0.359	2.5504
25	35	2	1	1800	0.03	0.75	6	0.5	1.989769	0.282754	0.695364	0.3422	2.7088
10	36	2	1	2200	0.04	0.75	8	0.3	4.104643	1.678986	1.791014	0.357	2.5808
37	37	2	1	2200	0.02	0.75	6	0.5	1.946013	0.227081	0.521819	0.3654	2.4056
21	38	2	1	2200	0.02	0.5	8	0.5	1.914962	0.518613	0.73011	0.4125	3.192
46	39	0	1	2200	0.03	0.75	8	0.5	2.801241	1.055213	1.187458	0.5316	3.9496
44	40	0	1	2200	0.03	0.75	8	0.5	3.2112	1.449413	1.726711	0.4875	3.3544
45	41	0	1	2200	0.03	0.75	8	0.5	2.599615	0.944492	1.088161	0.398	2.9352
8	42	2	1	2200	0.03	1	10	0.5	3.820604	1.502516	2.017082	0.5296	3.976
3	43	2	1	1800	0.04	0.75	8	0.5	2.986763	1.124742	1.325105	0.5441	3.6824
5	44	2	1	2200	0.03	0.5	6	0.5	1.439425	0.253217	0.704924	0.3354	2.7104
1	45	2	1	1800	0.02	0.75	8	0.5	2.425412	0.912639	0.94811	0.5443	3.8824
32	46	2	1	2200	0.03	1	8	0.7	2.034533	0.705338	1.066319	0.5355	3.644

ภาคผนวก ข

ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของการทดลอง

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ผลต่อความขรุขระผิวชิ้นงานก่อนตัดปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญ

Response Surface Regression: Ra versus Cutting speed, Feed rate, Depth of cut, Tool diameter, Air blow pressure						
The analysis was done using coded units.						
Estimated Regression Coefficients for Ra						
Term	Coef	SE Coef	T	P		
Constant	0.406017	0.06391	6.353	0.000		
Spindle speed	-0.046781	0.03914	-1.195	0.243		
Feed rate	-0.014331	0.03914	-0.366	0.717		
Depth of cut	-0.097537	0.03914	-2.492	0.020		
Tool diameter	0.343150	0.03914	8.768	0.000		
Air blow pressure	0.182263	0.03914	4.657	0.000		
Spindle speed*Spindle speed	0.080317	0.05299	1.516	0.142		
Feed rate*Feed rate	-0.001967	0.05299	-0.037	0.971		
Depth of cut*Depth of cut	0.002592	0.05299	0.049	0.961		
Tool diameter*Tool diameter	0.214092	0.05299	4.040	0.000		
Airblowpressure*Airblowpressure	0.038175	0.05299	0.720	0.478		
Spindle speed*Feed rate	0.089775	0.07828	1.147	0.262		
Spindle speed*Depth of cut	0.098075	0.07828	1.253	0.222		
Spindle speed*Tool diameter	0.010775	0.07828	0.138	0.892		
Spindle speed*Air blow pressure	-0.040200	0.07828	-0.514	0.612		
Feed rate*Depth of cut	-0.124525	0.07828	-1.591	0.124		
Feed rate*Tool diameter	0.034175	0.07828	0.437	0.666		
Feed rate*Air blow pressure	-0.104700	0.07828	-1.338	0.193		
Depth of cut*Tool diameter	-0.220525	0.07828	-2.817	0.009		
Depth of cut*Air blow pressure	-0.042025	0.07828	-0.537	0.596		
Tool diameter*Air blow pressure	0.070325	0.07828	0.898	0.378		
S = 0.156550 PRESS = 2.35632						
R-Sq = 85.05% R-Sq(pred) = 42.52% R-Sq(adj) = 73.10%						
Analysis of Variance for Ra						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	20	3.48689	3.48689	0.174344	7.11	0.000
Linear	5	2.60606	2.60606	0.521213	21.27	0.000
Square	5	0.47126	0.47126	0.094253	3.85	0.010
Interaction	10	0.40956	0.40956	0.040956	1.67	0.144
Residual Error	25	0.61270	0.61270	0.024508		
Lack-of-Fit	20	0.57579	0.57579	0.028790	3.90	0.068
Pure Error	5	0.03691	0.03691	0.007381		
Total	45	4.09959				

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์ผลต่อความขรุขระผิวชิ้นงานหลังตัดปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญ

Response Surface Regression: Ra versus Cutting speed, Feed rate, Depth of cut, Tool diameter, Air blow pressure

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for Ra

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.40637	0.03955	10.274	0.000
Spindle speed	-0.04678	0.03700	-1.264	0.217
Feed rate	-0.01433	0.03700	-0.387	0.701
Depth of cut	-0.09754	0.03700	-2.636	0.014
Tool diameter	0.34315	0.03700	9.274	0.000
Air blow pressure	0.18226	0.03700	4.926	0.000
Spindle speed*Cutting speed	0.08018	0.04708	1.703	0.100
Tool diameter*Tool diameter	0.21396	0.04708	4.545	0.000
Air blow pressure*Air blow pressure	0.03804	0.04708	0.808	0.426
Spindle speed*Feed rate	0.08978	0.07400	1.213	0.235
Spindle speed*Depth of cut	0.09808	0.07400	1.325	0.196
Spindle speed*Air blow pressure	-0.04020	0.07400	-0.543	0.591
Feed rate*Depth of cut	-0.12453	0.07400	-1.683	0.104
Feed rate*Tool diameter	0.03418	0.07400	0.462	0.648
Feed rate*Air blow pressure	-0.10470	0.07400	-1.415	0.168
Depth of cut*Tool diameter	-0.22053	0.07400	-2.980	0.006
Depth of cut*Air blow pressure	-0.04203	0.07400	-0.568	0.575
Tool diameter*Air blow pressure	0.07032	0.07400	0.950	0.350

S = 0.147997 PRESS = 1.97576

R-Sq = 85.04% R-Sq(pred) = 51.81% R-Sq(adj) = 75.96%

Analysis of Variance for Ra

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	17	3.48630	3.48630	0.205076	9.36	0.000
Linear	5	2.60606	2.60606	0.521213	23.80	0.000
Square	3	0.47114	0.47114	0.157046	7.17	0.001
Interaction	9	0.40910	0.40910	0.045455	2.08	0.068
Residual Error	28	0.61329	0.61329	0.021903		
Lack-of-Fit	23	0.57639	0.57639	0.025060	3.40	0.089
Pure Error	5	0.03691	0.03691	0.007381		
Total	45	4.09959				

ตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์ผลตบแรงตัดในแนวแกน X ก่อนตัดปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญ

Response Surface Regression: Fx versus Cutting speed, Feed rate, Depth of cut, Tool diameter, Air blow pressure						
The analysis was done using coded units.						
Estimated Regression Coefficients for Fx						
Term	Coef	SE Coef	T	P		
Constant	2.49873	0.13945	17.919	0.000		
Spindle speed	0.06735	0.08539	0.789	0.438		
Feed rate	0.55425	0.08539	6.490	0.000		
Depth of cut	0.33416	0.08539	3.913	0.001		
Tool diameter	0.67479	0.08539	7.902	0.000		
Air blow pressure	-0.46051	0.08539	-5.393	0.000		
Spindle speed* Spindle speed	0.16217	0.11562	1.403			
0.173						
Feed rate*Feed rate	0.19593	0.11562	1.695	0.103		
Depth of cut*Depth of cut	0.02454	0.11562	0.212	0.834		
Tool diameter*Tool diameter	0.18839	0.11562	1.629	0.116		
Air blow pressure*Air blow pressure	0.06484	0.11562	0.561	0.580		
Spindle speed*Feed rate	0.34700	0.17079	2.032	0.053		
Spindle speed*Depth of cut	0.38227	0.17079	2.238	0.034		
Spindle speed*Tool diameter	0.08742	0.17079	0.512	0.613		
Spindle speed*Air blow pressure	0.02622	0.17079	0.154	0.879		
Feed rate*Depth of cut	-0.13036	0.17079	-0.763	0.452		
Feed rate*Tool diameter	0.28334	0.17079	1.659	0.110		
Feed rate*Air blow pressure	-0.46593	0.17079	-2.728	0.011		
Depth of cut*Tool diameter	0.03001	0.17079	0.176	0.862		
Depth of cut*Air blow pressure	-0.24785	0.17079	-1.451	0.159		
Tool diameter*Air blow pressure	0.04325	0.17079	0.253	0.802		
S = 0.341579 PRESS = 9.00827						
R-Sq = 87.65% R-Sq(pred) = 61.85% R-Sq(adj) = 77.76%						
Analysis of Variance for Fx						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	20	20.6935	20.6935	1.03468	8.87	0.000
Linear	5	17.4529	17.4529	3.49057	29.92	0.000
Square	5	0.6270	0.6270	0.12539	1.07	0.398
Interaction	10	2.6137	2.6137	0.26137	2.24	0.050
Residual Error	25	2.9169	2.9169	0.11668		
Lack-of-Fit	20	1.8781	1.8781	0.09390	0.45	0.907
Pure Error	5	1.0388	1.0388	0.20776		
Total	45	23.6104				

ตารางที่ 8 ผลการวิเคราะห์ผลตบแรงตัดในแนวแกน X หลังตัดปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญ

Response Surface Regression: Fx versus Cutting speed, Feed rate, Depth of cut, Tool diameter, Air blow pressure

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for Fx

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	2.49873	0.13208	18.918	0.000
Spindle speed	0.06735	0.08088	0.833	0.412
Feed rate	0.55425	0.08088	6.853	0.000
Depth of cut	0.33416	0.08088	4.131	0.000
Tool diameter	0.67479	0.08088	8.343	0.000
Air blow pressure	-0.46051	0.08088	-5.694	0.000
Spindle speed*Cutting speed	0.16217	0.10951	1.481	0.150
Feed rate*Feed rate	0.19593	0.10951	1.789	0.084
Depth of cut*Depth of cut	0.02454	0.10951	0.224	0.824
Tool diameter*Tool diameter	0.18839	0.10951	1.720	0.096
Air blow pressure*Air blow pressure	0.06484	0.10951	0.592	0.559
Spindle speed*Feed rate	0.34700	0.16176	2.145	0.041
Spindle speed*Depth of cut	0.38227	0.16176	2.363	0.025
Spindle speed*Tool diameter	0.08742	0.16176	0.540	0.593
Feed rate*Depth of cut	-0.13036	0.16176	-0.806	0.427
Feed rate*Tool diameter	0.28334	0.16176	1.752	0.091
Feed rate*Air blow pressure	-0.46593	0.16176	-2.880	0.008
Depth of cut*Air blow pressure	-0.24785	0.16176	-1.532	0.137

S = 0.323526 PRESS = 7.31074

R-Sq = 87.59% R-Sq(pred) = 69.04% R-Sq(adj) = 80.05%

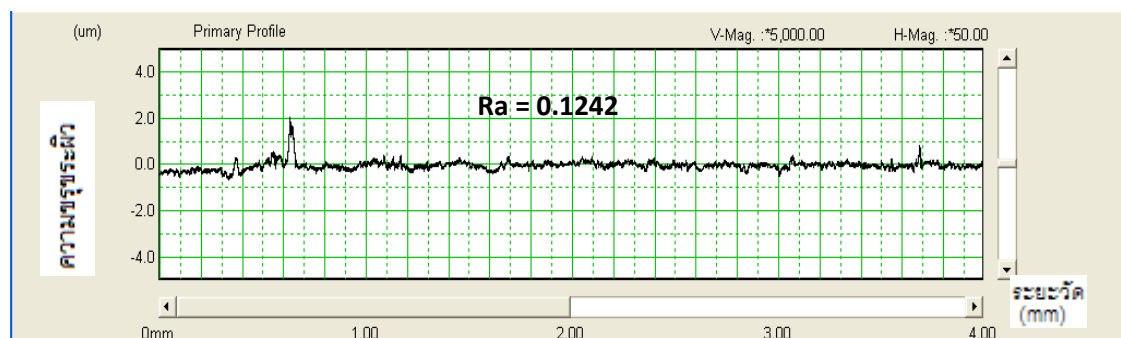
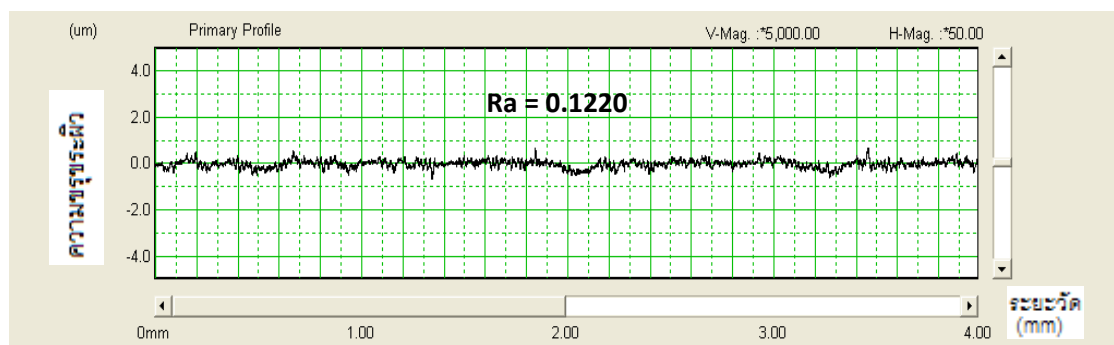
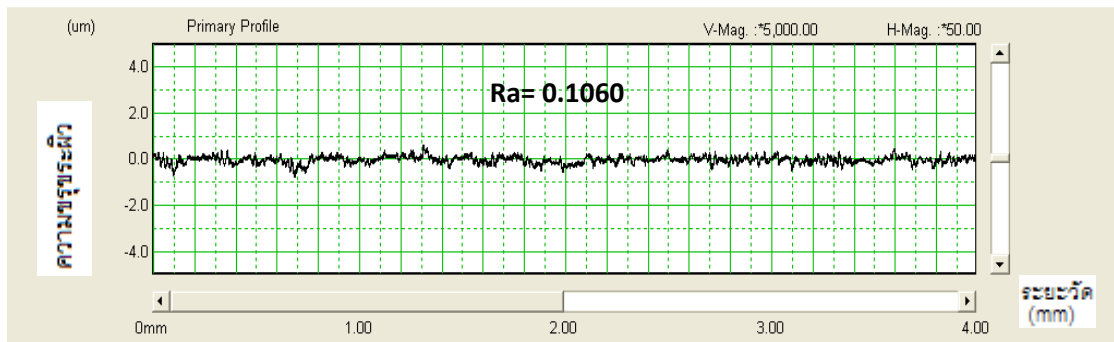
Analysis of Variance for Fx

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	17	20.6797	20.6797	1.21645	11.62	0.000
Linear	5	17.4529	17.4529	3.49057	33.35	0.000
Square	5	0.6270	0.6270	0.12539	1.20	0.336
Interaction	7	2.5999	2.5999	0.37141	3.55	0.007
Residual Error	28	2.9307	2.9307	0.10467		
Lack-of-Fit	23	1.8919	1.8919	0.08226	0.40	0.942
Pure Error	5	1.0388	1.0388	0.20776		
Total	45	23.6104				

ภาคผนวก ค

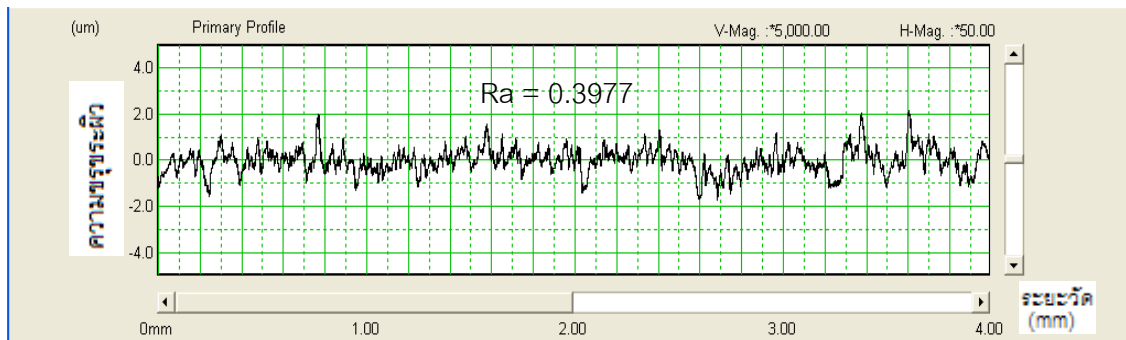
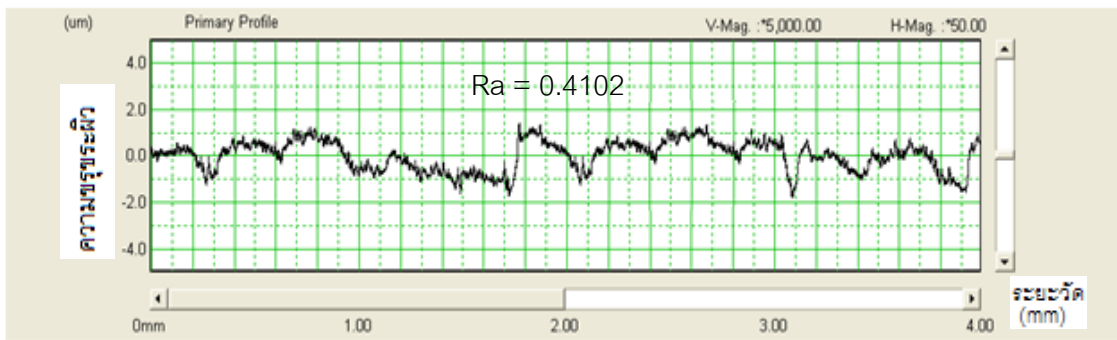
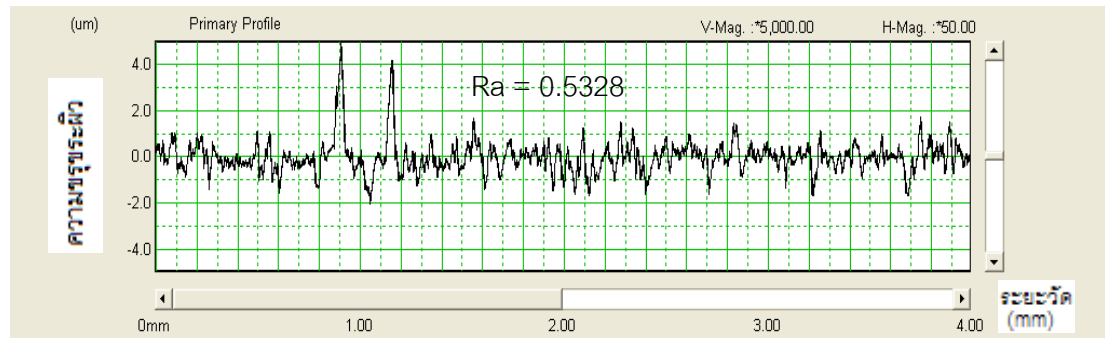
รูปความขรุขระผิวเฉลี่ยของชิ้นงานที่ทำการทดลอง และนำมาหาค่าเฉลี่ยของ
ความขรุขระผิว

ความเร็วรอบตัด 2200 รอบ/นาที, อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตร/รอบ, ความลึกตัด 0.75 มิลลิเมตร, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด 6 มิลลิเมตร และความดันลมเป่า 0.5 เมกกะปาสกาล



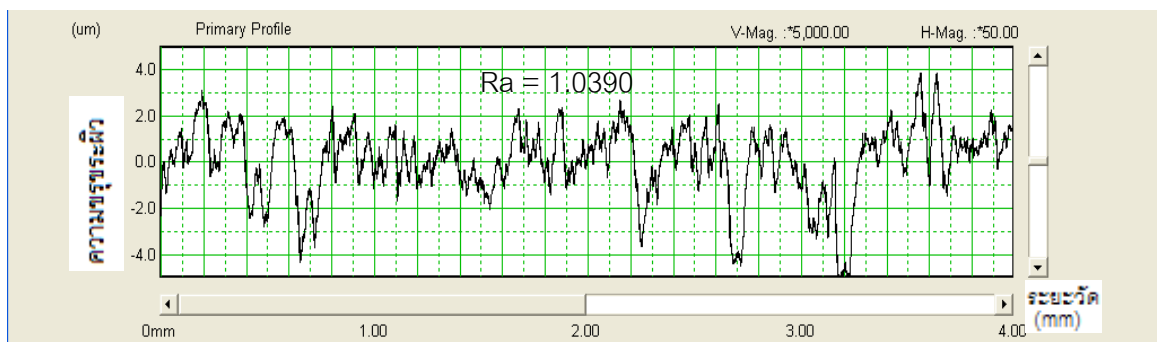
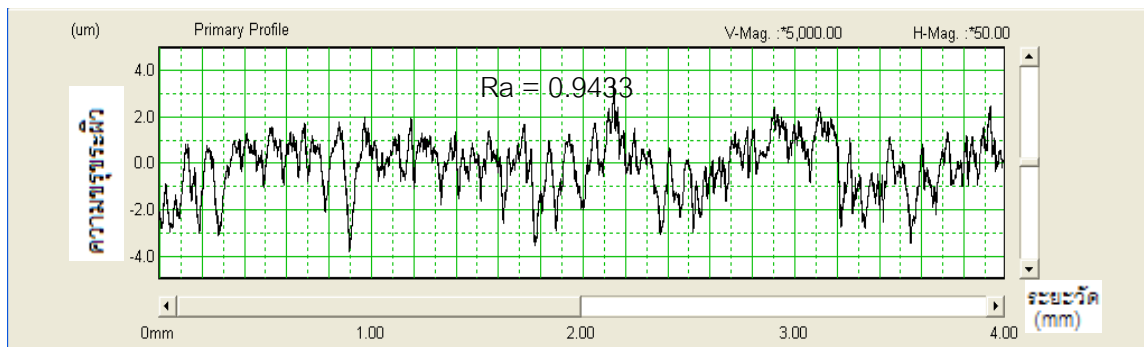
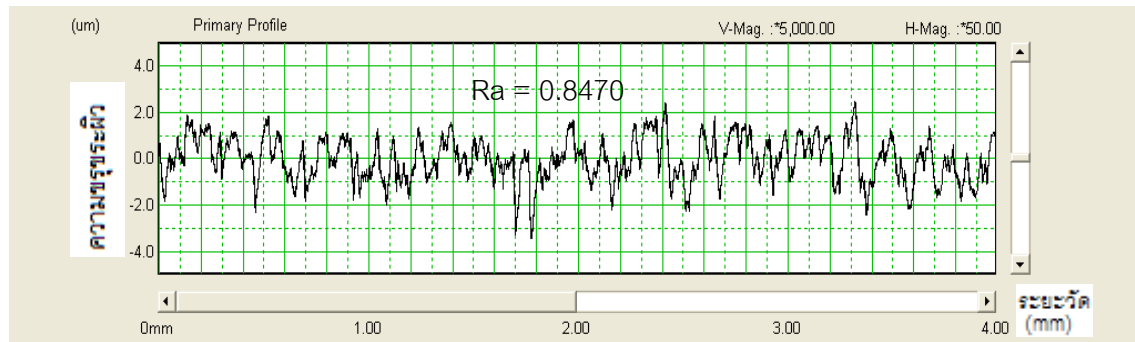
$$Ra_{เฉลี่ย} = (0.1060 + 0.1220 + 0.1242) / 3 = 0.1174$$

ความเร็วรอบตัด 2200 รอบ/นาที, อัตราป้อนตัด 0.015 มิลลิเมตร/รอบ, ความลึกตัด 1 มิลลิเมตร,
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด 6 มิลลิเมตร และความดันลมเป่า 0.5 เมกกะปาสกาล



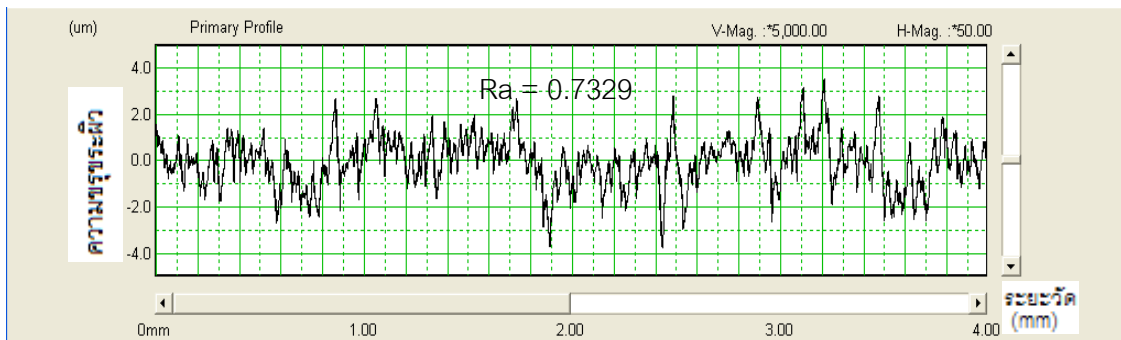
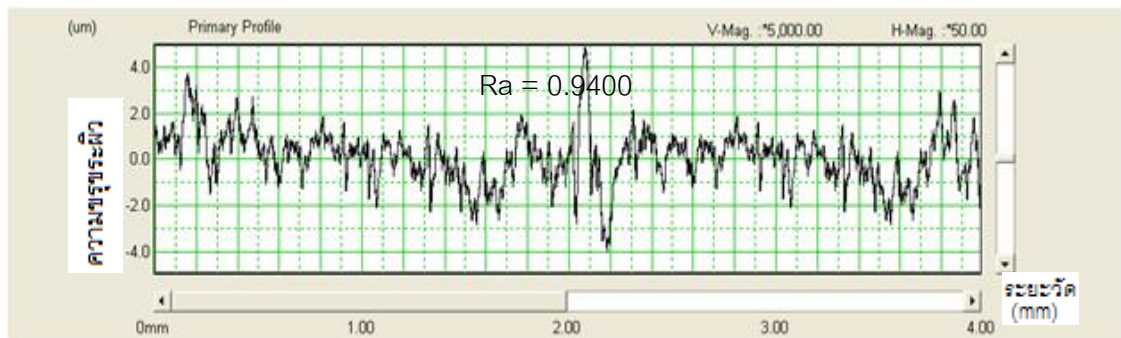
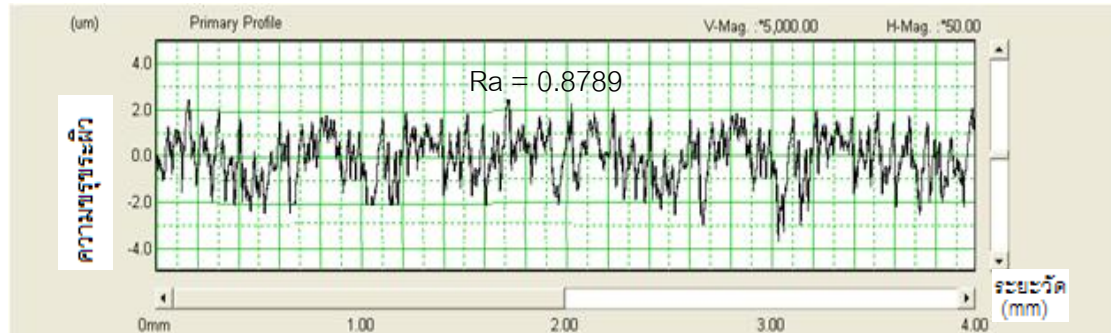
$$Ra_{เฉลี่ย} = (0.5328 + 0.4102 + 0.3977) / 3 = 0.4469$$

ความเร็วรอบตัด 1800 รอบ/นาที, อัตราป้อนตัด 0.015 มิลลิเมตร/รอบ, ความลึกตัด 0.75 มิลลิเมตร, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด 8 มิลลิเมตร และความดันลมเป่า 0.7 เมกะปาสกาล



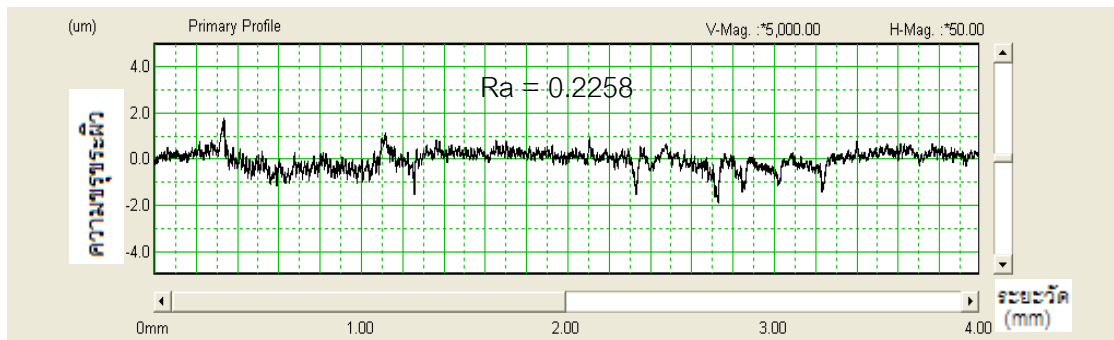
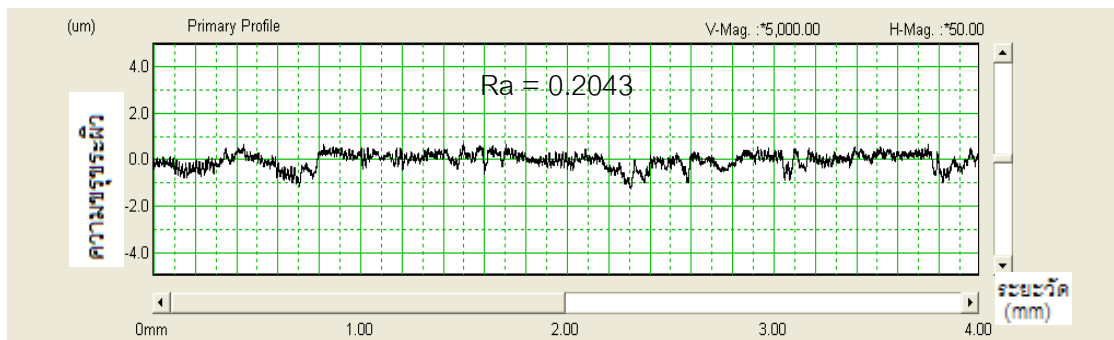
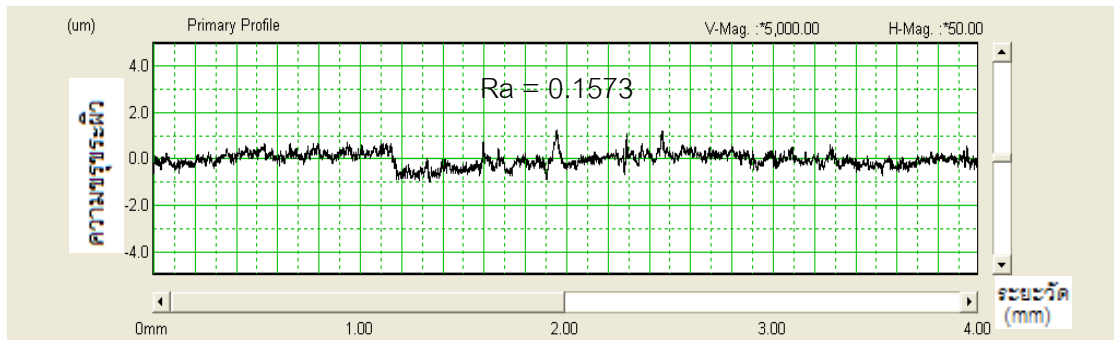
$$Ra_{เฉลี่ย} = (0.8470 + 0.9433 + 1.0390) / 3 = 0.9431$$

ความเร็วรอบตัด 2200 รอบ/นาที, อัตราป้อนตัด 0.01 มิลลิเมตร/รอบ, ความลึกตัด 0.75 มิลลิเมตร, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด 8 มิลลิเมตร และความดันลมเป่า 0.7 เมกกะปาสกาล



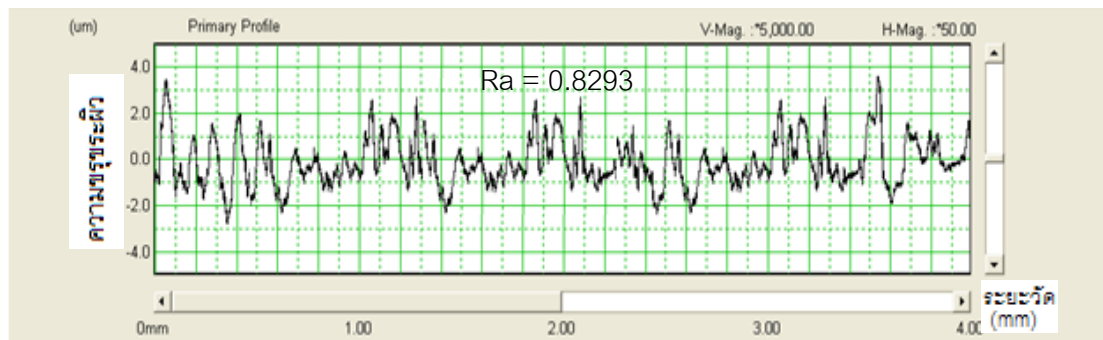
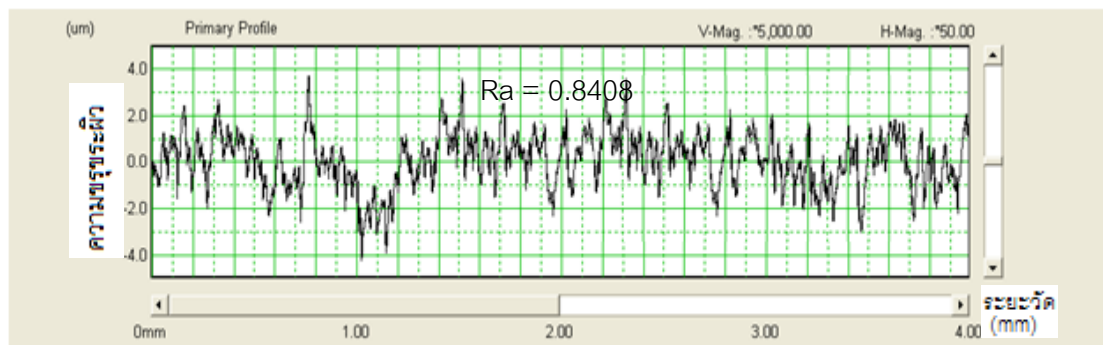
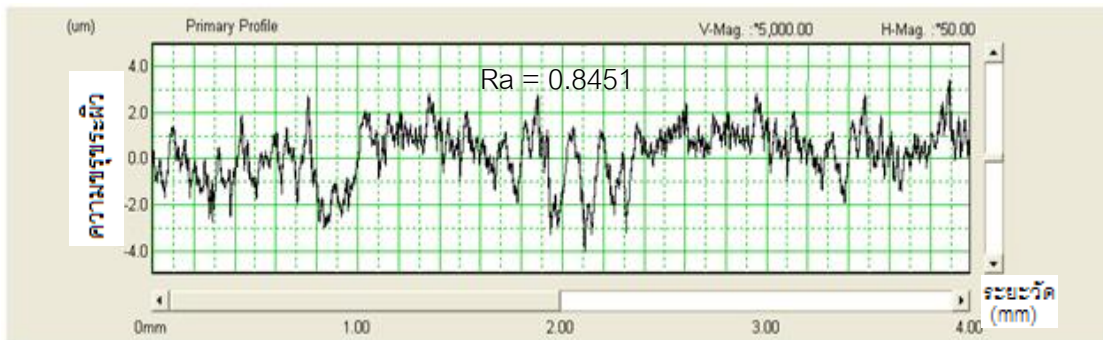
$$Ra_{เฉลี่ย} = (0.8789 + 0.9400 + 0.7329) / 3 = 0.8506$$

ความเร็วรอบตัด 2600 รอบ/นาที, อัตราป้อนตัด 0.01 มิลลิเมตร/รอบ, ความลึกตัด 0.75 มิลลิเมตร, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด 8 มิลลิเมตร และความดันลมเป่า 0.5 เมกกะปาสกาล



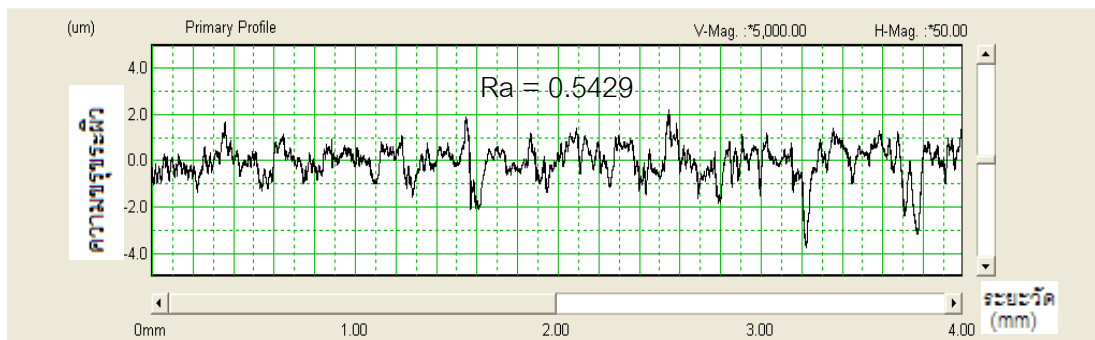
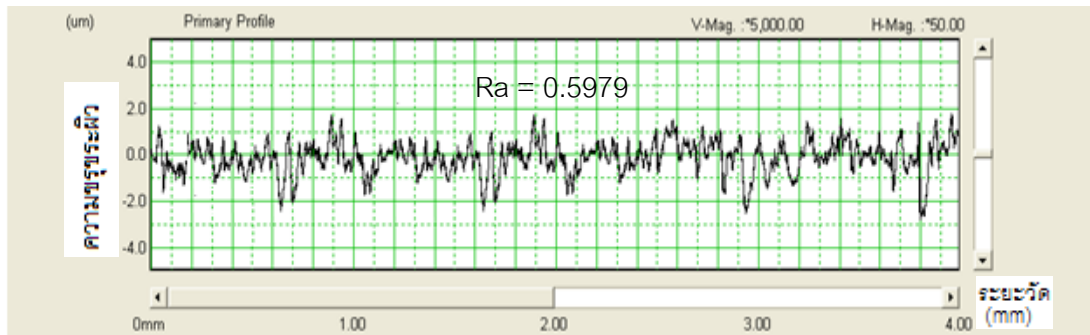
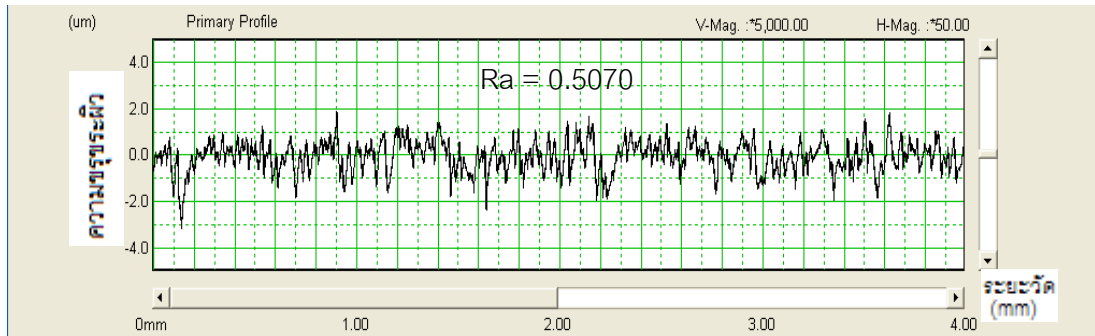
$$Ra_{เฉลี่ย} = (0.1573 + 0.2043 + 0.2258) / 3 = 0.1958$$

ความเร็วรอบตัด 2200 รอบ/นาที, อัตราป้อนตัด 0.015 มิลลิเมตร/รอบ, ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด 8 มิลลิเมตร และความดันลมเป่า 0.7 เมกกะปาสกาล



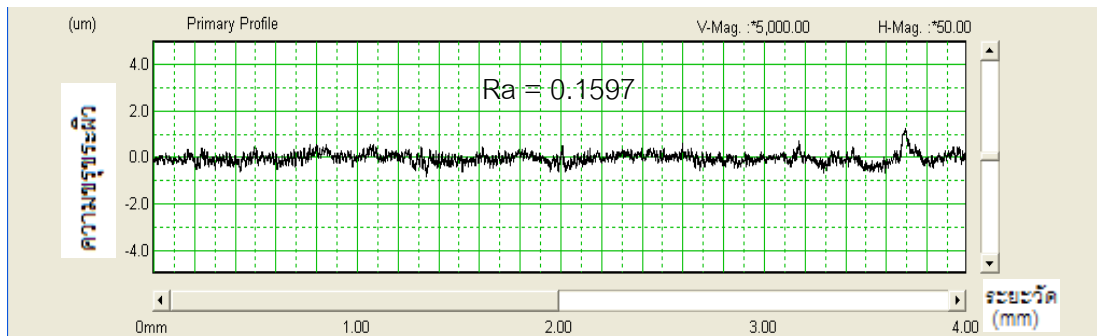
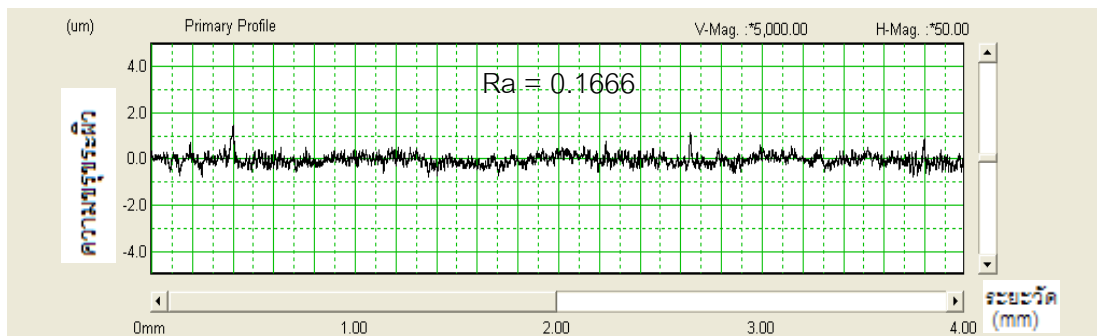
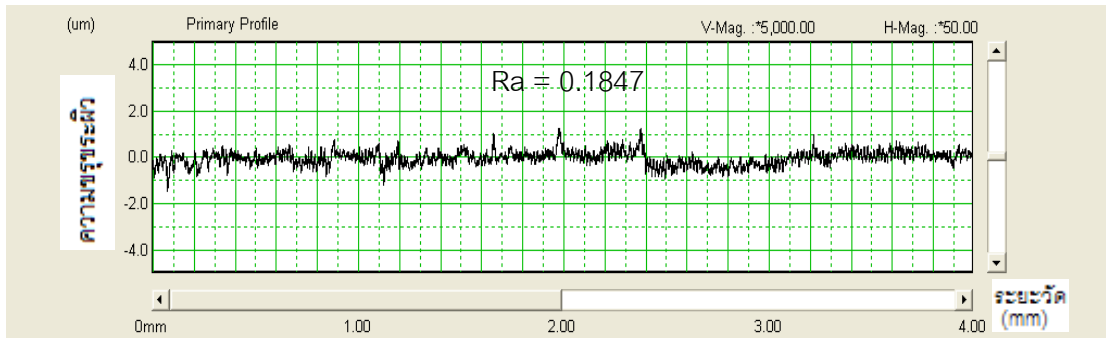
$$Ra_{เฉลี่ย} = (0.8451 + 0.8408 + 0.8293) / 3 = 0.8384$$

ความเร็วรอบตัด 1800 รอบ/นาที, อัตราป้อนตัด 0.015 มิลลิเมตร/รอบ, ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด 8 มิลลิเมตร และความดันลมเป่า 0.7 เมกกะปาสกาล



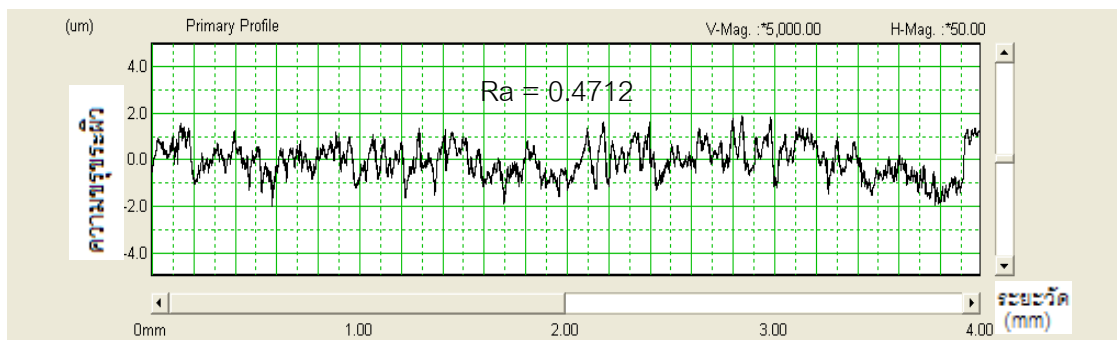
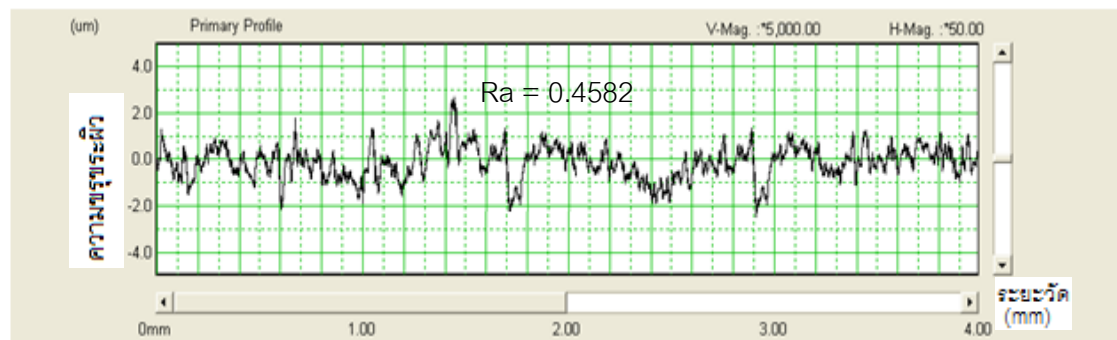
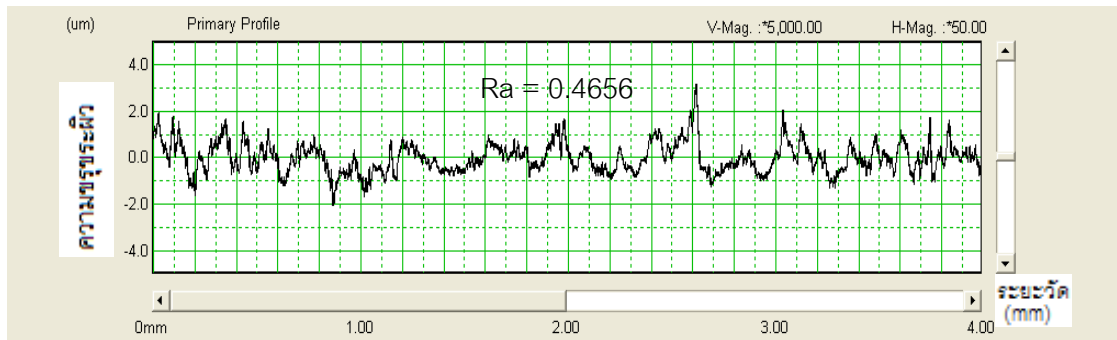
$$Ra_{เฉลี่ย} = (0.5070 + 0.5979 + 0.5429) / 3 = 0.5493$$

ความเร็วรอบตัด 2200 รอบ/นาที, อัตราป้อนตัด 0.01 มิลลิเมตร/รอบ, ความลึกตัด 0.75 มิลลิเมตร, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด 8 มิลลิเมตร และความดันลมเป่า 0.3 เมกกะปาสกาล



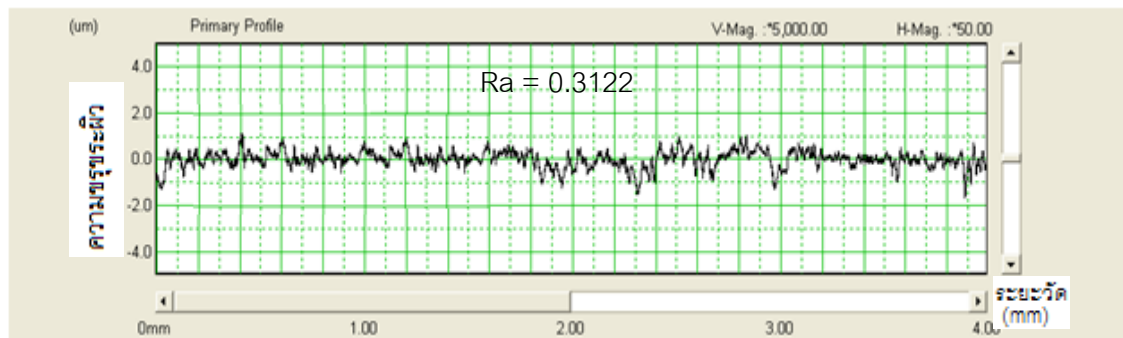
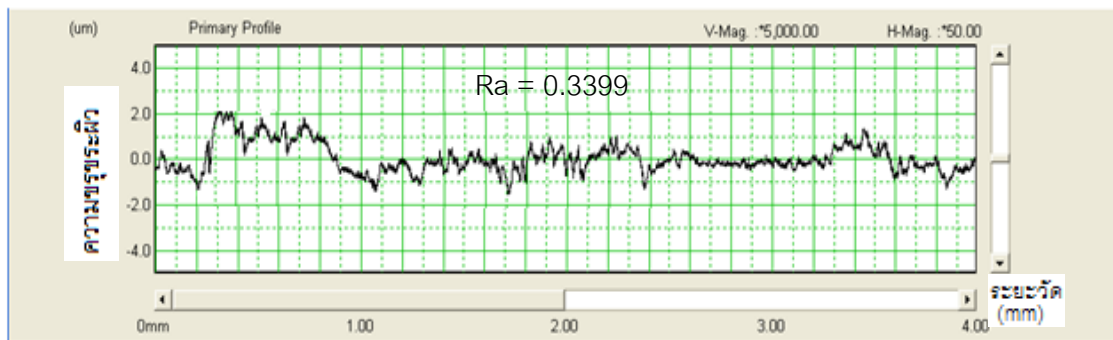
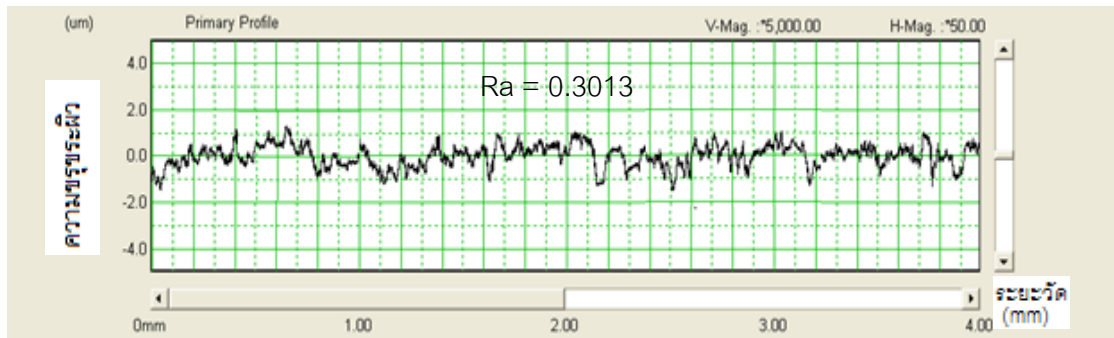
$$Ra_{เฉลี่ย} = (0.1847 + 0.1666 + 0.1597) / 3 = 0.1703$$

ความเร็วรอบตัด 2200 รอบ/นาที, อัตราป้อนตัด 0.01 มิลลิเมตร/รอบ, ความลึกตัด 1 มิลลิเมตร,
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด 8 มิลลิเมตร และความดันลมเป่า 0.5 เมกกะปาสกาล



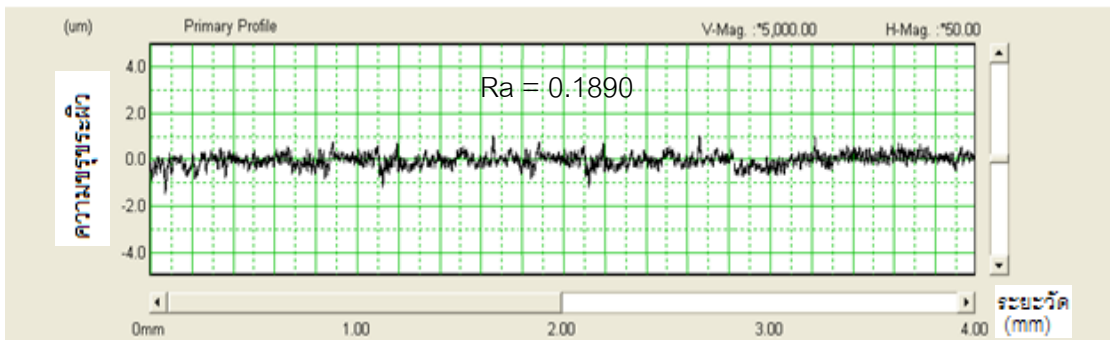
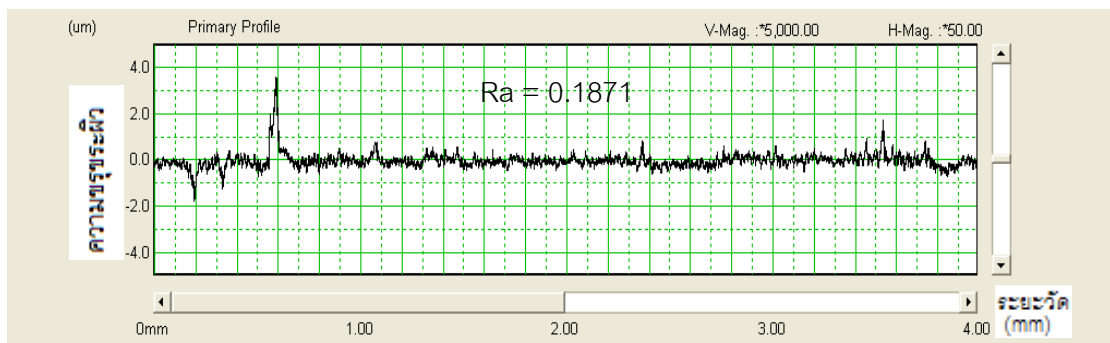
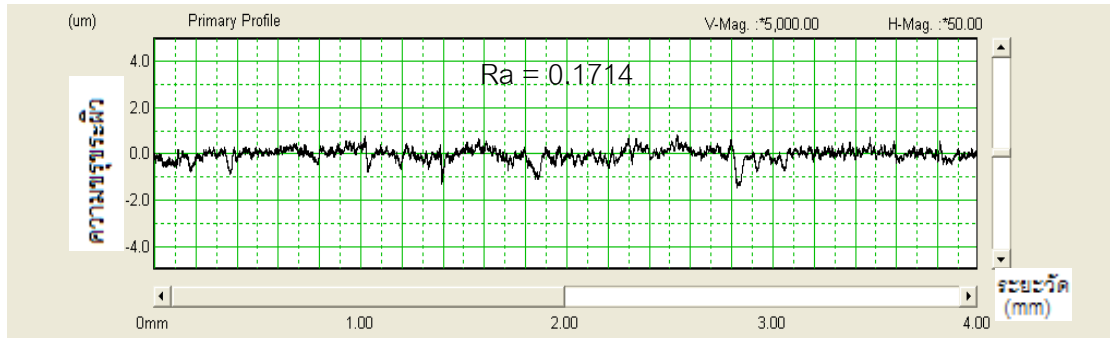
$$Ra_{เฉลี่ย} = (0.4656 + 0.4582 + 0.4712) / 3 = 0.4650$$

ความเร็วรอบตัด 1800 รอบ/นาที, อัตราป้อนตัด 0.015 มิลลิเมตร/รอบ, ความลึกตัด 1 มิลลิเมตร,
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด 8 มิลลิเมตร และความดันลมเป่า 0.5 เมกกะปาสกาล



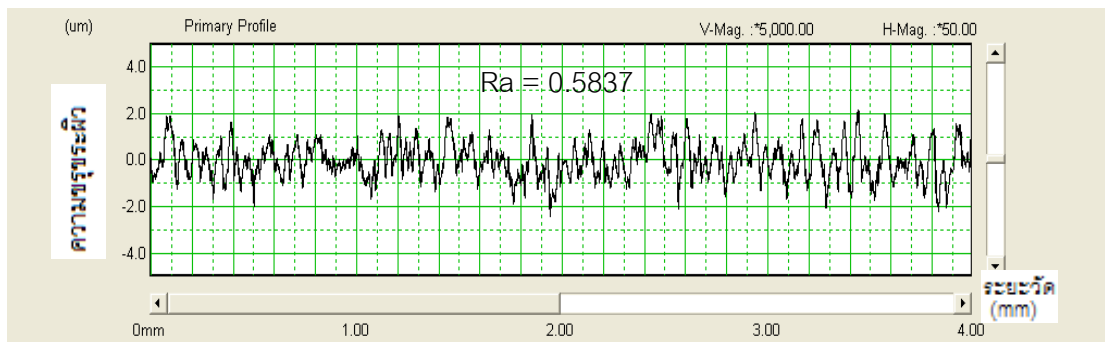
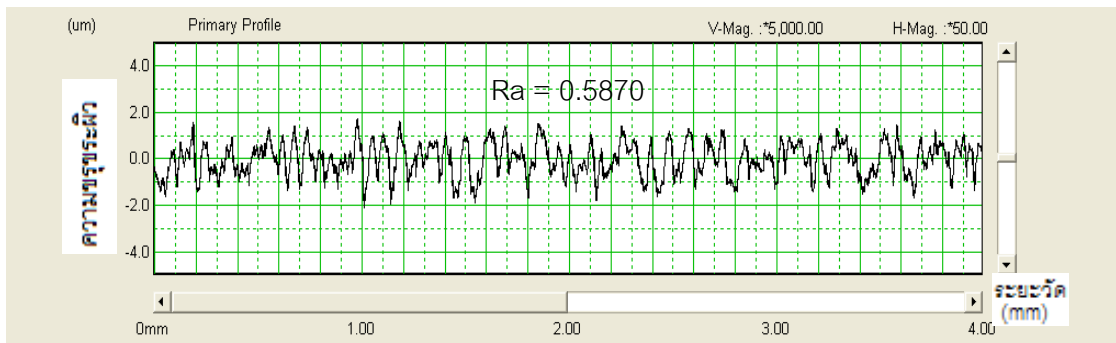
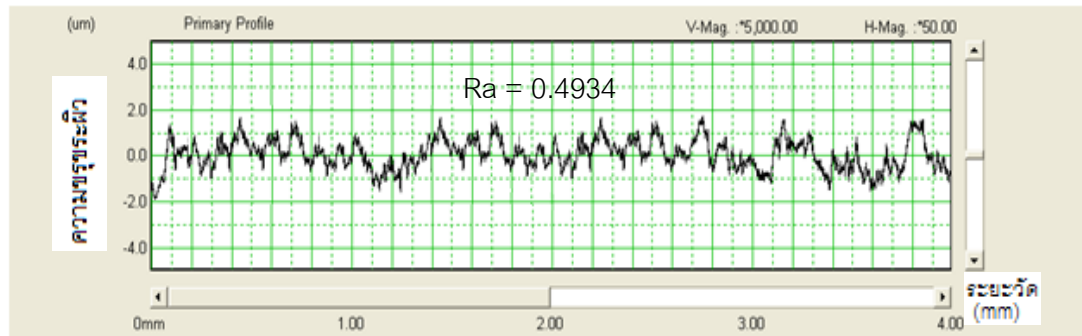
$$Ra_{เฉลี่ย} = (0.3013 + 0.3399 + 0.3122) / 3 = 0.3178$$

ความเร็วรอบตัด 2600 รอบ/นาที, อัตราป้อนตัด 0.015 มิลลิเมตร/รอบ, ความลึกตัด 0.75 มิลลิเมตร, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด 8 มิลลิเมตร และความดันลมเป่า 0.3 เมกกะปาสคาล



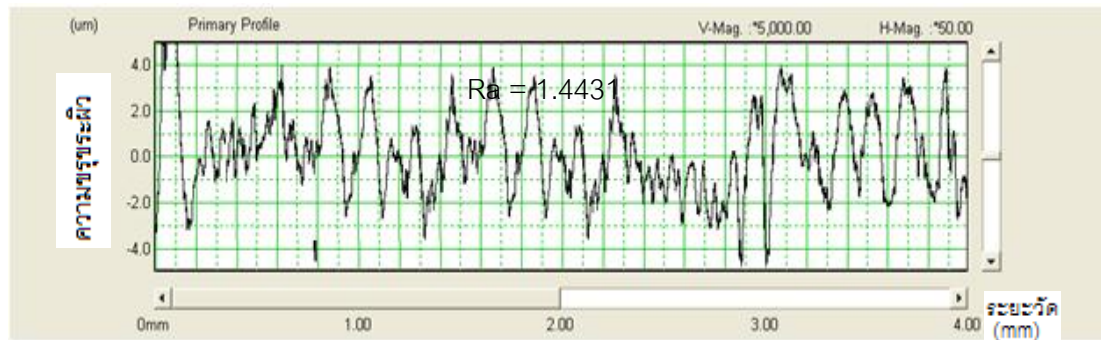
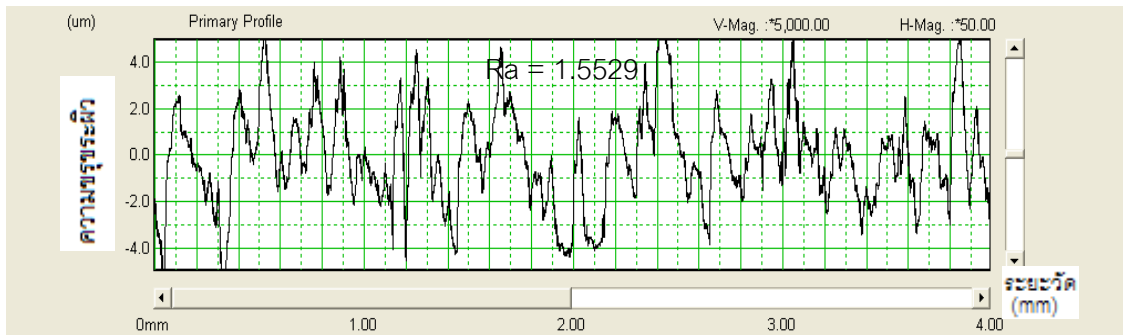
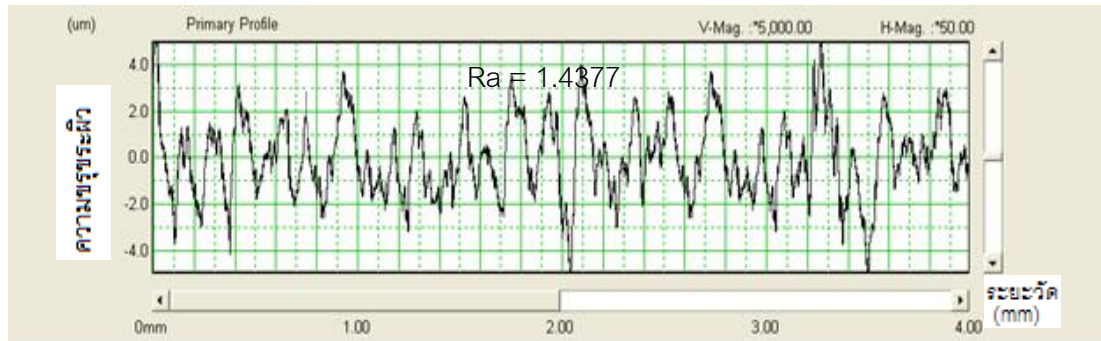
$$Ra_{เฉลี่ย} = (0.1714 + 0.1871 + 0.1890) / 3 = 0.1825$$

ความเร็วรอบตัด 2600 รอบ/นาที, อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตร/รอบ, ความลึกตัด 0.75 มิลลิเมตร, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด 8 มิลลิเมตร และความดันลมเป่า 0.5 เมกกะปาสกาล



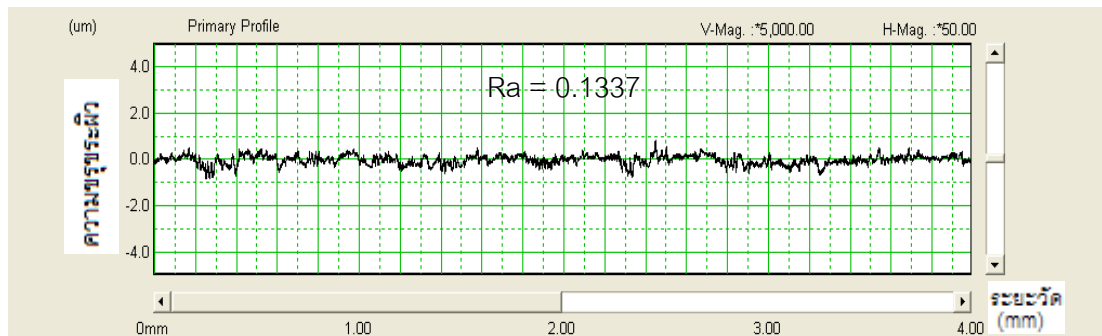
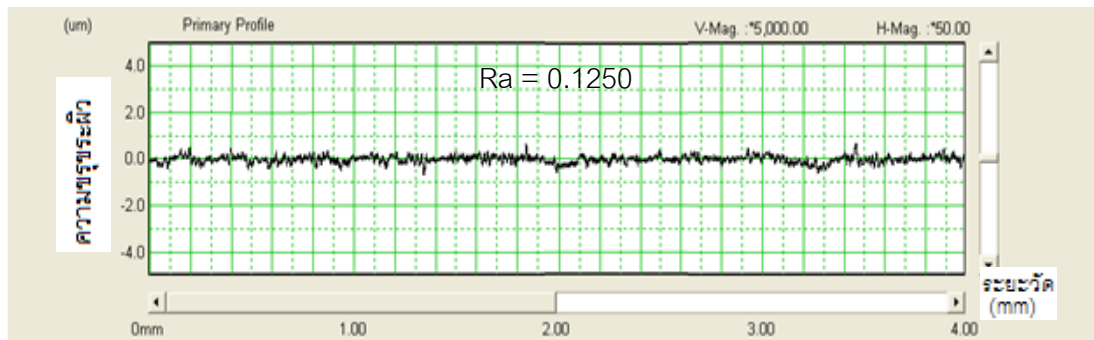
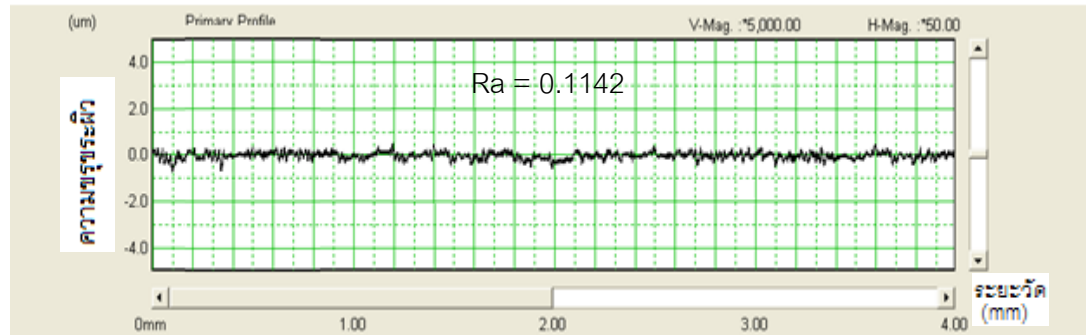
$$Ra_{เฉลี่ย} = (0.4934 + 0.5870 + 0.5837) / 3 = 0.5547$$

ความเร็วรอบตัด 2200 รอบ/นาที, อัตราป้อนตัด 0.015 มิลลิเมตร/รอบ, ความลึกตัด 0.75 มิลลิเมตร, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด 10 มิลลิเมตร และความดันลมเป่า 0.3 เมกกะปาสกาล



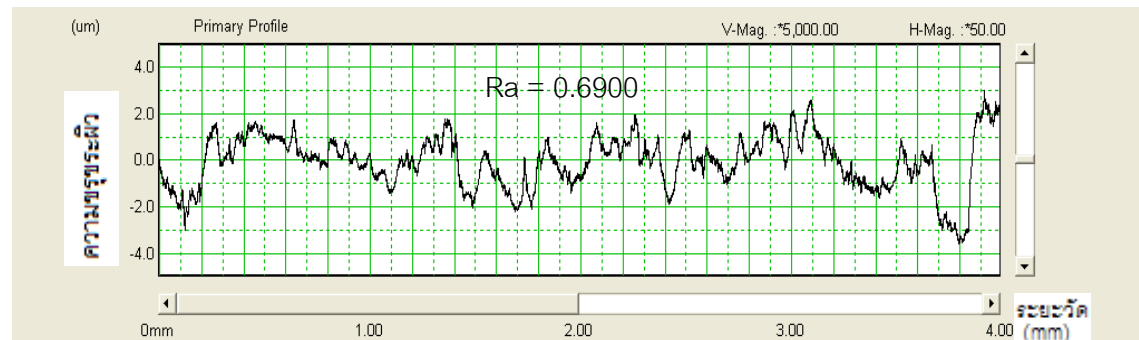
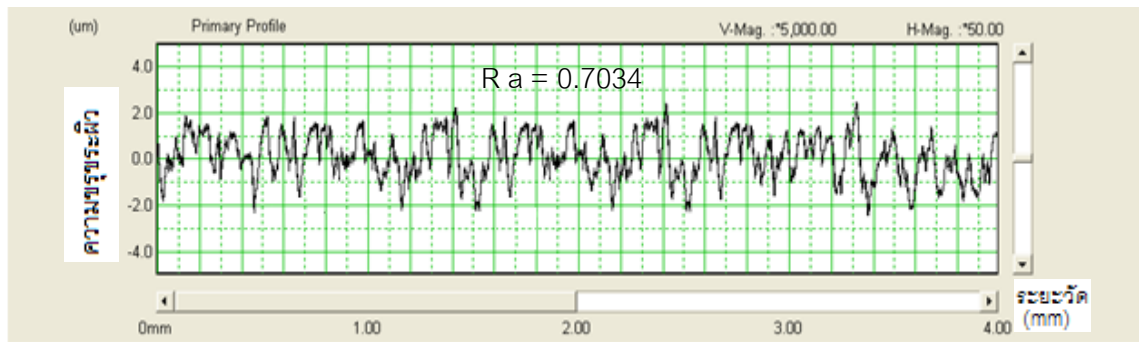
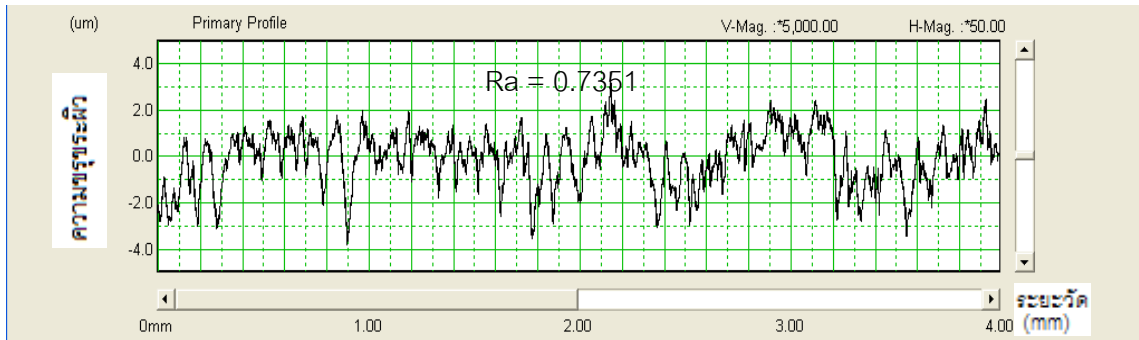
$$Ra_{เฉลี่ย} = (1.4377 + 1.5529 + 1.4431) / 3 = 1.4779$$

ความเร็วรอบตัด 2200 รอบ/นาที, อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตร/รอบ, ความลึกตัด 1 มิลลิเมตร,
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด 8 มิลลิเมตร และความดันลมเป่า 0.5 เมกกะปาสกาล



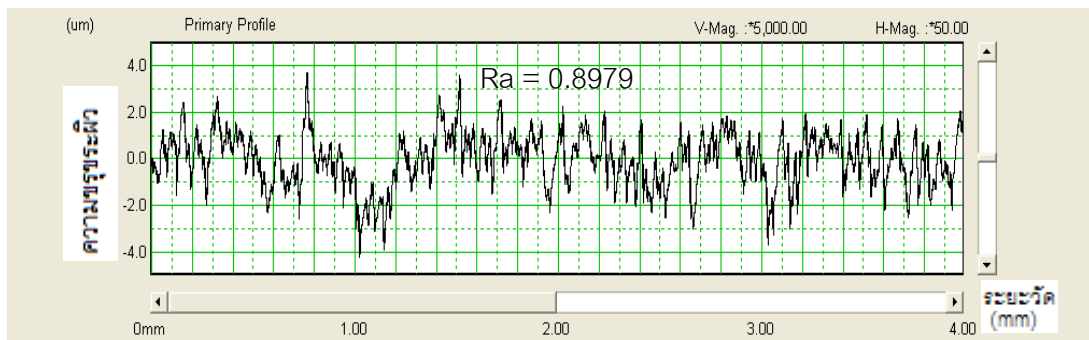
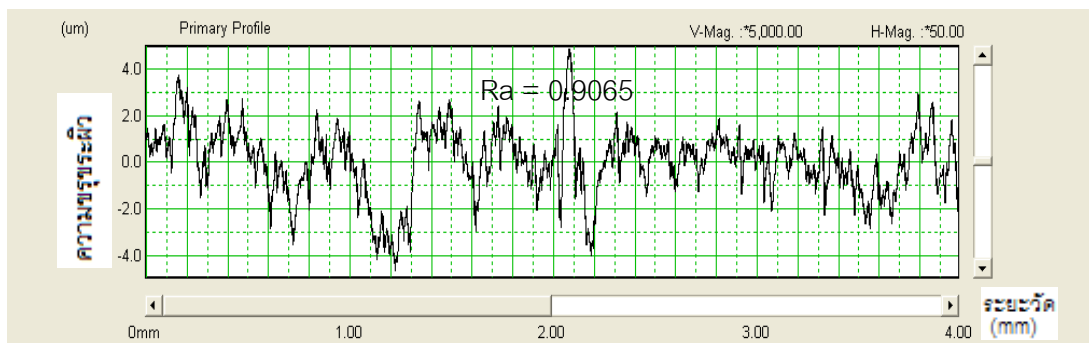
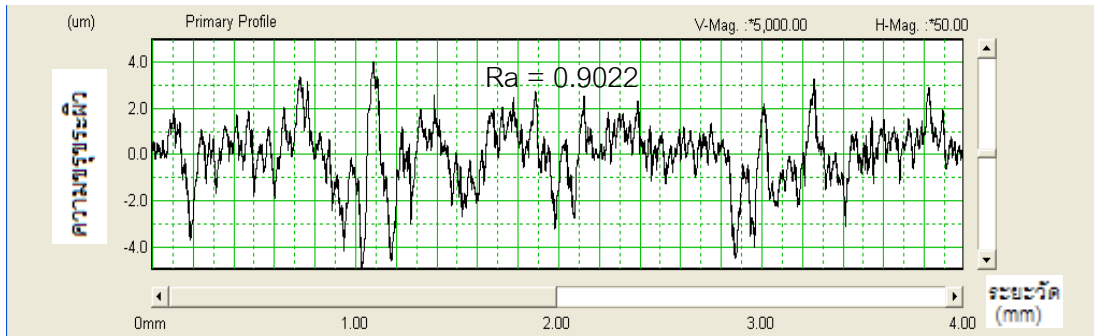
$$Ra_{เฉลี่ย} = (0.1142 + 0.1250 + 0.1337) / 3 = 0.1243$$

ความเร็วรอบตัด 2600 รอบ/นาที, อัตราป้อนตัด 0.015 มิลลิเมตร/รอบ, ความลึกตัด 0.75 มิลลิเมตร, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด 8 มิลลิเมตร และความดันลมเป่า 0.7 เมกกะปาสกาล



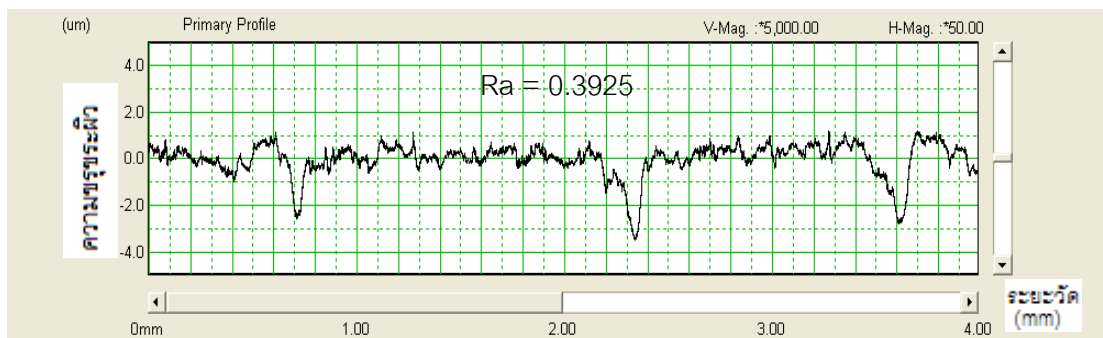
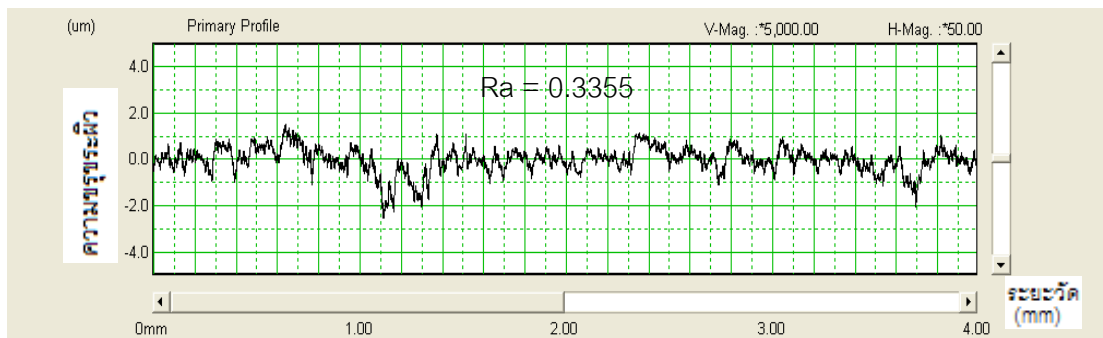
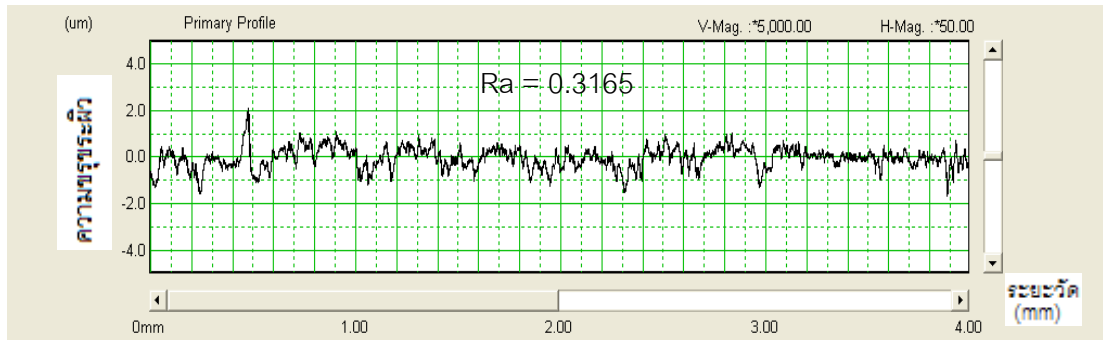
$$Ra_{เฉลี่ย} = (0.7351 + 0.7034 + 0.6900) / 3 = 0.7095$$

ความเร็วรอบตัด 2200 รอบ/นาที, อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตร/รอบ, ความลึกตัด 0.75 มิลลิเมตร, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด 10 มิลลิเมตร และความดันลมเป่า 0.5 เมกะปาสกาล



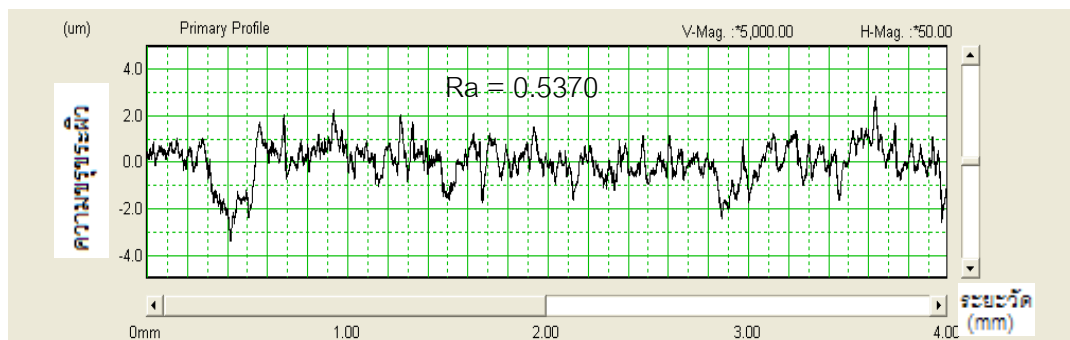
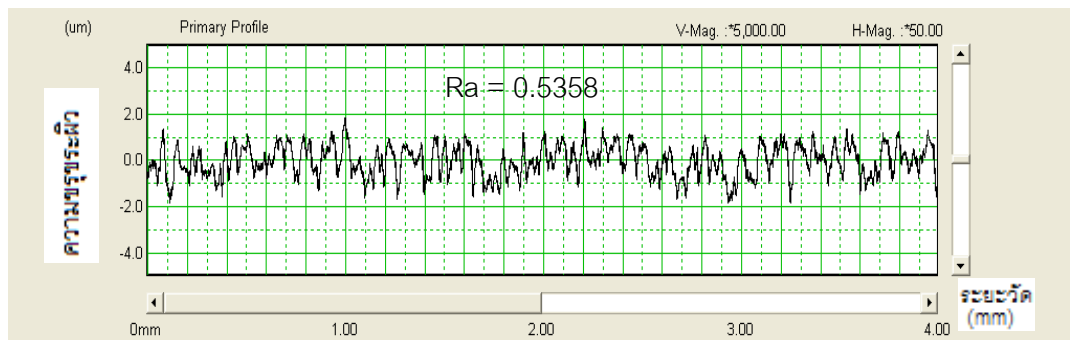
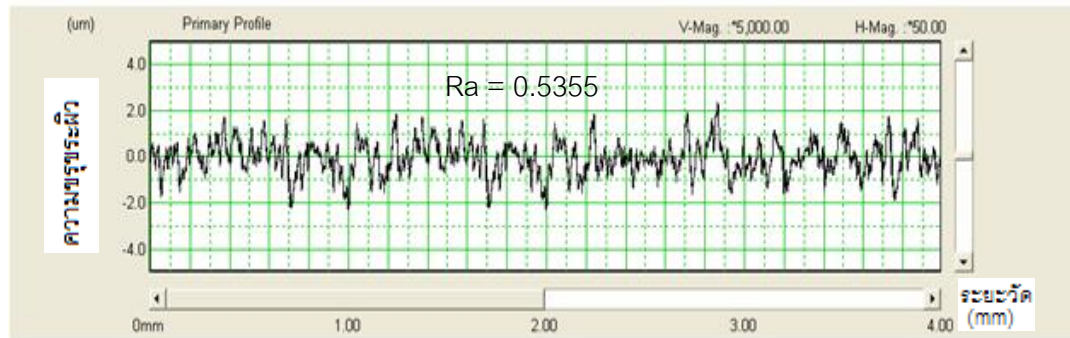
$$Ra_{เฉลี่ย} = (0.9022 + 0.9065 + 0.8979) / 3 = 0.9022$$

ความเร็วรอบตัด 2200 รอบ/นาที, อัตราป้อนตัด 0.015 มิลลิเมตร/รอบ, ความลึกตัด 0.75 มิลลิเมตร, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด 8 มิลลิเมตร และความดันลมเป่า 0.5 เมกกะปาสกาล



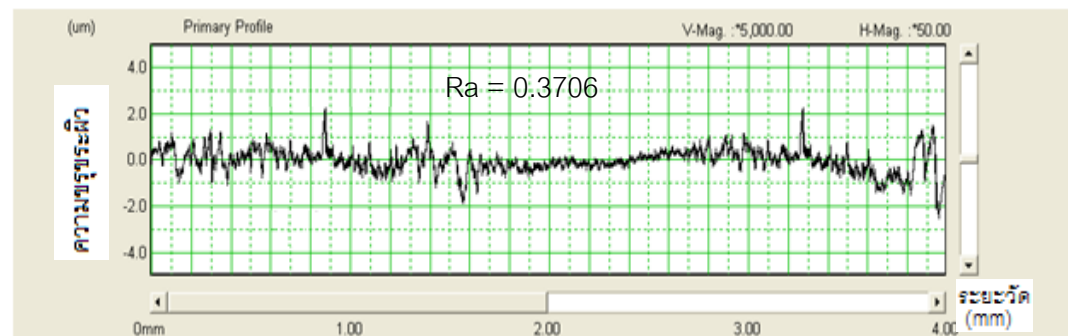
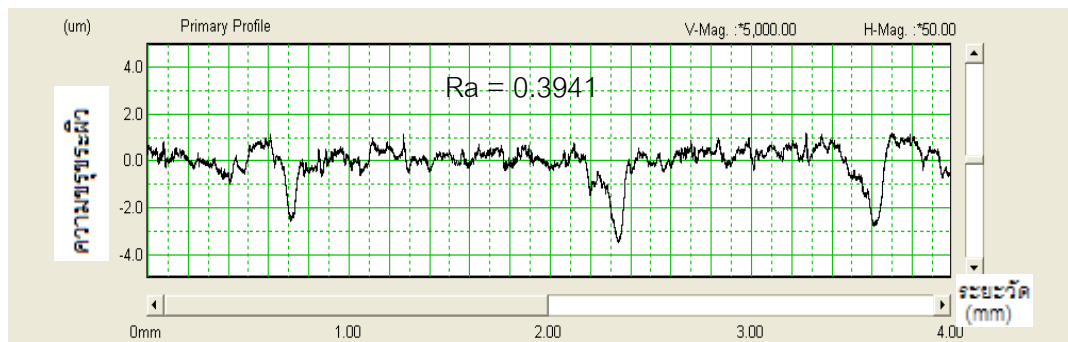
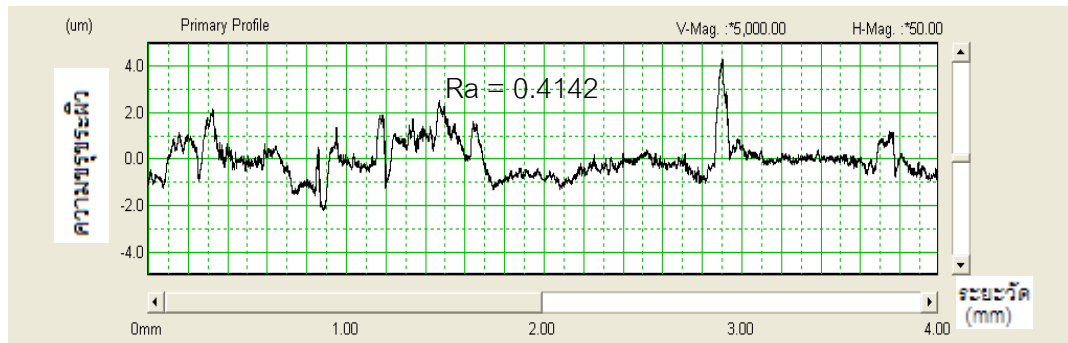
$$Ra_{เฉลี่ย} = (0.3165 + 0.3355 + 0.3925) / 3 = 0.3482$$

ความเร็วรอบตัด 2600 รอบ/นาที, อัตราป้อนตัด 0.015 มิลลิเมตร/รอบ, ความลึกตัด 1 มิลลิเมตร,
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด 8 มิลลิเมตร และความดันลมเป่า 0.5 เมกกะปาสกาล



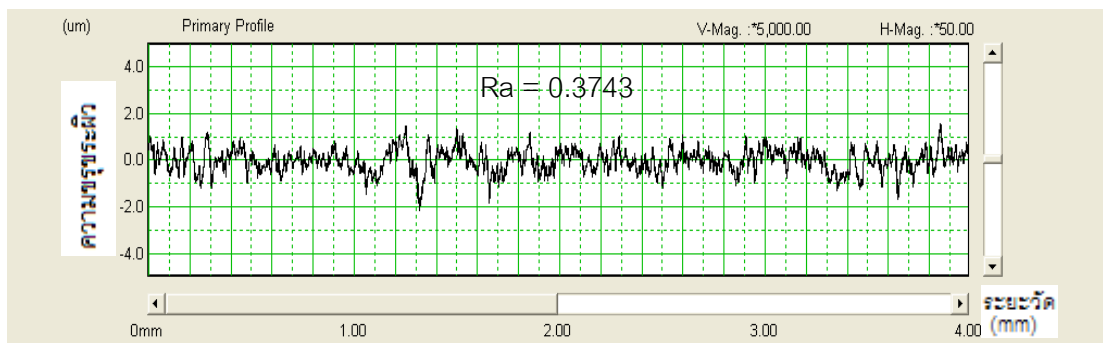
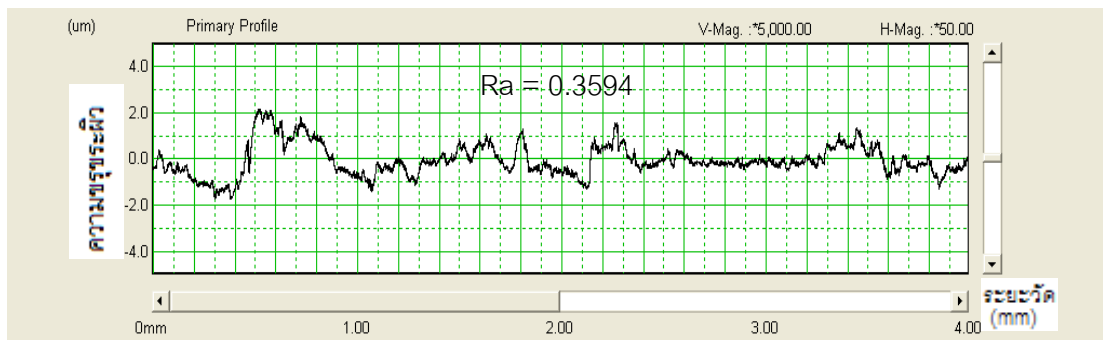
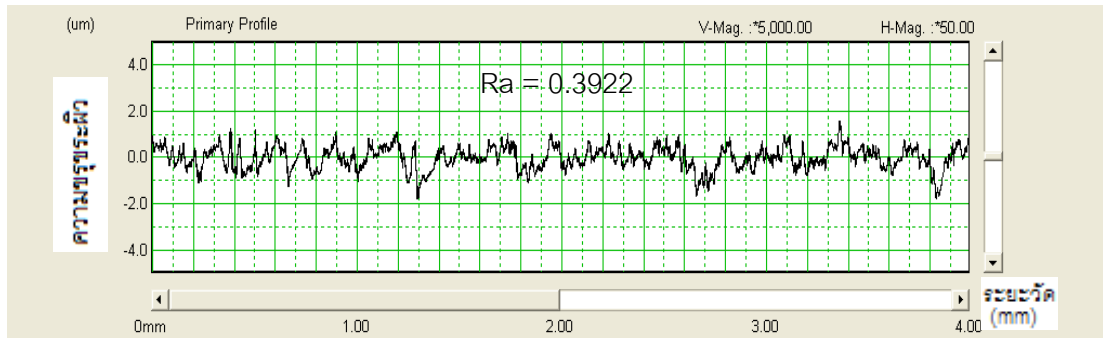
$$Ra_{เฉลี่ย} = (0.5355 + 0.5358 + 0.5370) / 3 = 0.5361$$

ความเร็วรอบตัด 2200 รอบ/นาที, อัตราป้อนตัด 0.015 มิลลิเมตร/รอบ, ความลึกตัด 0.75 มิลลิเมตร, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด 6 มิลลิเมตร และความดันลมเป่า 0.3 เมกกะปาสกาล



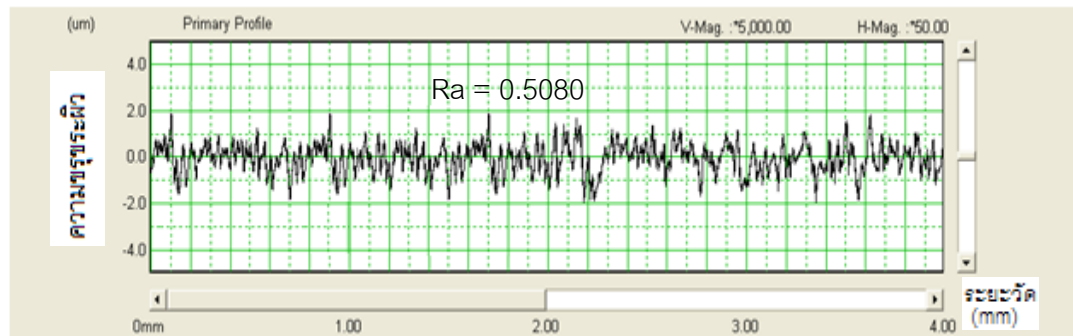
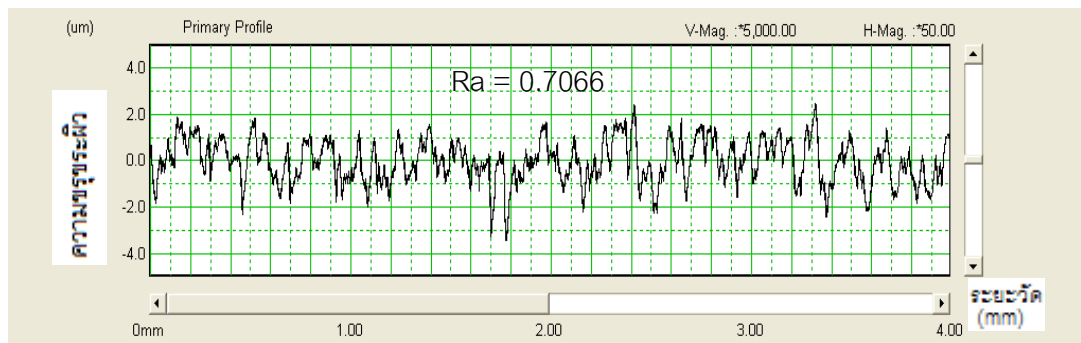
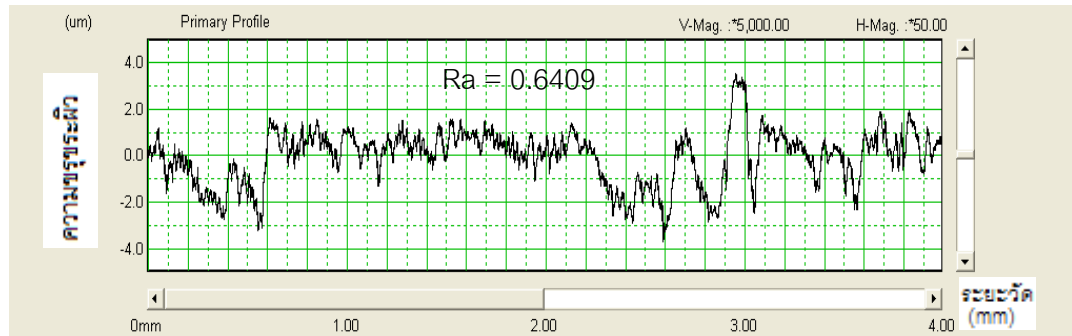
$$Ra_{เฉลี่ย} = (0.4142 + 0.3941 + 0.3706) / 3 = 0.3930$$

ความเร็วรอบตัด 2600 รอบ/นาที, อัตราป้อนตัด 0.015 มิลลิเมตร/รอบ, ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด 8 มิลลิเมตร และความดันลมเป่า 0.5 เมกกะปาสกาล



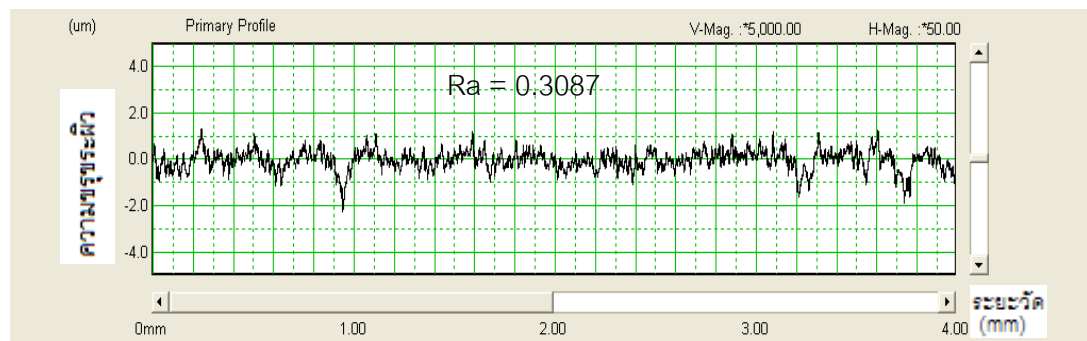
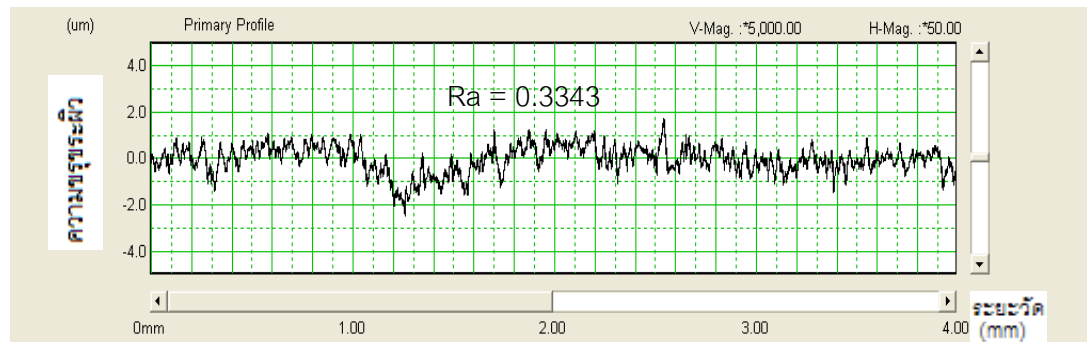
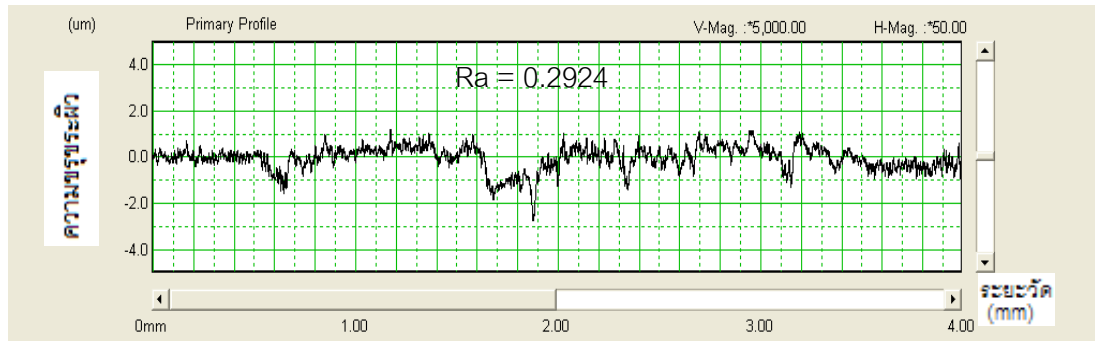
$$Ra_{เฉลี่ย} = (0.3922 + 0.3594 + 0.3743) / 3 = 0.3753$$

ความเร็วรอบตัด 2200 รอบ/นาที, อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตร/รอบ, ความลึกตัด 0.75 มิลลิเมตร, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด 8 มิลลิเมตร และความดันลมเป่า 0.7 เมกกะปาสกาล



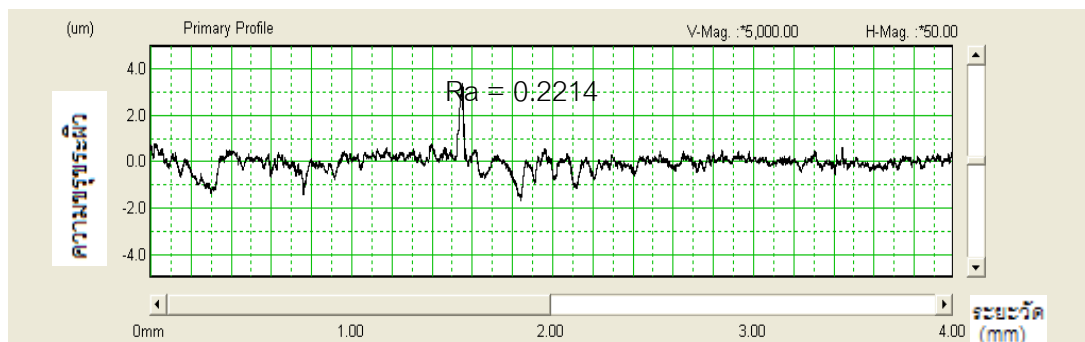
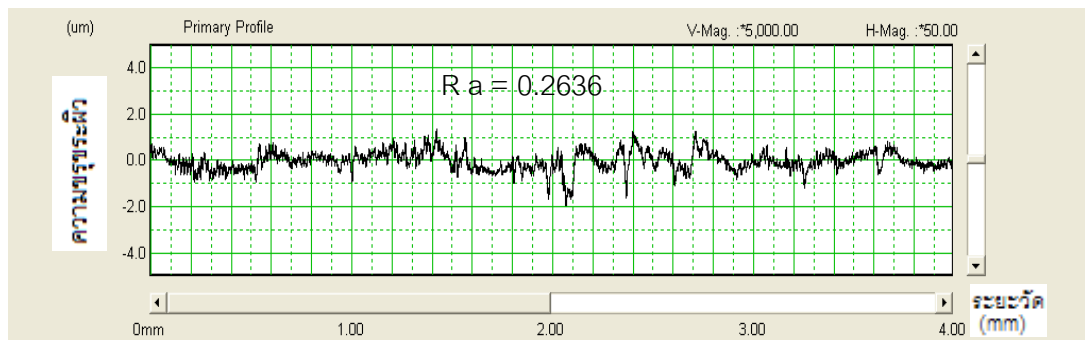
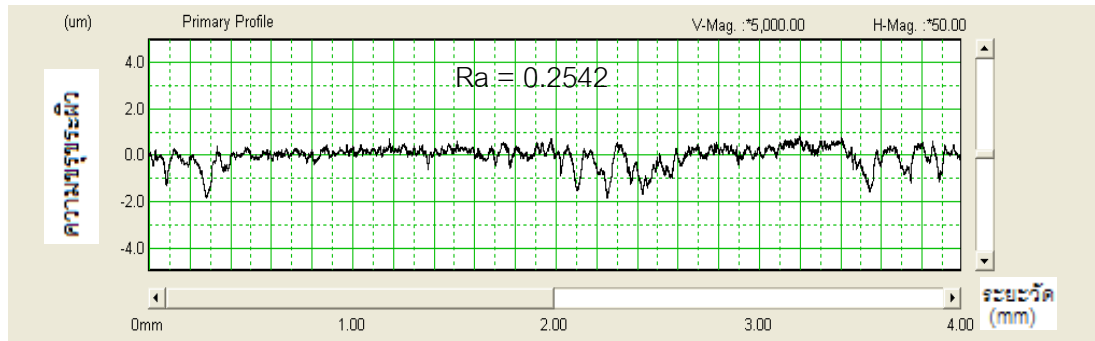
$$Ra_{เฉลี่ย} = (0.6409 + 0.7066 + 0.5080) / 3 = 0.6185$$

ความเร็วรอบตัด 2200 รอบ/นาที, อัตราป้อนตัด 0.015 มิลลิเมตร/รอบ, ความลึกตัด 0.75 มิลลิเมตร, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด 8 มิลลิเมตร และความดันลมเป่า 0.5 เมกกะปาสกาล



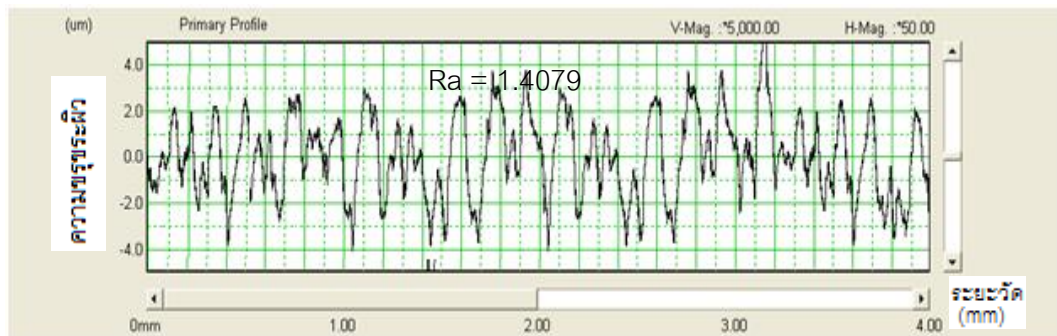
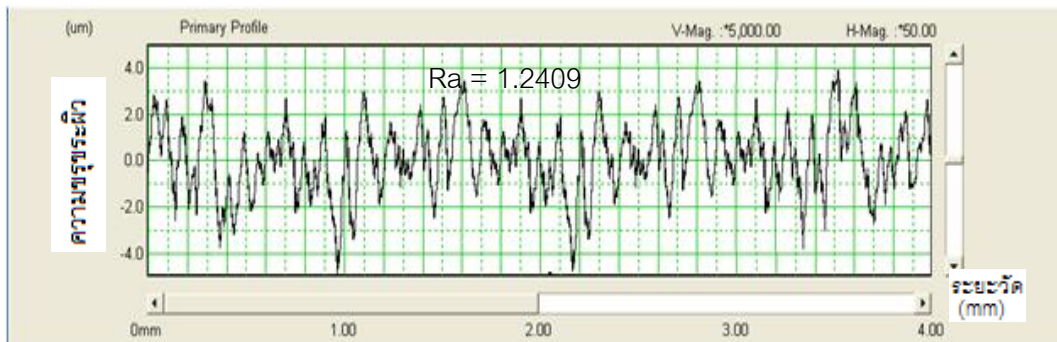
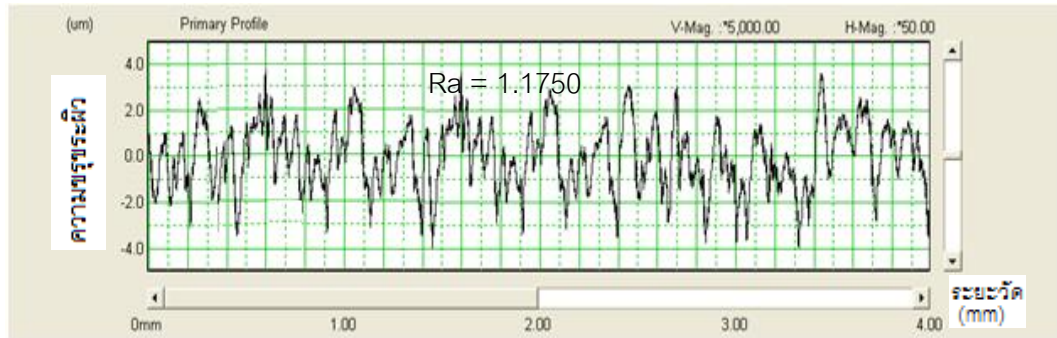
$$Ra_{เฉลี่ย} = (0.2924 + 0.3343 + 0.3087) / 3 = 0.3118$$

ความเร็วรอบตัด 2600 รอบ/นาที, อัตราป้อนตัด 0.015 มิลลิเมตร/รอบ, ความลึกตัด 0.75 มิลลิเมตร, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด 6 มิลลิเมตร และความดันลมเป่า 0.5 เมกกะปาสกาล



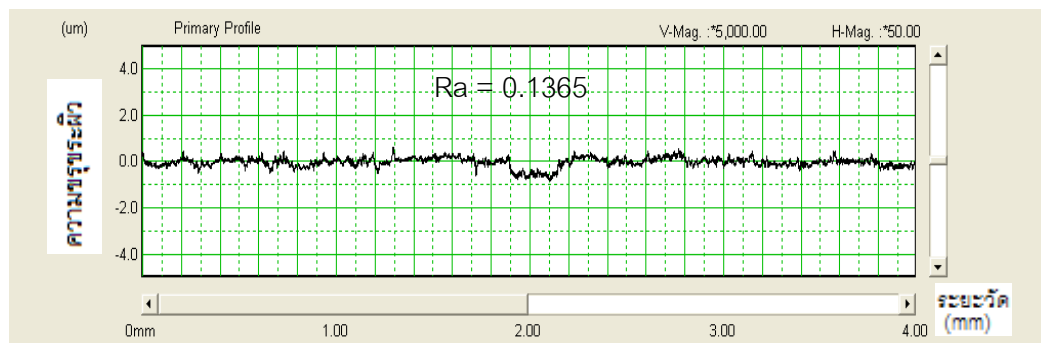
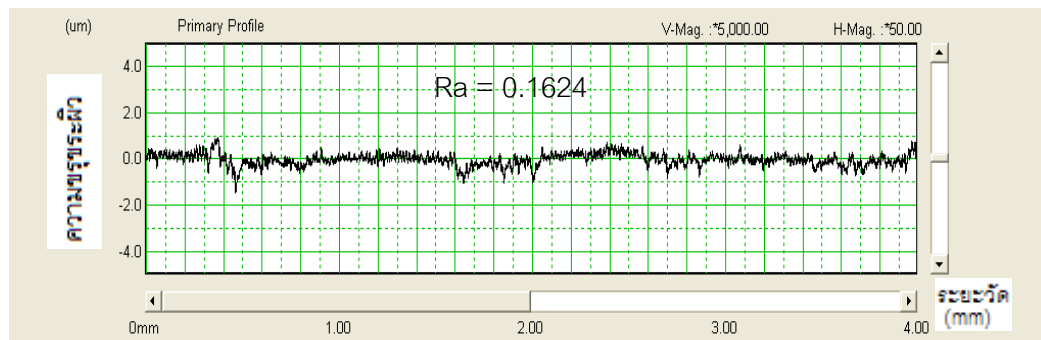
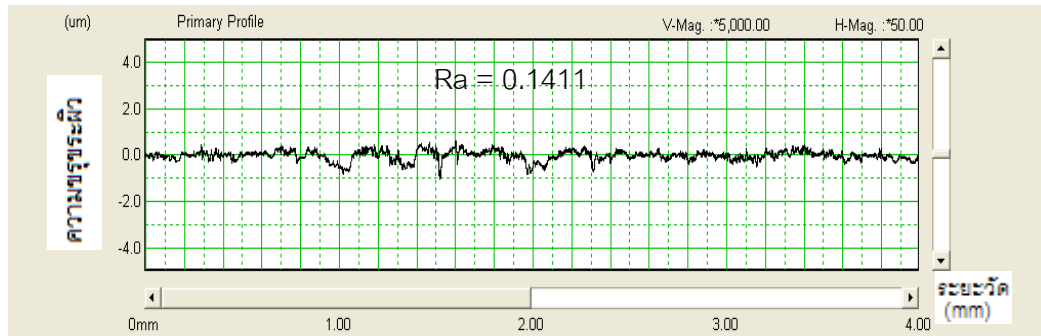
$$Ra_{เฉลี่ย} = (0.2542 + 0.2636 + 0.2214) / 3 = 0.2464$$

ความเร็วรอบตัด 1800 รอบ/นาที, อัตราป้อนตัด 0.015 มิลลิเมตร/รอบ, ความลึกตัด 0.75 มิลลิเมตร, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด 10 มิลลิเมตร และความดันลมเป่า 0.5 เมกกะปาสกาล



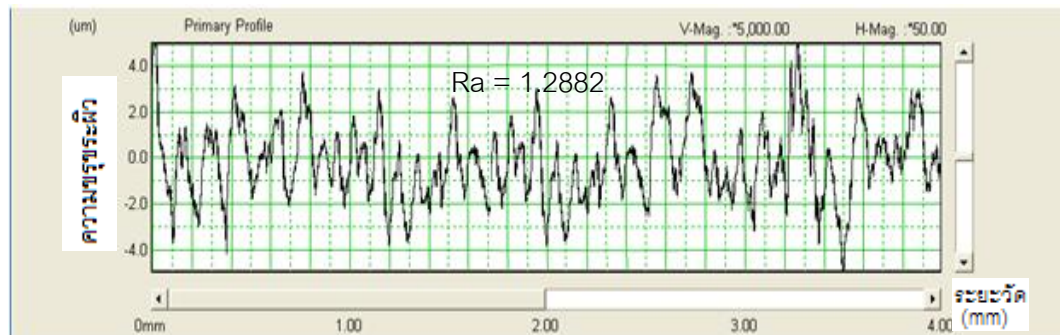
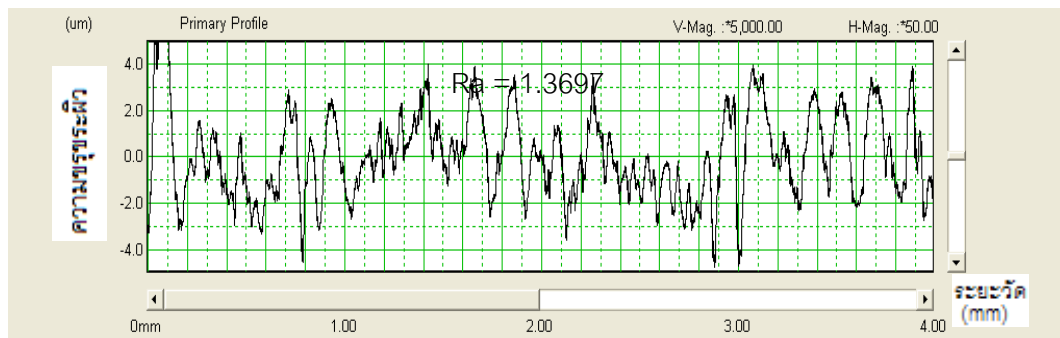
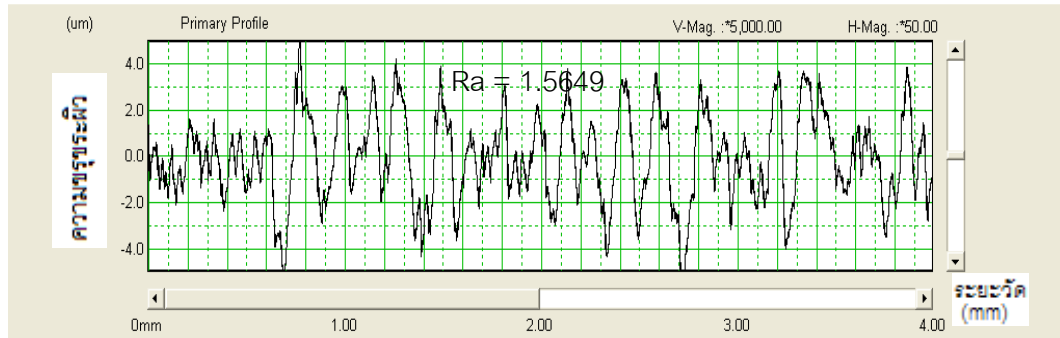
$$Ra_{เฉลี่ย} = (1.1750 + 1.2409 + 1.4079) / 3 = 1.2746$$

ความเร็วรอบตัด 2200 รอบ/นาที, อัตราป้อนตัด 0.015 มิลลิเมตร/รอบ, ความลึกตัด 0.75 มิลลิเมตร, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด 6 มิลลิเมตร และความดันลมเป่า 0.7 เมกกะปาสกาล



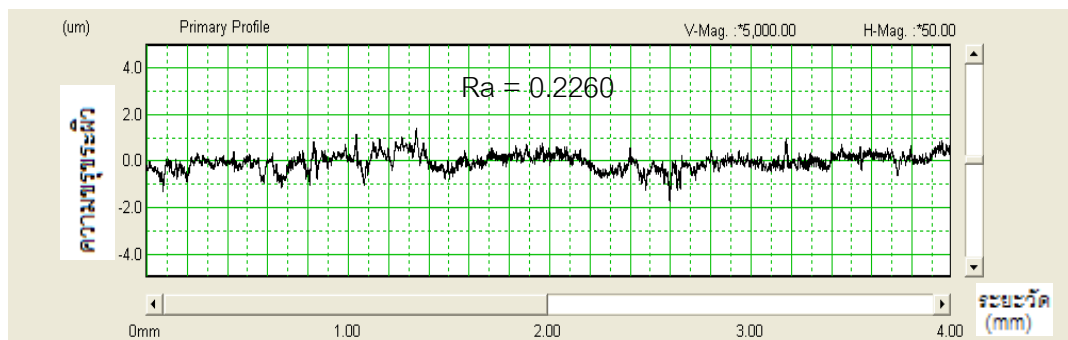
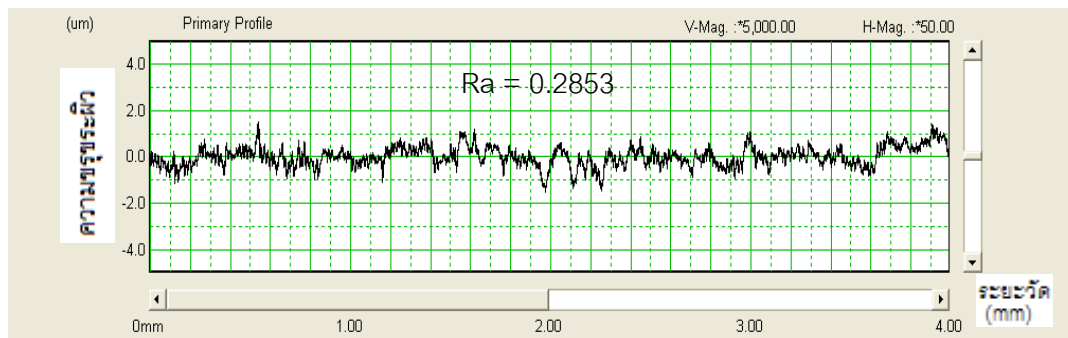
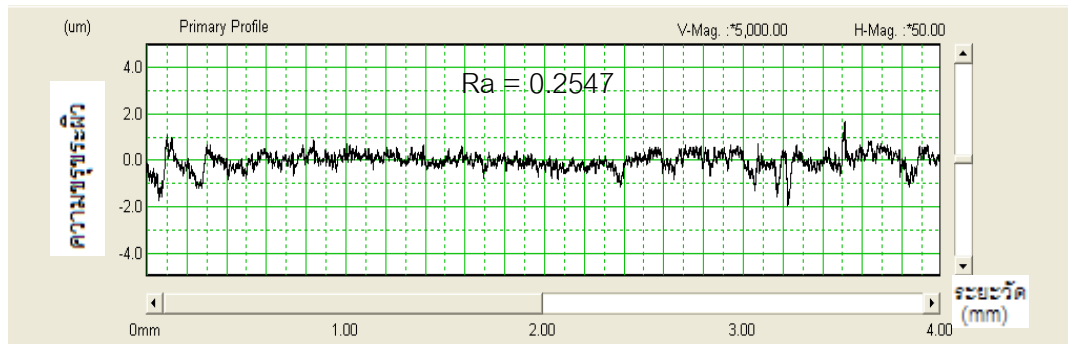
$$Ra_{เฉลี่ย} = (0.1411 + 0.1624 + 0.1365) / 3 = 0.1467$$

ความเร็วรอบตัด 2200 รอบ/นาที, อัตราป้อนตัด 0.01 มิลลิเมตร/รอบ, ความลึกตัด 0.75 มิลลิเมตร, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด 10 มิลลิเมตร และความดันลมเป่า 0.5 เมกะปาสกาล



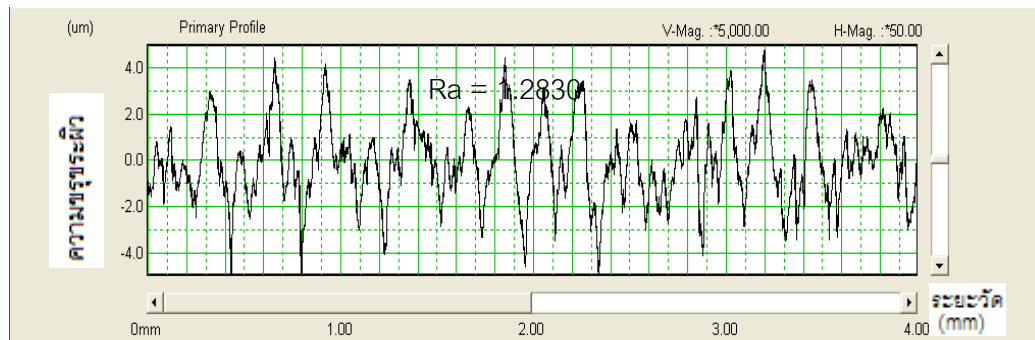
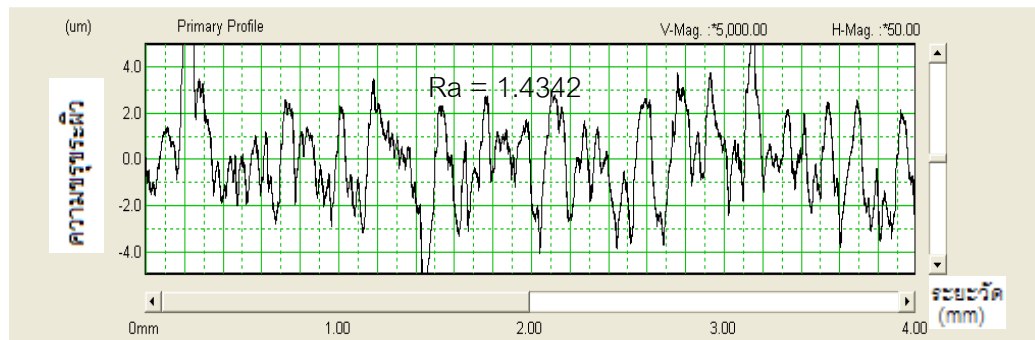
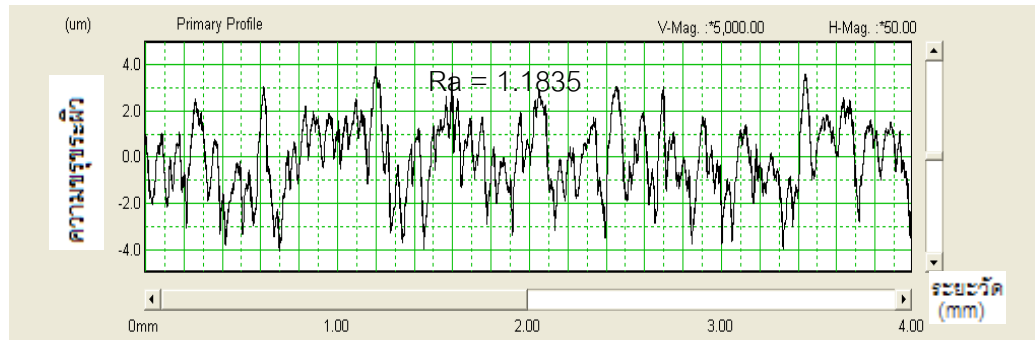
$$Ra_{เฉลี่ย} = (1.5649 + 1.3697 + 1.2882) / 3 = 1.4076$$

ความเร็วรอบตัด 1800 รอบ/นาที, อัตราป้อนตัด 0.015 มิลลิเมตร/รอบ, ความลึกตัด 0.75 มิลลิเมตร, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด 8 มิลลิเมตร และความดันลมเป่า 0.3 เมกกะปาสกาล



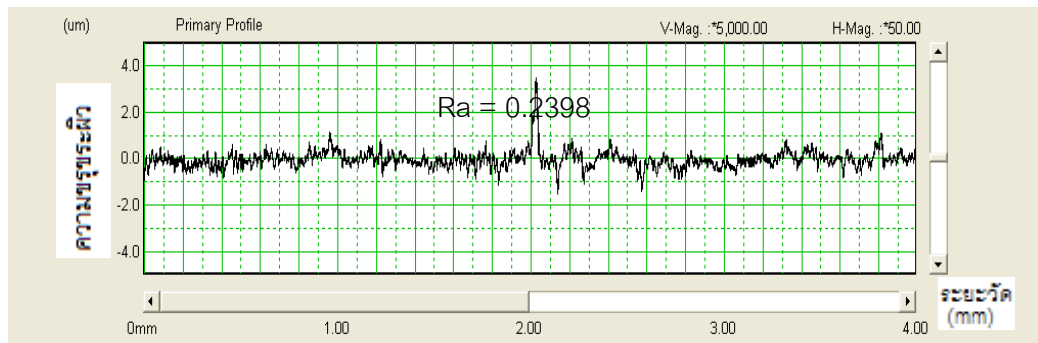
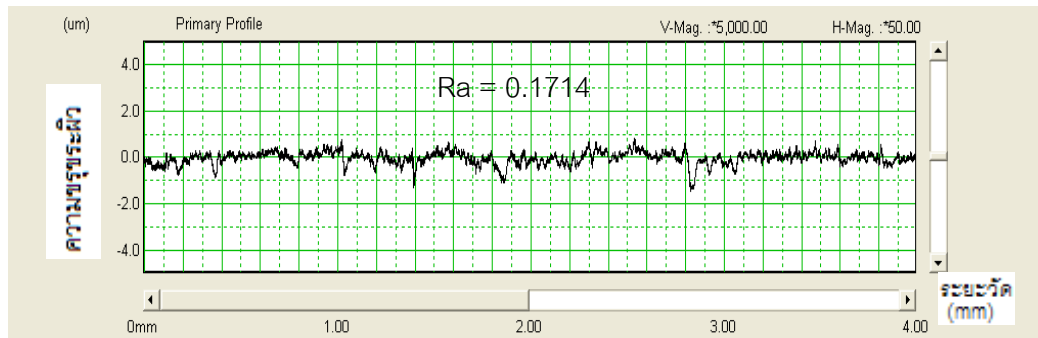
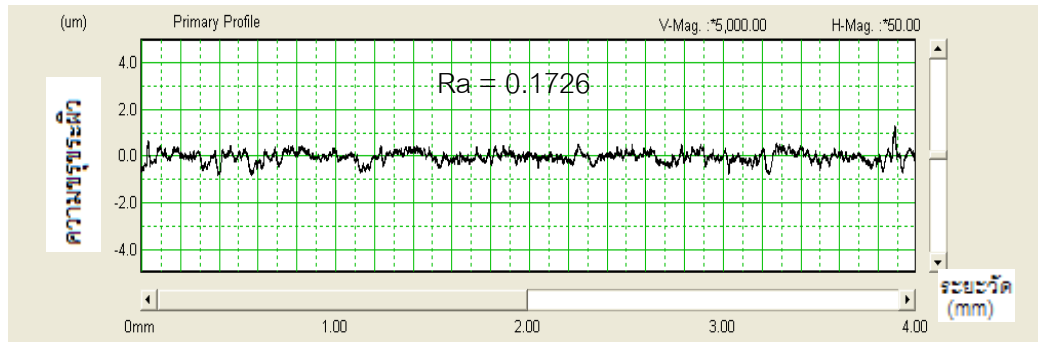
$$Ra_{เฉลี่ย} = (0.2547 + 0.2853 + 0.2260) / 3 = 0.2553$$

ความเร็วรอบตัด 2200 รอบ/นาที, อัตราป้อนตัด 0.015 มิลลิเมตร/รอบ, ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด 10 มิลลิเมตร และความดันลมเป่า 0.5 เมกกะปาสกาล



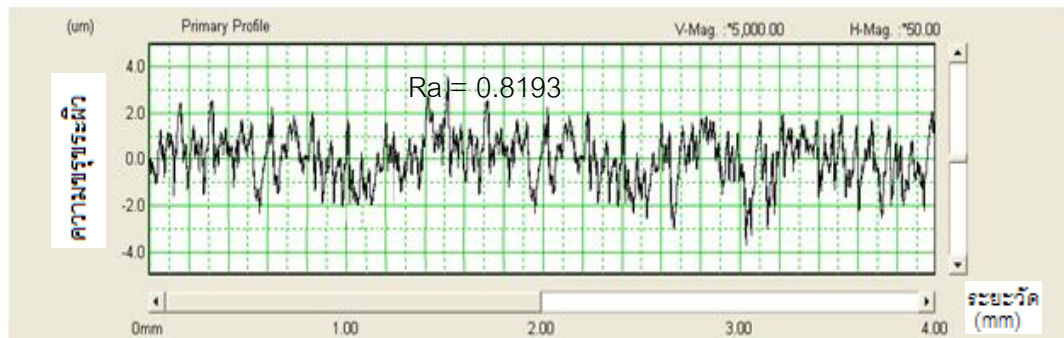
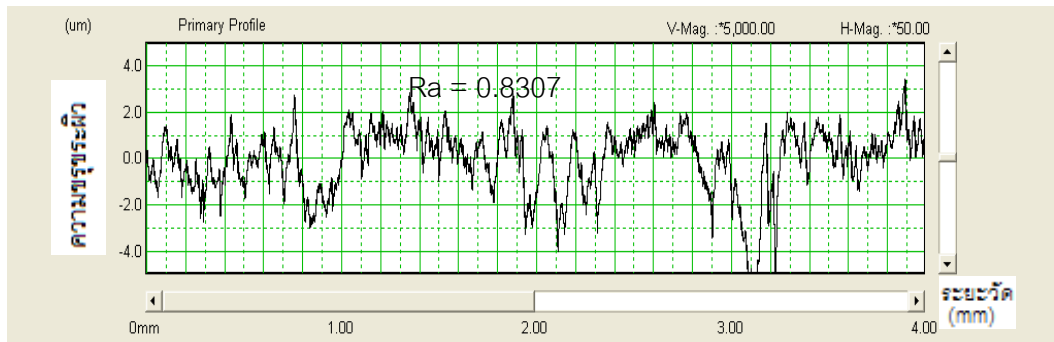
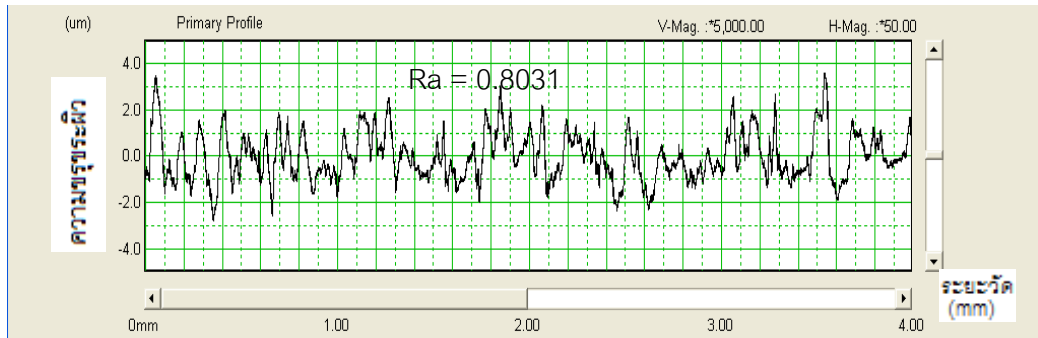
$$Ra_{เฉลี่ย} = (1.1835 + 1.4342 + 1.2830) / 3 = 1.3002$$

ความเร็วรอบตัด 2200 รอบ/นาที, อัตราป้อนตัด 0.015 มิลลิเมตร/รอบ, ความลึกตัด 1 มิลลิเมตร,
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด 8 มิลลิเมตร และความดันลมเป่า 0.3 เมกกะปาสกาล



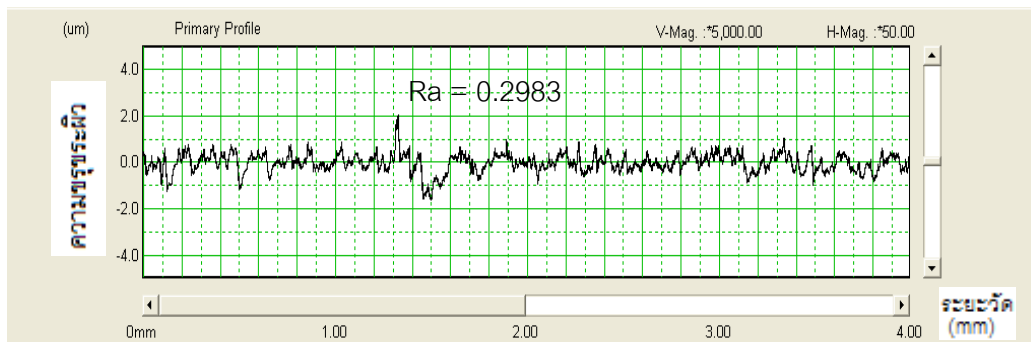
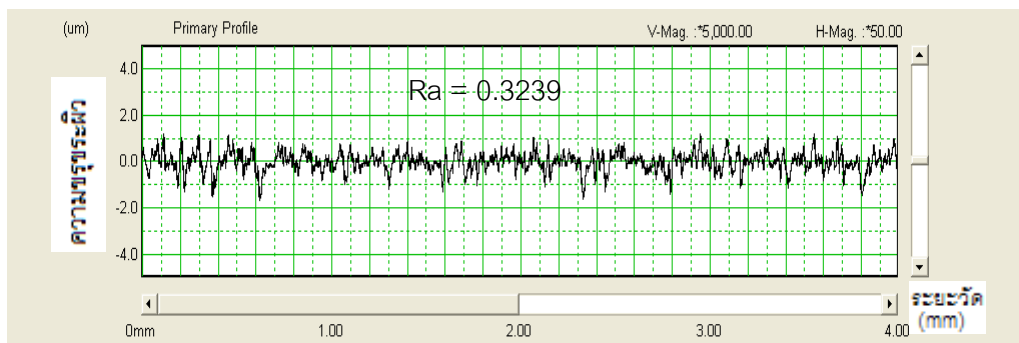
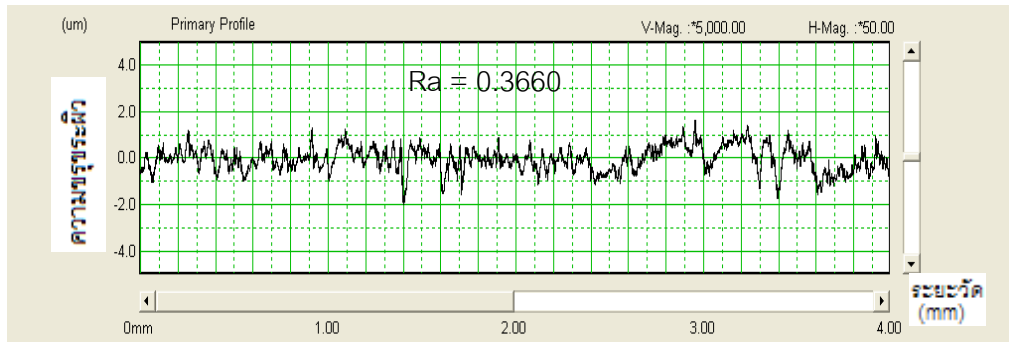
$$Ra_{เฉลี่ย} = (0.1726 + 0.1714 + 0.2398) / 3 = 0.1946$$

ความเร็วรอบตัด 2200 รอบ/นาที, อัตราป้อนตัด 0.015 มิลลิเมตร/รอบ, ความลึกตัด 0.75 มิลลิเมตร, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด 10 มิลลิเมตร และความดันลมเป่า 0.7 เมกะปาสกาล



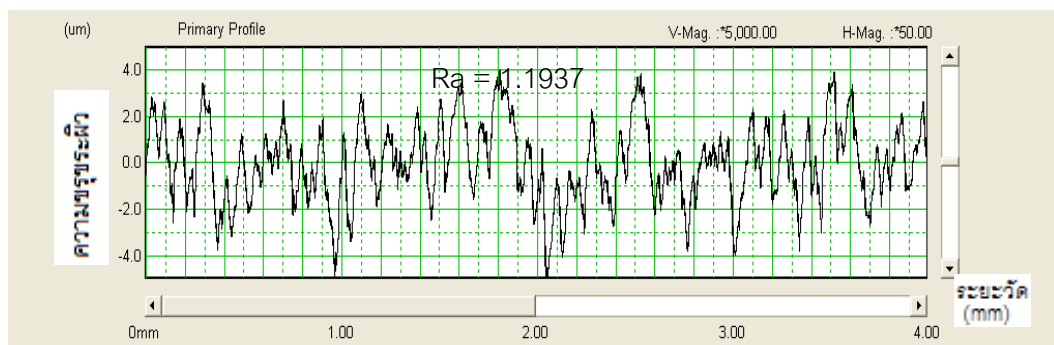
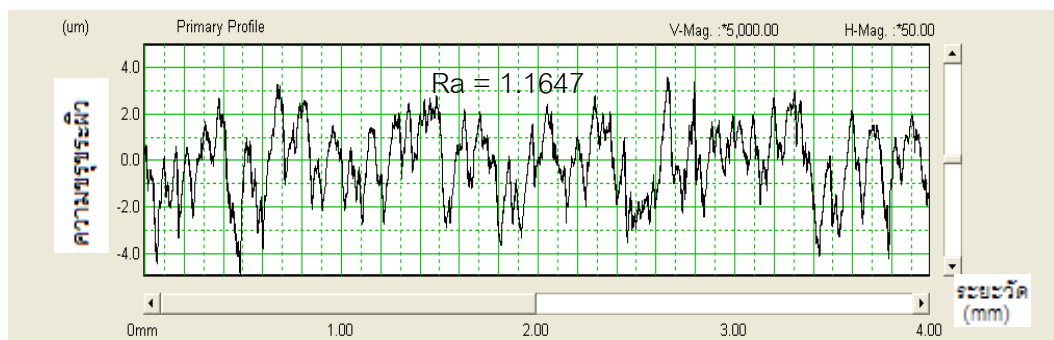
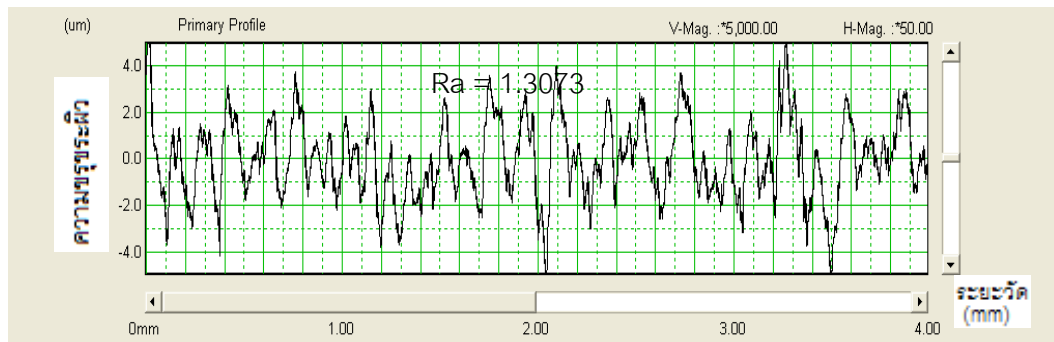
$$Ra_{เฉลี่ย} = (0.8031 + 0.8307 + 0.8193) / 3 = 0.8177$$

ความเร็วรอบตัด 2200 รอบ/นาที, อัตราป้อนตัด 0.015 มิลลิเมตร/รอบ, ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด 8 มิลลิเมตร และความดันลมเป่า 0.3 เมกกะปาสกาล



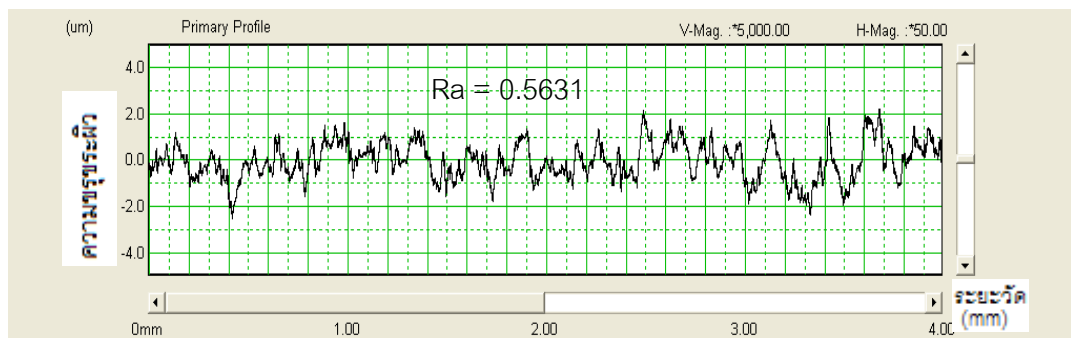
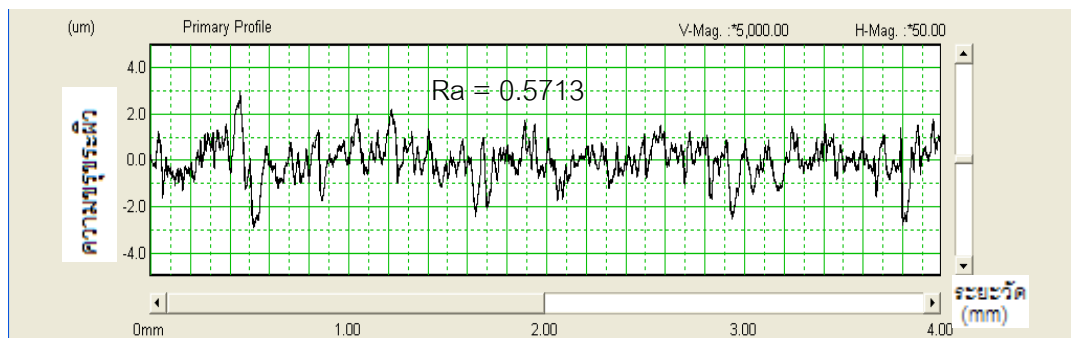
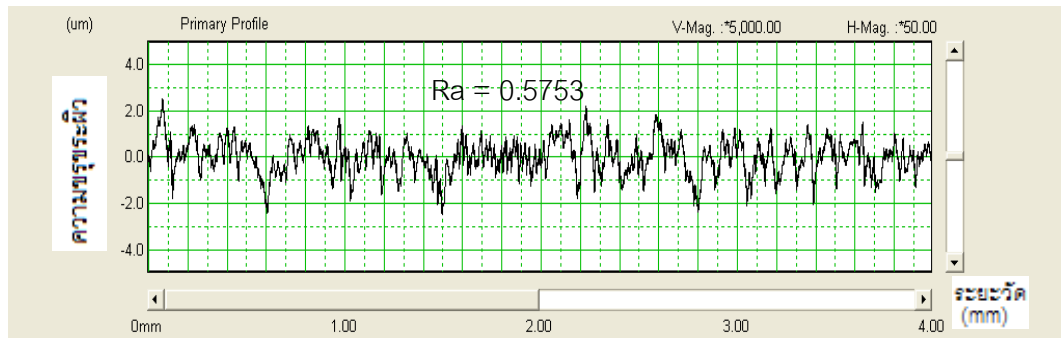
$$Ra_{เฉลี่ย} = (0.3660 + 0.3239 + 0.2983) / 3 = 0.3294$$

ความเร็วรอบตัด 2600 รอบ/นาที, อัตราป้อนตัด 0.015 มิลลิเมตร/รอบ, ความลึกตัด 0.75 มิลลิเมตร, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด 10 มิลลิเมตร และความดันลมเป่า 0.5 เมกกะปาสกาล



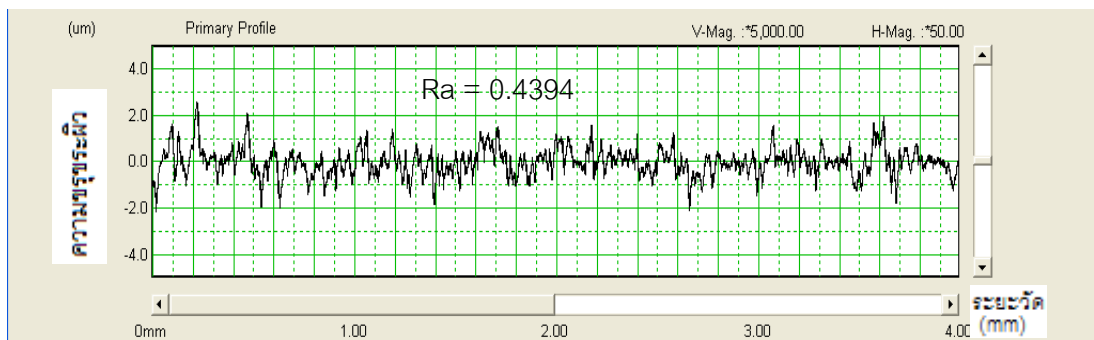
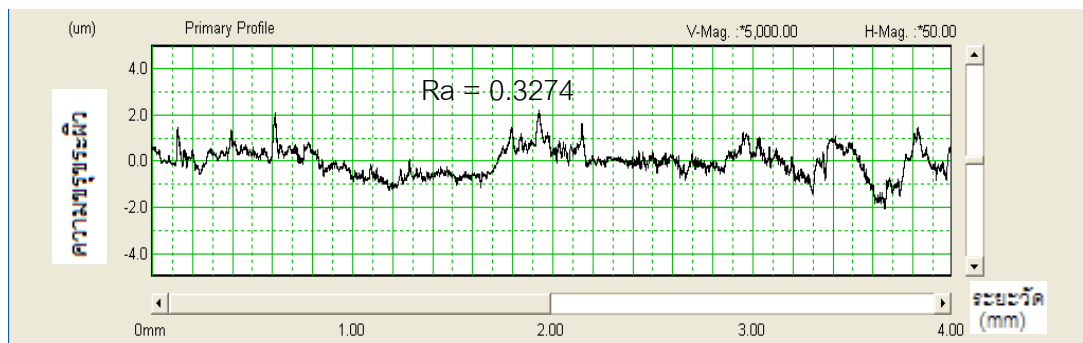
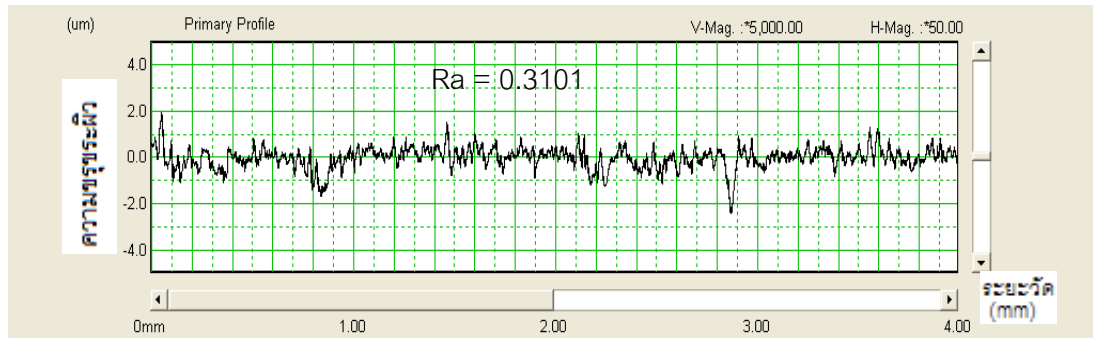
$$Ra_{เฉลี่ย} = (1.3073 + 1.1647 + 1.1937) / 3 = 1.2219$$

ความเร็วรอบตัด 2200 รอบ/นาที, อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตร/รอบ, ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด 8 มิลลิเมตร และความดันลมเป่า 0.5 เมกกะปาสกาล



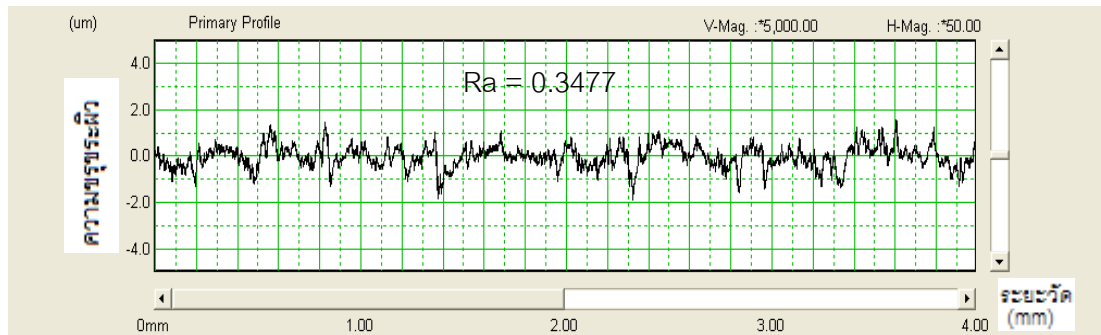
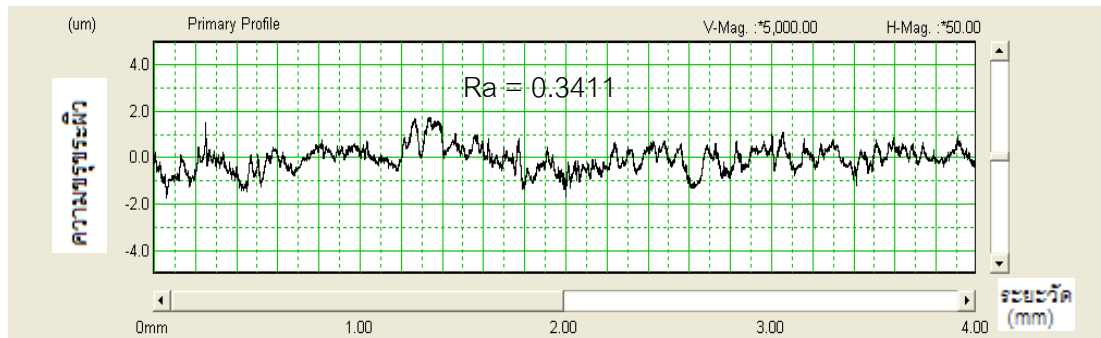
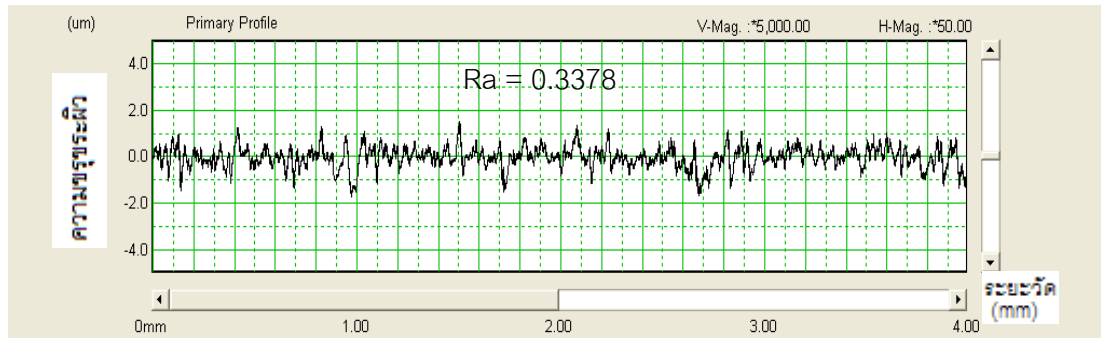
$$Ra_{เฉลี่ย} = (0.5753 + 0.5713 + 0.5631) / 3 = 0.5699$$

ความเร็วรอบตัด 2200 รอบ/นาที, อัตราป้อนตัด 0.015 มิลลิเมตร/รอบ, ความลึกตัด 0.75 มิลลิเมตร, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด 8 มิลลิเมตร และความดันลมเป่า 0.5 เมกกะปาสกาล



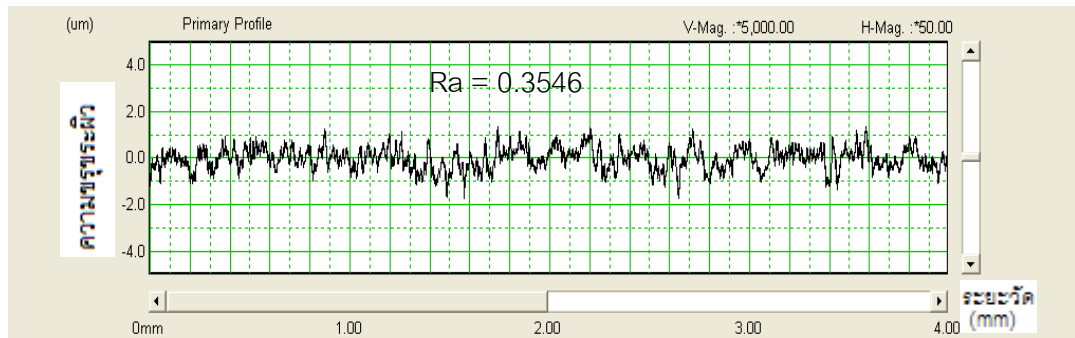
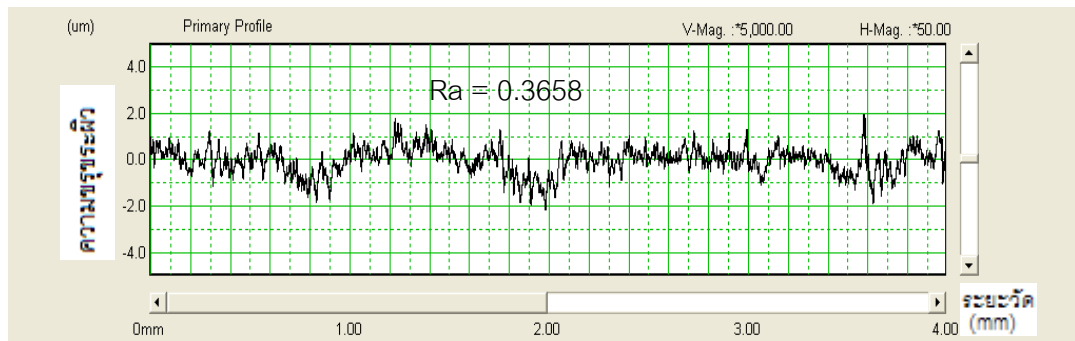
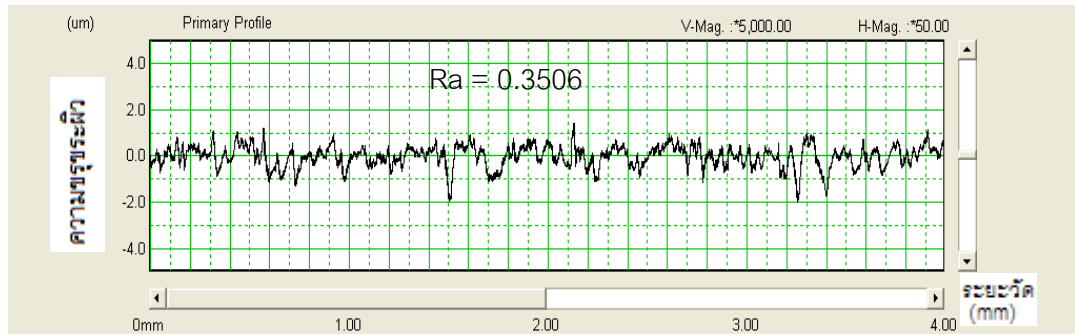
$$Ra_{เฉลี่ย} = (0.3101 + 0.3274 + 0.4394) / 3 = 0.3590$$

ความเร็วรอบตัด 1800 รอบ/นาที, อัตราป้อนตัด 0.015 มิลลิเมตร/รอบ, ความลึกตัด 0.75 มิลลิเมตร, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด 6 มิลลิเมตร และความดันลมเป่า 0.5 เมกะปาสกาล



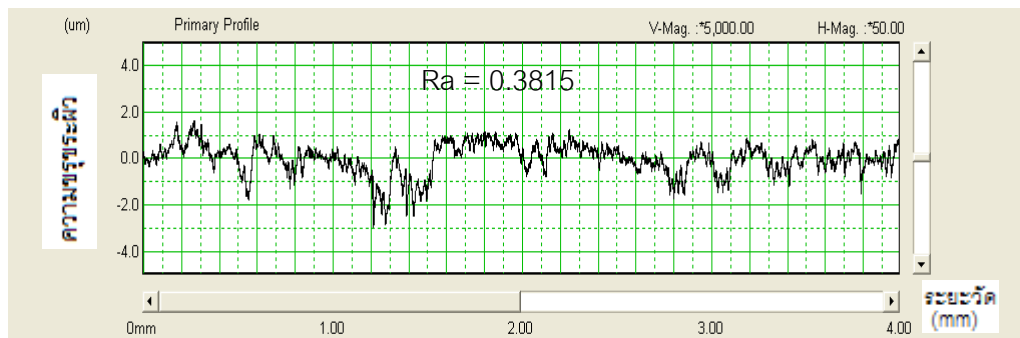
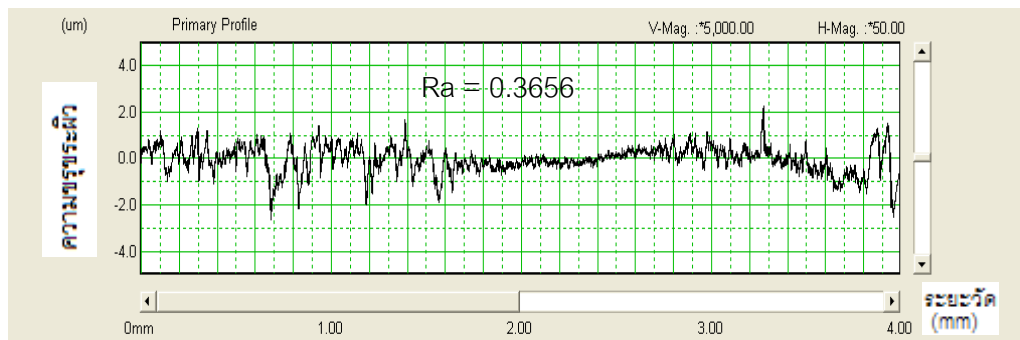
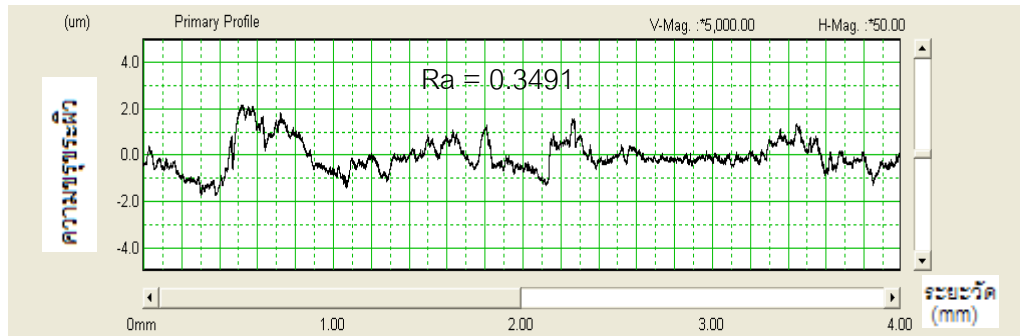
$$Ra_{เฉลี่ย} = (0.3378 + 0.3411 + 0.3477) / 3 = 0.3422$$

ความเร็วรอบตัด 2200 รอบ/นาที, อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตร/รอบ, ความลึกตัด 0.75 มิลลิเมตร, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด 8 มิลลิเมตร และความดันลมเป่า 0.3 เมกกะปาสกาล



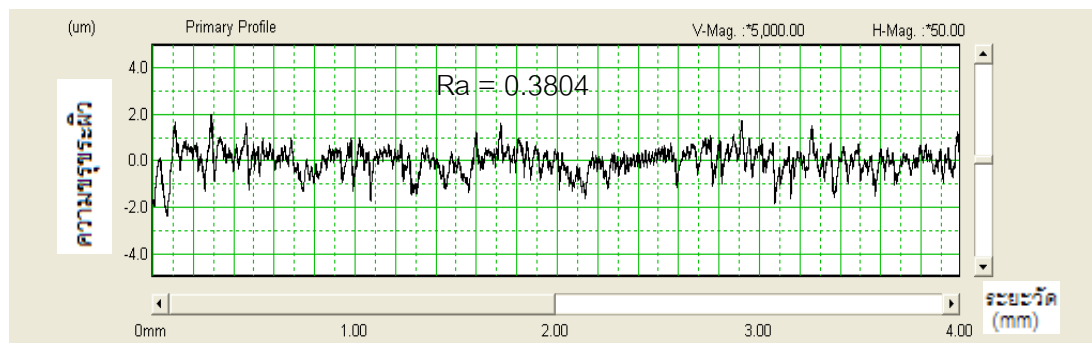
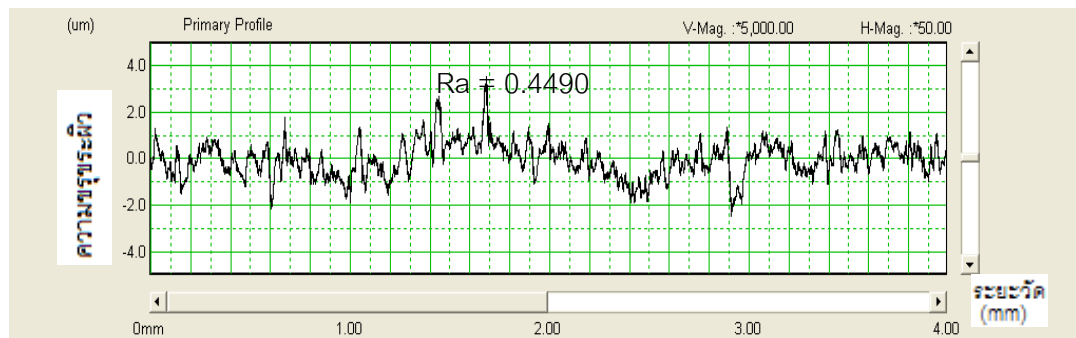
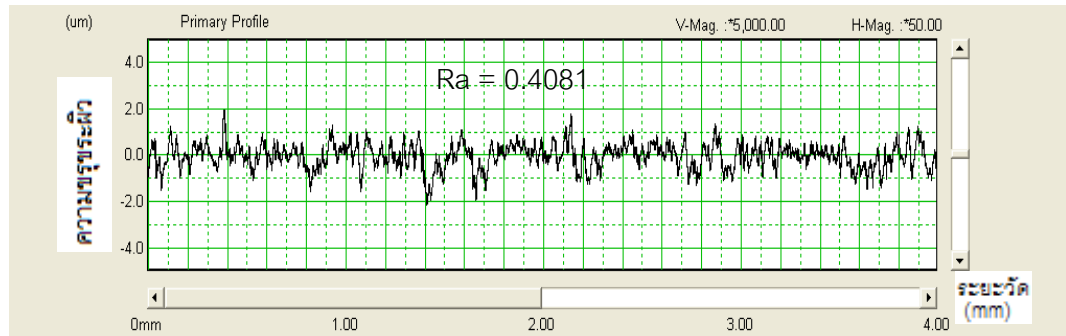
$$Ra_{เฉลี่ย} = (0.3506 + 0.3658 + 0.3546) / 3 = 0.3570$$

ความเร็วรอบตัด 2200 รอบ/นาที, อัตราป้อนตัด 0.01 มิลลิเมตร/รอบ, ความลึกตัด 0.75 มิลลิเมตร, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด 6 มิลลิเมตร และความดันลมเป่า 0.5 เมกกะปาสกาล



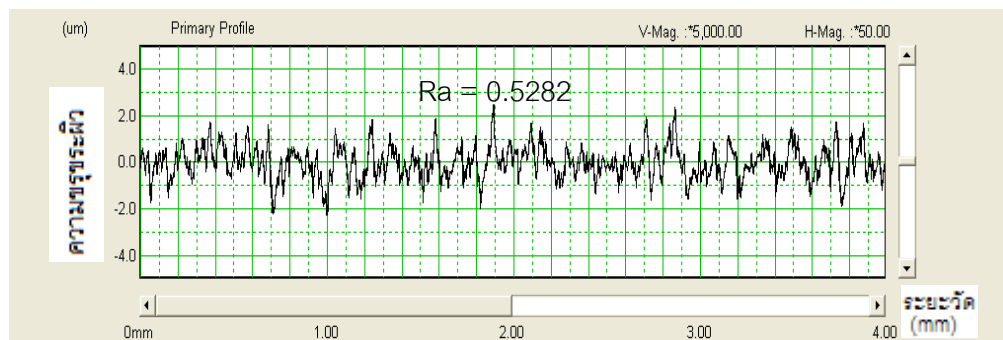
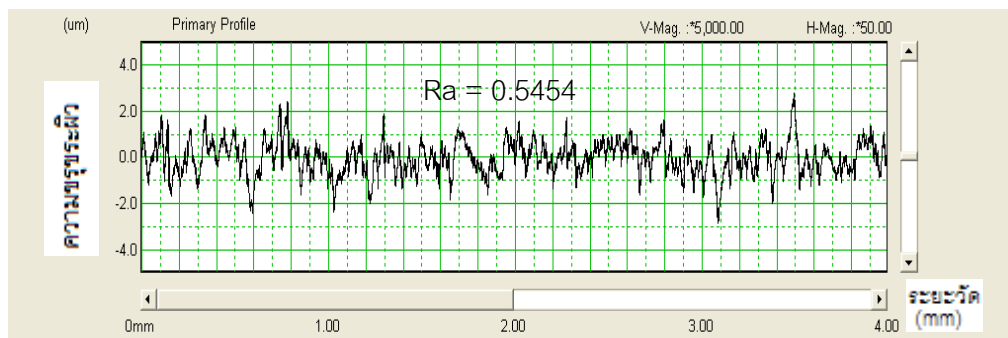
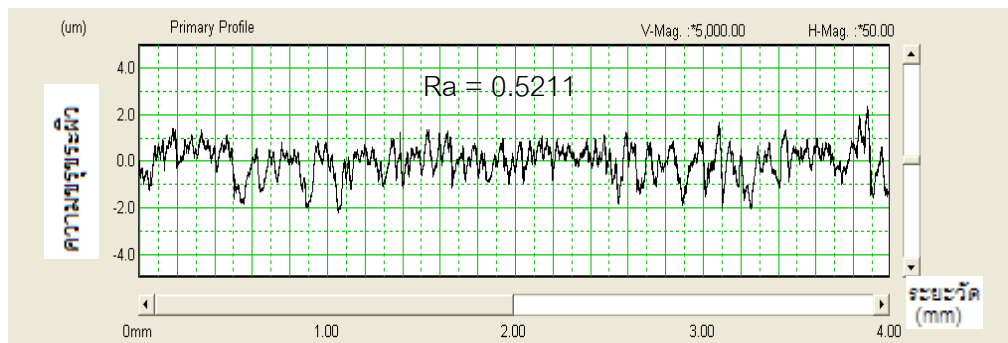
$$Ra_{เฉลี่ย} = (0.3491 + 0.3656 + 0.3815) / 3 = 0.3654$$

ความเร็วรอบตัด 2200 รอบ/นาที, อัตราป้อนตัด 0.01 มิลลิเมตร/รอบ, ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด 8 มิลลิเมตร และความดันลมเป่า 0.5 เมกกะปาสกาล



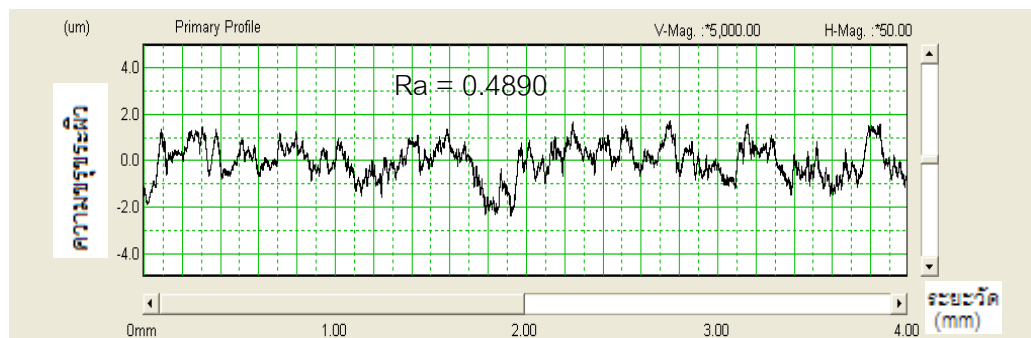
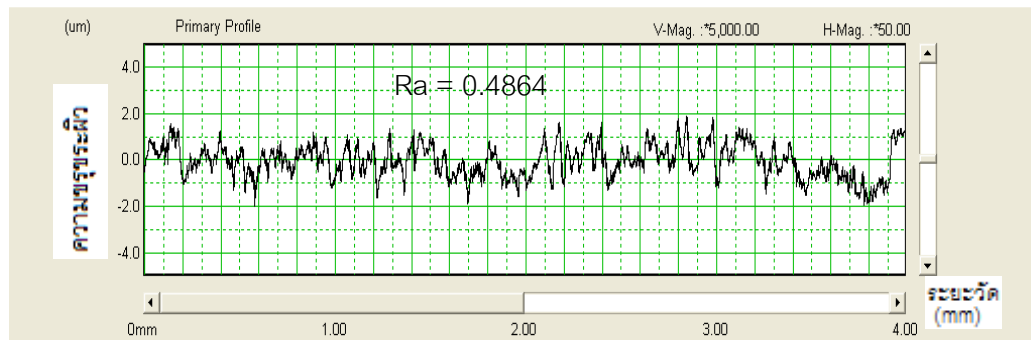
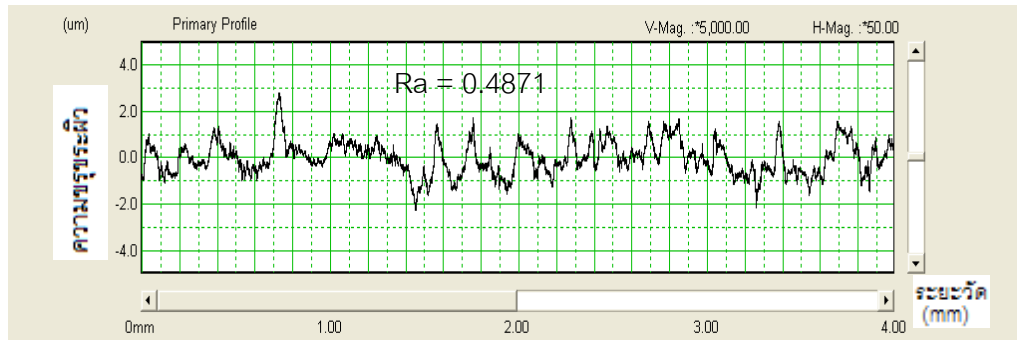
$$Ra_{เฉลี่ย} = (0.4081 + 0.4490 + 0.3804) / 3 = 0.4125$$

ความเร็วรอบตัด 2200 รอบ/นาที, อัตราป้อนตัด 0.015 มิลลิเมตร/รอบ, ความลึกตัด 0.75 มิลลิเมตร, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด 8 มิลลิเมตร และความดันลมเป่า 0.5 เมกกะปาสกาล



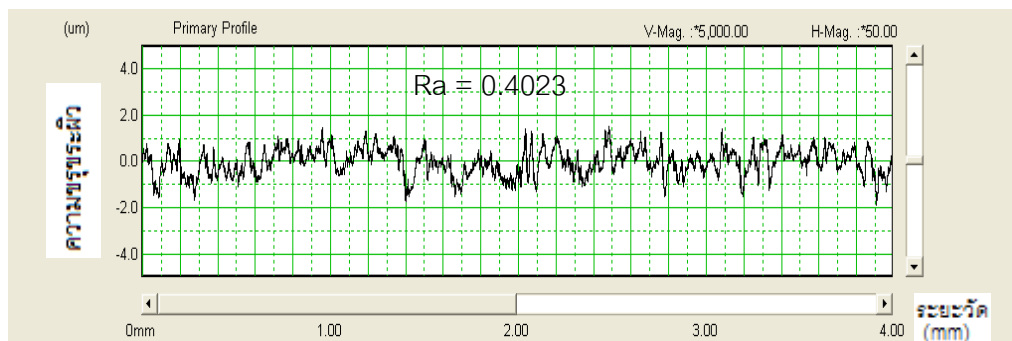
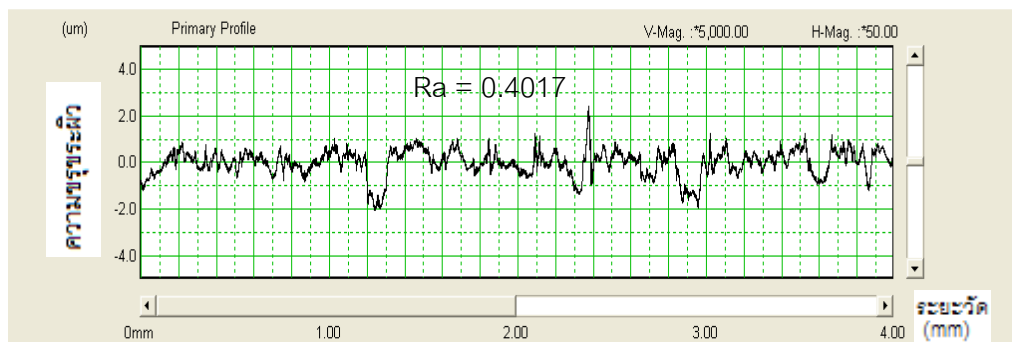
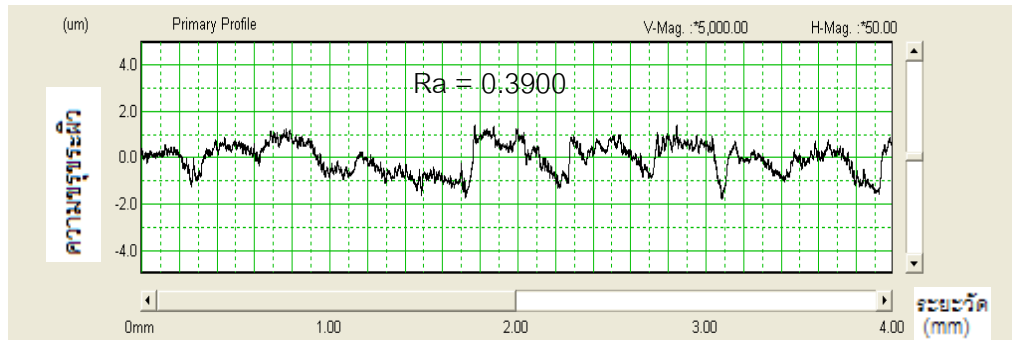
$$Ra_{เฉลี่ย} = (0.5211 + 0.5454 + 0.5282) / 3 = 0.5316$$

ความเร็วรอบตัด 2200 รอบ/นาที, อัตราป้อนตัด 0.015 มิลลิเมตร/รอบ, ความลึกตัด 0.75 มิลลิเมตร, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด 8 มิลลิเมตร และความดันลมเป่า 0.5 เมกกะปาสกาล



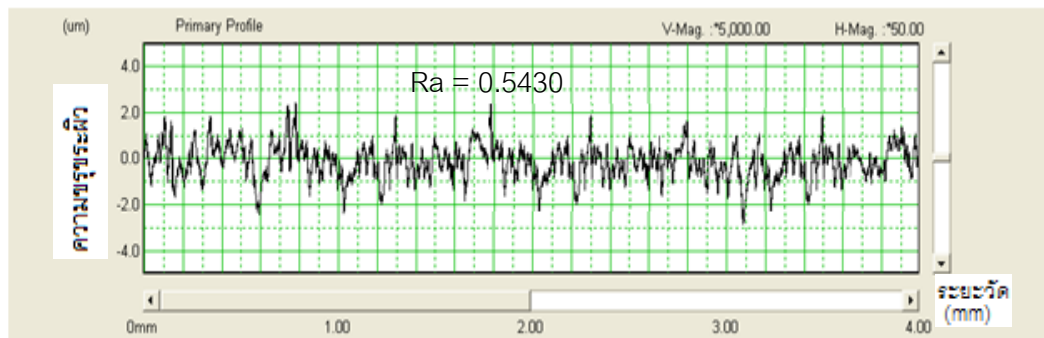
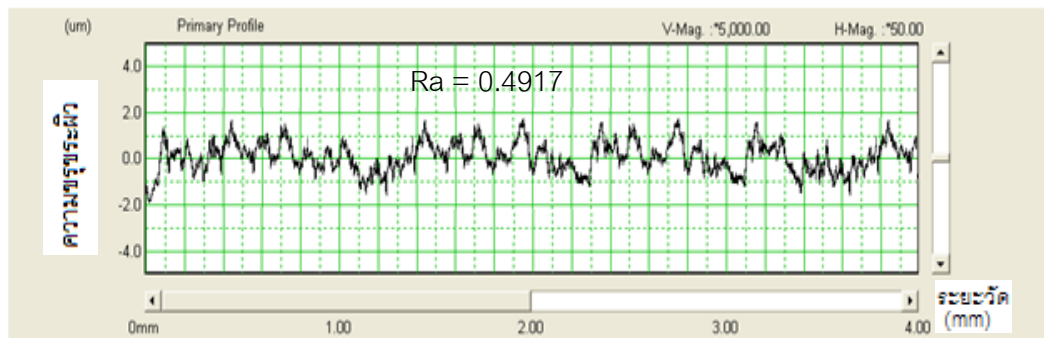
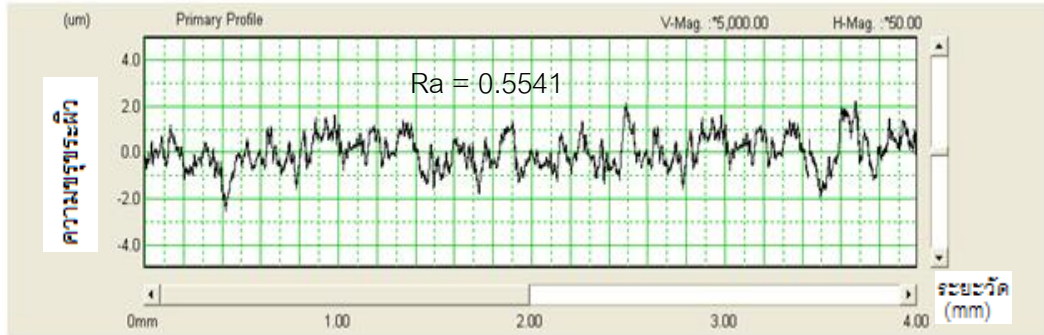
$$Ra_{เฉลี่ย} = (0.4871 + 0.4864 + 0.4890) / 3 = 0.4875$$

ความเร็วรอบตัด 2200 รอบ/นาที, อัตราป้อนตัด 0.015 มิลลิเมตร/รอบ, ความลึกตัด 0.75 มิลลิเมตร, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด 8 มิลลิเมตร และความดันลมเป่า 0.5 เมกกะปาสกาล



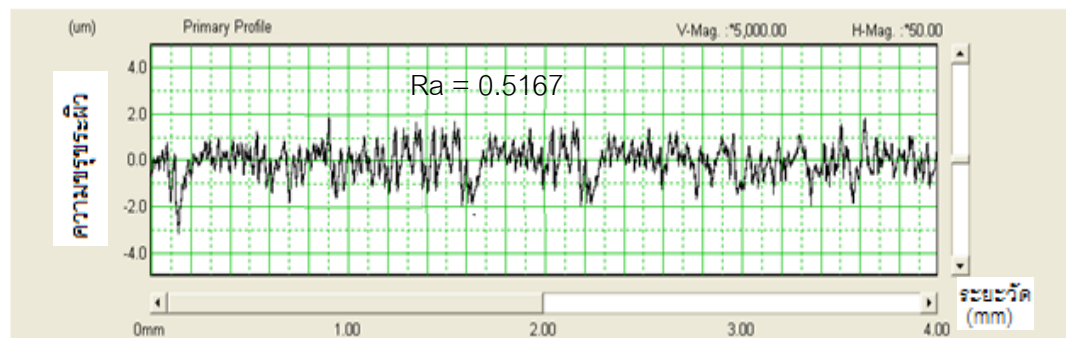
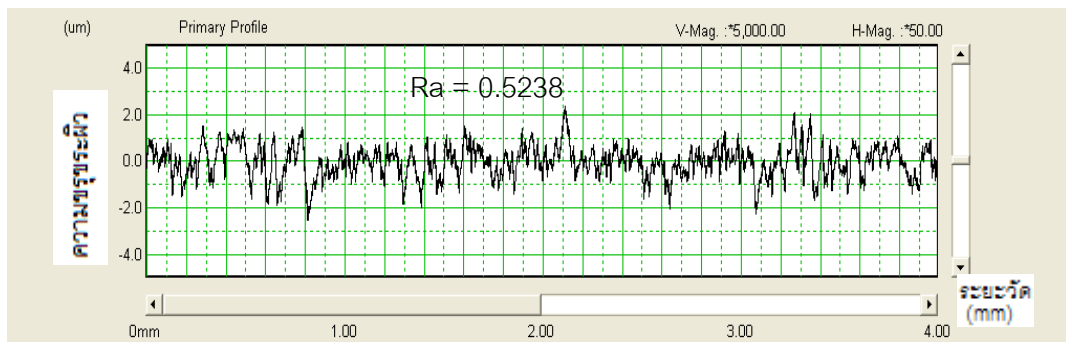
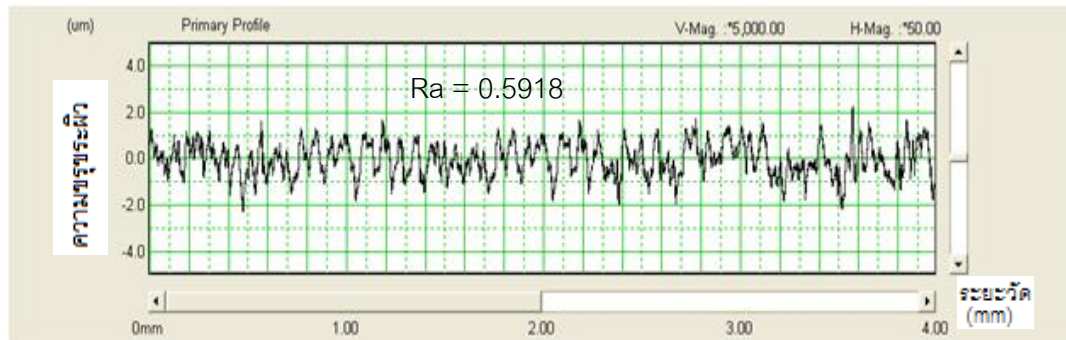
$$Ra_{เฉลี่ย} = (0.3900 + 0.4017 + 0.4023) / 3 = 0.3980$$

ความเร็วรอบตัด 2200 รอบ/นาที, อัตราป้อนตัด 0.015 มิลลิเมตร/รอบ, ความลึกตัด 1 มิลลิเมตร,
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด 10 มิลลิเมตร และความดันลมเป่า 0.5 เมกกะปาสกาล



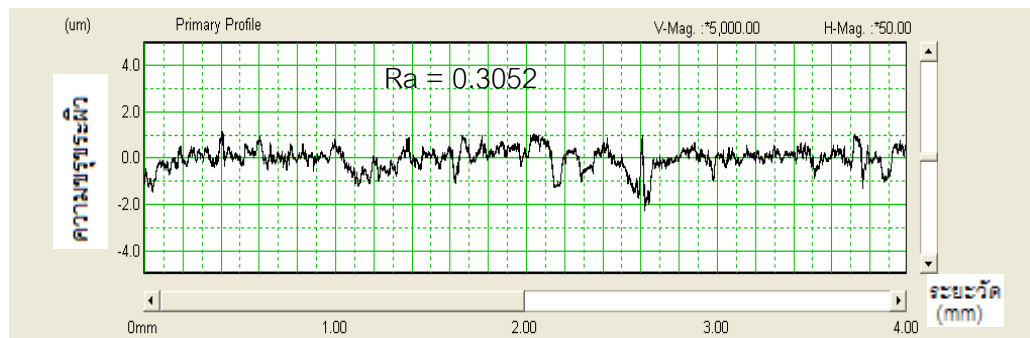
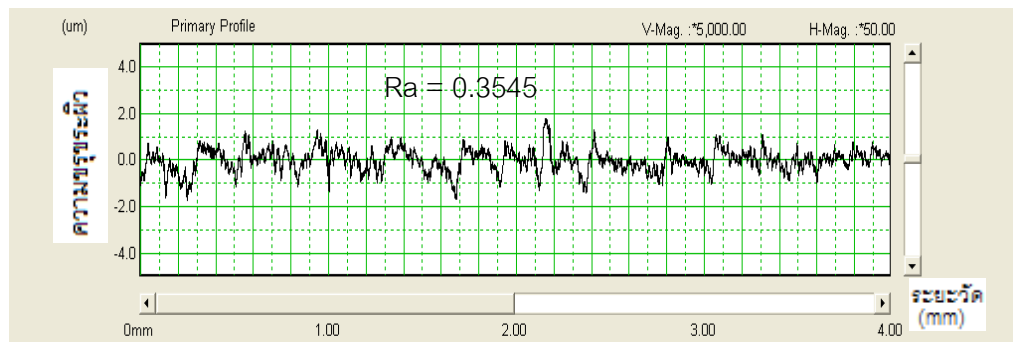
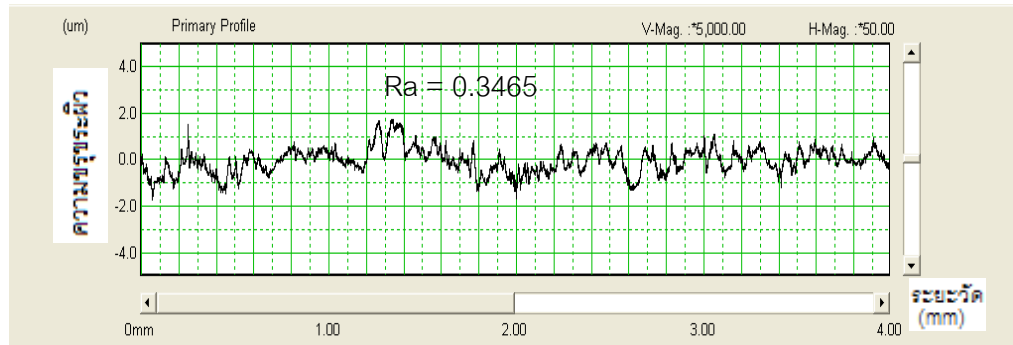
$$Ra_{เฉลี่ย} = (0.5541 + 0.4917 + 0.5430) / 3 = 0.5296$$

ความเร็วรอบตัด 1800 รอบ/นาที, อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตร/รอบ, ความลึกตัด 0.75 มิลลิเมตร,
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด 8 มิลลิเมตร และความดันลมเป่า 0.5 เมกะปาสคาล



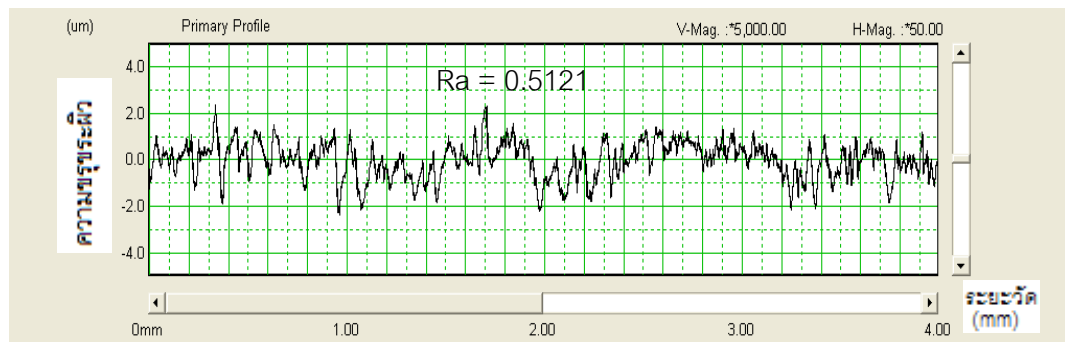
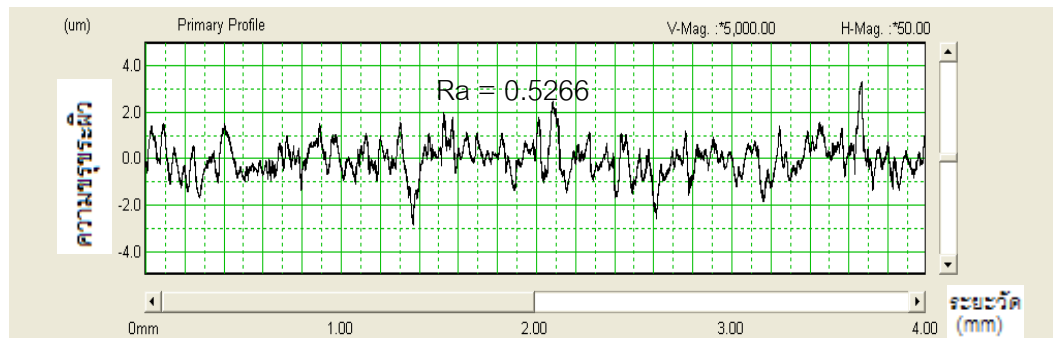
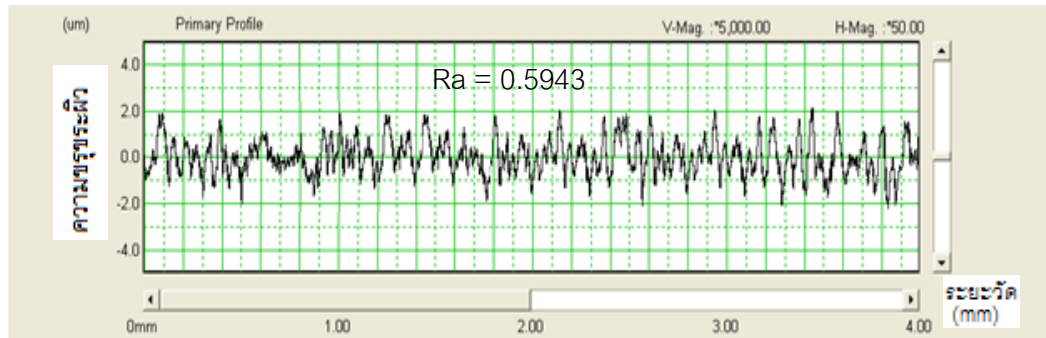
$$Ra_{เฉลี่ย} = (0.5918 + 0.5238 + 0.5167) / 3 = 0.5441$$

ความเร็วรอบตัด 2200 รอบ/นาที, อัตราป้อนตัด 0.015 มิลลิเมตร/รอบ, ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด 6 มิลลิเมตร และความดันลมเป่า 0.5 เมกกะปาสคาล



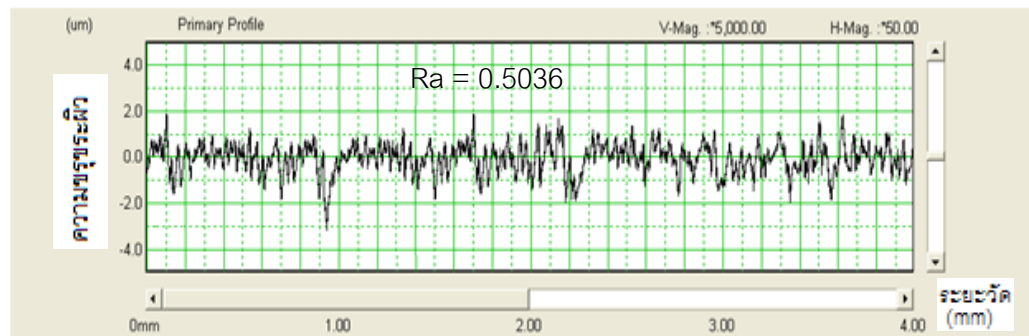
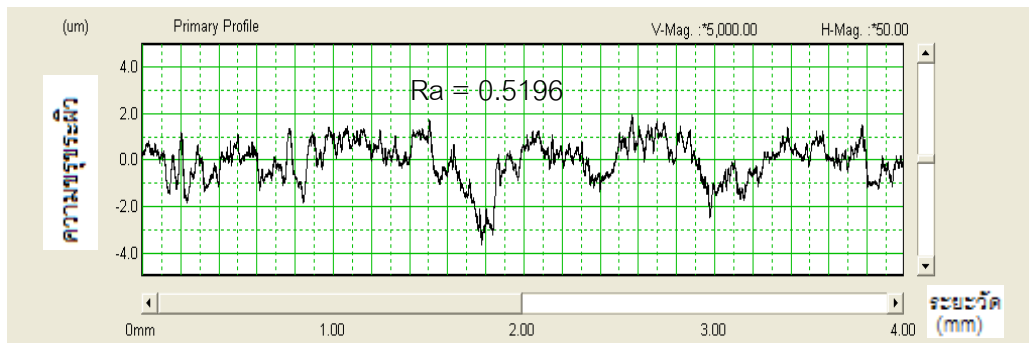
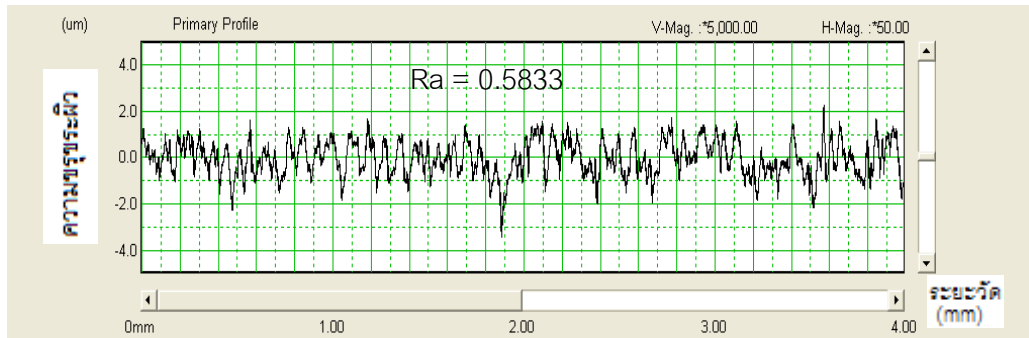
$$Ra_{เฉลี่ย} = (0.3465 + 0.3545 + 0.3052) / 3 = 0.3354$$

ความเร็วรอบตัด 1800 รอบ/นาที, อัตราป้อนตัด 0.01 มิลลิเมตร/รอบ, ความลึกตัด 0.75 มิลลิเมตร, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด 8 มิลลิเมตร และความดันลมเป่า 0.5 เมกกะปาสกาล



$$Ra_{เฉลี่ย} = (0.5943 + 0.5266 + 0.5121) / 3 = 0.5443$$

ความเร็วรอบตัด 2200 รอบ/นาที, อัตราป้อนตัด 0.015 มิลลิเมตร/รอบ, ความลึกตัด 1 มิลลิเมตร,
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด 8 มิลลิเมตร และความดันลมเป่า 0.7 เมกกะปาสกาล



$$Ra_{เฉลี่ย} = (0.5833 + 0.5196 + 0.5036) / 3 = 0.5355$$

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายเกียรติ คุรุณาสวัสดิ์ เกิดวันที่ 27 มีนาคม พ.ศ. 2529 ที่จังหวัดนครปฐม สำเร็จ
การศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาทรัพยากรธรณี คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2551 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรม
ศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย ในภาคการศึกษาต้น ปีการศึกษา 2552