



อิทธิพลของปัจจัยในการกลึงอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง 6061 โดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง
Influence Factors Variables in Turning of Aluminum Casting Semi-Solid 6061
Using Response Surface Methodology



ผศ.สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์
ดร.ชาตรี หอมเขียว
ดร.วรรณพร ชีววุฒิพงศ์

สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
งบประมาณเงินรายได้ ประจำปี พ.ศ. 2559

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของค่าความขรุขระผิวในกระบวนการกลึงอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6061 โดยใช้วิธีพื้นผิวผลตอบสนองด้วยการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง โดยมีปัจจัยที่ใช้ในการทดลองคือ ความเร็วตัด อัตราป้อน และความลึกในการตัด จากการทดลองพบว่าปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าความขรุขระผิว คือ ความเร็วตัด อัตราป้อน และความลึกในการตัด สภาวะที่เหมาะสมต่อค่าความขรุขระผิว คือ ความเร็วตัด 120 เมตร/นาที อัตราป้อน 0.03 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกในการตัด 0.2 มิลลิเมตร ได้ค่าความขรุขระผิว เท่ากับ 0.614 ไมโครเมตร ลักษณะการสึกหรอของเม็ดมีดพบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปทรง ซึ่งจะเป็นการสึกหรอแบบแตกหักที่ปลายคมตัด อาจเนื่องจากการเสียดสีและการกระแทกชิ้นงาน

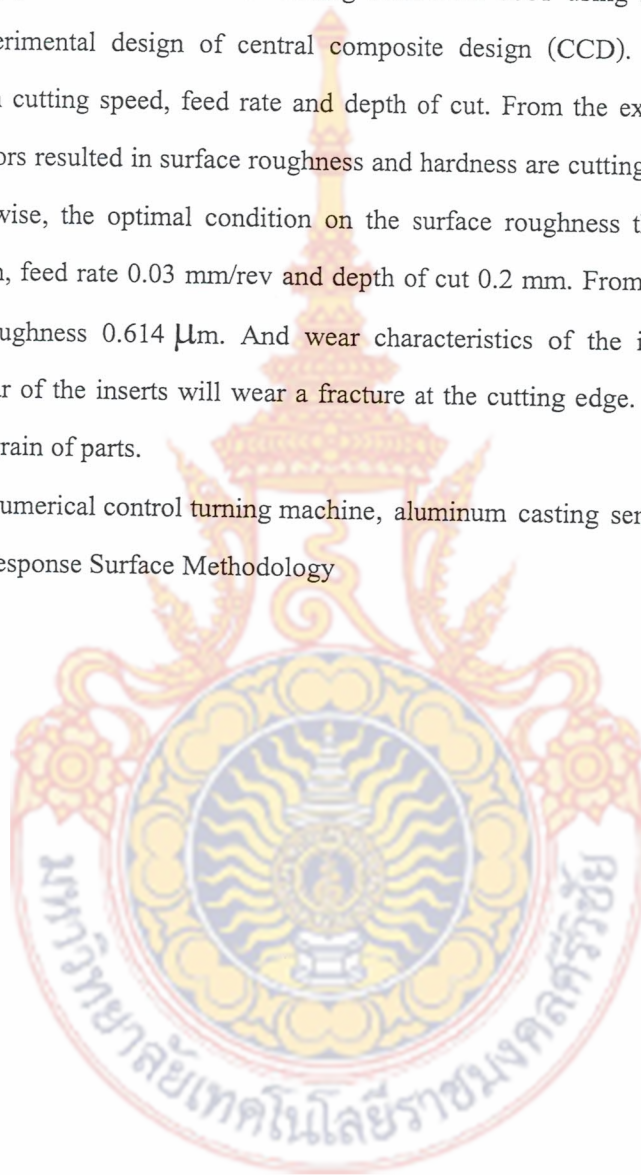
คำหลัก: เครื่องกลึงควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์, อะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง, ความขรุขระผิว, การพยากรณ์, วิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง



ABSTRACT

The objective of this research was to find the optimal conditions of surface roughness and hardness in turning process of aluminum casting semi-solid 6061 using response surface methodology with experimental design of central composite design (CCD). Factors used in experiment include with cutting speed, feed rate and depth of cut. From the experiment, it was found that the main factors resulted in surface roughness and hardness are cutting speed, feed rate and depth of cut. Likewise, the optimal condition on the surface roughness that found is the cutting speed 120 m/min, feed rate 0.03 mm/rev and depth of cut 0.2 mm. From this equation, it revealed the surface roughness 0.614 μm . And wear characteristics of the inserts were not changed shape. The wear of the inserts will wear a fracture at the cutting edge. Probably due to friction and shock with grain of parts.

Keywords: computer numerical control turning machine, aluminum casting semi-solid, surface roughness, Prediction, Response Surface Methodology



กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากงบประมาณรายได้ ประจำปี 2559 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการทดลอง และขอขอบคุณคณาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรมทุกท่านที่ให้ความสนใจในการวิจัย จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์

ชาติรี หอมเขียว

วรรณพร ชีววุฒิพงศ์

5 มิถุนายน 2559



สารบัญ

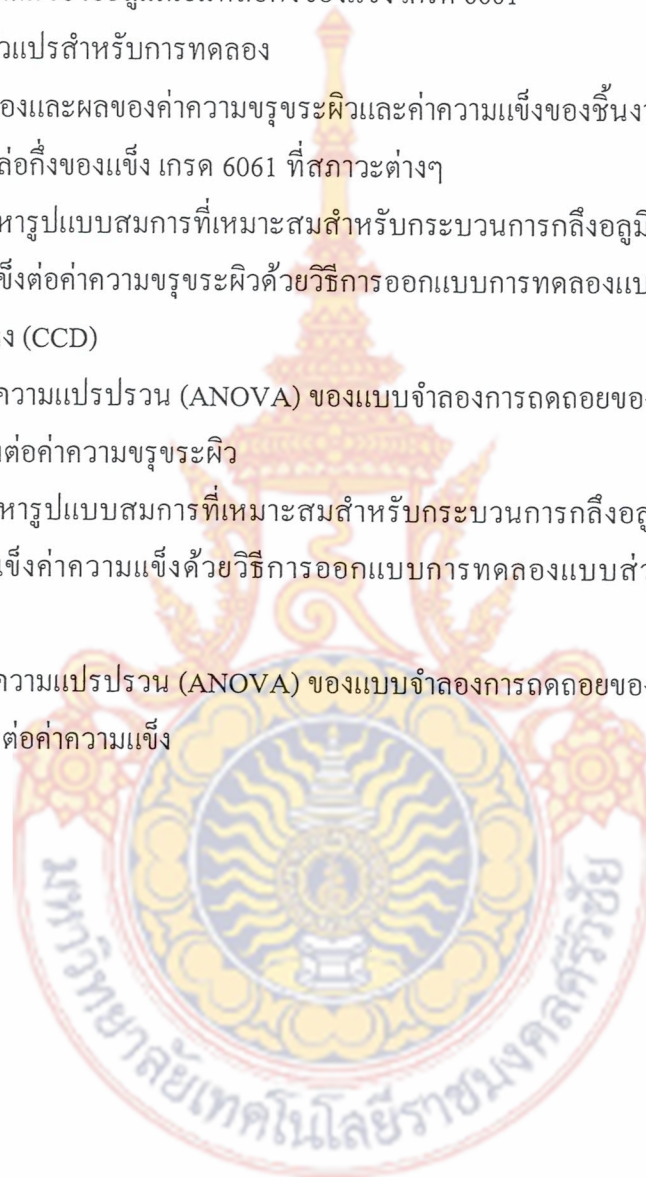
	หน้า
บทคัดย่อ	ข
Abstract	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 อะลูมิเนียม (Aluminum)	5
2.2 หลักการพื้นฐานของการตัดโดยใช้ใบมีด	7
2.3 ความขรุขระผิว (Surface Roughness)	13
2.4 การออกแบบการทดลอง (Design of Experimental)	14
2.5 การวัดความถูกต้องแม่นยำของการพยากรณ์	16
2.6 การสึกหรอของเครื่องมือตัด	17
บทที่ 3 วิธีดำเนินงาน	20
3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง และการออกแบบการทดลอง	20
3.2 วิธีการวัดชิ้นงาน	23
3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	24
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์	27
4.1 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	27
4.2 สมการถดถอยและการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความขรุขระผิว	28
4.3 การหาค่าสถานะที่เหมาะสมของค่าความขรุขระผิว	36

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4 การทดลองยืนยันผลของค่าความขรุขระผิว	37
4.5 การวิเคราะห์รูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติที่เหมาะสมของค่าความ แข็ง	37
4.6 การตรวจสอบความพอเพียงของรูปแบบจำลองของค่าความแข็ง	37
4.7 สมการถดถอยและการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็ง	39
4.8 การหาค่าสภาวะที่เหมาะสมของค่าความแข็ง	42
4.9 การทดลองยืนยันผลของค่าความขรุขระผิว	43
4.10 ลักษณะการสึกหรอของเม็ดมิด	43
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	44
5.1 สรุปผลการทดลอง	44
5.2 ลักษณะการสึกหรอของเม็ดมิด	44
5.3 ข้อเสนอแนะ	45
บรรณานุกรม	46
ภาคผนวก ก	49
ตารางบันทึกผลการทดลอง	50
ภาคผนวก ข	65
ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน	66
ภาคผนวก ค	71
ข้อมูลเครื่องจักรและอุปกรณ์ในการทดลอง	72

สารบัญญัตินำ

ตารางที่		หน้า
3.1	ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6061	23
3.2	การกำหนดตัวแปรสำหรับการทดลอง	25
4.1	แผนการทดลองและผลของค่าความขรุขระผิวและค่าความแข็งของชิ้นงาน อะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6061 ที่สภาวะต่างๆ	29
4.2	การวิเคราะห์หารูปแบบสมการที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการกลึงอะลูมิเนียม หล่อกิ่งของแข็งต่อค่าความขรุขระผิวด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบ ส่วนผสมกลาง (CCD)	30
4.3	การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของแบบจำลองการถดถอยของ ผลตอบสนองต่อค่าความขรุขระผิว	31
4.4	การวิเคราะห์หารูปแบบสมการที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการกลึงอะลูมิเนียม หล่อกิ่งของแข็งค่าความแข็งด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม กลาง (CCD)	40
4.5	การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของแบบจำลองการถดถอยของ ผลตอบสนองต่อค่าความแข็ง	40



สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	การใช้งานอะลูมิเนียมในอุตสาหกรรม	2
2.1	อุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีการปล่อยฟองแก๊ส	7
2.2	ลักษณะทางเรขาคณิตของใบมีดตัด	8
2.3	ลักษณะของการสึกหรอบนผิวหลบ	19
2.4	ลักษณะของการสึกหรอบนผิวคาย	19
2.5	ลักษณะของการสึกหรอที่ปลายมีด	19
3.1	ชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061 ที่ใช้ในการทดลอง	20
3.2	ใบมีดคาร์ไบด์ที่ใช้ในการทดลอง	20
3.3	เครื่องกลึงที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ ยี่ห้อ EMCO รุ่น PC Turn 50	21
3.4	เครื่องวัดความขรุขระผิว	21
3.5	เวอร์เนียร์คาลิเปอร์	22
3.6	ชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061	23
3.7	โครงสร้างทางจุลภาคของอะลูมิเนียมกึ่งของแข็ง เกรด 6061	23
3.8	การกำหนดช่วงการวัดของชิ้นงาน	24
3.9	วิธีการวัดความขรุขระผิว	24
4.1	การตรวจสอบความพอเพียงของรูปแบบจำลองการถดถอยของค่าความขรุขระผิว	28
4.2	อิทธิพลของปัจจัยของความเร็วตัดและอัตราป้อนที่มีผลต่อค่าความขรุขระผิว	35
4.3	อิทธิพลของปัจจัยของอัตราป้อนและความลึกในการตัดที่มีผลต่อค่าความขรุขระผิว	36
4.4	อิทธิพลของปัจจัยของความเร็วตัดและความลึกในการตัดที่มีผลต่อค่าความ	36
4.5	สภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยในการกลึงต่อค่าความขรุขระผิว	37
4.6	การตรวจสอบความพอเพียงของรูปแบบจำลองการถดถอยของค่าความแข็ง	38
4.7	อิทธิพลของปัจจัยของความเร็วตัดและอัตราป้อนที่มีผลต่อค่าความแข็ง	41
4.8	อิทธิพลของปัจจัยของความเร็วตัดและความลึกในการตัดที่มีผลต่อค่าความแข็ง	41
4.9	อิทธิพลของปัจจัยของอัตราป้อนและความลึกในการตัดที่มีผลต่อค่าความแข็ง	41
4.10	สภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยในการกลึงต่อค่าความแข็ง	42

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.11	สถานะที่เหมาะสมของปัจจัยในการกึ่งต่อค่าความขรุขระผิวและความแข็ง	42
4.12	ลักษณะการสึกหรอของเม็ดเม็ด	43



บทที่ 1

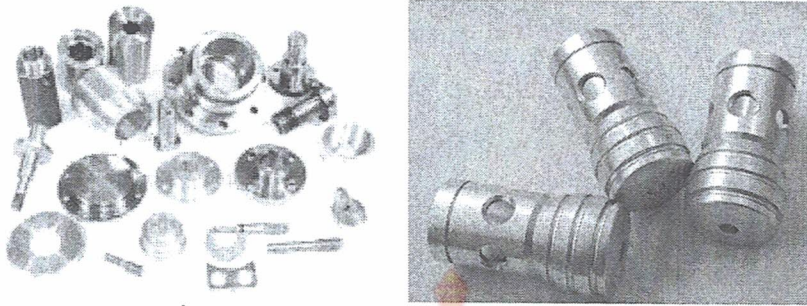
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ ชิ้นส่วนเครื่องยนต์ และชิ้นส่วนอุตสาหกรรมมีความสำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศทั้งในด้านการผลิตและมีความเชื่อมโยงกับอุตสาหกรรมต่อเนื่องอื่นๆ ซึ่งทำรายได้ให้แก่ประเทศในแต่ละปีเป็นจำนวนมาก ภาครัฐได้ให้การส่งเสริมสนับสนุนในด้านการลงทุนการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์จนประเทศไทยกลายเป็นฐานการผลิตที่สำคัญแหล่งหนึ่งของโลก อุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ของไทยได้มีการขยายการลงทุน และมุ่งพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องจนสามารถผลิตชิ้นส่วนให้มีความหลากหลาย มีคุณภาพ และมาตรฐานการผลิตอยู่ในระดับที่ผู้ผลิตระดับโลกยอมรับ ปัจจุบันการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ได้ครอบคลุมชิ้นส่วนต่างๆ เช่น ชิ้นส่วนเครื่องยนต์ ชิ้นส่วนระบบกันสะเทือน ชิ้นส่วนตัวถัง ชิ้นส่วนระบบขับเคลื่อน ชิ้นส่วนตกแต่ง และชิ้นส่วนอุปกรณ์ระบบไฟฟ้า เป็นต้น

อะลูมิเนียมถือเป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่นิยมนำมาใช้ในการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ ชิ้นส่วนเครื่องยนต์ เนื่องจากอะลูมิเนียมมีความหนาแน่นต่ำ เป็นโลหะที่มีน้ำหนักเบา ทนทานต่อการเกิดสนิม และการผุกร่อนในสภาพแวดล้อมได้ดี สำหรับอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6061 เป็นอะลูมิเนียมผสม แมกนีเซียมและซิลิกอน เป็นหลักมีคุณสมบัติด้านความแข็งแรงสูง ด้านทานการกัดกร่อน ดังนั้นทำให้อะลูมิเนียมกลุ่มนี้จะนำไปใช้ทำชิ้นส่วนเครื่องยนต์ ชิ้นส่วนเรือเดินสมุทร ชิ้นส่วนอากาศยาน ชิ้นส่วนแม่พิมพ์ เป็นต้น

งานกลึงเป็นกระบวนการแปรรูปชิ้นส่วนอุตสาหกรรมที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง การกลึงปอกผิวเป็นกระบวนการในการลดขนาดความโตของชิ้นงานให้เป็นรูปร่างตามที่ต้องการ โดยให้มีมิติตัดเคลื่อนที่ตัดชิ้นงาน ปัจจัยสำคัญในกระบวนการกลึงปอกผิวคือ อัตราป้อน ความเร็วตัด ความลึกในการตัด วัสดุมีดกลึง มุมของคมตัด และวัสดุชิ้นงานที่ต้องการตัดเฉือน เป็นต้น ซึ่งผลที่เกิดขึ้นหลังผ่านกระบวนการกลึงปอก คือขนาดของชิ้นงาน ความขรุขระผิวของชิ้นงาน ลักษณะของเศษกลึง และการสึกหรอของมีดกลึง เป็นต้น แสดงดังตัวอย่างการใช้งานอะลูมิเนียม ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 การใช้งานอะลูมิเนียมในอุตสาหกรรม

จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตัดเฉือนวัสดุด้วยกระบวนการกลึงพบว่ามีการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อความขรุขระผิวและค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดในการกลึงไม้ตาลโตนดเพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นประโยชน์ในอุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์โดยใช้ใบมีดคาร์ไบด์ โดยพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อความขรุขระผิว คือ อัตราป้อน และความเร็วตัด โดยพบว่าค่าความขรุขระผิวจะลดลงเมื่อใช้อัตราป้อนต่ำลงและใช้ความเร็วตัดเพิ่มขึ้น [สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์ และจักรนรินทร์ ฉัตรทอง ; 2551] จากนั้นมีการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อความขรุขระผิวในการกลึงไม้มะพร้าวและไม้ปาล์มน้ำมันสำหรับทำชิ้นส่วนเฟอร์นิเจอร์โดยใช้มีดคาร์ไบด์ จากการทดลองพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อความขรุขระผิวของไม้มะพร้าวคือ อัตราป้อน และความเร็วตัด และพบว่าความลึกในการตัดไม่มีผลต่อค่าความขรุขระผิว ซึ่งมีแนวโน้มว่าค่าความขรุขระผิวลดลงเมื่อใช้อัตราป้อนต่ำลงและความเร็วตัดเพิ่มขึ้น [สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์ และคณะ ; 2552] ส่วนของการกลึงวัสดุที่เป็นโลหะได้มีการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการกลึงเหล็กกล้าสแตนเลส เกรด AISI 316 ที่มีผลต่อการสึกหรอของเม็ดมีดและความขรุขระผิวโดยใช้เม็ดมีดซีเมนต์คาร์ไบด์เคลือบด้วยไทเทเนียมไนไตรด์ภายใต้ค่าความเร็วตัด อัตราป้อน และความลึกในการตัดที่แตกต่างกัน จากนั้นได้ศึกษาอิทธิพลของอัตราการกำจัดเนื้อโลหะในการวัดการสึกหรอของเม็ดมีดและการวัดค่าความขรุขระพื้นผิว ผลการทดลองพบว่าความเร็วตัด และความลึกในการตัดให้ค่าการสึกหรอของเม็ดมีดกลึงแบบ Flank Wear ใกล้เคียงกัน ในขณะที่การเพิ่มอัตราป้อนและอัตราการกำจัดเนื้อโลหะส่งผลให้ค่าความขรุขระพื้นผิวเพิ่มสูงขึ้น โดยสรุปสถานะการตัดที่เหมาะสมในการกลึงเหล็กกล้าสแตนเลส เกรด AISI 316 คือ ความเร็วตัด อัตราป้อน และความลึกในการตัดมีค่า 160 ม.ต่อนาที 0.08 มม.ต่อรอบ และ 0.2 มม. ตามลำดับ [พงษ์พันธ์ ราชภักดี และ เฉลิมพล คล้ายนิล ; 2550] ในส่วนของการกลึงวัสดุที่เป็นอะลูมิเนียมได้มีการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในการกลึงปอกต่อความขรุขระผิวอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็งเกรด 7075 โดยใช้เครื่องกลึงควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์โดยใช้มีดกลึงคาร์ไบด์ ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ ความเร็วตัด อัตราป้อน และความลึกในการตัด โดยกำหนดความเร็วตัดอยู่ในช่วง 130-220 ม./นาที อัตราป้อน 0.02-0.1 มม./รอบ และความลึกใน

การตัด 0.45-0.85 มม. ผลการทดลองพบว่าอัตราป้อนมีผลต่อความขรุขระผิวสูงสุด โดยค่าความขรุขระผิวมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราป้อนต่ำลง [วิมล บุญรอด และ ธเนศ รัตนวิไล ; 2555]

ปัจจุบันอะลูมิเนียมผสมได้ถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม แต่อะลูมิเนียมบริสุทธิ์มีความแข็งแรงต่ำนำไปผสมกับธาตุอื่นๆ เช่น ซิลิกอน สังกะสี แมกนีเซียม เป็นต้น ในปริมาณที่เหมาะสมจะทำให้มีสมบัติทางกลที่ดีขึ้น อะลูมิเนียมผสมมีกรรมวิธีการผลิตที่หลากหลาย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับรูปแบบของผลิตภัณฑ์ ในกระบวนการขึ้นรูปอะลูมิเนียมแบบดั้งเดิมจะเกิดเกรนแบบกึ่งไม้ในโครงสร้างจุลภาคส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการหดตัวเนื่องจากมีรูพรุนของอากาศแทรกอยู่ในโครงสร้างจุลภาค ซึ่งลักษณะดังกล่าวส่งผลให้ชิ้นงานมีสมบัติทางกลที่ด้อยลง ปัจจุบันมีการศึกษาเทคโนโลยีการหล่อโลหะกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Metal Casting) โดยใช้เทคนิค Gas Induced Semi-Solid ; GISS) [เกษภา วรณสินธุ์ ; 2554] [รอมฎอน บุระพา และคณะ ; 2552] โดยการพ่นแก๊สไนโตรเจนลงไปใต้น้ำโลหะที่หลอมเหลวจะทำให้เกิดโครงสร้างเกรนเป็นแบบก้อนกลม (Globular Grain) โครงสร้างภายในรวมตัวกันแน่นขึ้นและมีโพรงอากาศน้อยลงส่งผลให้มีสมบัติทางกลที่ดีขึ้น รวมถึงการตอบสนองต่อกระบวนการทางความร้อนได้ดียิ่งขึ้น อนึ่งการนำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อโลหะกึ่งของแข็งด้วยกระบวนการ GISS นี้ไปใช้ในการผลิตชิ้นส่วนอุตสาหกรรมได้นั้น จำเป็นต้องผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการตัดเฉือน เพื่อให้ได้ขนาดและผิวชิ้นงานตามต้องการ อย่างไรก็ตามองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับการกลึงปอกผิวชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อโลหะกึ่งของแข็งด้วยกระบวนการ GISS ยังมีการวิจัยจำนวนน้อย จึงเป็นที่มาของงานวิจัยที่ต้องการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อความขรุขระผิวและการสึกหรอของเม็ดมีดในการกลึงปอกอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061 เพื่อเป็นแนวทางในการกำหนดปัจจัยและการเลือกใช้สภาวะการกลึงให้มีความเหมาะสม ทำให้ได้ชิ้นส่วนอะลูมิเนียมที่มีคุณภาพสามารถลดต้นทุนการผลิตให้แก่อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องได้ จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าปัจจัยในการกลึงปอกเพื่อให้ได้ค่าความขรุขระผิวที่ดีจะประกอบด้วยปัจจัยหลัก 3 ปัจจัย คือ ความเร็วตัด อัตราป้อน และความลึกในการตัด ซึ่งจะเป็นปัจจัยหลักในการศึกษาวิจัยนี้ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อความขรุขระผิวในการกลึงปอกอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061
- 2) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการกลึงปอกอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061
- 3) เพื่อวิเคราะห์รูปแบบการสึกหรอของเม็ดมีดคาร์ไบด์ในการกลึงปอกอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1) ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรควบคุมได้ในการกลึงอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง ซึ่งตัวแปรอิสระที่ถูกควบคุมในการทดลองนี้คือ ความเร็วรอบ (Speed) อัตราป้อน (Feed Rate) และความลึกในการตัด (Depth of cut)
- 2) เครื่องกลึงในการทดลองเป็นเครื่องกลึงควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ (CNC) ยี่ห้อ EMCO TRONIC รุ่น PC Turn 50
- 2) กลึงปอกผิวชิ้นงานทรงกระบอกในลักษณะของการกลึงละเอียด และผลจากการทดลองคือ ค่าความขรุขระผิว (Surface Roughness) ของชิ้นงาน
- 3) วัสดุที่ใช้ในการวิจัย เป็นอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการหล่อกึ่งของแข็ง โดยใช้เทคโนโลยี GISS (Gas Induce Semi Solid) เกรด SSM 6061
- 4) ใช้ไบต์คาร์ไบด์ ชนิดถอดเปลี่ยนได้ (Carbide Cutting Tool Insert) ยี่ห้อ Plansee Tizit แบบ DCGT 070204FN-27 เกรด H10T มีส่วนผสมของ Co 6.0% เป็นวัสดุคมตัด
- 5) ใช้เครื่องวัดความขรุขระผิว ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น SJ-210
- 6) กำหนดความเร็วรอบในการกลึงไม่เกิน 2,500 รอบต่อนาที เนื่องจากเป็นความเร็วรอบสูงสุดของเครื่องจักร และความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงเส้นที่ผิวชิ้นงาน (เมตรต่อนาที) กับความเร็วรอบ (รอบต่อนาที) คือ $V = (\pi DN)/1000$ โดยที่ V คือความเร็วเชิงเส้น (ม./นาที) D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน (มม.) และ N คือความเร็วรอบของชิ้นงาน (รอบ/นาที)
- 8) ช่วงของตัวแปรอิสระที่นำมาทดลองจะอยู่ภายในช่วงดังนี้ ความเร็วรอบช่วง 1,000-2,500 รอบ/นาที อัตราป้อนตัดช่วง 0.02-0.25 มม./รอบ และความลึกในการตัดช่วง 0.4-1.5 มม.
- 9) แบบแผนการทดลองที่ใช้คือการทดลองวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้ปัจจัยที่มีผลต่อการกลึงอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061 โดยใช้เม็ดคาร์ไบด์
- 2) ได้สภาวะที่เหมาะสมในการกลึงอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061 ที่มีผลต่อค่าความขรุขระผิวและพฤติกรรมการสึกหรอของเม็ดมีด
- 3) ประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนแม่พิมพ์ ชิ้นส่วนยานยนต์ และที่เกี่ยวข้องที่ใช้อะลูมิเนียมได้แนวทางการเลือกสภาวะการกัดได้อย่างเหมาะสม

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

โครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในการกลึงอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง 6061 ด้วยมีดคาร์ไบด์โดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง โดยผู้วิจัยได้ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยดังกล่าวละเอียดต่อไปนี้

2.1 อะลูมิเนียม (Aluminum)

อะลูมิเนียม เป็นโลหะเบาที่ถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวาง และมีจำนวนสูงสุดในกลุ่ม วัสดุโลหะเบาด้วยกัน สามารถพบอะลูมิเนียมได้เป็นจำนวนมากบนพื้นโลก โดยจะอยู่ในรูปของอะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminum Oxide) หรือที่เรียกว่า อะลูมินา (Alumina) ในสภาพเจือปนอยู่ในสินแร่บ็อกไซต์ (Bauxite) ในองค์ประกอบของอะลูมินาที่มีสภาพเจือปนจะมีสินแร่อะลูมิเนียมอยู่ประมาณ 40-60 เปอร์เซ็นต์

อะลูมิเนียมเป็นวัสดุที่ถูกนำมาใช้งานมากที่สุดในกลุ่มโลหะที่มีน้ำหนักเบา (Light Metals) เพราะอะลูมิเนียมมีคุณสมบัติเด่นหลายประการ อะลูมิเนียมจะมีความหนาแน่นน้อยและมีกำลังวัสดุต่อหน่วยน้ำหนักสูง จึงนิยมใช้ทำชิ้นส่วนที่ต้องการความแข็งแรงสูง แต่ต้องการน้ำหนักเบา สามารถขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีต่างๆ ได้ง่าย จุดหลอมเหลวต่ำ หล่อหลอมง่าย นิยมใช้เป็นตัวนำไฟฟ้า ไม่เป็นพิษต่อร่างกาย ทนทานต่อการเกิดสนิมและการกัดกร่อนในบรรยากาศ

อุตสาหกรรมในประเทศไทยมีความต้องการชิ้นส่วนอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้นทุกปีตามการเติบโตของอุตสาหกรรม แต่เนื่องจากผู้ประกอบการของไทยเป็นเพียงผู้ใช้เทคโนโลยีของประเทศอื่น จึงขาดองค์ความรู้ในด้านการผลิตและขาดเทคโนโลยีที่สามารถพัฒนาไปใช้ในการแข่งขันได้ ประกอบกับการผลิตอะลูมิเนียมในประเทศไทยจะเป็นการนำเข้าอะลูมิเนียมมาหลอมใหม่เนื่องจากประเทศไทยไม่มีแหล่งแร่บ็อกไซต์ที่ใช้ในการผลิตอะลูมิเนียมขั้นต้น โดยอะลูมิเนียมที่นำมาหลอมใหม่มีทั้งการใช้เศษอะลูมิเนียมในประเทศและนำเข้าจากต่างประเทศ ซึ่งจะได้อะลูมิเนียมในลักษณะสินค้ากึ่งสำเร็จรูป ที่เรียกว่า Slab และ Billet ที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมรถยนต์ อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรกล อุตสาหกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งอุตสาหกรรมเหล่านี้มีความต้องการชิ้นส่วนอะลูมิเนียมผสมที่หล่อด้วยกระบวนการหล่อฉีด (Die Casting) เพื่อช่วยลดน้ำหนักและลดการใช้

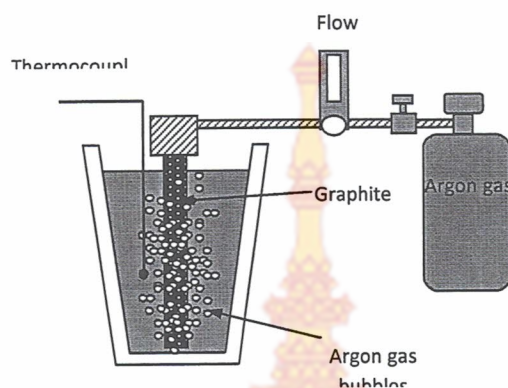
พลังงาน ทำให้ปัจจุบันมีการคิดค้นเทคโนโลยีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนอะลูมิเนียม

ประเทศอุตสาหกรรมชั้นนำต่าง ๆ ของโลก เช่น ญี่ปุ่น ไต้หวัน เกาหลี ยุโรป และอเมริกา เป็นประเทศที่สามารถผลิตชิ้นส่วนอะลูมิเนียมที่มีคุณภาพสูงได้ เนื่องจากมีการคิดค้นเทคโนโลยีที่ช่วยเพิ่มศักยภาพในการหล่ออะลูมิเนียมแบบฉีดอย่างกว้างขวาง โดยค้นพบเทคโนโลยีที่เรียกว่ากรรมวิธีการหล่อแบบ Rheocasting ซึ่งเป็นกระบวนการหล่อโลหะแบบกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Metal Processes) ถูกค้นพบครั้งแรกในช่วงต้นปี 1970 โดย Spencer และ Fleming ที่สถาบันเทคโนโลยีแห่งรัฐแมสซาชูเซตส์ (Massachusetts Institute of Technology ; MIT) การหล่อโลหะแบบกึ่งของแข็งนี้ เป็นการขึ้นรูปโลหะด้วยการหล่อในขณะที่โลหะอยู่ในสถานะกึ่งแข็งกึ่งเหลว (Mushy State) โลหะจะมีการแข็งตัวเป็นบางส่วนโดยโลหะส่วนที่แข็งตัวแล้วจะมีโครงสร้างเกรนไม่เป็นแบบเดนไดรต์ (Non – Dendritic Grain) หรือบางที่อาจจะเรียกว่าเกรนแบบก้อนกลม (Globular Grain) ซึ่งเกรนก้อนกลมที่ลอยอยู่ในน้ำโลหะนี้จะทำให้โลหะกึ่งของแข็งมีความเหนียวมากกว่าน้ำโลหะทั่วไปหลายเท่า (Wannasin et al., 2006)

สำหรับประเทศไทยเริ่มมีการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการหล่อโลหะกึ่งของแข็งเพื่อประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมในประเทศ โดยการคิดค้นกรรมวิธีการผลิตโลหะกึ่งของแข็งแบบใหม่ขึ้น โดย รศ.ดร. เกษฎา วรณสินธุ์ อาจารย์และนักวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ โดยกระบวนการนี้จะใช้การพ่นฟองแก๊สเฉื่อย เช่น แก๊สอาร์กอนหรือไนโตรเจนผ่านแท่งกราไฟต์พอร์นในปริมาณที่น้อยมาก ให้ไหลลงไปในน้ำโลหะเพื่อผลิตโลหะกึ่งของแข็ง โดยใช้หลักการการเคลื่อนย้ายของน้ำโลหะและการดูดความร้อนเฉพาะจุด ซึ่งวิธีการนี้ฟองแก๊สจะเป็นตัวกลางในการกวนและแท่งกราไฟต์พอร์นจะเป็นตัวดูดระบายความร้อน โดยเรียกกรรมวิธีการผลิตแบบใหม่นี้ว่ากระบวนการ Gas Induced Semi-Solid หรือ GISS (รวมภูอน บูระพา,2552)

กระบวนการหล่อโลหะกึ่งของแข็งด้วยเทคนิค GISS เป็นกระบวนการสร้างโลหะกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีการพ่นฟองแก๊สเฉื่อยผ่านแท่งกราไฟต์พอร์น ซึ่งเป็นกรรมวิธีแบบใหม่สำหรับการผลิตโลหะกึ่งของแข็งที่มีหลักการคล้ายกับวิธีการหล่อแบบ Rheocasting ที่ให้โครงสร้างเกรนแบบก้อนกลม (Spheroidal Grain) คุณสมบัติของโลหะกึ่งของแข็งมีหลายประการเช่น มีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าโลหะเหลว โลหะเริ่มแข็งตัวบางส่วนแล้วขณะเทใส่แม่พิมพ์มีความเหนียวที่สูงกว่าน้ำโลหะ มีความเค้นขณะไหลต่ำกว่าโลหะที่แข็งตัวแล้ว เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวมีข้อดีหลายประการที่สามารถนำไป

ประยุกต์ใช้ได้อย่างหลากหลายในกระบวนการผลิต เช่น ลดการเกิดของเสียจากปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนในขั้นตอนการหล่อโลหะลงในเบ้าและลดการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage) อีกทั้งยังช่วยยืดอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ แสดงดังในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตโลหะกิ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีการปล่อยฟองแก๊ส
(เจษฎา วรรณสินธุ์, 2554)

อะลูมิเนียมผสมเกรด 6061 เป็นอะลูมิเนียมผสมที่มีส่วนผสมหลัก คือแมกนีเซียม และซิลิกอน โดยมีคุณลักษณะเด่นคือมีความแข็งแรงสูง สามารถนำมาผ่านกระบวนการทางความร้อนจะทำให้สมบัติทางกลดีขึ้น ลักษณะการนำไปใช้งานเหมาะกับงานโครงสร้างที่ต้องการทนต่อการกัดกร่อนได้ดี และสมบัติในการเชื่อมง่าย เช่น ชิ้นส่วนแม่พิมพ์ ชิ้นส่วนเครื่องจักร ชิ้นส่วนรถยนต์ ชิ้นส่วนเรือ เป็นต้น

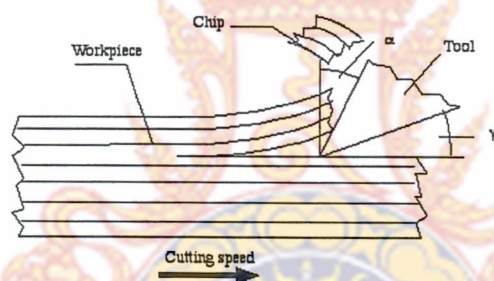
2.2 หลักการพื้นฐานของการตัดโดยใช้ใบมีด

ในการตัดโลหะแบบธรรมดาทั่วไปนั้น อาศัยหลักการขึ้นพื้นฐานที่ว่าใช้ใบมีดตัดที่มีความแข็งแรงสูงกดลงบนชิ้นงานที่มีความแข็งน้อยกว่า เนื้อชิ้นงานจะเกิดสนามความเค้น เมื่อลากคมมีดผ่านเนื้อชิ้นงาน ค่าความเค้นในระนาบหนึ่งบนเนื้อชิ้นงาน จะสูงเท่ากันหรือมากกว่าความต้านการเฉือนของเนื้อวัสดุชิ้นงาน เป็นผลให้เกิดการเฉือนของเนื้อโลหะ ชิ้นงานจึงแยกออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกคือชิ้นส่วนที่จะนำไปใช้ ส่วนที่สองคือส่วนซึ่งแยกออกมา มีลักษณะเป็นเส้นยาวๆ หรือเป็นท่อนสั้นๆ เรียกว่าฝอย (ศุภโชค วิริยโกศล, 2543)

2.2.1 สิ่งที่ควรศึกษาทำความเข้าใจกับใบมีดตัดคือ

- 1) ลักษณะทางเรขาคณิตของใบมีด (Cutting tool geometry) หมายถึง มุมมีดตัดและลักษณะต่างๆ
- 2) วัสดุใบมีดตัด (Cutting tool material) รวมถึงโครงสร้างของใบมีดตัด เช่น โครงสร้างจุลภาคและการเคลือบผิว
- 3) สมรรถนะของใบมีดตัด (Cutting tool performance) เช่น ความแข็งแรง ความทนทานต่อการสึกหรอ ค่าความเร็วสูงสุดที่สามารถรับได้

2.2.2 เรขาคณิตของใบมีดเนื่องจากกรรมวิธีการผลิตมีมากมาย มีตัวแปรเชิงเรขาคณิตหลายต่อหลายตัวมาเกี่ยวข้อง ใบมีดตัดมีหลายชนิด เช่น ใบมีดกลึง ใบมีดไส ใบมีดกัดดอกสว่าน ซึ่งแต่ละชนิดยังแบ่งย่อยตามลักษณะการใช้งานต่อไปอีก ลักษณะทางเรขาคณิตจึงมีหลายรูปแบบ เช่น เรขาคณิตใบมีดกลึง เป็นต้น แสดงดังรูปที่ 2.2



α = มุมเฉย (Rake angle) γ = มุมหลบ (Clearance angle)

รูปที่ 2.2 ลักษณะทางเรขาคณิตของใบมีดตัด (ศุภโชค วิริยโกศล, 2543)

2.2.3 วัสดุของมีดตัด

การค้นคว้าหาวัสดุใหม่ๆ ที่มีคุณสมบัติดีกว่า วัสดุเดิมที่เคยใช้ เป็นงานที่มีพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้เพราะวัสดุชิ้นงานใหม่ๆ ที่มีคุณสมบัติแตกต่างไปจากวัสดุเดิมขึ้นตลอดเวลา นอกจากนี้เครื่องจักรกลที่ใช้ในการตัดวัสดุก็มีการพัฒนาให้มีกำลังมากขึ้น ทำงานด้วยความเร็วสูงทำงานที่มีความซับซ้อนมากขึ้น จึงจำเป็นต้องมีการค้นคว้าวัสดุใบมีดตัดใหม่ๆ มาใช้เพื่อให้สามารถตัดวัสดุชิ้นงานใหม่ และใช้กับเครื่องจักรกลใหม่ๆ ให้เต็มขีดความสามารถ สมบัติของวัสดุใบมีดตัดเป็นสิ่งที่จำเป็นที่จะต้องมีการค้นคว้าและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง

2.2.4 สมบัติของวัสดุมีดตัด

หลักการขั้นพื้นฐานของการตัดวัสดุโดยใช้ใบมีดตัด “วัสดุที่แข็งกว่าย่อมขูดวัสดุที่อ่อนกว่าให้เป็นรอยได้” ดังนั้นใบมีดตัดจะต้องทำจากวัสดุที่ความแข็งสูงกว่าชิ้นงานเสมอ วัสดุที่เหมาะสมในการนำมาทำใบมีดตัด ควรจะมีคุณสมบัติดังนี้ 1) มีความแข็งสูง (High hardness) 2) คงความแข็งไว้ได้ที่อุณหภูมิสูง (Hot hardness) 3) ต้านทานการสึกหรอได้ดี (High wear resistance) 4) มีความแข็งแรงสูง (High strength) 5) ไม่เปราะ กะเทาะ หรือร้าวง่ายเมื่อถูกกระทบกระแทก 6) ไม่ไวต่อการประลัยโดยความล้า (Fatigue resistance) 7) ไม่ไวต่อปฏิกิริยาเคมี ไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับสารชิ้นงาน เป็นต้น

2.2.5 ชนิดของวัสดุใบมีด

ชนิดของวัสดุ ที่รู้จักกันอยู่ในปัจจุบันมีอยู่หลายชนิด เช่น 1) เหล็กกล้าไฮคาร์บอน (High carbon steels) 2) เหล็กกล้าไฮสปีด (High speed steels) 3) โลหะผสมนอกกลุ่มเหล็ก (Cast nonferrous alloys) 4) คาร์ไบด์ (Carbides) 5) เซอร์เมท (Cermets) 6) เซรามิก (Ceramics) 7) เพชร (Diamond) 8) คิวบิก โบรอน ไนไตรด์ หรือซีบีเอ็น (Cubic boron nitride) 9) โครโรไนท์ (Coronite) 10) เหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูง (High speed tool steels)

2.2.6 มีดกัดความเร็วสูง (High speed tool steels)

เป็นเหล็กกล้าเครื่องมือที่มีจุดมุ่งหมายหลัก เพื่อใช้เป็นวัสดุในการตัดโลหะด้วยความเร็วสูง เช่น ใบเลื่อย (Saws), ใบตัด (Milling cutters) เป็นต้น คุณสมบัติสำคัญของเหล็กกล้ากลุ่มนี้ คือความสามารถในการรักษาความแข็งของคมตัดที่อุณหภูมิสูงกว่าปกติไว้ได้ (ความแข็งของคมตัดยังคงสภาพเดิม แม้จะเกิดความร้อนจนร้อนจัดเป็นสีแดง)

2.2.7 อายุการใช้งานใบมีดตัด

ในการตัดวัสดุเพื่อให้การวางแผนการผลิตเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ผู้วางแผนงานจำเป็นต้องรู้อย่างยิ่งที่จะต้องรู้ว่า มีดที่นำมาใช้งานจะมีอายุการใช้งานได้อย่างมากเท่าไร เช่น ใช้ตัดชิ้นงานได้กี่นาทีหรือใช้ตัดงานได้กี่ชิ้น ก่อนจะหมดสภาพการใช้งานโดยการแตกหัก กะเทาะ ร้าว หรือสึกหรอเกินขนาดที่ยอมรับได้ เพื่อที่จะได้วางแผนการเปลี่ยนใบมีดทั้งใบ หรือเปลี่ยนเฉพาะคมมีดบางคมในบางกรณีที่ใบมีดมีหลายคมและถอดเปลี่ยนได้ อายุการใช้งานของใบมีดตัดขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ลักษณะของการหัดอายุ ความง่ายในการตัดวัสดุชิ้นงานและตัวแปรที่เกี่ยวกับสภาวะการตัด เช่น ความเร็วในการตัด อัตราป้อน ความลึกในการตัด ชนิดน้ำหล่อเย็น และอัตราการฉีดน้ำหล่อเย็น เป็นต้น

1) หน่วยวัดอายุขัย (Unit of tool life) หน่วยที่นำมาใช้วัดอายุขัยมีหลายวิธี ดังนี้

1.1) เวลาในการตัดจริงจนคมมีดหมดสภาพการใช้งาน หมายถึงเวลาที่คมมีดผ่าลงบนชิ้นงานจริงๆ นิยมใช้หน่วยเป็นนาที การระบุโดยเวลาตัดจริงเป็นวิธีที่นิยมใช้กันทุกๆ ไป ใช้กับกรรมวิธีการผลิตที่คมมีดสัมผัสกับชิ้นงานอย่างต่อเนื่องระยะเวลาในการตัด เช่น การกลึง การไส การกัด การเจาะ

1.2) เวลาทั้งหมดในการตัดจนใบมีดหมดสภาพการใช้งาน หมายถึงเวลาทั้งหมดที่ใช้เครื่องจักรกลไม่ว่าจะเป็นเวลาที่คมมีดตัดชิ้นงานหรือไม่ก็ตาม นิยมใช้กับกรรมวิธีการที่คมมีดสัมผัสกับชิ้นงานอย่างไม่ต่อเนื่องระหว่างการผลิต เช่น การกัด ซึ่งการหาเวลาในการกัดจริงทำได้ยาก

1.3) ความยาวชิ้นงานที่ถูกตัดออกตั้งแต่เริ่มตัดจนหมดอายุ นิยมวัดเป็นหน่วยเมตรหรือฟุต ตามแต่ผู้ใช้นิยม เป็นวิธีการที่เข้าใจง่ายในการใช้งานในอุตสาหกรรม และเหมาะสมกับกรณีการตัดวัสดุด้วยความเร็วสูง ที่เวลาของอายุขัยคมมีดอาจจะสั้น

1.4) ปริมาตรของชิ้นงานที่ถูกตัดออกไปตั้งแต่เริ่มตัดจน คมมีดหมดอายุวัดเป็นลูกบาศก์มิลลิเมตร ลูกบาศก์นิ้ว หรือแล้วแต่ผู้ใช้งานต้องการ

1.5) จำนวนชิ้นงานที่ผลิตได้ก่อนที่คมมีดจะหมดอายุ เป็นวิธีที่สะดวกและเข้าใจง่ายในการวางแผนและควบคุมการผลิตในโรงงาน และง่ายต่อการติดตั้งอุปกรณ์นับจำนวนชิ้นส่วนที่ผลิตได้

2) เกณฑ์ตัดสินว่าคมมีดหมดอายุ (Tool life criterion)

โดยทั่วไป หลักใหญ่ในการตัดสินว่าคมมีดหมดอายุแล้ว คือ การที่คมมีดไม่สามารถตัดชิ้นงานให้ป็นชิ้นส่วนที่มีคุณภาพตรงตามความต้องการ ซึ่งอาจจะหมายความว่าโดยวิธีใดอย่างหนึ่งดังต่อไปนี้

2.1) คมมีดแตกหักโดยสิ้นเชิง (Total failure) ใช้งานต่อไปไม่ได้และอาจจะเป็นอันตราย

2.2) คมมีดเกิดการร้าว (Cracking) หรือการกะเทาะ (Chipping) ใกล้เคียงแตกหัก ต้องเลิกใช้งานก่อนจะแตกหักจริงจนเป็นอันตราย

2.3) คมมีดสึกหรอมากหมดสภาพการใช้งาน หรือใกล้เคียงแตกหักแล้ว การวัดค่าขนาดความสึกหรอ เป็นเรื่องยุ่งยากเพราะใบมีดมีลักษณะการสึกหรอมากมายหลายรูปแบบจำเป็นต้องเลือกวิธีการวัดอย่างใดอย่างหนึ่ง โดยมีวิธีที่ชัดเจนสามารถทำซ้ำหรือตรวจสอบได้

2.4) รอยแถบลึก ที่ผิวด้านหลังมีดหรือผิวหลบของคมมีด มีขนาดสูงเกินค่าที่ยอมรับได้ ถ้าขึ้นใช้คมตัดต่อไป จะเสี่ยงต่อการที่คมมีดแตกหัก

2.5) ความลึกของหลุมรอยลึกหรือความกว้างของหลุมที่ผิวหน้ามีดมีขนาดสูงเกินกว่าค่าที่ยอมรับได้ถ้าใช้คมมีดตัดต่อไปก็เสี่ยงต่อการแตกหักของคมมีด

2.6) ปริมาตรหรือน้ำหนักของรอยลึก มีค่าสูงเกินกว่าค่าที่ยอมรับได้

2.7) ชิ้นส่วนที่ผลิตออกมาแล้วมีขนาดผิดไปจากค่าที่กำหนดเกินกว่าที่จะยอมรับได้

2.8) ชิ้นส่วนที่ผลิตออกมาแล้วมีค่าความขรุขระของพื้นผิวเกินกว่าค่าที่จะยอมรับได้

2.2.8 อิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ต่ออายุคมมีด

ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่ออายุคมมีดคัตมีหลายตัวแปร สามารถแบ่งพิจารณาเป็นประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้

1) ตัวแปรต่อสภาวะการตัด เป็นตัวแปรที่มักจะใช้ควบคุมในกรรมวิธีการผลิตและจำเป็นที่ต้องเลือกค่าที่เหมาะสม เช่น ความเร็วในการตัด อัตราป้อนชิ้นงานและความลึกในการตัด

2) ลักษณะทางเรขาคณิตของคมมีด ได้แก่ขนาดระยะทางเส้นตรงและมุมต่างๆ ของใบมีด โดยทั่วไปเป็นที่เข้าใจกันว่าภายใต้ส่วนผสมหนึ่งของสารหล่อเย็น จะมีค่าที่เหมาะสมที่สุดของมุมมีดแต่ละมุม รวมทั้งค่าของรัศมีงูมมีด ดังตัวอย่างในกรณีของมีดกลึง แต่เป็นการยากที่จะทราบว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดมีค่าเท่าใดแน่ โดยปกติผู้ตัดวัสดุมักจะถือเอาหรือสมมุติเอาว่ามุมต่างๆ ของใบมีดที่ผู้ผลิตใบมีดแนะนำให้เลือกมาใช้งาน จะเท่ากับหรือใกล้เคียงกับค่าที่ดีที่สุด แต่ทั้งนี้อาจจะจริงหรือไม่จริงก็ได้

3) วัสดุใบมีดวัสดุที่มีความแข็งกว่าจะเข้าลึกหรือช้ากว่า ดังนั้นวัสดุใบมีดที่แข็งกว่ามักจะมีอายุการใช้งานนานกว่าวัสดุใบมีดที่อ่อนกว่า แต่ต้องไม่มีการเกิดการกะเทาะแตกหักหรือร้าว

4) วัสดุชิ้นงาน วัสดุชิ้นงานที่มีความแข็งโดยเฉลี่ยสูง จะทำให้ใบมีดสึกหรือเร็วและอายุการใช้งานคมมีดสั้น ยกเว้นกรณีที่สารชิ้นงานที่มีเนื้อแข็งมากหรืออ่อนมากปนกันอยู่

5) น้ำยาหล่อเย็น โดยทั่ว ๆ ไปการใช้น้ำยาหล่อเย็นชนิดไปยังบริเวณคมมีดจะช่วยลดอุณหภูมิของคมมีดทั้งผิวหน้ามีดและหลังมีด การลดอุณหภูมิจะทำให้อัตราการสึกหรือของคมมีดลดลง

6) ความสามารถของเครื่องจักรในการควบคุมอัตราป้อน ในกรณีเครื่องจักรธรรมดา การควบคุมอัตราป้อนระหว่างการกัดคมมีดเข้าสู่เนื้อชิ้นงานและการถอนคมมีดออกจากเนื้องานเป็นการควบคุมด้วยมือซึ่งทำได้ยาก ในกรณีเครื่องจักรซีเอ็นซี การควบคุมอัตราการป้อนทำได้ง่ายกว่าและลดการแตกหักได้น้อยกว่า

2.2.9 องค์ประกอบที่สำคัญในงานกลึง

เพื่อให้ได้งานที่มีคุณภาพตามต้องการจะต้องเรียนรู้เกี่ยวกับการเลือกใช้ความเร็วรอบ ความเร็วตัด และ อัตราการป้อนอย่างถูกต้องและเหมาะสมดังต่อไปนี้

1) ความเร็วตัด (Cutting Speed) หมายถึงความยาวของเนื้อโลหะที่ถูกตัดเฉือนผ่าน ปลายคมตัด ใน ระยะเวลา 1 นาที จะมีความยาว เป็นเมตร

องค์ประกอบที่ทำให้เกิดความเร็วตัด (Factors Effecting Cutting Speed)

1.1) วัสดุที่ใช้ทำเครื่องมือตัด (Cutting Tool) ที่ทำมาจากเหล็กโรบสูง (High Speed Steel) สามารถใช้ความเร็วตัดได้สูงเป็น 2 เท่าของความเร็วตัดของมีดที่ทำมาจากวัสดุคาร์บอน ส่วนวัสดุคมตัดที่มีส่วนผสมพิเศษออกไปสามารถใช้ความเร็วตัดได้สูงกว่าเหล็กโรบสูง

1.2) ชนิดของวัสดุ (Type of Materials) ที่จะนำมาทำการตัดเฉือนโดยทั่วไปวัสดุงานที่มีความแข็งมากจะใช้ความเร็วตัดช้ากว่าวัสดุที่อ่อนกว่า

1.3) รูปร่างของคมตัด (Form Cutting Tools) มีผลต่อการทำงานมาก เช่นมีดตัดงานขนาด จะใช้ความเร็วรอบต่ำกว่ามีดกลึงปอกผิวงาน

1.4) ความลึกในการตัด (Depth of Cut) ถ้าป้อนตัดลึกจะใช้ความเร็วรอบน้อยกว่าป้อนตื้นๆ

1.5) อัตราป้อน (Feed Rate)

1.6) การระบายความร้อน (Cutting Lubricant) ความเร็วตัดของวัสดุบางชนิด อาจเพิ่มให้สูงขึ้นได้ เมื่อมีการระบายความร้อน (Lubricant) ที่ถูกต้อง ซึ่งสารระบายความร้อนจะช่วยรักษา อุณหภูมิของคมตัดไม่ให้ร้อนจนเกินไปขณะทำงาน

1.7) การจับงานให้มั่นคงแข็งแรง (Rigidity of the Work) ในกรณีงานที่ถูกจับด้วยหัวจับ (Chuck) โผล่ออกมาสั้น ๆ จะใช้ความเร็วได้สูงกว่างานที่ถูกจับให้โผล่ออกมายาว ๆ

1.8) ความสามารถและสภาพเครื่อง เครื่องที่แข็งแรงมีกำลังขับสูง สามารถใช้ความเร็วตัดได้ สูง อย่างไรก็ตามอย่าให้สูงจนคมตัดใหม่

2) อัตราการป้อน (Feed) หมายถึงระยะทางการเดินป้อนของมีดไปตามความยาวของชิ้นงานในแต่ละรอบของการหมุนของเพลลาของเครื่อง

3) ความลึกในการตัด (Depth of Cut)

2.3 ความขรุขระผิว (Surface Roughness)

2.3.1 ประเภทของการจำแนกตามความขรุขระผิวสำเร็จ

การตัดวัสดุถ้าหากมองในแง่ของความประณีต ความละเอียดแม่นยำ หรือความขรุขระผิวสำเร็จ (Surface Finish) นั่นคือพื้นผิวที่ได้จากกรรมวิธีการผลิต แบ่งออกเป็น 4 ประเภท ดังนี้

1) การตัดหยาบ (Rough Cutting) หมายถึง การตัดงานที่ต้องการให้งานเสร็จอย่างรวดเร็ว แต่ไม่เน้นเรื่องการทำให้อายุขัยของเครื่องมือ ไม่เน้นความแม่นยำหรือความละเอียดของพื้นผิวสำเร็จของชิ้นงาน งานส่วนมากในการตัดโดยใช้ใบมีดตัดมักจะเป็นการตัดหยาบ ใช้ความเร็วในการตัดค่อนข้างสูง อัตราป้อนสูง และความลึกในการตัดสูง เป็นผลให้ใช้แรงตัดสูง ใช้กำลังในการตัดสูง และอาจจะต้องฉีดน้ำยาหล่อเย็นที่มีสมบัติของการหล่อเย็นหรือการลดแรงตัดได้ดี ทั้งนี้เพราะต้องการให้งานเสร็จเร็ว หลังจากงานตัดหยาบแล้วอาจจะต้องมีการตัดละเอียด หรือการเจียรระไน อีกครั้งหนึ่ง

2) การตัดปานกลาง (Medium Cutting) เป็นการตัดที่ประนีประนอมระหว่างการตัดหยาบและการตัดละเอียด คือ ต้องการให้งานเสร็จเร็ว โดยที่ต้องการให้ความขรุขระผิวน้อยด้วย ซึ่งอาจจะทำได้ในบางกรณี โดยการเลือกค่าความเร็วในการตัด อัตราป้อน และความลึกของการตัดที่เหมาะสม

3) การตัดละเอียด (Fine Cutting) หมายถึงการตัดที่ต้องการให้อายุขัยของเครื่องมือ ความแม่นยำหรือความละเอียดของผิวสำเร็จของชิ้นงาน ไม่เน้นให้งานเสร็จอย่างรวดเร็ว แต่ถ้าเสร็จเร็วก็เป็น好事 งานในลักษณะนี้เกิดขึ้นเป็นงานในขั้นตอนต่อเนื่องจากการตัดหยาบหรือเป็นการตัดครั้งสุดท้าย ใช้ความเร็วในการตัดสูงหรือต่ำก็ได้แล้วแต่ความเหมาะสม อัตราป้อนต่ำและความลึกในการตัด

4) การตัดละเอียดยิ่ง (Ultra - Fine Machining) ในการตัดชิ้นงานบางอย่างเช่น การกลึงเลนส์ การกลึงอะลูมิเนียมให้พื้นผิวสำเร็จเป็นมันวาวคล้ายกระจก ค่าความขรุขระจะน้อยมากเป็นพิเศษ

2.3.2 การวัดค่าความขรุขระผิว

โดยปกติแล้วจะใช้เครื่องมือที่มีลักษณะคล้ายเข็ม ลากอย่างช้าๆ ผ่านไปบนแกนนอน (แกน X) ของพื้นผิวที่จะทำการวัดค่าความขรุขระ การเคลื่อนที่ของปลายเข็มในแนวตั้งคือ ตามแกน Y จะเป็นไปตามลักษณะเส้นขอบของพื้นผิว จากนั้นจะมีระบบบันทึกค่า X และ Y_u ไว้ในหน่วยความจำ และระบบคำนวณค่าอิทธิพลของความเป็นคลื่นที่มีขนาด Y_w ในแนวตั้ง จากนั้นวงจรคำนวณก็จะลบค่าของอิทธิพลของความเป็นคลื่นออกก็จะเหลือเฉพาะในแนวตั้งอันเนื่องมาจากความขรุขระผิว ซึ่งจะนำไปคำนวณค่าความขรุขระต่อไป ค่าความขรุขระแสดงได้ด้วยตัวแปรต่างๆ หลายตัวแปร ซึ่งจะได้นำมาพิจารณาดังต่อไปนี้

1) ค่าเฉลี่ยทางเลขคณิต (Arithmetic Average ; R_a)

2) ค่าระหว่างยอดสูงสุดกับก้นร่องต่ำสุด (Maximum Distance Between Peak to Valley ;

R_{max})

2.4 การออกแบบการทดลอง (Design of Experimental)

การออกแบบการทดลอง คือการทดสอบหรือชุดของการทดสอบ เพื่อศึกษาผลของปัจจัยนำเข้า (Input) ต่อผลลัพธ์ที่สนใจ คุณลักษณะทางคุณภาพ (Quality Characteristics) โดยการเปลี่ยนระดับของปัจจัยนำเข้่าอย่างตั้งใจตามแผนการทดลองที่ออกแบบไว้มีคำศัพท์ที่ต้องทราบคือ ปัจจัย (Factor) เป็นปัจจัยอิสระ (Independence) ที่ผู้วิเคราะห์สงสัยว่าจะส่งผลต่อผลลัพธ์ ซึ่งแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable factor หรือ Noise factor) และ ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable factor) โดยการออกแบบการทดลอง จะมุ่งเน้นที่การศึกษาเพื่อบ่งชี้ ผลกระทบจากปัจจัยที่ควบคุมได้ต่อผลลัพธ์ที่สนใจในขณะที่ต้องการกระจายผลของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ ไม่ให้ส่งผลกระทบต่อผลลัพธ์อย่างมีนัยสำคัญ ปัจจัยที่ควบคุมได้จะเรียกว่า ทริตเมนต์ (Treatment) จำนวนครั้งในการทำการทดลองซ้ำ (Replication) เป็นการทำการทดลองซ้ำด้วยเงื่อนไขที่เหมือนกัน โดยในการทดลองหนึ่ง ๆ จะมีจำนวนเงื่อนไขการทดลอง (Treatment combination) เท่ากับผลคูณของจำนวนปัจจัยและจำนวนระดับของแต่ละปัจจัย เช่น การทดลองที่มี 2 ปัจจัย ๆ ละ 2 ระดับ จะมีทั้งหมด 4 เงื่อนไขการทดลอง ส่วนผลลัพธ์ที่สนใจ (Response) เป็นคุณลักษณะทางคุณภาพที่สนใจ ซึ่งเป็นปัจจัยไม่อิสระ (Dependence) ต้องการศึกษาควคุม ซึ่งอาจเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญตามการเปลี่ยนแปลงของทริตเมนต์ต่าง ๆ การสุ่ม (Randomization) เป็นส่วนหนึ่งของการออกแบบการทดลองที่พยายามให้ผล

ของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable factors) กระจายอย่างสม่ำเสมอเกี่ยวกับค่าของผลลัพธ์ (response) ที่ได้จากการทดลอง

1) ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

เพื่อให้ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยการออกแบบการทดลองมีความน่าเชื่อถือ นำไปใช้ได้ อย่างมีประสิทธิภาพ จำเป็นที่ผู้วิเคราะห์ต้องมีเป้าหมายการศึกษา ผลลัพธ์ (Response) ที่สนใจ, ปัจจัย ที่คาดว่าจะส่งผลต่อผลลัพธ์, วิธีการเก็บข้อมูล ตลอดจนแนวทางการวิเคราะห์อย่างชัดเจน ซึ่ง [Montgomery ; 2009] ได้สรุปแนวทางการศึกษาด้วยการออกแบบการทดลองไว้ดังนี้ 1. ศึกษาปัญหา 2. กำหนดผลลัพธ์ที่ต้องการศึกษา 3. กำหนดปัจจัยที่ต้องการควบคุม และ ระดับของปัจจัย 4. กำหนด รูปแบบการทดลอง 5. ทำการทดลองและเก็บข้อมูล 6. วิเคราะห์ข้อมูล 7. สรุปและนำเสนอแนวทางการปรับปรุง

2) การออกแบบพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Design)

วิธีการพื้นผิวตอบสนอง เป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มี ประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหา โดยที่ผลตอบที่สนใจขึ้นอยู่กับหลายตัวแปรและมีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่ดีที่สุด โดยกำหนดให้ปัจจัยนั้นๆ ผลมาจากการทดลอง ถ้ากำหนด ว่า $E(y) = f(x_1, x_2) = \eta$ ดังนั้น สามารถเขียนสมการของพื้นผิวได้คือ $\eta = f(x_1, x_2)$ ซึ่งจะเรียกว่า “พื้นผิวตอบสนอง (Response Surface)” โดยส่วนใหญ่จะแสดงพื้นผิวตอบสนองในรูปของกราฟ โดย ที่ η จะถูกพล็อตกับระดับของ x_1 และ x_2 เพื่อที่จะช่วยให้มองรูปร่างของพื้นผิวผลตอบได้ดียิ่งขึ้น ซึ่ง อาจจะพล็อตเส้นโครงร่าง (Contour Plot) ของพื้นผิวตอบสนอง โดยที่ปัญหาในส่วนใหญ่จะไม่ทราบ ความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองและตัวแปรอิสระ โดยในขั้นแรก จะต้องหาตัว ประมาณที่เหมาะสมที่ใช้เป็นตัวแทนสำหรับแสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่าง y และ เซ็ตของตัวแปรอิสระ อาจจะ เป็น แบบจำลองของผลตอบมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันที่ใช้เป็น แบบจำลองกำลังหนึ่งดังสมการ $y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \dots + \beta_k x_k + \epsilon$

วิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง (Response surface method: RSM) เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้การ ออกแบบการทดลองในการศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระที่มีผลต่อตัวแปรผลตอบพร้อมทั้ง สามารถพัฒนาสมการแบบจำลองและหาระดับของตัวแปรอิสระที่ให้ผลตอบที่ดีที่สุด อีกทั้งให้ความ แม่นยำอยู่ในระดับที่น่าพอใจ [10] อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ของความขรุขระผิวนั้น ไม่เป็นแบบเชิง เส้น (Non-linear) ดังนั้น การออกแบบการทดลองที่มีระดับปัจจัยอย่างน้อยสามระดับสามารถพิจารณา

ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองได้หลายแบบ เช่น บ็อก-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) ส่วนประสมกลาง (Central Composite Design) แฟคทอเรียลที่มีระดับของปัจจัยสามระดับ (3k Factorial design) เป็นต้น

2.5 การวัดความถูกต้องแม่นยำของการพยากรณ์

การวัดความคลาดเคลื่อนของค่าจริงและค่าที่พยากรณ์ได้โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ หรือจำนวนข้อมูลต่าง ๆ จะพิจารณาจากการที่ค่าจริงใกล้เคียงค่าพยากรณ์ที่สุด หรือทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ย่อมเป็นค่าที่เหมาะสมกับการใช้พยากรณ์ให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำ การวัดความคลาดเคลื่อนสามารถวัดได้จากค่าต่าง ๆ เช่น ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Mean Square Error : MSE) ค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์ของความคลาดเคลื่อน (Mean Absolute Error : MAE) และ ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสมบูรณ์ (Mean Absolute Percentage Error : MAPE)

โดยปกติแล้วมักจะนิยมวัดค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ในระยะยาว ซึ่งวัดจากค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์สะสม โดยเปรียบเทียบค่าข้อมูลจริงในอดีตและค่าที่ได้จากตัวแบบการพยากรณ์ ในการเลือกใช้ตัวแบบการพยากรณ์จึงควรพิจารณาว่าการพยากรณ์ที่ได้นั้นมีความถูกต้องสูง หรืออีกนัยหนึ่งก็คือมีค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ต่ำนั่นเอง วิธีวัดค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ที่นิยมใช้มีดังนี้

1) ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Deviation: MAD) มีสูตรในการคำนวณดังนี้

$$\text{Mean Absolute Deviation (MAD)} = \frac{\sum | \text{ค่าจริง} - \text{ค่าพยากรณ์} |}{n} \quad (2.7)$$

ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย หรือ MAD เป็นตัวชี้วัดความถูกต้องของการพยากรณ์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย นอกจากนั้นยังนิยมนำมาใช้วัดเพื่อเปรียบเทียบวิธีการพยากรณ์ โดยผู้พยากรณ์ควรจะเลือกสมการพยากรณ์ที่มีค่า MAD ต่ำสุด นั่นคือ ค่า MAD ยิ่งน้อย หมายถึง การพยากรณ์ยิ่งแม่นยำ

2) ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Mean Squared Error: MSE) มีสูตรในการคำนวณดังนี้

$$\text{Mean Squared Error (MSE)} = \frac{\sum (\text{ค่าจริง} - \text{ค่าพยากรณ์})^2}{n} \quad (2.8)$$

การวัดความถูกต้องของการพยากรณ์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายอีกวิธีหนึ่ง คือ การหาค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย หรือ MSE ซึ่งค่านี้ใช้หลักการเดียวกันกับการหาค่าความ

แปรปรวนในทางสถิติ การวัดค่าความคลาดเคลื่อนด้วยวิธีนี้จะได้ค่าความคลาดเคลื่อนที่สูง เนื่องจากการนำความคลาดเคลื่อน ณ เวลาใด ๆ มายกกำลังสอง ก่อนที่จะหาผลรวมแล้วจึงนำมาหาค่าเฉลี่ยอีกครั้งหนึ่ง นั่นคือ ค่า MSE ยิ่งน้อย หมายถึง การพยากรณ์ยิ่งแม่นยำ

3) ค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Percentage Error: MAPE) มีสูตรในการคำนวณดังนี้

$$(MAPE) = \frac{\sum ((\text{ค่าจริง} - \text{ค่าพยากรณ์}) \times 100) / \text{ค่าจริง}}{n} \quad (2.9)$$

การวัดความถูกต้องของการพยากรณ์โดยใช้ค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย หรือ MAPE นั้นจะมีข้อได้เปรียบกว่าอีก 2 วิธีที่กล่าวมา เนื่องจากการวัดความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์เทียบกับค่าข้อมูลจริงจึงสามารถที่จะใช้ในการประเมินการพยากรณ์ได้เหมาะสมกว่า นั่นคือ ค่า MAPE ยิ่งน้อย หมายถึงการพยากรณ์ยิ่งแม่นยำ

2.6 การสึกหรอของเครื่องมือตัด

การสึกหรอของเครื่องมือตัด (Tool Wear) หมายถึง การใช้งานจนหมดสภาพระหว่างทำงาน ตัดเฉือนที่ส่วนของมีดตัดถูกกระทำด้วยพลังงานความร้อน และพลังงานกล

กลไกการสึกหรอเนื่องจากการเสียดสี (Mechanism of Wear in Sliding System) กลไกการสึกหรอเนื่องจากการเสียดสี จากการศึกษาลักษณะของการสึกหรอที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานแห่ง ๆ สองชิ้น ขัดกันพบว่ามียู่ 4 ลักษณะคือ

1) การสึกหรอเนื่องจากการขัดสี (Abrasion Wear)

เกิดจากส่วนประกอบบางตัวที่คมหรือแข็งของเนื้อชิ้นงาน เมื่อส่วนประกอบเหล่านี้สัมผัสและถูไถไปบนผิวเครื่องมือตัด จึงเกิดการขัดสีกันและสึกหรอได้ เหล็กกล้า เหล็กหล่อ และนิเกิลผสมที่มีส่วนประกอบที่แข็งของคาร์ไบด์ออกไซด์และไนไตรด์จะเป็นสาเหตุทำให้เครื่องมือสึกหรอได้ง่าย และที่สังเกตได้ง่ายคือเมื่อทำการกลึงชิ้นส่วนงานหล่อที่มีสเกลของออกไซด์ หรือที่มีทรายฝังอยู่จะทำให้เครื่องมือนั้นสึกหรอมากและรวดเร็ว การสึกหรอแบบนี้เกี่ยวข้องกับ การตัด และขึ้นอยู่กับ ความแข็ง ความยืดหยุ่น และรูปร่างของผิวหน้าทั้งสองด้วย

2) การสึกหรอเนื่องจากการยึดเกาะของวัสดุ (Adhesion Wear)

เกิดจากการที่ผิววัสดุ 2 ชนิดรวมยึดเกาะเป็นเนื้อเดียวกัน อันเนื่องมาจากแรงอัดและการเข้มนติดกัน แล้วเกิดแรงเฉือนจนทำให้บริเวณที่ยึดเกาะเป็นเนื้ออันเดียวกันนั้น ขาดออกจากวัสดุเดิมดังแสดงตามข้อสันนิษฐาน ขณะตัดโลหะมักจะเกิดเหตุการณ์เหล่านี้ได้ เนื้อวัสดุของปลายคมตัดจะแตกและติดไปกับเศษชิ้นงานได้ อุณหภูมิที่เกิดขึ้นขณะตัดโลหะ และแรงกระทำที่เกิดขึ้นจะมีอิทธิพลต่อ

การเกิดการยึดเกาะกันของวัสดุแต่ละคู่ (เครื่องมือตัดกับชิ้นงาน) การยึดเกาะนี้จะเกิดที่ความเร็วตัดต่ำ ๆ แต่จะขึ้นกับเวลา และมีแนวโน้มว่าจะเกิดน้อยลงเมื่อใช้ความเร็วตัดสูง ๆ ถ้าเป็นการตัดที่รุนแรง หรือมีการสั่นสะเทือนหรือกระแทกเป็นช่วง ๆ จะทำให้เกิดการยึดเกาะเร็วขึ้น และสึกหรอมาก

3) การสึกหรอเนื่องจากการแพร่ซึมส่วนผสมเคมี (Diffusion Wear)

เคมีนี้หรือของธาตุเหล่านี้เกิดในสถานะของแข็ง (Solid-State Diffusion) ที่อะตอมเคลื่อนย้ายจาก Lattice หนึ่งจากที่มีอะตอมเข้มข้นกว่าไปยังที่มีอะตอมเบาบางกว่าบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่า บรรยากาศแวดล้อมมากก็ยังมี การแพร่ซึม ส่วนผสมได้มากขึ้นขณะตัดโลหะ เมื่อเกิดการยึดเกาะของวัสดุ และเกิดอุณหภูมิสูงเพียงพอในบริเวณที่ยึดเกาะเป็นเนื้อเดียวกันนี้ จะเกิดการไหลของอะตอมจากเนื้อวัสดุเครื่องมือตัด ไปยังเนื้อชิ้นงานปริมาณการแพร่ซึมจะมาก หรือ น้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับคู่สัมผัสกันของเนื้อวัสดุทั้งสอง และระดับการสั่นของอะตอมซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ถ้าเวลาที่สัมผัสยึดเกาะกันอยู่นานก็จะแพร่ซึมได้มาก แต่ถ้าใช้ความเร็วตัดสูงก็จะแพร่ซึมได้น้อย เครื่องมือตัดที่ทำจากเหล็กกล้าไฮสปีด จะมีอะตอมของธาตุคาร์บอนของเครื่องมือตัดแพร่ซึมเข้าไปสู่ผิวชิ้นงานทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมบริเวณนี้ สมบัติของเครื่องมือตัดก็จะเปลี่ยนไป คือแข็งน้อยลงแล้วจะสึกหรอได้ง่าย

4) การสึกหรอเนื่องจากการล้า (Fatigue Wear)

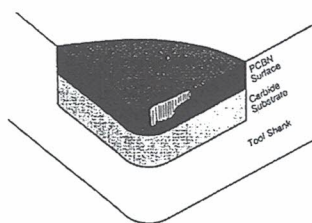
เมื่อผิวอันหนึ่งมีปฏิกิริยาขึ้นมาแล้วขัดสีไปบนผิวหน้าอีกอันหนึ่งจะทำให้เกิดแรงกดขึ้นที่ผิวหน้าข้างหน้าปมนั้น ขณะเดียวกันก็เกิดแรงดึงขึ้นข้างหลังปมนั้นซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการล้า (Fatigue failure) ตัวขึ้นซึ่งในทางทฤษฎีแล้วจะทำให้เกิดรอยแตก Crack ขึ้นจะดำเนินต่อไปยังผิวหน้า ทำให้ผิวหน้าหลุดออกไปในกรณีที่พบทั่วไปปรากฏว่าผิวที่หลุดมาโดยใช้วิธีนี้มักเป็น Oxide Film ดังนั้นการสึกหรอเนื่องจากการล้าตัวนี้จึงเกิดขึ้นกับ Oxide Film มากกว่าโลหะ

ชนิดการสึกหรอบนคมตัดของมีดตัด

การสึกหรอบนคมตัดสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ตามลักษณะของตำแหน่งที่เกิดการสึกหรอ คือ การสึกหรอบนผิวหลบ (Flank Wear) การสึกหรอบนผิวคาย (Crater Wear) และ การสึกหรอที่ปลายมีด (Nose Wear)

1) การสึกหรอบนผิวหลบ (Flank Wear)

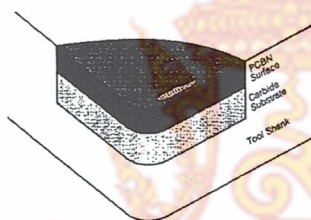
จะเกิดขึ้นเป็นแนวยาวด้านข้างของคมตัด ดังแสดงในรูปที่ 2.3 การสึกหรอชนิดนี้เกิดจากการขัดสีกันระหว่างด้านข้างของมีดกัดกับโลหะที่กำลังทำการตัดเฉือน เมื่อการสึกหรอบนผิวหลบ (Flank Wear) เกิดขึ้นมากก็จะมี การขัดสีเพิ่มขึ้น ทำให้ต้องการกำลังสำหรับการตัดเฉือนมากขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 2.3 ลักษณะของการสึกหรอบนผิวหลบ

2) การสึกหรอบนผิวคาย (Crater Wear)

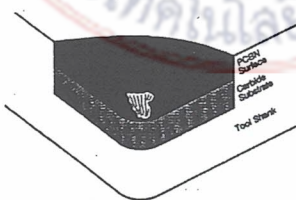
จะมีลักษณะเป็นหลุมหรือเป็นร่องลึกเกิดใกล้ ๆ กับคมตัด ดังแสดงในรูปที่ 2.4 การสึกหรอบนผิวคาย (Crater Wear) เกิดจากการขัดสีของเศษโลหะไปบนผิวคายของมีดกัด เมื่อการสึกหรอบนผิวคาย (Crater Wear) เกิดขึ้นมากในที่สุดก็จะทำให้คมตัดเกิดการแตกหักได้



รูปที่ 2.4 ลักษณะของการสึกหรอบนผิวคาย

3) การสึกหรอที่ปลายมีด (Nose Wear)

เป็นการสึกหรอที่ปลายมีดค้ำหรือจุดที่เกิดการเสียดสีระหว่างปลายมีดกัดกับโลหะที่กำลังทำการตัดเฉือน ดังแสดงในรูปที่ 2.5 การสึกหรอที่ปลายมีด (Nose Wear) บนคมตัดจะส่งผลกับคุณภาพของผิวชิ้นงาน



รูปที่ 2.5 ลักษณะของการสึกหรอที่ปลายมีด

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน

การหาอิทธิพลของปัจจัยในการกลึงอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแจ๊จ เกรด 6061 โดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง เป็นการศึกษาเชิงทดลอง โดยจะทำการทดลอง และเก็บข้อมูล ซึ่งมีการดำเนินการทดลองดังต่อไปนี้

3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง และการออกแบบการทดลอง

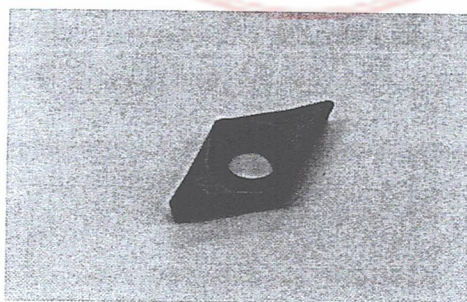
3.1.1 วัสดุชิ้นงานและเครื่องมือตัด

1) ชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแจ๊จ เกรด 6061 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแจ๊จ เกรด 6061 ที่ใช้ในการทดลอง

2) เครื่องมือตัดใช้มีดกลึงคาร์ไบด์ ยี่ห้อ Plansee Tizit แบบ DCGT 070204FN-27 เกรด H10T ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ใบมีดคาร์ไบด์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.2 เครื่องจักรและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1) เครื่องกลึงที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ ยี่ห้อ EMCO รุ่น PC Turn 50 ดังแสดงในรูป

ที่ 3.3



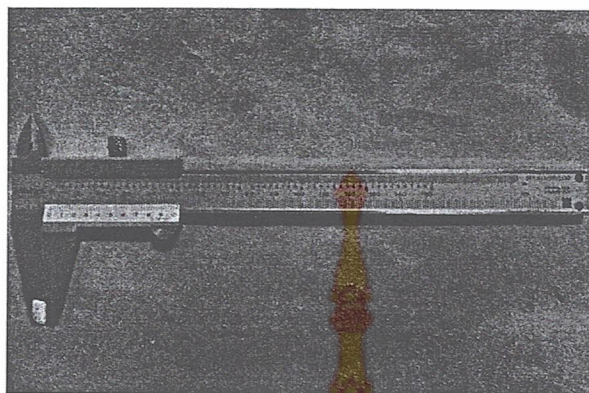
รูปที่ 3.3 เครื่องกลึงที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ ยี่ห้อ EMCO รุ่น PC Turn 50

- 2) เครื่องวัดความขรุขระผิว ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น SJ-210 ดังแสดงในรูปที่ 3.4



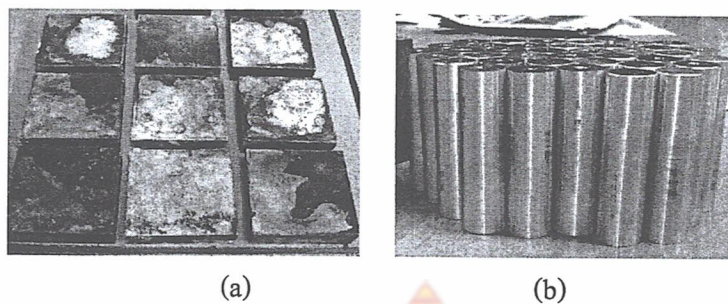
รูปที่ 3.4 เครื่องวัดความขรุขระผิว

3) เวอร์เนียคาลิเปอร์ชี้หื้อ Mitutoyo ความละเอียด 0.02 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เวอร์เนียคาลิเปอร์

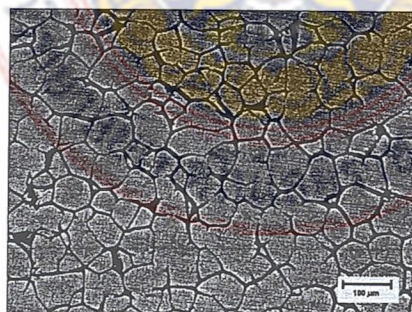
4) วัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็นอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6061 ที่ผ่านกระบวนการผลิตโลหะแบบหล่อกิ่งของแข็งโดยใช้เทคโนโลยี Gas Induce Semi Solid (GISS) ร่วมกับการหล่อแบบบีบอัด แสดงดังรูปที่ 4 โดยวัสดุในการทดลองผ่านกระบวนการผลิตโลหะแบบหล่อกิ่งของแข็งโดยใช้เทคโนโลยี Gas Induce Semi Solid (GISS) ร่วมกับการหล่อแบบบีบอัด (Squeeze Casting) [8] โดยเริ่มจากการหลอมอะลูมิเนียม เกรด 6061 ภายในเบ้าหลอมชนิดกราฟไฟต์ด้วยเตาหลอมไฟฟ้าแบบควบคุมความดันที่อุณหภูมิ 750°C เมื่ออะลูมิเนียมหลอมละลายดีแล้ว จึงทำความสะอาดอะลูมิเนียมหลอมเหลวด้วยฟลักซ์ (Flux) แล้วจึงทำการตัดอะลูมิเนียมหลอมเหลวจากเตาหลอมในปริมาณ 700 กรัม นำไปเข้าสู่กระบวนการ GISS เพื่อผลิตอะลูมิเนียมกิ่งของแข็ง ด้วยการพ่นแก๊สไนโตรเจนผ่าน แท่งกราฟไฟต์ลงในอะลูมิเนียมหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 660°C เป็นเวลา 10 วินาที จากนั้นจึงทำการเทหล่ออะลูมิเนียมกิ่งของแข็งที่ผลิตได้ลงในช่องว่างของแม่พิมพ์ อุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่ใช้หล่อขึ้นรูปอยู่ที่ 300°C แล้วจึงใช้แรงดันในการบีบอัดอะลูมิเนียมกิ่งของแข็งที่ 66 MPa ด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกขนาด 100 ตัน ทำให้ได้ชิ้นงานดิบของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6061 ที่มีขนาด $100 \times 100 \times 25$ มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3.6(a) จากนั้นก็จึงให้เป็นชิ้นงานสำหรับการทดลองให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3.6(b) ส่วนผลสมทางเคมีของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6061 แสดงดังตารางที่ 1 และมีค่าความแข็งแรงดึงอยู่ที่ 225 Mpa โครงสร้างทางจุลภาคของอะลูมิเนียมกิ่งของแข็งเกรด 6061 ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีการหล่อแบบบีบอัดร่วมกับกระบวนการ GISS แสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.6 ชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อทิ้งของแข็ง เกรด 6061

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมหล่อทิ้งของแข็ง เกรด 6061

Elements	% โดยน้ำหนัก
Si	0.57
Fe	0.41
Cu	0.26
Mn	0.06
Mg	1.08
Zn	0.01
Ti	0.02
Cr	0.04
Al	Bal.
Tensile Strength (MPa)	225

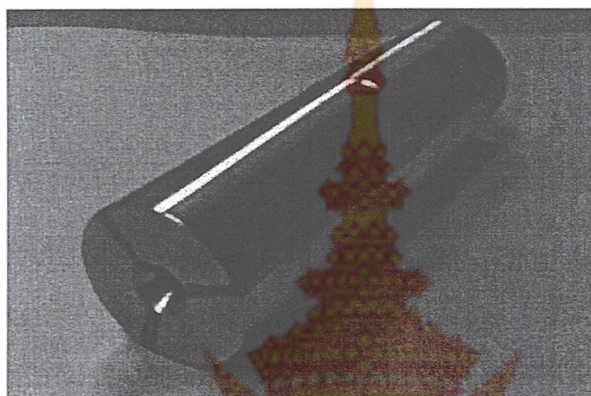


รูปที่ 3.7 โครงสร้างทางจุลภาคของอะลูมิเนียมหล่อทิ้งของแข็ง เกรด 6061

3.2 วิธีการวัดชิ้นงาน

การออกแบบวิธีการวัด (Design of Measurement Method) การวัดค่าความขรุขระผิวจะวัดบนผิวอะลูมิเนียมหล่อทิ้งของแข็ง เกรด 6061 การทดลองนี้จะทำการกลึงปอกที่ระยะทาง 50 มิลลิเมตร

และกำหนดจุดวัดที่ระยะห่างจากหน้าตัดของชิ้นงาน 10 มิลลิเมตร โดยแบ่งชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6061 ออกเป็น 3 ส่วน ส่วนละ 120 องศา ดังรูปที่ 3.8 ใช้เครื่องวัดความขรุขระผิว ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น SJ-210 โดยในแต่ละค่าของสภาวะการกลึงปอกจะวัด 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยโดยค่าที่วัดได้ คือ ค่าเฉลี่ยทางคณิตศาสตร์ การวัดค่าเพื่อเก็บข้อมูลจะทำการวัดทันทีเมื่อกิ่งปอกผิวชิ้นงานเสร็จ เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของข้อมูล แล้วทำการวัดในทิศทางขนานกับทิศทางการกลึงปอก ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.8 การกำหนดช่วงการวัดของชิ้นงาน



รูปที่ 3.9 วิธีการวัดความขรุขระผิว

3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

1) วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุในการทดลองเป็นอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6061 ที่ผ่านกระบวนการผลิตโลหะแบบหล่อกิ่งของแข็งโดยใช้เทคโนโลยี Gas Induce Semi Solid (GISS) ร่วมกับการหล่อแบบบีบอัด (Squeeze Casting)

2) หาขนาดสิ่งตัวอย่างการทดลอง

หาขนาดสิ่งตัวอย่างการทดลองที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยใช้โปรแกรม Minitab 16 จากการทดลองกลึงปอกอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6061 โดยกลึงปอกซ้ำสภาวะ 15 ครั้ง แล้วนำข้อมูลมาวิเคราะห์เพื่อหาขนาดตัวอย่างที่เหมาะสมโดยใช้โปรแกรม Minitab 16 พบว่าได้ขนาดสิ่งตัวอย่างเท่ากับ 3 ตัวอย่าง ในสภาวะการทดลองให้ค่ากำลังแห่งการทดสอบเท่ากับ 96.68% ซึ่งสูงกว่าค่าระดับความเชื่อมั่นที่ตั้งไว้ 95% ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

3) การออกแบบการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง (Response surface method; RSM) ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง (Central Composite Design; CCD) [5-7] ซึ่งเป็นการออกแบบที่ทุกระดับของแต่ละปัจจัยอยู่ห่างจากจุดกึ่งกลาง (Center) ของการออกแบบเท่ากัน และทำซ้ำที่จุดกึ่งกลาง แต่ละปัจจัยจะมีระดับการทดลอง 3 ระดับ (-1, 0, +1) นอกจากนี้การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง (CCD) การวิเคราะห์ผลทางสถิติ และวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) ถูกกระทำโดยใช้โปรแกรม Design-Expert (Version 9.0.6, Stat-Ease, Inc.) ซึ่งปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลองประกอบด้วย ความเร็วตัด (Cutting Speed) อัตราป้อน (Feed Rate) และความลึกในการตัด (Depth of Cut) ตลอดจนระดับของแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง แสดงดังตารางที่ 2 ผลตอบสนอง คือ ค่าความขรุขระผิว (Surface roughness) และค่าความแข็ง (Hardness)

ตารางที่ 3.2 การกำหนดตัวแปรสำหรับการทดลอง

Factor	Low	Medium	High
Cutting Speed (m/min)	90	105	120
Feed (mm/rev)	0.03	0.05	0.07
Depth of Cut (mm)	0.2	0.35	0.5

4) การวัดค่าความขรุขระผิวและความแข็ง

เมื่อถึงชิ้นงานทดลองเสร็จแล้วให้ถอดชิ้นงานออกมาเพื่อวัดค่าความขรุขระผิว โดยจะวัดบนผิวอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6061 การทดลองนี้จะทำการกลึงปอกที่ระยะทาง 75 มิลลิเมตร และกำหนดจุดวัดที่ระยะห่างจากหน้าตัดของชิ้นงาน 10 มิลลิเมตร โดยแบ่งชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง ออกเป็น 3 ส่วน ส่วนละ 120 องศา ใช้เครื่องวัดความขรุขระผิว ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น SJ-210 โดยในแต่ละค่าของสภาวะการกลึงปอกจะวัด 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยโดยค่าที่วัดได้ คือ ค่าเฉลี่ยทางคณิตศาสตร์ การวัดค่าเพื่อเก็บข้อมูลจะทำการวัดทันทีเมื่อกิ่งปอกผิวชิ้นงานเสร็จเพื่อลดความ

คลาดเคลื่อนของข้อมูล แล้วทำการวัดในทิศทางขนานกับทิศทางการกลิ้งปอก และนำชิ้นงานทดลองไปวัดค่าความแข็ง (Hardness) ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ ยี่ห้อ MATSUZAWA รุ่น MMT-X7-LCD Type A แล้วทำการบันทึกข้อมูลความแข็งของแต่ละสภาวะการทดลอง โดยทำการวัดซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อลดความแปรปรวนของข้อมูลในตำแหน่ง 10, 40 และ 60 มิลลิเมตร จากหน้าตัดของชิ้นงาน ตามลำดับ

5) วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง (CCD) ด้วยการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของการทดลอง การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (ANOVA) ของผลการทดลอง และนำไปวิเคราะห์ตัวแบบสมการถดถอย (Regression) และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การพยากรณ์ค่าความขรุขระผิว จากนั้นตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบสมการถดถอย และเปรียบเทียบค่าความขรุขระผิวที่ได้จากสมการพยากรณ์และผลจากการวัดค่าจริง



บทที่ 4

ผลการวิจัย

การดำเนินงานงานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลองเพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมและการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6061 โดยในการกลึงใช้เครื่องกลึงซีเอ็นซี ดังนั้น เพื่อให้การดำเนินงานวิจัยเป็นไปด้วยความถูกต้อง ผู้วิจัยได้กำหนดขั้นตอนวิธีการวิจัย ดังนี้

4.1 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง (CCD) มีตัวแปรอิสระที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง ประกอบด้วย ความเร็วตัด (Cutting Speed) อัตราป้อน (Feed Rate) และความลึกในการตัด (Depth of Cut) ซึ่งสามารถออกแบบสภาวะการกลึงปอกที่ใช้ในการทดลองได้ 20 สภาวะ ค่าผลตอบสนองที่ได้จากการทดลองคือ ค่าความขรุขระผิว และค่าความแข็ง แสดงดังตารางที่ 4.1

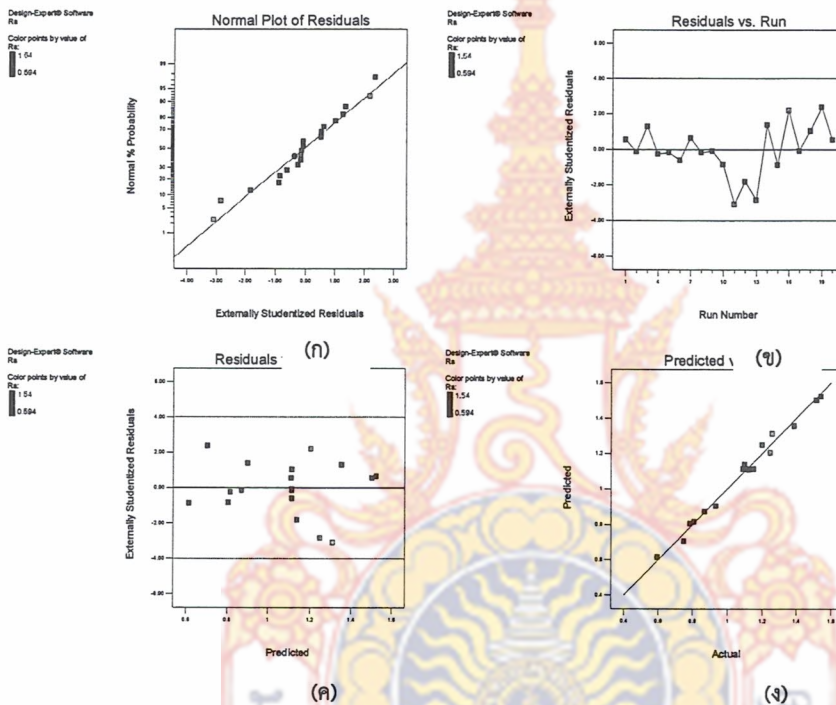
1) การวิเคราะห์รูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติที่เหมาะสมของค่าความขรุขระผิว

ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.1 สามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อเลือกรูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติที่เหมาะสม ซึ่งผลการวิเคราะห์ทางสถิติแสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่าค่าความขรุขระผิวมีความเหมาะสมกับรูปแบบจำลองเชิงเส้น โค้ง (Quadratic Model) เมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบอื่น ๆ รูปแบบที่เหมาะสมนี้มีค่า $Adj-R^2$ และค่า $Pred-R^2$ สูงกว่ารูปแบบอื่น ๆ เมื่อเปรียบเทียบกับกัน เช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) พบว่ารูปแบบจำลองที่เหมาะสมเหล่านี้มีค่า P-value ของ Lack of Fit ที่ไม่มีนัยสำคัญ ($P>0.05$) ซึ่งหมายความว่ารูปแบบจำลองการถดถอยมีความสมรูปกับข้อมูล

2) การตรวจสอบความพอเพียงของรูปแบบจำลอง

การตรวจสอบความพอเพียงของรูปแบบจำลอง เป็นการตรวจสอบความเหมาะสม และความถูกต้องของรูปแบบจำลอง เพื่อยืนยันความเพียงพอและความน่าเชื่อถือของรูปแบบจำลองการถดถอยที่ได้รับจากการทดลอง จากรูปที่ 4.1(ก) กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal probability) พบว่าไม่มีค่าที่ผิดปกติเกิดขึ้นในกราฟตลอด จนข้อมูลมีการแนบชิดกับเส้นตรงหรือแสดงเป็นเส้นตรง ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงเป็นแบบปกติ รูปที่ 4.1(ข) แสดงกราฟค่าเศษเหลือต่อลำดับการทดลอง พบว่าค่าเศษเหลือไม่มีความสัมพันธ์กับลำดับการทดลองที่เป็นแนวโน้ม หรือมีความสัมพันธ์ที่สามารถคาดการณ์ได้ตลอดจนไม่มี ค่าที่ผิดปกติเกิดขึ้นในกราฟ รูปที่ 4.1(ค) แสดงกราฟค่าเศษเหลือต่อค่าพยากรณ์ และพบว่าค่าเศษเหลือมีการกระจายตัวที่ไม่มีแนวโน้มหรือรูปแบบที่แน่นอน เช่นเดียวกันค่าเศษเหลือมีการกระจายรอบ

ๆ ค่าศูนย์ที่เท่าๆ กัน ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเสถียรภาพของความแปรปรวนและคุณสมบัติด้านความเป็นอิสระ และรูปที่ 4.1(ง) แสดงกราฟค่าพยากรณ์ต่อค่าการทดลองจริง เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าที่ได้จากการพยากรณ์โดยรูปแบบจำลองการถดถอยและการทดลองจริง พบว่าข้อมูลมีความสัมพันธ์กันค่อนข้างเป็นเส้นตรง ซึ่งเป็นการยืนยันว่ารูปแบบจำลองการถดถอยเหล่านี้สามารถพยากรณ์ค่าจากการทดลองได้อย่างแม่นยำ ดังนั้นจากการวิเคราะห์กราฟทั้ง 4 และข้อมูลเหล่านี้สามารถสรุปได้ว่ารูปแบบจำลองมีความน่าเชื่อถือและมีความพอเพียง



รูปที่ 4.1 การตรวจสอบความพอเพียงของรูปแบบจำลองการถดถอยของค่าความขรุขระผิว (ก) กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติ (ข) กราฟค่าเศษเหลือต่อลำดับการทดลอง (ค) กราฟค่าเศษเหลือต่อค่าที่พยากรณ์ และ (ง) กราฟค่าพยากรณ์ต่อค่าการทดลองจริง

4.2 สมการถดถอยและการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความขรุขระผิว

จากผลการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง พบว่าข้อมูลที่ได้มีความน่าเชื่อถือ จึงนำข้อมูลผลการวัดความขรุขระผิวมาทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัย เพื่อตรวจสอบว่าปัจจัยที่ทำการศึกษานั้นมีปัจจัยใดบ้างที่มีผลต่อความขรุขระผิวของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแจ๊จ เกรด 6061 โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Design Expert V.9.1 แสดงดังตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าปัจจัยหลัก ประกอบด้วย ความเร็วตัด

อัตราป้อน และความลึกในการตัด และอัตรากรียาอื่น ๆ ที่ทำการทดลองมีอิทธิพลต่อค่าความขรุขระผิวของ อะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6061 เนื่องจากมีค่า P-Value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 แสดงดังตารางที่ 4.3 และจากการวิเคราะห์การถดถอย สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร ต่าง ๆ ในรูปของสมการกำลังสอง (Quadratic) ของค่าความขรุขระผิว ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการแบบ Actual Variable ได้ดังสมการที่ 1 คือ

$$Ra = -2.10818 + 0.040003 \text{ Cutting Speed} + 38.66579 \text{ Feed Rate} - 0.29201 \text{ Depth of Cut} - 0.21333 \text{ Cutting Speed} * \text{Feed Rate} + 0.017444 \text{ Cutting Speed} * \text{Depth of Cut} - 15.16667 \text{ Feed Rate} * \text{Depth of Cut} - 0.000190938 \text{ Cutting Speed}^2 - 27.85291 \text{ Feed Rate}^2 + 0.88762 \text{ Depth of Cut}^2 \quad (1)$$

จากสมการถดถอยของค่าความขรุขระผิวในการกลึงอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6061 สามารถนำมาสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนอง (Response surface plot) แสดงดังรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าถ้าใช้ความเร็วตัดน้อยลง และใช้อัตราป้อนเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความขรุขระผิวมากขึ้น และถ้าใช้ความเร็วตัดเพิ่มขึ้น อัตราป้อนน้อยลง จะทำให้ค่าความขรุขระผิวลดลง แสดงดังรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าถ้าใช้ความลึกในการตัดเพิ่มขึ้น และใช้อัตราป้อนเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความขรุขระผิวมากขึ้น และถ้าใช้ความลึกในการตัดน้อยลง อัตราป้อนน้อยลง จะทำให้ค่าความขรุขระผิวลดลง แสดงดังรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าถ้าใช้ความเร็วตัดน้อยลง และใช้ความลึกในการตัดเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความขรุขระผิวมากขึ้น และถ้าใช้ความเร็วตัดเพิ่มขึ้น ความลึกในการตัดน้อยลง จะทำให้ค่าความขรุขระผิวลดลง

ตารางที่ 4.1 แผนการทดลองและผลของค่าความขรุขระผิวและค่าความแข็งของชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6061 ที่สภาวะต่างๆ

Runs	Factors			Surface Roughness (μm)				Hardness (Hv)			
	Cutting Speed (m/min)	Feed Rate (mm/rev)	Depth of Cut (mm)	1	2	3	Average	1	2	3	Average
1	90	0.07	0.50	1.497	1.531	1.517	1.515	85.1	84.9	83.8	84.6
2	105	0.05	0.35	1.077	1.053	1.193	1.108	79.6	80.3	83.3	81.1
3	105	0.08	0.35	1.451	1.357	1.356	1.388	82.0	80.1	82.0	81.3
4	105	0.05	0.10	0.738	0.823	0.865	0.809	67.4	65.3	66.0	66.2
5	130	0.05	0.35	0.865	0.844	0.900	0.870	74.0	74.1	74.9	74.3
6	105	0.05	0.35	1.174	1.032	1.065	1.090	79.9	78.8	80.1	79.6

ตารางที่ 4.1 แผนการทดลองและผลของค่าความขรุขระผิวและค่าความแข็งของชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6061 ที่สภาวะต่างๆ (ต่อ)

Runs	Factors			Surface Roughness (μm)				Hardness (Hv)			
	Cutting Speed (m/min)	Feed Rate (mm/rev)	Depth of Cut (mm)	1	2	3	Average	1	2	3	Average
7	105	0.05	0.60	1.534	1.560	1.525	1.540	80.7	85.3	83.4	83.1
8	105	0.05	0.35	1.101	1.101	1.119	1.107	82.1	81.3	83.6	82.3
9	105	0.05	0.35	1.097	1.053	1.180	1.110	81.8	80.4	82.5	81.6
10	105	0.02	0.35	0.900	0.812	0.642	0.785	62.1	63.2	63.5	62.9
11	120	0.07	0.50	1.295	1.230	1.255	1.260	82.7	81.7	82.4	82.3
12	90	0.03	0.50	1.115	1.061	1.124	1.100	69.4	70.4	69.1	69.6
13	90	0.07	0.20	1.203	1.173	1.224	1.200	77.5	75.6	77.6	76.9
14	120	0.07	0.20	0.918	0.932	0.956	0.935	67.1	66.3	67.8	67.1
15	120	0.03	0.20	0.575	0.632	0.575	0.594	63.1	62.3	64.8	63.4
16	120	0.03	0.50	1.309	1.261	1.174	1.248	70.5	69.5	72.3	70.8
17	105	0.05	0.35	1.141	1.099	1.061	1.110	80.9	81.9	82.6	81.8
18	105	0.05	0.35	1.232	1.037	1.185	1.151	78.6	80.6	79.2	79.5
19	90	0.03	0.20	0.721	0.759	0.769	0.750	64.7	63.5	62.7	63.6
20	80	0.05	0.35	1.124	1.122	1.123	1.123	74.6	76.6	77.1	76.1

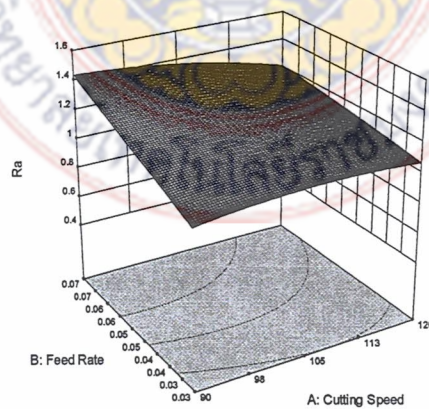
ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์หารูปแบบสมการที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการกลึงอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็งต่อค่าความขรุขระผิวด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง (CCD)

Summary (detailed tables shown below)					
	Sequential	Lack of Fit	Adjusted	Predicted	
Source	p-value	p-value	R-Squared	R-Squared	
Linear	< 0.0001	0.0012	0.8820	0.8190	
2FI	0.0152	0.0040	0.9331	0.8471	
Quadratic	<u>0.0066</u>	<u>0.0266</u>	<u>0.9731</u>	<u>0.8887</u>	Suggested
Cubic	0.0102	0.4652	0.9936	0.9483	Aliased

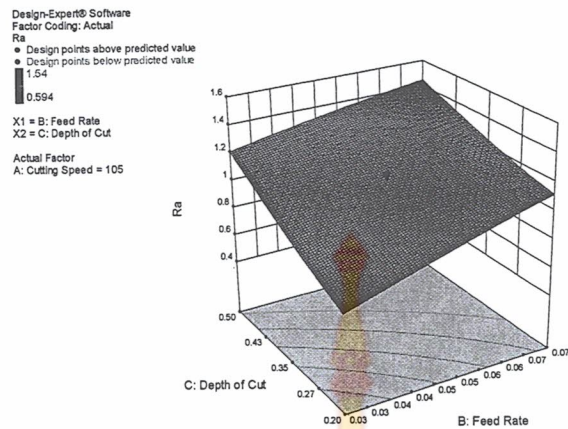
ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของแบบจำลองการถดถอยของผลตอบสนองต่อค่าความขรุขระผิว

ANOVA for Response Surface Quadratic model					
Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]					
	Sum of		Mean	F	p-value
Source	Squares	df	Square	Value	Prob > F
Model	1.13	9	0.13	77.41	< 0.0001
A-Cutting Speed	0.067	1	0.067	40.90	< 0.0001
B-Feed Rate	0.36	1	0.36	224.14	< 0.0001
C-Depth of Cut	0.60	1	0.60	371.42	< 0.0001
AB	0.033	1	0.033	20.13	0.0012
AC	0.012	1	0.012	7.57	0.0204
BC	0.017	1	0.017	10.18	0.0097
A ²	0.027	1	0.027	16.34	0.0024
B ²	0.001789	1	0.001789	1.10	0.3192
C ²	0.005748	1	0.005748	3.53	0.0896
Residual	0.016	10	0.001628		
Lack of Fit	0.014	5	0.002845	6.93	0.0266
Pure Error	0.002051	5	0.0004103		
Cor Total	1.15	19			

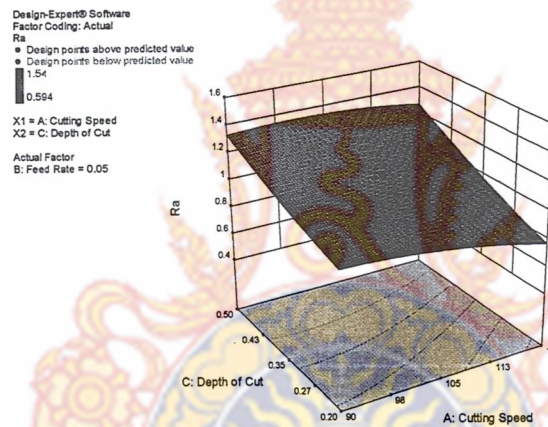
Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 Ra
 1.54
 0.594
 X1 = A: Cutting Speed
 X2 = B: Feed Rate
 Actual Factor
 C: Depth of Cut = 0.44



รูปที่ 4.2 อิทธิพลของปัจจัยของความเร็วตัดและอัตราป้อนที่มีผลต่อค่าความขรุขระผิว



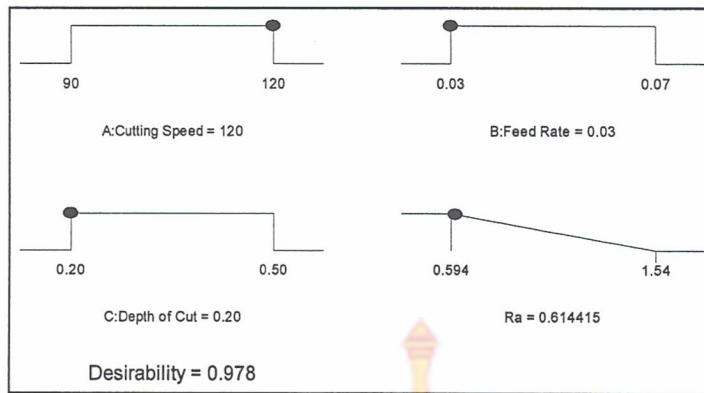
รูปที่ 4.3 อิทธิพลของปัจจัยของอัตราป้อนและความลึกในการตัดที่มีผลต่อค่าความขรุขระผิว



รูปที่ 4.4 อิทธิพลของปัจจัยของความเร็วตัดและความลึกในการตัดที่มีผลต่อค่าความขรุขระผิว

4.3 การหาค่าสถานะที่เหมาะสมของค่าความขรุขระผิว

การวิเคราะห์หาสถานะที่เหมาะสมในการกลึงอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6061 เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาผลลัพธ์ โดยจะเลือกค่าระดับของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความขรุขระผิว (Ra) มีค่าน้อยที่สุด ผลการวิเคราะห์สถานะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความขรุขระผิว แสดงดังรูปที่ 4.5 เมื่อพิจารณาพบว่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ค่าความขรุขระผิวน้อยที่สุดของการกลึงอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6061 ซึ่งวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Design Expert V.9.1 คือ ความเร็วตัด 120 เมตร/นาที อัตราป้อน 0.03 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกในการตัด 0.2 มิลลิเมตร ซึ่งได้ค่าความขรุขระผิว เท่ากับ 0.614 ไมโครเมตร และค่าความพึงพอใจ (Desirability) เท่ากับ 97.8 %



รูปที่ 4.5 สถานะที่เหมาะสมของปัจจัยในการกลึงต่อค่าความขรุขระผิว

4.4 การทดลองยืนยันผลของค่าความขรุขระผิว

เป็นการทดลองเพื่อยืนยันผลของปัจจัยที่ได้ว่าสอดคล้องกับการทดลองที่ผ่านมาหรือไม่ โดยนำผลการทดลองมาพยากรณ์ค่าความขรุขระผิว โดยทำการสุ่มสภาวะการกลึงอยู่ในขอบเขตที่กำหนด แล้วนำผลที่ได้จากการพยากรณ์มาเปรียบเทียบกับค่าจริง (d) ที่ได้จากการทดลอง และกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์สำหรับค่าความขรุขระผิวไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ โดยค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างความขรุขระผิวของค่าจริงกับค่าพยากรณ์มาคำนวณได้ ซึ่งจากการทดลองเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดรวมของการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวที่ได้จากสมการถดถอยเมื่อเทียบกับค่าที่วัดได้จากการทดลองในแต่ละระดับของปัจจัยมีค่าเท่ากับ 3.21 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

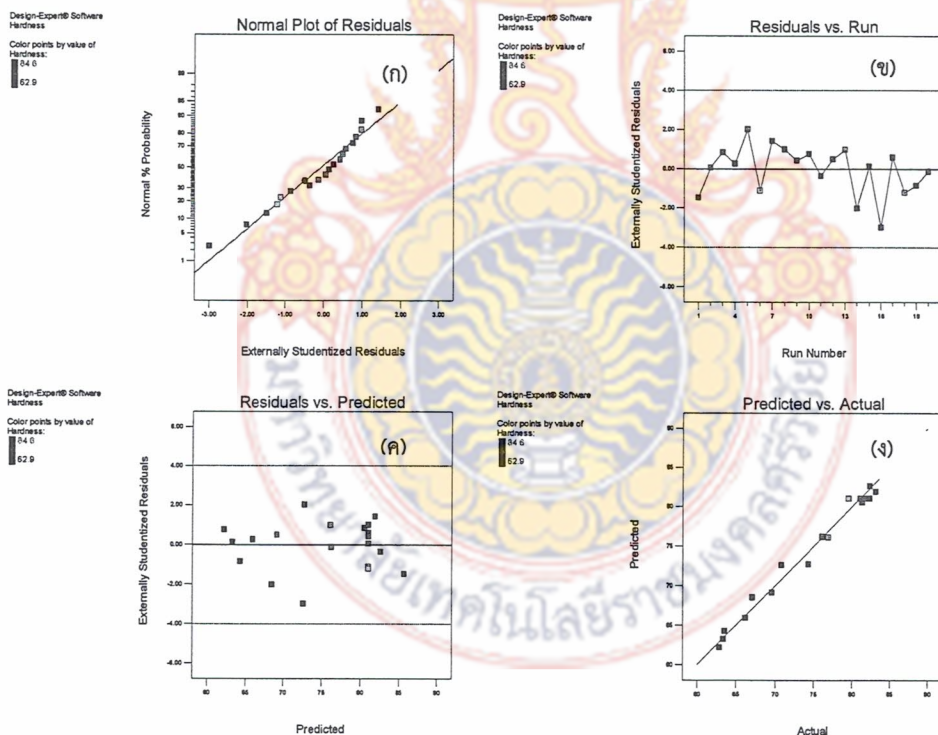
4.5 การวิเคราะห์รูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติที่เหมาะสมของค่าความแข็ง

ผลการทดลองในตารางที่ 4.1 สามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อเลือกรูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติที่เหมาะสม ซึ่งผลการวิเคราะห์ทางสถิติ แสดงดังตารางที่ 4.4 พบว่าค่าความแข็งมีความเหมาะสมกับรูปแบบจำลองเชิงเส้นโค้ง (Quadratic Model) เมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบอื่น ๆ รูปแบบที่เหมาะสมนี้มีค่า Adj-R² และค่า Pred-R² สูงกว่ารูปแบบอื่น ๆ เมื่อเปรียบเทียบกัน เช่นเดียวกับการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) พบว่ารูปแบบจำลองที่เหมาะสมเหล่านี้มีค่า P-value ของ Lack of Fit ที่ไม่มีนัยสำคัญ ($P > 0.05$) หมายความว่ารูปแบบจำลองการถดถอยมีความสมรูปกับข้อมูล

4.6 การตรวจสอบความพอเพียงของรูปแบบจำลองของค่าความแข็ง

การตรวจสอบความพอเพียงของรูปแบบจำลอง เป็นการตรวจสอบความเหมาะสม และความถูกต้องของรูปแบบจำลอง เพื่อยืนยันความเพียงพอและความน่าเชื่อถือของรูปแบบจำลองการถดถอยที่ได้รับจากการทดลอง จากรูปที่ 4.6(ก) กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal Probability)

พบว่าไม่มีค่าที่ผิดปกติเกิดขึ้นในกราฟ ตลอด จนข้อมูลมีการแนบชิดกับเส้นตรงหรือแสดงเป็นเส้นตรง ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงเป็นแบบปกติ รูปที่ 4.6(ข) แสดงกราฟค่าเศษเหลือต่อลำดับการทดลอง พบว่าค่าเศษเหลือไม่มีความสัมพันธ์กับลำดับการทดลองที่เป็นแนวโน้มหรือมีความสัมพันธ์ที่สามารถคาดการณ์ได้ตลอดจนไม่มีค่าที่ผิดปกติเกิดขึ้นในกราฟ รูปที่ 4.6(ค) แสดงกราฟค่าเศษเหลือต่อค่าพยากรณ์ และพบว่าค่าเศษเหลือมีการกระจายตัวที่ไม่มีแนวโน้มหรือรูปแบบที่แน่นอน เช่นเดียวกันค่าเศษเหลือมีการกระจายรอบ ๆ ค่าศูนย์ที่เท่าๆ กัน ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเสถียรภาพของความแปรปรวนและคุณสมบัติด้านความเป็นอิสระ และรูปที่ 4.7(ง) แสดงกราฟค่าพยากรณ์ต่อค่าการทดลองจริง เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าความแข็งที่ได้จากการพยากรณ์โดยรูปแบบจำลองการถดถอยและการทดลองจริง พบว่าข้อมูลมีความสัมพันธ์กันค่อนข้างเป็นเส้นตรง ซึ่งเป็นการยืนยันว่ารูปแบบจำลองการถดถอยเหล่านี้สามารถพยากรณ์ค่าจากการทดลองได้อย่างแม่นยำ ดังนั้นจากการวิเคราะห์กราฟทั้ง 4 และข้อมูลเหล่านี้สามารถสรุปได้ว่ารูปแบบจำลองมีความน่าเชื่อถือและมีความพอเพียง



รูปที่ 4.6 การตรวจสอบความพอเพียงของรูปแบบจำลองการถดถอยของค่าความแข็ง (ก) กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติ (ข) กราฟค่าเศษเหลือต่อลำดับการทดลอง (ค) กราฟค่าเศษเหลือต่อค่าพยากรณ์ และ (ง) กราฟค่าพยากรณ์ต่อค่าการทดลองจริง

4.7 สมการถดถอยและการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็ง

จากผลการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง พบว่าข้อมูลที่ได้มีความน่าเชื่อถือ จึงนำข้อมูลผลการวัดความแข็งมาทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัย เพื่อตรวจสอบว่าปัจจัยที่ทำการศึกษานั้นมีปัจจัยใดบ้างที่มีผลต่อความแข็งของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061 โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Design Expert V.9.1 แสดงดังตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าปัจจัยหลักประกอบด้วย ความเร็วตัด อัตราป้อน และความลึกในการตัด และอิทธิกริยาอื่น ๆ ที่ทำการทดลองมีอิทธิพลต่อค่าความขรุขระผิวของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061 เนื่องจากมีค่า P-Value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 และจากการวิเคราะห์การถดถอย สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ในรูปของสมการกำลังสอง (Quadratic) ของค่าความแข็ง ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการแบบ Actual Variable ได้ดังสมการที่ 2 คือ

$$\begin{aligned} \text{Hardness} = & -88.27215 + 2.18967 \text{ Cutting Speed} + 1559.38598 \text{ Feed Rate} + 37.89507 \text{ Depth of Cut} \\ & -5.45833 \text{ Cutting Speed} * \text{Feed Rate} + 0.49444 \text{ Cutting Speed} * \text{Depth of Cut} + 395.83333 \text{ Feed} \\ & \text{Rate} * \text{Depth of Cut} - 0.010280 \text{ Cutting Speed}^2 - 8522.47241 \text{ Feed Rate}^2 - 111.44124 \text{ Depth of Cut}^2 \end{aligned} \quad (2)$$

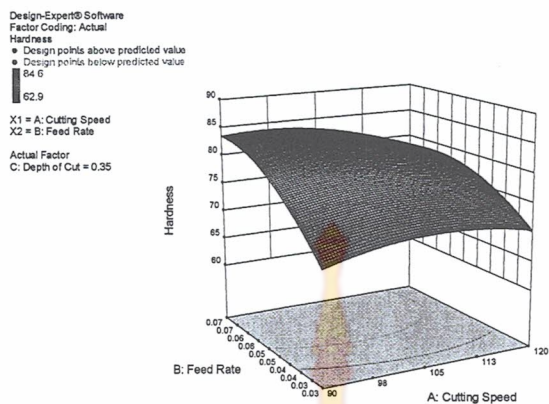
จากสมการถดถอยของค่าความแข็งในการกลึงอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061 สามารถนำมาสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Plot) แสดงดังรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าถ้าใช้ความเร็วตัดน้อยลง และใช้อัตราป้อนเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น และถ้าใช้ความเร็วตัดเพิ่มขึ้น อัตราป้อนน้อยลง จะทำให้ค่าความแข็งลดลง รูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าถ้าใช้ความลึกในการตัดเพิ่มขึ้น และใช้อัตราป้อนลดลง จะทำให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และถ้าใช้ความลึกในการตัดน้อยลง อัตราป้อนเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความแข็งลดลงเล็กน้อย รูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่าถ้าใช้ความเร็วเพิ่มขึ้น และใช้ความลึกในการตัดเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น และถ้าใช้ความเร็วตัดน้อยลง ความลึกในการตัดน้อยลง จะทำให้ค่าความขรุขระผิวลดลง

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์หารูปแบบสมการที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการกลึงอูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็งค่าความแข็งด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง (CCD)

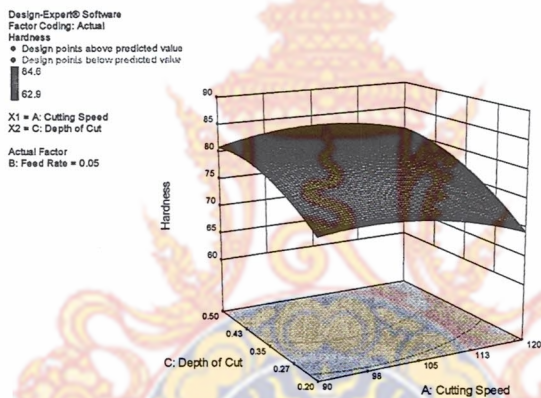
Summary (detailed tables shown below)					
	Sequential	Lack of Fit	Adjusted	Predicted	
Source	p-value	p-value	R-Squared	R-Squared	
Linear	0.0003	0.0015	0.6179	0.5368	
2FI	0.6196	0.0011	0.5879	0.1392	
<u>Quadratic</u>	<u><0.0001</u>	<u>0.2520</u>	<u>0.9647</u>	<u>0.8920</u>	<u>Suggested</u>
Cubic	0.4856	0.1111	0.9643	-0.0705	Aliased

ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของแบบจำลองการถดถอยของผลตอบสนองต่อค่าความแข็ง

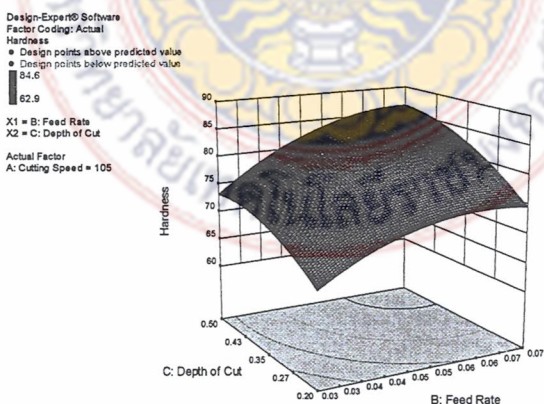
ANOVA for Response Surface Quadratic model						
Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]						
	Sum of		Mean	F	p-value	
Source	Squares	df	Square	Value	Prob > F	
Model	1052.15	9	116.91	58.70	< 0.0001	significant
A-Cutting Speed	14.61	1	14.61	7.34	0.0220	
B-Feed Rate	405.81	1	405.81	203.75	< 0.0001	
C-Depth of Cut	306.73	1	306.73	154.00	< 0.0001	
AB	21.45	1	21.45	10.77	0.0083	
AC	9.90	1	9.90	4.97	0.0499	
BC	11.28	1	11.28	5.66	0.0386	
A^2	77.10	1	77.10	38.71	< 0.0001	
B^2	167.48	1	167.48	84.09	< 0.0001	
C^2	90.61	1	90.61	45.49	< 0.0001	
Residual	19.92	10	1.99			
Lack of Fit	13.01	5	2.60	1.88	0.2520	not significant
Pure Error	6.91	5	1.38			
Cor Total	1072.07	19				



รูปที่ 4.7 อิทธิพลของปัจจัยของความเร็วตัดและอัตราป้อนที่มีผลต่อค่าความแข็ง



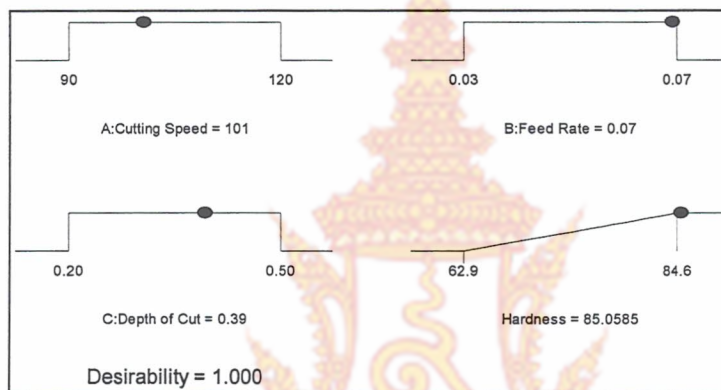
รูปที่ 4.8 อิทธิพลของปัจจัยของความเร็วตัดและความลึกในการตัดที่มีผลต่อค่าความแข็ง



รูปที่ 4.9 อิทธิพลของปัจจัยของอัตราป้อนและความลึกในการตัดที่มีผลต่อค่าความแข็ง

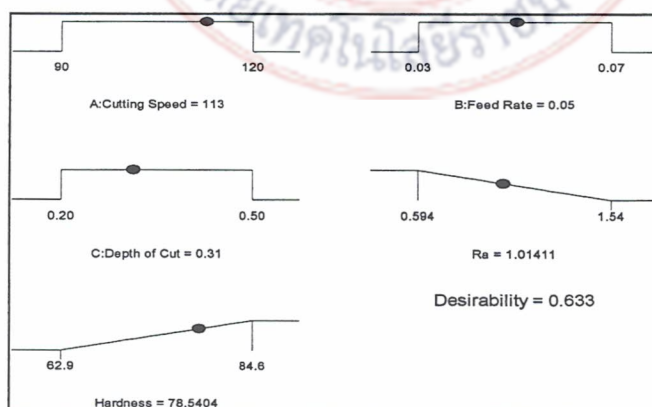
4.8 การหาค่าสถานะที่เหมาะสมของค่าความแข็ง

การวิเคราะห์หาสถานะที่เหมาะสมในการกลึงอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6061 เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาผลลัพธ์ โดยจะเลือกค่าระดับของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความแข็ง (Hardness) มีค่ามากที่สุด ผลการวิเคราะห์สถานะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็ง แสดงดังรูปที่ 14 เมื่อพิจารณาพบว่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ค่าความแข็งมากที่สุดของการกลึงอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6061 ซึ่งวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Design Expert V.9.1 คือ ความเร็วตัด 101 เมตร/นาที อัตราป้อน 0.07 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกในการตัด 0.39 มิลลิเมตร ซึ่งได้ค่าความแข็ง เท่ากับ 85.0585 Hv และค่าความพึงพอใจ (Desirability) เท่ากับ 100 %



รูปที่ 4.10 สถานะที่เหมาะสมของปัจจัยในการกลึงต่อค่าความแข็ง

การวิเคราะห์หาสถานะที่เหมาะสมในการกลึงอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6061 เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาผลลัพธ์ทั้งสอง โดยจะเลือกค่าระดับของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความขรุขระผิว (Ra) น้อยที่สุด และความแข็ง (Hardness) มีค่ามากที่สุด ผลการวิเคราะห์สถานะเหมาะสมของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความขรุขระผิวและความแข็ง แสดงดังรูปที่ 15 เมื่อพิจารณาพบว่าระดับปัจจัยที่เหมาะสม คือ ความเร็วตัด 113 เมตร/นาที อัตราป้อน 0.05 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกในการตัด 0.31 มิลลิเมตร



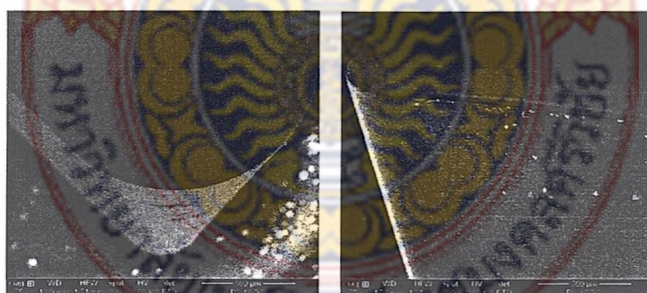
รูปที่ 4.11 สถานะที่เหมาะสมของปัจจัยในการกลึงต่อค่าความขรุขระผิวและความแข็ง

4.9 การทดลองยืนยันผลของค่าความแข็ง

เป็นการทดลองเพื่อยืนยันผลของปัจจัยที่ได้ว่าสอดคล้องกับการทดลองที่ผ่านมาหรือไม่ โดยนำสมการถอดออกมาพยากรณ์ความแข็ง โดยทำการสุ่มสถานะการกลึงอยู่ในขอบเขตที่กำหนด แล้วนำผลที่ได้จากการพยากรณ์มาเปรียบเทียบกับค่าจริง (d_p) ที่ได้จากการทดลอง และกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์สำหรับค่าความแข็งไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ โดยค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างความแข็งของค่าจริงกับค่าพยากรณ์ที่คำนวณได้ ซึ่งจากการทดลองเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดรวมของการพยากรณ์ค่าความแข็งที่ได้จากสมการถอดเมื่อเทียบกับค่าที่วัดได้จากการทดลองในแต่ละระดับของปัจจัยมีค่าเท่ากับ 3.19 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

4.10 ลักษณะการสึกหรอของเม็ดมีด (Tool Wear)

ในขั้นตอนนี้ได้กำหนดสถานะในการทดลอง 1 สถานะการตัด ประกอบด้วย ความเร็วตัด 110 เมตร/นาที อัตราป้อน 0.06 มิลลิเมตร/รอบ และความลึกของการตัด 0.35 มิลลิเมตร โดยทำการกลึงอะลูมิเนียมหล่อทิ้งของแข็ง เกรด 6061 เวลาในการกลึง 1 ชั่วโมง 45 นาที แล้วนำเม็ดมีดไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนสแกน (SEM) เพื่อดูลักษณะการสึกหรอของเม็ดมีด พบว่าเม็ดมีดไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างชัดเจน และจากการทดลองกลึงปอกผิวอย่างต่อเนื่อง พบว่าจะเป็นการสึกหรอแบบแตกหักที่ปลายคมตัด อาจเนื่องจากการเสียดสีและการกระทบกับชิ้นงาน ลักษณะการสึกหรอของเม็ดมีด ดังรูปที่ 4.12 (ก) และ (ข)



รูปที่ 4.12 ลักษณะการสึกหรอของเม็ดมีด

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การหาสภาวะที่เหมาะสมและการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิว และความแข็งในกระบวนการกลึงปอกด้วยเครื่องกลึงซีเอ็นซี โดยประยุกต์ใช้วิธีพื้นผิวตอบสนองด้วยการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง (CCD) โดยสมการการพยากรณ์เป็นฟังก์ชันของปัจจัยการกลึง ซึ่งประกอบด้วยความเร็วตัด อัตราป้อน และความลึกในการตัด เพื่อใช้สำหรับวัดค่าความขรุขระผิวและความแข็ง การวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยในการกลึงปอกอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6061 ผลการวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความขรุขระผิวและความแข็ง พบว่าปัจจัยที่เหมาะสม คือ ความเร็วตัด 113 เมตร/นาที อัตราป้อน 0.05 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกในการตัด 0.31 มิลลิเมตร และการทดสอบสมการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิว และความแข็ง แสดงให้เห็นว่าสมการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวและค่าความแข็งมีความแม่นยำและน่าเชื่อถือ

การทดลองเพื่อยืนยันผลของปัจจัยที่ได้ว่าสอดคล้องกับการทดลองที่ผ่านมาหรือไม่ ผลการทดลองเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดรวมของการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวที่ได้จากสมการถดถอยเมื่อเทียบกับค่าที่วัดได้จากการทดลองในแต่ละระดับของปัจจัยมีค่าเท่ากับ 3.21 เปอร์เซ็นต์ และเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดรวมของการพยากรณ์ค่าความแข็งที่ได้จากสมการถดถอยเมื่อเทียบกับค่าที่วัดได้จากการทดลองในแต่ละระดับของปัจจัยมีค่าเท่ากับ 3.19 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

5.2 ลักษณะการสึกหรอของเม็ดมีด (Tool Wear)

จากการกำหนดสภาวะการทดลองที่ความเร็วตัด 110 เมตร/นาที อัตราป้อน 0.06 มิลลิเมตร/รอบ และความลึกของการตัด 0.35 มิลลิเมตร โดยทำการกลึงอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6061 เวลาในการกลึง 1 ชั่วโมง 45 นาที แล้วนำเม็ดมีดไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนสแกน (SEM) เพื่อดูลักษณะการสึกหรอของเม็ดมีด พบว่าเม็ดมีดไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปทรงอย่างชัดเจน และจากการทดลองกลึงปอกผิวอย่างต่อเนื่อง พบว่าจะเป็นการสึกหรอแบบแตกหักที่ปลายคมตัด อาจเนื่องจากการเสียดสีและการกระทบกับชิ้นงาน

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การจัดทำปฏิญานีพนธ์นี้ จำกัดอยู่เฉพาะเครื่องกลึงควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ที่มีขนาดเล็กซึ่งมีกำลัง และค่าทางเทคนิคไม่สูง ซึ่งเหมาะสำหรับการขึ้นรูป และกลึงปอกผิวชิ้นส่วนอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแจ๊จ เกรด 6061 ที่มีขนาดเล็ก

5.2.2 กำหนดระดับของปัจจัยอื่นๆ เช่น ความลึกในการป้อน ความเร็วตัด อัตราป้อน เป็นต้น ให้มีระยะห่างมากกว่าการทดลองในครั้งนี้ ซึ่งอาจจะพบข้อแตกต่างของความลึกในการป้อน ความเร็วตัด และอัตราป้อน

5.2.3 การศึกษาครั้งต่อไปควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับ ความยาวในการจับชิ้นงาน วิธีการจับยึดชิ้นงาน น้ำหล่อเย็น มุมตัด ชนิดของเม็ดมีด ความเป็นทรงกระบอกหรือทรงกลม เป็นต้น



บรรณานุกรม

- [1] โอกาสและรู้ทางการลงทุนของจีนในไทยอุตสาหกรรมยานยนต์และชิ้นส่วนยานยนต์. (2554). [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก :
<http://chineseinfo.boi.go.th/CIC/Document/Reference/ShowDoc.aspx?cName=79>.
(วันที่ค้นข้อมูล : 10 กันยายน 2558).
- [2] ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ. (2549). *วัสดุวิศวกรรม*. กรุงเทพฯ. ซีเอ็ดดูเคชั่น.
- [3] สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์ และ จักรนรินทร์ ฉัตรทอง. (2551). *การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกลึงไม้ตาลโดนดด้วยใบมีดคาร์ไบด์*. การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม, 20-22 ตุลาคม 2551, โรงแรมบีพีสมิหลาบีช, สงขลา. หน้า 787-795.
- [4] สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์ จักรนรินทร์ ฉัตรทอง จุฬาลักษณ์ โรจนานุกูล และ จตุพร ใจदारงค์. (2553). *การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของงานกัดตัวอักษรบนไม้มะพร้าวด้วยเครื่องกัดควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์*. การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม, 13-15 ตุลาคม, โรงแรมสุเนียแกรนด์ แอนด์ คอนเวนชัน เซ็นเตอร์. อุบลราชธานี.
- [5] พงษ์พันธ์ ราชภักดี และ เฉลิมพล คล้ายนิล. (2550). *อิทธิพลของสภาวะการกลึงเหล็กกล้าสแตนเลส AISI 316 ด้วยใบมีดคาร์ไบด์ ที่มีผลต่อการสึกหรอใบมีดตัดและความขรุขระของพื้นผิว*. สาขาวิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมการวิจัย. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์.
- [6] วิมล บุญรอด และ ชเนศ รัตนวิไล. 2555. *อิทธิพลของปัจจัยในการกลึงปอกต่อต่อความขรุขระของผิวอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง*. วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา ปีที่ 23 ฉบับที่ 4. 2555. หน้า 73-77
- [7] เจษฎา วรรณสินธุ์. (2554, กุมภาพันธ์-มีนาคม). การขึ้นรูปโลหะด้วยกระบวนการหล่อโลหะกิ่งของแข็ง. *วารสารเทคโนโลยี โพรโมชัน*, 37(215), หน้า 77-81.
- [8] รอมฎอน บูรพา รังสิณี แคนยุกต์ เจษฎา วรรณสินธุ์. *การพัฒนากระบวนการผลิตโลหะกิ่งของแข็ง โดยการพ่นพองแก๊สขณะแข็งตัวสำหรับอะลูมิเนียมผสมเกรด A356*. วิทยานิพนธ์คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2552
- [9] S. Rawangwong, J. Chatthong and J. Rodjananugoon. (2011). **The Study of Proper Conditions in Face Coconut Wood by CNC Milling Machine**. IEEE International Conference on Quality and Reliability. Bangkok, Thailand. 14-17 September. (pp. 455-459).

- [10] Surasit Rawangwong, Jaknarin Chatthong, R. Burapa and W. Boonchouytan. (2012) **An investigation of optimum cutting conditions in face milling aluminum 7075-t6 using design of experiment.** 4th International Conference on Applied Operational Research, (2012) Vol. 4. (pp.125–135)
- [11] Surasit Rawangwong Jaknarin Chatthong Worapong Boonchouytan and Romadorn Burapa. (2012) **An Investigation of Optimum Cutting Conditions in Face Milling Aluminum Semi Solid 2024 Using Carbide Tool.** 10th Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium, Ubon Ratchathani, Thailand, December 5-8. 2012. (pp. 779-784).
- [12] Surasit Rawangwong, Jaknarin Chatthong, Romadorn Burapa, and Worapong Boonchouytan. (2012). **An Investigation of Optimum Cutting Conditions in Face Milling Semi-Solid AA 7075 Using Carbide Tool.** International Journal of Innovation, Management and Technology, Vol. 3, No. 6, December 2012. (pp.692-696) (pp. 455-459).
- [13] **Aluminium Alloys** [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : www.thyssenkruppmaterials.co.th/dmdocuments/aluminium.pdf (วันที่ค้นข้อมูล : 12 กันยายน 2558).
- [14] สุขโชค วิริยโกศล. (2543). **การตัดวัสดุ.** สงขลา : ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [15] ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และพงษ์ชนัน เหลืองไพบุลย์. (2551). **การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง.** กรุงเทพฯ. สำนักพิมพ์ท็อป.
- [16] กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ. (2545). **สถิติสำหรับงานวิศวกรรม.** เล่ม 2 ประมวลผลด้วย Minitab. พิมพ์ครั้งที่ 4. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). กรุงเทพฯ.
- [17] Montgomery. D. C., (2005). **Design and Analysis of Experiment.** 5th edition. John Wiley & Son, Inc.

ภาคผนวก





ภาคผนวก ก

ตารางบันทึกผลการทดลอง

ตาราง ก-1 ผลการทดลองวัดค่าความขรุขระผิวอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็งเกรด 6061 (ครั้งที่ 1)

No.	Cutting Speed (rpm)	Feed Rate (mm/rev)	Depth of Cut (mm)	R_a (μm)				
				1	2	3	4	Average
1	90	0.07	0.50	1.554	1.530	1.410	1.495	1.497
2	105	0.05	0.35	1.056	1.062	1.109	1.081	1.077
3	105	0.08	0.35	1.406	1.421	1.429	1.548	1.451
4	105	0.05	0.10	0.607	0.680	0.788	0.877	0.738
5	130	0.05	0.35	0.837	0.893	0.882	0.849	0.865
6	105	0.05	0.35	1.110	1.247	1.197	1.140	1.174
7	105	0.05	0.60	1.521	1.541	1.556	1.518	1.534
8	105	0.05	0.35	1.089	1.083	0.931	1.302	1.101
9	105	0.05	0.35	1.057	1.093	1.074	1.164	1.097
10	105	0.02	0.35	1.003	0.852	0.842	0.903	0.900
11	120	0.07	0.50	1.254	1.295	1.395	1.235	1.295
12	90	0.03	0.50	1.126	1.156	1.091	1.087	1.115
13	90	0.07	0.20	1.154	1.236	1.117	1.304	1.203
14	120	0.07	0.20	0.916	0.905	0.936	0.913	0.918
15	120	0.03	0.20	0.537	0.550	0.610	0.603	0.575
16	120	0.03	0.50	1.334	1.346	1.383	1.171	1.309
17	105	0.05	0.35	1.154	1.211	1.192	1.007	1.141
18	105	0.05	0.35	1.301	1.314	1.211	1.102	1.232
19	90	0.03	0.20	0.710	0.721	0.749	0.705	0.721
20	80	0.05	0.35	1.144	1.083	1.041	1.228	1.124

ตาราง ก-2 ผลการทดลองวัดค่าความขรุขระผิวอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็งเกรด 6061 (ครั้งที่ 2)

No.	Cutting Speed (rpm)	Feed Rate (mm/rev)	Depth of Cut (mm)	R _a (μm)				
				1	2	3	4	Average
1	90	0.07	0.50	1.716	1.642	1.339	1.425	1.531
2	105	0.05	0.35	1.010	1.073	1.055	1.074	1.053
3	105	0.08	0.35	1.421	1.457	1.324	1.225	1.357
4	105	0.05	0.10	0.819	0.854	0.795	0.824	0.823
5	130	0.05	0.35	0.894	0.821	0.847	0.814	0.844
6	105	0.05	0.35	0.986	1.054	1.116	0.971	1.032
7	105	0.05	0.60	1.601	1.564	1.503	1.570	1.560
8	105	0.05	0.35	1.052	1.164	1.088	1.098	1.101
9	105	0.05	0.35	1.056	1.047	1.088	1.021	1.053
10	105	0.02	0.35	0.795	0.727	0.941	0.783	0.812
11	120	0.07	0.50	1.144	1.258	1.223	1.293	1.230
12	90	0.03	0.50	1.028	1.053	1.013	1.149	1.061
13	90	0.07	0.20	1.137	1.149	1.165	1.242	1.173
14	120	0.07	0.20	0.977	0.903	0.938	0.911	0.932
15	120	0.03	0.20	0.617	0.690	0.643	0.576	0.632
16	120	0.03	0.50	1.258	1.391	1.100	1.296	1.261
17	105	0.05	0.35	1.184	1.041	1.128	1.041	1.099
18	105	0.05	0.35	1.054	0.996	0.982	1.115	1.037
19	90	0.03	0.20	0.738	0.796	0.729	0.772	0.759
20	80	0.05	0.35	1.050	1.185	1.098	1.153	1.122

ตาราง ก-3 ผลการทดลองวัดค่าความขรุขระผิวอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็งเกรด 6061 (ครั้งที่ 3)

No.	Cutting Speed (rpm)	Feed Rate (mm/rev)	Depth of Cut (mm)	R_a (μm)				
				1	2	3	4	Average
1	90	0.07	0.50	1.551	1.390	1.314	1.814	1.517
2	105	0.05	0.35	1.118	1.222	1.235	1.196	1.193
3	105	0.08	0.35	1.322	1.415	1.326	1.359	1.356
4	105	0.05	0.10	0.798	0.899	0.921	0.843	0.865
5	130	0.05	0.35	0.907	0.904	0.844	0.944	0.900
6	105	0.05	0.35	1.101	1.141	1.003	1.014	1.065
7	105	0.05	0.60	1.533	1.504	1.514	1.550	1.525
8	105	0.05	0.35	1.224	1.115	1.041	1.095	1.119
9	105	0.05	0.35	1.154	1.264	1.135	1.166	1.180
10	105	0.02	0.35	0.607	0.698	0.605	0.658	0.642
11	120	0.07	0.50	1.259	1.215	1.287	1.257	1.255
12	90	0.03	0.50	1.134	1.087	1.210	1.064	1.124
13	90	0.07	0.20	1.189	1.254	1.241	1.210	1.224
14	120	0.07	0.20	0.954	0.964	0.935	0.970	0.956
15	120	0.03	0.20	0.591	0.549	0.609	0.549	0.575
16	120	0.03	0.50	1.179	1.154	1.126	1.237	1.174
17	105	0.05	0.35	1.015	1.011	1.003	1.214	1.061
18	105	0.05	0.35	1.154	1.241	1.302	1.044	1.185
19	90	0.03	0.20	0.765	0.754	0.744	0.813	0.769
20	80	0.05	0.35	1.071	1.120	1.153	1.149	1.123

ตาราง ก-4 ผลการทดลองวัดค่าความแข็งอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็งเกรด 6061 (ครั้งที่ 1)

No.	Cutting Speed (rpm)	Feed Rate (mm/rev)	Depth of Cut (mm)	Hardness (Hv)				
				1	2	3	4	Average
1	90	0.07	0.50	85.2	80.4	86.7	88.2	85.1
2	105	0.05	0.35	81.2	80.3	78.2	78.5	79.6
3	105	0.08	0.35	84.2	74.6	78.2	90.8	82.0
4	105	0.05	0.10	66.5	63.1	71.9	68.0	67.4
5	130	0.05	0.35	71.7	66.1	75.8	82.4	74.0
6	105	0.05	0.35	72.1	80.3	90.4	76.8	79.9
7	105	0.05	0.60	83.4	82.5	80.1	80.9	81.7
8	105	0.05	0.35	80.8	79.5	82.4	85.7	82.1
9	105	0.05	0.35	77.2	83.1	84.7	82.1	81.8
10	105	0.02	0.35	62.7	55.8	61.8	68.0	62.1
11	120	0.07	0.50	74.6	83.7	94.8	77.7	82.7
12	90	0.03	0.50	69.1	70.8	68.3	69.3	69.4
13	90	0.07	0.20	70.2	77.4	80.1	82.3	77.5
14	120	0.07	0.20	64.0	67.2	68.4	68.6	67.1
15	120	0.03	0.20	59.4	58.8	69.2	65.1	63.1
16	120	0.03	0.50	67.2	75.4	62.1	77.1	70.5
17	105	0.05	0.35	81.1	79.9	79.1	83.4	80.9
18	105	0.05	0.35	80.8	78.4	77.9	77.2	78.6
19	90	0.03	0.20	61.8	64.8	65.0	67.0	64.7
20	80	0.05	0.35	72.6	77.3	73.1	75.2	74.6

ตาราง ก-5 ผลการทดลองวัดค่าความแข็งอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็งเกรด 6061 (ครั้งที่ 2)

No.	Cutting Speed (rpm)	Feed Rate (mm/rev)	Depth of Cut (mm)	Hardness (Hv)				
				1	2	3	4	Average
1	90	0.07	0.50	84.4	83.7	84.3	87.1	84.9
2	105	0.05	0.35	79.0	80.2	80.6	81.2	80.3
3	105	0.08	0.35	81.9	76.9	76.4	85.1	80.1
4	105	0.05	0.10	69.5	64.1	64.5	63.0	65.3
5	130	0.05	0.35	70.5	69.5	71.8	84.6	74.1
6	105	0.05	0.35	85.2	80.4	74.1	75.3	78.8
7	105	0.05	0.60	86.2	85.8	83.7	85.3	85.3
8	105	0.05	0.35	82.4	78.0	80.6	84.2	81.3
9	105	0.05	0.35	77.2	82.1	80.0	82.1	80.4
10	105	0.02	0.35	66.7	60.5	58.1	67.4	63.2
11	120	0.07	0.50	80.9	81.3	84.1	80.5	81.7
12	90	0.03	0.50	70.5	70.1	69.6	71.5	70.4
13	90	0.07	0.20	69.5	75.4	76.8	80.5	75.6
14	120	0.07	0.20	62.1	62.9	70.7	69.5	66.3
15	120	0.03	0.20	61.7	60.8	60.5	66.2	62.3
16	120	0.03	0.50	65.4	74.1	63.5	75.1	69.5
17	105	0.05	0.35	79.1	82.7	84.9	81.0	81.9
18	105	0.05	0.35	80.5	80.7	81.6	79.4	80.6
19	90	0.03	0.20	60.2	64.1	63.4	66.4	63.5
20	80	0.05	0.35	75.4	77.6	77.1	76.1	76.6

ตาราง ก-6 ผลการทดลองวัดค่าความแข็งอะลูมิเนียมหล่อทิ้งของแข็งเกรด 6061 (ครั้งที่ 3)

No.	Cutting Speed (rpm)	Feed Rate (mm/rev)	Depth of Cut (mm)	Hardness (Hv)				
				1	2	3	4	Average
1	90	0.07	0.50	79.2	88.1	89.2	78.5	83.8
2	105	0.05	0.35	83.0	81.7	87.2	81.4	83.3
3	105	0.08	0.35	84.2	74.6	78.2	90.8	82.0
4	105	0.05	0.10	69.4	65.4	63.1	66.0	66.0
5	130	0.05	0.35	82.7	67.5	77.8	71.4	74.9
6	105	0.05	0.35	73.2	79.5	88.1	79.5	80.1
7	105	0.05	0.60	85.4	82.5	84.0	81.6	83.4
8	105	0.05	0.35	85.4	81.7	80.1	87.1	83.6
9	105	0.05	0.35	79.2	85.4	81.7	83.7	82.5
10	105	0.02	0.35	62.1	57.4	64.5	70.1	63.5
11	120	0.07	0.50	78.2	85.7	79.1	86.5	82.4
12	90	0.03	0.50	69.7	70.1	69.4	67.1	69.1
13	90	0.07	0.20	75.4	74.1	79.8	81.1	77.6
14	120	0.07	0.20	67.4	66.1	64.8	72.9	67.8
15	120	0.03	0.20	68.4	59.1	64.1	67.4	64.8
16	120	0.03	0.50	77.5	77.8	64.4	69.5	72.3
17	105	0.05	0.35	85.1	77.3	80.6	87.3	82.6
18	105	0.05	0.35	84.4	71.5	80.2	80.6	79.2
19	90	0.03	0.20	62.9	57.6	71.0	59.4	62.7
20	80	0.05	0.35	79.1	79.1	70.6	79.5	77.1



ภาคผนวก ข

ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีสุทธานนท์

ตารางที่ ข-1 วิเคราะห์ผลทางสถิติ ค่า F ภายใต้ความน่าจะเป็น $\alpha = 0.25$

		V_1															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	25	30	
V_2	1	5.83	7.5	8.2	8.58	8.82	8.98	9.1	9.19	9.26	9.32	9.41	9.49	9.5	9.63	9.67	
	2	2.57	3	3.15	3.23	3.28	3.31	3.34	3.35	3.37	3.38	3.39	3.41	3.43	3.44	3.44	
	3	2.02	2.28	2.36	2.39	2.41	2.42	2.43	2.44	2.44	2.44	2.45	2.46	2.46	2.46	2.47	
	4	1.81	2	2.05	2.06	2.07	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	
	5	1.69	1.85	1.88	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.88	1.88	1.88
	6	1.62	1.76	1.78	1.79	1.79	1.78	1.78	1.78	1.77	1.77	1.77	1.77	1.76	1.76	1.75	1.75
	7	1.57	1.7	1.72	1.72	1.71	1.71	1.7	1.7	1.69	1.69	1.68	1.68	1.68	1.17	1.67	1.66
	8	1.54	1.66	1.67	1.66	1.66	1.65	1.64	1.64	1.63	1.63	1.62	1.62	1.62	1.61	1.61	1.6
	9	1.51	1.62	1.63	1.63	1.62	1.61	1.6	1.6	1.59	1.59	1.58	1.57	1.57	1.56	1.55	1.55
	10	1.49	1.6	1.6	1.59	1.59	1.58	1.57	1.56	1.56	1.55	1.54	1.53	1.52	1.52	1.52	1.51
	11	1.47	1.58	1.58	1.57	1.56	1.55	1.54	1.53	1.53	1.52	1.51	1.5	1.49	1.48	1.49	1.48
	12	1.46	1.56	1.56	1.55	1.54	1.53	1.52	1.51	1.51	1.5	1.49	1.48	1.47	1.46	1.46	1.45
	13	1.45	1.55	1.55	1.53	1.52	1.51	1.5	1.49	1.49	1.4	1.47	1.46	1.45	1.44	1.44	1.43
	14	1.44	1.53	1.53	1.52	1.51	1.5	1.49	1.48	1.47	1.46	1.45	1.44	1.44	1.43	1.42	1.41
	15	1.43	1.52	1.52	1.51	1.49	1.48	1.47	1.46	1.46	1.45	1.44	0.143	1.44	1.41	1.4	1.4
	16	1.42	1.51	1.51	1.5	1.48	1.47	1.46	1.45	1.44	1.44	1.43	1.41	1.4	1.39	1.38	1.37
	17	1.42	1.51	1.5	1.49	1.47	1.46	1.45	1.44	1.43	1.43	1.41	1.4	1.39	1.38	1.37	1.36
	18	1.41	1.5	1.49	1.48	1.46	1.45	1.44	1.43	1.42	1.42	1.4	1.39	1.38	1.37	1.36	1.35
	19	1.41	1.49	1.49	1.47	1.46	1.44	1.43	1.42	1.41	1.41	1.4	1.39	1.38	1.37	1.35	1.34
	20	1.4	1.49	1.48	1.47	1.45	1.44	1.43	1.42	1.41	1.4	1.39	1.37	1.36	1.35	1.34	1.33
	21	1.4	1.48	1.48	1.46	1.44	1.43	1.42	1.41	1.4	1.39	1.38	1.37	1.35	1.34	1.33	1.32
	22	1.4	1.48	1.47	1.45	1.44	1.42	1.41	1.4	1.39	1.39	1.37	1.36	1.34	1.33	1.32	1.31
	23	1.39	1.47	1.47	1.45	1.43	1.42	1.41	1.4	1.39	1.38	1.37	1.35	1.34	1.33	1.32	1.31
	24	1.39	1.47	1.46	1.44	1.43	1.41	1.4	1.39	1.38	1.38	1.36	1.35	1.33	1.32	1.31	1.3
	25	1.39	1.47	1.46	1.44	1.42	1.41	1.4	1.39	1.38	1.37	1.36	1.34	1.33	1.31	1.31	1.3
	26	1.38	1.46	1.45	1.44	1.42	1.41	1.39	1.38	1.37	1.37	1.35	1.34	1.32	1.31	1.3	1.29
	27	1.38	1.46	1.45	1.43	1.42	1.4	1.39	1.38	1.37	1.36	1.35	1.33	1.32	1.3	1.3	1.29
	28	1.38	1.46	1.45	1.43	1.41	1.4	1.39	1.38	1.37	1.36	1.34	1.33	1.31	1.3	1.29	1.28
	29	1.38	1.45	1.45	1.43	1.4	1.38	1.37	1.36	1.35	1.34	1.32	1.32	1.31	1.3	1.29	1.28
	30	1.38	1.45	1.44	1.42	1.41	1.39	1.38	1.37	1.36	1.35	1.34	1.32	1.3	1.29	1.28	1.27
40	1.36	1.44	1.42	1.4	1.39	1.37	1.36	1.35	1.34	1.33	1.31	1.3	1.28	1.26	1.25	1.23	
50	1.35	1.43	1.41	1.39	1.37	1.36	1.34	1.33	1.32	1.31	1.3	1.28	1.26	1.25	1.23	1.22	
60	1.35	1.42	1.41	1.38	1.37	1.35	1.33	1.32	1.31	1.3	1.29	1.27	1.25	1.23	1.22	1.21	
120	1.34	1.4	1.4	1.37	1.35	1.33	1.31	1.3	1.29	1.28	1.26	1.24	1.22	1.2	1.19	1.18	

ตารางที่ ข-2 วิเคราะห์ผลทางสถิติ ค่า F ภายใต้ความน่าจะเป็น $\alpha = 0.10$

		v_1															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	25	30	
v_2	1	5.83	7.5	8.2	8.58	8.82	8.9	9.1	9.19	9.26	9.32	9.41	9.49	9.58	9.63	9.67	
	2	2.57	3	3.15	3.23	3.28	3.31	3.34	3.35	3.37	3.38	3.39	3.41	3.43	3.44	3.44	
	3	2.02	2.28	2.36	2.39	2.41	2.42	2.43	2.44	2.44	2.44	2.45	2.46	2.46	2.46	2.47	
	4	1.81	2	2.05	2.06	2.07	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	
	5	1.69	1.85	1.88	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.88	1.88	
	6	1.62	1.76	1.78	1.79	1.79	1.78	1.78	1.78	1.78	1.77	1.77	1.77	1.76	1.76	1.75	
	7	1.57	1.7	1.72	1.72	1.71	1.71	1.7	1.7	1.69	1.69	1.69	1.68	1.68	1.67	1.67	
	8	1.54	1.66	1.67	1.66	1.66	1.65	1.64	1.64	1.63	1.63	1.62	1.62	1.62	1.61	1.6	
	9	1.51	1.62	1.63	1.63	1.62	1.61	1.6	1.6	1.59	1.59	1.58	1.57	1.56	1.55	1.55	
	10	1.49	1.6	1.6	1.59	1.59	1.58	1.57	1.56	1.56	1.55	1.54	1.53	1.52	1.52	1.51	
	11	1.47	1.58	1.58	1.57	1.56	1.55	1.54	1.53	1.53	1.52	1.51	1.5	1.49	1.49	1.48	
	12	1.46	1.56	1.56	1.55	1.54	1.53	1.52	1.51	1.51	1.5	1.49	1.48	1.47	1.46	1.45	
	13	1.45	1.55	1.55	1.53	1.52	1.51	1.5	1.49	1.49	1.48	1.47	1.46	1.45	1.44	1.43	
	14	1.44	1.53	1.53	1.52	1.51	1.5	1.49	1.48	1.47	1.46	1.45	1.44	1.43	1.42	1.41	
	15	1.43	1.52	1.52	1.51	1.49	1.48	1.47	1.46	1.46	1.45	1.44	1.43	1.41	1.4	1.4	
	16	1.42	1.51	1.51	1.5	1.48	1.47	1.46	1.45	1.44	1.44	1.43	1.41	1.4	1.39	1.38	
	17	1.42	1.51	1.5	1.49	1.47	1.46	1.45	1.44	1.43	1.43	1.41	1.4	1.39	1.38	1.37	
	18	1.41	1.5	1.49	1.48	1.46	1.45	1.44	1.43	1.42	1.42	1.4	1.39	1.38	1.37	1.36	
	19	1.41	1.49	1.49	1.47	1.46	1.44	1.43	1.42	1.41	1.41	1.4	1.38	1.37	1.36	1.35	
	20	1.4	1.49	1.48	1.47	1.45	1.44	1.43	1.42	1.41	1.4	1.39	1.37	1.36	1.35	1.34	
	21	1.4	1.48	1.48	1.46	1.44	1.43	1.42	1.41	1.4	1.39	1.38	1.37	1.35	1.34	1.33	
	22	1.4	1.48	1.47	1.45	1.44	1.42	1.41	1.4	1.39	1.39	1.37	1.36	1.34	1.33	1.32	
	23	1.39	1.47	1.47	1.45	1.43	1.42	1.41	1.4	1.39	1.38	1.37	1.35	1.34	1.33	1.32	
	24	1.39	1.4	1.46	1.44	0.43	1.41	1.4	1.39	1.38	1.38	1.36	1.35	1.33	1.32	1.31	
	25	1.39	1.47	1.46	1.44	1.42	1.41	1.4	1.39	1.38	1.37	1.36	1.34	1.33	1.31	1.31	
	26	1.38	1.46	1.45	1.4	1.42	1.41	1.39	1.38	1.37	1.37	1.35	1.34	1.32	1.31	1.3	
	27	1.38	1.46	1.45	1.43	1.42	1.4	1.39	1.38	1.37	1.36	1.35	1.33	1.32	1.3	1.3	
	28	1.38	1.46	1.45	1.43	1.41	1.4	1.39	1.38	1.37	1.36	1.34	1.33	1.31	1.3	1.29	
	29	1.38	1.45	1.45	1.43	1.41	1.4	1.38	1.37	1.36	1.35	1.34	1.32	1.31	1.3	1.29	
	30	1.38	1.45	1.44	1.42	1.41	1.39	1.38	1.37	1.36	1.35	1.34	1.32	1.3	1.29	1.28	
40	1.36	1.44	1.42	1.4	1.39	1.37	1.36	1.35	1.34	1.33	1.31	1.3	1.28	1.26	1.25		
50	1.35	1.43	1.41	1.39	1.37	1.36	1.34	1.33	1.32	1.31	1.3	1.28	1.26	1.25	1.23		
60	1.35	1.42	1.41	1.38	1.37	1.35	1.33	1.32	1.31	1.3	1.29	1.27	1.25	1.23	1.22		
120	1.34	1.4	1.39	1.37	1.35	1.33	1.31	1.3	1.29	1.28	1.26	1.24	1.22	1.2	1.19		

ตารางที่ ข-3 วิเคราะห์ผลทางสถิติ ค่า F ภายใต้ความน่าจะเป็น $\alpha = 0.05$

		V_1															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	25	30	
V_2	1	161.5	199.5	215.7	224.6	230.2	234	236.8	238.9	240.5	241.9	243.9	246	248	249.3	250.1	
	2	18.51	19	19.16	19.25	19.3	19.33	19.35	19.37	19.38	19.4	19.41	19.43	19.45	19.46	19.46	
	3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.74	8.7	8.66	8.63	8.62	
	4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6	5.96	5.91	5.86	5.8	5.77	5.75	
	5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.68	4.62	4.56	4.52	4.5	
	6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.1	4.06	4	3.94	3.87	3.83	3.81	
	7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.57	3.51	3.44	3.4	3.38	
	8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.5	3.44	3.39	3.35	3.28	3.22	3.15	3.11	3.08	
	9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.07	3.01	2.95	2.89	2.86	
	10	4.96	4.1	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.91	2.85	2.77	2.73	2.7	
	11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.2	3.09	3.01	2.95	2.9	2.85	2.79	2.72	2.65	2.6	2.57	
	12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3	2.91	2.85	2.8	2.75	2.69	2.62	2.54	2.5	2.47	
	13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.6	2.53	2.46	2.41	2.38	
	14	4.6	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.7	2.65	2.6	2.53	2.46	2.39	2.34	2.31	
	15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.9	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.48	2.4	2.33	2.28	2.25	
	16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.42	2.35	2.28	2.23	2.19	
	17	4.45	3.59	3.2	2.96	2.81	2.7	2.61	2.55	2.49	2.45	2.38	2.31	2.23	2.18	2.15	
	18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.34	2.27	2.19	2.14	2.11	
	19	4.38	3.52	3.13	2.9	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.31	2.23	2.16	2.11	2.07	
	20	4.35	3.49	3.1	2.87	2.71	2.6	2.51	2.45	2.39	2.35	2.28	2.2	2.12	2.07	2.04	
	21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.25	2.18	2.1	2.05	2.01	
	22	4.3	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.4	2.34	2.3	2.23	2.15	2.07	2.02	1.98	
	23	4.28	3.42	3.03	2.8	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.2	2.13	2.05	2	1.96	
	24	4.26	3.4	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.3	2.25	2.18	2.11	2.03	1.97	1.94	
	25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.6	2.49	2.4	2.34	2.28	2.24	2.16	2.09	2.01	1.96	1.92	
	26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	2.15	2.07	1.99	1.94	1.9	
	27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	2.2	2.13	2.06	1.97	1.92	1.88	
	28	4.2	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	2.12	2.04	1.96	1.91	1.87	
	29	4.18	3.33	2.93	2.27	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22	2.18	2.1	0.03	1.94	1.89	1.85	
	30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.09	2.01	1.93	1.88	1.84	
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2	1.92	1.84	1.78	1.74		
50	4.03	3.18	2.79	2.56	2.4	2.29	2.2	2.13	2.07	2.03	1.95	1.87	1.78	1.73	1.69		
60	4	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.1	2.04	1.99	1.92	1.84	1.75	1.69	1.65		
120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.18	2.09	2.02	1.96	1.91	1.83	1.75	1.66	1.6	1.55		

ตารางที่ ข-4 วิเคราะห์ผลทางสถิติ ค่า F ภายใต้ความน่าจะเป็น $\alpha = 0.025$

		v_1														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	25	30
v_2	1	647.79	799.84	864.15	899.6	921.83	937.11	948.2	956.64	963.28	968.63	976.72	984.87	993.08	998.09	1001.4
	2	38.51	39	39.17	39.25	39.3	39.33	39.36	39.37	39.39	39.4	39.41	39.43	39.45	39.46	39.46
	3	17.44	16.04	15.44	15.1	14.88	14.73	14.62	14.54	14.47	14.42	14.34	14.25	14.17	14.12	14.08
	4	12.22	10.65	9.98	9.6	9.36	9.2	9.07	8.98	8.9	8.84	8.75	8.66	8.56	8.5	8.46
	5	10.01	8.43	7.76	7.39	7.15	6.98	6.85	6.76	6.68	6.62	6.52	6.43	6.33	6.27	6.23
	6	8.81	7.26	6.6	6.23	5.99	5.82	5.7	5.6	5.52	5.46	5.37	5.27	5.17	5.11	5.07
	7	8.07	6.54	5.89	5.52	5.29	5.12	4.99	4.9	4.82	4.76	4.67	4.57	4.47	4.4	4.36
	8	7.57	6.06	5.42	5.05	4.82	4.65	4.53	4.43	4.36	4.3	4.2	4.1	4	3.94	3.89
	9	7.21	5.71	5.08	5.72	4.48	4.32	4.2	4.1	4.03	3.96	3.87	3.77	3.67	3.6	3.56
	10	6.94	5.46	4.83	4.47	4.24	4.07	3.95	3.85	3.78	3.72	3.62	3.52	3.42	3.35	3.31
	11	6.72	5.26	4.63	4.28	4.04	3.88	3.76	3.66	3.59	3.53	3.43	3.33	3.23	3.16	3.12
	12	6.55	5.1	4.47	4.12	3.89	3.73	3.61	3.51	3.44	3.37	3.28	3.18	3.07	3.01	2.96
	13	6.41	4.97	4.35	4	3.77	3.6	3.48	3.39	3.31	3.25	3.15	3.05	2.95	2.88	2.84
	14	6.3	4.86	4.24	3.89	3.66	3.5	3.38	3.29	3.21	3.15	3.05	2.95	2.84	2.78	2.73
	15	6.2	4.77	4.15	3.8	3.58	3.41	3.29	3.2	3.12	3.06	2.96	2.86	2.76	2.69	2.64
	16	6.12	4.69	4.08	3.73	3.5	3.34	3.22	3.12	3.05	2.99	2.89	2.79	2.68	2.61	2.57
	17	6.04	4.62	4.01	3.66	3.44	3.28	3.16	3.06	2.98	2.92	2.82	2.72	2.62	2.55	2.5
	18	5.98	4.56	3.95	3.61	3.38	3.22	3.1	3.01	2.93	2.87	2.77	2.67	2.56	2.49	2.44
	19	5.92	4.51	3.9	3.56	3.33	3.17	3.05	2.96	2.88	2.82	2.72	2.62	2.51	2.44	2.39
	20	5.87	4.46	3.86	3.51	3.29	3.13	3.01	2.91	2.84	2.77	2.68	2.57	2.46	2.4	2.35
	21	5.83	4.42	3.82	3.48	3.25	3.09	2.97	2.87	2.8	2.73	2.64	2.53	2.42	2.36	2.31
	22	5.79	4.38	3.78	3.44	3.22	3.05	2.93	2.84	2.76	2.7	2.6	2.5	2.39	2.32	2.27
	23	5.75	4.35	3.75	3.41	3.18	3.02	2.9	2.81	2.73	2.67	2.57	2.47	2.36	2.29	2.24
	24	5.72	4.32	3.72	3.38	3.15	2.99	2.87	2.78	2.7	2.64	2.54	2.44	2.33	2.26	2.21
	25	5.69	4.29	3.69	3.35	3.13	2.97	2.85	2.75	2.68	2.61	2.51	2.41	2.3	2.23	2.18
	26	5.66	4.27	3.67	3.33	3.1	2.94	2.82	2.73	2.65	2.59	2.49	2.39	2.28	2.21	2.16
	27	5.63	4.24	3.65	3.31	3.08	2.92	2.8	2.71	2.63	2.57	2.47	2.36	2.25	2.18	2.13
	28	5.61	4.22	3.63	3.29	3.06	2.9	2.78	2.69	2.61	2.55	2.45	2.34	2.23	2.16	2.11
	29	5.59	4.2	3.61	3.27	3.04	2.88	2.76	2.67	2.59	2.53	2.43	2.32	2.21	2.14	2.09
	30	5.57	4.18	3.59	3.25	3.03	2.87	2.75	2.65	2.57	2.51	2.41	2.31	2.2	2.12	2.07
40	5.42	4.05	3.46	3.13	2.9	2.74	2.62	2.53	2.45	2.39	2.29	2.18	2.07	1.99	1.94	
50	5.34	3.97	3.39	3.05	2.83	2.67	2.55	2.46	2.38	2.32	2.22	2.17	2.06	1.94	1.87	
60	5.29	3.93	3.34	3.01	2.79	2.63	2.51	2.41	2.33	2.27	2.17	2.06	1.94	1.87	1.82	
120	5.15	3.8	3.23	2.89	2.67	2.52	2.39	2.3	2.22	2.16	2.05	1.94	1.82	1.75	1.69	

ตารางที่ ข-5 วิเคราะห์ผลทางสถิติ ค่า F ภายใต้ความน่าจะเป็น $\alpha = 0.001$

		V_1														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	25	30
V_2	1	4052	4999	5404	5624	5764	5859	5928	5981	6022	6056	6017	6157	6209	6240	6260
	2	98.5	99	99.2	99.3	99.3	99.3	99.4	99.4	99.4	99.4	99.4	99.4	99.5	99.5	99.5
	3	34.1	30.8	29.5	28.7	28.2	27.9	27.7	27.5	27.3	27.2	27.1	26.9	26.7	26.6	26.5
	4	21.2	18	16.7	16	15.5	15.2	15	14.8	14.7	14.6	14.4	14.2	14	13.9	13.8
	5	16.3	13.3	12.1	11.4	11	10.7	10.5	10.3	10.2	10.1	9.89	9.72	9.55	9.45	9.38
	6	13.8	10.9	9.78	9.15	8.75	8.47	8.26	8.1	7.98	7.87	7.72	7.56	7.4	7.3	7.23
	7	12.3	9.55	8.45	7.85	7.46	7.19	6.99	6.84	6.72	6.62	6.47	6.31	6.16	6.06	5.99
	8	11.3	8.65	7.59	7.01	6.63	6.37	6.18	6.03	5.91	5.81	5.67	5.52	5.36	5.26	5.2
	9	10.6	8.02	6.99	6.42	6.06	5.8	5.61	5.47	5.35	5.26	5.11	4.96	4.81	4.71	4.65
	10	10	7.56	6.55	5.99	5.64	5.39	5.2	5.06	4.94	4.85	4.71	4.56	4.41	4.31	4.25
	11	9.65	7.21	6.22	5.67	5.32	5.07	4.89	4.74	4.63	4.54	4.4	4.25	4.1	4.01	3.94
	12	9.33	6.93	5.95	5.41	5.06	4.82	4.64	4.5	4.39	4.3	4.16	4.01	3.86	3.76	3.7
	13	9.07	6.7	5.74	5.21	4.86	4.62	4.44	4.3	4.19	4.1	3.96	3.82	3.66	3.57	3.51
	14	8.86	6.541	5.56	5.04	4.69	4.46	4.28	4.14	4.03	3.94	3.8	3.66	3.51	3.41	3.35
	15	8.68	6.36	5.42	4.89	4.56	4.32	4.14	4	3.89	3.8	3.67	3.52	3.37	3.28	3.21
	16	8.53	6.23	5.29	4.77	4.44	4.2	4.03	3.89	3.78	3.69	3.55	3.41	3.26	3.16	3.1
	17	8.4	6.11	5.19	4.67	4.34	4.1	3.93	3.79	3.68	3.59	3.46	3.31	3.16	3.07	3
	18	8.29	6.01	5.09	4.58	4.25	4.01	3.84	3.71	3.6	3.51	3.37	3.23	3.08	2.98	2.92
	19	8.18	5.93	5.01	4.5	4.17	3.94	3.77	3.63	3.52	3.43	3.3	3.15	3	2.91	2.84
	20	8.1	5.85	4.94	4.43	4.1	3.87	3.7	3.56	3.46	3.37	3.23	3.03	2.94	2.84	2.78
	21	8.02	5.78	4.87	4.37	4.04	3.81	3.64	3.51	3.4	3.31	3.17	3.03	2.88	2.79	2.72
	22	7.95	5.72	4.82	4.31	3.99	3.76	3.59	3.45	3.35	3.26	3.12	2.98	2.83	2.73	2.67
	23	7.88	5.66	4.76	4.26	3.94	3.71	3.54	3.41	3.3	3.21	3.07	2.93	2.78	2.69	2.62
	24	7.82	5.61	4.72	4.22	3.9	3.67	3.5	3.36	3.26	3.17	3.03	2.89	2.74	2.64	2.58
	25	7.77	5.57	4.68	4.18	3.85	3.63	3.46	3.32	3.22	3.13	2.99	2.85	2.7	2.6	2.54
	26	7.72	5.53	4.64	4.14	3.82	3.59	3.42	3.29	3.18	3.09	2.96	2.81	2.66	2.57	2.5
	27	7.68	5.49	4.6	4.11	3.78	3.56	3.39	3.26	3.15	3.06	2.93	2.78	2.63	2.54	2.47
	28	7.64	5.45	4.57	4.07	3.75	3.53	3.36	3.23	3.12	3.03	2.9	2.75	2.6	2.51	2.44
	29	7.6	5.42	4.54	4.04	3.73	3.5	3.33	3.2	3.09	3	2.87	2.73	2.57	2.48	2.41
	30	7.56	5.39	4.51	4.02	3.7	3.47	3.3	3.17	3.07	2.98	2.84	2.7	2.55	2.45	2.39
40	7.31	5.18	4.31	3.83	3.51	3.29	3.12	2.99	2.89	2.8	2.66	2.52	2.37	2.27	2.2	
50	7.17	5.06	4.2	3.72	3.41	3.19	3.02	2.89	2.78	2.7	2.56	2.42	2.27	2.17	2.1	
60	7.08	4.98	4.13	3.65	3.34	3.12	2.95	2.82	2.72	2.63	2.5	2.35	2.2	2.1	2.03	
120	6.85	4.79	3.95	3.48	3.17	2.96	2.79	2.66	2.56	2.47	2.34	2.19	2.03	1.93	1.86	



ภาคผนวก ก

ข้อมูลเครื่องจักรและอุปกรณ์ในการทดลอง

ภาคผนวก ก-1 ข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องกลึงควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ ยี่ห้อ EMCO รุ่น
PC Turn 50



รูปที่ ก.1 เครื่องกลึงควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ ยี่ห้อ EMCO รุ่น PC Turn 50

ข้อมูลทั่วไป

ชื่อเครื่องจักร

เครื่องกลึงควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์

ยี่ห้อ/รุ่น

ยี่ห้อ EMCO รุ่น PC Turn 50

ประเทศผู้ผลิต

ออสเตรีย

ปีที่ผลิต

พ.ศ. 2538

รายละเอียดทางเทคนิค

ความกว้าง × ยาว × สูง

840 × 695 × 800 มิลลิเมตร

น้ำหนักเครื่องจักร

85 กิโลกรัม

ขอบเขตหัวจับ

ความเร็วรอบสูงสุด

2,500 รอบต่อนาที

หัวจับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

80 มิลลิเมตร

อัตราการจับป้อนของเครื่องจักรในแนวแกนต่างๆ

อัตราป้อนน้อยสุด

0.001 มิลลิเมตรต่อนาที

ความเร็วสูงสุดของการเคลื่อนที่

750 มิลลิเมตรต่อนาที

แรงตัดเฉือนสูงสุด

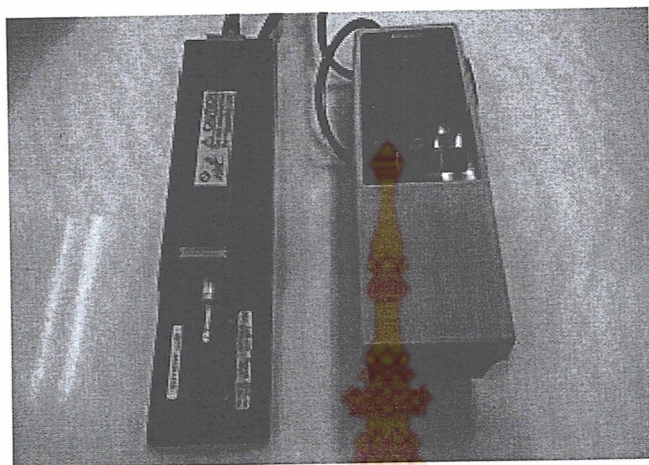
600 นิวตัน

ระบบไฟฟ้า

แรงดันไฟฟ้าที่ใช้	100, 110 และ 230 โวลต์
ความถี่ของกระแสไฟฟ้า	50 และ 60 เฮิรต์
ขนาดของฟิวส์ที่ใช้	6.3 แอมแปร์
ขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ใช้	0.6 กิโลวัตต์



ภาคผนวก ก-2 ข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องวัดความขรุขระผิว ยี่ห้อ มิตูโตโย รุ่น SJ-210



รูปที่ ก.2 เครื่องวัดความขรุขระผิว ยี่ห้อ มิตูโตโย รุ่น SJ-210

ข้อมูลทั่วไป

ชื่อเครื่องจักร

เครื่องวัดความขรุขระผิว

ยี่ห้อ/รุ่น

มิตูโตโย รุ่น SJ-210

ประเทศผู้ผลิต

ญี่ปุ่น

รายละเอียดทางเทคนิค

ระยะในการวัด

12.5 มิลลิเมตร

ความเร็วในการวัด

0.25, 0.5 มิลลิเมตร/วินาที

ทิศทางในการวัด

ถอยหลังกลับ

ความละเอียดในการวัด

350 ไมโครเมตร

ลักษณะการวัด

หัวกดเคลื่อนที่

แรงกดในการวัด

4 มิลลินิวตัน หรือ 0.75 มิลลินิวตัน

หัวกด

หัวเพชร 90 องศา (60 องศา สำหรับการใช้แรงกดต่ำ)

การเคลื่อนที่แนวโค้ง

40 มิลลิเมตร

แรงเคลื่อนที่ของหัวกด

น้อยกว่า 400 มิลลินิวตัน

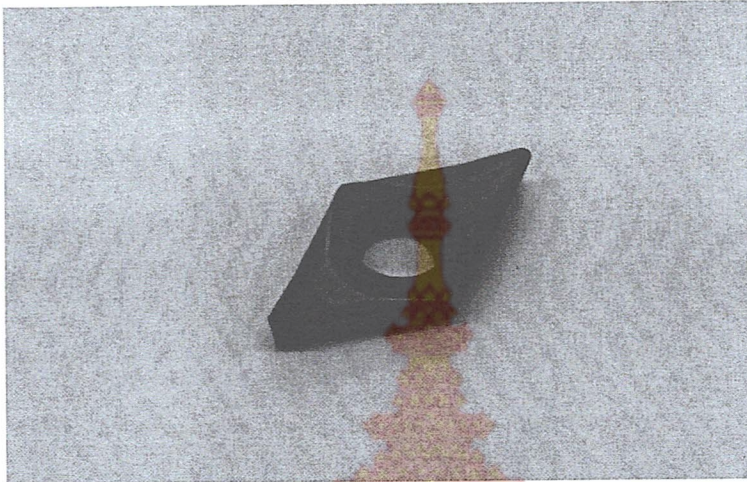
การเคลื่อนที่หัววัด

หัวกดเคลื่อนที่โดยใช้แม่เหล็ก

แหล่งกระจายไฟฟ้า

หม้อแปลงไฟฟ้ากระแสตรง และแบตเตอรี่สำรอง

ภาคผนวก ก-3 ข้อมูลทางเทคนิคมีดกลึงคาร์ไบด์ ยี่ห้อม PLANSEE TIZIT แบบ DCGT 070204FN-27 เกรด H10T



รูปที่ ก.3 มีดกลึงคาร์ไบด์ ยี่ห้อม PLANSEE TIZIT แบบ DCGT 070204FN-27 เกรด H10T

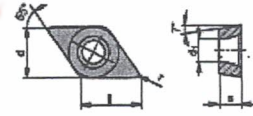
ข้อมูลทั่วไป

ยี่ห้อม	PLANSEE TIZIT แบบ DCGT 070204 FN-27 H10T
ความเร็วตัด (Vc)	100-1500 เมตรต่อนาที
อัตราป้อน (F)	0.1-0.75 มิลลิเมตรต่อรอบ
ความลึกในการตัด (a _p)	1-10 มิลลิเมตร

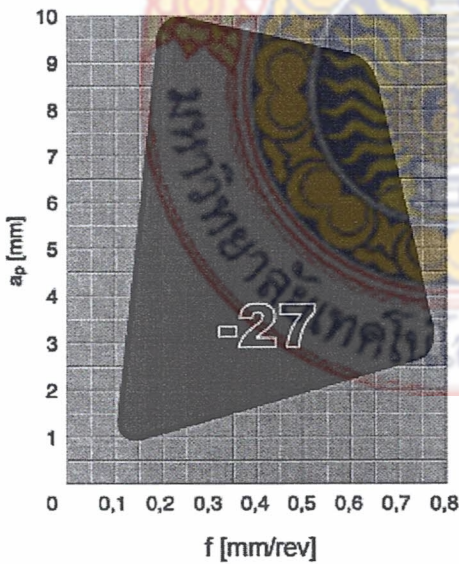
ภาคผนวก ก-3 ตาราง 1 ชนิดของเม็ดมีดคาร์ไบด์



r [mm]	Type, description	LNR 	LNR					l [mm]	d [mm]	s [mm]	d ₁ [mm]
			H21 GT	H10T	H21 GT	CTW7120	AMZ				
0.40	DCGT 070204FN-25P	N	●				●	7.75	6.35	2.38	2.80
	DCGT 070204FN-27			●			●				
	DCGW 070204FN					●					
	DCGT 070204FN-23P				●						
	DCMT 070204EN-29			●			●				
	Steel										
	Stainless	○				○					
	Cast iron										
	Non ferrous metals	○	○	○	○	○					
	Heat resistant	○									
	Hard materials										



ภาคผนวก ก-3 ตาราง 2 ข้อมูลการใช้อัตราป้อนและความถี่ในการตัด



ภาคผนวก ก-3 ตาราง 3 ข้อมูลรายละเอียดคุณสมบัติของการตัดและข้อมูลการใช้ความเร็วตัด

Work piece material	Type of treatment/alloy		VDI	HB
			3323 group	Hardness
Aluminium wrought alloys	non hardened		21	60
	hardened		22	100
Aluminium cast alloys	non hardened	< 12% Si	23	80
	hardened	< 12% Si	24	90
	non hardened	> 12% Si	25	130
Copper and Copper alloy (bronze, brass)		machining alloy stock (1%Pb)	26	-
		brass red bronze	27	90
		bronze	28	100
		lead-free copper and electrolytic copper	29	100
Non-metallic material		thermosetting plastics	29	-
		fiber-reinforced plastics	29	-
		hard rubber	30	-

ภาคผนวก ก-3 ตาราง 4 ข้อมูลรายละเอียดคุณสมบัติของการตัดและข้อมูลการใช้ความเร็วตัด (ต่อ)

Uncoated carbide			Coated carbide			
H2 10T	H216T/H10T	TMS30	CTC1425	CTC1435	CTP2440	CM45
Vc	Vc	Vc	Vc	Vc	Vc	Vc
(m/min)	(m/min)	(m/min)	(m/min)	(m/min)	(m/min)	(m/min)
120-3000	100-2500	80-2000	-	-	80-2000	80-2000
120-2500	100-2000	80-1500	-	-	80-1500	80-1500
120-2000	100-1500	80-1500	-	-	80-1500	80-1500
120-1800	100-1500	80-1300	-	-	80-1300	80-1300
120-1000	100-800	80-600	-	-	80-600	80-600
120-800	100-600	80-400	-	-	80-400	80-400
120-800	100-600	80-400	-	-	80-400	80-400
120-600	100-400	80-300	-	-	80-300	80-300
120-400	100-300	80-200	-	-	80-200	80-200
90-220	80-180	60-160	-	-	60-160	60-160
80-200	60-150	50-140	-	-	50-140	50-140
120-300	100-250	80-200	-	-	80-200	80-200