



การศึกษาปัจจัยของกระบวนการกลึง CNC ที่มีผลต่อคุณภาพชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม  
AISI/SUS 304 และความคุ้มค่าในการเลือกใช้เม็ดมีดกลึง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม  
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมและการจัดการ  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร  
ปีการศึกษา 2559  
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การศึกษาปัจจัยของกระบวนการกลึง CNC ที่มีผลต่อคุณภาพชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม  
AISI/SUS 304 และความคุ้มค่าในการเลือกใช้เม็ดมีดกลึง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม  
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมและการจัดการ  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร  
ปีการศึกษา 2559  
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

A STUDY OF THE CNC TURNING FACTORS AFFECTING ON QUALITY OF AISI/SUS 304  
STAINLESS STEEL AND VALUE TOOL CHANING



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree  
Master of Engineering Program in Engineering Management  
Department of Industrial Engineering and Management  
Graduate School, Silpakorn University  
Academic Year 2016  
Copyright of Graduate School, Silpakorn University

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง “ การศึกษาปัจจัยของกระบวนการกลึง CNC ที่มีผลต่อคุณภาพชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI/SUS 304 และความคุ้มค่าในการเลือกใช้ไม้ดัดกลึง ” เสนอโดย นายพงศ์ธร จันทรสุขจำเริญ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม

.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปานใจ ธารทัศน์วงศ์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่..... เดือน..... พ.ศ. ....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

อาจารย์ ดร.สุจินต์ วุฒิชัยวัฒน์

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(อาจารย์ ดร.สิทธิชัย แซ่เหล่ม)

...../...../.....

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.อิสราวิทย์ เขาวพานิช)

...../...../.....

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.สุจินต์ วุฒิชัยวัฒน์)

...../...../.....



56405311 : สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม

คำสำคัญ : เม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์เคลือบผิว PVD, เม็ดมีดกลึงเซอร์เม็ท, งานกลึง, การวิเคราะห์การ  
ถดถอย

พงศธร จันทรสุขจำเริญ : การศึกษาปัจจัยของกระบวนการกลึง CNC ที่มีผลต่อคุณภาพ  
ชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI/SUS 304 และความคุ้มค่าในการเลือกใช้เม็ดมีดกลึง. อาจารย์ที่ปรึกษา  
วิทยานิพนธ์ : อ.ดร.สุจินต์ วุฒิชัยวัฒน์. 131 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ระหว่างเม็ดมีด  
กลึงคาร์ไบด์เคลือบผิว PVD กับเม็ดมีดกลึงเซอร์เม็ท ในกระบวนการกลึงเหล็กกล้าไร้สนิม AISI/SUS  
304 โดยทำการศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการกลึงที่ทำให้ค่าความเรียบผิวอยู่ระหว่าง 0.2 –  
1.0  $\mu\text{m}$ . ด้วยวิธี Central Composite Design (CCD) และประมาณอายุการใช้งานของเม็ดมีดกลึง  
ทั้ง 2 ชนิด ด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอย นอกจากนั้นยังศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความแตกต่างของ  
เส้นผ่านศูนย์กลางและการเปลี่ยนแปลงความแข็งของชิ้นงาน ซึ่งปัจจัยที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย  
ความเร็วตัด (Cutting speed) อัตราป้อน (Feed rate) และความลึกป้อน (Depth of cut) ผลการ  
ทดลองของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความเรียบผิวกับเม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์เคลือบผิว PVD คือ อัตราป้อน  
กำลังหนึ่ง และอัตราป้อนกำลังสอง ส่วนผลการทดลองของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความเรียบผิวกับเม็ด  
มีดกลึงเซอร์เม็ท คือ อัตราป้อนกำลังหนึ่ง อัตราป้อนกำลังสอง และความลึกป้อนกำลังสอง แต่ไม่มี  
ปัจจัยใดส่งผลต่อความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลาง ส่วนการเปลี่ยนแปลงความแข็งของชิ้นงาน  
พบว่าปัจจัยที่ส่งผลคือ ความลึกป้อน ผลการทดลองความคุ้มค่าในการเลือกใช้เม็ดมีดกลึงพบว่า เม็ด  
มีดกลึงคาร์ไบด์เคลือบผิว PVD มีต้นทุนถูกกว่าเม็ดมีดกลึงเซอร์เม็ทประมาณ 19.62%



ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการ

บัณฑิตวิทยาลัย

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ปีการศึกษา 2559

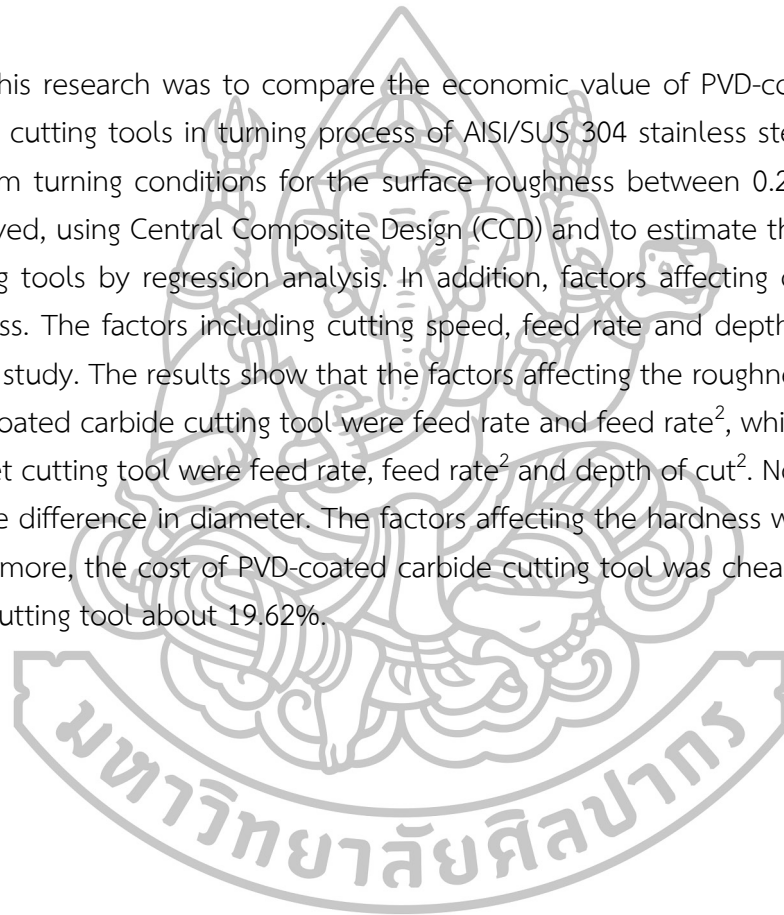
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ .....

56405311 : MAJOR : ENGINEERING MANAGEMENT

KEY WORD : PVD-COATED CARBIDE CUTTING TOOL, CERMET CUTTING TOOL,  
TURNING, REGRESSION ANALYSIS

PONGTORN JANSUKJUMROEN : A STUDY OF THE CNC TURNING FACTORS  
AFFECTING ON QUALITY OF AISI/SUS 304 STAINLESS STEEL AND VALUE TOOL CHANING.  
THESIS ADVISOR : SUJIN WOOTTICHAIWAT,Ph.D.. 131 pp.

This research was to compare the economic value of PVD-coated carbide and cermet cutting tools in turning process of AISI/SUS 304 stainless steel, by which the optimum turning conditions for the surface roughness between 0.2 and 1.0  $\mu\text{m}$  were observed, using Central Composite Design (CCD) and to estimate the tool life of both cutting tools by regression analysis. In addition, factors affecting on cylindrical and hardness. The factors including cutting speed, feed rate and depth of cut were selected to study. The results show that the factors affecting the roughness surface of using PVD-coated carbide cutting tool were feed rate and feed rate<sup>2</sup>, while the factors using cermet cutting tool were feed rate, feed rate<sup>2</sup> and depth of cut<sup>2</sup>. Nor any factors affecting the difference in diameter. The factors affecting the hardness were depth of cut. Furthermore, the cost of PVD-coated carbide cutting tool was cheaper than that of cermet cutting tool about 19.62%.



---

Department of Industrial Engineering and Management

Graduate School, Silpakorn University

Student's signature .....

Academic Year 2016

Thesis Advisor's signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีจากความกรุณาเป็นอย่างสูงของอาจารย์ ดร.สุจินต์ วุฒิชัยวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องในการทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงท่านประธานกรรมการและกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ของ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการ มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ให้คำปรึกษา คำชี้แนะ และให้ความช่วยเหลือ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาและขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ผู้เขียนขอขอบคุณ คุณไพโรจน์ คล้ายเพชร ผู้จัดการแผนกเครื่องจักรสนับสนุนการผลิต ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการทดลอง รวมถึงคุณชัยรัตน์ นิลรัตน์ วิศวกรอาวุโส แผนกเครื่องจักรสนับสนุนการผลิต และคุณเสริมชัย คล้ายวรรณะ หัวหน้าช่างเทคนิค(ควบ) แผนกเครื่องจักรจัดการธนบัตร ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลประกอบในงานวิจัยนี้



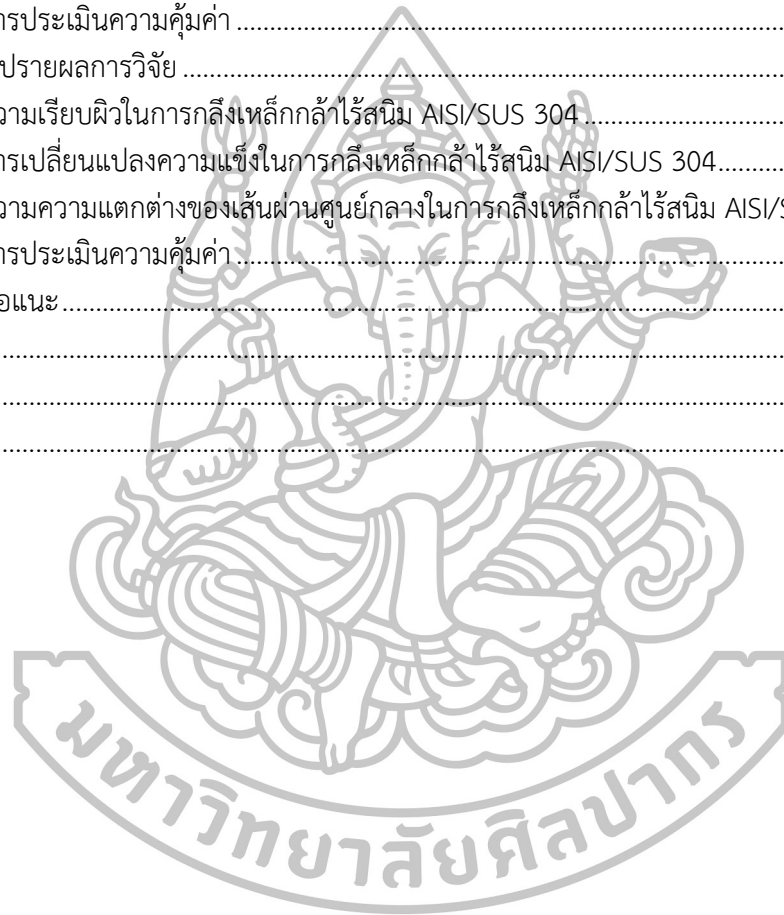
## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
สมมติฐานในการวิจัย.....	3
ขอบเขตการวิจัย.....	3
คำจำกัดความในงานวิจัย.....	4
กรอบแนวคิดในงานวิจัย.....	5
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
แผนการดำเนินงานวิจัย.....	6
2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	
งานกลึง.....	7
ปัจจัยที่สำคัญของงานกลึงปอกด้วยมีดอินเสิร์ต.....	8
ความเร็วตัด อัตราป้อน และระยะป้อนลึก.....	9
เหล็กกล้าไร้สนิม.....	10
ประเภทของเหล็กกล้าไร้สนิม.....	10
เหล็กกล้าไร้สนิม AISI/SUS 304.....	12
เครื่องซีเอ็นซี.....	13
มีดกลึง (Tool Lath).....	16
การวัดและการตรวจสอบความเรียบผิว.....	25
ทฤษฎีทางสถิติ.....	31
วิธีการตัวแปรผิวสะท้อน (Response Surface Methodology).....	34
การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล (Experiment of Factorial Design).....	36
แบบจำลองการถดถอย (Regression Model).....	37
ต้นทุนการผลิต (Cost of Production).....	39
ต้นทุนการผลิตระยะสั้น.....	40
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	41



บทที่	หน้า
3	วิธีดำเนินการวิจัย.....
	ชิ้นงานตัวอย่าง ..... 49
	เครื่องมือในการทดลอง ..... 49
	การวัดค่าในการทดลอง..... 51
	การวัดค่าความเรียบผิว ..... 51
	การวัดค่าความความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลาง..... 52
	การวัดค่าความแข็งของชิ้นงาน ..... 52
	การทดสอบปัจจัยที่ส่งผลในกระบวนการกลึง CNC และหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสม ..... 53
	การทดสอบปัจจัยในกระบวนการกลึง CNC ของเม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์เคลือบผิว PVD... 53
	การทดสอบปัจจัยของกระบวนการกลึง CNC ของเม็ดมีดกลึงเซอร์เม็ท ..... 54
	ขั้นตอนการทดลอง..... 55
	การบันทึกการทดลอง..... 55
	การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการบันทึกการทดลอง ..... 58
	สมการถดถอย ..... 59
	การหาค่าที่เหมาะสม..... 60
	การยืนยันผลการทดลอง ..... 60
	การศึกษาความคุ้มค่าในการเปลี่ยนชนิดเม็ดมีดกลึง..... 61
	แผนการทดลอง..... 61
	ขั้นตอนการทดลอง..... 61
	การบันทึกผลการทดลอง..... 62
	การวิเคราะห์ผลการทดลอง..... 62
	การประเมินความคุ้มค่า..... 62
4	ผลการดำเนินงานวิจัย.....
	การวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาปัจจัยของเม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์..... 64
	การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อความเรียบผิวของชิ้นงาน..... 65
	การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งของชิ้นงาน..... 75
	การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อความความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลาง ..... 88
	การวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาปัจจัยของเม็ดมีดกลึงเซอร์เม็ท ..... 89
	การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อความเรียบผิวของชิ้นงาน..... 89
	การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งของชิ้นงาน..... 100
	การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อความความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลาง ..... 112
	การวิเคราะห์ปัจจัยเพื่อหาความคุ้มค่าในการเลือกใช้เม็ดมีดกลึง ..... 116

บทที่	หน้า
5 สรุปและ อภิปรายผลการวิจัย.....	
สรุปผลการวิจัย.....	118
ความเรียบผิวในการกลึงเหล็กกล้าไร้สนิม AISI/SUS 304 .....	118
การเปลี่ยนแปลงความแข็งในการกลึงเหล็กกล้าไร้สนิม AISI/SUS 304.....	118
ความความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลางในการกลึงเหล็กกล้าไร้สนิม AISI/SUS 304	119
การประเมินความคุ้มค่า .....	119
การอภิปรายผลการวิจัย .....	119
ความเรียบผิวในการกลึงเหล็กกล้าไร้สนิม AISI/SUS 304 .....	119
การเปลี่ยนแปลงความแข็งในการกลึงเหล็กกล้าไร้สนิม AISI/SUS 304.....	120
ความความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลางในการกลึงเหล็กกล้าไร้สนิม AISI/SUS 304	121
การประเมินความคุ้มค่า .....	122
ข้อเสนอแนะ.....	123
รายการอ้างอิง.....	124
ภาคผนวก .....	127
ประวัติผู้วิจัย .....	131



## สารบัญญัตราง

ตารางที่	หน้า
1.1	แผนการดำเนินงานวิจัย..... 6
2.1	ส่วนผสมของธาตุต่างๆของเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) AISI/SUS 304..... 13
2.2	สัญลักษณ์ผิวงานตามมาตรฐาน DIN 3141; ISO 1302..... 30
2.3	ลักษณะการเก็บข้อมูลของ Central Composite Design สำหรับ 3 Factors ..... 35
2.4	การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับแบบจำลอง 3 ปัจจัย ..... 38
2.5	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องทางด้านงานกลึงในด้านปัจจัยที่ศึกษา..... 44
2.6	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องทางด้านงานกลึงในด้านเครื่องมือทางสถิติและตัวแปรตอบสนอง..... 45
3.1	ค่าระดับปัจจัยที่ใช้ในการศึกษาในการกลึงของเม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์เคลือบผิว PVD..... 54
3.2	ค่าระดับปัจจัยที่ใช้ในการศึกษาในการกลึงของเม็ดมีดกลึงเซอร์เม็ท..... 55
3.3	ลำดับการทดลองของเม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์เคลือบผิว PVD ..... 57
3.4	ตัวอย่างตารางการทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลอง ..... 60
3.5	ลำดับการบันทึกผล ..... 62
4.1	การวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาปัจจัยของเม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์เคลือบผิว PVD ..... 64
4.2	% Contribution ของค่าความเรียบผิว..... 70
4.3	การลดรูปสมการถดถอย ..... 71
4.4	กำหนดปัจจัยการทดลองเพื่อทดสอบความแม่นยำของสมการถดถอย ..... 74
4.5	ผลการทดสอบความแม่นยำของสมการถดถอย ..... 75
4.6	แสดงการเก็บข้อมูลค่าความแข็งในการกลึงด้วยเม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์เคลือบผิว PVD ..... 75
4.7	% Contribution ของค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็ง ..... 82
4.8	การลดรูปสมการถดถอย ..... 83
4.9	แสดงการเก็บข้อมูลค่าความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลางในการกลึงด้วยเม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์เคลือบผิว PVD ..... 85
4.10	แสดงการเก็บข้อมูลค่าความเรียบผิวในการกลึงด้วยเม็ดมีดกลึงเซอร์เม็ท..... 89
4.11	% Contribution ของค่าความเรียบผิว..... 93
4.12	ลดรูปสมการถดถอย..... 95
4.13	กำหนดปัจจัยการทดลองเพื่อยืนยันผลการทดลอง ..... 98
4.14	ผลการทดสอบความแม่นยำของสมการถดถอย ..... 99
4.15	แสดงการเก็บข้อมูลค่าความแข็งในการกลึงด้วยเม็ดมีดกลึงเซอร์เม็ท ..... 100
4.16	% Contribution ของค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็ง ..... 106
4.17	ลดรูปสมการถดถอย..... 107
4.18	แสดงการเก็บข้อมูลค่าความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลางในการกลึงด้วยเม็ดมีดกลึงเซอร์เม็ท ..... 109

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
4.19	ค่าความเรียบผิวในแต่ละช่วงการทดสอบของเม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์ .....	113
4.20	ค่าความเรียบผิวในแต่ละช่วงการทดสอบของเม็ดมีดกลึงเซอร์เม็ท .....	115
4.21	ค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อเม็ดมีด .....	116
4.22	ตารางคำนวณหาความยาวที่กลึงได้ .....	117
4.23	ตารางสรุปค่าใช้จ่าย .....	117
5.1	การทดสอบค่าความแข็ง .....	121



## สารบัญญภาพ

ภาพที่		หน้า
1.1	ชิ้นงานตัวอย่างที่มีการกำหนดค่าความหยาบผิว.....	1
2.1	กระบวนการของการกลึงปาดหน้า.....	7
2.2	กระบวนการของการกลึงปอก.....	8
2.3	ปัจจัยที่สำคัญทั้งหมดที่ใช้งานกลึงปอกด้วยมีดกลึงอินเสิร์ต.....	8
2.4	ลักษณะของความยาวเศษตัดที่เกิดขึ้นในเวลา 1 นาที.....	9
2.5	เครื่องเจาะซีเอ็นซี.....	14
2.6	เครื่องกลึงซีเอ็นซี.....	14
2.7	เครื่องแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์.....	15
2.8	ชนิดของมีดกลึงที่ใช้กันทั่วไป.....	16
2.9	ตัวอย่างของเม็ดมีด.....	16
2.10	การเปรียบเทียบสมบัติของวัสดุชนิดต่างๆ.....	17
2.11	วิวัฒนาการของวัสดุเครื่องมือตัดของบริษัท Sandvik (UK).....	20
2.12	ขนาดและรูปร่างของมีดกลึงคาร์ไบด์ อินเสิร์ตของบริษัท Sandvik (UK).....	21
2.13	ชนิดและลักษณะมีดเซรามิกอินเสิร์ตของบริษัท Sandvik (UK).....	21
2.14	วิธีการเคลือบผิวและโลหะวิทยาของมีดอินเสิร์ต.....	22
2.15	เม็ดมีดกลึง DCMT11T304-M25 CTPM125.....	23
2.16	เม็ดเกรนของการเคลือบผิว CTPM125.....	23
2.17	เม็ดมีดกลึง DCMT11T304GP TN6020.....	24
2.18	ด้ามมีดกลึงSDJCR 2525 M11.....	24
2.19	ลักษณะเส้นขอบของพื้นผิว (Surface Profile).....	25
2.20	ตัวอย่างการแบ่งเส้นขอบของผิวเป็นส่วนย่อยๆ.....	26
2.21	ค่าระหว่างยอดสูงสุดกับก้นร่องต่ำสุด $R_t$ .....	27
2.22	ค่าระหว่างยอดสูงสุดกับก้นร่องต่ำสุด 5 ค่าแรก $R_z$ .....	28
2.23	แผ่นเทียบผิว.....	28
2.24	เครื่องมือวัดความหยาบผิวแบบแสดงผลที่หน้าปัด.....	29
2.25	เครื่องมือวัดความหยาบผิวแบบพิมพ์ข้อมูลและกราฟ.....	29
2.26	แบบจำลองทั่วไปของกระบวนการ.....	32
2.27	Central Composite Design สำหรับ 3 Factors.....	35
3.1	ขั้นตอนในการดำเนินการทดลองในส่วนที่ 1.....	47
3.2	ขั้นตอนในการดำเนินการทดลองในส่วนที่ 2.....	48
3.3	ขนาดของชิ้นงานตัวอย่างในการทดลองส่วนที่ 1 และส่วนที่ 2.....	49
3.4	เครื่องกลึงอัตโนมัติ CNC.....	49

ภาพที่	หน้า	
3.5	สารหล่อเย็น Houghton Adrana D208.08.....	50
3.6	เครื่องวัดความเรียบผิว Mahr รุ่น MarSurf PS1.....	50
3.7	Digital Vernier caliper.....	50
3.8	เครื่องวัดความแข็ง.....	51
3.9	เวอร์เนีย.....	51
3.10	แสดงตำแหน่งวัดและจุดวัดค่าความเรียบผิว.....	52
3.11	แสดงตำแหน่งวัดและจุดวัดค่าความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลาง.....	52
3.12	แสดงตำแหน่งวัดและจุดวัดค่าความแข็งของชิ้นงาน.....	53
3.13	การกลึงชิ้นงานตัวอย่างในแต่ละระดับปัจจัย.....	55
3.14	หน้าต่างในการเลือกชนิดของการออกแบบการทดลอง.....	56
3.15	หน้าต่างในการเลือกจำนวนการทำการทดลองซ้ำ.....	56
3.16	กราฟตัวอย่างแสดงการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติที่มีการแจกแจงแบบปกติ.....	58
3.17	ตัวอย่างการวิเคราะห์ ANOVA จากการออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design.....	59
3.18	ตัวอย่างสมการถดถอยที่ได้จาก Minitab 16.....	59
3.19	หน้าต่างสำหรับกำหนดคำตอบสนองที่ต้องการ.....	60
3.20	ภาพกำหนดขนาดชิ้นงานทดสอบ.....	61
4.1	กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าส่วนตักค่าความเรียบผิว.....	66
4.2	กราฟการกระจายตัวของค่าส่วนตักค่าความเรียบผิว.....	66
4.3	กราฟความแปรปรวนของค่าส่วนตักค่าความเรียบผิว.....	67
4.4	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความเรียบผิว.....	68
4.5	กราฟส่วนตักค่าของค่าความเรียบผิว.....	69
4.6	ผลการวิเคราะห์การถดถอยของ อัตราป้อนกำลังหนึ่ง และอัตราป้อนกำลังสอง.....	71
4.7	กราฟค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมของค่าความเรียบผิว.....	72
4.8	กราฟโครงร่างพื้นผิวของความเรียบผิวระหว่างปัจจัย ความเร็วตัดและอัตราป้อน.....	72
4.9	กราฟพื้นผิวของความเรียบผิวระหว่างปัจจัย ความเร็วตัดและอัตราป้อน.....	73
4.10	กราฟผลกระทบของปัจจัยหลักต่อความเรียบผิว.....	73
4.11	กราฟผลกระทบของอันตรกิริยาต่อความเรียบผิว.....	74
4.12	กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าส่วนตักค่าในการทดลองยืนยันผล.....	75
4.13	กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าส่วนตักค่าความแข็งก่อนการกลึง.....	77
4.14	กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าส่วนตักค่าความแข็งหลังการกลึง.....	77
4.15	กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าส่วนตักค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็งการกลึง.....	78
4.16	กราฟการกระจายตัวของค่าส่วนตักค่าความแข็งก่อนการกลึง.....	78

ภาพที่		หน้า
4.17	กราฟการกระจายตัวของค่าส่วนตกราคาค่าความแข็งหลังการกลิ้ง .....	79
4.18	กราฟการกระจายตัวของค่าส่วนตกราคาค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็งการกลิ้ง .....	79
4.19	กราฟความแปรปรวนของส่วนตกราคาค่าความแข็งหลังการกลิ้ง .....	80
4.20	กราฟความแปรปรวนของส่วนตกราคาค่าเปลี่ยนแปลงความแข็งการกลิ้ง.....	80
4.21	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็ง .....	81
4.22	กราฟส่วนตกราคาค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็งการกลิ้ง.....	82
4.23	ผลการวิเคราะห์การถดถอยความลึกลับก้อนกำลังหนึ่ง .....	83
4.24	กราฟโครงร่างพื้นผิวของการเปลี่ยนแปลงความแข็งระหว่างอัตราป้อนกับความลึกลับก้อน .....	84
4.25	กราฟพื้นผิวของการเปลี่ยนแปลงความแข็งระหว่างความเร็วตัดกับความลึกลับก้อน .....	84
4.26	กราฟผลกระทบหลักของปัจจัยหลักต่อค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็งการกลิ้ง .....	85
4.27	กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลาง .....	86
4.28	กราฟการกระจายตัวของค่าความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลาง.....	87
4.29	กราฟความแปรปรวนของส่วนตกราคาค่าความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลาง .....	87
4.30	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลาง .....	88
4.31	กราฟส่วนตกราคาค่าความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลาง .....	89
4.32	กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าส่วนตกราคาค่าความเรียบผิว .....	90
4.33	กราฟการกระจายตัวของค่าส่วนตกราคาค่าความเรียบผิว .....	91
4.34	กราฟความแปรปรวนของค่าส่วนตกราคาค่าความเรียบผิว.....	91
4.35	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความเรียบผิว.....	92
4.36	กราฟส่วนตกราคาค่าความเรียบผิว .....	93
4.37	ผลการวิเคราะห์การถดถอยของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความเรียบผิว.....	94
4.38	ผลการวิเคราะห์การถดถอย อัตราป้อนกำลังหนึ่งและ อัตราป้อนกำลังสอง.....	95
4.39	กราฟค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมของค่าความเรียบผิว .....	96
4.40	กราฟโครงร่างพื้นผิวของความเรียบผิวระหว่างความเร็วตัดและอัตราป้อน .....	96
4.41	กราฟพื้นผิวของความเรียบผิวระหว่างความเร็วตัดและอัตราป้อน.....	97
4.42	กราฟผลกระทบของปัจจัยหลักต่อความเรียบผิว .....	97
4.43	กราฟผลกระทบของอันตรกิริยาต่อความเรียบผิว .....	98
4.44	ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวแบบปกติค่าส่วนตกราคาค่าทดลองการยืนยันผล .....	99
4.45	กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าส่วนตกราคาค่าความแข็งก่อนการกลิ้ง .....	101
4.46	กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าส่วนตกราคาค่าความแข็งหลังการกลิ้ง.....	101
4.47	กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าส่วนตกราคาค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็งการกลิ้ง.....	102
4.48	กราฟการกระจายตัวของค่าส่วนตกราคาค่าความแข็งก่อนการกลิ้ง .....	102
4.49	กราฟการกระจายตัวของค่าส่วนตกราคาค่าความแข็งหลังการกลิ้ง .....	103

ภาพที่	หน้า
4.50	กราฟการกระจายตัวของค่าส่วนตักค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็งการกลึง ..... 103
4.51	กราฟความแปรปรวนของค่าความแข็งหลังการกลึง ..... 104
4.52	กราฟความแปรปรวนของค่าความแข็งหลังการกลึง ..... 104
4.53	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็ง ..... 105
4.54	กราฟส่วนตักค่าของค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็งการกลึง ..... 106
4.55	ผลการวิเคราะห์การถดถอยปัจจัยความลึกป้อน ..... 107
4.56	กราฟโครงสร้างพื้นผิวการเปลี่ยนแปลงความแข็งระหว่างความเร็วตัดกับความลึกป้อน ..... 108
4.57	กราฟพื้นผิวการเปลี่ยนแปลงความแข็งระหว่างความเร็วตัดกับความลึกป้อน ..... 108
4.58	กราฟผลกระทบของปัจจัยหลักต่อความแข็งของชิ้นงาน ..... 109
4.59	กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลาง ..... 110
4.60	กราฟการกระจายตัวของค่าความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลาง ..... 111
4.61	กราฟความแปรปรวนของค่าความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลาง ..... 111
4.62	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลาง ..... 112
4.63	กราฟส่วนตักค่าของค่าความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลาง ..... 113
4.64	ผลการวิเคราะห์การถดถอยของค่าความเรียบผิว ..... 114
4.65	ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวแบบปกติของค่าส่วนตักค่าของค่าความเรียบผิว ..... 114
4.66	กราฟจุดแนวโน้มของค่าความเรียบผิว ..... 114
4.67	ผลการวิเคราะห์การถดถอยของค่าความเรียบผิวเปรียบเทียบกับความยาว ..... 115
4.68	ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวแบบปกติของค่าส่วนตักค่าของค่าความเรียบผิว ..... 116
4.69	กราฟจุดแนวโน้มของค่าความเรียบผิวเทียบ ..... 116
5.1	Scallop จากอัตราป้อน ..... 119
5.2	แผนภูมิค่าความแข็งในการกลึงด้วยเม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์เคลือบผิว PVD ..... 120
5.3	แผนภูมิค่าความแข็งในการกลึงด้วยเม็ดมีดกลึงเซอร์เมท ..... 121
5.4	กราฟจุดแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกป้อนกับค่าความแข็ง ..... 121
5.5	การกลึงเร็วด้วยวิธีเลื่อนศูนย์ท้ายแท่น ..... 122

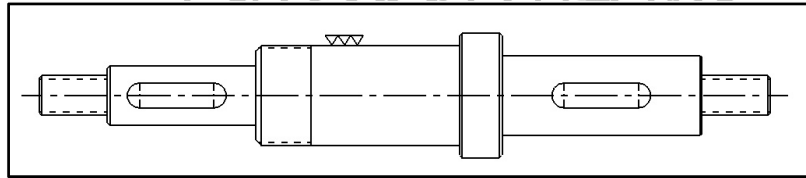


## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การผลิตชิ้นส่วน คือ การขึ้นรูปโลหะให้ได้รูปร่างที่ตรงต่อความต้องการ หรือตรงกับแบบงาน (Drawing) ที่ได้รับมอบหมาย และคุณสมบัติที่ต้องมีในการผลิตนั้นจะประกอบด้วย ขนาดชิ้นงาน (Dimensions) และความเรียบผิว (Surface Roughness) ถ้าขาดคุณสมบัติอย่างใดอย่างหนึ่งงานชิ้นนั้นจะขาดคุณสมบัติเพียงพอที่จะส่งมอบ ขนาดชิ้นงานสามารถกำหนดได้จากปรับค่าพารามิเตอร์ ส่วนความเรียบผิวต้องใช้ทักษะและความเชี่ยวชาญของพนักงานที่ควบคุมเครื่องจักร



ภาพที่ 1.1 ชิ้นงานตัวอย่างที่มีการกำหนดค่าความหยาบผิวในแบบงาน

วัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม AISI/SUS 304 เป็นวัสดุที่มีการใช้งานเป็นจำนวนมากจากภาพที่ 1.1 เป็นแบบงานตัวอย่างที่ทำจากวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม AISI/SUS 304 ที่มีการส่งกลับคืนมาเพื่อแก้ไขเนื่องจากความเรียบผิวไม่เป็นไปตามแบบกำหนดโดยจะมีขั้นตอนการแก้ไขชิ้นงานเพิ่มขึ้นมาคือ ขั้นตอนการขัดเงาในขั้นตอนการขัดเงานี้ทำให้เกิดผลเสียกับชิ้นงานในด้านของการควบคุมขนาดและความกลมให้สม่ำเสมอตลอดทั้งชิ้นงานและยังเป็นการเพิ่มเวลาในการผลิตและนอกจากนี้ปัญหาที่พบตามมาคือเม็ดมีดกลึงที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันนี้ไม่มีวางจำหน่ายแล้วโดยทางตัวแทนได้แนะนำเม็ดมีดกลึงชนิดใหม่แต่ทางตัวแทนไม่สามารถบอกถึงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม AISI/SUS304 ทั้งนี้ได้ทดลองใช้ค่าพารามิเตอร์เดิมกับเม็ดมีดกลึงที่ทางตัวแทนจำหน่ายได้แนะนำมาแล้วนั้นผลของค่าความเรียบผิวที่ออกมาอยู่นอยู่ที่  $1.70 \mu\text{m}$ . ซึ่งยังไม่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

จากงานวิจัยของ Horváth (2015) ที่ได้ศึกษาการใช้เม็ดมีดกลึงรูปแบบ ISO ที่เคลือบผิวแบบ PCD, CVD และ MDC กับรูปแบบ Wiper ที่เคลือบผิวแบบ PCD และ CVD โดยใช้ความเร็วตัด อัตราป้อนและความลึกป้อนเป็นปัจจัยในการศึกษากับวัสดุทดสอบอลูมิเนียม AS12 และ AS17 โดยใช้วิธี Central Composite Design (CCD) พบว่าความเร็วตัดและอัตราป้อนมีอิทธิพลต่อความเรียบผิวมากที่สุดแต่อิทธิพลร่วมของปัจจัยต่างๆก็มีผลต่อความเรียบผิวด้วยเช่นกันจึงเป็นที่มาของการศึกษาปัจจัยของกระบวนการกลึงด้วย CNC ที่มีผลต่อความเรียบผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI/SUS 304 คือความเร็วตัด (Cutting Speed), อัตราป้อน (Feed Rate) และความลึกป้อน (Depth of Cut) โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลอง Central Composite Design (CCD) เพื่อต้องการทราบถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อความเรียบผิว ความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลาง และการเปลี่ยนแปลงความแข็งของชิ้นงาน

งานวิจัยนี้จึงทำขึ้นเพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความเรียบผิว หาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมเพื่อให้ค่าความเรียบผิวที่ได้เป็นไปตามแบบกำหนด ความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลาง และการเปลี่ยนแปลงความแข็งของชิ้นงาน โดยปัจจัยที่ศึกษาจะประกอบด้วย ความเร็วตัด อัตราป้อนและความลึกป้อนจากการศึกษางานวิจัยจะเห็นได้ว่าวิธีการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) จะมีส่วนช่วยในการหาปัจจัยที่มีผลต่อความเรียบผิวและ ค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมได้ ทั้งยังเป็นการช่วยลดเวลาและ ของเสียจากการผลิตที่ไม่ได้คุณสมบัติที่เหมาะสมลงได้งานวิจัยนี้จึงใช้วิธีการออกแบบการทดลองวิธี Central Composite Design มีการทดลองซ้ำจำนวน 2 ครั้งมีจุดศูนย์กลางจำนวน 3 จุดทำให้มีจำนวนตัวอย่างที่ต้องทำการทดลองทั้งสิ้น 34 ตัวอย่าง ซึ่งมีจำนวนตัวอย่างน้อยกว่าการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ 3 ระดับที่มีการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง มีจำนวนการทดลองทั้งสิ้น 54 ตัวอย่าง ทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการทดลองประมาณ 37.04% ซึ่งจะเป็นการลดเวลาและค่าใช้จ่ายลงได้นอกจากนี้ยังได้ทำการเปรียบเทียบอายุการใช้งานของเม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์เคลือบผิว PVD กับ เม็ดมีดกลึงเซอรั่มเพื่อใช้ในการประเมินความคุ้มค่าในการเลือกใช้เม็ดมีดกลึงอีกด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพชิ้นงาน และหาค่าระดับปัจจัยที่ทำให้ค่าความเรียบผิวอยู่ระหว่าง  $0.2 - 1.0 \mu\text{m}$  ในการกลึงเหล็กกล้าไร้สนิม AISI/SUS 304

1.2.2 เพื่อศึกษาความคุ้มค่าในการเลือกใช้เม็ดมีดกลึงระหว่างเม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์เคลือบผิว PVD กับเม็ดมีดกลึงเซอรั่ม

### 1.3 สมมติฐานในการวิจัย

ปัจจัยที่ศึกษามีผลต่อความเรียบผิวในการกลึงเหล็กกล้าไร้สนิม AISI/SUS 304

### 1.4 ขอบเขตการวิจัย

1.4.1 ปัจจัยในการออกแบบการทดลองคือ ความเร็วตัด, อัตราป้อน และความลึกป้อน

1.4.2 ตัวแปรตอบสนอง

ความเรียบผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI/SUS304 ที่  $0.2 \mu\text{m}$  –  $1.0 \mu\text{m}$ .

ความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI/SUS 304

การเปลี่ยนแปลงความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI/SUS 304

1.4.3 ตัวแปรควบคุม

เหล็กกล้าไร้สนิม AISI/SUS 304 เป็นวัสดุไม่ผ่านกระบวนการชุบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 25 มิลลิเมตรความยาว 110 มิลลิเมตรกลึงปลอกตามค่าระดับปัจจัยที่จะทดสอบที่ความยาว 50 มิลลิเมตร

เม็ดมีดกลึงแบบคาร์ไบด์รหัสเม็ดมีดกลึง DCMT11T304-M25 CTPM125 เคลือบผิวด้วยกระบวนการPVDส่วนประกอบหลักทางเคมีของเม็ดมีดประกอบไปด้วย Co 9.6% mixed carbide 7.8% other 0.4% มีขนาดเม็ดเกรน 1-2  $\mu\text{m}$  มีความแข็งของเม็ดมีดกลึง 1460 HV เคลือบผิวด้วย TiN/TiAlN 6  $\mu\text{m}$  มีรัศมีหลายมีด 0.4 มิลลิเมตรใช้กับด้ามมีดกลึงขวารหัสด้ามมีด SDJCR 2525 M11 มีคมตัดจำนวน 2 คมตัดต่อ 1 เม็ดมีดกลึง

เม็ดมีดกลึงแบบเซอร์เมทัลรหัสเม็ดมีดกลึง DCMT11T304GP TN6020 มีส่วนประกอบหลักทางเคมีของเม็ดมีดคือ TiCN มีขนาดเม็ดเกรน 0.6  $\mu\text{m}$  มีความแข็งของเม็ดมีด 14.7 GPa มีรัศมีหลายมีด 0.4 มิลลิเมตรใช้กับด้ามมีดกลึงขวารหัสด้ามมีด SDJCR 2525 M11 มีคมตัดจำนวน 2 คมตัดต่อ 1 เม็ดมีดกลึง

การระบายความร้อนจากกระบวนการตัดเฉือนด้วยสารหล่อเย็น เครื่องหมายการค้า Houghton รหัส Adrana D208.08 ผสมน้ำในอัตราส่วน 1:20

เครื่องมือวัดความเรียบผิวเครื่องหมายการค้า Mahr รุ่น MarSurf PS1 สัณฐานลักษณะในการวัดคือ Ra และความละเอียดในการวัดคือ  $0.001 \mu\text{m}$ .

เครื่องมือวัดความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลางและขนาดทั่วไป Digital Vernier caliper เครื่องหมายการค้า Mitutoyo ช่วงการวัดคือ 0 – 150 มิลลิเมตร และมีความละเอียดในการวัดคือ 0.01 มิลลิเมตร

เครื่องมือวัดความแข็ง เครื่องหมายการค้า FRANK หน่วยที่ใช้ในการวัดค่าความแข็งที่ผิวชิ้นงาน คือ HRC ความละเอียดในการวัดเท่ากับ 1 HRC และช่วงการวัดอยู่ที่ 0 – 100 HRC

1.4.4 วิธีการทดลองใช้วิธีการ Response surface ในรูปแบบของวิธี Central Composite Design ในการกำหนดรูปแบบการทดลอง โดยจะใช้จุดศูนย์กลางจำนวน 3 จุดต่อการทดลองซ้ำ และทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 2 ครั้ง

1.4.5 วิธีดำเนินการทดลองใช้การกลึงปอกด้วยเครื่องกลึงอัตโนมัติ CNC กับ วัสดุและเม็ดมีดกลึงที่กำหนดในการออกแบบทดลอง

## 1.5 คำจำกัดความในงานวิจัย

1.5.1 AISI/SUS 304 คือ เหล็กกล้าไร้สนิมรหัส 304 เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีความเหนียวและทนต่อแรงกระแทกที่อุณหภูมิห้องและมีคุณสมบัติที่ไม่เป็นแม่เหล็กและมีการนำความร้อนที่ดี

1.5.2 Carbide Insert คือ เม็ดมีดกลึงแบบซีเมนต์คาร์ไบด์ที่มีอนุภาคของคาร์ไบด์ชนิดต่างๆ มารวมเข้าด้วยกันโดยวิธีการของโลหะผงวิทยา (Power Metallurgy) และสามารถนำไปเคลือบผิวได้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องมือ

1.5.3 Cermet Insert คือ CER(amic) กับ MET(al) รวมกันเป็น CERMET เป็นการรวมคุณสมบัติของวัสดุที่ทนความร้อนได้สูงและทนต่อปฏิกิริยาเคมีได้ดีของ Ceramic และการนำความร้อนและเหนียวของ Metal มารวมกันโดยจะใช้ Ni, Mo หรือ Co เข้าไปเป็นตัวประสาน

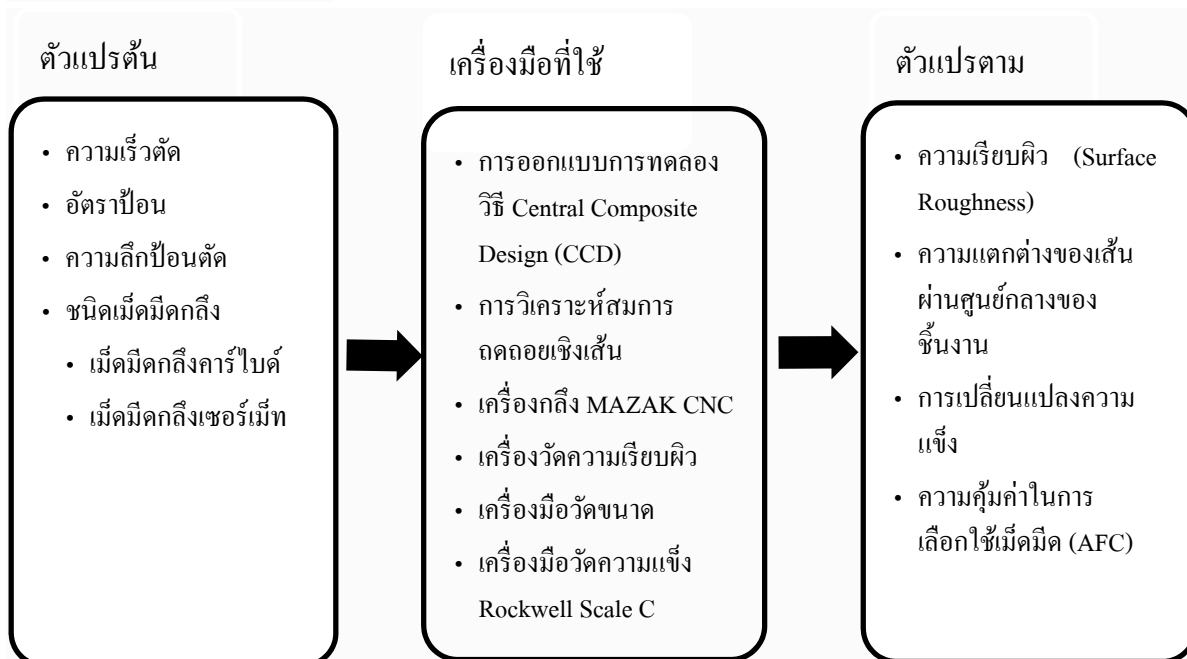
1.5.4 ความเร็วตัด (Cutting Speed) คือ ความเร็วที่คมมีดกลึงตัดหรือปาดโลหะออกเมื่อโลหะหมุนครบ 1 รอบคมมีดกลึงก็จะตัดโลหะเป็นแนวตัดยาวเท่าเส้นรอบวงพอดี ความเร็วตัดมีหน่วยเป็น เมตร/นาที

1.5.5 อัตราป้อน (Feed Rate) คือ การเคลื่อนที่ของมีดกลึงเข้าหาชิ้นงานในแนวขนานกับแกนชิ้นงาน มีหน่วยเป็น ระยะทางต่อรอบ (มิลลิเมตรต่อรอบ)

1.5.6 ความลึกป้อน (Depth of Cut) คือ การเคลื่อนที่ของมีดกลึงเข้าหาชิ้นงานในแนวตั้งฉากกับแกนชิ้นงาน มีหน่วยเป็น ระยะทาง (มิลลิเมตร)

1.5.7 คุณภาพชิ้นงาน คือ คุณสมบัติที่บ่งบอกถึงชิ้นงานที่มีคุณภาพเหมาะสมที่จะส่งมอบ โดยคุณสมบัติหลักในงานวิจัยนี้ คือ ความเรียบผิวงาน และยังมีคุณสมบัติอื่นที่บ่งบอกคุณภาพชิ้นงานอีก คือ ความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลาง และการเปลี่ยนแปลงความแข็งของชิ้นงาน

## 1.6 กรอบแนวคิดในงานวิจัย



## 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 เพื่อทราบถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความเรียบผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI/SUS 304

1.7.2 เพื่อทราบถึงค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าความเรียบผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI/SUS 304 อยู่ระหว่าง  $0.2 \mu\text{m}$ . –  $1.0 \mu\text{m}$ .

1.7.3 เพื่อลดต้นทุนและลดเวลาในการผลิตด้วยกระบวนการกลึง CNC



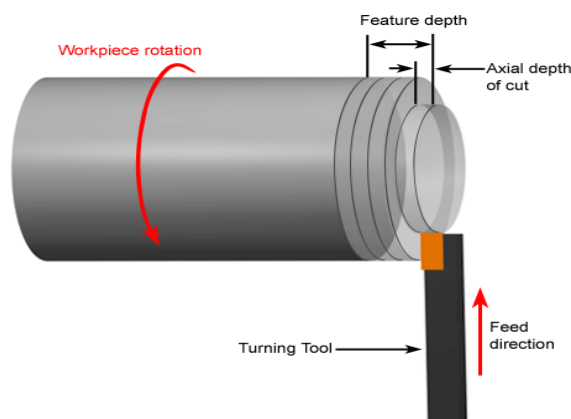
## บทที่ 2 แนวคิดทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาปัจจัยของกระบวนการกลึง CNC ที่มีผลต่อความเรียบผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI/SUS 304ซึ่งได้ค้นคว้างานวิจัย แนวความคิด และทฤษฎีต่างๆ เพื่อเป็นแนวทางในงานวิจัย ดังนี้

1. งานกลึง
2. เหล็กกล้าไร้สนิม
3. เครื่องซีเอ็นซี
4. มีดกลึง
5. การวัดและการตรวจสอบความเรียบผิว
6. ทฤษฎีทางสถิติ
7. ต้นทุนการผลิต
8. ศึกษาและสรุปผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 งานกลึง

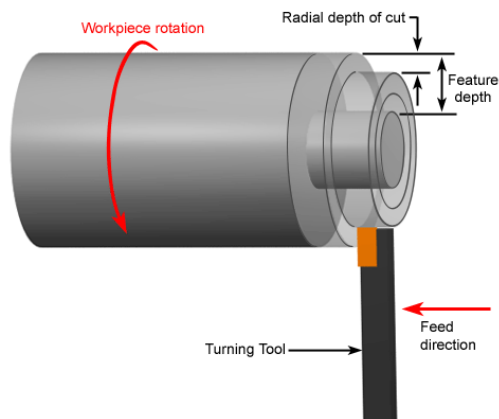
งานกลึง คือ การตัดโลหะโดยให้ชิ้นงาน (work piece) หมุนรอบตัวเอง โดยมีมีดกลึงเคลื่อนที่เข้าหาชิ้นงาน การกลึงสามารถแบ่งได้ 2 ลักษณะใหญ่ๆ คือ การกลึงปาดหน้าคือการตัดโลหะโดยให้มีดตัดชิ้นงานไปตามแนวขวางดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 กระบวนการของการกลึงปาดหน้า

ที่มา : CustomPartNet. **Turning**. เข้าถึงเมื่อ 2 ธันวาคม 2016. เข้าถึงได้จาก <http://www.custompartnet.com/wu/turning>.

กระบวนการกลึงปอกคือการตัดโลหะโดยให้มิตตัดเคลื่อนที่ตัดชิ้นงานไปตามแนวขนานกับแนวแกนของชิ้นงาน ดังภาพที่ 2.2



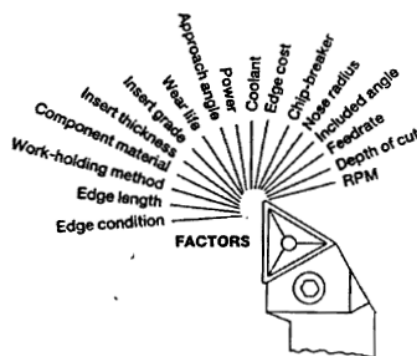
ภาพที่ 2.2 กระบวนการของการกลึงปอก

ที่มา : CustomPartNet. **Turning**. เข้าถึงเมื่อ 2 ธันวาคม 2016. เข้าถึงได้จาก <http://www.custompartnet.com/wu/turning>.

ปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดกระบวนการของการกลึงปอก คือ อัตราป้อน (Feed Rate) ความเร็วตัด (Cutting Speed) ระยะเวลาป้อนตัด (Depth of Cut) มีดกลึง (Cutting Tool) และชิ้นงานที่ต้องการทำการตัดเฉือน (Work piece) และเมื่อมีกระบวนการในการกลึงปอกเกิดขึ้น ผลที่จะเกิดขึ้นตามมาก็คือ ขนาดของชิ้นงาน (Work piece Dimension) ความเรียบผิวของชิ้นงาน (Surface Roughness) เศษกลึง (Chip) การสึกหรอของมีดกลึง (Tool Wear)

### 2.1.1 ปัจจัยที่สำคัญของงานกลึงปอกด้วยมีดอินเสิร์ต

ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลให้เกิดกระบวนการของการกลึงปอก คือ อัตราป้อน (Feed Rate) ความเร็วตัด (Cutting Speed) ระยะเวลาป้อนตัด (Depth of Cut) มีดกลึง (Cutting Tool) และชิ้นงานที่ต้องการทำการตัดเฉือนในการกลึงด้วยมีดกลึงดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 ปัจจัยที่สำคัญทั้งหมดที่ใช้ในงานกลึงปอกด้วยมีดกลึงอินเสิร์ต

ที่มา : กล้าหาญ วรพุทธพร และคนอื่นๆ, **เทคนิคช่างกล**. (กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2528), ไม่ปรากฏเลขหน้า.



## 2.1.2 ความเร็วตัด อัตราป้อน และระยะป้อนลึก

1. ความเร็วตัด (Cutting Speed) คือ ความเร็วที่คมมีดกลึงตัด หรือปาดโลหะ ออกเมื่อโลหะหมุนครบ 1 รอบ คมมีดกลึงก็จะตัดโลหะเป็นแนวตัดยาวเท่าเส้นรอบวงพอดี ความเร็วตัดมีหน่วยเป็น เมตร/นาทีดังภาพที่ 2.4 หลักเกณฑ์การเลือกใช้ความเร็วตัดมีดังนี้ คือ

1.1 วัสดุที่ใช้ทำเครื่องมือตัด (Cutting Tool) ที่ทำมาจากเหล็กโรบสูง (High Speed Steel) สามารถใช้ความเร็วตัดเป็น 2 เท่า ของความเร็วตัดของมิดที่ทำมาจากวัสดุเหล็กคาร์บอน โดยส่วนวัสดุของคมตัดจะมีส่วนผสมพิเศษออกไป สามารถใช้ความเร็วตัดได้มากกว่าเหล็กโรบสูง

1.2 ชนิดของวัสดุ (Material) ที่จะนำมาทำการตัดเฉือน โดยทั่วไปวัสดุที่แข็งมากจะใช้ความเร็วตัดช้ากว่าวัสดุที่อ่อนกว่า

1.3 รูปร่างของความตัด (Form Cutting Tool) มีผลต่อการทำงานมาก เช่น มิดตัดงานขนาด จะใช้ความเร็วรอบต่ำกว่ามีดกลึงปกผิว

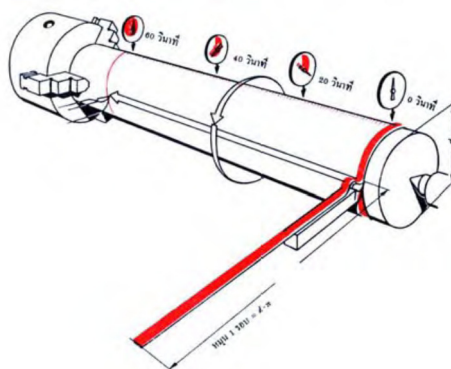
1.4 ความลึกป้อน (Depth of Cut) ถ้าป้อนตัดลึกจะใช้ความเร็วรอบน้อยกว่าป้อนตื้น

1.5 อัตราป้อน (Rate of Feed) ในการป้อนตัดงานหยาบ เช่น อัตราป้อน 3 มิลลิเมตร ความเร็วที่ใช้ในการตัดจะต่ำกว่าการป้อนตัดขั้นสุดท้าย เช่น อัตราป้อนตัด 0.13 มิลลิเมตร เป็นต้น จะใช้ความเร็วรอบได้สูง

1.6 การระบายความร้อน (Cutting Lubricant) ความเร็วตัดของวัสดุบางชนิดอาจเพิ่มให้สูงขึ้น ได้เมื่อมีการระบายความร้อนที่ถูกต้อง ซึ่งสารระบายความร้อนนี้ จะช่วยรักษาอุณหภูมิของคมตัดไม่ให้ร้อนสูงเกินไปขณะทำงาน

1.7 การจับชิ้นงานให้มั่นคงแข็งแรง (Rigidity of the Work) ในกรณีงานที่ถูกจับด้วยหัวจับ โผล่ออกมาสั้นๆจะใช้ความเร็วได้สูงกว่างานที่ถูกจับโผล่ออกมายาวๆ

1.8 ความสามารถของเครื่อง คือ เครื่องแข็งแรงมีกำลังสูงสามารถใช้ความเร็วตัดได้สูง อย่างไรก็ตามอย่าให้สูงจนคมไหม้ (กล้าหาญ และคณะ, 2528)



ภาพที่ 2.4 ลักษณะของความยาวเศษตัดที่เกิดขึ้นในเวลา 1 นาที

ที่มา : กล้าหาญ วรพุทธพร และคนอื่นๆ, **เทคนิคช่างกล**. (กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2528), ไม่ปรากฏเลขหน้า.

2. อัตราการป้อน (Feed) หมายถึงระยะทางการเดินป้อนของมีดไปตามความยาว ของชิ้นงานในแต่ละรอบของการหมุนของเพลา (Spindle) ของเครื่อง หรืออัตราการป้อนอาจพิจารณาจากความหนาของเศษตัด (Chips) อัตราการป้อน 5 มิลลิเมตร หมายถึงมีดตัด (Cutting Tool) มีการเคลื่อนที่เป็นระยะทาง 5 มิลลิเมตร ตามความยาวของชิ้นงานภายใน 1 นาที จะได้ Feed = 5 มิลลิเมตร ต่อ นาที

3. ความลึกป้อน (Depth of Cut) ทำให้เศษโลหะไหลออกมา ความลึกในการตัด 3 มิลลิเมตร บนชิ้นงานขนาดของชิ้นงานจะลดลง 6 มิลลิเมตร ทุกครั้งที่ทำการกลึงหยาบ ในการตั้งความลึกของการตัด (Depth of Cut) และอัตราป้อนตัด (Feed) จะต้องคำนึงถึงความสามารถของมีดตัด และเครื่องที่จะทนได้ด้วย (ศุภชัย และคณะ, 2534)

## 2.2 เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel)

เหล็กกล้าไร้สนิม หรือสแตนเลส นั้น ในทางโลหกรรมถือว่าเป็นโลหะผสมเหล็ก ที่มีโครเมียมอย่างน้อยที่สุด 10.5% ชื่อในภาษาไทย แปลจากภาษาอังกฤษว่า Stainless Steel เนื่องจากโลหะผสมดังกล่าวไม่เป็นสนิมอันเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยากันระหว่าง ออกซิเจนในอากาศกับโครเมียมในเนื้อของเหล็กกล้าไร้สนิม เกิดเป็นฟิล์มบางๆเคลือบผิวไว้ ทำหน้าที่ป้องกันการเกิดการเสียหายให้กับตัวเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นอย่างดี ป้องกันการเกิด Corrosion และไม่ชำรุดหรือสึกกร่อนง่ายอย่างโลหะทั่วไป สำหรับในสหรัฐอเมริกาและในหลายประเทศ โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมการบิน นิยมเรียกโลหะนี้ว่า Corrosion Resistant Steel เมื่อไม่ได้ระบุชัดว่าเป็นโลหะผสมชนิดใด และคุณภาพระดับใด แต่ในท้องตลาดเราสามารถพบเห็นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 18-8 มากที่สุด ซึ่งเป็นการระบุถึงธาตุที่เจือลงในเนื้อเหล็กคือ โครเมียมและนิกเกิล ตามลำดับ เหล็กกล้าไร้สนิมประเภทนี้จัดเป็น Commercial Grade คือมีใช้ทั่วไปหาซื้อได้ง่าย มักใช้ทำเครื่องใช้ทั่วไป ซึ่งเราสามารถจำแนกประเภทของเหล็กกล้าไร้สนิมได้จากเลขรหัสที่กำหนดขึ้นตามมาตรฐาน AISI เช่น 304 304L 316 316L เป็นต้น ซึ่งส่วนผสมจะเป็นตัวกำหนดเกรดของเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งมีความต้องการในการใช้งานที่แตกต่างกันออกไป เหล็กกล้าไร้สนิมกับการเกิดสนิม ปกติ Stainless Steel จะไม่เป็นสนิมเพราะผิวของมันจะมีฟิล์มโครเมียมออกไซด์ บางๆเคลือบผิวอยู่อันเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยากันระหว่าง Cr ใน Stainless Steel กับ ออกซิเจนในอากาศ การทำให้ Stainless Steel เป็นสนิมคือการถูกทำลายฟิล์มโครเมียมออกไซด์ ที่เคลือบผิวออกไปในสภาวะที่ Stainless Steel สามารถเกิดสนิมได้ ก่อนที่ฟิล์มโครเมียมออกไซด์จะก่อตัวขึ้นมาอีกครั้งเช่น ถ้าเหล็กกล้าไร้สนิมถูกทำให้เกิดรอยขีดข่วน แล้วบริเวณรายนั้นมีความชื้น ซึ่งสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยากับธาตุเหล็ก ก่อนที่ฟิล์มโครเมียมออกไซด์จะก่อตัวขึ้นมา ก็จะเป็นสาเหตุให้เกิดสนิมขึ้นได้ (กัมพล, 2550)

### 2.2.1 ประเภทของเหล็กกล้าไร้สนิม

เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) จะมีความโดดเด่นในเรื่องของความทนทานต่อการเป็นสนิมและการกัดกร่อนการใช้งานในสภาพแวดล้อมที่เกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติ หรือที่มนุษย์สร้างขึ้นก็ตาม เราก็ยังจำเป็นที่จะต้องเลือกประเภท และคุณสมบัติของเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) อย่างถูกต้องเพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งานเนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) นั้นมีอยู่

หลายประเภทด้วยกันซึ่งในแต่ละประเภทก็จะถูกนำไปใช้งานที่แตกต่างกันออกไป การแบ่งแยกหรือจำแนกประเภทของเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) นั้นสามารถทำได้ด้วยวิธีการเพิ่มหรือลดจำนวนของส่วนผสมที่เป็นธาตุแต่ละตัว ยกตัวอย่าง เช่น การเพิ่มนิกเกิล (Nickel) จะช่วยทำให้โครงสร้างออสเทนไนท์ (Austenitic) ของเหล็กมีความมั่นคงยิ่งขึ้น จึงจัดว่าเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) ประเภทที่มีจำนวนนิกเกิล (Nickel) สูง จะมีโอกาสของการไม่เกิดคุณสมบัติเป็นแม่เหล็กเจือปนสูงตามไปด้วย ในขณะที่การเพิ่มคาร์บอน (Carbon) จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความทนทาน อย่างไรก็ตามเราสามารถลดต้นทุนด้วยการเพิ่มแมงกานีส (Manganese) แทนนิกเกิล (Nickel) ซึ่งมีราคาสูงกว่าเพื่อให้ได้เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) ที่มีคุณสมบัติดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นได้เช่นกันเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) สามารถจำแนกออกได้อย่างง่ายๆ เป็น 5 ประเภท

1. เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) ประเภท ออสเทนนิติก ที่มีคุณสมบัติไม่เป็นแม่เหล็ก (Austenitic non-magnetic) ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) ไม่ว่าจะเริ่มจากเครื่องมือเครื่องใช้บนโต๊ะอาหารจนกระทั่งถึงผลิตภัณฑ์ที่ต้องมี คุณสมบัติที่มีความต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็มและการกัดกร่อนในที่อับ (Chloride pitting and Crevice corrosion) ส่วนใหญ่จะนิยมใช้เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) ประเภทนี้ เนื่องจากมีคุณสมบัติสูง ธาตุประกอบสำคัญของเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) ประเภทนี้ประกอบด้วย 3 ธาตุ คือ คาร์บอน (Carbon) โครเมียม (Chromium) และนิกเกิล (Nickel) หรือแมงกานีส (Manganese) ถ้าต้องการคุณสมบัติของความคงทนและทนทานต่อการกัดกร่อนสูงๆ ออสเทนนิติก (Austenitic) หรือมากกว่าสามารถทำได้โดยการเพิ่มส่วนผสมของโมลิบดีนัม (Molybdenum) ไนโตรเจน (Nitrogen) และนิกเกิล (Nickel) ให้มากขึ้น ดังนั้น จากออสเทนนิติก (Austenitic) ก็จะกลายเป็น “ซูเปอร์ออสเทนนิติก” (Superaustenitic) ก็หมายถึงราคาที่สูงขึ้นเช่นกัน ดังนั้น ดิวเพล็กซ์ (Duplex Steels) จึงเป็น อีกหนึ่งทางเลือก สำหรับผู้ที่ต้องการเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) ที่มี คุณสมบัติสูง แต่มีราคาที่ถูกกว่า เนื่องจากคุณสมบัติของดิวเพล็กซ์ (Duplex) นั้นมีความคล้ายคลึงกับออสเทนนิติก (Austenitic)

2. เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) ประเภท เฟอริติก ที่มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็ก (Ferritic magnetic) เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) ประเภทนี้มีโครเมียม (Chromium) เป็นส่วนผสมหลักและมีคาร์บอน (Carbon) กับนิกเกิล (Nickel) ต่ำ ดังนั้นราคา ก็จะถูกลงเช่นกัน

3. เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) ประเภท มาร์เทนซิติก (Martensitic) เป็นประเภทที่มีส่วนผสมของโครเมียม (Chromium) โมลิบดีนัม (Molybdenum) และคาร์บอน (Carbon) แต่ไม่มีนิกเกิล (Nickel) เป็นส่วนผสม ดังนั้นเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) ประเภทนี้จึงไม่มีคุณสมบัติความต้านทานการกัดกร่อน แต่ทว่ามี คุณสมบัติในส่วนของความ แข็งแรงและทนทาน เนื่องจากมีคาร์บอน (Carbon) เป็นตัวที่ช่วย เพิ่มคุณสมบัตินี้ อย่างไรก็ตามก็ยังมีข้อเสีย คือ ยิ่งแข็งมากขึ้นก็สามารถเปราะและแตกหักง่ายเช่นกัน

4. เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) ประเภทเพิ่มความแข็งโดยการตกผลึก (Precipitation-hardening martensitic) เหล็กกล้าไร้สนิมประเภทนี้มีสูตรผสมง่ายๆ คือ โครเมียม (Chromium) และ นิกเกิล (Nickel) หรือที่เรียกว่า “14/4PH” มีคุณสมบัติของการต้านทานการกัดกร่อน และความแข็งแรงทนทานได้ดีกว่าประเภทมาร์เทนซิติก (Martensitic) ธรรมดา

5. เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) ประเภทดูเพล็กซ์ เฟอริติก-ออสเทนนิติก (Duplex ferritic-austenitic) จัดอยู่ในกลุ่มเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) ประเภทที่มีโครงสร้างผสมระหว่างเฟอริติก (Ferritic) กับ (Austenitic) ออสเทนนิติก โดยพัฒนาขึ้นมาเพื่อเพิ่มความแข็งแรงทนทานและต้านทานการกัดกร่อนให้ดียิ่งขึ้นกว่า ออสเทนนิติก (Austenitic) ธรรมดา เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) ประเภทนี้นิยมนำมาใช้ในงานประเภทที่ต้องการความบาง เพื่อลดน้ำหนักของชิ้นงาน และต้นทุนในการผลิต (กัมพล, 2550)

สมบัติการแทรกซึมทางแม่เหล็กเป็นความสามารถของวัสดุในการแสดงความเป็นแม่เหล็ก โดยอาศัยสมบัติหรือระดับของความสามารถในการดึงดูดแม่เหล็กเป็นตัวบ่งชี้ เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) เกือบทุกประเภทมีคุณสมบัติของการเป็นแม่เหล็ก ยกเว้นเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) ประเภทออสเทนนิติกคุณสมบัติการเป็นแม่เหล็กในเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) นั้นขึ้นอยู่กับปริมาณธาตุของโลหะผสมนิกเกิล (Nickel) คือ ธาตุหนึ่งของโลหะผสมที่มีคุณสมบัติในการช่วยเพิ่มความแข็งแรง ทนทานของชิ้นผิวออกไซด์อันทำให้เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) มีคุณสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนได้ดี นอกจากนั้น นิกเกิล (Nickel) ยังเป็นธาตุที่เป็นปัจจัยสำคัญในการเปลี่ยนแปลงปรับปรุงโครงสร้างทาง วัตถุของเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) ไม่ให้มีคุณสมบัติการเป็นแม่เหล็ก อาจกล่าว ได้ว่ายิ่งเพิ่มปริมาณนิกเกิล (Nickel) เข้าไปในโลหะผสม ยิ่งทำให้ เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) ปราศจากคุณสมบัติการเป็นแม่เหล็กมากเท่านั้น เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) ที่จัดอยู่ในกลุ่มของออสเทนนิติก (Austenitic) เมื่อได้ ผ่านกระบวนการอบอ่อน จะทำให้มีคุณสมบัติการเป็นแม่เหล็กน้อยลง หรือเกือบจะไม่มีคุณสมบัติการเป็นแม่เหล็กเลย (<http://www.kinzi.co.th>, 2558)

## 2.2.2 เหล็กกล้าไร้สนิม AISI/SUS 304

เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) เกรด 304 จะมีคุณสมบัติการเป็นแม่เหล็กมากกว่า เกรด 310 และ 316 อย่างไรก็ตามเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) ประเภทออสเทนนิติก (Austenitic) มากกว่า 300 ชนิด ก็สามารถทำให้เกิดคุณสมบัติของการเป็นแม่เหล็กได้ในกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบเย็น แต่ก็สามารถทำให้ปราศจากคุณสมบัติการเป็นแม่เหล็กได้ โดยการอบคลายเครียด ที่อุณหภูมิ 700-800 องศาเซลเซียส หากว่าเหล็กกล้าไร้สนิมมีความไวต่อการตกผลึกคาร์ไบด์ ต้องอบคลายเครียดที่อุณหภูมิ 1000-1150 องศาเซลเซียส แล้วทำให้เย็นตัวทันทีที่จะขจัดความเป็นแม่เหล็กออกไป และไม่ทำให้ความต้านทานการกัดกร่อนลดลง (<http://www.kinzi.co.th>, 2558)

เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) AISI/SUS 304 มีคุณสมบัติที่แตกต่างจากเกรดอื่น สมบัติทางกล มีความเหนียว และมีคุณสมบัติทนต่อแรงกระแทกที่อุณหภูมิต่ำ คุณสมบัติทางกายภาพรวมไปถึงคุณสมบัติที่ไม่เป็นแม่เหล็กและมีการนำความร้อนที่ดี เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) AISI 304 ถือว่าเป็นตัวเลือกที่ดีที่สุดสำหรับการขึ้นรูปแบบแบน เช่น การกด (Pressing) การ

วาด (Drawing) การขึ้นรูปให้ขยายออก และ การหมุน (Spinning) เหล็กกล้าไร้สนิม ประเภทนี้มี ส่วนผสมของธาตุต่างๆ ดังตารางที่ 2.1 (<http://www.bosunsupplies.com>, 2558)

ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมของธาตุต่างๆของเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) AISI/SUS 304

Carbon	0.08% max.	Silicon	1.00% max.
Manganese	2.00% max.	Chromium	18.00-20.00%
Phosphorus	0.045% max.	Nickel	8.00-10.50%
Sulfur	0.030% max.		

ที่มา : Bosun Supplies. **STAINLESS STEEL INFO**. เข้าถึงเมื่อ 2 ธันวาคม 2015. เข้าถึงได้จาก <http://www.bosunsupplies.com/StainlessInfo2/>.

### 2.3 เครื่องซีเอ็นซี

ในปี ค.ศ. 1948 นักวิทยาศาสตร์ในสถาบัน MIT (Massachusetts Institute of Technology) ได้ริเริ่มทำโครงการพัฒนาเครื่องจักรที่ควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ขึ้น โดยได้รับทุนสนับสนุนโครงการจากกองทัพอากาศของสหรัฐอเมริกา (U.S. Air Force) เครื่องจักรระบบเอ็นซี เครื่องแรกคือ CINCINNATIC HYDROTEL VERTICAL-SPINDLE MACHINE และออกใช้งานในปี ค.ศ.1957

เอ็นซี (NC) ย่อมาจากคำว่า Numerical Control หมายถึง การควบคุมเครื่องจักรกล ด้วยระบบตัวเลขและตัวอักษร กล่าวคือ การเคลื่อนที่ต่างๆ ตลอดจนการทำงานอื่นๆ ของเครื่องจักรกล จะถูกควบคุมโดยรหัสคำสั่งที่ประกอบด้วยตัวเลข ตัวอักษร และสัญลักษณ์อื่นๆ ซึ่งจะ ถูกแปลงเป็นคลื่นสัญญาณ (pulse) ของกระแสไฟฟ้าหรือสัญญาณออกอื่นๆ ที่จะไปกระตุ้นมอเตอร์ หรืออุปกรณ์อื่นๆ เพื่อให้เครื่องจักรกลทำงานตามขั้นตอนที่ต้องการ

ซีเอ็นซี (CNC) ย่อมาจากคำว่า Computerized Numerical Control ระบบควบคุมเอ็นซีแบบนี้จะมีคอมพิวเตอร์ที่มีความสามารถสูงเพิ่มเข้าไปภายในระบบ ทำให้สามารถจัดการกับข้อมูลที่ป้อนเข้าไปในระบบเอ็นซี และประมวลผลข้อมูลเพื่อนำผลลัพธ์ที่ได้ไปควบคุมการทำงานของเครื่องจักรกล (ซาลี, 2542)

องค์ประกอบหลักๆของเครื่องจักรซีเอ็นซี มีองค์ประกอบ 3 ส่วนหลักๆ คือ

1. ตัวเครื่องจักร (Machine Body)
2. ชุดควบคุมการทำงาน (Controller)
3. ระบบกลไกในการเคลื่อนที่ (Drive Mechanisms)

เครื่องจักรกลซีเอ็นซี ที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมมีดังนี้

1. เครื่องเจาะ (CNC Drilling Machine) หลักการออกแบบการทำงานมีลักษณะคล้ายเครื่องเจาะทั่วไป แต่สามารถเปลี่ยนเครื่องมือตัดซึ่งอาจเป็นแบบเทอร์เรต หรือแบบแม็กกาซีน หรือบางชนิด สามารถทำงานคล้ายเครื่องกัดแต่มีลักษณะเป็นงานกัดเบาๆ ดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 เครื่องเจาะซีเอ็นซี

ที่มา : Indiamart. **CNC Drilling Machine**. เข้าถึงเมื่อ 2 ธันวาคม 2015. เข้าถึงได้จาก <http://dir.indiamart.com/impcat/cnc-drilling-machine.html>.

2. เครื่องกลึง (CNC Turning Machine) ถูกออกแบบพัฒนาจากเครื่องกลึงธรรมดา โดยมีการนำระบบคอมพิวเตอร์เข้ามาควบคุมกระบวนการทำงาน ทำให้สามารถกลึงชิ้นงานได้รวดเร็ว มีความเที่ยงตรง และสามารถกลึงงานที่มีความสลับซับซ้อนได้ง่ายขึ้น ในการออกแบบแนวแกนการเคลื่อนที่จะใช้ 2 แนวแกนได้แก่ แกน X และแกน Y สำหรับการหมุนของเพลาหัวเครื่อง จะถูกกำหนดให้เป็นแกน C ดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 เครื่องกลึงซีเอ็นซี

ที่มา : Bright Engineering (Precision Products) Ltd. **CNC turning**. เข้าถึงเมื่อ 2 ธันวาคม 2015. เข้าถึงได้จาก <http://www.brightengineering.co.uk/capacity/>.

3. เครื่องแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ (Machining Center) เป็นเครื่องจักรกลที่สามารถทำการตัดเฉือนชิ้นงานได้ 4-5 ด้าน ต่อการจับชิ้นงานเพียงครั้งเดียว และยังสามารถทำการตัดเฉือนได้หลากหลายลักษณะ เช่น งานกัด งานปาดหน้า งานคว้าน และงานอื่นๆ เป็นต้น โดยสามารถประกอบเครื่องมือตัดได้ตั้งแต่ 10 อันขึ้นไป ดังภาพที่ 2.7 (สมบัติ, 2551)



ภาพที่ 2.7 เครื่องแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์

ที่มา : Bright Engineering (Precision Products) Ltd. CNC milling. เข้าถึงเมื่อ 2 ธันวาคม 2015. เข้าถึงได้จาก <http://www.brightengineering.co.uk/capacity/>.

ข้อดีของเครื่องจักรกลซีเอ็นซี

1. มีความยืดหยุ่นในการทำงานสูง
2. ความเที่ยงตรง (Accuracy) สม่าเสมอ
3. ใช้เวลาในการผลิต (Production Time) สั้น
4. สามารถผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ง่าย
5. การปรับตั้งเครื่องจักรทำได้ง่าย
6. หลีกเลียงการใช้ช่างที่มีทักษะและประสบการณ์สูง
7. ช่างควบคุมเครื่องจักร มีเวลาเตรียมงานระหว่าง รอเครื่องจักร
8. ลดขั้นตอนการตรวจสอบคุณภาพ

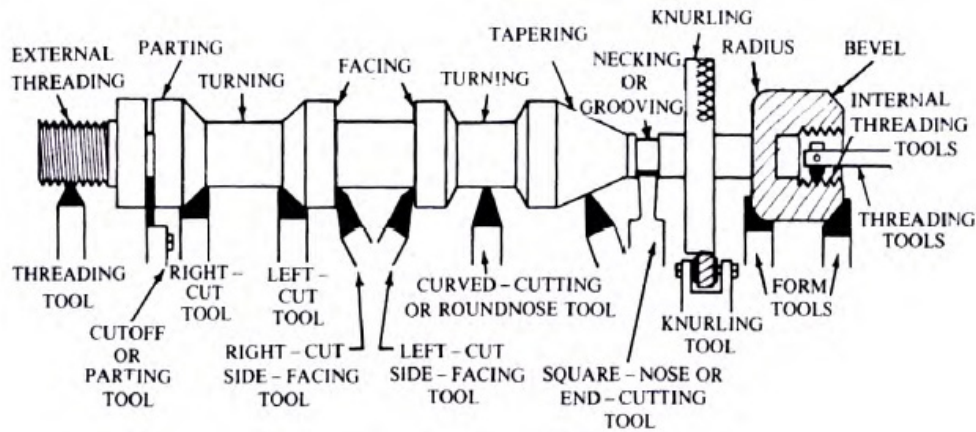
ข้อเสียของเครื่องจักรกลซีเอ็นซี

1. เครื่องจักรมีราคาสูง
2. การบำรุงรักษามีความซับซ้อน
3. ต้องใช้ช่างเขียนโปรแกรม (Part Programmer) ที่มีทักษะสูง
4. ชิ้นส่วนที่ซ่อมบำรุงต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศ
5. การซ่อมบำรุงต้องใช้ช่างที่มีประสบการณ์สูง
6. เครื่องมือที่ใช้ในการตัดเฉือนมีราคาสูง
7. พื้นที่ติดตั้งเครื่องจักร จะต้องควบคุมระดับอุณหภูมิ ความชื้น และฝุ่นละออง (ชาลี,

### 2.4 มีดกลึง (Tool Lath)

การกลึงงานให้เกิดรูปร่างลักษณะตามแบบที่กำหนดจำเป็นต้องอาศัยมีดกลึงทำหน้าที่ตัดเฉือนออกในขณะที่งานหมุน มีดกลึงมีหลายลักษณะ รูปร่างแตกต่างกันออกไปตามการปฏิบัติงาน

1. มีดกลึงสำหรับงานทั่วไป โดยปกติจะเป็นมีดกลึงที่ทำจากเหล็กกล้ารอบสูง (High Speed Steel: HSS) นำมาลับคมตัดให้มีรูปร่างต่าง ๆ ดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 ชนิดของมีดกลึงที่ใช้กันทั่วไป  
ที่มา : ศุภชัย รมยานนท์ และฉวีวรรณ รมยานนท์, **ทฤษฎีเครื่องมือกล1**, พิมพ์ครั้งที่2. (กรุงเทพฯ: บริษัท โรงพิมพ์ไทยวัฒนาพานิชย์ จำกัด, 2534), ไม่ปรากฏเลขหน้า.

2. มีดกลึงสำหรับเครื่องกลึงCNC โดยปกติแล้วจะผลิตออกมาเป็นเม็ดมีดสำเร็จรูปซึ่งได้รับการพัฒนาเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงสำหรับการผลิตในปริมาณมากและมีคุณภาพ ตัวอย่างของเม็ดมีดที่ใช้กับเครื่องกลึงซีเอ็นซีแสดงดังภาพที่ 2.9 (ศุภชัย และคณะ, 2534)



ภาพที่ 2.9 ตัวอย่างของเม็ดมีด  
ที่มา : ชาญ ราชวงศ์. “การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพผิวงานในการกลึงงานแข็ง.” (วิทยานิพนธ์ปริญญาครุศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2548), 7.



### 3. การแบ่งชนิดของมีดกลึง (Cutting Tool)

การแบ่งชนิดของมีดกลึงมีหลักในการแบ่งหลายลักษณะ เช่น แบ่งตามวัสดุที่ใช้ทำคมมีด แบ่งตามชนิดรูปร่างลักษณะหรือโครงสร้าง แบ่งตามหน้าที่หรือการใช้งาน

การแบ่งชนิดของมีดกลึงตามวัสดุที่ใช้ทำคมมีด มี 6 ประเภทใหญ่ๆ คือ

3.1 มีดกลึงเหล็กผสมคาร์บอนสำหรับทำเครื่องมือ (Tool carbon steel) คมมีดทำด้วยเหล็กผสมคาร์บอนสำหรับทำเครื่องมือ ปัจจุบันไม่ค่อยมีใช้กันแล้ว

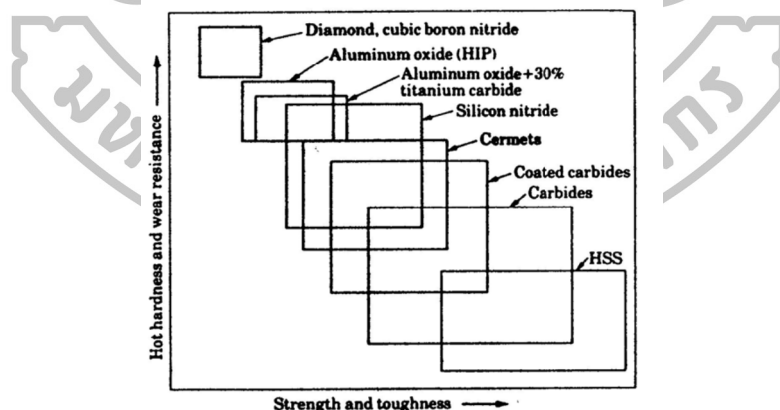
3.2 มีดกลึงเหล็กโลหะผสมสำหรับทำเครื่องมือ (Tool alloy steel) คมมีดทำด้วยเหล็กโลหะผสมสำหรับทำเครื่องมือ

3.3 มีดกลึงเหล็กเหนียวความเร็วสูง (High speed steel) คมมีดทำด้วยเหล็กเหนียวความเร็วสูง

3.4 มีดกลึงโลหะแข็งพิเศษ คมมีดทำด้วยโลหะผสมซึ่งมีความแข็งสำคัญเป็นพิเศษ ผลิตโดยกรรมวิธีซินเตอร์ซึ่งมีทังสเตนคาร์ไบด์ (WC) เป็นส่วนประกอบสำคัญ มีความแข็งมาก ทนทานต่อการกลึงด้วยความเร็วสูงเป็นอย่างดี ปัจจุบันนี้นิยมใช้กันกว้างขวางมากที่สุดส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของมีดอินเสิร์ท (Carbide Insert) นอกจากนี้แล้วยังมีมีดกลึงซึ่งมีคมมีดทำด้วยเซอร์เมท (Cermets) ซึ่งเป็นซินเตอร์ของไททาเนียมคาร์ไบด์ (TiC) และสารอื่นที่จัดอยู่ในจำพวกนี้ เป็นมีดกลึงที่มีความแข็งพิเศษชนิดหนึ่งใช้ในการกลึงด้วยความเร็วสูงโดยเฉพาะ

3.5 มีดกลึงเซรามิก ส่วนที่เป็นคมของมีดกลึงทำด้วยเซรามิก มีซินเตอร์ของอลูมิเนียมออกไซด์เป็นส่วนประกอบสำคัญ

3.6 มีดเพชร คมของมีดกลึงทำด้วยเพชรดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 การเปรียบเทียบสมบัติของวัสดุชนิดต่างๆ

ที่มา : มนูญ เทพกิจอารีกุล. “การศึกษาองค์ประกอบในงานกลึงที่มีผลกระทบต่อภารกิจของมีดกลึง.” (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2547), ไม่ปรากฏเลขหน้า.

#### 4. คุณสมบัติที่สำคัญของเครื่องมือตัด

##### 4.1 เหล็กกล้ารอบสูง (High Speed Steel)

เหล็กกล้ารอบสูงถูกนำไปใช้เป็นสว่าน, ตัวไส (Broacher), ฮ็อบ (Hob) และเครื่องมือตัดประเภทต่างๆที่ต้องการความเหนียว และคมตัดที่แหลมคม เหล็กกล้ารอบสูงสามารถนำไปชุบแข็งหรืออาจนำไปเคลือบผิวด้วยวิธีการ PVD (Physical Vapour Deposition) เพื่อเพิ่มคุณสมบัติความต้านทานการสึกหรอ เหล็กกล้ารอบสูงสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ได้แก่ กลุ่มทังสเทน (W-TYPE) และกลุ่มโมลิบดีนัม (MO-TYPE) โดยมีธาตุตัวอื่นๆประกอบได้แก่ โครเมียม (Cr), โคบอลต์ (Co), วานาเดียม (V) และคาร์บอน (C)

##### 4.2 ซีเมนต์คาร์ไบด์ (Cemented Carbide)

ซีเมนต์คาร์ไบด์ คือ อนุภาคของคาร์ไบด์ชนิดต่างๆมารวมเข้าด้วยกันโดยวิธีการของโลหะผงวิทยา (Power Metallurgy) ประกอบไปด้วย ทังสเทนคาร์ไบด์ (Wc), ไททาเนียมคาร์ไบด์ (TaC), นีโอเบียมคาร์ไบด์ (NbC) โดยมีโคบอลต์ (Co) เป็นตัวของคาร์ไบด์มีขนาดเล็กมาก ประมาณ 1-10 ไมครอน ซีเมนต์คาร์ไบด์ สามารถใช้งานที่ความเร็วตัดสูงกว่าเหล็กกล้ารอบสูงได้ และยังมีความต้านทานการสึกหรอสูงกว่าอีกด้วย ซีเมนต์คาร์ไบด์ สามารถนำไปเคลือบผิวได้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องมือตัด ซึ่งสารเคลือบและวิธีการเคลือบจะขึ้นอยู่กับเทคนิคของผู้ผลิตแต่ละราย

##### 4.3 เซอร์เมท (Cermets)

เซอร์เมท (Cermets) มาจากคำว่า Ceramic + Metal เซอร์เมทเป็นซีเมนต์คาร์ไบด์ ที่ประกอบไปด้วย ไทเทเนียมคาร์ไบด์ (TiC), ไททาเนียมคาร์ไบด์ไนไตรด์ (TiCN) และ/หรือ ไททาเนียมไนไตรด์ (TiN) มากกว่าทังสเทนคาร์ไบด์ (Wc) เซอร์เมท มีคุณสมบัติต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสูง (Thermal Shock Resistance) และยังมีความต้านทานสูงต่อการเกิดปฏิกิริยากับอากาศ (Oxidation) จะใช้งานได้ดีที่ความเร็วตัดที่สูง อัตราป้อนที่ต่ำ ความลึกตัดน้อย ควรหลีกเลี่ยงการใช้ เซอร์เมทตัดผิวงานหล่อโดยตรง เนื่องจากเซอร์เมทมีความเหนียวต่ำจะเกิดการแตกบิ่นได้ง่าย

##### 4.4 เซรามิก (Ceramic)

เซรามิกเป็นวัสดุที่มีความต้านทานการสึกหรอสูงและมีความแข็งแรงต่อการกดอัดสูง (Compressive Strength), มีค่าการนำความร้อนต่ำ มีช่วงการยืดตัวต่ำ (Plastic Elongation) มีความเสถียรภาพทางความร้อนและทางเคมี คือมีคุณสมบัติไม่เปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยที่ความร้อนสูง หรือเมื่อสัมผัสกับสารเคมี แต่จุดอ่อนของเซรามิกคือ มีความต้านทานต่ำต่อวัฏจักรการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (Thermal Cyclic Resistance) และเปราะแตกบิ่นได้ง่าย เซรามิกเหมาะสำหรับใช้ในการตัดชิ้นงานที่ต้องการความเที่ยงตรงแม่นยำด้วยความเร็วตัดสูง เนื่องจากเซรามิกมีความต้านทานการสึกหรอสูง จึงสามารถรักษาคมตัดไม่ให้เปลี่ยนรูปร่างได้ ขนาดและผิวชิ้นงานจะไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก โดยทั่วไปใช้ตัดกับชิ้นงานเหล็กหล่อ, เหล็กเหนียว, เหล็กกล้าทนความร้อน ซึ่งเซรามิกที่นำมาทำเครื่องมือตัดมีอยู่ 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่มีอลูมิเนียมออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) เป็นพื้นฐาน และกลุ่มที่มีซิลิกอนไนไตรด์ (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)

#### 4.5 คิวบิกโบรอนไนไตรด์ (Cubic Boron Nitride, CBN)

คิวบิกโบรอนไนไตรด์หรือที่เรียกว่า ซีบีเอ็น เป็นวัสดุที่มีความแข็งมาก มีความต้านทานการสึกหรอสูง มีเสถียรภาพทางเคมีและมีความเหนียวดีกว่าเซรามิก ซีบีเอ็นถูกผลิตมาจากผลึกคิวบิกโบรอนไนไตรด์ โดยใช้เซรามิกเป็นตัวประสาน คุณสมบัติของซีบีเอ็นจะขึ้นอยู่กับตัวผลึกโบรอนไนไตรด์, จำนวนผลึกคิวบิกโบรอนไนไตรด์ และชนิดของตัวประสานทำให้เกิดเป็นซีบีเอ็นเกรดต่างๆ โดยทั่วไปมักจะใช้ในงานตัดละเอียด งานที่ต้องการความเที่ยงตรงแม่นยำสูง ใช้ตัดโลหะที่มีความแข็งสูง เช่น เหล็กชุบแข็ง, เหล็กหล่อ, เหล็กเหนียว หรือ คาร์ไบด์ ใช้งานได้ดีที่ความเร็วตัดสูงและอัตราป้อนต่ำ ควรหลีกเลี่ยงการตัดที่มีการกระแทก (Interrupted Cut) เพราะอาจทำให้แตกบิ่นเสียหายได้ เนื่องจากซีบีเอ็นเป็นวัสดุที่มีความแข็งสูงแต่เปราะ ดังนั้นคมตัดจึงมีโอกาสแตก หักบิ่น หรือกะเทาะได้ง่าย ซึ่งสามารถแก้ไขโดยการลบคม (Honing) และการทำมุมเอียง (Chamfer) ซึ่งมุมและขนาดจะขึ้นอยู่กับประเภทการใช้งาน

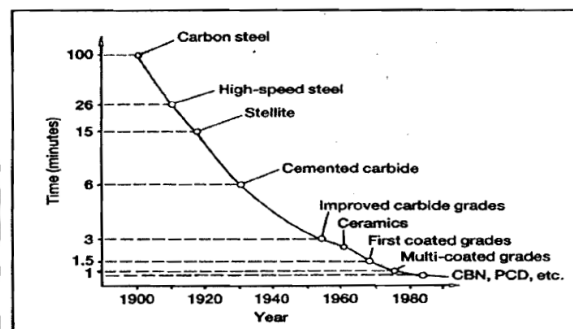
#### 4.6 เพชรสังเคราะห์ (Polycrystalline Diamond, PCD)

เพชรเป็นวัสดุเครื่องมือตัดที่มีความแข็งมากที่สุด มีความต้านทานการสึกหรอสูง ใช้ในการตัดวัสดุอโลหะ (Non-Ferrous Materials) เช่น อลูมิเนียม, ทองแดง, เซรามิก, คาร์ไบด์, ทองเหลือง, สังกะสีฯ สามารถให้อายุการใช้งานยาวนานกว่าซีเมนต์คาร์ไบด์หลายเท่า นิยมใช้ในการตัดอลูมิเนียม เพชรสังเคราะห์ไม่สามารถใช้ตัดโลหะจำพวกเหล็กได้ (Ferrous Application) เนื่องจาก ธาตุคาร์บอนในเพชรจะทำปฏิกิริยากับโลหะในเหล็กทำให้คมตัดเกิดการเสียหายสึกหรอหรือแตกบิ่นได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้อุณหภูมิขณะตัด (Cutting Zone Temperature) ต้องไม่เกิน 600°C เนื่องจากคาร์บอนในเพชรอาจเกิดการแตกตัวได้ที่อุณหภูมิที่สูง ควรใช้สารหล่อลื่นช่วยระบายความร้อน ควรใช้งานที่มีความเร็วตัดสูงและอัตราป้อนต่ำ (กล้าหาญ และคณะ, 2522)

### 5. วิวัฒนาการของวัสดุที่ใช้ทำเครื่องมือตัด

วิวัฒนาการของวัสดุที่ใช้ทำเครื่องมือตัดโดยใช้ระยะเวลาในการตัดเฉือนชิ้นงานมาตรฐานเป็นเกณฑ์ก่อนปี ค.ศ. 1870 มีทั้งหมดทำมาจากเหล็กกล้าคาร์บอน (Plain carbon steel) เช่นชนิดที่มีส่วนผสม 1% คาร์บอน และมี 0.2% แมงกานีส ส่วนที่เหลือเป็นเหล็ก วัสดุชนิดนี้จะมีค่าความแข็งต่ำเมื่อความร้อนสูงขึ้น และจะต้านทานการสึกหรอได้ในช่วงอุณหภูมิไม่เกิน 250 °C และเครื่องมือตัดยังสามารถใช้กับความเร็วดัดได้ประมาณ 5 เมตรต่อนาที และมักจะเกิดการแตกร้าวบ่อยเมื่อนำวัสดุไปชุบแข็งด้วยน้ำ ในปีเดียวกันนี้ Mushet ซึ่งทำงานอยู่ในประเทศอังกฤษ ได้เสนอเหล็กที่มีส่วนผสม 2% คาร์บอน 1.6% แมงกานีส 5.5% ทังสเทน และ 0.4% โครเมียม ซึ่งเป็นเหล็กที่ทำการชุบแข็งด้วยอากาศเพื่อให้สามารถรักษาสภาพความแข็งไว้ให้ได้อุณหภูมิสูงกว่าเก่า และวัสดุชนิดนี้สามารถใช้กับความเร็วดัดได้ถึง 8 เมตรต่อนาที วัสดุที่ปรับปรุงขึ้นมาเป็นวัสดุที่ใช้สำหรับทำมีดกลึง (Cutting tools) จนกระทั่งเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงโดยการใช้โครเมียมแทนแมงกานีส ในปี ค.ศ. 1901 F.W. Taylor และ M. White มีการปรับปรุงเครื่องมือตัดนี้ให้ดีขึ้นอย่างมาก ซึ่งสามารถใช้ความเร็วดัดได้ถึง 19 เมตรต่อนาที วัสดุที่พวกเขาพัฒนาขึ้นนี้ต่อมารู้จักกันในชื่อของมีดกลึงเหล็กเหนียวความเร็วสูง (High speed steel, HSS) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีส่วนผสม 1.9% คาร์บอน 0.3% แมงกานีส 8% ทังสเทน และ 3.8% โครเมียม ซึ่งเหล็กชนิดนี้แตกต่างจากเหล็กของ Mushet โดยดัดเพิ่มปริมาณของทังสเทน

และแทนที่แมงกานีสด้วยโครเมียม ช่วง 10 ปีถัดมาได้มีการนำ HSS มาทำการพัฒนาอย่างรวดเร็ว ในปี ค.ศ. 1910 ได้มีการเพิ่มทั้งสแตนขึ้นเป็น 18% โดยมี 4% โครเมียม และ 1% วานาเดียม ซึ่งรู้จักกันในชื่อ 18 : 4 : 1 HSS การเปลี่ยนแปลงครั้งที่มีชื่อเสียงมากที่สุดของ HSS เกิดขึ้นในปี ค.ศ. 1923 มีชื่อเรียกว่า “Super HSSs” แม้ว่าไม่ได้นำออกมาเผยแพร่ในเชิงพาณิชย์ จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1939 เมื่อ Gill ได้ลดปริมาณของทั้งสแตนบางส่วน และได้ใช้โมลิบดีนัมเข้ามาผสมแทน ทำให้สามารถนำไปใช้งานขึ้นรูปร้อน (hot work) ได้ และได้แนะนำเสนอในชื่อของ M2 HSS ในประเทศสหรัฐอเมริกา (USA) ในปี ค.ศ. 1950 ซึ่งวัสดุชนิดนี้มีส่วนผสม 0.8% คาร์บอน, 4% โครเมียม, 2% วานาเดียม, 6% ทั้งสแตน และ 5% โมลิบดีนัม ซึ่งมันจะสามารถต้านทานอุณหภูมิได้ถึง 650 °C โดยที่คมตัดไม่มีการเปลี่ยนแปลง และนี่ถือเป็นการพัฒนาขั้นสูงครั้งล่าสุดของ HSS และในปี ค.ศ. 1915 โลหะผสมที่เรียกว่า Stellite ซึ่งเป็นวัสดุที่มีส่วนผสมของโคบอลต์ โครเมียม และทั้งสแตนในปริมาณสูง ต้านทานอุณหภูมิได้ถึง 800 °C ทั้งสแตนคาร์ไบด์เป็นวัสดุเครื่องมือตัดที่พัฒนาขึ้นโดยเยอรมันเมื่อปี ค.ศ. 1928 ผลิตขึ้นโดยกระบวนการทางโลหะผง (powder – metallurgy) ในยุคแรกนี้ แสดงให้เห็นถึงในภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 วิวัฒนาการของวัสดุเครื่องมือตัดของบริษัท Sandvink (UK) ที่มา : รัชชัย อาจปฐ. “การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความเรียบผิวในการกลึงเหล็กหล่อเหนียว FCD450.” (วิทยานิพนธ์ปริญญาครุศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2550), 23.

“คาร์ไบด์” จะมีความเปราะและยากต่อการเชื่อมประสาน (brazing) และการเจียรนัย (grinding) และมักจะเกิดที่สึกหรอบนผิวคาย (Crater wear) โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อทำการตัดเฉือนเหล็กกล้า 25 ปี ต่อมา ได้มีการพัฒนาเกรดของคาร์ไบด์ให้สามารถต้านทานแรงกระแทกได้มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเกรดของคาร์ไบด์ที่พัฒนาขึ้นมานี้ยังมีข้อจำกัดขอบเขตการนำไปใช้งาน คือใช้สร้างเครื่องมือตัดที่สามารถทำการตัดเฉือนได้เฉพาะวัสดุงานที่เป็น เหล็กหล่อ และโลหะที่ไม่ใช่เหล็กเท่านั้น และในช่วงระยะเวลาที่ล้าหินเจียรนัยที่ทำด้วยเพชรก็กำลังมีการพัฒนาเหมือนกัน ซึ่งทำให้การเตรียมเครื่องมือตัดสามารถทำได้ง่ายขึ้นมาก ส่วนปัญหาของการเกิดการสึกหรอบนผิวคาย (Crater wear) เมื่อทำการตัดเฉือนเหล็กกล้านั้นสามารถจะลดได้โดยการเติมไทเทเนียมคาร์ไบด์ (Titanium carbide, TiC) และแทนทาลัมคาร์ไบด์ (Tantalum carbide, TaC) และได้มีการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลอื่นๆ อีกด้วย ลักษณะของมิดกลึงคาร์ไบด์อินเสิร์ตแสดงในภาพที่ 2.12 และ 2.13



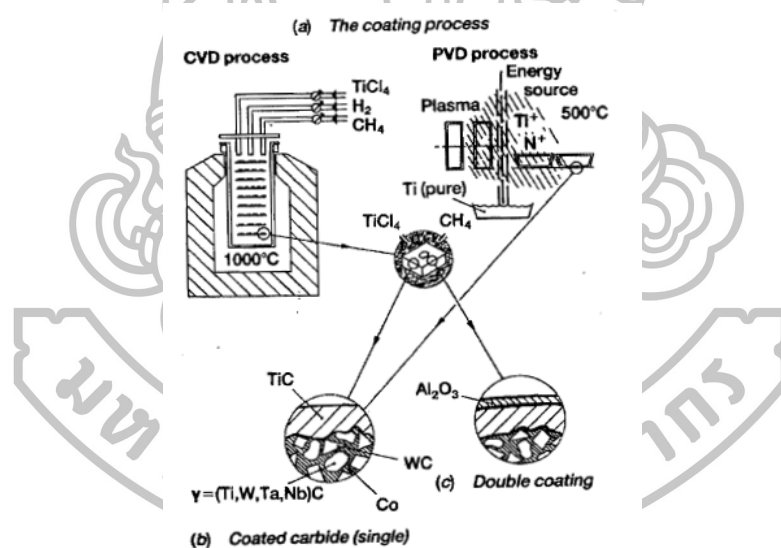
ภาพที่ 2.12 ขนาดและรูปร่างของเม็ดกลึงคาร์ไบด์ อินเสิร์ตของบริษัท Sandvik (UK) ที่มา : ธวัชชัย อัจจุรงค์. “การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความเรียบผิวในการกลึงเหล็กหล่อเหนียว FCD450.” (วิทยานิพนธ์ปริญญาครุศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2550), 23.



ภาพที่ 2.13 ชนิดและลักษณะเม็ดเซรามิกอินเสิร์ตของบริษัท Sandvik (UK) ที่มา : ธวัชชัย อัจจุรงค์. “การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความเรียบผิวในการกลึงเหล็กหล่อเหนียว FCD450.” (วิทยานิพนธ์ปริญญาครุศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2550), 24.

ในช่วงต้นปีถึงกลางปี ค.ศ. 1950 เครื่องมือตัดเซรามิก (ceramic cutting tools) ได้มีการพัฒนาขึ้นในประเทศอังกฤษ เยอรมัน และรัสเซีย ซึ่งผลิตจากผงของ  $\alpha$ - alumina ละเอียด โดยกระบวนการซินเตอร์ (sintering) ไม่มีการใช้ตัวประสานและสารเติมแต่ง ถึงแม้ว่าเครื่องมือตัดเซรามิกจะมีความแข็งและทนต่อความร้อนมากกว่าเครื่องมือตัดที่ทำจากคาร์ไบด์ แต่เครื่องมือตัดเซรามิกก็ยังคงมีปัญหาในเรื่องของความเปราะอยู่บ้าง เนื่องจากเกรนที่เล็กของ Alumina และกระบวนการซินเตอร์ที่มีความหนาแน่นสูง ถึงแม้ว่าต้นทุนของ Alumina จะต่ำ แต่ต้นทุนของกระบวนการในการผลิตก็ยิ่งสูงมาก นั่นเป็นเพราะว่าจะต้องทำการตัดก้อน Alumina ที่มีขนาดใหญ่ให้เป็นชิ้นเล็กๆ ด้วยเลื่อยเพชร แต่ถ้าใช้เครื่องมือตัดเซรามิก (ceramic cutting tools) ในการตัด

เนื่องวัสดุธรรมดาสามารถใช้ความเร็วตัดได้ถึง 900 เมตรต่อนาที หลังจากปี ค.ศ. 1960 เริ่มมีการพัฒนาเครื่องมือตัดเคลือบ (Coated tool) ซึ่งเป็นเครื่องมือตัดเคลือบ (Coated Tool) ที่มีการเคลือบชั้นเดียว (First coated tool) ด้วยไทเทเนียมคาร์ไบด์ (Titanium Carbide, TiC) ความหนาของสารเคลือบ 0.005 มิลลิเมตร โดยใช้วิธี Vapour – phase deposition การเคลือบผิวด้วยวิธีนี้จะช่วยลดการสึกหรอบนผิวคาย (Crater wear) และสามารถทำการตัดเฉือนด้วยความเร็วตัดและอัตราป้อนสูงๆได้ สารเคลือบที่มีการนำเสนอและใช้กันอย่างแพร่หลายคือ ไทเทเนียมคาร์ไบด์ (Titanium Carbide, TiC), ไททาเนียมไนไตรด์ (Titanium Nitrid, TiN), และอลูมินา (Alumina, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ในระหว่างปี ค.ศ. 1970 ได้มีการเคลือบหลายชั้น (Multi – coated grades) เกิดขึ้น โดยยังคงใช้สารเคลือบชนิดเดิมแต่มีการเคลือบเป็นชั้นย่อยๆ และในช่วงปี ค.ศ. 1975 ถึง ค.ศ. 1984 ได้มีการนำวัสดุโพลีคริสตอลไลน์ไดมอนด์ (Polycrystalline diamond, PCD) และคิวบิกโบรอนไนไตรด์ (Cubic boron nitride, CBN) โดยบริษัทผู้นำทางด้านการผลิตเครื่องมือตัดเข้ามาใช้ ซึ่งโครงสร้างพื้นฐานของวัสดุชนิดนี้ประกอบด้วยซินเตอร์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่มีโคบอลต์ (Cobalt, Co) เป็นตัวประสานและมี PCD หรือ CBN เคลือบอยู่ ชั้นของ PCD หรือ CBN จะมีขนาดเกรนเล็ก



ภาพที่ 2.14 วิธีการเคลือบผิวและโลหะวิทยาของมิดอินเสิร์ต

ที่มา : ธวัชชัย อัจจุรงค์. “การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความเรียบผิวในการกลึงเหล็กหล่อเหนียว FCD450.” (วิทยานิพนธ์ปริญญาครุศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2550), 25.

จากภาพที่ 2.14 เป็นการเคลือบผิวด้วย TiC ใช้ความหนา 0.005 มิลลิเมตร และในการเคลือบด้วย Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ใช้ความหนา 0.001 มิลลิเมตรวิธีการเคลือบผิวของเครื่องมือตัดแบบนี้เป็นที่นิยมใช้กันดังแสดงในภาพที่ 2.14ซึ่งเป็นวิธีการเคลือบมิดกลึงคาร์ไบด์ เป็นการประยุกต์กระบวนการ Chemical vapor deposition (CVD) ขบวนการนี้จะเกิดข้อบกพร่องเมื่อใช้เคลือบมิดกัด เพราะขบวนการเคลือบผิวแบบ CVD จะได้ผลก็ต่อเมื่อใช้อุณหภูมิในการเคลือบประมาณ 1000 °C และที่

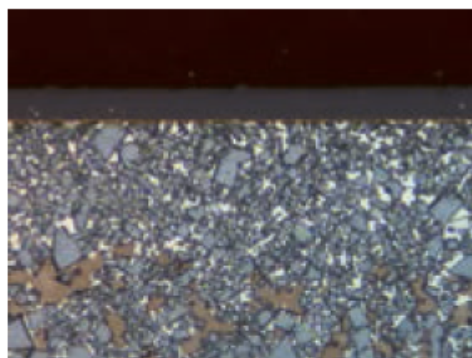
อุณหภูมินี้เป็นสาเหตุทำให้ความเหนียวของเครื่องมือตัดลดลง นั่นคือทำให้ความเปราะเพิ่มมากขึ้น และเป็นสาเหตุที่ทำให้มุมของเครื่องมือตัดเสียหาย จากผลลัพธ์เหล่านี้ จึงทำให้ส่วนมากเมื่อจะทำการเคลือบผิวของมีดตัดอินเสิร์ตและมีดกัด ด้วยกระบวนการเคลือบแบบ CVD จะต้องทำการลบมุมของเครื่องมือตัดก่อน แต่อย่างไรก็ตามยังมีกระบวนการเคลือบผิวที่เหมาะสมสำหรับมีดกัด กระบวนการนี้เรียกว่า Physical vapor deposition (PVD) เป็นขบวนการเคลือบที่ใช้อุณหภูมิต่ำกว่าขบวนการเคลือบแบบ CVD คือใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 500 °C หลักการพื้นฐานของขบวนการเคลือบแบบ CVD และ PVD แสดงในภาพที่ 2.14 (Smith, 1988)

## 6. เม็ดมีดกลึง

6.1 DCMT11T304-M25 CTPM125 โดยลักษณะทางกายภาพจะแสดงดังภาพที่ 2.15 และ โครงสร้างเม็ดเกรนในภาพที่ 2.16



ภาพที่ 2.15 เม็ดมีดกลึง DCMT11T304-M25 CTPM125



ภาพที่ 2.16 เม็ดเกรนของการเคลือบผิว CTPM125

ที่มา : CERATIZIT. **Main catalogue.** Luxembourg: n.p., 2016.

Coating CTPM125 เป็นการเคลือบผิวแบบ PVD (Physical Vapor Deposition) โดยวิธีการเคลือบผิวแบบนี้ ถูกนำมาเข้ามาทดแทนการเคลือบผิวของ Insert Carbide เดิมที่ใช้งานอยู่ โดย

จากเดิมได้เป็นการเคลือบผิวแบบ CTC 2135 ซึ่งเป็นแบบ CVD (Chemical Vapor Deposition) โดย CTPM 125 จะเป็นการเคลือบผิวแบบ TiN / TiAlN มีขนาดเม็ดเกรน 1 – 2  $\mu\text{m}$ . มีความแข็งเท่ากับ 1460HV และมีส่วนประกอบเป็น Co 9.6%, mixed carbides 7.8%, other 0.4%, WC balance (CERATIZIT Cutting tool main Catalog; 2015)

#### 6.2 DCMT11T304GP TN6020

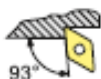
จะมีลักษณะทางกายภาพเหมือนกับ DCMT11T304-M25 CTPM125 แต่จะแตกต่างที่คุณสมบัติภายในทั้งหมด โดยดูได้จาก DCMT11T304 ส่วน GP จะเป็นการบอกรูปแบบการหักเหที่ปลายมีด และ TN6020 คือจะมีส่วนประกอบหลักเป็น TiCN ไม่มีกรรมวิธีการเคลือบผิว วัสดุพื้นฐานมีความแข็ง 1500 HV และมีสีเทาโดยลักษณะทางกายภาพจะแสดงดังภาพที่ 2.17



ภาพที่ 2.17 เม็ดมีดกลึง DCMT11T304GP TN6020

#### 7. ด้ามมีดกลึง SDJR 2525 M11

ด้ามมีดกลึงที่ใช้จับยึดเม็ดมีดกลึงนั้นจะใช้รหัส SDJR 2525 M11 แสดงดังภาพที่ 2.18



ภาพที่ 2.18 ด้ามมีดกลึง SDJCR 2525 M11

ที่มา : CERATIZIT. **Main catalogue.** Luxembourg: n.p., 2016.



## 2.5 การวัดและการตรวจสอบความเรียบผิว

การทำงานของเครื่องจักรแต่ละประเภท จะทำให้ผิวของชิ้นงานมีคุณภาพที่แตกต่างกัน โดยทั่วไปจะระบุพื้นผิวที่จะต้องผ่านเครื่องมือกลเอาไว้ เพื่อให้สามารถตีความละเอียดและควบคุมคุณภาพของผิวงานได้อย่างถูกต้อง (นริศ ศรีเมฆ, 2546) รูปแบบโดยทั่วไปของผิวมีคำศัพท์ทางเทคนิคหลายคำเกี่ยวกับพื้นผิวที่ควรรู้จัก

พื้นผิว (Surface) หมายถึง ส่วนนอกสุดของวัตถุ (Body) ที่จะสัมผัสกับอากาศ (Space) หรือสัมผัสเกี่ยวข้องกับวัตถุอื่น พื้นผิวของวัตถุส่วนมากจะมีลักษณะเป็นเหมือนเกลียวคลื่น (wave length) ยาวผสมกับละลอกคลื่นที่มีความยาวคลื่นสั้น

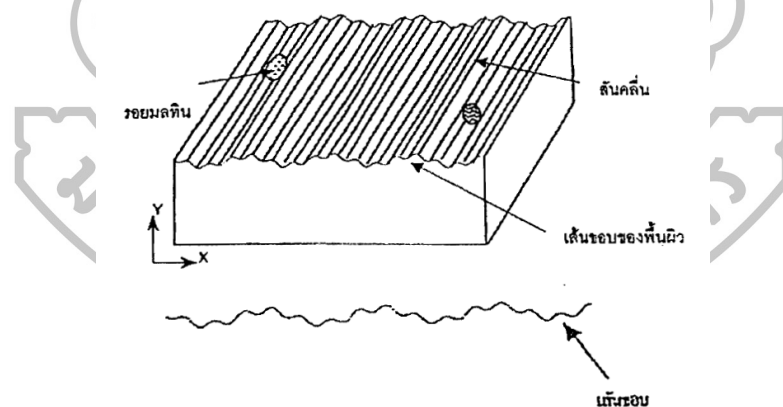
ความเป็นคลื่น (Waviness) หมายถึง เกลียวคลื่นที่มีช่วงคลื่นยาว ความเป็นคลื่นส่วนมากจะมีลักษณะเป็นคลื่นไซน์ (Sine Wave) จึงอาจจะแสดงได้โดยขนาด (Amplitude) ของคลื่น และโดยค่าความยาวคลื่น

ความขรุขระ (Roughness) หมายถึง ละลอกคลื่นที่มีช่วงคลื่นสั้น ความขรุขระผิวอาจจะแสดงได้โดยขนาด (Amplitude) ของคลื่น และโดยค่าความยาวคลื่น

เส้นขอบ (Profile) เป็นเส้นแสดงพื้นผิวเมื่อถูกตัดตามแนวขวาง

รอยมลทิน (Flaw) หมายถึง ริ้วรอยที่เกิดขึ้นอย่างไม่มีทิศทางแน่นอน มีจำนวนน้อย และจะไม่นำมาพิจารณาในการคำนวณ หรือในการวัดค่าความขรุขระ

โดยจะแสดงรูปภาพลักษณะเส้นขอบพื้นผิวต่างๆที่เกิดขึ้น ในภาพที่ 2.19



ภาพที่ 2.19 ลักษณะเส้นขอบของพื้นผิว (Surface Profile)

ที่มา : ชาญ ราชวงศ์. “การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพผิวงานในการกลึงงานแข็ง.” (วิทยานิพนธ์ปริญญาครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2548), 28.

การวัดค่าความขรุขระของพื้นผิว โดยปกติแล้วจะใช้เครื่องมือที่มีปลายลักษณะคล้ายเข็มลากอย่างช้า ๆ ผ่านไปบนแกนนอน (แกน X) ของพื้นผิวที่จะวัดค่าความขรุขระ การเคลื่อนที่ของปลายเข็มในแนวตั้ง (Ya) จะเป็นไปตามลักษณะเส้นขอบของพื้นผิว (Surface Profile) ดังแสดงในภาพที่ 2.20 จากนั้นจะมีระบบบันทึกค่า X และ Ya ไว้ในหน่วยความจำ และระบบคำนวณค่าอิทธิพล

ของความเป็นคลื่น (Waviness) ที่มีขนาด  $Y_w$  ในแนวตั้ง จากนั้นวงจรถ้าจะลบค่าอิทธิพลของความเป็นคลื่นออก จะเหลือเฉพาะค่าในแกนตั้งอันเนื่องมาจากความขรุขระ ( $Y$ ) ซึ่งจะนำไปคำนวณหาค่าความขรุขระต่อไป นั่นคือ  $Y = Y_a - Y_w$

การคำนวณหาค่า  $Y$  จะทำโดยอัตโนมัติ ค่า  $X$  และ  $Y$  ที่บันทึกไว้ในขั้นนี้ เป็นเพียงแต่ค่าของพื้นผิวจำลองที่เป็นผลมาจากความขรุขระ ยังไม่ใช่ค่าความขรุขระจะต้องนำไปคำนวณต่อไปอีกเพื่อหาความขรุขระ

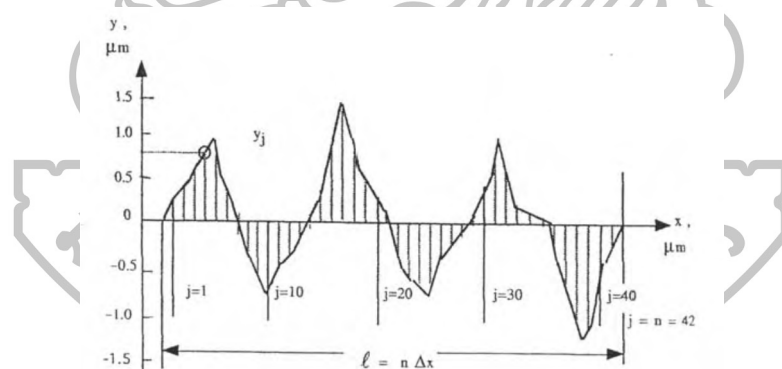
1. ค่าเฉลี่ยทางเลขคณิต (Arithmetic Average,  $R_a$ ) ถ้าลากเส้นในแนวนอนผ่านกึ่งกลางของเส้นขอบรูปที่ตัดค่าความเป็นคลื่นออก จนเหลือแต่ความขรุขระ หรือ

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y| dx \tag{สมการที่ 2.1}$$

หรือ ถ้าแบ่งระยะทาง  $l$  ออกเป็น  $n$  ส่วน โดยที่  $n$  มีค่าสูงพอ จะพบว่า

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |y_j| \tag{สมการที่ 2.2}$$

ค่าเฉลี่ยทางเลขคณิต  $R_a$  เป็นค่าที่นิยมใช้ระบุความขรุขระของพื้นผิวมาแต่ดั้งเดิมก่อนค่าอื่นๆ และเป็นที่ยอมรับกันดี และใช้กันมากจนกระทั่งปัจจุบัน แต่ต่อมามีการนำเอาตัวแปรอื่นๆ มาใช้ระบุค่าความขรุขระเพิ่มเติมอีก เพื่อให้การพิจารณาค่าความขรุขระมีหลายมุมมองยิ่งขึ้น



ภาพที่ 2.20 ตัวอย่างการแบ่งเส้นขอบของผิวเป็นส่วนย่อยๆ

ที่มา : ชาญ ราชวงศ์. “การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพผิวงานในการกลึงงานแข็ง.” (วิทยานิพนธ์ปริญญาครุศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2548), 29.

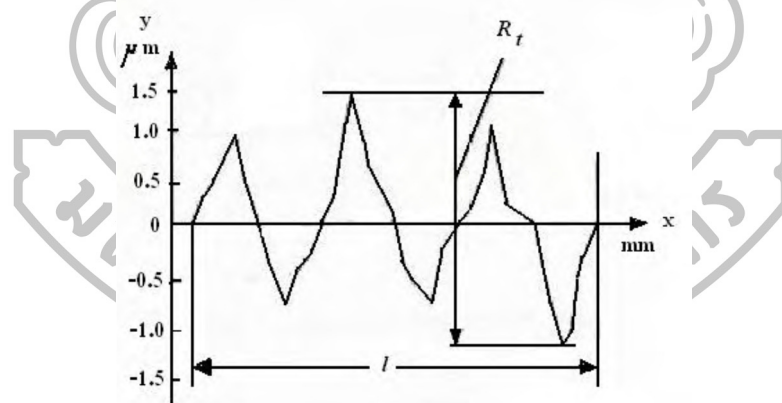
2. ค่าเฉลี่ยรูทมีนสแควร์ (Root Mean Square Average,  $R_q$  หรือ  $R_{rms}$ ) การคำนวณหาค่าความขรุขระตามวิธีรูทมีนสแควร์ เป็นความพยายามที่จะนำเอาหลักการทางสถิติมาใช้ในการวัดค่าความขรุขระ โดยใช้สูตรการคำนวณ อาศัยหลักการยกกำลังสองของ  $Y$  เพื่อหาค่า  $Y$  ที่มีค่าลบกลายเป็นค่าบวกของ  $Y$  จากนั้นหาค่าเฉลี่ยของ  $Y$  แล้วจึงถอดรูทฐานสอง เพื่อให้หน่วยของการวัดเป็นหน่วยของการวัดเป็นหน่วยยกกำลังหนึ่ง ซึ่งเป็นหน่วยตามปกติที่คุ้นเคยกันค่าความขรุขระตามวิธีรูทมีนสแควร์  $R_q$  หรือ  $R_{rms}$  หาได้จากสมการต่อไปนี้

$$R_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y^2} \quad \text{สมการที่ 2.3}$$

3. ค่าระหว่างยอดสูงสุดกับก้นร่องต่ำสุด (Maximum Distance Between Peak to Valley,  $R_t$ ) ค่า  $R_t$  เท่าที่วัดได้จากความยาว  $l$  ที่วัดจากพื้นผิว ได้แสดงไว้โดยภาพที่ 2.21 ค่า  $R_t$  หาได้ ดังนี้  $R_t = 1.5 + 1.2 = 2.7 \mu\text{m}$ . ค่า  $R_t$  มีความหมายในการปฏิบัติงาน คือ เป็นค่าที่จะบอกได้ว่า ในการจะขจัดเนื้อผิวตัวอย่างนี้ จะต้องขจัดเนื้อผิวออกเป็นความลึกไม่น้อยกว่าค่า  $R_t$  จึงจะทำลายผิวเดิมได้หมด แต่เนื่องจากค่า  $R_t$  วัดได้ไม่แน่นอนเพราะเป็นค่าสูงสุดค่าเดียวซึ่งจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของพื้นผิวที่วัด จึงนิยมวัดค่าเฉลี่ย  $R_z$  แทนค่า  $R_t$  โดยให้  $R_z$  เป็นค่าเฉลี่ยของค่าความสูงของระหว่างยอดสูงสุดกับก้นร่องต่ำสุด จากค่าสูงสุดที่วัดได้ 5 ค่าแรกถ้าค่า  $h_1, h_2, h_3, h_4$  และ  $h_5$  เป็นค่าความสูงระหว่างยอดสูงสุดกับก้นร่องต่ำสุดโดยเป็นค่าสูงสุด 5 ค่าแรก เท่าที่วัดได้จากความยาว  $l$  ที่วัดได้จากพื้นผิว ดังได้แสดงไว้โดยภาพที่ 2.22 ดังนั้น ค่า  $R_z$  คำนวณได้จาก

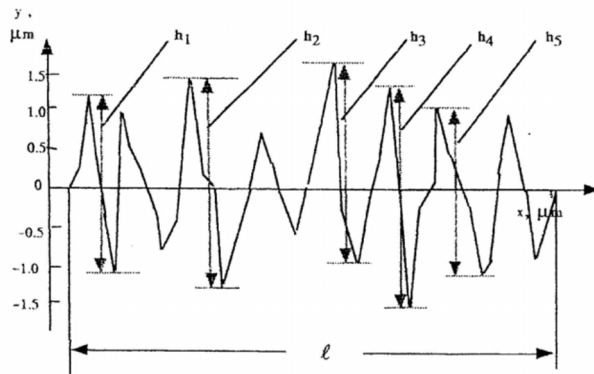
$$R_z = \frac{1}{5} \sum_{j=1}^5 h_j = \frac{1}{5} [h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5] \quad \text{สมการที่ 2.4}$$

ยังมีวิธีวัดค่าความขรุขระวิธีอื่นอีกหลายวิธี แต่ไม่สู้จะเป็นที่นิยมมากนัก จึงจะไม่นำมาพิจารณา (ศุภโชค, 2543)



ภาพที่ 2.21 ค่าระหว่างยอดสูงสุดกับก้นร่องต่ำสุด  $R_t$

ที่มา : ชาญุ ราขวงศ์. “การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพผิวงานในการกลึงงานแข็ง.” (วิทยานิพนธ์ปริญญาครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2548), 30.



รูปที่ 2.22 ค่าระหว่างยอดสูงสุดกับก้นร่องต่ำสุด 5 ค่าแรก  $R_z$   
 ที่มา : ชาญ ราชวงศ์. “การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพผิวงานในการกลึงงานแข็ง.” (วิทยานิพนธ์  
 ปริญญาครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม  
 และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2548), 30.

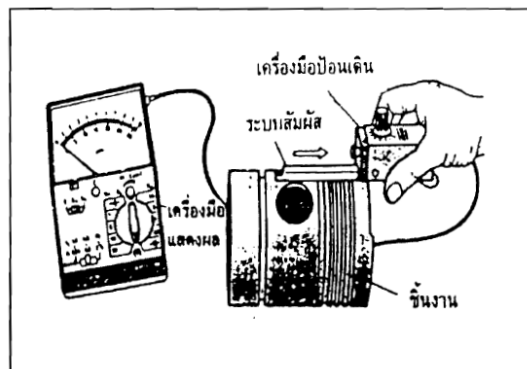
เครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าความหยาบผิวของผิวงาน

1. แผ่นเทียบผิว มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีสัญลักษณ์บอกระดับความหยาบไว้ เมื่อใช้งานจะต้องนำแผ่นเทียบผิวไปเปรียบเทียบกับผิวชิ้นงาน ก็สามารถอ่านค่าความหยาบผิวได้จากแผ่นเทียบผิวดังแสดงในภาพที่ 2.23

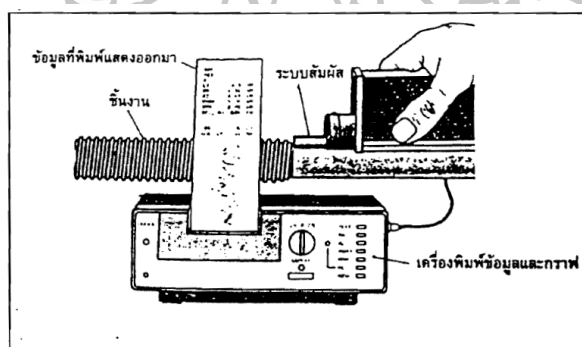
$R_a$ µm	0.4	0.8	1.6	3.2	6.3	12.5	25.0	50.0
$R_z$ µm	2.5	6.3	10	25	40	63	100	160
งาน กลึง								
เกรด	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12
	▽		▽		▽			

ภาพที่ 2.23 แผ่นเทียบผิว  
 ที่มา : ธวัชชัย อัจปรุ. “การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความเรียบผิวในการกลึงเหล็กหล่อเหนียว  
 FCD450.” (วิทยานิพนธ์ปริญญาครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม  
 คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2550), 36.

2. เครื่องวัดความหยาบผิว เป็นเครื่องวัดที่ทำด้วยระบบไฟฟ้าสามารถวัดค่าความหยาบผิวเป็นตัวเลขหรือแสดงเป็นกราฟก็ได้โดยบอกค่าความหยาบเป็น  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_t$  ได้อีกด้วยดังแสดงในภาพที่ 2.24 และภาพที่ 2.25 (นริศ, 2546)



ภาพที่ 2.24 เครื่องมือวัดความหยาบผิวแบบแสดงผลที่หน้าปัด  
 ที่มา : ธวัชชัย อัจจุปรุ. “การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความเรียบผิวในการกลึงเหล็กหล่อเหนียว FCD450.” (วิทยานิพนธ์ปริญญาครุศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2550), 37.



ภาพที่ 2.25 เครื่องวัดความหยาบผิวแบบพิมพ์ข้อมูลและกราฟ  
 ที่มา : ธวัชชัย อัจจุปรุ. “การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความเรียบผิวในการกลึงเหล็กหล่อเหนียว FCD450.” (วิทยานิพนธ์ปริญญาครุศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2550), 37.

## 3. ตารางเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวตามมาตรฐาน DIN กับ ISO

ตารางที่ 2.2 สัญลักษณ์ผิวงานตามมาตรฐาน DIN 3141; ISO 1302

ความหมาย DIN 140	เครื่องหมายผิว	ค่าเฉลี่ยความหยาบ เป็นช่วงๆ Rz หน่วย $\mu_m$				ความหยาบเฉลี่ย Rz หน่วย $\mu_m$						
		R1	R2	R3	R4	R1	R2	R3	R4			
ผิวเรียบ ซึ่งผ่านการผลิตด้วย กรรมวิธี ไร้อากาศ		เท่าใดก็ได้				ผิวเรียบ						
ผิวหยาบ สัมผัสความหยาบ ได้ด้วยมือและมองเห็น		160	100	63	25	25	12.5	6.3	3.2			
ผิวละเอียดปานกลาง สามารถมองเห็นความหยาบ ด้วยตาเปล่า		40	25	16	10	6.3	3.2	1.6	1.6			
ผิวละเอียดไม่สามารถ มองเห็นด้วยตาเปล่า		16	6.3	4	2.5	1.6	0.8	0.4	0.2			
ใน DIN 140 ไม่มี เครื่องหมายนี้		-	1	1	0.4	-	0.1	0.1	0.025			
ชั้นความหยาบ	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12
Ra หน่วย $\mu_m$	.025	0.05	0.1	0.2	0.4	0.8	1.6	3.2	6.3	12.5	25	50

ที่มา : ธวัชชัย อาจปฐ. “การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความเรียบผิวในการกลึงเหล็กหล่อเหนียว FCD450.” (วิทยานิพนธ์ปริญญาครุศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2550), 38.

ประเภทของการตัดจำแนกตามความเรียบผิวของผิวสำเร็จ

1. การตัดหยาบ(Rough Cutting) หมายถึง การตัดที่ต้องการให้งานเสร็จอย่างรวดเร็ว แต่ไม่เน้นเรื่องการทำให้อายุการใช้งานยาว ไม่เน้นความแม่นยำหรือความละเอียดของพื้นผิวสำเร็จของชิ้นงาน งานส่วนมากในการตัดโดยใช้เม็ดมีดตัด มักจะเป็นการตัดหยาบใช้ความเร็วในการตัดค่อนข้างสูง อัตราป้อนสูง และความลึกในการตัดมากเป็นผลให้ใช้แรงตัดสูง ใช้กำลังในการตัดสูงและอาจจะต้องฉีดน้ำหล่อเย็นที่มีสมบัติของการหล่อเย็นหรือการลดแรงตัดได้ดี ทั้งนี้เพราะต้องการให้งานเสร็จเร็วหลังจากงานตัดหยาบแล้วอาจจะต้องมีการตัดละเอียดหรือการเจียรนัยอีกครั้งหนึ่ง

2. การตัดละเอียด (Fine Cutting) หมายถึง การตัดที่ต้องการให้ค่าความเรียบผิวที่ดีและเน้นความแม่นยำหรือความละเอียดของพื้นผิวสำเร็จของชิ้นงาน ไม่เน้นให้งานเสร็จอย่างรวดเร็ว แต่ถ้าเสร็จรวดเร็วก็เป็นการดี งานในลักษณะนี้เกิดขึ้นเป็นงานในขั้นตอนต่อเนื่องจากการตัดหยาบหรือเป็นการตัดครั้งสุดท้ายใช้ความเร็วในการตัดสูง หรือต่ำก็ได้ แล้วแต่ความเหมาะสม อัตราป้อนต่ำและความลึกในการตัดต่ำหรือปานกลาง แรงและกำลังที่ใช้ตัดมีดจะมีค่าน้อยจนไม่ก่อให้เกิดปัญหามักจะต้องฉีดน้ำหล่อเย็นเพื่อขจัดฝอยออกจากบริเวณของการตัดอย่างรวดเร็วเพื่อให้ได้ความเรียบผิวที่ดีของพื้นผิวสำเร็จ

3. การตัดปานกลาง (Medium Cutting) เป็นการตัดที่อยู่ตรงกลางระหว่างการตัดหยาบและการตัดละเอียด คือ ต้องการให้งานเสร็จ และไม่เน้นความเรียบผิวมากนัก ซึ่งอาจทำได้ในบางกรณีโดยการเลือกค่าความเร็วในการตัด อัตราป้อนและความลึกในการตัดที่เหมาะสม

องค์ประกอบที่มีผลต่อความเรียบผิวงาน

คุณภาพผิวงานที่จะทำการตัดเฉือน สามารถกำหนดได้ว่าต้องการให้ผิวงานที่ได้ มีลักษณะอย่างไร จึงจะเหมาะสมกับการใช้งาน ซึ่งสมบัติดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบดังต่อไปนี้

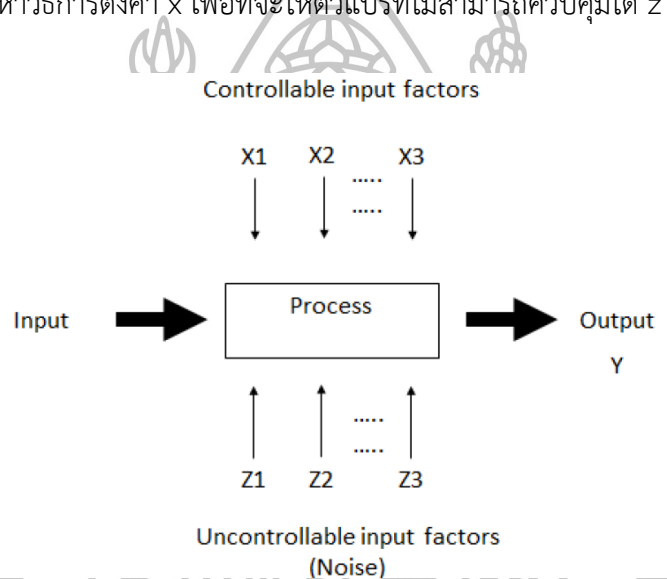
1. ความแข็งแรงของเครื่องจักร และความเที่ยงตรงของวัสดุรองรับ (Bearing)
2. คุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการตัดเฉือนเป็นผิวสำเร็จของวัสดุงาน
3. ชนิด ประเภท และลักษณะของวัสดุมีด
4. การเลือกใช้วัสดุน้ำมันตัดเฉือน
5. ลักษณะการเกิดเศษ
6. มุมมีดที่ใช้
7. ตัวแปรที่ใช้ในการตัดเฉือน ได้แก่ อัตราป้อน ความลึกรอยตัด และความเร็วตัด (ศุภโชค, 2543)

## 2.6 ทฤษฎีทางสถิติ

การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) คือ การทดสอบหรือชุดของการทดสอบที่มีวัตถุประสงค์ที่จะเปลี่ยนปัจจัย (factor) นำเข้าของกระบวนการ เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงที่จะเกิดขึ้นของผลตอบสนอง (response) ดังแสดงในภาพที่ 2.26 มีวัตถุประสงค์หลักคือต้องการพัฒนากระบวนการที่มีความเข้มแข็งโดยกระบวนการ คือ การรวมเอาคนงาน เครื่องจักร วิธีการ หรือทรัพยากรอื่นๆ เข้าด้วยกัน เพื่อเปลี่ยนปัจจัยขาเข้า เช่น วัตถุดิบ ไปสู่ผลลัพธ์ขาออกที่มี

ผลตอบออกมาหนึ่งผลตอบ หรือมากกว่าก็ได้ ซึ่งปัจจัยบางชนิดเป็นปัจจัยที่เราสามารถควบคุมได้ในขณะที่ปัจจัยบางชนิดไม่สามารถควบคุมได้ โดยกำหนดให้ตัวแปร  $x_1, x_2, \dots, x_p$  เป็นตัวแปรที่สามารถควบคุมได้ (controllable) ขณะที่แปร  $z_1, z_2, \dots, z_p$  เป็นตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ (uncontrollable) และบางครั้งเรียกว่า ปัจจัยรบกวน (noise) ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการทดลองมีดังนี้ (Montgomery, 2005)

1. การหาตัวแปรที่มีอิทธิพลมากที่สุดต่อผลตอบ  $y$
2. การหาวิธีการตั้งค่า  $x$  ที่มีผลต่อค่าผลตอบ  $y$  เพื่อให้ได้ค่า  $y$  ตามต้องการ
3. การหาวิธีการตั้งค่า  $x$  เพื่อที่จะให้เกิดความแปรปรวนในค่า  $y$  น้อยที่สุด
4. การหาวิธีการตั้งค่า  $x$  เพื่อที่จะให้ตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้  $z$  มีค่าต่ำสุด



ภาพที่ 2.26 แบบจำลองทั่วไปของกระบวนการ

ที่มา: Douglas C. Montgomery, *Introduction to Statistic Quality Control*, 6th ed (John Wiley & Son Inc., 2009): 15.

หลักการพื้นฐาน 3 ประการ สำหรับการออกแบบการทดลอง คือ การทดลองซ้ำ (replication), การสุ่มตัวอย่าง (randomization) และ การสร้างปัจจัยกลุ่ม (blocking)

1. การทดลองซ้ำ (replication) คือ การทำเพื่อให้ทราบตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ จำนวนซ้ำของการทดลองจะทำให้มีโอกาสที่จะพบผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ (signal) ในขอบเขตของความแปรปรวนในกระบวนการทางธรรมชาติ (noise) ซึ่งมีสมบัติที่สำคัญ 2 ประการคือ สามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดในการทดลองได้ ตัวประมาณค่าความผิดพลาดนี้กลายเป็นหน่วยของการวัดขั้นพื้นฐานสำหรับพิจารณาว่าความแตกต่างของข้อมูลที่ได้จากการทดลองนั้นมีความแตกต่างกันในเชิงสถิติหรือไม่ และถ้าค่าเฉลี่ยถูกนำมาใช้เพื่อประมาณผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งในการทดลอง ดังนั้นการทดลองซ้ำทำให้ผู้ทดลองสามารถหาตัวประมาณที่ถูกต้องยิ่งขึ้นในการประมาณผลกระทบนี้

2. การสุ่มตัวอย่าง (randomization) หมายถึง การทดลองที่มีทั้งวัสดุที่ใช้ในการทดลอง และลำดับของการทดลองแต่ละครั้งเป็นแบบสุ่ม (random) วิธีการเชิงสถิติกำหนดว่าข้อมูล (หรือ



ความผิดพลาด) จะต้องเป็นตัวแปรแบบสุ่มที่มีการกระจายแบบอิสระ การสุ่มตัวอย่างจะทำให้สมมติฐานเป็นจริง และยังทำให้สามารถลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจปรากฏในการทดลอง

3. การสร้างปัจจัยกลุ่ม (blocking) เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรง (precision) ให้แก่การทดลอง กลุ่มหนึ่งอาจจะหมายถึงส่วนหนึ่งของวัสดุที่ใช้ในการทดลองที่ควรจะมีความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันมากกว่าเซตทั้งหมดของวัสดุ การเปรียบเทียบเงื่อนไขที่น่าสนใจต่างๆ ภายในแต่ละกลุ่มจะเกิดขึ้นได้ซึ่งทำให้ทราบแหล่งของความแปรปรวนโดยการแบ่งอันดับการทดลองให้อยู่ในกลุ่มเดียวกันที่มีความคล้ายกันและใช้หลักการทางพีชคณิตแยกความแตกต่างออกมาจะทำให้เพิ่มความไวต่อการออกแบบการทดลอง (ปารเมศ, 2545) ข้อดีของการออกแบบการทดลองคือ ให้ผลของความแม่นยำและความถูกต้องในการวิเคราะห์ข้อมูลได้อย่างสูง โดยสามารถระบุออกมาเป็นค่าตัวเลขทางสถิติที่แสดงถึงระดับความสำคัญของตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการ นอกจากนี้ยังมีความรวดเร็วในการดำเนินการตรวจสอบสาเหตุของปัญหาการใช้วิธีการเชิงสถิติในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ทุกคนที่เกี่ยวข้องจะต้องมีความเข้าใจล่วงหน้าว่า เรา กำลังศึกษาอะไรอยู่จะเก็บข้อมูลได้อย่างไรและจะวิเคราะห์ข้อมูลที่เก็บได้นั้นอย่างไร ขั้นตอนในการดำเนินงานอาจจะทำได้ดังต่อไปนี้

1. ทำความเข้าใจถึงปัญหา พัฒนาแนวคิดเกี่ยวกับวัตถุประสงค์ของการทดลอง และบ่อยครั้งที่เราจะต้องหาข้อมูลสำหรับป้อนเข้าจากบุคคลที่มีความรู้ความชำนาญในแต่ละด้าน นั้นเป็นองค์ประกอบหนึ่งของการออกแบบการทดลองเพราะเป็นจุดเริ่มต้นของการดำเนินงานคือ การใช้ประสบการณ์คาดคะเนว่าปัจจัยใดบ้างที่น่าจะมีผลต่อปัญหาที่เราสนใจ ถ้าหากไม่มีในส่วนของประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญเข้ามาเกี่ยวข้อง การออกแบบการทดลองก็ยังคงดำเนินต่อไปแต่จะใช้เวลาที่นานขึ้นเพราะต้องเสียเวลาในการตรวจสอบทุกๆ ปัจจัยที่มีอยู่ทั้งหมด

2. เลือกปัจจัย ระดับ และขอบเขตผู้ทดลองต้องเลือกปัจจัยที่จะนำมาเปลี่ยนแปลงในระหว่างทำการทดลอง กำหนดขอบเขตที่ปัจจัยเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลง และกำหนดระดับ (level) ที่จะเกิดขึ้นในการทดลอง จะต้องพิจารณาด้วยว่าจะควบคุมปัจจัยเหล่านี้ ณ จุดที่กำหนดได้อย่างไร และจะวัดผลตอบโต้ได้อย่างไรดังนั้นในกรณีเช่นนี้ผู้ทดลองจะต้องมีความรู้เกี่ยวกับกระบวนการอย่างมากซึ่งความรู้นี้อาจจะได้มาจากประสบการณ์และความรู้จากทางทฤษฎี มีความจำเป็นที่เราจะต้องตรวจสอบดูว่า ปัจจัยที่กำหนดขึ้นมานี้มีความสำคัญหรือไม่ และเมื่อวัตถุประสงค์ของการทดลองคือการกรองปัจจัย (screening) ซึ่งต้องเลือกวิธีการคัดกรองปัจจัยให้เหมาะสมกับการทดลอง และควรที่จะกำหนดให้ระดับต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองมีจำนวนน้อยๆ การเลือกขอบเขตของการทดลองก็มีความสำคัญเช่นกัน ในการทดลองเพื่อกรองปัจจัยเราควรเลือกขอบเขตให้มีความกว้างมากๆ หมายถึงว่าขอบเขตที่ปัจจัยแต่ละตัวจะเปลี่ยนแปลงได้ควรมีค่ากว้างๆ และเมื่อเราได้เรียนรู้เพิ่มขึ้นว่า ตัวแปรใดมีความสำคัญและที่ระดับใดที่ทำให้เกิดผลลัพธ์ที่ดีที่สุด เราอาจจะลดขอบเขตให้แคบลงได้

3. เลือกตัวแปรตอบสนอง ในการเลือกตัวแปรตอบสนองผู้ทดลองควรจะแน่ใจว่าตัวแปรนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการที่กำลังศึกษาอยู่ บ่อยครั้งที่ค่าเฉลี่ยหรือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (หรือทั้งคู่) ของกระบวนการจะเป็นตัวแปรตอบสนอง เป็นไปได้ว่าในการทดลองหนึ่งอาจมีตัวแปรตอบสนองหลายตัว และมีความจำเป็นอย่างมากที่เราจะต้องกำหนดให้ได้ว่า อะไรคือตัวแปรตอบสนอง และจะวัดตัวแปรเหล่านี้ได้อย่างไร ก่อนที่จะเริ่มดำเนินการทดลองจริง

4. เลือกรูปแบบการทดลอง ถ้ากิจกรรมการวางแผนก่อนการทดลองทำได้ถูกต้อง ขั้นตอนนี้จะง่ายขึ้น การเลือกรูปแบบการทดลองที่เกี่ยวข้องกับการพิจารณาขนาดของตัวอย่าง (จำนวนการทำซ้ำ) การเลือกลำดับที่เหมาะสมของการทดลองที่จะใช้ในการเก็บข้อมูล และการตัดสินใจว่าควรจะใช้วิธีการสร้างปัจจัยกลุ่มหรือการสุ่มตัวอย่าง อย่างใดอย่างหนึ่งหรือไม่ ในการเลือกรูปแบบ เราจำเป็นต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ของการทดลองอยู่ตลอดเวลา ในการทดลองทางวิศวกรรมส่วนมาก เราจะทราบตั้งแต่เริ่มต้นแล้วว่า ปัจจัยบางตัวจะมีผลต่อค่าตอบสนองที่เกิดขึ้น ดังนั้นเราจะหาว่าปัจจัยตัวใดที่ทำให้เกิดความแตกต่าง และประมาณขนาดของความแตกต่างที่เกิดขึ้น

5. ทำการทดลอง เมื่อทำการทดลองเราจะต้องทำการทดลองอย่างระมัดระวัง เพื่อให้แน่ใจว่าการดำเนินการทุกอย่างเป็นไปตามการทดลองที่ได้ออกแบบไว้ ถ้ามีอะไรผิดพลาดเกิดขึ้นเกี่ยวกับการทดลองในขั้นตอนนี้จะทำให้การทดลองที่ทำนั้นใช้ไม่ได้ ดังนั้นการวางแผนในตอนแรกจะมีความสำคัญอย่างมากต่อความสำเร็จที่จะเกิดขึ้น

6. วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ ใช้วิธีการทางสถิติมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อว่าผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้นจะเป็นตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง ถ้าการทดลองได้ถูกออกแบบไว้เป็นอย่างดี และถ้าเราทำการทดลองตามที่ได้ออกแบบไว้ วิธีการทางสถิติที่จะนำมาใช้นั้นจะเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อน ข้อได้เปรียบของวิธีการทางสถิติ เป็นเครื่องช่วยในการตัดสินใจอย่างมีประสิทธิภาพ และถ้าเรานำเอาวิธีการทางสถิติมาผนวกกับความรู้ทางวิศวกรรม ความรู้เกี่ยวกับกระบวนการ จะทำให้ข้อสรุปที่ได้ออกมานั้นมีเหตุผลสนับสนุนและมีความน่าเชื่อถือ

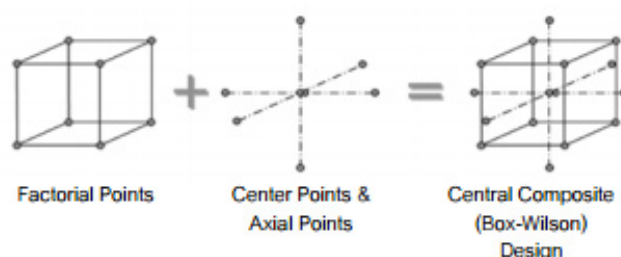
7. ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ เมื่อเราได้วิเคราะห์ข้อมูลเรียบร้อยแล้ว ผู้ทดลองจะต้องหาข้อสรุปในทางปฏิบัติและแนะนำแนวทางของ นอกจากนี้แล้วการทำทดลองเพื่อยืนยันผล (confirmation testing) ควรจะทำการขึ้นเพื่อที่จะตรวจสอบความถูกต้องของข้อสรุปที่เกิดขึ้นอีกด้วย (ปารเมศ, 2545)

### 2.6.1 วิธีการตัวแปรผิวสะท้อน (Response Surface Methodology)

วิธีการหาพื้นผิวสะท้อน เป็นวิธีการที่ใช้ในการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Condition) ของระบบหรือกระบวนการผลิต โดยอาศัยการสร้างแบบจำลอง (Mathematical Model) และการวิเคราะห์ข้อมูลที่มีอยู่ ผลตอบสนองของปัญหาเป็นความสัมพันธ์ หรือฟังก์ชันของหลายปัจจัย หรือตัวแปรอิสระโดยมีเป้าหมายเพื่อหาระดับของปัจจัยต่างๆ ที่ทำให้ผลตอบสนองมีค่าเหมาะสมที่สุด ซึ่งโดยปกติจะหาค่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการผลิตซึ่งทำให้ค่าเฉลี่ย (Mean) ของผลตอบสนองมีค่าเหมาะสมที่สุด (ประไพศรี, 2551)

การออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design of Experiment; CCD เป็นการทดลองที่ 3 ระดับ (แทนด้วยสัญลักษณ์ -1, 0, +1) กล่าวคือ จะปรับตัวแปรที่ต้องการศึกษาไปตัวแปรละ 3 ค่า แต่จะมีการปรับตัวแปรแบบ Full Combination หรือ Full Factorial โดยจะเลือกเพียงบาง Runs หรือบางสภาวะการทดลองที่จำเป็น เพื่อให้ได้ข้อมูลเพียงพอต่อการสร้างแบบจำลองทางสถิติ โดย Model ที่ได้จะยังคงมี Main Effect, Interaction และ Quadratic Terms โดยใช้ทรัพยากรไม่มากจนเกินไป

Central Composite Design สำหรับการศึกษาดัชนีตัวแปร 3 ตัว เป็นการออกแบบการทดลอง (Design Of Experiments; DOE) ที่ประกอบไปด้วย 3 ส่วน คือ 1. Factorial Points ซึ่งจะเป็นการนำเอา 2-Level Full Factorial มาเป็นส่วนหนึ่งของการทดลอง 2. Axial Points เป็นการปรับค่าตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งในขณะที่ Fix ให้ค่าตัวแปรอื่นอยู่ที่ค่ากลาง หรือค่า 0 และ 3. Center Points เป็นการปรับค่าตัวแปรทุกตัวแปรที่ค่ากลาง หรือค่า 0 (จรัล ทรัพย์เสรี, 2552) โดยปกติแล้วค่าที่ Center Points ควรจะใช้จำนวนการทดลอง 3-6 การทดลอง (Camposeco, 2014) สำหรับตารางที่ 2.4 เลือกใช้ค่า Alpha = 1 หรือ ระยะจาก Axial Points ไปยัง Center Points เป็น 1 (บางครั้งเรียก design ที่ alpha = 1 แบบนี้ว่า face centered design) ดังภาพที่ 2.27



ภาพที่ 2.27 Central Composite Design สำหรับ 3 Factors

ที่มา : จรัล ทรัพย์เสรี. “DOE Central Composite Design.” *For Quality* November 2009, Vol.145: 72-74.

ตารางที่ 2.3 ลักษณะการเก็บข้อมูลของ Central Composite Design สำหรับ 3 Factors

A	B	C	Point Types
-1	-1	-1	Factorial Point
1	-1	-1	Factorial Point
-1	1	-1	Factorial Point
1	1	-1	Factorial Point
-1	-1	1	Factorial Point
1	-1	1	Factorial Point
-1	1	1	Factorial Point
1	1	1	Factorial Point
-1	0	0	Axial Point
1	0	0	Axial Point
0	-1	0	Axial Point
0	1	0	Axial Point
0	0	-1	Axial Point
0	0	1	Axial Point
0	0	0	Center Point
0	0	0	Center Point

ที่มา : จรัล ทรัพย์เสรี. “DOE Central Composite Design.” *For Quality* November 2009, Vol.145: 72-74.

Central Composite Design เป็นการออกแบบที่มีประสิทธิภาพ สำหรับ Sequential Experimentation สามารถให้ข้อมูลสำหรับการทดสอบ lack of fit ในขณะที่ไม่ต้องใช้จุดของการออกแบบมากนักการออกแบบเหมาะกับการใช้ Spherical Region ที่มีระดับปัจจัย 5 ระดับ และมี  $\alpha = (2^k)^{1/4}$  (k คือระดับปัจจัย) หรือการออกแบบโดยใช้ cuboidal region ที่มีระดับปัจจัย 3 ระดับ และมี  $\alpha = 1$  กรณีของ spherical region อาจทำ rotatable ที่มีจุดศูนย์กลางของการออกแบบ 3-5 จุด แต่กรณีของ cuboidal ใช้จุดกลางของการออกแบบ 1-2 จุดก็เพียงพอแล้ว (Myers, 2001)

## 2.6.2 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Experiment of Factorial Design)

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล หมายถึงการทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลมีประโยชน์หลายประการ ได้แก่ ทำให้สามารถหลีกเลี่ยงปัญหาที่เกิดจากอันตรกิริยาของปัจจัยที่จะก่อให้เกิดข้อสรุปที่ผิดพลาดได้ เนื่องจากเป็นการออกแบบการทดลองที่มีประสิทธิภาพเหนือกว่าการทดลองทีละปัจจัย และทำให้เราสามารถประมาณผลของปัจจัยหนึ่งที่ระดับต่างๆ ของปัจจัยอื่นได้ การออกแบบแฟกทอเรียลเป็นการออกแบบพื้นฐานในการสร้างบล็อกเพื่อการสร้างพื้นผิวผลตอบอื่นๆ ตัวอย่างเช่น ถ้าเพิ่มการออกแบบ 22 ด้วยแนวแกน (axial runs) แล้วจะให้ผลลัพธ์เป็นการออกแบบประสมส่วนกลาง (Central Composite Design) ซึ่งเป็นหนึ่งในการออกแบบที่สำคัญมากของแบบจำลองพื้นผิวผลตอบกำลังสอง (Second-Order Response Surface Model) รวมทั้งทำให้เราสามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลตลอดเงื่อนไขของการทดลองได้ซึ่งการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลมีอยู่ด้วยกันหลายแบบได้แก่

1. การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย เป็นการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลชนิดที่ง่ายที่สุด จะเกี่ยวข้องกับปัจจัย 2 ปัจจัย เช่น ปัจจัย A และปัจจัย B โดยปัจจัย A จะประกอบด้วย a ระดับ ส่วนปัจจัย B จะประกอบด้วย b ระดับ ซึ่งในแต่ละการทำซ้ำของการทดลองจะประกอบด้วย การทดลองร่วมปัจจัยทั้งหมดเท่ากับ  $a \times b$  การทดลองและโดยปกติจะมีจำนวนการทำซ้ำทั้งหมด n ครั้ง

2. การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ เป็นการออกแบบการทดลองในกรณีที่มีปัจจัย k ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ ซึ่งจะแทนระดับสูงหรือต่ำของปัจจัยหนึ่งๆ ระดับเหล่านี้ อาจเกิดจากข้อมูลเชิงประมาณ หรืออาจเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพก็ได้ สำหรับการออกแบบนี้จะประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น  $2 \times 2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$  ข้อมูล และเรียกการออกแบบลักษณะนี้ว่า การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ  $2^k$  แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ และจะประกอบไปด้วยผลทั้งสิ้น  $2^k - 1$  ชนิด

การออกแบบ  $2^k$  มีประโยชน์มากต่อการทดลองในช่วงเริ่มแรก เมื่อมีปัจจัยเป็นจำนวนมากที่เราต้องการที่จะตรวจสอบ การออกแบบเช่นนี้จะทำให้เกิดการทดลองจำนวนน้อยที่สุด เพื่อศึกษาผลของปัจจัยทั้ง k ชนิดได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นการออกแบบ  $2^k$  จะถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายเพื่อกรองปัจจัยที่มีอยู่เป็นจำนวนมากให้เหลือน้อยลง

### 2.6.3 แบบจำลองการถดถอย (Regression Model)

แบบจำลองการถดถอย (Regression Model) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย เพื่อนำไปสร้างสมการทำนายค่าของผลตอบ ซึ่งจะทำให้สามารถหาผลตอบที่จุดใดๆ ในแต่ละช่วงของปัจจัยได้ โดยวิธีการที่ใช้ในการประมาณค่าตัวแปรต่างๆ ในแบบจำลองนี้ส่วนใหญ่คือ วิธีกำลังสองน้อยสุด (Least Square Method) ซึ่งเป็นการประมาณค่าตัวแปรที่ไม่ทราบค่า (Y) เพื่อให้ผลรวมของกำลังสองของความผิดพลาด ( $E^2$ ) มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งบางครั้งเราเรียก  $E^2$  เหล่านี้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย โดยมีขั้นตอนในการประมาณค่าดังนี้

1. สร้างผลรวมของกำลังสองของค่าความผิดพลาด โดยการพิชผลตอบ
2. ประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของปัจจัยในเทอมต่างๆ ที่ทำให้ผลรวมของกำลังสองของค่าความผิดพลาดมีค่าน้อยที่สุด

3. นำค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่ได้ไปเขียนสมการทำนายค่าของผลตอบ

แบบจำลองการถดถอยสำหรับการออกแบบส่วนประสมกลาง เนื่องจากการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการออกแบบส่วนประสมกลางมีการทำการทดลองไม่พอเพียงที่จะทำให้เกิด Cubic Model ได้ตั้งนั้นแบบจำลองการถดถอยจึงมีทั้งหมด 3 แบบ ดังนี้ (ปารเมศ, 2545)

1. Linear Model
2. Two-factor interaction Model
3. Quadratic Model

### 2.6.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) เป็นวิธีการพื้นฐานทางสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลอง โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าตอบสนอง (Response) หรือลักษณะคุณภาพ (Quality Characteristics) สนใจศึกษาหรือปรับปรุงของผลิตภัณฑ์จากระบบหรือกระบวนการ ในการวิเคราะห์จะแยกสาเหตุของความแตกต่างออกเป็น 2 ส่วนคือ

1. ความแตกต่างที่สามารถอธิบายได้ (Explained Variation) คือความแตกต่างหรือการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากปัจจัย (Factor) หรือวิธีปฏิบัติ (Treatment) ที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง บางครั้งอาจถูกเรียกว่าความแตกต่างระหว่างกลุ่ม (Between groups variation)

2. ความแตกต่างที่ไม่สามารถอธิบายได้ (unexplained Variation) คือความแตกต่างหรือการเปลี่ยนแปลงที่ไม่สามารถอธิบายได้เนื่องจากขาดความรู้ หรือความรู้เกี่ยวกับระบบยังไม่เพียงพอ ซึ่งในบางครั้งอาจเกิดจากกรณีที่ผู้ศึกษาทราบถึงปัจจัยที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลง แต่ไม่สามารถควบคุมได้ในการทดลอง (Noise Factors) ซึ่งในการวิเคราะห์ความแปรปรวนกล่าวถึงความแตกต่างในส่วนนี้ ในรูปของความผิดพลาดหรือส่วนที่ยังไม่สามารถอธิบายได้ (Error or Residuals) ถ้าผู้ทดลองมีความรู้หรือความสามารถในการควบคุมการทดลองมากขึ้นความผิดพลาดส่วนนี้ก็จะลดลง (ประไพศรี, 2551)

ตารางที่ 2.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับแบบจำลอง 3 ปัจจัย

Source of Variation	Sum of Squares	Degrees of Freedom	Mean Square	Expected Mean Square	F0
A	SSA	a - 1	MSA	$\sigma^2 + \frac{bcn \sum \tau_i^2}{a - 1}$	$\frac{MS_A}{MS_E}$
B	SSB	b - 1	MSB	$\sigma^2 + \frac{acn \sum \beta_j^2}{b - 1}$	$\frac{MS_B}{MS_E}$
C	SSC	c - 1	MSC	$\sigma^2 + \frac{abn \sum \gamma_k^2}{c - 1}$	$\frac{MS_C}{MS_E}$
AB	SSAB	(a - 1)(b - 1)	MSAB	$\sigma^2 + \frac{cn \sum \sum (\tau\beta)_{ij}^2}{(a - 1)(b - 1)}$	$\frac{MS_{AB}}{MS_E}$
AC	SSAC	(a - 1)(c - 1)	MSAC	$\sigma^2 + \frac{bn \sum \sum (\tau\gamma)_{ik}^2}{(a - 1)(c - 1)}$	$\frac{MS_{AC}}{MS_E}$
BC	SSBC	(b - 1)(c - 1)	MSBC	$\sigma^2 + \frac{cn \sum \sum (\beta\gamma)_{jk}^2}{(b - 1)(c - 1)}$	$\frac{MS_{BC}}{MS_E}$
ABC	SSABC	(a - 1)(b - 1)(c - 1)	MSABC	$\sigma^2 + \frac{n \sum \sum \sum (\tau\beta\gamma)_{ijk}^2}{(a - 1)(b - 1)(c - 1)}$	$\frac{MS_{ABC}}{MS_E}$
Error	SSE	abc(n-1)	MSE	$\sigma^2$	
Total	SST	abcn - 1			

ที่มา : ปารเมศ ชูติมา. การออกแบบการทดลองวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. (กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545), 240.

โดยที่ ปัจจัย A มีจำนวนระดับเท่ากับ a  
 ปัจจัย B มีจำนวนระดับเท่ากับ b  
 ปัจจัย C มีจำนวนระดับเท่ากับ c  
 มีจำนวนเรพลิเคต n = 2  
 จะมีจำนวนข้อมูลทั้งหมดในการทดลองเท่ากับ abc...n

การคำนวณสำหรับค่าผลรวมทั้งหมดของกำลังสองในตารางที่ 2.9 มีสูตรในการคำนวณดังนี้

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^n y_{ijkl}^2 - \frac{y_{...}^2}{abcn} \quad \text{สมการที่ 2.5}$$

ค่าผลรวมของกำลังสองของผลหลักหาได้จากสูตรต่อไปนี้

$$SS_A = \frac{1}{bcn} \sum_{i=1}^a y_{i...}^2 - \frac{y_{...}^2}{abcn} \quad \text{สมการที่ 2.6}$$

$$SS_B = \frac{1}{acn} \sum_{j=1}^b y_{.j..}^2 - \frac{y_{...}^2}{abcn} \quad \text{สมการที่ 2.7}$$

$$SS_C = \frac{1}{abn} \sum_{k=1}^c y_{...k.}^2 - \frac{y_{...}^2}{abcn} \quad \text{สมการที่ 2.8}$$

เพื่อที่จะคำนวณค่าผลรวมของกำลังสองแบบ 2 ปัจจัยของอันตรกิริยา เราจะต้องสร้างตารางผลรวมซึ่งประกอบด้วยเซลล์จำนวน  $A \times B$ ,  $A \times C$  และ  $B \times C$  เซลล์ขึ้นมา ซึ่งเกิดจากการยุบตารางข้อมูลเบื้องต้นให้อยู่ในรูปของตารางแบบ 2 ทาง จำนวน 3 ตาราง เพื่อคำนวณค่าต่างๆ ค่าผลรวมของกำลังสองหาได้จาก

$$\begin{aligned} SS_{AB} &= \frac{1}{cn} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij.}^2 - \frac{y_{...}^2}{abcn} - SS_A - SS_B \\ &= SS_{\text{Subtotals}(AB)} - SS_A - SS_B \end{aligned} \quad \text{สมการที่ 2.9}$$

$$\begin{aligned} SS_{AC} &= \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^c y_{i.k.}^2 - \frac{y_{...}^2}{abcn} - SS_A - SS_B \\ &= SS_{\text{Subtotals}(AC)} - SS_A - SS_B \end{aligned} \quad \text{สมการที่ 2.10}$$

$$\begin{aligned} SS_{BC} &= \frac{1}{an} \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c y_{.jk.}^2 - \frac{y_{...}^2}{abcn} - SS_A - SS_B \\ &= SS_{\text{Subtotals}(BC)} - SS_A - SS_B \end{aligned} \quad \text{สมการที่ 2.11}$$

ค่าผลรวมของกำลังสองของอันตรกิริยาแบบ 3 ปัจจัย หาได้จากสูตร

$$SS_{ABC} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c y_{ijk.}^2 - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{BC} \quad \text{สมการที่ 2.12}$$

ค่าผลรวมของกำลังสองของความผิดพลาดหาได้จากการลบผลรวมของกำลังสองทั้งหมดที่เกิดจากผลหลักและอันตรกิริยาจากผลรวมทั้งหมดของกำลังสอง (ปารเมศ, 2545)

$$SS_E = SS_T - SS_{\text{Subtotals}(ABC)} \quad \text{สมการที่ 2.13}$$

## 2.7 ต้นทุนการผลิต (Cost of Production)

ต้นทุนการผลิต (Cost of production) คือ ค่าใช้จ่ายของปัจจัยการผลิตทั้งที่จ่ายเป็นตัวเงิน และไม่ใช้ตัวเงินที่เกิดจากกระบวนการผลิต ดังนั้นจากความหมายนี้สามารถแบ่งต้นทุนออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. ต้นทุนที่เห็นชัดเจน (explicit cost) หมายถึง ค่าใช้จ่ายของปัจจัยการผลิตในบางส่วนที่ต้องจ่ายเป็นตัวเงินจริงๆ เช่น ค่าจ้าง ค่าแรง ค่าเช่า ค่าวัสดุดิบ ค่าเสื่อมราคา และค่าใช้จ่ายอื่นๆ
2. ต้นทุนจำบัง (implicit cost) หมายถึง ต้นทุนที่ไม่ได้จ่ายเป็นตัวเงินจริงๆ ค่าจ้างหรือค่าแรงงานของตนเองซึ่งไม่ได้จ่ายให้แก่ตัวเอง เงินทุนของตนเองที่นำมาลงทุนโดยไม่ได้จ่ายดอกเบี้ยให้แก่เงินต้นนั้น หรือการใช้อุปกรณ์ ปัจจัยการผลิตต่างๆ ของตนในกระบวนการผลิตโดยไม่มีค่าใช้จ่าย ค่าชดเชยให้แต่อย่างใด ต้นทุนประเภทนี้เรียกได้อีกอย่างหนึ่งว่า ต้นทุนค่าเสียโอกาส (opportunity cost) ซึ่งหมายถึงผลตอบแทนหรือค่าชดเชยที่ผู้ประกอบการควรได้รับ (แต่ไม่ได้รับ) จากการนำปัจจัยการผลิตต่างๆ มาใช้เพื่อการผลิตของตนเอง ซึ่งอย่างน้อยที่สุดจะต้องเท่ากับค่าชดเชยที่ควรได้รับหากนำปัจจัยการผลิตนี้ไปใช้เพื่อการผลิตประเภทอื่น

นอกจากนี้ เรายังอาจแบ่งประเภทของต้นทุนการผลิตตามประเภทของปัจจัยการผลิตออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. ต้นทุนคงที่ (fixed cost) เป็นค่าใช้จ่ายที่ใช้ในปัจจัยคงที่ ซึ่งเป็นปัจจัยที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดระยะเวลาการผลิต ดังนั้นต้นทุนคงที่จึงเป็นค่าใช้จ่ายที่ไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของการผลิต มีจำนวนคงที่แน่นอน ซึ่งส่วนใหญ่ได้แก่ ค่าใช้จ่ายในสินทรัพย์ถาวร เช่น ค่าเช่าที่ดิน ค่าติดตั้งเครื่องจักร ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างโรงงาน ฯลฯ

2. ต้นทุนแปรผัน (variable cost) เป็นค่าใช้จ่ายที่ใช้ปัจจัยแปรผัน ซึ่งเป็นปัจจัยที่เปลี่ยนแปลงตามระดับของการผลิต คือ หากต้องการผลิตมากก็จะใช้ปัจจัยมาก ต้นทุนที่ใช้ก็จะสูง ตรงกันข้ามถ้าต้องการผลิตน้อยการใช้ปัจจัยก็จะน้อย ต้นทุนที่ใช้ก็จะต่ำ หรือถ้าไม่ผลิตเลยต้นทุนดังกล่าวก็จะเท่ากับศูนย์ ดังนั้นต้นทุนประเภทนี้จะมากหรือน้อย ดังนั้นต้นทุนประเภทนี้จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขนาดการผลิตเป็นสำคัญ เช่น ค่าน้ำ ค่าไฟ ค่าแรงงาน ค่าวัสดุดิบ ฯลฯ อย่างไรก็ตามการแยกต้นทุนทั้ง 2 ประเภทดังกล่าวจะใช้ได้ก็เฉพาะการวิเคราะห์การผลิตในระยะสั้นเท่านั้น เพราะถ้าหากเป็นการวิเคราะห์การผลิตในระยะยาวแล้วจะมีต้นทุนเพียงประเภทเดียวคือ ต้นทุนแปรผัน อันเนื่องมาจากการผลิตในระยะยาวจะมีเพียงปัจจัยแปรผันเท่านั้น (ณรงค์, 2545)

### 2.7.1 ต้นทุนการผลิตระยะสั้น

ในการพิจารณาถึงต้นทุนในระยะสั้นหรือระยะยาวก็ตาม ถ้าเราสมมติว่าหน่วยธุรกิจที่ทำการผลิตสินค้าชิ้นนั้น ไม่มีอิทธิพลต่อราคาปัจจัยการผลิตในตลาดเลย เราสามารถเข้าใจได้ง่ายขึ้น การสมมติข้างต้นหมายความว่า เราสมมติให้ราคาปัจจัยการผลิตทุกชนิดและราคาวัสดุดิบต่างๆ คงที่โดยไม่คำนึงว่าหน่วยธุรกิจจะซื้อ มากหรือน้อยเท่าใดก็ตาม (อุปทานปัจจัยการผลิตทุกชนิดรวมทั้งอุปทานวัสดุดิบต่างๆ มีความยืดหยุ่นเท่ากับอินฟินิตี้) (ปัจจัย และคณะ, 2535) ต้นทุนในการผลิตระยะสั้นประกอบด้วย

1. ต้นทุนคงที่รวม (total fixed cost, TFC) คือ ค่าใช้จ่ายหรือต้นทุนที่ไม่ได้แปรเปลี่ยนตามจำนวนของการผลิต เป็นต้นทุนที่มีจำนวนคงที่ไม่่ว่าจะผลิตมากหรือน้อยเพียงใด
2. ต้นทุนแปรผันรวม (total variable cost, TVC) คือ ค่าใช้จ่ายหรือต้นทุนที่แปรเปลี่ยนตามจำนวนของการผลิต โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน
3. ต้นทุนรวม (total cost, TC) คือ ผลรวมของต้นทุนคงที่รวมกับต้นทุนแปรผันรวม นั่นคือ

$$TC = TFC + TVC \quad \text{สมการที่ 2.14}$$

4. ต้นทุนคงที่เฉลี่ย (average fixed cost, AFC) คือ ต้นทุนคงที่รวมเฉลี่ยต่อหน่วยของการผลิตรวม (TP) ซึ่งคำนวณได้จากการนำต้นทุนคงที่รวมหารด้วยผลผลิตรวม นั่นคือ

$$AFC = TFC / TP \quad \text{สมการที่ 2.15}$$

5. ต้นทุนแปรผันเฉลี่ย (average variable cost, AVC) คือ ต้นทุนแปรผันรวมเฉลี่ยต่อหน่วยการผลิตรวม (TP) คำนวณจากการนำต้นทุนแปรผันรวมหารด้วยผลผลิตรวม นั่นคือ

$$AVC = TVC / TP \quad \text{สมการที่ 2.16}$$

6. ต้นทุนเฉลี่ย (average cost, AC) คือ ผลรวมของต้นทุนคงที่เฉลี่ยกับต้นทุนแปรผันเฉลี่ย นั่นคือ

$$AC = AFC + AVC \quad \text{สมการที่ 2.17}$$



7. ต้นทุนเพิ่ม (marginal cost, MC) คือ ต้นทุนรวมที่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนผลผลิตรวมหนึ่งหน่วย นั่นคือ (ณรงค์, 2545)

$$MC = \Delta TC / \Delta Q$$

สมการที่ 2.18

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บุญเรือง ขวัญนุ้ย (2550) ได้ศึกษาการใช้งานมิตเซอร์รามิคเคลือบด้วยกรรมวิธี PVD ในการกลึงปกเหล็กกล้า S 45 C ที่มีความแข็งระหว่าง 25-35 HRC และใช้วัสดุหล่อเย็น โดยเปรียบเทียบกับคุณภาพผิวของงานเจียรนัยเป็นเกณฑ์ จากปัจจัยที่ศึกษาประกอบด้วยความเร็วตัด (Cutting Speed) ที่ 100, 110, 120 เมตรต่อนาที ระยะป้อนลึก (Depth of Cut) ที่ 0.3, 0.4 มิลลิเมตรและ อัตราป้อน (Feed Rate) ที่ 0.06, 0.08, 0.10 มิลลิเมตรต่อรอบพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อความเรียบผิวคือ อัตราป้อนซึ่งมีผลต่อคุณภาพผิวอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

อัจฉรา เนียมเกลี้ยง (2550) ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความเรียบผิวในการกลึงเหล็กกล้า S50C ด้วยมิตเซอร์รามิค โดยเทียบกับคุณภาพของงานเจียรนัยเป็นเกณฑ์ โดยได้ศึกษาปัจจัย 3 ปัจจัยคือ ระยะป้อน (Depth of Cut) ที่ 0.4, 0.5 มิลลิเมตร ความเร็วตัด (Cutting Speed) ที่ 110, 120, 130 เมตรต่อนาที และอัตราป้อน (Feed Rate) ที่ 0.12, 0.13, 0.14 มิลลิเมตรต่อรอบ จากการทดลองพบว่าปัจจัยร่วมของ ความเร็วตัด อัตราป้อน และระยะป้อนลึกส่งผลต่อความเรียบผิวอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

กัมพล เพชรคง (2550) ได้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความเรียบผิว ในการกลึงเหล็กกล้าไร้สนิม AISI/SUS 304 โดยใช้มิตกลึงอินเสิร์ตคาร์ไบด์เคลือบผิวด้วยกระบวนการ CVD และได้ศึกษาปัจจัย 3 ปัจจัยได้แก่ อัตราป้อน (Feed Rate) ที่ 0.08, 0.12, 0.16 มิลลิเมตรต่อรอบ ความเร็วตัด (Cutting Speed) ที่ 80, 150, 220 เมตรต่อนาที และใช้หรือไม่ใช้สารหล่อเย็น โดยกำหนดความลึกตัดคงที่ที่ 0.5 มิลลิเมตร จากการทดลองพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อความเรียบผิวคือความเร็วตัด ซึ่งมีผลต่อคุณภาพของผิวงานอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.10

ชาญ ราชวงศ์ (2548) ได้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพผิวในการกลึงงานแข็ง โดยเทียบกับคุณภาพผิวงานเจียรนัยเป็นเกณฑ์ โดยใช้วัสดุเป็นเหล็ก SCM 4 ซึ่งมีความแข็งระหว่าง  $54 \pm 2$  HRC กลึงด้วยมิตกลึงชนิด CBN โดยได้ศึกษาปัจจัย 2 ปัจจัยได้แก่ อัตราป้อน (Feed Rate) ที่ 0.08, 0.12, 0.16 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกในการป้อน (Depth of Cut) ที่ 0.10, 0.15, 0.20 มิลลิเมตร จากการทดลองพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อความเรียบผิวอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 คือ อัตราป้อน

ธวัชชัย อาจปฐ (2550) ได้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความเรียบผิวในการกลึงเหล็กหล่อเหนียว FCD 450 ด้วยมิตกลึงคาร์ไบด์เคลือบ CVD โดยได้ศึกษาปัจจัย 3 ปัจจัยได้แก่ อัตราป้อน (Feed Rate) ที่ 0.05, 0.075, 0.1 มิลลิเมตรต่อรอบ ความเร็วตัด (Cutting Speed) ที่ 200, 250, 300 เมตรต่อนาที และความลึกในการป้อน (Depth of Cut) ที่ 0.5, 1 มิลลิเมตร พบว่าความลึกในการป้อนที่ 0.5 มิลลิเมตร ความเร็วตัดที่ 300 ม.ต่อนาที และอัตราป้อนที่ 0.05 มิลลิเมตรต่อรอบ มีอิทธิพลต่อความเรียบผิวงานกลึง อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.01 จากการศึกษารถดถอย Regression Analysis พบอีกว่า ความเร็วตัด และอัตราป้อน เป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อความเรียบผิว

ศิริวัลย์ จันทร์ผ่อง และสมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ (2554) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการพยากรณ์ ความขรุขระผิวในกระบวนการกลึงโดยการประยุกต์ใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง โดยใช้วัสดุทดสอบ เหล็กกล้าคาร์บอน S 45C กับมีดกลึงคาร์ไบด์เคลือบผิว ชนิด KC-9110 โดยได้ศึกษาปัจจัย 3 ปัจจัย ได้แก่ อัตราป้อน (Feed Rate) ที่ 0.15, 0.20, 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความเร็วตัด (Cutting Speed) ที่ 180, 260, 340 เมตรต่อนาที ความลึกในการป้อน (Depth of Cut) ที่ 0.2, 0.4, 0.6 มิลลิเมตรและ รัศมีงูมูกมีด (Nose Radius) ที่ 0.4, 0.8, 1.2 มิลลิเมตร พบว่าเงื่อนไขการตัดที่ดีที่สุดที่ให้ความขรุขระ ผิวน้อยที่สุด คือความเร็วตัด 340 ม.ต่อนาที, อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ, ความลึกตัด 0.2 มิลลิเมตร และรัศมีงูมูกมีด 1.2 มิลลิเมตร

พรศิลป์ อุบลาลี (2543) ได้ศึกษาอายุการใช้งานของเม็ดมีดกลึงทั้งสแตนคาร์ไบด์ชนิดต่างๆ ดังนี้ CCMT09T308N-SK, SPMM432EMS, WMNG080404-TM, WCMX080412R-53, WCMX080412R-54, DCMT11T304N-SK, DCMT07204N-SK และVNMG160408N-SU10 กับวัสดุ เหล็ก S20C โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ แบบถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression) มาหาค่าความสัมพันธ์ ในเชิงสมการที่มีความชันเป็นลอการิทึม (logarithm) แล้วนำค่าความชันไปแทนในสมการ  $VT^n D^{n_1} F^{n_2} = K$  เพื่อหาค่าสภาวะตัดเฉือนที่เหมาะสม จากนั้นจึงนำไปทดลองเพื่อหาอายุการใช้งาน ของมีด ผลการศึกษาพบว่า ความเร็วตัด มีผลต่ออายุการใช้งานมากที่สุด อัตราป้อน และความลึกป้อน มีผลต่ออายุการใช้งานน้อย

Komson Jirapattarasilpa and Choobunyen Kuptanawin (2012) ได้ศึกษาปัจจัย ที่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความแข็ง และค่าความกลมของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 303 กับ เม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์เคลือบผิว TiCN+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiN และ เม็ดมีดกลึง PVD ใช้วิธีการออกแบบการ ทดลองแบบ 3<sup>2</sup> ปัจจัยที่ใช้ในการทดลองคือความเร็วตัด 100, 150 และ 200 เมตรต่อนาที อัตราป้อน 0.08, 0.12 และ 0.16 มิลลิเมตรต่อรอบ และการใช้/ไม่ใช้ สารหล่อเย็น พบว่า การใช้สารหล่อเย็น เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความกลมของชิ้นงาน (การใช้สารหล่อเย็นจะได้ความกลมของชิ้นงานดีกว่าการไม่ ใช้สารหล่อเย็น) และ ไม่มีปัจจัยใดส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งของชิ้นงาน

Richard Horváth and Ágota Drégelyi-Kiss (2015) ได้ศึกษาการทดลองใช้มีดกลึง จำนวน 2 รูปแบบคือ รูปแบบ ISO ที่เคลือบผิวแบบ PCD, CVD, MDC และรูปแบบ Wiper ที่เคลือบ ผิวแบบ PCD, CVD และใช้ความเร็วตัด (Cutting Speed) 500, 667, 1250, 1833, 2000 เมตรต่อ นาที อัตราป้อน (Feed Rate<sub>ISO</sub>) ของอินเสิร์ตรูปแบบ ISO อยู่ที่ 0.05, 0.058, 0.085, 0.112, 0.12 มิลลิเมตรต่อรอบ อัตราป้อน (Feed Rate<sub>WIPER</sub>) ของอินเสิร์ตรูปแบบ Wiper อยู่ที่ 0.1, 0.116, 0.17, 0.224, 0.24 มิลลิเมตรต่อรอบความลึกป้อน (Depth of Cut) 0.2, 0.267, 0.5, 0.733, 0.8 มิลลิเมตร กับวัสดุทดสอบ 2 ชนิดคือ อลูมิเนียม AS12 และ AS17 พบว่าค่าเฉลี่ยความเรียบผิวของ มีดกลึงรูปแบบ Wiper อยู่ในช่วง 0.363 – 1.220 μm และมีดกลึงรูปแบบ ISO อยู่ในช่วง 0.284 – 1.763 μm สำหรับวัสดุทดสอบ AS12 ส่วนวัสดุทดสอบ AS17 มีดกลึงรูปแบบ Wiper จะอยู่ในช่วง 0.351 – 1.040 μm และมีดกลึงรูปแบบ ISO 0.428 – 1.677 μm โดยความเร็วตัด และอัตราป้อนมี อิทธิพลต่อความเรียบผิวมากที่สุด แต่อิทธิพลร่วมของปัจจัยต่างๆก็มีผลต่อความเรียบผิว โดยค่าที่ เหมาะสมสำหรับมีดกลึงแบบ ISO คือการเคลือบผิวด้วย PCD ใช้ความเร็วตัดที่ 2,000 ม./นาที อัตรา ป้อนที่ 0.089 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกป้อนที่ 0.2 มิลลิเมตร ขณะที่มีดกลึงรูปแบบ Wiper คือ

การเคลือบผิวด้วย CVD ใช้ความเร็วตัดที่ 2,000 ม./นาที อัตราป้อนที่ 0.158 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกป้อนที่ 0.42 มิลลิเมตร

M. Nalbant, H. Gökkaya and G. Sur (2006) ได้ศึกษาการหาค่าที่เหมาะสมสำหรับการกลึงวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1030 โดยใช้มีดกลึงที่เคลือบผิวด้วย TiN โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลอง Taguchi Method ได้ศึกษาปัจจัยจำนวน 3 ปัจจัยคือ รัศมีงูมมิต (Insert Radius) 0.4, 0.8, 1.2 มิลลิเมตร ความลึกป้อน (Depth of Cut) 0.5, 1.5, 2.5 มิลลิเมตร และอัตราป้อน (Feed Rate) 0.15, 0.25, 0.35 มิลลิเมตรต่อรอบ และได้กำหนดค่าความเร็วตัด (Cutting Speed) ไว้ที่ 300 เมตรต่อนาที จากการศึกษพบว่า รัศมีปลายมีด และอัตราป้อน เป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อความเร็วผิว โดยค่าที่เหมาะสมคือ รัศมีปลายมีด 1.2 มิลลิเมตร อัตราป้อนที่ 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกป้อนที่ 0.5 มิลลิเมตรจะให้ค่าความเร็วผิวอยู่ในช่วงที่ต้องการ

Carmita Camposeco-Negrete (2015) ได้ศึกษาการหาค่าที่เหมาะสมเพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้า (Energy consumption), ค่าความเรียบผิวที่น้อยที่สุด (Surface Roughness) และอัตราการกำจัดเนื้อโลหะที่มากที่สุด (Material removal rate) โดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Method) ด้วยการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design) โดยศึกษาจากปัจจัย 3 ปัจจัย คือความเร็วตัด (Cutting speed), อัตราป้อน (Feed rate) และความลึกป้อน (Depth of cut) จากการศึกษพบว่า อัตราป้อน (Feed rate) และความลึกป้อน (Depth of cut) เป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อการลดลงของพลังงานที่ใช้และ อัตราป้อน (Feed rate) เป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อความเร็วผิวที่ดีขึ้นโดยค่าที่เหมาะสมอยู่ที่ อัตราป้อน 0.14 mm/rev, ความลึกป้อน 2.30 mm. และความเร็วตัด 434 m/min จากการเปรียบเทียบกับค่าเดิมพบว่า ลดการใช้พลังงานลงได้ 14.41% และค่าความเรียบผิวดีขึ้น 360.47%

D.I. Lalwani, N.K. Mehta and P.K. Jain (2008) ได้ศึกษาการหาปัจจัยที่ส่งผลต่อแรงที่กระทำในแนวแกนต่างๆ (แรงแนวแกนอัตราป้อน, แรงแนวแกนที่มีดกลึงดันเข้า และแรงในการตัดเฉือน) และ ความเรียบผิว โดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Method) ด้วยการออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design จากปัจจัย 3 ปัจจัย คือความเร็วตัด (Cutting speed), อัตราป้อน (Feed rate) และความลึกป้อน (Depth of cut) กับวัสดุเหล็ก MDN250 พบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อแรงในแนวแกนอัตราป้อนคือ ความลึกป้อน (89.05%) และ อัตราป้อน (6.61%) ปัจจัยที่ส่งผลต่อแรงในแนวแกนที่มีดกลึงดันเข้าคือ อัตราป้อน (46.71%) และความลึกป้อน (49.59%) และแรงในการตัดเฉือนคือ อัตราป้อน (52.60%) และความลึกป้อน (41.63%) ส่วนปัจจัยที่ส่งผลต่อความเร็วผิวคือ อัตราป้อนมากที่สุด 86.03% รองลงมาคือ อันตรกิริยาของ อัตราป้อนกับความลึกป้อนที่ 6.92%

J.A. Ghani, I.A. Choudhury and H.H. Masjuki (2004) ได้ศึกษาการสึกหรอของมีดกัดคาร์ไบด์เคลือบผิว TiN และเซอร์เม็ทที่ไม่ผ่านการเคลือบผิว กับชิ้นงานเหล็กเครื่องมือ AISI H13 ขนาด 100 x 100 x 100 มิลลิเมตรโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ ทากูชิ L9 จากปัจจัย 3 ปัจจัย คือความเร็วตัด (Cutting speed), อัตราป้อน (Feed rate) และความลึกป้อน (Depth of cut) พบว่าความเร็วตัดส่งผลต่อการสึกหรอที่คมตัดในมีดกัดทั้ง 2 ชนิด ค่าระดับปัจจัยที่ทำให้การสึกหรอต่ำที่สุด

คือ ความเร็วตัด 244 เมตรต่อนาที อัตราป้อน 0.1 มิลลิเมตรต่อฟัน ในมีดกัดทั้ง 2 ชนิด และในมีดกัดคาร์ไบด์เคลือบผิว TiN จะเกิดการแตกหักส่วนมีดกัดเซอร์เม็ทนั้นจะเกิดทั้งการแตกหัก

การออกแบบการทดลองในการหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.5 และตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องทางด้านงานกลึงในด้านปัจจัยที่ศึกษา

ผู้วิจัย	เครื่องมือ	วัสดุ	ปัจจัยที่ศึกษา				
			ความเร็วตัด	อัตราป้อน	ความลึกป้อน	น้ำยาหล่อเย็น	รัศมีปลายมีดกลึง
บุญเรือง (2550)	มีดเซรามิกเคลือบ PVD TNGA 160408 A66N	เหล็กS45 C	•	•	•		
อัจฉรา (2550)	มีดเซรามิก A65 R0.8	เหล็กS50 C	•	•	•		
กัมพล (2550)	มีดคาร์ไบด์เคลือบผิว CA 6525 TNMG 160408 MS	สแตนเลส AISI 304	•	•		•	
ชาญ (2548)	มีดกลึง CBN TNGA 160408 ME-T	เหล็กSCM4		•	•		
ธวัชชัย (2550)	มีดคาร์ไบด์เคลือบผิว CVD K20 R0.8	เหล็กเหนียวหล่อ FCD 450	•	•	•		
ศิริวัลย์ และคณะ (2554)	มีดคาร์ไบด์เคลือบผิว KC-9110	เหล็กS45 C	•	•	•		•
Jirapattarasilpa และคณะ (2012)	เม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์เคลือบผิว TiCN+Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +TiN เม็ดมีดกลึง PVD	เหล็ก SUS 303	•	•		•	
Horváth และคณะ (2015)	DCGW 11T304 PCD, CVD, MDC (ISO shape) PCD, CVD (Wiper shape)	อลูมิเนียม เกรด AS12 เกรด AS17	•	•	•		
Nalbant และคณะ (2006)	TNMG160404-MA TNMG160408-MA TNMG160412-MA	เหล็ก AISI 1030		•	•		•
Camposeco-Negrete (2015)	DCGX 11T304-AL H10	อลูมิเนียม AISI 6061 T6	•	•	•		
Lalwani และคณะ (2008)	TNMA160408S01525	เหล็ก MDN250	•	•	•		

ตารางที่ 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องทางด้านงานกลึงในด้านเครื่องมือทางสถิติและตัวแปรตอบสนอง

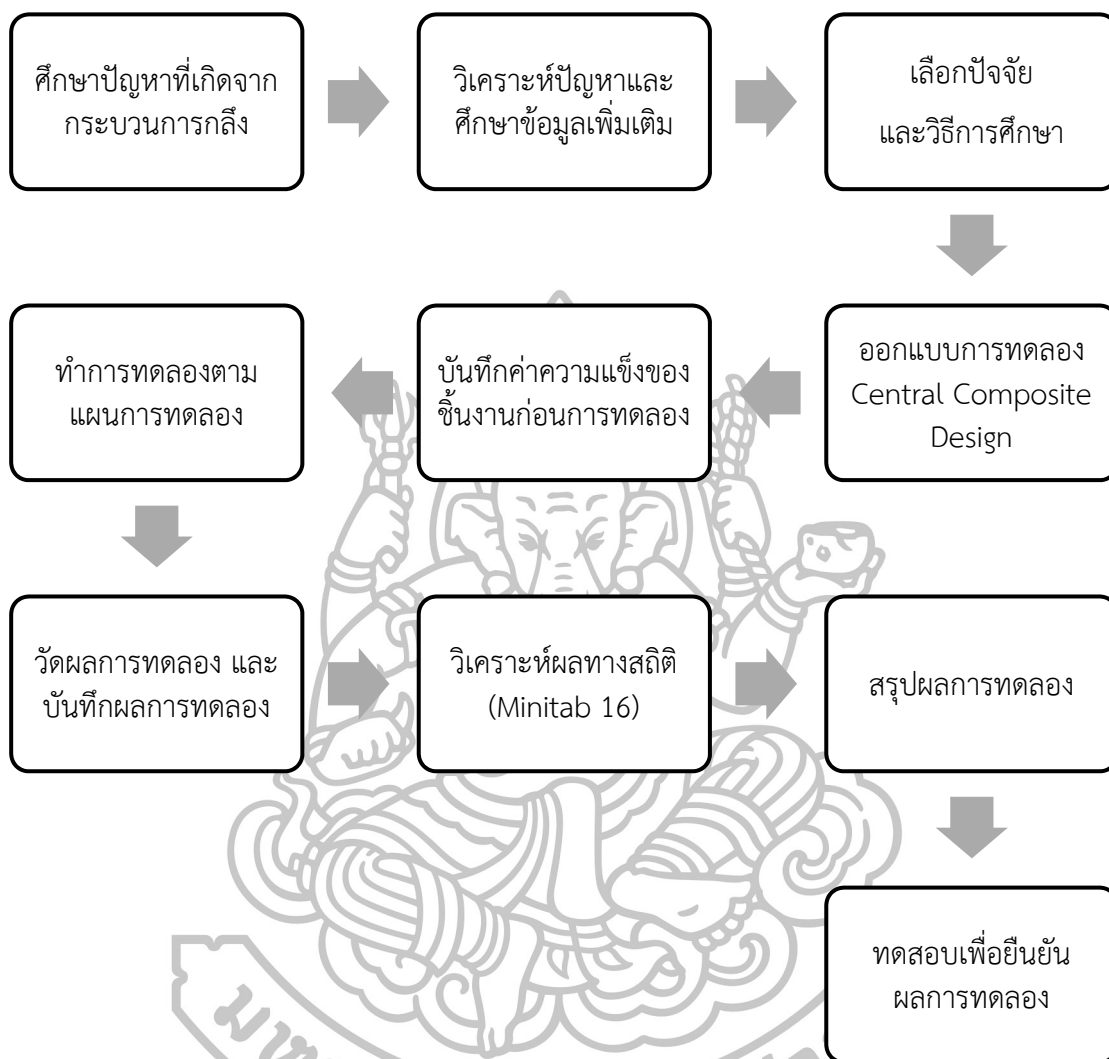
ผู้วิจัย	เครื่องมือทางสถิติ	วัสดุ	ตัวแปรตอบสนอง		
บุญเรือง (2550)	3k Full Factorial	เหล็กS45 C	ความเรียบผิว		
อัจฉรา (2550)	3k Full Factorial	เหล็กS50 C	ความเรียบผิว		
กัมพล (2550)	3k Full Factorial	สแตนเลส AISI 304	ความเรียบผิว		
ชาญ (2548)	3k Full Factorial	เหล็กSCM4	ความเรียบผิว		
รัชชัย (2550)	3k Full Factorial	เหล็กเหนียวหล่อ FCD 450	ความเรียบผิว		
ศิริวิทย์ และคณะ (2554)	Box-Behnken Design	เหล็กS45 C	ความเรียบผิว	อุณหภูมิตัด	แรงตัด
Jirapattarasilpa และ คณะ (2012)	3k Full Factorial	เหล็ก SUS 303		ความกลม	ความแข็ง
Horváth และคณะ (2015)	Central Composite Design	อลูมิเนียม เกรด AS12 เกรด AS17	ความเรียบผิว		
Nalbant และคณะ (2006)	Taguchi Method	เหล็กAISI 1030	ความเรียบผิว		
Camposeco- Negrete (2015)	Central Composite Design	อลูมิเนียม AISI 6061 T6	ความเรียบผิว	ปริมาณการใช้ พลังงาน	อัตราการ กำจัดเนื้อ
Lalwani และคณะ (2008)	Central Composite Design	เหล็ก MDN250	ความเรียบผิว	แรงตัดเฉือน ในแนวแกน	

### บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

กระบวนการผลิตธนบัตรมีกระบวนการมากมายในการผลิตธนบัตรแต่ละฉบับ ซึ่งในปัจจุบันเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) ได้เข้ามามีบทบาทมาก เพราะเป็นเหล็กที่ทนต่อการเกิดสนิม ทนต่อสารเคมี อากาศชื้น และน้ำ แต่เนื่องจากในกระบวนการแปรรูปชิ้นงานนั้น ยังไม่สามารถทำให้ค่าความเรียบผิวอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถส่งมอบงานได้ จึงต้องศึกษาปัจจัยที่ผลเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่ตรงตามความต้องการ และยังเป็นการลดขั้นตอนในการผลิตที่ไม่จำเป็นที่เกิดขึ้นเนื่องจากค่าความเรียบผิวไม่เป็นไปตามเกณฑ์ งานวิจัยฉบับนี้เป็นการศึกษาในเชิงทดลอง ทั้งยังมีการนำเครื่องมือทางสถิติมาช่วยในการวิเคราะห์ผลในการทดลอง ดังนั้นจึงมีขั้นตอนการออกแบบการทดลอง และวิธีดำเนินการทดลองอยู่ในการดำเนินงานวิจัยด้วย โดยในงานวิจัยนี้จะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน

1. ส่วนแรกนั้นจะเป็นการออกแบบการทดลอง Central Composite Design จำนวน 2 การทดลอง เพื่อหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สามารถทำให้ค่าความเรียบผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI/SUS 304 อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด ของเม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์เคลือบผิว PVD และ เม็ดมีดกลึงเซอร์เม็ท ขั้นตอนในการทดลองจะแสดงดังภาพที่ 3.1

2. ส่วนที่สองจะเป็นการทดลองเพื่อหาค่าความคุ้มค่าในการเปลี่ยนชนิดเม็ดมีดกลึง ระหว่างเม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์เคลือบผิว PVD กับ เม็ดมีดกลึงเซอร์เม็ท ขั้นตอนในการทดลองจะแสดงดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนในการดำเนินการทดลองในส่วนที่ 1



ภาพที่ 3.2 ขั้นตอนในการดำเนินการทดลองใน ส่วนที่ 2

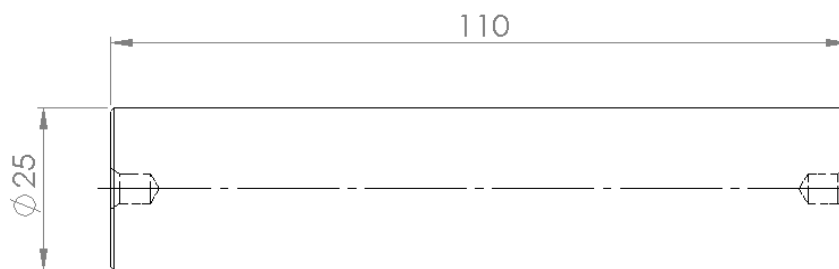


### 3.1 ชิ้นงานตัวอย่าง

งานวิจัยนี้ใช้เหล็กกล้าไร้สนิม AISI/SUS 304 เนื่องจากมีการใช้งานเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก และเป็นชิ้นงานที่มีความสูญเสียจากการที่ชิ้นงานไม่มีคุณสมบัติที่จะส่งมอบ วัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม AISI/SUS 304 มีส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปเย็น อบคลายเครียดที่อุณหภูมิ 700-800 องศาเซลเซียส

1. การทดลองในส่วนที่ 1 จะเป็นการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อความเรียบผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI/SUS 304 และค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าความเรียบผิวอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด โดยชิ้นงานทดลองจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ยาว 110 มิลลิเมตร และทำการเจาะย่นศูนย์กลางที่ชิ้นงานทุกชิ้น ดังภาพที่ 3.3 จำนวนทั้งหมด 34 ชิ้น ในแต่ละการทดลอง ซึ่งในการทดลองจะมีการทดลองกับเม็ดเม็ดกลึงคาร์ไบด์เคลือบผิว PVD และ เม็ดเม็ดกลึงเซอร์เม็ท

2. การทดลองในส่วนที่ 2 จะเป็นการทดลองเพื่อหาความคุ้มค่าในการเปลี่ยนชนิดเม็ดเม็ดกลึง โดยชิ้นงานทดลองจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ยาว 110 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 3.3 จำนวนทั้งหมด 32 ชิ้น



ภาพที่ 3.3 ขนาดของชิ้นงานตัวอย่างในการทดลองส่วนที่ 1 และส่วนที่ 2

### 3.2 เครื่องมือในการทดลอง

เครื่องมือในการทดลองนี้ใช้เครื่องกลึงอัตโนมัติ CNC เข้ามาเป็นองค์ประกอบในการทดลองเนื่องจากเป็นเครื่องจักรที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน รวมถึงอุปกรณ์ต่างๆดังนี้

1. เครื่องกลึงอัตโนมัติ CNC เครื่องหมายการค้า MAZAK รุ่น QuickTurn NEXUS 150-II ความเร็วรอบสูงสุด 5,000 รอบต่อนาที ดังภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 เครื่องกลึงอัตโนมัติ CNC

2. สารหล่อเย็น เครื่องหมายการค้า Houghton เบอร์ Adrana D208.08 ดังแสดงในภาพที่ 3.5 ผสมน้ำในอัตราส่วน สารหล่อเย็น 1 ส่วน ต่อน้ำ 20 ส่วน



ภาพที่ 3.5 สารหล่อเย็น Houghton Adrana D208.08

3. เครื่องวัดความเรียบผิว เครื่องหมายการค้า Mahr รุ่น MarSurf PS1 มีความละเอียดในการวัด 0.001 ไมโครเมตร ระยะในการวัดครั้งละ 17.50 มิลลิเมตร โดยสัญลักษณ์ที่ใช้ในการวัดเพื่อบอกถึงความเรียบผิวคือ Ra มีหน่วยเป็นไมโครเมตร ดังภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 เครื่องวัดความเรียบผิว Mahr รุ่น MarSurf PS1

4. เครื่องมือวัดความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลาง และขนาดทั่วไป เครื่องหมายการค้า Mitutoyo เป็นแบบ Digital Vernier caliper มีความละเอียดในการวัด 0.01 มิลลิเมตร ช่วงการวัดคือ 0 – 150 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 Digital Vernier caliper

5. เครื่องมือวัดความแข็ง เครื่องหมายการค้า FRANK มีช่วงในการวัดอยู่ที่ 0 – 100 HRC และมีความละเอียดในการวัด เท่ากับ 1 HRC แสดงในภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 เครื่องวัดความแข็ง

6. เครื่องมือวัดทั่วไป เวอร์เนีย เครื่องหมายการค้า Mitutoyo มีช่วงในการวัด คือ 0 – 200 มิลลิเมตร และความละเอียดในการวัด คือ 0.05 มิลลิเมตร แสดงในภาพที่ 3.9

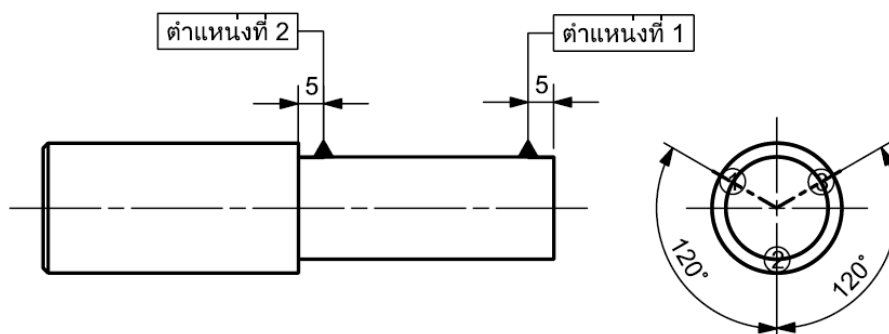


ภาพที่ 3.9 เวอร์เนีย

### 3.3 การวัดค่าในการทดลอง

#### 3.3.1 การวัดค่าความเรียบผิว

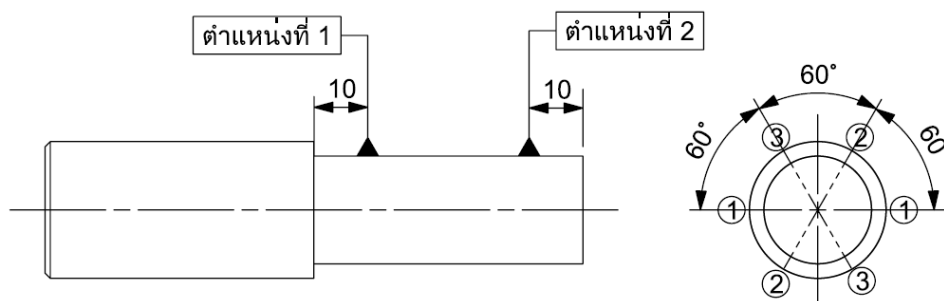
ให้นำชิ้นงานที่ผ่านการกลึงตามค่าระดับปัจจัยที่กำหนดมาวัดหาค่าความเรียบผิว โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองคือ ค่าความเรียบผิวแบบ Ra ในการวัดค่าความเรียบผิวแต่ละชิ้นงานจะวัดจำนวน 2 ตำแหน่ง โดยแต่ละจุดจะทำการหมุนชิ้นงานประมาณ  $120^\circ$  ตำแหน่งแรกจะห่างจากปลายประมาณ 5 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 3.10 และตำแหน่งที่ 2 ห่างจากขอบด้านในประมาณ 5 มิลลิเมตร นำผลการทดลองบันทึกลงในตารางที่ได้จาก Minitab 16



ภาพที่ 3.10 แสดงตำแหน่งวัดและจุดวัดค่าความเรียบผิว

### 3.3.2 การวัดค่าความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลาง

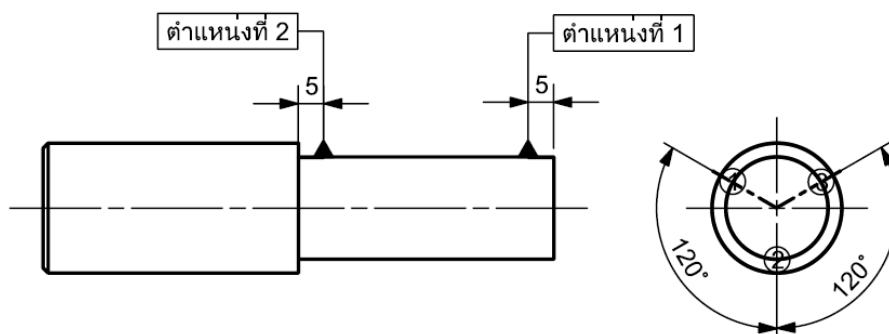
นำชิ้นงานที่ผ่านการกลึงตามค่าระดับปัจจัยที่กำหนดมาวัดหาค่าความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยวิธีการวัดค่าความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลางของการทดลองคือ วัดชิ้นงานที่ผ่านการทดลองแล้วจำนวน 2 ตำแหน่ง โดยตำแหน่งแรกห่างจากจุดปลาย 10 มิลลิเมตร และตำแหน่งต่อมาห่างจากขอบด้านใน 10 มิลลิเมตร วัดทั้งหมด 3 คู่ในแต่ละตำแหน่ง จากนั้นหาค่าเฉลี่ยแต่ละตำแหน่ง แล้วจึงนำมาเปรียบเทียบกันในรูปแบบของค่าสัมบูรณ์ เพื่อดูความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลาง ดังภาพที่ 3.11



ภาพที่ 3.11 แสดงตำแหน่งวัดและจุดวัดค่าความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลาง

### 3.3.3 การวัดค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็งของชิ้นงาน

ในการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็งนั้นจะมีการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานก่อนการทดลอง และหลังการทดลอง โดยการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานนั้นจะมีการวัดทั้งหมด 2 ตำแหน่ง โดยวัดตำแหน่งละ 3 จุด เพื่อศึกษาดูการเปลี่ยนแปลงความแข็งที่ผิวงานจากการทดลอง รูปแบบตำแหน่งในการวัดจะแสดงในภาพที่ 3.12



ภาพที่ 3.12 แสดงตำแหน่งวัดและจุดวัดค่าความแข็งของชิ้นงาน

### 3.4 การทดสอบปัจจัยที่ส่งผลในกระบวนการกลึง CNC และหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสม

การทดสอบปัจจัยในกระบวนการกลึง CNC เพื่อต้องการหาปัจจัยที่ส่งผลต่อความเรียบผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI/SUS 304 และค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าความเรียบผิวอยู่ที่  $0.2\mu\text{m} - 1.0\mu\text{m}$ .

จากศึกษางานวิจัยของ Horváth (2015) งานวิจัยนี้จึงใช้การทดลองพื้นผิวตอบสนองด้วยวิธีการ Central Composite Design ในการหาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการกลึง และการหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสม ในส่วนการเลือกปัจจัยที่จะศึกษานั้น จะเลือกจากการศึกษางานวิจัยที่มีลักษณะคล้ายกันเพื่อลดขั้นตอนในการทดลองเบื้องต้น ลดค่าใช้จ่าย และลดเวลาในการทำการทดลอง งานวิจัยส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นที่ปัจจัย 3 ปัจจัยหลัก คือ ความเร็วตัด (Cutting Speed), อัตราป้อน (Feed Rate), และความลึกป้อน (Depth of Cut) งานวิจัยนี้จึงเลือกทั้ง 3 ปัจจัยมาใช้ในการออกแบบการทดลองพื้นผิวตอบสนอง ทั้งนี้สามารถหาความเร็วรอบได้จากสมการที่ 3.1 (บรรเลง และคณะ, 2524)

$$n = \frac{V}{\pi * d}$$

สมการที่ 3.1

หมายเหตุ  $n$  = ความเร็วรอบ มีหน่วยเป็น รอบต่อนาที

$V$  = ความเร็วตัด มีหน่วยเป็น เมตรต่อนาที

$d$  = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร

#### 3.4.1 การทดสอบปัจจัยในกระบวนการกลึง CNC ของเม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์เคลือบผิว PVD

การทดสอบปัจจัยในการบวนการกลึง CNC ของเม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์เคลือบผิว PVD นั้น จะใช้ปัจจัยในการทดสอบทั้งหมด 3 ปัจจัย ประกอบด้วย

1. ความเร็วตัด (Cutting Speed) จาก Cutting tool main Catalog 2015 ของบริษัท CERATIZIT ระบุว่าค่าความเร็วตัดที่เหมาะสมสำหรับ เม็ดมีดกลึง DCMT11T304-M25 เท่ากับ 100

– 220 เมตรต่อนาที งานวิจัยนี้จึงใช้ค่าความเร็วตัดในการทดสอบที่ 100, 124, 160, 195, 220 เมตรต่อนาที

2. อัตราป้อน (Feed Rate) จาก Cutting tool main Catalog 2015 ของบริษัท CERATIZIT ที่ระบุจากรูปแบบการเคลือบผิว CTPM125 คือ 0.06 – 0.20 มิลลิเมตรต่อรอบ งานวิจัยนี้จึงเลือกค่าอัตราป้อนที่จะศึกษามีทั้งหมด 5 ระดับคือ 0.06, 0.09, 0.13, 0.17, 0.20 มิลลิเมตรต่อรอบ

3. ความลึกป้อน (Depth of Cut) จาก Cutting tool main Catalog 2015 ของบริษัท CERATIZIT ในรูปแบบการเคลือบผิว CTPM125 คือ 0.2 - 1.5 มิลลิเมตร แต่ค่าระดับปัจจัยเดิมใช้ที่ 0.40 มิลลิเมตร ผู้วิจัยจึงใช้ค่าความลึกป้อนที่ 0.40 มิลลิเมตรเป็นค่ากลางในการทดสอบ ดังนั้นค่าความลึกป้อนที่จะศึกษามีทั้งหมด 5 ระดับคือ 0.20, 0.28, 0.40, 0.52, 0.60 มิลลิเมตร

ค่าระดับปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลองสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าระดับปัจจัยที่ใช้ในการศึกษาในการกลึงของเม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์เคลือบผิว PVD

ปัจจัย	ค่าระดับปัจจัย					หน่วย
	1	2	3	4	5	
ความเร็วตัด	100	124	160	195	220	เมตรต่อนาที
อัตราป้อน	0.06	0.09	0.13	0.17	0.20	มิลลิเมตรต่อรอบ
ความลึกป้อน	0.20	0.28	0.40	0.52	0.60	มิลลิเมตร

### 3.4.2 การทดสอบปัจจัยของกระบวนการกลึง CNC ของเม็ดมีดกลึงเซอร์เม็ท

การเลือกปัจจัยสำหรับการทดลองกับเม็ดมีดกลึงเซอร์เม็ทนั้น งานวิจัยนี้จะเลือกความเร็วตัด อัตราป้อน และความลึกป้อน เป็นปัจจัยในการทดลอง

1. ความเร็วตัด (Cutting Speed) จาก General Catalog ของบริษัท KYOCERA ระบุว่าค่าความเร็วตัดที่เหมาะสมสำหรับ เม็ดมีดกลึง DCMT11T304GP TN6020 เท่ากับ 120 – 200 เมตรต่อนาที งานวิจัยนี้จึงใช้ค่าความเร็วตัดในการทดลองที่ 120, 136, 160, 184 และ 200 เมตรต่อนาที

2. อัตราป้อน (Feed Rate) จาก General Catalog ของบริษัท KYOCERA ที่ระบุว่าค่าที่เหมาะสมสำหรับ เม็ดมีดกลึง DCMT11T304GP TN6020 คือ 0.08 – 0.2 มิลลิเมตรต่อรอบ งานวิจัยนี้จึงเลือกค่าอัตราป้อนที่ 0.09, 0.11, 0.15, 0.18 และ 0.20 มิลลิเมตรต่อรอบ

3. ความลึกป้อน (Depth of Cut) จาก General Catalog ของบริษัท KYOCERA ที่ระบุว่าค่าที่เหมาะสมสำหรับ เม็ดมีดกลึง DCMT11T304GP TN6020 คือ 0.5 – 1.5 มิลลิเมตร งานวิจัยนี้จึงเลือกค่าความลึกป้อนที่ 0.50, 0.70, 1.00, 1.30 และ 1.50 มิลลิเมตร

ค่าระดับปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลองสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.2

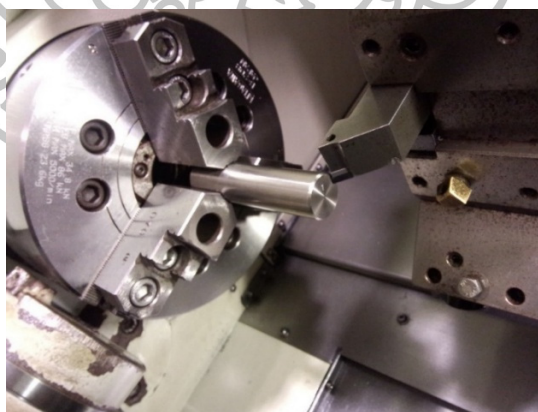
ตารางที่ 3.2 ค่าระดับปัจจัยที่ใช้ในการศึกษาในการกลึงของเม็ดมีดกลึงเซอร์เม็ท

ปัจจัย	ค่าระดับปัจจัย					หน่วย
	1	2	3	4	5	
ความเร็วตัด	120	136	160	184	200	เมตรต่อนาที
อัตราป้อน	0.09	0.11	0.15	0.18	0.20	มิลลิเมตรต่อรอบ
ความลึกป้อน	0.50	0.70	1.00	1.30	1.50	มิลลิเมตร

### 3.4.3 ขั้นตอนการทดลอง

ขั้นตอนการทดลองจะเป็นการจัดเตรียมวัสดุ รวมถึงขั้นตอนในการทำการทดลองเพื่อหาปัจจัย และค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสม ที่ทำให้ความเรียบผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI/SUS 304 อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด รวมถึงเพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพชิ้นงานในด้านอื่นด้วย

1. การจัดเตรียมชิ้นงานสำหรับใช้ในการทดลอง เป็นเหล็กกล้าไร้สนิม AISI/SUS 304 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร มีความยาว 110 มิลลิเมตร จำนวน 34 ชิ้น
2. นำชิ้นงานที่เตรียมไว้มาวัดค่าความแข็งของชิ้นงาน ที่ 2 ตำแหน่ง ตำแหน่งละ 3 จุด จากนั้นหาค่าเฉลี่ยแล้วบันทึกผลในตารางบันทึกผลค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็งของชิ้นงาน ของชิ้นงานก่อนการทดลอง
3. นำชิ้นงานที่จัดเตรียมไว้มาทำการกลึงตามค่าระดับปัจจัยที่กำหนด โดยกลึงให้ได้ความยาว 50 มิลลิเมตร ตามแนวยาวของชิ้นงาน (เปลี่ยนคมตัดเม็ดมีดกลึงทุกครั้งที่กลึงชิ้นงานใหม่) ดังภาพที่ 3.13



ภาพที่ 3.13 การกลึงชิ้นงานตัวอย่างในแต่ละระดับปัจจัย

4. วัดค่าความเรียบผิวชิ้นงานแบบ Ra ทั้งหมด 3 จุด จุดละ 2 ตำแหน่ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย จากนั้นบันทึกผลในตารางที่เตรียมไว้
5. วัดค่าความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานหลังการทดสอบ ทั้งหมด 2 ตำแหน่ง ตำแหน่งละ 3 จุด จากนั้นบันทึกผลในตารางที่เตรียมไว้

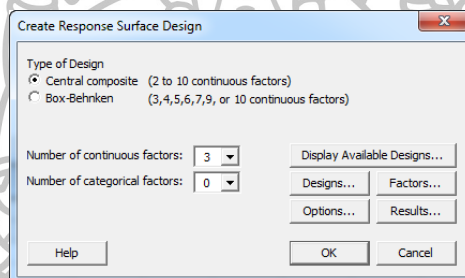
### 3.4.4 การบันทึกการทดลอง

การวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติจะใช้ Minitab 16 ช่วยในการออกแบบตารางการทดลองแบบ Central Composite Design การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการบันทึกการทดลอง การหาสมการถดถอย และการหาค่าที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าความเรียบผิวอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

1. การออกแบบตารางการทดลองแบบ Central Composite Design ใช้โปรแกรม Minitab 16 ในการสร้างตารางสำหรับบันทึกผลในการออกแบบการทดลอง Central Composite Design โดยมีขั้นตอนดังนี้

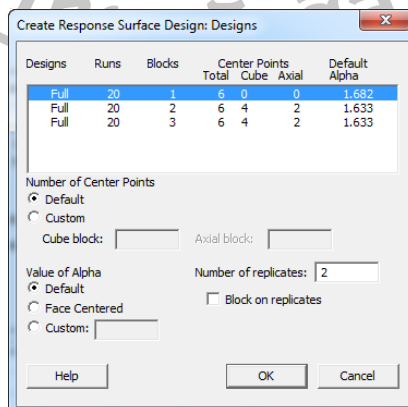
1.1 เปิดโปรแกรม Minitab16 และเลือก Stat --> DOE --> Response Surface --> Create Response Surface Design...

1.2 จากนั้นเลือกชนิดของการออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design โดยใช้ปัจจัยจำนวน 3 ปัจจัยในการทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 3.14



ภาพที่ 3.14 หน้าต่างในการเลือกชนิดของการออกแบบการทดลอง

1.3 จากนั้นใส่จำนวนที่ต้องการทำซ้ำจำนวน 2 ครั้งในแต่ละระดับของปัจจัย ดังแสดงในภาพที่ 3.15



ภาพที่ 3.15 หน้าต่างในการเลือกจำนวนการทำการทดลองซ้ำ



1.4 หลังจากนั้นจะได้ตารางสำหรับบันทึกผลสำหรับการออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design โดยจะใช้สำหรับบันทึกค่าความเรียบผิว และความกลม ของชิ้นงาน ทดสอบดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ลำดับการทดลองของเม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์เคลือบผิว PVD

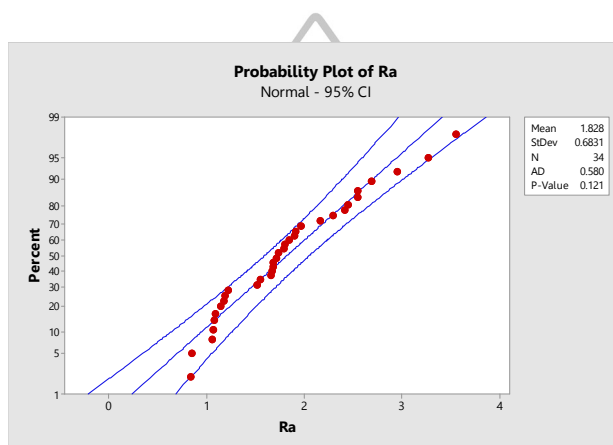
StdOrder	RunOrder	Speed	Feed	Depth
18	1	124	0.09	0.28
26	2	100	0.13	0.40
20	3	124	0.17	0.28
24	4	124	0.17	0.52
33	5	160	0.13	0.40
28	6	160	0.06	0.40
30	7	160	0.13	0.20
32	8	160	0.13	0.40
29	9	160	0.20	0.40
...	...	...	...	...
...	...	...	...	...
...	...	...	...	...
7	30	124	0.17	0.52
9	31	100	0.13	0.40
16	32	160	0.13	0.40
17	33	160	0.13	0.40
14	34	160	0.13	0.60

หมายเหตุ StdOrder คือ ลำดับรูปแบบหลักในการกำหนดรูปแบบการทดลอง  
 RunOrder คือ ลำดับการสุ่มในการดำเนินการทดลอง  
 Speed คือ ค่าระดับปัจจัยความเร็วตัดที่ใช้ในการทดลอง  
 Feed คือ ค่าระดับปัจจัยอัตราป้อนที่ใช้ในการทดลอง  
 Depth คือ ค่าระดับปัจจัยระยะป้อนตัดที่ใช้ในการทดลอง

### 3.4.5 การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการบันทึกการทดลอง

การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการบันทึกการทดลองนั้น จะมีการวิเคราะห์การกระจายตัวของข้อมูล หลังจากนั้นจะมีการวิเคราะห์ ANOVA

การวิเคราะห์การกระจายตัวของข้อมูลจะวิเคราะห์จากการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติ ว่ามีความเป็นปกติหรือไม่ สามารถสร้างกราฟได้จาก Graph --> Probability Plot... และดูค่า P-Value ของกราฟที่วิเคราะห์ได้ว่ามีผลอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ ดังแสดงในภาพที่ 3.16



ภาพที่ 3.16 กราฟตัวอย่างแสดงการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติที่มีการแจกแจงแบบปกติ

การวิเคราะห์ ANOVA จะเป็นการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าตอบสนองในทุกปัจจัย โดยในการออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design นี้จะแสดงถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าตอบสนองทั้งหมด 3 แบบด้วยกัน คือ ปัจจัยหลักกำลังหนึ่ง ปัจจัยหลักกำลังสอง และปัจจัยร่วมกำลังหนึ่ง ในการวิเคราะห์ว่าปัจจัยใดมีผลนั้น สามารถดูได้จากค่า P-Value ว่ามีผลอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ สามารถสร้างข้อมูลได้จาก Stat --> DOE --> Response Surface --> Analyze Response Surface Design... ดังแสดงในภาพที่ 3.17

Response Surface Regression: Ra versus Speed, Feed, Depth					
Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	14.9796	1.6644	95.01	0.000
Linear	3	14.3349	4.7783	272.76	0.000
Speed	1	0.0954	0.0954	5.45	0.028
Feed	1	14.2189	14.2189	811.67	0.000
Depth	1	0.0205	0.0205	1.17	0.290
Square	3	0.5328	0.1776	10.14	0.000
Speed*Speed	1	0.0990	0.0990	5.65	0.026
Feed*Feed	1	0.2689	0.2689	15.35	0.001
Depth*Depth	1	0.0016	0.0016	0.09	0.766
2-Way Interaction	3	0.1119	0.0373	2.13	0.123
Speed*Feed	1	0.0883	0.0883	5.04	0.034
Speed*Depth	1	0.0211	0.0211	1.20	0.284
Feed*Depth	1	0.0026	0.0026	0.15	0.706
Error	24	0.4204	0.0175		
Lack-of-Fit	5	0.1367	0.0273	1.83	0.155
Pure Error	19	0.2837	0.0149		
Total	33	15.4000			
Model Summary					
	S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)	
	0.132356	92.27%	91.25%	90.56%	

ภาพที่ 3.17 ตัวอย่างการวิเคราะห์ ANOVA จากการออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design

### 3.4.6 สมการถดถอย

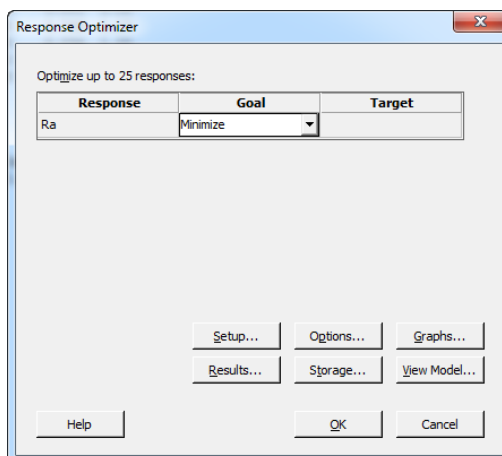
สมการถดถอยที่ได้จาก Minitab 16 จะเป็นสมการที่ใช้ในพยากรณ์ค่าตอบสนองในระดับปัจจัยต่างๆที่ทำการทดลอง จะได้พร้อมกับการวิเคราะห์ ANOVA ดังภาพที่ 3.18

$$Ra = -2.21 + 0.02554 \text{ Speed} + 8.50 \text{ Feed} + 1.75 \text{ Depth} - 0.000053 \text{ Speed*Speed} + 64.1 \text{ Feed*Feed} - 0.59 \text{ Depth*Depth} - 0.0531 \text{ Speed*Feed} - 0.00864 \text{ Speed*Depth} + 2.63 \text{ Feed*Depth}$$

ภาพที่ 3.18 ตัวอย่างสมการถดถอยที่ได้จาก Minitab 16

### 3.4.7 การหาค่าที่เหมาะสม

การหาค่าที่เหมาะสมใน Minitab 16 จะเป็นการหาค่าที่ทำให้ค่าตอบสนองอยู่ใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการในงานวิจัย โดยในงานวิจัยนี้ต้องการค่าที่ดีที่สุด (Minimize) แต่ค่าสูงสุดต้องไม่เกิน 1.0  $\mu\text{m}$ . สามารถหาได้จาก Stat --> DOE --> Response Surface --> Response Optimizer... ดังภาพที่ 3.19



ภาพที่ 3.19 หน้าต่างสำหรับกำหนดค่าตอบสนองที่ต้องการ

### 3.4.8 การยืนยันผลการทดลอง

การยืนยันผลการทดลองนี้ทำขึ้นเพื่อทดสอบความถูกต้องของสมการถดถอยว่ามีความแม่นยำมากน้อยเพียงใด โดยอ้างอิงวิธีการจากงานวิจัยของ ชาญ (2548) งานวิจัยนี้ใช้ชิ้นงานทดสอบทั้งหมด 6 ชิ้นงาน เพื่อเป็นการยืนยันผลการทดลอง และสามารถสร้างตารางสำหรับการทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ตัวอย่างตารางการทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลอง

ลำดับทดสอบ	ความเร็วตัด	อัตราป้อน	ความลึกป้อน	ค่าพยากรณ์	ค่าความเรียบผิว	ค่าส่วนต่าง	% ส่วนต่าง
1							
2							
3							
4							
5							
6							

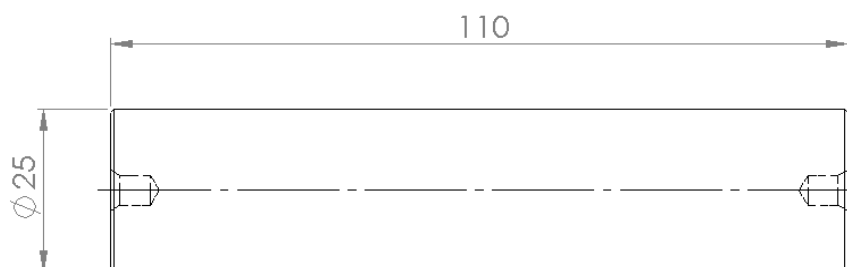
### 3.5 การศึกษาความคุ้มค่าในการเลือกใช้เม็ดมีดกลึง

การทดลองเพื่อนำมาสู่การหาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการเปลี่ยนเม็ดมีดกลึงในการใช้งาน โดยจะเป็นการทดลองกับเม็ดมีดกลึง 2 ชนิด คือ เม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์เคลือบผิว PVD กับเม็ดมีดกลึงเซอร่าเม็ท เมื่อค่าความเรียบผิวที่สูงกว่า  $1.0 \mu\text{m}$ . คมตัดของเม็ดมีดกลึงนั้นจะหมดอายุการใช้งานในทันที

#### 3.5.1 แผนการทดลอง

จากการศึกษางานวิจัยของ พรศิลป์ (2543) ที่วิจัยเพื่อศึกษาอายุการใช้งานของเม็ดมีดในการตัดเฉือนเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (S20C) โดยใช้ปัจจัย ความเร็วตัด, อัตราป้อน และความลึกป้อน ในการทดลอง ซึ่งตัวอย่างที่ใช้ในทดลองนั้นมีความยาว 800 มิลลิเมตร โดยทำการกลึงชิ้นงาน 2 ครั้ง โดยครั้งที่ 1 จะกลึงชิ้นงาน 400 มิลลิเมตร จากนั้นกลับด้านเพื่อกลึงชิ้นงานอีกด้านที่ระยะกลึง 400 มิลลิเมตรเช่นเดียวกัน ผลจากงานวิจัยนี้คือปัจจัยทั้ง 3 ส่งผลต่ออายุการใช้งานของเม็ดมีด แต่ความเร็วตัด จะส่งผลมากที่สุด

ดังนั้นในการวางแผนการทดลองเพื่อเปรียบเทียบอายุการใช้งานของเม็ดมีดกลึงในงานวิจัยนี้ จะใช้ชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI/SUS 304 โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร มีความยาว 110 มิลลิเมตร จากนั้นกลึงงานที่มีความยาว 50 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.20 จำนวน 32 ชิ้นงาน โดยมีคุณสมบัติอื่นเช่นเดียวกับการทดลองในช่วงที่ 1 และ 2



ภาพที่ 3.20 ภาพกำหนดขนาดชิ้นงานทดสอบ

#### 3.5.2 ขั้นตอนการทดลอง

1. จัดเตรียมชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI/SUS 304 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ความยาว 110 มิลลิเมตร จำนวน 32 ชิ้นงานตัวอย่าง
2. นำชิ้นงานที่จัดเตรียมไว้มาทำการกลึงตามค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมของแต่ละเม็ดมีดกลึง โดยกลึงให้ได้ความยาว 50 มิลลิเมตร ตามแนวยาวของชิ้นงาน จำนวน 16 ชิ้น ดังแสดงในภาพที่ 3.20 โดยในชิ้นงานทดลองเดียวกันนั้นจะไม่มีมีการเปลี่ยนคมตัดเม็ดมีดกลึง แต่จะเปลี่ยนเม็ดมีดกลึงเมื่อเปลี่ยนทำการทดลองซ้ำ และเปลี่ยนชนิดของเม็ดมีดกลึง

3. วัดค่าความเรียบผิวชิ้นงานแบบ Ra ในการวัดค่าความเรียบผิวแต่ละชิ้นงานจะวัดจำนวน 2 ตำแหน่ง โดยแต่ละจุดจะทำการหมุนชิ้นงานประมาณ 120° ตำแหน่งแรกจะห่างจากปลายประมาณ 5 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 3.10 และตำแหน่งที่ 2 ห่างจากขอบด้านในประมาณ 5 มิลลิเมตร

### 3.5.3 การบันทึกผลการทดลอง

การบันทึกผลการทดลองเพื่อหาความคุ้มค่าในการเปลี่ยนชนิดเม็ดมีดกลึงนั้น จะบันทึกลงในตารางในการบันทึกผล โดยจะแสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ลำดับการบันทึกผล

ชนิดเม็ดมีดกลึง	ตำแหน่งการวัดค่าความเรียบผิว (mm.)																
	50		100		150		...		...		700		750		800		
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	
เม็ดกลึงคาร์ไบด์เคลือบผิว PVD																	
เม็ดกลึงเซอร์เม็ท																	

### 3.5.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์ผลการทดลองจะเป็นการหาสมการถดถอยของเม็ดมีดกลึงแต่ละชนิด โดยจะใช้สมการถดถอยอย่างง่ายในการวิเคราะห์ สามารถหาได้จาก Stat --> Regression --> Regression ... จากนั้นจะได้สมการถดถอย 2 สมการ ซึ่งจะเป็นสมการของเม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์เคลือบผิว PVD และ เม็ดมีดกลึงเซอร์เม็ท โดยจะนำสมการถดถอยที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองมาหาอายุการใช้งานด้วยการแทนค่าผลตอบสนองด้วย 1.0 เพื่อหาเวลาที่เม็ดมีดกลึงสามารถกลึงได้และค่าความเรียบผิวอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

### 3.5.5 การประเมินความคุ้มค่า

การประเมินความคุ้มค่าในการเปลี่ยนชนิดเม็ดมีดกลึงจะใช้การประเมินในลักษณะต้นทุนการผลิตระยะสั้น ในรูปแบบของต้นทุนคงที่เฉลี่ย (average fixed cost, AFC) โดยในขั้นตอนนี้จะเป็นเป้าหมายสำคัญในการหาอายุการใช้งานของเม็ดมีดกลึง การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์สามารถหาได้จากสมการที่ 3.2

$$AFC = \frac{TFC}{TP}$$

สมการที่ 3.2

หมายเหตุ AFC = ต้นทุนคงที่เฉลี่ย ในงานวิจัยนี้คือ ตัวชี้วัดความคุ้มค่า  
TFC = ต้นทุนคงที่รวม ในงานวิจัยนี้คือ ราคาของเม็ดมีดกลึงแต่ละชนิด  
TP = หน่วยของผลผลิตรวม ในงานวิจัยนี้คือ ระยะทางที่เม็ดมีดกลึงสามารถกลึง  
ได้ที่ความเรียบผิวไม่เกิน 1.0 ไมโครเมตรคูณกับจำนวนคมตัด

เมื่อได้ตัวชี้วัดความคุ้มค่าของเม็ดมีดกลึงแต่ละชนิดแล้วให้นำมาเปรียบเทียบเพื่อนำค่า  
ความคุ้มค่าที่ได้ไปเป็นข้อมูลในการตัดสินใจเลือกใช้เม็ดมีดกลึง



## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะประกอบด้วยการศึกษาทดลองทั้งหมด 2 ส่วนคือ

1. การทดลองเพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพชิ้นงาน ซึ่งประกอบด้วย ความเรียบผิว การเปลี่ยนแปลงความแข็งที่ผิวงาน ความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลาง และค่าของระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าความเรียบผิวอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด โดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง Central Composite Design (CCD) แบ่งการทดลองออกเป็น 2 การทดลองคือ การทดลองกับเม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์เคลือบผิว PVD และ เม็ดมีดกลึงเซอร์เมท ปัจจัยที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย ความเร็วตัด อัตราป้อน และความลึกป้อน ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง

2. การทดลองเพื่อหาอายุการใช้งานของเม็ดมีดกลึง 2 ชนิดคือ เม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์เคลือบผิว PVD และเม็ดมีดกลึงเซอร์เมท เพื่อเปรียบเทียบความคุ้มค่าโดยใช้สมการถดถอยเชิงเส้นเป็นเครื่องมือในการหาอายุการใช้งานของเม็ดมีดกลึงในรูปแบบความยาวงานกลึง และใช้สมการต้นทุนคงที่เฉลี่ยในการหาความคุ้มค่าในการเปลี่ยนชนิดเม็ดมีดกลึง

#### 4.1 การวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาปัจจัยของเม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์เคลือบผิว PVD

ตารางที่ 4.1 แสดงการเก็บข้อมูลค่าความเรียบผิวในการกลึงด้วยเม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์เคลือบผิว PVD

StdOrder	RunOrder	Speed	Feed	Depth	Ra
18	1	124	0.09	0.28	0.795
26	2	100	0.13	0.40	1.770
20	3	124	0.17	0.28	2.566
24	4	124	0.17	0.52	2.706
33	5	160	0.13	0.40	1.533
28	6	160	0.06	0.40	0.592
30	7	160	0.13	0.20	1.470
32	8	160	0.13	0.40	1.521
29	9	160	0.20	0.40	3.283
23	10	195	0.09	0.52	0.548
25	11	195	0.17	0.52	2.760
34	12	160	0.13	0.40	1.472
22	13	124	0.09	0.52	0.891
21	14	195	0.17	0.28	2.696
31	15	160	0.13	0.60	1.634
27	16	219	0.13	0.40	1.756



ตารางที่ 4.1 แสดงการเก็บข้อมูลค่าความเรียบผิวในการกลึงด้วยเม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์เคลือบผิว PVD

(ต่อ)

StdOrder	RunOrder	Speed	Feed	Depth	Ra
19	17	195	0.09	0.28	0.695
4	18	195	0.17	0.28	2.213
10	19	219	0.13	0.40	1.418
1	20	124	0.09	0.28	0.794
13	21	160	0.13	0.20	1.476
11	22	160	0.06	0.40	0.569
12	23	160	0.20	0.40	3.335
2	24	195	0.09	0.28	0.928
6	25	195	0.09	0.52	0.672
8	26	195	0.17	0.52	2.433
15	27	160	0.13	0.40	1.350
5	28	124	0.09	0.52	0.842
3	29	124	0.17	0.28	2.684
7	30	124	0.17	0.52	2.538
9	31	100	0.13	0.40	1.461
16	32	160	0.13	0.40	1.515
17	33	160	0.13	0.40	1.539
14	34	160	0.13	0.60	1.597

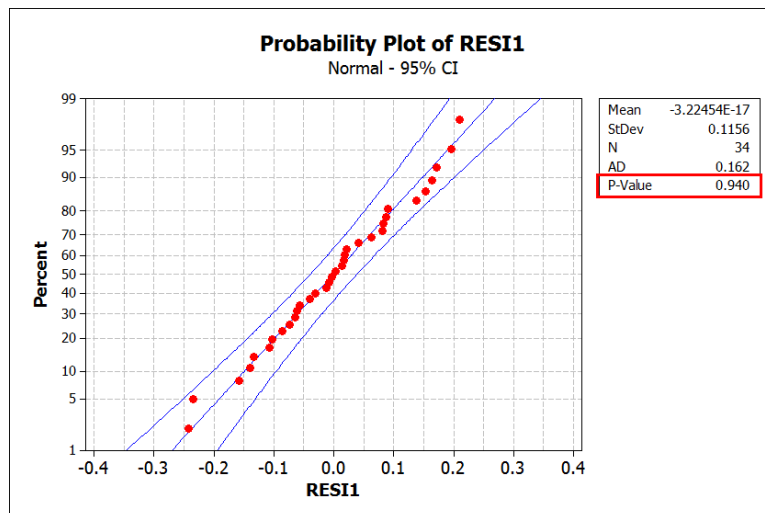
#### 4.1.1 การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อความเรียบผิวของชิ้นงาน

##### 1. การทดสอบความถูกต้องของค่าตอบสนอง

##### 1.1 การทดสอบความเป็นปกติของข้อมูล

การทดสอบความเป็นปกติของข้อมูลเป็นการทดสอบเพื่อดูความเป็นปกติของข้อมูลที่ได้ทำการบันทึกผลการทดลองในตารางที่ 4.1 ว่าค่าที่บันทึกมีความเชื่อมั่นหรือไม่ โดยงานวิจัยนี้จะใช้ความเชื่อมั่นที่ 95% หรือระดับนัยสำคัญที่ 0.05 เพื่อเป็นการสร้างความเชื่อมั่นในผลวิเคราะห์ที่ต่อเนื่องกัน

จากภาพที่ 4.1 แสดงให้เห็นกราฟความน่าจะเป็นของค่าส่วนตกค้างค่าความเรียบผิว มีค่า P-Value อยู่ที่ 0.940 แสดงให้เห็นว่าข้อมูลที่ได้ทำการบันทึกมีความเป็นปกติ

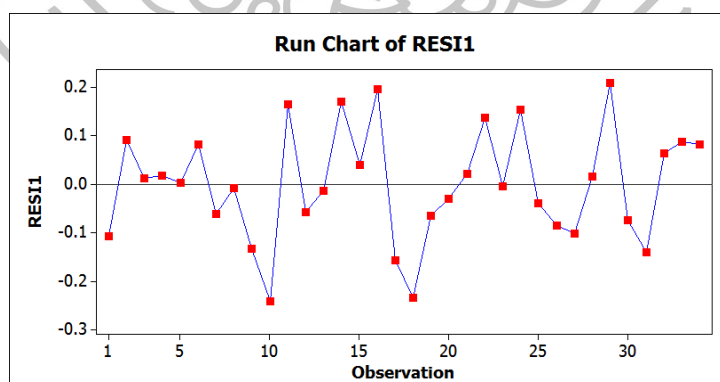


ภาพที่ 4.1 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าส่วนตักค่าความเรียบผิว

### 1.2 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลนั้น เป็นการสร้างแผนภาพการกระจายตัวของข้อมูล เพื่อใช้ในการสังเกตความเป็นอิสระของข้อมูลในตารางที่ 4.1 โดยดูจากข้อมูลว่ามีรูปแบบในการกระจายตัวที่แน่นอนหรือไม่ และสามารถประมาณค่าการกระจายตัวได้หรือไม่

จากภาพที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวของค่าส่วนตักค่าความเรียบผิว ไม่สามารถประมาณรูปแบบได้ และ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน เป็นการบ่งบอกถึงความเป็นอิสระต่อกันของค่าความเรียบผิว

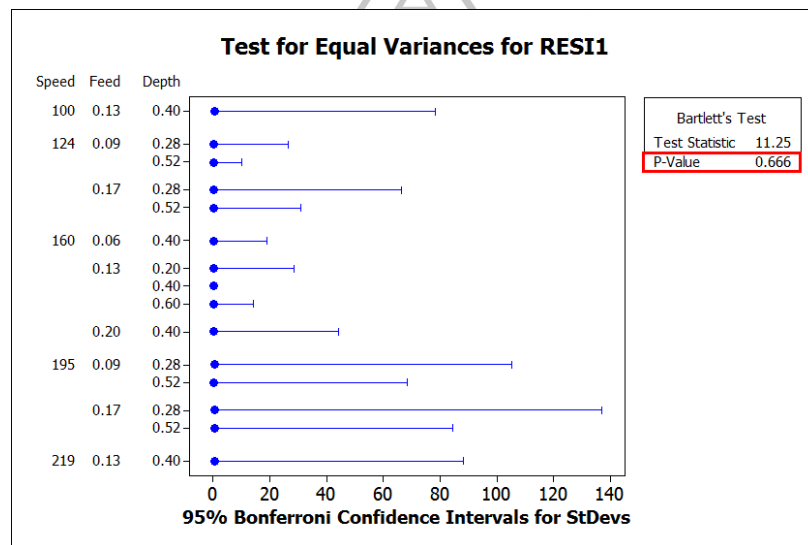


ภาพที่ 4.2 กราฟการกระจายตัวของค่าส่วนตักค่าความเรียบผิว

### 1.3 การทดสอบความเสถียรของความแปรปรวน

การทดสอบความเสถียรของความแปรปรวน เป็นการทดสอบเพื่อดูค่าความแปรปรวนเทียบกับระดับของปัจจัยทุกระดับที่ทำการกลึงในตารางที่ 4.1 โดยดูจากค่า P-Value ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือระดับนัยสำคัญที่ 0.05

จากภาพที่ 4.3 เป็นการตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวนของส่วนตักค้ำค่าความเรียบผิวเทียบกับระดับของปัจจัยทุกปัจจัย เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของค่าส่วนตักค้ำพบว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวนเนื่องจากค่า P-Value มีค่ามากกว่า 0.666



ภาพที่ 4.3 กราฟความแปรปรวนของค่าส่วนตักค้ำค่าความเรียบผิว

## 2. การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความเรียบผิว

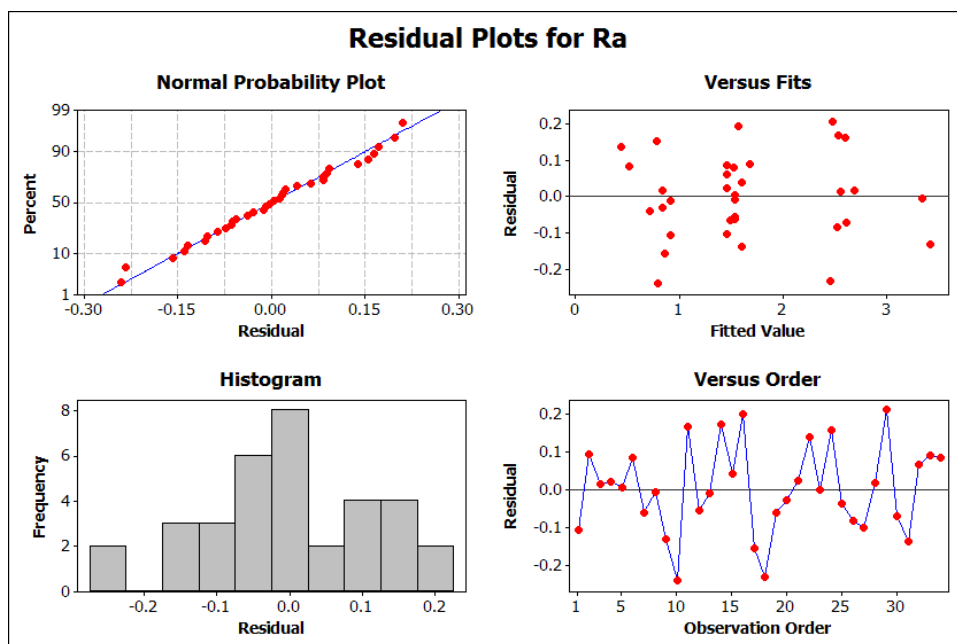
นำค่าความเรียบผิวที่บันทึกในตารางที่ 4.1 มาวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความเรียบผิว โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 โดยผลการวิเคราะห์ ดังภาพที่ 4.4 และ 4.5

Response Surface Regression: Ra versus Block, Speed, Feed, Depth						
Analysis of Variance for Ra						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Blocks	1	0.0514	0.0514	0.0514	2.68	0.115
Regression	9	21.0309	21.0309	2.3368	121.90	0.000
Linear	3	20.4496	20.4496	6.8165	355.59	0.000
Speed	1	0.0343	0.0343	0.0343	1.79	0.194
<b>Feed</b>	<b>1</b>	<b>20.4063</b>	<b>20.4063</b>	<b>20.4063</b>	<b>1064.52</b>	<b>0.000</b>
Depth	1	0.0091	0.0091	0.0091	0.47	0.499
Square	3	0.5586	0.5586	0.1862	9.71	0.000
Speed*Speed	1	0.0009	0.0226	0.0226	1.18	0.289
<b>Feed*Feed</b>	<b>1</b>	<b>0.5547</b>	<b>0.5297</b>	<b>0.5297</b>	<b>27.63</b>	<b>0.000</b>
Depth*Depth	1	0.0030	0.0030	0.0030	0.16	0.694
Interaction	3	0.0227	0.0227	0.0076	0.40	0.758
Speed*Feed	1	0.0005	0.0005	0.0005	0.02	0.876
Speed*Depth	1	0.0041	0.0041	0.0041	0.22	0.647
Feed*Depth	1	0.0181	0.0181	0.0181	0.94	0.341
Residual Error	23	0.4409	0.4409	0.0192		
Lack-of-Fit	19	0.4176	0.4176	0.0220	3.77	0.104
Pure Error	4	0.0233	0.0233	0.0058		
Total	33	21.5232				

S = 0.138454    PRESS = 1.03893  
R-Sq = 97.95%    R-Sq(pred) = 95.17%    R-Sq(adj) = 97.06%

ภาพที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความเรียบผิว

จากภาพที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่า ปัจจัยกำลังหนึ่งที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความเรียบผิว คือ อัตราป้อน เพียงปัจจัยเดียว เนื่องจากมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 ส่วนความเร็วตัด และความลึกป้อน ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความเรียบผิวอย่างมีนัยสำคัญ ด้วยแสดงค่า P-Value ที่มากกว่า 0.05 ส่วนของปัจจัยกำลังสองคือ อัตราป้อนกำลังสอง ที่ส่งผลต่อความเรียบผิวอย่างมีนัยสำคัญ โดยแสดงให้เห็นจากค่า P-value ที่น้อยกว่า 0.05 และส่วนอันตรกิริยานั้นไม่มีอันตรกิริยาใดที่ส่งผลต่อความเรียบผิวอย่างมีนัยสำคัญ



ภาพที่ 4.5 กราฟส่วนตกค้างของค่าความเรียบผิว

จากภาพที่ 4.5 แสดงถึงความเป็นปกติของข้อมูล จากกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติ แสดงให้เห็นว่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวเป็นปกติในแนวเส้นตรง และฮิสโตแกรมแสดงในทิศทางเดียวกันคือ มีลักษณะคล้ายระฆังคว่ำ แสดงว่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวเป็นปกติ ส่วนแผนภาพการกระจายตัวของส่วนตกค้างกับค่าพยากรณ์มีลักษณะกระจายไม่จับตัวเป็นกลุ่ม และแผนภาพการกระจายตัวระหว่างส่วนตกค้างกับเวลา มีความเป็นอิสระไม่สามารถกำหนดรูปแบบที่แน่นอนได้ ซึ่งแสดงว่าส่วนตกค้างเป็นอิสระต่อกัน

### 3. % Contribution ของค่าความเรียบผิว

ตารางที่ 4.2 % Contribution ของค่าความเรียบผิว

Factor	Mean square	Contribution ratio	% Contribution
Speed	0.03430	0.00163	0.163
Feed	20.40630	0.97045	97.045
Depth	0.00910	0.00043	0.043
Speed * Speed	0.02260	0.00107	0.107
Feed * Feed	0.52970	0.02519	2.519
Depth * Depth	0.00300	0.00014	0.014
Speed * Feed	0.00050	0.00002	0.002
Speed * Depth	0.00410	0.00019	0.019
Feed * Depth	0.01810	0.00086	0.086
<b>Total</b>	<b>21.02770</b>	<b>1.00000</b>	<b>100.000</b>

จากการหา % Contribution ในตารางที่ 4.2 จะแสดงให้เห็นว่า ปัจจัยหลักหรือ อันตรกิริยาใด ส่งผลต่อความเรียบผิวมากน้อยอย่างไร เมื่อดูจากตารางแสดงให้เห็นว่า อัตราป้อนกำลังหนึ่ง และ อัตราป้อนกำลังสอง ส่งผลต่อความเรียบผิวเท่ากับ 97.045% และ 2.519% ตามลำดับ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าอัตราป้อนส่งผลเป็นอย่างมากต่อความเรียบผิวที่กลึงด้วยเม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์เคลือบผิว PVD

### 4. การวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis)

การวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุคูณคือการหาความสัมพันธ์ของปัจจัยกำลังหนึ่ง ปัจจัยกำลังสอง และอันตรกิริยา เพื่อเป็นการพยากรณ์ค่าความเรียบผิวที่จะเกิดขึ้น เมื่อระดับปัจจัยต่างๆเปลี่ยนแปลงไป

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนในภาพที่ 4.4 จะพบว่ามีปัจจัยกำลังหนึ่ง ปัจจัยกำลังสองและอันตรกิริยา ที่ไม่มีผลต่อสมการถดถอยอย่างมีนัยสำคัญจากค่า P-Value ที่มีค่ามากกว่า 0.05 ดังนั้นจึงทำการตัดปัจจัยต่างๆดังกล่าวและทำการหาสมการถดถอย ดังภาพที่ 4.6

Response Surface Regression: Ra versus Blocks, Feed					
Regression Equation in Uncoded Units					
Ra = 0.239 - 1.69 Feed + 89.6 Feed*Feed					
Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	3	20.9936	6.9979	396.36	0.000
Blocks	1	0.0514	0.0514	2.91	0.098
Linear	1	20.4063	20.4063	1155.82	0.000
Feed	1	20.4063	20.4063	1155.82	0.000
Square	1	0.5359	0.5359	30.35	0.000
Feed*Feed	1	0.5359	0.5359	30.35	0.000
Error	30	0.5297	0.0177		
Lack-of-Fit	26	0.5063	0.0195	3.34	0.125
Pure Error	4	0.0233	0.0058		
Total	33	21.5232			
S = 0.132873					
R-Sq = 97.54% R-Sq(pred) = 97.29% R-Sq(adj) = 96.82%					

ภาพที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของ อัตราป้อนกำลังหนึ่ง และอัตราป้อนกำลังสอง

ตารางที่ 4.3 การลดรูปสมการถดถอย

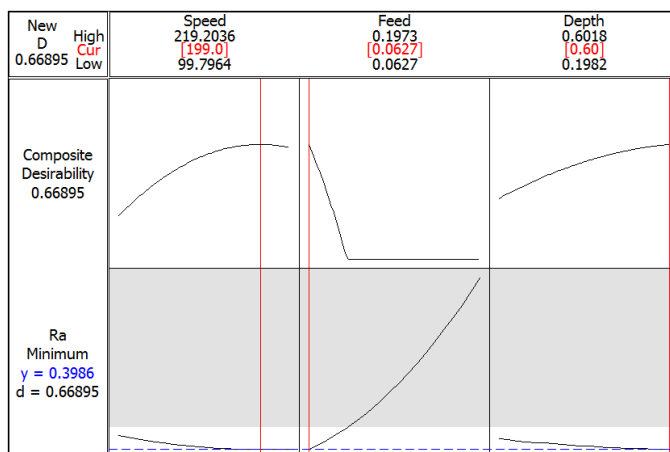
Factors	Regression equation	R-Sq (adj)
All	1.37 - 0.00800 Speed - 6.71 Feed - 0.80 Depth + 0.000025 Speed <sup>2</sup> + 95.8 Feed <sup>2</sup> + 0.81 Depth <sup>2</sup> + 0.0038 Speed*Feed - 0.00377 Speed*Depth + 7.01 Feed*Depth	97.95%
Feed	0.239 - 1.69 Feed + 89.6 Feed <sup>2</sup>	97.54 %

หมายเหตุ  $100 \leq \text{Speed} \leq 220$  ;  $0.06 \leq \text{Feed} \leq 0.20$  ;  $0.2 \leq \text{Depth} \leq 0.6$

การวิเคราะห์หาสมการถดถอยดังแสดงตามตารางที่ 4.3 เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Sq(adj)) พบว่าสมการถดถอยจากการลดรูปให้เหลือเพียงปัจจัยที่ส่งผลต่อความเรียบผิวอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05 จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ 97.54 % ลดลงจากเดิมที่เป็นสมการถดถอยแบบพื้นผิวตอบสนองทุกปัจจัยที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ 97.95 % เพียงเล็กน้อย

### 5. Optimization Plot ของค่าความเรียบผิว

จากภาพที่ 4.7 พบว่าค่าที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าความเรียบผิวต่ำที่สุด คือ ความเร็วตัด 199 เมตรต่อนาที อัตราป้อน 0.06 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกป้อน 0.60 มิลลิเมตร ซึ่งจะทำให้ค่าความเรียบผิวอยู่ที่ 0.3986  $\mu\text{m}$ .

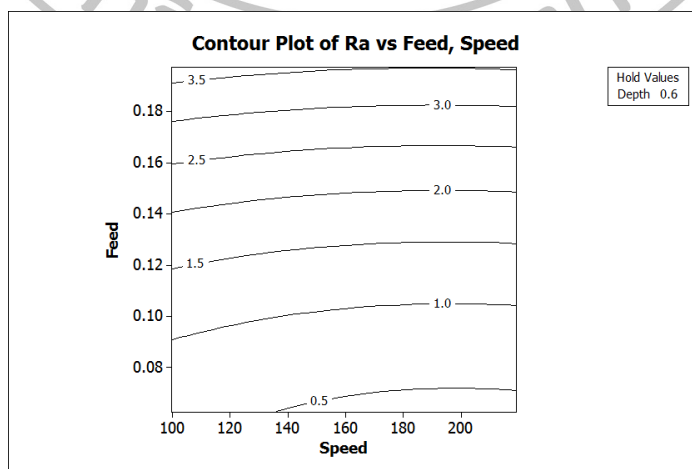


ภาพที่ 4.7 กราฟค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมของค่าความเรียบผิว

### 6. กราฟแสดงความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความเรียบผิว

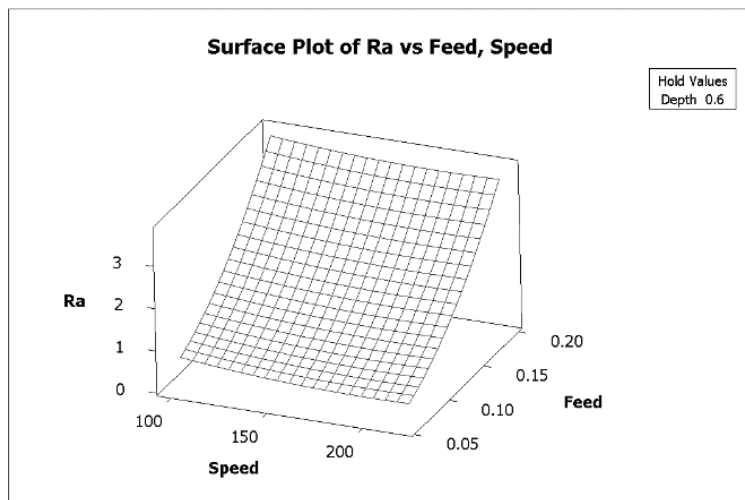
กราฟโครงร่างพื้นผิวและ กราฟพื้นผิวเป็นการแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าตอบสนองว่าจะเป็นไปในทิศทางใด

จากภาพที่ 4.8 และ 4.9 พบว่าเมื่อ อัตราป้อนลดลง จะทำให้ได้ค่าความเรียบผิวลดลง ด้วย ที่ความลึกป้อน 0.6 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4.8 กราฟโครงร่างพื้นผิวของความเรียบผิวระหว่างปัจจัย ความเร็วตัดและอัตราป้อน

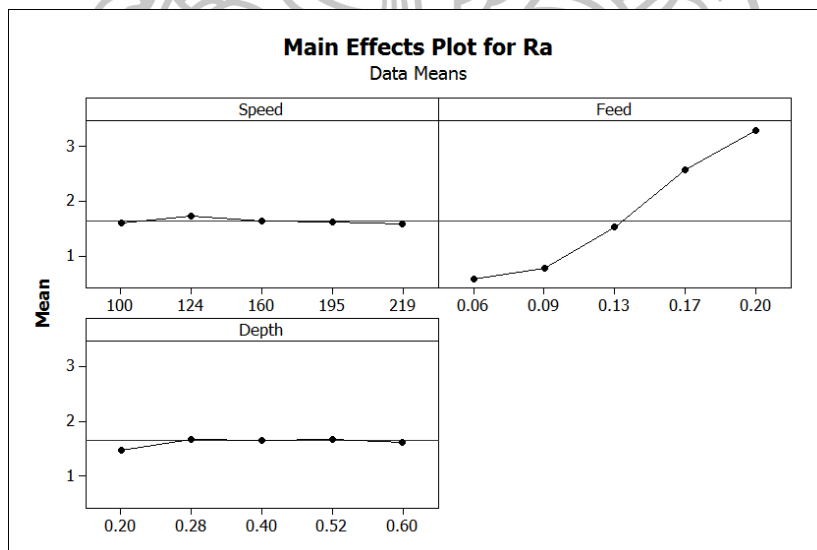




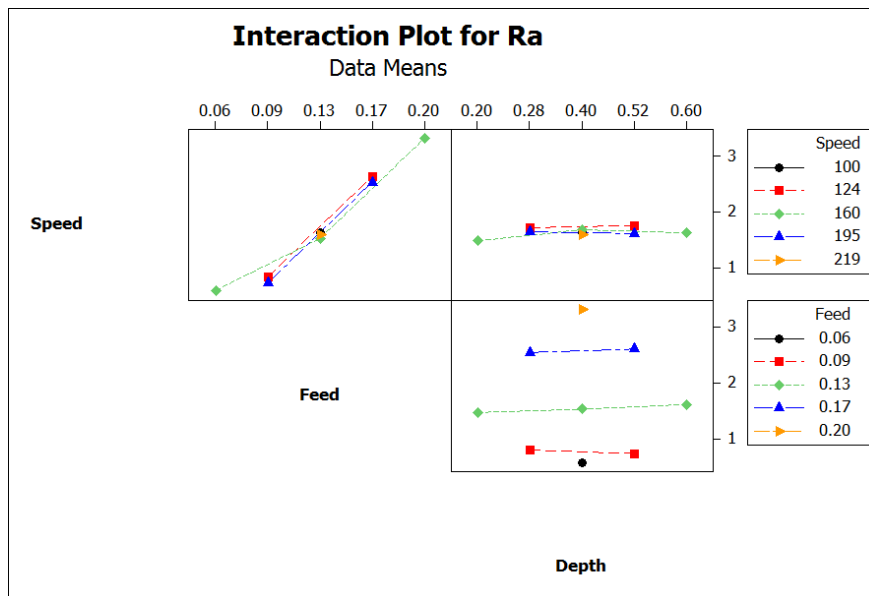
ภาพที่ 4.9 กราฟพื้นผิวของความเรียบผิวระหว่างปัจจัย ความเร็วตัดและอัตราป้อน

### 7. ผลกระทบของปัจจัยหลักและอันตรกิริยาต่อความเรียบผิว

จากภาพที่ 4.10 และ 4.11 พบว่าเมื่อ อัตราป้อนลดลงจะทำให้ค่าความเรียบผิวมีค่าลดลงด้วย ซึ่งมีความสอดคล้องกับการวิเคราะห์ความแปรปรวน กราฟโครงร่างพื้นผิว และกราฟพื้นผิว



ภาพที่ 4.10 กราฟผลกระทบของปัจจัยหลักต่อความเรียบผิว



ภาพที่ 4.11 กราฟผลกระทบของอันตรกิริยาต่อความเรียบผิว

### 8. การยืนยันผลการทดลอง

จากผลการทดลองพื้นผิวตอบสนองด้วยวิธี Central Composite Design นั้น พบว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อความเรียบผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI/SUS 304 คือ อัตราป้อนกำลังหนึ่ง และ อัตราป้อนกำลังสอง จึงได้กำหนดปัจจัยเพื่อทดลองเป็นการทดสอบความแม่นยำของสมการถดถอย ดังตารางที่ 4.4

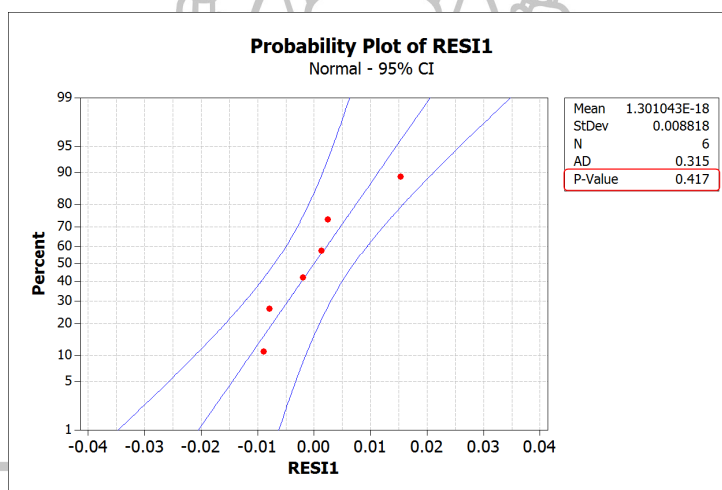
ตารางที่ 4.4 กำหนดปัจจัยการทดลองเพื่อทดสอบความแม่นยำของสมการถดถอย

ปัจจัย	ระดับปัจจัย						หน่วย
	1	2	3	4	5	6	
ความเร็วตัด	199	199	199	199	199	199	เมตรต่อนาที
อัตราป้อน	0.06	0.09	0.12	0.15	0.18	0.21	มิลลิเมตรต่อรอบ
ความลึกป้อน	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	มิลลิเมตร

จากตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบความแม่นยำของสมการถดถอย กับค่าที่ได้จากสมการถดถอย โดยค่าผิดพลาดที่ได้จะต้องมีค่า % ส่วนต่างอยู่ระหว่าง -2.46 ถึง 2.46 จากตารางที่ 4.5 พบว่า % ส่วนต่าง มีทั้งค่าสูงและค่าต่ำแต่ยังอยู่ในช่วงค่าผิดพลาดที่ได้กำหนดไว้ สมการถดถอยนี้จึงมีความเหมาะสมกับการทดลองนี้ และจากภาพที่ 4.12 แสดงผลการวิเคราะห์การกระจายตัวแบบปกติของค่าส่วนตกค้าง พบว่ามีการกระจายตัวที่เป็นแบบปกติ โดยมีค่า P-Value ที่มากกว่า 0.05

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบความแม่นยำของสมการถดถอย

ครั้งที่	ปัจจัย			ค่าความเรียบผิว (สมการถดถอย)	ค่าความเรียบผิว (การทดลอง)	ค่าส่วนต่าง	% ส่วนต่าง
	ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อน (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกป้อน (มิลลิเมตร)				
1	199	0.06	0.6	0.460	0.455	0.005	1.08
2		0.09		0.812	0.798	0.014	1.78
3		0.12		1.326	1.317	0.009	0.69
4		0.15		2.001	1.979	0.023	1.13
5		0.18		2.838	2.862	-0.024	-0.84
6		0.20		3.485	3.522	-0.037	-1.06



ภาพที่ 4.12 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าส่วนตกค้างในการทดลองยืนยันผล

#### 4.1.2 การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความแข็งของชิ้นงาน

ตารางที่ 4.6 แสดงการเก็บข้อมูลค่าความแข็งในการกลึงด้วยเม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์เคลือบผิว PVD

StdOrder	RunOrder	Speed	Feed	Depth	HRC 1	HRC 2	Difference of HRC
18	1	124	0.09	0.28	24.00	23.67	-0.33
26	2	100	0.13	0.40	25.00	24.50	-0.50
20	3	124	0.17	0.28	24.83	24.83	0.00
24	4	124	0.17	0.52	25.00	24.33	-0.67
33	5	160	0.13	0.40	24.50	24.00	-0.50
28	6	160	0.06	0.40	25.00	24.50	-0.50
30	7	160	0.13	0.20	24.83	24.67	-0.16
32	8	160	0.13	0.40	24.50	24.00	-0.50
29	9	160	0.20	0.40	25.00	24.50	-0.50
23	10	195	0.09	0.52	25.17	24.50	-0.67
25	11	195	0.17	0.52	25.33	25.00	-0.33

ตารางที่ 4.6 แสดงการเก็บข้อมูลค่าความแข็งในการกลึงด้วยมีดกัดกลึงคาร์ไบด์เคลือบผิว PVD (ต่อ)

StdOrder	RunOrder	Speed	Feed	Depth	HRC 1	HRC 2	Difference of HRC
34	12	160	0.13	0.40	24.87	24.33	-0.54
22	13	124	0.09	0.52	24.67	24.00	-0.67
21	14	195	0.17	0.28	24.83	24.50	-0.33
31	15	160	0.13	0.60	24.50	23.83	-0.67
27	16	219	0.13	0.40	25.17	24.67	-0.50
19	17	195	0.09	0.28	24.50	24.17	-0.33
4	18	195	0.17	0.28	25.17	24.87	-0.30
10	19	219	0.13	0.40	25.00	24.50	-0.50
1	20	124	0.09	0.28	24.50	24.50	0.00
13	21	160	0.13	0.20	25.17	25.17	0.00
11	22	160	0.06	0.40	24.67	24.33	-0.34
12	23	160	0.20	0.40	25.17	24.50	-0.67
2	24	195	0.09	0.28	25.50	25.17	-0.33
6	25	195	0.09	0.52	25.83	25.17	-0.66
8	26	195	0.17	0.52	25.00	24.33	-0.67
15	27	160	0.13	0.40	24.83	24.33	-0.50
5	28	124	0.09	0.52	25.33	24.67	-0.67
3	29	124	0.17	0.28	24.87	24.50	-0.37
7	30	124	0.17	0.52	24.83	24.33	-0.50
9	31	100	0.13	0.40	24.67	24.17	-0.50
16	32	160	0.13	0.40	25.00	24.50	-0.50
17	33	160	0.13	0.40	25.50	24.83	-0.67
14	34	160	0.13	0.60	24.50	23.50	-1.00

หมายเหตุ HRC1 = ค่าความแข็งเฉลี่ยก่อนการกลึง

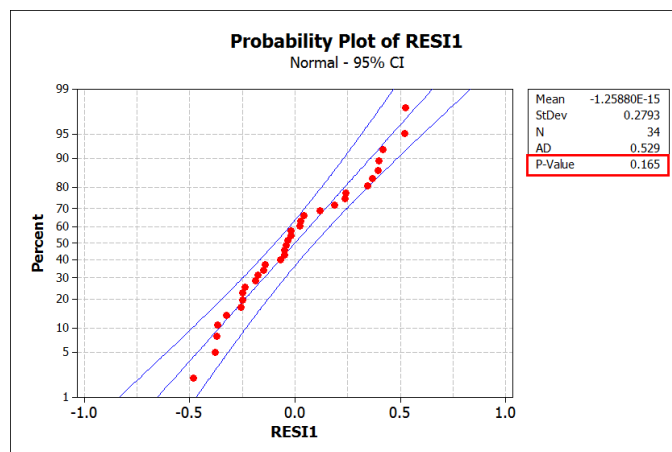
HRC2 = ค่าความแข็งเฉลี่ยหลังการกลึง

Difference of HRC = ค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็ง โดยมีค่าเท่ากับ HRC2 - HRC1

## 1. การทดสอบความถูกต้องของค่าตอบสนอง

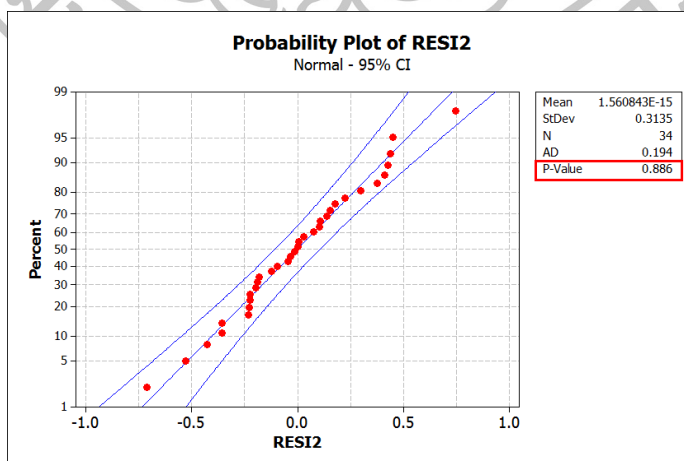
### 1.1 การทดสอบความเป็นปกติของข้อมูล

จากภาพที่ 4.13 แสดงให้เห็นกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าส่วนตกค้างค่าความแข็งแกร่งก่อนการกลิ้งในตารางที่ 4.6 มีค่า P-Value อยู่ที่ 0.165 แสดงให้เห็นว่าข้อมูลที่ได้ทำการบันทึกมีความเป็นปกติ



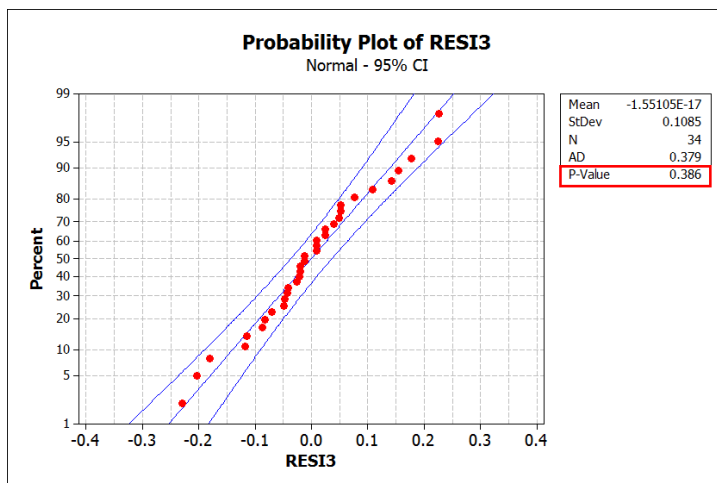
ภาพที่ 4.13 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าส่วนตกค้างค่าความแข็งแกร่งก่อนการกลิ้ง

จากภาพที่ 4.14 แสดงให้เห็นกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าส่วนตกค้างค่าความแข็งแกร่งหลังการกลิ้งในตารางที่ 4.6 มีค่า P-Value อยู่ที่ 0.886 แสดงให้เห็นว่าข้อมูลที่ได้ทำการบันทึกมีความเป็นปกติ



ภาพที่ 4.14 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าส่วนตกค้างค่าความแข็งแกร่งหลังการกลิ้ง

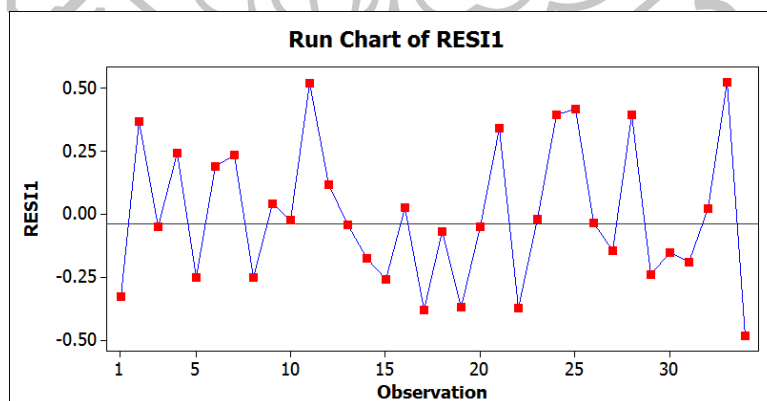
จากภาพที่ 4.15 แสดงให้เห็นกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าส่วนตกค้างค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็งแกร่งในตารางที่ 4.6 มีค่า P-Value อยู่ที่ 0.386 แสดงให้เห็นว่าข้อมูลที่ได้ทำการบันทึกมีความเป็นปกติ



ภาพที่ 4.15 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าส่วนตกค้างค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็งแกร่ง

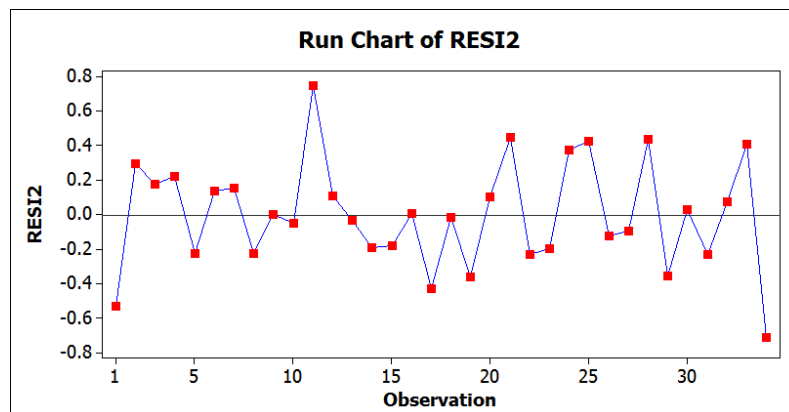
## 1.2 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

จากภาพที่ 4.16 แสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างค่าความแข็งแกร่งก่อนการกลิ้งในตารางที่ 4.6 ไม่สามารถประมาณรูปแบบได้ และ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน เป็นการบ่งบอกถึงความไม่เป็นอิสระต่อกันของค่าความแข็งแกร่งก่อนการกลิ้ง



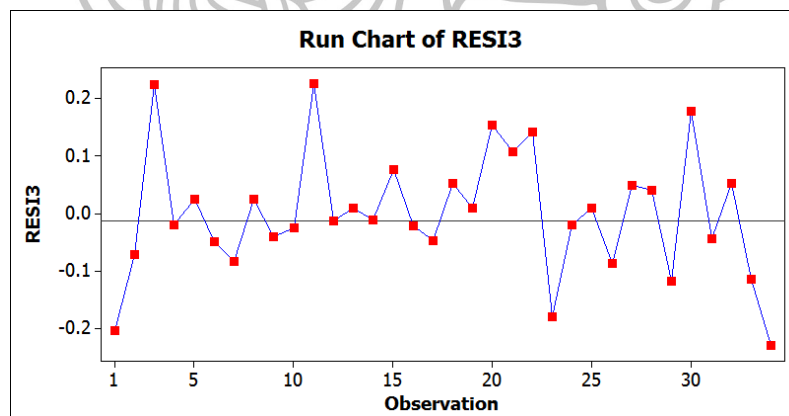
ภาพที่ 4.16 กราฟการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างค่าความแข็งแกร่งก่อนการกลิ้ง

จากภาพที่ 4.17 แสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างค่าความแข็งหลังการกลิ้งในตารางที่ 4.6 ไม่สามารถประมาณรูปแบบได้ และ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน เป็นการบ่งบอกถึงความไม่เป็นอิสระต่อกันของค่าความแข็งหลังการกลิ้ง



ภาพที่ 4.17 กราฟการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างค่าความแข็งหลังการกลิ้ง

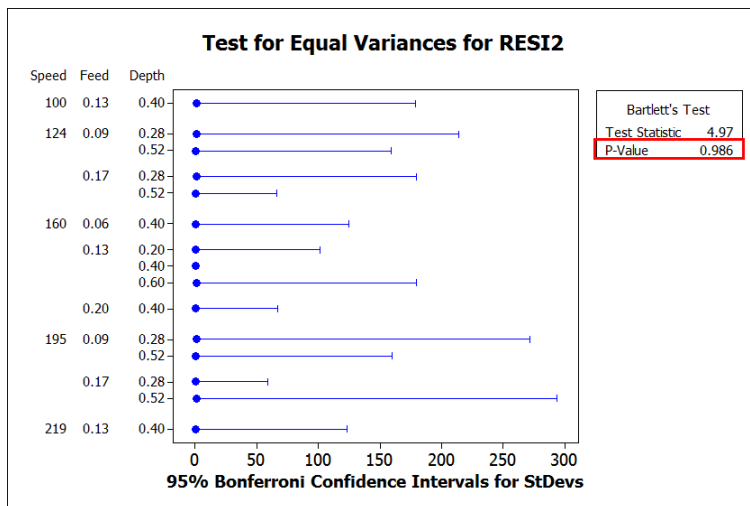
จากภาพที่ 4.18 แสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็งการกลิ้งในตารางที่ 4.6 ไม่สามารถประมาณรูปแบบได้ และ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน เป็นการบ่งบอกถึงความไม่เป็นอิสระต่อกันของค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็งการกลิ้ง



ภาพที่ 4.18 กราฟการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็งการกลิ้ง

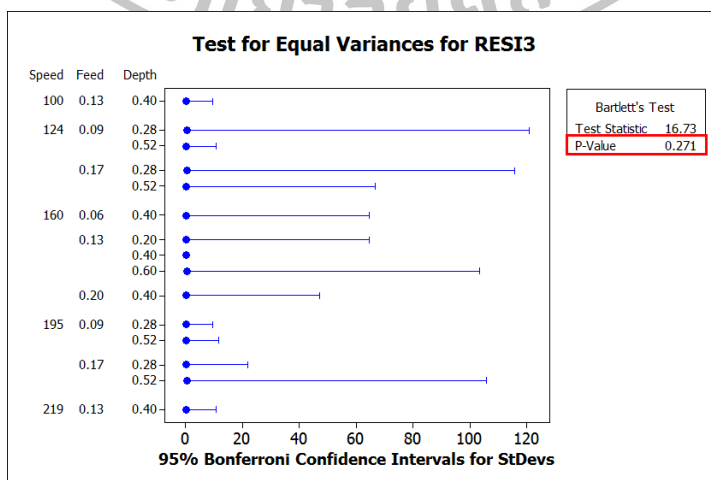
1.3 การทดสอบความเสถียรของความแปรปรวน

จากภาพที่ 4.19 เป็นการตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวนของส่วนตักค้ำค่าความแข็งหลังการกลึงในตารางที่ 4.6 เทียบกับระดับของปัจจัยทุกปัจจัย เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของค่าส่วนตักค้ำ พบว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวนเนื่องจากค่า P-Value มีค่ามากกว่า 0.986



ภาพที่ 4.19 กราฟความแปรปรวนของส่วนตักค้ำค่าความแข็งหลังการกลึง

จากภาพที่ 4.20 เป็นการตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวนของส่วนตักค้ำค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็งการกลึงในตารางที่ 4.6 เทียบกับระดับของปัจจัยทุกปัจจัย เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของค่าส่วนตักค้ำ พบว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวนเนื่องจากค่า P-Value มีค่ามากกว่า 0.271



ภาพที่ 4.20 กราฟความแปรปรวนของส่วนตักค้ำค่าเปลี่ยนแปลงความแข็งการกลึง



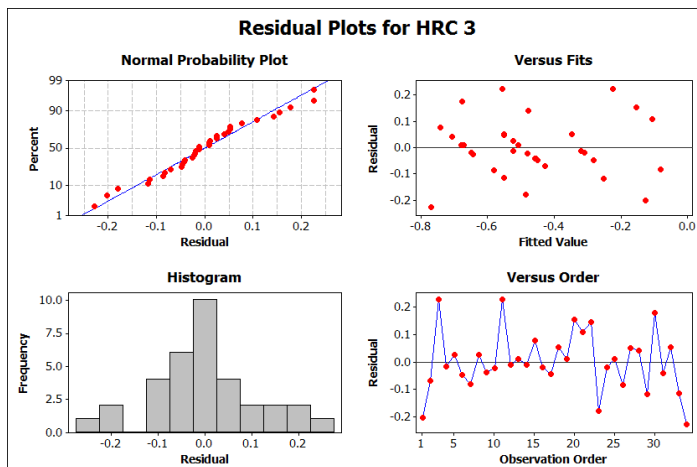
## 2. การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็งของชิ้นงาน

นำค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็งของชิ้นงานลงในตารางที่ 4.6 มาวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็งของชิ้นงาน จากภาพที่ 4.21 จะเห็นว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความแข็งนั้นอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05 เป็นปัจจัยกำลังหนึ่ง คือ ความลึกป้อน ส่วนปัจจัยกำลังสอง และ อันตรกิริยานั้น ไม่มีปัจจัยใดที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความแข็งของชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05

Response Surface Regression: HRC versus Block, Speed, Feed, Depth						
Analysis of Variance for HRC						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Blocks	1	0.00641	0.00641	0.00641	0.38	0.544
Regression	9	1.16404	1.16404	0.12934	7.65	0.000
Linear	3	1.06571	1.06571	0.35524	21.02	0.000
Speed	1	0.00653	0.00653	0.00653	0.39	0.540
Feed	1	0.00015	0.00015	0.00015	0.01	0.925
<b>Depth</b>	<b>1</b>	<b>1.05903</b>	<b>1.05903</b>	<b>1.05903</b>	<b>62.68</b>	<b>0.000</b>
Square	3	0.04215	0.04215	0.01405	0.83	0.490
Speed*Speed	1	0.00250	0.01348	0.01348	0.80	0.381
Feed*Feed	1	0.00398	0.01348	0.01348	0.80	0.381
Depth*Depth	1	0.03566	0.03566	0.03566	2.11	0.160
Interaction	3	0.05617	0.05617	0.01872	1.11	0.366
Speed*Feed	1	0.00350	0.00350	0.00350	0.21	0.653
Speed*Depth	1	0.03642	0.03642	0.03642	2.16	0.156
Feed*Depth	1	0.01626	0.01626	0.01626	0.96	0.337
Residual Error	23	0.38862	0.38862	0.01690		
Lack-of-Fit	19	0.36957	0.36957	0.01945	4.08	0.091
Pure Error	4	0.01905	0.01905	0.00476		
Total	33	1.55907				
S = 0.129987    PRESS = 0.911708						
R-Sq = 75.07%    R-Sq(pred) = 41.52%    R-Sq(adj) = 64.24%						

ภาพที่ 4.21 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็ง

จากภาพที่ 4.22 เป็นการแสดงถึงความเป็นปกติของข้อมูล จากกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติแสดงให้เห็นว่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวเป็นปกติในแนวเส้นตรง และฮิสโตแกรมแสดงในทิศทางเดียวกันคือ มีลักษณะคล้ายระฆังคว่ำ แสดงว่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวเป็นปกติ แผนภาพการกระจายตัวของส่วนตกค้างกับค่าพยากรณ์มีลักษณะกระจายไม่จับตัวเป็นกลุ่ม และแผนภาพการกระจายตัวระหว่างส่วนตกค้างกับเวลา มีความเป็นอิสระไม่สามารถกำหนดรูปแบบที่แน่นอนได้ ซึ่งแสดงว่าส่วนตกค้างเป็นอิสระต่อกัน



ภาพที่ 4.22 กราฟส่วนตกค้างของค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็งการกลึง

### 3. % Contribution ของค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็ง

การหา % Contribution จะแสดงให้เห็นว่า ปัจจัย หรือ อันตรกิริยาใด ส่งผลต่อค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็งมากน้อยอย่างไร

ตารางที่ 4.7 % Contribution ของค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็ง

Factor	Mean square	Contribution ratio	% Contribution
Speed	0.00653	0.0055	0.551
Feed	0.00015	0.0001	0.013
Depth	1.05903	0.8941	89.407
Speed * Speed	0.01348	0.0114	1.138
Feed * Feed	0.01348	0.0114	1.138
Depth * Depth	0.03566	0.0301	3.011
Speed * Feed	0.00350	0.0030	0.295
Speed * Depth	0.03642	0.0307	3.075
Feed * Depth	0.01626	0.0137	1.373
<b>Total</b>	<b>1.18451</b>	<b>1.0000</b>	<b>100.000</b>

จากการหา % Contribution ในตารางที่ 4.7 จะแสดงให้เห็นว่า ปัจจัยหลักหรือ อันตรกิริยาใด ส่งผลต่อค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็งมากน้อยอย่างไร เมื่อดูจากตารางแสดงให้เห็นว่า ความลึกป้อน ส่งผลต่อค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็งสูงที่สุดเท่ากับ 89.41% ดังนั้นจะเห็นได้ว่าความลึกป้อนส่งผลเป็นอย่างมากต่อค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็งที่กลึงด้วยเม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์เคลือบผิว PVD

#### 4. การวิเคราะห์การถดถอยแบบพื้นผิวตอบสนอง Central Composite Design

การวิเคราะห์การถดถอยแบบพื้นผิวตอบสนอง Central Composite Design เป็นการหาความสัมพันธ์ของปัจจัยกำลังหนึ่ง ปัจจัยกำลังสอง และอันตรกิริยา เพื่อเป็นการหาค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็งหลังการกลึงที่จะเกิดขึ้น เมื่อระดับปัจจัยต่างๆเปลี่ยนแปลงไป

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนในภาพที่ 4.21 พบว่ามีปัจจัยกำลังหนึ่ง ปัจจัยกำลังสองและอันตรกิริยา ที่ไม่มีผลต่อสมการถดถอยอย่างมีนัยสำคัญจากค่า P-Value ที่มีค่ามากกว่า 0.05 ดังนั้นจึงทำการตัดปัจจัยต่างๆดังกล่าวและทำการหาสมการถดถอย ดังภาพที่ 4.23

Regression Analysis: HRC versus Depth				
The regression equation is HRC 3 = 0.189 - 1.64 Depth				
Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.18950	0.08256	2.30	0.028
Depth	-1.6409	0.1993	-8.23	0.000
S = 0.125004    R-Sq = 67.9%    R-Sq(adj) = 66.9%				

ภาพที่ 4.23 ผลการวิเคราะห์การถดถอยความลึกข้อนกำลังหนึ่ง

ตารางที่ 4.8 การลดรูปสมการถดถอย

Factors	Regression equation	R-Sq (adj)
All	2.66 - 0.01246 Speed - 8.35 Feed - 6.50 Depth + 0.000019 Speed*Speed + 15.3 Feed*Feed + 2.76 Depth*Depth + 0.0104 Speed*Feed + 0.01120 Speed*Depth + 6.64 Feed*Depth	75.07 %
Depth	0.189 - 1.64 Depth	67.90 %

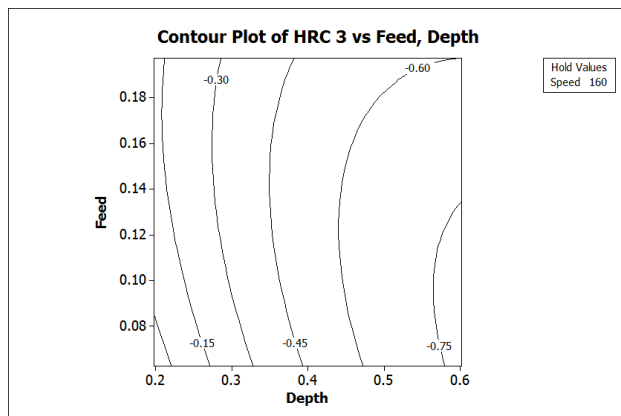
หมายเหตุ       $100 \leq \text{Speed} \leq 219$  ;  $0.06 \leq \text{Feed} \leq 0.20$  ;  $0.2 \leq \text{Depth} \leq 0.6$

การวิเคราะห์หาสมการถดถอยดังแสดงตามตารางที่ 4.8 เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Sq(adj)) พบว่าสมการถดถอยจากการลดรูปให้เหลือเพียงปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็งอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05 จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ 67.90% ลดลงจากเดิมที่เป็นสมการถดถอยแบบพื้นผิวตอบสนองทุกปัจจัยที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ 75.07%

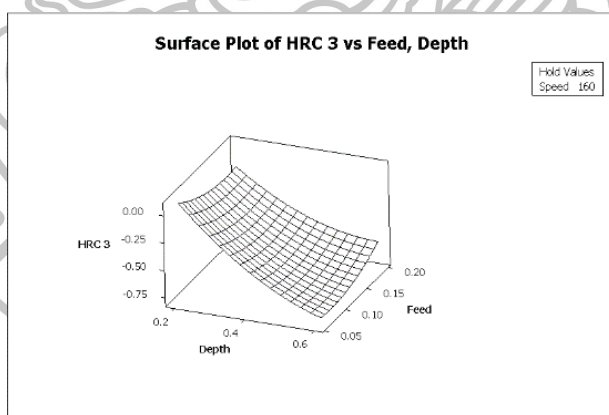
### 5. กราฟแสดงความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความแข็ง

กราฟโครงร่างพื้นผิวและ กราฟพื้นผิวจะแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าตอบสนองว่าจะเป็นไปได้ในทิศทางใด

จากภาพที่ 4.24 และ 4.25 พบว่าเมื่อ ความลึกป้อนมากขึ้นจะทำให้การเปลี่ยนแปลงความแข็งของชิ้นงานลดลง ที่ความเร็วตัด 160 เมตรต่อนาที



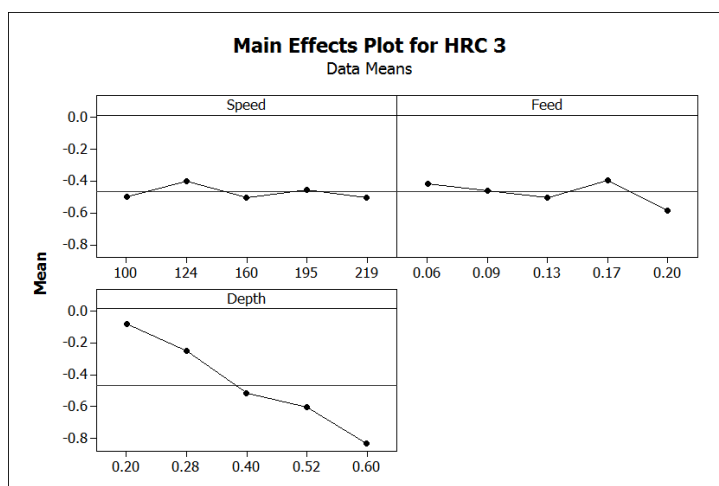
ภาพที่ 4.24 กราฟโครงร่างพื้นผิวของการเปลี่ยนแปลงความแข็งระหว่างอัตราป้อนกับความลึกป้อน



ภาพที่ 4.25 กราฟพื้นผิวของการเปลี่ยนแปลงความแข็งระหว่างความเร็วตัดกับความลึกป้อน

## 6. ผลกระทบของปัจจัยหลักต่อการเปลี่ยนแปลงความแข็ง

จากภาพที่ 4.26 พบว่าเมื่อ อัตราป้อนเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็งลดลง ซึ่งมีความสอดคล้องกับการวิเคราะห์ความแปรปรวน



ภาพที่ 4.26 กราฟผลกระทบหลักของปัจจัยหลักต่อค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็งการกลึง

### 4.1.3 การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน

ตารางที่ 4.9 แสดงการเก็บข้อมูลค่าความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลางในการกลึงด้วยเม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์เคลือบผิว PVD

StdOrder	RunOrder	Speed	Feed	Depth	Diameter 1	Diameter 2	Difference of Diameter
18	1	124	0.09	0.28	24.44	24.45	0.01
26	2	100	0.13	0.40	24.27	24.28	0.01
20	3	124	0.17	0.28	24.44	24.45	0.01
24	4	124	0.17	0.52	24.00	24.01	0.01
33	5	160	0.13	0.40	24.24	24.25	0.01
28	6	160	0.06	0.40	24.23	24.24	0.01
30	7	160	0.13	0.20	24.58	24.59	0.01
32	8	160	0.13	0.40	24.27	24.28	0.01
29	9	160	0.20	0.40	24.22	24.23	0.01
23	10	195	0.09	0.52	23.98	23.99	0.01
25	11	195	0.17	0.52	23.96	23.97	0.01
34	12	160	0.13	0.40	24.25	24.26	0.01
22	13	124	0.09	0.52	23.97	23.98	0.01
21	14	195	0.17	0.28	24.49	24.50	0.01
31	15	160	0.13	0.60	23.84	23.85	0.01
27	16	219	0.13	0.40	24.27	24.28	0.01

ตารางที่ 4.9 แสดงการเก็บข้อมูลค่าความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลางในการกลึงด้วยเม็ดมีดกลึง  
คาร์ไบด์เคลือบผิว PVD (ต่อ)

StdOrder	RunOrder	Speed	Feed	Depth	Diameter 1	Diameter 2	Difference of Diameter
19	17	195	0.09	0.28	24.45	24.46	0.01
4	18	195	0.17	0.28	24.50	24.52	0.02
10	19	219	0.13	0.40	24.25	24.26	0.01
1	20	124	0.09	0.28	24.50	24.52	0.01
13	21	160	0.13	0.20	24.58	24.59	0.01
11	22	160	0.06	0.40	24.24	24.25	0.01
12	23	160	0.20	0.40	24.25	24.26	0.01
2	24	195	0.09	0.28	24.49	24.50	0.01
6	25	195	0.09	0.52	23.99	24.00	0.01
8	26	195	0.17	0.52	24.04	24.05	0.01
15	27	160	0.13	0.40	24.24	24.25	0.01
5	28	124	0.09	0.52	24.03	24.04	0.01
3	29	124	0.17	0.28	24.45	24.46	0.01
7	30	124	0.17	0.52	24.02	24.04	0.02
9	31	100	0.13	0.40	24.27	24.28	0.01
16	32	160	0.13	0.40	24.29	24.30	0.01
17	33	160	0.13	0.40	24.27	24.28	0.01
14	34	160	0.13	0.60	23.86	23.87	0.01

หมายเหตุ Diameter 1 = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยในตำแหน่งที่ 1

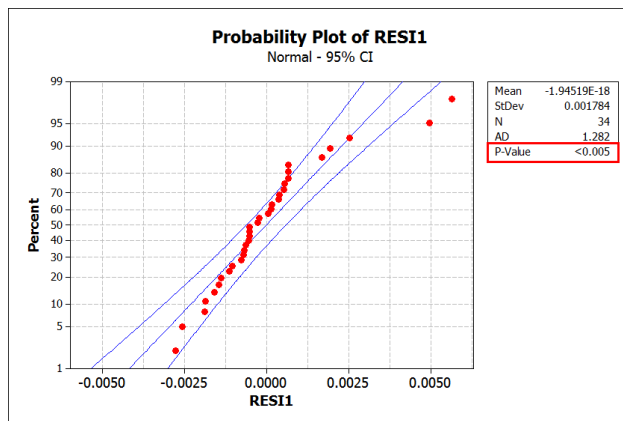
Diameter 2 = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยในตำแหน่งที่ 2

Difference of Diameter = ผลต่างของเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยมีค่าเท่ากับ ค่าสัมบูรณ์  
ของ D1-D2

## 1. การทดสอบความถูกต้องของค่าตอบสนอง

### 1.1 การทดสอบความเป็นปกติของข้อมูล

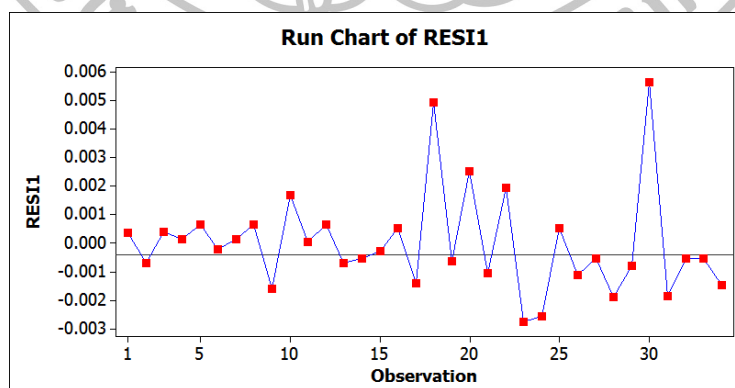
จากภาพที่ 4.27 แสดงให้เห็นกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลางจากรายที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีการแจกแจงไม่เป็นปกติ อย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05



ภาพที่ 4.27 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลาง

### 1.2 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

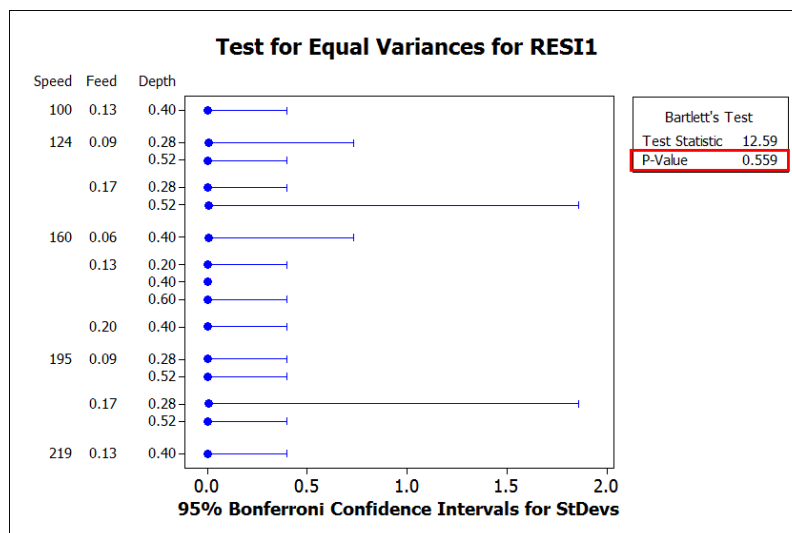
จากภาพที่ 4.28 แสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวของค่าความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลางจากรายที่ 4.9 มีรูปแบบที่ไม่แน่นอน และไม่สามารถประมาณรูปแบบได้ เป็นการบ่งบอกถึงความเป็นอิสระต่อกันของค่าความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลาง



ภาพที่ 4.28 กราฟการกระจายตัวของค่าความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลาง

### 1.3 การทดสอบความเสถียรของความแปรปรวน

จากภาพที่ 4.29 เป็นการตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวนของส่วนตกค้างของค่าความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลางจากตารางที่ 4.9 เทียบกับระดับของปัจจัยทุกปัจจัย เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง พบว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวนเนื่องจากค่า P-Value มีค่ามากกว่า 0.559



ภาพที่ 4.29 กราฟความแปรปรวนของส่วนตกค้างของค่าความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลาง

## 2. การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลาง

นำค่าความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานกลึงจากตารางที่ 4.9 มาวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน จากภาพที่ 4.30 จะเห็นว่าไม่มีปัจจัยใดที่ส่งผลต่อความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลางอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05



### Response Surface Regression: Difference versus Block, Speed, Feed, Depth

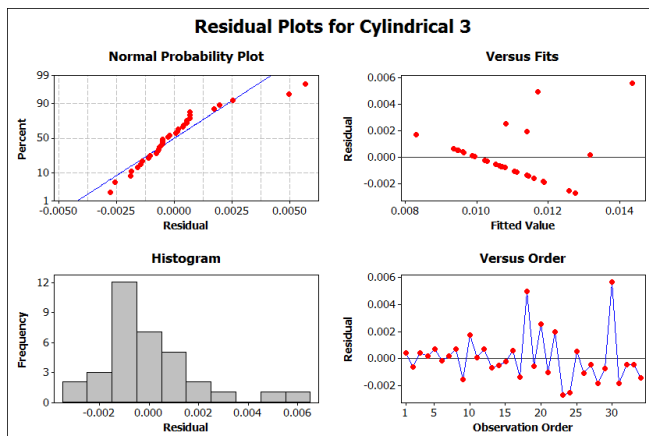
Analysis of Variance for Difference

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Blocks	1	0.000012	0.000012	0.000012	2.58	0.122
Regression	9	0.000040	0.000040	0.000004	0.98	0.484
Linear	3	0.000009	0.000009	0.000003	0.62	0.607
Speed	1	0.000004	0.000004	0.000004	0.80	0.380
Feed	1	0.000004	0.000004	0.000004	0.98	0.332
Depth	1	0.000000	0.000000	0.000000	0.09	0.768
Square	3	0.000007	0.000007	0.000002	0.53	0.666
Speed*Speed	1	0.000000	0.000002	0.000002	0.33	0.571
Feed*Feed	1	0.000006	0.000007	0.000007	1.51	0.232
Depth*Depth	1	0.000002	0.000002	0.000002	0.33	0.571
Interaction	3	0.000024	0.000024	0.000008	1.77	0.180
Speed*Feed	1	0.000001	0.000001	0.000001	0.15	0.700
Speed*Depth	1	0.000017	0.000017	0.000017	3.80	0.063
Feed*Depth	1	0.000006	0.000006	0.000006	1.37	0.254
Residual Error	23	0.000105	0.000105	0.000005		
Lack-of-Fit	19	0.000105	0.000105	0.000006	*	*
Pure Error	4	0.000000	0.000000	0.000000		
Total	33	0.000157				

S = 0.00213652 PRESS = 0.000252943  
R-Sq = 33.07% R-Sq(pred) = 0.00% R-Sq(adj) = 3.97%

ภาพที่ 4.30 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลาง

จากภาพที่ 4.31 เป็นการแสดงถึงความเป็นปกติของข้อมูล จากกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติแสดงให้เห็นว่าส่วนตักค้ำมีการกระจายตัวไม่เป็นปกติในแนวเส้นตรง และฮิสโตแกรมแสดงในทิศทางเดียวกันคือ ไม่มีลักษณะคล้ายระฆังคว่ำ แสดงว่าส่วนตักค้ำมีการกระจายตัวไม่เป็นปกติ แผนภาพการกระจายตัวของส่วนตักค้ำกับค่าพยากรณ์มีลักษณะกระจายไม่จับตัวเป็นกลุ่ม และแผนภาพการกระจายตัวระหว่างส่วนตักค้ำกับเวลา มีความเป็นอิสระไม่สามารถกำหนดรูปแบบที่แน่นอนได้ ซึ่งแสดงว่าส่วนตักค้ำเป็นอิสระต่อกัน



ภาพที่ 4.31 กราฟส่วนตักค้ำของค่าความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลาง

## 4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาปัจจัยของเม็ดมีดกลึงเซอร์เม็ท

### 4.2.1 การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อความเรียบผิวของชิ้นงาน

ตารางที่ 4.10 แสดงการเก็บข้อมูลค่าความเรียบผิวในการกลึงด้วยเม็ดมีดกลึงเซอร์เม็ท

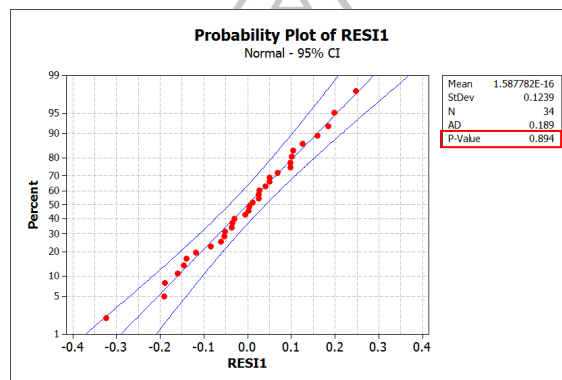
StdOrder	RunOrder	Speed	Feed	Depth	Ra
13	1	160	0.14	0.50	1.997
5	2	136	0.11	1.30	1.099
14	3	160	0.14	1.50	1.826
1	4	136	0.11	0.70	1.232
8	5	184	0.18	1.30	2.928
4	6	184	0.18	0.70	3.133
15	7	160	0.14	1.00	1.697
2	8	184	0.11	0.70	1.135
11	9	160	0.09	1.00	0.746
9	10	120	0.14	1.00	1.513
10	11	200	0.14	1.00	1.961
7	12	136	0.18	1.30	2.884
17	13	160	0.14	1.00	1.636
6	14	184	0.11	1.30	1.173
16	15	160	0.14	1.00	1.554
3	16	136	0.18	0.70	3.019
12	17	160	0.20	1.00	3.666
29	18	160	0.20	1.00	3.869
21	19	184	0.18	0.70	2.793
23	20	184	0.11	1.30	1.108
33	21	160	0.14	1.00	1.856
25	22	184	0.18	1.30	3.000
20	23	136	0.18	0.70	3.350
26	24	120	0.14	1.00	1.937
18	25	136	0.11	0.70	1.190
32	26	160	0.14	1.00	1.831
31	27	160	0.14	1.50	1.796
27	28	200	0.14	1.00	1.782
19	29	184	0.11	0.70	0.890
30	30	160	0.14	0.50	1.788
28	31	160	0.09	1.00	0.723
24	32	136	0.18	1.30	2.938
34	33	160	0.14	1.00	1.482
22	34	136	0.11	1.30	0.949

## 1. การทดสอบความถูกต้องของค่าตอบสนอง

### 1.1 การทดสอบความเป็นปกติของข้อมูล

การทดสอบความเป็นปกติของข้อมูลเป็นการทดสอบเพื่อดูความเป็นปกติของข้อมูลที่ได้ทำการบันทึกผลการทดลองว่าค่าที่บันทึกมีความเชื่อมั่นหรือไม่ โดยงานวิจัยนี้จะใช้ความเชื่อมั่นที่ 95% หรือระดับนัยสำคัญที่ 0.05 เพื่อเป็นการสร้างความเชื่อมั่นในผลวิเคราะห์ที่ต่อเนื่องกัน

จากภาพที่ 4.32 แสดงให้เห็นกราฟความน่าจะเป็นของค่าส่วนตกค้างค่าความเรียบผิวจากตารางที่ 4.10 มีค่า P-Value อยู่ที่ 0.894 แสดงให้เห็นว่าข้อมูลที่ได้ทำการบันทึกมีความเป็นปกติ

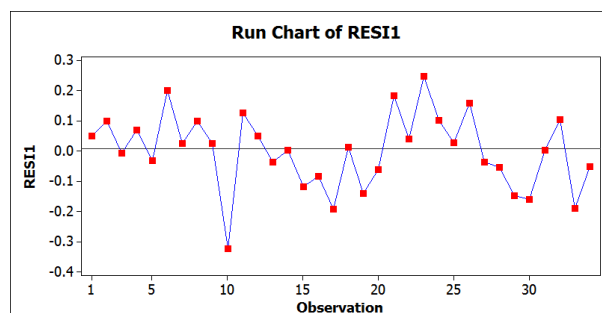


ภาพที่ 4.32 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าส่วนตกค้างค่าความเรียบผิว

### 1.2 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลนั้น เป็นการสร้างแผนภาพการกระจายตัวของข้อมูล เพื่อใช้ในการสังเกตความเป็นอิสระของข้อมูล โดยดูจากข้อมูลว่ามีรูปแบบในการกระจายตัวที่แน่นอนหรือไม่ และสามารถประมาณค่าการกระจายตัวได้หรือไม่

จากภาพที่ 4.33 แสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างค่าความเรียบผิวตารางที่ 4.10 ไม่สามารถประมาณรูปแบบได้ และ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน เป็นการบ่งบอกถึงความเป็นอิสระต่อกันของค่าความเรียบผิว

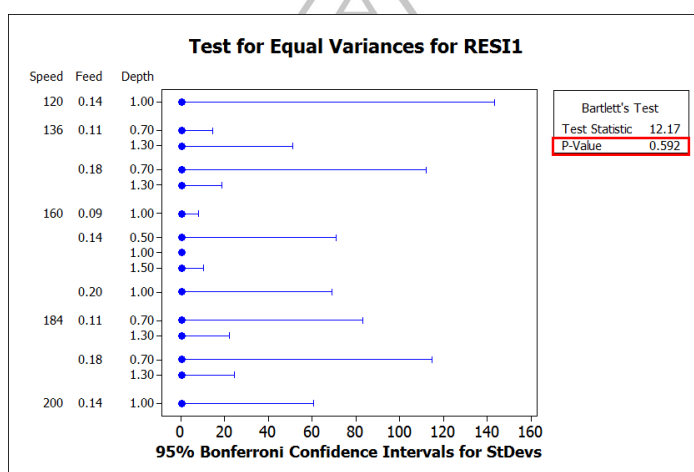


ภาพที่ 4.33 กราฟการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างค่าความเรียบผิว

### 1.3 การทดสอบความเสถียรของความแปรปรวน

การทดสอบความเสถียรของความแปรปรวน เป็นการทดสอบเพื่อดูค่าความแปรปรวน เทียบกับระดับของปัจจัยทุกระดับที่ทำการกลึง โดยดูจากค่า P-Value ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือระดับนัยสำคัญที่ 0.05

จากภาพที่ 4.34 เป็นการตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวนของส่วนตักค่า ความเรียบผิวตารางที่ 4.10 เทียบกับระดับของปัจจัยทุกปัจจัย เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของค่า ส่วนตักค่า พบว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวนเนื่องจากค่า P-Value มีค่ามากกว่า 0.592



ภาพที่ 4.34 กราฟความแปรปรวนของค่าส่วนตักค่าความเรียบผิว

### 2. การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความเรียบผิว

นำค่าความเรียบผิวที่บันทึกตารางที่ 4.10 มาวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความเรียบผิว โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 โดยผลการวิเคราะห์ ดังภาพที่ 4.35 และ 4.36

### Response Surface Regression: Ra versus Speed, Feed, Depth

Analysis of Variance for Ra

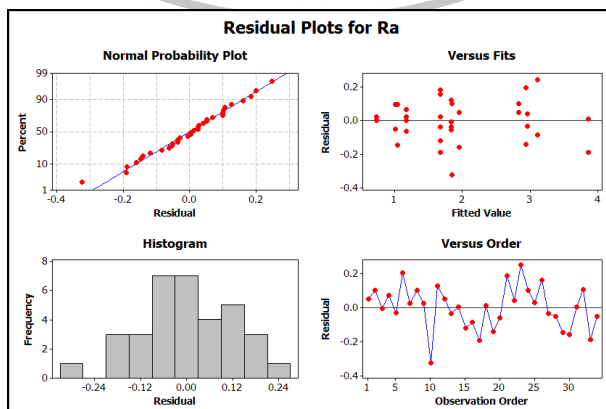
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	24.9654	24.9654	2.7739	131.32	0.000
Linear	3	23.7860	23.7860	7.9287	375.36	0.000
Speed	1	0.0000	0.0000	0.0000	0.00	0.992
<b>Feed</b>	<b>1</b>	<b>23.7539</b>	<b>23.7539</b>	<b>23.7539</b>	<b>1124.57</b>	<b>0.000</b>
Depth	1	0.0321	0.0321	0.0321	1.52	0.230
Square	3	1.0793	1.0793	0.3598	17.03	0.000
Speed*Speed	1	0.0023	0.0758	0.0758	3.59	0.070
<b>Feed*Feed</b>	<b>1</b>	<b>0.9435</b>	<b>1.0732</b>	<b>1.0732</b>	<b>50.81</b>	<b>0.000</b>
<b>Depth*Depth</b>	<b>1</b>	<b>0.1335</b>	<b>0.1335</b>	<b>0.1335</b>	<b>6.32</b>	<b>0.019</b>
Interaction	3	0.1001	0.1001	0.0334	1.58	0.220
Speed*Feed	1	0.0019	0.0019	0.0019	0.09	0.769
Speed*Depth	1	0.0868	0.0868	0.0868	4.11	0.054
Feed*Depth	1	0.0115	0.0115	0.0115	0.54	0.469
Residual Error	24	0.5069	0.5069	0.0211		
Lack-of-Fit	5	0.0861	0.0861	0.0172	0.78	0.578
Pure Error	19	0.4208	0.4208	0.0221		
Total	33	25.4723				

S = 0.145336 PRESS = 1.01529

R-Sq = 98.01% R-Sq(pred) = 96.01% R-Sq(adj) = 97.26%

ภาพที่ 4.35 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความเรียบผิว

จากภาพที่ 4.35 แสดงให้เห็นว่า ปัจจัยกำลังหนึ่งที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความเรียบผิว คือ อัตราป้อน เพียงปัจจัยเดียว เนื่องจากมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 ส่วนความเร็วตัด และความลึกป้อน ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความเรียบผิวอย่างมีนัยสำคัญ ด้วยแสดงค่า P-Value ที่มากกว่า 0.05 ส่วนของปัจจัยกำลังสองคือ อัตราป้อนกำลังสองและ ความลึกป้อนกำลังสอง ที่ส่งผลต่อความเรียบผิวอย่างมีนัยสำคัญ โดยแสดงให้เห็นจากค่า P-value ที่น้อยกว่า 0.05 และส่วนอันตรกิริยานั้นไม่มีอันตรกิริยาใดที่ส่งผลต่อความเรียบผิวอย่างมีนัยสำคัญ



ภาพที่ 4.36 กราฟส่วนตกค้างของค่าความเรียบผิว

จากภาพที่ 4.36 แสดงถึงความเป็นปกติของข้อมูล จากกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติ แสดงให้เห็นว่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวเป็นปกติในแนวเส้นตรง และฮิสโตแกรมแสดงในทิศทางเดียวกันคือ มีลักษณะคล้ายระฆังคว่ำ แสดงว่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวเป็นปกติ ส่วนแผนภาพการกระจายตัวของส่วนตกค้างกับค่าพยากรณ์มีลักษณะกระจายไม่จับตัวเป็นกลุ่ม และแผนภาพการกระจายตัวระหว่างส่วนตกค้างกับเวลา มีความเป็นอิสระไม่สามารถกำหนดรูปแบบที่แน่นอนได้ ซึ่งแสดงว่าส่วนตกค้างเป็นอิสระต่อกัน

### 3. % Contribution ของค่าความเรียบผิว

ตารางที่ 4.11 % Contribution ของค่าความเรียบผิว

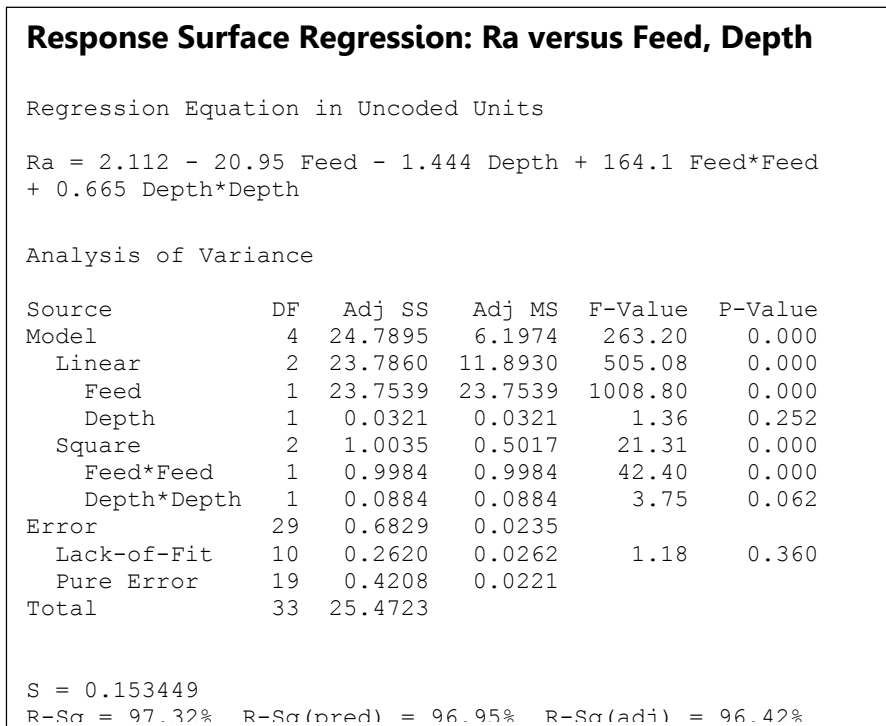
Factor	Mean square	Contribution ratio	% Contribution
Speed	0.0000	0.0000	0.000
Feed	23.7539	0.9438	94.379
Depth	0.0321	0.0013	0.128
Speed * Speed	0.0758	0.0030	0.301
Feed * Feed	1.0732	0.0426	4.264
Depth * Depth	0.1335	0.0053	0.530
Speed * Feed	0.0019	0.0001	0.008
Speed * Depth	0.0868	0.0034	0.345
Feed * Depth	0.0115	0.0005	0.046
<b>Total</b>	<b>25.1687</b>	<b>1.0000</b>	<b>100.000</b>

จากการหา % Contribution ในตารางที่ 4.11 จะแสดงให้เห็นว่า ปัจจัยกำลังหนึ่ง ปัจจัยกำลังสองหรือ อันตรกิริยาใด ส่งผลต่อความเรียบผิวมากน้อยอย่างไร เมื่อดูจากตารางแสดงให้เห็นว่าอัตราป้อน และอัตราป้อนกำลังสอง ส่งผลต่อความเรียบผิวสูงที่ 94.379% และ 4.264% ตามลำดับ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าอัตราป้อนส่งผลเป็นอย่างมากต่อความเรียบผิวที่กลึงด้วยเม็ดมีดกลึง เซอร์เม็ท

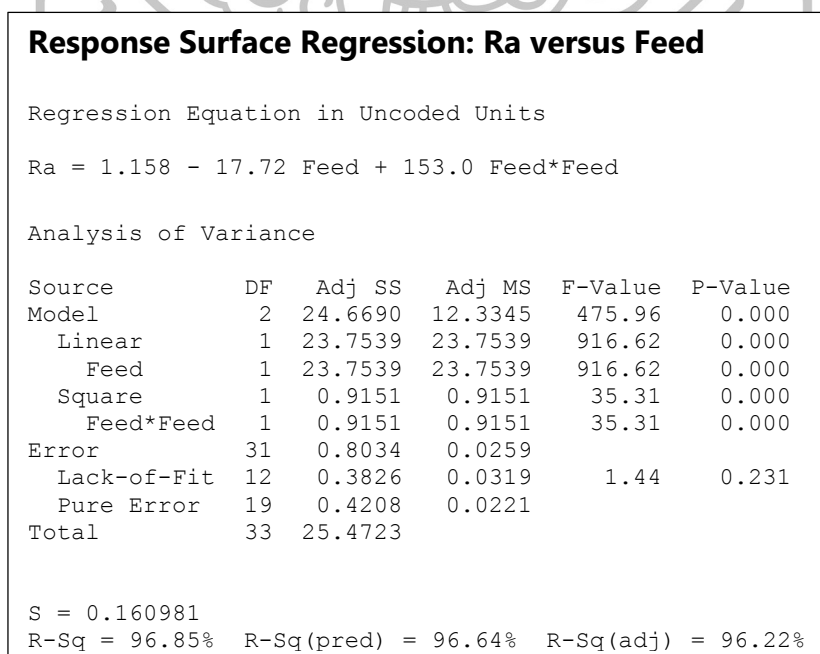
### 4. การวิเคราะห์สมการถดถอย (Regression analysis)

การวิเคราะห์สมการถดถอยแบบพหุคูณเป็นการหาความสัมพันธ์ของปัจจัยกำลังหนึ่ง ปัจจัยกำลังสอง และอันตรกิริยา เพื่อเป็นการพยากรณ์ค่าความเรียบผิวที่จะเกิดขึ้น เมื่อระดับปัจจัยต่างๆเปลี่ยนแปลงไป

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนในภาพที่ 4.35 จะพบว่ามีปัจจัยกำลังหนึ่ง ปัจจัยกำลังสองและอันตรกิริยา ที่ไม่มีผลต่อสมการถดถอยอย่างมีนัยสำคัญจากค่า P-Value ที่มีค่ามากกว่า 0.05 ดังนั้นจึงทำการตัดปัจจัยต่างๆดังกล่าวและทำการหาสมการถดถอยโดยใช้โปรแกรม Minitab 16 ดังภาพที่ 4.37 และ 4.38



ภาพที่ 4.37 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความเรียบผิว



ภาพที่ 4.38 ผลการวิเคราะห์การถดถอย อัตราป้อนกำลังหนึ่งและ อัตราป้อนกำลังสอง

ตารางที่ 4.12 ลดรูปสมการถดถอย

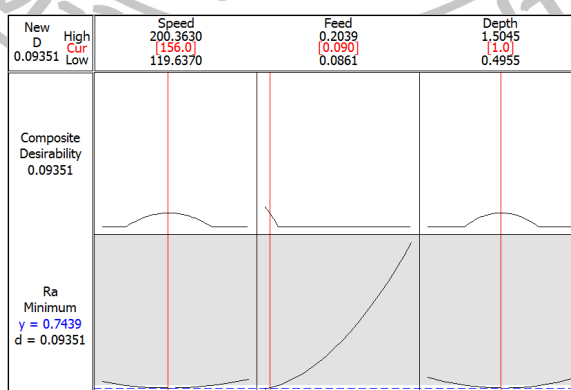
Factors	Regression equation	R-Sq (adj)
All	6.07 - 0.0406 Speed - 20.4 Feed - 3.09 Depth + 0.000101 Speed*Speed + 178.1 Feed*Feed + 0.855 Depth*Depth - 0.0128 Speed*Feed + 0.01023 Speed*Depth - 2.55 Feed*Depth	98.01 %
Feed & Depth	2.112 - 20.95 Feed - 1.444 Depth + 164.1 Feed*Feed + 0.665 Depth*Depth	97.32 %
Feed	1.158 - 17.72 Feed + 153.0 Feed*Feed	96.85 %

หมายเหตุ  $120 \leq \text{Speed} \leq 200$  ;  $0.09 \leq \text{Feed} \leq 0.20$  ;  $0.5 \leq \text{Depth} \leq 1.5$

การวิเคราะห์หาสมการถดถอยดังแสดงตามตารางที่ 4.12 เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Sq(adj)) พบว่าสมการถดถอยจากการลดรูปให้เหลือเพียงอัตราป้อนจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ 96.85% ลดลงจากเดิมที่เป็นสมการถดถอยแบบพื้นผิวตอบสนองทุกปัจจัยที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ 98.01%

### 5. Optimization Plot ของค่าความเรียบผิว

จากภาพที่ 4.39 พบว่าค่าที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าความเรียบผิวต่ำที่สุด คือ ความเร็วตัด 156 เมตรต่อนาที อัตราป้อน 0.09 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกป้อน 1.00 มิลลิเมตร ซึ่งจะทำให้ค่าความเรียบผิวอยู่ที่ 0.7439  $\mu\text{m}$ .



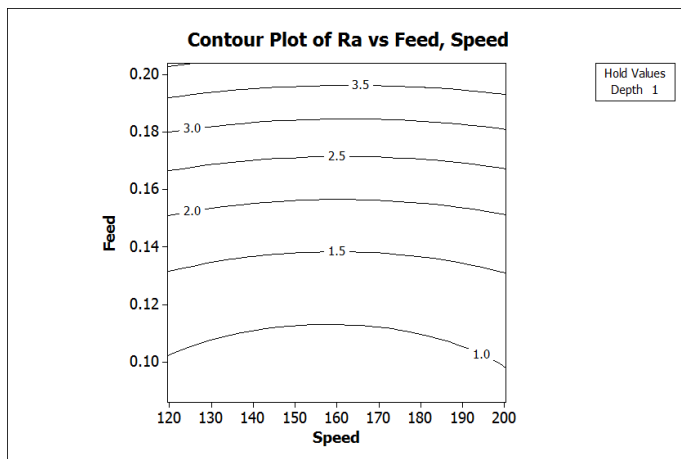
ภาพที่ 4.39 กราฟค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมของค่าความเรียบผิว



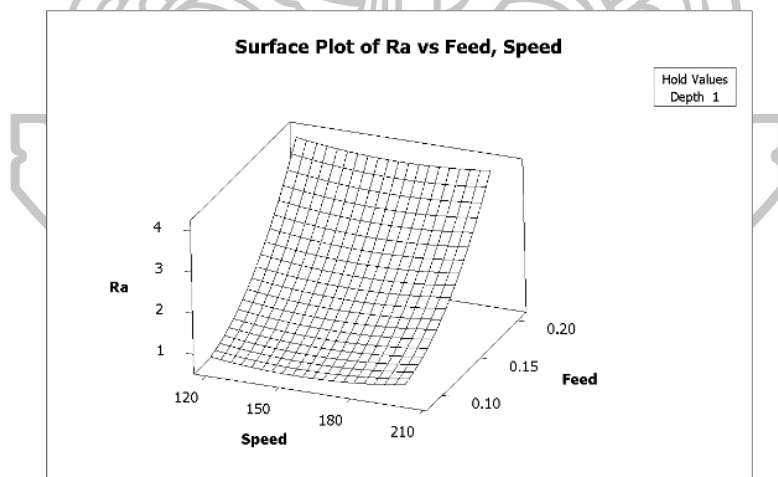
## 6. กราฟแสดงความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความเรียบผิว

กราฟโครงร่างพื้นผิวและ กราฟพื้นผิวจะแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าตอบสนองว่าจะเป็นไปในทิศทางใด

จากภาพที่ 4.40 และ 4.41 พบว่าเมื่อ อัตราป้อนลดลง จะทำให้ได้ค่าความเรียบผิวลดลง ด้วย ที่ความลึกป้อน 1.0 มิลลิเมตร



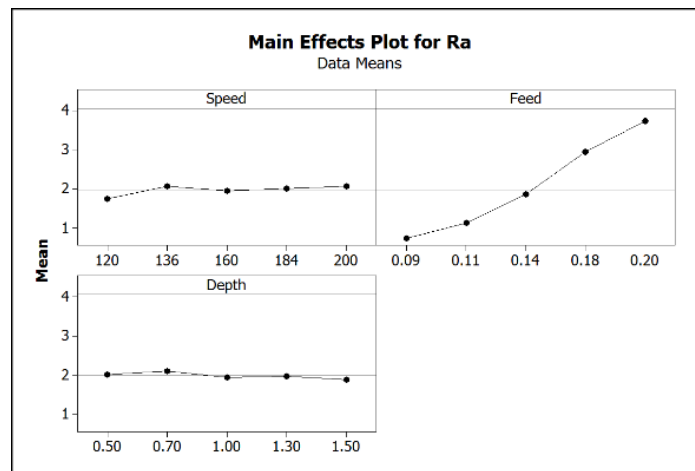
ภาพที่ 4.40 กราฟโครงร่างพื้นผิวของความเรียบผิวระหว่างความเร็วตัดและอัตราป้อน



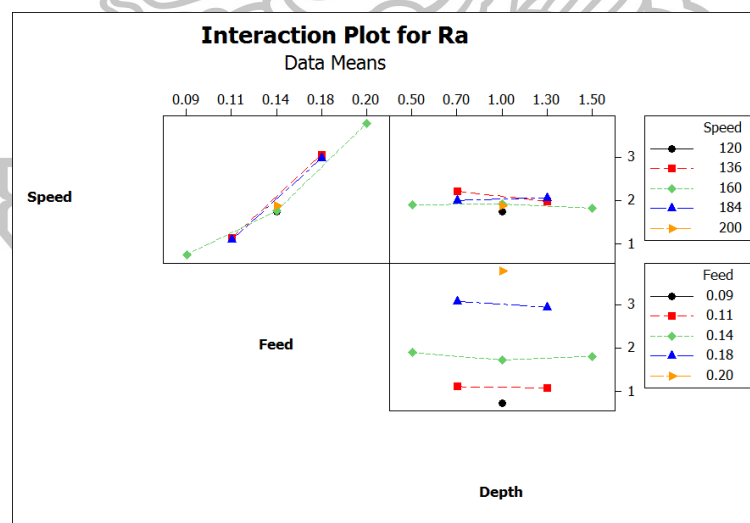
ภาพที่ 4.41 กราฟพื้นผิวของความเรียบผิวระหว่างความเร็วตัดและอัตราป้อน

## 7. ผลกระทบของปัจจัยหลักและอันตรกิริยาต่อความเรียบผิว

จากภาพที่ 4.42 และ ภาพที่ 4.43 พบว่าเมื่อ อัตราป้อนลดลงจะทำให้ค่าความเรียบผิวมีค่าลดลงด้วย ซึ่งมีความสอดคล้องกับการวิเคราะห์ความแปรปรวน กราฟโครงร่างพื้นผิว และกราฟพื้นผิว



ภาพที่ 4.42 กราฟผลกระทบของปัจจัยหลักต่อความเรียบผิว



ภาพที่ 4.43 กราฟผลกระทบของอันตรกิริยาต่อความเรียบผิว

## 8. การยืนยันผลการทดลอง

จากผลการทดลองพื้นผิวตอบสนองด้วยวิธี Central Composite Design (CCD) นั้น พบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อความเรียบผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI/SUS 304 คือ อัตราป้อนกำลังหนึ่ง, อัตราป้อนกำลังสองและ ความลึกป้อนกำลังสอง จึงได้กำหนดปัจจัยเพื่อทดลองเพิ่มเติมในการยืนยันผลการทดลอง ดังตารางที่ 4.13

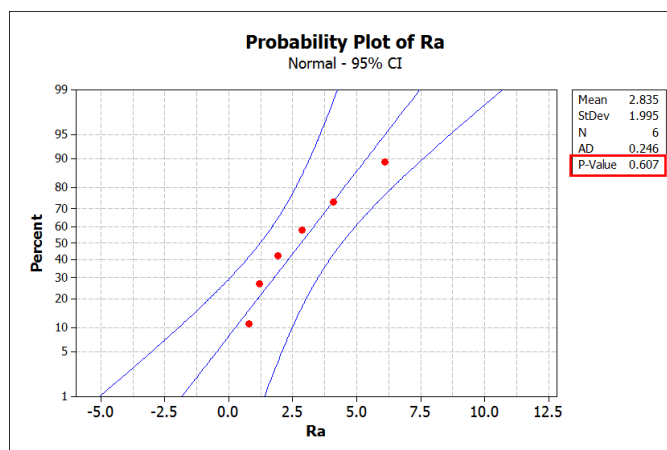
ตารางที่ 4.13 กำหนดปัจจัยการทดลองเพื่อยืนยันผลการทดลอง

ปัจจัย	ระดับปัจจัย						หน่วย
	1	2	3	4	5	6	
ความเร็วตัด	156	156	156	156	156	156	เมตรต่อนาที
อัตราป้อน	0.09	0.12	0.15	0.18	0.21	0.25	มิลลิเมตรต่อรอบ
ความลึกป้อน	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	มิลลิเมตร

จากตารางที่ 4.12 แสดงผลการทดสอบความแม่นยำของสมการถดถอย กับค่าที่ได้จากสมการถดถอย โดยค่าผิดพลาดที่ได้จะต้องมีค่า % ส่วนต่างอยู่ระหว่าง  $-3.15$  ถึง  $\leq 3.15$  จากตารางที่ 4.14 พบว่า % ส่วนต่างอยู่ในค่าต่ำแต่ยังอยู่ในช่วงค่าผิดพลาดที่ได้กำหนดไว้ สมการถดถอยนี้จึงมีความเหมาะสมกับการทดลองนี้ และจากภาพที่ 4.44 แสดงผลการวิเคราะห์การกระจายตัวแบบปกติของค่าส่วนตกค้าง พบว่ามีการกระจายตัวที่เป็นแบบปกติ โดยมีค่า P-Value ที่มากกว่า 0.05

ตารางที่ 4.14 ผลการทดสอบความแม่นยำของสมการถดถอย

ครั้งที่	ปัจจัย			ค่าความเรียบผิว (สมการถดถอย)	ค่าความเรียบผิว (การทดลอง)	ค่าส่วนต่าง	% ส่วนต่าง
	ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อน (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกป้อน (มิลลิเมตร)				
1	156	0.09	1.0	0.803	0.792	0.011	1.37
2		0.12		1.235	1.207	0.027	2.22
3		0.15		1.943	1.935	0.008	0.39
4		0.18		2.926	2.873	0.052	1.79
5		0.21		4.184	4.108	0.076	1.81
6		0.25		6.291	6.097	0.194	3.08



ภาพที่ 4.44 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวแบบปกติค่าส่วนตกค้างของค่าทดลองการยืนยันผล

#### 4.2.2 การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความแข็งของชิ้นงาน

ตารางที่ 4.15 แสดงการเก็บข้อมูลค่าความแข็งในการกลึงด้วยมีดมีดกลึงเซอร์เม็ท

StdOrder	RunOrder	Speed	Feed	Depth	HRC 1	HRC 2	Difference of HRC
13	1	160	0.14	0.50	24.67	24.67	0.00
5	2	136	0.11	1.30	24.50	23.33	-1.17
14	3	160	0.14	1.50	24.83	21.83	-3.00
1	4	136	0.11	0.70	24.67	23.50	-1.17
8	5	184	0.18	1.30	23.83	22.67	-1.17
4	6	184	0.18	0.70	24.33	24.33	0.00
15	7	160	0.14	1.00	24.50	23.67	-0.83
2	8	184	0.11	0.70	24.33	24.50	0.17
11	9	160	0.09	1.00	25.17	24.17	-1.00
9	10	120	0.14	1.00	24.83	23.33	-1.50
10	11	200	0.14	1.00	25.17	23.83	-1.33
7	12	136	0.18	1.30	24.67	23.50	-1.17
17	13	160	0.14	1.00	24.83	23.50	-1.33
6	14	184	0.11	1.30	24.50	24.00	-0.50
16	15	160	0.14	1.00	24.33	23.83	-0.50
3	16	136	0.18	0.70	25.17	23.33	-1.83
12	17	160	0.20	1.00	24.17	23.17	-1.00
29	18	160	0.20	1.00	24.50	23.00	-1.50
21	19	184	0.18	0.70	25.00	24.67	-0.33
23	20	184	0.11	1.30	24.83	23.50	-1.33
33	21	160	0.14	1.00	25.17	23.50	-1.67
25	22	184	0.18	1.30	24.83	22.50	-2.33
20	23	136	0.18	0.70	24.67	23.67	-1.00
26	24	120	0.14	1.00	24.33	24.17	-0.17
18	25	136	0.11	0.70	24.33	24.17	-0.17
32	26	160	0.14	1.00	24.17	24.17	0.00
31	27	160	0.14	1.50	23.83	22.67	-1.17
27	28	200	0.14	1.00	24.50	23.83	-0.67
19	29	184	0.11	0.70	25.00	24.00	-1.00
30	30	160	0.14	0.50	25.00	24.33	-0.67
28	31	160	0.09	1.00	24.83	23.00	-1.83
24	32	136	0.18	1.30	24.50	22.17	-2.33
34	33	160	0.14	1.00	24.33	23.00	-1.33
22	34	136	0.11	1.30	24.00	22.00	-2.00

หมายเหตุ HRC1 = ค่าความแข็งเฉลี่ยก่อนการกลึง

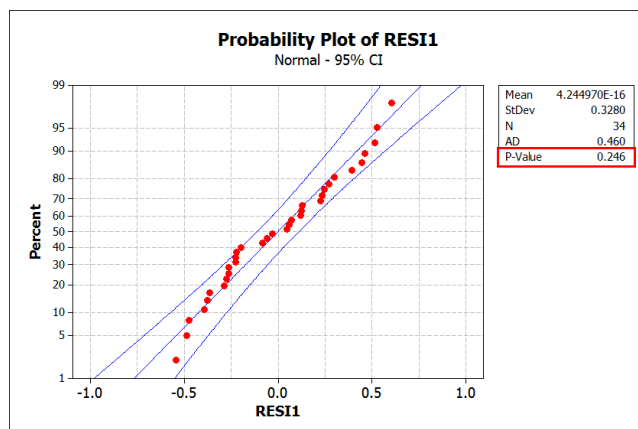
HRC2 = ค่าความแข็งเฉลี่ยหลังการกลึง

Difference of HRC = ค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็ง โดยมีค่าเท่ากับ HRC2 - HRC1

## 1. การทดสอบความถูกต้องของค่าตอบสนอง

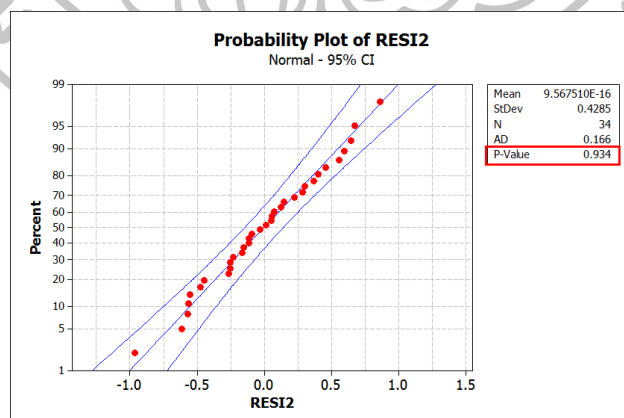
### 1.1 การทดสอบความเป็นปกติของข้อมูล

จากภาพที่ 4.45 แสดงให้เห็นกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าส่วนตกค้างค่าความแข็งก่อนการกลิ้งจากตารางที่ 4.15 มีค่า P-Value อยู่ที่ 0.246 แสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ อย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05



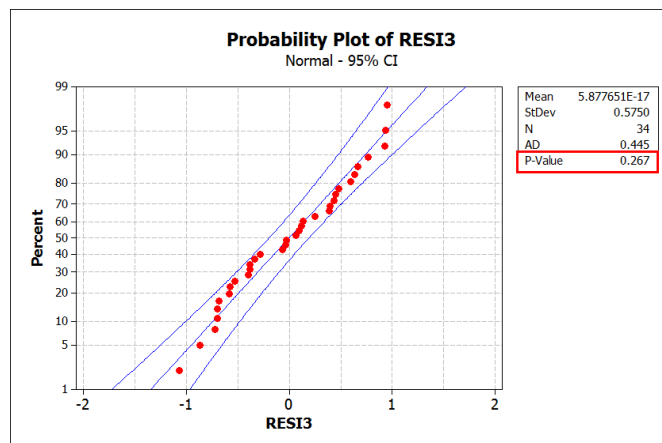
ภาพที่ 4.45 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าส่วนตกค้างค่าความแข็งก่อนการกลิ้ง

จากภาพที่ 4.46 แสดงให้เห็นกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าส่วนตกค้างค่าความแข็งหลังการกลิ้งจากตารางที่ 4.15 ซึ่งมีค่า P-Value อยู่ที่ 0.934 แสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ อย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05



ภาพที่ 4.46 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าส่วนตกค้างค่าความแข็งหลังการกลิ้ง

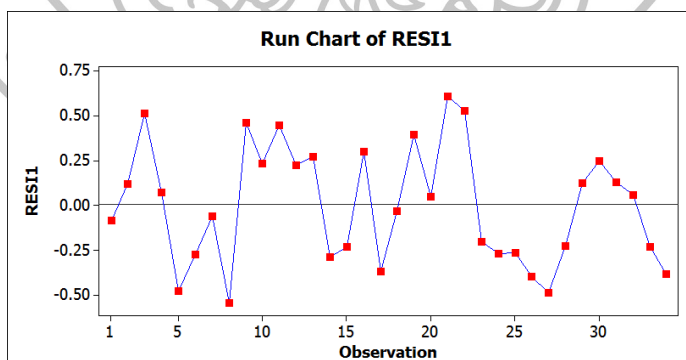
จากภาพที่ 4.47 แสดงให้เห็นกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าส่วนตกค้างค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็งแกร่งกลึงจากรายที่ 4.15 ซึ่งมีค่า P-Value อยู่ที่ 0.267 แสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ อย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05



ภาพที่ 4.47 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าส่วนตกค้างค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็งแกร่งกลึง

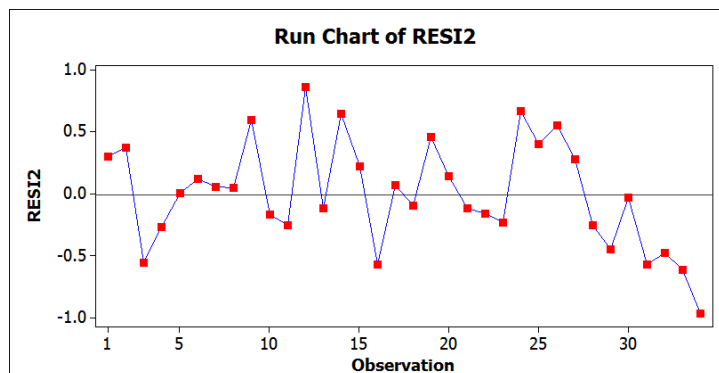
### 1.2 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

จากภาพที่ 4.48 แสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างค่าความแข็งแกร่งก่อนการกลึงจากรายที่ 4.15 มีรูปแบบที่ไม่แน่นอน และไม่สามารถประมาณรูปแบบได้ เป็นการบ่งบอกถึงความไม่เป็นอิสระต่อกัน



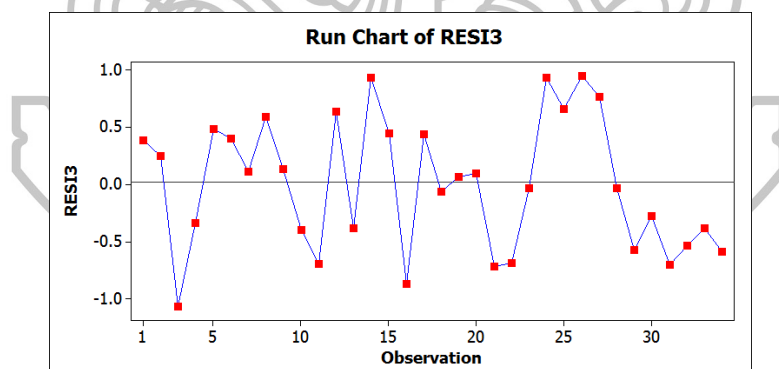
ภาพที่ 4.48 กราฟการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างความแข็งแกร่งก่อนการกลึง

จากภาพที่ 4.49 แสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างค่าความแข็งหลังการกลึงจากตารางที่ 4.15 ซึ่งมีรูปแบบที่ไม่แน่นอน และไม่สามารถประมาณรูปแบบได้ เป็นการบ่งบอกถึงความเป็นอิสระต่อกัน



ภาพที่ 4.49 กราฟการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างค่าความแข็งหลังการกลึง

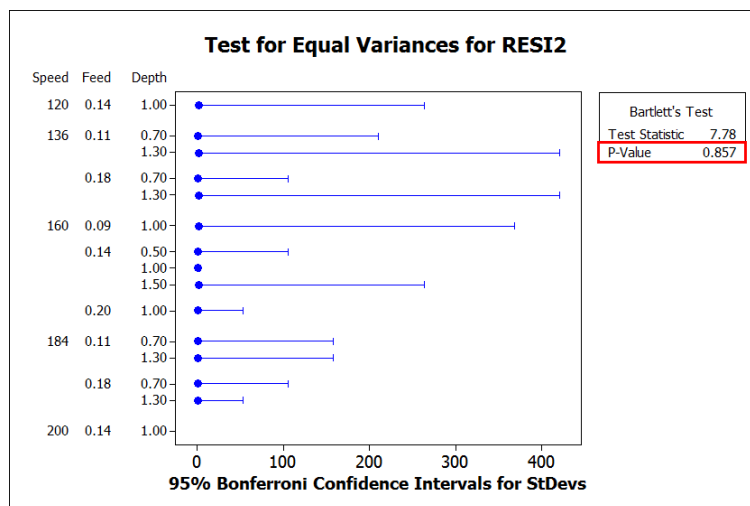
จากภาพที่ 4.50 แสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็งการกลึงซึ่งมีรูปแบบที่ไม่แน่นอน และไม่สามารถประมาณรูปแบบได้ เป็นการบ่งบอกถึงความเป็นอิสระต่อกัน



ภาพที่ 4.50 กราฟการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็งการกลึง

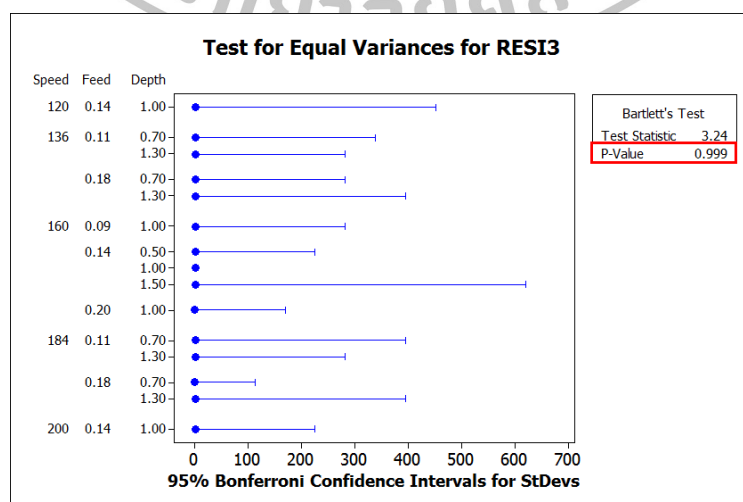
### 1.3 การทดสอบความเสถียรของความแปรปรวน

จากภาพที่ 4.51 เป็นการทดสอบความเสถียรของความแปรปรวนของค่าส่วนตกค้างค่าความแข็งหลังการกลึงเทียบกับระดับของปัจจัยทุกปัจจัย เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างแล้วพบว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวนอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05 เนื่องจากค่า P-Value เท่ากับ 0.857



ภาพที่ 4.51 กราฟความแปรปรวนของค่าส่วนตกค้างความแข็งหลังการกลึง

จากภาพที่ 4.52 เป็นการทดสอบความเสถียรของความแปรปรวนของค่าส่วนตกค้างค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็งการกลึงเทียบกับระดับของปัจจัยทุกปัจจัย เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างแล้วพบว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวนอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05 เนื่องจากค่า P-Value เท่ากับ 0.999



ภาพที่ 4.52 กราฟความแปรปรวนของค่าส่วนตกค้างค่าเปลี่ยนแปลงความแข็ง



## 2. การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็งของชิ้นงาน

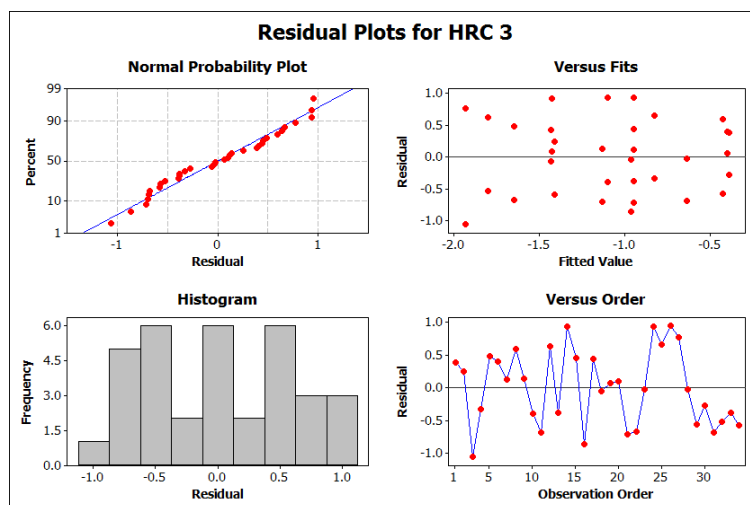
นำค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็งของชิ้นงานมาวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็งของชิ้นงาน จากภาพที่ 4.53 จะเห็นว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความแข็งนั้นอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05 เป็นปัจจัยกำลังหนึ่ง คือ ความลึกป้อน ส่วนปัจจัยกำลังสอง และ อันตรกิริยานั้น ไม่มีปัจจัยใดที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความแข็งของชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05

Response Surface Regression: HRC versus Speed, Feed, Depth						
Analysis of Variance for HRC						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	7.2684	7.2684	0.80760	1.78	0.126
Linear	3	6.5081	6.5081	2.16937	4.77	0.010
Speed	1	0.5211	0.5211	0.52111	1.15	0.295
Feed	1	0.2179	0.2179	0.21786	0.48	0.495
<b>Depth</b>	<b>1</b>	<b>5.7691</b>	<b>5.7691</b>	<b>5.76913</b>	<b>12.69</b>	<b>0.002</b>
Square	3	0.4964	0.4964	0.16547	0.36	0.780
Speed*Speed	1	0.1364	0.0177	0.01773	0.04	0.845
Feed*Feed	1	0.2329	0.3207	0.32074	0.71	0.409
Depth*Depth	1	0.1271	0.1271	0.12708	0.28	0.602
Interaction	3	0.2639	0.2639	0.08796	0.19	0.900
Speed*Feed	1	0.0278	0.0278	0.02778	0.06	0.807
Speed*Depth	1	0.1736	0.1736	0.17361	0.38	0.542
Feed*Depth	1	0.0625	0.0625	0.06250	0.14	0.714
Residual Error	24	10.9122	10.9122	0.45467		
Lack-of-Fit	5	1.8612	1.8612	0.37225	0.78	0.575
Pure Error	19	9.0509	9.0509	0.47636		
Total	33	18.1806				

S = 0.674295    PRESS = 22.2596  
R-Sq = 39.98%    R-Sq(pred) = 0.00%    R-Sq(adj) = 17.47%

ภาพที่ 4.53 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็ง

จากภาพที่ 4.54 เป็นการแสดงถึงความเป็นปกติของข้อมูล จากกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติแสดงให้เห็นว่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวเป็นปกติในแนวเส้นตรง และฮิสโตแกรมแสดงในทิศทางเดียวกันคือ มีลักษณะคล้ายระฆังคว่ำ แสดงว่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวเป็นปกติ แผนภาพการกระจายตัวของส่วนตกค้างกับค่าพยากรณ์มีลักษณะกระจายไม่จับตัวเป็นกลุ่ม และแผนภาพการกระจายตัวระหว่างส่วนตกค้างกับเวลา มีความเป็นอิสระไม่สามารถกำหนดรูปแบบที่แน่นอนได้ ซึ่งแสดงว่าส่วนตกค้างเป็นอิสระต่อกัน



ภาพที่ 4.54 กราฟส่วนตกค้างของค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็งแกร่ง

### 3. % Contribution ของค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็ง

การทำ % Contribution จะแสดงให้เห็นว่า ปัจจัย หรือ อันตรกิริยาใด ส่งผลต่อค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็งมากน้อยอย่างไร

ตารางที่ 4.16 % Contribution ของค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็ง

Factor	Mean square	Contribution ratio	% Contribution
Speed	0.5211	0.0720	7.200
Feed	0.2179	0.0301	3.010
Depth	5.7691	0.7971	79.711
Speed * Speed	0.0177	0.0024	0.245
Feed * Feed	0.3207	0.0443	4.432
Depth * Depth	0.1271	0.0176	1.756
Speed * Feed	0.0278	0.0038	0.384
Speed * Depth	0.1736	0.0240	2.399
Feed * Depth	0.0625	0.0086	0.864
<b>Total</b>	<b>7.2375</b>	<b>1.0000</b>	<b>100.000</b>

จากตารางที่ 4.16 จะแสดงให้เห็นว่าเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความแข็งมากที่สุดจะเป็นปัจจัยกำลังหนึ่งคือ ความลึกป้อน มากที่สุดเท่ากับ 79.711%

#### 4. การวิเคราะห์การถดถอยแบบพื้นผิวตอบสนอง Central Composite Design

การวิเคราะห์การถดถอยแบบพื้นผิวตอบสนอง Central Composite Design เป็นการหาความสัมพันธ์ของปัจจัยกำลังหนึ่ง ปัจจัยกำลังสอง และอันตรกิริยา เพื่อเป็นการหาค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็งหลังการกลึงที่จะเกิดขึ้น เมื่อระดับปัจจัยต่างๆเปลี่ยนแปลงไป

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนในภาพที่ 4.53 พบว่าความลึกป้อนส่งผลต่อค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็งอย่างมีนัยสำคัญจากค่า P-Value ที่มีค่ามากกว่า 0.05 ดังนั้นจึงนำความลึกป้อนมาหาการถดถอย ดังภาพที่ 4.55

Regression Analysis: HRC versus Depth				
The regression equation is HRC 3 = 0.449 - 1.53 Depth				
Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.4486	0.4113	1.09	0.284
Depth	-1.5319	0.3972	-3.86	0.001
S = 0.622782    R-Sq = 31.7%    R-Sq(adj) = 29.6%				

ภาพที่ 4.55 ผลการวิเคราะห์การถดถอยปัจจัยความลึกป้อน

ตารางที่ 4.17 ลดรูปสมการถดถอย

Factors	Regression equation	R-Sq (adj)
All	-3.6306 - 0.0025 Speed + 23.7 Feed + 3.314 Depth + 0.000049 Speed*Speed - 97.3636 Feed*Feed - 0.8342 Depth*Depth + 0.0496 Speed*Feed - 0.0145 Speed*Depth - 5.9524 Feed*Depth	39.98%
Depth	0.449 - 1.53 Depth	31.70 %

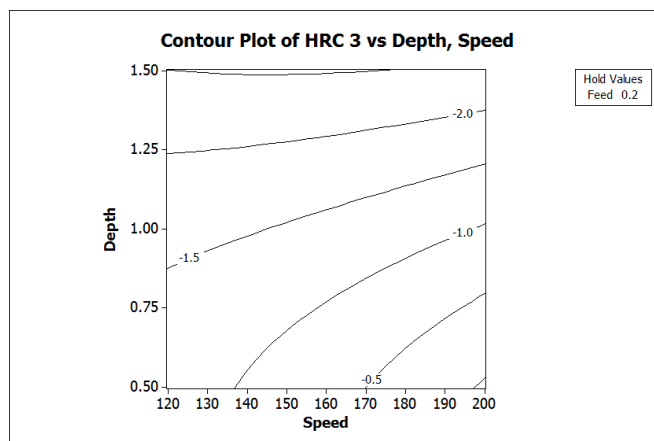
หมายเหตุ  $120 \leq \text{Speed} \leq 200$  ;  $0.09 \leq \text{Feed} \leq 0.20$  ;  $0.5 \leq \text{Depth} \leq 1.5$

การวิเคราะห์หาสมการถดถอยดังแสดงตามตารางที่ 4.17 เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Sq(adj)) พบว่าสมการถดถอยจากการลดรูปให้เหลือความลึกป้อน จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ 31.70% ลดลงจากเดิมที่เป็นสมการถดถอยทุกปัจจัยที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเพียง 39.98%

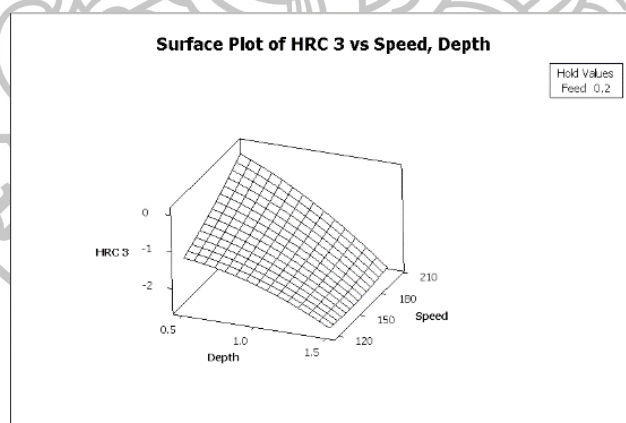
### 5. กราฟแสดงความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความแข็ง

กราฟโครงร่างพื้นผิวและ กราฟพื้นผิวเป็นการแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าตอบสนองว่าจะเป็นไปในทิศทางใด

จากภาพที่ 4.56 และ 4.57 พบว่าเมื่อ ความลึกป้อนมากขึ้นจะทำให้การเปลี่ยนแปลงความแข็งของชิ้นงานลดลง ที่อัตราป้อน 0.20 มิลลิเมตรต่อรอบ



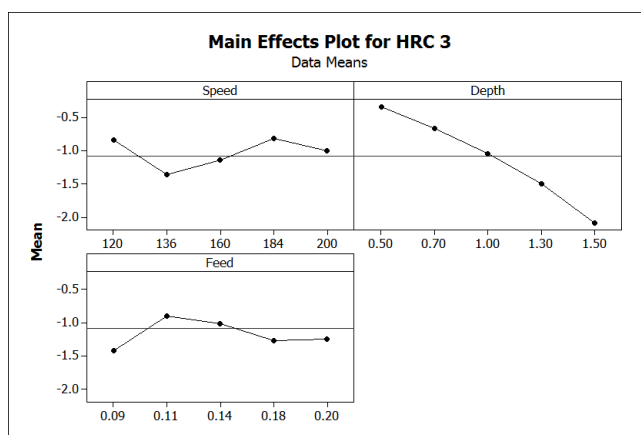
ภาพที่ 4.56 กราฟโครงร่างพื้นผิวการเปลี่ยนแปลงความแข็งระหว่างความเร็วตัดกับความลึกป้อน



ภาพที่ 4.57 กราฟพื้นผิวการเปลี่ยนแปลงความแข็งระหว่างความเร็วตัดกับความลึกป้อน

## 6. ผลกระทบของปัจจัยหลักต่อการเปลี่ยนแปลงความแข็งของชิ้นงาน

จากภาพที่ 4.58 พบว่าเมื่อ ความลึกป้อนมากขึ้นจะทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็งของชิ้นงานมีค่าลดลง ซึ่งมีความสอดคล้องกับการวิเคราะห์ความแปรปรวน



ภาพที่ 4.58 กราฟผลกระทบของปัจจัยหลักต่อการเปลี่ยนแปลงความแข็งของชิ้นงาน

### 4.2.3 การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน

ตารางที่ 4.18 แสดงการเก็บข้อมูลค่าความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลางในการกลึงด้วยเม็ดมีดกลึง เซอร์เม็ท

StdOrder	RunOrder	Speed	Feed	Depth	Diameter 1	Diameter 2	Difference of Diameter
13	1	160	0.14	0.50	24.01	24.02	0.01
5	2	136	0.11	1.30	22.40	22.41	0.01
14	3	160	0.14	1.50	21.99	22.00	0.01
1	4	136	0.11	0.70	23.60	23.61	0.01
8	5	184	0.18	1.30	22.40	22.41	0.01
4	6	184	0.18	0.70	23.60	23.61	0.01
15	7	160	0.14	1.00	23.00	23.01	0.01
2	8	184	0.11	0.70	23.60	23.61	0.01
11	9	160	0.09	1.00	23.00	23.01	0.01
9	10	120	0.14	1.00	23.00	23.01	0.01
10	11	200	0.14	1.00	23.00	23.01	0.01
7	12	136	0.18	1.30	22.40	22.41	0.01
17	13	160	0.14	1.00	23.00	23.01	0.01
6	14	184	0.11	1.30	22.40	22.41	0.01
16	15	160	0.14	1.00	23.00	23.01	0.01
3	16	136	0.18	0.70	23.60	23.61	0.01
12	17	160	0.20	1.00	23.00	23.01	0.01
29	18	160	0.20	1.00	23.00	23.01	0.01
21	19	184	0.18	0.70	23.60	23.61	0.01

ตารางที่ 4.18 แสดงการเก็บข้อมูลค่าความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลางในการกลึงด้วยเม็ดมีดกลึง เซอร์เมท (ต่อ)

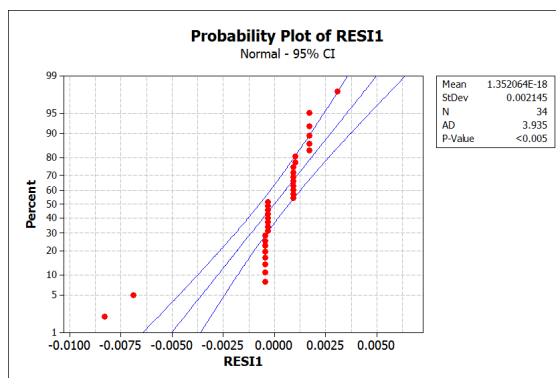
StdOrder	RunOrder	Speed	Feed	Depth	Diameter 1	Diameter 2	Difference of Diameter
23	20	184	0.11	1.30	22.40	22.41	0.01
33	21	160	0.14	1.00	23.00	23.01	0.01
25	22	184	0.18	1.30	22.40	22.41	0.01
20	23	136	0.18	0.70	23.60	23.61	0.01
26	24	120	0.14	1.00	23.00	23.01	0.01
18	25	136	0.11	0.70	23.60	23.61	0.01
32	26	160	0.14	1.00	23.00	23.01	0.01
31	27	160	0.14	1.50	21.99	22.00	0.01
27	28	200	0.14	1.00	23.00	23.01	0.01
19	29	184	0.11	0.70	23.60	23.61	0.01
30	30	160	0.14	0.50	24.01	24.02	0.01
28	31	160	0.09	1.00	23.00	23.02	0.02
24	32	136	0.18	1.30	22.40	22.41	0.01
34	33	160	0.14	1.00	23.00	23.02	0.02
22	34	136	0.11	1.30	22.40	22.41	0.01

หมายเหตุ Diameter 1 = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยในตำแหน่งที่ 1  
Diameter 2 = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยในตำแหน่งที่ 2  
Difference of Diameter = ผลต่างของเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยมีค่าเท่ากับ ค่าสัมบูรณ์ของ D1-D2

## 1. การทดสอบความถูกต้องของค่าตอบสนอง

### 1.1 การทดสอบความเป็นปกติของข้อมูล

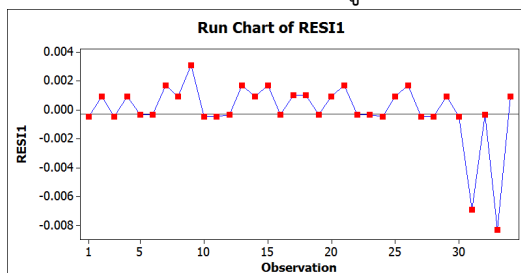
จากภาพที่ 4.59 แสดงให้เห็นกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าส่วนตกค้างของความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลางในตารางที่ 4.18 แสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีการแจกแจงไม่เป็นปกติ อย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05



ภาพที่ 4.59 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลาง

### 1.2 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

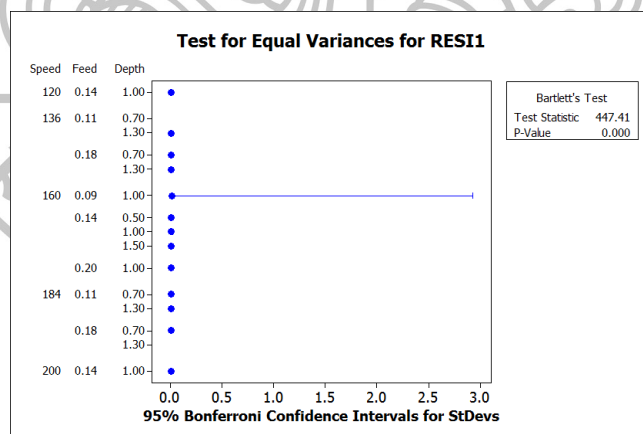
จากภาพที่ 4.60 แสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวของค่าความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลางในตารางที่ 4.18 มีรูปแบบที่ไม่แน่นอน และไม่สามารถประมาณรูปแบบได้ เป็นการบ่งบอกถึงความเป็นอิสระต่อกันของค่าความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลาง



ภาพที่ 4.60 กราฟการกระจายตัวของค่าความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลาง

### 1.3 การทดสอบความเสถียรของความแปรปรวน

จากภาพที่ 4.61 เป็นการทดสอบความเสถียรของความแปรปรวนของค่าส่วนตกค้างค่าความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลางในตารางที่ 4.18 เทียบกับระดับของปัจจัยทุกปัจจัย เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างแล้วพบว่าข้อมูลมีความเสถียรอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05 เนื่องจากค่า P-Value เท่ากับ 0



ภาพที่ 4.61 กราฟความแปรปรวนของค่าความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลาง

## 2. การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลาง

นำค่าความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานกลึงในตารางที่ 4.18 มาวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน จากภาพที่ 4.62 จะเห็นว่าไม่มีปัจจัยใดที่ส่งผลต่อความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลางอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05

### Response Surface Regression: Difference versus Block, Speed, Feed, Depth

Analysis of Variance for Difference

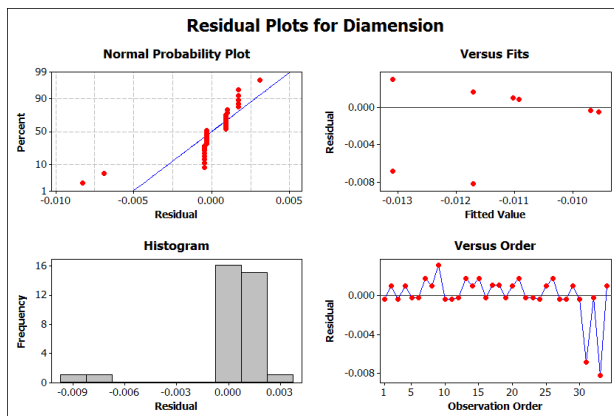
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	0.000036	0.000036	0.000004	0.64	0.754
Linear	3	0.000010	0.000010	0.000003	0.55	0.656
Speed	1	0.000000	0.000000	0.000000	0.00	1.000
Feed	1	0.000010	0.000010	0.000010	1.64	0.213
Depth	1	0.000000	0.000000	0.000000	0.00	1.000
Square	3	0.000026	0.000026	0.000009	1.37	0.276
Speed*Speed	1	0.000010	0.000013	0.000013	2.07	0.163
Feed*Feed	1	0.000003	0.000000	0.000000	0.05	0.822
Depth*Depth	1	0.000013	0.000013	0.000013	2.07	0.163
Interaction	3	0.000000	0.000000	0.000000	0.00	1.000
Speed*Feed	1	0.000000	0.000000	0.000000	0.00	1.000
Speed*Depth	1	0.000000	0.000000	0.000000	0.00	1.000
Feed*Depth	1	0.000000	0.000000	0.000000	0.00	1.000
Residual Error	24	0.000152	0.000152	0.000006		
Lack-of-Fit	5	0.000019	0.000019	0.000004	0.53	0.752
Pure Error	19	0.000133	0.000133	0.000007		
Total	33	0.000188				

S = 0.00251565 PRESS = 0.000262723  
R-Sq = 19.31% R-Sq(pred) = 0.00% R-Sq(adj) = 0.00%

ภาพที่ 4.62 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลาง

จากภาพที่ 4.63 เป็นการแสดงถึงความเป็นปกติของข้อมูล จากกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติแสดงให้เห็นว่าส่วนตักค้ำมีการกระจายตัวไม่เป็นปกติในแนวเส้นตรง และฮิสโตแกรมแสดงในทิศทางเดียวกันคือ ไม่มีลักษณะคล้ายระฆังคว่ำ แสดงว่าส่วนตักค้ำมีการกระจายตัวไม่เป็นปกติ แผนภาพการกระจายตัวของส่วนตักค้ำกับค่าพยากรณ์มีลักษณะกระจายไม่จับตัวเป็นกลุ่ม และแผนภาพการกระจายตัวระหว่างส่วนตักค้ำกับเวลา มีความเป็นอิสระไม่สามารถกำหนดรูปแบบที่แน่นอนได้ ซึ่งแสดงว่าส่วนตักค้ำเป็นอิสระต่อกัน





ภาพที่ 4.63 กราฟส่วนตกค้างของค่าความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลาง

### 4.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อประเมินความคุ้มค่า

การทดลองเพื่อหาความคุ้มค่าในการเลือกใช้เม็ดมีดกลึง จะได้จากการนำค่าที่ได้จากการทดลองในตารางที่ออกแบไว้มาหาสมการถดถอย โดยอายุการใช้งานที่ใช้ประเมินความคุ้มค่าของเม็ดมีดกลึงประเมินจากระยะความยาวที่เม็ดมีดกลึงสามารถกลึงได้ จากนั้นนำสมการถดถอยที่ได้มาหาอายุการใช้งานของเม็ดมีดกลึงมีค่าความเรียบผิวไม่เกินเกณฑ์ที่ได้กำหนดไว้

#### 4.3.1 การวิเคราะห์ปัจจัยเพื่อหาอายุการใช้งานของเม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์

##### 1. ผลการทดสอบของเม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์

ตารางแสดงผลการทดสอบระหว่างความยาวมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร เปรียบเทียบกับความเรียบผิวที่วัดได้ในแต่ละช่วงความยาว ดังตารางที่ 4.19

ตารางที่ 4.19 ค่าความเรียบผิวในแต่ละช่วงการทดสอบของเม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์

ชั้นที่		50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
ความเรียบผิว	1	0.408	0.418	0.421	0.424	0.431	0.436	0.440	0.442	0.447	0.450	0.456	0.457	0.460	0.462	0.482	0.488
	2	0.404	0.412	0.417	0.420	0.426	0.442	0.446	0.450	0.449	0.460	0.458	0.461	0.474	0.478	0.490	0.498
	เฉลี่ย	0.406	0.415	0.419	0.422	0.428	0.439	0.443	0.446	0.448	0.455	0.457	0.459	0.467	0.470	0.486	0.493

หมายเหตุ ชิ้นงานทดลองมีขนาด Ø25 มิลลิเมตร

##### 2. การวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis)

การวิเคราะห์การถดถอยเป็นการหาความสัมพันธ์ของปัจจัย เพื่อเป็นการพยากรณ์ค่าความเรียบผิวที่จะเกิดขึ้น เมื่อระดับปัจจัยเปลี่ยนแปลงไป จากภาพที่ 4.64 จะได้สมการถดถอยของค่าความเรียบผิวคือ  $Ra = 0.403 + 0.000104 * \text{Distance}$  (R-Sq = 97.60%)

### Regression Analysis: Roughness (PVD) versus Distance (mm.)

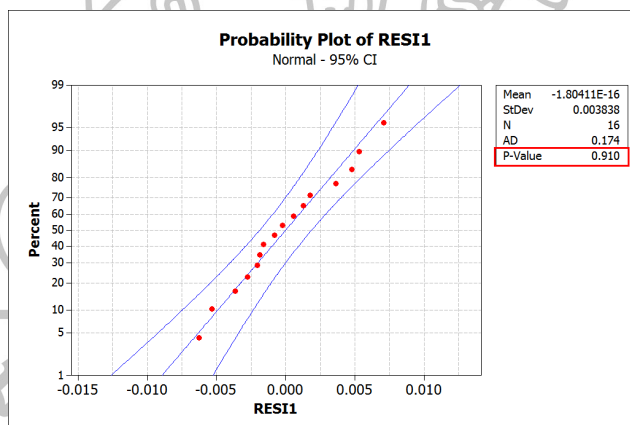
The regression equation is  
 Roughness (PVD) = 0.403 + 0.000104 Distance (mm.)

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.402854	0.002083	193.39	0.000
Distance (mm.)	0.00010377	0.00000431	24.09	0.000

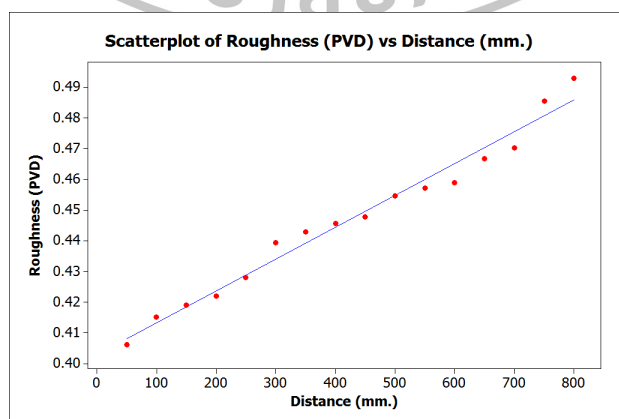
S = 0.00397239    R-Sq = 97.6%    R-Sq(adj) = 97.5%

ภาพที่ 4.64 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของค่าความเรียบผิว

จากภาพที่ 4.65 แสดงการทดสอบความเป็นปกติของค่าส่วนตกค้างค่าความเรียบผิว จากภาพแสดงให้เห็นว่ามีความเป็นปกติอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05 และภาพที่ 4.66 แสดงทิศทาง การเพิ่มขึ้นของค่าความเรียบผิวกับความยาว



ภาพที่ 4.65 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวแบบปกติของค่าส่วนตกค้างของค่าความเรียบผิว



ภาพที่ 4.66 กราฟจุดแนวโน้มของค่าความเรียบผิว

#### 4.3.2 การวิเคราะห์ปัจจัยเพื่อหาอายุการใช้งานของเม็ดมีดกลึงเซอร์เมท

##### 1. ผลการทดสอบของเม็ดมีดกลึงเซอร์เมท

ตารางแสดงผลการทดสอบระหว่างระหว่างความยาวมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร เปรียบเทียบกับความเรียบผิวที่วัดได้ในแต่ละช่วงความยาว ดังตารางที่ 4.20

ตารางที่ 4.20 ค่าความเรียบผิวในแต่ละช่วงการทดสอบของเม็ดมีดกลึงเซอร์เมท

ชั้นที่		50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
ความเรียบผิว	1	0.712	0.716	0.721	0.729	0.734	0.737	0.740	0.747	0.754	0.758	0.761	0.773	0.775	0.771	0.780	0.789
	2	0.736	0.736	0.737	0.733	0.752	0.749	0.755	0.761	0.767	0.770	0.775	0.775	0.777	0.789	0.786	0.801
	เฉลี่ย	0.724	0.726	0.729	0.731	0.743	0.743	0.747	0.754	0.761	0.764	0.768	0.774	0.776	0.780	0.783	0.795

##### 2. การวิเคราะห์สมการถดถอย (Regression analysis)

การวิเคราะห์สมการถดถอยเป็นการหาความสัมพันธ์ของปัจจัย เพื่อเป็นการพยากรณ์ค่าความเรียบผิวที่จะเกิดขึ้น เมื่อระดับปัจจัยเปลี่ยนแปลงไป จากภาพที่ 4.67 จะได้สมการถดถอยของค่าความเรียบผิวกับระยะความยาวคือ  $Ra = 0.716 + 0.000093 * \text{Distance}$  ( $R\text{-Sq} = 98.90\%$ )

##### Regression Analysis: Roughness (Cermet) versus Distance (mm.)

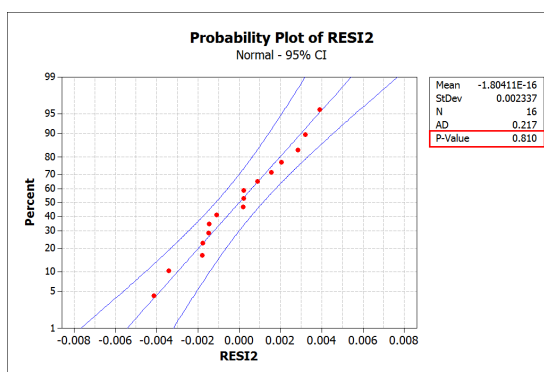
The regression equation is  
 $\text{Roughness (Cermet)} = 0.716 + 0.000093 \text{ Distance (mm.)}$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.716483	0.001269	564.81	0.000
Distance (mm.)	0.00009325	0.00000262	35.54	0.000

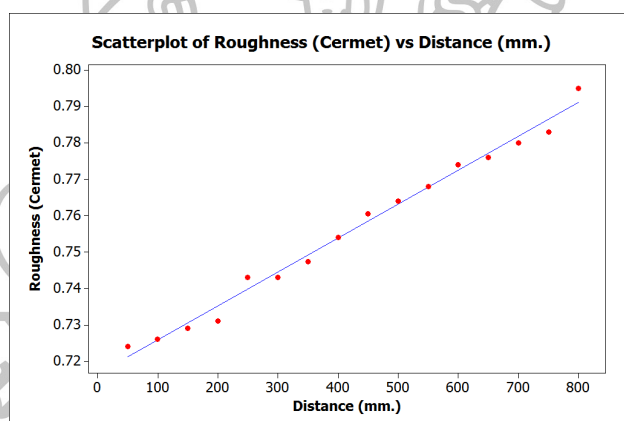
S = 0.00241902    R-Sq = 98.9%    R-Sq(adj) = 98.8%

ภาพที่ 4.67 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของค่าความเรียบผิวเปรียบเทียบกับความยาว

จากภาพที่ 4.68 แสดงการทดสอบความเป็นปกติของค่าส่วนตกค้างค่าความเรียบผิว จากภาพแสดงให้เห็นว่ามีความเป็นปกติอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05 และภาพที่ 4.69 แสดงทิศทาง การเพิ่มขึ้นของค่าความเรียบผิวกับความยาว



ภาพที่ 4.68 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวแบบปกติของค่าส่วนตกค้างของค่าความเรียบผิว



ภาพที่ 4.69 กราฟจุดแนวโน้มของค่าความเรียบผิวเทียบ

#### 4.3.3 การวิเคราะห์ปัจจัยเพื่อหาความคุ้มค่าในการเลือกใช้เม็ดมีดกลึง

เป็นการนำเอาสมการถดถอยที่ได้ จากการวิเคราะห์ปัจจัยเพื่อหาอายุการใช้งานของเม็ด มีดกลึงคาร์ไบด์ กับการวิเคราะห์ปัจจัยเพื่อหาอายุการใช้งานของเม็ดมีดกลึงเซอร่าเม็ท มาเปรียบเทียบ กัน โดยค่าความเรียบผิวที่ได้จะต้องไม่มากกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ โดยแสดงค่าใช้จ่ายดังตารางที่ 4.21

ตารางที่ 4.21 ค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อเม็ดมีด

ลำดับที่	ชนิดของเม็ดมีด	รหัสเม็ดมีด	บาทต่อหน่วย	วันที่ใบสั่งซื้อ
1	เม็ดมีดคาร์ไบด์	DCMT11T304-M25 CTPM125	285	5 ตุลาคม
2	เม็ดมีดเซอร่าเม็ท	DCMT11T304GP TN6020	225	2559

นำสมการถดถอยที่ได้มาพยากรณ์ค่าความเรียบผิวตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ เพื่อหาความยาวที่สามารถกลึงได้ ดังตารางที่ 4.22

ตารางที่ 4.22 ตารางคำนวณหาความยาวที่กลึงได้

ลำดับที่	ชนิดเม็ดมีดกลึง	สมการถดถอย	R-Sq	อายุการใช้งาน ความยาว (มิลลิเมตร)
1	คาร์ไบด์	$Ra = 0.403 + 0.000104 * \text{Distance}$	97.60%	5,740
2	เซอร์เม็ท	$Ra = 0.716 + 0.0000903 * \text{Distance}$	98.90%	3,054

นำสมการที่ 3.1 มาเป็นเครื่องมือในการเปรียบเทียบความคุ้มค่าของเม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์กับ เม็ดมีดกลึงเซอร์เม็ท ดังตารางที่ 4.23

ตารางที่ 4.23 ตารางสรุปค่าใช้จ่าย

ชนิดเม็ดมีดกลึง	ต้นทุนการกลึงต่อระยะตามแนวกลึง		% ต้นทุน
	สตางค์/มิลลิเมตร/เมตร	สตางค์/มิลลิเมตร/คมตัด	
เม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์	4.96	2.48	40.19
เม็ดมีดกลึงเซอร์เม็ท	7.37	3.69	59.81

จากตารางที่ 4.23 แสดงให้เห็นว่าในช่วงค่าความเรียบผิวไม่เกิน  $1 \mu\text{m}$ . เม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์สามารถกลึงได้ยาว 5,740 มิลลิเมตร มีอัตราความคุ้มค่าที่ 2.48 สตางค์ต่อมิลลิเมตร ส่วนเม็ดมีดกลึงเซอร์เม็ทสามารถกลึงได้ยาว 3,054 มิลลิเมตร มีอัตราความคุ้มค่าที่ 3.69 สตางค์ต่อมิลลิเมตร จึงสามารถสรุปได้ว่าในงานวิจัยนี้เม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์มีความคุ้มค่ากว่าเม็ดมีดกลึงเซอร์เม็ท ประมาณ 19.62%

## บทที่ 5

### สรุปและ อภิปรายผลการวิจัย

การวิจัยนี้ประกอบด้วยการศึกษาทดลอง 2 ส่วนคือ การหาปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพชิ้นงาน เหล็กกล้าไร้สนิม AISI/SUS 304 ประกอบด้วย ความเรียบผิว การเปลี่ยนแปลงความแข็งของชิ้นงาน และ ความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง Central Composite Design ทดลองกับเม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์เคลือบผิว PVD และ เม็ดมีดกลึงเซอร์เม็ท และการหาอายุการใช้งานของเม็ดมีดกลึง 2 ชนิดคือ เม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์เคลือบผิว PVD และเม็ดมีดกลึงเซอร์เม็ท เพื่อเปรียบเทียบความคุ้มค่าโดยใช้สมการถดถอยเชิงเส้นเป็นเครื่องมือในการหาอายุการใช้งานของเม็ดมีดกลึงในรูปแบบความยาวงานกลึง และใช้สมการต้นทุนคงที่เฉลี่ยในการหาความคุ้มค่าในการเลือกใช้ชนิดเม็ดมีดกลึง

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

##### 5.1.1 ความเรียบผิวในการกลึงเหล็กกล้าไร้สนิม AISI/SUS 304

ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความเรียบผิวในการกลึงเหล็กกล้าไร้สนิม AISI/SUS 304 กับเม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์เคลือบผิว PVD คือ อัตราป้อนกำลังหนึ่ง และอัตราป้อนกำลังสอง จากการวิเคราะห์การถดถอย จะได้สมการ  $Ra = 0.239 - 1.69 \text{ Feed} + 89.6 \text{ Feed} * \text{Feed}$  ( $100 \leq \text{Speed} \leq 220$  ;  $0.06 \leq \text{Feed} \leq 0.20$  ;  $0.2 \leq \text{Depth} \leq 0.6$ ) โดยค่าที่เหมาะสมคือ ความเร็วตัด 199 เมตรต่อนาที อัตราป้อน 0.06 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกป้อน 0.60 มิลลิเมตร ซึ่งจะทำให้ค่าความเรียบผิวอยู่ที่  $0.3986 \mu\text{m}$ .

ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความเรียบผิวในการกลึงเหล็กกล้าไร้สนิม AISI/SUS 304 กับเม็ดมีดกลึงเซอร์เม็ท คือ อัตราป้อนกำลังหนึ่ง อัตราป้อนกำลังสอง และความลึกป้อนกำลังสอง จากการวิเคราะห์การถดถอยได้สมการ  $Ra = 1.158 - 17.72 \text{ Feed} + 153.0 \text{ Feed} * \text{Feed}$  ( $120 \leq \text{Speed} \leq 200$  ;  $0.09 \leq \text{Feed} \leq 0.20$  ;  $0.5 \leq \text{Depth} \leq 1.5$ ) โดยค่าที่เหมาะสมคือ ความเร็วตัด 156 เมตรต่อนาที อัตราป้อน 0.09 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกป้อน 1.00 มิลลิเมตร ซึ่งจะทำให้ค่าความเรียบผิวอยู่ที่  $0.7439 \mu\text{m}$ .

##### 5.1.2 การเปลี่ยนแปลงความแข็งในการกลึงเหล็กกล้าไร้สนิม AISI/SUS 304

ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความแข็งในการกลึงเหล็กกล้าไร้สนิม AISI/SUS 304 กับเม็ดมีดกลึงทั้งสองชนิดคือ ความลึกป้อนกำลังหนึ่ง จากการวิเคราะห์การถดถอยของเม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์เคลือบผิว PVD ได้สมการถดถอย  $HRC = 0.189 - 1.64 * \text{Depth}$  ( $100 \leq \text{Speed} \leq 220$  ;  $0.06 \leq \text{Feed} \leq 0.20$  ;  $0.2 \leq \text{Depth} \leq 0.6$ ) และเม็ดมีดเซอร์เม็ท ได้สมการถดถอย  $HRC = 0.449 - 1.53 * \text{Depth}$  ( $120 \leq \text{Speed} \leq 200$  ;  $0.09 \leq \text{Feed} \leq 0.20$  ;  $0.5 \leq \text{Depth} \leq 1.5$ )

### 5.1.3 ความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลางในการกลึงเหล็กกล้าไร้สนิม AISI/SUS 304

ไม่มีปัจจัยใดที่ส่งผลต่อความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลางอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

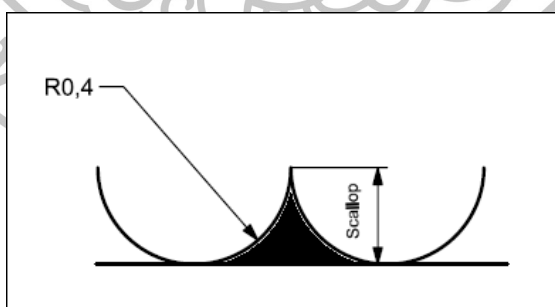
### 5.1.4 การประเมินความคุ้มค่า

การประเมินความคุ้มค่าในการเลือกใช้เม็ดมีดกลึง พบว่าเม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์มีต้นทุนการกลึงที่ถูกกว่าเม็ดมีดกลึงเซอร์เมท ประมาณ 19.62%

## 5.2 การอภิปรายผลการวิจัย

### 5.2.1 ความเรียบผิวในการกลึงเหล็กกล้าไร้สนิม AISI/SUS 304

ความเรียบผิวในการกลึงเหล็กกล้าไร้สนิม AISI/SUS 304 กับเม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์เคลือบผิว PVD จากการศึกษาของงานวิจัยของ Camposeco-Negrete (2015), Nalbant (2006) และบุญเรือง (2550) มีผลงานวิจัยที่สอดคล้องกันคือพบว่า อัตราป้อนส่งผลต่อค่าความเรียบผิวอย่างมีนัยสำคัญ โดยเมื่อลดอัตราป้อนลงจะทำให้ค่าความเรียบผิวลดลงทำให้ได้งานที่มีผิวเรียบดีขึ้น จากงานวิจัยของ บุญเรือง (2550) ได้สมการถดถอย  $Ra = -0.176 + 9.35 \text{ Feed}$  ( $R-Sq = 83.2\%$ ) ซึ่งจากสมการถดถอยจะเห็นได้ว่า อัตราป้อนมีผลอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อศึกษาในทางเทคนิคแล้วพบว่าปลายเม็ดมีดกลึงในงานวิจัยนี้มีรัศมีปลายมีด 0.4 มิลลิเมตร เมื่อเคลื่อนที่ในแนวยาวของชิ้นงาน(อัตราป้อน)จะเกิดส่วนสูงของการต่อเนื่องกันของรัศมีปลายมีดที่ส่งผลโดยตรงต่อค่าความเรียบผิว เรียกว่า Scallop ดังสามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 5.1



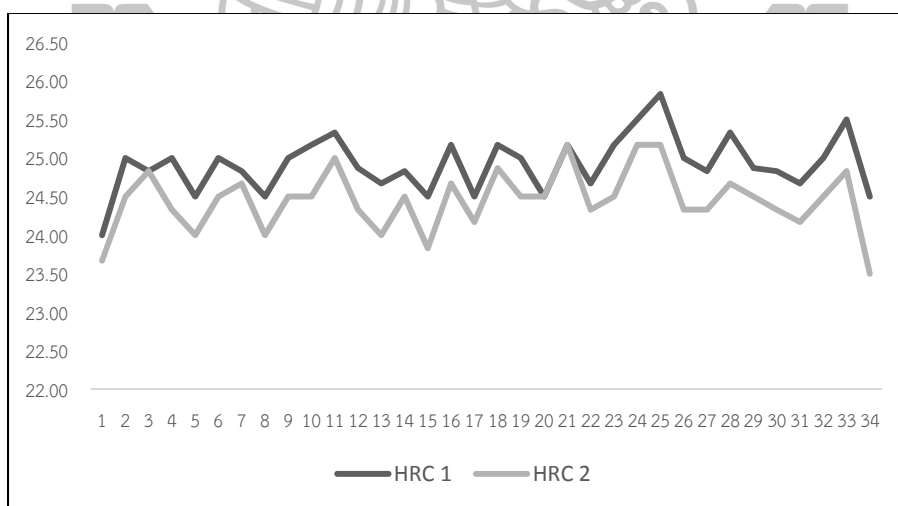
ภาพที่ 5.1 Scallop จากอัตราป้อน

ความเรียบผิวในการกลึงเหล็กกล้าไร้สนิม AISI/SUS 304 กับเม็ดมีดกลึงเซอร์เมท การทดลองในส่วนนี้สามารถอธิบายได้ตามหัวข้อที่กล่าวมาแล้ว แต่จากการสังเกตพบว่า มีปัจจัยความลึกป้อนกำลังสอง เพิ่มเติมขึ้นมา จากการศึกษาของงานวิจัยเพิ่มเติมพบว่า งานวิจัยของ Lalwani และคณะ (2008) แสดงให้เห็นว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อความเรียบผิวคือ อัตราป้อน 86.03% รองลงมาคือ อันตรกิริยาของอัตราป้อนกับความลึกป้อนที่ 6.92% จะสังเกตได้ว่าความลึกป้อนจะไม่อยู่ในปัจจัยหลัก ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่อาจเกิดจากปัจจัยรบกวน เพราะปัจจัยหลักไม่ส่งผลต่อความเรียบผิวอย่างมี

นัยสำคัญ ในงานวิจัยนี้ก็เช่นกัน และความลึบป้อนกำลังสองส่งผลเพียง 0.53% เป็นการแสดงให้เห็นว่า ความลึบป้อน ส่งผลเพียงเล็กน้อย อาจเป็นไปได้ว่าอาจเกิดจากปัจจัยรบกวนเช่นกัน งานวิจัยนี้จึงได้ตัดพจน์ของความลึบป้อนกำลังสองออกในการวิเคราะห์การถดถอย

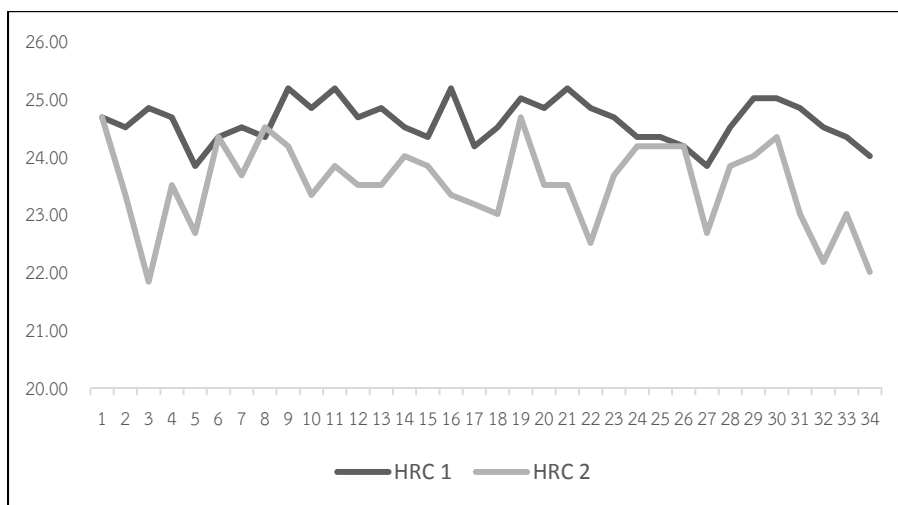
### 5.2.2 การเปลี่ยนแปลงความแข็งในการกลึงเหล็กกล้าไร้สนิม AISI/SUS 304

จากงานวิจัยของ Jirapattarasilp (2012) ซึ่งทดสอบปัจจัย ความเร็วตัด อัตราป้อน และการใช้หรือไม่ใช่สารหล่อเย็น พบว่าไม่มีปัจจัยใดส่งผลต่อค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็งของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 303 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยนี้ในด้านของปัจจัย ความเร็วตัด และอัตราป้อน ไม่ส่งผลต่อค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็งของชิ้นงาน และปัจจัยการใช้หรือไม่ใช่สารหล่อเย็น ไม่เป็นปัจจัยที่ผู้วิจัยศึกษา แต่ปัจจัยที่แตกต่างกับงานวิจัยที่ศึกษาคือ ความลึบป้อน เมื่อพิจารณาแล้วเชื่อว่า ความลึบป้อนที่เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความแข็งอย่างมีนัยสำคัญนั้น มีผลมาจากกรรมวิธีการผลิตเหล็กกลมทั่วไปคือวัสดุจะมีความแข็งที่ผิวของเหล็กมากที่สุดและจะลดระดับลงตามความลึกจากผิวเหล็ก จากการสร้างแผนภูมิเปรียบเทียบค่าความแข็งของเม็ดมีดกลึงทั้ง 2 ชนิด ทั้งก่อนการทดลอง (HRC1) กับหลังการทดลอง (HRC2) ดังภาพที่ 5.2 และ 5.3 พบว่าชิ้นงานหลังการทดลองจะมีค่าความแข็งที่ลดลง เพื่อเป็นการยืนยันความแข็งที่เปลี่ยนแปลงตามความลึกนั้นจึงได้ทำการทดลองเพื่อสังเกตค่าความแข็งที่เปลี่ยนแปลง โดยในตารางที่ 5.1 แสดงให้เห็นว่าที่ความลึบป้อนมากขึ้นความแข็งของเหล็กมีการลดลง และภาพที่ 5.4 แสดงให้เห็นว่าเมื่อนำข้อมูลในตารางที่ 5.1 มาเขียนเป็นกราฟจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าความแข็งมีแนวโน้มลดลงตามความลึบป้อนที่มากขึ้น



รูปที่ 5.2 แผนภูมิตค่าความแข็งในการกลึงด้วยเม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์เคลือบผิว PVD

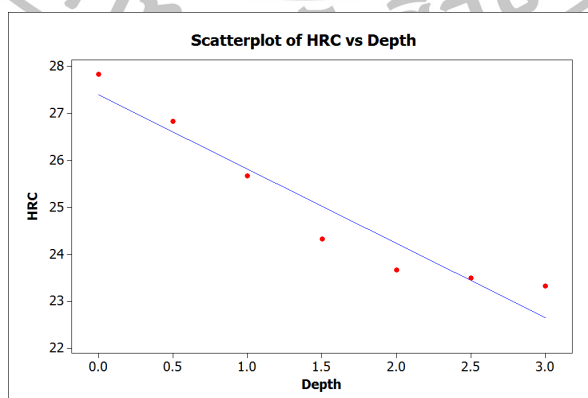




รูปที่ 5.3 แผนภูมิค่าความแข็งในการกลึงด้วยเม็ดมีดกลึงเซอร์เม็ท

ตารางที่ 5.1 การทดสอบค่าความแข็ง

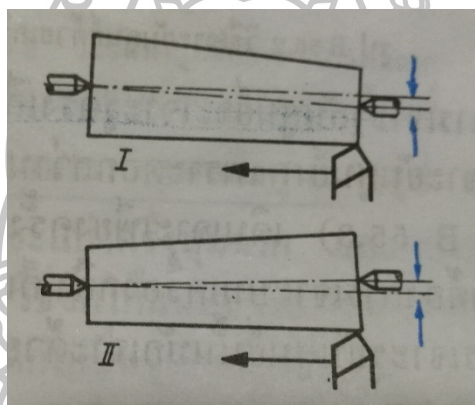
ลำดับที่	ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อน (มิลลิเมตรตอร์อบ)	ความลึกป้อน (มิลลิเมตร)	ค่าความแข็ง (HRC)
1	199	0.06	0	27.83
2			0.50	26.83
3			1.00	25.67
4			1.50	24.33
5			2.00	23.67
6			2.50	23.50
7			3.00	23.33



ภาพที่ 5.4 กราฟจุดแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกป้อนกับค่าความแข็ง

### 5.2.3 ความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลางในการกลึงเหล็กกล้าไร้สนิม AISI/SUS 304

จากงานวิจัยของ Jirapattarasilp (2012) ซึ่งทดสอบปัจจัย ความเร็วตัด อัตราป้อน และการใช้หรือไม่ใช้สารหล่อเย็น พบว่าการใช้สารหล่อเย็นส่งผลต่อความกลมของชิ้นงาน ซึ่งงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้การใช้สารหล่อเย็นในการระบายความร้อนเป็นตัวแปรควบคุม จึงทำให้การวัดในแต่ละตำแหน่งของชิ้นงานมีความกลม และยังใช้การกลึงร่วมศูนย์ในการทดลอง จึงเป็นไปได้ว่าค่าความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลางขึ้นอยู่กับความร่วมมือของหัวจับกับยันศูนย์ท้ายเครื่องเป็นสำคัญ โดยจากการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของการกลึงเร็วด้วยวิธีการเลื่อนท้ายแทนออกจากแนวศูนย์ของชิ้นงานจะกลึงได้ชิ้นงานเร็ว จะเรียวยาวที่ข้างหน้าหรือข้างหลังนั้น ขึ้นอยู่กับทิศทางการเลื่อนศูนย์ท้ายแทน ดังภาพที่ 5.5 (บุญญศักดิ์ ใจจงกิจ, 2518.)



ภาพที่ 5.5 การกลึงเร็วด้วยวิธีเลื่อนศูนย์ท้ายแทน

ที่มา : บุญญศักดิ์ ใจจงกิจ. *ทฤษฎีงานเครื่องมือกล*. กรุงเทพฯ: ศูนย์ผลิตตำราเรียน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2518.

### 5.2.4 การประเมินความคุ้มค่า

เมื่อพิจารณาผลการทดลองของ Ghani และคณะ (2004) พบว่ามีดกัดคาร์ไบด์เคลือบผิว TiN มีอายุการใช้งาน 22 นาที ส่วนมีดกัดเซอรัมมีทนั้น มีอายุการใช้งาน 33.25 นาที แสดงว่ามีดกัดเซอรัมมีทมีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่ามีดกัดคาร์ไบด์เคลือบผิว TiN ซึ่งเป็นในทิศทางตรงข้ามกับงานวิจัยนี้ อันมีสาเหตุส่วนหนึ่งมาจากค่าระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลองซึ่งจากงานวิจัยที่ศึกษาจะใช้ระดับของปัจจัยในการทดลองเท่ากันทั้งการทดลองกับมีดกัดคาร์ไบด์เคลือบผิว TiN และมีดกัดเซอรัมมีท ส่วนงานวิจัยนี้จะใช้ค่าที่ระดับปัจจัยที่ทำให้ค่าความเรียบผิวดีที่สุดและเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานได้ เมื่อสังเกตถึงค่าความเรียบผิวที่ดีที่สุดของแต่ละเม็ดมีดกลึงพบว่าจากการทดลองของเม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์มีค่าต่ำกว่าเม็ดมีดกลึงเซอรัมมีทอยู่มาก และเมื่อพิจารณาจากกราฟผลกระทบหลักของเม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์เคลือบผิว PVD และเม็ดมีดกลึงเซอรัมมีท ยังพบอีกว่ามีความเป็นไปได้ที่จะทำให้ค่าความเรียบผิวดีขึ้น ด้วยการกำหนดค่าอัตราป้อนให้ลดลง อันอาจจะเป็นผลทำให้ค่าต้นทุนในการกลึงมีการเปลี่ยนแปลงได้

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

1. เพื่อความสะดวกต่อการประยุกต์ใช้งานกับชิ้นงานที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างออกไป จึงได้ประยุกต์สมการเป็นดังนี้ ต้นทุนการกลึง =  $0.00034807 * \text{ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง} * \text{ราคาเม็ดมีดกลึง (บาท/หน่วย)}$

2. ปัจจัยที่ควรมีการศึกษาเพิ่มเติม เช่น ความยาวของชิ้นงานทดสอบ รัศมีปลายมีดกลึง การใช้/ไม่ใช้สารหล่อเย็น และชิ้นงานทดสอบ อาจส่งผลต่อค่าความเรียบผิว ค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็ง และค่าความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลาง



## รายการอ้างอิง

- กล้าหาญ วรพุทธพร และคณะ. (2528). **เทคนิคช่างกล**. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริม เทคโนโลยี (ไทย - ญี่ปุ่น).
- กัมพล เพชรคง. (2550). “การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความเรียบร้อยในการกลึงเหล็กกล้าไร้สนิม.” วิทยานิพนธ์ปริญญาครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- จรัส ทรัพย์เสรี. (2552). “DOE Central Composite Design.” **For Quality November 2009**, Vol.145: 72-74.
- ชาญ ราชวงศ์. (2548). “การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพผิวงานในการกลึงงานแข็ง.” วิทยานิพนธ์ปริญญาครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- ชาติ ตระการกุล. (2543). **เทคโนโลยีซีเอ็นซี**. พิมพ์ครั้งที่4. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริม เทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- ณรงค์ ธนาวิภาส. (2545). **หลักเศรษฐศาสตร์**. กรุงเทพฯ: บริษัท วิทย์พัฒน์ จำกัด.
- ธวัชชัย อาจปฐ. (2550). “การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความเรียบร้อยในการกลึงเหล็กหล่อเหนียว FCD450.” วิทยานิพนธ์ปริญญาครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- นริศ ศรีเมฆ. (2546). **เขียนแบบเทคนิคเบื้องต้น**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์เอ็มพันธ์.
- บรรเลง ศรีนิล และผศ.ประเสริฐ ก้วยสมบูรณ์. (2524). **ตารางโลหะ**. กรุงเทพฯ: ศูนย์ผลิตตำราเรียน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- บุญญศักดิ์ ใจจงกิจ. (2518). **ทฤษฎีงานเครื่องมือกล**. กรุงเทพฯ: ศูนย์ผลิตตำราเรียน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- บุญเรือง ขวัญนุ้ย. (2550). “การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความเรียบร้อยในการกลึงเหล็ก S45C ด้วยมีด เซรามิคเคลือบ PVD.” วิทยานิพนธ์ปริญญาครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และพงศ์ชนัน เหลืองไพบุลย์. (2551). **การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง**. กรุงเทพฯ: บริษัท สำนักพิมพ์ท้อป จำกัด.
- ปัจจัย บุณนาค และสมคิด แก้วสนธิ. (2535). **จุดเศรษฐศาสตร์**. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย

- ปารเมศ ชูติมา. (2545). **การออกแบบการทดลองวิศวกรรม**. พิมพ์ครั้งที่1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- มนูญ เทพกิจจารีกุล. (2547). “การศึกษาองค์ประกอบในงานกลึงที่มีผลกระทบต่อการศึกษาของมีดกลึง.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการ อดุสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอดุสาหกรรม บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- ศิริวัลย์ จันทร์ผ่อง. (2554). “การพยากรณ์ความขรุขระผิวในกระบวนการกลึงโดยการประยุกต์ใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอดุสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ศุภชัย รมยานนท์ และฉวีวรรณ รมยานนท์. (2534). **ทฤษฎีเครื่องมือกล1**. พิมพ์ครั้งที่2. กรุงเทพฯ: บริษัท โรงพิมพ์ไทยวัฒนาพานิชย์ จำกัด.
- ศุภโชค วิริยโกศล. (2543). **การตัดวัสดุ**. สงขลา: ภาควิชาวิศวกรรมอดุสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- สมบัติ ชิวหา. (2551). **พื้นฐานเทคโนโลยีซีเอ็นซี**. ปทุมธานี: บริษัท สกายบุ๊กส์ จำกัด.
- สุคนธ์ อัจฉฤทธิ์. (2535). **การตัดโลหะโดยเครื่องมือกล**. พิมพ์ครั้งที่2. ขอนแก่น: หน่วยงานบรรณงานบริหารธุรกิจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- อัจฉรา เนียมเกลี้ยง. (2550). “การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความเรียบผิวในการกลึงเหล็ก S50C ด้วยมีดเซรามิค.” วิทยานิพนธ์ปริญญาครุศาสตร์อดุสาหกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอดุสาหกรรม คณะครุศาสตร์อดุสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- Bosun Supplies. (2541). **STAINLESS STEEL INFO**. เข้าถึงเมื่อ 2 ธันวาคม. เข้าถึงได้จาก <http://www.bosunsupplies.com/StainlessInfo2/>.
- Carmita Camposeco-Negrete. (2015). “Optimization of cutting parameters using Response Surface Method for minimizing energy consumption and maximizing cutting quality in turning of AISI 6061 T6 aluminium.” **Journal of Cleaner Production**, Vol.91: 109-117.
- CERATIZIT. (2016). **Main catalogue**. Luxembourg: n.p.
- D.I. Lalwani, N.K. Mehta and P.K. Jain. (2008). “Experimental investigations of cutting parameters influence on cutting forces and surface roughness in finish hard turning of MDN250 steel.” **Journal of materials processing technology**, Vol.206: 167-179.
- Douglas C. Montgomery. (2009). **Introduction to Statistic Quality Control**. 6th ed. United State of America: John Wiley & Son, Incorporated.

- J.A. Ghani, I.A. Choudhury and H.H. Masjuki. (2004). "Wear mechanism of TiN coated carbide and uncoated cermets tools at high cutting speed applications." **Journal of Materials Processing Technology**, Vol.153: 1067-1073.
- Komson Jirapattarasilp and Choobunyen Kuptanawin. (2012). "Effect of Turning Parameters on Roundness and Hardness of Stainless Steel: SUS 303." **SciVerse ScienceDirect, AASRI Procedia** 3 (2012):160 – 165.
- M. Nalbant, H. Go'kkaya and G. Sur. (2006). "Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning." **Materials and Design**, Vol.28: 1379-1385.
- Raymond H. Myers and Douglas C. Montgomery. (2001). **Response Surface Methodology**, Second Edition. United State of America: John Wiley & Son, Incorporated.
- Richard Horváth and Ágota Drégelyi-Kiss. (2015). "Analysis of surface roughness of aluminum alloys fine turned: United phenomenological models and multi-performance optimization." **Measurement**, Vol.65: 181-192.





ภาคผนวก  
การพัฒนาตนเอง



เข้าร่วมประชุมวิชาการ 6th ATRANS Symposium 2013 ในวันที่ 23 สิงหาคม 2556 ณ โรงแรมอิมพีเรียล คเวินปาร์ค ถนนสุขุมวิท 22 กรุงเทพมหานคร



เข้าร่วมประชุมวิชาการ ช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2556 (IE Network Conference 2013) ในระหว่างวันที่ 16 ถึง 18 ตุลาคม 2556 ณ โรงแรม เอ-วัน เดอะรอยัลครุส พัทยา ชลบุรี





เข้าร่วมประชุมวิชาการ ด้านการวิจัยดำเนินงานแห่งชาติ ประจำปี 2558 (OR-Net 2015) ในระหว่างวันที่ 25 ถึง 27 มีนาคม 2558 ณ โรงแรมพินนาเคิลแกรนด์ จอมเทียนรีสอร์ทแอนด์สปา



เข้าร่วมประชุมวิชาการ 8th ATRANS Symposium 2015 ในระหว่างวันที่ 21 สิงหาคม 2558 ณ โรงแรมอิมพีเรียล ควีนพาร์ค ถนนสุขุมวิท 22 กรุงเทพมหานคร



เข้าร่วมประชุมวิชาการ การวิจัยเพื่อพัฒนาอย่างยั่งยืน ประจำปี 2559 (KU SRC 1st National Conference 2016) ในวันที่ 26 สิงหาคม 2559 ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต ศรีราชา ชลบุรี



นำเสนอบทความทางวิชาการใน การประชุมวิชาการด้านการพัฒนาการดำเนินงานทาง อุตสาหกรรมแห่งชาติ ครั้งที่ 8 ประจำปี 2560 (CIOD 2017) ในวันที่ 19 พฤษภาคม 2560 ณ โรงแรมนารายณ์ สีส้ม กรุงเทพมหานคร

## ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ – สกุล	พงศ์ธร จันทร์สุขจำเริญ
ที่อยู่	6/1 ม.1 ถนนพุทธมณฑลสาย 5 ต.บางกระพี้ อ.สามพราน จ.นครปฐม
ที่ทำงาน	ธนาคารแห่งประเทศไทย
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2547	จบปริญญาอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ประวัติการทำงาน	
พ.ศ. 2547 – 2548	บริษัท เจียฮง เยลโลพลาสติก จำกัด
พ.ศ. 2549 – 2550	บริษัท รอยัลคิงส์ผลิตภัณฑ์เด็ก จำกัด
พ.ศ. 2550 – 2552	บริษัท เจริญทรัพย์ไพศาลพลาสติก จำกัด
พ.ศ. 2552 – ปัจจุบัน	ธนาคารแห่งประเทศไทย

