



การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความเรียบผิวในกระบวนการกัด

อะลูมิเนียมอัลลอยด์ 7075

THE STUDY OF FACTORS THAT AFFECT THE ROUGHNESS OF  
ALUMINIUM ALLOY 7075 IN CNC MILLING PROCESS

นายฤทธิพงษ์  
นายปกรณ์

มีแสง  
ตาคำ

รหัส 51370973  
รหัส 50380225

ชื่อกลุ่มงานวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ.....24.08.2555...../.....
เลขทะเบียน.....16316529.....
เลขเรียกหนังสือ.....พ.ร.....
มหาวิทยาลัยนเรศวร ๑๗๖๑

2555

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร  
ปีการศึกษา 2555



## ใบรับรองปริญญาโท

ชื่อหัวข้อโครงการ การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความเครียดในกระบวนการคิด  
อะลูมิเนียมอัลลอยด์ 7075

ผู้ดำเนินโครงการ นายฤทธิพงษ์ มีแสง รหัส 51370973  
นายปกรณ์ ตาคำ รหัส 50380225


ที่ปรึกษาโครงการ รศ.ดร.กวิน สนธิเพิ่มพูน


สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

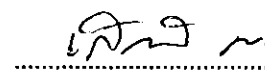
ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ปีการศึกษา 2555

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ อนุมัติให้ปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

  
.....ที่ปรึกษาโครงการ  
(รศ.ดร.กวิน สนธิเพิ่มพูน)

  
.....กรรมการ  
(ดร.พิสุทธิ อภิษยกุล)

  
.....กรรมการ  
(อาจารย์เสาวลักษณ์ ทองกลั่น)

ชื่อหัวข้อโครงการงาน	การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความเรียบผิวในกระบวนการกัด อะลูมิเนียมอัลลอยด์ 7075
ผู้ดำเนินโครงการงาน	นายฤทธิพงษ์ มีแสง รหัส 51370973 นายปกรณ์ ตาคำ รหัส50380225
ที่ปรึกษาโครงการงาน	รศ.ดร.กวิณ สนธิเพิ่มพูน
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
ปีการศึกษา	2555

#### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ทำการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองของความเรียบผิวชิ้นงานที่เกิดจากการเอียงของดอกกัด เพื่อหาองศาของมีดกัด อัตราการป้อนของโต๊ะงานและความเร็วรอบดอกกัดที่ทำให้ผิวโลหะอลูมิเนียมอัลลอยด์ 7075 มีค่าความเรียบผิวที่เหมาะสมจากการวัดความเรียบผิวด้วยเครื่อง Mitutoyo Surftest SV-400 ได้ผลการของความเรียบผิวและได้ชิ้นงานจากการทดลองยังสามารถนำผลการที่ได้จากการวิเคราะห์การทดลองไปใช้ได้ โดยนำหลักการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment, DOE) โดยใช้วิธีการทดลองแบบแฟคทอเรียลแบบสามปัจจัยสามระดับ โดยการนำโลหะอลูมิเนียมอัลลอยด์ 7075 มาทำการกัดด้วยเครื่อง CNC Machining Center VF 1 และนำผลจากการวัดความเรียบผิวไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทำให้ทราบถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อความเรียบผิวของชิ้นงาน

สรุปได้ว่าอัตราการป้อนของโต๊ะงานและองศาของดอกกัดส่งผลต่อความเรียบผิวของชิ้นงานโดยสรุปได้ว่า อัตราการป้อนของโต๊ะงานที่ 120 มิลลิเมตรต่อนาที และที่องศาของดอกกัด 10 องศา จะให้ความเรียบผิวที่ดีและได้ผลการแบบพหุคูณ คือ  $Roughness = -7.68 + (0.0824Feed) + (1.14Angle) + (0.000952Feed \times Angle) - (0.000443Feed^2) - (0.0253Angle^2)$  และจากการวิเคราะห์ ค่าความเรียบผิวจะมีค่าที่ดี เมื่อองศาของดอกกัดลดลง และผลค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างการคำนวณสมการถดถอยและค่าเฉลี่ยจากการทดลองจะมีค่าความคลาดเคลื่อนที่ร้อยละ 0.59

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทฉบับนี้ ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือหลายๆฝ่ายโดยเฉพาะอย่างยิ่ง รศ.ดร.กวิน สนธิเพิ่มพูนอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการและอาจารย์รณกฤต แสงผ่อง อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมโครงการ ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำ ข้อคิดเห็นในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ตลอดจนดูแลเอาใจใส่ ติดตามการดำเนินโครงการนี้มาโดยตลอด ขอขอบคุณคณะอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยนเรศวร ทุกคนเป็นอย่างสูง ที่ได้ให้วิชาความรู้ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการทำปริญญาโทฉบับนี้

สุดท้ายนี้ ผู้จัดทำโครงการ ไคร้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา เป็นอย่างสูงมากที่ได้ให้การดูแล อบรมสั่งสอน และให้กำลังใจด้วยดีเสมอมา ตลอดจนการดำเนินโครงการจนสำเร็จการศึกษา



ผู้ดำเนินโครงการ

นายฤทธิพงษ์ มีแสง

นายปกรณ์ ตาคำ

มกราคม 2556

## สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output) .....	1
1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome) .....	1
1.5 สถานที่ดำเนินงานวิจัยและรวบรวมข้อมูล.....	1
1.6 ระยะเวลาในการดำเนินการวิจัย.....	1
1.7 แผนการดำเนินการวิจัยและดำเนินการ.....	2
1.8 ขอบเขตในการดำเนินการศึกษาวิจัย.....	2
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีเบื้องต้น.....	3
2.1 บทนำ.....	3
2.2 เครื่องจักรกลซีเอ็นซี (CNC) .....	3
2.3 NC Program.....	12
2.4 การทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial Experiment).....	13
2.5 การคำนวณค่าต่างๆของเครื่องกัดแนวตั้ง.....	15
2.6 การวัดความเรียบของผิว.....	18
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	24
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการ.....	25
3.1 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	25
3.2 ออกแบบชิ้นงานด้วยโปรแกรมด้วยโปรแกรม CAD/CAM.....	25
3.3 เตรียมชิ้นงานเพื่อให้ได้ขนาดตามที้ออกแบบไว้.....	25
3.4 ทำการกัดชิ้นงานตามแบบที่ได้ออกแบบไว้.....	25

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 วัดค่าความเรียบผิวชิ้นงาน.....	25
3.6 วิจารณ์ผลการทดลองและสรุปผลที่ได้.....	27
3.7 จัดทำรูปเล่มโครงการปริญญานิพนธ์.....	27
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์.....</b>	<b>28</b>
4.1 การออกแบบการทดลอง.....	28
4.2 แบบชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง.....	29
4.3 ทิศทางการเดินของดอกกัด.....	31
4.4 ดอกกัดที่ใช้ในการทดลอง.....	31
4.5 การเก็บข้อมูลต่างๆ.....	32
4.6 การวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	35
<b>บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>46</b>
5.1 สรุปผล.....	46
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	46
เอกสารอ้างอิง.....	47
ภาคผนวก ก.....	48
ประวัติผู้ดำเนินโครงการ.....	56

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน.....	2
2.1 ความเร็วของการหมุนกัต.....	16
2.2 การส่งชิ้นงานที่หนึ่งคมมีด.....	17
2.3 เฉลี่ยความหยาบของผิวที่ผลิตขึ้นจากกรรมวิธีการใช้เครื่องมาตรฐาน.....	20
2.4 คุณสมบัติทางเคมีของอลูมิเนียมอัลลอยด์ 7075.....	23
2.5 คุณสมบัติทางกายภาพของอลูมิเนียมอัลลอยด์ 7075.....	23
3.1 ตารางบันทึกผลการทดลอง.....	26
4.1 ตารางบันทึกผลข้อมูลแบบแฟคทอเรียล.....	28
4.2 ตารางข้อมูลที่ได้จากการทดลอง.....	32
4.3 ตารางบันทึกผลข้อมูลแบบแฟคทอเรียลแบบ 3 <sup>3</sup> .....	35
4.4 ตาราง Analysis of Variance.....	42
4.5 ตาราง Regression Analysis Versus.....	43
4.6 ตาราง Regression Analysis.....	43
4.7 การวิเคราะห์ผลค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างการคำนวณจากสมการถดถอย และค่าเฉลี่ยจากการทดลอง.....	45

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การกำหนดแนวแกนของเครื่องกัดตั้ง.....	4
2.2 การกำหนดแนวแกนของเครื่องกัดแนวนอน.....	5
2.3 เครื่อง Machining Center 5 แกน.....	6
2.4 อุปกรณ์ประกอบการจับยึดดอกกัด.....	7
2.5 การวัดขนาดดอกกัดชนิดคมตัดข้างเดียว.....	7
2.6 การวัดขนาดดอกกัดชนิดคมตัดสองข้าง.....	8
2.7 การวัดขนาดดอกกัดปลายมน.....	8
2.8 ดอกกัด End Mill แบบก้านจับตรง.....	9
2.9 ดอกกัด End Mill แบบก้านจับเรียว.....	9
2.10 ดอกกัด Slotting End Mill.....	9
2.11 ดอกกัด Woodruff Key.....	10
2.12 ดอกกัด T-slot Cutting.....	11
2.13 ดอกกัด Dovetail Cutting.....	11
2.14 เครื่องวัดความเรียบผิว รุ่น SV-400.....	20
4.1 การออกแบบการกัดชิ้นงานที่ 0, 5 และ 10 องศา.....	29
4.2 การออกแบบการกัดชิ้นงานที่ 15 และ 20 องศา.....	30
4.3 ทิศทางการเดินของดอกกัดตามทฤษฎี.....	31
4.4 ทิศทางการเดินของดอกกัดในการกัดชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ.....	31
4.5 ดอกกัดที่ใช้ในการทดสอบ.....	31
4.6 กราฟแสดงส่วนตกค้างของข้อมูลของการวัดความเรียบผิวของชิ้นงาน.....	35
4.7 กราฟแสดงการแจกแจงเป็นแบบปกติของอัตราการป้อนของโต๊ะงาน.....	37
4.8 กราฟแสดงการแจกแจงเป็นแบบปกติขององศาดอกกัด.....	38
4.9 กราฟแสดงการแจกแจงเป็นแบบปกติของความเร็วรอบของดอกกัด.....	39
4.10 กราฟแสดงการแจกแจงเป็นแบบปกติของความเรียบผิวของชิ้นงาน.....	40
4.11 แผนภูมิแสดงผลของปัจจัยหลัก.....	40
4.12 แผนภูมิแสดงอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย.....	41



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

ในช่วงระยะเวลาหลายปีที่ผ่านมาจนถึงปัจจุบันอุตสาหกรรมต่างๆ ในประเทศไทยได้มีการพัฒนาและเติบโตอย่างรวดเร็วอันเนื่องมาจากปัจจัยหลายๆด้านทั้งเศรษฐกิจ การเงิน และเทคโนโลยี โดยเฉพาะเทคโนโลยีที่ทันสมัยขึ้นมีผลต่อการผลิตเป็นอย่างมากแต่การจะมีซึ่งเทคโนโลยีก็ต้องมีค่าใช้จ่ายในการลงทุนที่สูงตามมาด้วย แต่ก็มีอีกทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยให้การผลิตที่มีประสิทธิภาพก็คือการทราบถึงขีดความสามารถของเครื่องจักรที่มีอยู่และใช้ให้เกิดประสิทธิภาพมากที่สุด จากการศึกษาเครื่องกัดพบว่าปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องกับความเรียบผิวของชิ้นงานเช่น ความเร็วของเครื่องขณะทำการกัด เป็นต้น ด้วยเหตุนี้จึงทำการศึกษาเพื่อที่จะหาแนวทางเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องกัดและสะดวกในการทำงานให้มากขึ้นและเพื่อให้ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างองศาออกกัดกับความเรียบผิวที่ต้องการและเป็นแนวทางในการผลิตชิ้นงานในโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก ในชิ้นส่วนที่เป็นเบ้า (Cavity)

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อหาองศาของมีดกัด อัตราการป้อนของโต๊ะงานและความเร็วรอบของการกัดที่ทำให้ผิวโลหะอลูมิเนียมอัลลอยด์ 7075 มีค่าความเรียบผิวที่เหมาะสมจากการวัดความเรียบผิว ( $R_a$ ) ด้วยเครื่อง Mitutoyo Surftest SV-400

### 1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output)

- 1.3.1 ได้สมการของความเรียบผิวที่มาจากการทดลอง
- 1.3.2 ได้ชิ้นงานจากการทดลอง

### 1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome)

สามารถนำสมการที่ได้จากการวิเคราะห์การทดลองไปใช้ได้

### 1.5 สถานที่ดำเนินงานวิจัยและรวบรวมข้อมูล

อาคารปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์

### 1.6 ระยะเวลาในการดำเนินการวิจัย

กรกฎาคม พ.ศ. 2555 – มกราคม พ.ศ. 2556

## 1.7 แผนการดำเนินการวิจัยและดำเนินการ (Gantt Chart)

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน

การดำเนินงาน	ช่วงเวลา						
	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.
1.7.1 ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	←————→						
1.7.2 ออกแบบชิ้นงาน				←————→			
1.7.3 เตรียมชิ้นงานการทดลอง					←————→		
1.7.4 ดำเนินการทดลอง					←————→		
1.7.5 วัดค่าความเรียบผิวชิ้นงาน						←————→	
1.7.6 วิเคราะห์และสรุปผลผลการทดลอง						←————→	
1.7.7 จัดทำรูปเล่มโครงการปริญญาโท						←————→	

## 1.8 ขอบเขตในการดำเนินการศึกษาวิจัย

1.8.1 เครื่องกัดแนวตั้ง HAAS VF-1

1.8.2 วัสดุที่ใช้ คือ อลูมิเนียมอัลลอยด์ 7075 ขนาด กว้าง 3 เซนติเมตร x ยาว 5 เซนติเมตร x สูง 5 เซนติเมตร

1.8.3 ใช้การกัดปาดหน้าแบบ Face Milling ทิศทางการหมุนของดอกกัดแบบตามเข็มนาฬิกา

1.8.4 ใช้ดอกกัด Flat End Mill ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร

1.8.5 วิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยโปรแกรม Minitab 10, 15 และ 20 องศา

1.8.6 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา คือ อัตราการป้อนของโต๊ะงาน, ความเร็วรอบดอกกัด และ องศาของดอกกัด

## บทที่ 2

### หลักการและทฤษฎี

#### 2.1 บทนำ

เมื่อเริ่มยุคการผลิตแรกๆ ในสังคมกสิกรรมการผลิตสินค้าจะทำที่ละชิ้นเพื่อใช้ในการบริโภคส่วนตัว ซึ่งเราใช้เครื่องมือพื้นฐานทั่วไป โดยพึ่งพาด้านแรงงานและฝีมือของคนเกือบทั้งหมดต่อมาเมื่อความต้องการสินค้านี้มากขึ้นกระบวนการผลิตได้เปลี่ยนไปในรูปแบบการผลิตจำนวนมาก (Mass Production) นับเป็นการก้าวเข้าสู่ยุคอุตสาหกรรมได้มีการคิดค้นและสร้างเครื่องจักรที่ช่วยในการผลิตเฉพาะงานสามารถควบคุมได้ง่ายขึ้น (Manual Machine) อย่างไรก็ตามเครื่องจักรเหล่านี้ยังจำเป็นต้องอาศัยแรงงานคนอยู่มากจึงได้ถูกพัฒนาการมาเป็นเครื่องจักรแบบอัตโนมัติ (Automatic Machine) ในการผลิตที่มีรูปแบบการผลิตแบบเดียวกันเป็นจำนวนมาก

เมื่อมาถึงยุคที่ความต้องการสินค้าที่มีรูปแบบที่หลากหลายมากขึ้น และการผลิตในแต่ละครั้งต้องการจำนวนไม่มากนัก ระบบการผลิตแบบยืดหยุ่นและอัตโนมัติ (Flexible Automation) ที่สามารถตอบสนองความต้องการนี้ได้ดีตั้งนั้นการเลือกเครื่องจักรหรือกระบวนการผลิตให้ได้ประสิทธิภาพนั้น ขึ้นอยู่กับความต้องการสินค้าและจำนวนมากๆ การผลิตในยุคปัจจุบันมีรูปแบบการกระจายการผลิตออกไปยัง Maker เพื่อช่วยลดต้นทุน และควบคุมการผลิตโดยใช้ระบบข้อมูลข่าวสารแทนซึ่งในปัจจุบัน การผิดพลาดในการผลิตเพียงเล็กน้อย อาจจะทำให้เกิดความเสียหายต่อรายได้ของบริษัทที่ผลิตได้

ปัจจุบันบริษัทผู้ผลิตต่างๆ จึงได้นำเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์เข้ามาแก้ปัญหาเกี่ยวกับธุรกิจและอุตสาหกรรมแทบทุกประเภท ไม่ว่าจะเป็นกระทั่งในครัวเรือน คอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยงานแทนมนุษย์ในงานการที่ต้องการความถูกต้องเที่ยงตรงสูงและงานที่ทำซ้ำซาก โดยช่วยเพิ่มความเร็วลดความผิดพลาดและเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานทำให้การทำงานมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นช่วยลดต้นทุนต่างๆของบริษัท อุตสาหกรรมการผลิตก็เป็นอุตสาหกรรมที่พึ่งพาเทคโนโลยีของคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการผลิตแข่งขันค่อนข้างมาก เช่น การจัดการทำผังทางด้านควบคุมคุณภาพ, การวางแผนการผลิต เป็นต้นในส่วนของอุตสาหกรรมการผลิตแม่พิมพ์หรือชิ้นส่วนในปัจจุบัน คอมพิวเตอร์ได้เข้าไปมีบทบาทโดยตรงในกระบวนการผลิตช่วยในเรื่องของรูปแบบเทคโนโลยีเครื่องจักร CNC และซอฟต์แวร์ช่วยในการผลิต เช่น CAD/CAM หรือ CAE การใช้งานอุปกรณ์ซึ่งมีคอมพิวเตอร์เป็นส่วนประกอบ เพื่อให้การผลิตมีประสิทธิภาพ ทำให้งานการผลิตที่ต้องการความละเอียด ความแม่นยำ ความเที่ยงตรงประสบความสำเร็จ

## 2.2 เครื่องจักรกลซีเอ็นซี (CNC)

ซีเอ็นซี (CNC) ย่อมาจากคำว่า Computer Numerical Control คือการนำคอมพิวเตอร์หรือไมโครโปรเซสเซอร์สำหรับใช้ควบคุมการทำงาน

อักษร C ย่อมาจาก Computer หมายถึง คอมพิวเตอร์ที่ติดตั้งบนเครื่องจักร

อักษร N ย่อมาจาก Numerical หมายถึง ตัวเลข 0 ถึง 9 หรือตัวอักษร หรือ โค้ด เช่น A – Z และสัญลักษณ์ เช่น เครื่องหมาย +, - และ %

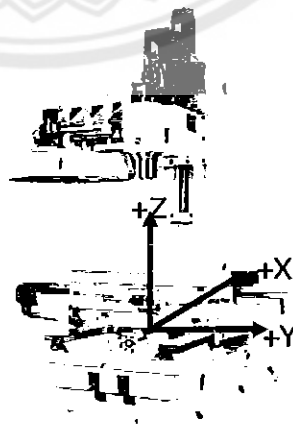
อักษร C ย่อมาจาก Control หมายถึง การควบคุมโดยการกำหนดค่าหรือตำแหน่งจริงที่ต้องการเพื่อให้เครื่องจักรทำงานให้ได้ค่าตามที่กำหนด

โปรแกรมดังกล่าวสามารถป้อนเข้าคอมพิวเตอร์โดยใช้คีย์บอร์ดหรือแป้นพิมพ์ , สื่อบันทึกความจำ เช่น แผ่นดิสก์, แถบแม่เหล็ก, แถบเทปกระดาษ, ระบบสื่อสารเชื่อมโยงข้อมูล เช่น RS 232 เครื่องจักรกลซีเอ็นซีเครื่องแรก ได้มีการแนะนำตัวในปี พ.ศ.2519 (ค.ศ.1976) โดยมีไมโครโปรเซสเซอร์ (Microprocessor) หรือคอมพิวเตอร์เป็นอุปกรณ์หลักในชุดควบคุม หรือ คอนโทรลเลอร์ (Controller) ติดตั้งที่เครื่องจักร ทำให้สามารถจัดเก็บโปรแกรมได้เป็นจำนวนมาก ทำการแก้ไข ดัดแปลง โปรแกรมเดิมได้ ทำให้เรียกโปรแกรมได้ทันที โดยไม่ต้องป้อนซ้ำ (Record) เมื่อต้องการผลิตงานซ้ำขึ้นมาใหม่ เพราะมีหน่วยความจำประกอบอยู่ในชุดข้อมูล

เครื่องจักรกลซีเอ็นซี เป็นเครื่องจักรกลการผลิตที่เข้ามาแทนเครื่องจักรธรรมดาที่ใช้มนุษย์ควบคุม โดยเฉพาะงานที่ซับซ้อน มีความเที่ยงตรงสูง และมีความต้องการอย่างเร่งด่วน องค์ประกอบของเครื่องจักรกลซีเอ็นซีมีองค์ประกอบ 3 ส่วนหลัก ได้แก่ ชุดควบคุม (Controller), ชุดกลไกการเคลื่อนที่ (Drive Mechanisms), ตัวเครื่องจักร (Machine Body)

2.2.1 การจำแนกประเภทของ CNC Machining Center สามารถแบ่งได้ตามแบบทิศทาง การติดตั้งสปินเดิล ดังนี้

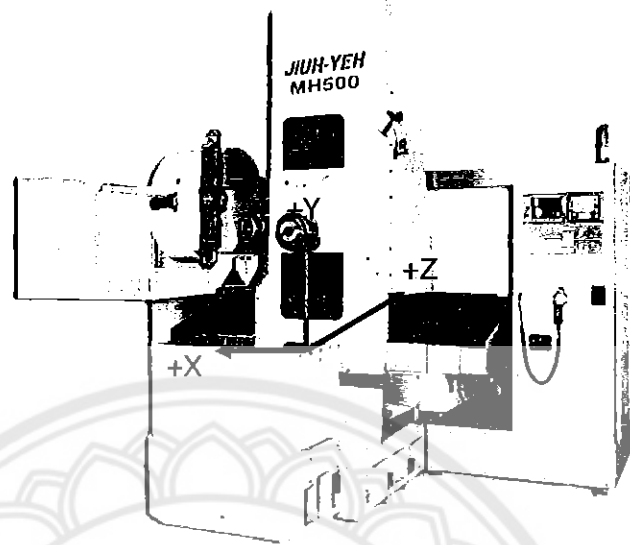
### 2.2.1.1 แนวตั้ง (Vertical Machining Center, VMC)



รูปที่ 2.1 การกำหนดแนวแกนของเครื่องกัดตั้ง

ที่มา: [http://www.global-trade.com.tw/images/Product/horizontal\\_mac\\_8182S.jpg](http://www.global-trade.com.tw/images/Product/horizontal_mac_8182S.jpg)

### 2.2.1.2 แนวนอน (Horizontal Machining Center, HMC)



รูปที่ 2.2 การกำหนดแนวแกนของเครื่องกัดนอน

ที่มา : <http://chinamachine.en.made-in-china.com>

เครื่องกัดแบบแนวตั้งนั้นมีจำนวนการใช้งานมากกว่าเครื่องแบบแนวนอนมากกว่าโดยเฉพาะในการนำมาใช้ผลิตชิ้นส่วนขนาดเล็กและกลาง รวมถึงขนาดใหญ่ด้วยเช่นกัน โดยที่ข้อดีของแบบแนวนอน คือ ไม่สะสมความร้อนที่ชิ้นงาน เศษโลหะจะตกลงพื้นไม่สะสมบนผิวของชิ้นงาน ที่อาจทำให้เกิดรอยขีดข่วนบนชิ้นงานได้

CNC Machining Center ที่สามารถเปลี่ยนตำแหน่งการติดตั้งหัวสปินเดิลให้อยู่ได้ทั้งในแนวนอนหรือแนวตั้ง โดยการใช้คำสั่ง CNC ในการเปลี่ยนตำแหน่งนั้น มีชื่อเรียกเครื่องประเภทนี้ว่า “Universal Machining Center” ฉะนั้นเครื่องจักรประเภทนี้จึงสามารถทำงานหลายขั้นตอนให้เสร็จได้ภายในเครื่องเดียวโดยไม่ต้องติดตั้งชิ้นงานใหม่ ซึ่งกัดได้ถึง 5-6 ด้านในครั้งเดียว

### 2.2.2 การแบ่งตามจำนวนของแกนการเคลื่อนที่ของทูล เมื่อเทียบกับชิ้นงาน ได้ดังนี้

#### 2.2.2.1 แบบ 2 แกนครึ่ง (2½ Axes)

เป็นเครื่องที่สามารถเคลื่อนที่ได้ 3 แกน แต่เคลื่อนที่ได้พร้อม ๆ กันคราวละ 2 แกน เช่น X-Y, X-Z, Y-Z เป็นต้นเครื่องประเภทนี้เหมาะสำหรับการเจาะ (Drilling)

#### 2.2.2.2 แบบ 3 แกน (3½ axes)

เป็นเครื่องที่สามารถเคลื่อนที่ได้พร้อมๆ กันได้ทั้ง 3 แกน

### 2.2.2.3 แบบ 3 แกนครึ่ง (3 axes)

พบมากในเครื่อง HMC โดยเป็นการหมุนของ Indexing table ในแกน B แล้วจึงเคลื่อนที่ไปแกน X ,Y และ Z ถ้าเป็นเครื่อง VMC จะติดตั้งให้หมุนในแกน A เป็นส่วนมาก

### 2.2.2.4 แบบ 4 แกน (4 axes)

พบมากในเครื่อง HMC โดยแกนที่ 4 เป็นแกนหมุนของโต๊ะหมุน(Rotary Table) ในแกน B ไปพร้อมๆกับการเคลื่อนที่ที่เชิงเส้น (แกน X ,Y และ Z) จึงเป็นการเคลื่อนที่ 4 แกนพร้อมๆกันถ้าเป็นแกนเครื่อง VMC จะติดตั้งให้หมุนในแกน A เป็นส่วนมาก (พลากร สุภาพ)

### 2.2.2.5 แบบ 5 แกน (5 axes)

มีการเคลื่อนที่เชิงเส้น (Linear Motion) 3 แกน (X Y Z) และการเคลื่อนที่เชิงมุม (Angular Motion) หรือการหมุน 2 แกน เครื่อง 5 แกนสามารถเคลื่อนที่ใดพร้อมๆ กันทั้ง 5 แกน



รูปที่ 2.3 เครื่อง Machining Center 5 แกน

ที่มา : ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

เครื่อง Machining Center 5 แกน ที่มีการเคลื่อนที่ในแกน X, Y, Z และการหมุนในแกน A และ นอกจากนี้แล้วเครื่องจักรในระบบซีเอ็นซีบางชนิดก็จะมีแนวแกนป้อนและแนวแกนหมุนรวมกันอยู่หลายแนวแกนซึ่งในการกำหนดแนวแกนของเครื่องจักรกลซีเอ็นซีตาม

มาตรฐาน EIA-267-B (Electronic Industries Association) ได้กำหนดแนวแกนมาตรฐานไว้ทั้งหมด 14 แนวแกนประกอบไปด้วยแนวแกนที่เคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง 9 แนวแกนแนวทวนอีก 5 แนวแกน

### 2.2.3 การวัดขนาดของดอกกัด

การวัดขนาดของดอกกัดชนิดคมตัดข้างเดียว (SINGLE END-END MILLS) โดยทั่วไปการแบ่งขนาดของการวัดได้ ดังนี้

2.2.3.1 ความยาวทั้งหมดของดอกกัด (LENGTH OVERALL)

2.2.3.2 ความยาวเฉพาะคมตัด (LENGTH OF CUT)

2.2.3.3 ความโตของเส้นผ่านศูนย์กลางของก้านจับ (DIA OF SHANK)

ของดอกกัด จะโตเท่าความโตของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคมตัด

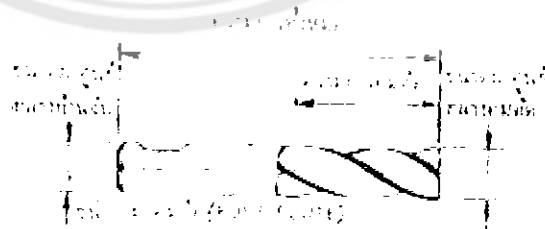
2.2.3.4 ความโตของเส้นผ่านศูนย์กลางของคมตัด (DIA OF CUT)

จะมีความยาวเท่าความโตของก้านจับ



รูปที่ 2.4 อุปกรณ์ประกอบการจับมีดดอกกัด

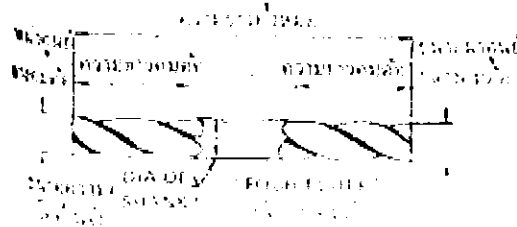
ที่มา : [krudaeng.wikispaces.com/file/view/รายงานเครื่องกัด](http://krudaeng.wikispaces.com/file/view/รายงานเครื่องกัด)



รูปที่ 2.5 การวัดขนาดดอกกัดชนิดคมตัดข้างเดียว (SINGLE-END END MILLS)

ที่มา : [krudaeng.wikispaces.com/file/view/รายงานเครื่องกัด](http://krudaeng.wikispaces.com/file/view/รายงานเครื่องกัด)

การวัดขนาดของดอกกัดชนิดคมตัดสองข้าง (DOUBLE END-END MILL) การวัดขนาด  
ไม่แตกต่างกัน เพียงแต่มีคมสองด้านเท่านั้น



### รูปที่ 2.6 การวัดขนาดดอกกัดชนิดคมตัดสองข้าง (DOUBLE-END END MILLS)

ที่มา : [krudaeng.wikispaces.com/file/view/รายงานเครื่องกัด](http://krudaeng.wikispaces.com/file/view/รายงานเครื่องกัด)

การวัดขนาดของดอกกัดปลายมน จะเพิ่มการวัดที่แตกต่างกันออกไป คือ รัศมีโค้งของดอก  
กัดนี้ ซึ่งช่วงรัศมีโค้งของดอกกัดบางชนิดผู้ผลิตจะฝังคมตัดชนิด CARBIDE เข้าไป ช่วยในการกัดนำ  
สำหรับงานที่มีความแข็ง



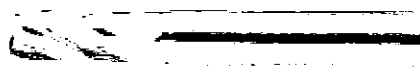
### รูปที่ 2.7 การวัดขนาดดอกกัดปลายมน

ที่มา : [krudaeng.wikispaces.com/file/view/รายงานเครื่องกัด](http://krudaeng.wikispaces.com/file/view/รายงานเครื่องกัด)

## 2.2.4 ชนิดและการทำงานของดอกกัดตั้ง

### 2.2.4.1 ดอกกัด END MILLแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ

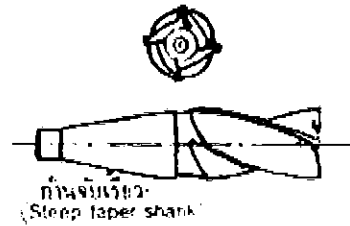
- ก. การแบ่งตามแบบของก้านจับ คือ แบบก้านจับตรง และก้านจับเรียว
- ข. การแบ่งตามลักษณะของคมกัด แบ่งได้เป็นแบบสองคมตัดสองคม ใช้กับงาน  
กัดหนัก และแบบคมตัดมากกว่าสองคม



### รูปที่ 2.8 ดอกกัด END MILL แบบก้านจับตรง

ที่มา : [http://www.jindasup.com/wizContent.asp?wizConID=371&txtmMenu\\_ID=7](http://www.jindasup.com/wizContent.asp?wizConID=371&txtmMenu_ID=7)





รูปที่ 2.9 ดอกกัด END MILL แบบก้านจับเรียว

ที่มา : [krudaeng.wikispaces.com/file/view/รายงานเครื่องกัด](http://krudaeng.wikispaces.com/file/view/รายงานเครื่องกัด)

การทำงานของดอกกัดตั้ง สามารถทำงานการกัดได้ทั้งในแนวตั้งการกัดในแนวเอียงมุม ซึ่งการเอียงมุมจะขึ้นอยู่กับ การปรับเอียงหัวจับของหัวกัดตั้งว่าจะเอียงเท่าใด และการกัดในแนวนอน ซึ่งแสดงถึงทิศทางการทำงานไว้ด้วย ซึ่งสามารถดูได้จากหัวลูกศรที่บอกไว้ ทิศทางการทำงานของดอกกัด ซึ่งแบ่งการเคลื่อนที่ได้เป็นสองแบบ คือ ทิศทางการเคลื่อนที่ของดอกกัด และทิศทางการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน ซึ่งขึ้นอยู่กับ การจับยึดดอกกัด และการจับยึดชิ้นงาน ตลอดจนรูปทรงของงานที่ต้องการการกัด

#### 2.2.4.2 ดอกกัด SLOTTING END MILL

ดอกกัด SLOTTING END MILL ลักษณะของคมกัดจะมีความแตกต่างกับดอกกัดอื่น ๆ คือ ที่ส่วนปลายด้านหน้าคมตัดจะเว้า และจะไม่เกิดการตัดเฉือนงานช่วงเว้านี้ ส่วนใหญ่จะเป็นการกัดทะลุหรือการกัดร่องน้ำมันบนเพลางาน

รูปที่ 2.10 ดอกกัด SLOTTING END MILL

ที่มา : <http://www.sourcingmap.com/5mm-diameter-6mm-straight-shank-flute-slottting-end-mill-p-140486.html>

การกัดงานจะกัดทั้งในแนวตั้ง และแนวนอน และการกัดมุมเอียง ซึ่งจะขึ้นอยู่กับ การจับที่ใช้จับยึดดอกกัดให้อยู่ในตำแหน่งใดของเครื่องกัด ทิศทางการทำงานกัด จะเหมือนกับทิศทางการทำงานของเครื่องกัด END MILL ในการกัดงานแต่ละครั้งจะต้องคำนึงถึงระยะของการกัดงาน เพื่อจะตั้งการกัดให้พอเหมาะและใช้เวลาในการทำงานน้อยพร้อมกับผลงานที่มีประสิทธิภาพสูง

### 2.2.4.3 ดอกกัด WOODRUFF KEY

ดอกกัด WOODRUFF KEY เป็นดอกกัดที่มีคมอยู่รอบ ๆ ตัว และด้านหน้าจะเว้า ลึกลงไปการทำงานของดอกกัดนี้สามารถทำงานได้ทั้งการกัดในแนวตั้งและแนวนอน ส่วนใหญ่แล้ว ดอกกัดชนิดนี้จะถูกใช้งานกัดร่องลิ้นตามขนาดของดอกกัดเอง ซึ่งมีความโตของเส้นผ่านศูนย์กลาง ดอกกัดหลายขนาด ร่องลิ้นที่กัดนี้เรียกว่า ร่องลิ้นพระจันทร์ เพราะมีลักษณะเป็นโค้งของวงกลมตาม โค้งของขนาดของดอกกัดนอกจากนี้การกัดร่องลิ้นแล้ว ยังสามารถกัดงานที่มีรูปร่างต่าง ๆ ได้ ตาม ความต้องการได้อีกด้วย



รูปที่ 2.11 ดอกกัด WOODRUFF KEY

ที่มา : <http://www.garvintools.com/index.cfm?md=Products&sd=ProductDetails&CategoryID=5&SubCategoryID=56&ProductID=358>

### 2.2.4.4 ดอกกัด TEE SLOT CUTTER

ดอกกัด TEE SLOT CUTTER เป็นดอกกัดที่ใช้กัดร่อง TEE SLOT ต่อจากการกัด จากดอกกัด END MILL ดอกกัดนี้จะมีคมกักรอบตัวของดอกกัด คมกััดจะแบ่งเป็นทั้งคมตัดตรง และ คมกััดเอียง



รูปที่ 2.12 ดอกกัด T-SLOT CUTTER

ที่มา : <http://www.ostartools.com/products/formetal/cutters/cutters.htm>

การกัดงานของดอกกัดสามารถกัดได้ทั้งในแนวตั้ง และแนวนอน และแนวมุมเอียง ตามแต่อุปกรณ์ของหัวกัดที่ใช้จับดอกกัดไว้ดอกกัดประเภทนี้ จะมีทั้งชนิดก้านตรงและชนิดก้านเรียว ซึ่งอยู่กับขนาดของดอกกัด และบริษัทผู้ผลิตที่ผลิตออกมาจำหน่ายส่วนใหญ่ชนิดก้านจับเรียวจะเป็น ขนาดโตมากกว่าชนิดก้านจับตรง

#### 2.2.4.5 ดอกกัด DOVERALL CUTTER

ดอกกัดร่องทางเหลี่ยม DOVERALL CUTTER ลักษณะของคมตัดจะเอียงมุมอยู่รอบ ๆ ตัวของดอกกัด และมีคมตัด อยู่บริเวณผิวด้านหน้า ของดอกกัดอีกด้วยการทำงาน จะใช้กับงานขึ้นรูป ที่ต้องการตามขนาดความเอียงของคมดอกกัด ซึ่งจะใช้กัดทั้งการกัดภายในร่องที่ผ่านการกัดมาก่อนและอยู่ในลักษณะของร่องฉาก แล้วจึงใช้ดอกกัดนี้กัดตามเพื่อให้ได้ร่องเอียงภายในในขณะเดียวกันของการทำงานที่ต้องการให้งาน 2 ชั้นประกบกันและเคลื่อนที่ไปตามช่องเอียง เมื่อกัดได้ร่องเอียงภายในแล้วชิ้นงานอีกชิ้นจะต้องกัดให้เป็นร่องเอียงภายนอก ด้วยดอกกัดที่มีขนาดเท่ากันเพื่อจะให้ทำงานร่วมกันได้



รูปที่ 2.13 ดอกกัด DOVERALL CUTTER

ที่มา:<http://www.ostartools.com/products/formetal/cutters/cutters.htm>

#### 2.2.5 การกัด Milling

Milling คือ การกัดที่มีดหมุน ตัดชิ้นงานโดยชิ้นงานจะเคลื่อนที่เข้าหาเม็ด (Milling Cutter – ดอกกัด) มี 2 ชนิด

2.2.5.1 Plain Milling / Peripheral Mill / Horizontal => ตัดราบแกนหมุนขนานกับงาน

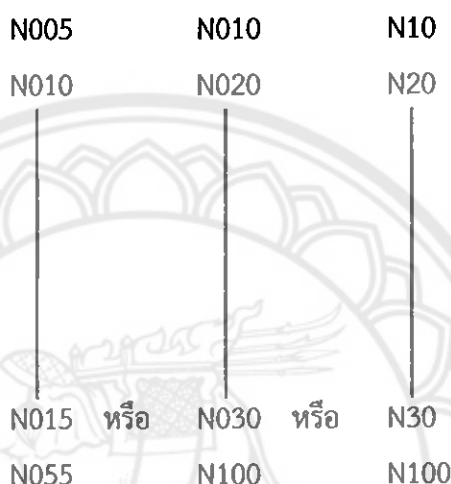
2.2.5.2 Face Mill / End Milling / Vertical => ตัดกัดแนวตั้ง แกนหมุนตั้งฉากกับงาน ลักษณะกัด ยังแบ่งลักษณะการตัด 2 ชนิดคือ Up Cut และ Down Cut (วีรวัดณ์ มะณี)

## 2.3 NC Program

### 2.3.1 คำในโปรแกรมเอ็นซี

คำที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมเอ็นซี (NC Words) เพื่อให้กำหนดหน้าที่และควบคุมการทำงานของเครื่องซีเอ็นซี สามารถแบ่งออกได้เป็น 8 ชนิด คือ

2.3.1.1 หมายเลขลำดับของบล็อก (Nxxx) โปรแกรมเอ็นซีนั้นจะมีหมายเลขของบล็อกกำกับไว้ตามขั้นตอนในการทำงานหรือขั้นตอนในการขึ้นรูปชิ้นงาน ตัวอย่างการเขียนหมายเลขของบล็อกในโปรแกรมที่มีลำดับขั้นตอนในการทำงาน 10 ขั้นตอนอาจจะเขียนได้ดังต่อไปนี้ คือ



### 2.3.1.2 การทำงานเตรียมการทำงาน ( G )

การจัดเตรียมในการทำงานในระบบเอ็นซีจะกำหนดด้วยอักษร G และตามด้วยตัวเลข 2 หลักเพื่อกำหนดและควบคุมการทำงาน

### 2.3.1.3 การให้ขนาดตามแนวแกน ( X, Y, Z )

การให้ขนาดตามแนวแกนเป็นการระบุตำแหน่งปลายทางในการเคลื่อนที่ของเครื่องมือตัดไปตามแนวแกนของเครื่องจักรซีเอ็นซีเช่น เคลื่อนที่ไปตามแนวแกน (X, Y, Z) โดยที่การให้ขนาดนี้จะใช้รหัสอักษรของแนวแกน และตามด้วยระยะทางในการเคลื่อนที่ ซึ่งตัวเลขระบุระยะทางในการเคลื่อนที่อาจจะมีทั้ง ค่าบวก (+) และค่าลบ (-) เลขจำนวนเต็ม หรือจุดทศนิยมก็ได้ ตัวอย่างการให้ขนาดตามแนวแกน เช่น N050 G90 X-2.0 Y-1.0 , N055 G01 X0 Y0 , N060 G01 Z-0.5 เป็นต้น

ส่วนตำแหน่งจุดศูนย์กลางของส่วนโค้ง (I, J, K) การให้ขนาดตำแหน่งจุดศูนย์กลางของวงกลม (I, J, K) จะใช้ในกรณีที่เครื่องมือตัดเคลื่อนที่ในแนวเส้นโค้ง เช่น G02 หรือ G03 โดยที่

I คือขนาดที่วัดจากจุดเริ่มต้นของส่วนโค้งถึงจุดศูนย์กลางของส่วนโค้งในแนวแกน X

J คือขนาดที่วัดจากจุดเริ่มต้นของส่วนโค้งถึงจุดศูนย์กลางของส่วนโค้งในแนวแกน Y

K คือขนาดที่วัดจากจุดเริ่มต้นของส่วนโค้งถึงจุดศูนย์กลางของส่วนโค้งในแนวแกน Z

ยกตัวอย่าง การให้ขนาดของตำแหน่งจุดศูนย์กลางของส่วนโค้ง เช่น

N015 G03 X0.5 Y3.0 I-0.5 J0.866 เป็นต้น

#### 2.3.1.4 การหมุนของเพลาจับยึดเครื่องมือตัด (S)

ความเร็วรอบของเพลาจับยึดเครื่องตัด (Spindle Speed) ในโปรแกรมซีเอ็นซีจะใช้รหัสตัวอักษรคือ S และตามด้วยตัวเลขของความเร็วรอบ 2 ถึง 5 หลัก โดยที่ความเร็วรอบนี้จะมีหน่วยวัดเป็นรอบ/นาที (Revolutions per Minute ; RPM) ยกตัวอย่างเช่น S90, S500, S2000, S1500 เป็นต้น

#### 2.3.1.5 เครื่องมือตัด (T)

การเรียกเครื่องมือตัดหรือการเปลี่ยนเครื่องมือตัด (M06) จะกำหนดโดยใช้รหัสตัวอักษร T และตามด้วยหมายเลขลำดับของเครื่องมือที่เราติดตั้งไว้ในชุดเปลี่ยนเครื่องมือโดยอัตโนมัติ (Automatic Tool Magazine) เช่น

T1 = มีดกัด เครื่องตัดเบอร์ 1 (ขนาด  $\varnothing$  12 มิลลิเมตร ความยาว 48 มิลลิเมตร)

T2 = ดอกสว่าน เครื่องตัดเบอร์ 2 (ขนาด  $\varnothing$  8 มิลลิเมตร ความยาว 48 มิลลิเมตร)

#### 2.3.1.6 อัตราป้อน (F)

การกำหนดอัตราป้อนในโปรแกรมเอ็นซีจะกำหนดโดยใช้รหัสอักษร F (Feed) และตามด้วยค่าตัวเลขของอัตราป้อนโดยปกติแล้วการกำหนดอัตราป้อนสำหรับงานกัดและงานเจาะนั้นมีหน่วยวัดเป็นนิ้ว/นาที หรือมิลลิเมตร/นาที และการกำหนดอัตราป้อนในงานกลึงจะมีหน่วยวัดเป็นนิ้ว/รอบ หรือมิลลิเมตร/รอบ ในการกำหนดด้วยการวัดอัตราป้อนนั้นจะใช้รหัส G94 และ G95 โดยที่ G94 นั้นจะกำหนดหน่วยการวัดเป็นนิ้ว/นาที หรือมิลลิเมตร/นาที ส่วนรหัส G95 จะกำหนดหน่วยวัดเป็นนิ้ว/รอบ หรือมิลลิเมตร/รอบ ดังที่ได้แสดงในตัวอย่างต่อไปนี้

G95G70 F0.02 อัตราป้อนเท่ากับ 0.02 นิ้ว/รอบ

G94G71 F200 อัตราป้อนเท่ากับ 200 มิลลิเมตร/นาที

G95G71 F2.5 อัตราป้อนเท่ากับ 0.02 มิลลิเมตร /รอบ

#### 2.3.1.7 การทำงานเสริม (M)

การทำงานเสริมหรือคำสั่งช่วยงาน (Miscellaneous Function) ในโปรแกรมเอ็นซีจะกำหนดด้วยรหัสอักษร M ซึ่งเป็นรหัสคำสั่งที่ช่วยควบคุมระบบการทำงานของเครื่องจักรซีเอ็นซี ร่วมกับคำสั่งการจัดเตรียมการทำงาน (G) การกำหนดรหัสคำสั่งชนิดนี้จะใช้ตัวเลข 2 หลัก ต่อท้ายตัวอักษร M (พลากร สุภาพ)

## 2.4 การออกแบบการทดลองทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial Experiment)

การทดลองแบบแฟคทอเรียลเป็นการทดลองที่ทรีทเมนต์ประกอบด้วยแฟคเตอร์ ตั้งแต่ 2 แฟคเตอร์ ขึ้นไปมารวมกันในรูปของทรีทเมนต์คอมบินชัน (Treatment Combination) ส่วนการจัด การสุ่มทรีทเมนต์ เข้าในสิ่งทดลองจะใช้แบบเดียวกับการสุ่มของการทดลองพื้นฐาน (Basic Design) ทุกประการ การทดลองแบบแฟคทอเรียลมีข้อดีในการขยายขอบเขตการสรุปผล ของผลร่วม (Interaction) ระหว่างแฟคเตอร์ ได้ ในการวิเคราะห์หาเงื่อนไขของการทดลองจะมี การแยกผล จากแต่ละแฟคเตอร์ ผลร่วม และ สามารถนำ การเปรียบเทียบแบบอโทโกนอล (Orthogonal Comparison) มาใช้ ประโยชน์ได้

การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลจะสามารถทำการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีต่อกระบวนการและเกิดขึ้นพร้อมๆกันได้เมื่อมีการทำการทดลองควรทำการเปลี่ยนค่าระดับปัจจัยไปพร้อมๆ กันมากกว่าทำการเปลี่ยนค่าระดับปัจจัยตัวใดตัวหนึ่งเพราะจะทำให้ได้งานที่มีประสิทธิภาพมากกว่าทั้งในเรื่องการประหยัดเวลาและต้นทุนและยังสามารถวิเคราะห์เรื่องอิทธิพลร่วม (Interaction) ระหว่างปัจจัยได้ด้วยโดยอิทธิพลร่วม (Interaction) คือผลของการที่ปัจจัยร่วมกันที่มีอยู่ในหลายๆกระบวนการถ้าไม่ได้ทำการทดลองแบบแฟคทอเรียลอาจจะไม่เห็นผลของอิทธิพลร่วม (Interaction) ได้ชัดเจนนัก

ในงานพัฒนากระบวนการและงานการผลิตส่วนมากมีตัวแปรจำนวนมากที่มีแนวโน้มว่าจะมีส่วนในการปรับปรุงการคัดเลือกเป็นการลดจำนวนตัวแปรเหล่านี้ให้มีจำนวนน้อยลงโดยคัดเลือกตัวแปรที่มีความสำคัญอย่างมากต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์การลดจำนวนตัวแปรนี้ทำให้คุณสามารถจะพิจารณาเฉพาะที่ตัวแปรที่มีความสำคัญต่อกระบวนการเท่านั้นได้หรือพิจารณาตามหลักการความสำคัญจำนวนน้อย "Vital Few" การคัดเลือกอาจจะสามารถทำได้ถึงการหาค่าที่เหมาะสม (Optimal) ของตัวแปรนั้นๆรวมทั้งทำการทดลองเพื่อหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization) เพื่อบอกว่าค่าตอบสนอง (Response) มีสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์เป็นเส้นตรงหรือเส้นโค้งซึ่งการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล จะมีวิธีการออกแบบการทดลองแบบหลักๆ อยู่ 2 แบบ คือ

### 2.4.1 Two-Level Full Factorial ( $2^2$ )

ในตัวแบบของ Two-Level Full Factorial ในทุกๆการทดลองทุกๆปัจจัยจะมีค่าระดับเพียงแค่ 2 ระดับเท่านั้นการทดลองแต่ละรันจะมีทุกๆค่าระดับของทุกๆปัจจัยถึงแม้ว่าตัวแบบ Two -Level Full Factorial จะไม่สามารถทำการทดลองที่ค่าปัจจัยย่าน (Range) กว้างๆ มากได้แต่ก็สามารถให้สาระข้อมูลที่มีประโยชน์ได้โดยที่จำนวนรันไม่มากนักต่อหนึ่งปัจจัยและเพราะว่า Two -Level Full Factorial สามารถที่จะแสดงค่าแนวโน้มได้จึงสามารถนำมาใช้เพื่อนำไปเป็นแนวทางในการสร้างการทดลองต่อไปตัวอย่างเช่นเมื่อคุณต้องการที่จะทำการทดลองในย่านที่กว้างขึ้นซึ่งคุณมีสมมติฐานเบื้องต้นว่าจะมีค่าที่ดีที่สุดอยู่คุณอาจใช้ตัวแบบแฟคทอเรียล (Factorial) เพิ่มเติมจากจุดนี้โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบ Central Composite

### 2.4.2 Tree-Level Full Factorial ( $3^3$ )

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล  $3^3$  หมายถึง การออกแบบการทดลองที่ปัจจัยที่เราสนใจมีอยู่ 3 ปัจจัย และแต่ละปัจจัย มี 3 ระดับ และระดับของปัจจัยทั้งสาม มีค่าเป็น สูง กลาง ต่ำ ซึ่งแนวคิดการออกแบบ  $3^3$  เหมาะสำหรับการทดลองที่ต้องการค่าผลกระทบรวม และยังสามารถขยายไปสู่กรณีของปัจจัย  $k$  ตัว (ปารเมศ ชุตินา)

## 2.5 การคำนวณค่าต่างๆ ของเครื่องกัดแนวตั้ง

มีดกัดมีคมหลายๆคมจะเรียงกันอยู่บนทรงกระบอกโดยการหมุนของมีดกัด ปลายคมมีดแต่ละคมจะกัดผิวชิ้นงานต่อเนื่องกันไป ในขณะที่คมมีดคมหนึ่งกำลังกัดผิวชิ้นงานอยู่และยังไม่เสร็จสิ้นการกัดนั้น คมมีดคมต่อคม จะเริ่มกัดและจะหมุนเวียนดังนี้ต่อไปเรื่อยๆ สำหรับคมมีดแต่ละคมของมีดกัดรูปทรงกระบอกนั้น เมื่อกัดแต่ละครั้งเสร็จสิ้นแล้ว จะหมุนเวียนไปรอบหนึ่งก่อนแล้วจึงเริ่มกัดครั้งต่อไป กล่าวคือ คมมีดกัดจะกัดเป็นจังหวะในขณะที่ทำการผลิตชิ้นงาน นอกจากเครื่องมือตัดและวิธีการกัดที่เหมาะสมแล้ว จะต้องกำหนดเงื่อนไขในการกัดที่เหมาะสมด้วย จะต้องมีการกำหนดความเร็วรอบ อัตราป้อน ระยะความลึกที่เหมาะสม และอาจจะต้องมีการใช้น้ำมันหล่อเย็นเพื่อระบายความร้อน และกำจัดเศษตัดออกไป ซึ่งเงื่อนไขการตัดจะขึ้นอยู่กับวัสดุชิ้นงานและวัสดุมีดตัดเป็นหลัก มีสมการในการคำนวณเงื่อนไขการตัดเดือน ดังนี้

### 2.5.1 ความเร็วรอบของการกัด

ความเร็วรอบของการกัด คือ ความเร็วที่ปลายมีดกัดชิ้นงานมีค่าเท่ากับความเร็วเส้นรอบวงของมีดกัด ดังนั้น จึงหาได้จากเส้นผ่าศูนย์กลางของมีดกัดและความเร็วรอบต่อนาที ดังสมการต่อไปนี้

สมการ หาความเร็วหาความเร็วของการกัด

$$n = \frac{V_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $n$  คือ ความเร็วของการตัด มีหน่วยเป็น รอบต่อนาทีได้จากการคำนวณ

$V_c$  คือ ความเร็วตัด มีหน่วยเป็น เมตรต่อนาที ได้จากตารางของเครื่องมือตัด

$\pi$  คือ ค่าคงที่ มีค่าเท่ากับ 3.14

$D$  คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเครื่องมือตัด มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร

ตารางที่ 2.1 ความเร็วของการหมุนกัด (เมตร/วินาที)

วัสดุชิ้นงาน	คุณสมบัติเชิงกล	มีดเหล็กเหนียว ความเร็วสูง		มีดโลหะผสมชนิด แข็งพิเศษ	
		หมุนกัด หยาบ	หมุนกัดแต่ง สำเร็จรูป	หมุนกัด หยาบ	หมุนกัดแต่ง สำเร็จรูป
โลหะ-ผสมเบา	แข็ง	150-300	200-500	400-1000	800-2000
	อ่อน	150-300	200-500	200-500	300-600
บรอนซ์	แข็งปานกลาง	50-60	70-90	200-500	200-350
	แข็ง	25-40	40-60	150-200	150-300
ทองเหลือง	อ่อน	25-40	40-60	100-150	150-300
	แข็ง	13-25	30-40	50-100	100-150
เหล็กหล่อ	Hb ต่ำกว่า 200	15-25	25-40	60-100	80-120
	Hb ต่ำกว่า 250	12-18	22-30	50-70	70-100
	Hb สูงกว่า 250	10-13	15-20	30-50	50-80
เหล็กหล่อตีแผ่นได้	—	15-20	22-28	50-80	80-120
เหล็กหล่อแบบซิล	ความทนแรงดึงต่ำ 85กก./ $(\text{มม})^2$	10-13	12-15	30-50	50-70
เหล็กหล่อเหนียว	—	15-20	25-30	25-70	50-120
เหล็กเหนียวผสม	ต่ำกว่า 80 กก./ $(\text{มม})^2$	10-15	15-20	40-80	50-100
	สูงกว่า 80 กก./ $(\text{มม})^2$	8-12	12-18	20-50	40-80
เหล็กเหนียว	ต่ำกว่า 50 กก./ $(\text{มม})^2$	16-25	25-40	80-150	120-200
คาร์บอน	50 – 70 กก./ $(\text{มม})^2$	15-20	20-30	50-120	80-180
	70 – 100 กก./ $(\text{มม})^2$	10-18	15-20	30-80	50-140

ที่มา: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย - ญี่ปุ่น), เทคนิคช่างกล (เล่ม 1). พ.ศ. 2528. หน้า 139



## 2.5.2 การหาอัตราป้อนของเครื่องกัดแนวตั้ง

อัตราป้อนเป็นตัวแปรที่สำคัญในการกำหนดคุณภาพของผิวชิ้นงาน และยังรวมไปถึงระยะเวลาในการตัดเดือนชิ้นงานอีกด้วย

สมการ หาอัตราป้อน

$$f_t = n \cdot f_z \cdot z \quad (2.2)$$

เมื่อ  $f_t$  คือ อัตราป้อนของโต๊ะงาน มีหน่วยเป็น มิลลิเมตรต่อนาที ได้จากการคำนวณ

$N$  คือ ความเร็วรอบของดอกกัด มีหน่วยเป็น รอบต่อนาที ได้จากการคำนวณ

$f_z$  คือ อัตราป้อนต่อคมตัด มีหน่วยเป็น มิลลิเมตรต่อคมตัด

$z$  คือ จำนวนคมตัดของเครื่องมือตัดหรือดอกกัด

ตารางที่ 2.2 การส่งชิ้นงานต่อหนึ่งคมมีด (มิลลิเมตร/คมตัด)

วัสดุของชิ้นงาน	มีดหมุนกัด ปาดหน้า		มีดหมุนกัด เรียบคมเฉ		มีดหมุนข้างกัด , กัดร่อง		มีดหมุนปลาย กัด		มีดหมุนกัดขึ้นร่อง		มีดหมุนรูป เลื่อยวงเดือน	
	HS	C	HS	C	HS	C	HS	C	HS	C	HS	C
พลาสติก	0.32	0.38	0.25	0.30	0.20	0.23	0.18	0.18	0.10	0.13	0.08	0.10
โลหะผสม Al, Mg	0.55	0.50	0.45	0.40	0.32	0.30	0.28	0.25	0.18	0.15	0.13	0.13
บรอนซ์ทองเหลือง												
ธรรมดา	0.35	0.50	0.28	0.25	0.20	0.18	0.18	0.15	0.10	0.10	0.08	0.08
แข็ง	0.23	0.25	0.18	0.20	0.15	0.15	0.13	0.13	0.08	0.18	0.05	0.08
เหล็กหล่อ												
HB 150-180	0.40	0.50	0.32	0.40	0.23	0.30	0.20	0.25	0.13	0.15	0.10	0.13
HB 180-220	0.32	0.40	0.25	0.32	0.18	0.25	0.18	0.20	0.10	0.13	0.08	0.10
HB 220-300	0.28	0.30	0.20	0.25	0.15	0.18	0.15	0.15	0.08	0.10	0.08	0.08
เหล็กหล่อตีแม่ได้- เหล็กหล่อเหนียว	0.30	0.35	0.25	0.28	0.18	0.20	0.15	0.18	0.10	0.13	0.08	0.10
เหล็กเหนียวคาร์บอน	0.25	0.35	0.20	0.28	0.15	0.20	0.13	0.18	0.08	0.10	0.08	0.10
เหล็กเหนียวผสม												
อบฮีม H <sub>b</sub> 180-220	0.20	0.35	0.18	0.28	0.28	0.20	0.10	0.18	0.08	0.10	0.05	0.10
H <sub>b</sub> 220-300	0.15	0.30	0.13	0.25	0.25	0.18	0.19	0.15	0.005	0.10	0.03	0.08
แข็ง H <sub>b</sub> 300-400	0.10	0.25	0.08	0.20	0.20	0.15	0.05	0.13	0.005	0.08	0.05	0.08
ไร้สนิม	0.15	0.25	0.13	0.20	0.20	0.15	0.08	0.13	0.005	0.08	0.05	0.08

ที่มา: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย - ญี่ปุ่น), เทคนิคช่างกล (เล่ม 1). พ.ศ. 2528. หน้า 140

ส่วนระยะป้อนลึกที่เหมาะสมในแต่ละครั้ง สามารถเปิดได้จากตารางของเครื่องมือตัดที่ได้จากผู้ผลิตเครื่องมือตัดนั้นๆ ซึ่งค่าในตารางเป็นค่าที่จะต้องปรับเปลี่ยนค่าในขณะที่ทำการผลิตชิ้นงานจริงๆ เนื่องจากยังมีตัวแปรอื่นๆอีกนอกเหนือจากความแข็งแรงของเครื่องมือตัดที่ผู้ผลิตได้ทดสอบมา ตัวแปรที่มีผลอย่างมากต่อระยะป้อนลึก คือ ความแข็งแรงของเครื่องกัด วิธีการจับยึดชิ้นงาน ระยะความยาวของเครื่องมือตัด ซึ่งผู้ปฏิบัติงานที่มีความชำนาญงานหลายๆ จะสามารถปรับเปลี่ยนรอบ อัตราป้อน และระยะลึก ให้เหมาะสมกับสภาพเครื่องกัด วิธีการจับยึดชิ้นงาน และระยะความยาวของเครื่องมือตัดได้อย่างเหมาะสม (วีรวัดณ์ มะณี)

## 2.6 การวัดความเรียบของผิว (SURFACE FINISH MEASUREMENT)

ในอดีตนั้นความเรียบของผิวไม่มีความสำคัญเท่าปัจจุบันนี้ เพราะฉะนั้นเครื่องจักรและรถยนต์ต่างๆ จึงกำหนดชั้นใช้ให้หนามากขึ้นเพื่อที่จะป้องกันความร้อนที่เกิดขึ้นจากความเสียดทานจะเป็นเหตุให้เกิดอันตรายกับเครื่องจักรจึงกำหนดเป็นมาตรฐานเสมอ เป็นหยาบ ปานกลาง และละเอียด ที่เป็นชนิดของความเรียบที่แสดงให้ทราบโดยใช้กรรมวิธี เช่น คว้านด้วยดอกคว้าน (Ream), เจียรระไน (Grimo), ขัด (LAP) ดังนั้นความเรียบของผิวจึงมักตรวจสอบโดยใช้มือลูบไปตามผิวเพื่อแสดงถึงความไม่สม่ำเสมอส่วนการตรวจด้วยตาเปล่าจะใช้อีกด้วยแต่จะไม่ปฏิบัติกับผิวมันที่ไม่จำเป็นต้องแสดงให้เห็นถึงความเรียบ

เทคโนโลยีสมัยใหม่จึงมีความเรียบของผิวที่ทำให้ดีขึ้นตามประเภทการใช้ลูกสูบ (Pistons) แบริ่ง (Bearing) และเฟืองต่างๆ (Gears) จะขึ้นอยู่กับความเรียบผิวที่ดีที่สุดสำหรับการใช้งานถูกต้อง ดังนั้น จึงบังคับขึ้นเล็กน้อยหรือเวลาที่ไม่ลดลงมีความเรียบดีกว่าเมื่อบังคับให้ปฏิบัติเพิ่มขึ้นเสมอ เช่นการขัดด้วยแผ่นโลหะหรือสารเชิงทราย (Lapping) หรือการขัดด้วยหินหรือสารเชิงทราย (Honing) และค่าแรงในการผลิตแพงมาเพื่อให้มีความเรียบตามความประสงค์จึงแสดงไว้บนแรงงานและแจ้งความรู้กับผู้ปฏิบัติเครื่องมือกลด้วยระบบของสัญลักษณ์ความที่คิดค้นขึ้น โดยสมาคมมาตรฐานอเมริกัน American Standard Association หรือ ASA ใช้ระบบมาตรฐานนี้ขึ้นกำหนดแสดงให้ทราบถึงความเรียบของผิวขึ้นเป็นหน่วยในการวัดความเรียบของผิวคือ ไมโครนิ้ว หรือหนึ่งในล้านนิ้ว (0.000001) หรือไมโครเมตร (0.000001) เครื่องมือที่ใช้ในการวัดความเรียบของผิวโดยมาก คือ เครื่องแสดงผิว (Surface Indicator)

เครื่องนี้ประกอบด้วยเทรเซอร์เฮด (Tracer Head) และเครื่องขยาย (Amplifier) ซึ่งโครงของเทรเซอร์เฮดเป็นปลายแหลมเส้นตัดกัน (Diamond Stylus) มีรัศมีที่ปลาย 0.0005 นิ้ว (0.01 มม.) รองรับการเลื่อนติดอยู่กับชั้นผิวงานที่อาจเคลื่อนที่ไปตามผิวงานด้วยมือหรือจับด้วยมอเตอร์ เมื่อปลายแหลมเคลื่อนที่ไปบนผิวไม่สม่ำเสมอแล้วจะเปลี่ยนเป็นไฟฟ้าขึ้นๆ ลงๆ โดยเทรเซอร์เฮดสัญญาณเหล่านี้ขยายให้เห็นโดยเครื่องขยายและแสดงที่มิเตอร์ด้วยเข็มแล้ว อ่านจากที่แสดงที่มิเตอร์เป็นไมโครนิ้ว (ไมโครเมตร) โดยเฉลี่ยความสูงของความหยาบของผิวหรือการยื่นออกของผิวนั้นจากที่เกี่ยวเส้น (ศูนย์กลาง) การอ่านอาจเป็นไปได้ทั้งเฉลี่ยตัวเลข (AA) หรือรากที่สอง (Root Mean Square) หรือ

(RMS) ตามปกติรูปตัดตามขวางของชิ้นงานจะขยายได้มากขึ้นเพื่อที่จะคำนวณความเรียบของผิวโดยไม่มีเครื่องแสดงผิวและความสูงของการเบี่ยงเบนเหล่านี้จะต้องวัดและบันทึกไว้เป็นตัวเลขหรือรากที่สองเป็นวิธีที่ดีที่สุดที่จะหาความหยาบของผิวดังนั้นการเบี่ยงเบนจึงมีมากเป็นพิเศษสำหรับการหาความเที่ยงขนาดของความเรียบของผิวด้วยเครื่องแสดงนั้นขั้นแรกจะต้องแก้ขนาดความผิดพลาดโดยการตั้งกับผิวที่มีความเกี่ยวข้องชนิดละเอียดอยู่บนแท่งทดสอบที่แก้ขนาดความผิดพลาดกับมาตรฐาน (ASA)

### 2.6.1 คำจำกัดความของความเรียบของผิว (SURFACE FINISH DEFINITIONS)

การเบี่ยงเบนของผิว (Surface Deviations) คือ การยื่นจากผิวปกติเป็นรูปต่างๆ ของ ลูกคลื่น ความหยาบ ตำหนิ จัดคลื่น และรูปด้านข้าง

ลูกคลื่น (Waviness) เกี่ยวข้องกับความไม่สม่ำเสมอของลูกคลื่นที่เบี่ยงเบนออกจากผิวเฉลี่ยในรูปลูกคลื่น ซึ่งอาจเกิดจากการสั่นของเครื่องหรือชิ้นงาน โดยทั่วไปไปแล้วจะมีระยะขยายไปกว้าง

ความหยาบ (Roughness) มีความสัมพันธ์เฉลี่ยของระยะละเอียดที่ไม่สม่ำเสมอของลูกคลื่น และเกิดขึ้นจากเครื่องมือตัดหรือการกร่อนของเม็ดแกรนสารเชิงทรายด้วยความเร็วป้อนของเครื่อง ซึ่งไม่มีความสม่ำเสมอเหล่านี้จะแคบมากกว่าลูกคลื่น

ตำหนิ (Flaw) คือ ความไม่สม่ำเสมอ เช่นรอยขีด รอยแตกสันหรือโพรง ที่ไม่เป็นไปตามแบบสม่ำเสมอในกรณีนี้จะเกิดขึ้นในลูกคลื่นและความหยาบ

จัดคลื่น (Lay) คือทิศทางของแบบผิวที่ตกลงกันไว้เกิดขึ้นจากกรรมวิธีของการใช้เครื่อง

ทำ

รูปด้านข้าง (Profile) คือ รูปร่างที่กำหนดตลอดหน้าตัดของผิว

ไมโครนิ้ว (Micro Inch) คือ หน่วยของการวัดที่ใช้วัดความเรียบของผิวจะเท่ากับ หนึ่งไมโครนิ้ว (0.000001) หรือ ไมโครเมตร (0.000001)

สัญลักษณ์ที่แสดงให้ทิศทางที่จัดคลื่นดังนี้

|| คือสัญลักษณ์ที่ขนานกับเส้นขอบเขตของผิว

⊥ คือสัญลักษณ์ที่ตั้งฉากกับเส้นขอบเขตของผิว

X คือสัญลักษณ์ที่เป็นเชิงมุมทั้งสองทิศทางบนผิว

M คือสัญลักษณ์แสดงหลายทิศทาง

C คือสัญลักษณ์ของวงกลมประมาณกับศูนย์กลางของผิว

R คือสัญลักษณ์ของรัศมีที่มีประมาณสัมพันธ์กับศูนย์กลางของผิว

ตารางที่ 2.3 เฉลี่ยความหยาบของผิวที่ผลิตขึ้นจากกรรมวิธีการใช้เครื่องมาตรฐาน

กรรมวิธีการผลิต	ค่าเฉลี่ยความหยาบ	
	ไมโครนิ้ว	ไมโครเมตร
การกลึง	100 – 250	2.54 – 6.35
การเจาะ	100 – 200	2.54 – 5.08
การคว้านด้วยดอกคว้าน	50 – 150	1.27 – 3.81
การเจียรระไน	20 – 100	0.50 – 2.54
การขัดด้วยหินขัด (Mowing)	5 – 20	0.12 – 0.50
การขัดด้วยสารเชิงทราย ( Lapping )	1 - 10	0.02 – 0.25

ที่มา : การศึกษาตัวแปรของเครื่องกัดแนวตั้งที่มีผลต่อความเรียบของชิ้นงาน

### 2.6.3 เครื่องทดสอบความหยาบของผิว (SURFACE ROUGHNESS TESTER)



รูปที่ 2.18 เครื่องวัดความเรียบผิว รุ่น SV-400

ที่มา : ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

เครื่องทดสอบผิวนี้นี้จะใช้ในการวัดความหยาบของผิวในเทอมของ  $R_a$  (ใช้เลขคณิตหาตัวกลางการเบี่ยงเบน) หรือ  $R_t$  (กำหนดขึ้นจากมาตรฐานเยอรมัน) จึงอ่าน  $R_a$  และ  $R_t$  โดยตรงจากมิเตอร์ เมื่อนำเครื่องบันทึกมารวมเข้าด้วยกันแล้วจะบันทึกออกมาได้เช่นเดียวกัน

เครื่องทดสอบประกอบด้วยเครื่องสามตัว คือ เครื่องรับคลื่นเครื่องขับและเครื่องขยายมีมิเตอร์อยู่ด้วย

เครื่องรับคลื่นอยู่สคิด (Skid) ลาก (Trace) ไปบนผิวที่ไม่สม่ำเสมอให้ลายแหลมเส้นตัดกัน (Diamond Tipped Stylus) รัศมี  $1.25 \mu\text{m}$  (0.005 inch) มุม 60 องศาใช้แรงน้อยกว่า 1.5 gf มีระยะเคลื่อนที่ขึ้นลง

เครื่องขยายและมิเตอร์ติดอยู่ มีทั้งที่กำหนดขึ้นเป็นระบบเมตริก หรือ เมตริก/อังกฤษ ขนาด 0.3  $\mu\text{m}$  (10  $\mu$  - inch ถึง 3000  $\mu$  - inch) เครื่องขับ 0.02  $\mu\text{m}$  ถึง 5.0  $\mu\text{m}$  (0.5  $\mu$  - inch ถึง 200  $\mu$  - inch) ค่าตัดออก (Cut Off Value) 6 mm. (0.240 inch) per min. ใช้ขนาด 2.5 mm. (1 inch) ถึง 0.25 mm. (0.010 inch) และ 2 mm. (0.808 inch) per sec ใช้ขนาด 0.8 mm. (0.030 inch) ถึง 0.08 mm. (0.003 inch)

แรงขับเคลื่อนที่และเครื่องรับคลื่นขนาด 6 mm. (240 inch) per sec หรือ 2 mm./sec คลื่นละเอียดมีความเร็วที่เที่ยงขนาดแน่นอนและไวใจได้

เครื่องนี้เป็นทรานซิสเตอร์อยู่ร่วมกับวงจรพิมพ์มีความสามารถให้จุดต่างๆ ที่เส้นผลิตออกมา สำหรับกรรมวิธีตรวจที่อยู่ระหว่างกลางของความหยาบของผิว

เครื่องบันทึกผิว เมื่อนำไปใช้ร่วมกับเครื่องทดสอบผิวแล้ว จะบันทึก  $R_t$  ออกมาสำหรับผู้ตรวจใช้สะดวกยิ่งขึ้น

เครื่องลากด้วยมือ (Hand Tracer) ใช้สำหรับวัดผิวเว้า (Concave) หรือนูน (Convex) ที่เครื่องรับคลื่นรับคลื่นมาตรฐานอยู่กับเครื่องขับไม่สามารถที่จะใช้ได้จึงใช้เครื่องชนิดนี้โดยที่ลายแหลม (Stylus) รองรับโดยที่สะกดทั้งสามจึงทำให้วัดได้สม่ำเสมอแน่นอน (วีรวัฒน์ มะณี)

#### 2.6.4 รูปแบบหลัก P (Primary Profile)

รูปแบบนี้ จะเป็นผลมาจากการบรรจบกันของ เครื่องมือวัดที่ใช้วัดความเรียบผิว โดยความเรียบปกติถึงความมาตรฐาน อย่างไรก็ตาม โดยปกติแล้ว จะเห็นว่า Primary Profile ปริมาณที่วัดได้จริง โดยผู้วัดความหยาบของผิว จะใช้เครื่องมือวัดรอยขีดของชิ้นงาน

#### 2.6.5 รูปแบบความหยาบผิว R (Roughness Profile R)

รูปแบบนี้ จะเป็นผลมาจากรูปแบบหลัก เป็นการปรับเส้นของรูปแบบหลักให้เรียบขึ้น ซึ่งประกอบด้วย เส้นความยาวคลื่น aviness Components หรือส่วนประกอบความเป็นคลื่น ความกรองจะถูกใช้เพื่อจุดมุ่งหมายที่เรียกว่า High-Pass Filters

#### 2.6.6 เส้นมาตรฐาน (Base Line)

เส้นมาตรฐาน คือ เส้นที่ใช้อ้างอิงการคำนวณ ของตัวแปรของโครงสร้างที่ใช้ในการประเมิน  $R_a$  ค่าเฉลี่ยเรขาคณิตของโครงสร้าง

$R_a$  คือ ค่าเฉลี่ยเรขาคณิต ของค่าสัมบูรณ์ของโครงสร้างการหันเห  $Y_i$  จากเส้นมาตรฐาน

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Y_i| \quad (2.3)$$

$R_q$  ค่าเฉลี่ยของรากที่สองของโครงสร้าง

$R_q$  คือ ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยเรขาคณิต ของโครงสร้างการหันเห  $Y_i$  จากเส้นมาตรฐาน

$$R_q = \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.4)$$

$R_y$  (ISO, JIS): ค่าสูงสุดของโครงสร้าง

$R_y$  (ISO, JIS) คือ ผลรวมของค่าสูงสุดของค่า  $Y_p$  ของจุดสูงสุดของเส้นมาตรฐาน และค่าที่ต่ำ  $Y_v$  ของจุดที่ต่ำที่สุดของเส้นมาตรฐาน

$$\begin{aligned} R_y &= Y_p + Y_v \\ &= Y_{max} + Y_{min} \end{aligned} \quad (2.5)$$

โครงสร้างของจุดสูงสุด/โครงสร้างของจุดต่ำสุด ของโครงสร้าง

เมื่อ Profile ถูก Sliced โดยเส้นมาตรฐานและแบ่งเป็นส่วนที่อยู่เหนือเส้นมาตรฐาน (Convex) เรียกว่า "Profile Peak" และส่วนที่อยู่ด้านล่างเส้นมาตรฐาน (Concave) เรียกว่า "Primary Valley"

จุดสูงสุดของแต่ละโครงสร้างที่สูง เรียกว่า "Highest Peak"

จุดต่ำสุดของแต่ละโครงสร้างที่ต่ำ เรียกว่า "Deepest Valley"

$R_z$  (ISO, JIS) จุดสูงสุดของความไม่สม่ำเสมอ

ทั้งหมดของ 2 ค่าเฉลี่ย คือ ค่าสูงสุดและค่าต่ำสุด ซึ่ง คือค่าเฉลี่ยที่สูงสุดของ 5 จุดที่สูงสุด และค่าเฉลี่ยของจุดที่ลึกที่สุดของ 5 จุด จะถูกวัดได้โดย เส้นสัมผัสที่จุดจุดหนึ่งของจุดสูงสุดและต่ำที่สุดและทำให้เส้นสัมผัสขนานกับเส้นมาตรฐาน

ค่าน้อยที่สุดของจุดสูงสุดต่ำสุดจะต้องเป็น ร้อยละ 10 ของ  $R_y$

หมายเหตุ: จำนวนของค่าสูงสุดและค่าต่ำสุด ซึ่งเป็นค่าที่น่าพอใจเป็นค่าน้อยที่สุด ซึ่งจะน้อยกว่าผลรวมของ 2 ค่า คือ ค่าเฉลี่ยสูงสุดและต่ำสุด ค่าเฉลี่ยที่สูงที่สุดและต่ำที่สุดซึ่งเป็นที่น่าพอใจ คือ ข้อสันนิษฐานของ  $R_z$  การวิเคราะห์  $R_z$  จากสิ่งหนึ่งคือ ตัดสินใจโดยใช้ทฤษฎี มันแสดงถึง  $R_z$

$R_c$  ค่าเฉลี่ยที่สุดของความไม่แน่นอน

การหันทนของจุดสูงที่สุดจากเส้นมาตรฐาน คือ  $Y_p$  และการหันทนของจุดที่ต่ำที่สุดจากเส้นมาตรฐาน คือ  $Y_v$  ผลรวมของค่าเฉลี่ยของเรขาคณิตของ  $Y_p$  และ  $Y_v$  คือ  $R_c$

$$R_c = \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_{pi} \right) + \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_{vi} \right) \quad (2.6)$$

### 2.6.7 อลูมิเนียมอัลลอย (Aluminum Alloys) 7075

อลูมิเนียมอัลลอย (Aluminum Alloys) 7075 เป็นโลหะผสมที่มีความแข็งแรง สามารถตัดแต่งได้ ไม่เหมาะกับการเชื่อม/สภาวะกัดกร่อนเหมาะสำหรับการนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมการอากาศยาน หรือ อุตสาหกรรมการยานยนต์ มีคุณสมบัติดังนี้

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติทางเคมีของอลูมิเนียมอัลลอย 7075

อุณหภูมิหลอมเหลว	635°C
อุณหภูมิแข็งตัว	477°C
สัมประสิทธิ์การขยายตัว ที่ 20 องศาเซลเซียส	23.4 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{K}$
ปริมาตร	$68 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{m}^3 \cdot \text{K}$
ความร้อนจำเพาะ	960 J/kg.K
ความหนาแน่น	2.80 $\text{g}/\text{cm}^3$

ที่มา : [http://www.aluminiumlearning.com/html/w\\_7075.html](http://www.aluminiumlearning.com/html/w_7075.html)

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติทางกายภาพ อลูมิเนียมอัลลอย 7075

ชนิดการคืน ตัว	ความทน แรงดึง (Mpa)	ความแข็งที่ จุดคราก (Mpa)	การยืดตัว (%)	ค่าความแข็ง (HB)	แรงเฉือน (Mpa)
O	228	103	17	60	152
T6,T651	503	503	11	150	331
T73	572	434	-	-	-

ที่มา : [http://www.aluminiumlearning.com/html/w\\_7075.html](http://www.aluminiumlearning.com/html/w_7075.html)

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อความเรียบผิวในหัวข้อเรื่อง การศึกษาตัวแปรของเครื่องกัดแนวตั้งที่มีผลต่อความเรียบผิวชิ้นงานเป็นงานวิจัยของ นายวีรวัฒน์ มะณี ได้กำหนดตัวแปรในการทดลอง คือ อัตราการป้อนของโต๊ะงานและความเร็วรอบดอกกัด ใช้ เหล็กเหนียวอุตสาหกรรม (ST37) ในการทดลอง ซึ่งผลการทดลองของอัตราการป้อนของโต๊ะงานที่ 70 มิลลิเมตรต่อนาที และความเร็วรอบดอกกัดที่ 680 รอบต่อนาที ทำให้ได้ค่าความเรียบผิวที่ดีที่สุด โดยสามารถเขียนเป็นสมการแบบพหุคูณคือ  $Roughness = 2.59 + (0.0196Feed) + (0.00856Speed) + (0.000025Feed \times Speed) - (0.000275Feed^2) - (0.000008Angle^2)$  และ ผลค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างการคำนวณสมการถดถอยและค่าเฉลี่ยจากการทดลองจะมีค่า ความคลาดเคลื่อนที่ ร้อยละ 1.94 ในงานวิจัยเรื่อง กรณีศึกษาผลกระทบของตัวแปรที่มีผลต่อผิว งานกัดโลหะเป็นงานวิจัยของ นายสวัสดิพงษ์ วอทอง ได้ทำการศึกษาค่าตัวแปรในการทดลอง คือ ความเร็วรอบดอกกัดและอัตราการป้อนของโต๊ะงาน ใช้อะลูมิเนียมในการทดลอง โดยมีผลการ ทดลอง คือ ที่ความเร็วรอบดอกกัด 5727 รอบต่อนาที และที่อัตราการป้อนของโต๊ะงาน 0.8 มิลลิเมตรต่อนาที ส่งผลให้ได้ชิ้นงานที่มีความเรียบผิวที่ดีที่สุด สามารถเขียนเป็นสมการแบบพหุคูณคือ  $Roughness = 0.393 + (0.570Feed) - (0.000107Speed)$  และผลค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างการคำนวณสมการถดถอยและค่าเฉลี่ยจากการทดลองจะมีค่าความคลาดเคลื่อนที่ ร้อยละ 10.2 ใน งานวิจัยเรื่อง Characteristics of inclined Planes According to the Variation of Cutting Direction in High - Speed Ball - End Milling เป็นงานวิจัยของ M. C. Kang, K. K. Kim ได้ ทำการศึกษาลักษณะการกัดของชิ้นงานที่มีการกำหนดตัวแปร คือ อัตราการป้อนของโต๊ะงาน ความเร็วรอบดอกกัด ความลึกการกัด และองศาการกัด ใช้วัสดุ Die Steel ในการทดลอง ซึ่งผลการ ทดลองของอัตราการป้อนของโต๊ะงานที่ 3200 มิลลิเมตรต่อนาที ความเร็วรอบดอกกัดที่ 8000 รอบ ต่อนาที ความลึกการกัดที่ 0.2 มิลลิเมตร และการกัดที่ 15 องศา ทำให้มีค่าความเรียบผิวที่ดี

การศึกษางานวิจัยที่ศึกษาการกัด ในหัวข้อเรื่อง การพยากรณ์ความเรียบผิวในงานกัดแม่พิมพ์ พลาสติกด้วยดอกกัด End-Mill เป็นงานวิจัยของ Hasan Oktem โดยนำตัวแปร ได้แก่ อัตราการป้อน ของโต๊ะงานที่ 80 มิลลิเมตรต่อนาที ความเร็วรอบดอกกัดที่ 250 รอบต่อนาที ความลึกการกัดที่ 0.3 มิลลิเมตร และค่าเผื่อการกัดที่ 0.001 มิลลิเมตร มาออกแบบการทดลองด้วยวิธี แฟคทอเรียลเต็ม รูปแบบสามระดับ โดยใช้อะลูมิเนียมอัลลอยด์ 7075-T6 ในการทดลองและทำการวิเคราะห์ผลการ ทดลองด้วยวิธี Neural Network และ Genetic Algorithm ทำให้ทราบว่าจากการเปรียบเทียบโดย ใช้ข้อมูลที่ได้จากการพยากรณ์เปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ได้ค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ ร้อยละ 5.34 เมื่อใช้วิธี Neural Network ในการสร้างแบบจำลอง และได้ค่าความคลาดเคลื่อน ร้อย ละ 1.33 เมื่อใช้วิธี Genetic Algorithm



### บทที่ 3

## วิธีการดำเนินโครงการ

### 3.1 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

- 3.1.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับความเรียบของผิวและการวัดค่าความเรียบผิว
- 3.1.2 ทฤษฎีการเขียนโปรแกรม NC Code, G-code
- 3.1.3 ทฤษฎีเกี่ยวกับการโปรแกรม CNC
- 3.1.4 ทฤษฎีเกี่ยวกับการใช้เครื่องวัดความเรียบผิว

### 3.2 ออกแบบชิ้นงานด้วยโปรแกรม CAD/CAM

ออกแบบชิ้นงานด้วยโปรแกรม AutoCAD และเขียน G-Code (ดังภาคผนวก หัวข้อที่ ก.2)

### 3.3 เตรียมชิ้นงานเพื่อให้ได้ขนาดตามที่ออกแบบไว้

นำแผ่นอะลูมิเนียมหนา มาตัดด้วยให้ได้ขนาดเท่ากับที่ได้ออกแบบไว้ข้อ 3.2

### 3.4 ทำการกัดชิ้นงานตามแบบที่ได้ออกแบบไว้

- 3.4.1 นำแผ่นอะลูมิเนียมที่เตรียมไว้มาทำการกัดตามขนาดที่ออกแบบไว้ด้วยเครื่องกัดแนวตั้ง 5 แกน
- 3.4.2 ใช้อัตราป้อนที่ 40, 80 และ 120 มิลลิเมตรต่อนาที
- 3.4.3 ใช้ความเร็วรอบที่ 125, 250 และ 375 รอบต่อนาที
- 3.4.4 กัดที่ความลึกสุดท้าย 0.3 มิลลิเมตร

หมายเหตุ อ้างอิงจากงานวิจัยเรื่อง Prediction Of Minimum Surface Roughness In Milling Mold Parts Using Neural Network And Genetic Algorithm

- 3.4.5 ใช้ดอกกัด Flat End Mill ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร
- 3.4.5 ใช้ใช้วิธีการกัดปาดหน้าผิวชิ้นงาน แบบ Face Milling

### 3.5 วัดค่าความเรียบผิวชิ้นงาน

นำชิ้นงานที่ได้จากข้อ 3.4 ไปวัดความเรียบผิวทุกองศา และบันทึกผลลงในตาราง

ตารางที่ 3.1 ตารางบันทึกผลการทดลอง

ความเร็วรอบ	อัตราการป้อน	องศา	วัดครั้งที่1	วัดครั้งที่2	เฉลี่ย
125	40	0			
		5			
		10			
		15			
		20			
	80	0			
		5			
		10			
		15			
		20			
120	120	0			
		5			
		10			
		15			
		20			
	40	0			
		5			
		10			
		15			
		20			
250	80	0			
		5			
		10			
		15			
		20			
	120	0			
		5			
		10			
		15			
		20			

ตารางที่ 3.1 (ต่อ) ตารางบันทึกผลการทดลอง

375	40	0			
		5			
		10			
		15			
		20			
	80	0			
		5			
		10			
		15			
		20			
	120	0			
		5			
10					
15					
		20			

3.6 วิเคราะห์ผลการทดลองและสรุปผลที่ได้

3.6.1 นำค่าความเรียบผิวที่ได้แต่ละองศา มาเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วย

โปรแกรม Minitab

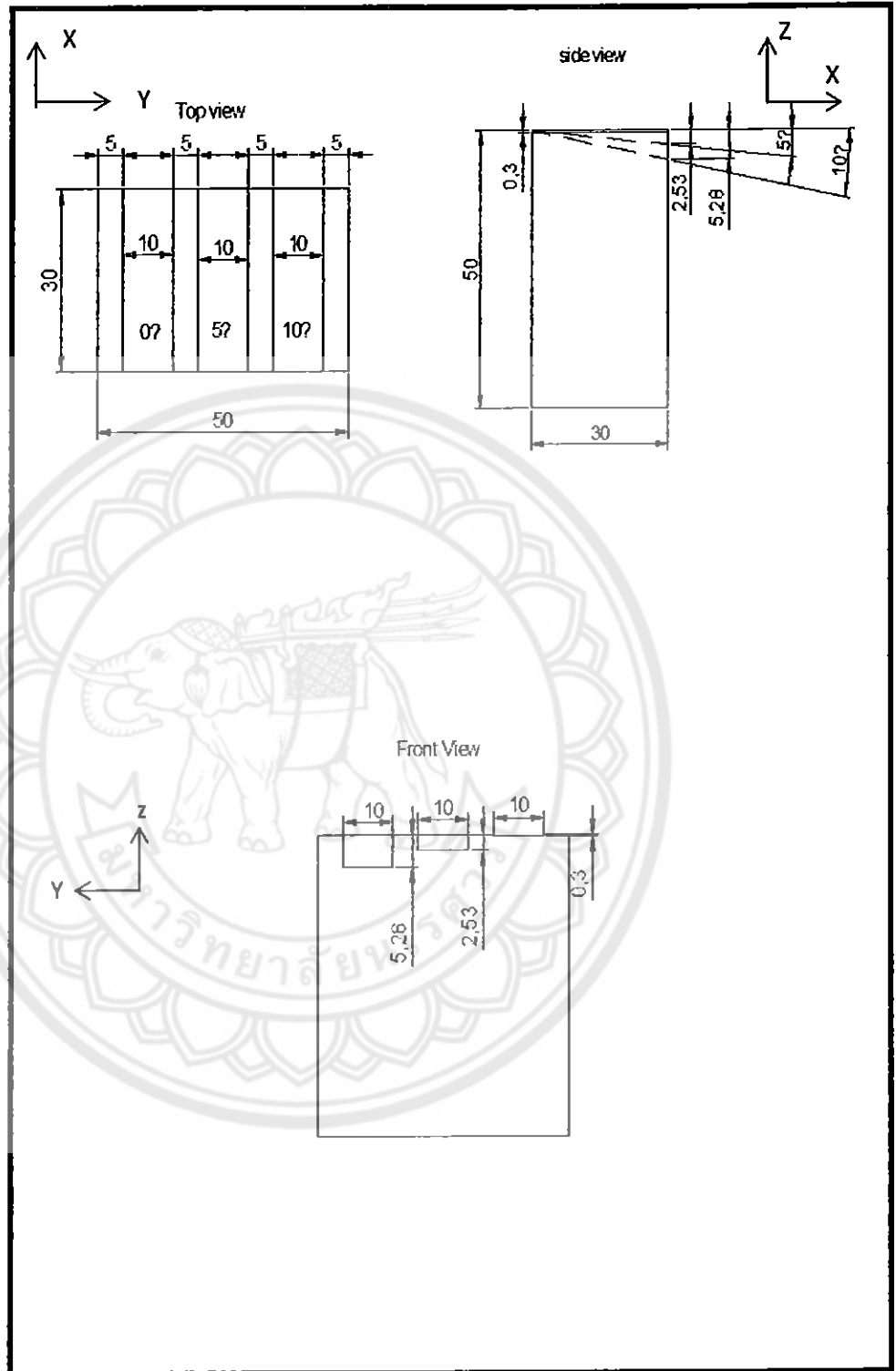
3.6.2 วิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้จากผลการเปรียบเทียบ

3.7 จัดทำรูปเล่มโครงการปริญญาโท

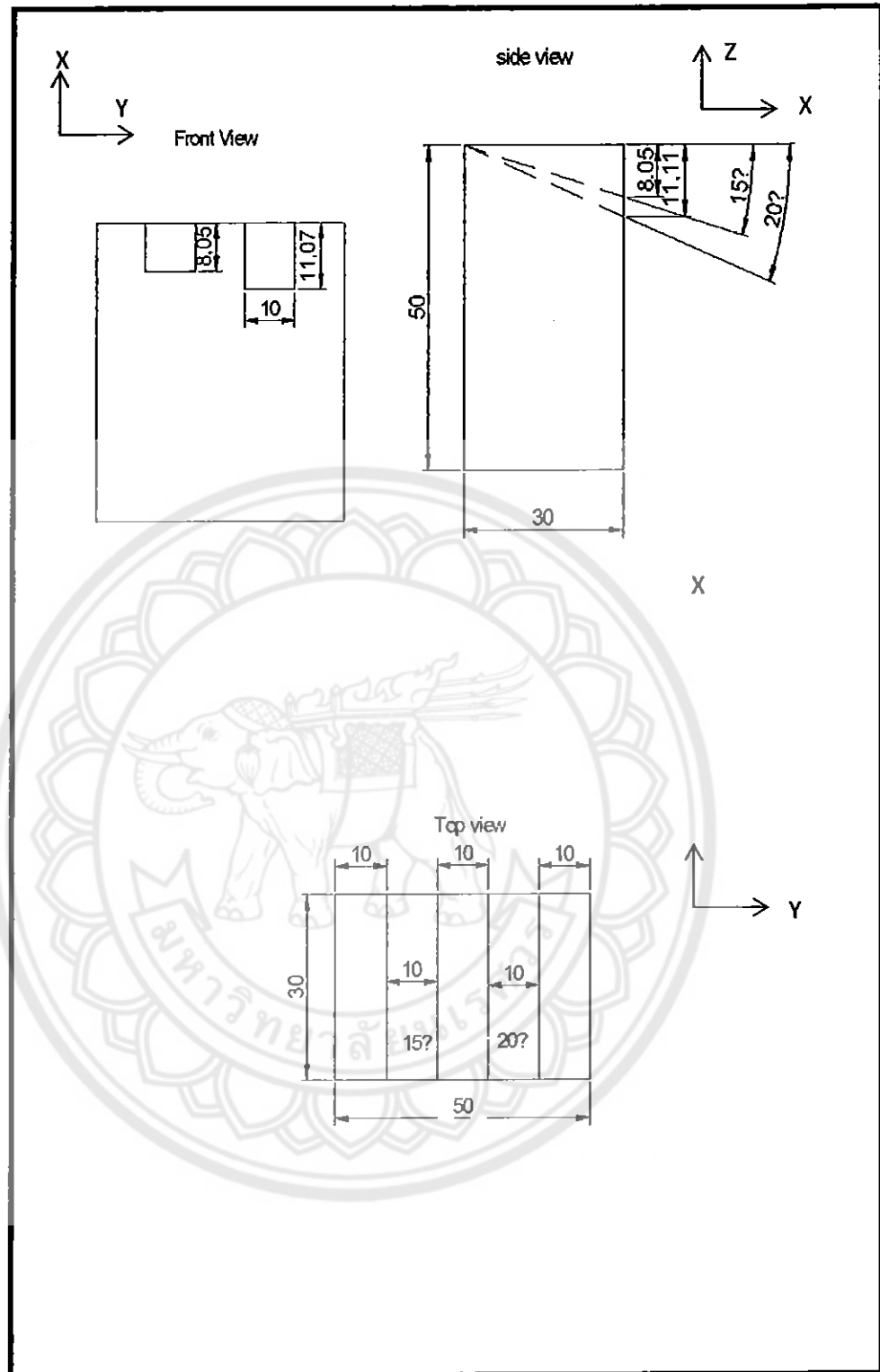
ทำการรวบรวมข้อมูลทั้งหมดในการดำเนินการวิจัยมาจัดพิมพ์รูปเล่มและนำมาเสนอ



4.2 แบบชิ้นงานที่ได้ใช้ในการทดลอง



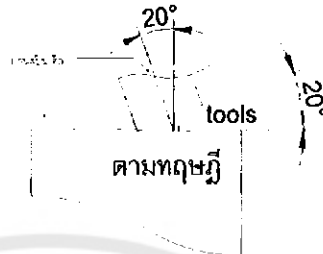
รูปที่ 4.1 การออกแบบการกัดชิ้นงานที่ 0, 5 และ 10 องศา



รูปที่ 4.2 การออกแบบการกัดชิ้นงานที่ 15 และ 20 องศา

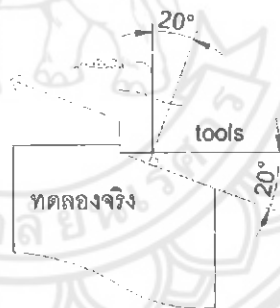
### 4.3 ทิศทางการเดินของดอกกัด

จากการศึกษาทิศทางดอกกัดของเครื่องกัดอัตโนมัติ 5 แกน เมื่อดอกกัดมีการเอียงทำองศาเส้นทางการทำงานจะเป็นดังรูป



รูปที่ 4.3 ทิศทางการเดินของดอกกัดตามทฤษฎี

เนื่องจากเครื่องจักรอัตโนมัติที่ใช้ในการทดสอบไม่สามารถทำการเอียงสปีนเดิลได้ เส้นทางการทำงานของดอกกัดจึงเป็นดังรูป



รูปที่ 4.4 ทิศทางการเดินของดอกกัดในการกัดชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง

### 4.4 ดอกกัดที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 4.5 ดอกกัดที่ใช้ในการทดลอง

#### 4.5 การเก็บข้อมูลต่างๆ

การเก็บข้อมูลผลการทดลอง เพื่อนำมาวิเคราะห์นั้นได้ทำการเก็บข้อมูลของความเรียบผิวของชิ้นงาน โดยใช้ค่า  $R_a$  มีหน่วยเป็น ไมโครเมตร ซึ่งได้ผลการทดลองดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.2 ตารางข้อมูลความเรียบผิว ( $R_a$ ) ที่ได้จากการทดลอง

ความเร็วรอบของ ดอกกัด (รอบต่อนาที)	อัตราการป้อนของ โต๊ะงาน (มิลลิเมตรต่อนาที)	องศาของ ดอกกัด	วัดครั้งที่1 (ไมโครเมตร)	วัดครั้งที่2 (ไมโครเมตร)	ค่าความเรียบผิว เฉลี่ยจากการวัด (ไมโครเมตร)
125	40	0	0.21	0.26	0.235
		5	2.17	2.22	2.195
		10	4.12	4.13	4.125
		15	6.31	6.24	6.275
		20	8.15	8.18	8.165
	80	0	1	1.02	1.01
		5	3.7	3.63	3.665
		10	5.26	5.26	5.26
		15	8.71	8.72	8.715
		20	10.01	10.06	10.035
	120	0	0.92	0.92	0.92
		5	3.05	3.06	3.055
		10	5.33	5.36	5.345
		15	8.85	8.88	8.865
		20	11.72	11.83	11.775



ตารางที่ 4.2 (ต่อ) ตารางข้อมูลความเร็วผิว ( $R_s$ ) ที่ได้จากการทดลอง

ความเร็วรอบของ ดอกกัด (รอบต่อนาที)	อัตราการป้อนของ โต๊ะงาน (มิลลิเมตรต่อนาที)	องศาของ ดอกกัด	วัดครั้งที่1 (ไมโครเมตร)	วัดครั้งที่2 (ไมโครเมตร)	ค่าความเร็วผิว เฉลี่ยจากการวัด (ไมโครเมตร)
250	40	0	0.55	0.55	0.55
		5	2.47	2.5	2.485
		10	4.91	4.91	4.91
		15	6.79	6.74	6.765
		20	8.97	8.88	8.925
	80	0	1	1.12	1.06
		5	3.85	3.89	3.87
		10	5.48	5.44	5.46
		15	9.43	9.44	9.435
		20	10.08	10.06	10.07
120	0	0.58	0.58	0.58	
	5	3.61	3.56	3.585	
	10	5.75	5.81	5.78	
	15	8.95	9.01	8.98	
	20	10.7	10.65	10.675	

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) ตารางข้อมูลความเรียบผิว ( $R_a$ ) ที่ได้จากการทดลอง

ความเร็วรอบของ ดอกกัด (รอบต่อนาที)	อัตราการป้อนของ โต๊ะงาน (มิลลิเมตรต่อนาที)	องศาของ ดอกกัด	วัดครั้งที่1 (ไมโครเมตร)	วัดครั้งที่2 (ไมโครเมตร)	ค่าความเรียบผิว เฉลี่ยจากการวัด (ไมโครเมตร)
375	40	0	0.92	0.95	0.935
		5	2.17	2.22	2.195
		10	4.14	4.12	4.13
		15	6.64	6.66	6.65
		20	8.15	8.18	8.165
	80	0	1.12	1.19	1.155
		5	2.81	2.82	2.815
		10	5.36	5.33	5.345
		15	8.88	8.85	8.865
		20	10.59	10.54	10.565
	120	0	0.75	0.78	0.765
		5	3.03	3.09	3.06
		10	6.7	6.71	6.705
		15	8.77	8.72	8.745
		20	9.77	9.74	9.755

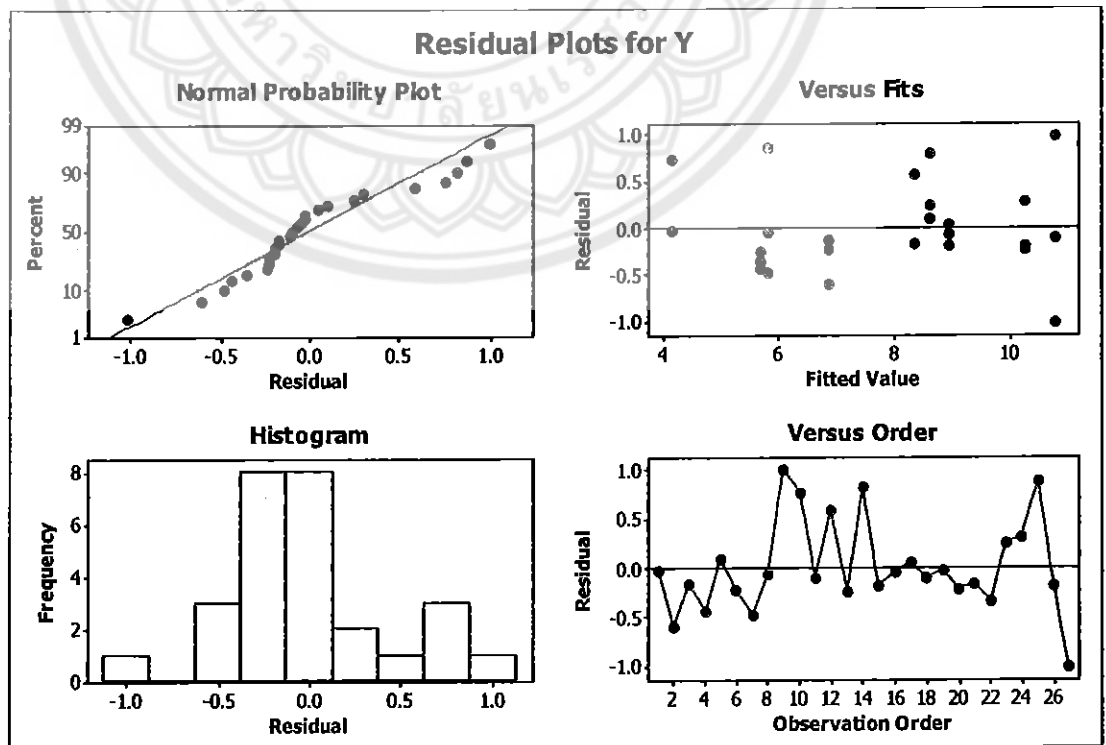
#### 4.6 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.3 ตารางบันทึกข้อมูลแบบแฟคทอเรียลแบบ  $3^3$

Angle (องศา)	Speed (รอบต่อนาที)								
	125			250			375		
	Feed (มิลลิเมตรต่อนาที)			Feed(มิลลิเมตรต่อนาที)			Feed(มิลลิเมตรต่อนาที)		
	40	80	120	40	80	120	40	80	120
10	4.125	5.260	5.345	4.910	5.460	5.780	4.130	5.345	6.705
15	6.275	8.715	8.865	6.765	9.435	8.980	6.650	8.865	8.745
20	8.165	10.035	11.775	8.925	10.070	10.675	8.165	10.565	9.755

การวิเคราะห์ผลของข้อมูลที่เก็บมาได้นั้นที่ 0 และ 15 องศา ไม่ได้นำมาวิเคราะห์ เนื่องจาก การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลแบบ  $3^3$  ใช้ตัวแปรขององศาแค่ 3 ตัว คือ 10, 15 และ 20 องศา เพื่อให้อยู่ในช่วงที่ครอบคลุมที่ 15 องศา ของงานวิจัยของ M.C.Kang, K.K.Kim จะถูกนำมา วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab ซึ่งจะได้ผลดังรูปต่อไปนี้

##### 4.6.1 การวิเคราะห์ผลจากกราฟ



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงส่วนตกค้างของข้อมูลของการวัดความเร็วผิวของชิ้นงาน

กราฟทั้ง 4 กราฟนี้เป็นการนำส่วนตกค้างของข้อมูลของการวัดความเรียบผิวของชิ้นงาน มาวิเคราะห์ดูว่า ข้อมูลที่ได้เก็บมานั้นมีความน่าเชื่อถือหรือว่าพอเพียงต่อการวิเคราะห์โดยวิธีการปกติ หรือว่าจะต้องทำการวิเคราะห์โดยวิธีขั้นสูงกว่า ซึ่งในรูปที่ 4.1 นี้จะแสดงถึงการวิเคราะห์ส่วนตกค้าง ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนคือ

4.6.1.1. Normal Probability Plot of the Residuals เป็นกราฟที่แสดงค่าการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residuals) ว่ามีการกระจายตัวเป็นแบบปกติหรือไม่ ซึ่งจะเห็นได้จากการที่จุดบนกราฟเรียงตัวกันเป็นลักษณะเส้นตรงและมีการกระจายตัวที่หนาแน่นบริเวณใกล้ๆ ศูนย์

4.6.1.2. Residuals Versus the Fitted Values เป็นกราฟที่ใช้ตรวจสอบว่าข้อมูลที่ได้เก็บมานั้นมีการกระจายตัวของส่วนตกค้างในแต่ละช่วงของข้อมูลนั้นมีการกระจายตัวใกล้ๆ กัน และลักษณะของกราฟควรมีการกระจายตัวแบบสุ่มรอบค่า 0 ซึ่งจากกราฟก็มีการกระจายตัวใกล้ๆ กันและการกระจายตัวแบบสุ่มรอบค่า 0

4.6.1.3. Histogram of the Residuals เป็นกราฟที่ใช้ตรวจสอบว่าส่วนตกค้างนั้นมีการกระจายตัวที่เป็นปกติหรือไม่ ซึ่งกราฟฮิสโตแกรมนั้นควรจะมียูปร่างสมมาตรเป็นรูปประฆังคว่ำและมีการกระจายตัวแบบสุ่มแบบ 0 ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่ามีมีการกระจายตัวที่เป็นปกติและมีลักษณะสมมาตรเป็นรูปประฆังคว่ำ

4.6.1.4. Residuals Versus the Order of the Data เป็นกราฟที่ใช้ตรวจสอบดูว่าส่วนตกค้างนั้นขึ้นอยู่กับเวลาที่เปลี่ยนไปในการเก็บข้อมูลหรือไม่ ซึ่งกราฟนี้ไม่ควรปรากฏลักษณะของแนวโน้มหรือรูปแบบใดๆ อย่างชัดเจน ซึ่งควรมีการกระจายตัวที่ขึ้นลงอย่างสม่ำเสมอซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่ามีข้อมูลมีการกระจายตัวไม่มีรูปทรงที่ชัดเจน

#### 4.6.2 Normal Distribution Test

Kolmogorov-Sminov Test เป็นการทดสอบที่ใช้การแจกแจงของประชากรว่าเป็นแบบปกติหรือไม่ หลักการของการทดสอบนี้ คือ การเปรียบเทียบค่าของฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของข้อมูลตัวอย่างกับค่าฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของข้อมูลภายใต้สมมติฐานว่าประชากร/ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ ถ้าค่าความแตกต่างต่ำ แสดงว่าการแจกแจงเป็นแบบปกติ

$$D = \max |FE(X_i) - F_0(X_i)|; i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (4.1)$$

เมื่อ D แทน ความเบี่ยงเบนสูงสุด (Maximum Deviation)

FE (Xi) แทน ความถี่สะสมสัมพัทธ์ที่คาดหวัง

F0 (Xi) แทน ความถี่สะสมสัมพัทธ์ที่สังเกตได้

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

$H_0$  : สุ่มตัวอย่างจากประชากรที่มีการแจกแจงเป็นแบบปกติ

$H_1$  : สุ่มตัวอย่างจากประชากรที่ไม่ได้มีการแจกแจงเป็นแบบปกติ

สถิติทดสอบ : Kolmogorov-Sminov

เขตปฏิเสธ  $H_0$  : ถ้าค่า P - Value หรือ Sig.(Significance) น้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนด

$H_0$  : ข้อมูลอัตราการป้อนของไต่ะงานมีการแจกแจงเป็นแบบปกติ

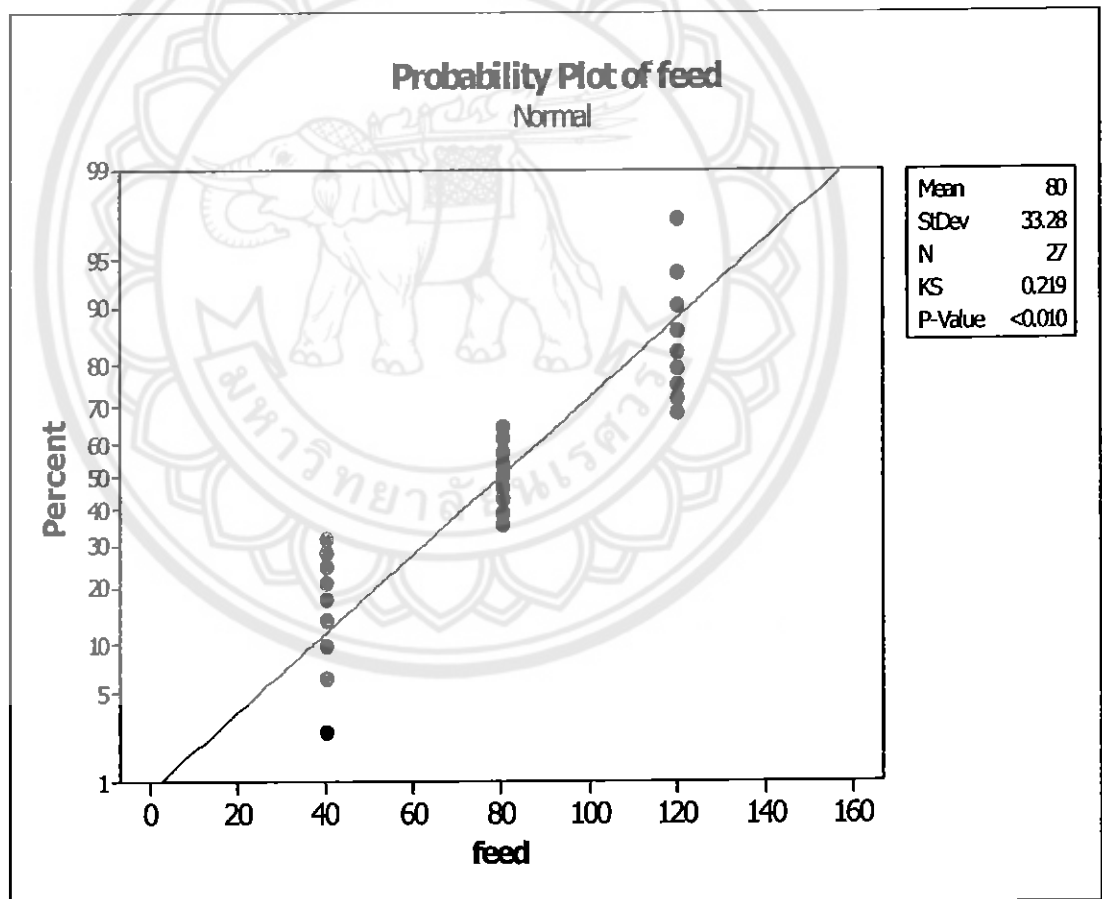
$H_1$  : ข้อมูลอัตราการป้อนของไต่ะงานไม่มีการแจกแจงเป็นแบบปกติ

ที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$

สถิติทดสอบ *Kolmogorov-Smirnov(K-S Test)* = 0.219

การตัดสินใจ เนื่องจากค่า *Kolmogorov-Smirnov(K-S Test)* = 0.219 >  $\alpha = 0.05$  จึงยอมรับ  $H_0$

สรุปว่า ข้อมูลอัตราการป้อนของไต่ะงานมีการแจกแจงเป็นแบบปกติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงการแจกแจงเป็นแบบปกติของอัตราการป้อนของไต่ะงาน

$H_0$  : ข้อมูลสมมุติของดอกกัตมีการแจกแจงเป็นแบบปกติ

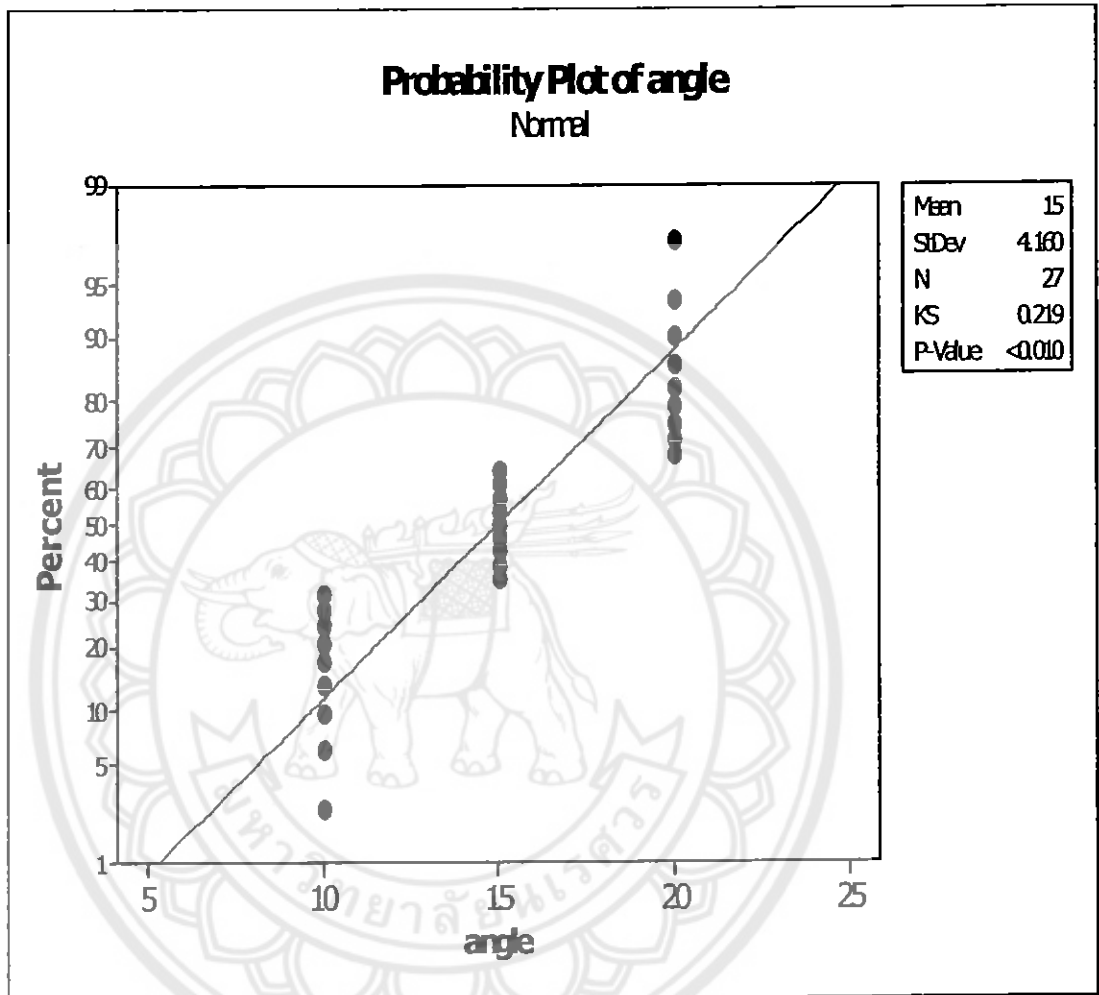
$H_1$  : ข้อมูลสมมุติของดอกกัตไม่มีการแจกแจงเป็นแบบปกติ

ที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$

สถิติทดสอบ *Kolmogorov-Smirnov(K-S Test)* = 0.219

การตัดสินใจ เนื่องจากค่า  $Kolmogorov-Smirnov(K-S Test) = 0.219 > \alpha = 0.05$  จึงยอมรับ  $H_0$

สรุปว่า ข้อมูลมุมของดอกกัทมีการแจกแจงเป็นแบบปกติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงการแจกแจงเป็นแบบปกติขององศาดอกกัท

$H_0$  : ข้อมูลความเร็วรอบสปินเดิลมีการแจกแจงเป็นแบบปกติ

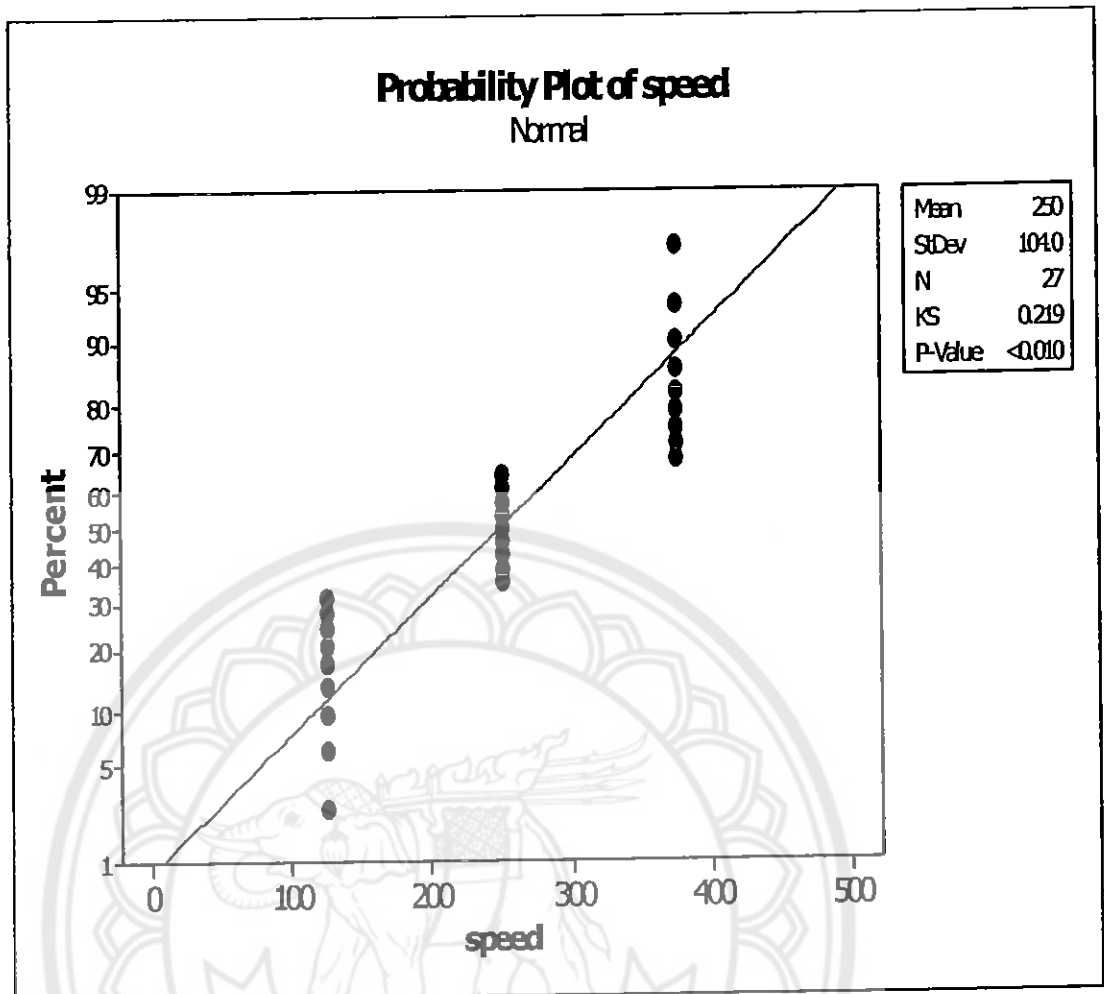
$H_1$  : ข้อมูลความเร็วรอบสปินเดิลไม่ได้มีการแจกแจงเป็นแบบปกติ

ที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$

สถิติทดสอบ  $Kolmogorov-Smirnov(K-S Test) = 0.219$

การตัดสินใจ เนื่องจากค่า  $Kolmogorov-Smirnov(K-S Test) = 0.219 > \alpha = 0.05$  จึงยอมรับ  $H_0$

สรุปว่า ข้อมูลความเร็วรอบดอกกัทมีการแจกแจงเป็นแบบปกติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงการแจกแจงเป็นแบบปกติของความเร็วยานของดอกกัท

$H_0$  : ข้อมูลความเร็วของผิวขี้นงานมีการแจกแจงเป็นแบบปกติ

$H_1$  : ข้อมูลความเร็วของผิวขี้นงานไม่ได้มีการแจกแจงเป็นแบบปกติ

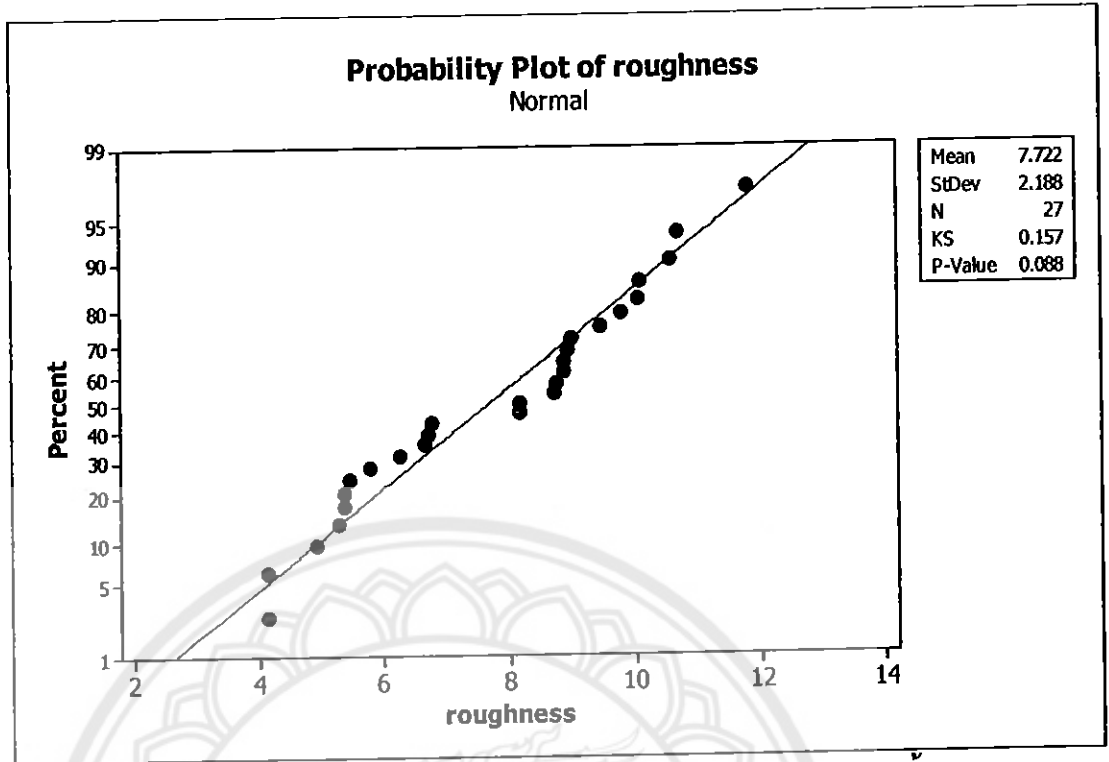
ที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$

สถิติทดสอบ *Kolmogorov-Smirnov* ( $K-S$  Test) = 0.157

การตัดสินใจ เนื่องจากค่า *Kolmogorov-Smirnov* ( $K-S$  Test) = 0.157 >  $\alpha = 0.05$  จึง

ยอมรับ  $H_0$

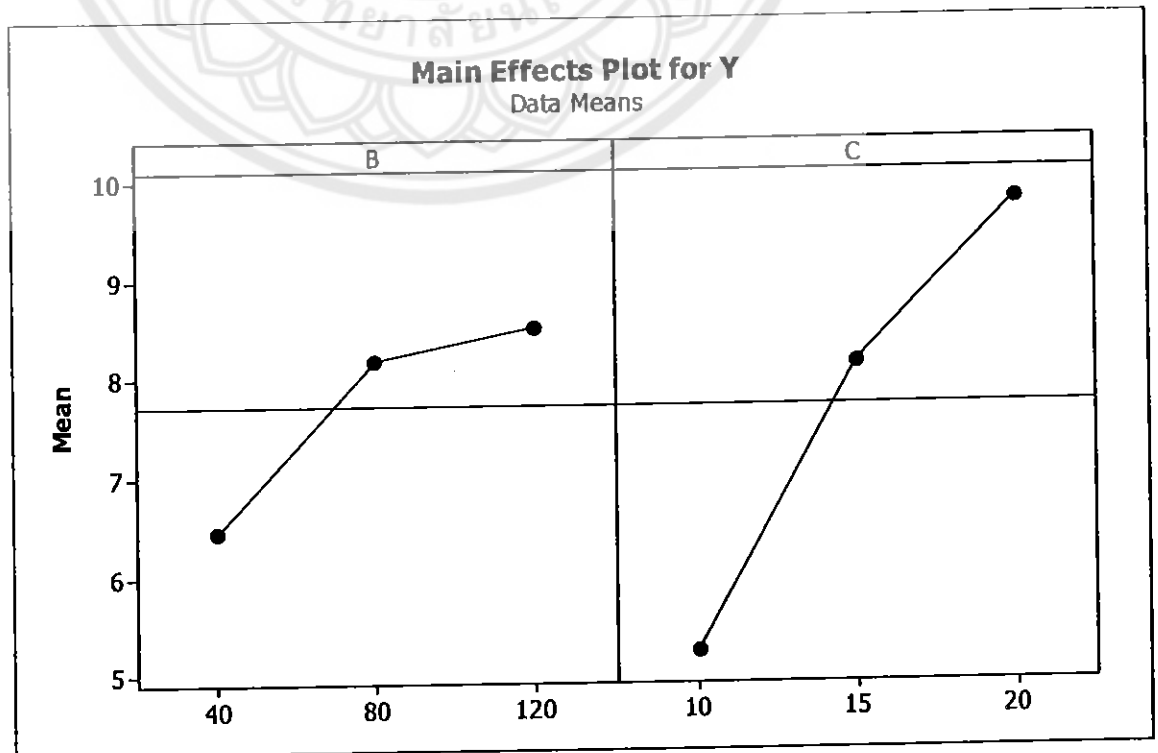
สรุปว่า ข้อมูลความเร็วของผิวขี้นงานมีการแจกแจงเป็นแบบปกติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงการแจกแจงเป็นแบบปกติของความเรียบผิวของชิ้นงาน

#### 4.6.3 การวิเคราะห์ผลจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน

Main Effects เป็นผลที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับผลตอบ (Response) ที่เกิดจากการเปลี่ยนระดับของปัจจัยนั้นๆ ซึ่งเป็นความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยที่ระดับต่างๆของปัจจัยนั้นๆซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์ จะได้ดังรูปที่ 4.11 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.11 แผนภูมิแสดงผลของปัจจัยหลัก



จากรูปที่ 4.11 สามารถวิเคราะห์ปัจจัยหลัก (Main Effect) ได้ดังนี้คือ

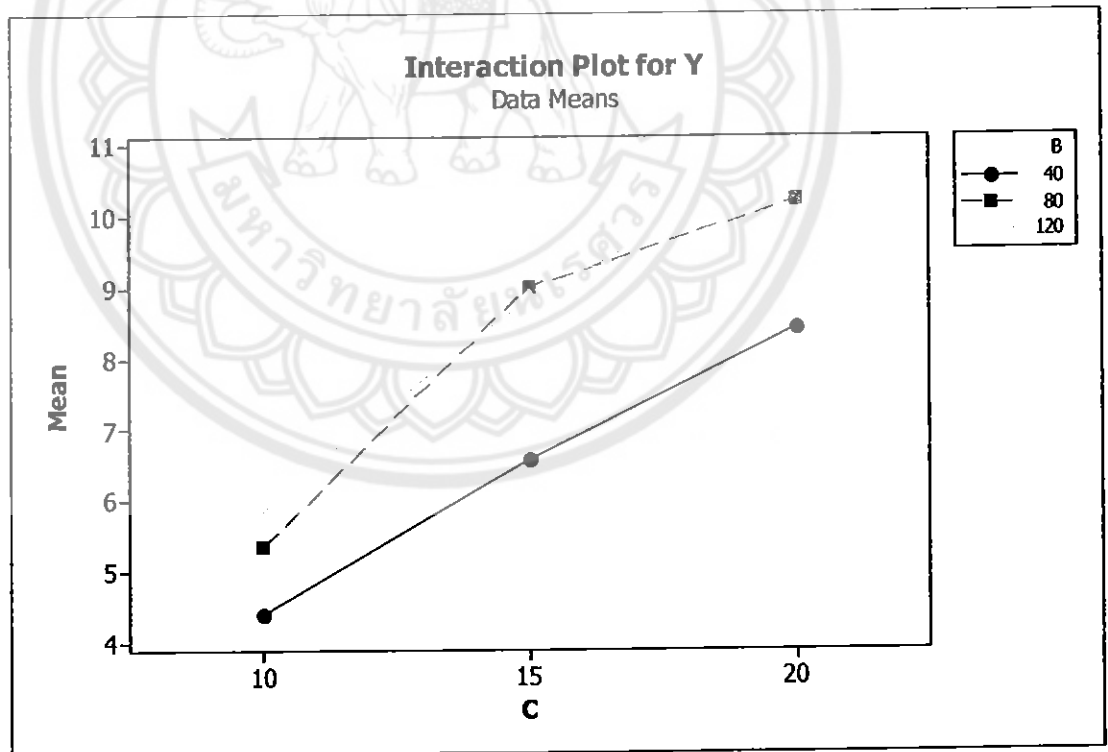
- อัตราการป้อนของโต๊ะงาน

จากแผนภูมิจะเห็นได้ว่าอัตราการป้อนของโต๊ะงานที่เหมาะสมคืออัตราการป้อนของโต๊ะงานโดยเฉลี่ยที่ 120 มิลลิเมตรต่อนาที จะได้ค่าความเรียบผิวที่มีค่าสูงกว่าอัตราการป้อนของโต๊ะงานที่ 40 มิลลิเมตรต่อนาที และที่ 80 มิลลิเมตรต่อนาทีสรุปได้ว่าอัตราการป้อนของโต๊ะงานเป็นปัจจัยที่มีผลต่อความเรียบผิวของชิ้นงาน

- องศาของดอกกัด

จากแผนภูมิจะพบว่า ค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูลจะเห็นได้ว่ายิ่งองศาของดอกกัดเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความเรียบผิวของชิ้นงานมีค่ามากขึ้น สรุปได้ว่าองศาของดอกกัดเป็นปัจจัยที่มีผลต่อความเรียบผิวของชิ้นงาน

การมีอันตรกิริยา เป็นผลตอบของปัจจัยหนึ่ง ซึ่งขึ้นอยู่กับระดับของปัจจัยอื่นๆ ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab จะได้ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 แผนภูมิแสดงอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย

ในการวิเคราะห์อันตรกิริยานั้น ซึ่งเป็นผลที่เกิดขึ้นร่วมกันระหว่าง 2 ปัจจัย นั้นเราจะพิจารณาได้ดังนี้คือ อันตรกิริยาระหว่าง อัตราการป้อนของโต๊ะงานและองศาของดอกกัดนั้นจากรูปที่ 4.12 เราจะกล่าวได้ว่า ถ้าใช้อัตราการป้อนของโต๊ะงานและองศาของดอกกัดที่มีเหมาะสมแล้วจะทำให้ความเรียบผิวของชิ้นงานมีค่าดี

#### 4.6.4 การวิเคราะห์การถดถอย

เป็นการศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม (Dependent Variable) ซึ่งเป็นตัวแปรที่แปรเปลี่ยนไปตามการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรอีกตัวหนึ่งที่เรียกว่าตัวแปรอิสระ (Independent Variable) ซึ่งการวิเคราะห์ที่ได้เป็นการถดถอยแบบพหุคูณ เนื่องจากเป็นการศึกษาความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างตัวแปรตามหนึ่งตัว กับตัวแปรอิสระมากกว่า 1 ตัวซึ่งมีสมการถดถอยแบบพหุคูณดังต่อไปนี้

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_1 X_2 + \beta_4 X_1^2 + \beta_5 X_2^2 + \dots + \beta_k X_k \quad (4.1)$$

##### 4.6.4.1 การทดสอบปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อผลการทดลอง

ตารางที่ 4.4 Analysis of Variance for Y, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Speed	2	0.3849	0.2848	0.1424	0.89	0.437
Feed	2	22.0622	20.6723	10.3362	64.36	0
Angle	2	96.1147	95.5673	47.7837	297.53	0
Speed*Feed	2	0.1229	0.1855	0.0927	0.58	0.576
Speed*Angle	2	0.7659	0.9266	0.4633	2.88	0.095
Feed*Angle	2	1.453	1.2693	0.6346	3.95	0.048
Speed*Feed*Angle	2	1.588	1.588	0.794	4.94	0.027
Error	12	1.9272	1.9272	0.1606		
Total	26	124.419				

จากการทดสอบตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อความเรียบผิวของชิ้นงานด้วยโปรแกรม Minitab จะทำให้ทราบว่า ตัวแปรใดส่งผลกระทบต่อความเรียบผิวชิ้นงาน

$H_0$ : ไม่ส่งผลกระทบต่อความเรียบผิว

$H_1$ : ส่งผลกระทบต่อความเรียบผิว

จากตาราง

Speed: P-value=0.437 >  $\alpha=0.05$  ไม่ส่งผลกระทบต่อความเรียบผิว

Feed: P-value=0 <  $\alpha=0.05$  ส่งผลกระทบต่อความเรียบผิว

Angle: P-value=0 <  $\alpha=0.05$  ส่งผลกระทบต่อความเรียบผิว

จากการทดสอบ จะเห็นได้ว่า ตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อความเรียบผิว คือ อัตราการป้อนของ โต้ะงานและองศาของดอกกัด เราจึงไม่นำความเร็วรอบของดอกกัด มาทำการวิเคราะห์

จากการวิเคราะห์ความถดถอยแบบพหุคูณด้วยโปรแกรม Minitab ได้ผลเป็นสมการต่อไปนี้

Feed = อัตราการป้อนของโต้ะงาน

Angle = องศาของดอกกัด

$$\text{Roughness} = -7.68 + (0.0824\text{Feed}) + (1.14\text{Angle}) + (0.000952\text{Feed} \times \text{angle}) - (0.000443\text{Feed}^2) - (0.0253\text{Angle}^2) \quad (4.2)$$

ตารางที่ 4.5 Regression Analysis: R<sub>a</sub> versus อัตราการป้อนของโต้ะงาน, องศาของดอกกัด

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-7.680	2.180	-3.52	0.002
อัตราการป้อนโต้ะชิ้นงาน	0.08235	0.02450	3.36	0.003
องศา	1.1402	0.2658	4.29	0.000
อัตราการป้อนโต้ะชิ้นงานxองศา	0.0009521	0.0007590	1.25	0.223
อัตราการป้อนโต้ะชิ้นงานยกกำลังสอง	-0.0004432	0.0001342	-3.30	0.003
องศายกกำลังสอง	-0.025333	0.00858	-2.95	0.008
S = 0.525853 R-Sq = 95.3% R-Sq (adj.) = 94.2%				

ตารางที่ 4.6 Regression Analysis: R<sub>a</sub>

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	5	118.612	23.722	85.79	0.00
Residual Error	21	5.807	0.277		
Lack of Fit	3	1.360	0.453	1.83	0.177
Pure Error	18	4.447	0.247		
Total	26	124.419			

จากตารางทำการทดสอบค่าสามารถสร้างสมการถดถอยได้หรือไม่

H<sub>0</sub>: β<sub>i</sub> = 0 ไม่มีสมการถดถอย

H<sub>1</sub>: β<sub>i</sub> ≠ 0 สามารถสร้างสมการถดถอยได้

จากตารางให้ค่า F = 85.79

P-value = 0.00

การตัดสินใจ เมื่อค่า P-Value = 0.00 < α = 0.05 จึงปฏิเสธ H<sub>0</sub>

ดังนั้นจะสรุปได้ว่า สมการถดถอยสามารถสร้างได้ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

จากตารางทำการทดสอบค่าสามารถสร้างสมการถดถอยได้หรือไม่

$H_0$  : สมการถดถอยมีความเหมาะสม

$H_1$  : สมการถดถอยขาดความเหมาะสม

การตัดสินใจ เมื่อค่า P-Value = 0.177 >  $\alpha$  = 0.05 จึงยอมรับ  $H_0$

ดังนั้นจะสรุปได้ว่า สมการมีความเหมาะสม

จากตารางสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 94.2 ซึ่งหมายความว่า ค่าความเรียบผิว (Y) ขึ้นอยู่กับอัตราการป้อนของโต๊ะงาน (Feed) และองศาของดอกกัด (Angle) ประมาณ ร้อยละ 94.2 ส่วนอีก ร้อยละ 5.8 จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบอื่นๆ ที่ไม่ได้นำมาศึกษาในที่นี้

4.6.5 การวิเคราะห์ผลค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างการคำนวณจากสมการถดถอยและค่าเฉลี่ยจากการทดลอง

เป็นการหาค่าความคลาดเคลื่อนของสมการที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลอง ที่ได้มาจากตัวแปรสองตัวแปรที่ใช้ในการทดลองคือ อัตราการป้อนของโต๊ะงานและองศาของดอกกัด โดยกำหนดช่วงของการทดลองขององศาดอกกัดที่ช่วง 10-20 องศา และอัตราการป้อนของโต๊ะงานที่ช่วง 40-120 มิลลิเมตรต่อนาที

ในการทดสอบสมการครั้งนี้ได้ทำการทดลองหาข้อมูลการทดลองอีกหนึ่งชุดที่มีค่าขององศาดอกกัดและอัตราการป้อนของโต๊ะงานที่อยู่ในช่วงการทดลองในครั้งแรก โดยกำหนดองศาของดอกกัดที่ 11 องศาและกำหนดอัตราป้อนของโต๊ะงานที่ 100 มิลลิเมตรต่อนาที เพื่อให้ได้ข้อมูลที่จะนำมาทดสอบความถูกต้องของสมการ ซึ่งได้ข้อมูลการทดลองและค่าความคลาดเคลื่อนแสดงได้ ดังตารางที่ 4.7 นี้

ตารางที่ 4.7 การวิเคราะห์ผลค่าความคลาดเคลื่อนของความเรียบผิว ( $R_a$ ) ระหว่างการคำนวณจากสมการถดถอยและค่าเฉลี่ยจากการทดลองที่มุมองศาดอกกัด 11 องศา

ครั้งที่	ค่าความเรียบผิว ( $R_a$ ) จากการทดลอง (ไมโครเมตร)	ค่าความเรียบผิว ( $R_a$ ) เฉลี่ยที่ได้จากการทดลอง (ไมโครเมตร)	ค่าความเรียบผิว ( $R_a$ ) ที่ได้จากการคำนวณ (ไมโครเมตร)	ค่าความคลาดเคลื่อน (ร้อยละ)
1	6.66	6.69	6.65	0.59
2	6.68			
3	6.74			

หมายเหตุ ความคลาดเคลื่อน ร้อยละ 0.59 ในการทดลองนี้มีการควบคุม 2 ปัจจัย คือ อัตราการป้อนของโต๊ะงานและองศาดอกกัดเท่านั้น

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผล

ผู้จัดทำได้นำหลักการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment, DOE) โดยใช้วิธีการทดลองแบบแฟคทอเรียลแบบสามปัจจัยสามระดับและใช้โปรแกรม Minitab เข้ามาช่วยในการทดลองและวิเคราะห์ปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อความเรียบผิวของชิ้นงานซึ่งได้แก่อัตราการป้อนของโต๊ะงาน ความเร็วรอบของดอกกัดและองศาของดอกกัดโดยการนำโลหะอลูมิเนียมอัลลอยด์ 7075 มาทำการกัดด้วยเครื่อง CNC Machining Center VF 1 ด้วยดอกกัด Flat End Mill ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตรจากนั้นจึงนำลูมิเนียมที่ทำการกัดแล้วไปวัดความเรียบผิว ( $R_a$ ) ด้วยเครื่องวัดความเรียบผิวรุ่น SV-400 และนำผลจากการวัดความเรียบผิวไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทำให้ทราบถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อความเรียบผิวของชิ้นงานและทำให้สรุปได้ว่าอัตราการป้อนของโต๊ะงานและองศาของดอกกัดส่งผลต่อความเรียบผิวของชิ้นงานพบว่าอัตราการป้อนของโต๊ะงานที่ 120 มิลลิเมตรต่อนาที และที่องศาของดอกกัด 10 องศา จะให้ความเรียบผิว ( $R_a$ ) ที่ดีและได้สมการแบบพหุคูณ คือ  $Roughness = -7.68 + (0.0824Feed) + (1.14Angle) + (0.000952Feed \times angle) - (0.000443Feed^2) - (0.0253Angle^2)$  และผลค่าความคลาดเคลื่อนของความเรียบผิว ( $R_a$ ) ระหว่างการคำนวณจากสมการถดถอยและค่าเฉลี่ยจากการทดลองจะมีค่าความคลาดเคลื่อนที่ ร้อยละ 0.59

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการศึกษาตัวแปรทั้งหมด 3 ตัวแปร คือ อัตราการป้อนของโต๊ะงาน ความเร็วรอบดอกกัด และองศาของดอกกัดกับผิวชิ้นงาน ซึ่งยังมีอีกหลายปัจจัยที่ไม่ได้ทำการควบคุมในการทดลองครั้งนี้เช่น ลักษณะผิวชิ้นงาน, ความลึกในการกัด, ชนิดดอกกัด, ชนิดของวัสดุ, คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ, การหมุนกัดหยาบ, การหมุนกัดละเอียด และอื่นๆ ตัวแปรที่กล่าวถึงข้างต้น อาจจะมีผลต่อความเรียบผิวของชิ้นงาน

5.2.2 การทดลองนี้ได้จุดเหมาะสมขององศาการกัดที่ 10 องศา ซึ่งได้ทำการทดลองในช่วง 10-20 องศา และได้อัตราป้อนของโต๊ะงานที่ 120 มิลลิเมตรต่อนาที ได้ทำการทดลองในช่วง 40-120 มิลลิเมตรต่อนาที ผู้ที่จะนำไปศึกษาต่อควรทำการทดลองหาองศากัดในช่วงที่ต่ำกว่า 10 องศาและทดลองหาอัตราการป้อนของโต๊ะงานที่มีช่วงมากกว่า 120 มิลลิเมตรต่อนาที อาจจะทำให้ทราบถึงแนวโน้มของความเรียบผิวที่ดีกว่า

## เอกสารอ้างอิง

- ปัทมา กางถัน, รุ่งนภา ร่องจิต. (2550). "การศึกษาตัวแปรของเครื่องกลึงที่มีผลต่อความเรียบผิวของชิ้นงาน". ปรินญาณิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต., มหาวิทยาลัยนเรศวร, พิษณุโลก
- ปารเมศ ชุติมา. (2545). "การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม" สำนักพิมพ์แห่งจุฬามหาวิทยาลัย พิมพ์ครั้งที่ 1
- พลากร สุภาพ, ชัยฤทธิ์ เฟื่องแจ้ง, ธนวุฒิ ภูสุวรรณ. (2548). "การพัฒนาโปรแกรมออกแบบ Unigraphics สำหรับเครื่องกัดแนวตั้ง 5 แกนแกน". ปรินญาณิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต., มหาวิทยาลัยนเรศวร, พิษณุโลก
- รศ.ดร.ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา, รศ.ดร.พงศ์ชนัน เหลืองไพโรบล. (2545). "การออกแบบและการวิเคราะห์การทดลอง". บริษัท สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด. พิมพ์ครั้งที่ 1
- วรวิทย์ ถิ่นทับ, วิศวะ ปรีชาจารย์. (2550). "การศึกษาตัวแปรของเครื่องเจียรนัยเพลากลมที่มีผลต่อความเรียบผิวของชิ้นงาน". ปรินญาณิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต., มหาวิทยาลัยนเรศวร, พิษณุโลก
- วีรวัฒน์ มะณี. (2552). "การศึกษาตัวแปรของเครื่องกัดแนวตั้งที่มีผลต่อความเรียบผิวของชิ้นงาน". ปรินญาณิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต., มหาวิทยาลัยนเรศวร, พิษณุโลก
- สวัสดิพงษ์ วอทอง. (2552). "กรณีศึกษาผลกระทบของตัวแปรที่มีผลต่อผิวงานกัดโลหะ". ปรินญาณิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต., มหาวิทยาลัยนเรศวร, พิษณุโลก
- สำนักพัฒนาอุตสาหกรรมสนับสนุนกรมส่งเสริมอุตสาหกรรมและสถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม. (2542). "การโปรแกรมและการทำงานสำหรับเครื่องกลึงและเครื่องกัด" พิมพ์ครั้งที่ 1
- CNC Software, Inc. Master Family of Product. (online). <http://mastercam/product/Default.aspx> (วันที่สืบค้นข้อมูล : 15 กันยายน 2554).
- HasanOktem, TuncayErzurumlu, FehmiErzincanli. "prediction of minimum surface roughness in end milling mold parts using neural network and genetic algorithm" .<http://www.elsevier.com> (สืบค้นเมื่อวันที่ 19 ตุลาคม 2554)
- M. C. Kang, K. K. Kim, D. W. Lee, J. S. Kim and N. K. Kim, "characteristics of inclined planes according to the variations of cutting direction in high-speed ball-end milling". The international journal of advanced manufacturing technology (สืบค้นเมื่อวันที่ 10 มกราคม 2555)



### ก.1 NC Code ที่ใช้ในการทดลอง

ที่มุม 0, 5, 10 องศา

O

00973

N001	T03	M06			N028	X5
N002	M03	S			N029	Z-9.08
N003	G90	G17	G54		N030	X-47.78 ZZ5
N004	X00	Y-10	Z10	M08	N031	X5
N005	G01	X5	Y5	F	N032	Z-9.39
N006	Z00				N033	X-48.63 Z5
N007	X5				N034	X5
N008	Y5				N035	M05
N009	Z-1.04				N036	M30
N010	X-17.49	Z5				
N011	X5					
N012	Z-3.11					
N013	X-25.21	Z5				
N014	X5					
N015	Z-4.41					
N016	X-29.07	Z5				
N017	X5					
N018	Z-5.18					
N019	X-32.93	Z5				
N020	X5					
N021	Z-6.21					
N022	X-36.78	Z5				
N023	Z-7.25					
N024	X-40.64	Z5				
N025	X5					
N026	Z-8.28					
N027	X-44.5	Z5				

ที่มุม 15, 20 องศา

O

00973



N001 T03 M06  
 N002 M03 S  
 N003 G90 G17 G54  
 N004 X00 Y-10 Z10 M08  
 N005 G01 X5 Y5 F  
 N006 Z00  
 N007 X5  
 N008 Y5  
 N009 Z-1.07  
 N010 X-11.44Z5  
 N011 X5  
 N012 Z-2.13  
 N013 X-14.33Z5  
 N014 X5  
 N015 Z-3.2  
 N016 X-17.22Z5  
 N017 X5  
 N018 Z-4.26 N038 X5  
 N019 X-20.11Z5N039 Z-12.59  
 N020 X5 N040 X-42.69Z5  
 N021 Z-5.33 N041 X5  
 N022 X-23.25N042 Z-12.91  
 N023 X5 N043 X-43.55Z5

N024 Z-6.4 N044 X5

N025 X-25.89Z5N045 M05

N026 X5 N046 M30

N027 Z-7.46

N028 X-28.78Z5

N029 X5

N030 Z-8.53

N031 X-31.67Z5

N032 X5

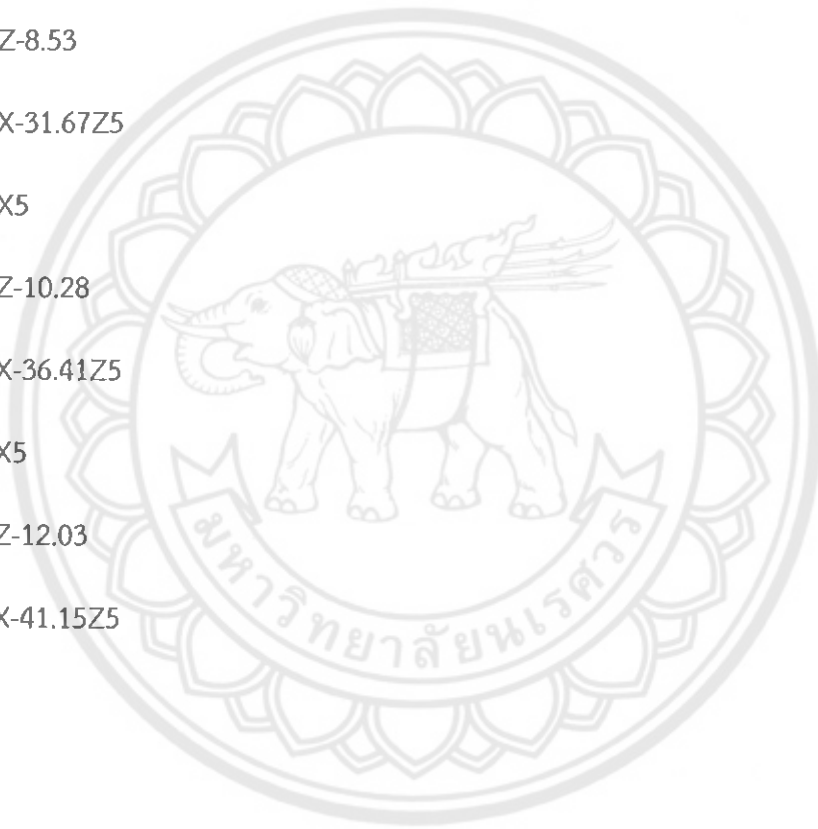
N033 Z-10.28

N034 X-36.41Z5

N035 X5

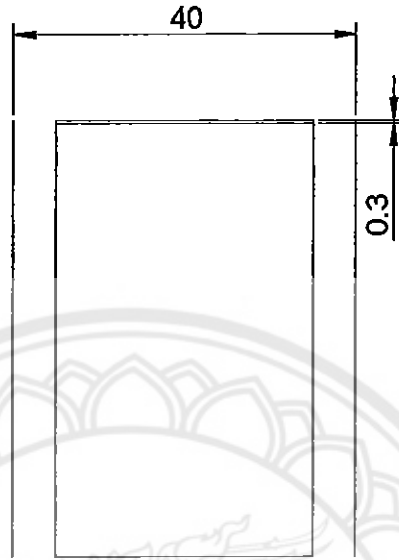
N036 Z-12.03

N037 X-41.15Z5

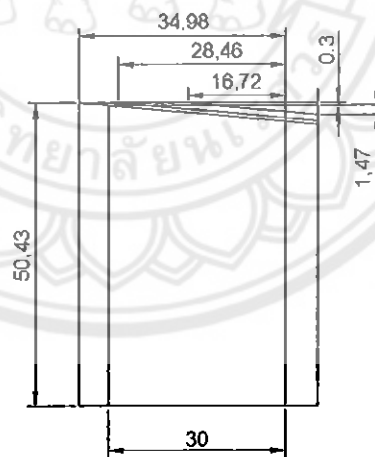


## ก.2 แบบระยະการกััดจากโปรแกรม AUTO CAD

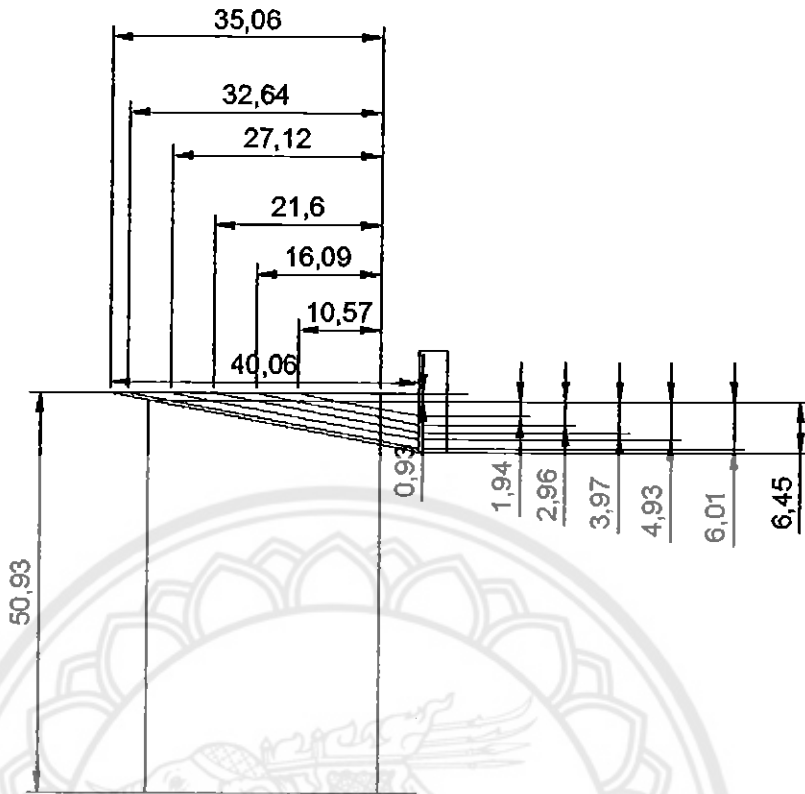
ระยະการกััด ของ 0 องศา



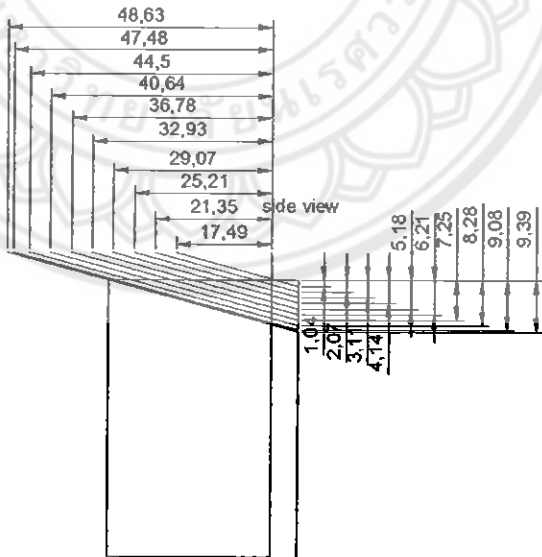
ระยະการกััด ของ 5 องศา



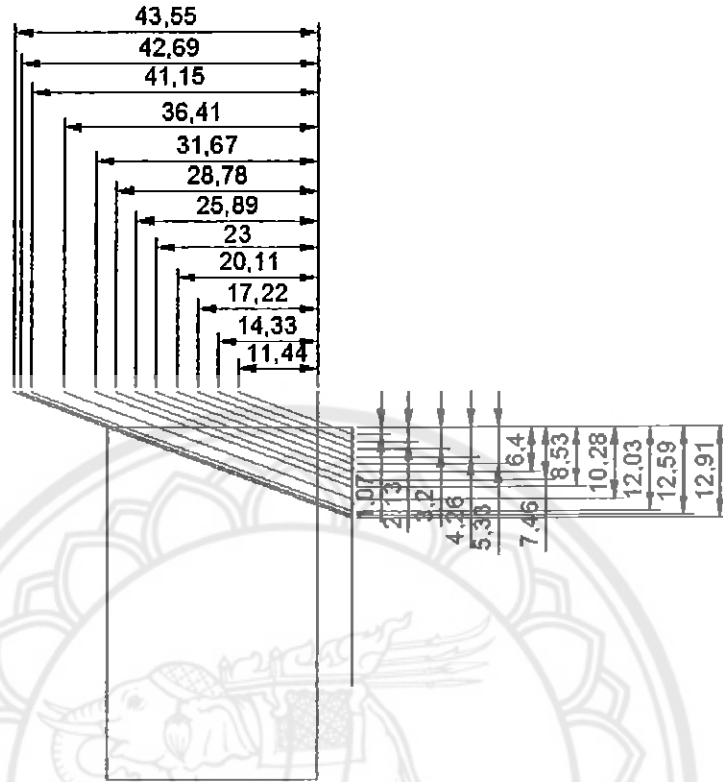
ระยະการกััด ของ 10 องศา



ระยะการกัด ของ 15 องศา



ระยะการกัด ของ 20 องศา



รูปที่ ก.2.1 ชิ้นงานที่ได้จากการทดลอง

### ก.3 ตัวอย่างค่าความเรียบผิวที่ได้จากการทดลองจากเครื่อง Mitutoyo SurfTest SV-400

<b>R-PROFILE</b>		<b>R-PROFILE</b>	
$\lambda_c$	0.8 mm	$\lambda_c$	0.8 mm
L	0.8 mm	L	0.8 mm
N	5	N	5
Ra	4.91 $\mu\text{m}$	Ra	4.91 $\mu\text{m}$

ที่อัตราความเร็วของดอกกัดที่ 250 รอบต่อนาที, อัตราการป้อนของโต๊ะงาน 40 มิลลิเมตรต่อนาที ที่องศาการเดินของดอกกัด 10 องศา

<b>R-PROFILE</b>		<b>R-PROFILE</b>	
$\lambda_c$	0.8 mm	$\lambda_c$	0.8 mm
L	0.8 mm	L	0.8 mm
N	5	N	5
Ra	6.71 $\mu\text{m}$	Ra	6.70 $\mu\text{m}$

ที่อัตราความเร็วของดอกกัดที่ 375 รอบต่อนาที, อัตราการป้อนของโต๊ะงาน 120 มิลลิเมตรต่อนาที ที่องศาการเดินของดอกกัด 10 องศา

<b>R-PROFILE</b>		<b>R-PROFILE</b>	
$\lambda_c$	0.8 mm	$\lambda_c$	0.8 mm
L	0.8 mm	L	0.8 mm
N	5	N	5
Ra	6.66 $\mu\text{m}$	Ra	6.68 $\mu\text{m}$

ที่อัตราความเร็วของดอกกัดที่ 250 รอบต่อนาที, อัตราการป้อนของโต๊ะงาน 100 มิลลิเมตรต่อนาที ที่องศาการเดินของดอกกัด 11 องศา