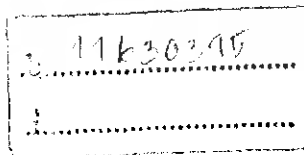


การศึกษาอิทธิพลและปัจจัยที่มีผลต่อความหยาบผิวของเหล็กกล้า  
เครื่องมือ DC 53 ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยเครื่องกัดอัตโนมัติ



นาย ชัชวาลย์ ทองชิว  
นาย ทรงพล จงเสถียรภาพ  
นาย ทิพนันทร สวาทหยุด

เลขที่.....  
เลขทะเบียน..... 62763  
วันเดือนปี 22 ส.ค. 2549



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**AN INVESTIGATION ON INFLUENCE OF MILLING  
PARAMETERS ON SURFACE ROUGHNESS OF DC 53  
TOOL STEEL**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2005**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองปริญญาโท

หัวข้อปริญญาโท การศึกษาอิทธิพลและปัจจัยที่มีผลต่อความหยาบผิวของเหล็กกล้าเครื่องมือ  
DC 53 ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยเครื่องกัดอัตโนมัติ  
AN INVESTIGATION ON INFLUENCE OF MILLING  
PARAMETERS ON SURFACE ROUGHNESS OF DC 53 TOOL STEEL

นักศึกษา

นายชัชวาลย์ ทองชีว รหัสประจำตัว 46015703  
นายทรงพล จงเสถียรภาพ รหัสประจำตัว 46015709  
นายทิพนันทร สาวหยุด รหัสประจำตัว 46015710

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาโท

  
(ผศ.ดร. กรรณชัย กัลยาศิริ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การศึกษาอิทธิพลและปัจจัยที่มีผลต่อความหยาบผิวของเหล็กกล้าเครื่องมือ DC 53 ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยเครื่องกัดอัตโนมัติ
นักศึกษา	นายชัชวาลย์ ทองชีว นายทรงพล องเสถียรภาพ นายทิพนทร สาวหยุด
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา	2548
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	ผศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ

### บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความหยาบผิวของเหล็กกล้าเครื่องมือ DC 53 ที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องกัดอัตโนมัติ โดยการออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ผลด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนร่วม (Analysis of Covariance: ANCOVA) เพื่อหาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน โดยตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย อัตราการป้อนชิ้นงาน ความเร็วรอบ ความลึกของการตัดและการสึกหรอของดอกกัดจากการศึกษา สามารถสรุปได้ว่าที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  ปัจจัยที่มีผลต่อความหยาบผิวคืออัตราการป้อนชิ้นงานและการสึกหรอของดอกกัด

**Thesis Title** An Investigaton on Influence of Milling Parameters on Surface Roughness of DC 53 Tool Steel

**Student** Mr.Chutchawarn Thongchew  
Mr.Songphon Chongsathierapap  
Mr.Thipphanate Saoyud

**Degree** Bachelor of Engineering in Industrial Engineering  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

**Academic Year** 2005

**Thesis Advisor** Asst. Prof. Dr.Kannachai Kanlayasiri

### ABTRACT

This project is aimed to investigate milling parameters that affect surface roughness of DC 53 tool steel. Analysis of covariance was used to design and analyze the experiment. The investigated parameters included feed rate, spindle speed, depth of cut, and tool wear. At significance level of 0.05 ( $\alpha = 0.05$ ), results showed that feed rate and tool wear had significant effects on surface roughness of the end- milled work piece.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่องการศึกษาอิทธิพลและปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้าเครื่องมือ DC 53 ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยเครื่องกัดอัตโนมัติฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเพราะได้รับการสนับสนุนและคำแนะนำของอาจารย์ทุกท่านเป็นอย่างดีตลอดมาตั้งแต่เริ่มต้นจนปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จเสร็จสมบูรณ์ลุล่วงไปได้ด้วยดี กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ

ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงสำหรับการให้โอกาสในการศึกษาปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ รวมทั้งมอบความรู้ คำแนะนำ ความช่วยเหลือทุกๆ ด้าน รวมถึงความเอาใจใส่ในการทำปริญญานิพนธ์เป็นอย่างดีและทุกๆ สิ่งที่อาจารย์มอบให้แก่กลุ่มผู้วิจัยตลอดระยะเวลาที่ผ่านมาในการทำโครงการงาน

ผศ.ดร.สรรพสิทธิ์ ลิ้มบรรณ์ กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับบรรยากาศดี ๆ ทำให้ไม่กดดันเวลาขึ้นสอบปริญญานิพนธ์

อาจารย์ชาวลิต หามนตรี กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับทุกคำตอบทุกคำแนะนำ และความห่วงใยตลอดระยะเวลาการทำปริญญานิพนธ์

อาจารย์วีรสู อุดมเพทายกุล ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงให้ ความกรุณาให้ใช้เครื่องเครื่องกัดอัตโนมัติ และเสียสละเวลามาให้ความรู้ คำแนะนำด้านการใช้เครื่องกัดอัตโนมัติ และมอบความสะดวกในการทดลองและปฏิบัติงานตลอดระยะเวลาที่ผ่านมาในการทำโครงการงาน

ขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และพี่น้องในตระกูล เป็นอย่างสูงที่สุดในการให้โอกาสในการศึกษาตลอด ระยะเวลาที่ผ่านมาที่มอบให้แก่กลุ่มผู้วิจัยทำให้มีความสำเร็จที่สดใสในวันนี้

ขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า ภาควิชาการกระบี่ เป็นที่ที่ให้มากกว่าคำว่าวิชาการ

ขอบคุณเพื่อนๆ 3 ZN และพี่น้องชาวลาดกระบี่ทุกคนที่ให้ความรู้ดีๆ ที่มีให้กันตลอดระยะเวลาที่ ผ่านมาและให้กำลังใจในการทำปริญญานิพนธ์ตลอดเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณหนังสือทุกเล่มที่ใช้ในการศึกษาข้อมูลในการค้นคว้าในการทำปริญญานิพนธ์และ แหล่งความรู้ทุกแหล่งข้อมูลอันทรงคุณค่าสำหรับการทำโครงการงานนี้

นายชัชวาลย์ ทองชีวะ

นายทรงพล จงเสถียรภาพ

นายทิพนทร สวาทหยุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 เครื่องจักรกลซีเอ็นซีสำหรับงานกัด.....	3
2.1.1 องค์ประกอบของเครื่องจักรกลซีเอ็นซี.....	3
2.1.2 การทำงานของเครื่องจักรกลซีเอ็นซี.....	4
2.1.3 ข้อมูลการตัดเนื้อโลหะสำหรับงานกัด.....	4
2.2 ทฤษฎีการตัดโลหะ.....	6
2.2.1 เครื่องมือสำหรับนิวเมอริคอลลคอนโทรล.....	6
2.2.2 ทฤษฎีงานกัดความหมายของงานกัด.....	8
2.3 การสึกหรอของเครื่องมือกล.....	11
2.3.1 ชนิดของการสึกหรอ.....	11
2.4 ความสำคัญของความหยาบผิว.....	13
2.4.1 ความหยาบผิว.....	14
2.4.2 การเกิดสภาพของผิว.....	14
2.4.3 ลักษณะการเบี่ยงเบนของผิวชิ้นงาน.....	15
2.4.4 รายละเอียดของเครื่องวัดค่าความหยาบผิว.....	18
2.4.5 แผ่นเทียบผิว.....	18
2.4.6 ลักษณะ โครงสร้างแผ่นเทียบผิว.....	18
2.4.7 การใช้แผ่นเทียบผิวตรวจสอบผิวงาน.....	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.8 ข้อควรระวังและการดูแลรักษาแผ่นเทียบผิว.....	19
2.4.9 คำที่เกี่ยวข้องกับความหยาบผิว.....	19
2.4.10 วิธีการแสดงค่าความหยาบผิว.....	20
2.5 หลักการออกแบบการทดลอง.....	22
2.5.1 ปัจจัยในการผลิต.....	23
2.5.2 วัตถุประสงค์ของการออกแบบการทดลอง.....	24
2.5.3 คำจำกัดความ.....	24
2.5.4 หลักในการออกแบบการทดลอง.....	25
2.5.5 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง.....	26
2.5.6 การใช้หลักทางสถิติในการทดลอง.....	27
2.5.7 การตั้งสมมติฐานในการตรวจสอบ.....	27
2.5.8 ชนิดของแผนการออกแบบการทดลอง.....	29
2.5.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	31
2.5.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนร่วม.....	33
<b>บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง</b>	
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	35
3.1.1 ดอกกัดเฮนมีล.....	35
3.1.2 ชันงานทดลอง.....	36
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	37
3.2.1 เครื่องกัดอัด โนมีตี.....	37
3.2.2 เครื่องวัดค่าความหยาบผิวของชันงาน.....	38
3.2.3 เครื่องวัดค่าการสึกหรอของดอกกัด.....	39
3.3 หลักการออกแบบการทดลอง.....	39
3.3.1 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง.....	39
3.3.2 ทำความเข้าใจถึงปัญหา.....	41
3.3.3 เลือกพารามิเตอร์ ระดับ และขอบเขต.....	41
3.3.4 เลือกการออกแบบการทดลอง.....	41
3.3.5 แผนการทดลอง.....	42
3.4 ขั้นตอนการทดลอง.....	44
3.4.1 ขั้นตอนก่อนการทดลอง.....	45
3.4.2 ขั้นตอนระหว่างการทดลอง.....	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.3 ขั้นตอนหลังการทดลอง.....	45
<b>บทที่ 4 ผลการทดลอง</b>	
4.1 ผลของการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความหนืดของซินงาน.....	53
4.1.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนร่วม.....	55
4.1.2 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ.....	56
4.1.3 ผลการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหนืด.....	64
<b>บทที่ 5 สรุปและวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน</b>	
5.1 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	65
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	66
<b>บรรณานุกรม.....</b>	<b>67</b>
<b>ภาคผนวก ก.....</b>	<b>ผก 1</b>
ก1. ผลการทดลองย่อย.....	ผก 2
ก2. วิเคราะห์ผลการทดลองย่อย.....	ผก 3
ก3. ตารางการวัดค่าการสึกหรอของการทดลองย่อย.....	ผก 6
ก4. แสดงการวัดค่าการสึกหรอของการทดลองย่อย.....	ผก 7
ก5. ตารางการวัดค่าการสึกหรอของการทดลองหลัก.....	ผก 15
ก6. แสดงการวัดค่าการสึกหรอของการทดลองหลัก.....	ผก 16
<b>ภาคผนวก ข.....</b>	<b>ผข 1</b>
ข1. ข้อมูลรายละเอียดคอกกักเอนมิล.....	ผข 2
ข2. แหล่งที่มาของเหล็กที่ใช้ในทดลอง.....	ผข 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงลักษณะการเบี่ยงเบนของผิวชิ้นงาน.....	16
ตารางที่ 2.2 อัตราร้อยระหว่างความยาวต่อร่องลึกความหยาบผิว.....	18
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าเครื่องมือ.....	36
ตารางที่ 3.2 ปัจจัยและระดับที่เลือกใช้ในการทดลอง.....	42
ตารางที่ 3.3 เมตริกการออกแบบการทดลอง.....	42
ตารางที่ 3.4 การสุ่มอย่างสมบูรณ์.....	43
ตารางที่ 3.5 ตารางบันทึกผลการทดลอง.....	44
ตารางที่ 3.6 แสดงการเทียบค่าการสึกหรอของมีดกัดกับค่าความหยาบผิว.....	48
ตารางที่ 4.1 ตารางบันทึกค่าความหยาบผิวของชิ้นงานและค่าการสึกหรอของดอกกัด.....	53
ตารางที่ 4.2 ค่าความหยาบผิวของชิ้นจากการทดลอง.....	54
ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนร่วม.....	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลการตัดเดือนโลหะสำหรับงานกัด.....	5
รูปที่ 2.2 แสดงการสึกหรอด้านหน้าของดอกกัด.....	12
รูปที่ 2.3 แสดงการสึกหรอเป็นหลุมด้านบนของดอกกัด.....	12
รูปที่ 2.4 ช่วงของการเบี่ยงเบนผิวชิ้นงาน.....	15
รูปที่ 2.5 ลักษณะความแตกต่างระหว่างหัวลากกับหัวสัมผัส.....	17
รูปที่ 2.6 จำแนกลักษณะการเบี่ยงเบนผิวชิ้นงาน.....	17
รูปที่ 2.7 รูปหน้าตัดที่เป็นผลและรูปหน้าตัดคัดแปลงของความหยาบ.....	20
รูปที่ 2.8 ค่าพารามิเตอร์ค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยทาง คณิตศาสตร์ของพื้นที่หน้าตัดของค่าความหยาบผิว.....	21
รูปที่ 2.9 ค่าสูงที่สุดของส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลง และค่าความสูงที่มีการเปลี่ยนแปลง 10 จุดของค่าความหยาบผิว.....	22
รูปที่ 2.10 รูปแบบของกระบวนการหรือระบบ.....	23
รูปที่ 2.11 แสดงอิทธิพลที่ไม่มีผลและอิทธิพลที่มีผลของปัจจัยต่อผลิตภัณฑ์.....	24
รูปที่ 2.12 แสดงการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่ไม่มีอันตรกิริยาระหว่างกัน.....	30
รูปที่ 2.13 แสดงการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่มีอันตรกิริยาระหว่างกัน.....	30
รูปที่ 3.1 ดอกกัดเอนมิล.....	36
รูปที่ 3.2 ชิ้นงานเหล็กดีซี 53.....	37
รูปที่ 3.3 เครื่องกัดอัตโนมัติ.....	38
รูปที่ 3.4 เครื่องวัดค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน.....	38
รูปที่ 3.5 เครื่องวัดค่าการสึกหรอของดอกกัด.....	39
รูปที่ 3.6 การวัดมุม.....	47
รูปที่ 3.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสึกหรอของมีดกัดกับค่าความหยาบผิวของพารามิเตอร์ค่าต่ำ.....	49
รูปที่ 3.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสึกหรอของมีดกัดกับค่าความหยาบผิวของพารามิเตอร์ค่ากลาง.....	49
รูปที่ 3.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสึกหรอของมีดกัดกับค่าความหยาบผิวของพารามิเตอร์ค่าสูง.....	50
รูปที่ 3.10 แสดงการสึกหรอของดอกกัดที่ทำให้ห้องเสาทางด้านมุมของคมตัดเปลี่ยนแปลงไป.....	51
รูปที่ 4.1 กราฟการแจกแจงแบบปกติสำหรับค่าส่วนตกค้างของค่าความหยาบผิว.....	56
รูปที่ 4.2 ค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล.....	57
รูปที่ 4.3 ค่าส่วนตกค้างกับค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน.....	58
รูปที่ 4.4 ค่าส่วนตกค้างกับระดับต่างๆ ระดับของค่าอัตราการป้อนชิ้นงาน.....	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.5 ค่าส่วนตกค้างกับระดับต่างๆ ระดับของค่าความเร็วรอบ.....	59
รูปที่ 4.6 ค่าส่วนตกค้างกับระดับต่างๆ ระดับของค่าความลึกของการตัด.....	59
รูปที่ 4.7 แสดงอันตรกิริยาระหว่างค่าอัตราการป้อนชิ้นงาน กับค่าความเร็วรอบกับค่าเฉลี่ยของค่าความหยาบผิว.....	60
รูปที่ 4.8 แสดงอันตรกิริยาระหว่างค่าอัตราการป้อนชิ้นงาน กับค่าความลึกของการตัดกับค่าเฉลี่ยของค่าความหยาบผิว.....	60
รูปที่ 4.9 แสดงอันตรกิริยาระหว่างค่าความเร็วรอบ กับค่าความลึกของการตัดกับค่าเฉลี่ยของค่าความหยาบผิว.....	61
รูปที่ 4.10 แสดงการเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวกับค่าอัตราการป้อนชิ้นงาน.....	62
รูปที่ 4.11 แสดงการเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวกับค่าความเร็วรอบ.....	62
รูปที่ 4.12 แสดงการเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวกับค่าความลึกของการตัด.....	63
รูปที่ 4.13 แสดงลักษณะของการเกิดค่าความหยาบผิว.....	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญของโครงการ

อุตสาหกรรมในยุคปัจจุบันมีเทคโนโลยีใหม่ๆเกิดขึ้นมากมายเพื่อนำมาเพิ่มปริมาณการผลิตและเพิ่มประสิทธิภาพ รวมทั้งยังช่วยลดเวลาในการทำงานเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้น ในเวลานี้น้อยลง จุดมุ่งหมายที่สำคัญ คือ การที่จะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ออกสู่ตลาดเป็นที่ยอมรับและเป็นที่ต้องการของผู้บริโภค ด้วยเหตุนี้เครื่องจักรที่ควบคุมด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์จึงมีบทบาทที่สำคัญอย่างมากในอุตสาหกรรมการผลิต

หากพิจารณาถึงผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่เราเห็นและเราใช้ในชีวิตประจำวัน ในปัจจุบันส่วนแล้วแต่ผลิตด้วยเครื่องจักรที่ทันสมัยส่วนสำคัญที่ควรพิจารณาและไม่ควรมองข้าม คือ ความหยابของผิวชิ้นงานที่เป็นสิ่งบ่งบอกถึงคุณภาพของชิ้นงานที่ผลิตออกมา หากพิจารณาไปตอนเริ่มต้นผลิตชิ้นงาน ที่ได้จากการป้อนขึ้นรูป การฉีดขึ้นรูป เช่น การป้อนขึ้นส่วนรถยนต์ การฉีดขวดน้ำดื่ม เป็นต้น จะเห็นว่าค่าความหยابผิวของชิ้นงานที่ได้นั้นต้องเริ่มมาจากแม่พิมพ์ที่มีคุณภาพซึ่งผิวของแม่พิมพ์ต้องมีความละเอียดอย่างมาก เพื่อที่จะทำให้ชิ้นงานที่ออกมาคุณภาพตามไปด้วย การพัฒนาของเทคโนโลยีสมัยใหม่ไม่ได้ต้องการเฉพาะการควบคุมปรับปรุงความละเอียดเที่ยงตรงของขนาดให้ดีขึ้นเท่านั้น แต่ต้องการปรับปรุงความหยابละเอียดของผิวหน้าบนชิ้นส่วนที่ถูกใช้ทั้งที่ทำงานและไม่ทำงาน มีปฏิกริยารากฐานอยู่ 3 ประการ ซึ่งเป็นตัวที่ทำให้การควบคุมความหยاب ละเอียดของผิวมีความสำคัญซึ่งก็คือ อายุการล้า คุณสมบัติการทนทานและการสึกหรอ

เครื่องจักรกลัดโนมัติที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์มีความสำคัญในการผลิตแม่พิมพ์เป็นอย่างมาก เช่น เครื่องกัดอัดโนมัติ (CNC Vertical Milling Machine) เป็นเครื่องจักรที่ได้รับความนิยมใช้ในการผลิตแม่พิมพ์เพราะสามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน ได้ดีอีกทั้งยังมีความแม่นยำสูงในเรื่องของขนาดที่ต้องการ ความหยابผิวของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องกัดที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์เป็นสิ่งที่ทำให้เห็นถึงคุณภาพของชิ้นงาน

งานวิจัยการทดลองเพื่อการศึกษาความหยابผิวของชิ้นงานของปีการศึกษา 2547 นั้น ได้ทำการศึกษาค่าความหยابผิวของชิ้นงานที่เกิดจากการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรต่าง ๆ ในการทดลองเพียงอย่างเดียวซึ่งขาดในเรื่องของเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองคือ อิทธิพลของการสึกหรอของดอกกัดที่มีต่อค่าความหยابผิว

ดังนั้นงานวิจัยสำหรับปริญญาโทฉบับนี้ จึงเป็นการศึกษาค่าความหยابผิวของชิ้นงานที่เกิดจากการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรต่างๆ ในการทดลอง และการสึกหรอของเครื่องมือที่ใช้ในการกัด ดังนั้นเพื่อให้การใช้งานของเครื่องกัดที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและเกิดประโยชน์สูงสุดจึงจำเป็นต้องหาปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหยابผิวมากที่สุด มีผลอย่างไรต่อค่าความหยابผิวและมีผลมากน้อยเพียงใดต่อค่าความหยابผิวเหตุผลนี้เองจึงเป็นที่มาของการศึกษาอิทธิพลของการสึกหรอของดอกกัดและปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหยابผิวของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องกัดอัดโนมัติ

หลักการทางสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลจากการทดลอง งานวิจัยการทดลองของปีการศึกษา 2547 ได้ใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ในการวิเคราะห์ข้อมูล การวิเคราะห์ความแปรปรวน เป็นการวิเคราะห์โดยไมคำนึงว่าข้อมูลที่จะนำมาวิเคราะห์เป็นไปตามข้อกำหนดหรือเงื่อนไขของแผนการทดลองแบบต่างๆ หรือไม่ เช่น ประชากรมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อสาธารณะไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแจกแจงแบบปกติ ความแปรปรวนของประชากร ปัจจัยกลุ่มต่างๆ มีค่าเท่ากัน อิทธิพลของปัจจัยและอิทธิพลอื่นต้องเป็นไปในเชิงบวก ถ้าพบว่าข้อมูลไม่เป็นไปตามข้อกำหนดควรวัดปัจจัยจะใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนไม่ได้ เพราะผลสรุปที่ได้อาจผิดพลาดไปจากความเป็นจริงจึงจำเป็นต้องตรวจสอบข้อกำหนดต่างๆ ก่อนการวิเคราะห์ความแปรปรวน สำหรับงานวิจัยของปริญญาโทฉบับนี้ เป็นการทดลองเปรียบเทียบอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ เนื่องจากสิ่งต่างๆ ที่นำมาเปรียบเทียบนั้นไม่ใช่อิทธิพลของปัจจัยอย่างเดียว แต่มีอิทธิพลของสิ่งอื่นเข้ามาเกี่ยวข้องกับอิทธิพลของปัจจัยด้วย วิธีการที่จะจัดอิทธิพลของสิ่งอื่นที่เข้ามาเกี่ยวข้องกับอิทธิพลของปัจจัย ได้แก่การวิเคราะห์ความแปรปรวนร่วม (ANCOVA)

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการทำโครงการ

- 1.2.1 เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความหยาบผิวของชิ้นงาน โลหะจากการขึ้นรูปด้วยเครื่องกัดอัตโนมัติ (CNC Vertical Milling Machine)
- 1.2.2 ศึกษาผลกระทบของการสึกหรอของดอกกัดที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน

## 1.3 ขอบเขตของโครงการ

- 1.3.1 ศึกษาเงื่อนไขการแปรรูปโลหะด้วยกรรมวิธีขึ้นรูปด้วยเครื่องกัดอัตโนมัติ (CNC Vertical Milling Machine) โดยพิจารณาปัจจัยที่แตกต่างกัน 3 ตัว คือ ค่าอัตราการป้อนชิ้นงาน (Feed Rate) ค่าความเร็วรอบ (Speed) และค่าความลึกของการตัด (Depth of Cut)
- 1.3.2 ศึกษาการสึกหรอของเครื่องมือที่ใช้ในการกัด (End Milling) โดยพิจารณาการสึกหรอด้านมุม Concavity Angle ของดอกกัดเพียงมุมเดียว
- 1.3.3 วิเคราะห์ว่าปัจจัยใดมีผลต่อค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลอง (Design of Experiments)

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้ศึกษากรรมวิธีการผลิตของเครื่องกัดอัตโนมัติ (CNC Vertical Milling Machine)
- 1.4.2 มีข้อมูลในการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องกัดอัตโนมัติ (CNC Vertical Milling Machine) ในการปรับเปลี่ยนปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน
- 1.4.3 ได้ประยุกต์ใช้ความรู้ทางด้านสถิติในการแก้ปัญหา และได้เรียนรู้สถิติขั้นสูงขึ้น
- 1.4.4 รู้จักวิธีการแก้ปัญหาอย่างเป็นระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เพื่อที่จะได้ปฏิบัติการทดลองได้อย่างถูกต้องทฤษฎีมีความสำคัญมากในงานวิจัยนี้และทฤษฎีที่ใช้ในการศึกษาในงานวิจัยหลักๆ มีดังนี้

1. เครื่องจักรกลซีเอ็นซีสำหรับงานกัด
2. ทฤษฎีการตัดโลหะ
3. การสึกหรอของเครื่องมือกล คอกกัด (End Milling)
4. ความสำคัญของความหนาผิว
5. หลักการออกแบบการทดลอง

#### 2.1 เครื่องจักรกลซีเอ็นซีสำหรับงานกัด

เครื่องจักร CNC (Computer Numerical Control) คือ เครื่องจักรกลการผลิตที่มีคอมพิวเตอร์ หรือ ไมโครโปรเซสเซอร์ สำหรับใช้ควบคุมการทำงาน

##### 2.1.1 องค์ประกอบของเครื่องจักรกลซีเอ็นซี

เครื่องจักรกลซีเอ็นซี มีองค์ประกอบ 3 ส่วนหลัก ได้แก่

- ชุดควบคุม (Controller)
- กลไกการเคลื่อนที่ (Drive Mechanisms)
- ตัวเครื่องจักร (Machine Body)

##### 2.1.1.1 ชุดควบคุม

คอนโทรลเลอร์ของเครื่องซีเอ็นซีเป็นระบบคอมพิวเตอร์ที่สามารถจัดเก็บ โปรแกรมและแก้ไขคำสั่งโปรแกรมได้คอมพิวเตอร์เข้าใจ โปรแกรมที่ป้อนแล้วทำการควบคุมเครื่องจักรให้ทำงานตามคำสั่งในโปรแกรม

##### 2.1.1.2 กลไกการเคลื่อนที่

กลไกการเคลื่อนที่ได้แก่ ฟีดมอเตอร์ (Feed Motor) ซึ่งเป็นเซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor) ควบคุมการเคลื่อนที่ของแกนต่างๆ ใต้ โดยใช้นัลสกรู (Ball Screw) แปลงการเคลื่อนที่เชิงมุมเป็นการเคลื่อนที่เชิงเส้น โดยมีตำแหน่งหรือระยะทางการเคลื่อนที่และความเร็วถูกควบคุมโดยรับสัญญาณจากคอนโทรลเลอร์

##### 2.1.1.3 ตัวเครื่องจักร

ตัวเครื่องจักร คือ โครงสร้างที่ประกอบเป็นรูปร่างที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานตามประเภทของเครื่องจักรนั้นๆ เครื่องจักรมีส่วนประกอบหลัก เช่น แท่นเครื่อง โต๊ะวางชิ้นงานแท่นติดตั้งสปินเคิลและมอเตอร์สปินเคิล เป็นต้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.2 การทำงานของเครื่องจักรกลเอ็นซี

หลักการการทำงานของเครื่องจักรกลเอ็นซีหรือซีเอ็นซีจะคล้ายคลึงกับเครื่องจักรกลทั่วไป กล่าวคือ โดยพื้นฐานเบื้องต้นแล้วเครื่องจักรกลเอ็นซีก็จะทำงานผลิตชิ้นงานเหมือนกับเครื่องจักรกลทั่วไป เช่น เครื่องจักรเอ็นซีก็จะทำงานเหมือนเครื่องกัดทั่วไป เพียงแต่ว่าระบบควบคุมเอ็นซีของเครื่องจะทำงานในขั้นตอนต่างๆ แทนช่วงควบคุมเครื่อง อย่างไรก็ตาม ก่อนที่เครื่องจักรกลเอ็นซีจะสามารถทำงานได้นั้น ระบบควบคุมของเครื่อง จะต้องได้รับการบอกกล่าวเสียก่อนว่าจะให้ทำอะไร และจะต้องบอกกล่าวเป็นภาษาที่ระบบควบคุมสามารถเข้าใจได้นั้นคือจะต้องป้อนโปรแกรมเข้าไปในระบบควบคุมของเครื่องผ่านแป้นพิมพ์ (Key Board) หรือเทปแม่เหล็ก (Magnetic Tape) ก็ได้ เมื่อระบบควบคุมอ่าน โปรแกรมที่ป้อนเข้าไปแล้ว ก็จะนำไปควบคุมให้เครื่องจักรกลทำงานแต่เนื่องจากเครื่องจักรกลเอ็นซีไม่มีมือสำหรับหมุนมือหมุนให้แทนแฉกเคลื่อนที่ได้ ดังนั้นแทนแฉกต่างๆ จะต้องมียอเตอร์ป้อน(Feed Motor) ประกอบอยู่ เช่น เครื่องกัดซีเอ็นซี จะมีการเคลื่อนที่ 3 แนวแกนจะมีมอเตอร์ป้อน 3 ตัว

เมื่อระบบควบคุมอ่าน โปรแกรมแล้วก็จะเปลี่ยนรหัส โปรแกรมนั้นให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าเพื่อไปควบคุมให้มอเตอร์ทำงานแต่เนื่องจากสัญญาณที่ออกจากระบบควบคุมนี้มีกำลังน้อยไม่สามารถไปหมุนขับให้มอเตอร์ทำงานได้ ดังนั้นจึงต้องส่งสัญญาณนี้เข้าไปในภาคขยายสัญญาณของระบบขับ (Drive Amplifier) และส่งต่อไปยังมอเตอร์ป้อนของแนวแกนที่ต้องการเคลื่อนที่

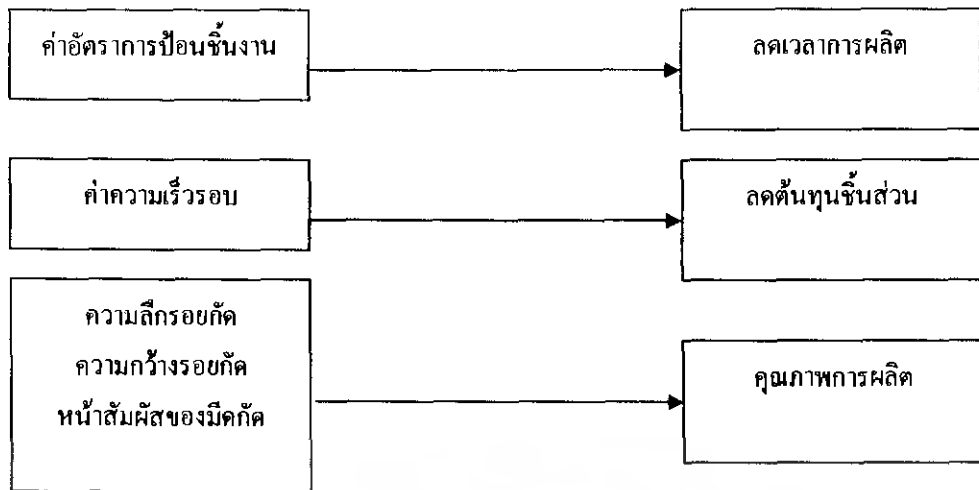
ความเร็วและระยะทางการเคลื่อนที่ของแทนแฉกจะต้องกำหนดให้ระบบควบคุมรู้ช่วงควบคุมเครื่องอาศัยสายตามองตำแหน่งของคมตัดกับชิ้นงานก็จะรู้ว่าจะต้องเคลื่อนแทนแฉกไปอีกเป็นระยะทางเท่าใดแต่ระบบควบคุมเอ็นซีมองไม่เห็น ดังนั้นจึงต้องออกแบบอุปกรณ์หรือเครื่องมือที่จะสามารถบอกตำแหน่งของแทนแฉกให้ระบบควบคุมรู้ได้ อุปกรณ์ชนิดนี้เรียกว่า ระบบวัดขนาด (Measuring System) ซึ่งประกอบด้วยสเกลแนวตรง (Linear Scale) มีจำนวนเท่ากับจำนวนแนวแกนในการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรกล ทำหน้าที่ส่งสัญญาณไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับระยะทางที่แทนแฉกเคลื่อนที่ไปยังระบบควบคุม ทำให้ระบบควบคุมรู้ว่าแทนแฉกเคลื่อนที่ไปเป็นระยะทางเท่าใดแล้ว

จากหลักการควบคุมการทำงานดังกล่าว ทำให้เครื่องจักรกลซีเอ็นซีสามารถผลิตชิ้นงานให้มีรูปทรงและขนาดที่ต้องการได้จากลักษณะโครงสร้างและการทำงานที่เหนือกว่าเครื่องจักรกลทั่วไป ทำให้เครื่องจักรกลเอ็นซีและซีเอ็นซีเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญมากในอุตสาหกรรมอัตโนมัติ และมีปริมาณความต้องการใช้เพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ

### 2.1.3 ข้อมูลการตัดเฉือนโลหะสำหรับงานกัด

ในหัวข้อนี้จะเป็นการแนะนำและอธิบายถึงข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการทำงานกัดซึ่งจะมีพื้นฐานของข้อมูลที่คล้ายคลึงกับข้อมูลการตัดเฉือน โลหะสำหรับงานกลึง ซึ่งได้แสดงความสัมพันธ์ดังรูปที่ 2.1

ข้อมูลที่ช่างเขียน โปรแกรมจะต้องจัดเตรียมสำหรับการทำงานกัด ได้แก่ ความเร็วรอบของเพลามัดกัด อัตราป้อน ความลึกหรือความกว้างรอยกัด และหน้าสัมผัสของมีดกัด ปัจจัยเหล่านี้จะต้องนำมาพิจารณาเพื่อให้บรรลุเป้าหมาย 3 ประการ คือ



รูปที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลการตัดเฉือนโลหะสำหรับงานกัด

### 2.1.3.1 เป้าหมายที่ 1 ลดเวลาการผลิต

ปัจจัยสำคัญเกี่ยวกับเวลาการผลิต (Cycle Time) ที่สามารถควบคุมได้โดยช่างเขียนโปรแกรมเอ็นซี ได้แก่ ปริมาณการตัดเฉือนเนื้อโลหะออกต่อนาที (Stock Removal Rate Per Minute) ซึ่งเป็นผลคูณของค่าอัตราการป้อนกับหน้าสัมผัสของมีดกัด (Cut Engagement) กับความลึกหรือความกว้างของรอยกัด ค่าปัจจัยค่าหนึ่งค่าใดใน 3 ค่านี้ หากมีค่าใดสูงขึ้นไปจะเป็นผลให้ปริมาณการตัดเฉือนเนื้อโลหะออกต่อนาทีมีค่าสูงขึ้นด้วยสิ่งที่ควรคำนึงถึงประการหนึ่งก็คือ ถ้าปริมาณการตัดเฉือนเนื้อโลหะออกมีอัตราที่สูงขึ้น ก็จะเป็นผลให้เครื่องมือตัดสึกหรอเร็วขึ้นด้วยทำให้ค่าเฉลี่ยของเวลาการผลิตสูงขึ้นด้วย เนื่องจากการเปลี่ยนเครื่องมือตัดหรือคมตัด

### 2.1.3.2 เป้าหมายที่ 2 ลดต้นทุนชิ้นส่วน

การเพิ่มขึ้นของค่าข้อมูลการตัดเฉือนใดๆ ก็ตาม จะมีผลทำให้เวลาการผลิตต่อชิ้นลดลง ซึ่งจะเป็นการช่วยลดค่าแรงงานและค่าเครื่องจักรลดลงด้วย แต่ค่าเครื่องมือตัดจะสูงขึ้น เนื่องจากการสึกหรอสูง ดังนั้น จึงไม่ควรเลือกใช้ค่าข้อมูลการตัดเฉือนที่จะมีผลทำให้ค่าเครื่องมือตัดที่เกิดจากการสึกหรอสูงเกินระดับหนึ่ง ซึ่งอาจจะพิจารณาเลือกใช้สารหล่อเย็นเพื่อเพิ่มอายุขัยของมีดให้ยาวขึ้นด้วยก็ได้

### 2.1.3.3 เป้าหมายที่ 3 คุณภาพการผลิตสูง

การเลือกใช้ข้อมูลการตัดเฉือนจะถูกจำกัดด้วยผลิตภัณฑ์ที่ต้องการคุณภาพสูง ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับผิวสำเร็จและพิถีพิถันความเผื่อของขนาดชิ้นงานสำเร็จการเลือกใช้ข้อมูลการตัดเฉือนจะต้องพิจารณาให้สัมพันธ์กันกับข้อมูลอื่นๆ ได้แก่

1. หมวดงานกัด เช่น งานกัดตาม งานกัดทวน งานกัดปาดหน้า เป็นต้น
2. รูปทรงของมีดกัด
3. ชนิดของขอบคมตัดที่ใช้ เช่น รูปทรงของขอบคมตัด วัสดุมีดกัด เป็นต้น
4. ภาระงานของเครื่องจักร เช่น ความสามารถในการรับความเค้น (Stressability)
5. คุณสมบัติการสั่นสะเทือนของเครื่องจักร เครื่องมือตัด และวัสดุงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 ทฤษฎีการตัดโลหะ

การทำงานของเครื่องตัด ไม่ว่าจะเป็นมีดกลึงหรือเครื่องมือกลใดๆ จะอยู่ภายใต้พื้นฐานของทฤษฎีอันเดียวกัน จุดประสงค์ของการทำงานใดๆ ก็ต้องการให้ได้มาซึ่งผลงานที่ดี งานเสร็จด้วยระยะเวลาอันสั้น ใช้ความพยายามไม่มาก และต้นทุนต่ำสุด

ความต้องการให้ได้การใช้งานที่ยาวนานที่สุดจากเครื่องมือก่อนที่จะต้องมีการเจียรระไนใหม่ ความต้องการอันนี้เป็นวัตถุประสงค์อย่างหนึ่งของเทคโนโลยีเครื่องมือกล สมมติว่าเครื่องมือกลได้ออกแบบและทำขึ้นอย่างถูกต้องแล้ว ความเสียหายของเครื่องมือจะเกิดจากการที่คมตัดเกิดการสึกหรอ การเปลี่ยนแปลงรูปทรงของเครื่องมือก็จะเกิดขึ้น การเปลี่ยนแปลงรูปทรงทางเรขาคณิตของเครื่องมือโดยทั่วไปก็คือการเปลี่ยนแปลงคมมีด ความเรียบ และมุมของมันเปลี่ยนไป การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้ก็จะทำให้เกิดความร้อนขึ้น ซึ่งความร้อนอันนี้ทำให้ความแข็งของเครื่องมือลดลง การเปลี่ยนแปลงอันนี้ไม่ได้หมายความว่าเครื่องมืออ่อน แต่หมายความว่าประสิทธิภาพในการกัดของเครื่องมือบนชิ้นงานลดลง ด้วยความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ของเครื่องมือเพื่อกัด กลึง ไส เจาะมากเกินไป ส่วนที่กัดเนื้อชิ้นงานจะเกิดการสึกและหน้าสัมผัสกับชิ้นงานก็จะเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดความร้อนสูง ดังนั้นก็จะยิ่งทำให้คมของมันมีขนาดใหญ่ขึ้น การเกิดการอ่อนของเครื่องมือและหักสึกของคมเครื่องมือจะเกิดขึ้นจนกระทั่งเครื่องมือหักออกจากกัน

ด้วยเหตุนี้การหล่อเย็นหรือการระบายความร้อนที่ถูกต้อง รูปทรงเครื่องมือ มุมที่ถูกต้อง หน้าตัดของเครื่องมือ อัตราการป้อนที่เหมาะสม ความเร็วที่ถูกต้อง และการตั้งเครื่องมือให้เหมาะสมกับผิวของงาน ทั้งหมดจะช่วยลดความร้อนที่เกิดขึ้น และยืดอายุการใช้งานของเครื่องมือ อายุของเครื่องมือนิยามเป็นความยาวนานของเวลาในการใช้งานของเครื่องมือ จนกระทั่งเกิดการเสียหายขึ้น สาเหตุอื่นๆ ของการเสียหายของเครื่องมือเป็นผลมาจากการเกิดความเค้นสูง โดยเครื่องมือและชิ้นงานกระทำต่อกัน หากโลหะเกิดความแข็งเนื่องจากการใช้งาน (Work Hardening) ขึ้น จะทำให้ต้องใช้แรงอย่างมากในการที่มีดกลึงหรือเครื่องมือกลจะปอกเนื้อโลหะออกมาได้ วัสดุบางชนิดมักเกิดความแข็งเนื่องจากการใช้งานขึ้นมากกว่าวัสดุอื่นซึ่งเป็นตัวประกอบสำคัญในกระบวนการตัด

### 2.2.1 เครื่องมือสำหรับนิวเมอริคอลลคอนโทรล

เครื่องมือเป็นสิ่งที่มียุทธิต่อการ โปรแกรมกับ NC วัสดุที่ทนเครื่องมือตัด (Cutting Tool Materials) ส่วนมากทำจากวัสดุพื้นฐาน 3 ชนิด ได้แก่

1. เหล็กกล้าความเร็วสูง (High Speed Steel)
2. ทังสเทนคาร์ไบด์ (Tungsten Carbide)
3. เซรามิก (Ceramics)

เครื่องมือทั้ง 3 ชนิดต้องเลือกใช้อย่างระมัดระวัง

#### 2.2.1.1 เหล็กกล้าความเร็วสูง

เป็นเครื่องมือที่ทำจากวัสดุชนิดหนึ่ง ซึ่งมีข้อดีมากกว่าเครื่องมือที่ทำจากคาร์ไบด์ คือ

1. มีราคาถูกกว่าคาร์ไบด์หรือเซรามิก
2. เพราะน้อยกว่าคาร์ไบด์และไม่แตกหักขณะเข้าตัดชิ้นงาน
3. สามารถลับคมได้ง่ายกว่าคาร์ไบด์
4. เป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ในปัจจุบัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักก้าความเร็วสูงมีข้อเสีย คือ

1. ความสามารถต่อการจับยึดน้อยกว่าเครื่องมือที่ทำจากคาร์ไบด์และเซรามิกในขณะที่เกิดความร้อนสูงขณะทำงาน
2. ใช้ตัดวัสดุแข็งได้ไม่ดี

#### 2.2.1.2 กังสแตนคาร์ไบด์

กังสแตนคาร์ไบด์หรือเรียกกันสั้นๆ ว่าคาร์ไบด์ เป็นวัสดุอีกชนิดหนึ่งที่ทำมาทำเครื่องมือกันมาก ซึ่งมีข้อดี คือ

1. สามารถจับยึดได้ดีกว่าที่ความร้อนสูง
2. สามารถตัดวัสดุที่แข็งได้ดี

กังสแตนคาร์ไบด์ มีข้อเสีย คือ

1. ราคาสูงกว่าหลักก้าความเร็วสูง
2. เพราะก้าหลักก้าความเร็วสูงและมีการแตกสะเก็ดที่คมบ่อย
3. แข็งกว่าหลักก้าความเร็วสูงทำให้ลับได้ยาก

#### 2.2.1.3 เซรามิก

เครื่องมือที่ทำจากเซรามิก มีข้อดีอยู่มาก แต่ว่ามีราคาแพง เซรามิกมีข้อดี คือ

1. เซรามิกมีราคาถูกกว่าคาร์ไบด์เมื่อนำไปใช้งานกับเครื่องมืออินเสิร์ต
2. เซรามิกทนต่อวัสดุที่แข็งกว่าที่ความเร็วที่สูงกว่าวัสดุเครื่องมือชนิดอื่น

เซรามิกมีข้อเสีย คือ

1. เซรามิกเพราะหักง่ายกว่าหลักก้าความเร็วสูงและคาร์ไบด์
2. เซรามิกมักทำงานภายใต้พารามิเตอร์ของผิวหน้างาน ถ้าทำงานกับการเคลื่อนที่ของผิวหน้าชิ้นงานที่ซ้ำ

หลายๆ ตัวอินเสิร์ตจะหักลงอย่างง่ายดายและรวดเร็ว

หลักก้าความเร็วสูงโดยทั่วๆ ไปใช้กับชิ้นงานที่ทำจากอะลูมิเนียมและวัสดุไร้สนิมผสม ส่วนคาร์ไบด์ใช้กับอะลูมิเนียมชนิดมีซิลิคอนสูง

อินเสิร์ตคาร์ไบด์บางตัวจะมีการเคลือบด้วยสารละลายพิเศษอย่างเช่น ไทเทเนียมไนไตรด์ เพื่อเพิ่มอายุการใช้งาน การเคลือบผิวสามารถเพิ่มอายุการใช้งานได้ถึง 20 เท่า

ปัจจุบันวงการอุตสาหกรรมทั้งไทยและต่างประเทศยอมรับว่าเครื่องมือตัดเจาะ (Tooling) และชิ้นรูปที่ถูกเคลือบผิวถือเป็นมาตรฐานสำคัญไปแล้ว เพราะการเคลือบผิวนั้นทำให้เครื่องมือดังกล่าว ทนทานและแข็งแรงขึ้น การเคลือบผิวเครื่องมือตัดเจาะและชิ้นรูปให้แข็งทนทานนั้น มีด้วยกันหลายระบบแต่ที่นิยม คือระบบ PVD (Physical Vapour Deposition) เนื่องจากเป็นระบบที่ทันสมัยเหนือระบบอื่นหลายประการด้วยกัน เช่น

1. ไม่ทำให้ชิ้นงานเสียรูปทรงเพราะใช้ความร้อนมากไป
2. ไม่ทำให้ส่วนคมหรือขนาดของชิ้นงานผิดไป เนื่องจากอุณหภูมิเพียง 3 ไมครอน

ในปัจจุบันความต้องการที่จะชุบเคลือบผิว ด้วยระบบ PVD ในอุตสาหกรรมตัดเจะนั้นมีมากขึ้นเรื่อยๆ เพราะ  
หากสามารถเลือกฟิล์มแข็งที่เหมาะสมกับงาน ผสมกับการใช้งานที่ถูกวิธีจะเอื้อประโยชน์ดังนี้

1. เพิ่มความทนทานต่อการสึกกร่อนให้กับเครื่องมือตัดเจาะ
2. เพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนให้กับเครื่องมือตัดเจาะ
3. เพิ่มความลื่นให้กับเครื่องมือตัดเจาะ
4. ลดการหลอมเชื่อมระหว่างเครื่องมือตัดเจาะกับชิ้นงาน
5. เพิ่มอายุการใช้งานให้กับเครื่องมือตัดเจาะ
6. สามารถเพิ่มค่าอัตราการป้อนชิ้นงาน (Feed Rate) และความเร็วตัด (Cutting Speed) ให้แก่เครื่องมือตัดเจาะ
7. สามารถลดเวลาในการบำรุงรักษาเครื่องจักรที่ใช้ในการเจาะ
8. ประหยัดรายจ่ายในการใช้เครื่องมือใหม่

ชนิดของฟิล์มที่นิยมใช้ในงานชุบผิวเครื่องมือ สำหรับฟิล์มแข็งบาง (Thin Hard Film) ที่นิยมใช้ชุบเครื่องมือ  
ตัดเจะนั้น ใช้สารประกอบที่มีความแข็งยิ่งยวด ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารประกอบของไททาเนียม เป็นหลัก อาทิ TiAlN,  
TiZrN, TiN, TiC, TiCN, TiZrCN, ZrN, ZrCN, CrN ฯลฯ

## 2.2.2 ทฤษฎีงานกัดความหมายของงานกัด

งานกัดเป็นงานที่เกิดขึ้นจากการตัดเฉือนของมีดกัดที่มีคมตัดตั้งแต่หนึ่งคมขึ้นไปถึงหลายๆ คม การเคลื่อนที่  
ของคมตัดจะเคลื่อนที่หมุนรอบตัวเอง ซึ่งจะอยู่ในแนวตั้งหรือแนวนอนหรือในแนวเอียงมุมแบบต่างๆ ได้ลักษณะของ  
คมตัดจะมีทั้งแบบตายตัวและแบบถอดเปลี่ยนคมได้

ขณะทำการกัดในกรณีที่มีมีดกัดมีคมตัดหลายๆ คม ซึ่งอยู่รอบตัวมันเองในหนึ่งรอบมีดกัดจะกัดงานเสร็จ  
เฉพาะฟัน แล้วเคลื่อนที่ฟรีไปช่วงหนึ่งจนหมุนกลับมาที่เดิมอีก จึงจะเริ่มกัดงานใหม่การว่างเช่นนี้จะเป็ประโยชน์  
ให้กับคมของมีดกัดได้ระบายความร้อนออกไปได้บ้าง ซึ่งผิดกับการกัดงานคมมีดกัดจะตะแฉิวงานอยู่ตลอดเวลา

แต่กระนั้นก็ตามเราก็ยังต้องการใช้น้ำมันหล่อเย็นมาช่วยในการระบายความร้อนให้กับการทำงานซึ่งจะช่วย  
ให้ความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีระหว่างคมตัดกับงานลดลง และไล่เศษที่คุดออกจากผิวงานบริเวณตัดเฉือน ทำให้ผิว  
งานเรียบ

ความเร็วกัดจะเกิดขึ้นระหว่างการทำงานของเครื่องกัด และชนิดของวัสดุงานที่นำมากัด ซึ่งจะคำนึงถึงสิ่ง  
ต่อไปนี้เป็นหลัก คือ

1. ชนิดของวัสดุที่นำมากัด (Kind of Material)
2. ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำมีดกัด (Kind of Cutter Material)
3. ค่าความลึกของการตัด (Depth of Cut)
4. ความแข็งของมีดกัดและงาน (Rigidity of Cutter and Work Piece)

ในการตั้งความเร็วกัดให้เหมาะสมนั้น เราจำเป็นต้องทราบความเร็วตัด (Cutting Speeds) ของวัสดุแต่ละ  
ชนิด และนำไปคิดความเร็วรอบจากสูตร โดยความเร็วตัด (Cutting Speeds) วัดโดยความยาวของเศษโลหะที่ออกมาใน  
1 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N = \frac{(1000 \times CS)}{\pi D} \quad (2.1)$$

- เมื่อ  $N$  = ความเร็วรอบของมีดกัด (รอบ/นาที)  
 $CS$  = ความเร็วตัด (เมตร/นาที)  
 $D$  = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของมีดกัด (มิลลิเมตร)  
 $\pi$  = 3.14 (ค่าประมาณ)

อัตราการกินป้อนกัด จะมากหรือน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายประการเช่นกัน เช่น อัตราการเคลื่อนที่ของงาน ประสิทธิภาพของเครื่องกัด ความกว้างและการกินลึก ซึ่งบางครั้งก็คิดเอาปริมาณของเนื้อวัสดุคิดเป็นปริมาณต่อ 1 นาที เช่น ลูกบาศก์นิ้ว/นาที หรือลูกบาศก์เซนติเมตร/นาที เป็นต้น

อัตราการกินป้อนกัดต่อฟันเป็นการกำหนดที่ละเอียดยิ่งขึ้น เพราะมีดกัดแต่ละแบบแต่ละชนิดมีจำนวนฟันไม่เท่ากัน ดังนั้นความสามารถในการกินป้อนย่อมแตกต่างกันไปบ้าง

#### 2.2.2.1 การคำนวณการตัดเนื้อชิ้นงานด้วยดอกกัดเออนมิก

โดยอัตราส่วนการกำจัดเนื้อสามารถคำนวณได้จาก

$$R = WHf \quad (2.2)$$

- เมื่อ  $R$  = อัตราการกำจัดเนื้อ (ลูกบาศก์นิ้ว/นาที)  
 $W$  = ความกว้างของมีดกัด (นิ้ว)  
 $H$  = ความลึกในการกัด (นิ้ว)  
 $f$  = ความเร็วของการป้อนชิ้นงานเข้าสู่เครื่องมือตัด (นิ้ว/นาที)

#### 2.2.2.2 การคำนวณค่าความเร็วกัด

การปรับตั้งค่าความเร็วในการตัดของเครื่องตัดที่ใช้ในโรงงานต่างๆ ไป จะคิดค่าการส่งถ่ายกำลังตัดออกมาเป็นความเร็วรอบต่อนาที (Revolution Per Minute – RPM) ของเพลา มีดกัด (Machine Spindle)

ค่าความเร็วตัดที่จะเลือกใช้ จะต้องคำนึงถึงชนิดของมีดกัด (Cutter) และชนิดของวัสดุงานที่นำมากัด ตลอดจนอัตราการป้อนกัด และสารระบายความร้อนที่จะใช้ให้เหมาะสมกับวัสดุงาน และวัสดุมีดกัดสูตรค่าความเร็วกัดที่ใช้ต่างๆ ไป

$$RPM = \frac{(1000 \times CS)}{\pi D} \quad (2.3)$$

- เมื่อ  $RPM$  = ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)  
 $D$  = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของมีดกัด (มิลลิเมตร)  
 $CS$  = ความเร็วตัด (เมตร/นาที)  
 $\pi$  = 3.14 (ค่าประมาณ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้สูตรในการคำนวณหาความเร็วรอบของมิลด์กัด ทำให้เราสามารถหาความเร็วได้เหมาะสมกับเครื่องมือกัดได้ ก็ตาม เพื่อให้การใช้มิลด์กัดให้มีอายุยาวนาน มีหลักการดังนี้

1. ถ้าต้องการยืดอายุการใช้งานของมิลด์กัดให้สามารถใช้งานได้ยาวนานควรเลือกความเร็วตัดให้น้อยกว่าค่าในตารางก็จะช่วยยืดอายุการใช้งานของมิลด์ได้มากขึ้น

2. การกัดงานต้องคว่ำวัสดุทำมาจากวัสดุอะไร

3. การเริ่มกัดงานใหม่ๆ ควรใช้ค่าความเร็วตัดต่ำๆ ก่อน แล้วค่อยๆ เพิ่มให้มากขึ้นเมื่อมิลด์สามารถกัดงานได้ดี

4. การกัดงานให้ผิวเรียบช่วงสุดท้ายของงาน ลดอัตราการป้อนกัดให้น้อยลง และเพิ่มความเร็วรอบของมิลด์กัดให้สูงขึ้น

5. ในการหล่อเย็นลดความร้อนให้กับมิลด์ และช่วยหล่อลื่นและล้างเศษโลหะมีผลให้งานเรียบสวยงาม

### 2.2.2.3 ค่าอัตราการป้อนชิ้นงาน

หมายถึงความเร็วของการกระทำด้วยเครื่องจักร (Machining) เข้าเนื้อชิ้นงานของเครื่องกัด โดยการคิดระยะอัตราการป้อนชิ้นงาน จะคิดระยะทางหน่วยนิ้วหรือมิลลิเมตร/นาที นั้นจะคิดโดย มิลด์กัดจะกัดงานเป็นระยะทางต่อระยะเวลา 1 นาที เศษที่เกิดจากการกัดจะคิดจากคมมิลด์ 1 ฟัน ได้เศษ 1 ชิ้น

การเลือกใช้จากตาราง จะเลือกใช้อัตราการป้อนชิ้นงานต่อฟัน โดยพิจารณาจากชนิดของมิลด์กัด และวัสดุที่นำมากัดรวมถึงการป้อนลึกของมิลด์กัดด้วยตลอดจนค่าความเร็วของเหล้ามิลด์กัดที่ตั้งกัด เพื่อจะนำมาวิเคราะห์หาค่าเป็นสูตรที่ใช้สูตรที่ใช้ในการคำนวณหา

$$Feed = N \times CPM \times RPM \quad (2.4)$$

เมื่อ  $Feed$  = ค่าอัตราการป้อนชิ้นงาน (มิลลิเมตร/นาที)

$N$  = จำนวนฟันของมิลด์กัด (ฟัน)

$CPM$  = จำนวนเศษต่อคมตัด (มิลลิเมตร)

$RPM$  = ความเร็วรอบของมิลด์กัด (รอบ/นาที)

### 2.2.2.4 ค่าความลึกของการตัด

หมายถึงความลึกของการกระทำด้วยเครื่องจักร (Machining) เข้าเนื้อชิ้นงาน การกำหนดค่าความลึก และค่าอัตราการป้อนชิ้นงาน (Feed Rate) ต้องคำนึงถึงความสามารถในการรับแรงของมิลด์กัดที่จะนำมาใช้และของเครื่องจักรสูตรที่ใช้ในการคำนวณหา

$$Depth\ of\ cut = 0.5 \times D \quad (2.5)$$

เมื่อ  $Depth\ of\ cut$  = ค่าความลึกของการตัด (มิลลิเมตร)

$D$  = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของมิลด์กัด (มิลลิเมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3 การสึกหรอของเครื่องมือกล ดอกกัด (End Milling)

ในการผลิตชิ้นงานให้ได้ขนาด รูปร่างและความละเอียดผิวที่เหมาะสม เราใช้เทคนิคการกำจัดเนื้อวัสดุออกจากผิวโดยการตัดแต่งผิวโลหะ (Metal Cutting) การขัดถู (Abrasive Means) การกัดกร่อนด้วยสารเคมี (Chemical Method) หรือการกัดแต่งด้วยไฟฟ้า (Electrical Method) จนกระทั่งได้เป็นชิ้นงานสำเร็จพร้อมใช้งาน ชิ้นส่วนโลหะส่วนใหญ่จะต้องผ่านการกัดแต่งอย่างใดอย่างหนึ่งในตอนสุดท้ายก่อนนำไปใช้งาน ไม่ว่าจะเป็นการกัด การเจียรนัย การเจาะ รูชิ้นงาน ฯลฯ ดังนั้น การสึกหรอและความจำเป็นที่จะต้องเปลี่ยนใหม่ของเครื่องมือกลจึงเป็นต้นทุนการผลิตที่ต่อเนื่อง และมีมูลค่าสูงมากในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วน ในด้านงานวิจัยจะพบว่า การสึกหรอของเครื่องมือกลเป็นหัวข้องานวิจัยและพัฒนาที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างยิ่งมาเป็นเวลานาน

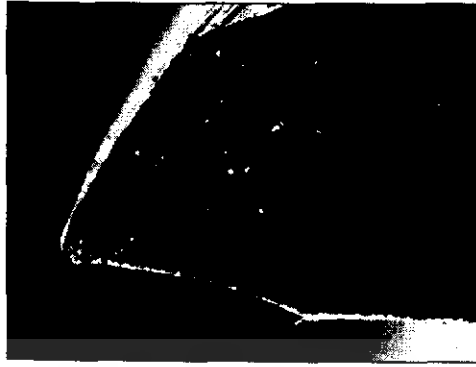
ถึงแม้ว่าในปัจจุบันกรรมวิธีการผลิตชิ้นส่วนสมัยใหม่จะมุ่งไปในทิศทางของ “Near-net-shape” กล่าวคือ การขึ้นรูปชิ้นงานให้ได้ใกล้เคียงรูปร่างสุดท้ายมากที่สุด เช่น การหล่อประณีต (Precision Casting) และการขึ้นรูปจาก โลหะผง (Powder Metallurgy) เป็นต้น ทั้งนี้เพื่อจุดประสงค์ที่จะลดขั้นตอนการกัดแต่งลงให้ได้มากที่สุด แต่ก็ยังมีกระบวนการพื้นฐานที่ยังคงใช้กันอยู่อีกมากที่ต้องมีการกัดชิ้นงานจนได้รูปร่างสุดท้าย เช่น การหล่อแบบดั้งเดิม การชุบขึ้นรูป การกัดขึ้นรูปชิ้นงานจากโลหะ กระบวนการเหล่านี้ยังต้องอาศัยการกัดแต่งเพื่อเอาวัสดุที่ผิวออก เนื่องจาก

- ต้องการควบคุมให้ได้ขนาดที่แม่นยำกว่าขนาดที่ได้จากกระบวนการขึ้นรูปในขั้นต้น
- ต้องการปรับสภาพผิว (ลักษณะ รูปร่าง และความละเอียด)
- ต้องการแต่งผิวโลหะให้เป็นรูปร่างตามที่กำหนดซึ่งไม่สามารถทำได้ด้วยวิธีอื่น
- ต้องการปรับและควบคุมขนาดชิ้นงานหลังจากการชุบแข็งแล้ว
- ในการผลิตชิ้นส่วนขนาดเล็กที่เหมือนกันเป็นจำนวนมากจะพบว่า การกัดแต่งชิ้นงานจากแท่งโลหะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าใช้การกัดแต่งที่ความเร็วสูง (High Speed Machining) จะเป็นวิธีที่ประหยัดและคุ้มค่ากว่าการขึ้นรูปด้วยวิธีอื่นๆ

ในการกัดแต่งผิวโลหะเราใช้ชิ้นส่วน “Tool” หรือเครื่องมือกล ในการกระทำลงบนผิวโลหะให้ได้รูปร่างที่กำหนด “Tool” หมายถึง อุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตชิ้นงาน ในที่นี้จะใช้กล่าวถึงอุปกรณ์สิ้นเปลืองที่ใช้ในเครื่องมือกล สำหรับสำหรับการตัดแต่งรูปร่างชิ้นงาน (Cutting Tools) ประเภทเครื่องกลึง เครื่องไส เครื่องตัด เครื่องเจาะ ฯลฯ ชิ้นส่วนเครื่องมือกลเหล่านี้ ได้แก่ ดอกสว่าน มีดเล็บ (Inserted-tooth) มีดตัด มีดกัด เป็น

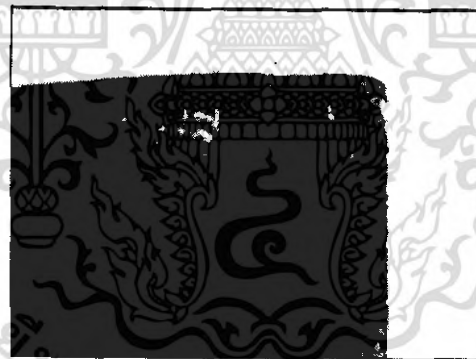
#### 2.3.1 ชนิดของการสึกหรอมี 9 ชนิดที่แตกต่างกันดังนี้

1. การสึกหรอด้านหน้า (Flank Wear) การสึกหรอด้านหน้าเป็นการสึกหรอที่เกิดขึ้นโดยทั่วไป เป็นการสึกหรอทางกลที่เกิดขึ้นจากชิ้นงานเคลื่อนที่ผ่านเครื่องมือตัด ในขณะที่ตัวกันเศษโลหะแยกตัวออกมาจากชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 2.2



X=850 (ไมโครเมตร) กำลังขยายเท่ากับ 1.2 เท่า  
รูปที่ 2.2 แสดงการสึกหรอด้านหน้าของดอกกัด

2. การสึกหรอเป็นหลุมด้านบน (Crater Wear) การสึกหรอเป็นหลุมด้านบนเกิดจากการเสียดสีอนุภาคของเศษโลหะไหลผ่านด้านบนของเครื่องมือตัด เกิดการเสียดสีคล้ายการเจียรนัย ชั้นส่วนที่ร้อนที่สุดของเศษโลหะจะเกิดการแพร่กระจาย (Diffusion) ของอนุภาคระหว่างเศษโลหะและเครื่องมือตัด คือเกิดการแลกเปลี่ยนอนุภาคซึ่งกันและกัน ธาตุเหล็ก (Fe) ในเศษโลหะแพร่กระจายเข้าไปในเครื่องมือตัด การสึกหรอเป็นหลุมด้านบนมักเกิดจากการตัดเหล็กเหนียว แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงการสึกหรอเป็นหลุมด้านบนของดอกกัด

3. การสึกหรอเป็นรอยบาก (Notch Wear) การสึกหรอเป็นรอยบากจะเกิดขึ้นที่บริเวณปลายคมตัด เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยากับอากาศ (Oxidation) ของเครื่องมือตัด และชิ้นงาน สามารถพบได้บ่อยในการตัดชิ้นงานที่มีความแข็งสูง

4. การหลอมตัวของเครื่องมือตัด (Plastic Deformation) ในขณะที่ทำการตัด บริเวณคมตัดจะเกิดอุณหภูมิ และความดันสูง โดยเฉพาะในการตัดวัสดุที่มีความแข็งสูง ด้วยอัตราเร็วและอัตราป้อนที่สูงมากๆ เมื่อความร้อนเพิ่มขึ้นจนถึงค่าวิกฤต (Critical Hot Hardness) เครื่องมือตัดไม่สามารถทนความร้อนที่เกิดจากการตัดได้

5. การแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิ (Thermal Cracking) การแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิสูงเกิดจากวัฏจักรการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Thermal Cyclic) โดยเฉพาะในงานปาด (Milling) ในขณะที่มีคมตัดชิ้นงานจะเกิดความร้อน และเย็นตัวลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเม็ดมีค้อออกจากชิ้นงาน จากนั้นเม็ดมีค้อจะกลับเข้ามาตัดชิ้นงานอีกครั้งในรอบถัดไป เกิดความร้อนขึ้นอีกครั้ง เป็นวัฏจักรการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ต่อเนื่อง ถ้าใช้สารหล่อเย็นจะยิ่งทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิมากขึ้นไปอีก

6. การแตกร้าวเนื่องจากความล้า (Mechanical Fatigue Cracking) การแตกร้าวเนื่องจากความล้าเกิดขึ้นจากความไม่คงที่ของแรงตัด แต่ขนาดของแรงตัดเองไม่มากพอที่จะ ทำให้เครื่องมือตัดเสียหายได้ทันที การแตกร้าวที่เกิดขึ้นจะเกิดขึ้นนานกับคมตัด

7. การกระเทาะของคมตัด (Chipping of The Cutting Edge) การกระเทาะของคมตัดเกิดขึ้นจากวัฏจักรของแรงที่กระทำต่อคมตัด ทำให้อนุภาคของเครื่องมือตัดหลุดออกจากผิวหน้าไป รูปร่างของการกระเทาะจะคล้ายการสึกหรอด้านหน้า

8. การแตกของคมตัด (Fracture of Cutting Edge) การแตกของคมตัด เป็นความเสียหายที่ต้องหลีกเลี่ยงให้มากที่สุด การแตกของคมตัดทำให้รูปทรงของคมตัดเปลี่ยนไป คมตัดไม่แข็งแรง อุณหภูมิขณะตัดสูง ใช้แรงในการตัดมาก และอาจสร้างความเสียหายต่อชิ้นงาน เครื่องจักร อุปกรณ์ยึดจับชิ้นงาน การแตกของคมตัดมักพบในงานตัดหนัก (Heavy Cutting) งานตัดกระแทก (Interrupt Cutting) หรือการตัดชิ้นงานที่มีความแข็งสูง

9. การสะสมของเศษวัสดุที่คมตัด (Build up Edge) การสะสมของเศษวัสดุที่คมตัด เกิดจากชิ้นงานเกิดความร้อนจากการตัด จนกระทั่งชิ้นงานหลอมตัวมาพอกบริเวณคมตัด และหลุดออกไปเมื่อเครื่องมือตัดทำการตัดชิ้นงาน จากนั้นจะก่อตัวขึ้นใหม่อีกครั้งเป็นวัฏจักรการสะสมของเศษวัสดุที่คมตัดอาจทำให้อนุภาคของเครื่องมือตัดแตกหลุดออกไปพร้อมชิ้นงานหลอมที่คมตัด การสะสมของเศษวัสดุที่คมตัด ทำให้รูปทรงของคมตัดเปลี่ยนไป ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดปัญหาอื่นๆ

## 2.4 ความสำคัญของความหยาบผิว

ความสำคัญของความหยาบผิวมีส่วนสำคัญต่อคุณภาพสูงสุดและความน่าเชื่อถือสูงสุดของผลิตภัณฑ์ เมื่อนำไปใช้งานผลของความเรียบของผิวงานสำเร็จมีส่วนสำคัญโดยค่าความเรียบผิว (Surface Roughness) จะมีผล หรือสามารถวิเคราะห์หาผลของกรรมวิธีการผลิต เช่น การควบคุมสภาพแวดล้อม ผลของประสิทธิภาพการทำงาน มองผ่านชิ้นงานที่เข้าสู่หรือที่ผ่านการผลิตเสร็จสิ้น ความเหมาะสมของขบวนการผลิต ที่จะทำให้สภาพแวดล้อมการผลิตเหมาะสมต่องาน ขนาดจริงแท้จริงของชิ้นงาน หลังจากชิ้นงานผ่านการใช้งานไประยะเวลาหนึ่งค่าความเรียบผิวที่เหมาะสมและค่าคุณสมบัติของผิว (Surface Parameter) และวิธีการผลิตที่ถูกต้อง จะทำให้ต้นทุนการผลิตลดลง หรือไม่สูงเกินไป จากการออกแบบขั้นตอนการผลิตที่เหมาะสมถูกต้อง เนื่องจาก การมีความเข้าใจอย่างถูกต้องต่อรูปทรงแบบต่างๆของคุณสมบัติของผิวและวิธีการวัดผิว/วิเคราะห์จะทำให้ผู้ออกแบบสามารถเลือกกำหนดค่าและวิธีการวัดความหยาบที่เหมาะสม ซึ่งไม่เพียงแต่จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ แต่จะทำให้เกิดขบวนการผลิตที่เหมาะสมและต้นทุนการผลิตที่ถูกต้อง

การพัฒนาของเทคโนโลยีสมัยใหม่ไม่ได้ต้องการเฉพาะการควบคุมปรับปรุงความละเอียดเพียงตรงเท่านั้น แต่ต้องการปรับปรุงความหยาบ ละเอียดของผิวหน้าบนชิ้นส่วนที่ถูกใช้ทั้งที่ทำงานและไม่ทำงาน มีปฏิภณารากฐานอยู่ 3 ประการ ซึ่งเป็นตัวที่ทำหน้าที่ควบคุมความหยาบ ละเอียดของผิวของผิวมีความสำคัญซึ่งก็คือ อายุการล้า คุณสมบัติการทนทานและการสึกหรอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. อายุการล้าตัว (Fatigue Life) ถ้าชิ้นส่วนชิ้นหนึ่งเป็นส่วนที่ได้รับความเครียดย้อนกลับซ้ำๆ กัน มันก็จะเกิดการล้าตัวขึ้นและอายุของมันก็จะสั้นกว่าชิ้นงานที่ได้รับน้ำหนักคงที่เท่ากัน จำนวนของความเครียดย้อนกลับที่มันสามารถต้านทานต่อความเครียดที่ให้ไปจะถูกเรียกว่า อายุการล้าตัว การแตกหักที่เนื่องจากการล้าตัวจะพบเห็นอยู่เสมอว่าเริ่มต้นที่มุมที่แหลมคมก่อนที่จะเกิดความเครียดรวมขึ้น ดังเช่น ตรงส่วนของผิวหน้าที่ไม่เรียบแม้ว่าจะเป็นผิวหน้าที่ไม่ได้ทำงานก็ตามที
2. คุณสมบัติการทนทาน (Bearing Properties) ผิวหน้าที่ดีเลิศทุกประการ เช่น ไม่มีสิ่งบกพร่องใดๆ เลย และมีความเรียบอย่างดีมากไม่ได้มีการทนทานที่ดี ในความเป็นจริงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการยากต่อการบำรุงรักษาแผ่นบางๆ ของการหล่อลื่น ซึ่งไม่เป็นผลดีต่อการหล่อลื่น ซึ่งไม่เป็นผลดีต่อการสัมผัสกันระหว่างโลหะกับโลหะ
3. การสึกหรอ (Wear) กฎที่รู้จักกันดีของทางฟิสิกส์ก็คือความเสียดทาน (Friction) ไม่ได้ขึ้นอยู่กับพื้นที่สัมผัส อย่างไรก็ตามอัตราการสึกหรอจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ในการสัมผัส เมื่อพื้นที่มีน้ำหนักน้อยกว่าต่อหน่วยพื้นที่ ดังนั้นอัตราการสึกหรอก็น้อยด้วย

#### 2.4.1 ความหยาบผิว

ความหยาบผิว (Surface Roughness) คือ ความหยาบผิวที่ได้จากชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแปรรูป เช่น งานกลึง งานกัด งานไส เป็นต้น ผ่านการตรวจจะสังเกตได้ว่าชิ้นงานขรุขระเป็นลอนคลื่น ชั้นที่ลอนคลื่นสูงแสดงว่าชิ้นงานดังกล่าวมีผิวหยาบส่วนที่ลอนคลื่นต่ำแสดงว่าผิวชิ้นนั้นเรียบ ความหยาบผิวชิ้นงานมีผลต่อการใช้งานอย่างมาก เมื่อการผลิตมีคุณภาพผิวชิ้นงานไม่ตรงกับสภาพที่แท้จริงขณะทำงาน จะทำให้อายุการใช้งานของชิ้นงานสั้นลงหรือชิ้นงานบางชิ้นที่ผลิตขึ้นมาจะมีผิวที่ละเอียด แต่สภาพใช้งานจริงไม่จำเป็น เพราะจะทำให้เสียเวลาในการทำงานโดยเปล่าประโยชน์

หากนำเอาผิวของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแปรรูป โดยชิ้นงานได้รับการแปรรูปจาก งานกลึง งานกัด งานไส งานเจียรระโน งานเลเซอร์ (Laser) เป็นต้น ผ่านการตรวจด้วยแว่นขยายจะพบว่าผิวของชิ้นงานขรุขระเป็นลอนคลื่น ชิ้นงานใดที่มีลอนคลื่นสูงแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานดังกล่าวมีผิวหยาบ ส่วนที่มีลอนคลื่นต่ำแสดงว่าผิวชิ้นงานนั้นเรียบ จะทำให้อายุการใช้งานของชิ้นงานสั้นลง หรือชิ้นงานบางชิ้นที่ผลิตขึ้นมาจะมีผิวที่ละเอียด แต่สภาพใช้งานจริงไม่จำเป็น เพราะจะทำให้เสียเวลาในการทำงานโดยเปล่าประโยชน์

#### 2.4.2 การเกิดสภาพของผิว

ภายใต้ขบวนการขึ้นรูปด้วยเครื่องจักร เช่น กลึง กัด ไส บริเวณผิวงานสำเร็จที่มองเห็นและสัมผัสได้นั้นจะเป็นแหล่งที่รวมและสามารถบ่งบอกผลจากแหล่งกำเนิดหลายอย่างปะปนกันอยู่ โดยจะทราบได้ต่อเมื่อได้ทำการตรวจวัดและวิเคราะห์ผิว (Surface Analysis)

ความหยาบผิว (Surface Roughness) จะเกิดขึ้นเมื่อวัตถุดิบถูกกระทำด้วยเครื่องจักร (Machining) โดยจะเกิดรอยทางเดินของเครื่องมือตัด (Tool) บริเวณเนื้อชิ้นงาน หากได้มีการขยายบริเวณพื้นผิวขึ้นมาดูจะพบรอยหยาบ ที่เกิดจากทางเดินของเครื่องมือกำจัดเนื้อวัสดุซึ่งบ่งบอกส่วนประกอบความหยาบผิว (Roughness Component) โดยปัจจัยที่ทำให้เกิด ความหยาบผิว (Surface Roughness) ได้แก่ ค่าความลึกของการตัด (Depth of Cut) และค่าความเร็วรอบ (Speed) และ ค่าอัตราการป้อนชิ้นงาน (Feed Rate) ของเครื่องมือกำจัดเนื้อวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.3 ลักษณะการเบี่ยงเบนของผิวชิ้นงาน

การเบี่ยงเบนของผิวชิ้นงานสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่ม คือ บกพร่องทางด้านความราบ การเบี่ยงเบนผิวชิ้นงานที่เกิดจากลอนคลื่น การเบี่ยงผิวจากร่องโค้ง การเบี่ยงเบนผิวชิ้นงานจากแอ่งหรือรอยแตกเป็นจุดหยาบ ดังตารางที่ 2.1 แสดงลักษณะการเบี่ยงเบนผิวของชิ้นงานซึ่งบอกสาเหตุต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของผิวชิ้นงาน

#### 2.4.3.1 บกพร่องทางด้านความราบ ความกลม

บกพร่องทางด้านความราบ ความกลม (Form Error) อีกส่วนประกอบหนึ่งของความหยาบผิวงาน เกิดจากการที่ร่างขยับเคลื่อน หรือ ร่างที่รองรับชุดเคลื่อนที่ของป้อนมีค เกิดสึกหรือ ค่าความตรง (Straightness) ลดลง ผลที่ได้มักจะเป็นคลื่นที่มีช่วงความยาวมาก อาจมากกว่าความยาวของร่างเคลื่อนที่ โดยจะปรากฏรวมอยู่ในความหยาบผิว

#### 2.4.3.2 การเบี่ยงเบนที่เกิดจากลอนคลื่น

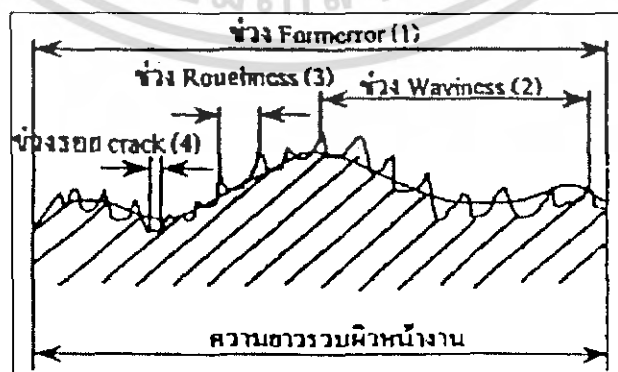
การเบี่ยงเบนที่เกิดจากลอนคลื่น (Waviness) คุณลักษณะผิว คือความเป็นคลื่น (Waviness) ซึ่งมักจะเกิดจากการสั่นสะเทือนจากแหล่งกำเนิดต่างๆ โดยรอบ เช่น เครื่องมือไม่ได้วางแผ่นป้องกันการสั่นสะเทือน หรือจากเกิดเครื่องเอียง เกิดจากการสึกของลูกปืน (Bearing) คอเครื่อง เกียร์ทด ชุดจับยึด หรือ ส่วนอื่นๆ ที่เริ่มต้นคลอนตามอายุหรือกาลเวลาที่ใช้งาน ความสั่นสะเทือนเหล่านี้จะปรากฏแฝงอยู่ในลักษณะของผิวงาน

#### 2.4.3.3 การเบี่ยงเบนจากร่องโค้ง

การเบี่ยงเบนจากร่องโค้ง (Roughness) ความหยาบ ความเป็นคลื่น หรือ ความผิดเพี้ยนของรูปทรง อันเกิดขึ้นในระหว่างที่ทำงาน ผสมปนกันอยู่ในภาพของผิวงานที่เห็นหรือสัมผัสได้

#### 2.4.3.4 ความไม่เรียบ ขรุขระเป็นจุดหยาบ

ไม่เรียบขรุขระเป็นจุดหยาบ (Crack) ลักษณะจะคล้ายกับการเบี่ยงเบนจากร่องโค้ง (Roughness) แต่จะความหยาบผิวที่มากกว่า (เวชิระ มีทอง, 2544, วิศวกรรมการการวัดละเอียด)



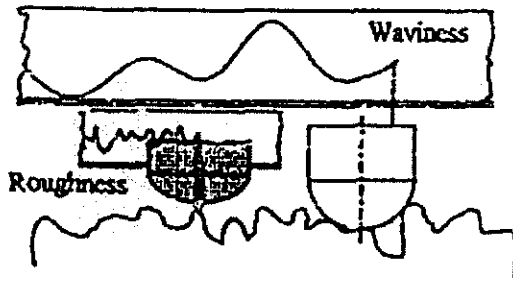
รูปที่ 2.4 ช่วงของการเบี่ยงเบนผิวชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 แสดงลักษณะการเบี่ยงเบนของผิวชิ้นงาน

แสดงการเบี่ยงเบนของผิวชิ้นงาน		ตัวอย่างการเบี่ยงเบนผิวของชิ้นงาน	สาเหตุที่ทำให้เบี่ยงเบน
	Form Error	บกพร่องทางด้านความราบ ความกลม	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ผิดพลาดจากระบบนำเคลื่อนเครื่องมือ</li> <li>- การ โกงงอของเครื่องมือหรือชิ้นงาน</li> </ul>
	Waviness	การเบี่ยงเบนที่เกิดการลอนคลื่น	<ul style="list-style-type: none"> <li>- การจับยึดที่เชิงศูนย์กลางของชิ้นงาน</li> <li>- การเบี่ยงเบนจากรูปทรงหรือการหมุนของคมตัด</li> </ul>
	Roughness	การเบี่ยงเบนจากร่องโค้ง	<ul style="list-style-type: none"> <li>- รูปทรงคมตัด</li> <li>- การตั้งค่าอัตราป้อนชิ้นงานหรือตั้งค่าความเร็วลึกมุมตัด</li> </ul>
	Crack	ความไม่เรียบ ขรุขระเป็นจุดหยาบหรือรอยแตก	<ul style="list-style-type: none"> <li>- การ ไหลหรือการขาดของเศษงาน</li> <li>- การเตรียมผิวด้วยกรรมวิธียิงทราย</li> </ul>

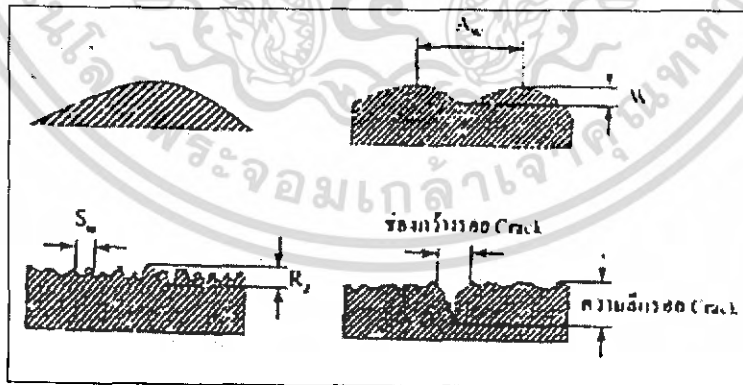
ข้อบกพร่องของผิวหน้าชิ้นงานที่มีขนาดเป็นตัวกำหนดให้มีรูปแบบความเบี่ยงเบนผิวชิ้นงานแบบต่างๆ ดังรูป 2.4 ช่วงการเบี่ยงเบนซึ่งจะแสดงให้เห็นลักษณะของช่วงความเบี่ยงเบนผิวชิ้นงานแบบต่างๆ จากตารางที่ 2.1 แสดงลักษณะการเบี่ยงเบนของผิวชิ้นงานในแบบรูปบกพร่องทางด้านความราบความกลม (Form Error) และรูปแบบ การเบี่ยงเบนที่เกิดจากลอนคลื่น (Waviness) เป็น ไปในลักษณะมหภาค (Macro) ส่วนการเบี่ยงเบนผิวชิ้นงานรูปแบบ การเบี่ยงเบนจากร่องโค้ง (Roughness) และรูปแบบไม่เรียบขรุขระเป็นจุดหยาบ (Crack) เป็นไปในลักษณะจุลภาค (Micro) ซึ่งมีร่องหรือช่องความหยาบแฉกมาก ดังนั้นการวัดตรวจสอบเพื่อหาค่าที่ต้องการต้องใช้อุปกรณ์เครื่องวัดความหยาบผิว ซึ่งมีหลักการและส่วนประกอบเบื้องต้นในรูปที่ 2.5 ซึ่งเป็นลักษณะของหัวลากกับหัวสัมผัสของเครื่องวัดความหยาบที่ใช้ในการวิจัย



รูปที่ 2.5 ลักษณะความแตกต่างระหว่างห้วงลาก (รูปด้านขวา) กับห้วงสัมผัส (รูปด้านซ้าย)

ข้อบกพร่องผิวหน้าชิ้นงาน เกิดมาจากรวมวิธีการผลิตชิ้นงานผิวหน้ามักจะมีการเบี่ยงเบนตลอดเวลาที่ทำการผลิตชิ้นงาน จากความคิดที่เกี่ยวกับรูปทรงต่างๆ ทางเรขาคณิต ซึ่งข้อเท็จจริงทั้งหลายความเบี่ยงเบนจากรูปแบบ ไม่เป็นความจริงของผิวชิ้นงานด้วยเหตุนี้ผิวชิ้นงานเป็นเรื่องสำคัญ ดังนั้นที่ของชิ้นส่วนจักรกลพฤติกรรมการกัดกร่อนความสามารถในการแข่งขัน ความสามารถทำให้เกิดการสิ้นเปลืองเสียสัณฐานอยู่ที่การควบคุมคุณภาพผิวหน้า ซึ่งตามมาตรฐาน DIN 4760 มีการแบ่งรูปแบบการเบี่ยงเบนออกเป็น 6 แบบ สำหรับแบบที่ 5 และแบบที่ 6 เป็นองค์ประกอบที่หลุดอยู่ในโครงสร้างแบบที่ 4 และเกิดเป็นโครงสร้างแบบค้ำขาย และไม่มีตัวอย่างอธิบายที่แน่ชัด ขนาดเป็นตัวกำหนดให้มีรูปแบบเบี่ยงเบน ซึ่งมีทั้งหมด 4 รูปแบบ อาจจะไม่เกี่ยวข้องกับหน้าที่ของผิวหน้า ณ เวลา ผิวหน้าที่ด้านไม่ควรจะมีหลายส่วนของรูปแบบเบี่ยงเบน ผิวหน้าต้องการความหยาบค่า ผิวหน้าที่เปลี่ยนแปลงควรจะมีรูปคลื่นที่ชัดเจน

จากข้อมูลทำให้สามารถจำแนกลักษณะการเบี่ยงเบนผิวงานทั้ง 4 รูปแบบตามอัตราส่วนระหว่างความยาว (L) ต่อร่องลึก (t) แสดงดังรูปที่ 2.6 (เวธิระ มีทอง, 2544, วิศวกรรมกรรมการวัดละเอียด) และตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.6 จำแนกลักษณะการเบี่ยงเบนผิวชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ 62763 ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ 2.2 อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อร่องลึกความหยابผิว

ลักษณะการเบี่ยง	Form Error	Waviness	Roughness	Crack
อัตราส่วน L/h ไมโครเมตร	> 1000	100 - 1000	5 - 100	< 5

### 2.4.4 รายละเอียดของเครื่องวัดค่าความหยابผิว

#### 2.4.4.1 หลักการทำงานของเครื่องวัดค่าความหยابผิวของชิ้นงาน

การทำงานของเครื่องวัดค่าความหยابผิวจะเป็นการทำงานร่วมกันของหัวทดสอบกับชุดขยายสัญญาณและควบคุมที่จะแปลงผลการสัมผัสของปลายวัด ซึ่งเคลื่อนที่ขึ้นลงตามลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานเปลี่ยนไปเป็นสัญญาณทางไฟฟ้ารวม ที่มีคลื่นของความถี่สูงและค่าผสมกันอยู่ อันมีผลมาจากลักษณะ โครงสร้างรวมของพื้นผิวที่วัดได้ ซึ่งการประมวลผลของผิว ตามคุณสมบัติการวัดจำเป็นต้องแยกลักษณะสัญญาณความถี่สูงและต่ำนี้ออกจากกัน เนื่องจากแต่ละลักษณะเป็นค่าที่แทนคุณสมบัติที่ต่างกัน คือ

- ย่านความถี่สูงจะเป็นค่าคุณสมบัติของความหยابผิว (Roughness)
- ย่านความถี่ต่ำจะเป็นค่าคุณสมบัติของความเป็นลอนคลื่น (Waviness)

#### 2.4.4.2 วิธีการทำงานของเครื่องวัดค่าความหยابผิวของชิ้นงาน

โดยตัวที่เป็นหัวทดสอบวัดค่าความหยابผิวคือ หัวทดสอบใช้วัดค่าความหยابผิวของชิ้นงาน โดยจะมีแท่งโลหะด้านในมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่มีขนาดเล็กจะเชื่อมต่อกับหัวทดสอบคล้ายปากกาปากแหลมและแท่งโลหะด้านนอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่มีขนาดใหญ่โดยใช้หัวทดสอบลากสัมผัสกับผิวชิ้นงาน โดยชิ้นงานที่นำมาหาค่าความหยابผิวนั้นต้องมีขนาดของร่องทดสอบที่สามารถให้หัวทดสอบเข้าไปสัมผัสวัดค่าได้แต่ก่อนที่จะวัดค่าความหยابผิวได้นั้นต้องมีการปรับค่าการวัดค่าความหยابผิว (Calibrate) ก่อนทุกครั้งที่ทำกรวัดค่าเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้อง

### 2.4.5 แผ่นเทียบผิว

แผ่นเทียบผิว (Comparator Gages) เป็นเครื่องมือวัดความหยابผิวงานที่สามารถใช้งานได้รวดเร็วก่อนที่จะศึกษาเรื่องแผ่นเทียบผิว จำเป็นต้องศึกษาเกี่ยวกับสัญลักษณ์ความหยابผิวตามมาตรฐานต่างๆ เสียก่อนจึงจะสามารถเข้าใจถึงลักษณะของผิวงานได้ถูกต้อง

แผ่นเทียบผิวเป็นเครื่องมือที่ใช้ตรวจสอบความหยابผิวความละเอียดของผิวงานที่ผ่านการ ตะไบ การกลึง การกัด การเจียรไน ซึ่งสามารถทำการตรวจสอบได้สะดวกรวดเร็ว

### 2.4.6 ลักษณะโครงสร้างแผ่นเทียบผิว

แผ่นเทียบผิวมีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยม วางเรียงกันเป็นชุดตามลำดับความหยاب ในแต่ละแผ่นจะมีสัญลักษณ์บอกระดับความหยابกำกับไว้ แผ่นเทียบผิวชุดหนึ่งจะมีแผ่นเทียบผิว 8 แผ่น แผ่นเทียบผิวแต่ละชุดใช้สำหรับตรวจสอบความหยابของผิวงานแต่ละชนิดต่างกัน เช่น ผิวงานตะไบ ผิวงานกลึง งานกัด และผิวงานเจียรไน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.4.7 การใช้แผ่นเทียบผิวตรวจสอบผิวงาน

การใช้แผ่นเทียบผิวตรวจสอบความหยาบผิวงาน ต้องเลือกแผ่นเทียบผิวให้ตรงกับผิวชิ้นงานที่จะตรวจสอบ เช่น แผ่นเทียบผิวงานกัด ใช้สำหรับเทียบความหยาบของผิวงาน วิธีการใช้แผ่นเทียบผิวมี 2 วิธีคือ

##### 2.4.7.1 วิธีที่ 1 การใช้สายตาตรวจสอบโดยอาศัยหลักการสะท้อนแสง

การใช้สายตาตรวจสอบโดยอาศัยหลักการสะท้อนแสง จากผิวงานเปรียบเทียบกับแผ่นเทียบผิว ผิวงานที่มีความเรียบมากจะสะท้อนแสงได้ดีกว่า แต่หากชิ้นงานมีขนาดใหญ่ไม่สามารถเคลื่อนย้ายมาใกล้ที่มีแสงสว่างเพียงพอ จำเป็นต้องใช้โคมไฟส่องที่ผิวงานและแผ่นเทียบผิว และสังเกตการสะท้อนแสงจากผิวงานกับแผ่นเทียบผิวว่ามีขนาดเท่ากันหรือใกล้เคียงที่สุดในช่วงใด จากนั้นจึงอ่านค่าความหยาบผิวชิ้นงานออกมาเป็นตัวเลข หรือบอกเป็นสัญลักษณ์ที่กำหนดบนแผ่นเทียบผิว

##### 2.4.7.2 วิธีที่ 2 การใช้ความรู้สึกสัมผัส

วิธีนี้ใช้ในกรณีที่มีบางครั้งเกิดความไม่เชื่อมั่นในสายตาตนเอง ไม่สามารถบอกค่าความหยาบผิวได้ถูกต้อง หรือผิวงานที่นำมาตรวจสอบไม่สะท้อนแสงหรือสะท้อนแสงน้อยมาก เช่น ผิวเหล็กหล่อ จำเป็นต้องอาศัยความรู้สึกสัมผัส โดยใช้นิ้วมือลูบเปรียบเทียบระหว่างผิวงานกับแผ่นเทียบผิวว่ามีความหยาบเท่ากันในช่วงใดของแผ่นเทียบผิว จากนั้นจึงอ่านค่าความหยาบผิว หรือกำหนดเป็นสัญลักษณ์ความหยาบผิวตามที่ปรากฏบนแผ่นเทียบผิว

#### 2.4.8 ข้อควรระวังและการดูแลรักษาแผ่นเทียบผิว

เลือกใช้แผ่นเทียบผิวให้ตรงกับชนิดของความหยาบผิวงานที่ต้องการเปรียบเทียบ

1. เช็ดคราบน้ำมันที่แผ่นเทียบผิวออกให้หมด และทำความสะอาดผิวชิ้นงานที่ต้องการเปรียบเทียบ
2. ระวังไม่ให้ของแข็งขูดขีดแผ่นเทียบผิว
3. ตรวจสอบในที่ที่มีแสงสว่างเพียงพอ
4. หลังการใช้งานต้องรีบเช็ดทำความสะอาด ทาน้ำมันกันสนิม และนำเก็บใส่ซอง

#### 2.4.9 ค่าที่เกี่ยวข้องกับความหยาบผิว

##### 2.4.9.1 ความหยาบผิว

ความหยาบผิว (Surface Roughness) คือ ปริมาณของลักษณะบนพื้นผิวชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีการแปรรูปด้วยเครื่องจักรและกำหนดเป็นสเกลด้วยค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยทางคณิตศาสตร์ (Arithmetical Mean Deviation) ของพื้นที่หน้าตัด ( $R_a$ ) ความสูงของส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลง 10 จุด ( $R_z$ ) และค่าสูงที่สุดของส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลง ( $R_p$ )

##### 2.4.9.2 ความยาวอ้างอิง

ความยาวอ้างอิง (Reference Length) ความยาวอ้างอิง ( $l_r$ ) กำหนดให้เป็นความยาวซึ่งจำเป็นต่อการหาค่าที่สุทธาระยะระหว่างจุดสูงสุดและปริมาณค่าสูงที่สุดของส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลง ( $R_p$ ) หรือความสูงที่สุดของส่วนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

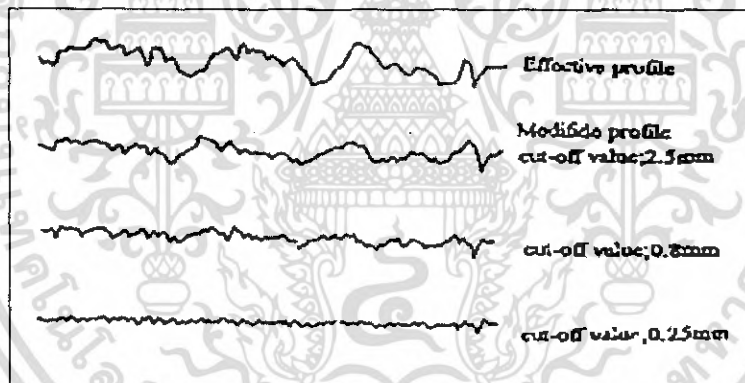
เปลี่ยนแปลง 10 จุด ( $R_z$ ) จากพื้นที่หน้าตัดคัดแปลงค่าความยาวของความยาวอ้างอิง ไม่มีผลต่อความเรียบของผิวชิ้นงานปกติ

#### 2.4.9.3 เส้นค่าเฉลี่ย

เส้นค่าเฉลี่ย (Mean Line) ถูกกำหนดให้เป็นเส้นตรงหรือเส้นโค้งซึ่งเป็นผลรวมทั้งหมดของค่ากำลัง 2 ของความสูงจากเส้นค่าเฉลี่ยถึงส่วนโค้งจากการวัด โดยแสดงเป็นค่าต่ำสุด เส้นเฉลี่ยถูกใช้เป็นเส้นอ้างอิง เพื่อหาค่าตัวแปรของความหยาบของผิวชิ้นงาน

#### 2.4.9.4 รูปหน้าตัดที่เป็นผลและรูปหน้าตัดคัดแปลง

รูปหน้าตัดที่เป็นผลและรูปหน้าตัดคัดแปลง (Effective Profile and Modified Profile) ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการแปรรูปด้วยเครื่องอีดีเอ็มจะมีลักษณะนูนขึ้นเป็นแอ่งด้วยความสูง ช่วงห่าง และความเอียงแตกต่างกันมากมาย เมื่อความเรียบของผิวเหล่านี้ถูกวัดด้วยส่วนสัมผัสทางไฟฟ้าหรือหัวทดสอบ แล้วจึงคัดลอกความถี่ออกไปด้วยรูปหน้าตัดคัดแปลงจะเกิดเส้นโค้งที่ลากด้วยปลายหัวทดสอบ ซึ่งมีความหมายซึ่งมีความแตกต่างจากเส้นโค้งที่ลากโดยผ่าน Low Band Cut-off Filter หรือที่เรียกว่า รูปหน้าตัดคัดแปลง ค่าของความถี่ที่ได้ถ้าวัดออกด้วย Filter เรียกว่า ค่าตัดออก และรูปร่างของเส้นโค้งมีความแตกต่างกัน (วชิระ มีทอง, 2544, วิศวกรรมการผลิตโลหะ)



รูปที่ 2.7 รูปหน้าตัดที่เป็นผลและรูปหน้าตัดคัดแปลงของความหยาบ

#### 2.4.10 วิธีการแสดงค่าความหยาบผิว

การศึกษาเกี่ยวกับความหยาบผิวของชิ้นงานเป็นการเก็บค่าและการหาค่าเฉลี่ยของความแรงสัญญาณ (Amplitude) จากรูปหน้าตัดและเมื่อศึกษาวิธีการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับใช้คลื่นเสียง จึงได้นำมาประยุกต์เพื่อการวิเคราะห์ค่าความหยาบของผิวชิ้นงานและมีวิธีการคำนวณค่าต่างๆ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

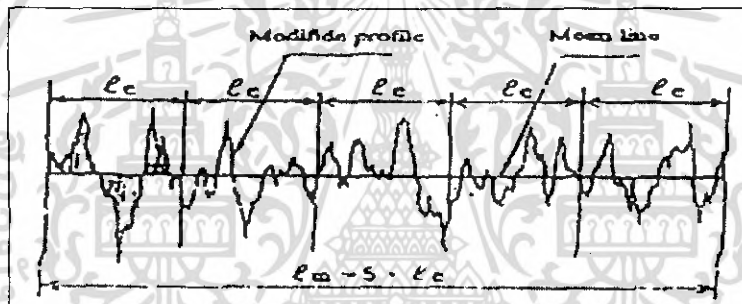
2.4.10.1 ค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยทางคณิตศาสตร์ของพื้นที่หน้าตัด

ค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยทางคณิตศาสตร์ของพื้นที่หน้าตัด ( $R_a$ ) มีวิธีหาโดย แกน  $x$  ใช้กำหนดทิศทางเส้นค่าเฉลี่ยของเส้นโค้งจากการวัดและมีความยาวประเมินโดย ( $l_m = 5 \cdot l_c$ ) โดยทั่วไปความยาวประเมิน ( $l_m$ ) มีค่าเป็น 5 เท่าของความยาวอ้างอิง ( $l_c$ ) การกำหนดตามแกน  $x$  ในรูปที่ 2.8 และแกน  $z$  มีทิศทางในแนวตั้งฉากกับแกน  $x$  และรูปพื้นที่หน้าตัดตัดแปลงจะถูกอธิบายโดย  $z = f(x)$  ค่า  $R_a$  หาได้จากสมการที่ 2.6 วิธีการหามีดังนี้

$$R_a = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} |f(x)| dx \quad (2.6)$$

เมื่อ  $l_m$  = ความยาวประเมิน (ไมโครเมตร)

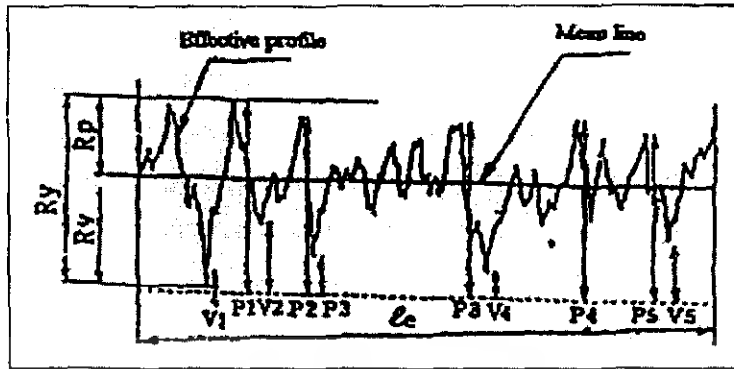
$l_c$  = ความยาวอ้างอิง (ไมโครเมตร)



รูปที่ 2.8 ค่าพารามิเตอร์ค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยทางคณิตศาสตร์ของพื้นที่หน้าตัดของค่าความหยาบผิว

2.4.10.2 ค่าสูงที่สุดของส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลง

ค่าสูงที่สุดของส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลง ( $R_p$ ) มีวิธีการหาโดย การตัดออกเส้นโค้งจากการวัดช่วงห่างของความยาวอ้างอิงแล้วลากเส้น 2 เส้นขนานกับเส้นค่าเฉลี่ยของรูปหน้าตัดแปลงให้หนึ่งสัมผัสกับส่วนที่สูงสุดปลายยอดแหลม (Peak) และอีกเส้นสัมผัสกับส่วนที่ลึกที่สุดของแอ่ง (Valley) ค่า  $R_p$  ได้จากระยะความยาวช่วงห่างเส้นขนานทั้งสองดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.9 ค่าค่าสูงที่สุดของส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงและค่าความสูงของส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลง 10 จุด ของค่าความหยาบผิว

วิธีการหาวิธีดังนี้

$R_p$  = ระยะจากเส้นค่าเฉลี่ยถึงจุดที่สูงที่สุดของปลายยอดแหลม (Peak)

$R_v$  = ระยะจากเส้นค่าเฉลี่ยถึงจุดที่ลึกที่สุดของแอ่ง (Valley)

$R_t$  = ระยะระหว่างจุดที่สูงที่สุดของปลายยอดแหลม (Peak) และจุดที่ลึกที่สุดของแอ่ง (Valley)

ถ้าค่า  $R_p$  และ  $R_v$  มีค่ามากๆ จะมีส่วนสำคัญต่อการสึกหรอของชิ้นส่วนของเครื่องจักร

#### 2.4.10.3 ความสูงของส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลง 10 จุด

ความสูงของส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลง 10 จุด ( $R_z$ ) มีวิธีการหาโดยส่วนของเส้นโค้งจากการวัดตัดออกด้วยความยาวอ้างอิงให้เหลือจุดสูงที่สุดของปลายยอดแหลม (Peak) 5 จุด และจุดที่ลึกที่สุดของแอ่ง (Valley) 5 จุด ดังรูปที่ 2.9 ค่า  $R_z$  หาได้จากสมการ 2.7

วิธีการหาวิธีดังนี้

$P_{(1,2,3,4,5)}$  = เป็นค่าสูงที่สุดของปลายยอดแหลม (Peak) 5 จุด

$V_{(1,2,3,4,5)}$  = เป็นค่าลึกที่สุดของแอ่ง (Valley) 5 จุด

$$R_z = \frac{1}{5} \{ (P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5) - (V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5) \} \quad (2.7)$$

เมื่อ  $P_i$  เป็นค่าสูงที่สุดของปลายยอดแหลมและ  $V_i$  เป็นค่าสูงที่สุดอันดับที่สองของรอยแตกหรือแอ่ง และเรียงลำดับต่อไป สำหรับ  $R_z$  คือ จุดสูงสุดและจุดต่ำสุดจำนวน 10 จุด ในความสูงของส่วนที่เปลี่ยนแปลงแสดงในรูปที่ 2.9 ลักษณะที่เหมือนภูเขาและหุบเขา ในเส้นโค้งที่ได้จากการวัด จะมียอดแหลมและแอ่งแต่ละส่วน 1 จุดเท่านั้น

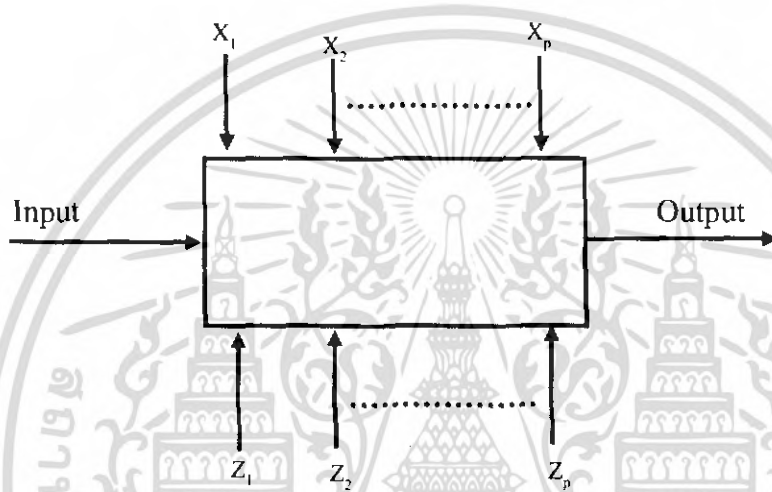
#### 2.5 หลักการออกแบบการทดลอง

การทดลองถูกสร้างขึ้นด้วยผู้ทดลอง ซึ่งมาจากหลายสาขาอาชีพที่ต้องการคำตอบจากกระบวนการหรือระบบที่ผู้ทดลองมีความสนใจ การทดลองในที่นี้อาจหมายถึงการทดสอบหรือชุดของการทดสอบที่คาดหมายว่าเมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนตัวแปรป้อนเข้าของกระบวนการหรือระบบ จะเป็นผลให้ตัวแปรตอบสนองมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น ในงานทางด้านวิศวกรรมการทดลองมีบทบาทอย่างมากในการออกแบบผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ การพัฒนากรรมวิธีการผลิตของกระบวนการและการปรับปรุงกระบวนการผลิต บางกรณีอาจต้องการพัฒนากระบวนการที่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจากแหล่งภายนอกกระบวนการจะมีผลกระทบไม่มากต่อกระบวนการ

ตามปกติแล้วการทดลองถูกนำมาใช้เพื่อการศึกษาถึงประสิทธิภาพในการทำงานของกระบวนการและระบบ (Process or System) ซึ่งทั้งกระบวนการและระบบสามารถที่จะแทนด้วยแบบจำลองดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ปรเมศ ชูติมา, 2545, การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม)



รูปที่ 2.10 รูปแบบจำลองของกระบวนการหรือระบบ

เราอาจจะมองได้ว่าภาพของกระบวนการเป็นการรวมกันของเครื่องจักร วิธีการ คน และทรัพยากรอื่นๆ และเมื่อมีสิ่งป้อนเข้ามา (Input) สู่วกระบวนการ กระบวนการจะถูกเปลี่ยนรูปออกมาได้เป็นผลลัพธ์ (Output) ซึ่งผลลัพธ์ดังกล่าวอาจมีได้ตั้งแต่หนึ่งหรือมากกว่าหนึ่ง

จากรูปที่ 2.10 จะเห็นได้ว่ากระบวนการหรือระบบยังประกอบด้วยปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factors) คือ  $X_1, X_2, \dots, X_p$  และปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factors) คือ  $Z_1, Z_2, \dots, Z_p$

### 2.5.1 ปัจจัยในการผลิต

ปัจจัยในการผลิตสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

#### 2.5.1.1 ปัจจัยที่ควบคุมได้

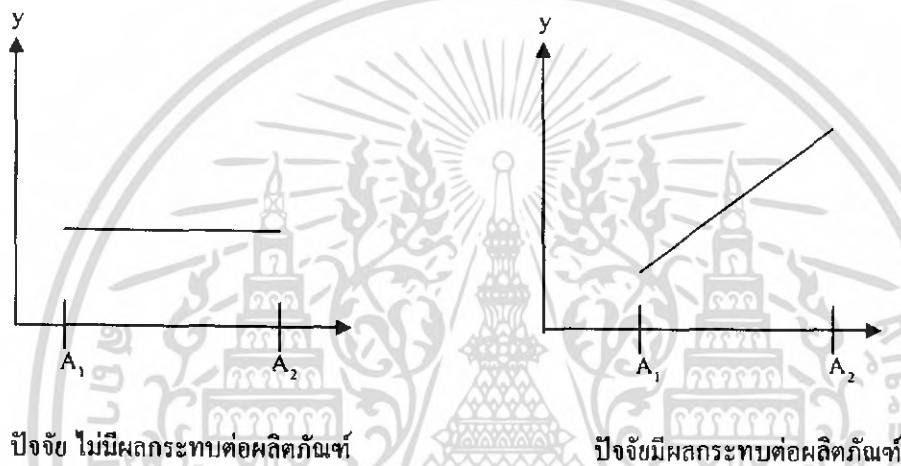
ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factor) หมายถึง ปัจจัยที่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในกระบวนการ ซึ่งเป็นผลต่อการทดลองเพราะโดยส่วนใหญ่ผู้ทำการทดลองต้องการกำหนดค่าต่างๆ ที่คิดว่ามีผลต่อค่าตอบสนองที่เราสนใจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.1.2 ปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้

ปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable) หมายถึง ปัจจัยที่ไม่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในกระบวนการ อันเนื่องมาจากเทคโนโลยีที่ไม่ทันสมัยพอหรือต้นทุนในการควบคุมสูงมาก ผู้ทดลองควรกำจัดปัจจัยลักษณะนี้เพื่อให้เปลี่ยนเป็นปัจจัยที่ควบคุมได้ จึงจะเป็นประโยชน์ต่อการทดลอง

การออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์ให้ได้ว่าปัจจัยใดมีอิทธิพลต่อปัจจัยได้หรือไม่ ต้องทำการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยอย่างน้อย 2 ระดับ แล้วทำการทดลองจากนั้นจึงวิเคราะห์ผลการทดลอง ตัวอย่างเช่น ให้  $y$  เป็นค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน  $A$  เป็นปัจจัยหนึ่งที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งจะสรุปผลเมื่อได้กราฟ แสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงอิทธิพลที่ไม่มีผลและอิทธิพลที่มีผลของปัจจัยต่อผลิตภัณฑ์

### 2.5.2 วัตถุประสงค์ของการออกแบบการทดลอง

วัตถุประสงค์ในการออกแบบการทดลอง มีดังนี้

1. หาค่าตัวแปรที่มีผลมากที่สุดต่อค่าตอบสนอง  $y$
2. หาวิธีการตั้งค่าของ  $x$  ที่มีผลต่อค่าตอบสนอง  $y$  เพื่อให้  $y$  อยู่ที่ค่าที่ต้องการ
3. หาวิธีการตั้งค่าของ  $x$  ที่มีผลต่อค่าตอบสนอง  $y$  เพื่อให้  $y$  มีค่าน้อย
4. หาวิธีการตั้งค่าของ  $x$  ที่มีผลต่อค่าตอบสนอง  $y$  เพื่อให้ผลของตัวแปรที่เราไม่สามารถควบคุมได้  $Z_1, Z_2, \dots, Z_p$  มีค่าน้อยที่สุด

### 2.5.3 คำจำกัดความ

#### 2.5.3.1 อิทธิพลหรือผล

อิทธิพลหรือผล (Effect) หมายถึง ผลของตัวแปรต้นที่มีผลต่อตัวแปรตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.3.2 ปัจจัย

ปัจจัย (Factor) หมายถึง สิ่งที่เราคิดว่ามีอิทธิพลต่อผลการทดลองของคุณสมบัติในตัวผลิตภัณฑ์

### 2.5.3.3 ระดับของปัจจัย

ระดับของปัจจัย (Level of Factor) หมายถึง สถานะต่างๆของปัจจัยหนึ่งๆที่ทำการกำหนดในการทดลอง

### 2.5.3.4 ปัจจัยรบกวน

ปัจจัยรบกวน (Noise Factor) หมายถึง ปัจจัยที่ก่อให้เกิดผลกระทบเล็กน้อยๆ และไม่สามารถควบคุมได้

## 2.5.4 หลักในการออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองเป็นกระบวนการวางแผนของการทดลองซึ่งข้อมูลในการทดลองนั้นจะถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติ จนได้ข้อมูลสรุปของวัตถุประสงค์ที่ได้ตั้งไว้ หลักการทางสถิติถูกนำมาใช้ในการออกแบบการทดลองเพื่อทำความเข้าใจในข้อมูล และหาผลสรุปออกมานั่นเอง หลักในการออกแบบการทดลองมีดังนี้

### 2.5.4.1 การทำซ้ำ

การทำซ้ำ (Replication) คือ การทดลองซ้ำในแต่ละข้อมูลเพื่อที่จะกำจัดผลของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ออกไป การทำซ้ำมีความสำคัญ 2 ประการ เพื่อประมาณค่าความผิดพลาดของการทดลอง และเพื่อประมาณค่าเฉลี่ยนั้นให้มีความมั่นใจมากขึ้น

### 2.5.4.2 การทำแบบสุ่ม

การทำแบบสุ่ม (Randomization) คือ การให้อาสาในการเก็บข้อมูลของข้อมูลแต่ละตัวให้เท่ากันเพื่อกระจายผลของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ให้กับข้อมูลทุกระดับในการทดลองให้เท่าๆ กันการทำแบบสุ่มสามารถแบ่งออกได้ 3 วิธีดังนี้

1. การทำแบบสุ่มสมบูรณ์ (Complete Randomization)
2. การทำแบบสุ่มอย่างง่าย (Simple Randomization)
3. การทำแบบสุ่มสมบูรณ์ภายในบล็อก (Complete Randomization within Block)

### 2.5.4.3 การบล็อก

การบล็อก (Blocking) คือ การจัดกลุ่มทำการเก็บข้อมูลเป็นช่วงเพื่อลดผลจากปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ ทำให้การทดลองนั้นมีความเที่ยงตรงมากขึ้น การบล็อกส่วนใหญ่เกิดขึ้นกับวัสดุที่ใช้ในการทดลองนั้น ไม่มีความสม่ำเสมอ จึงจำเป็นต้องแยกเอาผลของวัสดุที่แตกต่างกันออกไปจะสนใจผลการทดลองที่เกิดขึ้นในแต่ละบล็อกเท่านั้น

## 2.5.5 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

การใช้หลักการทางสถิติในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองเป็นสิ่งจำเป็น ผู้ทำการทดลองต้องมีความเข้าใจวิธีในการเก็บข้อมูลตลอดการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้มา

### 2.5.5.1 การนิยามปัญหา

การนิยามปัญหา คือ การระบุว่าความต้องการในการผลิตคืออะไรและต้องการรู้อะไรบ้างในการผลิต ซึ่งการนิยามปัญหานี้จะเชื่อมโยงไปถึงวัตถุประสงค์ของการทดลอง

### 2.5.5.2 การเลือกปัจจัยที่มีผลและระดับของปัจจัย

การเลือกปัจจัยที่มีผลและระดับของปัจจัย คือ การใช้หลักการทางทฤษฎีและประสบการณ์ที่เคยปฏิบัติมาในการผลิต เพื่อระบุว่าปัจจัยใดบ้างที่น่าจะมีผลต่อการทดลอง และแต่ละปัจจัยนั้นควรมีช่วงในการทดลองอย่างไร เพื่อระบุระดับของปัจจัยในการทดลองสุดท้ายเป็นการระบุที่ใช้เป็นแบบกำหนด (Fixed Levels), แบบสุ่ม (Random Levels) หรือแบบผสม (Mixed Levels)

1. แบบกำหนด (Fixed Levels) หมายถึง ระดับของปัจจัยที่สามารถควบคุมหรือกำหนดได้แน่นอน
2. แบบสุ่ม (Random Levels) หมายถึง ระดับของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้หรือกำหนดค่าของปัจจัยได้แน่นอน
3. แบบผสม (Mixed Levels) หมายถึง การผสมผสานของปัจจัยที่เป็นทั้งแบบกำหนดได้และแบบสุ่ม

### 2.5.5.3 การเลือกตัวแปรตอบสนอง

ในการเลือกตัวแปรตอบสนอง (Response Variables) ผู้ทำการทดลองต้องมีความมั่นใจว่าเลือกตัวแปรที่สามารถให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อกระบวนการที่ทำการศึกษา ค่าเฉลี่ยหรือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าที่จะใช้วัดเป็นตัวแปรตอบสนอง โดยทั่วไปจะเก็บข้อมูลของตัวแปรตอบสนองเพียงค่าเดียว แต่ก็มีบางการทดลองที่ทำการวัดค่าตัวแปรตอบสนองหลายค่า การวัดค่าจะต้องมีความแม่นยำทั้งความถูกต้องของเครื่องมือวัดด้วย

### 2.5.5.4 การเลือกแบบการทดลอง

การเลือกแบบการทดลองจะต้องพิจารณาถึงขนาดของข้อมูลหรือจำนวนที่ใช้ในการทำซ้ำ (Replicate) ความเหมาะสมของลำดับที่ใช้ในการทดลอง ข้อจำกัดในการสุ่ม (Randomization) และการบล็อก (Blocking) ที่จำเป็นทั้งนี้ต้องนำความเกี่ยวข้องกันในด้านความเสี่ยงและต้นทุนที่ใช้ในการทดลอง

### 2.5.5.5 การดำเนินการทดลอง

เมื่อทำการทดลอง ต้องทำการตรวจสอบการทดลองอย่างระมัดระวังว่ามีการดำเนินการตามที่วางไว้ ข้อควรระวังในการทดลองคือความถูกต้องของกระบวนการเครื่องมือวัด และความสม่ำเสมอในการทดลองเพื่อให้เกิดความผิดพลาดน้อยที่สุดเพราะความผิดพลาดในขั้นตอนนี้มักจะทำให้การทดลองล้มเหลวได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.5.5.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

หลักการทางสถิติถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลจากการทดลอง การวิเคราะห์ข้อมูลอาจใช้ซอฟต์แวร์เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ด้วย ซึ่งปัจจุบันมีซอฟต์แวร์อยู่หลายประเภทที่สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ได้ วิธีการถูกนำมาใช้อย่างได้ผลคือกราฟอย่างง่ายคือช่วยในการวิเคราะห์และตีความข้อมูลจากการทดลอง การตรวจสอบความเพียงพอของโมเดล (Model Adequacy Checking) เป็นสิ่งที่จำเป็นต้องทำการวิเคราะห์เพื่อความเชื่อมั่นของข้อมูลที่เก็บมาจากการทดลอง จึงจำไว้ว่าวิธีทางสถิติไม่สามารถพิสูจน์ได้ว่าปัจจัยใดมีอิทธิพลได้อย่างแน่นอนอนเพียงแต่เป็นเครื่องมือที่ช่วยให้แนวทางในการวิเคราะห์ภายใต้ความเชื่อมั่นโดยระบุเป็นเปอร์เซ็นต์ในการสรุปผลการทดลอง แต่อย่างไรก็ตามการใช้หลักการทางสถิติช่วยให้การตัดสินใจเป็นนามธรรมมากยิ่งขึ้น

#### 2.5.5.7 สรุปผลและข้อเสนอแนะ

เมื่อข้อมูลถูกวิเคราะห์จะต้องสรุปผลจากการวิเคราะห์ซึ่งอาจจะแสดงในรูปแบบของกราฟ ตาราง แผนภูมิ ตลอดจนให้ข้อเสนอแนะจากการทดลองเพื่อสรุปผลและควรมีการทดสอบเพื่อยืนยันผลจากการทดลองอีกครั้ง

#### 2.5.6 การใช้หลักทางสถิติในการทดลอง

การใช้หลักทางสถิติในการทดลองนั้นผู้ทำการทดลองต้องมีความเข้าใจในประเด็นต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. ผู้ทำการทดลอง ต้องมีความรู้เกี่ยวกับงานในสาขาที่จะทำการทดลอง โดยใช้ความรู้ที่ไม่ใช่วิธีทางสถิติในการพิจารณาปัญหาที่เกิดขึ้น
2. ผู้ทำการทดลอง ควรเลือกการออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ที่ง่ายและไม่ซับซ้อน
3. ผู้ทำการทดลอง ควรเข้าใจความแตกต่างระหว่างนัยสำคัญ ในทางปฏิบัติและนัยสำคัญทางสถิติ เพราะความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ในการทดลองซึ่งเรียกว่าความแตกต่างทางด้านสถิตินั้น ไม่สามารถประกันได้ว่ามีความแตกต่างมากเพียงพอที่จะใช้ในทางปฏิบัติ และจะต้องคำนึงถึงต้นทุนว่าคุ้มค่าในการลงทุนหรือไม่
4. ผู้ทำการทดลอง ควรทำการทดลองซ้ำๆ หลายครั้งเพื่อให้แน่ใจว่าผลที่ได้ถูกต้อง

#### 2.5.7 การตั้งสมมติฐานในการตรวจสอบ

##### 2.5.7.1 ความหมายของสมมติฐานทางสถิติ

สมมติฐาน คือ ความเชื่อมั่นของบุคคลใดบุคคลหนึ่งหรือของกลุ่มบุคคลใดๆ หรืออาจกล่าวได้ว่าสมมติฐานเป็นสิ่งที่บุคคลหรือองค์กรคาดว่าจะเกิดขึ้น ความเชื่อหรือสิ่งที่คาดนั้นอาจเป็นจริงหรือไม่ก็ได้

##### 2.5.7.2 ชนิดของสมมติฐาน

สมมติฐานแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ดังต่อไปนี้

1. สมมติฐานหลัก (Null Hypothesis) หรือใช้สัญลักษณ์  $H_0$
2. สมมติฐานอื่นๆ (Alternative Hypothesis) ใช้สัญลักษณ์  $H_1$

สมมติฐานหลักที่ตั้งขึ้น เพื่อทดสอบว่าจะยอมรับหรือไม่ว่าเป็นจริง การปฏิเสธ ไม่ยอมรับสมมติฐานหลักก็คือการยอมรับสมมติฐานอื่นๆ ว่าเป็นจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประเภทของสมมติฐาน สมมติฐานแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังต่อไปนี้

1. สมมติฐานเดี่ยว (Simple Hypothesis) คือ สมมติฐานประเภทที่กำหนดค่าเฉพาะของพารามิเตอร์เจาะจงลงไปว่ามีค่าเท่ากับเท่าใด

2. สมมติฐานรวม (Composite Hypothesis) คือ สมมติฐานประเภทที่มีค่าพารามิเตอร์หลายค่า

### 2.5.7.3 ความผิดพลาดในการทดสอบสมมติฐาน

ความผิดพลาดในการทดสอบสมมติฐาน แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังต่อไปนี้

1. ความผิดพลาดประเภทที่ 1 (Type I Error) หรือเรียกโดยทั่วไปว่า ระดับนัยสำคัญ (Level of Significance) ใช้สัญลักษณ์  $\alpha$  เป็นความผิดพลาดที่เกิดจากการปฏิเสธสมมติฐานหลักและยอมรับสมมติฐานอื่นๆ โดยที่สมมติฐานหลักเป็นจริง

2. ความผิดพลาดประเภทที่ 2 (Type II Error) ใช้สัญลักษณ์  $\beta$  เป็นความผิดพลาดที่เกิดจากการยอมรับสมมติฐานอื่นๆ โดยที่สมมติฐานอื่นๆ เป็นจริง

ในการทดสอบแต่ละครั้ง ผู้ทดสอบย่อมต้องการให้ความผิดพลาดทั้งสองประเภท ( $\alpha$  และ  $\beta$ ) น้อยที่สุด แต่เมื่อค่าของ  $\alpha$  ลดลง ค่าของ  $\beta$  จะเพิ่มขึ้นในทำนองเดียวกัน เมื่อค่าของ  $\alpha$  เพิ่มขึ้น ค่าของ  $\beta$  จะลดลง ดังนั้นเมื่อต้องการลดค่าความผิดพลาดทั้งสองประเภทให้ลดลงได้พร้อมๆ กันทำได้ด้วยการเพิ่มจำนวนข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ให้มากขึ้น

### 2.5.7.4 การตั้งสมมติฐาน ในการออกแบบการทดลอง

การตั้งสมมติฐานในการออกแบบการทดลอง สามารถแบ่งเป็น 3 กรณี ดังต่อไปนี้

1. การออกแบบการทดลองแบบผลกระทบคงที่ (Fixed Effect Model) จะทำการตรวจสอบว่าปัจจัยต่างๆ มีผลกระทบต่อกระบวนการหรือไม่ สามารถตั้งสมมติฐานได้ดังต่อไปนี้

$H_0$ : ปัจจัยไม่มีผลกระทบต่อกระบวนการ

$H_1$ : ปัจจัยมีผลกระทบต่อกระบวนการ

หรือสามารถเขียนอยู่ในรูปสัญลักษณ์  $\mu$  เมื่อ  $\mu$  ค่าเฉลี่ยของปัจจัย

$H_0$ :  $\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_r$

$H_1$ :  $\mu_i \neq \mu_j$  อย่างน้อยที่สุดหนึ่งคู่ ( $i, j$ )

หรือสามารถเขียนอยู่ในรูปสัญลักษณ์  $\tau$  เมื่อ  $\tau$  คือค่าเฉลี่ยของปัจจัย

$H_0$ :  $\tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_r = 0$

$H_1$ :  $\tau_i \neq 0$ ; อย่างน้อยที่สุดหนึ่งค่า

2. การออกแบบการทดลองแบบผลกระทบแบบสุ่ม (Random Effects Model) จะทำการตรวจสอบว่า ความแปรปรวน ( $\sigma^2_\tau$ ) จะมีค่าเท่ากับ 0 หรือไม่ เพราะไม่สามารถหาค่าของอิทธิพล (Effect) ของระดับของปัจจัยที่เกิดขึ้นมาแน่นอน สามารถตั้งสมมติฐานดังต่อไปนี้

$H_0$ :  $\sigma^2_\tau = 0$

$H_1$ :  $\sigma^2_\tau > 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixed Effect Model) เมื่อปัจจัยในการทดลองเป็นแบบผลกระทบบางที่ (Fixed Level) และแบบสุ่ม (Random Level) รวมกันอยู่จะต้องใช้การตั้งสมมติฐานของ 2 กรณีที่กล่าวข้างต้น โดยแยกตามลักษณะรูปแบบของปัจจัยนั้นๆ

## 2.5.8 ชนิดของแผนการออกแบบการทดลอง

### 2.5.8.1 แผนการออกแบบการทดลองแบบปัจจัยเดียว

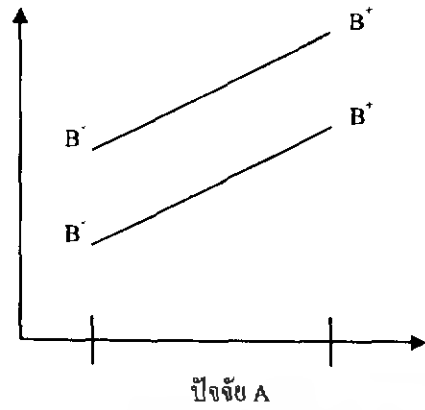
แผนการออกแบบการทดลองแบบปัจจัยเดียว (Single Factor Design) จะต้องเก็บข้อมูลโดยระดับของปัจจัยหรือทรีตเมนต์ (Treatment) เพื่อทดสอบว่าระดับของปัจจัยต่างๆ มีผลต่อค่าตอบสนองหรือไม่ โดยแผนการออกแบบการทดลองแบบปัจจัยเดียวสามารถแบ่งออกเป็นสองปัจจัยใหญ่ๆ คือ

1. การทดลองแบบสุ่มโดยสมบูรณ์ (Completely Randomized Design: CRD) เป็นการทดลองที่มีปัจจัยเดียว แต่จะทำการเปรียบเทียบระหว่างระดับของปัจจัยที่มีปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ มีผลกระทบน้อยและไม่มีปัจจัยรบกวน โดยการทดลองจะให้หลักการทำแบบสุ่มและการทำซ้ำ

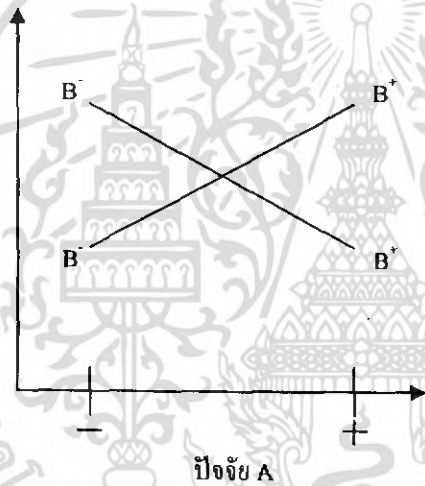
2. การทดลองแบบสุ่มโดยสมบูรณ์ภายในบล็อก (Completely Randomized Block Design) เป็นการทดลองที่มีปัจจัยเดียวและมีปัจจัยรบกวนที่มีผลกระทบต่อค่าตอบสนองและต้องทำการกำจัดปัจจัยรบกวนดังกล่าวทิ้งบางครั้ง ปัจจัยรบกวนนั้นไม่ทราบและสามารถควบคุมได้จึงต้องใช้วิธีการบล็อก (Blocking) ในการกำจัดผลของปัจจัยรบกวนนั้นออกไป

### 2.5.8.2 แผนการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล

แผนการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design) เป็นการทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับ (Level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้นๆ จึงเป็นการทดลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุดโดยใช้ในการศึกษาถึงผลของปัจจัยตั้งแต่สองปัจจัยขึ้นไปตัวอย่างเช่น กรณี 3 ปัจจัย ถ้าปัจจัย A ประกอบด้วย 2 ระดับ ปัจจัย B ประกอบด้วย 2 ระดับและปัจจัย C ประกอบด้วย 2 ระดับในการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง จะประกอบด้วยการทดลองทั้งหมด  $2 \times 2 \times 2 \times 3 = 24$  การทดลอง และเมื่อปัจจัยที่เกี่ยวข้องถูกนำมาให้อยู่ในรูปแบบของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล จึงกล่าวได้ว่าปัจจัยเหล่านี้มีการไขว้ (Crossed) ซึ่งกันและกัน ผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งหมายถึง การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับผลตอบสนอง (Response) ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยนั้นๆ ซึ่งเรียกว่าปัจจัยหลัก (Main Effect) และหากผลตอบสนองของปัจจัยหนึ่งขึ้นกับระดับของปัจจัยอื่นๆ ซึ่งเรียกว่าการมีอันตรกิริยา (Interaction) ต่อกันระหว่างปัจจัยที่เกี่ยวข้อง แนวคิดดังกล่าวสามารถแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.12 และ 2.13 (ปารเมศ ชูติมา, 2545, การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม)



รูปที่ 2.12 แสดงการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่ไม่มีอันตรกิริยาระหว่างกัน



รูปที่ 2.13 แสดงการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่มีอันตรกิริยาระหว่างกัน

จากรูปที่ 2.12 จะเห็นได้ว่า เส้นของ  $B'$  และ  $B''$  จะประมาณได้ว่าขนานกัน ซึ่งลักษณะของกราฟเช่นนี้จะบ่งบอกถึงการไม่มีอันตรกิริยาซึ่งกันและกันของปัจจัยทั้งสองในทำนองเดียวกัน จากรูปที่ 2.13 จะเห็นได้ว่า เส้นของ  $B'$  และ  $B''$  ไม่ขนานกันและสามารถกล่าวได้ว่าปัจจัยทั้งสองมีอันตรกิริยาต่อกัน บ่อยครั้งที่กราฟลักษณะเช่นนี้จะถูกนำมาใช้เพื่อแสดงถึงกรณีสำคัญของอันตรกิริยา อย่างไรก็ตามกราฟเช่นนี้ไม่ควรนำมาใช้แทนเทคนิคการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ เพราะว่าการตีความจากกราฟค่อนข้างที่จะขึ้นกับความตีความส่วนบุคคล ซึ่งอาจทำให้เกิดการเข้าใจผิดหรือวิเคราะห์ผิดพลาดได้

รูปแบบของการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลยังแบ่งย่อยในกรณีที่แผนการทดลองมีลักษณะเฉพาะตัว อีกดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1. การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล $2^k$ ( $2^k$ Factorial Design)

การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล  $2^k$  เป็นการทดลองที่มี  $k$  ปัจจัย แต่ละปัจจัยจะมีระดับของปัจจัยอยู่ 2 ระดับ คือ ระดับต่ำ ใช้สัญลักษณ์  $-1$  หรือ  $(-)$  และ ระดับสูง ใช้สัญลักษณ์  $1$  หรือ  $(+)$  การทดลองแบบนี้เหมาะสำหรับการทดลองที่มีปัจจัยมาก เป็นการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่มีอิทธิพลเบื้องต้นจะช่วยในการทดลองที่เจาะลึกต่อไป

### 2. การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล $3^k$ ( $3^k$ Factorial Design)

การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล  $3^k$  เป็นการทดลองที่มี  $k$  ปัจจัย แต่ละปัจจัยจะมีระดับของปัจจัยอยู่ 3 ระดับ คือ ระดับต่ำ ใช้สัญลักษณ์  $-1$  หรือ  $(-1)$  ระดับกลาง ใช้สัญลักษณ์  $0$  หรือ  $(0)$  และระดับสูง ใช้สัญลักษณ์  $1$  หรือ  $(+)$  การทดลองแบบนี้เหมาะสมเมื่อผู้ทดลองกำลังสนใจผลตอบสนองที่มีลักษณะเป็นส่วนโค้ง

### 3. การออกแบบการทดลองเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล (Fractional Factorial Design)

การออกแบบการทดลองเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล เป็นการออกแบบที่ใช้ในกรณีเมื่อการทดลองมีหลายปัจจัย ทำให้ต้องเสียเวลาในการเก็บข้อมูลมาก ดังนั้นจะทำให้ความสับสนของทรีตเมนต์ (Treatment) ซึ่งจะทำให้ข้อมูลที่ใช้ในการทดลองนั้นลดลง

#### 2.5.8.3 แผนการออกแบบการทดลองอื่นๆ

แผนการออกแบบการทดลองอื่นๆ มีดังนี้

1. แผนการออกแบบการทดลองลาตินสแควร์ (Latin Square Design)
2. แผนการออกแบบการทดลองเนสต์เต็ด (Nested Design)
3. แผนการออกแบบการทดลองสปลิตพล็อต (Split-Plot Design)
4. แผนการออกแบบการทดลองพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Design)

#### 2.5.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) คือ เทคนิคที่ใช้ในการจัดสรรความแปรปรวนหรือความผันแปรที่เกิดขึ้นในข้อมูลออกเป็นส่วนย่อยๆ ตามแหล่งที่คาดว่าทำให้เกิดความผันแปร ความผันแปรที่เกิดในข้อมูลเขียนเป็นสมการ ได้ดังนี้

$$\text{ความผันแปรทั้งหมด} = \text{ความผันแปรเนื่องจากปัจจัย} + \text{ความผันแปรโดยธรรมชาติของข้อมูล} \quad (2.8)$$

สมการ 2.8 ได้จากข้อคิดที่ว่า ความแตกต่างกันของข้อมูลไม่น่าจะมาจากสาเหตุของความผันแปรโดยธรรมชาติ หรือที่เรียกกันว่าความผิดพลาดแบบสุ่มของข้อมูลแต่เพียงอย่างเดียวแต่น่าจะมาจากปัจจัยหนึ่งปัจจัยใดหรือหลายๆ ปัจจัยที่ทำให้เกิดความผันแปร ดังนั้นความผันแปรทั้งหมดที่เกิดขึ้นกับข้อมูลจึงเนื่องมาจากอิทธิพลของปัจจัยและธรรมชาติของข้อมูล

ปัจจัยที่คาดว่าจะมีอิทธิพลต่อความผันแปรของข้อมูลถือได้ว่าเป็นตัวแปรอิสระซึ่งมีผลต่อตัวแปรตาม โดยเป็นข้อมูลที่วัดผลหรือเก็บรวบรวมมา ตัวแปรอิสระดังกล่าวมักจะไม่ได้มีแค่เพียงค่าเดียวแต่จะมีหลายค่าซึ่งเรียกว่าระดับของปัจจัย ถ้าปัจจัยนั้นมีผลต่อตัวแปรตามจริงๆ แต่ระดับก็จะมีผลต่อตัวแปรตามไม่เหมือนกัน การวิเคราะห์จึงทำโดยการทดลองกำหนดค่าตัวแปรอิสระที่ระดับต่างๆ เพื่อหาตัวแปรตามที่เกิดขึ้นจากการทดลองนั้นๆ แล้วนำไปวิเคราะห์ดูว่าความผันแปรที่เกิดขึ้นจากความแตกต่างของการทดลองนั้นมีนัยสำคัญหรือไม่เมื่อเทียบกับความผันแปรเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยธรรมชาติของตัวแปรตาม และเพื่อที่จะช่วยให้ผู้วิเคราะห์มีความเชื่อมั่นในผลของการวิเคราะห์ที่ได้จากการทดลอง มักจะต้องทำการทวนซ้ำให้ได้จำนวนข้อมูลที่แต่ละการทดลองมากพอ การเลือกระดับของปัจจัยถ้าเป็นการเจาะจง รูปแบบของการทดลองจะถูกเรียกว่าแบบผลกระทบบคงที่ (Fixed Effect Model) ผลที่ได้จากการทดลองจะสรุปได้เฉพาะ อิทธิพลของปัจจัยที่ระดับที่นำมาทดลอง แต่ถ้าเลือกระดับของปัจจัยเป็นการเลือกแบบสุ่ม รูปแบบของการทดลองจะเป็นแบบสุ่ม (Random Effect Model) ผลที่ได้จากการทดลองจะสรุปอิทธิพลโดยรวมของปัจจัย

จาก ความผันแปรทั้งหมด = ความผันแปรเนื่องจากปัจจัย + ความผันแปรโดยธรรมชาติของข้อมูลหรือเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ได้เป็น

$$SS_T = SS_{Tr} + SS_E \quad (2.9)$$

โดยที่  $SS_T$  คือ ผลบวกกำลังสองทั้งหมด

$SS_{Tr}$  คือ ผลบวกกำลังสองเนื่องจากอิทธิพลของปัจจัย

$SS_E$  คือ ผลบวกกำลังสองเนื่องจากความผิดพลาดแบบสุ่ม

การวัดความผันแปรของข้อมูลในการทดลองนั้นจะใช้ตัวประมาณค่าของความแปรปรวน (Variance) ที่ดีที่สุด คือ ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสอง (Mean Square: MS) โดยที่ค่า MS สามารถคำนวณได้จาก

$$MS = SS/DF \quad (2.10)$$

เมื่อ

SS คือ ผลบวกกำลังสอง (Sum of Square)

DF คือ ชั้นของความอิสระ

สถิติทดสอบ (Test Statistic) ที่นำมาเปรียบเทียบค่าความผันแปรคือ

$$F = MS_{Tr}/MS_E \quad (2.11)$$

เมื่อ

$MS_{Tr}$  คือ ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสองของปัจจัย

$MS_E$  คือ ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสองของความผิดพลาดแบบสุ่ม

เปรียบเทียบค่าสถิติสำหรับทดสอบ F กับค่า  $F_{\alpha, v_1, v_2}$

ถ้า  $F \geq F_{\alpha, v_1, v_2}$  ปฏิเสธ  $H_0$

ถ้า  $F < F_{\alpha, v_1, v_2}$  ยอมรับ  $H_0$

เมื่อ

$\alpha$  คือ ระดับนัยสำคัญ (Level of Significance)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$V_1$  คือ ชั้นของความอิสระของปัจจัย

$V_2$  คือ ชั้นของความอิสระของความผิดพลาดแบบสุ่ม

### 2.5.9.1 รูปแบบเชิงเส้นทางสถิติ

ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนนั้นจำเป็นต้องสร้างรูปแบบเชิงเส้นทางสถิติ (Linear Statistical Model) ขึ้นด้วย ซึ่งรูปแบบเชิงเส้นทางสถิติจะขึ้นอยู่กับรูปแบบของแผนการออกแบบการทดลอง จะแสดงดังตัวอย่างต่อไปนี้ การวิเคราะห์ความแปรปรวนกรณีที่มี 3 ปัจจัย รูปแบบเชิงเส้นคือ

$$y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \epsilon_{ijkl} \quad (2.12)$$

โดยที่

$i = 1, 2, 3, \dots, a$  (ระดับของปัจจัย A)

$j = 1, 2, 3, \dots, b$  (ระดับของปัจจัย B)

$k = 1, 2, 3, \dots, c$  (ระดับของปัจจัย C)

$l = 1, 2, 3, \dots, n$  (จำนวนซ้ำ)

และ

$y_{ijkl}$  คือ ค่าตัวแปรตอบสนองหรือตัวแปรตาม

$\mu$  คือ ค่าเฉลี่ยซึ่งเป็นค่าคงที่

$\tau_i$  คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัย A

$\beta_j$  คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัย B

$\gamma_k$  คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัย C

$(\tau\beta)_{ij}$  คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของอันตรกิริยาของปัจจัย A และ B

$(\tau\gamma)_{ik}$  คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของอันตรกิริยาของปัจจัย A และ C

$(\beta\gamma)_{jk}$  คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของอันตรกิริยาของปัจจัย B และ C

$(\tau\beta\gamma)_{ijk}$  คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของอันตรกิริยาของปัจจัย A, B และ C

$\epsilon_{ijkl}$  คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของความผิดพลาดแบบสุ่ม

### 2.5.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนร่วม

การวิเคราะห์ความแปรปรวนร่วม (Analysis of Covariance: ANCOVA) คือ วิถีทางสถิติที่พยายามปรับตัวแปรตามการปรับ (Adjustments) นี้อยู่บนฐานของความสัมพันธ์ของตัวแปรตามกับตัวแปรร่วม (Concomitant หรือ Covariate variables) เป็นสำคัญ

ANCOVA เป็นวิธีวิเคราะห์ข้อมูลที่รวมวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) กับการวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) เข้าไว้ด้วยกัน การวิเคราะห์ความแปรปรวนวิเคราะห์เฉพาะตัวแปรตาม แต่การวิเคราะห์ความแปรปรวนร่วมวิเคราะห์ทั้งตัวแปรร่วม (Covariate) ที่เลือกสรรมาแล้วว่าเป็นตัวแปรมาปรับที่ดี ผลที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกมาจึงเป็นผลของการปรับตัวแปรทั้งสองหรือมากกว่าสองเข้าหากัน เพื่อผลออกมาจะได้มีความคลาดเคลื่อนน้อยและไม่ลำเอียง การเลือกตัวแปรร่วมจึงต้องศึกษาให้มีความเกี่ยวข้องกับตัวแปรตามมาน้อยเพียงใด

### 2.5.10.1 รูปแบบเชิงเส้นทางสถิติ

ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนร่วมนั้นจำเป็นต้องสร้างรูปแบบเชิงเส้นทางสถิติ (Linear Statistical Model) ขึ้นด้วย ซึ่งรูปแบบเชิงเส้นทางสถิติจะขึ้นอยู่กับรูปแบบของแผนการออกแบบการทดลอง จะแสดงดังตัวอย่างต่อไปนี้ การวิเคราะห์ความแปรปรวนร่วมกรณีที่มี 3 ปัจจัย รูปแบบเชิงเส้นคือ

$$y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j(x_{ijk} - \bar{x}) + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \epsilon_{ijkl} \quad (2.13)$$

โดยที่

$i = 1, 2, 3, \dots, a$  (ระดับของปัจจัย A)

$j = 1, 2, 3, \dots, b$  (ระดับของปัจจัย B)

$k = 1, 2, 3, \dots, c$  (ระดับของปัจจัย C)

$l = 1, 2, 3, \dots, n$  (จำนวนซ้ำ)

และ

$y_{ijkl}$  คือ ค่าตัวแปรตอบสนองหรือตัวแปรตาม

$\mu$  คือ ค่าเฉลี่ยทั้งหมดซึ่งเป็นค่าคงที่

$\tau_i$  คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัย A

$\beta_j$  คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัย B

$(x_{ijk} - \bar{x})$  คือ ค่าเบี่ยงเบนของตัวแปรปรวนร่วมที่  $ijk$  จากค่าเฉลี่ยทั้งหมดของตัวแปรปรวนร่วม

$\gamma_k$  คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัย C

$(\tau\beta)_{ij}$  คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของอันตรกิริยาของปัจจัย A และ B

$(\tau\gamma)_{ik}$  คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของอันตรกิริยาของปัจจัย A และ C

$(\beta\gamma)_{jk}$  คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของอันตรกิริยาของปัจจัย B และ C

$(\tau\beta\gamma)_{ijk}$  คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของอันตรกิริยาของปัจจัย A, B และ C

$\epsilon_{ijkl}$  คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของความผิดพลาดแบบสุ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

จากการทำการทดลองเกี่ยวกับการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องกัด  
อัตโนมัติ (CNC Vertical Milling Machine) ทำให้เราทราบถึงหลักการทำงานของเครื่องกัดอัตโนมัติ (CNC Vertical  
Milling Machine) เครื่องวัดค่าความหยาบผิวและยังรู้ถึงกรรมวิธีการทดลอง วัสดุและขั้นตอนต่างๆที่ใช้ในการ  
ทดลอง ซึ่งในปัจจุบันนี้อุปกรณ์และวัสดุที่ใช้ในการทดลองล้วนแล้วแต่มีลักษณะและส่วนผสมที่แตกต่างกันแล้วแต่ว่า  
ผู้ทำการทดลองจะเลือกอุปกรณ์และวัสดุแบบไหนในการทดลอง ส่วนการทดลองนี้เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่าความ  
หยาบผิวของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องกัดอัตโนมัติ (CNC Vertical Milling Machine) สามารถแบ่งอุปกรณ์และวิธีการ  
ทดลองได้ดังต่อไปนี้

1. วัสดุที่ใช้ในการทดลอง
2. เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง
3. หลักการออกแบบการทดลอง
4. ขั้นตอนการทดลอง

#### 3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

ในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องกัดอัตโนมัติ (CNC Vertical Milling  
Machine) วัสดุที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

##### 3.1.1 ดอกกัด

ลักษณะของดอกกัดที่ใช้ในการทดลองที่เลือกใช้ คือ เป็นเหล็กเครื่องมือ โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16  
มิลลิเมตร เป็นเหล็กไฮสปีด ไม่มีโคบอลต์ อายุการใช้งานและการทนต่อการสึกหรอสูง ผิวสีบรอนซ์ (Bronze Finish)  
ความแข็ง Hardness 830-870 (HV10) ส่วนผสม C (0.9 %), W (6.25%), Mo (5.0%), Cr (4.2%), V (1.9%)

การเตรียมดอกกัด (End Mill) โดยการสั่งซื้อจากบริษัท Yong Hong Seng โดยลักษณะของดอกกัด มีขนาด  
เส้นผ่าศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ความยาว 108.5 มิลลิเมตร ความยาวคมตัด 58.5 มิลลิเมตร มีจำนวนทั้งหมด 4 ฟัน ค่ามุม  
Concavity Angle ประมาณ 1.54 องศา ในการทดลองนี้ใช้จำนวนดอกกัด ทั้งหมด 1 ดอก ซึ่งลักษณะของดอกกัดที่ใช้ใน  
การทดลองแสดงดังรูปที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 ดอกก๊อด

### 3.1.2 ชิ้นงานทดลอง

ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองคือเหล็ก DC 53 เหล็กกล้าแม่พิมพ์งานเย็น DC53 ได้พัฒนาขึ้นมาใหม่นี้ เป็นผลิตภัณฑ์ที่ปรับปรุงฟอสฟอรัสน้อยกว่า เหล็กกล้าทำเครื่องมือเกรด SKD11 (JIS G4404) และในการทดลองได้ออกแบบให้มีขนาด กว้าง 30 มิลลิเมตร ยาว 155 มิลลิเมตร หนา 32 มิลลิเมตร ซึ่งลักษณะของชิ้นงานเหล็ก DC 53 ที่ใช้ในการทดลองดังรูปที่ 3.2 ซึ่งเหล็ก DC 53 มีส่วนผสมทางเคมีและคุณสมบัติดังนี้คือ

เหล็กกล้าแม่พิมพ์งานเย็น DC53 ที่ได้พัฒนาขึ้นมาใหม่นี้สามารถขจัดข้อเสียในเรื่อง ความแข็งแรงและเหนียวแน่นไม่เพียงพอ ที่พบในเกรด SKD11 อันเป็นผลมาจากการเผาอ่อน หรืออบคืนไฟที่อุณหภูมิสูง ผลิตภัณฑ์นี้ออกแบบมาให้ใช้แทน SKD11 สำหรับใช้ทำแม่พิมพ์อเนกประสงค์ และแม่พิมพ์แบบมีความละเอียดเที่ยงตรง

#### 3.1.2.1 ส่วนผสมทางเคมี

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็ก SKD11และเหล็ก DC 53

ชนิดเหล็ก	ส่วนผสมทางเคมี							
	คาร์บอน	ซิลิกอน	โมลิบดีนัม	วานาเดียม	โครเมียม	แมงกานีส	ฟอสฟอรัส	ซัลเฟอร์
SKD11	1.4 - 1.6%	0.15 - 0.35%	0.8 - 1.2%	0.2 - 0.5%	11 - 13%	0.3 - 0.6%	< 0.025%	> 0.01%
DC 53	1.5%	0.25%	0.3%	1.0%	12%	-	-	-

#### 3.1.2.2 คุณสมบัติ

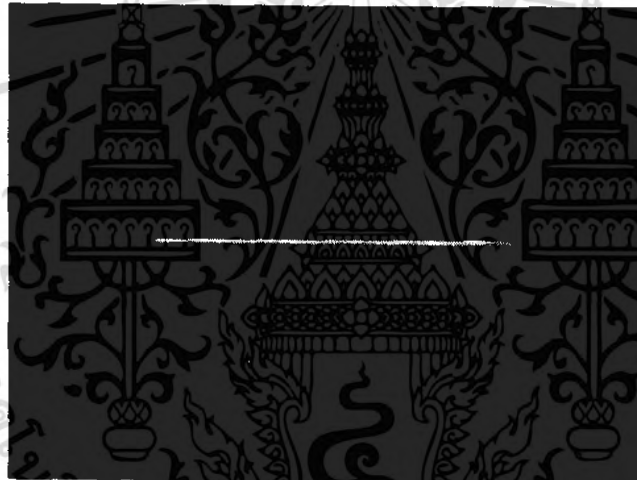
1. หลังผ่านกรรมวิธีชุบแข็งแล้ว จะมีความแข็งแรงสูงกว่า SKD11: ความแข็งที่ 62-63 HRC เกิดขึ้นหลังผ่านกรรมวิธีเผาอ่อน หรืออบคืนไฟที่อุณหภูมิสูง (520 - 530 องศาเซลเซียส) ดังนั้น DC53 จึงเหนือกว่า SKD11 ในแง่ของความแข็งแรงและความต้านทานการสึกกร่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. มีความเหนียวเป็นสองเท่าของ SKD11: ในบรรดาเหล็กกล้าแม่พิมพ์งานเย็นด้วยกันทั้งหมดแล้ว DC53 ให้สมรรถนะการทำงานที่ดียิ่ง ดังนั้น เครื่องมือและแม่พิมพ์ที่ทำมาจาก DC53 จึงประสบกับปัญหาน้อยกว่า เป็นต้นว่า เรื่องการแตกร้าว และแตกเป็นเศษผง ซึ่งมักส่งผลกระทบต่อเครื่องมือ และแม่พิมพ์ที่ทำจากเหล็กกล้าแบบใช้กันทั่วไป

3. มีความเค้นดกค้ำน้อยกว่า หลังการตัดปาดขึ้นรูปด้วยการจ่ายประจุไฟฟ้าจากสายไฟ ความเค้นดกค้ำนี้สามารถทำให้น้อยลงไปได้ด้วยวิธีอบคืนไฟที่อุณหภูมิสูง ดังนั้น ปัญหาในเรื่องการแตกร้าว และบิดเบี้ยวเสียรูป จึงป้องกันมิให้เกิดขึ้นได้ในระหว่าง และหลังจากที่ทำการตัดปาดขึ้นรูปเหล็กกล้านี้ ด้วยการจ่ายประจุไฟฟ้าจากสายไฟแล้ว

4. มีคุณสมบัติในการกลึงไส และเจียรขัดได้ดีกว่า SKD11 เหล็กกล้า DC53 เหนือชั้นกว่า SKD11 ในแง่การกลึงไสขึ้นรูปและเจียรขัด ดังนั้น การใช้ DC53 ทำเครื่องมือ นั้น จะให้อายุการใช้งานที่ยาวนานกว่า และลดจำนวนขั้นตอนในการทำแม่แบบลงไป



รูปที่ 3.2 ชิ้นงานเหล็ก DC 53

## 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

### 3.2.1 เครื่องกัดอัตโนมัติ

เป็นเครื่องกัดอัตโนมัติ (CNC Vertical Milling Machine) ยี่ห้อ Tree รุ่น J425 CNC ใช้ระบบไฮดรอลิกส์ในการขับเคลื่อน แกน XYZ และระบบควบคุมโดยใช้ระบบการสัมผัสบนหน้าจอแผงควบคุมซึ่งเป็นระบบอัตโนมัติที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งเป็นเครื่องมือที่มีอยู่ในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ดังรูปที่ 3.3

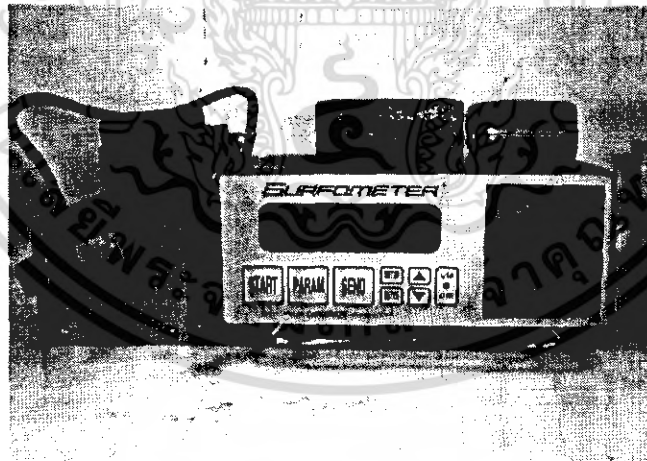
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 เครื่องกัดอัตโนมัติ

### 3.2.2 เครื่องวัดค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน

เครื่องวัดค่าความหยาบผิวของชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง โดยใช้วัดค่าความหยาบผิวของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยเครื่องกัดอัตโนมัติ (CNC Vertical Milling Machine) และเป็นเครื่องที่สามารถวัดค่าความหยาบผิวได้ละเอียดถึง 1 ไมครอน เป็นเครื่องยี่ห้อ Precision Device INC, Milan, Michigan 48160 Model PDD – 400 – bo Ser. 5086 ซึ่งลักษณะของเครื่องวัดค่าความหยาบผิวแสดงดังรูปที่ 3.4

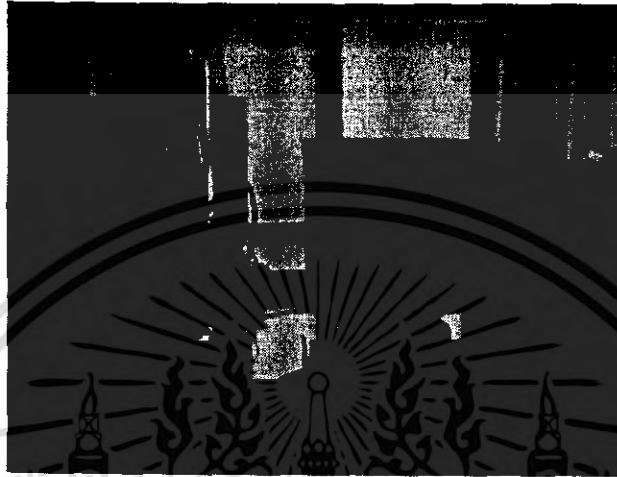


รูปที่ 3.4 เครื่องวัดค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.3 เครื่องวัดค่าการสึกหรอของดอกกัด

เครื่องวัดค่าการสึกหรอของดอกกัด ที่ใช้ในการทดลอง โดยใช้วัดค่าการสึกหรอของดอกกัด ที่ผ่านการตัดเฉือนกับชิ้นงานมาแล้ว ซึ่งลักษณะของเครื่องวัดค่าความหยาบผิวแสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เครื่องวัดค่าการสึกหรอของดอกกัด

### 3.3 หลักการออกแบบการทดลอง

ในการออกแบบการทดลองที่ใช้ เครื่องกัดอัตโนมัติ (CNC Vertical Milling Machine) ในการกัดชิ้นงานทดลอง จะต้องทำตามขั้นตอนต่างๆ ที่ได้เตรียมเอาไว้แล้ว และค่าความหยาบผิวที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยเครื่องกัดอัตโนมัติ (CNC Vertical Milling Machine) จะนำมาวิเคราะห์เพื่อหาค่าของตัวแปรว่าตัวแปรใดมีผลต่อค่าความหยาบผิวมากที่สุดเพียงใด เนื่องจากว่ามีปัจจัยที่ใช้ในการศึกษามากกว่า 1 ปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยมีอยู่ด้วยกันอยู่หลายระดับที่ต้องทำการทดลอง โดยในการทดลองนี้มีปัจจัยที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด 3 ปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยมีด้วยกัน 2 ระดับ คือ ปัจจัยที่ 1 คือ ค่าอัตราการป้อนชิ้นงาน (Feed Rate) ปัจจัยที่ 2 คือ ค่าความเร็วรอบ (Speed) ปัจจัยที่ 3 คือ ค่าความลึกของการตัด (Depth of Cut)

#### 3.3.1 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง

ค่าความเร็วรอบ (รอบ/นาที)

$$\text{จากสูตร } N = \frac{(1000 \times CS)}{\pi D}$$

เมื่อ  $N$  = ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)

$D$  = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดกัด (มิลลิเมตร)

$\pi$  = 3.14 (ค่าประมาณ)

$CS$  = ความเร็วตัด (เมตร/นาที)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ความเร็วรอบค่าต่ำ} = \frac{(1000 \times 16.5)}{\pi(16)} = 328.25 \approx 328 \text{ (รอบ/นาที)}$$

$$\text{ความเร็วรอบค่าสูง} = \frac{(1000 \times 25)}{\pi(16)} = 497.36 \approx 497 \text{ (รอบ/นาที)}$$

ค่าอัตราการป้อนชิ้นงาน (มิลลิเมตร/นาที)

จากสูตร  $Feed = N \times f_z \times z$

เมื่อ  $Feed =$  ค่าอัตราการป้อนชิ้นงาน (มิลลิเมตร/นาที)

$Z =$  จำนวนฟันของมีดกัด (ฟัน)

$f_z =$  จำนวนเศษต่อคมตัด (มิลลิเมตร)

$N =$  ความเร็วรอบของมีดตัด (รอบ/นาที)

$$\begin{aligned} \text{ค่าอัตราการป้อนชิ้นงานค่าต่ำ} &= 328.25 \times 0.126 \times 4 \\ &= 165.44 \approx 165 \text{ (มิลลิเมตร/นาที)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่าอัตราการป้อนชิ้นงานค่าสูง} &= 497.36 \times 0.126 \times 4 \\ &= 250.66 \approx 250 \text{ (มิลลิเมตร/นาที)} \end{aligned}$$

ค่าความลึกของการตัด (มิลลิเมตร)

สูตรที่ใช้ในการคำนวณหา  $Depth\ of\ cut = 0.5 \times D$

ค่าความลึกของการตัดค่าต่ำ  $= 0.25$  มิลลิเมตร

ค่าความลึกของการตัดค่าสูง  $= 0.75$  มิลลิเมตร

ค่าความลึกของการกระทำด้วยเครื่องจักร (Machining) เข้าเนื้อชิ้นงาน การกำหนดค่าความลึก และค่าอัตราการป้อนชิ้นงาน (Feed Rate) ต้องคำนึงถึงความสามารถในการรับแรงของมีดกัดที่จะนำมาใช้และของเครื่องจักร

ทั้ง 3 ปัจจัยนี้และปัจจัยมีด้วยกันปัจจัยละ 2 ระดับ กล่าวคือเมื่อทำการจัดทริทเมนต์ (Treatment) ในการทดลอง เราจะเรียกผลการจัดทริทเมนต์เหล่านี้ว่า Treatment Combination เช่น การทดลองมี 3 ปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับและทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ดังนั้นจะเรียกว่า การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลขนาด  $3 \times 2^3$  ดังนั้น Combination ทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองมีทั้งหมด 24 ครั้ง ดังนั้นหลักในการออกแบบการทดลองมีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2 ทำความเข้าใจถึงปัญหา

หาแนวความคิดที่เกี่ยวกับวัตถุประสงค์ของการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องกัดอัตโนมัติ (CNC Vertical Milling Machine) โดยปัจจัยแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ

#### 3.3.2.1 ปัจจัยที่ควบคุมได้

ในการออกแบบการทดลองเราต้องหาปัจจัยที่สามารถควบคุมได้มาใช้ในการทดลองเพื่อป้องกันการผิดพลาดของผลการทดลอง โดยปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ ได้แก่ ค่าอัตราการป้อนชิ้นงาน (Feed Rate) ค่าความเร็วรอบ (Speed) ค่าความลึกของการตัด (Depth of Cut) เครื่องมือตัด (Tool) และขนาดของชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองเป็นต้น ในการทดลองนี้ได้กำหนดปัจจัยที่ใช้ในการศึกษา 3 ปัจจัย คือ ค่าอัตราการป้อนชิ้นงาน (Feed Rate) ค่าความเร็วรอบ (Speed) ค่าความลึกของการตัด (Depth of Cut) โดยทั้ง 3 ปัจจัยนี้สามารถปรับเปลี่ยนระดับตามที่ได้กำหนดไว้ได้อย่างแม่นยำ

#### 3.3.2.2 ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้

ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้เป็นปัจจัยที่ไม่อยากให้เกิดขึ้นในการทดลอง เพราะเมื่อเกิดขึ้นแล้วจะส่งผลกระทบต่อผลการทดลอง ทำให้ผลของการทดลองผิดพลาด ไปและสร้างความไม่แน่นอนเชื่อถือให้กับรูปแบบ (Model) ของการทดลอง โดยปัจจัยเหล่านั้น ได้แก่ อายุการใช้งานของเครื่องมือตัด (Tool Life) ความผิดพลาดของเครื่องกัดอัตโนมัติ (CNC Vertical Milling Machine) และความผิดพลาดจากผู้ทำการทดลอง

### 3.3.3 เลือกพารามิเตอร์ ระดับ และขอบเขต

การเลือกพารามิเตอร์ที่จะนำมาใช้ในการทดลอง โดยในการทดลองนี้เลือกมาทั้งหมด 3 พารามิเตอร์หรือ 3 ปัจจัย คือ ค่าอัตราการป้อนชิ้นงาน (Feed Rate) ค่าความเร็วรอบ (Speed) ค่าความลึกของการตัด (Depth of Cut) แล้วทำการกำหนดระดับของพารามิเตอร์ ซึ่งในการกำหนดระดับของพารามิเตอร์นี้ได้ทำการศึกษาลักษณะของพารามิเตอร์ว่าควรจะมีค่าเป็นเท่าไร โดยกำหนดค่าจากการคำนวณและค่าจากคู่มือการใช้เครื่องมือตัด (Tools) โดยนำค่าระหว่างที่มาจากทั้ง 2 นี้ มาทำการเปรียบเทียบกันแล้วเลือกที่เหมาะสมที่สุดและเป็นค่าที่ไม่เกิดอันตรายต่อผู้ทดลองในระหว่างทำการทดลอง รวมทั้งเป็นค่าที่รักษาอายุการใช้งานของเครื่องมือตัด (Tools) อีกด้วย

### 3.3.4 เลือกการออกแบบการทดลอง

ในการเลือกการออกแบบการทดลองได้เลือกการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลแบบ  $2^k$  โดยที่ 2 หมายถึงระดับของปัจจัยแต่ละปัจจัย ส่วน k หมายถึงจำนวนของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง โดยในการทดลองนี้มีด้วยกันทั้งหมด 3 ปัจจัย และต้องทำการตัดสินใจว่าควรจะทำการบล็อกกิง (Blocking) หรือทำการสุ่ม (Randomization) อย่างไรดีหรือไม่ โดยในการทดลองนี้ได้ทำการสุ่ม (Randomization) ลำดับการทดลอง และทำการทดลองซ้ำ (Replication) 3 ครั้ง เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการทดลอง ดังนั้นจำนวนครั้งในการทดลองนี้มีทั้งหมดเท่ากับ  $3 \times 2^3 = 24$  ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.5 แผนการทดลอง

ตารางที่ 3.2 ปัจจัยและระดับที่เลือกใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	ระดับ		
		ต่ำ	สูง
A : ค่าอัตราการป้อนชิ้นงาน (มิลลิเมตร/นาที)		165	250
B : ค่าความเร็วรอบ (รอบ/นาที)		328	497
C : ค่าความลึกของการตัด (มิลลิเมตร)		0.25	0.75

การทดลองด้วยกรรมวิธีการขึ้นรูปชิ้นงานด้วย เครื่องกัดตัด โนมัติ (CNC Vertical Milling Machine) ด้วยการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างตามที่ได้ทำการออกแบบการทดลองไว้แล้ว โดยปัจจัยที่ใช้ในการทดลองและระดับของแต่ละปัจจัยแสดงดังตารางที่ 3.2 ขั้นตอนแรกเมื่อทำการขึ้นรูปชิ้นงานให้ได้จำนวนครั้ง 24 ครั้งตามที่ได้ออกแบบการทดลองไว้ นำชิ้นงานมาทำการเก็บค่าความหยาบผิวด้วยการใช้เครื่องทดสอบค่าความหยาบผิวแล้วนำผลที่ได้มาประมวลผลเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ตอบสนอง ขั้นสุดท้ายเป็นการทดลองเปรียบเทียบกับค่าที่พยากรณ์ได้ หรือค่าที่มีผลมากที่สุดที่ได้จากการนำผลไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมทางสถิติ

#### 3.3.5.1 การทดลองเพื่อหาตัวแปรตอบสนอง

ตารางที่ 3.3 เมตริกการออกแบบการทดลอง

ลำดับการทดลอง	ปัจจัย			ค่าการสึกหรอของดอกกัด					ค่าความหยาบผิว			
	A	B	C	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 1	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 1	เฉลี่ย
1	+	+	+									
2	+	+	-									
3	+	-	+									
4	+	-	-									
5	-	+	+									
6	-	+	-									
7	-	-	+									
8	-	-	-									

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขั้นตอนของการทดลองเพื่อหาตัวแปรตอบสนองนี้ จะแสดงถึงค่าพารามิเตอร์และระดับขั้นของการออกแบบการทดลอง โดยที่ค่าของพารามิเตอร์จะใช้เครื่องหมายบวก (+) แทนระดับสูง และเครื่องหมายลบ (-) แทนระดับต่ำ โดยแสดงดังตารางที่ 3.3 เป็นเมตริกการออกแบบการทดลองและมีการทำซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง โดยการทำการทดลองแต่ละครั้งต้องมีการสุ่มลำดับขั้นของการทดลองโดยการสุ่มลำดับขั้นของการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 การสุ่มอย่างสมบูรณ์

ลำดับการทดลอง	หมายเลขลำดับที่		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
1	21	16	17
2	15	13	18
3	3	5	6
4	2	1	7
5	24	4	11
6	8	22	19
7	23	20	12
8	9	10	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 ตารางบันทึกผลการทดลอง

ลำดับ	ปัจจัย			ค่าการสึกหรอของดอกกัด (ไมโครเมตร)					ค่าความหยาบผิว (ไมโครเมตร)			
	A mm/min	B rpm	C mm	พื้นที่ 1	พื้นที่ 2	พื้นที่ 3	พื้นที่ 4	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
1	165	328	0.75									
2	165	497	0.75									
3	250	497	0.75									
4	250	497	0.75									
5	165	328	0.25									
6	250	328	0.75									
7	165	328	0.25									
8	250	328	0.75									
9	165	497	0.25									
10	165	497	0.75									
11	250	497	0.25									
12	250	497	0.75									
13	250	497	0.25									
14	165	328	0.25									
15	165	328	0.75									
16	250	328	0.25									
17	165	497	0.25									
18	165	497	0.25									
19	250	497	0.25									
20	250	328	0.75									
21	250	328	0.25									
22	165	328	0.75									
23	250	328	0.25									
24	165	497	0.75									

เพื่อให้ง่ายขึ้นในการเก็บค่าจากผลการทดลองจึงจำเป็นต้องสร้างตารางบันทึกผลการทดลองขึ้นมาโดยแสดงดังตารางที่ 3.5 ซึ่งในแต่ละครั้งจะเก็บค่าความหยาบผิวมาทั้งหมด 3 ค่าแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย

### 3.4 ขั้นตอนการทดลอง

ในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวของชิ้นงานจะต้องมีการวางแผนการทดลองหรือมีการจัดลำดับขั้นของการทดลอง เพื่อให้จะทำให้การทดลองเป็นไปตามขั้นตอนที่ได้ออกแบบไว้ และในการทดลองก่อนที่จะทำการทดลองจะต้องมีการเตรียมชิ้นงานให้ได้ขนาดตามความต้องการและต้องให้ผิวของชิ้นงานมีความละเอียดเหมือนกันทุก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้น โดยการทำการเจียรระไนเมื่อเตรียมชิ้นงานเสร็จเรียบร้อยแล้วจึงทำการทดลอง โดยมีรายละเอียดของขั้นตอนการทดลองดังต่อไปนี้

### 3.4.1 ขั้นตอนก่อนการทดลอง

#### 3.4.1.1 เตรียมชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง

การเตรียมชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง ก่อนที่จะทำการทดลองต้องมีการเตรียมชิ้นงานให้ได้ขนาดตามที่กำหนดไว้ โดยนำเหล็ก DC 53 ที่ใช้ทำแม่พิมพ์มาทำการปรับขนาดโดยใช้เครื่องกัด และทำการเจียรระไนเพื่อให้ได้ความละเอียดของผิวตามที่ต้องการ โดยขนาดและความละเอียดของผิวชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง มีขนาดความกว้าง 30 มิลลิเมตร ความยาว 155 มิลลิเมตร ความสูง 32 มิลลิเมตร และมีค่าความละเอียดของผิวเท่ากับ 0.85 ไมโครเมตร ซึ่งในการทดลองนี้ใช้ชิ้นงานทั้งหมด 2 ชิ้น โดยแต่ละชิ้นสามารถทดลองได้ 14 ครั้ง ซึ่งลักษณะของชิ้นงานที่นำมาใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.2

#### 3.4.2 ขั้นตอนระหว่างการทดลอง

1. ทำการเตรียมชิ้นงานให้ได้ขนาดที่กำหนด
2. ทำความสะอาดชิ้นงานที่ได้ขนาดแล้ว และนำไปจับยึดกับปากก้าจับงานบนเครื่องกัดอัตโนมัติ
3. ตรวจสอบระดับของชิ้นงานด้วยฉากและแล้วทำการขันล็อกให้แน่น
4. ทำการติดตั้งคอกกักที่ใช้ในการทดสอบกับเครื่องกัดอัตโนมัติ
5. กำหนดตำแหน่งของแกน Z ศูนย์แล้วบันทึกค่าลงในชุดควบคุม เพื่อใช้ในการอ้างอิงตำแหน่ง Z ศูนย์
6. เขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องที่จะใช้ในการกัดชิ้นงานทดสอบ
7. สั่งให้เครื่องกัดอัตโนมัติทำการกัดชิ้นงานทดสอบตามโปรแกรมที่เขียนไว้
8. ตรวจสอบและทำความสะอาดชิ้นงานให้เรียบร้อย
9. นำชิ้นงานที่ทำความสะอาดแล้วไปวัดค่าความหยาบผิว แล้วทำการบันทึกค่าที่วัดได้

#### 3.4.3 ขั้นตอนหลังการทดลอง

ในส่วนของขั้นตอนหลังการทดลองนั้น จะทำการตรวจสอบและเช็คชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องกัดอัตโนมัติ (CNC Vertical Milling Machine) โดยชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปมาแล้วจะมีคราบน้ำมันและเศษเหล็กของชิ้นงานที่เกิดจากการขึ้นรูปด้วยเครื่องกัดอัตโนมัติ (CNC Vertical Milling Machine) มาทำการทำความสะอาดโดยใช้ผ้าสะอาดเช็ด แล้วนำไปเป่าด้วยลมต่อไป แล้วจึงนำชิ้นงานไปทำการวัดค่าความหยาบผิวด้วยเครื่องวัดความหยาบผิวและบันทึกผลลงในตารางที่ 3.4 จากนั้นนำผลไปวิเคราะห์ต่อไป ซึ่งรายละเอียดต่างๆมีดังนี้

#### 3.4.3.1 การทำความสะอาดชิ้นงาน

การทำความสะอาดชิ้นงานจะดำเนินการเมื่อมีการทดลองเสร็จสิ้น โดยการทดลองนั้นเกิดจากการขึ้นรูปด้วยเครื่องกัดอัตโนมัติ (CNC Vertical Milling Machine) การทำความสะอาดทำได้โดยการนำชิ้นงานมาเช็ดคราบน้ำมันและเศษเหล็กที่เกิดจากการทดลอง จากนั้นนำไปเป่าด้วยลมให้แห้งเพื่อจะได้นำไปวัดค่าความหยาบผิวต่อไป

#### 3.4.3.2 การวัดค่าความหยาบผิว

หลังจากที่ทำความสะอาดชิ้นงานแล้ว นำชิ้นงานมาทำการวัดค่าความหยาบผิวด้วยเครื่องวัดค่าความหยาบผิว โดยลักษณะของการวัดต้องการควบคุมปัจจัยต่างๆให้เหมือนกันโดยปัจจัยต่างๆเหล่านั้น เช่น ความสูงของการวางชิ้นงาน ตำแหน่งของการเก็บค่าความหยาบผิว เป็นต้น ซึ่งในการวัดค่าความหยาบผิวนี้จะใช้ผู้ทำการวัดเพียงคนเดียวเพื่อป้องกันการคลาดเคลื่อนซึ่งเกิดจากผู้ทำการวัด และก่อนการใช้เครื่องวัดค่าความหยาบผิวเมื่อเปิดเครื่องแล้วต้องทำการปรับค่าการวัดค่าความหยาบผิวเครื่องวัดทุกครั้ง เพื่อให้ผลการวัดค่าความหยาบผิวที่ออกมาถูกต้องและแม่นยำ แล้วจึงทำการวัดค่าความหยาบผิวซึ่งในการทดลองนี้จะทำการวัดค่าความหยาบผิว 3 ค่า และค่าการสึกหรอของดอกกัด 4 ค่า จากนั้นนำค่าทั้งสองค่ามาเฉลี่ย ในการทดลองแต่ละครั้ง จากนั้นนำค่าทั้ง 3 มาหาค่าความเฉลี่ย ค่าเฉลี่ยที่ได้คือผลการทดลองในแต่ละครั้งและนำไปบันทึกในตารางที่เตรียมไว้ข้างต้นช่วงความยาวที่หัวทดสอบเคลื่อนที่ในการทำการวัดค่าความหยาบผิว (Scan Length) ที่ใช้เท่ากับ 0.8 มิลลิเมตร (Stroke) ที่ใช้เท่ากับ 12.7 มิลลิเมตร


#### 3.4.3.3 การทดลองย่อย

เนื่องจากงานวิจัยของปริณยานิพนธ์นี้ มีปัจจัยที่พิจารณาอยู่ 3 ปัจจัยที่สามารถควบคุมค่าได้ก็คือ ค่าอัตราการป้อนชิ้นงาน (มิลลิเมตร/นาที) ค่าความเร็วรอบ (รอบ/นาที) ค่าความลึกของการตัด (มิลลิเมตร) และอีก 1 ปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมค่าได้ก็คือ ค่าการสึกหรอของดอกกัด และในการทดลองก็จะต้องทำการทดลองย่อยขึ้นมาเพื่อพิจารณาว่าค่าการสึกหรอของดอกกัด มีผลต่อค่าความหยาบผิวของชิ้นงานทดลองหรือไม่ ก่อนที่จะนำปัจจัยการสึกหรอของดอกกัด มาร่วมพิจารณาในการออกแบบการทดลองต่อไป

ขั้นตอนในการทำการทดลองย่อย

1. ทำการวัดค่ามุม Concavity Angle ของดอกกัก

ในการวัดค่ามุม Concavity Angle ได้ใช้เครื่องวัดค่าการสึกหรอของดอกกัก แสดงดังรูปที่ 3.5 และใช้โปรแกรม (Image-Pro Express) ทำการวัดค่า แสดงดังรูปที่ 3.6

	Count	Features	Area	Length	Angle
	1	L1		7968.758	270
	2	L2		4857.928	268.4622

รูปที่ 3.6 การวัดค่ามุม Concavity Angle โดยใช้โปรแกรม (Image-Pro Express) ทำการวัดค่า

$$\begin{aligned}(\text{Angle L1}) - (\text{Angle L2}) &= 270 - 268.4622 \text{ องศา} \\ &= 1.5378 \text{ องศา} \\ &\approx 1.54 \text{ องศา}\end{aligned}$$

เพราะฉะนั้น

ค่าของมุม Concavity Angle ของดอกกัก ที่วัดได้โดยประมาณคือ 1.54 องศา

2. ทำการกักชิ้นงาน โดยทำการกักตามแผนการทดลองที่ออกแบบไว้
3. เก็บข้อมูลค่าการสึกหรอของดอกกัก และค่าความหยาบผิว ดังแสดงในตารางที่ 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.6 แสดงการเก็บค่าการสึกหรอของมีดกัด (w) กับค่าความหยาบผิว ( $R_a$ )

ลำดับการทดลอง	ปัจจัย			ค่าการสึกหรอของมีดกัด (w) (ไมโครเมตร)					ค่าความหยาบผิว ( $R_a$ ) (ไมโครเมตร)			
	A	B	C	พื้นที่ 1	พื้นที่ 2	พื้นที่ 3	พื้นที่ 4	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
1	-	-	-	0	0	0	0	0	2.75	2.94	2.91	2.86
2	0	0	0	263.16	330.82	293.22	255.64	285.71	0.82	1.03	1.18	1.01
3	0	0	0	428.57	421.05	353.38	398.50	400.38	0.88	0.86	0.86	0.87
4	+	+	+	443.61	503.75	541.35	488.72	494.36	2.07	1.85	1.98	1.96
5	-	-	-	481.20	548.86	631.57	654.13	578.94	2.28	2.31	2.31	2.30
6	+	+	+	503.76	609.01	631.57	661.67	601.50	1.43	1.29	1.56	1.43
7	-	-	-	563.91	646.60	654.10	699.25	640.97	1.18	1.25	1.19	1.21
8	0	0	0	646.62	684.18	712.03	744.36	696.80	0.80	0.81	0.79	0.80
9	+	+	+	661.66	699.26	717.29	759.39	709.40	0.74	1.10	1.02	0.95
10	0	0	0	684.20	759.14	744.06	804.51	748.06	0.67	0.72	0.89	0.76
11	-	-	-	706.77	766.90	777.06	842.10	773.21	1.01	1.06	1.11	1.06
12	+	+	+	759.40	774.43	802.24	894.73	807.70	0.90	0.86	0.77	0.84
13	-	-	-	804.51	789.47	819.54	917.29	832.70	0.96	0.66	0.77	0.84
14	+	+	+	864.66	834.58	857.14	924.80	870.30	0.69	0.83	0.87	0.79
15	0	0	0	939.85	849.62	864.66	939.72	898.47	0.48	0.63	0.73	0.61

Stroke = 12.7 mm

Scan length = 0.8 mm

#### 4. วิเคราะห์ผลการทดลองย่อย

โดยทำการประมวลผลและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Stat Graphics plus 3.0 ดังแสดงในรูปที่ 3.7, 3.8 และรูปที่ 3.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Regression Analysis - Linear model: $Y = a + b \cdot X$				
Dependent variable: Ra				
Independent variable: Wear				
Parameter	Standard Estimate	T Error	Statistic	P-Value
Intercept	2.9991	0.426931	7.0248	0.0059
Slope	-0.00238003	0.000668836	-3.55846	0.0379

Analysis of Variance					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	2.49355	1	2.49355	12.66	0.0379
Residual	0.590767	3	0.196922		
Total (Corr.)	3.08432	4			
R-squared = 80.846 %					

รูปที่ 3.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสึกหรอของมิดกัด (w) กับค่าความหยาบผิว ( $R_a$ ) ของพารามิเตอร์ค่าต่ำ

Regression Analysis - Linear model: $Y = a + b \cdot X$				
Dependent variable: Ra				
Independent variable: Wear				
Parameter	Standard Estimate	T Error	Statistic	P-Value
Intercept	1.14451	0.0627719	18.2328	0.0004
Slope	-0.0005521	0.0000969	-5.69231	0.0107

Analysis of Variance					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	0.07889	1	0.07889	32.40	0.0107
Residual	0.007304	3	0.002434		
Total (Corr.)	0.0862	4			
R-squared = 91.526 %					

รูปที่ 3.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสึกหรอของมิดกัด (w) กับค่าความหยาบผิว ( $R_a$ ) ของพารามิเตอร์ค่ากลาง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Regression Analysis - Linear model: $Y = a + b \cdot X$				
Dependent variable: Ra				
Independent variable: Wear				
Parameter	Standard Estimate	T Error	Statistic	P-Value
Intercept	3.37508	0.3870	8.71952	0.0032
Slope	- 0.003130	0.000545	- 5.74135	0.0105

Analysis of Variance					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	0.907892	1	0.907892	32.96	0.0105
Residual	0.082628	3	0.027542		
Total (Corr.)	0.99052	4			
R-squared = 91.66 %					

รูปที่ 3.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสึกหรอของมิดกัด (w) กับค่าความหยาบผิว ( $R_a$ ) ของพารามิเตอร์ค่าสูง

จากการวิเคราะห์ของผลการทดลองย่อยที่ใช้การประมวลผลและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Stat Graphics plus 3.0 ดังแสดงในรูปที่ 3.7, 3.8 และรูปที่ 3.9 เป็นการทดสอบว่าค่าการสึกหรอของมิดกัด (w) และค่าความหยาบผิว ( $R_a$ ) มีความสัมพันธ์กันหรือไม่

การทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสึกหรอของมิดกัด (w) และค่าความหยาบผิว ( $R_a$ ) ว่ามีความสัมพันธ์กันในเชิงเส้นตรงหรือไม่ของพารามิเตอร์ค่าต่ำดังแสดงในรูปที่ 3.7

การทดสอบสมมติฐาน

ตั้งสมมติฐาน

$H_0: \beta_1 = 0$  (ค่าการสึกหรอของมิดกัดและค่าความหยาบผิวไม่มีความสัมพันธ์กันในเชิงเส้นตรง)

$H_1: \beta_1 \neq 0$  (ค่าการสึกหรอของมิดกัดและค่าความหยาบผิวมีความสัมพันธ์กันในเชิงเส้นตรง)

คำนวณค่าสถิติทดสอบ

$$t = -3.55846$$

กำหนดระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  ,  $1 - \frac{\alpha}{2} = 0.975$

สร้างเขตปฏิเสธ  $H_0$

จะปฏิเสธ  $H_0$  ถ้า  $t > t_{0.975,3} = 3.18$  หรือ  $t < t_{0.975,3} = -3.18$

สรุปผลการทดสอบ

เนื่องจาก  $t = -3.55846 < -3.18$  จึงปฏิเสธ  $H_0$

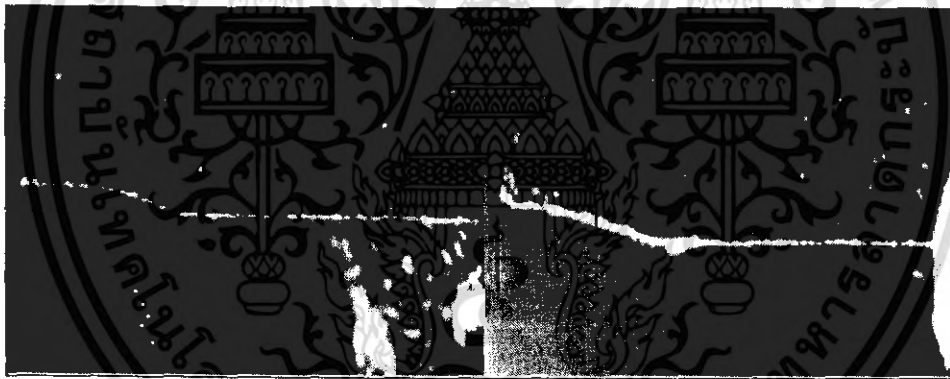
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั่นคือ ค่าการสึกหรอของมีดกัด ( $w$ ) กับค่าความหยาบผิว ( $R_a$ ) มีความสัมพันธ์กันในเชิงเส้นตรงที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

และทำการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสึกหรอของมีดกัด ( $w$ ) และค่าความหยาบผิว ( $R_a$ ) ว่ามีความสัมพันธ์กันในเชิงเส้นตรงหรือไม่ของพารามิเตอร์ค่ากลางดังแสดงในรูปที่ 3.8 และของพารามิเตอร์ค่าสูงดังแสดงในรูปที่ 3.9 ได้ผลอย่างเดียวกันกับการทดสอบสมมติฐานของพารามิเตอร์ค่าต่ำ นั่นก็คือ ค่าการสึกหรอของมีดกัด ( $w$ ) กับค่าความหยาบผิว ( $R_a$ ) มีความสัมพันธ์กันในเชิงเส้นตรงที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

#### 5. สรุปผลการทดลองย่อย

จากการวิเคราะห์ของผลการทดลองย่อยที่ใช้การประมวลผลและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Stat Graphics plus 3.0 ดังแสดงในรูปที่ 3.7, 3.8 และรูปที่ 3.9 สรุปผลการทดลองได้ดังนี้ ค่าการสึกหรอของมีดกัด ( $w$ ) กับค่าความหยาบผิว ( $R_a$ ) มีความสัมพันธ์กันในเชิงเส้นตรง  $Y = a + bX$ , นั่นคือ ถ้าค่าการสึกหรอของมีดกัด ( $w$ ) มีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความหยาบผิว ( $R_a$ ) จะมีค่าลดลง หรือถ้าค่าการสึกหรอของมีดกัด ( $w$ ) มีค่าลดลง ค่าความหยาบผิว ( $R_a$ ) จะมีค่าเพิ่มขึ้น ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 หรืออีกนัยหนึ่งก็คือ ถ้าลักษณะการสึกหรอของดอกกัด เพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆ ทำให้ห้องสาคทางด้านมุมของคมตัดนั้นเปลี่ยนแปลงไปตามดังแสดงในรูปที่ 3.10 กว้างขยายเท่ากับ 1.2 เท่า และเป็นผลทำให้ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานทดลองนั้นมีค่าความหยาบผิวที่ดีขึ้นคือ ผิวของชิ้นงานมีความละเอียดมากขึ้น



ก่อน

หลัง

รูปที่ 3.10 แสดงการสึกหรอของดอกกัดที่ทำให้ห้องสาคทางด้านมุมของคมตัดเปลี่ยนแปลงไป  $X=1000$  ไมโครเมตร

#### 3.4.3.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

เมื่อได้ค่าความหยาบผิวและค่าการสึกหรอแล้วจึงต้องนำค่าที่ได้มาทำการประมวลผลและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมทางสถิติ ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

ในการดำเนินการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้ ทำได้โดยกำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง 3 ปัจจัย ดังแสดงดังตารางที่ 3.1 เพื่อทำการศึกษาค่าความหยาบผิวของชิ้นงานและค่าการสึกหรอของดอกกัด (End Mill) ที่เกิดจากการขึ้นรูปด้วยเครื่องกัดอัตโนมัติ (CNC Vertical Milling Machine) โดยทำการทดลองตามวิธีการทดลองที่ได้วางไว้ในบทที่ 3 การทดลองด้วยกรรมวิธีการขึ้นรูปด้วยเครื่องกัดอัตโนมัติ (CNC Vertical Milling Machine) ทำเพื่อขึ้นรูปชิ้นงานตามที่ได้ออกแบบไว้ โดยทำการขึ้นรูปทั้งหมด 24 ครั้ง ซึ่งขั้นตอนในการทดลองนี้ คือ ขั้นตอนการทำการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1 ผลของการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน

ตารางที่ 4.1 ตารางบันทึกค่าความหยาบผิวของชิ้นงานและค่าการสึกหรอของคอกกัด (End Mill) จากการทดลอง

ลำดับ	ปัจจัย			ค่าการสึกหรอของคอกกัด (ไมโครเมตร)					ค่าความหยาบผิว (ไมโครเมตร)			
	A* (mm/min)	B* (rpm)	C* (mm)	พื้นที่ 1	พื้นที่ 2	พื้นที่ 3	พื้นที่ 4	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
1	165	328	0.75	473.676	706.755	509.278	458.647	537.089	1.75	2.12	1.98	1.95
2	165	497	0.75	501.270	714.281	533.834	473.684	555.767	1.54	1.67	1.35	1.52
3	250	497	0.75	501.270	744.356	541.353	503.759	572.684	1.98	1.75	2.24	1.99
4	250	497	0.75	503.751	879.694	551.432	533.828	617.176	2.35	2.12	1.92	2.13
5	165	328	0.25	526.307	924.807	563.909	546.316	640.334	1.93	2.15	1.86	1.98
6	250	328	0.75	533.826	1067.664	639.097	578.947	704.883	1.97	1.65	1.39	1.67
7	165	328	0.25	556.382	1187.965	654.06	593.985	748.098	1.43	1.21	1.75	1.46
8	250	328	0.75	571.420	1533.830	699.248	593.985	849.620	1.97	1.46	1.34	1.59
9	165	497	0.25	593.976	1601.499	706.767	593.985	874.056	0.99	1.11	0.53	0.52
10	165	497	0.75	654.062	1706.762	736.842	593.985	922.912	0.62	0.71	0.42	0.58
11	250	497	0.25	691.721	1714.762	736.842	601.504	936.207	0.66	0.45	0.72	0.61
12	250	497	0.75	706.758	1721.800	745.729	601.504	943.947	1.65	1.87	1.52	1.68
13	250	497	0.25	716.683	1777.288	754.060	616.541	966.143	1.38	1.53	1.42	1.44
14	165	328	0.25	729.315	1857.138	759.398	616.541	990.598	0.68	1.21	0.54	0.81
15	165	328	0.75	829.615	1882.488	759.398	616.541	1022.010	0.84	1.01	0.91	0.92
16	250	328	0.25	834.548	1891.317	759.398	616.541	1025.451	0.53	0.55	0.48	0.52
17	165	497	0.25	842.022	1912.561	764.706	616.541	1033.957	0.48	0.42	0.45	0.45
18	165	497	0.25	867.059	1917.288	766.917	624.060	1043.831	0.62	0.45	0.32	0.25
19	250	497	0.25	884.954	2015.033	774.436	631.579	1076.500	0.49	0.52	0.55	0.52
20	250	328	0.75	909.691	2038.877	857.142	646.617	1113.081	1.03	0.92	0.84	0.93
21	250	328	0.25	977.435	2062.521	1142.857	751.880	1233.673	1.04	0.89	0.98	0.97
22	165	328	0.75	999.991	2112.777	1203.007	759.399	1268.793	0.41	0.23	0.21	0.28
23	250	328	0.25	992.473	2166.432	1654.135	842.105	1413.786	0.61	0.67	0.49	0.59
24	165	497	0.75	1007.510	2210.521	1691.729	849.624	1439.846	0.19	0.22	0.25	0.22

Stroke = 12.70 mm

Scan length = 0.80 mm

หมายเหตุ

- \* A: ค่าอัตราการป้อนชิ้นงาน (มิลลิเมตร/นาที)
- B: ค่าความเร็วรอบ (รอบ/นาที)
- C: ค่าความลึกของการตัด (มิลลิเมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ค่าความหนาผิวของชิ้นงานและค่าการสึกหรอของดอกกัด (End Mill) จากการทดลอง

ลำดับการทดลอง	ค่าอัตราการป้อนชิ้นงาน (มิลลิเมตร/นาที)	ค่าความเร็วรอบ (รอบ/นาที)	ค่าความลึกของการตัด (มิลลิเมตร)	ค่าการสึกหรอของดอกกัด (ไมโครเมตร)	ค่าความหนาผิว (ไมโครเมตร)
1	165	328	0.75	537.089	1.95
2	165	497	0.75	555.767	1.52
3	250	497	0.75	572.684	1.99
4	250	497	0.75	617.176	2.13
5	165	328	0.25	640.334	1.98
6	250	328	0.75	704.883	1.67
7	165	328	0.25	748.098	1.46
8	250	328	0.75	849.620	1.59
9	165	497	0.25	874.056	0.52
10	165	497	0.75	922.912	0.58
11	250	497	0.25	936.207	0.61
12	250	497	0.75	943.947	1.68
13	250	497	0.25	966.143	1.44
14	165	328	0.25	990.598	0.81
15	165	328	0.75	1022.010	0.92
16	250	328	0.25	1025.451	0.52
17	165	497	0.25	1033.957	0.45
18	165	497	0.25	1043.831	0.25
19	250	497	0.25	1076.500	0.52
20	250	328	0.75	1113.081	0.93
21	250	328	0.25	1233.673	0.97
22	165	328	0.75	1268.793	0.28
23	250	328	0.25	1413.786	0.59
24	165	497	0.75	1439.846	0.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองในขั้นตอนนี้จะทำการกำหนดค่าของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองไว้ก่อน ซึ่งแสดงดังตารางที่ 3.1 แล้วทำการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล  $2^3$  แล้วทำซ้ำในแต่ละกลุ่มของตัวแปร อีก 3 ครั้ง ดังนั้นจำนวนการทดลองทั้งหมดเท่ากับ  $3 \times 2^3 = 24$  ครั้ง แล้วจึงทำการทดลองในแต่ละกลุ่มของตัวแปรและทำการวัดค่าความหยาบผิวของชิ้นงานและค่าการสึกหรอของดอกกัดแล้วบันทึกผล

#### 4.1.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนร่วม

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ ANCOVA

Analysis of Covariance for Roughness - Type III Sums of Squares					
Source of Variation	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F <sub>0</sub>	P-Value
<b>COVARIATES</b>					
Wear	2.7793	1	2.7793	31.21	0.0001
<b>MAIN EFFECTS</b>					
A	0.77540	1	0.7754	8.70	0.0100
B	0.29912	1	0.29912	3.36	0.0868
C	0.33601	1	0.33601	3.77	0.0711
<b>INTERACTIONS</b>					
AB	0.28876	1	0.28876	3.34	0.0919
AC	0.08564	1	0.08564	0.96	0.3423
BC	0.32194	1	0.32194	3.62	0.0766
ABC	0.00007	1	0.00007	0	0.9822
Error	1.33576	15	0.08905		
Total	9.17878	23			

หลักการวิเคราะห์ความแปรปรวนร่วม คือ การหาความผันแปรโดยรวมแล้วแยกออกเป็นความผันแปรเนื่องจากทรีทเมนต์ (Treatment) สำหรับแต่ละปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม แล้วพิจารณาความผันแปรเนื่องจากทรีทเมนต์ว่ามีปริมาณเท่าไร ในระหว่างเงื่อนไขในการทดลอง แล้วนำมาสร้างเป็นตาราง ANCOVA จะเริ่มจากการพิจารณาความมีนัยสำคัญทางสถิติ (Significations) ของอิทธิพลร่วมที่ระดับสูงก่อน ซึ่งถ้าพบว่ามีนัยสำคัญทางสถิติหมายความว่า ถ้าเปลี่ยนระดับของปัจจัยตัวใด โดยให้ปัจจัยตัวอื่นคงที่แล้วจะส่งผลให้ตัวแปรตอบสนองเปลี่ยนไปด้วย ซึ่งกล่าวไว้ว่าปัจจัยหลักที่เกิดจากปัจจัยร่วมจะมีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้วยนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

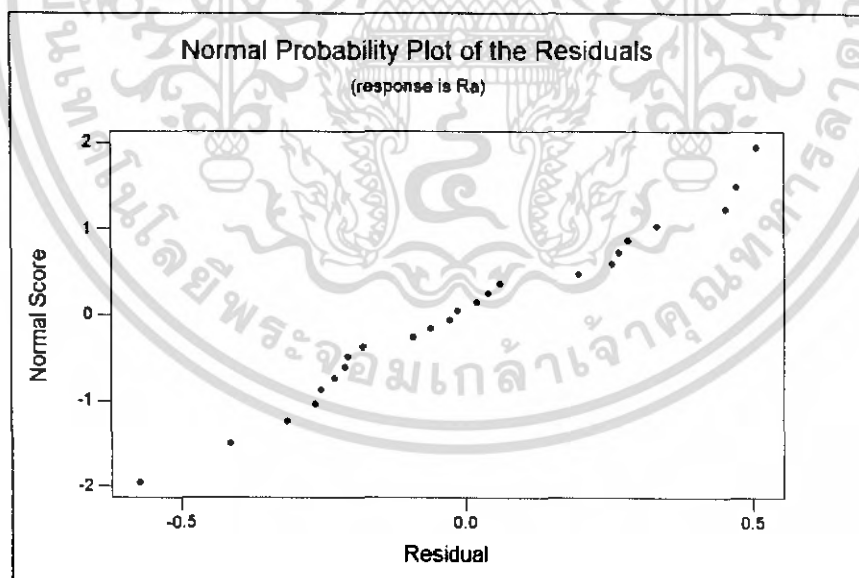
จากตารางที่ 4.3 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนร่วม เมื่อกำหนด ให้ A คือ ค่าอัตราการป้อนชิ้นงาน (Feed Rate), B คือ ค่าความเร็วรอบ (Speed), C คือ ค่าความลึกของการตัด (Depth of Cut) และ (Wear) คือ ค่าการสึกหรอของดอกกัด เมื่อพิจารณาว่า P-Value พบว่ามีปัจจัยที่มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 (ในการทดลองนี้กำหนด  $\alpha = 0.05$ ) ได้แก่ ค่าอัตราการป้อนชิ้นงาน (Feed Rate), และค่าการสึกหรอของดอกกัด (Wear) จึงสรุปได้ว่าทั้งค่าอัตราการป้อนชิ้นงาน (Feed Rate) และค่าการสึกหรอของดอกกัด (Wear) มีผลต่อค่าความหยาบผิว ซึ่งก่อนจะนำผลการวิเคราะห์ไปใช้งานต้องตรวจสอบค่าความถูกต้องของรูปแบบซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

#### 4.1.2 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model Adequacy Checking) เป็นวิธีการตรวจสอบที่ทำให้ทราบว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนร่วมมีความน่าเชื่อถือถึงเป็นไปตามหลักทางสถิติหรือไม่ โดยการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบมีอยู่ 3 ประเภท คือ

##### 4.1.2.1 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบว่าเป็นการแจกแจงแบบปกติ

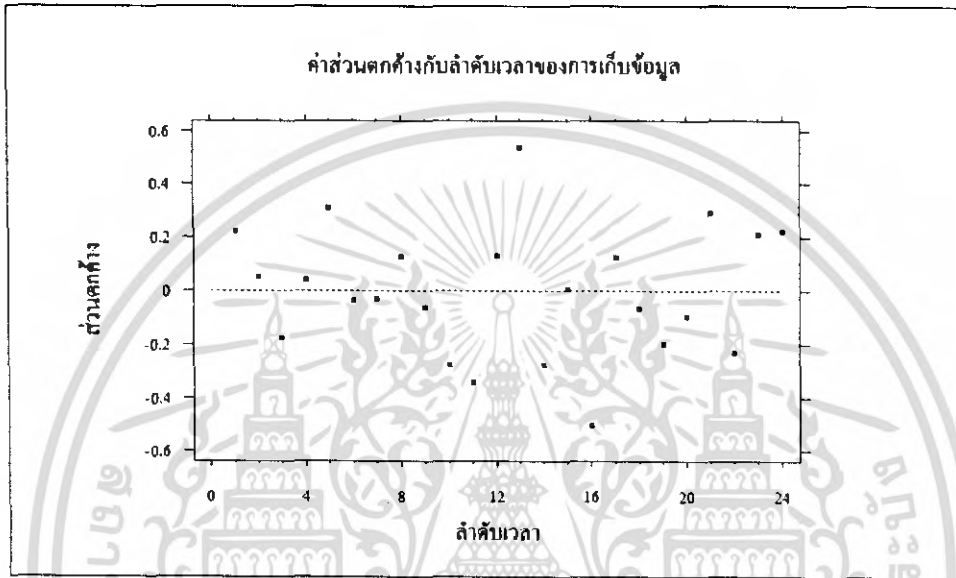
โดยการใช้ค่าส่วนตกค้าง (Residual) หรือทดสอบกราฟทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability Paper: NOPP) หากลักษณะของกราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรงหรือเกือบจะตรงแสดงว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ ซึ่งรูปที่ 4.1 เป็นรูป กราฟการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability Plot) สำหรับค่าส่วนตกค้างกับค่าความหยาบผิว จะเห็นว่าลักษณะของกราฟประมาณเกือบที่จะเป็นเส้นตรงแสดงว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้มีลักษณะของการกระจายตัวแบบปกติ



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงการแจกแจงแบบปกติสำหรับค่าส่วนตกค้างของค่าความหยาบผิว

#### 4.1.2.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

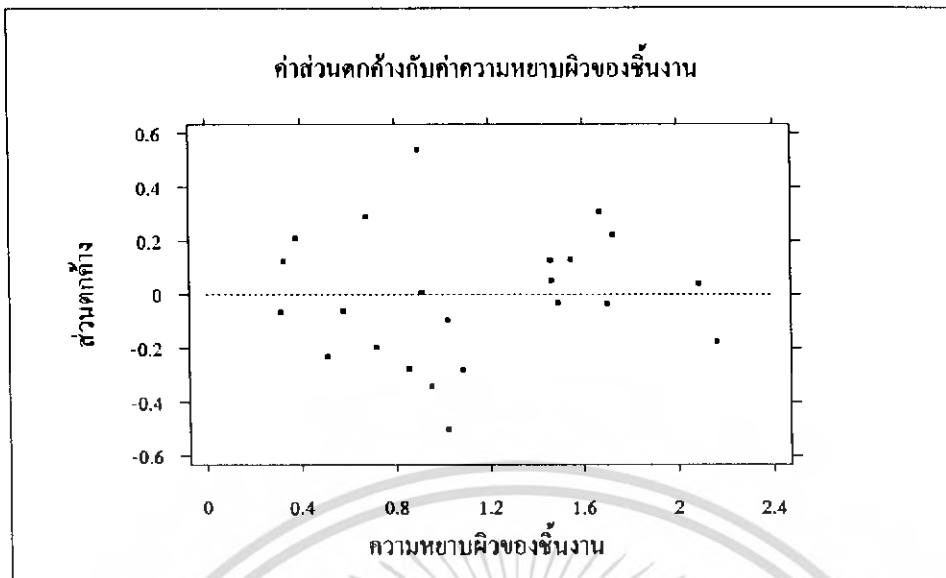
เป็นการทดสอบความสัมพันธ์ของค่าส่วนตกค้าง โดยใช้ค่าส่วนตกค้างและลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล มาทำการพล็อตกราฟค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้งและลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลอยู่บนแกนนอน ดังรูปที่ 4.2 เป็นรูปที่แสดงค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลที่จากทวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งลักษณะของกราฟมีการกระจายตัวอย่าง ไม่มีรูปแบบแสดงว่าข้อมูลในการทดลองมีความเป็นอิสระต่อกัน



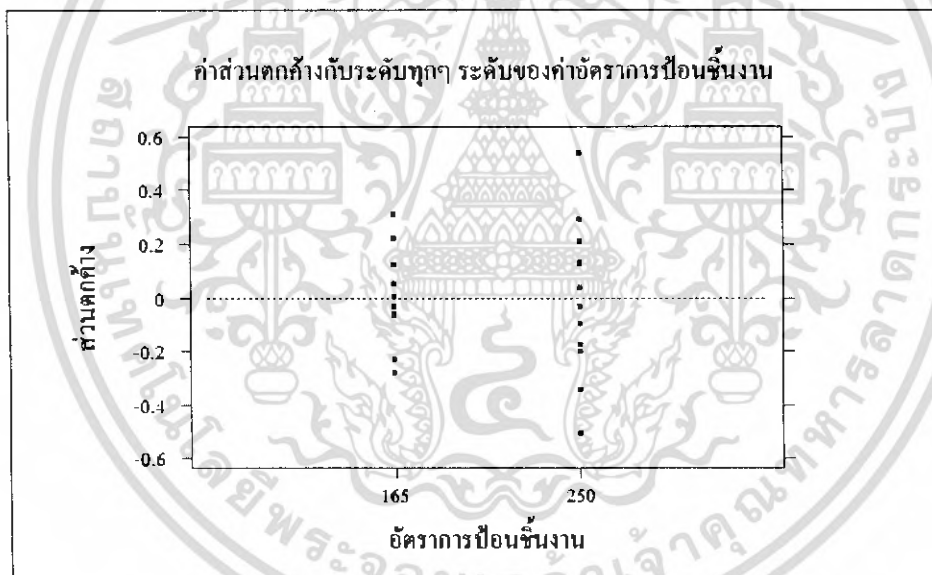
รูปที่ 4.2 ค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล

#### 4.1.2.3 การตรวจสอบความเสถียรภาพของความแปรปรวน

เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของข้อมูล โดยการใช้ข้อมูลค่าส่วนตกค้างและค่าที่ถูกฟิต (Fitted Value) ในที่นี้คือค่าความหนาของชิ้นงานมาทำการพล็อตกราฟระหว่างค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิต ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้งและค่าที่ถูกฟิตอยู่บนแกนนอนแสดงดังรูปที่ 4.3 และทดสอบโดยการใช้อัตราการป้อนชิ้นงาน (Feed Rate), ค่าความเร็วรอบ (Speed), ค่าความลึกของการตัด (Depth of Cut) มาทำการพล็อตกราฟระหว่างค่าส่วนตกค้างกับระดับของปัจจัยซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.4, 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ

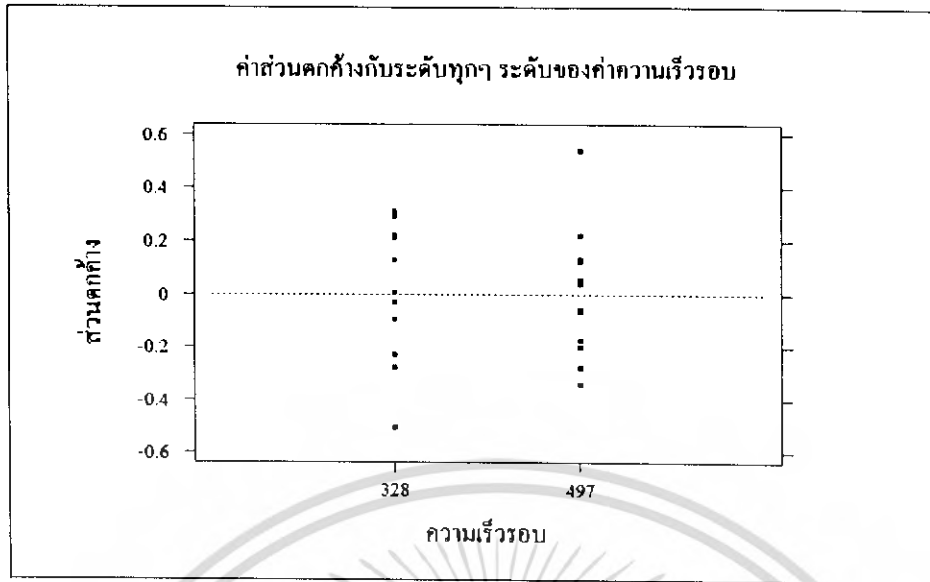


รูปที่ 4.3 ค่าส่วนตกร้างกับค่าความหยาบผิวของหินงาน

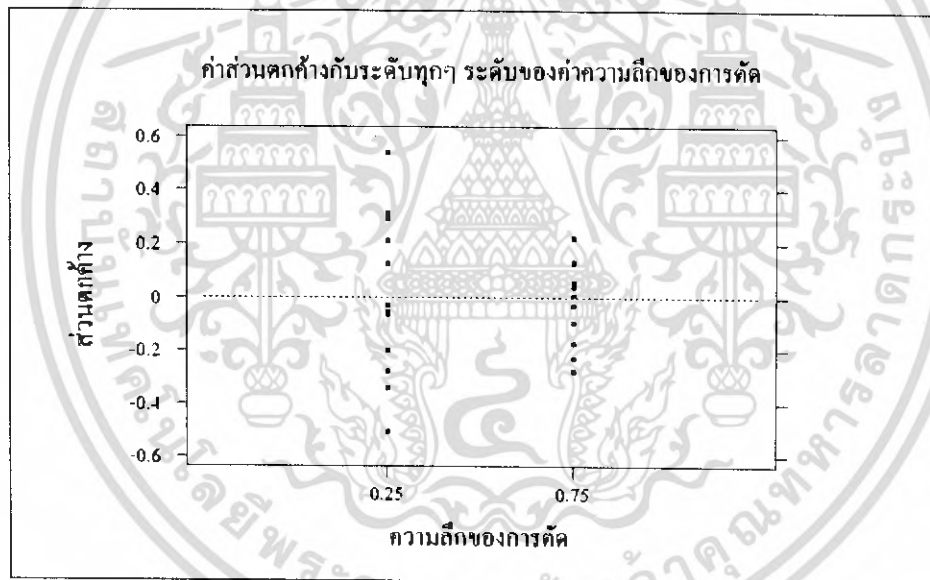


รูปที่ 4.4 ค่าส่วนตกร้างกับระดับต่างๆ ระดับของค่าอัตราการป้อนหินงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 58.จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ค่าส่วนตกร้างกับระดับต่างๆ ระดับของค่าความเร็วรอบ

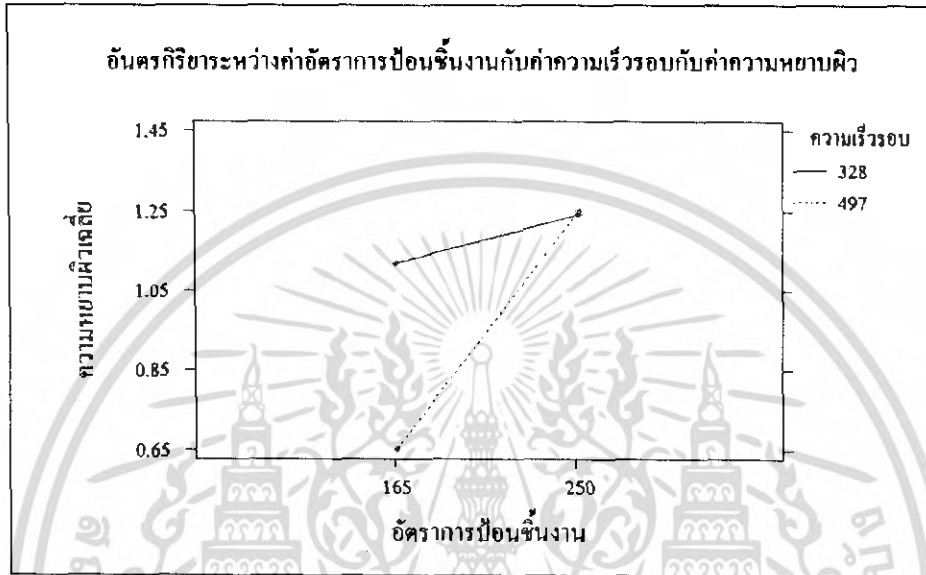


รูปที่ 4.6 ค่าส่วนตกร้างกับระดับต่างๆ ระดับของค่าความลึกของการตัด

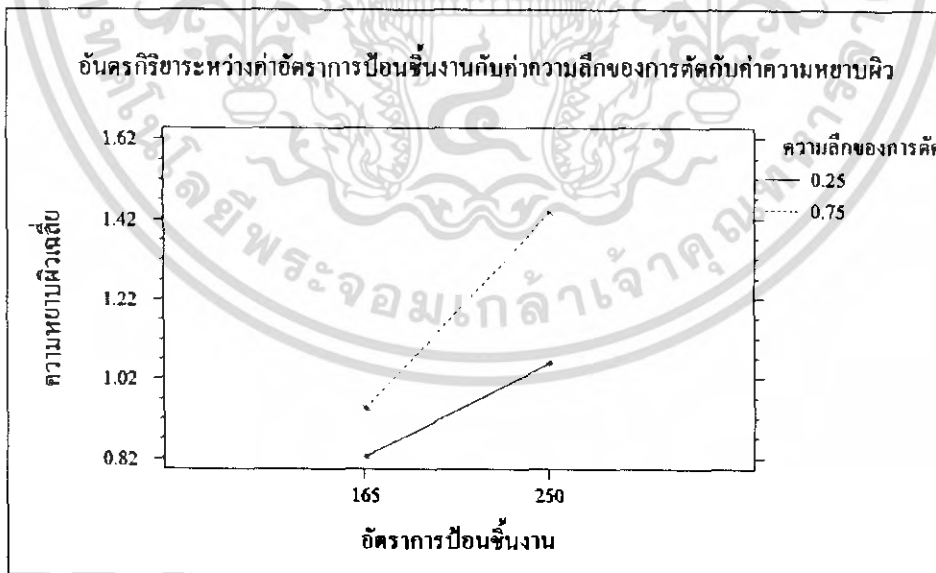
เมื่อพิจารณารูปดังกล่าวข้างต้นแล้ว พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติมีความเป็นอิสระซึ่งกันและกันและมีความสม่ำเสมอของความแปรปรวน จึงสรุปได้ว่าผลการวิเคราะห์จากข้อมูลนี้มีความน่าเชื่อถือได้ กล่าวคือค่าอัตราการป้อนชิ้นงาน (Feed Rate), และค่าการสึกหรอของดอกกัด (Wear) มีผลต่อค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน แต่ค่าความเร็วรอบ (Speed), ค่าความลึกของการตัด (Depth of Cut) และปัจจัยร่วมระหว่างค่าอัตราการป้อนชิ้นงาน (Feed Rate) กับค่าความเร็วรอบ (Speed), ค่าอัตราการป้อนชิ้นงาน (Feed Rate) กับค่าความลึกของการตัด (Depth of Cut), ค่าความเร็วรอบ (Speed) กับค่าความลึกของการตัด (Depth of Cut) และค่าอัตราการป้อน (Feed Rate) กับค่าความเร็วรอบ (Speed) กับค่าความลึกของการตัด (Depth of Cut) ไม่มีผลต่อค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 59 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองจะเห็นว่าปัจจัยต่างมีความสัมพันธ์กัน คือ ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานระหว่างระดับของปัจจัยหลักกับค่าเฉลี่ยของค่าความหยาบผิว อันตรกิริยาระหว่างค่าอัตราการป้อน (Feed Rate) กับค่าความเร็วรอบ (Speed) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.7 อันตรกิริยาระหว่างค่าอัตราการป้อน (Feed Rate) กับค่าความลึกของการตัด (Depth of Cut) แสดงดังรูปที่ 4.8 และอันตรกิริยาระหว่างค่าอัตราการป้อน (Feed Rate) กับค่าความเร็วรอบ (Speed) กับค่าความลึกของการตัด (Depth of Cut) แสดงดังรูปที่ 4.9

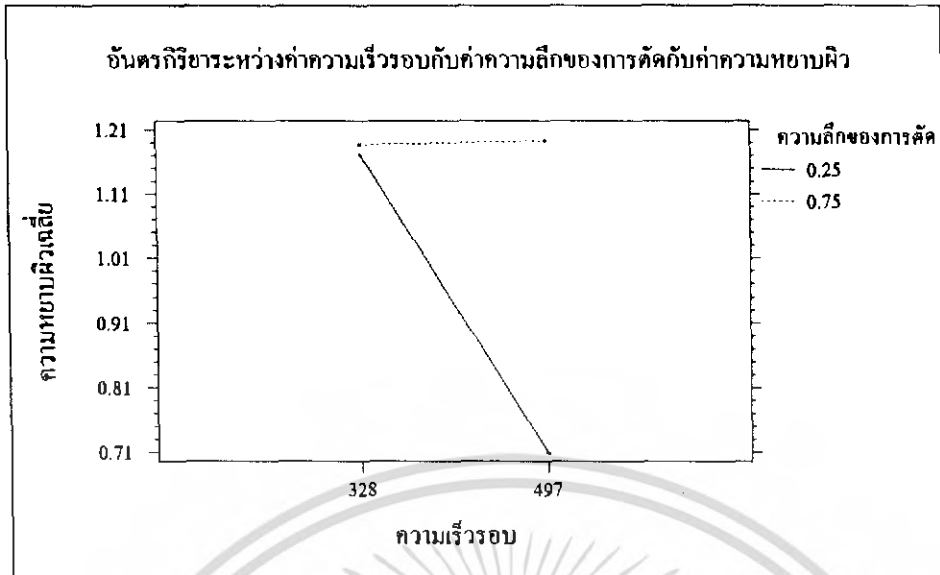


รูปที่ 4.7 แสดงอันตรกิริยาระหว่างค่าอัตราการป้อนชิ้นงานกับค่าความเร็วรอบกับค่าเฉลี่ยของค่าความหยาบผิว



รูปที่ 4.8 แสดงอันตรกิริยาระหว่างค่าอัตราการป้อนชิ้นงานกับค่าความลึกของการตัดกับค่าเฉลี่ยของค่าความหยาบผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 60 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

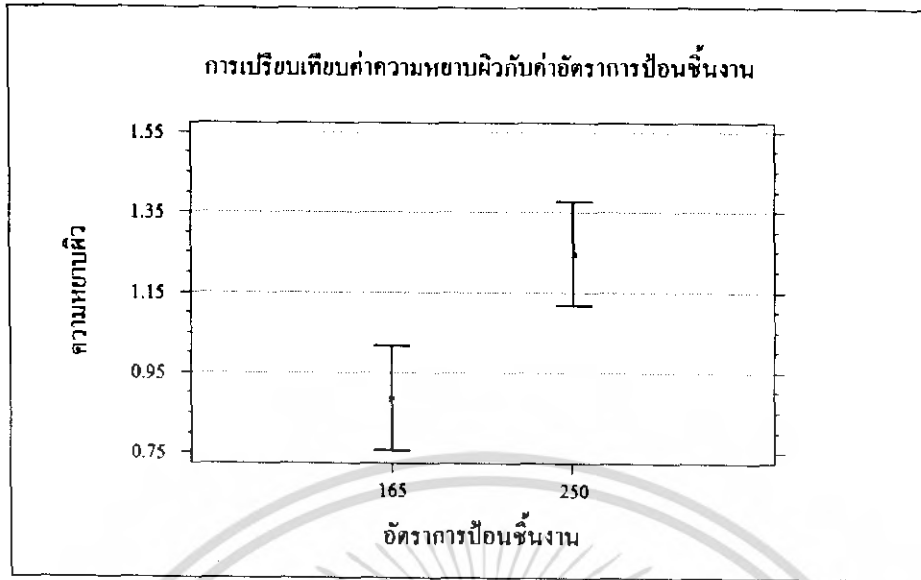


รูปที่ 4.9 แสดงอันตรกิริยาระหว่างค่าความเร็วรอบกับค่าความเค้นของการตัดกับค่าเฉลี่ยของค่าความหนาผิว

#### 4.1.2.4 การวิเคราะห์การเกิดค่าความหนาผิวที่ปัจจัยต่าง ๆ

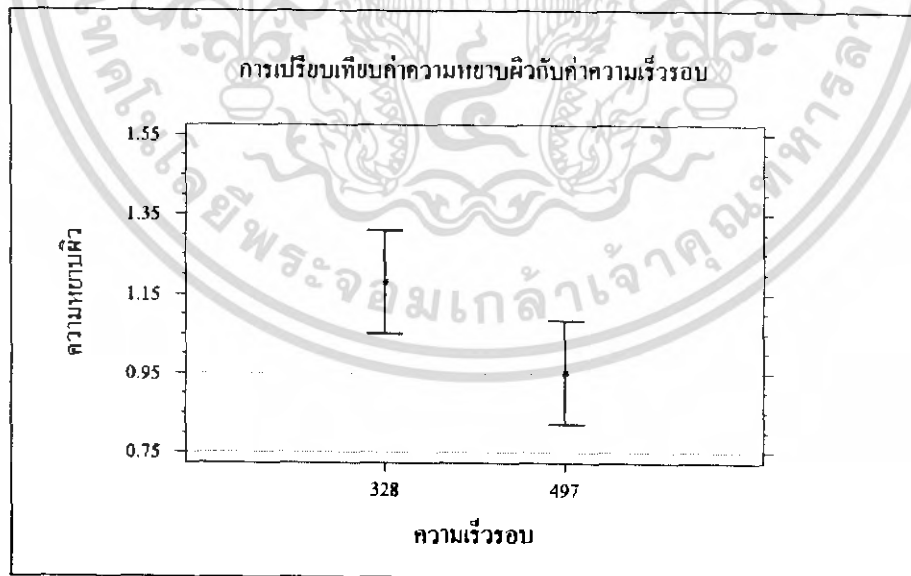
จากการวิเคราะห์ของผลการทดลอง ค่าการสึกหรอของมีดกัดกับค่าความหนาผิว ถ้าค่าการสึกหรอของมีดกัดมีค่าเพิ่มขึ้นค่าความหนาผิวจะมีค่าลดลง หรือถ้าค่าการสึกหรอของมีดกัดมีค่าลดลงค่าความหนาผิวจะมีค่าเพิ่มขึ้น ที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  หรืออีกนัยหนึ่งก็คือ ถ้าลักษณะการสึกหรอของดอกกัดเพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆ ทำให้องศาทางด้านมุมของคมตัดนั้นเปลี่ยนแปลงไปตาม และเป็นผลทำให้ค่าความหนาผิวของชิ้นงานทดลองนั้นมีค่าความหนาผิวที่ดีขึ้นคือ ผิวของชิ้นงานมีความละเอียดมากขึ้น

ลักษณะของการเกิดค่าความหนาผิวถ้าอัตราการป้อนชิ้นงาน (Feed Rate) เป็นค่าสูง จะเห็นได้ว่าค่าความหนาผิวของชิ้นงานจะมีค่ามากแต่ถ้าอัตราการป้อนชิ้นงาน (Feed Rate) เป็นค่าต่ำ ค่าความหนาผิวของชิ้นงานจะมีค่าน้อยตามไปด้วย แสดงดังรูปที่ 4.10 โดยที่ค่าอัตราการป้อนชิ้นงาน (Feed Rate) จะมีผลต่อระยะ  $f$  โดยถ้าอัตราการป้อนชิ้นงาน (Feed Rate) เป็นค่าสูง จะทำให้ระยะ  $f$  มาก ทำให้ค่าความสูงของคลื่นความหนาผิวมาก ค่าความหนาผิว ( $R_{max}$ ) จะมีค่ามาก แต่ถ้าอัตราการป้อนชิ้นงาน (Feed Rate) เป็นค่าต่ำ จะทำให้ระยะ  $f$  น้อย ทำให้ค่าความสูงของคลื่นความหนาผิวน้อยค่าความหนาผิว ( $R_{max}$ ) จะมีค่าน้อย แสดงดังรูปที่ 4.13



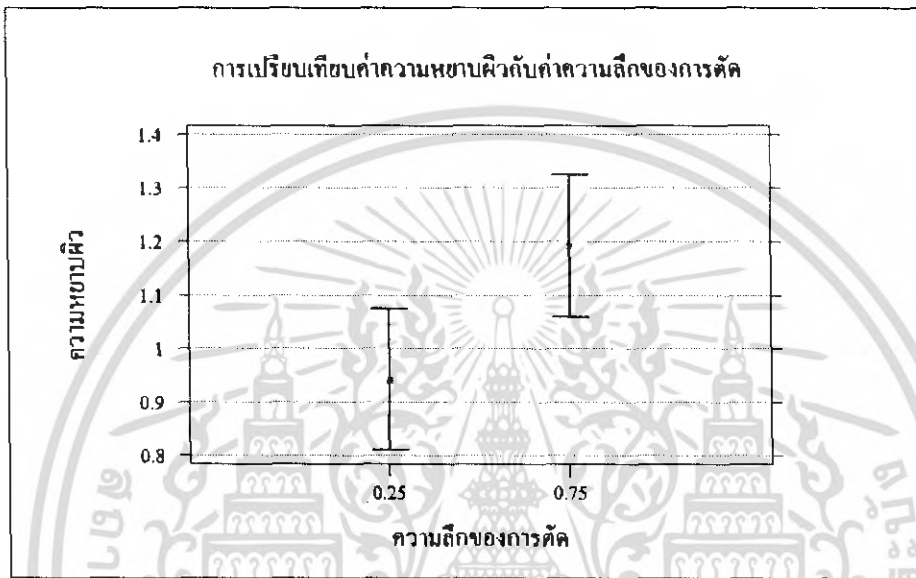
รูปที่ 4.10 แสดงการเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวกับค่าอัตราการป้อนชิ้นงาน

ลักษณะของการเกิดค่าความหยาบผิวถ้าค่าความเร็วรอบ (Speed) เป็นค่าสูง จะเห็นได้ว่าค่าความหยาบผิวของชิ้นงานจะมีค่าน้อยแต่ถ้าค่าความเร็วรอบ (Speed) เป็นค่าต่ำ ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานจะมีค่ามาก แสดงดังรูปที่ 4.11 โดยในกรณีที่อัตราการป้อนชิ้นงาน (Feed Rate) คงที่และระยะความยาวของร่องชิ้นงานที่กัดเท่ากัน ถ้าใช้ค่าความเร็วรอบ (Speed) เป็นค่าสูง ความถี่ของคลื่นความหยาบผิวก็จะมาก ส่งผลให้ค่าความหยาบผิวน้อย ในกรณีเดียวกันถ้าใช้ค่าความเร็วรอบ (Speed) เป็นค่าต่ำ ความถี่ของคลื่นความหยาบผิวก็จะน้อย ส่งผลให้ค่าความหยาบผิวมาก

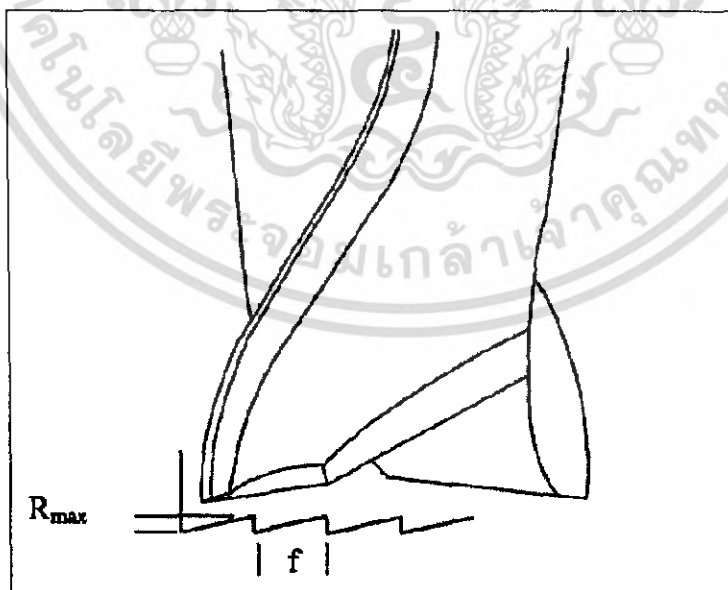


รูปที่ 4.11 แสดงการเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวกับค่าความเร็วรอบ

ลักษณะของการเกิดค่าความหยابผิวถ้าค่าความลึกของการตัด (Depth of Cut) เป็นค่าสูง จะเห็นได้ว่าค่าความหยابผิวของชิ้นงานจะมีค่ามากแต่ถ้าค่าความลึกของการตัด (Depth of Cut) เป็นค่าต่ำ ค่าความหยابผิวของชิ้นงานจะมีค่าน้อย แสดงดังรูปที่ 4.12 โดยมีสาเหตุมาจาก การกัดชิ้นงานถ้าค่าความลึกของการตัด (Depth of Cut) เป็นค่าสูง ดอกกัดจะรับภาระแรงกดสูงมากทำให้ดอกกัดมีอาการสั่นสะเทือนมากในขณะที่ทำการกัดทำให้ผิวงานมีค่าความหยابผิวมาก แต่ถ้าค่าความลึกของการตัด (Depth of Cut) เป็นค่าต่ำ ดอกกัดจะรับภาระแรงกดน้อยทำให้ดอกกัดมีอาการสั่นสะเทือนน้อยมากในขณะที่ทำการกัดทำให้ผิวงานมีค่าความหยابผิวน้อย



รูปที่ 4.12 แสดงการเปรียบเทียบค่าความหยابผิวกับค่าความลึกของการตัด



รูปที่ 4.13 แสดงลักษณะของการเกิดค่าความหยابผิว

#### 4.1.3 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหยาบผิว

จากงานวิจัยในครั้งนี้ผลการวิเคราะห์ที่ได้ออกมาสอดคล้องกับทฤษฎี ซึ่งในทางทฤษฎีจะมีเพียงปัจจัยเดียวที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน โดยใช้ดอกกัด ซึ่งปัจจัยนั้นก็คือค่าอัตราการป้อนชิ้นงาน (Feed Rate) นั่นเอง

$$\text{สมการทางทฤษฎี} \quad R_a = \frac{f}{4 \cot k} \quad (4.1)$$

เมื่อ  $f$  = Feed Rate (มิลลิเมตร/นาที)

$k$  = Concavity Angle (°)

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนร่วมดังตารางที่ 4.3 พบว่าปัจจัยที่มีนัยสำคัญทางสถิติ (ค่า P-Value น้อยกว่า 0.05) คือ ค่าอัตราการป้อนชิ้นงาน (Feed Rate) และค่าการสึกหรอของดอกกัด (Wear) จะเห็นได้ว่าผลการวิเคราะห์มีหนึ่งปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวที่ได้ออกมาสอดคล้องกับทฤษฎี

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนร่วม พบว่าปัจจัยที่มีนัยสำคัญทางสถิติ (ค่า P-Value น้อยกว่า 0.05) คือ อัตราการป้อนชิ้นงาน (Feed Rate) ความเร็วรอบ (Speed) ความลึกของการตัด (Depth of Cut) และการสึกหรอของดอกกัด (Wear) จะเห็นว่าการสึกหรอของดอกกัด (Wear) เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่เราต้องระมัดระวังนอกจากอัตราการป้อนชิ้นงาน (Feed Rate) ซึ่งจากสมการทางทฤษฎีจะขึ้นอยู่กับอัตราการป้อนชิ้นงาน (Feed Rate) ตัวเดียว เพราะฉะนั้นจากการทดลองแสดงให้เห็นว่านอกจากอัตราการป้อนชิ้นงาน (Feed Rate) แล้ว ตัวแปรอื่นๆ เช่น การสึกหรอของดอกกัด (Wear) ความเร็วรอบ (Speed) ความลึกของการตัด (Depth of Cut) ก็อาจมีผลด้วยซึ่งไม่ใช่ว่ามีเฉพาะอัตราการป้อนชิ้นงาน (Feed Rate) อย่างเดียวในสมการทางทฤษฎีดังแสดงในสมการ 4.1 เป็นสมการที่เรียกว่า Geometrical Models ซึ่งได้จากการพิสูจน์ทางเรขาคณิตคือ สมมติว่าไม่มีการทำปฏิกิริยากันระหว่างดอกกัดกับเนื้อชิ้นงานคือ เรื่องของความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเสียดสี ไม่เข้ามาเกี่ยวข้อง แต่ในทางปฏิบัติอย่างเช่น ดอกกัดหมุนเร็วขึ้นความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างดอกกัดกับเนื้อชิ้นงานก็จะมากขึ้น ซึ่งอาจจะทำให้เกิดการคั่งกันระหว่างผิวชิ้นงานกับดอกกัดจึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ผิวของชิ้นงานไม่เป็นไปตามสมการทางทฤษฎี

## บทที่ 5

### สรุปและวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน

สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้เป็นการศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อความหยาบผิวของชิ้นงาน DC 53 ที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องกัดอัตโนมัติ (CNC Vertical Milling Machine) เพื่อทำการศึกษาค่าต่างๆ ที่ส่งผลต่อความหยาบผิวในขณะที่ปรับเปลี่ยนระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง ดังนั้นเพื่อให้การใช้งานของเครื่องกัดอัตโนมัติ (CNC Vertical Milling Machine) เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและเกิดประโยชน์สูงสุดจึงควรทำการศึกษาค่าปัจจัยที่มีผลต่อความหยาบผิวและมีผลอย่างไร มีความสำคัญมากน้อยเพียงใดต่อความหยาบผิว เพราะว่าผิวของชิ้นงานที่มีความละเอียดเป็นสิ่งที่ยังบอกถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ซึ่งผิวที่ละเอียดมากจะช่วยลดโอกาสที่ชิ้นงานจะวิบัติเนื่องจากความล้า และมีความสำคัญมากต่ออุตสาหกรรมการผลิตแม่พิมพ์ เพราะแม่พิมพ์ต้องการความละเอียดของชิ้นส่วนที่ใช้ในการผลิตค่อนข้างสูง ซึ่งความละเอียดของชิ้นส่วนของแม่พิมพ์จะส่งผลไปถึงผลิตภัณฑ์ที่จะทำการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์อีกด้วย ซึ่งเหตุผลดังกล่าวนี้จึงเป็นที่มาของ “การศึกษาค่าอิทธิพลและปัจจัยที่มีผลต่อความหยาบผิวของชิ้นงาน DC 53 ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยเครื่องกัดอัตโนมัติ”

จากการทดลองขึ้นรูปด้วยเครื่องกัดอัตโนมัติ (CNC Vertical Milling Machine) โดยการปรับเปลี่ยนระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง ค่าที่ได้ทำการออกแบบการทดลองไว้ และนำมาวิเคราะห์เพื่อหาค่าของตัวแปรว่าตัวแปรใดมีผลต่อค่าความหยาบผิวมากน้อยเพียงใด เนื่องจากว่ามีปัจจัยที่ใช้ในการศึกษามากกว่า 1 ปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยมีอยู่ด้วยกันอยู่หลายระดับที่ต้องทำการทดลอง โดยในการทดลองนี้มีปัจจัยที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด 4 ปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยแรกมีด้วยกัน 2 ระดับ คือ ปัจจัยที่ 1 คือ ค่าอัตราการป้อนชิ้นงาน (Feed Rate) ปัจจัยที่ 2 คือ ค่าความเร็วรอบ (Speed) ปัจจัยที่ 3 คือ ค่าความลึกของการตัด (Depth of Cut) และอีก 1 ปัจจัยที่ควบคุมระดับไม่ได้ คือ ค่าการสึกหรอของดอกกัด (Wear) โดยในการทดลองนั้นทำการทดลองทั้งหมด 24 ครั้ง แล้วนำมาผลวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Stat Graphics plus

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าค่าอัตราการป้อนชิ้นงาน (Feed Rate) และค่าการสึกหรอของดอกกัด (Wear) มีผลต่อค่าความหยาบผิวของชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จากการวิเคราะห์ผลการทดลองจะเห็นว่าผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวที่ได้ออกมาสอดคล้องกับทฤษฎี

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนร่วม พบว่าปัจจัยที่มีนัยสำคัญทางสถิติ (ค่า P-Value น้อยกว่า 0.05) คือ อัตราการป้อนชิ้นงาน (Feed Rate) และการสึกหรอของดอกกัด (Wear) จะเห็นว่าการสึกหรอของดอกกัด (Wear) เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่เราต้องระมัดระวังนอกจากอัตราการป้อนชิ้นงาน (Feed Rate) ซึ่งจากสมการทางทฤษฎีจะขึ้นอยู่กับอัตราการป้อนชิ้นงาน (Feed Rate) ตัวเดียว เพราะฉะนั้นจากการทดลองแสดงให้เห็นว่านอกจากอัตราการป้อนชิ้นงาน (Feed

Rate) แล้วตัวแปรอื่นๆ เช่น การสึกหรอของดอกกัด (Wear) ความเร็วรอบ (Speed) ความลึกของการตัด (Depth of Cut) ก็อาจมีผลด้วยซึ่งไม่ใช่ว่ามีเฉพาะอัตราการป้อนชิ้นงาน (Feed Rate) อย่างเดียวในสมการทางทฤษฎีที่เรียกว่า Geometrical Models เป็นสมการที่ได้จากการพิสูจน์ทางเรขาคณิตคือ สมมุติว่าไม่มีการทำปฏิกิริยากันระหว่างดอกกัดกับเนื้อชิ้นงานคือ เรื่องของความร้อนไม่เข้ามาเกี่ยวข้อง แต่ในทางปฏิบัติอย่างเช่น ดอกกัดหมุนเร็วขึ้นความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างดอกกัดกับเนื้อชิ้นงานก็จะมากขึ้น ซึ่งอาจจะทำให้เกิดการดิ่งกันระหว่างผิวชิ้นงานกับดอกกัดจึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ผิวของชิ้นงานไม่เป็นไปตามสมการทางทฤษฎี

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยในครั้งนี้ผลการวิเคราะห์ที่ได้ออกมาสอดคล้องกับทฤษฎี ซึ่งในทางทฤษฎีจะมีเพียงปัจจัยเดียวที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน โดยใช้ดอกกัดเอนมิล (End Mill) ซึ่งปัจจัยนั้นก็คือค่าอัตราการป้อนชิ้นงาน (Feed Rate) นั่นเอง สมการที่เป็นสมการทางทฤษฎีเป็นสมการในอุดมคติ ไม่เหมาะสมกับสถานการณ์จริงในการกัดชิ้นงาน ดังนั้นผู้ที่สนใจงานวิจัยนี้สามารถที่จะศึกษาเพิ่มเติมต่อไปได้โดยทำการทดลองเพื่อที่จะสร้างสมการที่ใช้ในทางปฏิบัติจริง ผู้ทำการทดลองต้องทำการทดลองให้ละเอียดขึ้น เพื่อสมการที่ใช้พยากรณ์ค่าความหยาบผิวในทางปฏิบัติขึ้นมา

## บรรณานุกรม

- ก่อพงษ์ พ่วงรอดพันธุ์, ดาวร ชาปัญญา, 2546. การศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความหยาบผิวที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า.
- กาญจน์ อ้าไพจิตร, วิชัย สารรัตน์, สุทัส เกลิมญาติ, 2547. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวของชิ้นงานแอสเตดี 11 ที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องกัดอัตโนมัติ.
- กัลยา วานิชย์บัญชา, 2540. หลักสถิติ. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปารเมศ ชูติมา, 2545. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พิสมัย หาญมงคลพิพัฒน์, 2547. สถิติและการวางแผนการทดลองทางเกษตร. พิมพ์ครั้งที่ 2 กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สุรพล อุดิษฐกุล, 2526. สถิติการวางแผนการทดลอง เล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แอ็ดสเททการพิมพ์
- สิริจันทร์ ทองประเสริฐ, 2542. สถิติสำหรับงานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วชิระ มีทอง, 2544. วิศวกรรมการกัดละเอียด. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า วิทยาเขตธนบุรี
- Douglas C. Montgomery, 2001. Design and Analysis of Experiments. 6<sup>th</sup> edition : Wiley, New York.
- [http://www.9engineer.com/9cnc\\_main/surface%20analysis.doc](http://www.9engineer.com/9cnc_main/surface%20analysis.doc).
- Ming-Yung Wang, and Hung-Yen Chang 2004. Experimental study of surface roughness in slot end milling AL2014-T6. Int. J. of Machine Tools&Manufacture,44,51-57.



ภาคผนวก ก  
การวัดค่าการสึกหรอของดอกกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผก1 ตารางเก็บค่าของการคำนวณย่อย

ลำดับการทดลอง	ค่าอัตราการป้อนชิ้นงาน (มิลลิเมตร/นาที)	ค่าความเร็วรอบ (รอบ/นาที)	ค่าความลึกของการตัด (มิลลิเมตร)	ค่าการสึกหรอของดอกกัด (ไมโครเมตร)	ค่าความหยาบผิว (ไมโครเมตร)
1	165	328	0.25	0	2.86
2	207	412	0.5	285.71	1.01
3	207	412	0.5	400.38	0.87
4	250	497	0.75	494.36	1.96
5	165	328	0.25	578.94	2.30
6	250	497	0.75	601.50	1.43
7	165	328	0.25	640.97	1.21
8	207	412	0.5	696.80	0.80
9	250	497	0.75	709.40	0.95
10	207	412	0.5	748.06	0.76
11	165	328	0.25	773.21	1.06
12	250	497	0.75	807.70	0.84
13	165	328	0.25	832.70	0.84
14	250	497	0.75	870.30	0.79
15	207	412	0.5	898.47	0.61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Regression Analysis - Linear model:  $Y = a + b \cdot X$

Dependent variable: Ra

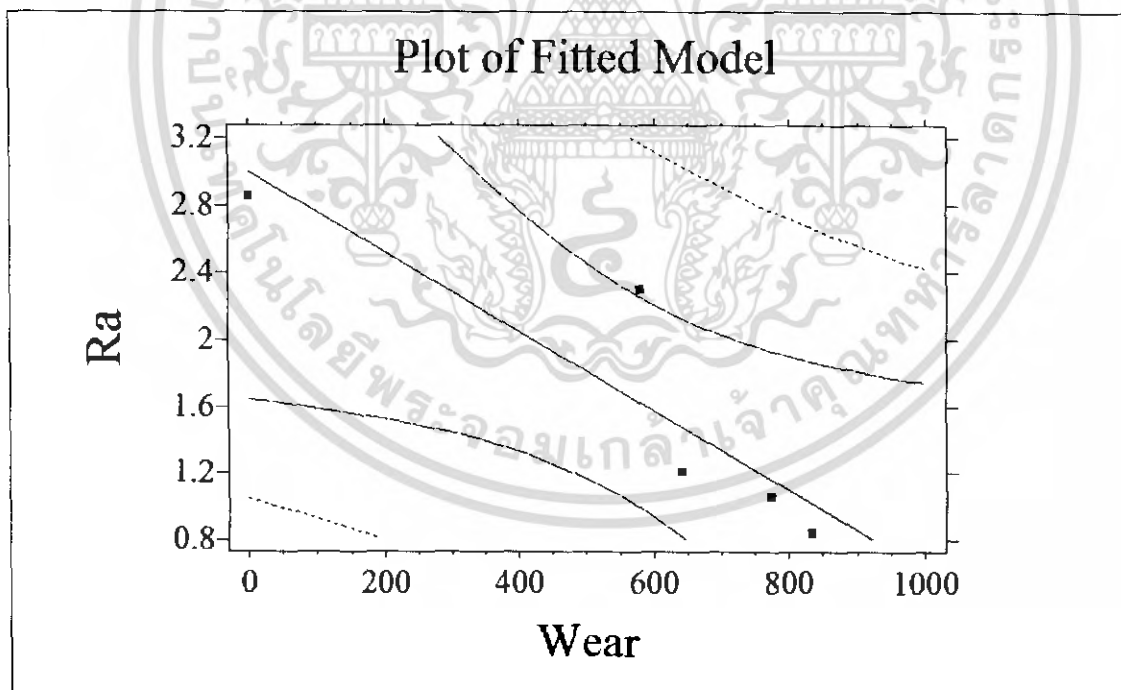
Independent variable: Wear

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
Intercept	2.9991	0.426931	7.0248	0.0059
Slope	-0.00238003	0.000668836	-3.55846	0.0379

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	2.49355	1	2.49355	12.66	0.0379
Residual	0.590767	3	0.196922		
Total (Corr.)	3.08432	4			

Correlation Coefficient = -0.899145  
 R-squared = 80.8461 percent  
 Standard Error of Est. = 0.443759



รูปที่ ผก 1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสึกหรอของมิดกัด (w) กับค่าความหยาบผิว ( $R_a$ ) ของพารามิเตอร์ค่าต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา <sup>พท 3</sup> และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Regression Analysis - Linear model:  $Y = a + b \cdot X$

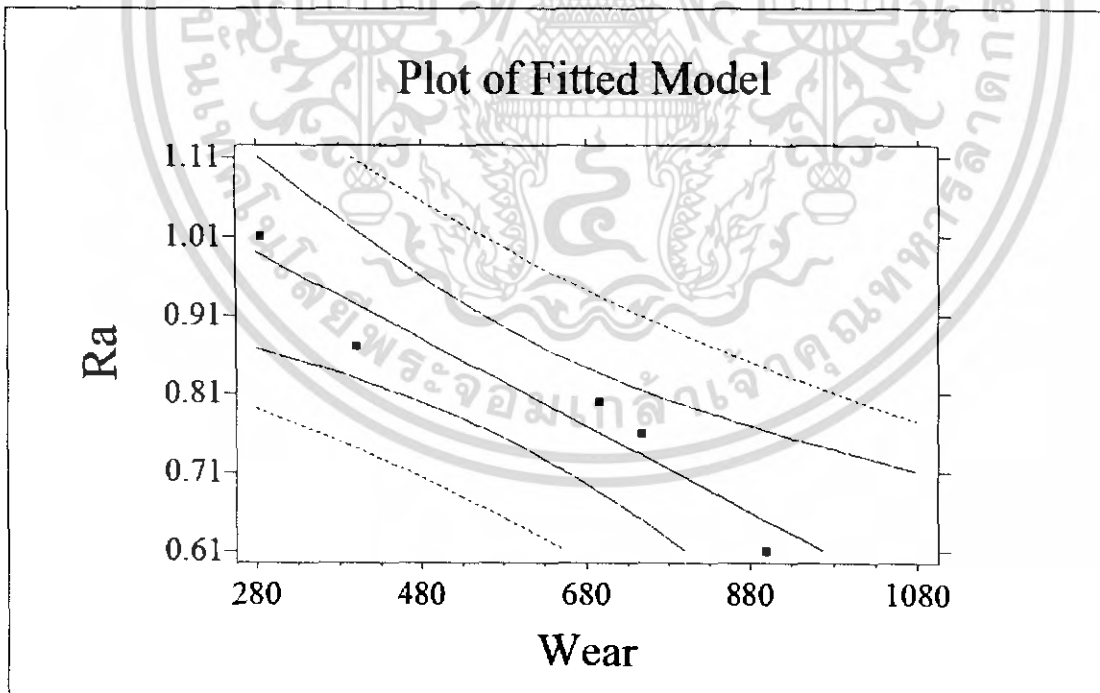
Dependent variable: Ra  
Independent variable: Wear

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
Intercept	1.14451	0.0627719	18.2328	0.0004
Slope	-0.000552101	0.0000969907	-5.69231	0.0107

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	0.0788954	1	0.0788954	32.40	0.0107
Residual	0.00730459	3	0.00243486		
Total (Corr.)	0.0862	4			

Correlation Coefficient = -0.956692  
R-squared = 91.526 percent  
Standard Error of Est. = 0.0493443



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสึกหรอของมีดกัด (w) กับค่าความหยาบผิว ( $R_a$ ) ของพารามิเตอร์ค่ากลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา <sup>บท 4</sup> และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Regression Analysis - Linear model:  $Y = a + b \cdot X$

Dependent variable: Ra

Independent variable: Wear

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
Intercept	3.37508	0.387072	8.71952	0.0032
Slope	-0.0031308	0.000545308	-5.74135	0.0105

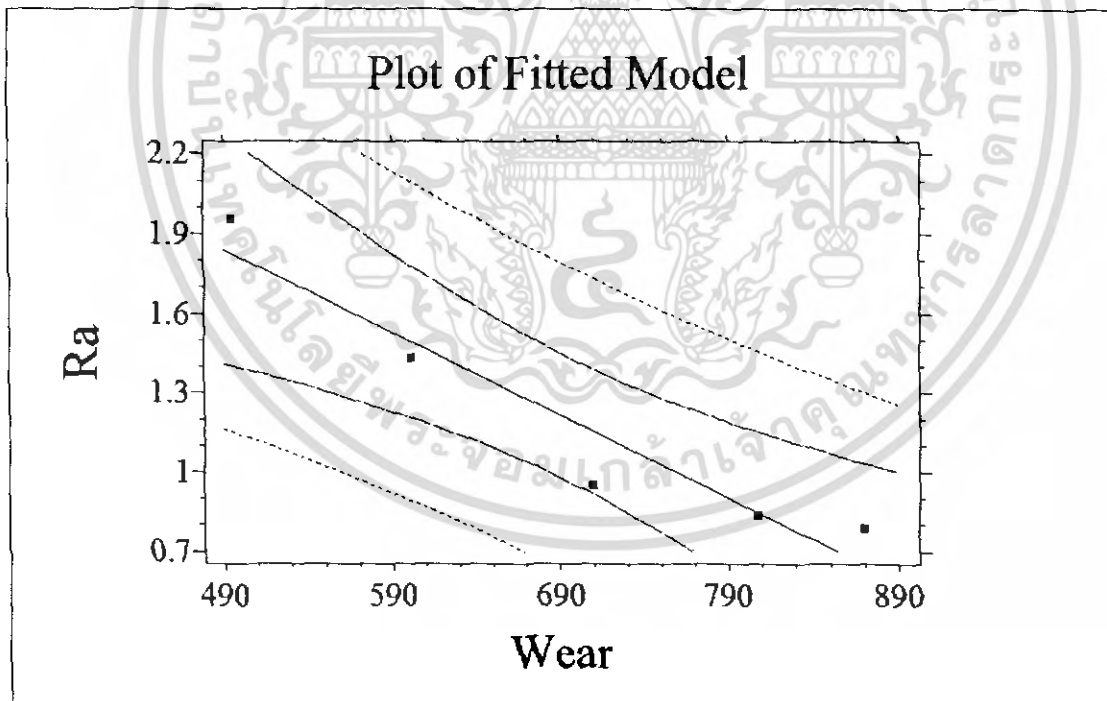
Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	0.907892	1	0.907892	32.96	0.0105
Residual	0.082628	3	0.0275427		
Total (Corr.)	0.99052	4			

Correlation Coefficient = -0.957382

R-squared = 91.6581 percent

Standard Error of Est. = 0.16596



รูปที่ ผก 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสึกหรอของมีดกัด ( $w$ ) กับค่าความหยาบผิว ( $R_a$ ) ของพารามิเตอร์ค่าสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผก 2 ตารางการวัดค่าการสึกหรอของดอกกัดของการทดลองย่อย

ลำดับการวัดค่าการสึกหรอ	ค่าอัตราการป้อนชิ้นงาน (มิลลิเมตร/นาที)	ค่าความเร็วรอบ (รอบ/นาที)	ค่าความลึกของการตัด (มิลลิเมตร)	ค่าการสึกหรอของดอกกัด (ไมโครเมตร)
1	165	328	0.25	0
2	207	412	0.5	285.71
3	207	412	0.5	400.38
4	250	497	0.75	494.36
5	165	328	0.25	578.94
6	250	497	0.75	601.50
7	165	328	0.25	640.97
8	207	412	0.5	696.80
9	250	497	0.75	709.40
10	207	412	0.5	748.06
11	165	328	0.25	773.21
12	250	497	0.75	807.70
13	165	328	0.25	832.70
14	250	497	0.75	870.30
15	207	412	0.5	898.47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



\* หมายเหตุ ระยะ X = 1000 ไมโครเมตร

รูปที่ ผก 4 แสดงการวัดค่าการสีกพรของการทดลองย่อย ลำดับที่ 1 และ 2

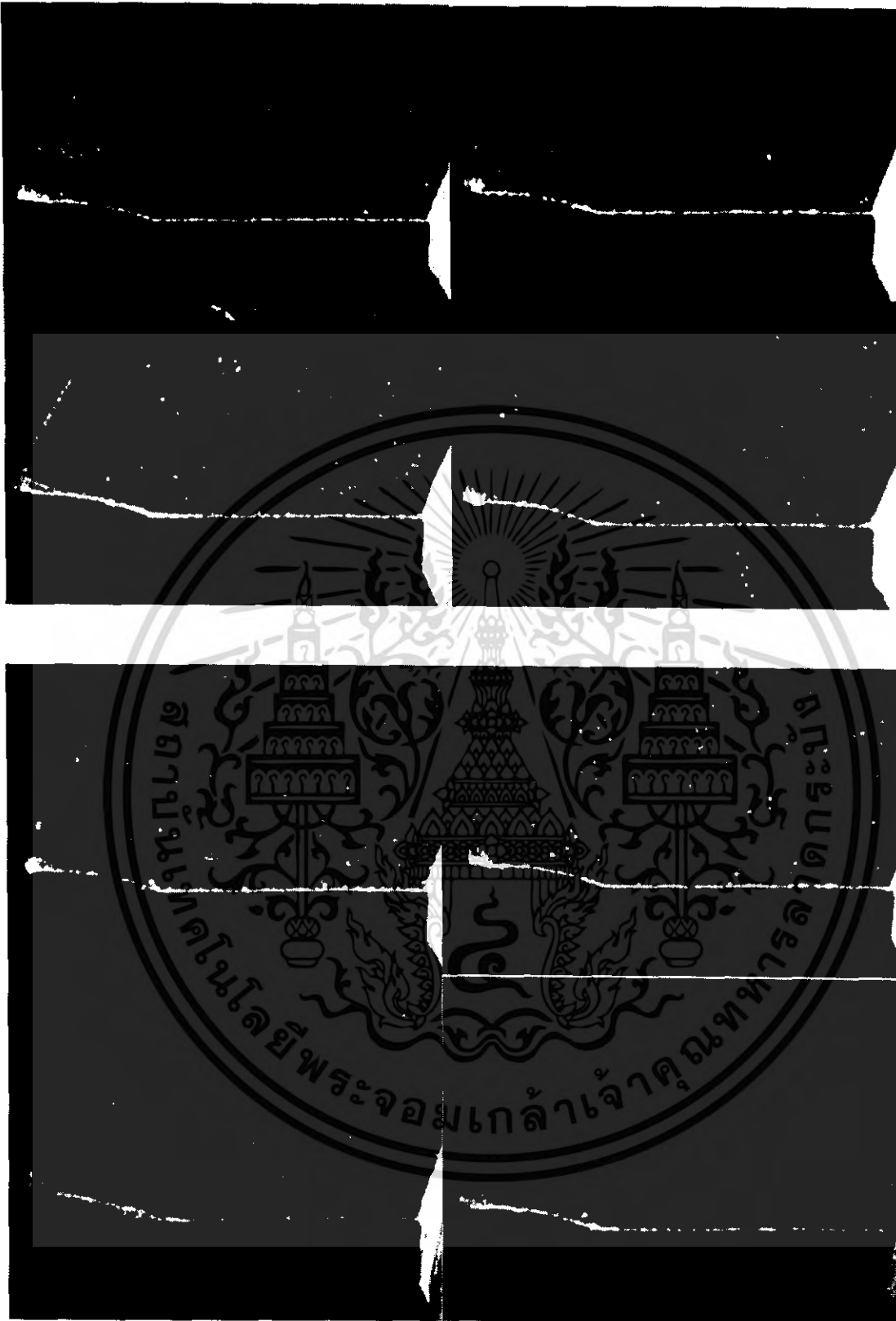
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 7 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



\* หมายถึง ระยะ X = 1000 ไมโครเมตร

รูปที่ ผก 5 แสดงการวัดค่าการสึกหรอของการทดลองย่อย ลำดับที่ 3 และ 4

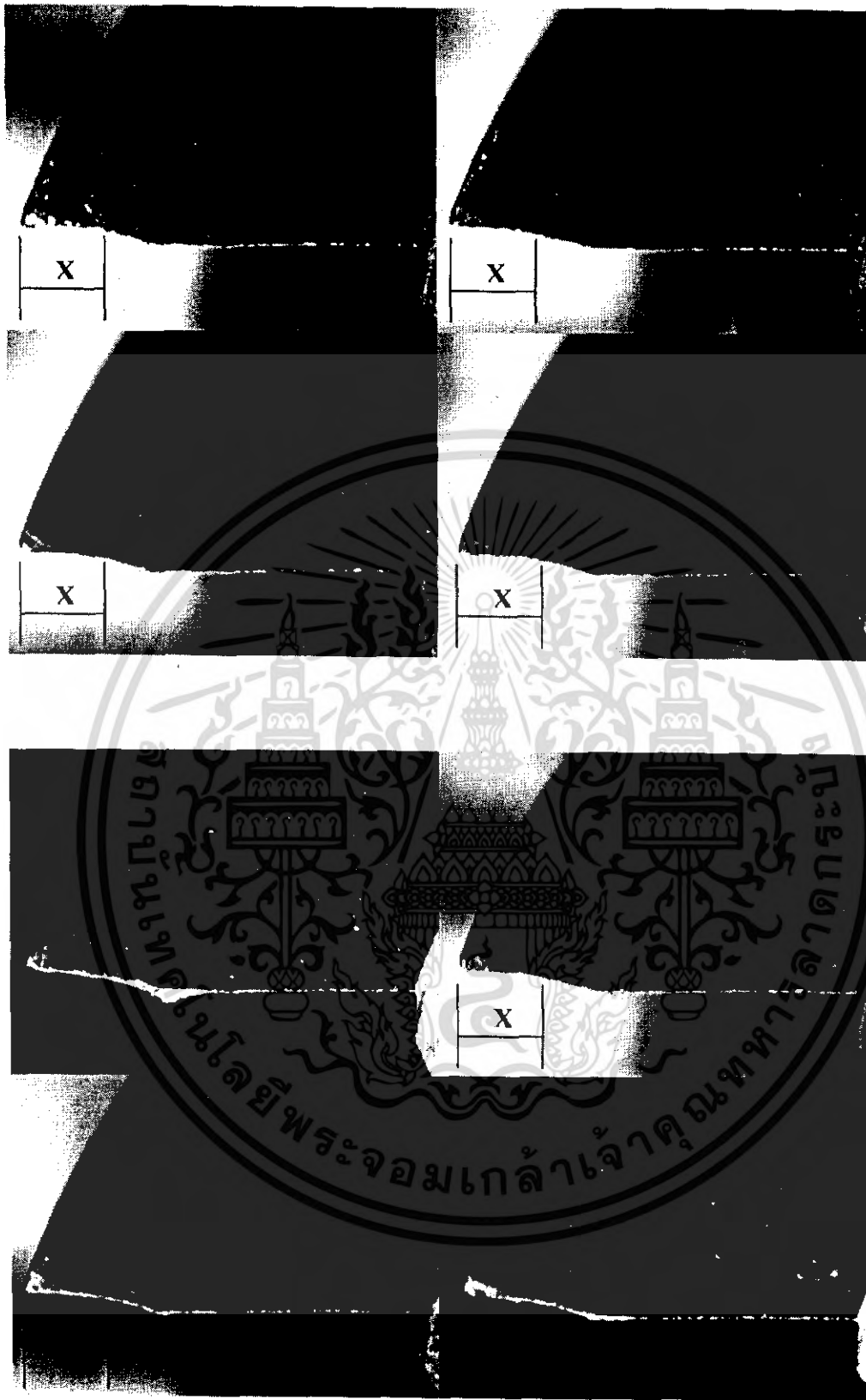
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา **ผก 8** และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



\* หมายถึง ระยะ  $X = 1000$  ไมโครเมตร

รูปที่ ผก 6 แสดงการวัดค่าการสีกหรือของการทดลองย่อย ลำดับที่ 5 และ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



\*หมายเหตุ ระยะ  $X = 1000$  ไมโครเมตร

รูปที่ ผก 7 แสดงการวัดค่าการเลี้ยวเบนของการทดลองย้อย ลำดับที่ 7 และ 8

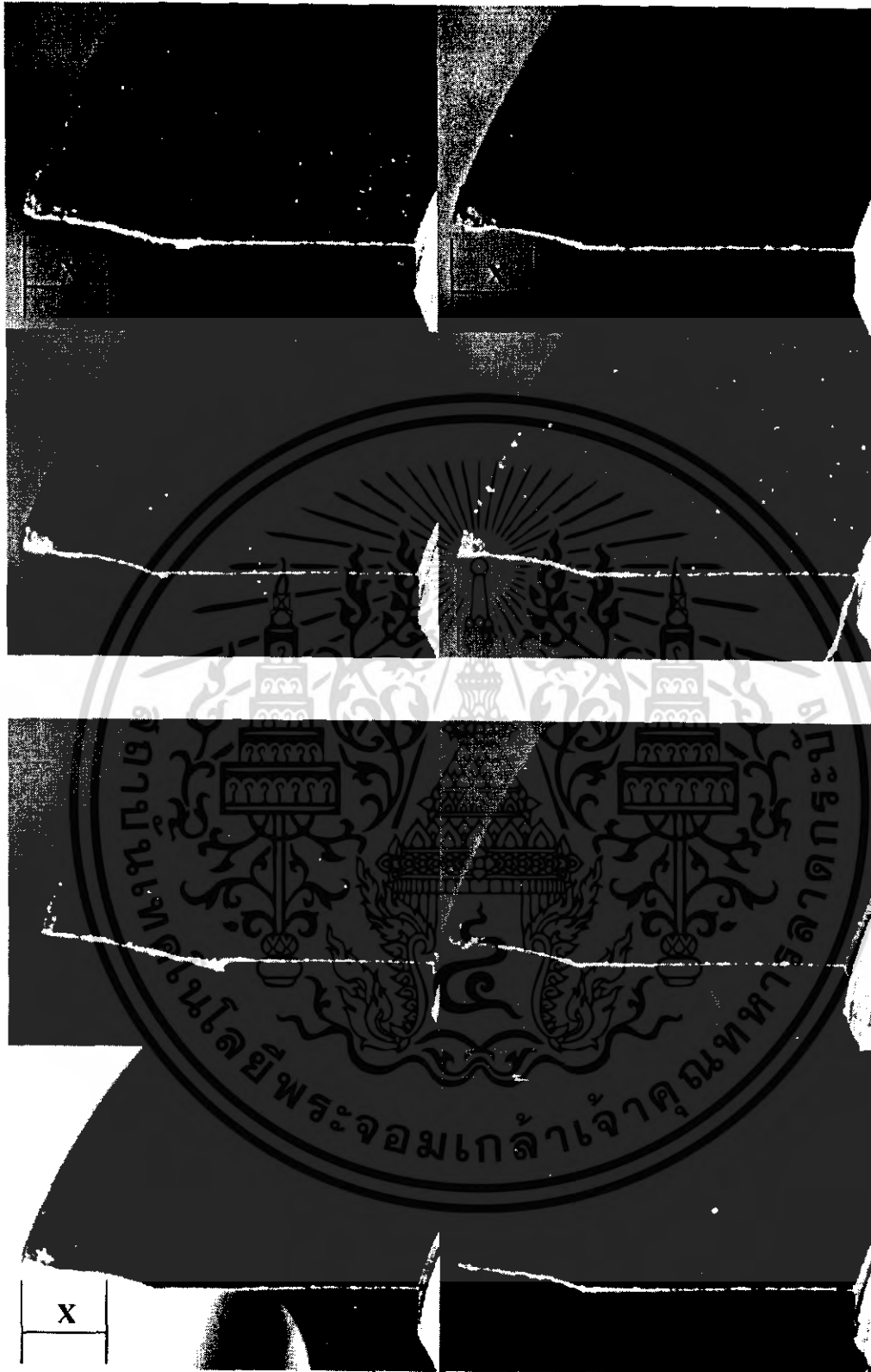
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



\* หมายเหตุ ระยะ X = 1000 ไมโครเมตร

รูปที่ ผก 8 แสดงการวัดค่าการสึกหรอของการทดลองย่อย ลำดับที่ 9 และ 10

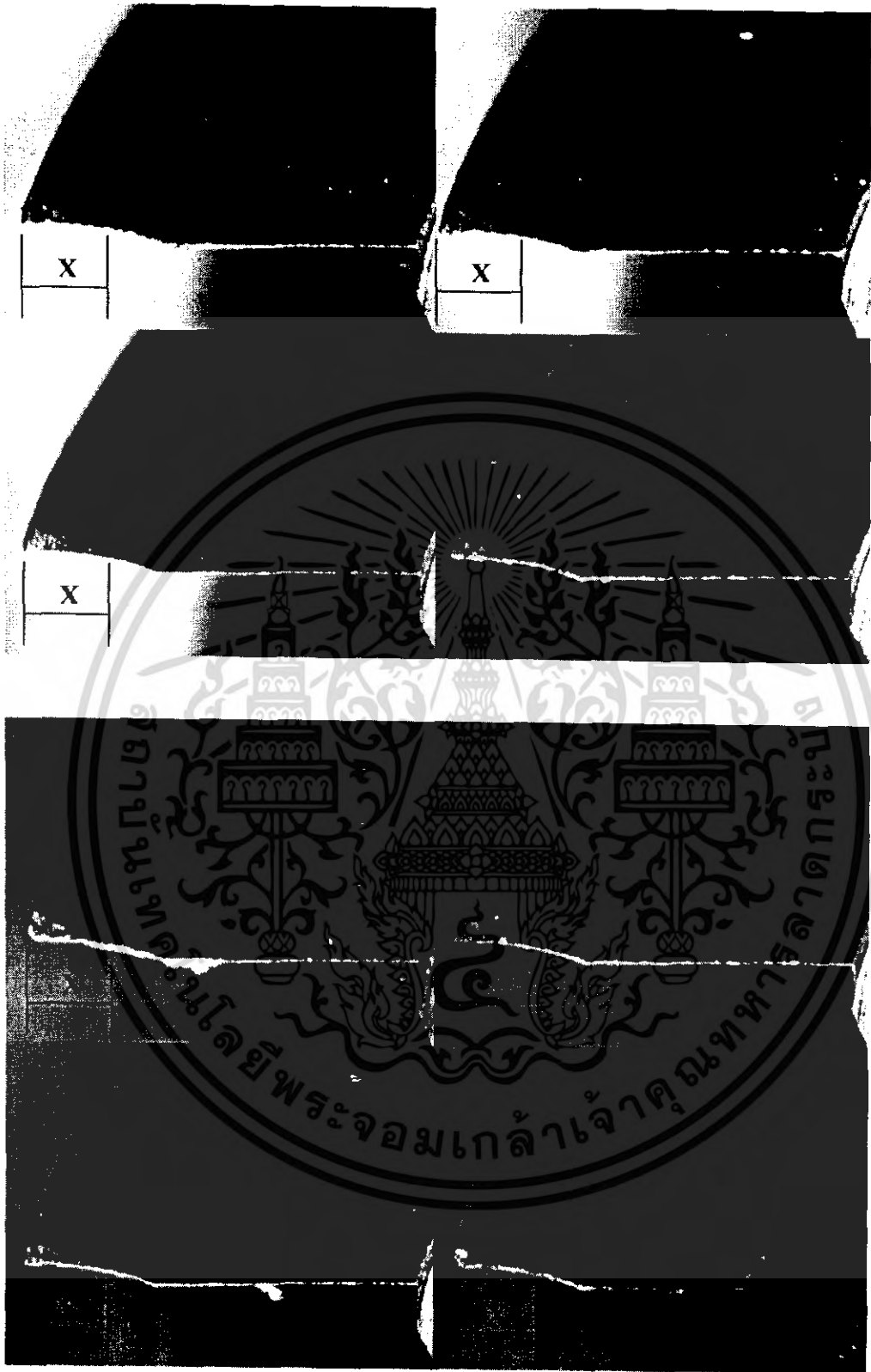
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลง **ผก 11** และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



\* หมายเหตุ ระยะ X = 1000 ไมโครเมตร

รูปที่ ผก 9 แสดงการวัดค่าการสึกหรอของการทดลองย่อย ลำดับที่ 11 และ 12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อ ผก 12 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



\*หมายเหตุ ระยะ X = 1000 ไมโครเมตร

รูปที่ ผก 10 แสดงการวัดค่าการสึกหรอของการทดลองย่อย ลำดับที่ 13 และ 14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงแก้ไข 13 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



\* หมายเหตุ ระยะ X = 1000 ไมโครเมตร

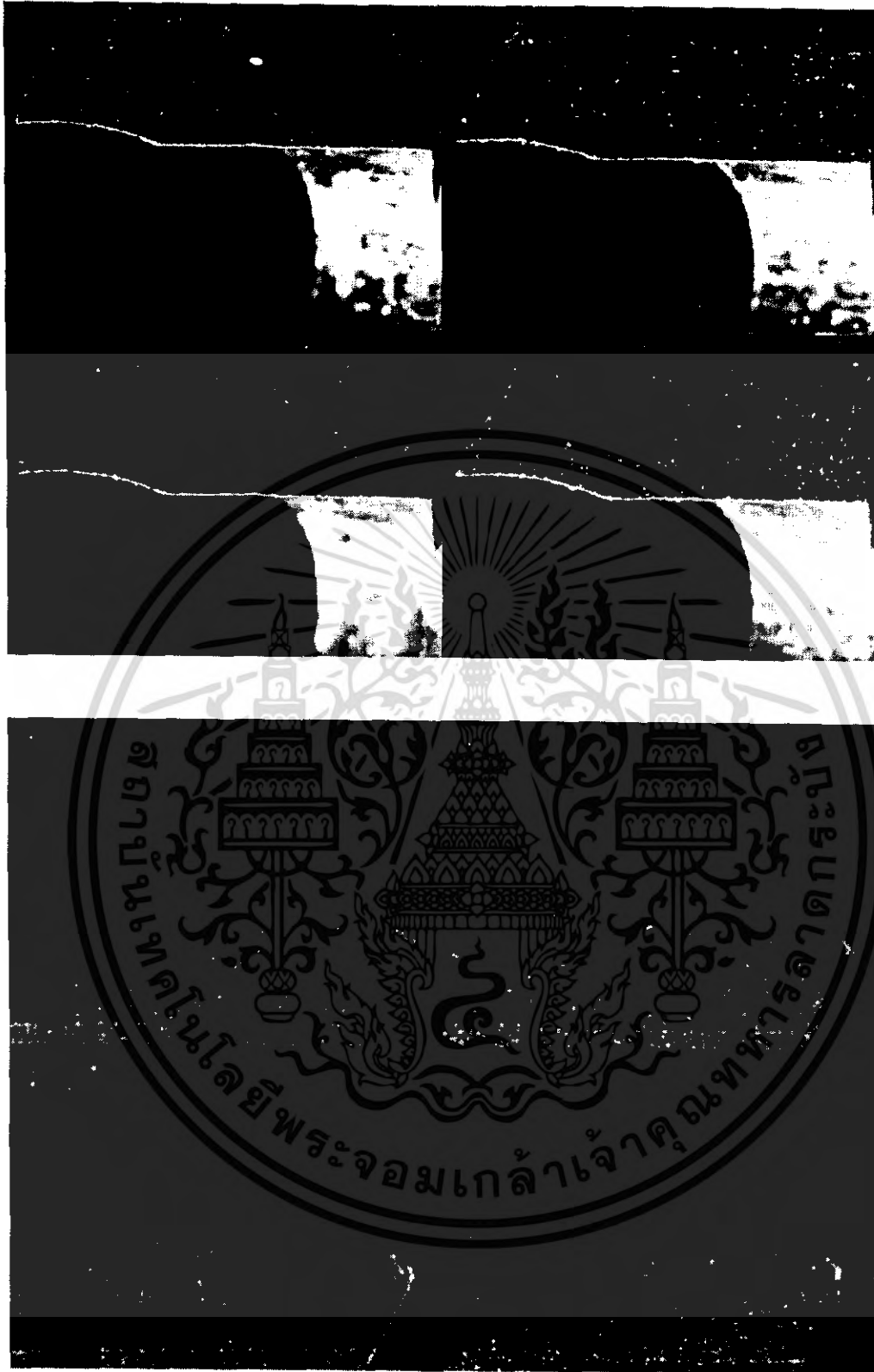
รูปที่ ผก 11 แสดงการวัดค่าการสึกหรอของการทดลองย่อย ลำดับที่ 15 และ 16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 14 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผก 3 ตารางการวัดค่าการสึกหรอของดอกกัดของการทดลองหลัก

ลำดับการวัดค่า การสึกหรอ	ค่าการสึกหรอของดอกกัด (ไมโครเมตร)				
	พื้นที่ 1	พื้นที่ 2	พื้นที่ 3	พื้นที่ 4	เฉลี่ย
1	473.676	706.755	509.278	458.647	537.089
2	501.270	714.281	533.834	473.684	555.767
3	501.270	744.356	541.353	503.759	572.684
4	503.751	879.694	551.432	533.828	617.176
5	526.307	924.807	563.909	546.316	640.334
6	533.826	1067.664	639.097	578.947	704.883
7	556.382	1187.965	654.06	593.985	748.098
8	571.420	1533.830	699.248	593.985	849.620
9	593.976	1601.499	706.767	593.985	874.056
10	654.062	1706.762	736.842	593.985	922.912
11	691.721	1714.762	736.842	601.504	936.207
12	706.758	1721.800	745.729	601.504	943.947
13	716.683	1777.288	754.060	616.541	966.143
14	729.315	1857.138	759.398	616.541	990.598
15	829.615	1882.488	759.398	616.541	1022.010
16	834.548	1891.317	759.398	616.541	1025.451
17	842.022	1912.561	764.706	616.541	1033.957
18	867.059	1917.288	766.917	624.060	1043.831
19	884.954	2015.033	774.436	631.579	1076.500
20	909.691	2038.877	857.142	646.617	1113.081
21	977.435	2062.521	1142.857	751.880	1233.673
22	999.991	2112.777	1203.007	759.399	1268.793
23	992.473	2166.432	1654.135	842.105	1413.786
24	1007.510	2210.521	1691.729	849.624	1439.846

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงแก้ไข และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



\* หมายเหตุ ระยะ X = 1000 ไมโครเมตร

รูปที่ ผก 12 แสดงการวัดค่าการสึกหรอของการทดลองหลัก ลำดับที่ 1 และ 2

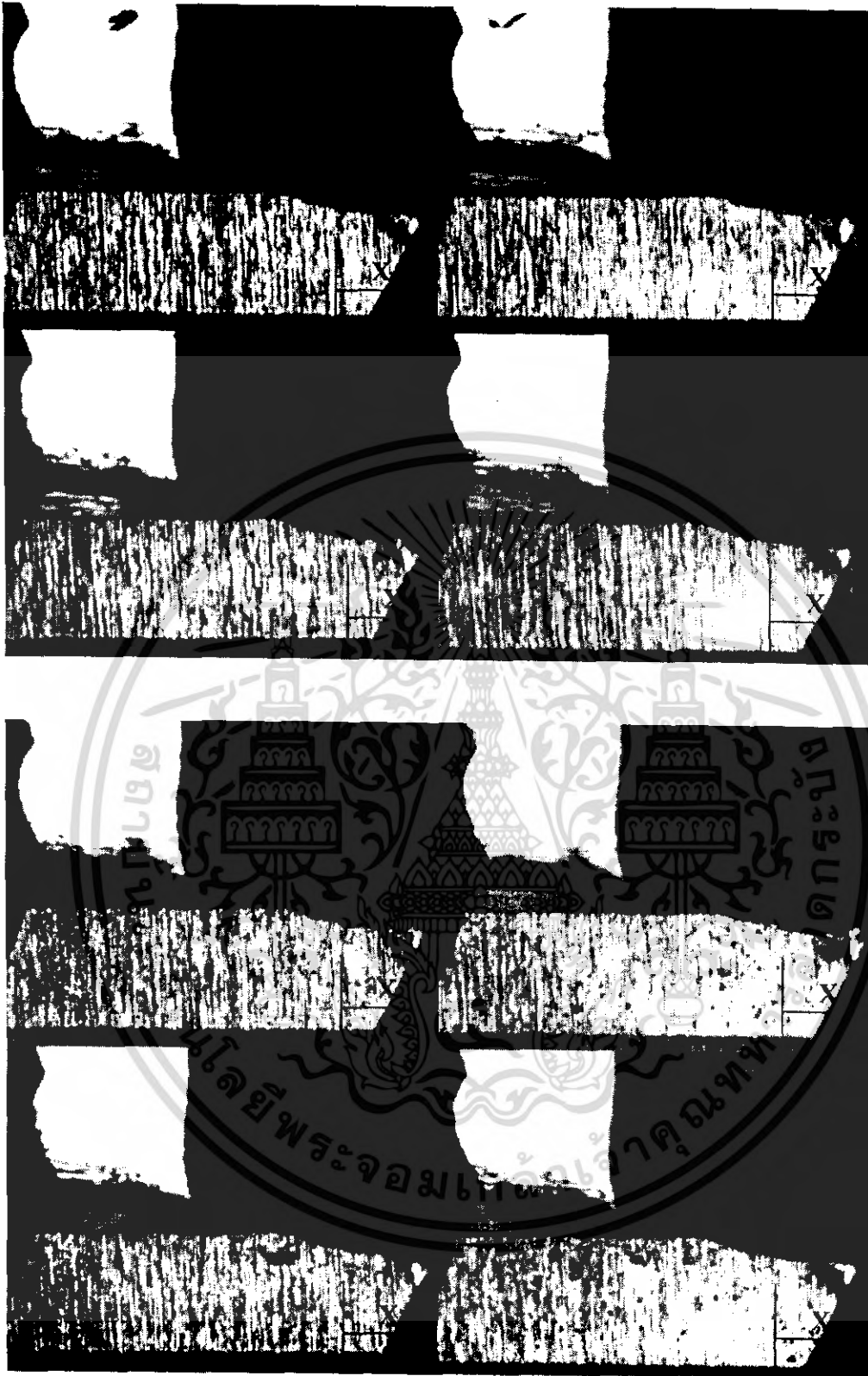
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา ผก 16 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



\* หมายถึง ระยะ X = 1000 ไมโครเมตร

รูปที่ ผก 13 แสดงการวัดค่าการสีกหรือของการทดลองหลัก ลำดับที่ 3 และ 4

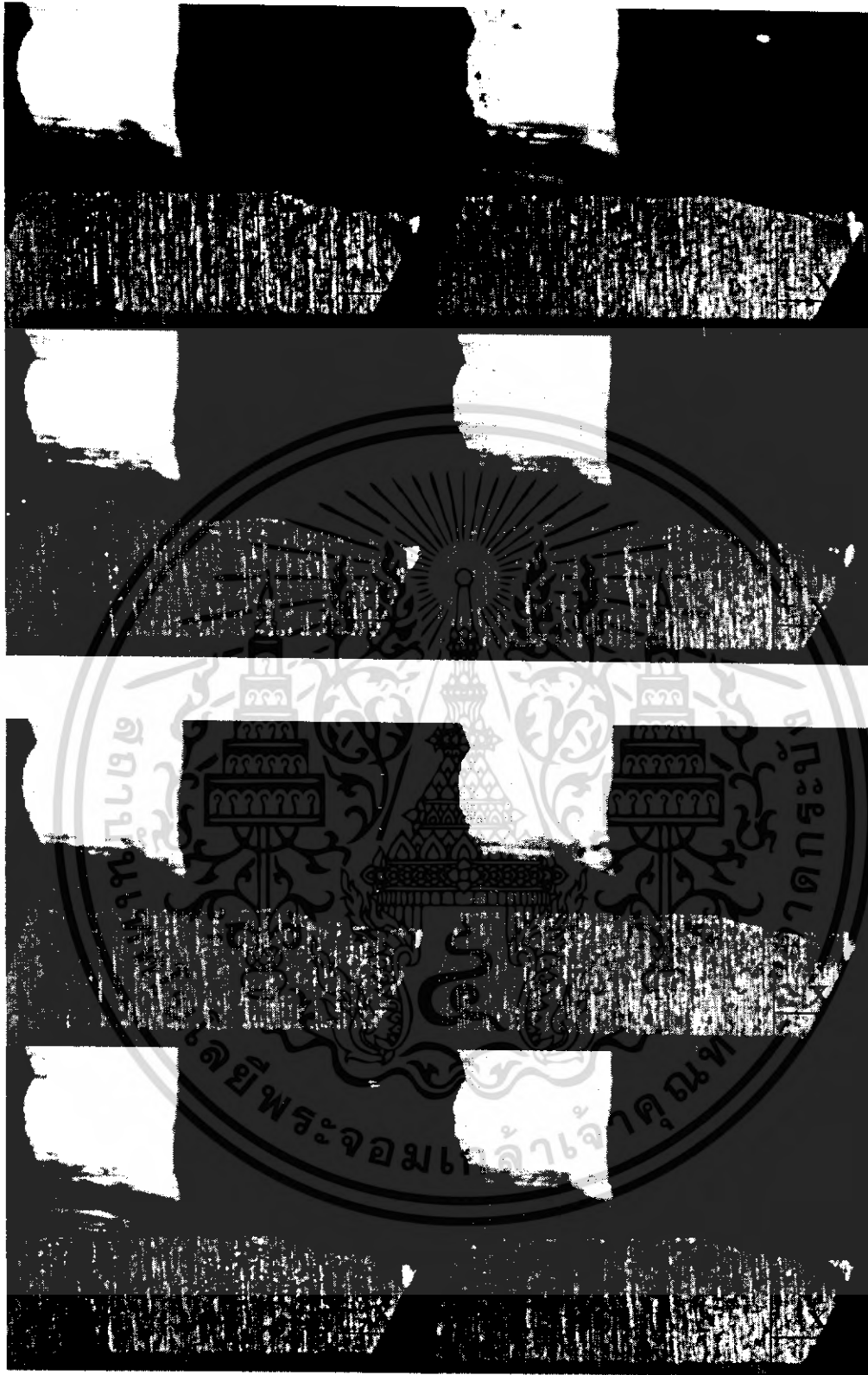
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงแก้ไข 17 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



\* หมายถึง ระยะ X = 1000 ไมโครเมตร

รูปที่ ผก 14 แสดงการวัดค่าการสึกหรอของการทดลองหลัก ลำดับที่ 5 และ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา<sup>ผก.18</sup> และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



\* หมายถึง ระยะ X = 1000 ไมโครเมตร

รูปที่ ผก 15 แสดงการวัดค่าการสึกหรอของการทดลองหลัก ลำดับที่ 7 และ 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



\* หมายถึง ระยะ X = 1000 ไมโครเมตร

รูปที่ ผก 16 แสดงการวัดค่าการสึกหรอของการทดลองหลัก ลำดับที่ 9 และ 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



\* หมายเหตุ ระยะ X = 1000 ไมโครเมตร

รูปที่ ผก 17 แสดงการวัดค่าการสึกหรอของการทดลองหัก ลำดับที่ 11 และ 12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



\*หมายเหตุ ระยะ X = 1000 ไมโครเมตร

รูปที่ ผก 18 แสดงการวัดค่าการสึกหรอของการทดลองหลัก ลำดับที่ 13 และ 14

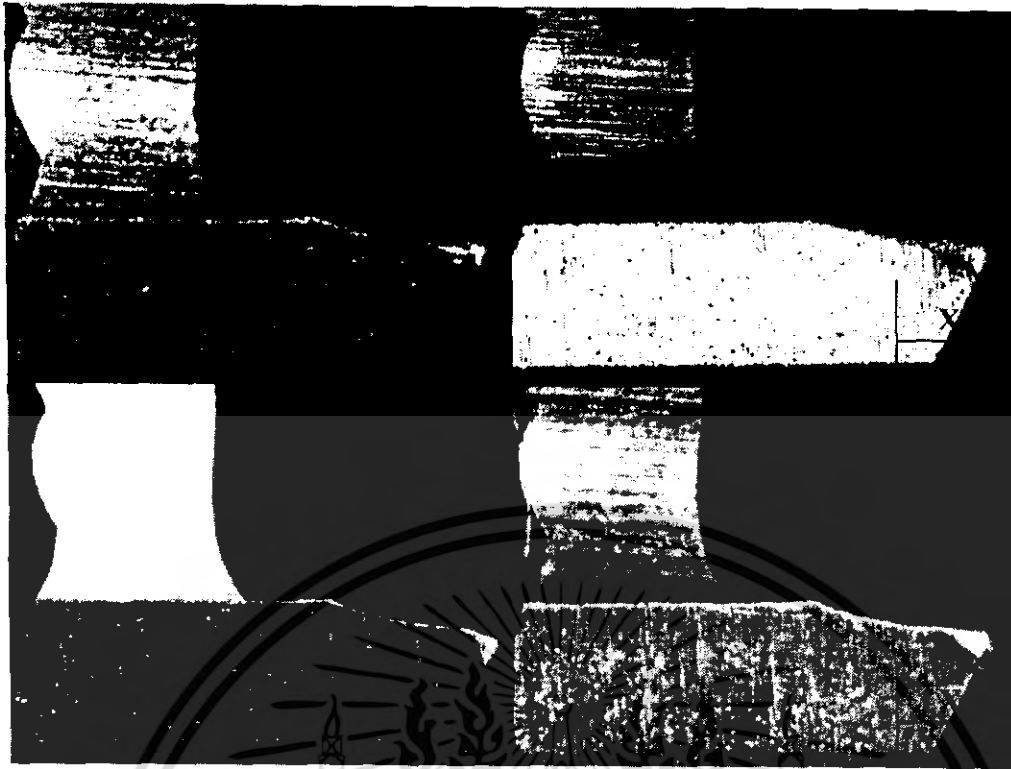
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา<sup>ผก.22</sup> และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



\* หมายเหตุ ระยะ X = 1000 ไมโครเมตร

รูปที่ ผก 19 แสดงการวัดค่าการสึกหรอของการทดลองหลัก ลำดับที่ 15 และ 16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลง ผก 23 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



\* หมายเหตุ ระยะ X = 1000 ไมโครเมตร

รูปที่ ผก 20 แสดงการวัดค่าการสึกหรอของการทดลองหลัก ลำดับที่ 17 และ 18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



\* หมายเหตุ ระยะ X = 1000 ไมโครเมตร

รูปที่ ผก 21 แสดงการวัดค่าการสึกหรอของการทดลองหลัก ลำดับที่ 19 และ 20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา <sup>ผก 25</sup> และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



\* หมายเหตุ ระยะ X = 1000 ไมโครเมตร

รูปที่ ผก 22 แสดงการวัดค่าการสึกหรอของการทดลองหลัก ลำดับที่ 21 และ 22

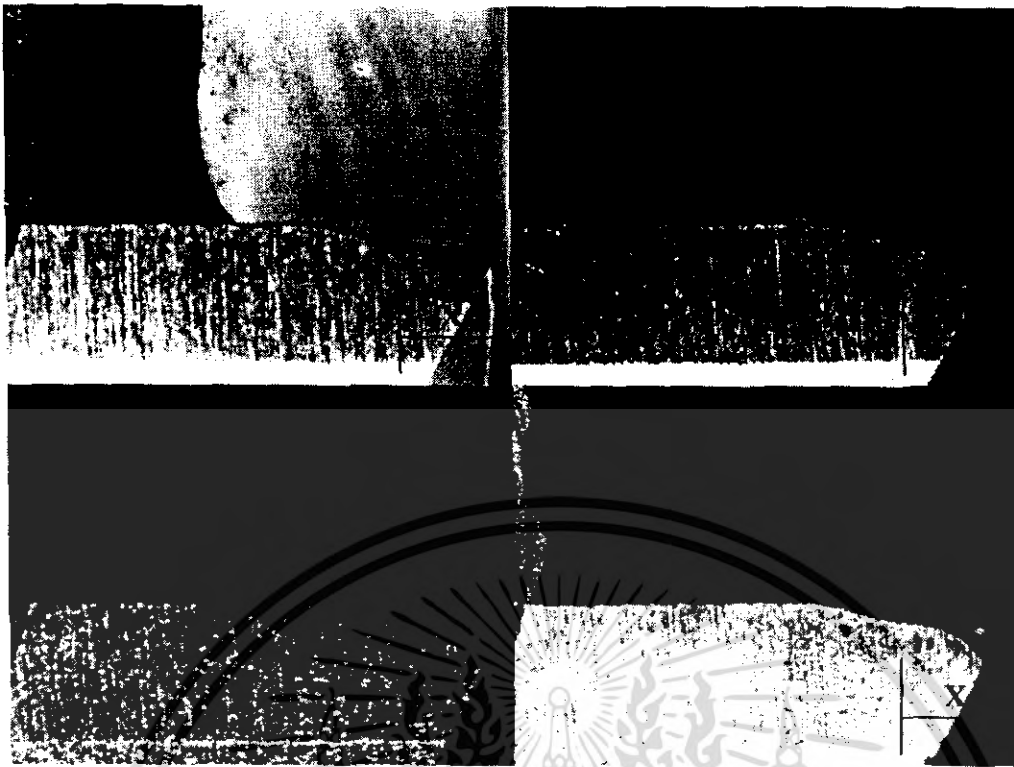
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา <sup>ผก 26</sup> และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



\* หมายเหตุ ระยะ X = 1000 ไมโครเมตร

รูปที่ ผก 23 แสดงการวัดค่าการสึกหรอของการทดลองหลัก ลำดับที่ 23 และ 24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อ ผก 27 ละต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



\*หมายเหตุ ระยะ X = 1000 ไมโครเมตร

รูปที่ ผก 24 แสดงการวัดค่าการสีกหรือของการทดลองหลัก ลำดับที่ 25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข  
ข้อมูลรายละเอียดดอกกักและเหล็กที่ใช้ในการทดลอง

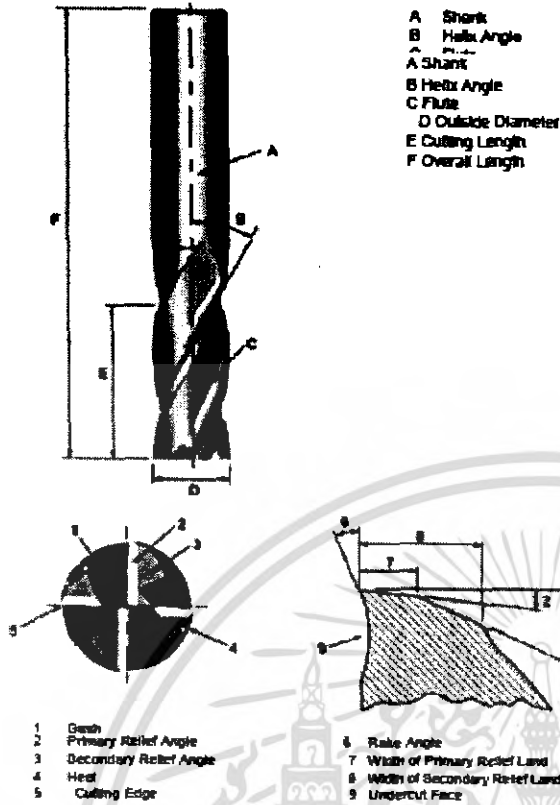
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผข 1 ข้อมูลรายละเอียดดอกกักเฮนมิถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาขข 2 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NOMENCLATURE



ลักษณะ ของเอนมิล – และคมตัดปลาย

คมตัดจนถึงจุดศูนย์กลาง	คมตัดไม่ถึงจุดศูนย์กลาง
	
สามารถเจาะที่อกก็เล็กมากๆได้เลย ใบกรมีทั้งที่มีคมเป็นเลขคู่ เช่น 2,4,6 คมจะมีคมตัด 2 คม บรรจบกันตรงศูนย์กลาง ใบกรมีที่เป็นเลขคี่ เช่น 3, 5 คม จะมีคมตัด 1 คม ที่ยาวจนถึงจุดศูนย์กลาง	ใช้สีชมพูรวมทั้งค้อนบนและ กัด ร่อง สามารถลับคม โดยการขึ้นศูนย์ 2 ชั้นได้

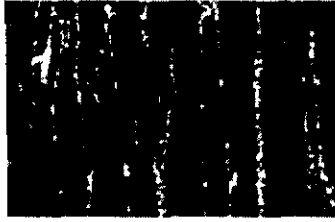
รูปที่ ผข 2 ข้อมูลรายละเอียดคอกกักเอนมิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา ผข.3 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

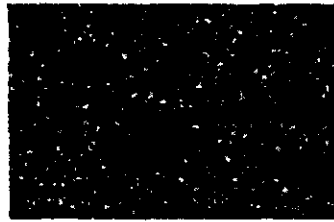
**โครงการประกวดนวัตกรรม**

หัวข้อ: นวัตกรรมพัฒนาคุณภาพงานผลิตโลหะ

นวัตกรรมที่คิดค้นขึ้น: นวัตกรรม HSCo-XP ผลิตจากส่วนผสมของ HSS และ HSS-E เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตัด (Toughness) และลดการสึกหรอของหัวตัดโลหะที่ผลิตโดยกรมโลหวิทยา



HSS



HSCo-XP

**คุณสมบัติทางเคมี DORMER ไร้ตะกั่ว**

	Grade	Hardness (HV10)	C %	W %	Mo %	Cr %	V %	Co %	ISO standard
HSS	M2	810-850	0,9	6,4	5,0	4,2	1,8	-	HSS
HSSV	M9V	830-870	1,25	3,5	8,5	4,2	2,7	-	HSS-E
HSCo	M35	830-870	0,93	6,4	5,0	4,2	1,8	4,8	HSS-E
	M42	870-960	1,08	1,5	9,4	3,9	1,2	8,0	HSS-E
HSS XBI	-	830-870	0,9	5,25	5,0	4,2	1,9	-	HSS-PM
HSCo XP	ASP 2017	860-900	0,8	3,0	3,0	4,0	1,0	8,0	HSS-E-PM
	ASP 2030	870-910	1,28	6,4	5,0	4,2	3,1	8,5	HSS-E-
	ASP 2052	870-910	1,8	10,5	2,0	4,8	5,0	8,0	HSS-E-PM

วัสดุที่นำมาใช้ต้องมีความแข็งแรงสูง (High Compression Strength) และมีความแข็งสูง (High Hardness) และทนต่อการสึกหรอได้ดีกว่าเหล็กกล้าคาร์บอน (Flexural Strength) และทนต่อการแตกหัก (Tough) วัสดุที่ใช้ในการทำสว่าน (Taps) สกัดรูในวัสดุ (Reamers) ตัดคมที่เร็ว (Milling Cutters) สกัดรู (Drills) และสว่านเกลียว (Thread Milling Cutters)

คุณสมบัติ	เหล็ก HSS	สแตนเลส	คาร์ไบด์ K10/30F 1/2 Solid Tools
ความแข็ง (HV30)	800-950	1300-1800	1600
ความถ่วงจำเพาะ (g/cm <sup>3</sup> )	8,0-9,0	7,2-15	14,45
ความแข็งแรงดึง (MPa)	3000-4000	3000-8000	6250
ความแข็งแรงดึง (MPa)	2500-4000	1000-4700	4300
ความทนความร้อน	550	1000	900
E-module (KN/mm <sup>2</sup> )	260-300	460-630	580
ขนาดของอนุภาค (µm)	-	0,2-10	0,8

คุณสมบัติของคาร์ไบด์ (WC) สัมพันธ์กับปริมาณคาร์บอนที่ใส่เข้าไปในคาร์ไบด์ที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน

คุณสมบัติ	คาร์ไบด์	คาร์ไบด์
ความแข็ง	ความแข็งคาร์ไบด์	ความแข็งคาร์ไบด์
ความแข็งแรงดึง (CS)	CS คาร์ไบด์	CS คาร์ไบด์
ความแข็งแรงดึง (BS)	BS คาร์ไบด์	BS คาร์ไบด์

รูปที่ ผข 3 ข้อมูลรายละเอียดคอกัดเคาน์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

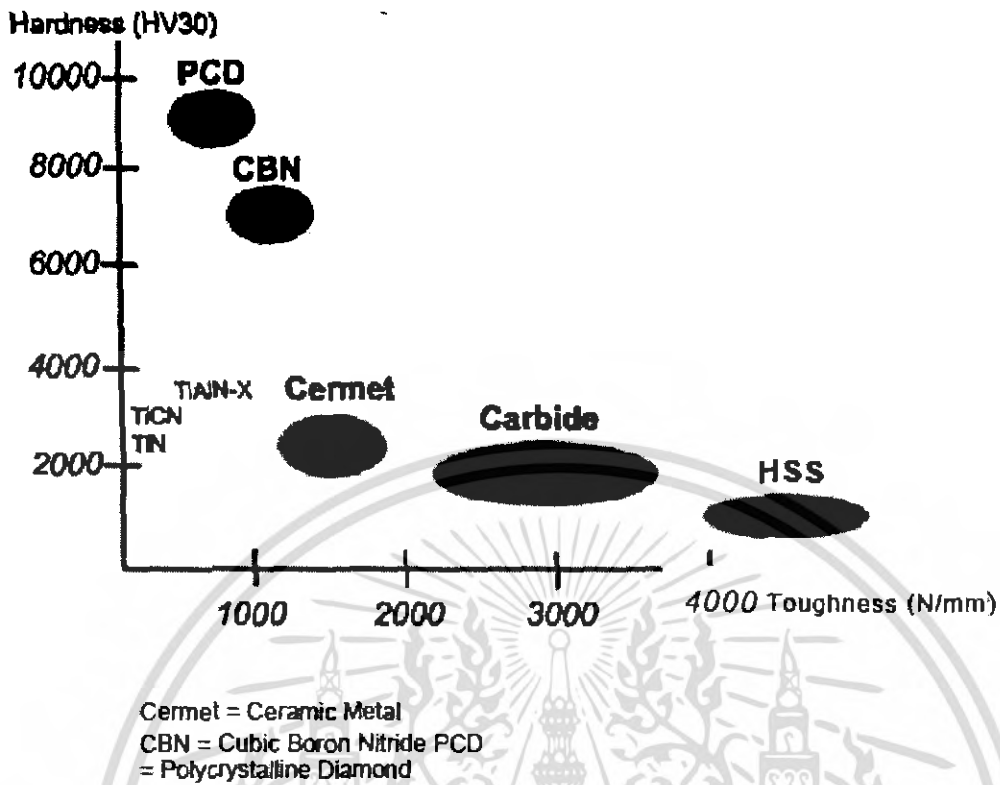
**DORMER****General Information****SURFACE TREATMENT / COATING PROPERTIES**

Surface Treatments	Colour	Coating material	Hardness (HV)	Thickness (µm)	Coating structure	Frict. coeff. against steel	Max. appl. temp. (°C)
<b>ST</b>	Dark grey	Fe 304	400	Max. 5	Conversion into the surface	-	550
<b>Br</b>	Bronze	Fe 304	400	Max. 5	Conversion into the surface	-	550
<b>N</b>	Grey	FeN	1300	20	Diffusion zone	-	550
<b>Cr</b>	Silver	Cr	1100	Max. 5	Mono-layer	-	550
<b>TiN</b>	Gold	TiN	2300	1-4	Mono-layer	0,4	600
<b>TiCN</b>	Blue grey	TiCN	3000	1-4	Multi-layer gradient	0,4	500
<b>TiAlN</b>	Black grey	TiAlN	3300	3	Nano structured	0,3-0,35	900
<b>TiAlN X</b>	Violet grey	TiAlN	3500	1-3	Mono-layer	0,4	900
<b>CrN</b>	Silver grey	CrN	1750	3-4	Mono-layer	0,5	700
<b>Super R</b>	Copper	Ti, C, N	2900	3,5-3,7	Multi-layer	0,3-0,4	475
<b>Super G</b>	Blue grey	AlCrN	3200		Mono-layer	0,35	1100
<b>Super E</b>	Black	TiAlN+WC/C	3000	2-6	Multi-layer lamellar	0,2	800
<b>ZrN</b>	Gold yellow	ZrN	2800	2-3	Mono-layer	0,2	600
<b>Dialab</b>	Black	a-C:H	6000	1,5-2	Mono-layer	0,1-0,2	600
<b>Diamond</b>	Light grey	Polycrystalline diamond	8000	6, 12, 20	Mono-layer	0,15-0,20	700

รูปที่ ผข 4 ข้อมูลรายละเอียดคอกัดเค้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อ ผข 5 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและความเหนียวแน่นของวัสดุกันเครื่องมือตัด



**C291**

Fraises de finition

C29116.0

recommandation

C29716.0	HSCo TiCN	Fraises de finition	16	92	32	16	4	0.00
C25016.0	HSCo Brillant	Fraises de finition	16	92	32	16	4	0.00
C29216.0	HSS-XS-1 Bronze	Fraises de finition	16	108.5	58.5	16.0	4	0.00
C29116.0	HSS-XS-1 Bronze	Fraises de finition	16	77.0	26.5	16.0	4	0.00

รูปที่ พช 5 ข้อมูลรายละเอียดดอกกัดเอ็นมิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา พช 6 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แหล่งที่มาของเหล็กกล้าเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

เหล็ก DC-53 ซึ่งเป็นมาตรฐานจากประเทศญี่ปุ่น และเรียกตามมาตรฐานของบริษัท กรุงเทพเหล็กกล้า ซึ่งมีส่วนผสมต่างๆ คือ C (1.5 %), Si (0.25 %), Mo (0.3 %), Cr (12 %), V (1.0 %) เหล็ก DC-53 เป็นเหล็กขึ้นรูปเย็น มักใช้ในวงการอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ และเป็นที่ยอมรับมากในปัจจุบัน บริษัทที่ซื้อเหล็กคือ บริษัทซีดีพาร์คสตีล อิมพอร์ต (2002) จำกัด อ.บางบ่อ จ.สมุทรปราการ โทร. 02-3131313



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้