

การศึกษาลักษณะของการตัดของเหล็กกล้าเครื่องมือ AUD 11

โดยวิธี EDM แบบแท่งอิเล็กทรอนิกส์



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....  
วัน, เดือน, ปี.....

b. 11960486  
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**A STUDY ON MACHINING CHARACTERISTICS  
OF AUD 11 TOOL STEEL MACHINED  
BY ROTARY EDM**



**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 2007**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองปริญญาโท

หัวข้อปริญญาโท

การศึกษาลักษณะของการตัดของเหล็กกล้าเครื่องมือ  
AUD 11 โดยวิธี EDM แบบแท่งอิเล็กโทรดหมุน  
A STUDY ON MACHINING CHARACTERISTICS  
OF AUD 11 TOOL STEEL MACHINED BY  
ROTARY EDM

นักศึกษา

นายนิรุช ประถมพันธ์	รหัสประจำตัว	48015669
นายบัญญัติ เจริญพจน์	รหัสประจำตัว	48015671
นางสาวศิริพร บุญมี	รหัสประจำตัว	48015681
นายสกลย กองคำ	รหัสประจำตัว	48015683

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาโท

(ผศ. ดร. กรรณชัย กัลยาศิริ)

(ดร. อนิรุท ไชยจารุณิข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์

การศึกษาลักษณะของการตัดของเหล็กกล้าเครื่องมือ  
AUD 11 โดยวิธี EDM แบบแท่งอิเล็กโทรดหมุน

นักศึกษา

นายนิรุช ประถมพันธ์

นายบัญญัติ เจริญพจน์

นางสาวศิริพร บุญมี

นายสกาย กองคำ

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา

2550

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์

ผศ. ดร. กรรณชัย กัลยาศิริ

ดร. อนิรุท ไชยจารุวิช

### บทคัดย่อ

โครงการปริญญานิพนธ์นี้จัดทำขึ้นเพื่อเป็นการศึกษาเกี่ยวกับการกัดเจาะด้วยไฟฟ้า โดยในการทดลองครั้งนี้ พิจารณาตัวแปรด้วยกัน 3 ตัว ได้แก่ ช่วงระยะเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า (Electric Discharge Time: ON) ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ก (Electric Discharge Peak Current: IP) และช่วงความเร็วรอบของการหมุนของอิเล็กโทรด (Rotational Speed: S) ซึ่งตัวแปรเหล่านี้มีอิทธิพลต่ออัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (Material Removal Rate: MRR) อัตราการสึกหรอของแท่งอิเล็กโทรด (Electrode Wear Rate: EWR) ระยะเวลาตัดเกิน (Overcut) และค่าความหยาบผิว (Surface Roughness) ซึ่งในการทดลองใช้ทองแดงเป็นอิเล็กโทรด และเหล็กกล้าเครื่องมือ AUD 11 เป็นชิ้นงานในการทดสอบ

ในการทดลองนี้ได้ออกแบบการทดลองโดยใช้หลักการพื้นผิวผลตอบ (Respond Surface) และได้กำหนดช่วงของตัวแปรที่ทดลองไว้ 3 ระดับ คือ ช่วงระยะเวลาการปล่อยกระแสไฟฟ้าที่ระดับ 250, 300 และ 350  $\mu\text{sec}$  ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ก ที่ระดับ 20, 40 และ 60 A และช่วงความเร็วรอบที่ระดับ 5, 10 และ 15 RPM จากการวิเคราะห์ทางสถิติ สรุปได้ว่าค่าช่วงระยะเวลาการปล่อยกระแสไฟฟ้าค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ก และช่วงความเร็วรอบ มีผลต่ออัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน อัตราการสึกหรอของแท่งอิเล็กโทรด และค่าความหยาบผิว แต่ไม่มีผลต่อ ระยะเวลาตัดเกินของชิ้นงานที่ระดับนัยสำคัญที่  $\alpha = 0.1$  หรือความเชื่อมั่น 90%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และคู่อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	A Study on Machining Characteristics of AUD 11 Tool Steel Machined By Rotary EDM
<b>Student</b>	Mr. Niruch Pratompun Mr. Bandasak Jaroundpod Miss Siriporn Boonmee Mr. Sky Kongksam
<b>Degree</b>	Bachelor of Engineering in Industrial Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
<b>Academic Year</b>	2007
<b>Thesis Advisor</b>	Asst. Prof. Dr. Kannachai Kanlayasiri Dr. Anirut Chaijaruwanch

### ABSTRACT

The aim of this project was to study electrical discharge process. The experiment considered 3 machining variables as following: electric discharge time: ON, electric discharge peak current: IP and rotational speed: S. These variables affected material removal rate: MRR, electrode wear rate: EWR, overcut and surface roughness. Copper was used as an electrode and AUD11 tool steel was used as a workpiece in the experiment.

The experiment was designed using the response surface principle, and three levels of variables were used as following 250, 300, and 350  $\mu$ sec for electric discharge time, 20, 40 and 60 A for electric discharge peak current and 5, 10 and 15 RPM for rotational speed. From statistical analysis, it can be concluded that electric discharge time, electric discharge peak current and rotational speed had effects on material removal rate (MRR), electrode wear rate (EWR) and surface roughness, but they did not affect overcut of the workpieces at the significance level  $\alpha = 0.1$  or confidence level 90%.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การศึกษาลักษณะของการตัดของเหล็กกล้าเครื่องมือ AUD 11 โดยวิธี EDM แบบแห้ง อิเล็กโทรดหมุน สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเพราะว่าได้รับคำแนะนำและการสนับสนุนของอาจารย์ทุกท่านเป็นอย่างดี เสมอมาจนโครงการนี้สำเร็จสมบูรณ์ไปได้ด้วยดี กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ

ผศ. ดร. กรรณชัย กัลยาศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับการให้โอกาสในการศึกษาปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ รวมทั้งมอบความรู้ คำแนะนำ ความช่วยเหลือทุก ๆ ด้าน รวมถึงความเอาใจใส่ในการทำปริญญานิพนธ์เป็นอย่างดีและทุก ๆ สิ่งที่อาจารย์มอบให้แก่กลุ่มผู้วิจัยตลอดระยะเวลาที่ผ่านมาในการทำโครงการ

ดร. อนิรุท ไชยจรรวนิช อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงสำหรับการให้คำปรึกษาและคำแนะนำต่าง ๆ ในการหาข้อมูล และสืบเสาะเวลามาให้ความรู้

อาจารย์ กิตติวัฒน์ สิริเกษมสุข กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับความรู้ คำแนะนำ และความช่วยเหลือทุก ๆ ด้านในการจัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

ขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง รวมทั้งอาจารย์ทุก ๆ ท่าน

ขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องชั่งน้ำหนัก

ขอบพระคุณ บริษัทยันมาร์ เอส.พี. (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องวัดความหยาบผิวยี่ห้อ TOKYO SIEMITSU รุ่น SURFCOM 480A

ขอบคุณเพื่อนทุกคนสำหรับความช่วยเหลือจนทำให้ปริญญานิพนธ์สำเร็จลุล่วง และคอยเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณหนังสือทุกเล่มที่ใช้ในการศึกษาข้อมูลในการค้นคว้าทำปริญญานิพนธ์และแหล่งความรู้ทุกแหล่งข้อมูลอันทรงคุณค่าสำหรับทำโครงการนี้

นายนิรุช ประถมพันธ์  
นายบัญญัติศักดิ์ เจริญพงษ์  
นางสาวศิริพร บุญมี  
นายศกาย กองคำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ณ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของการสปาร์ก.....	4
2.1.1 สภาพที่กระแสเริ่มไหล (Dark Current).....	5
2.1.2 การสปาร์กแบบโคโรนา (Corona Discharge).....	5
2.1.3 การสปาร์กแบบโกลว์ (Glow Discharge).....	5
2.1.4 การสปาร์กแบบอาร์ค (Arc Discharge).....	5
2.2 หลักการของกรรมวิธีขึ้นรูปด้วยเครื่องอีดีเอ็ม6	
2.2.1 ใส่แรงดันไฟฟ้า.....	7
2.2.2 การสูญเสียความเป็นฉนวน.....	7
2.2.3 สปาร์กหลอมละลาย.....	7
2.2.4 เย็นตัว.....	7
2.2.5 กลับคืนสู่ความเป็นฉนวน.....	7
2.2.6 ประโยชน์ของกรรมวิธีอีดีเอ็ม.....	8
2.2.7 การแบ่งประเภทของกรรมวิธีอีดีเอ็ม (Categories of EDM).....	7
2.2.8 อุปกรณ์ของกรรมวิธีอีดีเอ็ม.....	7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3 ระบบไดอิเล็กตริก (Dielectric System) .....	9
2.3.1 หน้าที่ของสารไดอิเล็กตริก .....	9
2.3.2 ประเภทของสารไดอิเล็กตริก .....	10
2.3.3 คุณสมบัติของสารไดอิเล็กตริก .....	11
2.4 ระบบการไหลของไดอิเล็กตริก .....	11
2.4.1 ระบบการไหลของไดอิเล็กตริกในกรรมวิธีอีเอ็ม .....	12
2.4.2 ปัญหาแก๊ส (Gas Problem) .....	15
2.5 ระบบเซอร์โว (Servo System) .....	16
2.5.1 ระบบควบคุมการป้อนอิเล็กโทรดในกรรมวิธีอีเอ็ม .....	16
2.6 ความสำคัญของความหยาบผิว .....	17
2.6.1 ความหยาบผิว .....	17
2.6.2 การเกิดสภาพของผิว .....	17
2.6.3 ลักษณะการเขียนบนของผิวชิ้นงาน .....	18
2.6.4 รายละเอียดของเครื่องวัดค่าความหยาบผิว .....	20
2.6.5 ค่าที่เกี่ยวข้องกับความหยาบผิว .....	21
2.6.6 วิธีการแสดงค่าความหยาบผิว .....	22
2.7 หลักการออกแบบการทดลอง .....	24
2.7.1 ปัจจัยในการผลิต .....	25
2.7.2 วัตถุประสงค์ของการออกแบบการทดลอง .....	26
2.7.3 คำจำกัดความ .....	26
2.7.4 หลักในการออกแบบการทดลอง .....	26
2.7.5 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง .....	27
2.7.6 การใช้หลักทางสถิติในการทดลอง .....	28
2.7.7 การตั้งสมมติฐานในการตรวจสอบ .....	29
2.7.8 ชนิดของแผนการออกแบบการทดลอง .....	30
2.7.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวน .....	36
2.7.10 แบบจำลองการถดถอย .....	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 3</b> <b>อุปกรณ์และวิธีการทดลอง</b>	
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	44
3.1.1 อิเล็กโทรด.....	45
3.1.2 ชิ้นงานทดสอบ.....	45
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	46
3.2.1 เครื่องอิตีเอ็ม.....	46
3.2.2 เครื่องวัดความหยาบผิวของชิ้นงาน.....	47
3.2.3 เครื่องชั่งน้ำหนัก.....	47
3.2.4 เครื่องวัดระยะตัดกัน.....	48
3.3 หลักการออกแบบการทดลอง.....	48
3.3.1 นำความเข้าใจถึงปัญหา.....	48
3.3.2 เลือกพารามิเตอร์ ระดับ และขอบเขต.....	48
3.3.3 เลือกการออกแบบการทดลอง.....	49
3.3.4 แผนการทดลอง.....	49
3.3.5 วิธีการคำนวณในการออกแบบ CCD.....	50
3.3.6 โครงสร้างรูปแบบการทดลอง (Central Composite Design: CCD).....	52
3.4 ขั้นตอนการทดลอง.....	53
3.4.1 ขั้นตอนก่อนการทดลอง.....	54
3.4.2 ขั้นตอนระหว่างการทดลอง.....	57
3.4.3 ขั้นตอนหลังการทดลอง.....	57
<b>บทที่ 4</b> <b>ผลการทดลอง</b>	
4.1 ผลการทดลอง.....	61
4.2 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ.....	62
4.2.1 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR).....	63
4.2.2 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของ อัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR).....	72
4.2.3 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของ ค่าความหยาบผิว (Surface Roughness).....	81
4.3 การวิเคราะห์กราฟ.....	87
4.3.1 อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR).....	87
4.3.2 อัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR).....	89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง	
5.1 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	92
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	93
หนังสืออ้างอิง.....	94
ภาคผนวก ก.....	ผก
ภาคผนวก ข.....	ผข



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ลักษณะการเบี่ยงเบนของผิวชิ้นงาน.....	19
ตารางที่ 2.2 แสดงการคำนวณการวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	39
ตารางที่ 3.1 ระดับตัวแปรในการทดลอง.....	49
ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่สภาวะคงที่โดยกำหนดค่าคงที่ตลอดการทดลอง.....	49
ตารางที่ 3.3 Coded Variables.....	51
ตารางที่ 3.3 ลำดับการทดลอง.....	53
ตารางที่ 4.1 ผลการเก็บค่าน้ำหนักก่อน-หลังการทดลอง.....	61
ตารางที่ 4.2 ค่าอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน อัตราการสึกหรอของอิลีก ไทรอด และความหยาบผิว.....	62
ตารางที่ 4.3 ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ ANOVA รูปแบบ Linear model.....	63
ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าตอบสนองอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR).....	63
ตารางที่ 4.4 ตารางที่ 4.4 ผลค่าสัมประสิทธิ์ของ Linear model.....	63
ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ ANOVA รูปแบบ Linear + Squares model.....	65
ตารางที่ 4.6 ผลค่าสัมประสิทธิ์ของ Linear + Squares model.....	66
ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ ANOVA รูปแบบ Linear + Interaction model.....	66
ตารางที่ 4.8 ผลค่าสัมประสิทธิ์ของ Linear + Interaction model.....	67
ตารางที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์ ANOVA รูปแบบ Full + Quadratic.....	67
ตารางที่ 4.10 ผลค่าสัมประสิทธิ์ของ Full + Quadratic.....	68
ตารางที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าตอบสนองอัตราการสึกหรอของอิลีก ไทรอด (EWR).....	69
ตารางที่ 4.12 ผลค่าสัมประสิทธิ์ของ Full + Quadratic model adjust.....	69
ตารางที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าตอบสนองอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR).....	72
ตารางที่ 4.14 ผลค่าสัมประสิทธิ์ของ Linear model.....	73
ตารางที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าตอบสนองอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR).....	74
ตารางที่ 4.16 ผลค่าสัมประสิทธิ์ของ Linear + Squares model.....	75
ตารางที่ 4.17 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าตอบสนองอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR).....	76
ตารางที่ 4.18 ผลค่าสัมประสิทธิ์ของ Linear + Interaction.....	76
ตารางที่ 4.19 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าตอบสนองอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR).....	77
ตารางที่ 4.20 ผลค่าสัมประสิทธิ์ของ Full + Quadratic.....	77
ตารางที่ 4.21 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าตอบสนองอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR).....	78
ตารางที่ 4.22 ผลค่าสัมประสิทธิ์ของ Full + Quadratic model adjust.....	79
ตารางที่ 4.23 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าตอบสนองอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR).....	81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 4.24 ผลค่าสัมประสิทธิ์ของ Linear model .....	82
ตารางที่ 4.25 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าตอบสนองอัตราการค้าเนื้อชิ้นงาน (MRR) .....	83
ตารางที่ 4.26 ผลค่าสัมประสิทธิ์ของ Linear model .....	84



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 คุณสมบัติพิเศษแรงดันไฟฟ้า - กระแสไฟฟ้าของการสปาร์ก.....	4
รูปที่ 2.2 กระบวนการคิซชารจ์.....	5
รูปที่ 2.3 สภาพของลำดับการสปาร์กในแต่ละครั้ง.....	6
รูปที่ 2.4 รูปร่างคลื่นของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในการขึ้นรูปด้วยเครื่องอีดีเอ็ม.....	6
รูปที่ 2.5 หลักการทำงานของระบบอีดีเอ็ม.....	9
รูปที่ 2.6 การสะสมของอนุภาคโลหะในช่องว่างเมื่อไม่ใช้ระบบการไหลของไดอิเล็กตริก.....	11
รูปที่ 2.7 อนุภาคโลหะก่อตัวเป็นสะพานตัวนำไฟฟ้า.....	12
รูปที่ 2.8 การไหลของไดอิเล็กตริกแบบจุด.....	12
รูปที่ 2.9 ไดอิเล็กตริกไหลผ่านรูพจนกรวไฟท์ออกมาที่บริเวณช่องว่าง.....	13
รูปที่ 2.10 การไหลของไดอิเล็กตริกแบบจุด.....	13
รูปที่ 2.11 การไหลของไดอิเล็กตริกทางด้านข้าง.....	14
รูปที่ 2.12 การไหลของไดอิเล็กตริกโดยอาศัยการขึ้น-ลงของอิเล็กโทรด.....	15
รูปที่ 2.13 การไหลแบบจุดพร้อมกับเลือนอิเล็กโทรดขึ้น.....	15
รูปที่ 2.14 การเจาะรูอิเล็กโทรดเพื่อระบายแก๊สที่เกิดขึ้น.....	16
รูปที่ 2.15 ช่วงของการเบี่ยงเบนผิวชิ้นงาน.....	18
รูปที่ 2.16 ลักษณะความแตกต่างระหว่างหัวลาก (รูปด้านขวา) กับหัวสัมผัส (รูปด้านซ้าย).....	20
รูปที่ 2.17 จำแนกลักษณะการเบี่ยงเบนผิวชิ้นงาน.....	20
รูปที่ 2.18 รูปหน้าตัดที่เป็นผลและรูปหน้าตัดคัดแปลงของความหยาบ.....	22
รูปที่ 2.19 ค่าพารามิเตอร์ค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยทางคณิตศาสตร์ของพื้นที่หน้าตัดของค่าความหยาบผิว.....	23
รูปที่ 2.20 ค่าสูงที่สุดของส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงและมีค่าความสูง ของส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลง 10 จุดของค่าความหยาบผิว.....	23
รูปที่ 2.21 รูปแบบของกระบวนการหรือระบบ.....	24
รูปที่ 2.22 อิทธิพลที่ไม่มีผลและอิทธิพลที่มีผลของปัจจัยต่อผลิตภัณฑ์.....	25
รูปที่ 2.23 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่ไม่มีอันตรกิริยาระหว่างกัน.....	31
รูปที่ 2.24 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่มีอันตรกิริยาระหว่างกัน.....	31
รูปที่ 2.25 การออกแบบส่วนประสมกลาง สำหรับ $k = 2$ และ $k = 3$ .....	32
รูปที่ 2.26 เส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบที่มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานคงที่ ที่ถูกทำนายสำหรับ CCD ที่สามารถหมุนได้.....	34
รูปที่ 3.1 อิเล็กโทรด.....	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
ณ

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.2 ซินทอดสอบเหล็กกล้า AUD11.....	45
รูปที่ 3.3 เครื่องอีดีเอ็ม .....	46
รูปที่ 3.4 เครื่องวัดความหยาบผิว.....	47
รูปที่ 3.5 เครื่องชั่งน้ำหนัก.....	47
รูปที่ 3.6 เครื่องวัดระยะตัดเกิน.....	47
รูปที่ 3.7 โครงสร้างรูปแบบการทดลอง (Central Composite Design: CCD).....	52
รูปที่ 3.8 การขึ้นรูปชิ้นงานโดยการไส.....	54
รูปที่ 3.9 การขึ้นรูปชิ้นงานโดยการเจียรระโน.....	54
รูปที่ 3.10 การขึ้นรูปชิ้นงานโดยการกัด.....	55
รูปที่ 3.11 การขึ้นรูปอิเล็กทรอนิกส์โทรดโดยการตัด.....	55
รูปที่ 3.12 หัวจับแท่งอิเล็กทรอนิกส์โทรดแบบเดิม.....	56
รูปที่ 3.13 หัวจับแท่งอิเล็กทรอนิกส์โทรดแบบใหม่.....	56
รูปที่ 3.14 ลักษณะการจับยึดชิ้นงานและอิเล็กทรอนิกส์ โทรด.....	57
รูปที่ 3.15 ลักษณะการติดตั้งชิ้นงานเข้ากับเครื่องวัดความหยาบผิว.....	58
รูปที่ 3.16 ลักษณะการวัดค่าระยะตัดเกิน.....	58
รูปที่ 4.17 การแจกแจงแบบปกติสำหรับค่าส่วนตกค้างของอัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์ โทรด (EWR).....	64
รูปที่ 4.2 ค่าส่วนตกค้างกับค่าอัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์ โทรด (EWR).....	65
รูปที่ 4.3 การแจกแจงแบบปกติสำหรับค่าส่วนตกค้างของอัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์ โทรด (EWR).....	71
รูปที่ 4.4 ค่าส่วนตกค้างของอัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์ โทรดกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล.....	71
รูปที่ 4.5 ค่าส่วนตกค้างกับค่าอัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์ โทรด (EWR).....	72
รูปที่ 4.6 การแจกแจงแบบปกติสำหรับค่าส่วนตกค้างของอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR).....	73
รูปที่ 4.7 ค่าส่วนตกค้างกับค่าอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR).....	74
รูปที่ 4.8 การแจกแจงแบบปกติสำหรับค่าส่วนตกค้างของอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR).....	80
รูปที่ 4.9 ค่าส่วนตกค้างของอัตราการตัดเนื้อชิ้นงานกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล.....	80
รูปที่ 4.10 ค่าส่วนตกค้างกับค่าอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR).....	81
รูปที่ 4.11 การแจกแจงแบบปกติสำหรับค่าส่วนตกค้างของความหยาบผิว (Surface Roughness).....	82
รูปที่ 4.12 ค่าส่วนตกค้างกับค่าความหยาบผิว.....	83
รูปที่ 4.13 การแจกแจงแบบปกติสำหรับค่าส่วนตกค้างของความหยาบผิว (Surface Roughness).....	85
รูปที่ 4.14 ค่าส่วนตกค้างความหยาบผิว (Surface Roughness).....	86
รูปที่ 4.15 ค่าส่วนตกค้างกับความหยาบผิว (Surface Roughness).....	86
รูปที่ 4.16 กราฟ Contour / surface Plots ของ EWR ที่ระดับ S = 5 RPM แบบ Uncoded.....	87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.17 กราฟ Contour / surface Plots ของ EWR ที่ระดับ S = 10 RPM แบบ Uncoded.....	88
รูปที่ 4.18 กราฟ Contour / surface Plots ของ EWR ที่ระดับ S = 15 RPM แบบ Uncoded.....	88
รูปที่ 4.19 กราฟ Contour / surface Plots ของ MRR ที่ระดับ S = 5 RPM แบบ Uncoded.....	89
รูปที่ 4.20 กราฟ Contour / surface Plots ของ MRR ที่ระดับ S = 10 RPM แบบ Uncoded.....	89
รูปที่ 4.21 กราฟ Contour / surface Plots ของ MRR ที่ระดับ S = 15 RPM แบบ Uncoded.....	90
รูปที่ 4.22 กราฟ Contour / surface Plots ของ Surface Roughness ที่ระดับ S = 5 RPM แบบ Uncoded.....	90



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาของงานวิจัย

อุตสาหกรรมหลักต่าง ๆ ของประเทศไทย เช่น อุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ อุตสาหกรรมการผลิตพลาสติก อุตสาหกรรม ไฟฟ้า เป็นอุตสาหกรรมที่มีการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเหมือน ๆ กันเป็นจำนวนมาก ซึ่งในการผลิตชิ้นส่วนโลหะและผลิตภัณฑ์ให้มีปริมาณมาก ๆ มีขนาดที่แน่นอน และมีคุณภาพนั้นต้องอาศัยการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ทั้งสิ้น คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้นั้นจึงขึ้นอยู่กับคุณภาพของแม่พิมพ์ แม่พิมพ์เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในการขึ้นรูปชิ้นส่วนโลหะหรือพลาสติก เช่น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ชิ้นส่วนคอมพิวเตอร์ ชิ้นส่วนรถยนต์ ดังนั้นถ้าการสร้างแม่พิมพ์ไม่มีคุณภาพแล้วชิ้นส่วนและอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้นก็จะไม่มีคุณภาพตามที่ต้องการเช่นกัน ในการผลิตแม่พิมพ์ที่ได้นั้นจึงจำเป็นต้องใช้เครื่องจักรที่มีประสิทธิภาพสูงในการสร้างแม่พิมพ์ ซึ่งก็คือ เครื่องกัดเจาะด้วยไฟฟ้า (Electrical Discharge Machining: EDM) เป็นเครื่องจักรที่มีบทบาทอย่างมากในอุตสาหกรรมการสร้างแม่พิมพ์ เครื่องกัดเจาะด้วยไฟฟ้าเป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับการกัดเจาะโลหะ โดยอาศัยพลังงานจากการปลดปล่อยประจุทางไฟฟ้า (Discharge) ที่เกิดขึ้นบนช่องว่างระหว่างชิ้นงานและอิเล็กโทรด ภายใต้สารไดอิเล็กทริกซึ่งทำหน้าที่เป็นฉนวน โดยที่ชิ้นงานและอิเล็กโทรดจะไม่มีสัมผัสกัน โดยจะมีสภาวะการควบคุมการปล่อยกระแสไฟฟ้าวออกมาเป็นช่วง ๆ ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อคุณภาพของงาน เช่น ช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า (Electric Discharge Time: ON) และกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ค (Electric Discharge Peak Current: IP) และช่วงความเร็วรอบ (Rotational Speed: S) ซึ่งเป็นปัจจัยที่จะใช้ในการศึกษา ฉะนั้นจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจที่จะทำการศึกษาดังปัจจัยเหล่านี้ที่มีผลต่อ อัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (Material Removal Rate: MRR) อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (Electrode Wear Rate: EWR) ระยะเวลาตัดเกิน (Over Cut) และค่าความหยาบผิว (Surface Roughness) โดยเหล็กกล้าเครื่องมือที่ใช้ในการขึ้นรูปแม่พิมพ์ คือ เหล็กกล้าเครื่องมือ AUD 11 ได้พัฒนามาจากเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD 11

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อศึกษาลักษณะของการตัด (Machining Characteristics) คืออัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (Material Removal Rate: MRR) อัตราการสึกหรอของแท่งอิเล็กโทรด (Electrode Wear Rate: EWR) ระยะเวลาตัดเกิน (Over cut) และค่าความหยาบผิว (Surface Roughness) ของเหล็กกล้าเครื่องมือ AUD 11 โดยผ่านกรรมวิธี EDM แบบแท่งอิเล็กโทรดหมุน

### 1.3 ขอบเขตปริญญานิพนธ์

1. ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองมี 3 ตัวแปรคือ ช่วงระยะเวลาของการปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ค (IP) และช่วงความเร็วรอบของการหมุน (S)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ศึกษาเฉพาะเหล็กกล้าเครื่องมือ AUD 11 และใช้ทองแดงเป็นอิเล็กโทรดในการขึ้นรูปด้วยวิธี EDM
3. ศึกษาลักษณะของการตัด (Machining Characteristics) คืออัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (Material Removal Rate: MRR) อัตราการสึกหรอของแท่งอิเล็กโทรด (Electrode Wear Rate: EWR) ระยะตัดเกิน (Over cut) และค่าความหยาบผิว (Surface Roughness) ของเหล็กกล้าเครื่องมือ AUD 11 โดยกรรมวิธี EDM แบบแท่งอิเล็กโทรดหมุน

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถควบคุมคุณสมบัติเชิงกลในด้านของความแข็งแรงของวัสดุ AUD 11 ที่ต้องผ่านกระบวนการขึ้นรูปโดยเครื่อง EDM
2. สามารถนำผลการวิเคราะห์ที่ได้ไปใช้ในการสร้างแม่พิมพ์ต่างๆ ที่ต้องการคุณสมบัติเชิงกลในด้านความแข็งแรง ให้ทนทานและมีความเหมาะสมมากขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การทำาทดลองในงานวิจัยนี้มีทฤษฎีที่เกี่ยวข้องหลายทฤษฎีและเพื่อที่จะได้ปฏิบัติการทดลองได้อย่างถูกต้องจึงมีทฤษฎีที่ทำการศึกษาค้นคว้า ในงานวิจัยดังนี้

1. ทฤษฎีเบื้องต้นของการสปาร์ค
2. หลักการของกรรมวิธีขึ้นรูปด้วยเครื่องอีดีเอ็ม
3. ระบบ ไดอิเล็กทริก (Dielectric System)
4. ระบบการไหลของไดอิเล็กทริก (Flushing)
5. ระบบเซอร์โว (Servo System)
6. ความสำคัญของความหนายืด
7. หลักการออกแบบการทดลอง

กรรมวิธี Electrical Discharge Machining เป็นประเภทหนึ่งของกระบวนการเทคโนโลยีแยกอนุภาควัสดุโดยไม่ใช้วิธีการ (Non – Mechanical Means) กระบวนการแยกอนุภาคโดยไม่ใช้วิธีการ แบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท

1. วิธีทางความร้อน (Thermal)
2. วิธีทางเคมี (Chemical)
3. วิธีเคมีไฟฟ้า (Electrochemical)

อีดีเอ็ม (EDM) คือกระบวนการแยกอนุภาควัสดุโดยวิธีความร้อน ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นจากการสปาร์คทางไฟฟ้า อนุภาควัสดุที่ถูกแยกออกมาจะอยู่ในรูปของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส

การกัดเซาะไฟฟ้า (Electroerosion) เป็นคำที่ใช้ครอบคลุมทุกกระบวนการที่แยกอนุภาควัสดุที่เกี่ยวข้องกับการส่งผ่านประจุไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดที่อยู่ภายใต้ของเหลว ไดอิเล็กทริก

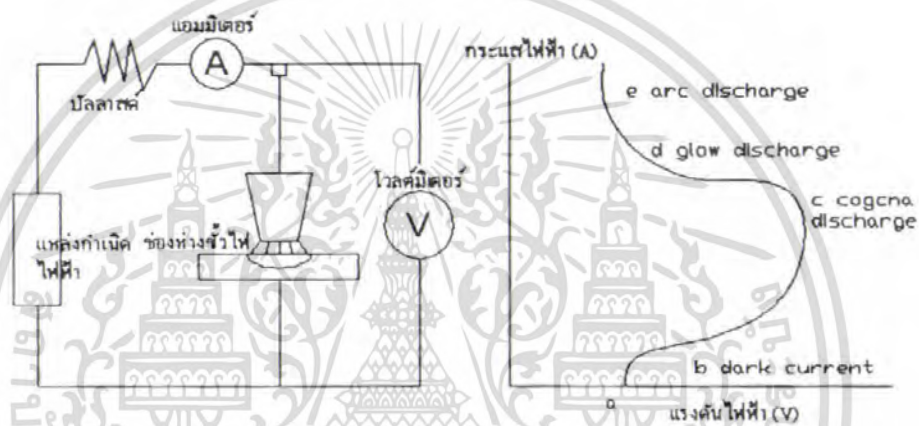
หลักการทางฟิสิกส์ที่รู้จักกันมานานกว่า 100 ปีแล้ว นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ ชื่อ โจเซฟ พริสทลีย์ (Joseph Priestley) ค.ศ. 1733 – 1809 ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับผลของการกัดเซาะเนื่องการปล่อยประจุไฟฟ้า จากการทดลองยังไม่สามารถนำไปใช้ให้เป็นประโยชน์ในงานโลหะได้ จนกระทั่ง Lazarenk ได้ทำการทดลองเป็นผลสำเร็จในระหว่างสงครามโลกครั้งที่สอง โดยใช้ประโยชน์ของอุปกรณ์สวิตซ์ไฟฟ้ามานำเป็นแนวทางในการพัฒนา

พลังความร้อนที่เกิดจากการปล่อยประจุไฟฟ้าออกมา จะหลอมละลายพื้นผิวของอิเล็กโทรดและชิ้นงานที่บริเวณช่องแคบของการปล่อยประจุไฟฟ้า โลหะหลอมเหลวจะถูกแรงหนีศูนย์กลางขับออกมา ในขณะที่พลังงานที่จัดให้ถูกขัดจังหวะหรือถูกตัด ความดันในบริเวณเส้นทางคิสซาร์จะขับอนุภาคที่หลอมเหลวออกมา และยังขับอนุภาคของแข็งออกมาด้วยโดยวิธีกระแทกทางกล

## 2.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของการสปาร์ก

ปรากฏการณ์การสปาร์กเป็นชื่อโดยรวมของการสปาร์กต่างๆที่เกิดขึ้นในกรณีที่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้า ประเภทของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซตั้งอยู่ จนให้ฉนวน ไฟฟ้าเหล่านี้สูญเสียความเป็นฉนวน (Dielectric Breakdown) และเกิดมีกระแสไหลอย่างรุนแรง

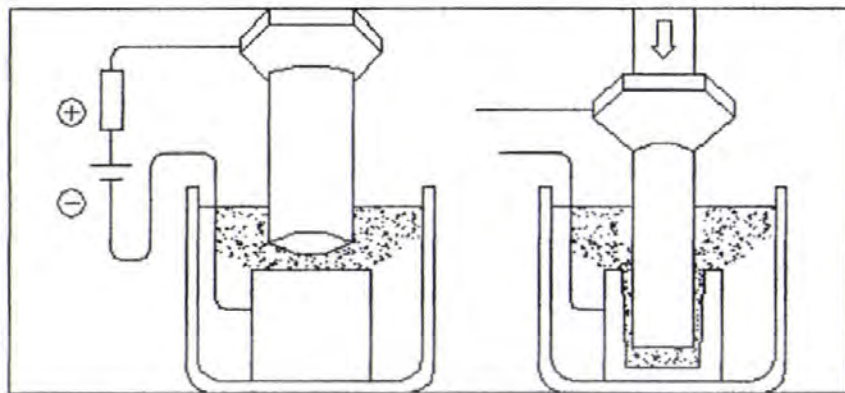
ดังนั้นปรากฏการณ์ดังกล่าว จึงหมายถึง การมีบังคับทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัสดุตัวกลางที่โดยปกติกระแสจะไหลผ่านได้ยากและเมื่อถึงเวลาที่มีการมีบังคับทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัสดุตัวกลางที่โดยปกติกระแสจะไหลผ่านได้ยาก และเมื่อถึงเวลาที่มีการมีบังคับนี้ถึงขีดจำกัด ก็จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขนาดใหญ่ไหลขึ้นมาอย่างกะทันหัน การนำเอาหลักการสปาร์กมาประยุกต์ใช้งาน ได้แก่ หลอดฟลูออเรสเซนต์ การเชื่อมแบบอาร์ค การขึ้นรูปด้วยวิธีการสปาร์กเครื่องอีซีเอ็ม



รูปที่ 2.1 คุณสมบัติพิเศษแรงดันไฟฟ้า - กระแสไฟฟ้าของการสปาร์ก (Inonuc, K., 1977)

กระบวนการปล่อยประจุไฟฟ้า (Discharge Process) หลักการของการกักเซาะไฟฟ้า ชีงงานและอิเล็กโทรดถูกนำมาวางไว้ในตำแหน่งที่พร้อมจะทำงานแต่ไม่สัมผัสกัน กระบวนการทั้งหมดจะเกิดในช่องว่างที่เป็นฉนวนให้กับชีงงานและอิเล็กโทรด ชีงงานและอิเล็กโทรดถูกค้ำกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง กระแสไฟฟ้านี้จะถูกตัดหรือขัดจังหวะด้วยสวิตช์เปิด เมื่อสวิตช์ปิด ศักย์ไฟฟ้าถูกสร้างขึ้นระหว่างอิเล็กโทรดกับชีงงาน ซึ่งเป็นการสร้างสนามไฟฟ้าระหว่างแอโนดกับแคโทดเองจากตัวกลางไดอิเล็กตริกเป็นฉนวน จึงไม่มีกระแสไหลในตอนเริ่มต้นจากระบบความก้าวหน้าของเครื่องจักร ทำให้อิเล็กโทรดและชีงงานเคลื่อนเข้าหากัน ดังนั้นจึงเกิดการสปาร์กที่จุดที่มีสนามไฟฟ้าสูงสุด การเกิดสปาร์กนี้เรียกว่า การปล่อยประจุไฟฟ้า กระบวนการนี้กระแสไฟฟ้าแปรผันเป็นความร้อนทำให้พื้นผิวรอบ ๆ เส้นทางที่ปล่อยประจุที่มีความร้อนเกิดขึ้นสูง 8000°C ถึง 12000°C ถ้ากระแสที่ไหลอยู่ถูกขัดจังหวะให้หยุดโดยการปิดสวิตช์ เส้นทางสปาร์กจะยุบพังลง การใช้สวิตช์ให้หยุดจ่ายพลังงานจะเป็นสาเหตุทำให้ความดันที่บริเวณเส้นทางที่ปล่อยประจุไฟฟ้าลดลงอย่างทันทีทันใดมีผลทำให้โลหะหลอมเหลวเกิดการแตกกระจายเป็นไอหลุดออกมาจากโลหะหลอมเหลว และของแข็งที่ความลึกแน่นอน จึงเกิดเป็นหลุมบนพื้นผิวของการกักเซาะไฟฟ้าของวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 กระบวนการคายประจุ

### 2.1.1 สภาพที่กระแสเริ่มไหล (Dark Current)

ถ้าเพิ่มแรงดันไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า หรือ ลดช่องว่างระหว่างสปาร์คลงมาเรื่อย ๆ เมื่อถึงจุดหนึ่งอากาศจะรวมตัวเป็นประจุไฟฟ้า และอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุเป็นลบจะถูกดูดจากฝั่งขั้วลบไปยังขั้วบวก ซึ่งในช่วงเวลาระยะนี้จะมีกระแสไหลมากประมาณ  $10^{-8} - 10^{-11}$  A สภาพเช่นนี้มีชื่อเรียกว่า สภาพกระแสเริ่มไหล

### 2.1.2 การสปาร์คแบบโคโรนา (Corona Discharge)

ถ้าเพิ่มแรงดันหรือลดช่องว่างลงอีกผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าบางส่วนที่เกิดสนามไฟฟ้าแรงเป็นพิเศษจะเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวน เราเรียกสภาพนี้ว่าการสปาร์คแบบโคโรนา ซึ่งเป็นการสปาร์คที่ขาดเสถียรภาพอย่างมาก

### 2.1.3 การสปาร์คแบบโกลว์ (Glow Discharge)

บริเวณที่เกิดการสูญเสียความเป็นฉนวนแล้วนั้นอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบจะไหลในส่วนนี้มากขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้กระแสไฟฟ้ามียังขนาดใหญ่ขึ้นอย่างรวดเร็วด้วยสภาพการสปาร์คที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงระยะเวลาที่สั้นมาก เช่นนี้ เรียกว่า การสปาร์คแบบโกลว์

### 2.1.4 การสปาร์คแบบอาร์ค (Arc Discharge)

หลังจากที่ประจุไฟฟ้าที่สะสมอยู่ระหว่างขั้วถูกปลดปล่อยออกมา และการสปาร์คแบบโกลว์ได้มีขนาดกระแสไฟฟ้าค่าสูงสุดแล้ว การสปาร์คจะเข้าสู่ขั้นตอนสุดท้าย สภาพการสปาร์ค เช่นนี้จะเกิดขึ้นในลักษณะที่ควบคุมไม่ได้ ซึ่งเป็นสภาพที่ไม่เหมาะกับการขึ้นรูปด้วยวิธีการสปาร์ค ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องควบคุมพลังงานหรือระยะก่อนที่จะเข้าสู่ภาวะการสปาร์คแบบอาร์คนี้

การสปาร์คที่เป็นประกายไฟ โดยทั่วไปแล้วนั้นเป็นการสปาร์คซึ่งเกิดขึ้นทุกชั้นตอน ตั้งแต่สภาพที่กระแสเริ่มไหล จนถึงภาวะสปาร์คแบบการอาร์ค ภายในช่วงระยะเวลาที่สั้นมาก

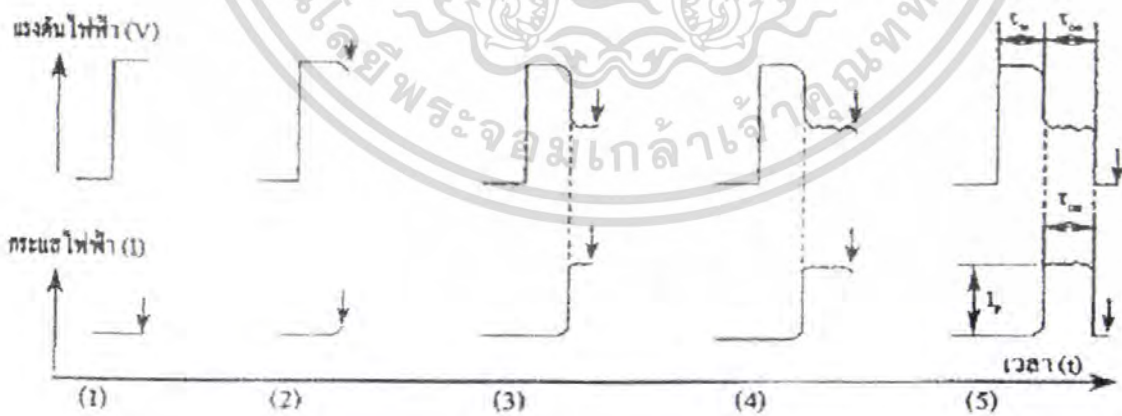
## 2.2 หลักการของกรรมวิธีขึ้นรูปด้วยเครื่องอิตีเอ็ม

กรรมวิธีการขึ้นรูปด้วยเครื่องอิตีเอ็ม ในทางปฏิบัติจะทำงานในสารละลาย โดยใช้ทองแดง ทองเหลือง กราไฟต์ เป็นขั้วไฟฟ้าและวัตถุที่นำมาขึ้นรูปได้จะไม่เกี่ยวกับความแข็งเพียงแต่ต้องเป็นวัตถุที่ไฟฟ้าไหลผ่านได้ จะไม่ปล่อยกระแสไฟฟ้าไหลอย่างต่อเนื่องเหมือนกับการเชื่อมแต่ต้องใช้วิธีการเปิด/ปิด กระแสไฟฟ้าเป็นช่วงจังหวะ เพื่อป้องกันไม่ให้ความร้อนจากการสปาร์คหลอมละลายวัสดุมากเกินไปจนเสียรูปทรง เครื่องอิตีเอ็มอาศัยการใช้พลังงานระดับสูงซึ่งปลดปล่อยออกมาในช่วงสั้นมาก ดังนั้นปัญหาที่สำคัญมาก คือทำอย่างไรจะทำให้เกิดการสปาร์คที่เป็นประกายไฟอย่างมีเสถียรภาพและมีประสิทธิภาพสูง

ในการใช้งานจะใช้ระบบ NC (Numerical Control) ควบคุมให้เกิดการสปาร์คหลายแสนครั้งใน 1 วินาที สภาพของพัลส์ (Pulse) แต่ละลูกของการสปาร์คจะเป็นดังรูป



รูปที่ 2.3 สภาพของลำดับการสปาร์คในแต่ละครั้ง (Inonue, K., 1977)



รูปที่ 2.4 รูปร่างคลื่นของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในการขึ้นรูปด้วยเครื่องอิตีเอ็ม (Inonue, K., 1977)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.1 ไล่แรงดันไฟฟ้า

เริ่มด้วยการไล่แรงดันไฟฟ้า (ประมาณ 60 – 280 V) ที่ระหว่างชิ้นงานกับขั้วไฟฟ้า (เรียกว่าระหว่างขั้ว) ซึ่งแรงดันไฟฟ้าใช้โหลด (No-load Voltage) ในสภาพเช่นนี้ระหว่างขั้วยังรักษาความต้านทานระหว่างขั้วให้มีค่าสูงเพื่อลดระยะระหว่างขั้ว และเป็นการระบายความร้อนของขั้ว ซึ่งการลดช่องว่างของขั้วไฟฟ้าที่เกิดการสปาร์กให้แคบลงจะส่งผลคือ ทำให้ชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูปมีความละเอียดสูง

### 2.2.2 การสูญเสียความเป็นฉนวน

เมื่อชนระยะระหว่างขั้วใกล้กันเรื่อย ๆ จนถึงระยะหนึ่ง (ระยะทางเป็นไมโครเมตร) สารละลายจะเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวนอ่อนประจุลบจะถูกดึงไปอีกฝั่งที่เป็นบวก คือ เริ่มมีกระแสไหล

### 2.2.3 สปาร์กหลอมละลาย

เมื่อเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวนขึ้นแล้ว อิเล็กตรอนที่เป็นประจุลบจะเริ่มไหลเป็นจำนวนมากอย่างรุนแรง ซึ่งก็คือการสปาร์กนั่นเอง บริเวณส่วนที่เกิดการสปาร์กขึ้นนี้จะมีกระแสไฟฟ้าที่มีความหนาแน่นสูงมาก ไหลในช่วงเวลาสั้น ในการขึ้นรูปชิ้นงานนั้นจะมีกระแสตั้งแต่ 0.1 แอมแปร์ ไปจนถึงหลายร้อยแอมแปร์ พลังงานที่ถูกปล่อยออกมาในช่วงนี้จะทำให้บริเวณที่เกิดการสปาร์กมีอุณหภูมิสูงมากขึ้นมา (3,000 องศาเซลเซียสขึ้นไป) จนบางส่วนของชิ้นงานถูกหลอมละลาย นอกจากนั้นแล้วสารละลายบริเวณที่เกิดการสปาร์กก็จะถูกความร้อนที่เกิดขึ้นทำให้กลายเป็นก๊าซไป และเกิดความคืบที่สูงมากเป็นบางส่วน

เมื่อการสปาร์กเริ่มขึ้น เนื่องจากว่ามีฉนวน (สารละลาย) อยู่ระหว่างขั้วจึงทำให้แรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วต่ำลง  $E = IR$  (ตามกฎของโอห์ม) แรงดันไฟฟ้าในช่วงนี้เรียกว่าแรงดันไฟฟ้าสปาร์ก (Discharge)

### 2.2.4 เย็นตัว

ความคืบที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้ส่วนที่หลอมละลายของชิ้นงานหลุดกระเด็นไป ซึ่งเมื่อถูกสารละลายรอบข้างดูดความร้อนออกไปก็จะเริ่มเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วกลายเป็นเศษผงชิ้นเล็ก ๆ ในช่วงที่เกิดการสปาร์กอยู่นั้นกระแสไฟฟ้าจะไหลอยู่ในระดับค่าหนึ่งแต่พอพลังงานที่สะสมอยู่ในระหว่างนั้นถูกปลดปล่อยออกมาแรงดันไฟฟ้าจะต่ำลงอย่างรวดเร็ว

### 2.2.5 กลับคืนสู่ความเป็นฉนวน

หลังจากที่การสปาร์กหนึ่งครั้งได้จบลงกระแสไฟฟ้าจะกลับกลายเป็นศูนย์ และจะรอจนกว่าสารละลายจะกลับคืนสู่ความเป็นฉนวนโดยไม่มีการแรงดันไฟฟ้าเข้าไป การรอในช่วงนี้จะช่วยป้องกันการเกิดสปาร์กแบบผิดปกติ เช่น การสปาร์กซ้ำหรือสปาร์กเป็นบางจุดอื่นเนื่องจากการสะสมหรือทับถมจับตัวกันของอิเล็กตรอนที่ตกค้างระหว่างขั้วหรือเศษผงที่เกิดจากการสปาร์ก ภายหลังจากที่กลับคืนสู่ความเป็นฉนวนแล้วก็จะทำการสปาร์กเช่นเดิมอีก โดยเริ่มต้นขึ้นตอนที่หนึ่งใหม่

## 2.2.6 ประโยชน์ของกรรมวิธีอีดีเอ็ม

1. ความสามารถในการแปรรูปโลหะแข็งหรือโลหะผสม ซึ่งไม่สามารถทำได้โดยวิธีธรรมดา กรรมวิธีอีดีเอ็มจึงมีบทบาทสำคัญในการทำแม่พิมพ์ และเครื่องมือที่ทำจากโลหะแข็ง ทั้งสแตนคาร์ไบด์ สเตลไลท์
2. ความสามารถในการผลิตชิ้นรูปร่างใดๆ ก็ได้ เนื่องจากการกัดเนื้อโลหะอาศัยการสปาร์ค จึงไม่ต้องการความสัมพันธ์ ของการเคลื่อนที่ระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงาน นอกจากอิเล็กโทรดเคลื่อนที่ลงมาในชิ้นงานเท่านั้น ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะแปรรูปโลหะรูปร่างใดๆ โดยใช้เพียงหนึ่งอิเล็กโทรด
3. พื้นผิวจากกรรมวิธีอีดีเอ็มมีลักษณะเป็นหลุมจำนวนมาก จึงช่วยให้สามารถเก็บรักษาน้ำมันหล่อลื่นได้ดี จึงช่วยลดปัญหาเกี่ยวกับการหล่อลื่นได้
4. ในระหว่างทำการแปรรูปชิ้นงานจะไม่มีกรเปลี่ยนแปลงรูปร่าง เนื่องจากไม่มีแรงจากการสัมผัสของอิเล็กโทรดหรือไม่มีแรงทางกล ทำให้สามารถแปรรูปชิ้นงานที่บอบบางหรือเปราะได้
5. แม้กรรมวิธีอีดีเอ็มจะมีผลกระทบของความร้อน แต่เป็นผลกระทบเฉพาะที่ไม่ได้มีผลกระทบต่อวัสดุส่วนใหญ่

## 2.2.7 การแบ่งประเภทของกรรมวิธีอีดีเอ็ม (Categories of EDM)

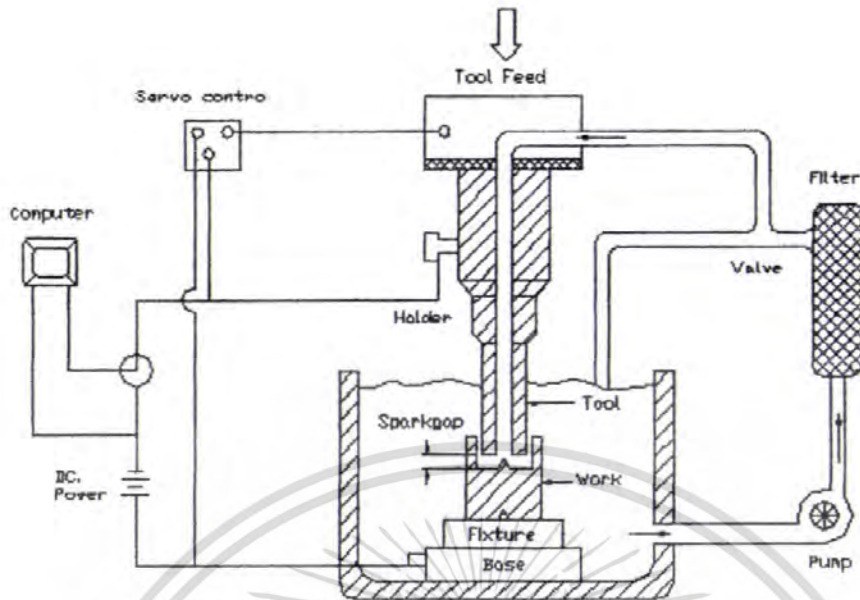
การแปรรูปโลหะ โดยอาศัยการสปาร์คสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท

1. การสร้างแม่พิมพ์ (Sinking by EDM)
2. การตัด (Cutting by EDM)
3. การเจียรไน (Grinding by EDM)

## 2.2.8 อุปกรณ์ของกรรมวิธีอีดีเอ็ม

กรรมวิธีอีดีเอ็มจะเกี่ยวข้องกับการใช้ความร้อนที่มีความเข้มสูง ทำให้โลหะชิ้นงานหลอมละลายหรือกลายเป็นไอเฉพาะที่ จะมีอุปกรณ์ประกอบดังนี้

1. แหล่งจ่ายไฟ (Power Supply)
2. ระบบไดอิเล็กตริก (Dielectric System)
3. อิเล็กโทรด (Electrodes)
4. ระบบเซอร์โว (Servosystem)



รูปที่ 2.5 หลักการทำงานของระบบอดีเอ็ม

1. แหล่งจ่ายไฟทำหน้าที่ผลิตพลังงานคิซาร์จเพื่อใช้ในการแยกอนุภาคโลหะ
2. ระบบไดอิเล็กตริก ทำหน้าที่เป็นฉนวน ทัศนาคอนอนุภาคโลหะและระบายความร้อนที่เกิดขึ้น
3. อิเล็กโทรด ทำหน้าที่เป็นตัวสร้างแบบให้กับชิ้นงานหรือกัดเซาะโลหะงาน
4. ระบบเซอร์โว ทำการควบคุมการป้อนอิเล็กโทรด เพื่อรักษาระยะช่องว่างของคิซาร์จให้คงที่ คังนั้นกำลังงานเฉลี่ยจะลดลงโดยตัวประกอบช่วงเวลาประวิง และสัมพันธ์กับการเกิดคิซาร์จ และกำลังงานเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นกับตัวประกอบหน้าที่กระแสพัลส์ กระแสเฉลี่ยจะลดลงโดยตัวประกอบหน้าที่ช่วงเวลาประวิง

### 2.3 ระบบไดอิเล็กตริก (Dielectric System)

ระบบไดอิเล็กตริกประกอบด้วย สาร ไดอิเล็กตริก ท่อส่ง บี้ม เครื่องกรอง และถังบรรจุสาร ไดอิเล็กตริก สารไดอิเล็กตริกมีหลายชนิด แต่ที่นิยมใช้กันมากคือน้ำมันไฮโดรคาร์บอน (น้ำหนัก 30 - 50) น้ำมันซิลิกอน และน้ำกำจัดไอออน น้ำกำจัดไอออนจะใช้ไม่มาก แม้ว่าจะมีอัตราการกัดเนื้อโลหะสูง และมีความสามารถหล่อเย็น แต่การสึกหรอของอิเล็กโทรดในการเจาะรู เมื่อทำงานเสร็จต้องคัดปลายสวดออกแล้วจึงเริ่มเจาะรูใหม่ได้ การใช้น้ำกำจัดไอออนใช้มากในกรรมวิธีของ Wire-EDM

#### 2.3.1 หน้าที่ของสารไดอิเล็กตริก

1. ฉนวน (Insulation) จุดประสงค์หลักของสารไดอิเล็กตริก คือทำหน้าที่เป็นฉนวนระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงาน การคิซาร์จไม่ควรจะเกิดขึ้นจนกว่าระยะช่องว่างจะน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้เพื่อให้ได้ความละเอียดถูกต้องมากที่สุด

2. ไอออน (Ionisation) สารไดอิเล็กทริกควรที่จะสร้างเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการเกิดดิซชาร์จเร็วที่สุด และเมื่อสวิตช์ออฟ (off) สารไดอิเล็กทริกจำเป็นต้องกำจัดไอออนในเส้นทางดิซชาร์จเพื่อให้เกิดการดิซชาร์จใหม่ในตำแหน่งอื่นต่อไป

3. การหล่อเย็น (Cooling) อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในช่องว่างประมาณ  $10,000^{\circ}\text{C}$  ภายในเวลาเศษส่วนล้านของวินาที ความร้อนที่เกิดขึ้นต้องระบายออก ดังนั้นสารไดอิเล็กทริกจึงทำหน้าที่ระบายความร้อนจากชิ้นงานและอิเล็กโทรด ความร้อนที่สูงเกินไปจะทำให้อิเล็กโทรดสึกหรอมากในเวลาเดียวกัน ไอของโลหะก็จะกลั่นตัวในสารไดอิเล็กทริกด้วย

4. พัดพาอนุภาคโลหะอนุภาคโลหะ จากกระบวนการอีทีเอ็มในช่องว่างดิซชาร์จจะถูกสารไดอิเล็กทริกพัดพาออกมา จึงช่วยกระบวนการให้ดำเนินไปได้ตามปกติมีประสิทธิภาพ ถ้าการไหลพัดพาอนุภาคโลหะไม่ดีจะทำให้เกิดการหยุดนิ่งของสารไดอิเล็กทริก ทำให้มีอนุภาคโลหะตกค้างในช่องว่างและอาจจะเกิดการลัดวงจรได้ เนื่องจากสารไดอิเล็กทริกที่ใช้งานแล้วต้องผ่านการทำความสะอาดโดยเครื่องกรอง กรองเอาอนุภาคโลหะออกจากสารไดอิเล็กทริกแล้วจึงนำกลับมาใช้งานใหม่ต่อไป

### 2.3.2 ประเภทของสารไดอิเล็กทริก

#### 2.3.2.1 น้ำกำจัดไอออน

สารละลายน้ำหรือน้ำในสถานะปกติจะมีไอออนผสมอยู่มาก จึงมีค่าความต้านทานต่ำ ดังนั้นเวลาที่จะแปรรูปโลหะจึงต้องผ่านกระบวนการทำให้มีความต้านทานสูงขึ้น เนื่องจากน้ำมีค่าความต้านทานต่ำกว่าน้ำมัน จึงทำให้กระแสไฟฟ้าโดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้น ความเร็วในการกัดโลหะจึงสูงกว่าน้ำมันประมาณ 2 – 10 เท่า แต่คุณภาพผิวงานจะหยาบปกติแล้วน้ำจะใช้เป็นสารไดอิเล็กทริกในเครื่องอีทีเอ็มประเภทตัดด้วยเส้นลวด

#### 2.3.2.2 ไฮโดรคาร์บอน ที่นิยมใช้กันมีหลายชนิดคือ

1. น้ำมัน (Oils) ที่ใช้กันมากได้แก่น้ำมันแร่ (Mineral) ซึ่งให้ผลลัพท์ดี น้ำมันแร่จะไม่มี Aromatics หรือสารเพิ่มเติมอื่นๆ ความหนืดของน้ำมันเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ เช่น น้ำมันที่มีความหนืดสูงจะไม่เหมาะสมกับงานขั้นตอนการกัดผิวสำเร็จเนื่องจากขั้นตอนนี้ต้องตั้งช่องว่างแคบลง จึงทำให้น้ำมันที่มีความหนืดสูงไหลเวียนได้ยากขึ้น ในช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงาน สำหรับขั้นตอนการกัดหยาบจะใช้น้ำมันเคาเป็นสารไดอิเล็กทริก จุดวาบไฟของสารไดอิเล็กทริกก็มีความสำคัญ เพราะถ้าจุดเดือดต่ำ แนวโน้มที่จะกลายเป็นไอจะเกิดขึ้นได้ง่าย ทำให้เกิดแก๊สปริมาณมาก จึงต้องลดความเร็วการแปรรูปลง

2. น้ำมันก๊าด (Kerosene) มีความหนืดต่ำ ทำให้เหมาะกับขั้นตอนการกัดละเอียดและละเอียดมาก แนะนำให้ใช้กับการแปรรูปโลหะทั้งสเตนคาร์ไบด์ เมื่อตั้งช่วงพัลส์และเมื่อต้องการกำจัดกลิ่นที่เกิดจากสารที่แตกตัว

นอกจากน้ำมันก๊าดแล้วยังมีน้ำมันอื่น ๆ อีกเช่น น้ำมันจักร (Spindle Oil) น้ำมันเครื่องกล (Machine Oil)

น้ำมันที่มีจุดวาบไฟสูงและจุดติดไฟสูงนิยมนำมาใช้งาน น้ำมันซิลิคอนจึงเป็นประโยชน์ในแง่คิณีและการขนส่งที่ปลอดภัยด้วย สารไดอิเล็กทริกต้องไม่เป็นอันตรายต่อผิวหนังและเสื้อผ้า แก๊สที่เกิดจากการแตกตัวของความร้อนต้องไม่เป็นอันตราย โดยทั่วไปแก๊สจะค่อย ๆ ปรากฏขึ้นโดยดิซชาร์จในของเหลวไฮโดรคาร์บอน ส่วนใหญ่ได้แก่ อาเซทิลีน ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ) แอททิลีน ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ) มีเทน ( $\text{CH}_4$ ) และไฮโดรเจน จึงต้องมีเครื่องมือตรวจแก๊สเพื่อความปลอดภัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.3 คุณสมบัติของสารโคอิเล็กตริก

1. มีความหนืดต่ำ
2. มีจุดเดือดสูง และจุดความไฟสูง
3. มีคุณสมบัติความเป็นฉนวนสูง
4. ไม่เป็นอันตรายต่อร่างกายและผิวหนัง
5. ต้องไม่เกิดแก๊สที่เป็นอันตรายจากการแตกตัวหรือสลายตัวเนื่องจากความร้อน
6. ไม่กัดกร่อนชิ้นงาน
7. มีความสามารถในการระบายความร้อนได้ดี
8. มีราคาถูกหรือประหยัด

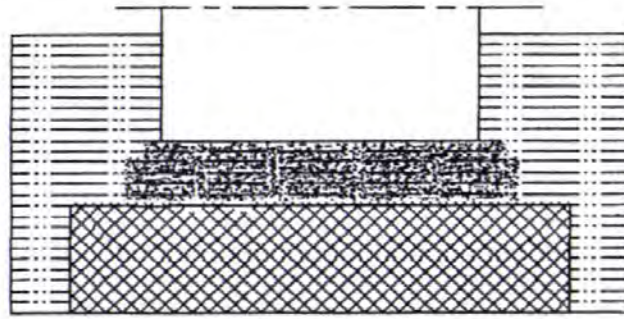
### 2.4 ระบบการไหลของโคอิเล็กตริก (Flushing)

การไหลที่ถูกต้องของสาร โคอิเล็กตริก ระหว่างอิเล็กโทรดและชิ้นงาน จะทำให้การทำงานของระบบอีดีเอ็มมีประสิทธิภาพ ถ้าหากกรรมวิธีอีดีเอ็มไม่ใช้ระบบการไหลของสาร โคอิเล็กตริกจะมีผลกระทบดังนี้ ในตอนเริ่มต้นแรก สารโคอิเล็กตริกยังสะสมอยู่ ไม่มีอนุภาคโลหะและคาร์บอนที่เกิดจากการแตกตัวของโคอิเล็กตริก ทำให้ความคงทนต่อการเป็นฉนวนสูงกว่าโคอิเล็กตริกที่มีอนุภาคโลหะ ทำให้มีการประวิงก่อนที่ความเป็นฉนวนจะสิ้นสุดลง และเริ่มเกิดคิสซาร์จ อนุภาคโลหะที่เกิดจากคิสซาร์จในตอนแรกจะให้ความคงทนต่อการเป็นฉนวนของ โคอิเล็กตริกครั้งต่อมา ลดลง และสามารถทำให้เกิดคิสซาร์จง่ายขึ้น



รูปที่ 2.6 การสะสมของอนุภาค โลหะในช่องว่างเมื่อไม่ใช้ระบบการไหลของโคอิเล็กตริก

ถ้าหากความหนาแน่นของอนุภาคโลหะในช่องว่างมีมากขึ้น ก็จะทำให้เกิดการสะสมของอนุภาคโลหะก่อรูปเป็นสะพานตัวนำไฟฟ้า ทำให้เกิดการคิสซาร์จที่ผิดปกติไปหรือเกิดการอาร์คขึ้น ทำให้ผิวของชิ้นงานและอิเล็กโทรดถูกทำลาย ด้วยเหตุนี้เองจึงต้องจัดอนุภาคโลหะออกไปจากช่องว่างโดยระบบการไหลของโคอิเล็กตริกเข้าไปในช่องว่าง



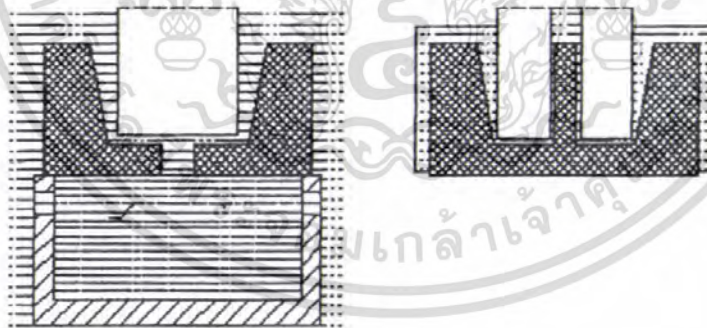
รูปที่ 2.7 อนุภาค โลหะก่อดัวเป็นสะพานตัวนำไฟฟ้า

**2.4.1 ระบบการไหลของไดอิเล็กตริกในกรรมวิธีอีเอ็ม**

1. การไหลแบบฉีด (Injection Flushing)
2. การไหลแบบดูด (Suction Flushing)
3. การไหลด้านข้าง (Side Flushing)
4. การไหลที่ใช้การขึ้น-ลงของอิเล็กโทรด (Flushing by Dielectric "Pumping")
5. การไหลแบบฉีดพร้อมกับการยกอิเล็กโทรดขึ้น

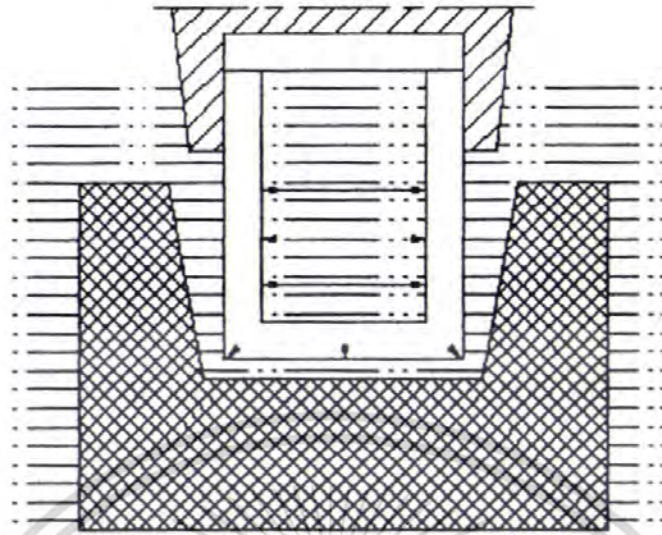
**2.4.1.1 การไหลแบบฉีด**

การไหลแบบนี้ ไดอิเล็กตริกจะถูกฉีดเข้าไปในบริเวณช่องว่างของขั้วพิมพ์และอิเล็กโทรด



รูปที่ 2.8 การไหลของไดอิเล็กตริกแบบฉีด

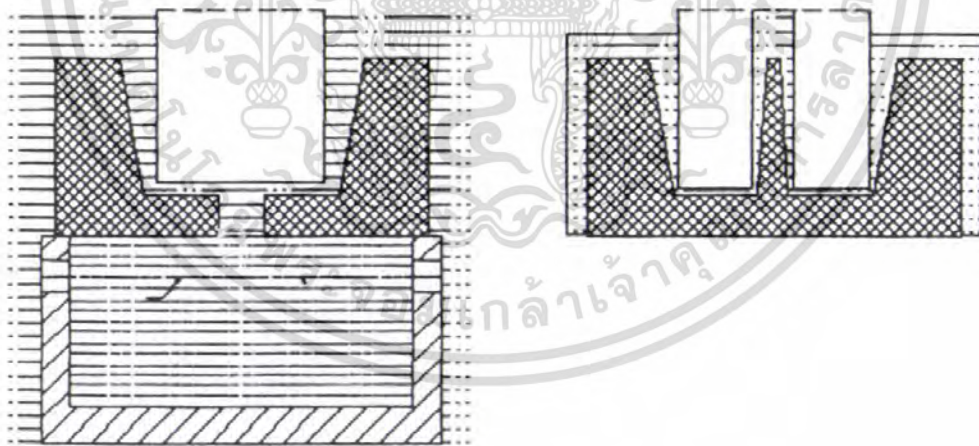
การไหลของไดอิเล็กตริกแบบฉีดจะใช้กับชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นรีหรือใช้กับอิเล็กโทรดที่มีลักษณะแนวตั้งคองที่ สำหรับลักษณะของรีวที่เกิด้ขึ้นนั้นเกิดจากการคิด้ซาร์จทางด้านข้างของอิเล็กโทรด ระบบการไหลที่คิด้จะทำให้สามารถเจาะรูคิด้ๆ ได้โดยใช้อิเล็กโทรดกราวไฟต์คิด้คัด้ของ ไดอิเล็กตริกให้สูงคิด้และไหลเข้าไปในคัด้ของอิเล็กโทรดกราวไฟต์ รูปรุนของกราวไฟต์จะทำให้ไดอิเล็กตริกไหลคัด้นออกมายังบริเวณคัด้ว่างคิด้



รูปที่ 2.9 ใคอิเล็กตริกไหลผ่านวทรุนกรราไฟท้อออกมาที่บริเวณช่องว่าง

#### 2.4.1.2 การไหลแบบลุด

การไหลแบบนี้ใคอิเล็กตริกจะถูกลุดออกผ่านรูของร้งงาน หรือรูของอิเล็กโทรค เมื่อเปรีซบเทียบกับการไหลแบบนึคจะเห็นว่แบบลุดหลึกเถียงผลกระทบของเรียจวากการเกิดคิตซารจทางค้ันข้างของอิเล็กโทรค รูที่เจาะจึงเป็นทรงกระบอกกลม ความค้ันของการลุดค้ญญูภาคค้องไม่นานกว่า 0.8-0.9 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร

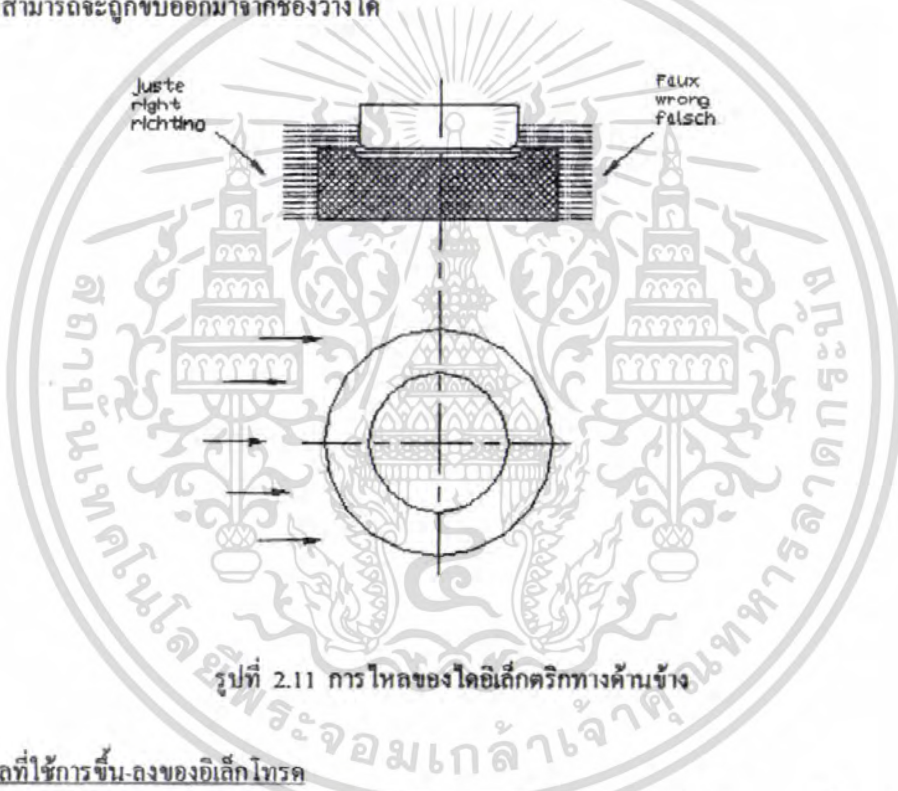


รูปที่ 2.10 การไหลของใคอิเล็กตริกแบบลุด

การใช้งานของการไหลแบบลุดจะสามารถใช้ลักษณะเดียวกับกับการไหลแบบนึค แต่การไหลแบบลุดนิยมนให้ใคอิเล็กตริกไหลผ่านอิเล็กโทรคมากกว่าที่จะผ่านร้งงาน

### 2.4.1.3 การไหลด้านข้าง

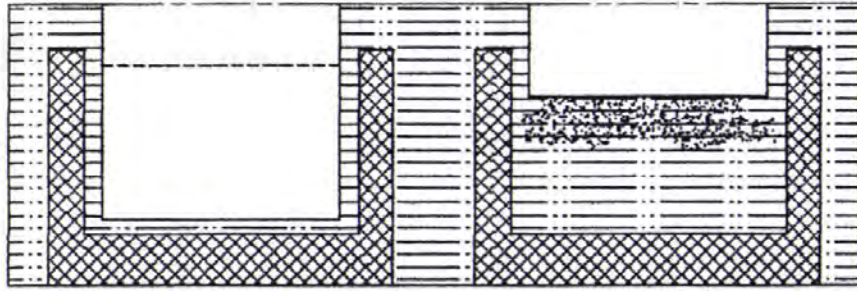
วิธีนี้จะใช้เมื่อไม่สามารถเจาะรูของอิเล็กทรอนิกส์หรือชิ้นงานได้ เช่นกรณีของแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ ร่องลึกที่แคบของแบบหล่อพลาสติก จึงต้องให้การไหลของไดอิเล็กตริกกระทำทางด้านข้างโดยการใช้หัวฉีด ซึ่งต้องระมัดระวังในการปรับให้พื้นผิวของการทำงานของอิเล็กทรอนิกส์ไหลที่เท่า ๆ กัน สำหรับเทคนิคนี้จะใช้ร่วมกับการกระเพื่อมของอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อช่วยให้การไหลดีขึ้น เมื่อทำการแปรรูปพื้นผิวหน้าเรียบ ทิศทางการไหลของไดอิเล็กตริกจะต้องสอดคล้องกับมุมฉีดไดอิเล็กตริกเข้า สำหรับแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญเมื่อรูปแบบคามขาวไม่เรียบจะต้องใช้หัวฉีดแบบพิเศษมาใช้ และเมื่อทิศทางการไหลของ ไดอิเล็กตริกไม่ขนานกับด้านข้างของอิเล็กทรอนิกส์ จะทำให้การไหลปั่นป่วนขึ้น ดังนั้นจะมีไดอิเล็กตริกจำนวนน้อยเข้าไปภายในช่องว่างเท่านั้นจึงทำให้ระบบการไหลไม่ดี แต่ถ้าการไหลของไดอิเล็กตริกมีทิศทางเข้าไปในช่องว่างโดยตรง จะทำให้ปริมาณของไดอิเล็กตริกเข้าไปจำนวนมาก ทำให้การไหลมีประสิทธิภาพดีขึ้น ระบบการไหลทางด้านข้างจะไม่ใช้พร้อมกันทั้งสองด้านของอิเล็กทรอนิกส์ เพราะจะทำให้อนุภาคโลหะที่บริเวณส่วนล่างของชิ้นงาน ไม่สามารถจะถูกขับออกมาจากช่องว่างได้



รูปที่ 2.11 การไหลของไดอิเล็กตริกทางด้านข้าง

### 2.4.1.4 การไหลที่ใช้การขึ้น-ลงของอิเล็กทรอนิกส์

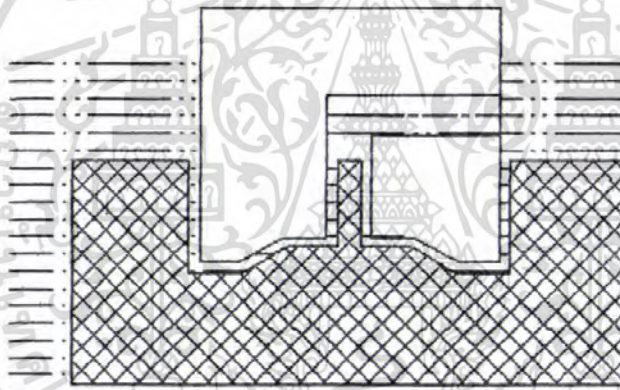
การไหลของไดอิเล็กตริกแบบนี้จะอาศัยการยกขึ้น-ลงของอิเล็กทรอนิกส์ เมื่ออิเล็กทรอนิกส์ถูกยกขึ้นจะทำให้ช่องว่างกว้างขึ้น ไดอิเล็กตริกที่สะสมจะถูกดูดเข้าไปผสมกับอนุภาคโลหะ และเมื่ออิเล็กทรอนิกส์เคลื่อนที่ลง อนุภาคโลหะก็จะถูกขับออกไป วิธีการนี้จะใช้กับชิ้นงานที่มีความลึก และในระบบการไหลต้องไม่มีความดัน



รูปที่ 2.12 การไหลของไดอิเล็กตริกโดยอาศัยการขึ้น-ลงของอิเล็กทรอนิกส์

#### 2.4.1.5 การไหลแบบฉีดพร้อมกับการยกอิเล็กทรอนิกส์

เมื่อทำการแปรรูปโลหะโดยใช้อิเล็กทรอนิกส์จะเห็นความผิดปกติของอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในระบบการไหลแบบฉีด มีการสึกหรอมาก และเพิ่มขึ้นตามความดันในบริเวณที่ฉีด



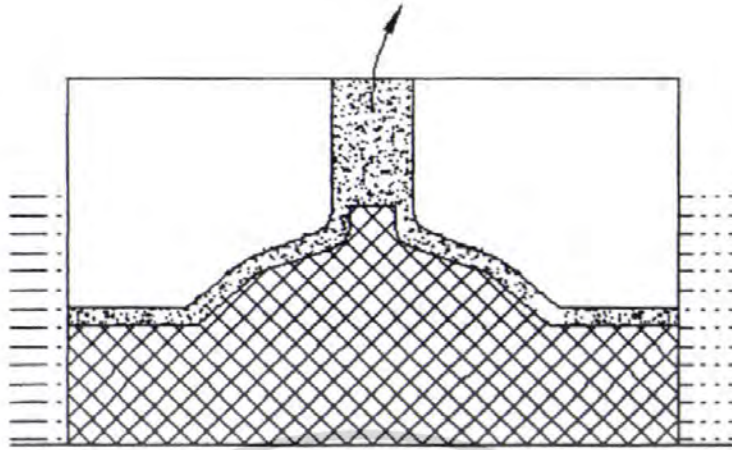
รูปที่ 2.13 การไหลแบบฉีดพร้อมกับการเลื่อนอิเล็กทรอนิกส์

การที่จะป้องกันการสึกหรอที่เกิดจากความดันจะใช้วิธีการฉีดไดอิเล็กตริกเข้าไปในช่องว่าง ในขณะที่ตัวอิเล็กทรอนิกส์ก็เคลื่อนที่ยกขึ้นด้วย

#### 2.4.2 ปัญหาแก๊ส (Gas Problem)

ในระบบการไหลแบบฉีดระหว่างการแปรรูปจะมีการสะสมของแก๊ส ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการระเบิดและจะทำให้ชิ้นงานเลื่อนได้ จึงต้องระมัดระวังไม่ให้เกิดขึ้น ที่สำคัญคือต้องหลีกเลี่ยงแนวโน้มที่จะเป็นสาเหตุของการระเบิด เช่น แก๊ส อากาศ ดังนั้นก่อนจะเริ่มทำการแปรรูป ต้องมั่นใจว่าภายในอุปกรณ์ฉีดมีไดอิเล็กตริกเต็ม และภายในถังบรรจุมีไดอิเล็กตริกตามที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 การเจาะรูเล็กโทรศเพื่อระบายแก๊สที่เกิดขึ้น

กำหนดเพื่อป้องกันบีมไม่ให้ลุคเอาอากาศเข้าไป เพื่อที่จะลดปริมาณการสะสมของแก๊สในอุปกรณ์ต้องพยายามให้ทางคูดของอุปกรณ์อยู่ในจุดที่สูงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เมื่อทำการแปรรูปด้วยอิเล็กโทรศแบบเว้าเข้า จะทำให้มีการสะสมของแก๊สภายในส่วนที่เว้านั้น จึงต้องทำการเจาะรูเล็กโทรศเพื่อระบายแก๊สออกไป

## 2.5 ระบบเซอร์โว (Servo System)

ระบบเซอร์โวคือระบบควบคุมบังคับกลไกการป้อนอิเล็กโทรศ โดยอาศัยสัญญาณความแตกต่างของโวลต์เทจจากช่องว่างคิตซาร์จกับโวลต์เทจอ้างอิงเป็นตัวเปรียบเทียบ เพื่อทำการควบคุมกลไกการป้อนอิเล็กโทรศให้เหมาะสมกับอัตราการกัดเนื้อโลหะงาน

เนื่องจากช่องว่างจะมีเศษอนุภาคโลหะจากการคิตซาร์จ แก๊สและทาร์ที่เกิดจากการแตกตัวของไดอิเล็กตริกเนื่องจากความร้อน จะทำให้การเกิดคิตซาร์จครั้งต่อไปขาดเสถียรภาพและอาจทำให้เกิดคิตซาร์จ การสับคิตโดยตรงระหว่างอิเล็กโทรศกับชิ้นงานจะทำให้เกิดการลัดวงจรด้วย ทำให้การคิตซาร์จขาดหายไป ประสิทธิภาพการกัดจะจึงลดลง เมื่อช่องว่างมีความห่างพอเหมาะ ปริมาณการกัดเนื้อโลหะจะคงที่ แต่เมื่อช่องว่างแคบลงหลังงานคิตซาร์จที่ช่องว่างก็จะลดลง ทำให้ประสิทธิภาพการกัดเนื้อโลหะต่ำลง

เพื่อที่จะรักษาการกัดเนื้อโลหะให้เหมาะสม จะต้องทำการควบคุมกลไกการป้อนอิเล็กโทรศให้มีระยะช่องว่างคงที่ ในขณะที่เดียวกันก็ป้องกันการสับคิตระหว่างอิเล็กโทรศกับชิ้นงาน ขณะที่อิเล็กโทรศและชิ้นงานจะสึกไปด้วย เนื่องจากช่องว่างนี้จะแคบมากจึงไม่สามารถรักษาให้คงที่ได้ตามสัดส่วนของการสึก ดังนั้นการป้อนอิเล็กโทรศจะใช้ระบบควบคุมแบบ Adaptive Control

### 2.5.1 ระบบควบคุมการป้อนอิเล็กโทรศในกรรมวิธีอีดีเอ็ม

1. ควบคุมการป้อนอิเล็กโทรศโดยใช้โซลินอยด์
2. ควบคุมการป้อนอิเล็กโทรศโดยใช้เซอร์โวไฟฟ้า
3. ควบคุมการป้อนอิเล็กโทรศโดยการใช้เซอร์โวไฮดรอลิก

## 2.6 ความสำคัญของความหยาบผิว

ความสำคัญของความหยาบผิวมีส่วนสำคัญต่อคุณภาพสูงสุดและความน่าเชื่อถือสูงสุดของผลิตภัณฑ์ เมื่อนำไปใช้งานผลของความเรียบของผิวงานสำเร็จมีส่วนสำคัญโดยค่าความเรียบผิว (Surface Roughness) จะมีผลหรือสามารถวิเคราะห์หาผลของกรรมวิธีการผลิต เช่น การควบคุมสภาพแวดล้อม ผลของประสิทธิภาพการทำงาน มองผ่านชิ้นงานที่เข้าสู่หรือที่ผ่านการผลิตเสร็จสิ้น ความเหมาะสมของขบวนการผลิต ที่จะทำให้สภาพแวดล้อมการผลิตเหมาะสมต่องาน ขนาดจริงแท้จริงของชิ้นงาน หลังจากชิ้นงานผ่านการใช้งาน ไประยะเวลาหนึ่งค่าความเรียบผิวที่เหมาะสมและค่าคุณสมบัติของผิว (Surface Parameter) และวิธีการผลิตที่ถูกต้อง จะทำให้ต้นทุนการผลิตลดลง หรือไม่สูงเกินไป จากการออกแบบขั้นตอนการผลิตที่เหมาะสมถูกต้อง เนื่องจาก การมีความเข้าใจอย่างถูกต้องต่อรูปทรงแบบต่างๆ ของคุณสมบัติของผิวและวิธีการวัดผิวและวิเคราะห์ จะทำให้ผู้ออกแบบสามารถเลือกกำหนดค่าและวิธีการวัดความหยาบที่เหมาะสม ซึ่งไม่เพียงแต่จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ แต่จะทำให้เกิดขบวนการผลิตที่เหมาะสมและต้นทุนการผลิตที่ถูกต้อง

### 2.6.1 ความหยาบผิว

ความหยาบผิว (Surface Roughness) คือ ความหยาบผิววัดได้จากชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแปรรูป เช่น งานกลึง งานกัด งานไส เป็นต้น ผ่านการตรวจจะสังเกตได้ว่าชิ้นงานขรุขระเป็นลอนคลื่น ชิ้นที่ลอนคลื่นสูงแสดงว่าชิ้นงานดังกล่าวมีผิวหยาบ ส่วนที่ลอนคลื่นต่ำแสดงว่ามีผิวที่เรียบ ความหยาบผิวชิ้นงานมีผลต่อการใช้งานอย่างมาก เมื่อการผลิตมีคุณภาพผิวชิ้นงาน ไม่ตรงกับสภาพที่แท้จริงขณะทำงาน จะทำให้อายุการใช้งานของชิ้นงานสั้นลงหรือชิ้นงานบางชิ้นที่ผลิตขึ้นมาผิวที่ละเอียด แต่สภาพใช้งานจริงไม่จำเป็น เพราะจะทำให้เสียเวลาในการทำงานโดยเปล่าประโยชน์

หากนำเอาผิวของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแปรรูป โดยชิ้นงานได้รับการแปรรูปจาก งานกลึง งานกัด งานไส งานเจียรระไน งานเลเซอร์ (Laser) และงานอีซีเอ็ม เป็นต้น ผ่านการตรวจด้วยแว่นขยายจะพบว่าผิวของชิ้นงานขรุขระเป็นลอนคลื่นชิ้นงานใดที่มีลอนคลื่นสูง แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานดังกล่าวมีผิวหยาบ ส่วนที่มีลอนคลื่นต่ำแสดงว่ามีผิวที่เรียบ จะทำให้อายุการใช้งานของชิ้นงานสั้นลง หรือชิ้นงานบางชิ้นที่ผลิตขึ้นมาผิวที่ละเอียด แต่สภาพใช้งานจริงไม่จำเป็น เพราะจะทำให้เสียเวลาในการทำงานโดยเปล่าประโยชน์

### 2.6.2 การเกิดสภาพของผิว

ภายใต้กระบวนการขึ้นรูปด้วยเครื่องจักร เช่น กลึง กัด ไส บริเวณผิวงานสำเร็จที่มองเห็นและสัมผัสได้นั้นจะเป็นแหล่งที่รวมและสามารถบ่งบอกผลจากแหล่งกำเนิดหลายอย่างปะปนกันอยู่ โดยจะทราบได้ต่อเมื่อได้ทำการตรวจวัดและวิเคราะห์ผิว (Surface Analysis)

ความหยาบผิว (Surface Roughness) จะเกิดขึ้นเมื่อวัตถุดิบถูกกระทำด้วยเครื่องจักร (Machining) โดยจะเกิดรอยทางเดินของเครื่องมือตัด (Tool) บริเวณเนื้อชิ้นงาน หากได้มีการขยายบริเวณพื้นผิวขึ้นมาจะพบรอยหยาบ ที่เกิดจากทางเดินของเครื่องมือกัดเนื้อวัสดุซึ่งบ่งบอกส่วนประกอบความหยาบผิว (Roughness Component) โดยปัจจัยที่ทำให้เกิดความหยาบผิว (Surface Roughness) ได้แก่ ค่าความเร็วลึกมุมตัด (Depth of Cut) และค่าความเร็วรอบ (Speed) และค่าอัตราป้อนชิ้นงาน (Feed Rate) ของเครื่องมือกัดเนื้อวัสดุ

### 2.6.3 ลักษณะการเบี่ยงเบนของผิวชิ้นงาน

การเบี่ยงเบนของผิวชิ้นงานสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่ม คือ บกพร่องทางด้านความราบ การเบี่ยงเบนผิวชิ้นงานที่เกิดจากลอนคลื่น การเบี่ยงผิวจากร่องโค้ง การเบี่ยงเบนผิวชิ้นงานจากแอ่งหรือรอยแตกเป็นจุดหยาบ ดังตารางที่ 2.1 แสดงลักษณะการเบี่ยงเบนของผิวชิ้นงานซึ่งบอกสาเหตุต่างๆที่ทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของผิวชิ้นงาน

#### 2.6.3.1 บกพร่องทางด้านความราบ ความกลม

บกพร่องทางด้านความราบ ความกลม (Form Error) อีกส่วนประกอบหนึ่งของความหยาบผิวตัวอย่างเช่น เกิดจากการที่รางขับเคลื่อน หรือรางที่รองรับชุดเคลื่อนที่ของป้อนมีดเกิดการสึกหรอ ค่าความตรง (Straightness) ลดลง ผลที่ได้มักจะเป็นคลื่นที่มีช่วงความยาวมากกว่าความยาวของรางเคลื่อนที่ โดยจะปรากฏรวมอยู่ในความหยาบผิว

#### 2.6.3.2 การเบี่ยงเบนที่เกิดจากลอนคลื่น

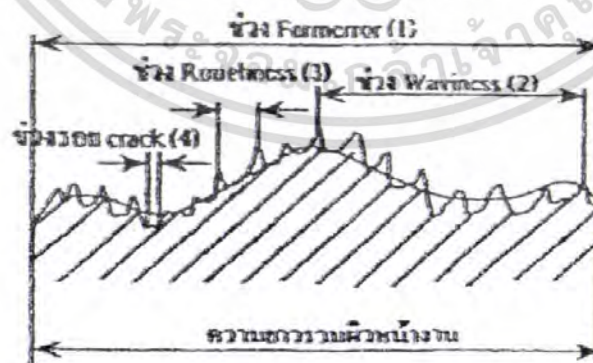
การเบี่ยงเบนที่เกิดจากลอนคลื่น (Waviness) คุณลักษณะผิว คือความเป็นคลื่น (Waviness) ซึ่งมักจะเกิดจากการสั่นสะเทือนจากแหล่งกำเนิดต่าง ๆ โดยรอบ เช่น เครื่องมือไม่ได้วางแน่นป้องกันการสั่นสะเทือน หรือเกิดจากเครื่องเอียง เกิดจากการสึกหรอของลูกปืน (Bearing) คอเครื่อง เกียร์ทด ชุดจับยึด หรือส่วนอื่น ๆ ที่เริ่มสั่นคลอนตามอายุ หรือกาลเวลาที่ใช้งาน ความสั่นสะเทือนเหล่านี้จะปรากฏแฝงอยู่ในลักษณะของผิวงาน

#### 2.6.3.3 การเบี่ยงเบนจากร่องโค้ง

การเบี่ยงเบนจากร่องโค้ง (Roughness) ความหยาบ ความเป็นลอนคลื่น หรือความผิดเพี้ยนของรูปทรงอันเกิดขึ้นในระหว่างที่ทำงาน ผสมปนกันอยู่ในภาพของผิวงานที่เห็นหรือสัมผัสได้

#### 2.6.3.4 ความไม่เรียบ ขรุขระเป็นจุดหยาบ

ไม่เรียบขรุขระเป็นจุดหยาบ (Crack) ลักษณะจะคล้ายกับการเบี่ยงเบนจากร่องโค้ง (Roughness) แต่จะมีความหยาบผิวที่มากกว่า



รูปที่ 2.15 ช่วงของการเบี่ยงเบนผิวชิ้นงาน

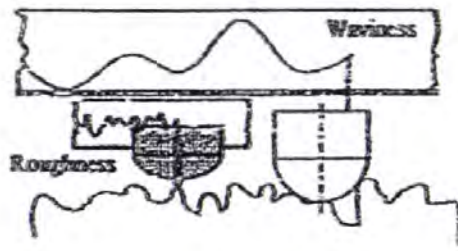
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ลักษณะการเบี่ยงเบนของผิวชิ้นงาน

แสดงการเบี่ยงเบนของผิวชิ้นงาน		ตัวอย่างการเบี่ยงเบนผิวของชิ้นงาน	สาเหตุที่ทำให้เบี่ยงเบน
	Form Error	บกพร่องทางด้านความราบ ความกลม	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ผิดพลาดจากระบบน้ำ</li> <li>เคลื่อนเครื่องมือ</li> <li>- การ โกงงอของเครื่องมือหรือชิ้นงาน</li> </ul>
	Waviness	การเบี่ยงเบนที่เกิดการลอนคลื่น	<ul style="list-style-type: none"> <li>- การจับยึดที่เอียงศูนย์ของชิ้นงาน</li> <li>- การเบี่ยงเบนจากรูปทรงหรือการหมุนของคมตัด</li> </ul>
	Roughness	การเบี่ยงเบนจากร่องโค้ง	<ul style="list-style-type: none"> <li>- รูปทรงคมตัด</li> <li>- การตั้งค่าอัตราป้อนชิ้นงานหรือตั้งค่าความเร็วลัดมุมตัด</li> </ul>
	Crack	ความ ไม่เรียบ ขรุขระเป็นจุดหยวนหรือรอยแตก	<ul style="list-style-type: none"> <li>- การไหลหรือการขาดของเศษงาน</li> <li>- การเตรียมผิวด้วยกรรมวิธียิงทราย</li> </ul>

ข้อบกพร่องของผิวหน้าชิ้นงานที่มีขนาดเป็นตัวกำหนดให้มีรูปแบบความเบี่ยงเบนผิวชิ้นงานแบบต่าง ๆ ดังรูป 2.15 ช่วงการเบี่ยงเบนซึ่งจะแสดงให้เห็นลักษณะของช่วงความเบี่ยงเบนผิวชิ้นงานแบบต่างๆจากตารางที่ 2.1 แสดงลักษณะการเบี่ยงเบนของผิวชิ้นงานในแบบรูปบกพร่องทางด้านความราบความกลม (Form Error) และรูปแบบการเบี่ยงเบนที่เกิดจากลอนคลื่น (Waviness) เป็นไปในลักษณะมหภาค (Macro) ส่วนการเบี่ยงเบนผิวชิ้นงานรูปแบบ การเบี่ยงเบนจากร่องโค้ง (Roughness) และรูปแบบไม่เรียบขรุขระเป็นจุดหยวน (Crack) เป็นไปในลักษณะจุลภาค (Micro) ซึ่งมีช่องหรือช่องความหยวนแคบมาก ดังนั้นการวัดตรวจสอบเพื่อหาค่าที่ต้องการต้องใช้อุปกรณ์เครื่องวัดความหยวนผิว ซึ่งมีหลักการและส่วนประกอบเบื้องต้นในรูปที่ 2.16 ซึ่งเป็นลักษณะของหัวลากกับหัวสัมผัสของเครื่องวัดความหยวนที่ใช้ในการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 ลักษณะความแตกต่างระหว่างห้วงลาก (รูปคลื่นขนา) กับหัวสัมผัส (รูปคลื่นซ้ำ)

ข้อบกพร่องผิวหน้าชิ้นงานเกิดมาจากกรรมวิธีการผลิตชิ้นงานผิวหน้ามักจะมี การเบี่ยงเบนตลอดเวลาที่ทำการผลิตชิ้นงาน จากความลิตที่เกี่ยวกับรูปทรงต่าง ๆ ทางเรขาคณิต ซึ่งข้อเท็จจริงทั้งหลายความเบี่ยงเบนจากรูปแบบ ไม่เป็นจริงของผิวชิ้นงานเหตุนี้ผิวชิ้นงานเป็นเรื่องสำคัญดังนั้นของชิ้นส่วนจักรกลพฤติกรรมการกัดกร่อนความสามารถ ในการแข่งขัน ความสามารถทำให้เกิดการสึกหรอที่การควบคุมคุณภาพผิวหน้า ซึ่งตามมาตรฐาน DIN 4760 มีการแบ่งรูปแบบการเบี่ยงเบนออกเป็น 6 แบบ สำหรับแบบที่ 5 และแบบที่ 6 เป็นองค์ประกอบที่หลุดออกอยู่ใน โครงสร้างแบบที่ 1 ถึงแบบที่ 4 และเกิดเป็น โครงสร้างแบบตาข่าย และไม่มีตัวอย่างอธิบายที่แน่ชัด ขนาดเป็นตัว กำหนดให้มีรูปแบบเบี่ยงเบน ซึ่งมีทั้ง 4 รูปแบบ อาจจะไม่เกี่ยวข้องกับหน้าที่ของผิวหน้า ณ เวลา ผิวหน้าที่ด้านไม่ควร จะมีหลายส่วนของรูปแบบเบี่ยงเบน ผิวหยาบต้องการความหยาบต่ำ ผิวหน้าที่เปลี่ยนแปลงควรมีรูปคลื่นที่ชัดเจน



รูปที่ 2.17 จำแนกลักษณะการเบี่ยงเบนผิวชิ้นงาน

## 2.6.4 รายละเอียดของเครื่องวัดค่าความหยาบผิว

รายละเอียดของเครื่องวัดค่าความหยาบผิว (Surface Profilometer)

### 2.6.4.1 หลักการทำงานของเครื่องวัดค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน

การทำงานของเครื่องวัดค่าความหยาบผิวจะเป็นการทำงานร่วมกันของหัวทดสอบกับชุดขยายสัญญาณและ ควบคุมที่การแปลงผลการสัมผัสของปลายวัด ซึ่งเคลื่อนที่ขึ้นลงตามลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานเปลี่ยน ไปเป็นสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางไฟที่รวม ที่มีคลื่นของความถี่สูงและต่ำผสมกันอยู่ อันมีผลมาจากลักษณะ โครงสร้างรวมของพื้นผิวที่วัดได้ ซึ่งการประมวลผลของผิว ตามคุณสมบัติการวัดจำเป็นต้องแยกลักษณะสัญญาณความถี่สูงและต่ำนี้ออกจากกัน เนื่องจากแต่ละลักษณะเป็นค่าที่แทนคุณสมบัติที่ต่างกัน คือ

- ย่านความถี่สูงจะเป็นค่าคุณสมบัติของความหยาบผิว (Roughness)
- ย่านความถี่ต่ำจะเป็นค่าคุณสมบัติของความเป็นลอนคลื่น (Waviness)

#### 2.6.4.2 วิธีการทำงานของเครื่องวัดค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน

โดยตัวที่เป็นตัวทดสอบวัดค่าความหยาบผิวคือ หัวทดสอบใช้วัดค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน โดยจะมีแท่งโลหะด้านในมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่มีขนาดเล็กจะเชื่อมต่อกับหัวทดสอบคล้ายปากกาปากแหลม และแท่งโลหะด้านนอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่มีขนาดใหญ่โดยใช้หัวทดสอบลากสัมผัสกับผิวชิ้นงาน โดยชิ้นงานที่นำมาหาค่าความหยาบผิวนั้นต้องมีร่องทดสอบที่สามารถให้หัวทดสอบเข้าไปสัมผัสวัดได้แต่ก่อนที่จะวัดค่าความหยาบผิวนั้นนั้นต้องมีการปรับค่าการวัดค่าความหยาบ (Calibrate) ก่อนทุกครั้งที่ทำกรวัดค่าเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้อง

#### 2.6.5 ค่าที่เกี่ยวข้องกับความหยาบผิว

##### 2.6.5.1 ความหยาบผิว

ความหยาบผิว (Surface Roughness) คือปริมาณของลักษณะบนพื้นผิวชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีการแปรรูปด้วยเครื่องจักรและกำหนดเป็นสถิติด้วยค่าเบี่ยงเบนทางคณิตศาสตร์ (Arithmetical Mean Deviation) ของพื้นที่หน้าตัด (Ra) ความสูงของส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลง 10 จุด (Rz) ค่าที่สูงที่สุดของส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลง (Rt) และค่าความหยาบผิวที่ลึกที่สุด (Rmax) ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับ Rt และ Rz

##### 2.6.5.2 ความยาวอ้างอิง

ความยาวอ้างอิง (Reference Length) ความยาวอ้างอิง (lc) กำหนดให้เป็นความยาวซึ่งจำเป็นต่อการหาค่าที่สุทธาระยะระหว่างจุดสูงสุดและปริมาณค่าสูงที่สุดของส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลง (Rt) หรือความสูงที่สุดของส่วนที่เปลี่ยนแปลง 10 จุด (Rz) จากพื้นที่หน้าตัดคิดแปลงค่าความยาวของความยาวอ้างอิง ไม่มีผลต่อความเรียบของผิวชิ้นงานปกติ

##### 2.6.5.3 เส้นค่าเฉลี่ย

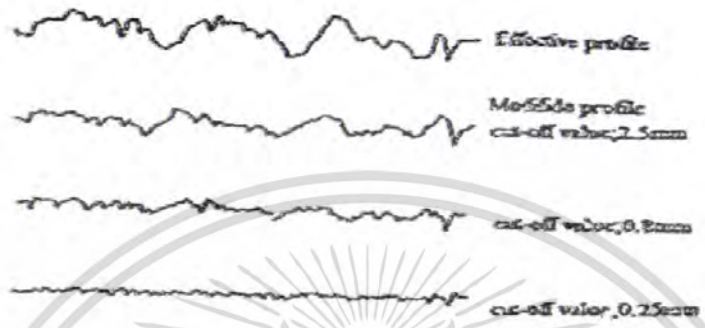
เส้นค่าเฉลี่ย (Mean Line) ถูกกำหนดให้เป็นเส้นตรงหรือเส้นโค้งซึ่งมีผลรวมทั้งหมดของค่ายกกำลัง 2 ของความสูงจากเส้นค่าเฉลี่ยถึงส่วนโค้งจากการวัด โดยแสดงเป็นค่าต่ำสุด เส้นเฉลี่ยถูกใช้เป็นเส้นอ้างอิงเพื่อหาค่าตัวแปรของความหยาบของผิวชิ้นงาน

##### 2.6.5.4 รูปหน้าตัดที่เป็นผลและรูปหน้าตัดคิดแปลง

รูปหน้าตัดที่เป็นผลและรูปหน้าตัดคิดแปลง (Effective Profile and Modified Profile) ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการแปรรูปด้วยเครื่องตัดเฉิมจะมีลักษณะนูนขึ้นเป็นแอ่งด้วยความสูง ช่วงห่าง และความเอียงแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากมาย เมื่อความเรียบของผิวเหล่านี้ถูกวัดด้วยส่วนสัมผัสทางไฟฟ้าหรือหัวทดสอบ แล้วขจัดคลื่นความถี่ออกไปด้วย รูปหน้าตัดคคคแปลงจะเกิดเส้นโค้งที่ลากด้วยปลายหัวทดสอบ ซึ่งมีความหมายความแตกต่างจากเส้นโค้งที่ลากโดยผ่าน Low Band Cut-off Filter หรือที่เรียกว่ารูปหน้าตัดคคคแปลง ค่าของความถี่ที่ได้ค่าวัดออกด้วย Filter เรียกว่า ค่าตัดออก และรูปร่างของเส้นโค้งมีความแตกต่างกัน



รูปที่ 2.18 รูปหน้าตัดที่เป็นผลและรูปหน้าตัดคคคแปลงของความหยาบ

2.6.6 วิธีการแสดงค่าความหยาบผิว

การศึกษาเกี่ยวกับความหยาบผิวของชิ้นงานเป็นการเก็บค่าและหาค่าเฉลี่ยของความแรงสัญญาณ (Amplitude) จากรูปหน้าตัดและเมื่อศึกษาวิธีการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับใช้คลื่นเสียง จึงได้นำมาประยุกต์เพื่อวิเคราะห์ค่าความหยาบของผิวชิ้นงานและวิธีการคำนวณค่าต่าง ๆ ดังนี้

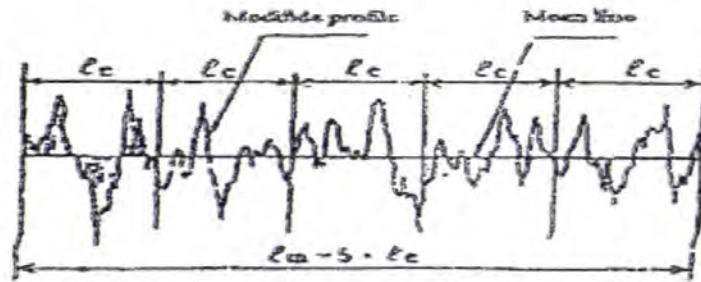
2.6.6.1 ค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยทางคณิตศาสตร์ของพื้นที่หน้าตัด

ค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยทางคณิตศาสตร์ของพื้นที่หน้าตัด (Ra) มีวิธีหาโดยแทน x ใช้กำหนดทิศทางเส้นค่าเฉลี่ยของเส้นโค้งจากการวัดและมีความยาวประเมิน โดย (lm = 5\*le) โดยทั่วไปความยาวประเมิน (lm) มีค่าเป็น 5 เท่าของความยาวอ้างอิง (le) การกำหนดตามแกน x ในรูปที่ 2.19 และแกน z มีทิศทางในแนวตั้งฉากกับแกน x และรูปพื้นที่หน้าตัดคคคแปลงจะถูกอธิบายโดย z = f(x) ค่า Ra หาได้จากสมการที่ 2.18 วิธีการหาวิธีดังนี้

$$Ra = \frac{1}{lm} \int_{lm_0}^{lm} |f(x)| dx \tag{2.1}$$

- เมื่อ lm = ความยาวประเมิน (ไมโครเมตร)
- le = ความยาวอ้างอิง (ไมโครเมตร)

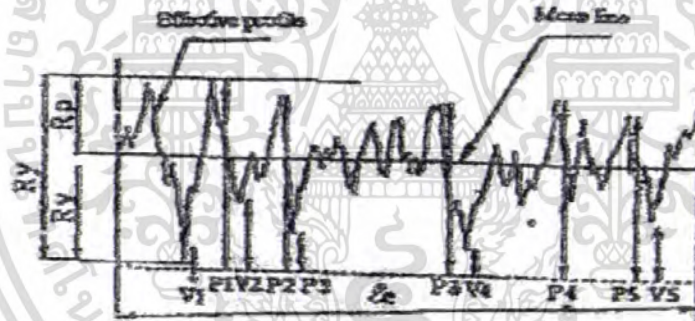
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 ค่าพารามิเตอร์ค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยทางคณิตศาสตร์ของพื้นที่หน้าตัดของค่าความหยาบผิว

### 2.6.6.2 ค่าสูงที่สุดของส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลง

ค่าสูงที่สุดของส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลง ( $R_t$ ) มีวิธีการหาโดยการตัดออกเส้นโค้งจากการวัดช่วงห่างของความยาวอ้างอิงแล้วลากเส้น 2 เส้นขนานกับเส้นค่าเฉลี่ยของรูปหน้าตัดแปลงให้หน้าตัดสัมผัสกับส่วนที่สูงสุดปลายยอดแหลม (Peak) และอีกเส้นสัมผัสกับส่วนที่ลึกที่สุดของแอ่ง (Valley) ค่า  $R_t$  ได้จากระยะความยาวช่วงห่างเส้นขนานทั้งสองดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ค่าสูงที่สุดของส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงและมีค่าความสูงของส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลง 10 จุด ของค่าความหยาบผิว

### วิธีการหาค่านี้

- $R_p$  = ระยะจากเส้นค่าเฉลี่ยถึงจุดที่สูงที่สุดของปลายยอดแหลม (Peak)
  - $R_v$  = ระยะจากเส้นค่าเฉลี่ยถึงจุดที่ลึกที่สุดของแอ่ง (Valley)
  - $R_t$  = ระยะระหว่างจุดที่สูงที่สุดของปลายยอดแหลม (Peak) และจุดที่ลึกที่สุดของแอ่ง (Valley)
- ถ้าค่า  $R_p$  และ  $R_v$  มีค่ามาก ๆ จะมีส่วนสำคัญต่อการสึกหรอของชิ้นส่วนของเครื่องจักร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.6.6.3 ความสูงของส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลง 10 จุด

ความสูงของส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลง 10 จุด ( $R_z$ ) มีวิธีการหาโดยส่วนของเส้นโค้งจากการวัดตัดออกด้วยความยาวอ้างอิงให้เลือกจุดสูงสุดที่สูงสุดของปลายยอดแหลม (Peak) 5 จุด และจุดที่ลึกที่สุดของแอ่ง (Valley) 5 จุด ดังรูปที่

2.11 ค่า  $R_z$  หาได้จากสมการ 2.2

วิธีการหานี้ดังนี้

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

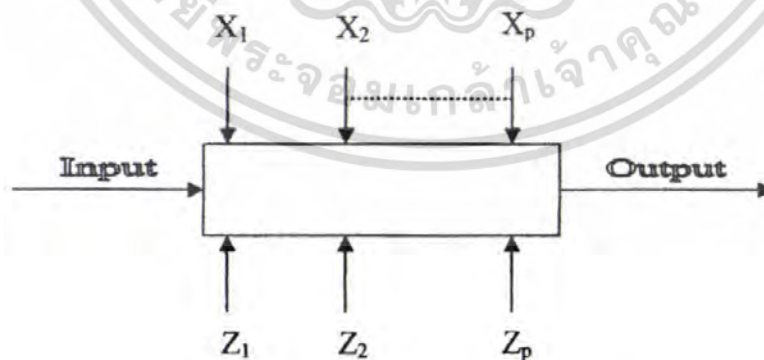
$V_{(1,2,3,4,5)}$  = เป็นค่าลึกที่สุดของแอ่ง (Valley)

$$R_z = \frac{1}{5} \{ (P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5) - (V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5) \} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $P_1$  เป็นค่าสูงที่สุดของปลายยอดแหลม และ  $V_2$  เป็นค่าสูงที่สุดอันดับที่สองของรอยแตกหรือแอ่ง และเรียงลำดับต่อไป สำหรับ  $R_z$  คือจุดสูงสุดและจุดต่ำสุดจำนวน 10 จุด ในความสูงของส่วนที่เปลี่ยนแปลงแสดงในรูปที่ 2.11 ลักษณะเสมือนภูเขาและหุบเขา ในเส้นโค้งที่ได้จากการวัดจะมียอดแหลมและแอ่งแต่ละส่วน 1 จุดเท่านั้น

## 2.7 หลักการออกแบบการทดลอง

การทดลองถูกสร้างขึ้นด้วยผู้ทดลอง ซึ่งมาจากหลายสาขาอาชีพที่ต้องการคำตอบจากระบบการหรือระบบที่ผู้ทดลองมีความสนใจ การทดลองในที่นี้อาจหมายถึงการทดสอบหรือชุดของการทดสอบที่คาดการณ์ว่าเมื่อเปลี่ยนตัวแปรป้อนเข้าของกระบวนการหรือระบบ จะเป็นผลให้ตัวแปรตอบสนองมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น ในงานทางด้านวิศวกรรมการทดลองมีบทบาทอย่างมากในการออกแบบผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ การพัฒนากรรมวิธีการผลิตของกระบวนการ และการปรับปรุงกระบวนการผลิต บางกรณีอาจต้องการพัฒนากระบวนการที่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจากแหล่งภายนอกกระบวนการจะมีผลกระทบไม่มากต่อกระบวนการ



รูปที่ 2.21 รูปแบบของกระบวนการหรือระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไป การทดลองถูกใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการ หรือ ระบบ (Process or System) รูปที่ 2.21 แสดงรูปของกระบวนการหรือระบบส่วนใหญ่จะสามารถมองเห็นภาพของกระบวนการเป็นการรวมกันของเครื่องจักร วิธีการ คน และทรัพยากรอื่น ๆ และเมื่อมีสิ่งป้อนเข้ามา (Input) สู่กระบวนการจะถูกเปลี่ยนรูปออกมาได้เป็นผลลัพธ์ (Output) ซึ่งผลลัพธ์ดังกล่าวอาจมีได้ตั้งแต่หนึ่งหรือมากกว่าหนึ่ง

จากรูปที่ 2.21 จะเห็นได้ว่ากระบวนการหรือระบบยังประกอบด้วยปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factors) คือ  $X_1, X_2, \dots, X_p$  และปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factors) คือ  $Z_1, Z_2, \dots, Z_p$

## 2.7.1 ปัจจัยในการผลิต

ปัจจัยในการผลิตสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

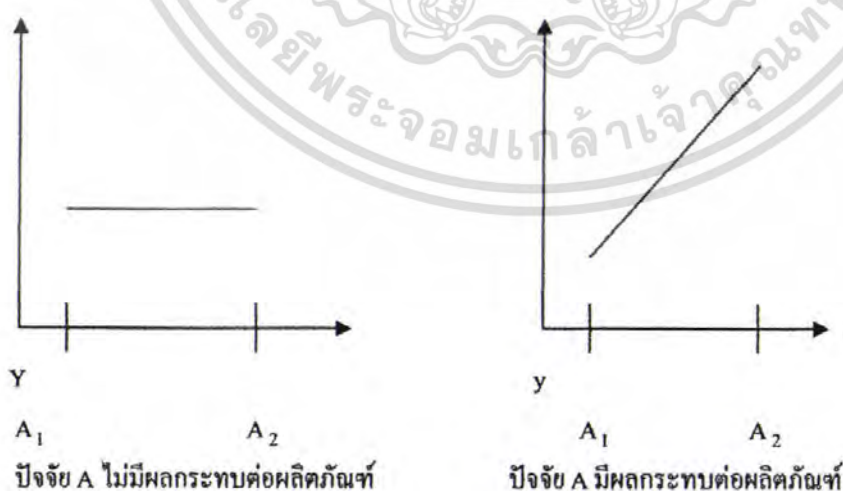
### 2.7.1.1 ปัจจัยที่ควบคุมได้

ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factor) หมายถึง ปัจจัยที่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในกระบวนการ ซึ่งเป็นผลดีต่อการทดลองเพราะโดยส่วนใหญ่ผู้ทำการทดลองต้องการกำหนดค่าต่างๆ ที่คิดว่ามีผลต่อค่าตอบสนองที่เราสนใจ

### 2.7.1.2 ปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้

ปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable) หมายถึง ปัจจัยที่ไม่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในกระบวนการ อันเนื่องมาจากเทคโนโลยีที่ไม่ทันสมัยพอหรือต้นทุนในการควบคุมสูงมาก ผู้ทดลองควนกำจัดปัจจัยลักษณะนี้เพื่อให้เปลี่ยนเป็นปัจจัยที่ควบคุมได้ จึงจะเป็นประโยชน์ต่อการทดลอง

การออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์ให้ได้ว่าปัจจัยใดมีอิทธิพลต่อปัจจัยได้หรือไม่ ต้องทำการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยอย่างน้อย 2 ระดับ แล้วทำการทดลองจากนั้นจึงวิเคราะห์ผลการทดลอง ตัวอย่างเช่น ให้  $y$  เป็นค่าความหยابผิวของชิ้นงาน  $A$  เป็นปัจจัยหนึ่งที่ใช้ในทดลอง ซึ่งจะสรุปผลเมื่อได้กราฟ แสดงดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 อิทธิพลที่ไม่มีผลและอิทธิพลที่มีผลของปัจจัยต่อผลิตภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7.2 วัตถุประสงค์ของการออกแบบการทดลอง

วัตถุประสงค์ในการออกแบบการทดลอง มีดังนี้

1. หาดัชนีแปรที่มีผลต่อค่าตอบสนอง  $y$  มากที่สุด
2. กำหนดค่า  $x$  ที่ทำให้ค่า  $y$  ใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการ
3. กำหนดค่า  $x$  ที่ทำให้ค่า  $y$  สมการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด
4. กำหนดค่า  $x$  ที่ทำให้ปัจจัยที่ควบคุม ไม่ได้มีผลน้อยที่สุด

## 2.7.3 คำจำกัดความ

### 2.7.3.1 อิทธิพลหรือผล

อิทธิพลหรือผล (Effect) หมายถึง ผลของตัวแปรต้นที่มีผลต่อตัวแปรตาม

### 2.7.3.2 ปัจจัย

ปัจจัย (Factor) หมายถึง สิ่งที่เราสนใจอิทธิพลต่อการทดลองของคุณสมบัติในตัวผลิตภัณฑ์

### 2.7.3.3 ระดับของปัจจัย

ระดับของปัจจัย (Level of factor) หมายถึง สถานะต่างๆ ของปัจจัยหนึ่งๆ ที่ทำการกำหนดในการทดลอง

### 2.7.3.4 ปัจจัยรบกวน

ปัจจัยรบกวน (Noise Factor) หมายถึง ปัจจัยที่ก่อให้เกิดผลกระทบเล็กๆ น้อยๆ และ ไม่สามารถควบคุมได้

## 2.7.4 หลักในการออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองเป็นกระบวนการวางแผนของการทดลองซึ่งข้อมูลในการดลองนั้นจะถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติ จนได้ข้อมูลสรุปของวัตถุประสงค์ที่ได้ตั้งไว้ หลักการทางสถิติถูกนำมาใช้ในการออกแบบการทดลองเพื่อทำความเข้าใจในข้อมูล และหาผลสรุปออกมานั่นเอง หลักในการออกแบบการทดลองมีดังนี้

### 2.7.4.1 การทำซ้ำ

การทำซ้ำ (Replication) คือ การทดลองซ้ำในแต่ละข้อมูลเพื่อที่จะกำจัดผลของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ ออกไป การทำซ้ำมีความสำคัญ 2 ประการ เพื่อประมาณค่าความผิดพลาดของการทดลอง และเพื่อประมาณค่าเฉลี่ยนั้นให้มีความมั่นใจมากขึ้น

#### 2.7.4.2 การทำแบบสุ่ม

การทำแบบสุ่ม (Randomization) คือ การให้โอกาสในการเก็บข้อมูลของข้อมูลในแต่ละตัวให้เท่ากันเพื่อกระจายผลของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ให้กับข้อมูลทุกระดับในการทดลองให้เท่า ๆ กันการทำแบบสุ่มสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 วิธีดังนี้

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

#### 2.7.4.3 การบล็อก

การบล็อก (Blocking) คือ การจัดกลุ่มทำการเก็บข้อมูลเป็นช่วงเพื่อลดผลจากปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ ทำให้การทดลองนั้นมีความเที่ยงตรงมากขึ้น การบล็อกส่วนใหญ่เกิดขึ้นกับวัสดุที่ใช้ในการทดลองนั้นไม่มีความสม่ำเสมอ จึงจำเป็นต้องแยกเอาผลวัสดุที่แตกต่างกันออกไปจะสนใจการทดลองที่เกิดขึ้นในแต่ละบล็อกเท่านั้น

#### 2.7.5 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

การใช้หลักการทางสถิติในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองเป็นสิ่งจำเป็น ผู้ทำการทดลองต้องมีความเข้าใจวิธีในการเก็บข้อมูลตลอดการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้มา

##### 2.7.5.1 การนิยามปัญหา

การนิยามปัญหา คือ การระบุว่าความต้องการในการผลิตคืออะไรและต้องการรู้อะไรบ้างในการผลิต ซึ่งการนิยามปัญหานี้จะเชื่อมโยงไปถึงวัตถุประสงค์ของการทดลอง

##### 2.7.5.2 การเลือกปัจจัยที่มีผลและระดับของปัจจัย

การเลือกปัจจัยที่มีผลและระดับของปัจจัย คือการหลักการทางทฤษฎีและประสบการณ์ที่เคยปฏิบัติมาในการผลิต เพื่อระบุว่าปัจจัยใดบ้างที่น่าจะมีผลต่อการทดลอง และแต่ละปัจจัยนั้นควรมีช่วงในการทดลองอย่างไร เพื่อระบุระดับของปัจจัยในการทดลองสุดท้ายเป็นการระบุที่ใช้เป็นแบบกำหนด (Fixed Levels) แบบสุ่ม (Random Level) หรือแบบผสม (Mixed Level)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.7.5.3 การเลือกตัวแปรตอบสนอง

การเลือกตัวแปรตอบสนอง (Response Variables) ผู้ทำการทดลองต้องมีความมั่นใจว่าเลือกตัวแปรที่สามารถให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อกระบวนการที่ทำการศึกษาค่าเฉลี่ยหรือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าที่จะใช้วัดเป็นตัวแปรตอบสนอง โดยทั่วไปจะเก็บข้อมูลของตัวแปรตอบสนองเพียงค่าเดียว แต่ก็มีบางการทดลองที่ทำการวัดค่าตัวแปรตอบสนองหลายค่า การวัดค่าจะต้องมีความแม่นยำทั้งความถูกต้องของเครื่องมือวัดด้วย

### 2.7.5.4 การเลือกแบบการทดลอง

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

### 2.7.5.5 การดำเนินการทดลอง

เมื่อทำการทดลอง ต้องทำการตรวจสอบการทดลองอย่างระมัดระวังว่ามีการดำเนินการตามที่วางไว้ ข้อควรระวังในการทดลองคือความถูกต้องของกระบวนการเครื่องมือวัด และความสม่ำเสมอในการทดลองเพื่อให้เกิดความผิดพลาดน้อยที่สุดเพราะความผิดพลาดในขั้นตอนนั้นจะทำให้การทดลองล้มเหลวได้

### 2.7.5.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

หลักการทางสถิติถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล และสรุปผลการทดลอง การวิเคราะห์ข้อมูลอาจใช้ซอฟต์แวร์เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ด้วย ซึ่งปัจจุบันมีซอฟต์แวร์อยู่หลายประเภทที่สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ได้ วิธีการถูกนำมาใช้อย่างได้ผลคือกราฟอย่างง่ายคือช่วยในการวิเคราะห์และตีความข้อมูลจากการทดลอง การตรวจสอบความเพียงพอของโมเดล (Model Adequacy Checking) เป็นสิ่งที่จำเป็นต้องทำการวิเคราะห์เพื่อความเชื่อมั่นของข้อมูลที่เก็บมาจากการทดลอง จึงจำไว้ว่าวิธีทางสถิติไม่สามารถพิสูจน์ได้ว่าปัจจัยมีอิทธิพล ได้อย่างแน่นอนเพียงแต่เป็นเครื่องมือที่ช่วยให้แนวทางในการวิเคราะห์ภายใต้ความเชื่อมั่น โดยระบุเป็นเปอร์เซ็นต์ในการสรุปผลการทดลอง แต่อย่างไรก็ดีการใช้หลักการทางสถิติช่วยให้การตัดสินใจเป็นนามธรรมมากยิ่งขึ้น

### 2.7.5.7 สรุปผลและข้อเสนอแนะ

เมื่อข้อมูลถูกวิเคราะห์จะต้องสรุปผลจากการวิเคราะห์ซึ่งอาจจะแสดงในรูปแบบของกราฟ ตาราง แผนภูมิ ตลอดจนให้ข้อเสนอแนะจากการทดลองเพื่อสรุปผลและควรที่จะมีการทดสอบเพื่อยืนยันผลจากการทดลองอีกครั้ง

## 2.7.6 การใช้หลักทางสถิติในการทดลอง

การใช้หลักทางสถิติในการทดลองนั้นผู้ทำการทดลองต้องมีความเข้าใจในประเด็นต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. ผู้ทำการทดลอง ต้องมีความรู้เกี่ยวกับงานในสาขาที่จะทำการทดลอง โดยใช้ความรู้ที่ไม่ใช่วิธีการทางสถิติในการพิจารณาปัญหาที่เกิดขึ้น

2. ผู้ทำการทดลอง ควรเลือกการออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ที่ง่ายและไม่ซับซ้อน
3. ผู้ทำการทดลองควรเข้าใจความแตกต่างระหว่างนัยสำคัญในทางปฏิบัติและนัยสำคัญทางสถิติ เพราะว่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในการทดลองซึ่งเรียกว่าความแตกต่างทางค่านสถิติมัน ไม่สามารถประกันได้ว่ามีความแตกต่างมากเพียงพอที่จะใช้ในทางปฏิบัติ และจะต้องคำนึงถึงต้นทุนว่าคุ้มค่าในการลงทุนหรือไม่
4. ผู้ทำการทดลอง ควรทำการทดลองซ้ำๆ หลายๆ ครั้งเพื่อให้แน่ใจว่าผลที่ได้ถูกต้อง

## 2.7.7 การตั้งสมมติฐานในการตรวจสอบ

### 2.7.7.1 ความหมายของสมมติฐานทางสถิติ

สมมติฐาน คือ ความเชื่อมั่นของบุคคลใดบุคคลหนึ่งหรือของกลุ่มของบุคคลใด ๆ หรืออาจกล่าวได้ว่าสมมติฐานเป็นสิ่งที่บุคคลหรือองค์กรคาดว่าจะเกิดขึ้น ความเชื่อมั่นหรือสิ่งที่คาดนั้นอาจเป็นจริงหรือไม่ก็ได้

### 2.7.7.2 ชนิดของสมมติฐาน

สมมติฐานแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ดังต่อไปนี้

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

สมมติฐานหลักที่ตั้งขึ้น เพื่อทดสอบว่าจะยอมรับหรือไม่ว่าเป็นจริง การปฏิเสธ ไม่ยอมรับสมมติฐานหลักก็คือการยอมรับสมมติฐานอื่นๆ ว่าเป็นจริง

ประเภทของสมมติฐาน สมมติฐานแบ่งออกเป็น 2 ประเภทดังต่อไปนี้

1. สมมติฐานเดี่ยว (Simple Hypothesis) คือ สมมติฐานที่กำหนดค่าเฉพาะของค่าพารามิเตอร์เฉพาะลงไปว่ามีค่าเท่ากับเท่าใด
2. สมมติฐานรวม (Composite Hypothesis) คือ สมมติฐานประเภทที่มีค่าพารามิเตอร์หลายค่า

### 2.7.7.3 ความผิดพลาดในการทดสอบสมมติฐาน

ความผิดพลาดในการทดสอบสมมติฐาน แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังต่อไปนี้

1. ความผิดพลาดประเภทที่ 1 (Type I Error) หรือเรียกโดยทั่วไปว่าระดับนัยสำคัญ (Level of Significance) ใช้สัญลักษณ์  $\alpha$  เป็นความผิดพลาดที่เกิดจากการปฏิเสธสมมติฐานหลักและยอมรับสมมติฐานอื่น ๆ โดยที่สมมติฐานหลักเป็นจริง

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

ในการทดสอบแต่ละครั้ง ผู้ทดสอบย่อมต้องการให้มีความผิดพลาดทั้งสองประเภท ( $\alpha$  และ  $\beta$ ) น้อยที่สุด แต่เมื่อค่าของ  $\alpha$  ลดลง ค่าของ  $\beta$  จะเพิ่มขึ้นในทำนองเดียวกัน เมื่อค่าของ  $\alpha$  เพิ่มขึ้น ค่าของ  $\beta$  จะลดลง ดังนั้นเมื่อต้องการลดค่าความผิดพลาดทั้งสองประเภทให้ลดลงได้พร้อม ๆ กันทำได้ด้วยการเพิ่มจำนวนข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ให้มากขึ้น

#### 2.7.7.4 การตั้งสมมติฐานในการออกแบบการทดลอง

การตั้งสมมติฐานในการออกแบบการทดลอง สามารถแบ่งเป็น 3 กรณี ดังต่อไปนี้

1. การออกแบบการทดลองแบบผลกระทบคงที่ (Fixed Effect Model) จะทำการตรวจสอบว่าปัจจัยต่าง ๆ มีผลกระทบต่อกระบวนการหรือไม่ สามารถตั้งสมมติฐานได้ดังต่อไปนี้

$H_0$ : ปัจจัยไม่มีผลต่อกระบวนการ

$H_1$ : ปัจจัยมีผลต่อกระบวนการ

หรือสามารถเขียนอยู่ในรูปสัญลักษณ์  $\mu$  เมื่อ  $\mu$  ค่าเฉลี่ยของปัจจัย

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

$H_1: \tau_i \neq 0$ ; อย่างน้อยที่สุดครั้งหนึ่ง

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

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

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

3. การออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixed Effect Model) เมื่อปัจจัยในการทดลองเป็นแบบผลกระทบคงที่ (Fixed Level) และแบบสุ่ม (Random Level) รวมกันจะต้องใช้การตั้งสมมติฐานของ 2 กรณีที่กล่าวข้างต้นโดยแยกตามลักษณะรูปแบบของปัจจัยนั้น ๆ

#### 2.7.8 ชนิดของแผนการออกแบบการทดลอง

##### 2.7.8.1 แผนการออกแบบการทดลองแบบปัจจัยเดียว

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

1. การออกแบบโดยสุ่มโดยสมบูรณ์ (Completely Randomized Design: CRD) เป็นการทดลองที่มีปัจจัยเดียว แต่จะทำการเปรียบเทียบระหว่างระดับของปัจจัยที่มีปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ มีผลกระทบน้อยและไม่มีปัจจัยรบกวนโดยการทดลองจะใช้หลักการทำแบบสุ่มและการทำซ้ำ

2. การทดลองแบบสุ่มโดยสมบูรณ์ภายในบล็อก (Completely Randomized Block Design) เป็นการทดลองที่มีปัจจัยเดียวและมีปัจจัยรบกวนที่มีผลกระทบต่อค่าตอบสนองและต้องทำการกำจัดปัจจัยรบกวนดังกล่าวทั้งบางครั้งปัจจัยรบกวนนั้น ไม่ทราบและสามารถควบคุมได้จึงต้องใช้วิธีการบล็อก (Blocking) ในการกำจัดผลของปัจจัยรบกวนนั้นออกไป

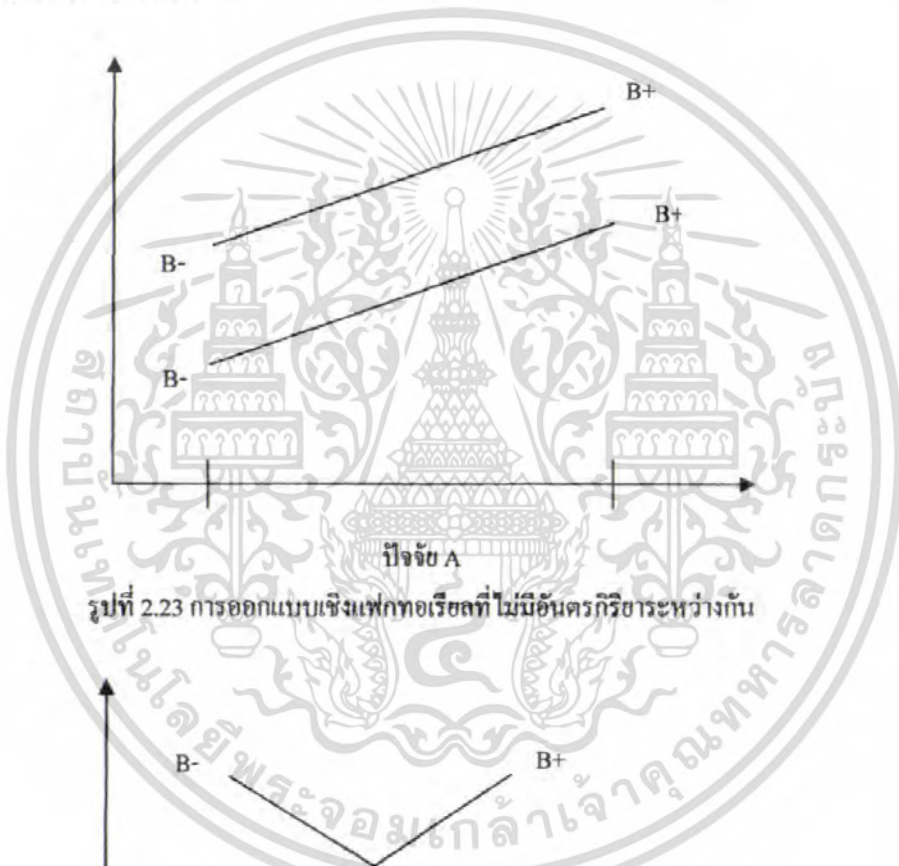
##### 2.7.8.2 แผนการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล

แผนการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design) เป็นการทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจาก

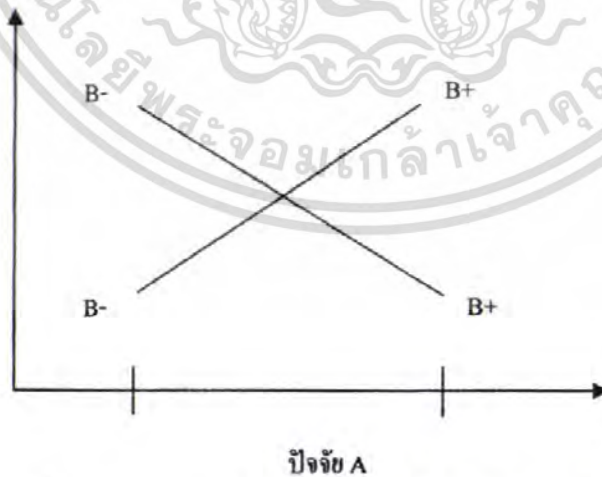
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การรวมกันของระดับ (Level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้นๆ จึงเป็นการทดลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุดโดยใช้ในการศึกษาถึงผลของปัจจัยตั้งแต่สองปัจจัยขึ้นไปตัวอย่างเช่น กรณี 3 ปัจจัย A ประกอบด้วย 2 ระดับ ปัจจัย B ระดับและปัจจัย C ประกอบด้วย 2 ระดับในการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง จะประกอบด้วย การทดลองทั้งหมด  $2 \times 2 \times 2 \times 3 = 24$  การทดลอง และเมื่อปัจจัยที่เกี่ยวข้องถูกนำมาให้อยู่ในรูปแบบของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล จึงกล่าวได้ว่า ปัจจัยเหล่านี้มีการไขว้ (Crossed) ซึ่งกันและกัน

ผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งหมายถึง การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับผลตอบสนอง (Response) ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยนั้น ๆ ซึ่งเรียกว่าปัจจัยหลัก (Main Effect) และหากผลตอบสนองของปัจจัยหนึ่งขึ้นกับระดับของปัจจัยอื่นๆ ซึ่งเรียกว่าการมีอันตรกิริยา (Interaction) ต่อกันระหว่างปัจจัยที่เกี่ยวข้อง แนวคิดดังกล่าวสามารถแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.23 และ 2.24



รูปที่ 2.23 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่ไม่มีอันตรกิริยาระหว่างกัน



รูปที่ 2.24 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่มีอันตรกิริยาระหว่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.23 จะเห็นได้ว่าเส้นของ B- และ B+ จะประมาณได้ว่าขนานกัน ซึ่งลักษณะของกราฟเช่นนี้จะบ่งบอกถึงการไม่มีอันตรกิริยาซึ่งกันและกันของปัจจัยทั้งสองในทำนองเดียวกัน จากรูปที่ 2.24 จะเห็นได้ว่าเส้นของ B- และ B+ ไม่ขนานกันและสามารถกล่าวได้ว่าปัจจัยทั้งสองมีอันตรกิริยาค่อกัน บ่อยครั้งที่กราฟลักษณะเช่นนี้จะถูกนำมาใช้เพื่อแสดงถึงการมีนัยสำคัญของอันตรกิริยา อย่างไรก็ตามกราฟเช่นนี้ไม่ควรนำมาใช้แทนเทคนิคการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ เพราะว่าการตีความจากกราฟค่อนข้างที่จะขึ้นกับความคิดเห็นส่วนบุคคล ซึ่งอาจทำให้เกิดความเข้าใจผิดหรือวิเคราะห์ผิดพลาดได้

รูปแบบของการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลยังแบ่งย่อยโรกรณีที่แผนการทดลองมีลักษณะเฉพาะตัวอีกดังต่อไปนี้

1. การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล  $2^k$  ( $2^k$  Factorial Design)

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล  $2^k$  เป็นการทดลองที่มี k ปัจจัย แต่ละปัจจัยจะมีระดับของปัจจัยอยู่ 2 ระดับ คือ ระดับต่ำ ใช้สัญลักษณ์ -1 หรือ (-) และระดับสูง ใช้สัญลักษณ์ 1 หรือ (+) การทดลองแบบนี้เหมาะสำหรับการทดลองที่มีปัจจัยมากๆ เป็นการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่มีอิทธิพลเบื้องต้นจะช่วยให้การทดลองที่เจาะลึกต่อไป

2. การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล  $3^k$  ( $3^k$  Factorial Design)

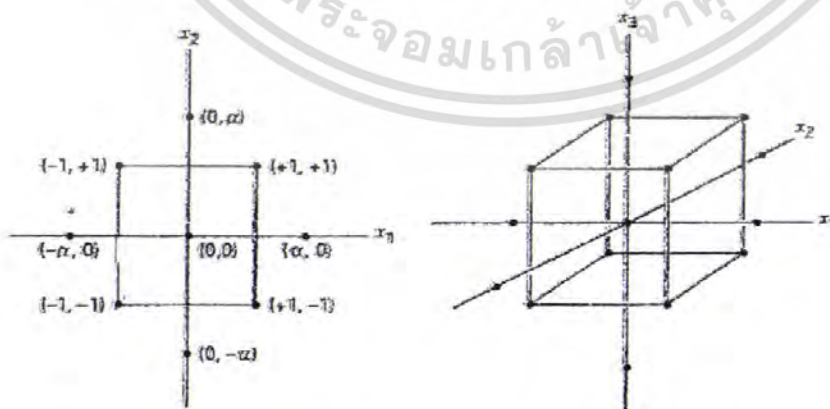
การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล  $3^k$  เป็นการทดลองที่มี k ปัจจัย แต่ละปัจจัยจะมีแต่ละระดับของปัจจัยอยู่ 3 ระดับ คือ ระดับต่ำ ใช้สัญลักษณ์ -1 หรือ (-1) ระดับกลาง ใช้สัญลักษณ์ 0 หรือ (0) และระดับสูง ใช้สัญลักษณ์ 1 หรือ (+) การทดลองแบบนี้เหมาะสมเมื่อทดลองกำลังสนใจผลตอบสนองที่มีลักษณะเป็นส่วนโค้ง

3. การออกแบบการทดลองเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล (Fractional Factorial Design)

การออกแบบการทดลองเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล เป็นการออกแบบที่ใช้ในกรณีเมื่อการทดลองมีหลายปัจจัย ทำให้ต้องเสียเวลาต้องเก็บข้อมูลมาก ดังนั้นจะทำให้ความสัมพันธ์ของทรีทเมนต์ (Treatment) ซึ่งจะทำให้ข้อมูลที่ใช้ในการทดลองนั้นลดลง

2.7.8.3 การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design)

โดยทั่วไป CCD จะประกอบด้วย  $2^k$  แฟกทอเรียลที่มี  $n_c$  รัน,  $2^k$  รันในแนวแกนหรือในแนวรูปดาว (Star) และ  $n_c$  รันที่จุดศูนย์กลาง ดังรูป 2.25 แสดง CCD สำหรับ  $k=2$  และ  $k=3$  ปัจจัย



รูปที่ 2.25 การออกแบบส่วนประสมกลาง สำหรับ  $k=2$  และ  $k=3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ CCD มีพารามิเตอร์อยู่ 2 ตัวในการออกแบบที่จะต้องถูกกำหนดคือ ระยะทาง  $\alpha$  ของการรันในแนวแกนจากจุดศูนย์กลางของการออกแบบ และจำนวนจุดศูนย์กลาง  $n_c$

**ความสามารถในการหมุน**

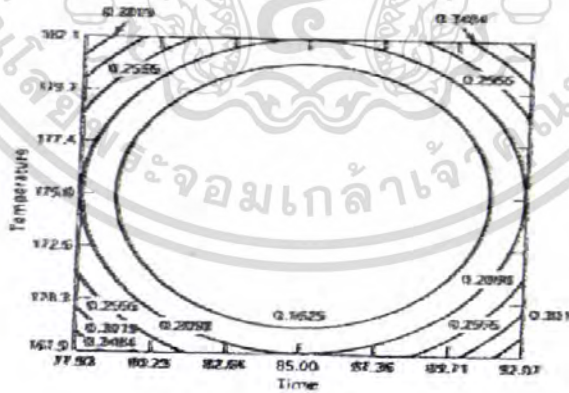
เป็นความสำคัญอย่างหนึ่งของแบบจำลองอันดับที่สอง ที่จะต้องมีความสามารถในการพยากรณ์ได้ตลอดบริเวณที่สนใจอยู่ วิธีการหนึ่งที่จะบอกว่า แบบจำลองนี้ดีก็คือ แบบจำลองนี้จะต้องอยู่กับร่องกับรอยอย่างมีเหตุผล และมีความแปรปรวนที่มีเสถียรภาพของผลตอบที่จุด  $X$  ซึ่งอยู่ในความสนใจ

$$V[\hat{y}(x)] = \sigma^2 x' (XX)x \tag{2.3}$$

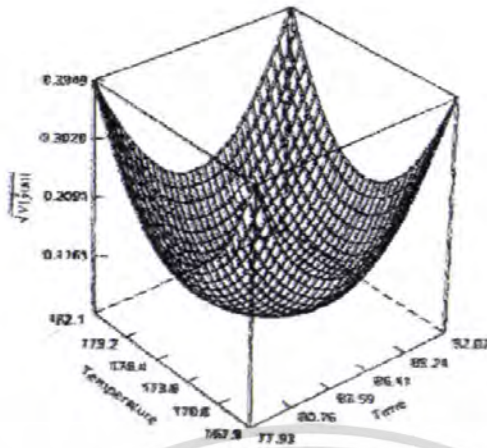
ซึ่งถูกแนะนำว่า การออกแบบพื้นผิวผลตอบอันดับที่สองควรจะสามารถในการหมุน (Rotatable) ซึ่งหมายความว่า  $V[\hat{y}(x)]$  คือ จุด  $x$  ทุกจุดที่มีระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของการออกแบบเท่ากัน นั่นคือค่าความแปรปรวนของผลตอบที่ถูกพยากรณ์จะมีค่าคงตัวบนรูปทรงกลม

รูปที่ 2.26 แสดงเส้นโครงร่างของค่าคงตัว  $\sqrt{V[\hat{y}(x)]}$  สำหรับแบบจำลองอันดับที่สองที่ถูกฝึกโดยใช้ CCD ซึ่งถ้าเส้นโครงร่างของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่มีค่าตัวของผลตอบที่ถูกพยากรณ์จะเป็นวงกลมที่มีศูนย์กลางร่วมกับการออกแบบที่มีคุณสมบัติเช่นนี้จะทำให้ค่าความแปรปรวนของ  $\hat{y}$  ไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อการออกแบบถูกหมุนรอบจุดศูนย์กลาง  $(0,0,\dots,0)$  ดังนั้นทำให้เราเรียกการออกแบบเช่นนี้ว่า การออกแบบที่สามารถหมุนได้ (Rotatable Design) การออกแบบส่วนประสมกลาง สามารถทำให้หมุนได้โดยการเลือกค่าของ  $\alpha$  ค่าของ  $\alpha$  สำหรับความสามารถหมุนได้ขึ้นอยู่กับจำนวนของจุดในส่วนแฟกทอเรียลของการออกแบบ ความจริงแล้ว

$\alpha = (n_f)^{1/4}$  จะทำให้เกิดการออกแบบส่วนประสมกลาง ที่สามารถหมุนได้ โดยที่  $n_f$  คือ จำนวนของจุดที่ถูกใช้ในส่วนแฟกทอเรียลของการออกแบบ



(a) contours of  $\sqrt{V[\hat{y}(x)]}$



(b) the response surface plot

รูปที่ 2.26 เส้น โครงร่างของพื้นผิวผลตอบที่มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานคงที่  
ที่ถูกทำนายสำหรับ CCD ที่สามารถหมุนได้

#### CCD รูปทรงกลม

ความสามารถในการหมุนเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของรูปทรงกลม (Sphere) นั่นคือ จะเป็นถาวรก็ตามถ้าจะใช้  
เกณฑ์การ ในการออกแบบเช่นนี้เมื่อบริเวณที่เรากำลังสนใจอยู่มีรูปทรงกลม อย่างไรก็ตามการออกแบบที่ดีไม่จำเป็นว่า  
ต้องให้เกิดความสามารถ ในการหมุนได้อย่างถูกต้อง 100 % ในความเป็นจริงแล้ว สำหรับบริเวณทรงกลมที่เรากำลัง  
สนใจ ทางเลือกที่ดีที่สุดสำหรับ  $\alpha$  หาได้จากการศึกษาการแปรปรวนสำหรับ CCD ซึ่งกำหนดให้  
 $\alpha = \sqrt{k}$  การออกแบบเช่นนี้เรียกว่าการออกแบบ CCD รูปทรงกลม (Spherical CCD) ซึ่งจะกำหนดให้จุดทุกจุดที่อยู่ใน  
การออกแบบแฟกทอเรียล และการออกแบบในแนวแกน ให้อยู่บนพื้นผิวของทรงกลมซึ่งมีรัศมี  $\sqrt{k}$   
จุดศูนย์กลางของการรันใน CCD

การเลือก  $\alpha$  ใน CCD จะถูกกำหนดโดยบริเวณที่เราสนใจ เมื่อบริเวณนี้เป็นรูปทรงกลม การออกแบบจะต้อง  
เลือกเอาจุดศูนย์กลางของกลางรันเข้าไว้ด้วย ทั้งนี้เพื่อจะทำให้ค่าแปรปรวนของผลตอบที่พยากรณ์ได้มีเสถียรภาพ  
อย่างเต็มที่ยอมรับได้ ตามปกติแล้ว แนะนำให้ใช้ 3-5 รัน(อ้างอิง)

#### 2.7.8.4 แบบจำลองการถดถอยแบบเชิงเส้น

แบบจำลองการถดถอยกำลังหนึ่ง เป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระตั้งแต่  
สองตัวขึ้นไป โดยที่ความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสองเป็นเส้นตรง ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสองได้เป็น

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \varepsilon \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองการถดถอยกำลังสอง เป็นวิเคราะห์เมื่อทดลองอยู่ใกล้เคียงกับจุดที่ดีที่สุด แบบจำลองที่สามารถแสดงส่วนโค้งได้น่าจะใช้ในการประมาณค่าของผลตอบ ส่วนมากแบบจำลองกำลังสองจะมีรูปแบบดังนี้

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \sum b_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2.5)$$

โดย  $y$  = ค่าพื้นผิวผลตอบ  $\beta$  =  
 $K$  = จำนวนปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง  $\varepsilon$  = ค่าความผิดพลาด  
 $x_i$  = Coded Variables  $b_{ij}$  = ตัวแปรอิสระ

### 2.7.8.5 การทดสอบ Lack of Fit

เป็นวิธีการทดสอบสมมติฐานว่าค่าที่ทดลองมาเป็นที่ยอมรับได้หรือไม่ โดยแสดงถึงวิธีการเคมจุดศูนย์กลางเข้าไปยังการออกแบบแฟกทอเรียล  $2^k$  ที่ทำให้ผู้ทำการทดลองสามารถหาตัวประมาณของความผิดพลาดในการทดลองโดยตรงได้ และทำให้เราสามารถแบ่งผลรวมของกำลังสองตกค้าง  $SS_E$  ไปเป็นสองส่วนได้คือ

$$SS_E = SS_{PE} + SS_{LOF} \quad (2.6)$$

โดยที่  $SS_{PE} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 \quad (2.7)$

$$SS_{LOF} = \sum_{i=1}^m n_i (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2 \quad (2.8)$$

สถิติที่ใช้ในการทดสอบ Lack of Fit

$$F = \frac{SS_{LOF} / (m - p)}{SS_{PE} / (n - m)} = \frac{MS_{LOF}}{MS_{PE}} \quad (2.9)$$

ค่าคาดหวังของ  $MS_{PE}$  คือ  $\sigma^2$  และค่าคาดหวังของ  $MS_{LOF}$  คือ

$$E(MS_{LOF}) = \sigma^2 + \frac{\sum_{i=1}^m [E(y_i) - \beta_0 - \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij}]^2}{m - 2} \quad (2.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าฟังก์ชันการถดถอยเป็นเส้นตรงจริง ดังนั้น  $E(y_i) = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_{ij}$  และทอจน์ที่สองของสมการ เท่ากับ 0 ทำให้  $E(MS_{LOF}) = \sigma^2$  อย่างไรก็ตาม ถ้าฟังก์ชันการถดถอยไม่เป็นเส้นตรง ดังนั้น  $E(y_i) \neq \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_{ij}$  และ  $E(MS_{LOF}) \neq \sigma^2$  ยิ่งกว่านั้นถ้าฟังก์ชันการถดถอยเป็นแบบเชิงเส้น ดังนั้นสถิติ  $F_0$  จะมีการกระจายแบบ  $F_{m-p, n-m}$  ดังนั้น เพื่อเป็นการทดสอบ Lack of Fit เราก็ควรจะคำนวณตัวทดสอบสถิติ  $F_0$  และสรุปว่าฟังก์ชันการถดถอยไม่เป็นเชิงเส้นถ้า  $F_0 > F_{\alpha, m-p, n-m}$

ถ้าเราสรุปได้ว่าฟังก์ชันการถดถอยไม่เป็นเส้นตรง ดังนั้น แบบจำลองที่กำลังพิจารณาอยู่ก็ไม่ควรจะถูกนำมาพิจารณาต่อ

**สูตรที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง**

สมการ

$$X_i = \frac{2X - (X_{\max} + X_{\min})}{[X_{\max} - X_{\min}]} \tag{2.11}$$

โดย

- $X_i$  คือ Coded variable of ON, IP และ S
- $X$  คือ Natural variables

**2.7.8.6 แผนการออกแบบการทดลองอื่น ๆ**

แผนการออกแบบการทดลองอื่น ๆ มีดังนี้

1. แผนการออกแบบการทดลองลาตินสแควร์ (Latin Square Design)
2. แผนการออกแบบการทดลองเนสต์เต็ด (Nested Design)
3. แผนการออกแบบการทดลองสปีทพล็อต (Split-Plot-Design)

**2.7.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวน**

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) คือ เทคนิคที่ใช้ในการจัดสรรความแปรปรวนหรือความผันแปรที่เกิดขึ้นในข้อมูลออกเป็นส่วนย่อย ๆ ตามแหล่งที่คาดว่าทำให้เกิดความผันแปร ความผันแปรที่เกิดในข้อมูลเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{ความผันแปรทั้งหมด} = \text{ความผันแปรเนื่องจากปัจจัย} + \text{ความผันแปรโดยธรรมชาติของข้อมูล} \tag{2.12}$$

สมการ 2.12 ได้จากข้อคิดที่ว่า ความแตกต่างกันของข้อมูลไม่น่าจะมาจากสาเหตุของความผันแปร โดยธรรมชาติ หรือที่เรียกกันว่าความผิดพลาดแบบสุ่มของข้อมูลแต่เพียงอย่างเดียวแต่น่าจะมาจากปัจจัยหนึ่งปัจจัยใดหรือหลายๆ ปัจจัยที่ทำให้เกิดความผันแปร ดังนั้นความผันแปรทั้งหมดที่เกิดขึ้นกับข้อมูลจึงเนื่องมาจากอิทธิพลของปัจจัยของธรรมชาติของข้อมูล

ปัจจัยที่คาดว่าจะมีอิทธิพลต่อความผันแปรของข้อมูลถือได้ว่าเป็นตัวแปรอิสระซึ่งมีผลต่อตัวแปรตามโดยเป็นข้อมูลที่วัดผลหรือเก็บรวบรวมมา ตัวแปรอิสระดังกล่าวมักจะ ไม่ได้มีเพียงค่าเดียวแต่จะมีหลายค่าซึ่งเรียกว่าระดับ

ของปัจจัย ถ้าปัจจัยนั้นมีผลต่อตัวแปรตามจริงๆ แต่ละระดับก็จะมีผลต่อตัวแปรตามไม่เหมือนกัน การวิเคราะห์จึงทำโดยการทดลองกำหนดค่าตัวแปรอิสระที่ระดับต่างๆ เพื่อหาตัวแปรตามที่เกิดขึ้นจากการทดลองนั้นๆ แล้วนำไปวิเคราะห์ดูว่าความผันแปรที่เกิดขึ้นจากความแตกต่างของการทดลองนั้นมีนัยสำคัญหรือไม่เมื่อเทียบกับความผันแปรโดยธรรมชาติของตัวแปรตาม และเพื่อที่จะช่วยให้ผู้วิเคราะห์มีความเชื่อมั่นในผลของการวิเคราะห์ที่ได้จากการทดลองมักจะต้องทำการทวนซ้ำให้ได้จำนวนข้อมูลที่แต่ละการทดลองมากพอ การเลือกระดับของปัจจัยดำเนินการเจาะจงรูปแบบของการทดลองจะถูกเรียกว่าแบบผลกระทบคงที่ (Fixed Effect Model) ผลที่ได้จากการทดลองจะสรุปเฉพาะอิทธิพลของปัจจัยที่ระดับที่นำมาทดลอง แต่ถ้าเลือกระดับของปัจจัยเป็นการเลือกสุ่ม รูปแบบของการทดลองจะเป็นแบบสุ่ม (Random Effect Model) ผลที่ได้จากการทดลองจะสรุปอิทธิพลโดยรวมของปัจจัย

จาก ความผันแปรทั้งหมด = ความผันแปรเนื่องจากปัจจัย + ความผันแปรโดยธรรมชาติของข้อมูลหรือเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ได้เป็น

$$SS_T = SS_{Tr} + SS_E \quad (2.13)$$

โดยที่  $SS_T$  คือ ผลบวกกำลังสองทั้งหมด  
 $SS_{Tr}$  คือ ผลบวกกำลังสองเนื่องจากอิทธิพลของปัจจัย  
 $SS_E$  คือ ผลบวกกำลังสองเนื่องจากความผิดพลาดแบบสุ่ม

การวัดความผันแปรของข้อมูลในการทดลองนั้นจะใช้ตัวประมาณค่าของความแปรปรวน (Variance) ที่ดีที่สุดคือ ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสอง (Mean Square : MS) โดยที่ค่า MS สามารถคำนวณได้จาก

$$MS = \frac{SS}{DF} \quad (2.14)$$

เมื่อ

$SS$  คือ ผลบวกกำลังสอง (Sum of Square)

$DF$  คือ ชั้นของความอิสระ

สถิติทดสอบ (Test Statistic) ที่นำมาเปรียบเทียบค่าความผันแปรคือ

$$F = \frac{MS_{Tr}}{ME_E} \quad (2.15)$$

เมื่อ

$MS_{Tr}$  คือ ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสองของปัจจัย

$ME_E$  คือ ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสองของความผิดพลาดแบบสุ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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)

$v_1$  คือ ชั้นของความอิสระปัจจัย

$v_2$  คือ ชั้นของความอิสระของความผิดพลาดแบบสุ่ม

### 2.7.9.1 รูปแบบเชิงเส้นทางสถิติ

ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนนั้นจำเป็นต้องสร้างรูปแบบเชิงเส้นทางสถิติ (Linear Statistical Model) ขึ้น  
ด้วย ซึ่งรูปแบบเชิงเส้นทางสถิติจะขึ้นอยู่กับรูปแบบของแผนการออกแบบการทดลอง จะแสดงดังตัวอย่างต่อไปนี้

การวิเคราะห์ความแปรปรวนกรณีที่มี 3 ปัจจัย รูปแบบเชิงเส้นทางคือ

$$y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \epsilon_{ijkl} \quad (2.16)$$

โดยที่

$i = 1, 2, 3, a$  (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

โดยข้อมูลจะถูกนำมาคำนวณแล้วใส่ไว้ในตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัย แสดงได้ดังตารางที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 แสดงการคำนวณการวิเคราะห์ความแปรปรวน

Source of Variation	Sum of Square	Degree of Freedom	Mean Square	F <sub>0</sub>
A	SS <sub>A</sub>	a-1	SS <sub>A</sub> / DF	MS <sub>A</sub> / MS <sub>E</sub>
B	SS <sub>B</sub>	b-1	SS <sub>B</sub> / DF	MS <sub>B</sub> / MS <sub>E</sub>
C	SS <sub>C</sub>	c-1	SS <sub>C</sub> / DF	MS <sub>C</sub> / MS <sub>E</sub>
AB	SS <sub>AB</sub>	(a-1)(b-1)	SS <sub>AB</sub> / DF	MS <sub>AB</sub> / MS <sub>E</sub>
AC	SS <sub>AC</sub>	(a-1)(c-1)	SS <sub>AC</sub> / DF	MS <sub>AC</sub> / MS <sub>E</sub>
BC	SS <sub>BC</sub>	(b-1)(c-1)	SS <sub>BC</sub> / DF	MS <sub>BC</sub> / MS <sub>E</sub>
ABC	SS <sub>ABC</sub>	(a-1)(b-1)(c-1)	SS <sub>ABC</sub> / DF	MS <sub>ABC</sub> / MS <sub>E</sub>
Error	SS <sub>E</sub>	Abc(n-1)	SS <sub>E</sub> / DF	
Total	SS <sub>T</sub>	Abcn-1		

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^m y_{ijkl}^2 - \frac{y^2 \dots}{abcn}$$

$$SS_A = \frac{1}{bcn} \sum_{i=1}^a y_{i\dots}^2 - \frac{y^2 \dots}{abcn}$$

$$SS_B = \frac{1}{bcn} \sum_{j=1}^b y_{j\dots}^2 - \frac{y^2 \dots}{abcn}$$

$$SS_C = \frac{1}{bcn} \sum_{k=1}^c y_{k\dots}^2 - \frac{y^2 \dots}{abcn}$$

$$SS_{AB} = \frac{1}{cn} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij\dots}^2 - \frac{y^2 \dots}{abcn} - SS_A - SS_B$$

$$SS_{AC} = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^c y_{ik\dots}^2 - \frac{y^2 \dots}{abcn} - SS_A - SS_C$$

$$SS_{BC} = \frac{1}{an} \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c y_{jk\dots}^2 - \frac{y^2 \dots}{abcn} - SS_B - SS_C$$

$$SS_{ABC} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c y_{ijk\dots}^2 - \frac{y^2 \dots}{abcn} - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{BC}$$

$$SS_E = SS_T - SS_{ABC}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบสมมติฐานของการทดลอง จะใช้ค่าสถิติทดสอบที่มีการกระจายแบบเอฟ (F- Distribution) โดยกำหนดค่า  $\alpha$  ก่อน หากค่า  $F < F_{\alpha, v_1, v_2}$  ขอมรับ  $H_0$  นั่นคือปัจจัยไม่มีผลต่อค่าตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ ความเชื่อมั่น  $(1 - \alpha) \%$  แต่ถ้าหาก  $F \geq F_{\alpha, v_1, v_2}$  ปฏิเสธ  $H_0$  นั่นคือปัจจัยนั้นมีผลต่อค่าตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น

### 2.7.9.2 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model Adequacy Checking) เป็นวิธีการตรวจสอบที่ทำให้ทราบว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนมีความน่าเชื่อถือเป็นไปตามหลักการสถิติหรือไม่ โดยอาศัยข้อสมมติฐานที่สำคัญซึ่งอธิบายได้โดยใช้แบบจำลองดังต่อไปนี้

$$y_{ij} = \mu + \tau_j + \varepsilon_{ij} \tag{2.17}$$

โดยที่

- $y_{ij}$  คือ ค่าตัวแปรตอบสนองหรือตัวแปรตาม
- $\mu$  คือ ค่าเฉลี่ยซึ่งเป็นค่าคงที่
- $\tau_j$  คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัย
- $\varepsilon_{ij}$  คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของความผิดพลาดแบบสุ่ม

โดยความผิดพลาดแบบสุ่ม (Random Error) จะต้องมีการแจกแจงแบบปกติและเป็นอิสระต่อกันด้วยค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และ  $\sigma^2$  มีค่าคงตัวและไม่ทราบค่าซึ่งเขียนเป็นสัญลักษณ์ได้ดังนี้  $\varepsilon_{ij} \sim NID(0, \sigma^2)$  ถ้าสมมติฐานเหล่านี้เป็นจริงกระบวนการวิเคราะห์ความแปรปรวนนี้ก็จะเป็นการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับการไม่มีความแตกต่างในค่าเฉลี่ยของระดับที่ถูกต้อง

ในทางปฏิบัติสมมติฐานมักจะไม่เป็นเช่นนี้ ซึ่งจะเชื่อถือผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนได้ก็ต่อเมื่อสามารถตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐานว่าเป็นจริงเสียก่อน โดยสามารถตรวจสอบสมมติฐานขั้นต้นและความถูกต้องของแบบจำลองได้โดยการตรวจสอบส่วนตกค้าง (Residual) สำหรับค่าสังเกต  $j$  ของระดับที่  $i$  ส่วนตกค้างจะมีค่าเป็น

$$e_{ij} = y_{ij} - \hat{y}_{ij} \tag{2.18}$$

โดยที่  $\hat{y}_{ij}$  คือค่าประมาณของค่าสังเกต  $y_{ij}$  ซึ่งหาได้จาก

$$\begin{aligned} y_{ij} &= \mu + \tau_j \\ &= \hat{y} + (\hat{y}_j - \hat{y}) \\ &= \hat{y}_j \end{aligned}$$

จากสมการค่าประมาณของค่าสังเกตใด ๆ ในระดับที่  $i$  ก็คือค่าเฉลี่ยของระดับนั้น ๆ ดังนั้นการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบมีอยู่ 3 ประเภท คือ

1. การตรวจสอบการแจกแจงของข้อมูลว่าเป็นการกระจายแบบปกติหรือไม่ โดยนำส่วนตกค้าง (Residual) ไปทดสอบโดยใช้วิธีดังต่อไปนี้

- การทดสอบแบบไคร์สแควร์ ( $\chi^2$  - Goodness of Fit Test)
- การทดสอบแบบโคลโกโมรอฟ - สเมอรันอฟ (Kolmogorov - Smirnov Test)
- การทดสอบโดยใช้กระดาษตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติ (NOPP)

2. การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล เป็นการตรวจสอบข้อมูลว่ามีความเป็นอิสระซึ่งกันและกันหรือไม่ทดสอบโดยใช้แผนภูมิกระจาย (Scatter Plot) ระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลแล้วดูลักษณะของข้อมูลว่ามีการกระจายตัวเป็นอิสระหรือมีลักษณะเป็นรูปแบบใด ๆ

3. การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูลทดสอบโดยใช้แผนภูมิการกระจาย (Scatter Plot) ระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับค่าที่ถุกฟิต (Fitted Value) ถ้าหากข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวนหรือมีความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของข้อมูล รูปที่พล็อตขึ้นมาจะกระจายอยู่ทั่วไป ไม่มีรูปแบบหรือโครงสร้างใดๆทั้งสิ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรอื่นใด และทดสอบโดยใช้แผนภูมิการกระจาย (Scatter Plot) ระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับระดับของปัจจัยแต่ละปัจจัย ถ้าหากข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวนหรือมีความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของข้อมูล รูปที่พล็อตขึ้นมาจะมีลักษณะเป็นทรงกระบอก แต่ถ้ารูปที่พล็อตขึ้นมาเป็นการเพิ่มขึ้นหรือลดลงเป็นลำดับแสดงว่าข้อมูลนั้นไม่มีความเสถียรของความแปรปรวนหรือไม่มีความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล

#### 2.7.10 แบบจำลองการถดถอย

สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ ดังต่อไปนี้

##### 2.7.10.1 แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย

แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Single Liner Regression Model) เป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระหนึ่งตัว โดยที่ความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสองเป็นเส้นตรง ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองได้ดังต่อไปนี้

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \varepsilon \quad (2.19)$$

##### 2.7.10.2 แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นเชิงซ้อน

แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นเชิงซ้อน (Multiple Liner Regression Model) เป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระตั้งแต่สองตัวขึ้นไป โดยที่ความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสองเป็นเส้นตรง ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสองได้ดังต่อไปนี้

$$y = \beta_0 + \sum \beta_i x_i + \varepsilon \quad (2.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.7.10.3 แบบจำลองการถดถอยอย่างอื่น

แบบจำลองการถดถอยอย่างอื่น (Other Regression Model) ได้แก่

1. แบบจำลองการถดถอยเส้นโค้งเอกโปเนนเชียล (Exponential) ที่มี 1 ตัวแปรอิสระ ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองได้ดังต่อไปนี้

$$y = e^{\beta_0 + \beta_1 x} + \varepsilon \quad (2.21)$$

2. แบบจำลองการถดถอยเส้นโค้งไฮเพอโบลิก (Hyperbolic) ที่มี 1 ตัวแปรอิสระ ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองได้ดังต่อไปนี้

$$y = \frac{\beta_0 + \beta_1}{x + \varepsilon} \quad (2.22)$$

3. แบบจำลองการถดถอยเส้นโค้งพหุนาม (Polynomial) ดีกรี n ที่มี 1 ตัวแปรอิสระซึ่งเขียนความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองได้ดังต่อไปนี้

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + \beta_3 x^3 + \dots + \beta_n x^n + \varepsilon \quad (2.23)$$

วิธีการหาแบบจำลองการถดถอยแล้ว ทำได้โดยการแปลงลักษณะความสัมพันธ์ของตัวแปรให้อยู่ในรูปของเส้นตรงก่อน หลังจากวิเคราะห์หาแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นตรงได้แล้ว จึงเปลี่ยนรูปความสัมพันธ์ของตัวแปรไปอยู่รูปเดิม

เมื่อทราบแบบจำลองการถดถอยแล้ว จะต้องตรวจสอบขนาดของความแปรปรวนที่เกิดขึ้นในตัวแปรตามที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระ ที่เรียกว่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (The Coefficient of Determination : R-Square) ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R-Square) แสดงโดยใช้ค่าสัดส่วนของความแปรปรวนที่เกิดขึ้นในตัวแปรตามที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระต่อความแปรปรวนทั้งหมดที่เกิดขึ้นทั้งหมดในตัวแปรตาม ดังนั้น R-Square จะอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

ถ้า R-Square มีค่าเข้าใกล้ 0 เช่น R-Square = 0.1 แสดงว่า 10% ของความแปรปรวนที่เกิดขึ้นในตัวแปรตามที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระ ส่วนอีก 90% ที่เหลืออาจเกิดขึ้นจากปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้

ถ้า R-Square มีค่าเข้าใกล้ 1 เช่น R-Square = 0.9 แสดงว่า 90% ของความแปรปรวนที่เกิดขึ้นในตัวแปรตามที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระ ส่วนอีก 10% ที่เหลืออาจเกิดขึ้นจากปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้

ถ้า R-Square มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่า ความแปรปรวนทั้งหมดที่เกิดขึ้นในตัวแปรตามไม่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระ

ถ้า R-Square มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่า ความแปรปรวนทั้งหมดที่เกิดขึ้นในตัวแปรตามไม่สามารถอธิบาย

#### 2.7.10.4 การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลอง เป็นเครื่องมือที่สำคัญในงานด้านวิศวกรรมสำหรับการเพิ่มสมรรถนะของวิธีการผลิตของกระบวนการ ซึ่งมักจะทำให้เกิดการพัฒนาในกระบวนการใหม่ การประยุกต์ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองในการพัฒนากระบวนการสามารถพิจารณาในรูปแบบต่อไปนี้

- การเพิ่มผลผลิตของกระบวนการ
- การลดความผันแปรของกระบวนการและกระบวนการมีค่าใกล้เคียงกับเป้าหมายที่ต้องการ
- การลดเวลาที่ต้องใช้ในการพัฒนา
- การลดต้นทุนโดยรวมของกระบวนการ

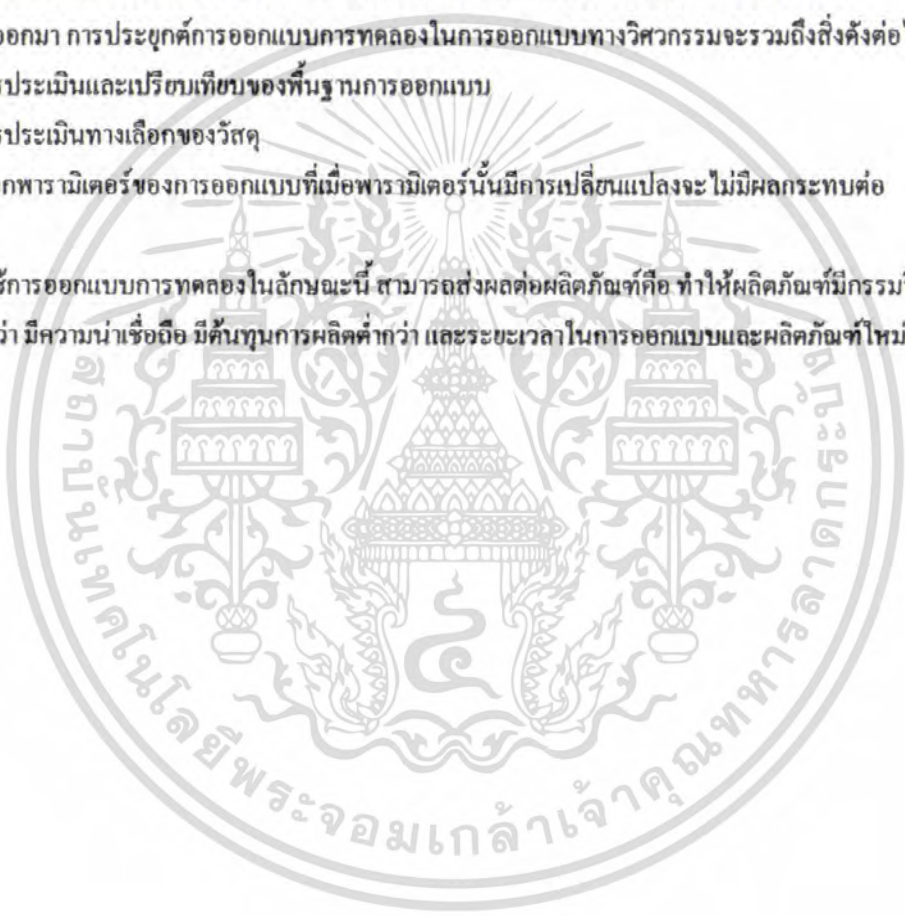
วิธีการออกแบบการทดลอง มีบทบาทอย่างมากในการออกแบบทางวิศวกรรมทำให้มีการพัฒนา

ผลิตภัณฑ์ใหม่ออกมา การประยุกต์การออกแบบการทดลองในการออกแบบทางวิศวกรรมจะรวมถึงสิ่งดังต่อไปนี้

- การประเมินและเปรียบเทียบของพื้นฐานการออกแบบ
- การประเมินทางเลือกของวัสดุ
- เลือกพารามิเตอร์ของการออกแบบที่เมื่อพารามิเตอร์นั้นมีการเปลี่ยนแปลงจะไม่มีผลกระทบต่อ

ผลิตภัณฑ์

การใช้การออกแบบการทดลองในลักษณะนี้ สามารถส่งผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์คือ ทำให้ผลิตภัณฑ์มีกรรมวิธีการผลิตที่ง่ายกว่า มีความน่าเชื่อถือ มีต้นทุนการผลิตต่ำกว่า และระยะเวลาในการออกแบบและผลิตภัณฑ์ใหม่สั้นกว่า



## บทที่ 3

### อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

จากการทำการทดลองเกี่ยวกับ การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (Material Removal Rate: MRR) อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (Electrode Wear Rate: EWR) ระยะเวลาตัดเกิน (Overcut) และความหยาบผิวของชิ้นงาน (Surface Roughness) ทำให้ทราบถึงหลักการทำงานของเครื่องอีดีเอ็ม (EDM) เครื่องวัดค่าความหยาบผิว เครื่องมือวัดระยะตัดเกิน กรรมวิธีการทดลอง วัสดุและขั้นตอนต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งสามารถแบ่งเป็นหัวข้อหลักๆ ได้ดังนี้

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

#### 3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

ในกรรมวิธีการสปาร์คของเครื่องอีดีเอ็ม วัสดุที่นำมาใช้ในการทดลองโดยกรรมวิธีการสปาร์คของเครื่องอีดีเอ็ม จะเป็นชิ้นงานเหล็กกล้าที่ใช้ทำแม่พิมพ์ ซึ่งเหล็กกล้าที่นำมาใช้คือ เหล็กกล้า AUD 11 ซึ่งได้พัฒนามาจากเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 ส่วนอิเล็กโทรด (Electrode) ที่นำมาใช้ในการทดลองทำมาจากแท่งทองแดงมีหน้าตัดเป็นวงกลม เป็นลักษณะแท่งทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร

### 3.1.1 อิเล็กโทรด

อิเล็กโทรดมีหลายขนาดและหลายประเภทแต่ในการทดลองจะมีรูปร่างหน้าตัดวงกลมเป็นรูปทรงแท่ง กระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร โดยมีส่วนผสมทางเคมี Cr = 0.70 - 0.96 wt% Zr = 0.31 - 0.42 wt% และที่เหลือเป็นทองแดงบริสุทธิ์ (Cu)



รูปที่ 3.1 อิเล็กโทรด

### 3.1.2 ชิ้นงานทดลอง

เหล็กกล้าเครื่องมือ AUD 11 มีขนาด 33×33×33 มิลลิเมตร โดยมีส่วนผสมทางเคมี C = 1.08 wt% Si = 1.05 wt% Mn = 0.58 wt% P = 0.19 wt% S = 0.05 wt% Cr = 9.86 wt% Mo = 1.50 wt% V = 0.05 wt% P=0.19% Cu=0.02% Ni=0.16%



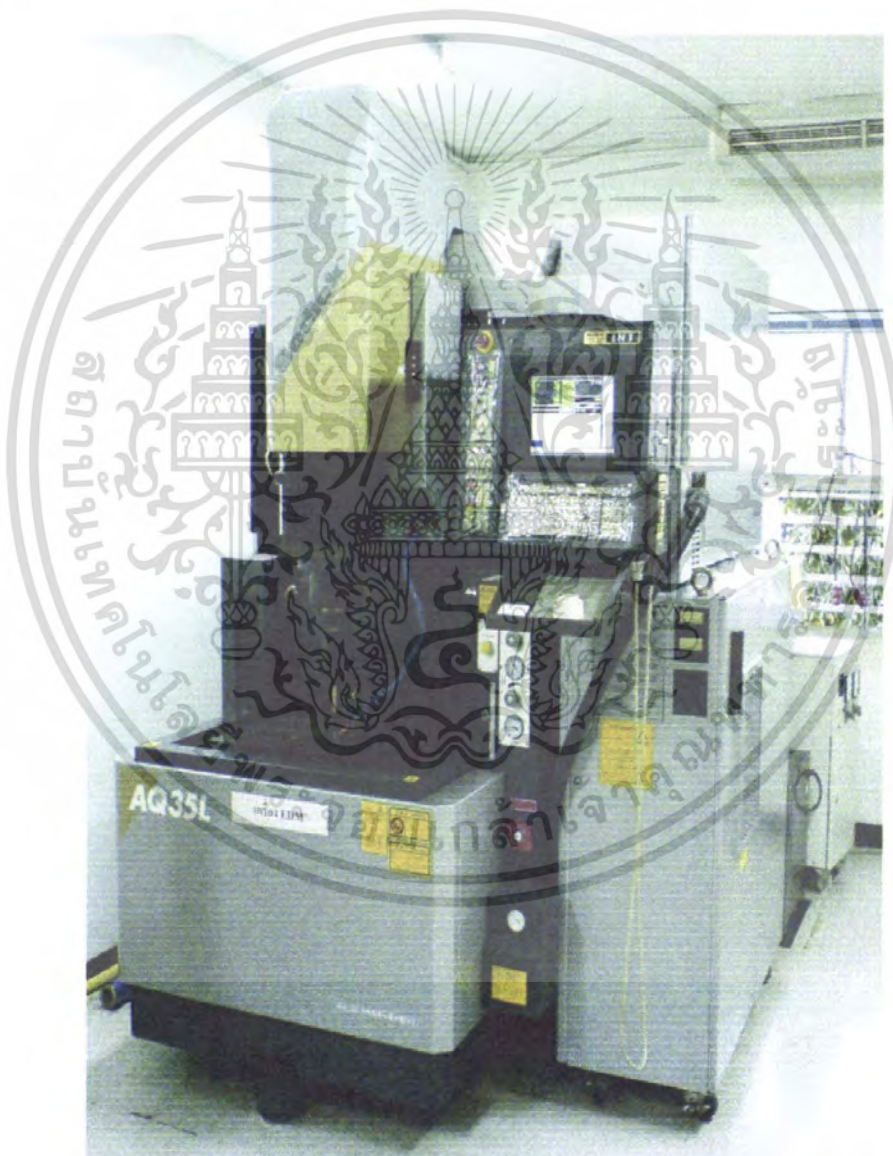
รูปที่ 3.2 ชิ้นทดสอบเหล็กกล้า AUD 11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

### 3.2.1 เครื่องอีซีเอ็ม

เป็นเครื่องรุ่น AQ35L มีระบบไฮดรอลิกในการขับเคลื่อน แกน XYZ และระบบควบคุมโดยใช้ระบบการสัมผัสบนหน้าจอแผงควบคุม ซึ่งเป็นระบบอัตโนมัติ ขนาดของโต๊ะเซรามิก 600×400 มิลลิเมตร สามารถจับยึดอิเล็กทรอนิกส์หนัก 50 กิโลกรัม รับน้ำหนักของชิ้นงานได้สูงสุด 550 กิโลกรัม ช่วงขีดหย่นของชุดหัวจับจากล่างถึงบนสุด 212 มิลลิเมตร ถึง 462 มิลลิเมตร น้ำหนักของชุดเครื่องมือ 3900 กิโลกรัม ความดันอากาศ 0.65 เมกกะปาสคาล ความยาวการเคลื่อนที่ของแกน X = 350 มิลลิเมตร Y = 250 มิลลิเมตร Z = 250 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.3 เครื่องอีซีเอ็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 เครื่องวัดความหนาผิวชิ้นงาน

เป็นเครื่องวัดความหนาผิวของชิ้นงานที่วัดความหนาผิวของชิ้นงานที่เกิดจากการสปาร์คของเครื่องอีดีเอ็ม และเป็นเครื่องที่สามารถวัดค่าความหนาผิวได้ละเอียดในระดับไมครอน เป็นเครื่องยี่ห้อ TOKYO SEIMITSU รุ่น SURFCOM 480 A โดยได้ทำการวัดที่ห้องปฏิบัติการของบริษัท ยันมาร์ เอส.พี. (ประเทศไทย) จำกัด



รูปที่ 3.4 เครื่องวัดความหนาผิว

### 3.2.3 เครื่องชั่งน้ำหนัก

เป็นเครื่องชั่งน้ำหนักที่สามารถชั่งได้ 3 ตำแหน่ง โดยในการทดลองใช้สำหรับชั่งชิ้นงานทดสอบ และ อิเล็กโทรด เป็นเครื่องยี่ห้อ METTLER รุ่น PM4000 ได้ทำการชั่งที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี



รูปที่ 3.5 เครื่องชั่งน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.4 เครื่องวัดระยะตัดเกิน

เป็นเครื่องที่วัดระยะตัดเกินของชั้นทดสอบ โดยนำชั้นทดสอบมาส่งกล้องเพื่อดูระยะตัดเกินของชั้นทดสอบ แล้วทำการคำนวณเพื่อหาค่าระยะตัดเกิน



รูปที่ 3.6 เครื่องวัดระยะตัดเกิน

### 3.3 หลักการออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองที่ใช้เครื่องอีดีเอ็มเป็นตัวสปาร์คนั้น จะต้องเป็นไปตามขั้นตอนต่าง ๆ ที่ได้วางแผนไว้แล้ว และศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบได้แก่ ค่าอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (Material Removal Rate) อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (Electrode Wear Rate) ระยะตัดเกิน (Overcut) และความหยาบผิวของชิ้นงาน (Surface Roughness) ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการทดลองจะนำไปวิเคราะห์เพื่อศึกษาว่าปัจจัยแต่ละปัจจัยมีผลกระทบต่อเหล็กกล้าเครื่อง AUD 11 โดยอาศัยวิธีพื้นผิวผลตอบตามหลักการออกแบบการทดลอง มีปัจจัยที่ใช้ในการศึกษา 3 ปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยมีอยู่ด้วยกัน 3 ระดับที่ต้องการทดลอง คือ ช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า (Electric Discharge Time) 3 ระดับ กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ค (Electric Discharge Peak Current) 3 ระดับ และ ความเร็วในการหมุนของหัวจับแท่งอิเล็กโทรด 3 ระดับ

#### 3.3.1 ปัจจัยที่ควบคุมได้และ ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้

##### 3.3.1.1 ปัจจัยที่ควบคุมได้

ในการออกแบบการทดลองเราต้องหาปัจจัยที่สามารถควบคุมได้มาใช้ในการทดลองเพื่อป้องกันการผิดพลาดของผลการทดลอง โดยปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ ได้แก่ ช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ค (IP) ความเร็วในการหมุนของหัวจับแท่งอิเล็กโทรด (S) อัตราการฉีกไล่เศษชิ้นงานที่เกิดจากการสปาร์ค ขนาดของชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง และขนาดของอิเล็กโทรด ในการทดลองนี้ได้กำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง คือ ช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์คความเร็วและในการหมุนของหัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จับแท่งอิเล็กโทรด ซึ่งปัจจัยสามตัวนี้สามารถปรับเปลี่ยนได้อย่างแม่นยำโดยการสั่งการจากคอมพิวเตอร์ ที่อยู่ในเครื่อง อีซีเอ็ม

### 3.3.1.2 ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้

ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้เป็นปัจจัยที่ไม่อยากให้เกิดขึ้นในการทดลอง เพราะเมื่อเกิดขึ้นแล้วจะส่งผลกระทบต่อผลของการทดลอง ทำให้ผลของการทดลองผิดพลาดไปและสร้างความไม่น่าเชื่อถือให้กับรูปแบบ (Model) ของการทดลอง โดยปัจจัยเหล่านี้ ได้แก่ ความผิดพลาดของเครื่องอีซีเอ็ม อุณหภูมิสภาพแวดล้อม ความผิดพลาดจากผู้ที่ทำการทดลอง

### 3.3.2 เลือกพารามิเตอร์ ระดับ และขอบเขต

การเลือกพารามิเตอร์หรือปัจจัยที่จะนำมาใช้ในการทดลอง โดยในการทดลองนี้เลือกทั้งหมดสี่พารามิเตอร์ คือ ช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ค (IP) ความเร็วในการหมุนของหัวจับแท่งอิเล็กโทรด (S) และชนิดของเหล็กกล้าเครื่องมือ AUD 11 การกำหนดระดับของพารามิเตอร์ได้นำค่าในแต่ละระดับจากงานวิจัยอื่น ซึ่งมีความคล้ายคลึงกันมาประยุกต์ใช้

### 3.3.3 เลือกการออกแบบการทดลอง

ในการเลือกการออกแบบการทดลองได้เลือกการออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบ จำนวนของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองมี 3 ปัจจัยและต้องทำการสุ่ม (Randomization) ลำดับการทดลอง

### 3.3.4 แผนการทดลอง

ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองคือ ช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) และกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ค (IP) ความเร็วในการหมุนของหัวจับแท่งอิเล็กโทรด (S) โดยมีระดับของตัวแปร 3 ระดับ ดังที่แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ระดับตัวแปรในการทดลอง

ตัวแปร	Level 1	Level 2	Level 3
Electric Discharge Time (ON) $\mu$ sec	250	300	350
Electric Discharge Peck Current (IP) A	20	40	60
Rotational Speed (S) RPM	5	10	15

ในส่วนตัวแปรที่นอกเหนือจากตัวแปร ON, IP และ S จะกำหนดเป็นค่าคงที่ตลอดการทดลองทุกครั้งที่ทำกรทดลอง โดยจะยึดตามค่ามาตรฐานของเงื่อนไข C100 (Condition C100) ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ใช้สำหรับอิเล็กโทรดทองแดงกับชิ้นงานเหล็กกล้าในการตัดเนื้อชิ้นงาน โดยแสดงดังตารางที่ 3.2 ส่วนการตั้งความเป็นซ้ำจะให้อิเล็กโทรดเป็นซ้ำและชิ้นงานเป็นซ้ำวก ในการทดลองมีตัวแปร ON=3 ระดับ, IP=3 ระดับ และ S=3 ทำให้จะต้องมีจำนวนชิ้นงาน 18 ชิ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่สภาวะคงที่โดยกำหนดค่าคงที่ตลอดการทดลอง

Parameter	Function	ค่า
PL	Polarity	PL (-)
OFF	Electric discharge stop time	40
SV	Servo voltage	55
S	Servo speed	73
UP	Jump-up time	15
DN	Jump-down machining time	70
JS	Jump speed	20
LNS	Loran shape	0
STEP	Loran orbiting motion distance on one side	0
V	Main supply voltage	1
HP	Auxiliary power supply circuit control	40
PP	PIKADEN pulse. Shutoff	10
C	Capacitor	0
ALV	Arc detection level	15
OC	ON pulse control	0
LF	OFF pulse control	5
JM	Jump mode	0
LS	Loran speed and direction	0
LNM	Loran mode	0

### 3.3.5 วิธีการคำนวณในการออกแบบ CCD

สมการ

$$X_i = \frac{2X - (X_{\max} + X_{\min})}{(X_{\max} - X_{\min})}$$

โดย  $X_i$  คือ Coded variable of ON, IP และ S

$X$  คือ Natural variables

เช่น  $X = 300 \mu \text{ sec}$ ,  $X_{\max} = 350 \mu \text{ sec}$ ,  $X_{\min} = 250 \mu \text{ sec}$

$$X_i = \frac{2(300) - (350 + 250)}{(350 - 250)} = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

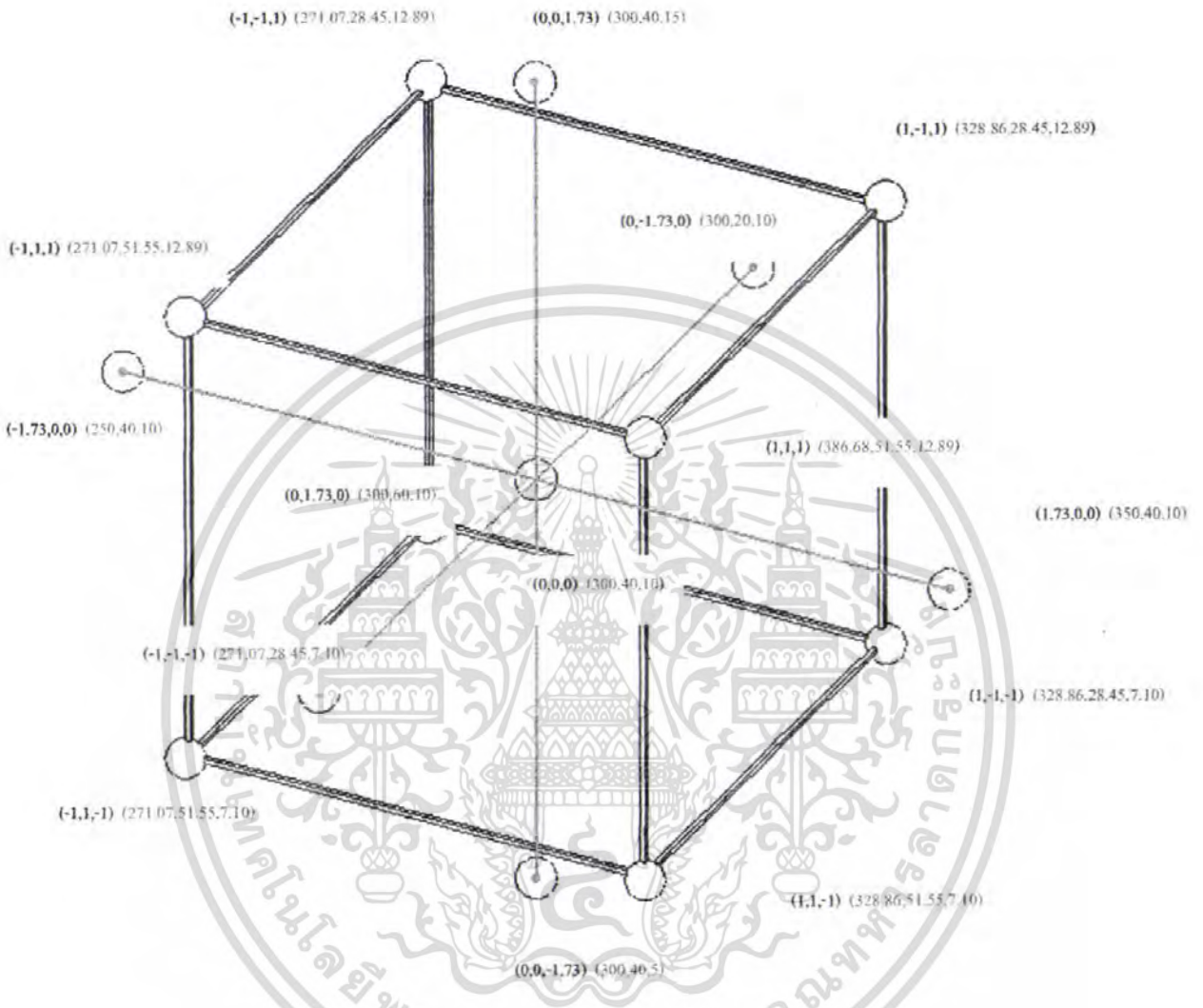
ตารางที่ 3.3 Coded Variables

ลำดับที่	Natural Variables			Coded Variables		
	$\xi_1 = \text{ON}$	$\xi_2 = \text{IP}$	$\xi_3 = \text{S}$	$X_1$	$X_2$	$X_3$
1	271.07	28.45	7.1	-1	-1	-1
2	328.86	28.45	7.1	1	-1	-1
3	271.07	51.55	7.1	-1	1	-1
4	328.86	51.55	7.1	1	1	-1
5	271.07	28.45	12.89	-1	-1	1
6	328.86	28.45	12.89	1	-1	1
7	271.07	51.55	12.89	-1	1	1
8	328.86	51.55	12.89	1	1	1
9	300	40	10	0	0	0
10	300	40	10	0	0	0
11	300	40	10	0	0	0
12	300	40	10	0	0	0
13	350	40	10	1.73	0	0
14	250	40	10	-1.73	0	0
15	300	60	10	0	1.73	0
16	300	20	10	0	-1.73	0
17	300	40	15	0	0	1.73
18	300	40	5	0	0	-1.73

เป็นตารางที่แสดงการ Coded Variables คือ การนำปัจจัยในการทดลองมาทำการ Coded Variables ก่อนแล้วจึงนำไปทำการทดลอง โดยต้องทำการ Coded ทุกค่าที่จะนำมาทำการทดลอง โดยวิธีการ Coded จะแสดงขั้นตอนไว้ในหัวข้อที่ 3.3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.6 โครงสร้างรูปแบบการทดลอง(Central Composite Design: CCD)



รูปที่ 3.7 โครงสร้างรูปแบบการทดลอง (Central Composite Design: CCD)

เป็นโครงสร้างที่แสดงรูปแบบการทดลองที่ได้ออกแบบไว้แบบ (Central Composite Design: CCD) โดยมี การกำหนดค่าระดับของปัจจัยตามจุดกึ่งกลางของรูปดังรูป

ในการทดลองทั้งหมด 18 ครั้ง จะต้องมีการสุ่มลำดับของการทดลองเพื่อให้ค่าความผิดพลาดของการทดลองเกิดการกระจายตัวอย่างเท่า ๆ กัน เป็นการหลีกเลี่ยงค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเป็นลักษณะแนวโน้มหรือมีการกระจุกตัวของค่าความผิดพลาด ซึ่งลำดับในการทดลองตามการออกแบบการทดลอง แสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ลำดับการทดลอง

ครั้งที่	ลำดับที่	เหล็กชิ้นที่	ทองแดงชิ้นที่	ON ( $\mu\text{sec}$ )	IP (A)	S (RPM)
1	9	16	82	300	40	10
2	12	5	24	300	40	10
3	1	10	88	271.07	28.45	7.10
4	6	1	85	328.86	28.45	12.89
5	10	9	81	300	40	10
6	3	22	59	271.07	51.55	7.10
7	15	3	36	300	60	10
8	11	14	47	300	40	10
9	2	6	4	328.86	28.45	7.10
10	18	11	65	300	40	5
11	4	20	31	328.86	51.55	7.10
12	17	8	72	300	40	15
13	16	13	90	300	20	10
14	7	21	25	271.07	51.55	12.89
15	13	12	60	350	40	10
16	5	17	80	271.07	28.45	12.89
17	14	4	48	250	40	10
18	8	7	74	328.86	51.55	12.89

เมื่อทำการทดลองครบทั้ง 18 การทดลอง ตามแผนการทดลองข้างต้น จะต้องคำนวณหาอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด วัดความหยาบผิวของชิ้นงาน และวัดระยะตัดเกิน ผลการทดลองทั้งหมดจะต้องนำไปวิเคราะห์ที่พื้นผิวผลตอบ และตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล (Residual) โดยใช้โปรแกรม Minitab

### 3.4 ขั้นตอนการทดลอง

ในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการทดลองจะต้องมีการวางแผนการทดลองหรือมีการจัดลำดับขั้นของการทดลอง เพื่อให้จะทำให้การทดลองเป็นไปตามขั้นตอนที่ได้ออกแบบไว้ และในการทดลองก่อนที่จะทำการทดลองจะต้องมีการเตรียมชิ้นงานให้ได้ขนาดตามความต้องการมีลักษณะสมมาตรกันทุกชิ้นเพื่อที่คำนวณหาปริมาตรของเหล็กและนำมาคำนวณหาอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.1 ขั้นตอนก่อนการทดลอง

#### 3.4.1.1 การเตรียมชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง

การเตรียมชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองก่อนที่จะทำการทดลองต้องมีการเตรียมชิ้นงานให้ได้ขนาดตามที่กำหนด ให้นำเหล็กกล้าเครื่องมือ AUD 11 มาแปรรูปโดยใช้เครื่องไสปรับขนาดให้ได้ขนาด 33 x 33 x 33 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.6 สุดท้ายนำไปเข้าเครื่องเจียรไนราบเพื่อให้ชิ้นงานสมมาตรดังรูปที่ 3.7

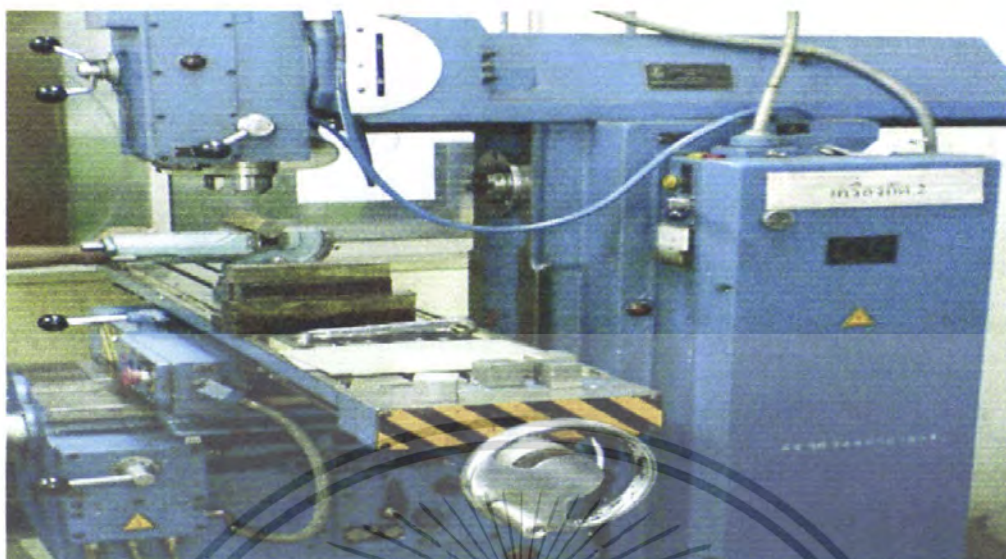


รูปที่ 3.8 การขึ้นรูปชิ้นงานโดยการไส



รูปที่ 3.9 การขึ้นรูปชิ้นงานโดยการเจียรไน

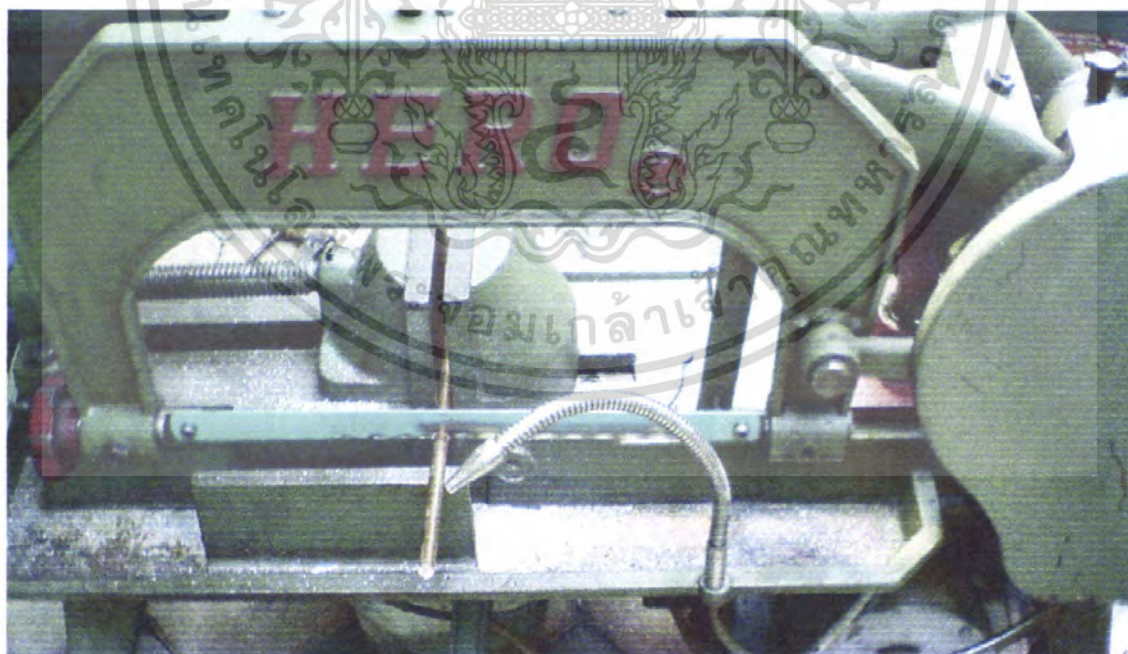
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 การขึ้นรูปชิ้นงาน โดยการกัด

#### 3.4.1.2 ขั้นตอนการเตรียมอิเล็กโทรด

การเตรียมอิเล็กโทรด นำอิเล็กโทรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.5 มิลลิเมตร ตัดให้ได้ทั้งหมด 100 แท่ง โดยแต่ละแท่งตัดให้ได้ความยาว 100 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปปาดหน้าด้วยเครื่องกลึง



รูปที่ 3.11 การขึ้นรูปอิเล็กโทรด โดยการตัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.1.3 ทำหัวจับแท่งอิเล็กโทรด

จากการทดลองครั้งนี้ต้องใช้หัวจับแท่งอิเล็กโทรดแบบหมุนแต่เนื่องจากหัวจับแท่งอิเล็กโทรดที่ติดเครื่อง EDM ไม่สามารถนำมาใช้ในการทดลองได้ ทางกลุ่มปริญญานิพนธ์จึงจัดทำหัวจับแท่งอิเล็กโทรดแบบหมุนขึ้นเพื่อใช้ในการทดลองครั้งนี้



รูปที่ 3.12 หัวจับแท่งอิเล็กโทรดแบบเดิม

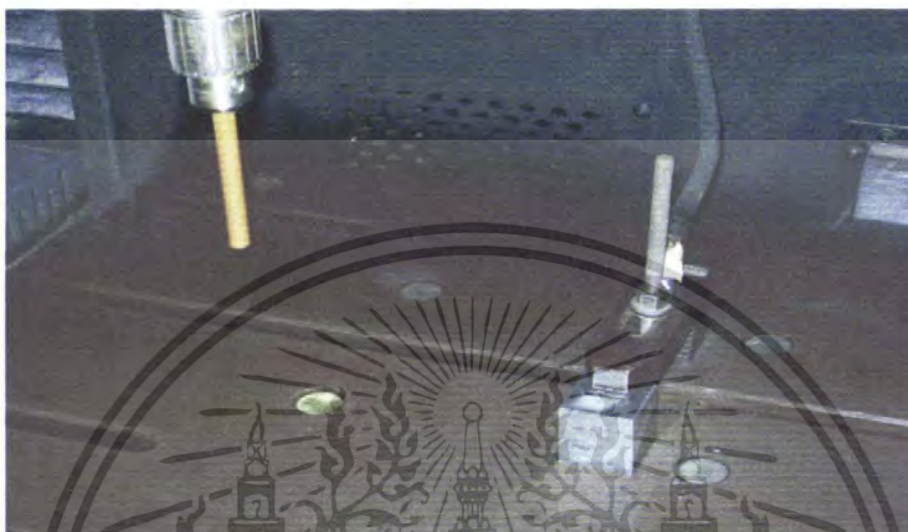


รูปที่ 3.13 หัวจับแท่งอิเล็กโทรดแบบใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.2 ขั้นตอนระหว่างการทดลอง

1. นำชิ้นงานและอิเล็กโทรดไปชั่งน้ำหนักเพื่อบันทึกค่าน้ำหนักก่อนการตัด
2. ทำการจับยึดชิ้นงานและอิเล็กโทรดเข้ากับหัวจับของเครื่องอีดีเอ็ม ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.14 ลักษณะการจับยึดชิ้นงานและอิเล็กโทรด

3. ทำการตั้งค่าศูนย์ของระบบพิกัดแกนทั้ง 3 แกน (XYZ) ซึ่งเป็นจุดอ้างอิงในการเดินของอิเล็กโทรด
4. กำหนดตำแหน่งของหัวฉีดสาร ไดอิเล็กทริกในตำแหน่งเดิมทุกครั้งของการทดลอง
5. ทำการเขียนจีโค้ด (G-Code) กำหนดความเร็ว 15 มิลลิเมตรเวลาและกำหนดเงื่อนไข C100 (Condition C100)
6. ป้อนค่าตัวแปรตามลำดับการตั้งค่าการทดลองคือ ตัวแปร ON, IP และ S
7. ทำการทดสอบโปรแกรม (Run) ที่ได้เขียนจีโค้ดไว้ แล้วเริ่มทำการสปาร์ค
8. ปลดปล่อยสาร ไดอิเล็กทริกกลับเข้าสู่ถังเก็บจนหมด แล้วจึงถอดอิเล็กโทรดและชิ้นงานออกได้
9. ทำความสะอาดอิเล็กโทรดและชิ้นงานจนแห้งแล้วนำไปชั่งน้ำหนักอีกครั้งเพื่อเก็บบันทึกค่าการทดลอง
10. ทำการทดลองตามแผนการทดลองจนครบทั้ง 18 การทดลอง

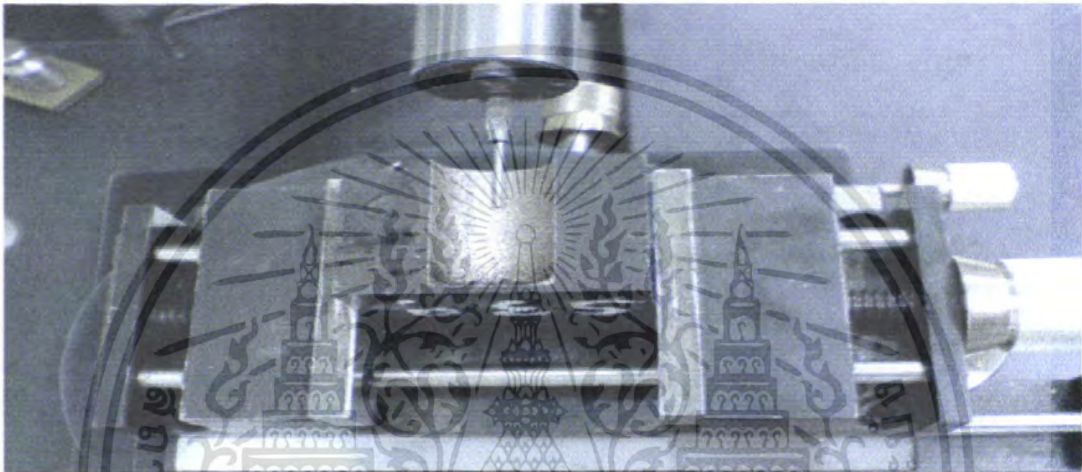
### 3.4.3 ขั้นตอนหลังการทดลอง

ในส่วนขั้นตอนหลังการทดลองจะทำการตรวจสอบและตรวจเช็คชิ้นงานที่สปาร์คเสร็จแล้ว โดยชิ้นงานที่ทำการสปาร์คเสร็จแล้วจะมีคราบน้ำมันและเศษผงที่เกิดจากการสปาร์คเข้ามาที่เกิดจากการสปาร์ค มาทำความสะอาดชิ้นงานโดยการเป่าลม แล้วเช็ดด้วยผ้าสะอาดให้แห้ง จากนั้นนำผลน้ำหนักที่ได้จากการบันทึกในขั้นตอนระหว่างการทดลอง ไปคำนวณอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (Material Removal Rate) อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (Electrode Wear Rate) นำไปวัดค่าความหยาบผิว (Surface Roughness) และวัดค่าระยะตัดเกิน (Overcut)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

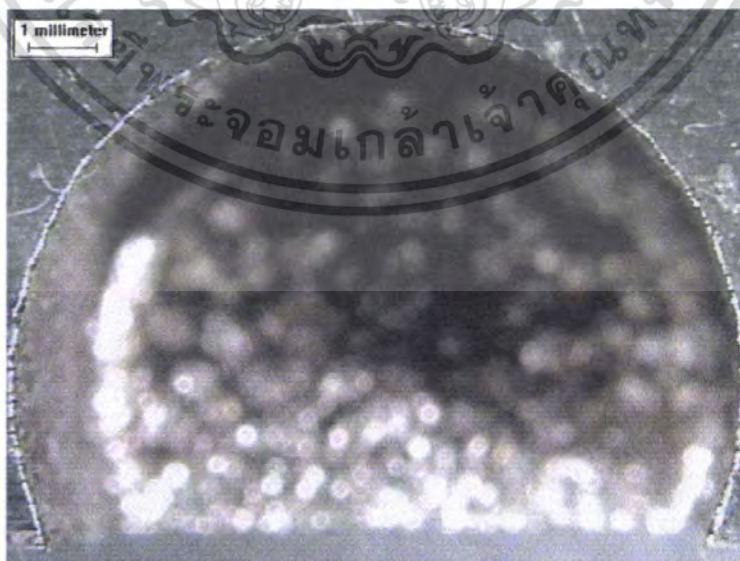
### 3.4.3.1 การวัดค่าความหยาบผิวชิ้นงาน

นำชิ้นงานมาทำการวัด ค่าความหยาบผิวด้วยเครื่องวัดค่าความหยาบผิวโดยลักษณะของการวัดต้องทำการควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ให้เหมือนกันโดยปัจจัยต่าง ๆ เหล่านั้น เช่น ความสูงของการวางชิ้นงาน ตำแหน่งของการเก็บค่าความหยาบผิว เป็นต้น ซึ่งในการวัดค่าความหยาบผิวนี้จะใช้ผู้ทำการวัดเพียงคนเดียวเพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนซึ่งเกิดจากผู้ทำการวัด และก่อนการใช้เครื่องวัดค่าความหยาบผิวเมื่อเปิดเครื่องแล้วต้องทำการปรับค่าการวัดค่าความหยาบผิวเครื่องทุกครั้ง เพื่อให้ผลการวัดค่าความหยาบผิวที่ออกมาถูกต้องและแม่นยำแล้วจึงทำการวัดค่าความหยาบผิว ซึ่งในการวัดค่าความหยาบผิวจะได้ผลออกมา 3 ค่า คือ Ra, Rz และ Rmax



รูปที่ 3.15 ลักษณะการติดตั้งชิ้นงานเข้ากับเครื่องวัดความหยาบผิว

### 3.4.3.2 การวัดค่าระยะตัดเกิน



รูปที่ 3.16 ลักษณะการวัดค่าระยะตัดเกิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.3.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

เมื่อได้ค่าอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (Material Removal Rate) อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (Electrode Wear Rate) และค่าความหยาบผิว Ra, Rz และ Rmax โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่  $\alpha = 0.10$  หรือที่ระดับความเชื่อมั่น 90 % ได้นำค่าผลตอบสนองไปวิเคราะห์ความแปรปรวน วิเคราะห์ส่วนตกค้าง (Residuals) และสร้าง Contour plot ด้วยโปรแกรม Minitab 14



## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

ในการดำเนินการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้ ทำได้โดยกำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง 3 ปัจจัย ดังแสดงในตารางที่ 4.1 โดยมีปัจจัยที่ใช้ในการศึกษา 3 ปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยมีอยู่ด้วยกัน 3 ระดับ คือช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า (Electric Discharge Time: ON) 3 ระดับ กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ค (Electric Discharge Peak Current: IP) 3 ระดับ และความเร็วในการหมุนของหัวจับแท่งอิเล็กโทรด (Rotational Speed: S) 3 ระดับ เพื่อทำการศึกษาอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (Material Removal Rate: MRR) อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (Electrode Wear Rate: EWR) ระยะเวลาเกินของชิ้นงาน (Overcut) และความหยาบผิวของชิ้นงาน (Surface Roughness) ซึ่งทำการทดลองตามวิธีการทดลองที่ออกแบบไว้ในบทที่ 3

ทำการทดลองด้วยกรรมวิธีที่ปรับเปลี่ยนด้วยเครื่องอีดีเอ็มแบบแท่งอิเล็กโทรดหมุน โดยใช้ทองแดงผสมเป็นอิเล็กโทรด ส่วนชิ้นงานประกอบด้วยเหล็กกล้าเครื่องมือ AUD 11

#### 4.1 ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.1 ผลการเก็บค่าน้ำหนักก่อน-หลังการทดลอง

ลำดับการทดลอง	ON (μsec)	IP (A)	S (RPM)	น้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์ (g)		น้ำหนักชิ้นงาน (g)	
				ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
1	328.86	28.45	12.89	63.476	63.466	280.255	271.953
2	300	60	10	63.482	63.463	271.556	263.537
3	250	40	10	63.568	63.525	279.316	271.316
4	300	40	10	63.510	63.468	277.785	269.642
5	328.86	28.45	7.10	63.637	63.565	277.796	270.288
6	328.86	51.55	12.89	63.576	63.562	273.692	265.960
7	300	40	15	63.497	63.478	280.401	272.565
8	300	40	10	63.506	63.499	272.073	264.066
9	271.07	28.45	7.10	63.626	63.613	279.322	271.395
10	300	40	5	63.388	63.371	270.681	263.191
11	350	40	10	63.523	63.505	278.277	270.916
12	300	20	10	63.578	63.524	278.047	270.304
13	300	40	10	63.598	63.586	278.632	270.464
14	300	40	10	63.521	63.496	278.751	271.295
15	271.07	28.45	12.89	63.476	63.462	273.223	265.710
16	328.86	51.55	7.10	63.435	63.434	278.097	270.580
17	271.07	51.55	12.89	63.479	63.466	273.438	265.863
18	271.07	51.55	7.10	63.904	63.893	270.800	263.058

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ค่าอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทโรด และความหยาบผิว

ลำดับการทดลอง	ON ( $\mu\text{sec}$ )	IP (A)	S (RPM)	EWR ( $\text{mm}^3/\text{min}$ )	MRR ( $\text{mm}^3/\text{min}$ )	Ra ( $\mu\text{m}$ )
1	328.86	28.45	12.89	0.00050	0.472	7.163
2	300	60	10	0.00101	0.488	9.972
3	250	40	10	0.00080	0.170	6.930
4	300	40	10	0.00045	0.099	9.074
5	328.86	28.45	7.10	0.00340	0.405	7.425
6	328.86	51.55	12.89	0.00109	0.689	10.505
7	300	40	15	0.00129	0.606	8.025
8	300	40	10	0.00030	0.393	7.469
9	271.07	28.45	7.10	0.00018	0.128	7.409
10	300	40	5	0.00083	0.416	8.496
11	350	40	10	0.00117	0.544	7.006
12	300	20	10	0.00257	0.421	6.795
13	300	40	10	0.00004	0.029	8.436
14	300	40	10	0.00187	0.636	9.065
15	271.07	28.45	12.89	0.00048	0.297	7.448
16	328.86	51.55	7.10	0.00002	0.214	9.370
17	271.07	51.55	12.89	0.00072	0.477	8.163
18	271.07	51.55	7.10	0.00075	0.605	10.058

#### 4.2 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

จากตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดลองค่าอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทโรดและความหยาบผิวชิ้นงานซึ่งเป็นผลตอบสนองที่ต้องการเพื่อที่จะนำไปวิเคราะห์ ANOVA และพื้นผิวผลตอบ (Response Surface) และการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model Adequacy Checking) โดยจะใช้โปรแกรมเข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ โปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ โปรแกรม Minitab14 กำหนดให้ A = ON, B = IP และ C = S อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทโรด =  $Y_1$ , อัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน =  $Y_2$  และความหยาบผิวชิ้นงาน =  $Y_3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.1 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของอัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์ (EWR)

##### 4.2.1.1 Linear model

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ ANOVA รูปแบบ Linear model

Term	Coefficients	SE Coefficients	T	P-Value
Constant	0.000982	0.000207	4.754	0.000
A	0.000461	0.000406	1.134	0.276
B	-0.000604	0.000407	-1.487	0.159
C	0.000177	0.000414	0.427	0.676

S = 0.0008691 R-Sq = 19.7% R-Sq(adj) = 2.5%

ตารางที่ 4.4 ผลค่าสัมประสิทธิ์ของ Linear model

Term	Coefficients
Constant	$-9.27622 \times 10^{-4}$
A	$9.21715 \times 10^{-6}$
B	$-3.02232 \times 10^{-5}$
C	$3.53556 \times 10^{-5}$

$$Y_1 = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 \quad (4.1)$$

$$Y_1 = -9.27622 \times 10^{-4} + 9.21715 \times 10^{-6}(X_1) - 3.02232 \times 10^{-5}(X_2) + 3.53556 \times 10^{-5}(X_3) \quad (4.2)$$

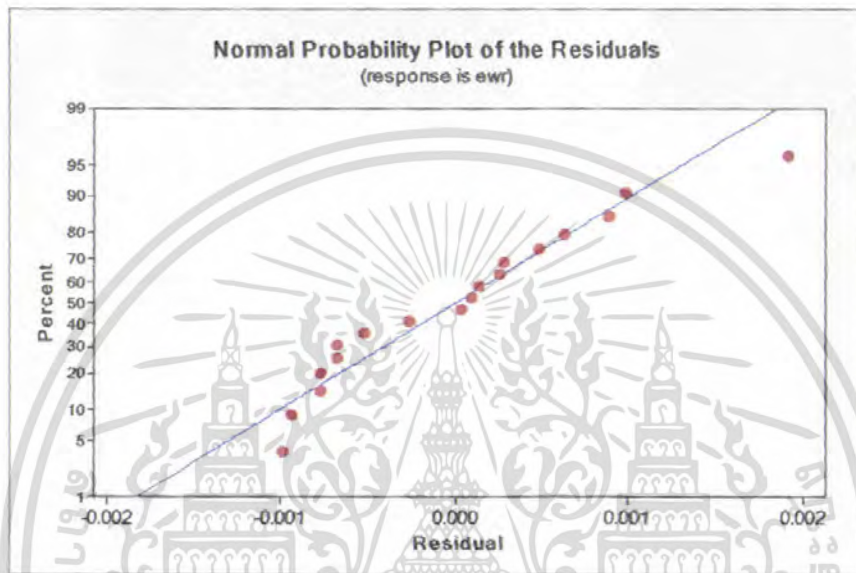
การวิเคราะห์จากตารางที่ 4.3 ดูที่ค่า P-Value ไม่พบปัจจัยใดเลยที่ส่งผลกระทบต่อค่า อัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์(EWR) ที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.1$  เพราะค่า P-Value ของปัจจัย ON, IP และ S มีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.1$  ทั้งหมด และค่า R-Sq = 19.7% R-Sq(adj) = 2.5% มีค่าน้อยกว่า R-Sq = 70% Sq(adj) จึงไม่สามารถยอมรับ Linear model ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model Adequacy Checking) เป็นวิธีการตรวจสอบที่ทำให้ทราบว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนมีความน่าเชื่อถือเป็นไปตามหลักทางสถิติหรือไม่ คือ การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบว่าเป็นการแจกแจงปกติ

โดยการใช้ค่าส่วนตกค้าง (Residual) พล็อตลงบนกราฟทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability Paper: NOPP) หากลักษณะของกราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรงหรือเกือบจะตรงแสดงว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ

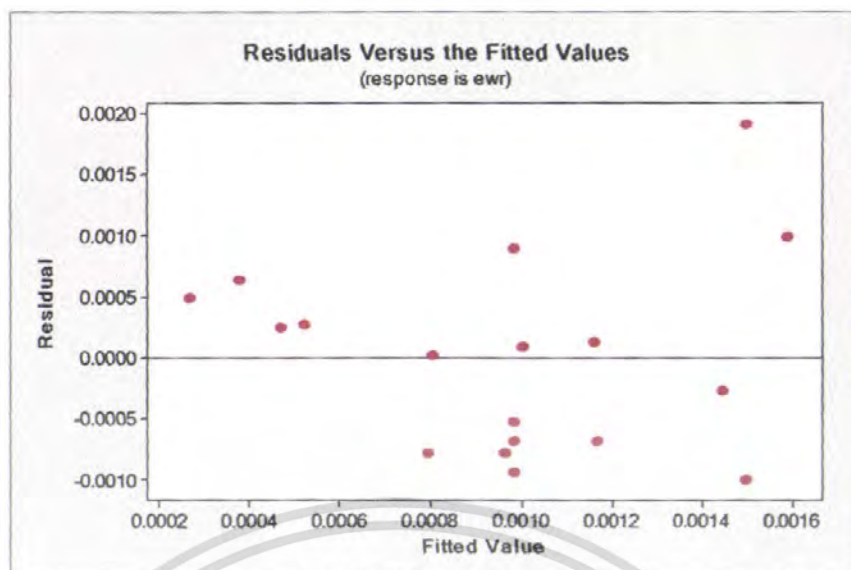


รูปที่ 4.1 การแจกแจงแบบปกติสำหรับค่าส่วนตกค้างของอัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์ (EWR)

จากรูปที่ 4.1 เป็นรูปกราฟการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability) สำหรับค่าส่วนตกค้างของอัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์ (EWR) จะเห็นได้ว่าค่าส่วนตกค้างไม่เกาะกลุ่มกันไปในลักษณะเส้นตรง แสดงว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้มีลักษณะไม่มีการกระจายตัวแบบปกติ นั่นหมายถึงข้อมูลการวิเคราะห์ไม่สามารถเชื่อถือได้

### การตรวจสอบความเสถียรภาพของความแปรปรวน

เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของข้อมูล โดยการใช้ข้อมูลค่าส่วนตกค้างและค่าที่ถูกฟิต (Fitted) ในที่นี้คือ ค่าอัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์ (EWR) นำมาสร้างกราฟระหว่างค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิต (Fitted) ซึ่งจะแสดงดังรูปที่ 4.2 จากลักษณะของกราฟสรุปได้ว่า ข้อมูลมีการกระจายตัวแบบไม่ปกติไม่มีความเป็นอิสระของข้อมูลและไม่มีความสม่ำเสมอของความแปรปรวนนั่นหมายถึงข้อมูลการวิเคราะห์ไม่สามารถเชื่อถือได้



รูปที่ 4.2 ค่าส่วนคลาดกับค่าอิตรการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์ (EWR)

จากการวิเคราะห์ อิตรการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์ (EWR) ที่ Linear model พบว่าข้อมูลที่ออกมาไม่สามารถยอมรับได้ เราจึงต้องเพิ่มพจน์ของปัจจัย ON IP และ S ให้เป็นสมการ Linear + Squares เพื่อทำให้ค่า R-Sq, R-Sq(adj) มีค่าประมาณ 70 %

#### 4.2.1.2 Linear + Squares model

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ ANOVA รูปแบบ Linear + Squares model

Term	Coefficients	SE Coefficients	T	P-Value
Constant	0.000666	0.000459	1.451	0.175
A	0.000464	0.000429	1.082	0.302
B	-0.000608	0.000429	-1.416	0.185
C	0.000201	0.000438	0.459	0.655
AA	0.000115	0.000743	0.154	0.880
BB	0.000920	0.000743	1.238	0.241
CC	0.000189	0.000743	0.255	0.803

$$S = 0.0009178 \quad R\text{-Sq} = 29.6\% \quad R\text{-Sq(adj)} = 0.0\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ผลค่าสัมประสิทธิ์ของ Linear + Squares model

Term constant	Coefficients
Constant	0.00726046
A	$-1.82352 \times 10^{-5}$
B	$-2.14466 \times 10^{-4}$
C	$-1.11283 \times 10^{-4}$
AA	$4.58745 \times 10^{-8}$
BB	$2.30090 \times 10^{-6}$
CC	$7.57435 \times 10^{-6}$

$$Y_1 = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_1 X_1 + \beta_5 X_2 X_2 + \beta_6 X_3 X_3 \quad (4.3)$$

$$Y_1 = 0.00726046 - 1.82352 \times 10^{-5} (X_1) - 2.14466 \times 10^{-4} (X_2) - 1.11283 \times 10^{-4} (X_3) + 4.58745 \times 10^{-8} (X_1 X_1) + 2.30090 \times 10^{-6} (X_2 X_2) + 7.57435 \times 10^{-6} (X_3 X_3) \quad (4.4)$$

การวิเคราะห์จากตารางที่ 4.6 ดูที่ค่า P-Value ไม่พบปัจจัยใดเลยที่ส่งผลกระทบต่อค่า อัตราการสึกหรอของ อิเล็กโทรด(EWR) ที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.1$  เพราะค่า P-Value ของปัจจัย ON, IP และ S มีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.1$  ทั้งหมด และค่า R-Sq = 29.6% R-Sq(adj) = 0.0% มีค่าน้อยกว่า R-Sq = 70% Sq(adj) จึงไม่สามารถยอมรับ Linear + Squares model ได้ เราจึงต้องเพิ่มพจน์ของปัจจัย ON, IP และ S ให้เป็นสมการ Linear + Interaction เพื่อให้ค่า R-Sq, R-Sq(adj) มีค่าประมาณ 70%

#### 4.2.1.3 Linear + Interaction model

ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ ANOVA รูปแบบ Linear + Interaction model

Term	Coefficients	SE Coefficients	T	P-Value
Constant	0.001008	0.000219	4.595	0.001
A	0.000519	0.000437	1.086	0.260
B	-0.000663	0.000438	-1.515	0.158
C	0.000332	0.000437	0.759	0.464
AB	-0.001600	0.001051	-1.523	0.156

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ ANOVA รูปแบบ Linear + Interaction model

Term	Coefficients	SE Coefficients	T	P-Value
BC	0.000502	0.001048	0.479	0.241
AC	0.000072	0.001049	0.069	0.946

S = 0.0008786 R-Sq = 35.5% R-Sq(adj) = 0.3%

ตารางที่ 4.8 ผลค่าสัมประสิทธิ์ของ Linear + Interaction model

$$Y_1 = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_1 X_2 + \beta_5 X_1 X_3 + \beta_6 X_2 X_3 \quad (4.5)$$

$$Y_1 = -0.0143306 + 5.42972 \times 10^{-3} (X_1) + 0.000439681 (X_2) - 5.64999 \times 10^{-4} (X_3) - 1.60010 \times 10^{-6} (X_1 X_2) + 2.00841 \times 10^{-6} (X_1 X_3) + 7.20878 \times 10^{-7} (X_2 X_3) \quad (4.6)$$

การวิเคราะห์จากตารางที่ 4.7 ค่า P-Value ไม่พบปัจจัยใดเลยที่ส่งผลกระทบต่อค่า อัตราการสึกหรอของ อิเล็กโทรด (EWR) ที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.1$  เพราะว่าค่า P-Value ของปัจจัย ON, IP และ S มีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.1$  ทั้งหมด และค่า R-Sq = 35.5% R-Sq(adj) = 0.3% มีค่าน้อยกว่า R-Sq = 70% Sq(adj) จึงไม่สามารถยอมรับ Linear + Interaction model ได้ เราจึงต้องเพิ่มพจน์ของปัจจัย ON, IP และ S ให้เป็นสมการ Full + Quadratic เพื่อให้ค่า R-Sq, R-Sq(adj) มีค่าประมาณ 70 %

#### 4.2.1.4 Full + Quadratic

ตารางที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์ ANOVA รูปแบบ Full + Quadratic

Term	Coefficients	SE Coefficients	T	P-Value
Constant	0.000666	0.000470	1.416	0.194
A	0.000547	0.000469	1.165	0.278
B	-0.000691	0.000470	-1.471	0.180
C	0.000375	0.000471	0.797	0.448
AA	0.000162	0.000767	0.211	0.838
BB	0.000968	0.000767	1.261	0.243
CC	0.000237	0.000767	0.309	0.766

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AB	-0.001684	0.001129	-1.491	0.174
AC	0.000632	0.001133	0.558	0.592
BC	-0.000058	0.001134	-0.051	0.961

S = 0.0009404 R-Sq = 46.3% R-Sq(adj) = 0.0%

ตารางที่ 4.10 ผลค่าสัมประสิทธิ์ของ Full + Quadratic

Term	Coefficients
Constant	-0.00418772
A	$1.14281 \times 10^{-5}$
B	0.000282794
C	$-8.49276 \times 10^{-4}$
AA	$6.48065 \times 10^{-8}$
BB	$2.41935 \times 10^{-6}$
CC	$9.46545 \times 10^{-6}$
AB	$-1.68366 \times 10^{-6}$
AC	$2.52700 \times 10^{-6}$
BC	$-5.77167 \times 10^{-7}$

$$Y_1 = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_1 X_1 + \beta_5 X_2 X_2 + \beta_6 X_3 X_3 + \beta_7 X_1 X_2 + \beta_8 X_1 X_3 + \beta_9 X_2 X_3 \quad (4.7)$$

$$Y_1 = -0.00418772 + 1.14281 \times 10^{-5} (X_1) + 0.000282794 (X_2) - 8.49276 \times 10^{-4} (X_3) + 6.48065 \times 10^{-8} (X_1 X_1) + 2.41935 \times 10^{-6} (X_2 X_2) + 9.46545 \times 10^{-6} (X_3 X_3) - 1.68366 \times 10^{-6} (X_1 X_2) + 2.52700 \times 10^{-6} (X_1 X_3) - 5.77167 \times 10^{-7} (X_2 X_3) \quad (4.8)$$

การวิเคราะห์จากตารางที่ 4.9 พบว่าค่า R-Sq = 46.3%, R-Sq(adj) = 0.0% มีค่าน้อยกว่า R-Sq = 70% และค่า P-Value ในตารางที่ 4.9 ไม่มีปัจจัยใดเลยที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์ (EWR) เลขที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.1$  ทำให้ไม่สามารถยอมรับได้ เราต้องลองปรับค่าอัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์ (EWR), ON, IP และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

S ให้ข้อมูลเรียบกว่าเดิมเพื่อที่จะทำให้ค่า R-Sq และ R-Sq(adj) ที่คำนวณ มีค่าประมาณ R-Sq= 70% โดยการใส่ค่า Log In 1/Log และ 1/ln ฯลฯ

จากการปรับค่า EWR, ON, IP และ S ได้รุ่มนำปัจจัยแต่ละตัวมาคำนวณโดยใช้ 1/EWR, ON, IP และ 1/S ที่ค่า R-Sq ใกล้เคียง R-Sq= 70% กำหนดให้ A = ON, B = IP และ C = 1/S

#### 4.2.1.5 Full + Quadratic model adjust

ตารางที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าตอบสนองอัตราการศึกษาของอิเล็กทรอนิกส์ (EWR)

Term	Constant	Coefficients	SE Coefficients	T	P-Value
A		-445	2046	-0.218	0.833
B		-8019	3675	-2.182	0.061
C		-2093129	1289747	-1.623	0.143
AA		3	3	-0.819	0.437
BB		-18	21	-0.863	0.413
CC		-3736939	1896214	-1.971	0.084
AB		29	12	2.460	0.039
AC		9047	4060	2.228	0.056
BC		11025	10157	1.085	0.309

S = 9973 R-Sq = 69.8% R-Sq(adj) = 35.8%

ตารางที่ 4.12 ผลค่าสัมประสิทธิ์ของ Full + Quadratic model adjust

Term	Coefficients
Constant	318635
A	-445.092
B	-8018.86
C	-2093129
AA	-2.70649
BB	-17.8280

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 ผลค่าสัมประสิทธิ์ของ Full + Quadratic model adjust

Term	Coefficients
CC	-3736939
AB	29.0349
AC	9047.08
BC	11024.8

$$Y_1 = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_1 X_1 + \beta_5 X_2 X_2 + \beta_6 X_3 X_3 + \beta_7 X_1 X_2 \quad (4.9)$$

$$+ \beta_8 X_1 X_3 + \beta_9 X_2 X_3$$

$$Y_1 = 318635 - 445.092 (X_1) - 8018.86 (X_2) - 2093129 (X_3) - 2.70649 (X_1 X_1) \quad (4.10)$$

$$- 17.8280 (X_2 X_2) - 3736939 (X_3 X_3) + 29.0349 (X_1 X_2) + 9047.08 (X_1 X_3)$$

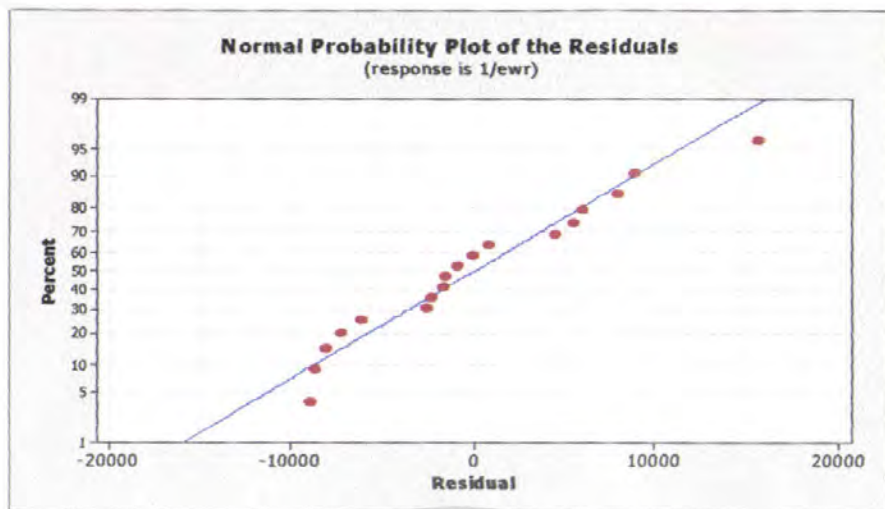
$$+ 11024.8 (X_2 X_3)$$

การวิเคราะห์จากตารางที่ 4.11 พบว่าค่า  $R-Sq = 69.8\%$ ,  $R-Sq(adj) = 35.8\%$  มีค่าใกล้เคียงกับ  $R-Sq = 70\%$  และค่า P-Value ในตารางที่ 4.11 มีปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์ (EWR) ที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.1$  คือ  $B = IP$ ,  $CC = (1/S)(1/S)$ ,  $AB = (ON)(IP)$  และ  $AC = (ON)(S)$  ทำให้สามารถยอมรับสมการ Full + Quadratic model adjust ได้

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบว่าเป็นการแจกแจงปกติ

โดยการใช้ค่าส่วนตกค้าง (Residual) หรือคลงบนกราฟทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability Paper: NOPP) หากลักษณะของกราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรงหรือเกือบจะตรงแสดงว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ

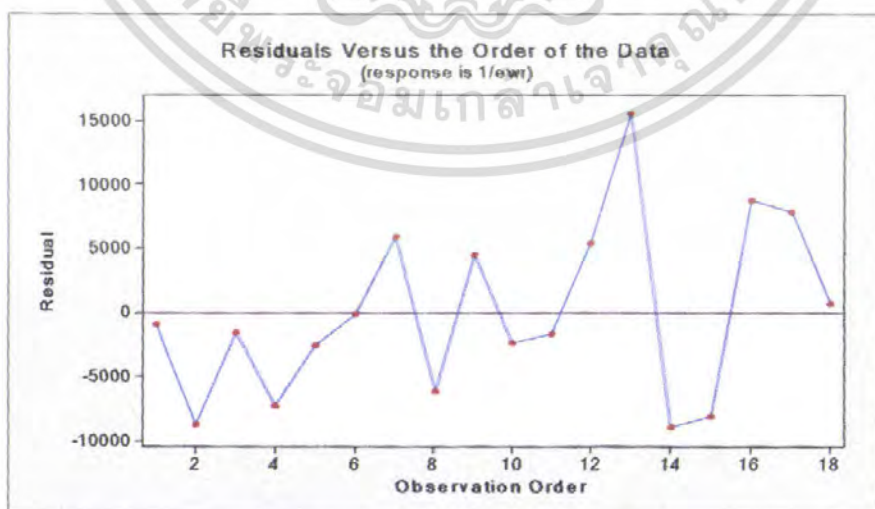


รูปที่ 4.3 การแจกแจงแบบปกติสำหรับค่าส่วนตกค้างของอัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์โทรด (EWR)

จากรูปที่ 4.3 เป็นรูปกราฟการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability) สำหรับค่าส่วนตกค้างของอัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์โทรด (EWR) จะเห็นได้ว่าค่าส่วนตกค้างเกาะกลุ่มกันไปในลักษณะเส้นตรง แสดงว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้มีลักษณะของการกระจายตัวแบบปกติ นั่นหมายถึงข้อมูลการวิเคราะห์สามารถเชื่อถือได้ การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

เป็นการทดสอบความสัมพันธ์ของค่าส่วนตกค้างโดยใช้ค่าส่วนตกค้างและลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล มาทำการพล็อตกราฟค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้งและลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลอยู่บนแกนนอน

จากรูปที่ 4.4 เป็นรูปที่แสดงค่าส่วนตกค้างของอัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์โทรด (EWR) กับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งลักษณะของกราฟมีการกระจายตัวอย่างไม่เป็นรูปแบบแสดงว่าข้อมูลในการทดลองมีความเป็นอิสระต่อกัน

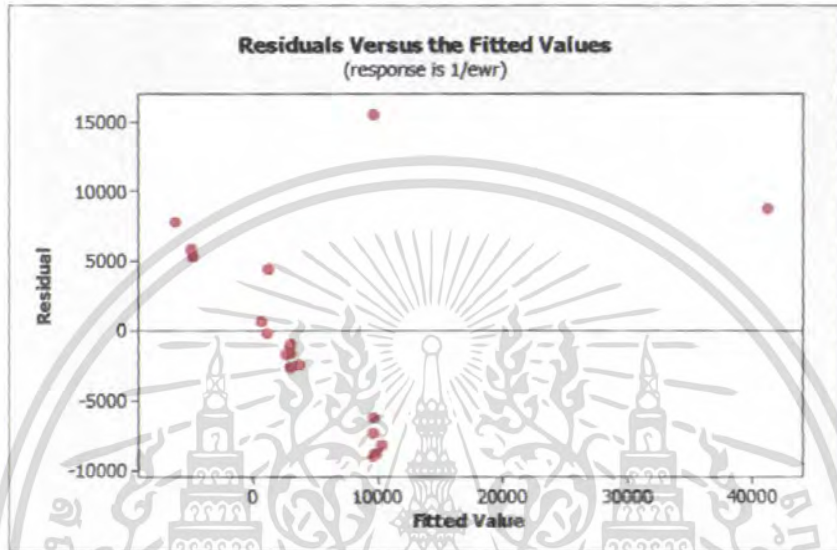


รูปที่ 4.4 ค่าส่วนตกค้างของอัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์โทรดกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตรวจสอบความเสถียรภาพของความแปรปรวน

เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของข้อมูล โดยการใช้ข้อมูลค่าส่วนตกค้างและค่าที่ถูกฟิต (Fitted) ในที่นี้คือ ค่าอัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์ (EWR) นำมาสร้างกราฟระหว่างค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิต (Fitted) ซึ่งจะแสดงดังรูปที่ 4.5 จากลักษณะของกราฟสรุปได้ว่า ข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติมีความเป็นอิสระของข้อมูล ไม่มีแนวโน้มในลักษณะรูปแบบใด ๆ และมีความสม่ำเสมอของความแปรปรวน



รูปที่ 4.5 ค่าส่วนตกค้างกับค่าอัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์ (EWR)

#### 4.2.2 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของ อัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR)

##### 4.2.2.1 Linear model

ตารางที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าตอบสนองอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR)

Term	Coefficients	SE Coefficients	T	P-Value
constant	0.40043	0.04547	8.805	0.000
A	0.12829	0.08946	1.434	0.174
B	0.08435	0.08950	0.943	0.362
C	0.10117	0.09102	1.112	0.285

$$S = 0.1913 \quad R\text{-Sq} = 22.8\% \quad R\text{-Sq(adj)} = 6.3\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.14 ผลค่าสัมประสิทธิ์ของ Linear model

Term	Coefficients
Constant	-0.740363
A	0.00256577
B	0.00421774
C	0.0202349

$$Y_1 = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 \quad (4.11)$$

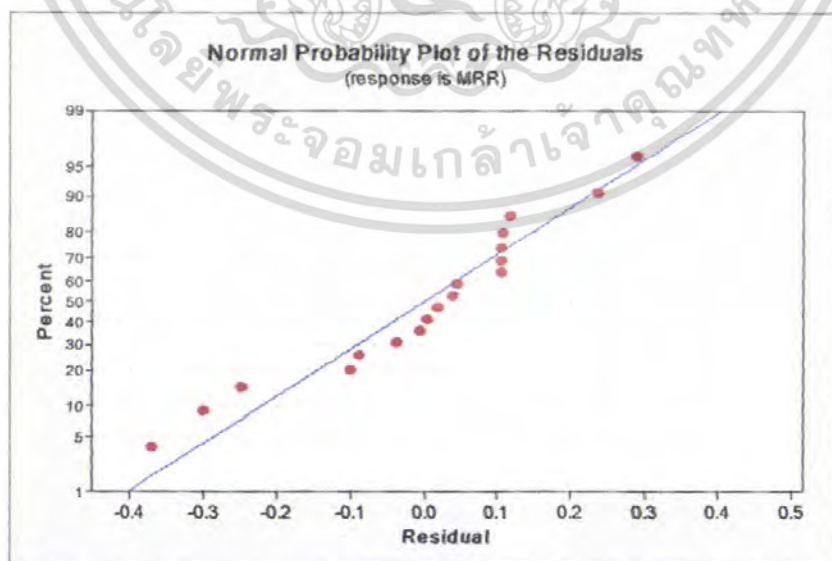
$$Y_1 = -0.740363 + 0.00256577 (X_1) + 0.00421774 (X_2) + 0.0202349 (X_3) \quad (4.12)$$

วิเคราะห์ จากตารางที่ 4.13 ค่า P-Value ไม่พบปัจจัยใดเลยที่ส่งผลกระทบต่อค่าอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR) ที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.1$  เพราะค่า P-Value ของปัจจัย ON, IP และ S มีค่าน้อยกว่าระดับ นัยสำคัญ  $\alpha = 0.1$  ทั้งหมด และค่า R-Sq = 22.8%, R-Sq(adj) = 6.3% มีค่าน้อยกว่า R-Sq = 70% Sq(adj) จึงไม่สามารถยอมรับ Linear model ได้

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบว่าเป็นการแจกแจงปกติ

โดยการใช้ค่าส่วนตกค้าง (Residual) ทดสอบบนกราฟทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability Paper: NOPP) หากลักษณะของกราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรงหรือเกือบจะตรงแสดงว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ

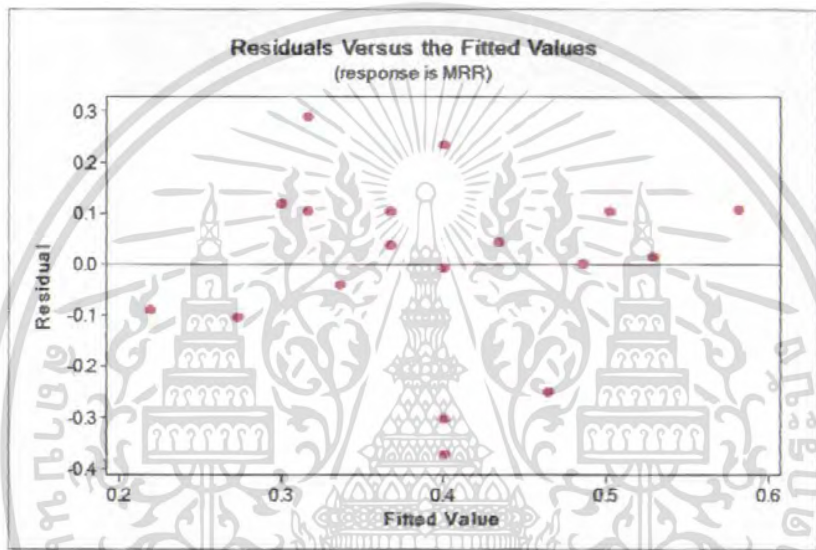


รูปที่ 4.6 การแจกแจงแบบปกติสำหรับค่าส่วนตกค้างของอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์จากรูปที่ 4.6 เป็นรูปกราฟการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability) สำหรับค่าส่วนตกค้างของอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR) จะเห็นได้ว่าค่าส่วนตกค้างไม่เกาะกลุ่มกันไปในลักษณะเส้นตรงแสดงว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้มีลักษณะของการกระจายตัวไม่เป็นแบบปกติ นั่นหมายถึงข้อมูลการวิเคราะห์ที่ไม่สามารถเชื่อถือได้ การตรวจสอบความเสถียรภาพของความแปรปรวน

เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของข้อมูล โดยการใช้ข้อมูลค่าส่วนตกค้างและค่าที่ถูกฟิต (Fitted) ในที่นี้คือ ค่าอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR) นำมาสร้างกราฟระหว่างค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิต (Fitted) ซึ่งจะแสดงดังรูปที่ 4.11 จากลักษณะของกราฟสรุปได้ว่า ข้อมูลมีการกระจายตัวแบบไม่ปกติมีความไม่อิสระของข้อมูล และไม่มี ความสม่ำเสมอของความแปรปรวน



รูปที่ 4.7 ค่าส่วนตกค้างกับค่าอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR)

จากการวิเคราะห์อัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR) ที่ Linear model พบว่าข้อมูลที่ออกมาไม่สามารถยอมรับได้ เราจึงต้องเพิ่มพจน์ของปัจจัย ON, IP และ S ให้เป็นสมการ Linear + Squares เพื่อให้ค่า R-Sq, R-Sq(adj) มีค่าประมาณ 70 %

#### 4.2.2.2 Linear + Squares model

ตารางที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าตอบสนองอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR)

Term	Coefficients	SE Coefficients	T	P-Value
Constant	0.28926	0.09819	2.946	0.013
A	0.12956	0.09185	1.411	0.186
B	0.08317	0.09188	0.905	0.385
C	0.10989	0.09368	1.173	0.266

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าตอบสนองอัตราการผลิตเนื้อชิ้นงาน (MRR)

Term	Coefficients	SE Coefficients	T	P-Value
AA	0.05959	0.15900	0.375	0.715
BB	0.15702	0.15903	0.987	0.345
CC	0.21345	0.15890	1.343	0.206

S = 0.1964 R-Sq = 36.1% R-Sq(adj) = 1.2%

ตารางที่ 4.16 ผลค่าสัมประสิทธิ์ของ Linear + Squares model

Term	Coefficients
Constant	2.75287
A	-0.0117102
B	-0.0272457
C	-0.148781
AA	$2.38357 \times 10^{-5}$
BB	0.000392551
CC	0.00853791

$$Y_2 = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_1 X_1 + \beta_5 X_2 X_2 + \beta_6 X_3 X_3 \quad (4.13)$$

$$Y_2 = 2.75287 - 0.0117102 (X_1) - 0.0272457 (X_2) - 0.148781 (X_3) + 2.38357 \times 10^{-5} (X_1 X_1) + 0.000392551 (X_2 X_2) + 0.00853791 (X_3 X_3) \quad (4.14)$$

การวิเคราะห์จากตารางที่ 4.15 ดูที่ค่า P-Value ไม่พบปัจจัยใดเลยที่ส่งผลกระทบต่อค่าอัตราการผลิตเนื้อชิ้นงาน (MRR) ที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.1$  เพราะค่า P-Value ของปัจจัย ON, IP และ S มีค่ามากกว่าระดับ นัยสำคัญ  $\alpha = 0.1$  ทั้งหมดและค่า R-Sq = 36.1%, R-Sq(adj) = 1.2% มีค่าน้อยกว่า R-Sq = 70% Sq(adj) จึงไม่สามารถยอมรับ Linear + Squares model ได้ เราจึงเพิ่มพจน์ของปัจจัย ON, IP และ S ให้เป็นสมการ Linear + Interaction เพื่อให้ค่า R-Sq, R-Sq(adj) มีค่าประมาณ 70 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2.3 Linear + Interaction

ตารางที่ 4.17 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าตอบสนองอัตราการผลิตเนื้อชิ้นงาน (MRR)

Term	Coefficients	SE Coefficients	T	P-Value
constant	0.41674	0.04637	8.987	0.000
A	0.16467	0.09243	1.782	0.102
B	0.04792	0.09249	0.518	0.615
C	0.14778	0.09235	1.600	0.138
A*B	-0.38998	0.22206	-1.756	0.107
B*C	0.29304	0.22156	1.323	0.213
B*C	-0.06452	0.22174	-0.291	0.776

S = 0.1857 R-Sq = 42.9% R-Sq(adj) = 11.7%

ตารางที่ 4.18 ผลค่าสัมประสิทธิ์ของ Linear + Interaction

Term	Coefficients
Constant	-2.38405
A	0.00717106
B	-0.125842
C	-0.296283
AB	$-3.89979 \times 10^{-4}$
AC	0.00117216
BC	$-6.45209 \times 10^{-4}$

$$Y_2 = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_1 X_2 + \beta_5 X_1 X_3 + \beta_6 X_2 X_3 \tag{4.15}$$

$$Y_2 = -2.38405 + 0.00717106 (X_1) + 0.125842 (X_2) - 0.296283 (X_3) \tag{4.16}$$

$$-3.89979 \times 10^{-4} (X_1 X_2) + 0.00117216 (X_1 X_3) + -6.45209 \times 10^{-4} (X_2 X_3)$$

การวิเคราะห์จากตารางที่ 4.17 ดูที่ค่า P-Value ไม่พบปัจจัยใดเลยที่ส่งผลกระทบต่อค่า อัตราการผลิตเนื้อชิ้นงาน (MRR) ที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.1$  เพราะว่าค่า P-Value ของปัจจัย ON, IP และ S มีค่ามากกว่าระดับ นัยสำคัญ  $\alpha = 0.1$  ทั้งหมด และค่า R-Sq = 42.9%, R-Sq(adj) = 11.7% มีค่าน้อยกว่า R-Sq = 70% Sq(adj) จึงไม่สามารถยอมรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Linear + Interaction model ได้ เราจึงต้องเพิ่มพจน์ของปัจจัย ON, IP และ S ให้เป็นสมการ Full + Quadratic เพื่อให้ค่า R-Sq, R-Sq(adj) มีค่าประมาณ 70 %

#### 4.2.2.4 Full + Quadratic

ตารางที่ 4.19 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าตอบสนองอัตราการผลิตเนื้อชิ้นงาน (MRR)

Term	Coefficients	SE Coefficients	T	P-Value
Constant	0.28924	0.09158	3.158	0.013
A	0.17510	0.09141	1.915	0.092
B	0.03759	0.09146	0.411	0.692
C	0.16416	0.09166	1.791	0.111
AA	0.08578	0.14942	0.574	0.582
BB	-0.18324	0.14946	1.226	0.255
CC	-0.23969	0.14934	1.605	0.147
AB	-0.42111	0.21989	-1.915	0.092
AC	0.34143	0.22061	1.548	0.160
BC	-0.11297	0.22079	-0.512	0.623

S = 0.1832 R-Sq = 59.6% R-Sq(adj) = 14.1%

ตารางที่ 4.20 ผลค่าสัมประสิทธิ์ของ Full + Quadratic

Term	Coefficients
Constant	2.20685
A	-0.0138976
B	0.102862
C	-0.523448
AA	$3.43114 \times 10^{-5}$
BB	0.000458092
CC	0.00958768
AB	$-4.21110 \times 10^{-4}$
AC	0.00136571
BC	-0.00112969

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Y_2 = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_1 X_1 + \beta_5 X_2 X_2 + \beta_6 X_3 X_3 + \beta_7 X_1 X_2 \quad (4.17)$$

$$+ \beta_8 X_1 X_3 + \beta_9 X_2 X_3$$

$$Y_2 = 2.20685 - 0.0138976 (X_1) + 0.102862 (X_2) - 0.523448 (X_3) + 3.43114 \times 10^{-5} (X_1 X_1) \quad (4.18)$$

$$+ 0.000458092 (X_2 X_2) + 0.00958768 (X_3 X_3) - 4.21110 \times 10^{-4} (X_1 X_2) + 0.00136571 (X_1 X_3)$$

$$- 0.00112969 (X_2 X_3)$$

การวิเคราะห์จากตารางที่ 4.19 พบว่าค่า R-Sq=59.6%, R-Sq(adj)= 14.1% มีค่าน้อยกว่า R-Sq = 70% และค่า P-Value ในตารางที่ 4.19 มีปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR) คือ A= ON แต่หนึ่งตัวเท่านั้นที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.1$  ทำให้ไม่สามารถยอมรับได้ เราต้องลองปรับค่าอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR) ON, IP และ S ให้ข้อมูลเรียบกว่าเดิมเพื่อที่จะทำให้ค่า R-Sq และ R-Sq(adj) ที่คำนวณ มีค่าประมาณ R-Sq= 70% โดยการใส่ค่า Log, ln, 1/Log, 1/ln ฯลฯ

จากการปรับค่า MRR, ON, IP และ S ได้ห้รุ่นนำปัจจัยแต่ละตัวมาคำนวณโดยใช้ 1/Log(MRR), ln(ON), ln(IP), Log(S) ทำให้ได้ค่า R-Sq ใกล้เคียง R-Sq= 70% กำหนดให้ A = ln(ON) B =ln( IP) และ C = Log(S)

#### 4.2.2.5 Full + Quadratic model adjust

ตารางที่ 4.21 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าตอบสนองอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR)

Term	Constant	Coefficients	SE Coefficients	T	P-Value
A		250.368	463.99	0.540	0.604
B		-152.310	119.78	-1.272	0.239
C		551.587	247.61	2.228	0.057
AA		-24.757	40.33	-0.614	0.556
BB		-3.238	3.74	-0.865	0.412
CC		-35.122	20.35	-1.726	0.123
AB		30.123	19.26	1.564	0.157
AC		-87.944	43.07	-2.042	0.075
BC		3.140	14.02	0.224	0.828

$$S = 1.376 \quad R-Sq = 62.1\% \quad R-Sq(adj) = 19.5\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.22 ผลค่าสัมประสิทธิ์ของ Full + Quadratic model adjust

Term	Coefficients
Constant	-44359.5
A	12340.6
B	-2078.28
C	15851.8
AA	-874.806
BB	-10.7237
CC	-617.129
AB	325.964
AC	-2192.24
BC	23.9583

$$Y_2 = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_1 X_1 + \beta_5 X_2 X_2 + \beta_6 X_3 X_3 + \beta_7 X_1 X_2 \quad (4.19)$$

$$+ \beta_8 X_1 X_3 + \beta_9 X_2 X_3$$

$$Y_2 = -44359.5 + 12340.6 (X_1) - 2078.28 (X_2) + 15851.8 (X_3) - 874.806(X_1 X_1) \quad (4.20)$$

$$- 10.7237 (X_2 X_2) - 617.129 (X_3 X_3) + 325.964 (X_1 X_2) - 2192.24 (X_1 X_3)$$

$$+ 23.9583 (X_2 X_3)$$

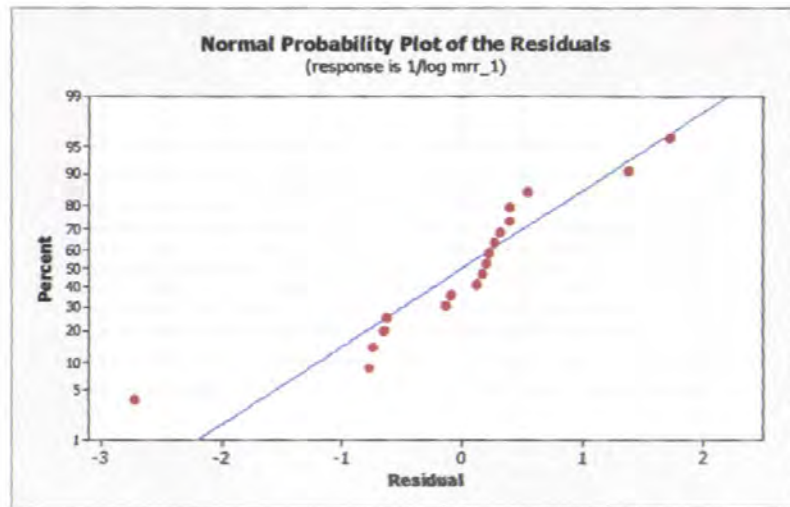
การวิเคราะห์จากตารางที่ 4.21 พบว่าค่า R-Sq = 62.1%, R-Sq(adj) = 19.5% เป็นค่าที่ปรับแล้วมีค่า ใกล้เคียงกับ R-Sq = 70% มากที่สุดและค่า P-Value ในตารางที่ 4.21 มีปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR) เลขที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.1$  คือ C = Log S และ AC = (In ON)(Log S) ทำให้สามารถยอมรับสมการ Full + Quadratic model adjust ได้

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบว่าเป็นการแจกแจงปกติ

โดยการใช้ค่าส่วนตกค้าง (Residual) พล็อตลงบนกราฟทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability Paper: NOPP) หากลักษณะของกราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรงหรือเกือบจะตรงแสดงว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

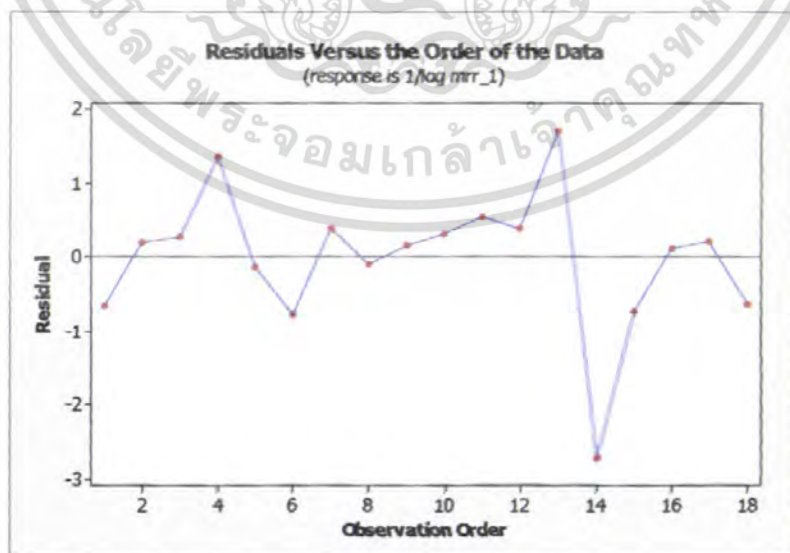


รูปที่ 4.8 การแจกแจงแบบปกติสำหรับค่าส่วนตกค้างของอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR)

จากรูปที่ 4.8 เป็นรูปกราฟการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability) สำหรับค่าส่วนตกค้างของอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR) จะเห็นได้ว่าค่าส่วนตกค้างเกาะกลุ่มกันไปในลักษณะเส้นตรง แสดงว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้มีลักษณะของการกระจายตัวแบบปกติ นั่นหมายถึงข้อมูลการวิเคราะห์สามารถเชื่อถือได้ การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

เป็นการทดสอบความถี่ของค่าส่วนตกค้างโดยใช้ค่าส่วนตกค้างและลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล มาทำการพล็อตกราฟค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้งและลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลอยู่บนแกนนอน

จากรูปที่ 4.9 เป็นรูปที่แสดงค่าส่วนตกค้างของอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR) กับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งลักษณะของกราฟมีการกระจายตัวอย่างไม่มีการเรียงแบบแสดงว่าข้อมูลในการทดลองมีความเป็นอิสระต่อกัน

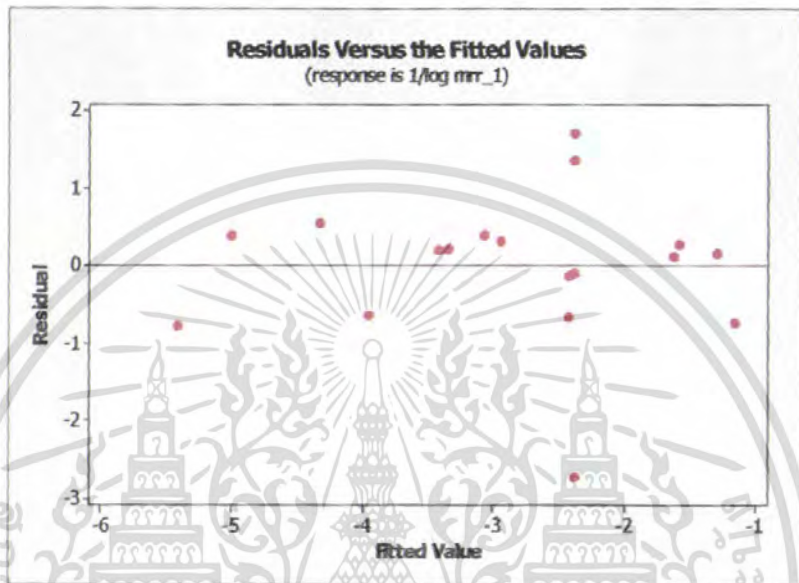


รูปที่ 4.9 ค่าส่วนตกค้างของอัตราการตัดเนื้อชิ้นงานกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตรวจสอบความเสถียรภาพของความแปรปรวน

เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของข้อมูล โดยการใช้ข้อมูลค่าส่วนตกค้างและค่าที่ถูกฟิต (Fitted) ในที่นี้คือ ค่าอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR) นำมาสร้างกราฟระหว่างค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิต (Fitted) ซึ่งจะแสดงดังรูปที่ 4.10 จากลักษณะของกราฟสรุปได้ว่า ข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติมีความเป็นอิสระของข้อมูล ไม่มีแนวโน้มในลักษณะรูปแบบใด ๆ และมีความสม่ำเสมอของความแปรปรวน



รูปที่ 4.10 ค่าส่วนตกค้างกับค่าอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR)

#### 4.2.3 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของค่าความหยาบผิว (Surface Roughness)

##### 4.2.3.1 Linear model

ตารางที่ 4.23 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าตอบสนองอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR)

Term	Coefficients	SE Coefficients	T	P-Value
constant	8.2554	0.1871	44.123	0.000
A	0.1612	0.3681	0.438	0.668
B	1.7770	0.3682	4.826	0.000
C	-0.1830	0.3745	-0.489	0.633

$$S = 0.7871 \quad R\text{-Sq} = 62.8\% \quad R\text{-Sq(adj)} = 54.8\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.24 ผลค่าสัมประสิทธิ์ของ Linear model

Term	Coefficients
constant	4.10023
A	0.00322366
B	0.0888524
C	-0.0366061

$$Y_3 = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 \quad (4.21)$$

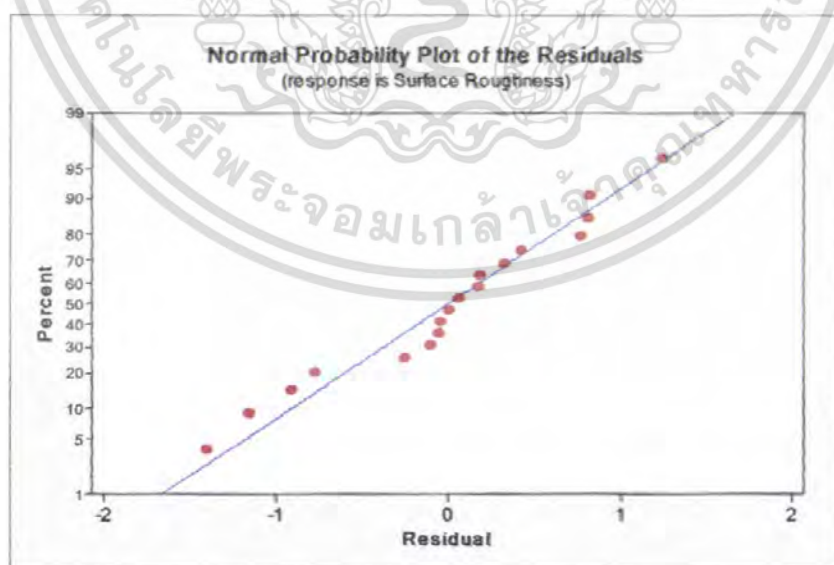
$$Y_3 = 4.10023 + 0.00322366 (X_1) + 0.0888524 (X_2) - 0.0366061 (X_3) \quad (4.22)$$

การวิเคราะห์จากตารางที่ 4.23 ดูที่ค่า P-Value พบปัจจัย B=IP ได้ส่งผลกระทบต่อค่าความหยาบผิว (Surface Roughness) ที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.1$  และได้ค่า R-Sq = 62.8%, R-Sq(adj) = 54.8% มีค่าน้อยน้อย R-Sq = 70% และค่า R-Sq(adj) ต้องมีค่าใกล้เคียงกับ R-Sq จึงไม่สามารถยอมรับ Linear model ได้

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบว่าเป็นการแจกแจงปกติ

โดยการใช้ค่าส่วนตกค้าง (Residual) ทดสอบบนกราฟทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability Paper: NOPP) หากลักษณะของกราฟที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงหรือเกือบจะตรง แสดงว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ



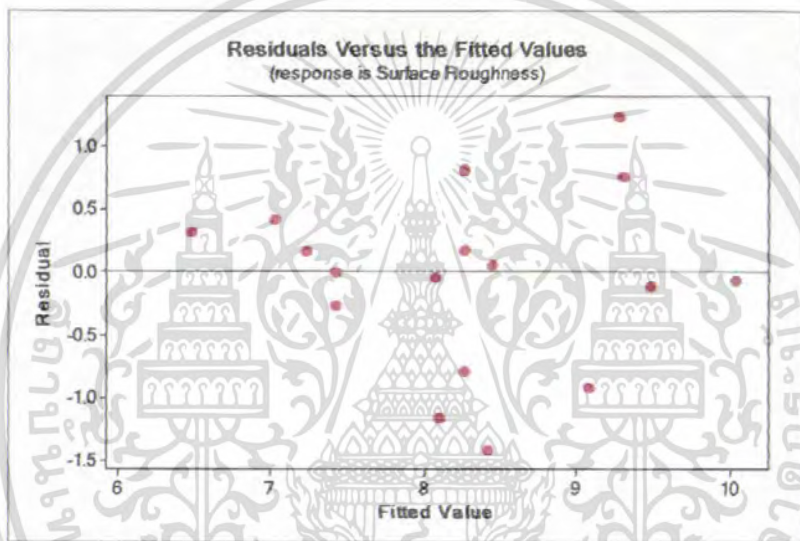
รูปที่ 4.11 การแจกแจงแบบปกติสำหรับค่าส่วนตกค้างของความหยาบผิว (Surface Roughness)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.11 เป็นรูปกราฟการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability) สำหรับค่าส่วนตักข้างของความหยาบผิว (Surface Roughness) จะเห็นได้ว่าค่าส่วนตักข้างไม่เกาะกลุ่มกันไปในลักษณะเส้นตรง แสดงว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้มีลักษณะของการกระจายตัวไม่เป็นแบบปกติ นั่นหมายถึงข้อมูลการวิเคราะห์ที่ไม่สามารถเชื่อถือได้

**การตรวจสอบความเสถียรภาพของความแปรปรวน**

เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของข้อมูล โดยการใช้ข้อมูลค่าส่วนตักข้างและค่าที่ถูกฟิต (Fitted) ในที่นี้คือค่าความหยาบผิว (Surface Roughness) นำมาสร้างกราฟระหว่างค่าส่วนตักข้างกับค่าที่ถูกฟิต (Fitted) ซึ่งจะแสดงดังรูปที่ 4.11 จากลักษณะของกราฟสรุปได้ว่า ข้อมูลมีการกระจายตัวแบบไม่ปกติมีความไม่อิสระของข้อมูล และไม่มี ความสม่ำเสมอของความแปรปรวน



รูปที่ 4.12 ค่าส่วนตักข้างกับค่าความหยาบผิว (Surface Roughness)

จากการวิเคราะห์ค่าความหยาบผิว (Surface Roughness) ที่ Linear model พบว่าข้อมูลที่ออกมาไม่สามารถยอมรับได้ เราจึงต้องเพิ่มพจน์ของปัจจัย ON, IP และ S ให้เป็นสมการ Linear + Squares เพื่อให้ค่า R-Sq, R-Sq(adj) มีค่าประมาณ 70 %

**4.2.3.2 Linear + Squares**

ตารางที่ 4.25 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าตอบสนองอัตราการผลิตเนื้อชิ้นงาน (MRR)

Term	Coefficients	SE Coefficients	T	P-Value
Constant	8.50985	0.3655	23.284	0.000
A	0.15734	0.3418	0.460	0.654
B	1.77982	0.3420	5.204	0.000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.25 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าตอบสนองอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR)

Term	Coefficients	SE Coefficients	T	P-Value
C	-0.20222	0.3487	-0.580	0.574
AA	-1.23146	0.5918	-2.081	0.062
BB	0.18377	0.5919	0.310	0.762
CC	0.06232	0.5914	0.105	0.918

S = 0.7310 R-Sq = 74.8% R-Sq(adj) = 61.0%

ตารางที่ 4.26 ผลค่าสัมประสิทธิ์ของ Linear model

Term	Coefficients
Constant	-38.9377
A	0.298698
B	0.0522359
C	-0.0903008
AA	$-4.92585 \times 10^{-4}$
BB	0.000459436
CC	0.00249280

$$Y_3 = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_1 X_1 + \beta_5 X_2 X_2 + \beta_6 X_3 X_3 \quad (4.23)$$

$$Y_3 = -38.9377 + 0.298698 (X_1) + 0.0522359 (X_2) - 0.0903008 (X_3) \quad (4.24)$$

$$-4.92585 \times 10^{-4} (X_1 X_1) + 0.000459436 (X_2 X_2) + 0.00249280 (X_3 X_3)$$

การวิเคราะห์จากตารางที่ 4.25 พบว่าค่า R-Sq = 74.8 %, R-Sq(adj) = 61.0% มี จึงส่งผลให้ค่า P-Value ใน ตารางที่ 4.25 ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าความหยาบผิว (Surface Roughness) คือ B = IP และ AA = (ON)(ON) ระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.1$  จึงสามารถยอมรับ Model นี้ได้

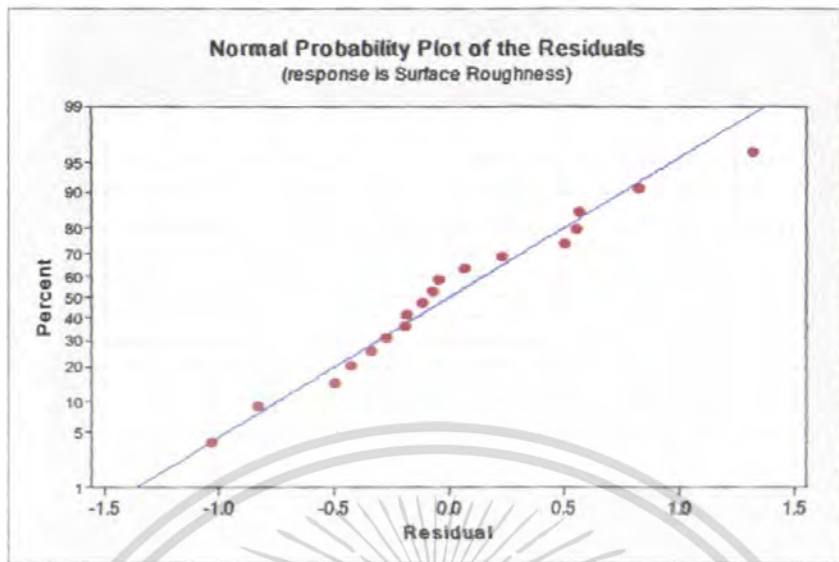
การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบว่าเป็นการแจกแจงปกติ

โดยการใช้นำส่วนตกค้าง (Residual) พล็อตลงบนกราฟทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability

Paper: NOPP) หากลักษณะของกราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรงหรือเกือบจะตรงแสดงว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 การแจกแจงแบบปกติสำหรับค่าส่วนตกค้างของความหยาบผิว (Surface Roughness)

จากรูปที่ 4.13 เป็นรูปกราฟการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability) สำหรับค่าส่วนตกค้างของความหยาบผิว (Surface Roughness) จะเห็นได้ว่าค่าส่วนตกค้างเกาะกลุ่มกันไปในลักษณะเส้นตรง แสดงว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้มีลักษณะของการกระจายตัวแบบปกติ นั่นหมายถึงข้อมูลการวิเคราะห์สามารถเชื่อถือได้

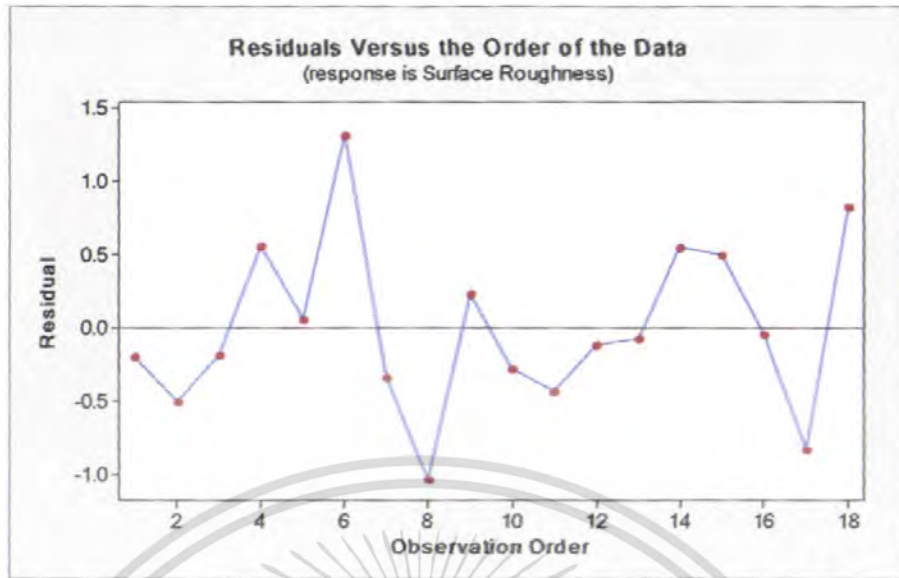
#### การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

เป็นการทดสอบความสัมพันธ์ของค่าส่วนตกค้างโดยใช้ค่าส่วนตกค้างและลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล มาทำการพล็อตกราฟค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้งและลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลอยู่บนแกนนอน

จากรูปที่ 4.14 เป็นรูปที่แสดงค่าส่วนตกค้างความหยาบผิว (Surface Roughness) กับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนซึ่งลักษณะของกราฟมีการกระจายตัวอย่างไม่มีรูปแบบแสดงว่าข้อมูลในการทดลองมีความเป็นอิสระต่อกัน

รูปที่ 4.15 ค่าส่วนตกค้างความหยาบผิว (Surface Roughness) ของกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล

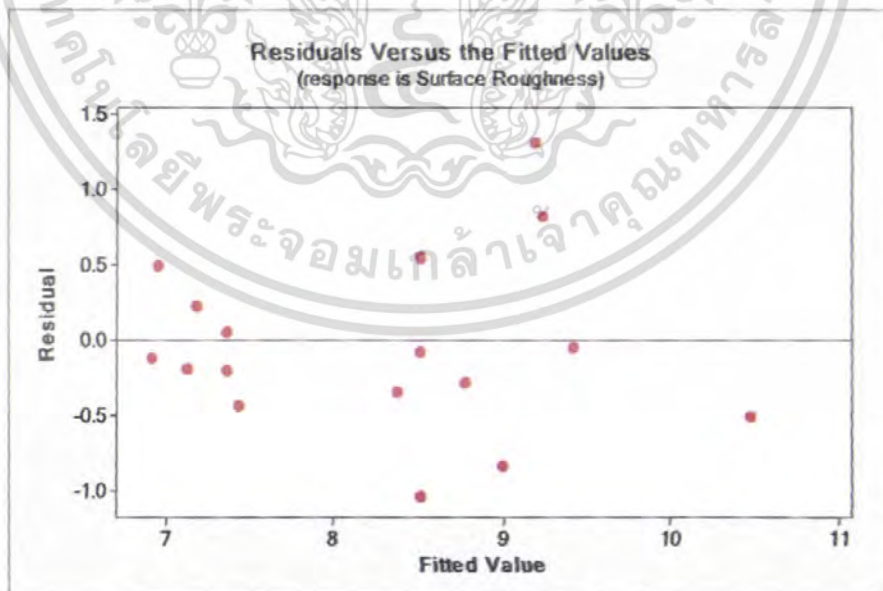
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 ค่าส่วนตกค้างความหยาบผิว (Surface Roughness)

การตรวจสอบความเสถียรภาพของความแปรปรวน

เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของข้อมูล โดยการใช้ข้อมูลค่าส่วนตกค้างและค่าที่ถูกฟิต (Fitted) ในที่นี้คือความหยาบผิว (Surface Roughness) นำมาสร้างกราฟระหว่างค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิต (Fitted) ซึ่งจะแสดงดังรูปที่ 4.15 จากลักษณะของกราฟสรุปได้ว่า ข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติมีความเป็นอิสระของข้อมูล ไม่มีแนวโน้มในลักษณะรูปแบบใดๆ และมีความสม่ำเสมอของความแปรปรวน



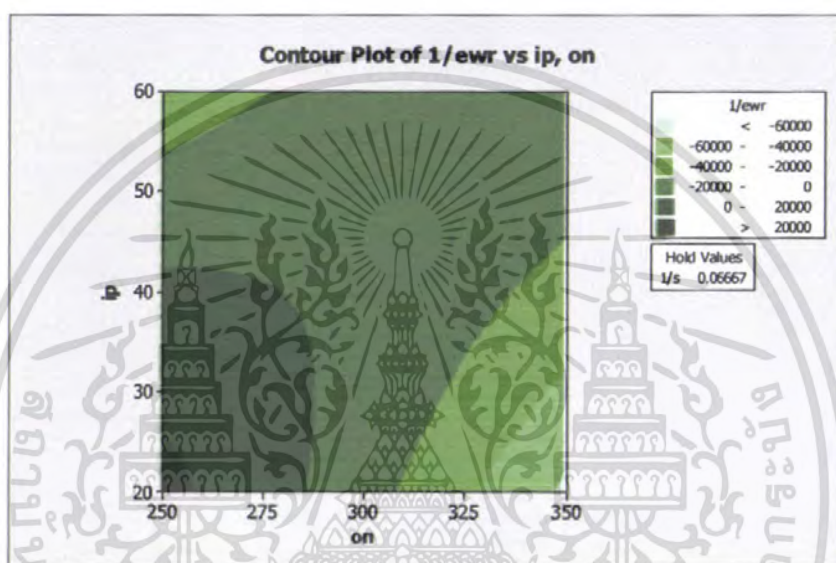
รูปที่ 4.15 ค่าส่วนตกค้างกับความหยาบผิว (Surface Roughness)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 การวิเคราะห์กราฟ Contour Plots

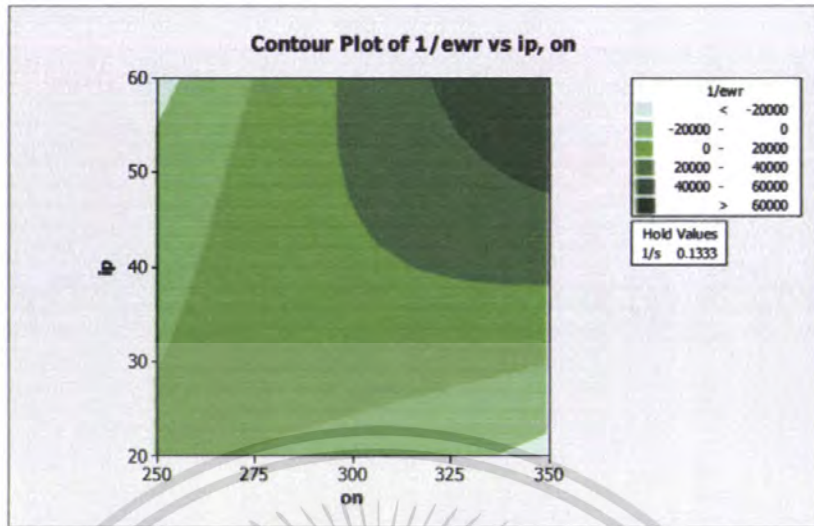
การวิเคราะห์ผลจากกราฟจะสามารถทำให้เข้าใจได้มากขึ้น ในการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยว่ามีผลอย่างไรกับค่าผลตอบสนองแต่ละค่า ในการสร้างกราฟจะนำค่าสมการที่มีค่า R-Sq และ R-Sq(adj) มากที่สุดของค่าอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR) ค่าอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR) และค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน (Surface Roughness) มาสร้างกราฟ Contour Plot

#### 4.3.1 อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR)



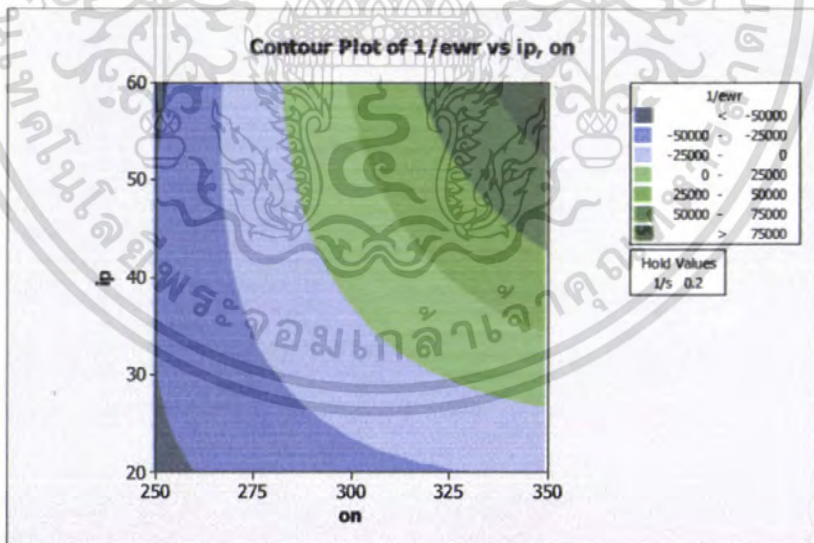
รูปที่ 4.16 กราฟ Contour / surface Plots ของ EWR ที่ระดับ S = 5 RPM แบบ Uncoded

ที่ความเร็ว 5 RPM จาก Contour Plot พบว่าแนวโน้มค่า ON และ IP ที่ส่งผลให้อัตราการสึกหรอของแท่งอิเล็กโทรดมีค่าน้อยที่สุดอยู่ในช่วง  $NO = 250-260 \mu \text{ sec}$  และ  $IP = 20-26 \text{ A}$  ที่ระดับความเชื่อมั่น  $\alpha = 0.1$



รูปที่ 4.17 กราฟ Contour / surface Plots ของ EWR ที่ระดับ S = 10 RPM แบบ Uncoded

ที่ความเร็ว 10 RPM จาก Contour Plot พบว่าแนวโน้มค่า ON และ IP ที่ส่งผลให้อัตราการสึกหรอของแท่งอิเล็กโทรดมีค่าน้อยที่สุดอยู่ในช่วง NO = 250-255  $\mu$  sec, IP = 55-60 A และ NO = 340-350  $\mu$  sec, IP 20-25 A ที่ระดับความเชื่อมั่น  $\alpha = 0.1$

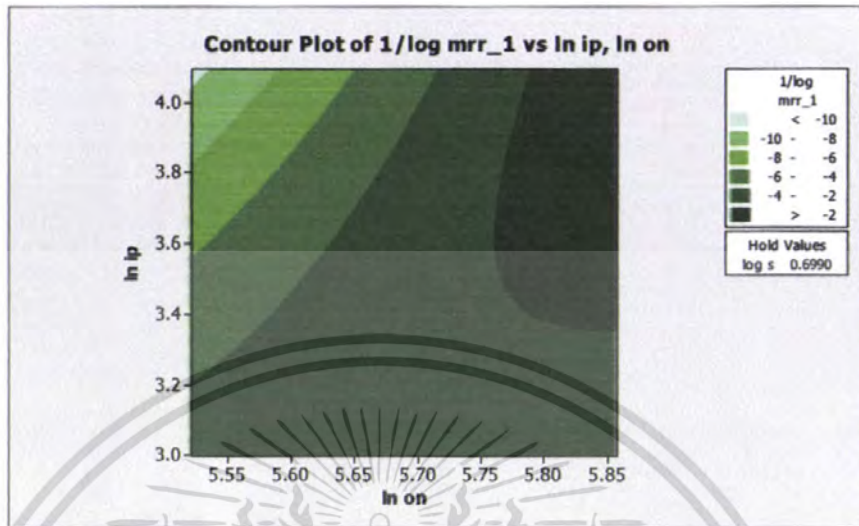


รูปที่ 4.18 กราฟ Contour / surface Plots ของ EWR ที่ระดับ S = 15 RPM แบบ Uncoded

ที่ความเร็ว 15 RPM จาก Contour Plot พบว่าแนวโน้มค่า ON และ IP ที่ส่งผลให้อัตราการสึกหรอของแท่งอิเล็กโทรดมีค่าน้อยที่สุดอยู่ในช่วง NO = 340 -350  $\mu$  sec และ IP = 55-60 A ที่ระดับความเชื่อมั่น  $\alpha = 0.1$

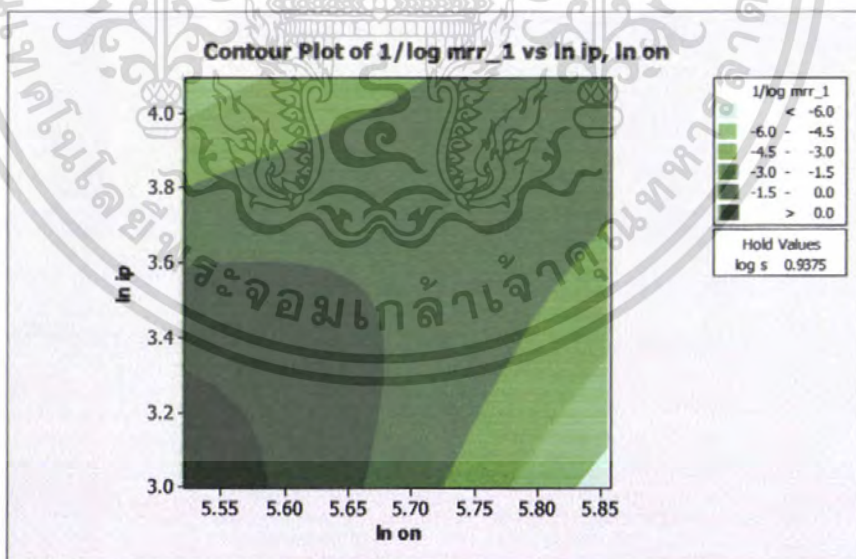
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.2 อัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR)



รูปที่ 4.19 กราฟ Contour / surface Plots ของ MRR ที่ระดับ S = 5 RPM แบบ Uncoded

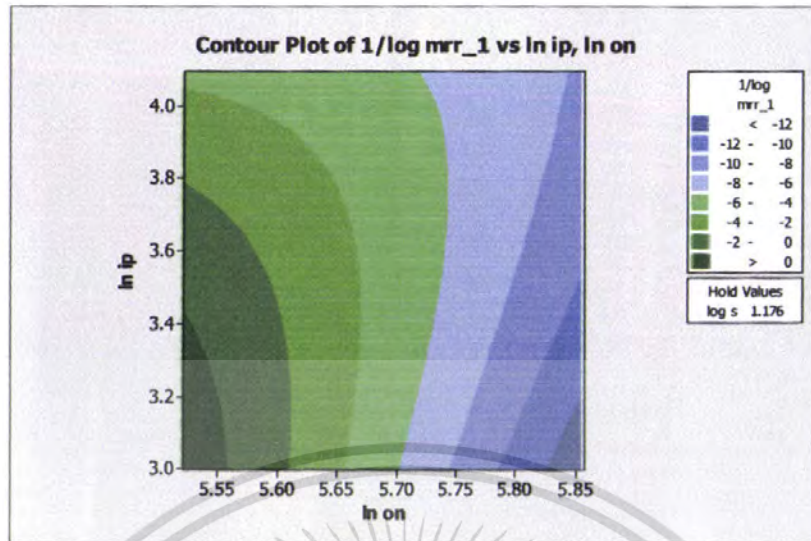
ที่ความเร็ว 5 RPM จาก Contour Plot พบว่าแนวโน้มค่า ON และ IP ที่ส่งผลให้อัตราการตัดเนื้อชิ้นงานมีค่ามากที่สุด อยู่ในช่วง NO = 250-255  $\mu$  sec และ IP = 55 - 60 A ที่ระดับความเชื่อมั่น  $\alpha = 0.1$



รูปที่ 4.20 กราฟ Contour / surface Plots ของ MRR ที่ระดับ S = 10 RPM แบบ Uncoded

ที่ความเร็ว 10 RPM จาก Contour Plot พบว่าแนวโน้มค่า ON และ IP ที่ส่งผลให้อัตราการตัดเนื้อชิ้นงานมีค่ามากที่สุด อยู่ที่ NO = 345-350  $\mu$  sec และ IP = 20-30 A ที่ระดับความเชื่อมั่น  $\alpha = 0.1$

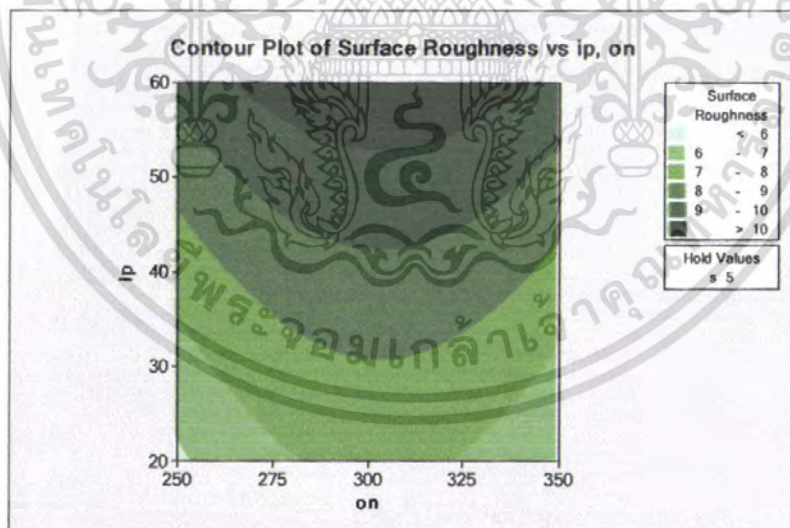
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 กราฟ Contour / surface Plots ของ MRR ที่ระดับ S = 15 RPM แบบ Uncoded

ที่ความเร็ว 15 RPM จาก Contour Plot พบว่าแนวโน้มค่า ON และ IP ที่ส่งผลให้อัตราการตัดเนื้อชิ้นงานมีค่ามากที่สุดอยู่ในช่วง NO = 345-350  $\mu$  sec และ IP = 20-30 A ที่ระดับความเชื่อมั่น  $\alpha = 0.1$

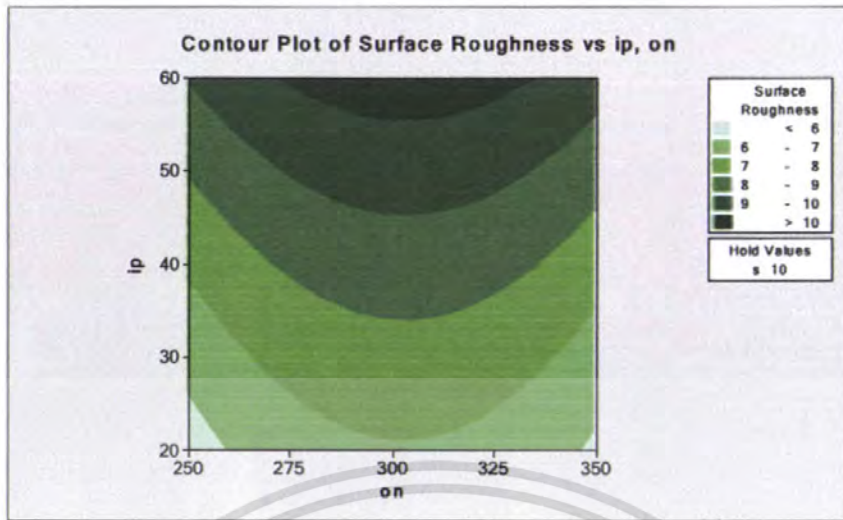
#### 4.3.3 ความหยาบผิวของชิ้นงาน (Surface Roughness)



รูปที่ 4.22 กราฟ Contour / surface Plots ของ Surface Roughness ที่ระดับ S = 5 RPM แบบ Uncoded

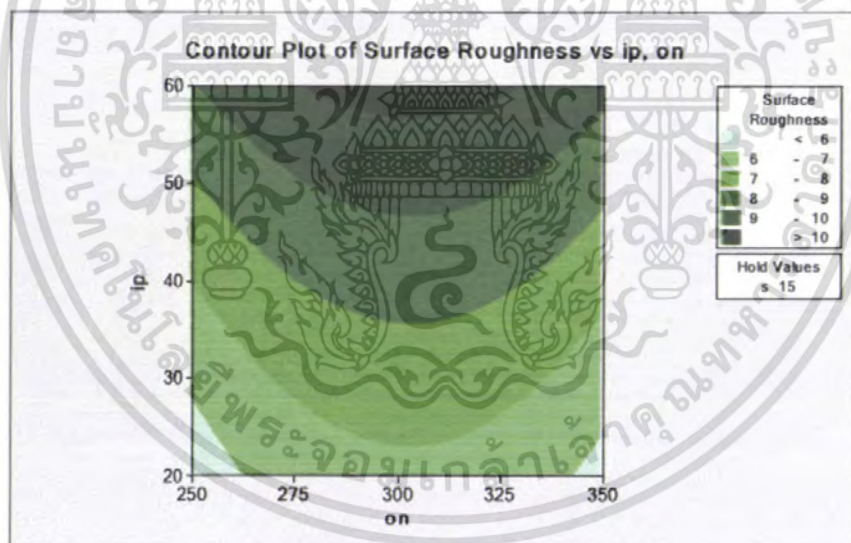
ที่ความเร็ว 5 RPM จาก Contour Plot พบว่าแนวโน้มค่า ON และ IP ที่ส่งผลให้ค่าความหยาบผิวมีค่าน้อยที่สุดอยู่ในช่วง NO = 250 - 255  $\mu$  sec และ IP = 20-22 A ที่ระดับความเชื่อมั่น  $\alpha = 0.1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 กราฟ Contour / surface Plots ของ Surface Roughness ที่ระดับ S = 10 RPM แบบ Uncoded

ที่ความเร็ว 10 RPM จาก Contour Plot พบว่าแนวโน้มค่า ON และ IP ที่ส่งผลให้ค่าความหยาบผิวมีค่าน้อยที่สุดอยู่ในช่วง NO = 250-260  $\mu$  sec, IP = 20-26 A และ NO = 345-350  $\mu$  sec, IP = 20-23 A ที่ระดับความเชื่อมั่น  $\alpha = 0.1$



รูปที่ 4.3 กราฟ Contour / surface Plots ของ Surface Roughness ที่ระดับ S = 15 RPM แบบ Uncoded

ที่ความเร็ว 15 RPM จาก Contour Plot พบว่าแนวโน้มค่า ON และ IP ที่ส่งผลให้ค่าความหยาบผิวมีค่าน้อยที่สุดอยู่ในช่วง NO = 250-260  $\mu$  sec, IP = 20-28 A และ NO = 345-350  $\mu$  sec, IP = 20-25 A ที่ระดับความเชื่อมั่น  $\alpha = 0.1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

สำหรับการทดลองและการวิจัยในครั้งนี้เป็นการศึกษาอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (Material Removal Rate: MRR) อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (Electrode Wear Rate: EWR) ความหยาบผิวของชิ้นงาน (Surface Roughness) และ ระยะตัดเกินของชิ้นงาน (Overcut) ที่ทำการตัดขึ้นรูปด้วยอีดีเอ็ม (Electrical Discharge Machining: EDM) ดังนั้น เพื่อให้การใช้งานของเครื่องอีดีเอ็ม เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและเกิดประโยชน์สูงสุดจึงควรทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่า อัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน) อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด ความหยาบผิวของชิ้นงาน และระยะตัดเกินของชิ้นงาน โดยที่อัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR) และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR) เป็นตัวแปรที่สำคัญในการกำหนดต้นทุนในการผลิต ในขณะที่ความหยาบผิวของชิ้นงานเป็นตัวแปรที่สำคัญตัวหนึ่งในการกำหนดคุณภาพของแม่พิมพ์ที่ผลิต เพราะแม่พิมพ์ต้องการความละเอียดของผิวชิ้นส่วนที่ใช้ในการผลิตค่อนข้างสูง

จากการทดลองตัวแปรที่ใช้ในการทดลองคือ ช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ก (IP) และช่วงความเร็วรอบ (S) ในการหมุนของหัวจับแท่งอิเล็กโทรด โดยมีระดับของตัวแปร 3 ระดับ ส่วนตัวแปรที่นอกเหนือจากตัวแปร ON และ IP จะกำหนดเป็นค่าคงที่ตลอดการทดลองทุกครั้งที่ทำการศึกษา โดยจะยึดตามค่ามาตรฐานของเงื่อนไข C100 (Condition C100) ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ใช้สำหรับอิเล็กโทรดทองแดงกับชิ้นงานเหล็กกล้าในการตัดเนื้อชิ้นงาน ซึ่งสามารถกำหนดได้โดยการป้อนจ็โวลต์ลงไปใน โปรแกรมควบคุมการตัด ส่วนการตั้งความเป็นขั้วจะให้อิเล็กโทรดเป็นขั้วลบ และชิ้นงานเป็นขั้วบวก ในการทดลองมีตัวแปร ON=3 ระดับ IP=3 ระดับ และ S = 3 ระดับ เหล็กกล้าเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง คือ เหล็กกล้าเครื่องมือ AUD 11 ส่วนอิเล็กโทรดที่ใช้ คือ ทองแดง

#### 5.1 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยกำหนดระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.1$  หรือความเชื่อมั่น 90 % พบว่า

1. ถ้าใช้ S = 5, 15 ON=250 IP=20 จะส่งผลทำให้ EWR มีค่าน้อยที่สุด
2. ถ้าใช้ S = 10, 15 ON=350 IP=20 จะส่งผลทำให้ MRR มีค่ามากที่สุด
3. ถ้าใช้ S = 5, 10 ON=350 IP=20 จะส่งผลทำให้ Surface Roughness มีค่าน้อยที่สุด

ดังนั้นค่าช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ก และช่วงความเร็วรอบ ที่มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.10 มีผลต่ออัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน อัตราการสึกหรอของแท่งอิเล็กโทรด และค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน แต่ไม่มีผลต่อค่าระยะตัดเกินของชิ้นงาน

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับการทดลองและการวิจัยในครั้งนี้เป็นการศึกษาลักษณะของอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน อัตราการสึกหรอของแท่งอิเล็กโทรด ค่าความหยาบผิว และระยะตัดเกินของเหล็กกล้าเครื่องมือ AUD 11 โดยผ่านกรรมวิธี EDM แบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบแท่งอิเล็กทรอนิกส์ แต่เนื่องจากหัวจับแท่งอิเล็กทรอนิกส์ที่เครื่องอิเล็กทรอนิกส์ที่ภาควิชาไม่ได้มีไว้ใช้งานทางด้านการหมุน โดยตรงจึงอาจส่งผลให้ค่าของผลการทดลองในครั้งนี้ผิดพลาดได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# TEST CERTIFICATE

**AICHI STEEL CORPORATION**

KARIYA PLANT: KARIYA-CITY.  
AICHI-PREF., JAPAN  
Date: MAR. 19, 2004 No. K-0745

Messrs: \_\_\_\_\_

Material	Size (MM)	Section Code	Charge No.	Condition Code	Bundle No.	No. of Piece	Netweight (KGS)
AUD11	75.00 X 75.00	20	12644	Q	FLD007	7	870

Ladle Analysis(%)										
C. x100	Si. x100	Mn. x100	P. x1000	S. x1000	Cu. x100	Ni. x100	Cr. x100	Mo. x100	B. x10000	V x100
108	105	56	19	5	2	16	986	150		5

Mechanical Properties								
Heat Treatment (C)		Tensile Test				Impact Test	Hardness Test	Bend Test
2nd Quenching	Tempering	Yield Strength kg/w. 100psi	Tensile Strength kg/cm <sup>2</sup> , 1000psi	Elongation %	Reduction of Area %	Charpy Imp Joule's-ft		

INSPECTOR'S MARK YA  
ID NUMBER S-03-2070

Hardness Test (As indicated)	Grain Size Test	Micro Structure	Micro Structure	Remark

Section	10: Round Bar	60: Flat Bar(Stainless steel)	Condition	A: Annealed	P: Cold Drawn
	20: Square Bar	61: Equal Leg Angle Bar(Stainless steel)		B: Low Temperature Annealed	Q: Spheroidized
Code	30: Hexagonal Bar	62: Unequal Leg Angle Bar(Stainless steel)	D: Solution Heat Treated	R: Hot Rolled	
	50: Flat Bar(Round edge)	63: Channel Bar	G: Oxidation Ground	S: Pickled	
	51: Flat Bar(Square edge)	65: Sheet Bar(Stainless steel)	H: Quenched and Tempered	T: Bar Turned	
	54: Flat Bar(Parabolic type)	61: Wire Rod	N: Normalized		

Chief, Quality Control Dept.  
AICHI STEEL CORPORATION

*Handwritten signature*

ตารางที่ ผค 1 ใบตรวจคุณสมบัติเหล็กกล้าเครื่องมือ AUD11



# MILL TEST CERTIFICATE

**ORIENTAL COPPER CO., LTD.**

Certificate Number : OC-QC-0162/07  
 Customer Name : \_\_\_\_\_  
 Order Number : CY-0701-010  
 Date : \_\_\_\_\_  
 L/C Number : \_\_\_\_\_  
 Specification : JIS H3140 : 1992 C1100 BB & H3250 : 2000 C1100 BD HALF HARD TEMPER  
 Product Description : COPPER BUSBARS  
 Product Traceability Code : P.I. NO. ZY-0701-022

OFFICE : 27<sup>th</sup> Fl., Bangkok Insurance B.C.A. Building,  
 25 South Sathon Road, Tungmahamek, Sathon,  
 Bangkok 10120, Thailand  
 TEL : +66 (0) 2697-5100  
 FAX : +66 (0) 2697-5199  
 FACTORY : 70045 M.6 Amata Nakhon Industrial Estate  
 Klongnam Sub-District, Amphur Muang,  
 Chonburi 20000, Thailand  
 TEL : (66 38) 743-444 (Auto 10 Lines)  
 FAX : (66 38) 213-256  
 Web Site : [www.orientalcopper.com](http://www.orientalcopper.com)

Size Thickness x Width x Length	Weight kgs	Conductivity %IACS	Copper %	Bend Test	Tensile Strength MPa	Elongation %	Dimension Check
DIA 3/8" RB x 5000 mm	532.2	101.0	99.98 min	-	288.6	17.9	PASSED
DIA 12 mm RB x 5000 mm	487.5	100.8	99.98 min	-	285.7	21.0	PASSED
1/8" x 5/8" SE x 5000 mm	583.1	100.5	99.98 min	PASSED	296.5	15.5	PASSED
3/16" x 3/4" SE x 5000 mm	523.9	100.9	99.98 min	PASSED	300.4	16.4	PASSED
3/16" x 1 1/4" SE x 5000 mm	529.3	100.8	99.98 min	PASSED	302.7	15.2	PASSED
1/4" x 1" SE x 5000 mm	585.3	100.9	99.98 min	PASSED	298.8	19.0	PASSED
3/8" x 1 1/2" SE x 5000 mm	713.9	101.1	99.98 min	PASSED	297.7	16.2	PASSED
3/8" x 2" SE x 5000 mm	495.8	101.1	99.98 min	PASSED	288.4	18.7	PASSED

We certify that the materials described hereon have been  
 manufactured, examined and tested in accordance with  
 our quality assurance procedure to JIS H3140 & H3250

Prepared by  
 Quality Assurance

Approved by  
 Plant Manager

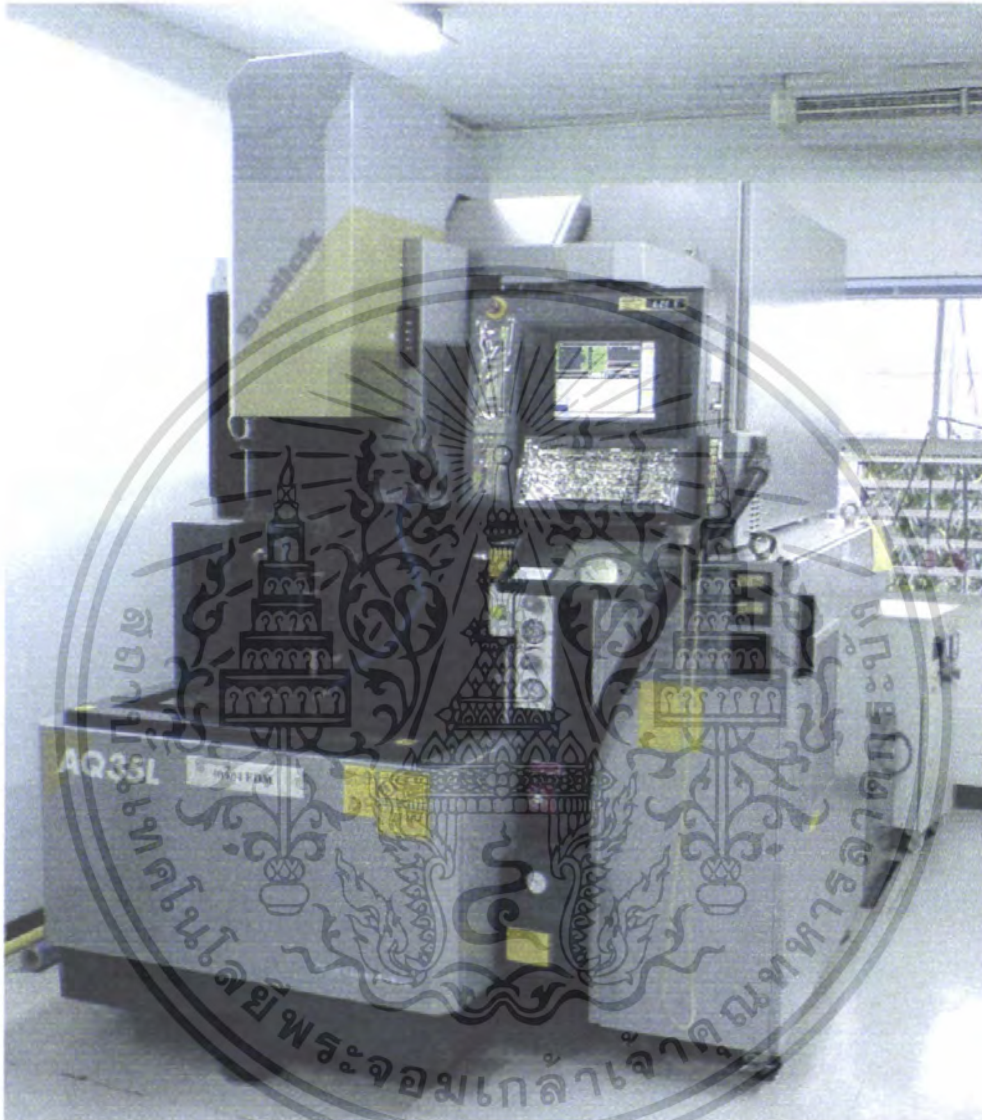
FM-QA-037 : 1/0 : 15-11-02

ตารางที่ ผก 2 ใบแสดงส่วนผสมเหล็กโทรทองแดง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# วิธีการใช้เครื่องอีดีเอ็ม



รูปที่ ผข 1 เครื่องอีดีเอ็มยี่ห้อ Sodick รุ่น AQ35L

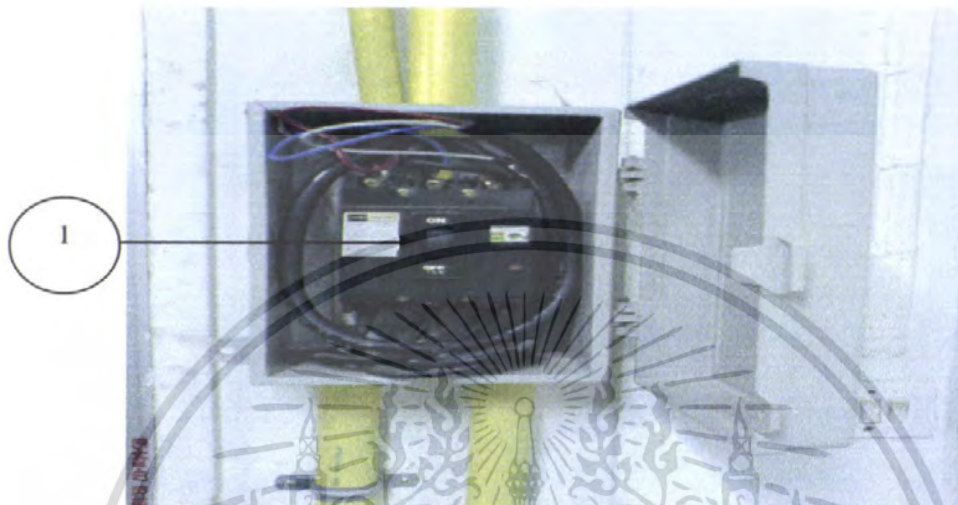
วิธีการใช้เครื่องสามารถแบ่งได้ 5 ขั้นตอนดังนี้

1. การเปิดเครื่อง
2. การติดตั้งอิเล็กโทรดและชิ้นงาน
3. การเชื่อมต่อเครื่องการป้อน โค้ดต่างๆ และการเริ่มทำการสปาร์ค
4. การถอดอิเล็กโทรดและชิ้นงาน
5. การปิดเครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1. การเปิดเครื่อง

1.1 เปิดสวิตช์เบรกเกอร์ ตามหมายเลข 1 ที่อยู่บริเวณมุมห้องด้านหน้าประตูทางเข้า



รูปที่ ผข 2 สวิตช์เบรกเกอร์

1.2 เปิดสวิตช์เครื่องแปลงไฟฟ้า ตามหมายเลข 2 ที่อยู่บริเวณด้านหลังเครื่องอีทีเอ็ม จากนั้นให้กดปุ่ม RESET ตามหมายเลข 3 เมื่อมีเสียงบีบคังขึ้น



รูปที่ ผข 3 เครื่องแปลงไฟฟ้า

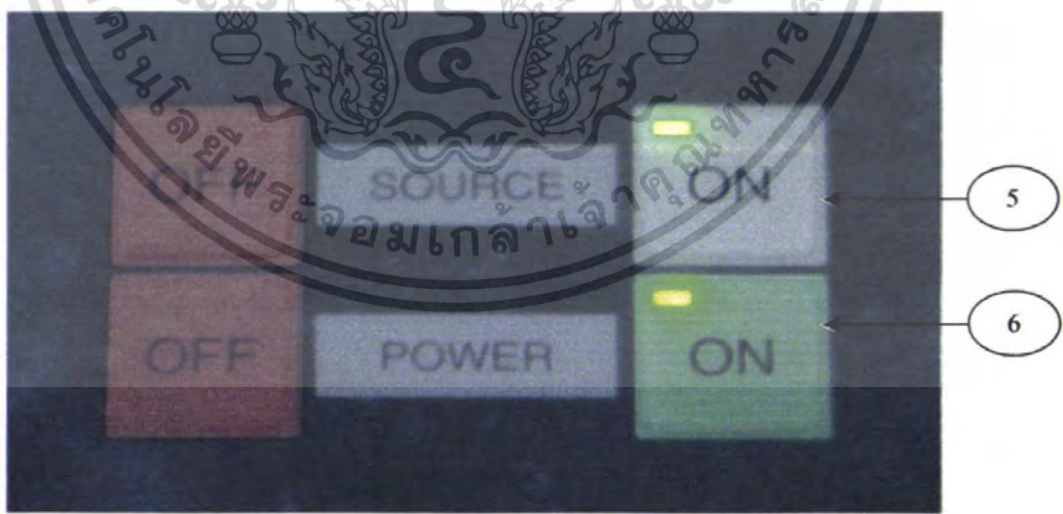
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 เปิดสวิตช์เบรกเกอร์ด้านหลังเครื่องอีซีเอ็ม ตามหมายเลข 4



รูปที่ ผข 4 สวิตช์เบรกเกอร์ด้านหลังเครื่องอีซีเอ็ม

- 1.4 กดปุ่ม SOURCE: ON (สีเขียว) ที่แผงควบคุมด้านหน้าเครื่องอีซีเอ็ม ตามหมายเลข 5 แล้วรอนจาเครื่องบูทระบบเสร็จ
- 1.5 กดปุ่ม POWER: ON (สีเขียว) ตามหมายเลข 6 แล้วรอนจนมอนิเตอร์ปรากฏข้อความให้กดปุ่ม ENT (สีเขียว) ตรงแผงควบคุมด้านซ้าย

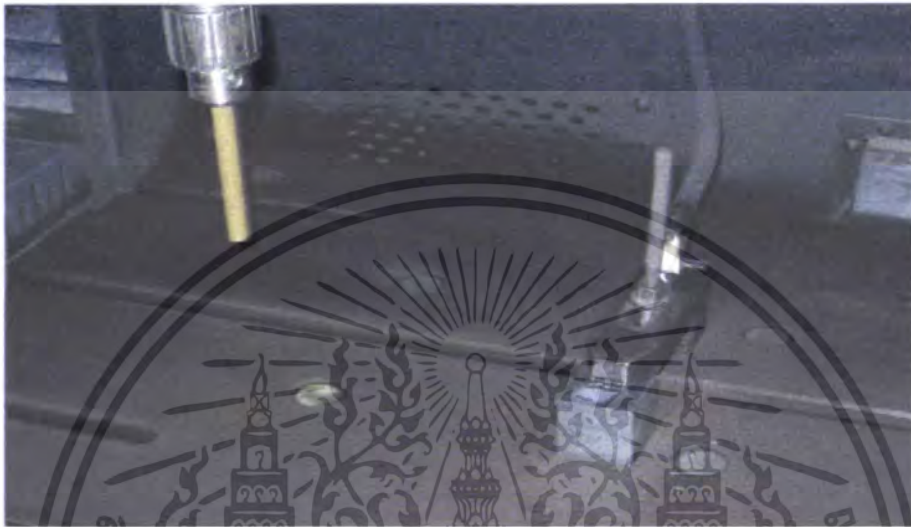


รูปที่ ผข 5 ปุ่ม เปิด/ปิด ระบบเครื่องอีซีเอ็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. การติดตั้งอิเล็กโทรดและชิ้นงาน

ทำการติดตั้งอิเล็กโทรดและชิ้นงานดังรูป ผข 6 ในส่วนของท่อนिकासาร ไดอิเล็กทริก เพื่อทำการฉีคล้ำพิเศษ โลหะในระหว่างการสปาร์ค จะต้องเซตตำแหน่งให้มีอัตราการผลิตล้ำพิเศษ โลหะทุกๆครั้งของการทดลอง



รูปที่ ผข 6 การติดตั้งอิเล็กโทรดและชิ้นงาน

## 3. การเซตอัพเครื่อง การป้อนโค้ดต่างๆ และการเริ่มทำการสปาร์ค

ในการตั้งค่าศูนย์นั้นจะต้องดำเนินการตั้งค่าศูนย์ที่ละแกน โดยจะมีรายละเอียดดังนี้

- 3.1 เริ่มต้นโดยการตั้งค่าศูนย์ในแนวแกน X ก่อน ให้เคลื่อนอิเล็กโทรด โดยกดปุ่มบังคับทิศทาง (อยู่ตรงแผงควบคุมทั้งซ้าย) เข้าใกล้ชิ้นงานตามแนวแกน X ห่างจากชิ้นงานประมาณ 1-2 เซนติเมตร
- 3.2 เมื่ออิเล็กโทรดอยู่ในจุดที่พร้อมจะตั้งค่าศูนย์แล้ว ให้เลือกคำสั่ง Appr Face ตามหมายเลข 7 ซึ่งเป็นคำสั่งที่ใช้ในการตั้งค่าศูนย์ชิ้นงาน
- 3.3 ให้กดเลือกแกน X บนหน้าจอมอนิเตอร์ ตามหมายเลข 8 แล้วป้อนทิศของแกน X เป็นบวก (+)
- 3.4 กดปุ่ม ON ตามหมายเลข 9
- 3.5 กำหนดการเคลื่อนที่เป็นแบบ ABS (Absolute) หรือ INC (Increment) โดยกดเลือกตามหมายเลข 10
- 3.6 กดปุ่ม ENT (สีเขียว) ตรงแผงควบคุมด้วยซ้าย จากนั้นหัวอิเล็กโทรดจะเข้าทำการเคลื่อนที่ค้นหาจุดอ้างอิงตามแกน X จนกระทั่งอิเล็กโทรดชนกับชิ้นงาน แล้วอิเล็กโทรดจะถอยห่างออกจากชิ้นงานเป็นระยะ 1 มม. โดยอัตโนมัติ
- 3.7 ทำการตั้งค่าศูนย์ของชิ้นงานในแกน Y และแกน Z ต่อไป ตามขั้นตอนที่ 3.2 ถึง 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผข 7 หน้าจอแสดงฟังก์ชัน Appr Face

3.8 เมื่อทำการตั้งค่าศูนย์ของชิ้นงานครบทั้ง 3 แกนแล้ว ผู้ใช้สามารถบังคับเลือก ไตรศมายังจุดเริ่มต้น (Origin Point) ได้ โดยใช้คำสั่ง Move ตามหมายเลข 11 จากนั้นกดปุ่ม XYZ ตามลำดับ ตามหมายเลข 12 หน้าจออมิตเตอร์จะแสดงพิกัดเริ่มต้นที่ X=0, Y=0 และ Z=0 ต่อไปให้กดปุ่ม ENT (สีเขียว) ตรงแผงควบคุมด้วยซ้ำอีก ไตรศก็จะเคลื่อนที่มายังจุดเริ่มต้น (Origin Point)



รูปที่ ผข 8 หน้าจอแสดงฟังก์ชัน Move

3.9 ป้อน G-Code โดยการเข้าไปโหมด Edit ด้านขวาของจออมิตเตอร์ ตามหมายเลข 13 ในโหมด Edit แล้วทำการป้อน G-Code ของการหมุนหัวจับแท่งอิเล็กทรอนิกส์ คือ ป้อน M08 ดังรูปที่ ผข 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผข 9 หน้าจอสำหรับเขียน G-Code ในฟังก์ชัน Edit



รูปที่ ผข 10 หน้าจอแสดง G-Code การหมุนหัวจับแท่งอิเล็กทรอนิกส์

- 3.10 กำหนดเงื่อนไขในการสปาร์ค กรณีที่ต้องการเปลี่ยนแปลงค่าของเงื่อนไขในการสปาร์คให้กลุ่มเงื่อนไขตามหมายเลข 14 แล้วทำการเปลี่ยนแปลงค่าเงื่อนไขที่ต้องการ แต่สำหรับผู้ใช้ที่ไม่สนใจเงื่อนไขในการสปาร์คสามารถใช้ค่าดีฟอลต์ (default) ของเครื่องในการสปาร์คได้
- 3.11 เข้าแถบเมนู Run เพื่อทำการทดสอบ G-Code และเงื่อนไขในการสปาร์ค ตามหมายเลข 15
- 3.12 เมื่อทดสอบ โปรแกรมผ่านแล้ว กดเลือก START G30 หมายเลข 16
- 3.13 กดปุ่ม ENT (สีเขียว) ตรงแผงควบคุมด้วยซ้ำ จากนั้นเครื่องก็จะเริ่มทำการสปาร์คขึ้นงาน ตามโค้ดที่ผู้ใช้ได้ป้อนเข้าไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา ผข 7 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

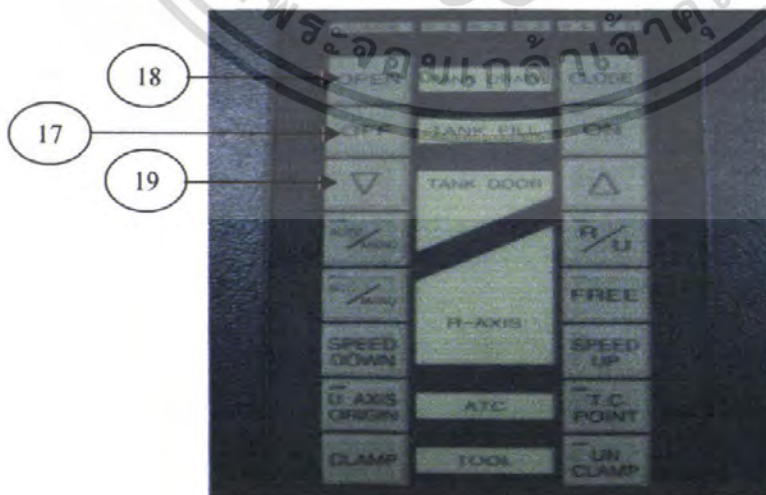


รูปที่ ผข 11 หน้าจอแสดงเมนู Run

#### 4. การถอดคีย์ล็อกโทรคและชิ้นงาน

ก่อนจะถอดคีย์ล็อกโทรคและชิ้นงานออก จะต้องทำการระบายสารไดอิเล็กทริกออกจากแท่งค้ำให้หมดก่อน โดยปฏิบัติดังต่อไปนี้

- 4.1 กดปุ่ม OFF TANK FILL หมายเลข 17
- 4.2 กดปุ่ม OPEN TANK DRAIN หมายเลข 18 แล้วรอนสารไดอิเล็กทริกไหลกลับสู่ถังเก็บจนหมด
- 4.3 กดปุ่ม TANK DOOR หมายเลข 19 เพื่อนำแท่งค้ำลง
- 4.2 ทำการถอดคีย์ล็อก โทรคและชิ้นงานออกจากตัวจับยึด
- 4.3 บังคับคีย์ล็อกโทรคมายังตำแหน่งกึ่งกลางของเครื่อง



รูปที่ ผข 12 แผงควบคุมแท่งค้ำด้านหน้าเครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5. การปิดเครื่อง

ทำการปิดไล้ย้อนกลับโดยมีขั้นตอนดังนี้

- 5.1 ทำการปิดระบบแมคคาณิก โดยการกดปุ่ม POWER OFF
- 5.2 ปิดโปรแกรม โดยการกดปุ่ม SOURCE OFF
- 5.3 ทำการปิดสวิทช์ด้านหลังเครื่องอีดีเอ็ม หมายเลข 4
- 5.4 ปิดสวิทช์เครื่องแปลงไฟฟ้า หมายเลข 2
- 5.5 ปิดสวิทช์เบรกเกอร์ (Breaker) หมายเลข 1
- 5.6 ทำความสะอาดเครื่องอีดีเอ็ม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้