

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาอิทธิพลของขนาดของอิเล็กทรอนิกส์ที่มีผลกระทบต่ออัตรา
การตัดเนื้อชิ้นงานและอัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์ของเหล็กกล้า
เครื่องมือ DC53 ที่ผ่านกรรมวิธี EDM



นายกิตติพงษ์ สุชาติ
นายชาญประสิทธิ์ ยุทธวารี
นายดำรงศักดิ์ นาคผิว

ว.พ.
ก.ว.ว.
ว.ว.

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 71994
วัน,เดือน,ปี..... 7 ส.ย. 2550

b. 11261081
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**A STUDY ON EFFECT OF ELECTRODE SIZE ON
MATERIAL REMOVAL RATE AND ELECTRODE WEAR
RATE OF EDMed DC 53 TOOL STEEL**



**MR. KITTIPONG SUCHAT
MR. CHANPRASIT YUTTHAWAREE
MR. DAMRONGSAK NAKPIVE**

**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 2006**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญาโท

หัวข้อปริญญาโท

การศึกษาอิทธิพลของขนาดของอิเล็กโทรดที่มีผลต่ออัตราการตัดเนื้อ
ชิ้นงานและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดของเหล็กกล้าเครื่องมือ DC 53 ที่
ผ่านกรรมวิธี EDM

A study on effect of electrode size on material removal rate and electrode
wear rate of EDMed DC 53 tool steel

นักศึกษา

นายกิตติพงษ์ สุขชาติ	รหัสประจำตัว	47015629
นายชาญประสิทธิ์ บุทธาวารี	รหัสประจำตัว	47015634
นายดำรงศักดิ์ นาคผิว	รหัสประจำตัว	47015638

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาโท

(ผศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ)

(ดร.อนิรุท ไชยจรรณชัย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การศึกษاثิทธิพลของขนาดของอิเล็กโทรดที่มีผลกระทบท่ออัตราการผลิตเนื้อชิ้นงานและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดของเหล็กกล้าเครื่องมือ DC53 ที่ผ่านกรรมวิธี EDM		
นักศึกษา	นายกิตติพงษ์ สุขชาติ	รหัสประจำตัว	47015629
	นายชาญประสิทธิ์ บุทธาวารี	รหัสประจำตัว	47015634
	นายดำรงศักดิ์ นาคผิว	รหัสประจำตัว	47015638
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม		
ปีการศึกษา	2549		
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	ผศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ ดร.อนิรุท ไชยจรรวนิช		

บทคัดย่อ

โครงการนี้ได้ทำการศึกษاثิทธิพลของขนาดของอิเล็กโทรดที่มีผลกระทบท่ออัตราการผลิตเนื้อชิ้นงานและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดของเหล็กกล้าเครื่องมือ DC 53 ที่เกิดจากการสปาร์คขึ้นรูป ในกระบวนการตัดด้วยวิธีการจ่ายประจุไฟฟ้า (Electrical Discharge Machining) โดยใช้ตัวแปรคือ ช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ค (IP) และ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอิเล็กโทรดซึ่งอิเล็กโทรดที่ใช้เป็นแท่งทองแดงทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 ขนาดคือ 9.5 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร และ 18.5 มิลลิเมตร โดยใช้ชิ้นงานทั้งหมดในการทดลอง 81 ชิ้น แต่ละชิ้นงานจะใช้เวลาในการทดลอง 30 นาที ต่อดังกล่าวทดลอง จากการใช้กราฟและการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ สรุปได้ว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอิเล็กโทรด มีผลกระทบท่ออัตราการผลิตเนื้อชิ้นงาน และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	A study on effect of electrode size on material removal rate and electrode wear rate of EDMed DC 53 tool steel
Student	Mr. Kittipong Suchat Mr. Chaprasit Yutthawaree Mr. Damrongsak Nakpive
Degree	Bachelor of Engineering in Industrial Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic Year	2006
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Kannaehai Kanlayasiri Dr. Anirut Chaijaruwanih

ABSTRACT

This project is aimed to study the effects of electrode size on material removal rate (MRR) and on electrode wear rate (EWR) during EDM process of DC53 tool steel. The process parameters are electrical discharge time (ON), electrical discharge peak current (IP) and electrode size: 9.5, 15, 18.5 mm. Cylindrical copper electrodes were used. The total number of experiments carried out was 81. Each workpiece was sparked for 30 minutes. From graph analysis and analysis of variance (ANOVA) at a confidence level of 95% ($\alpha = 0.05$), it can be concluded that the diameter of electrode affects both MRR and EWR.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเพราะได้รับคำแนะนำและการสนับสนุนของอาจารย์ทุกท่านอย่าง
ดีเสมอมาจนโครงการนี้สำเร็จสมบูรณ์ลุล่วงไปได้ด้วยดี กลุ่มผู้ทำกรวิจัยขอกราบขอบพระคุณ

ผศ.ดร. กรรณชัย กัลยาศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง
สำหรับช่วยให้โอกาสในการศึกษาปริญญาโทเล่มนี้ รวมทั้งมอบความรู้ คำแนะนำ ความช่วยเหลือทุกๆด้านรวมถึง
ความเอาใจใส่ในการทำปริญญาโทเป็นอย่างดีและทุกๆสิ่งที่อาจารย์มอบให้แก่กลุ่มผู้วิจัยตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา
ในการทำโครงการ

ดร. อนิรุท วิชาจรูณวิช อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงสำหรับ
การให้เกียรติและคำแนะนำต่างๆ ในการหาข้อมูล และเสียสละเวลามาให้ความรู้

ขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ เป็นอย่างสูงที่สุดในการให้โอกาสในการศึกษาตลอดระยะเวลาที่ผ่านมาที่มอบ
ให้แก่กลุ่มผู้วิจัยทำให้มีความสำเร็จที่สกลในวินวันนี้

ขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ
ทหารลาดกระบัง รวมทั้งอาจารย์ทุกท่าน

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่น้องชาลาคณะบังทุกคนที่ให้ความรู้ที่ดี ๆ ที่มีให้กับตลอดระยะเวลาที่ผ่านมาและให้
กำลังใจในการทำโครงการตลอดเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณหนังสือทุกเล่มที่ใช้ในการศึกษาข้อมูลในการค้นคว้าทำปริญญาโทและแหล่งความรู้
อื่นๆ ที่กลุ่มผู้วิจัยได้ใช้มาตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา

นายกิตติพงศ์ สุชาติ
นายชาญประสิทธิ์ ยุทธวาริ
นายดำรงศักดิ์ นาคผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

		หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย		ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ		ข
กิตติกรรมประกาศ		ก
สารบัญ		ง
สารบัญตาราง		จ
สารบัญรูป		ฉ
บทที่ 1	บทนำ	
	1.1 ที่มาของงานวิจัย	1
	1.2 วัตถุประสงค์	2
	1.3 ขอบเขตของการศึกษา	2
	1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2	ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
	2.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของการสปาร์ค	3
	2.1.1 สภาพที่กระแสเริ่มไหล (Dark current)	4
	2.1.2 การสปาร์คแบบโคโรน่า (Corona discharge)	4
	2.1.3 การสปาร์คแบบโกลว์ (Glow discharge)	4
	2.1.4 การสปาร์คแบบอาร์ค (Arc discharge)	4
	2.2 หลักการของกรรมวิธีขึ้นรูปด้วยเครื่องอีดีเอ็ม	5
	2.2.1 โส่รงดันไฟฟ้า	6
	2.2.2 การสูญเสียความเป็นจนวน	7
	2.2.3 สปาร์คหลอมละลาย	7
	2.2.4 เย็นตัว	7
	2.2.5 กลับคืนสู่ความเป็นจนวน	7
	2.2.6 ประโยชน์ของกรรมวิธีอีดีเอ็ม	7
	2.2.7 การแบ่งประเภทของกรรมวิธีอีดีเอ็ม (Categories of EDM)	8
	2.2.8 อุปกรณ์ของกรรมวิธีอีดีเอ็ม	8
	2.3 อิเล็กโทรด (Electrode)	9
	2.3.1 คุณสมบัติของอิเล็กโทรดกรรมวิธีอีดีเอ็ม	9
	2.3.2 วัสดุที่ทำอิเล็กโทรด	9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 ระบบไดอิเล็กตริก (Dielectric System)	13
2.4.1 หน้าทีของสารไดอิเล็กตริก	13
2.4.2 ประเภทของสารไดอิเล็กตริก	13
2.4.3 คุณสมบัติของสารไดอิเล็กตริก	14
2.5 ระบบการไหลไดอิเล็กตริก (Flushing)	14
2.5.1 การแบ่งประเภทระบบการไหลของไดอิเล็กตริก	15
2.5.2 ปัญหาแก๊ส (Gas Problem)	19
2.5.3 ระบบเซอร์โว (Servo System)	19
2.6 หลักการออกแบบการทดลอง	20
2.6.1 การออกแบบการทดลองแบบฟลายอเรียค	20
2.6.2 การนำเขยบคุม	21
2.6.3 การเลือกขนาดของตัวอย่าง	21
2.6.4 เส้นโค้งลักษณะสมบัติของการดำเนินงาน	22
2.7 การใช้หลักทางสถิติในการทดลอง	23
2.8 การตั้งสมมติฐานในการทดสอบ	23
2.8.1 ชนิดของสมมติฐาน	23
2.8.2 ความผิดพลาดในการทดสอบสมมติฐาน	24
2.8.3 การตั้งสมมติฐานในการออกแบบการทดลอง	24
2.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวน	24
2.9.1 รูปแบบเชิงเส้นทางสถิติ	26
2.9.2 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ	28
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง	31
3.1.1 อิเล็กโทรด	31
3.1.2 ชิ้นงานทดลอง	32
3.1.3 สารไดอิเล็กตริก	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	32
3.2.1 เครื่องออสซิลิโสม	32
3.2.2 เครื่องก้อยไฟฟ้าตัดโลหะ	33
3.2.3 เครื่องกัด	34
3.2.4 เคาบไฟฟ้า	34
3.2.5 เครื่องกลึง	35
3.2.6 เครื่องขึ้นน้ำหนักดิจิทัล	36
3.3 หลักการออกแบบการทดลอง	36
3.3.1 ทำความเข้าใจถึงปัญหา	36
3.3.2 เลือกพารามิเตอร์ ระดับ และขอบเขต	36
3.3.3 เลือกการออกแบบการทดลอง	37
3.3.4 แผนการทดลอง	37
3.4 ขั้นตอนการทดลอง	41
3.4.1 ขั้นตอนก่อนการทดลอง	41
3.4.2 ขั้นตอนระหว่างการทดลอง	41
3.4.3 ขั้นตอนหลังการทดลอง	41
บทที่ 4 ผลการทดลอง	
4.1 ตารางบันทึกผลการทดลอง	43
4.2 การวิเคราะห์ผลด้วยกราฟ	46
4.3 การวิเคราะห์การทดลอง	52
4.3.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน	52
4.3.2 การวิเคราะห์ Duncan's Multiple Range Test	55
4.3.3 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ	58
4.3.4 การเปรียบเทียบระดับปัจจัย	62
4.3.5 การ Interaction ของอัตราการผลิตเนื้อชิ้นงาน (MRR)	
และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR)	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	
5.1 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง	69
5.2 ข้อเสนอแนะ	70
หนังสืออ้างอิง	71
ภาคผนวก ก	๗๓
ภาคผนวก ข	๗๖
ภาคผนวก ค	๗๘
ภาคผนวก ง	๗๙



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2-1 การคำนวณการวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	27
ตารางที่ 3-1 ระดับพหามิเตอร์ในการทดลอง.....	36
ตารางที่ 3-2 ตัวแปรที่สถานะคงที่โดยกำหนดค่าคงที่ตลอดการทดลอง.....	37
ตารางที่ 3-3 การออกแบบและลำดับการทดลองหาพารามิเตอร์ตอบสนอง.....	38
ตารางที่ 4-1 ค่าอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด.....	43
ตารางที่ 4-2 ผลการวิเคราะห์ MRR ด้วย ANOVA.....	53
ตารางที่ 4-3 ผลการวิเคราะห์ EWR ด้วย ANOVA.....	54
ตารางที่ 4-4 ผลการวิเคราะห์ MRR ด้วย Duncan's Multiple Range Test.....	55
ตารางที่ 4-7 ผลการวิเคราะห์ EWR ด้วย Duncan's Multiple Range Test.....	56
ตารางที่ ผก 1 G - Code.....	ผก 9
ตารางที่ ผข 1 แสดงค่าเฉลี่ย ($\bar{\mu}$) และ ค่าความแปรปรวน (σ).....	ผข 2
ตารางที่ ผข 2 แสดงผลการหาขนาดของตัวอย่างที่เหมาะสม.....	ผข 3
ตารางที่ ผค 1 ใบแสดงส่วนผสมเหล็กกล้า DC53.....	ผค 2
ตารางที่ ผค 2 ใบแสดงส่วนผสมอิเล็กโทรดทองแดง.....	ผค 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2-1 คุณสมบัติพิเศษแรงดันไฟฟ้า - กระแสไฟฟ้าของการสปาร์ก.....	4
รูปที่ 2-2 กระบวนการคิซาร์จ.....	5
รูปที่ 2-3 สภาพของลำดับการสปาร์กในแต่ละครั้ง.....	6
รูปที่ 2-4 รูปร่างคลื่นของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในการขึ้นรูปด้วยเครื่องอีซีเอ็ม.....	6
รูปที่ 2-5 หลักการทำงานของระบบอีซีเอ็ม.....	8
รูปที่ 2-6 การสะสมของอนุภาคโลหะในช่องว่างเมื่อไม่ใช้ระบบการไหลของไดอิเล็กตริก.....	15
รูปที่ 2-7 อนุภาคโลหะก่อตัวเป็นสะพานตัวนำไฟฟ้า.....	15
รูปที่ 2-8 การไหลของไดอิเล็กตริกแบบฉีด.....	16
รูปที่ 2-10 ไดอิเล็กตริกไหลผ่านรูพรุนกราฟท์ออกมาที่บริเวณช่องว่าง.....	16
รูปที่ 2-11 การไหลของไดอิเล็กตริกแบบดูด.....	17
รูปที่ 2-12 การไหลของไดอิเล็กตริกทางค้ำข้าง.....	17
รูปที่ 2-13 การไหลของไดอิเล็กตริกโดยอาศัยการขึ้น-ลงของอิเล็กโทรด.....	18
รูปที่ 2-14 การไหลแบบฉีดพร้อมกับเลื่อนอิเล็กโทรดขึ้น.....	18
รูปที่ 2-15 การเจาะรูอิเล็กโทรดเพื่อระบายแก๊สที่เกิดขึ้น.....	19
รูปที่ 3-1 แท่งอิเล็กโทรดทองแดง.....	31
รูปที่ 3-2 ชิ้นงานทดลอง.....	32
รูปที่ 3-3 เครื่องอีซีเอ็ม.....	33
รูปที่ 3-4 เครื่องเลื่อยไฟฟ้าตัดโลหะ.....	33
รูปที่ 3-5 เครื่องกัด.....	34
รูปที่ 3-6 เตอบไฟฟ้า.....	35
รูปที่ 3-7 เครื่องกลึง.....	35
รูปที่ 3-8 เครื่องชักน้ำหนักคิซาร์จ.....	36
รูปที่ 4-1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง DIAMETER กับ MRR ที่ IP 50 แอมป์.....	46
รูปที่ 4-2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง DIAMETER กับ EWR ที่ IP 50 แอมป์.....	47
รูปที่ 4-3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง DIAMETER กับ MRR ที่ IP 75 แอมป์.....	47
รูปที่ 4-4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง DIAMETER กับ EWR ที่ IP 75 แอมป์.....	48
รูปที่ 4-5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง DIAMETER กับ MRR ที่ IP 90 แอมป์.....	48
รูปที่ 4-6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง DIAMETER กับ EWR ที่ IP 90 แอมป์.....	49
รูปที่ 4-7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง DIAMETER กับ MRR ที่ ON 125 ไมโครเซก.....	49
รูปที่ 4-8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง DIAMETER กับ EWR ที่ ON 125 ไมโครเซก.....	50
รูปที่ 4-9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง DIAMETER กับ MRR ที่ ON 190 ไมโครเซก.....	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4-10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง DIAMETER กับ EWR ที่ ON 190 ไมโครเซก.....	51
รูปที่ 4-11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง DIAMETER กับ MRR ที่ ON 250 ไมโครเซก.....	51
รูปที่ 4-12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง DIAMETER กับ EWR ที่ ON 250 ไมโครเซก.....	52
รูปที่ 4-13 การแจกแจงแบบปกติสำหรับค่าส่วนตกค้างของอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR).....	58
รูปที่ 4-14 การแจกแจงแบบปกติสำหรับค่าส่วนตกค้างของอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทโรด (EWR).....	59
รูปที่ 4-15 ค่าส่วนตกค้างของอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR) กับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล.....	60
รูปที่ 4-16 ค่าส่วนตกค้างของอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทโรด (EWR) กับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล.....	60
รูปที่ 4-17 กราฟค่าส่วนตกค้างกับค่าการทำนายอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR).....	61
รูปที่ 4-18 กราฟค่าส่วนตกค้างกับค่าการทำนายอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทโรด (EWR).....	62
รูปที่ 4-19 ระดับของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR).....	63
รูปที่ 4-20 ระดับของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการสึกหรอของอิเล็กโทโรด (EWR).....	63
รูปที่ 4-21 ระดับของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR).....	64
รูปที่ 4-22 ระดับของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการสึกหรอของอิเล็กโทโรด (EWR).....	64
รูปที่ 4-23 ระดับของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR).....	65
รูปที่ 4-24 ระดับของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการสึกหรอของอิเล็กโทโรด (EWR).....	65
รูปที่ 4-25 การ Interaction ของอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR).....	66
รูปที่ 4-26 การ Interaction ของอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR) (ต่อ).....	66
รูปที่ 4-27 การ Interaction ของอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR) (ต่อ).....	67
รูปที่ 4-28 การ Interaction ของอัตราการสึกหรอของแท่งอิเล็กโทโรด (EWR).....	67
รูปที่ 4-29 การ Interaction ของอัตราการสึกหรอของแท่งอิเล็กโทโรด (EWR) (ต่อ).....	68
รูปที่ 4-30 การ Interaction ของอัตราการสึกหรอของแท่งอิเล็กโทโรด (EWR) (ต่อ).....	68
รูปที่ ผก 1 ภาพเครื่องอีดีเอ็มยี่ห้อ Sodick รุ่น AQ35L.....	ผก 2
รูปที่ ผก 2 รูปหน้าปัดต่างๆของเครื่องแปลงไฟ.....	ผก 3
รูปที่ ผก 3 สวิตช์ด้านหลังเครื่องอีดีเอ็ม.....	ผก 3
รูปที่ ผก 4 แสดงปุ่มเปิดเครื่อง.....	ผก 4
รูปที่ ผก 5 แสดงหน้าจอหลังจากเปิดโปรแกรมของเครื่อง.....	ผก 4
รูปที่ ผก 6 แสดงภาพหน้าจอหลังจากเปิดระบบแมคคาณิก.....	ผก 5
รูปที่ ผก 7 แสดงปุ่มควบคุมต่างๆ.....	ผก 5
รูปที่ ผก 10 การติดตั้งชิ้นงาน และอิเล็กโทโรด.....	ผก 6
รูปที่ ผก 11 แสดงหน้าจอพร้อมใช้งานหลังจากเปิดเครื่อง.....	ผก 6
รูปที่ ผก 12 แสดงหน้าจอของ Appr Face.....	ผก 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา ฤๅละต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ ผก 13 แสดงหน้าต่าง MOVE	ผก 7
รูปที่ ผก 14 แสดงหน้าต่าง EDIT	ผก 8
รูปที่ ผก 15 แสดงหน้าต่างการป้อน G - Code และการป้อนค่า ON กับ IP	ผก 9
รูปที่ ผก 16 แสดงหน้าต่าง RUN	ผก 10
รูปที่ ผก 17 ปุ่มควบคุมต่างๆ	ผก 11
รูปที่ ผข 1 เส้นโค้งลักษณะสมมติของการดำเนินการ (Operating Characteristic Curves)	ผข 4
รูปที่ ผง 1 การสึกหรอของแท่งอิเล็กโทรด ลำดับการทดลองที่ 49 ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18.5 มิลลิเมตร	ผง 2
รูปที่ ผง 2 การสึกหรอของแท่งอิเล็กโทรด ลำดับการทดลองที่ 45 ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18.5 มิลลิเมตร	ผง 2
รูปที่ ผง 3 การสึกหรอของแท่งอิเล็กโทรด ลำดับการทดลองที่ 75 ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.5 มิลลิเมตร	ผง 3
รูปที่ ผง 4 การสึกหรอของแท่งอิเล็กโทรด ลำดับการทดลองที่ 81 ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร	ผง 3
รูปที่ ผง 5 การสึกหรอของแท่งอิเล็กโทรด ลำดับการทดลองที่ 72 ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร	ผง 4
รูปที่ ผง 6 การสึกหรอของแท่งอิเล็กโทรด ลำดับการทดลองที่ 51 ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร	ผง 4
รูปที่ ผง 7 การสึกหรอของแท่งอิเล็กโทรด ลำดับการทดลองที่ 26 ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18.5 มิลลิเมตร	ผง 5
รูปที่ ผง 8 การสึกหรอของแท่งอิเล็กโทรด ลำดับการทดลองที่ 12 ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18.5 มิลลิเมตร	ผง 5
รูปที่ ผง 9 การสึกหรอของแท่งอิเล็กโทรด ลำดับการทดลองที่ 8 ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร	ผง 6
รูปที่ ผง 10 การสึกหรอของแท่งอิเล็กโทรด ลำดับการทดลองที่ 4 ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18.5 มิลลิเมตร	ผง 6
รูปที่ ผง 11 ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 1 ลำดับชั้นงานที่ 66	ผง 7
รูปที่ ผง 12 ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 2 ลำดับชั้นงานที่ 25	ผง 7
รูปที่ ผง 13 ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 3 ลำดับชั้นงานที่ 38	ผง 7
รูปที่ ผง 14 ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 4 ลำดับชั้นงานที่ 76	ผง 8
รูปที่ ผง 15 ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 5 ลำดับชั้นงานที่ 48	ผง 8
รูปที่ ผง 16 ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 6 ลำดับชั้นงานที่ 65	ผง 8
รูปที่ ผง 17 ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 7 ลำดับชั้นงานที่ 62	ผง 9
รูปที่ ผง 18 ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 8 ลำดับชั้นงานที่ 52	ผง 9
รูปที่ ผง 19 ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 9 ลำดับชั้นงานที่ 2	ผง 9
รูปที่ ผง 20 ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 10 ลำดับชั้นงานที่ 78	ผง 10
รูปที่ ผง 21 ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 11 ลำดับชั้นงานที่ 12	ผง 10
รูปที่ ผง 22 ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 12 ลำดับชั้นงานที่ 80	ผง 10
รูปที่ ผง 23 ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 13 ลำดับชั้นงานที่ 19	ผง 11
รูปที่ ผง 24 ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 14 ลำดับชั้นงานที่ 13	ผง 11
รูปที่ ผง 25 ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 15 ลำดับชั้นงานที่ 75	ผง 11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา ฤๅละต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ ผง 26	ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 16 ลำดับชั้นงานที่ 39	ผง 12
รูปที่ ผง 27	ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 17 ลำดับชั้นงานที่ 57	ผง 12
รูปที่ ผง 28	ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 18 ลำดับชั้นงานที่ 6	ผง 12
รูปที่ ผง 29	ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 19 ลำดับชั้นงานที่ 21	ผง 13
รูปที่ ผง 30	ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 20 ลำดับชั้นงานที่ 35	ผง 13
รูปที่ ผง 31	ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 21 ลำดับชั้นงานที่ 72	ผง 13
รูปที่ ผง 32	ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 22 ลำดับชั้นงานที่ 60	ผง 14
รูปที่ ผง 33	ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 23 ลำดับชั้นงานที่ 51	ผง 14
รูปที่ ผง 34	ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 24 ลำดับชั้นงานที่ 30	ผง 14
รูปที่ ผง 35	ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 25 ลำดับชั้นงานที่ 41	ผง 15
รูปที่ ผง 36	ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 26 ลำดับชั้นงานที่ 71	ผง 15
รูปที่ ผง 37	ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 27 ลำดับชั้นงานที่ 9	ผง 15
รูปที่ ผง 38	ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 28 ลำดับชั้นงานที่ 27	ผง 16
รูปที่ ผง 39	ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 29 ลำดับชั้นงานที่ 64	ผง 16
รูปที่ ผง 40	ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 30 ลำดับชั้นงานที่ 67	ผง 16
รูปที่ ผง 41	ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 31 ลำดับชั้นงานที่ 59	ผง 17
รูปที่ ผง 42	ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 32 ลำดับชั้นงานที่ 58	ผง 17
รูปที่ ผง 43	ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 33 ลำดับชั้นงานที่ 22	ผง 17
รูปที่ ผง 44	ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 34 ลำดับชั้นงานที่ 14	ผง 18
รูปที่ ผง 45	ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 35 ลำดับชั้นงานที่ 40	ผง 18
รูปที่ ผง 46	ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 36 ลำดับชั้นงานที่ 31	ผง 18
รูปที่ ผง 47	ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 37 ลำดับชั้นงานที่ 69	ผง 19
รูปที่ ผง 48	ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 38 ลำดับชั้นงานที่ 23	ผง 19
รูปที่ ผง 49	ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 39 ลำดับชั้นงานที่ 36	ผง 19
รูปที่ ผง 50	ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 40 ลำดับชั้นงานที่ 10	ผง 20
รูปที่ ผง 51	ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 41 ลำดับชั้นงานที่ 46	ผง 20
รูปที่ ผง 52	ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 42 ลำดับชั้นงานที่ 3	ผง 20
รูปที่ ผง 53	ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 43 ลำดับชั้นงานที่ 77	ผง 21
รูปที่ ผง 54	ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 44 ลำดับชั้นงานที่ 26	ผง 21
รูปที่ ผง 55	ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 45 ลำดับชั้นงานที่ 73	ผง 21
รูปที่ ผง 56	ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 46 ลำดับชั้นงานที่ 53	ผง 22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ ผง 57 ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 47 ลำดับชั้นงานที่ 4	ผง 22
รูปที่ ผง 58 ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 48 ลำดับชั้นงานที่ 34	ผง 22
รูปที่ ผง 59 ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 49 ลำดับชั้นงานที่ 61	ผง 23
รูปที่ ผง 60 ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 50 ลำดับชั้นงานที่ 55	ผง 23
รูปที่ ผง 61 ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 51 ลำดับชั้นงานที่ 44	ผง 23
รูปที่ ผง 62 ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 52 ลำดับชั้นงานที่ 37	ผง 24
รูปที่ ผง 63 ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 53 ลำดับชั้นงานที่ 20	ผง 24
รูปที่ ผง 64 ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 54 ลำดับชั้นงานที่ 50	ผง 24
รูปที่ ผง 65 ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 55 ลำดับชั้นงานที่ 11	ผง 25
รูปที่ ผง 66 ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 56 ลำดับชั้นงานที่ 24	ผง 25
รูปที่ ผง 67 ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 57 ลำดับชั้นงานที่ 7	ผง 25
รูปที่ ผง 68 ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 58 ลำดับชั้นงานที่ 29	ผง 26
รูปที่ ผง 69 ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 59 ลำดับชั้นงานที่ 18	ผง 26
รูปที่ ผง 70 ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 60 ลำดับชั้นงานที่ 74	ผง 26
รูปที่ ผง 71 ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 61 ลำดับชั้นงานที่ 70	ผง 27
รูปที่ ผง 72 ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 62 ลำดับชั้นงานที่ 81	ผง 27
รูปที่ ผง 73 ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 63 ลำดับชั้นงานที่ 15	ผง 27
รูปที่ ผง 74 ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 64 ลำดับชั้นงานที่ 68	ผง 28
รูปที่ ผง 75 ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 65 ลำดับชั้นงานที่ 17	ผง 28
รูปที่ ผง 76 ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 66 ลำดับชั้นงานที่ 33	ผง 28
รูปที่ ผง 77 ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 67 ลำดับชั้นงานที่ 79	ผง 29
รูปที่ ผง 78 ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 68 ลำดับชั้นงานที่ 8	ผง 29
รูปที่ ผง 79 ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 69 ลำดับชั้นงานที่ 5	ผง 29
รูปที่ ผง 80 ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 70 ลำดับชั้นงานที่ 47	ผง 30
รูปที่ ผง 81 ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 71 ลำดับชั้นงานที่ 56	ผง 30
รูปที่ ผง 82 ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 72 ลำดับชั้นงานที่ 43	ผง 30
รูปที่ ผง 83 ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 73 ลำดับชั้นงานที่ 32	ผง 31
รูปที่ ผง 84 ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 74 ลำดับชั้นงานที่ 1	ผง 31
รูปที่ ผง 85 ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 75 ลำดับชั้นงานที่ 16	ผง 31
รูปที่ ผง 86 ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 76 ลำดับชั้นงานที่ 45	ผง 32
รูปที่ ผง 87 ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 77 ลำดับชั้นงานที่ 63	ผง 32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ ผง 88 ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 78 ลำดับชั้นงานที่ 28	ผง 32
รูปที่ ผง 89 ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 79 ลำดับชั้นงานที่ 42	ผง 33
รูปที่ ผง 90 ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 80 ลำดับชั้นงานที่ 54	ผง 33
รูปที่ ผง 91 ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 81 ลำดับชั้นงานที่ 49	ผง 33



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาของงานวิจัย

ในปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ มีความต้องการเพิ่มปริมาณการผลิตและเพิ่มรวมทั้งการลดเวลาในการทำงานเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้น ในเวลาที่น้อยลง จุดมุ่งหมายที่สำคัญ คือ การที่จะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ออกสู่ตลาดเป็นที่ยอมรับและเป็นที่ต้องการของผู้บริโภค วิธีการผลิตด้วยการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์จึงเป็นที่นิยม ซึ่งเป็นกระบวนการผลิตที่สามารถให้ปริมาณของงานออกมามากและเหมือนกันทั้งในด้านรูปร่าง และรูปทรง อีกทั้งเป็นการผลิตที่รวดเร็ว ให้คุณสมบัติที่เหมาะสม และง่ายต่อขบวนการผลิต การเลือกวัสดุมาใช้ในการทำแม่พิมพ์เพื่อใช้ในการผลิตชิ้นงานมักเป็นวัสดุที่มีความแข็งสูง ในการขึ้นรูปวัสดุโดยใช้กรรมวิธีทางกลธรรมดา นั้นอาจทำได้ยาก เนื่องจากวัสดุมีความแข็งใกล้เคียงกับเม็ดตัด ทำให้เกิดการสึกหรอของเม็ดตัดค่อนข้างรวดเร็ว ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องใช้กระบวนการอื่นเข้ามาทำการขึ้นรูป ซึ่งกรรมวิธีอีดีเอ็ม (Electrical Discharge Machining : EDM) เป็นวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในการตัดวัสดุที่มีความแข็งสูง โดยกรรมวิธีอีดีเอ็ม จะขึ้นรูปวัสดุโดยการทำให้เกิดความร้อนที่สูงมาก จนวัสดุเกิดการหลอมละลายในตำแหน่งที่เราต้องการความร้อนเกิดขึ้นจากการตัด มีผลทำให้แท่งอิเล็กโทรดมีการสึกหรอและทำให้อัตราการตัดเนื้อชิ้นงานเปลี่ยนแปลงไปด้วย เมื่อแท่งอิเล็กโทรดมีการสึกหรอและอัตราการตัดเนื้อชิ้นงานเปลี่ยนแปลง จึงมีผลให้การผลิตชิ้นงานที่ไม่ได้คุณภาพตามที่ต้องการ ซึ่งเป็นการเพิ่มต้นทุนในการผลิต เพราะต้องนำชิ้นงานเหล่านั้นไปทำการแก้ไขใหม่ หรือสูญเสียวัตถุดิบไปโดยเปล่าประโยชน์หากทำการแก้ไขใหม่ไม่ได้

ดังนั้นการศึกษาดังกล่าวนี้มีผลทำให้แท่งอิเล็กโทรดมีการสึกหรอ และทำให้อัตราการตัดเนื้อชิ้นงานเปลี่ยนแปลง เพื่อให้การผลิตมีประสิทธิภาพมากขึ้น จึงทำให้เกิดโครงการงานวิจัยนี้ขึ้นเพื่อศึกษาถึงความสำคัญของขนาดแท่งอิเล็กโทรดซึ่งเป็นตัวแปรหนึ่งของการผลิตด้วยกรรมวิธีอีดีเอ็ม ว่ามีผลกระทบมากน้อยเพียงใดที่จะทำให้อัตราการตัดเนื้อชิ้นงานและอัตราการสึกหรอของแท่งอิเล็กโทรดเปลี่ยนแปลง

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาอิทธิพลของขนาดของอิเล็กโทรดที่มีผลกระทบต่ออัตราการตัดเนื้อชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ DC53
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของขนาดของอิเล็กโทรดที่มีผลกระทบต่ออัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกรรมวิธีดีเอ็ม และศึกษาเฉพาะ 2 ตัวแปรหลัก คือระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) และกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ก (IP)
2. ใช้อิเล็กโทรดทองแดงทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.5 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร และ 18.5 มิลลิเมตร ในการขึ้นรูป
3. ศึกษาเฉพาะเหล็กกล้าเครื่องมือ DC 53

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถใช้เครื่องดีเอ็ม ในการขึ้นรูปได้
2. ทราบอัตราการตัดเนื้อชิ้นงานที่อิเล็กโทรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.5 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร และ 18.5 มิลลิเมตร
3. ทราบอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดที่อิเล็กโทรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.5 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร และ 18.5 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

กรรมวิธีอีดีเอ็ม (EDM) คือกระบวนการตัดวัสดุโดยวิธีความร้อน เป็นประเภทหนึ่งของกระบวนการตัดวัสดุโดยไม่ใช้วิธีการ (Non-Mechanical Means) ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นเกิดจากการสปาร์กทางไฟฟ้าทำให้อนุภาควัสดุที่ถูกแยกออกมาซึ่งอาจจะอยู่ในรูปของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส

เพื่อที่จะได้ปฏิบัติการทดลองได้อย่างถูกต้อง ทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องจึงมีความสำคัญมาก ซึ่งทฤษฎีที่ทำการศึกษาหลักๆ มีดังนี้

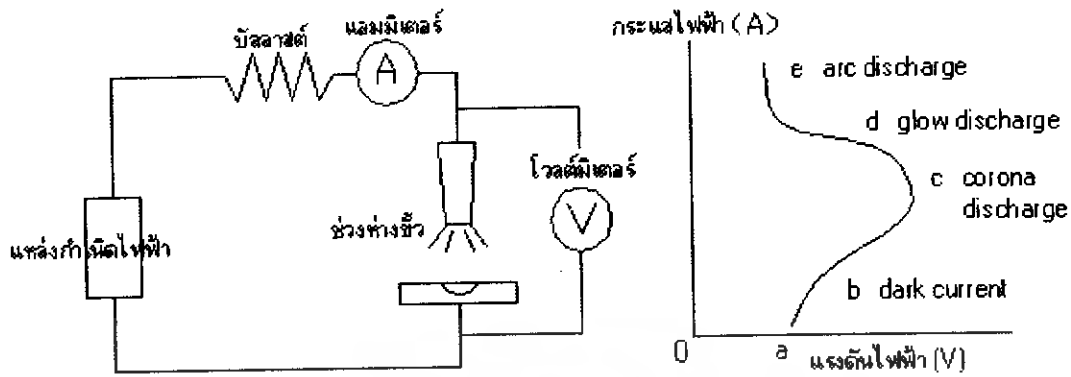
1. ทฤษฎีเบื้องต้นของการสปาร์ก
2. หลักการของกรรมวิธีขึ้นรูปด้วยเครื่องอีดีเอ็ม
3. อิเล็กโทรด (Electrode)
4. ระบบไดอิเล็กตริก (Dielectric System)
5. ระบบการไหลของไดอิเล็กตริก (Flushing)
6. ระบบเซอร์โว (Servo System)
7. หลักการออกแบบการทดลอง
8. การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA)

2.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของการสปาร์ก

ปรากฏการณ์การสปาร์ก เป็นชื่อโดยรวมของการสปาร์กต่างๆ ซึ่งเกิดขึ้นในกรณีที่ใส่แรงเคลื่อนไฟฟ้า ประเภท ของแข็ง ของเหลว หรือแก๊สคั่งอยู่ จนให้ฉนวนไฟฟ้าเหล่านี้สูญเสียความต้านทาน (Dielectric Breakdown) และเกิดมีกระแสไหลอย่างรุนแรง

ดังนั้นปรากฏการณ์ดังกล่าว จึงหมายถึง การสับบังคับทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัสดุตัวกลางที่โดยปกติกระแสจะไหลผ่านได้ยาก และเมื่อถึงเวลาที่การสับบังคับทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัสดุตัวกลางที่โดยปกติกระแสจะไหลผ่านได้ยาก และเมื่อถึงเวลาที่การสับบังคับนี้ถึงขีดจำกัด ก็จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขนาดใหญ่ไหลขึ้นมาอย่างกะทันหัน การนำเอาหลักการสปาร์กมาประยุกต์ใช้งาน ได้แก่ หลอดฟลูออเรสเซนต์ การเชื่อมแบบอาร์ค การขึ้นรูปด้วยวิธีการสปาร์ก เครื่องอีดีเอ็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-1 คุณสมบัติพิเศษของหลอดสุญญากาศ - กระแสไฟฟ้าของการสปาร์ค

2.1.1 สภาพที่กระแสเริ่มไหล (Dark Current)

ถ้าเพิ่มแรงดันไฟฟ้าของหลอดกำเนิดไฟฟ้า หรือ ลดช่องว่างระหว่างสปาร์คลงมาเรื่อยๆ เมื่อถึงจุดหนึ่งอากาศจะรวมตัวเป็นประจุไฟฟ้า และอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุเป็นลบจะถูกดูดจากขั้วลบไปยังขั้วบวก ซึ่งในช่วงเวลาจะจะมีกระแสไหลมากประมาณ 10^{-10} - 10^{-11} แอมแปร์ สภาพเช่นนี้มีชื่อเรียกว่า สภาพที่กระแสเริ่มไหล

2.1.2 การสปาร์คแบบโคโรน่า (Corona Discharge)

ถ้าเพิ่มแรงดันหรือลดช่องว่างลงอีกผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าบางส่วนที่เกิดสนามไฟฟ้าแรงเป็นพิเศษจะปล่อยประจุเสียความเป็นฉนวน เราเรียกสภาพนี้ว่าการสปาร์คแบบโคโรน่า ซึ่งเป็นการสปาร์คที่ขาดเสถียรภาพอย่างถาวร

2.1.3 การสปาร์คแบบโกลว์ (Glow Discharge)

บริเวณที่เกิดการสูญเสียความเป็นฉนวนแล้วนั้นอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบจะไหลในส่วนนี้มากขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้กระแสไฟฟ้ามีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างรวดเร็วด้วยสภาพการสปาร์คที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงระยะเวลาที่สั้นมาก เช่นนี้ เรียกว่า การสปาร์คแบบโกลว์

2.1.4 การสปาร์คแบบอาร์ค (Arc Discharge)

หลังจากที่ประจุไฟฟ้าที่สะสมอยู่ระหว่างขั้วถูกปลดปล่อยออกมา และการสปาร์คแบบโกลว์ได้มีขนาดกระแสไฟฟ้าค่าสูงสุดแล้ว การสปาร์คจะเข้าสู่ขั้นคอนสแตนต์ สภาพการสปาร์ค เช่นนี้จะเกิดขึ้นในลักษณะที่ควบคุมไม่ได้ ซึ่งเป็นสภาพที่ไม่เหมาะกับการขึ้นรูปด้วยวิธีการสปาร์ค ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องควบคุมพลังงานหรือระยะก่อนที่จะเข้าสู่สภาวะการสปาร์คแบบอาร์คนี้

การสปาร์คที่เป็นประภาไฟ โดยทั่วไปแล้วนั้นเป็นการสปาร์คซึ่งเกิดขึ้นทุกขั้นตอน ตั้งแต่สภาพที่กระแสเริ่มไหล จนถึงสภาวะสปาร์คแบบอาร์ค ภายในช่วงระยะเวลาที่สั้นมาก

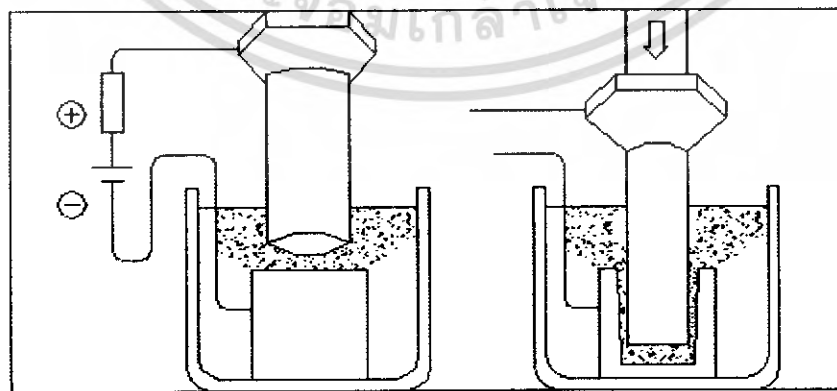
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 หลักการของกรรมวิธีขึ้นรูปด้วยเครื่องอีดีเอ็ม

การกัดโลหะไฟฟ้า (Electro Erosion) เป็นคำที่ใช้ครอบคลุมทุกกระบวนการที่แยกอนุภาควัสดุที่เกี่ยวข้องกับการส่งผ่านประจุไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดที่อยู่ภายใต้ของเหลวไดอิเล็กตริก หลักการทางฟิสิกส์ที่รู้จักกันมานานกว่า 100 ปีแล้ว นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ ชื่อ โจเซฟ พริสทลีย์ (Joseph Priestley) ค.ศ. 1733 - 1809 ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับผลของการกัดโลหะเนื่องการปล่อยประจุไฟฟ้า จากการทดลองยังไม่สามารถนำไปใช้ให้เป็นประโยชน์ในงานโลหะได้ จนกระทั่ง ได้มีการทดลองเป็นผลสำเร็จในระหว่างสงครามโลกครั้งที่สอง โดยที่ใช้ประโยชน์ของอุปกรณ์สวิตซ์ไฟฟ้ามาเป็นแนวทางในการพัฒนา

หลังความร้อนที่เกิดจากการปล่อยประจุไฟฟ้าออกมา จะหลอมละลายพื้นผิวของอิเล็กโทรดและชิ้นงานที่บริเวณช่องแคบของการปล่อยประจุไฟฟ้า โลหะหลอมเหลวจะถูกแรงหนีศูนย์กลางขี้นออกมา ในขณะที่พลังงานที่จัดให้ถูกขัดจังหวะหรือถูกตัด ความดันในบริเวณเส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่หลอมเหลวออกมา และยังจับอนุภาคของแข็งออกมาด้วยโดยวิธีกระแทกทางกล

กระบวนการปล่อยประจุไฟฟ้า (Discharge Process) คือหลักการของการกัดโลหะไฟฟ้า ชิ้นงานและอิเล็กโทรดถูกนำมวางไว้ในตำแหน่งที่พร้อมจะทำงานแต่ไม่สัมผัสกัน กระบวนการทั้งหมดจะเกิดในช่องของเหลวที่เป็นฉนวนไว้กับชิ้นงานและอิเล็กโทรด ชิ้นงานและอิเล็กโทรดถูกต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง กระแสไฟฟ้านี้จะถูกตัดหรือขัดจังหวะด้วยสวิตซ์เปิดปิด เมื่อสวิตซ์เปิด ศักย์ไฟฟ้าถูกสร้างขึ้นระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงาน ซึ่งเป็นการสร้างสนามไฟฟ้าระหว่างแอโนดกับแคโทดเองจากตัวกลางไดอิเล็กตริกเป็นฉนวน จึงไม่มีกระแสไหลในตอนเริ่มต้นจากระบบความถี่ความถี่ของเครื่องจักรทำให้อิเล็กโทรดและชิ้นงานเคลื่อนเข้าหากัน ดังนั้นจึงเกิดการสปาร์คที่จุดที่มีสนามไฟฟ้าสูงสุด การเกิดสปาร์คนี้เรียกว่า การปล่อยประจุไฟฟ้า กระบวนการนี้กระแสไฟฟ้าแปรผันเป็นความร้อนทำให้พื้นผิวรอบๆ เส้นทางการปล่อยประจุที่มีความร้อนเกิดขึ้นสูง 8000 องศาเซลเซียส ถึง 12000 องศาเซลเซียส ถ้ากระแสที่ไหลอยู่ถูกขัดจังหวะให้หยุด โดยการปิดสวิตซ์ เส้นทางการสปาร์คจะยุบพังลง การใช้สวิตซ์ให้หยุดจ่ายพลังงานจะเป็นสาเหตุทำให้ความดันที่บริเวณเส้นทางการปล่อยประจุไฟฟ้าลดลงอย่างทันทีทันใด มีผลทำให้โลหะหลอมเหลวเกิดการแตกกระจายเป็นไอ หลุดออกมาจากโลหะหลอมเหลว และของแข็งที่มีความสึกแน่นอน จึงเกิดเป็นหลุมบนพื้นผิวของการกัดโลหะไฟฟ้าของวัสดุ



รูปที่ 2-2 กระบวนการดีสชาร์จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 การสูญเสียความถี่เป็นฉนวน

เมื่อผ่านระยะระหว่างขั้วใกล้กันเรื่อย ๆ จนถึงระยะหนึ่ง (ระยะทางเป็นไมโครเมตร) สารละลายจะเกิดการสูญเสียความถี่เป็นฉนวนไอออนประจุลบจะถูกดึงไปอีกฝั่งที่เป็นบวก คือ เริ่มมีกระแสไหล

2.2.3 สปาร์คหลอมละลาย

เมื่อเกิดการสูญเสียความถี่เป็นฉนวนขึ้นแล้ว อิเล็กตรอนที่เป็นประจุลบจะเริ่มไหลเป็นจำนวนมากอย่างรุนแรง ซึ่งก็คือการสปาร์คนั่นเอง บริเวณส่วนที่เกิดการสปาร์คขึ้นนี้จะมีกระแสไฟฟ้าที่มีความหนาแน่นสูงมากไหลในช่วงระยะเวลาสั้น ในการขึ้นรูปชิ้นงานนั้นจะมีกระแสตั้งแต่ 0.1 แอมแปร์ ไปจนถึงหลายร้อยแอมแปร์ พลังงานที่ถูกปล่อยออกมาในช่วงนี้จะทำให้บริเวณที่เกิดการสปาร์คมีอุณหภูมิสูงมากขึ้นมาก (3,000 องศาเซลเซียสขึ้นไป) จนบางส่วนของชิ้นงานถูกหลอมละลาย นอกจากนั้นแล้วสารละลายบริเวณที่เกิดการสปาร์คก็จะถูกความร้อนที่เกิดขึ้นทำให้กลายเป็นก๊าซไป และเกิดความดันที่สูงมากเป็นบางส่วน

เมื่อการสปาร์คเริ่มขึ้น เนื่องจากว่ามีฉนวน (สารละลาย) อยู่ระหว่างขั้วจึงทำให้แรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วต่ำลง $E = IR$ (ตามกฎของโอห์ม) แรงดันไฟฟ้าในช่วงนี้เรียกว่าแรงดันไฟฟ้าสปาร์ค (Discharge)

2.2.4 การเย็นตัว

ความดันที่เกิดขึ้นนี้ จะทำให้ส่วนที่หลอมละลายของชิ้นงานหลุดกระเด็นไป ซึ่งมีอนุภาคสารละลายรอบข้างดูดความร้อนออกไปก็จะเริ่มออกไปก็จะเริ่มเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วกลายเป็นเศษผงชิ้นเล็กๆ ในช่วงที่เกิดการสปาร์คอยู่นั้นกระแสไฟฟ้าจะไหลอยู่ในระดับค่าหนึ่งแต่เมื่อพลังงานที่สะสมอยู่ในระหว่างนั้นถูกปลดปล่อยออกมาแรงดันไฟฟ้าจะต่ำลงอย่างรวดเร็ว

2.2.5 การกลับคืนสู่ความเป็นฉนวน

หลังจากที่การสปาร์คหนึ่งครั้ง ได้จบลงกระแสไฟฟ้าจะกลับกลายเป็นศูนย์ และจะรองกันว่าสารละลายจะกลับคืนสู่ความเป็นฉนวนโดยไม่มีกระแสไฟฟ้าเข้าไป การรอในช่วงนี้จะช่วยป้องกันการเกิดสปาร์กแบบผิดปกติ เช่น การสปาร์กซ้ำหรือสปาร์กเป็นบางจุดอื่นเนื่องจากการสะสมหรือทับถมจับตัวกันของอิเล็กตรอนที่ตกค้างระหว่างขั้วหรือเศษผงที่เกิดจากการสปาร์ค ภายหลังจากที่กลับคืนสู่ความเป็นฉนวนแล้วก็จะทำการสปาร์คเช่นเดิมอีก โดยเริ่มต้นที่ V ใหม่

2.2.6 ประโยชน์ของกรรมวิธีอีดีเอ็ม

1. ความสามารถในการแปรรูปโลหะแข็งหรือโลหะผสม ซึ่งไม่สามารถทำได้โดยวิธีธรรมดา กรรมวิธีอีดีเอ็มจึงมีบทบาทสำคัญในการทำแม่พิมพ์ และเครื่องมือที่ทำจากโลหะแข็ง ทั้งสะเดนคาร์ไบด์ สเตลไลท์
2. ความสามารถในการผลิตขึ้นรูปร่างใดๆก็ได้ เนื่องจากการกัดเนื้อโลหะอาศัยการสปาร์ค จึงไม่ต้องการความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงาน นอกจากอิเล็กโทรดเคลื่อนที่ลงมาในชิ้นงานเท่านั้น ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะแปรรูปโลหะรูปร่างใดๆโดยใช้เพียงหนึ่งอิเล็กโทรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. พื้นผิวจากกรรมวิธีอีดีเอ็มมีลักษณะเป็นหลุมเป็นจำนวนมาก จึงช่วยให้สามารถเก็บรักษาน้ำมันหล่อลื่นได้ดี จึงช่วยลดปัญหาเกี่ยวกับการหล่อลื่นได้
4. ในระหว่างทำการปรุรูขึ้นงานจะไม่มีารเปลี่ยนรูปร่าง เนื่องจากไม่มีแรงจากการสัมผัสของอิเล็กโทรดหรือไม่มีแรงทางกล ทำให้สามารถปรุรูขึ้นงานที่อบบางหรือเปราะได้
5. แม้กรรมวิธีอีดีเอ็มจะมีผลกระทบของความร้อน แต่เป็นผลกระทบเฉพาะที่ไม่ได้มีผลกระทบต่อกว้างส่วนใหญ่

2.2.7 การแบ่งประเภทของกรรมวิธีอีดีเอ็ม (Categories of EDM)

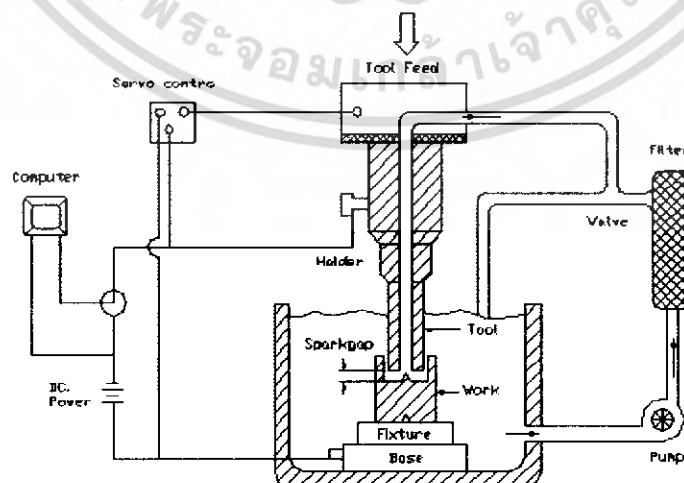
การปรุรูโลหะ โดยอาศัยการสปาร์คสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท

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) ทำหน้าที่ผลิตพลังงานดีสชาร์จเพื่อใช้ในการแยกอนุภาคโลหะ
2. ระบบไดอิเล็กทริก (Dielectric System) ทำหน้าที่เป็นฉนวน พัดพาสบอนุภาคโลหะและระบายความร้อนที่เกิดขึ้น
3. อิเล็กโทรด (Electrodes) ทำหน้าที่เป็นตัวสร้างแบบให้กับชิ้นงานหรือกัดเซาะโลหะงาน
4. ระบบเซอร์โว (Servo System) ทำการควบคุมการเคลื่อนอิเล็กโทรดเพื่อรักษาระยะช่องว่างของดีสชาร์จให้คงที่ ดังนั้นกำลังงานเฉลี่ยจะลดลงโดยตัวประกอบช่วงเวลาประวิง และสัมพันธ์กับการเกิดลัดวงจร และกำลังงานเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นกับตัวประกอบหน้าที่กระแสพัลส์ กระแสเฉลี่ยจะลดลงโดยตัวประกอบหน้าที่ช่วงเวลาประวิง



รูปที่ 2-5 หลักการทำงานของระบบอีดีเอ็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 อิเล็กโทรด (Electrode)

อิเล็กโทรดในกรรมวิธีดีเอ็มจะใช้กำหนดรูปร่างของชิ้นงานหรือรูที่ต้องการเจาะ ดังนั้นจึงต้องพิจารณาส่วนประกอบของอิเล็กโทรดและชนิดของวัสดุที่ใช้ ประกติแล้วค่าใช้จ่ายในการทำอิเล็กโทรดจะประมาณเท่ากับหรือมากกว่า 50% ของค่าใช้จ่ายในการแปรรูปทั้งหมด จะเห็นว่าการเลือกจำนวนอิเล็กโทรดที่ใช้งานมีความสำคัญมาก

2.3.1 คุณสมบัติของอิเล็กโทรดในกรรมวิธีดีเอ็ม

1. เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี
2. เป็นตัวนำความร้อนที่ดี
3. มีจุดหลอมละลายและมีจุดเดือดสูง
4. ต่อด้านการกัดเจาะจากไฟฟ้าหรือการสึกหรอต่ำ
5. มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ
6. มีความสามารถทำงานได้ดี ราคาควรจะประหยัด และความหนาแน่นต่ำ ทำให้มีน้ำหนักเบาด้วย

2.3.2 วัสดุที่ทำอิเล็กโทรด

อิเล็กโทรดสามารถทำมาจากวัสดุได้หลายประเภทซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆได้ดังนี้

2.3.2.1 อิเล็กโทรดโลหะ

ทองแดง (Electrolytic Copper)

ความหนาแน่น 8.9 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

จุดเดือด 1083 องศาเซลเซียส

ความต้านทานไฟฟ้า 0.0167 โอห์ม มม.²/ม.

ข้อดี ทองแดงสามารถใช้งานทั้งประเภทงานกัดขยายและงานกัดละเอียด ให้อัตราการกัดเนื้อโลหะสูง แต่การสึกหรอต่ำ

ข้อเสีย มีน้ำหนัก การขยายตัวทางความร้อนสูง รูปทรงไม่เสถียรเมื่อมีขนาดบาง

การผลิต การสร้างอิเล็กโทรด อาจจะใช้การขึ้นรูปโดยวิธี Stamping และ Coining ทองแดงสามารถแปรรูปได้โดยการกลึงหรือการกัด เพื่อที่หลีกเลี่ยงรอยจากมีดกลึงหรือมีดกัด จะต้องมีการหล่อเย็นด้วยน้ำมันหล่อเย็นชนิดพิเศษ หรือ Fat oil 50% ผสมกับ Petroleum 50% การเจียรระโนทองแดง จะใช้ใบเจียรระโนคือ

สารขัดดู	:	คาร์บอนรันดัม (Carborundum)
เกรน	:	46 ถึง 80 ตามผิวสำเร็จที่ต้องการ
โครงสร้าง	:	ความแข็ง H-K, รูปทูน 13 - 15
ความเร็วรอบ	:	30 เมตร/วินาที
สิ่งจำเป็น	:	มีการหล่อเย็นหรือใช้น้ำมันหล่อเย็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทองแดงผสมทั้งสะเตน

ความหนาแน่น 15-18 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

จุดเดือด 2,500 องศาเซลเซียส

ความต้านทานไฟฟ้า 0.045-0.055 โอห์ม มม.²/ม.

ทองแดงผสมทั้งสะเตนมีโครงสร้างเท่ากันทุกทิศทาง อัตราส่วนผสมของทั้งสองสามารถที่จะเปลี่ยนแปลงได้ ส่วนผสมของทั้งสะเตนอยู่ระหว่าง 50% ถึง 80% ทองแดงอยู่ระหว่าง 50% ถึง 20% ถ้าโลหะมีทั้งสะเตนผสมอยู่มากจะทำให้การแปรรูปยากกว่าโลหะที่มีทั้งสะเตนผสมอยู่น้อย แต่ในการทำเป็นอิเล็กทรอนิกส์ การสึกหรอจะต่ำกว่า

ข้อดี คุณภาพผิวงานดี มีความต้านทานการกัดเซาะ และมีเสถียรภาพทางความร้อน อัตราการกัดกร่อนโลหะสูง

ข้อเสีย ราคาแพงมากจำกัดกระบวนการจะยากกว่าทองแดง

การผลิต การทำอิเล็กทรอนิกส์ใช้วิธีการธรรมดา คือ การกลึง การเจียรระโน

การกลึง

มีดกลึง คาร์ไบด์ เหล็กเครื่องมือ

ความเร็วตัด 60 – 100 เมตร/นาที 12 – 20 เมตร/นาที

มุมคายหลบ 6 – 8 องศา 8 – 10 องศา

มุมหลบ 4 – 6 องศา 4 – 6 องศา

การเจียรระโน

สารขัดถู : คาร์บอนอีเอ็มเขียว (Green Carborundum)

เกรน : 60

ความแข็ง : J

โครงสร้าง : 8

การใช้งาน ทองแดงผสมทั้งสะเตนจะใช้งานดังต่อไปนี้

1. การแปรรูปโลหะทั้งสะเตนคาร์ไบด์
2. การเจาะรูที่มีความลึก
3. งานที่มีรอยละเอียดสูง
4. งานที่มีมุมขอบแหลม
5. งานที่ต้องการปริมาณมาก ชิ้นส่วนเล็ก

อลูมิเนียมผสม (Aluminium Alloys)

เมื่อแปรรูปชิ้นงานขนาดใหญ่ และเป็นสามมิติ ไม่ต้องการความเรียบของผิว จะใช้อลูมิเนียมผสม

ชื่อ ซิลูมิน (Silumin) เป็นอิเล็กทรอนิกส์ โลหะชนิดนี้ประกอบด้วย Al 85%, Si 11%, Mg 0.4% - 0.6%, Zn 1%, Ti 1%, Mn, Fe, Cu 1%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดี ชีวมินสามารถที่จะหล่อได้ง่าย เพื่อหลีกเลี่ยงรูปพรรณซึ่งไม่ควรจะหนามาก (ประมาณ 10 - 15 มิลลิเมตร) การหดตัวประมาณ 1% และสามารถขัดเซตด้วยการขึ้นรูปเย็น (Cold-Forming) ก่อนการอบอ่อน กระทำให้ ความร้อนอิเล็กโทรดถึง 540 องศาเซลเซียส ผสมด้วยให้เย็นตัวในน้ำ ใช้ระบบขับเศษโลหะแบบจืด และใช้ความดันต่ำ

ทองเหลือง (Brass)

ในทางปฏิบัติจะไม่ใช้ทองเหลืองเป็นอิเล็กโทรด เพราะมีการสึกหรอสูง แต่ลักษณะเด่นที่ได้รับจาก ทองเหลืองคือใช้กับการแปรรูปไปทานิยมผสม

เหล็ก (Steel)

เหล็กสามารถใช้เป็นอิเล็กโทรดได้ แต่ประสิทธิภาพจะต่ำกว่าทองแดงและกราไฟท์ สิ่งสำคัญของ กรรมวิธีดีเอ็มบนเหล็ก จะได้เส้นแยกของแบบหล่อพลาสติก และแบบหล่อแม่พิมพ์ ซึ่งส่วนบนของแบบหล่อหรือ แม่พิมพ์ ก็คืออิเล็กโทรด

2.3.2.2 อิเล็กโทรดโลหะ

กราไฟท์ (Graphites)

ความหนาแน่น	:	1.6 - 1.85 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
ความต้านทานไฟฟ้า	:	8 - 15 โอห์ม.มม. ² /ม.
จุดเดือด	:	3600 องศาเซลเซียส
ความแข็งแรงแตกหัก	:	200 - 700 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร
ขนาดของเกรน	:	0.01 - 0.045 มิลลิเมตร

ปกติแล้วกราฟไฟท์จะถูกอัดมาเป็นก้อนใหญ่ในระหว่างการผลิตตามความดันที่ใช้ ความหนาแน่น สามารถเปลี่ยนแปลงได้ กราไฟท์ความหนาแน่นต่ำจะเป็นแอนไอโซทรอปิก ส่วนกราฟไฟท์ความหนาแน่นสูงจะเป็นไอโซทรอปิก ความหนาแน่นของกราฟไฟท์สามารถที่จะระบุลักษณะที่สำคัญของกรรมวิธีดีเอ็ม เช่น กราไฟท์ความหนาแน่นต่ำ (1.6 - 1.7) จะให้อัตราการกัดโลหะสูงกว่ากราฟไฟท์ความหนาแน่นสูง (1.8 - 1.85)

ส่วนอัตราการสึกหรอที่มุม กราไฟท์ความหนาแน่นสูงจะให้ผลลัพธ์ดีกว่าขนาดเกรนของกราฟไฟท์ จะมีผลโดยตรงกับผิวของกราฟไฟท์และบนผิวที่กัดเซาะด้วย กราไฟท์ที่มีเกรนละเอียดจะมีผิวเรียบกว่ากราฟไฟท์ที่มีเกรนหยาบและผิวที่ถูกกัดเซาะก็จะมีคุณภาพดีกว่าด้วย

ข้อดี ไม่มีผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนอุณหภูมิโดยฉับพลัน และคงรักษาคุณสมบัติทางกลไว้ได้ ไม่มีการบิดงอหรือการเบี่ยงเบน สามารถแปรรูปได้ง่ายด้วยวิธีธรรมดาและราคาถูกทำให้ประหยัด

ข้อเสีย วัสดุเป็นสารขัดถู จึงต้องระมัดระวังในการป้องกันการสึกของเครื่องจักรจากผงกราฟไฟท์ กราไฟท์มักจะเปราะ ดังนั้นในการผลิตต้องระมัดระวังเป็นพิเศษโดยเฉพาะที่บริเวณมุมต่างๆ ไม่เหมาะกับการหล่อ และการขึ้นรูป ฝุ่นละอองของกราฟไฟท์ที่เกิดขึ้นระหว่างการขึ้นรูป ต้องมีระบบกำจัดที่เหมาะสมกับโรงงานและเป็น สิ่งจำเป็น

ข้อสังเกต กราไฟท์ไม่สามารถใช้กับเครื่องกำเนิดพัลส์แบบแกลกเซชัน (Relaxation) ได้การแปรรูป ทั้งสะเดนคาร์ไบด์จะทำได้ยาก และมีความเสี่ยงต่อความผิดปกติของดีซิสอาร์จสูงกว่าการใช้โลหะเป็น อิเล็กโทรดครา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฟฟ้าความหนาแน่นสูงจะใช้มือการสึกหรอและความแข็งแรงที่นุ่มเป็นวิกฤต ในขณะที่กราฟที่อื่นๆ ใช้ในกรณีการสึกหรอมีความสำคัญรองลงไป และภายในของแบบไม่มีรายละเอียดมากนัก

กราฟที่มีกรนละเอียดจะใช้สำหรับการแปรรูปที่มีรายละเอียด เช่น ขอบ นุ่มต่างๆ

การผลิต ในการทำอิเล็กทรอนิกส์กราฟจะใช้วิธีการแปรรูปแบบธรรมดา คือ การกลึง การเจียรระโนและการกัด

การกลึง การกลึงกราฟจะใช้มีดกลึงทำด้วยเหล็กเครื่องมือ ทั้งสะเตนคาร์ไบด์ หรือถ้าผลิตจำนวนมากอาจใช้มีดกลึงเพชร มีรายละเอียดดังนี้

	เหล็กเครื่องมือ	คาร์ไบด์	เพชร
มุมเหือ (Clearance Angle)	8 - 10 องศา	8 - 10 องศา	10 - 20 องศา
มุมคาบ (Rake Angle)	16 - 20 องศา	16 - 20 องศา	10 องศา
ความเร็วตัด	80 เมตร/นาที	150 เมตร/นาที	250 - 400 เมตร/นาที

การเจียรระโน กราฟสามารถทำการเจียรระโนได้โดยใช้ล้อหินเจียรระโนดังนี้

สารขัดถู	: คาบอร์นคิมเขียว
การยึดเหนี่ยว	: สารเคลือบ
เกรน	: 60 สำหรับงานละเอียด 36 สำหรับงานหยาบ
ความแข็ง	: 1
โครงสร้าง	: 5

การกัด เป็นข้อได้เปรียบของกราฟเมื่อผลิตอิเล็กทรอนิกส์สามมิติจากแบบจำลองเช่นใช้เครื่องกัดคัดลอก อาจจะใช้ความคมด้วยมือหรือควบคุมอัตโนมัติ ความเร็วกัดสูง(100 - 200 เมตร/นาที) และอัตราป้อน (100 - 200 มิลลิเมตร/นาที) ซึ่งสามารถทำอิเล็กทรอนิกส์กราฟได้เร็วกว่าทองแดงหรือทองแดงเคลือบเร็วถึง 5 - 10 เท่า

2.3.2.3 โลหะและอโลหะผสมกัน

ทองแดงผสมกราฟไฟท์

ใช้สำหรับจุดประสงค์พิเศษ ในวิธีสูญญากาศ จะเทพทองแดงเข้าไปในรูพรุนของกราฟไฟท์ ทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

ความหนาแน่น	: 2.4 - 3.2 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
ความต้านทานไฟฟ้า	: 3 - 5 โอห์ม มม./ม.
ความแข็งแรงตดหัก	: 700 - 900 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร

ข้อดี ทองแดงผสมกราฟไฟท์มีข้อดีเหมือนกับกราฟไฟท์ นอกจากนี้ยังมีการแปรรูปด้วยวิธีธรรมดาจะง่ายกว่า เพราะมีความประนี้อยลง และที่นุ่มมีโอกาสแตกน้อยลง ดังนั้นจึงแนะนำสำหรับอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กที่มีรายละเอียด

ข้อเสีย ทองแดงผสมกราฟไฟท์มีข้อเสียเหมือนกราฟไฟท์ และที่เพิ่มเติมคือราคาแพงกว่า

ข้อสังเกต การเปรียบเทียบกราฟไฟท์กับทองแดงผสมกราฟไฟท์

1. โอกาสที่เกิดความผิดปกติของคิซาร์จะลดลง
2. สามารถแปรรูปทั้งสะเตนคาร์ไบด์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. สามารถใช้กับ Microfin Relaxation ได้
4. อัตราการสึกหรดต่ำกว่า
5. ให้คุณภาพผิวงานดีกว่า และนำไปใช้กับชั้นคอนกรีตละเอียด
6. ให้อัตราการเกิดโลหะ สูงกว่าในถังสะเดนคราไบต์ (10 - 15%) เมื่อแปรรูปเหล็กอัตราการสึกจะต่ำกว่า เมื่อใช้เหล็กที่มรดบเป็นขั้วลบ และจะเท่ากันเมื่ออิเล็กโทรดเป็นขั้วบวก

2.4 ระบบไดอิเล็กตริก (Dielectric System)

ระบบไดอิเล็กตริกประกอบด้วย สารไดอิเล็กตริก ท่อส่ง ไม้ เครื่องกรอง และถังบรรจุสารไดอิเล็กตริก สารไดอิเล็กตริกมีหลายชนิด แต่ที่นิยมใช้กันมากคือน้ำมันไฮโดรคาร์บอน (น้ำหนัก 30 - 50) น้ำมันซิลิกอน และน้ำกำจัดไอออน น้ำกำจัดไอออนจะใช้ไว้มาก แต่มีความสามารถหล่อเย็น แม้ว่าจะมีอัตราการกัดเนื้อโลหะสูง

2.4.1 หน้าที่ของสารไดอิเล็กตริก สารไดอิเล็กตริกจะมีหน้าที่ดังนี้

1. ฉนวน (Insulation) จุดประสงค์หลักของสารไดอิเล็กตริกคือทำหน้าที่เป็นฉนวนระหว่างอิเล็กโทรด กับ ชิ้นงาน การดีสชาร์จไม่ควรถูกเกิดขึ้นจนกว่าระยะช่องว่างจะน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้เพื่อให้ได้ความละเอียดถูกต้องมากที่สุด
2. ไอออไนซ์ (Ionisation) สารไดอิเล็กตริกควรที่จะสร้างเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการเกิดดีสชาร์จเร็ว ที่สุด และเมื่อสวิตช์ออฟ (Off) สารไดอิเล็กตริกจำเป็นต้องกำจัดไอออนในเส้นทางดีสชาร์จเพื่อให้เกิดการดีสชาร์จใหม่ในตำแหน่งอื่นต่อไป
3. การหล่อเย็น (Cooling) อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในช่องว่างประมาณ 10,000 องศาเซลเซียส ภายในเวลาเศษส่วนล้านของวินาที ความร้อนที่เกิดขึ้นต้องระบายออก ดังนั้นสารไดอิเล็กตริกจึงทำหน้าที่ระบายความร้อนจากชิ้นงานและอิเล็กโทรด ความร้อนที่สูงเกินไปจะทำให้อิเล็กโทรดสึกหรอมากในเวลาเดียวกันไอของโลหะก็จะกลั่นตัวในสารไดอิเล็กตริกด้วย
4. พัดพาอนุภาคโลหะอนุภาคโลหะ จากกระบวนการอีดีเอ็มในช่องว่างดีสชาร์จจะถูกสารไดอิเล็กตริกพัดพาออกมา จึงช่วยกระบวนการให้ดำเนินไปได้ตามปกติมีประสิทธิภาพ ถ้าการไหลพัดพาอนุภาคโลหะไม่ดีจะทำให้เกิดการหยุดนิ่งของสารไดอิเล็กตริก ทำให้มีอนุภาคโลหะตกค้างในช่องว่างและอาจเกิดการลัดวงจรได้ เนื่องจากสารไดอิเล็กตริกที่ใช้งานแล้วต้องผ่านการทำความสะอาดโดยเครื่องกรอง กรองเอาอนุภาคโลหะออกจากสาร ไดอิเล็กตริกแล้วจึงนำกลับมาใช้งานใหม่ต่อไป

2.4.2 ประเภทของสารไดอิเล็กตริก

สารไดอิเล็กตริกแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ

2.4.2.1 น้ำกำจัดไอออน

สารละลายน้ำหรือน้ำในสภาวะปกติจะมีไอออนผสมอยู่มาก จึงมีค่าความต้านทานต่ำ ดังนั้นเวลาที่แปรรูปโลหะจึงต้องผ่านกระบวนการทำให้มีความต้านทานสูงขึ้น เนื่องมาจากน้ำมีค่าความต้านทานต่ำกว่าน้ำมัน จึงทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสไฟฟ้าโดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้น ความเร็วในการกัดโลหะจึงสูงกว่าน้ำมันประมาณ 2-10 เท่า แต่คุณภาพผิวงานจะหยาบ ปกติแล้วน้ำจะใช้เป็นสารไดอิเล็กตริกในเครื่องอัดฉีดเอมโปรแอสด้วยเส้นสวด

2.4.2.2 ไฮโดรคาร์บอน ที่นิยมใช้กันมีหลายชนิดคือ

1. น้ำมัน (Oils) ที่ใช้กันมากได้แก่น้ำมันแร่ (Mineral) ซึ่งให้ผลลัพท์ดี น้ำมันแร่จะไม่มีประกอบหรือสารเพิ่มเติมอื่นๆ ความหนืดของน้ำมันเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ เช่น น้ำมันที่มีความหนืดสูงจะไม่เหมาะสมกับงานขั้นตอนการกัดผิวสำเร็จเนื่องจากชั้นตอนนี้ต้องตั้งช่องว่างยกบน จึงทำให้น้ำมันที่มีความหนืดสูงไหลเวียนได้ยากขึ้นในช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงาน สำหรับขั้นตอนการกัดขยาย จะใช้น้ำมันตามเป็นสารไดอิเล็กตริก จุดความไปของสารไดอิเล็กตริกก็มีความสำคัญ เพราะถ้าจุดเดือดต่ำ เมื่อน้ำมันจะกลายเป็นไอจะเกิดขึ้นได้ง่าย ทำให้เกิดแก๊สปริมาณมาก จึงต้องลดความเร็วการแปรรูปลง
2. น้ำมันก๊าด (Kerosene) มีความหนืดต่ำ ทำให้เหมาะกับการขั้นตอนการกัดละเอียดและละเอียดมาก แนะนำให้ใช้กับการแปรรูปลโลหะทั้งสะเตนคาร์ไบด์ เมื่อตั้งช่วงพัลส์และเมื่อต้องการกำจัดกลิ่นที่เกิดจากสารที่แตกตัว นอกจากนี้ น้ำมันก๊าดแล้วยังมีน้ำมันอื่นๆ อีกเช่น น้ำมันจักร (Spindle Oil) น้ำมันเครื่อง (Machine Oil)

น้ำมันที่มีจุดความไปสูงและจุดติดไฟสูงนิยมนำมาใช้งาน น้ำมันซิลิกอนจึงเป็นประโยชน์ในแง่ลดนี้ และการขนส่งก็ปลอดภัยด้วย สารไดอิเล็กตริกต้องไม่เป็นอันตรายต่อผิวหนังและเสื้อผ้า แก๊สที่เกิดจากการแตกตัวของความร้อนต้องไม่เป็นอันตราย โดยทั่วไปแก๊สจะค่อยๆ ปรากฏขึ้นโดยดีสชาร์จในของเหลวไฮโดรคาร์บอนด์ ส่วนใหญ่ได้แก่ อาเซทิลีน (C_2H_2) บอททิลีน (C_2H_4) มีเทน (CH_4) และไฮโดรเจน จึงต้องมีเครื่องมือตรวจสอบแก๊สเพื่อความปลอดภัย

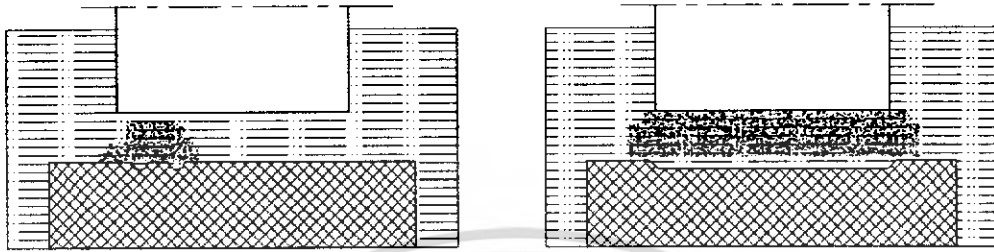
2.4.3 คุณสมบัติของสารไดอิเล็กตริก

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

2.5 ระบบการไหลของไดอิเล็กตริก (Flushing)

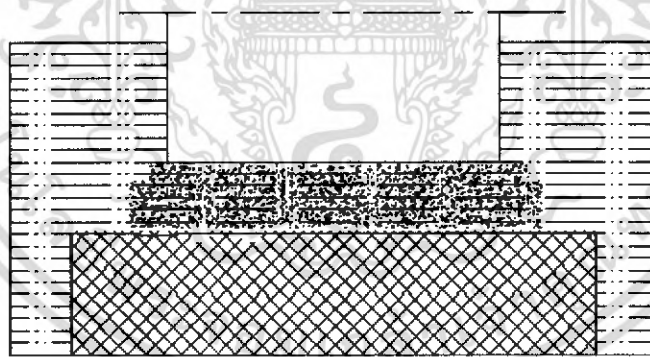
การไหลที่ถูกต้องของสารไดอิเล็กตริกระหว่างอิเล็กโทรดและชิ้นงาน จะทำให้การทำงานของระบบอัดฉีดมีประสิทธิภาพ ถ้าหากกรรมวิธีอัดฉีดไม่ใช้ระบบการไหลของสารไดอิเล็กตริกจะมีผลกระทบดังนี้ ในตอนเริ่มต้นแรกสารไดอิเล็กตริกยังสะอาดอยู่ ไม่มีอนุภาคโลหะและคาร์บอนที่เกิดจากการแตกตัวของไดอิเล็กตริก ทำให้ความคงทนต่อการเป็นฉนวนสูงกว่าไดอิเล็กตริกที่มีอนุภาคโลหะ ทำให้มีการประวิงก่อนที่ความเป็นฉนวนจะ

กันสุดลง และเริ่มเกิดดิซซาร์จ อนุภาคโลหะที่เกิดจากดิซซาร์จในตอนแรกจะให้ความทนต่อการเป็นฉนวนของไดอิเล็กตริกครั้งต่อมาลดลง และสามารถทำให้เกิดดิซซาร์จง่ายขึ้น



รูปที่ 2-6 การสะสมของอนุภาคโลหะในช่องว่างเมื่อไม่ใช้ระบบการไหลของไดอิเล็กตริก

ถ้าหากความหนาแน่นของอนุภาคโลหะในช่องว่างมีมากขึ้น ก็จะทำให้เกิดการสะสมของอนุภาคโลหะก่อรูปเป็นสะพานตัวนำไฟฟ้า ทำให้เกิดการดิซซาร์จที่ผิดปกติไปหรือเกิดการอาร์คขึ้น ทำให้ผิวของขั้วงานและอิเล็กโทรดถูกทำลาย ด้วยเหตุนี้เองจึงต้องขจัดอนุภาคโลหะออกไปจากช่องว่างโดยระบบการไหลของไดอิเล็กตริกเข้าไปในช่องว่าง



รูปที่ 2-7 อนุภาคโลหะก่อตัวเป็นสะพานตัวนำไฟฟ้า

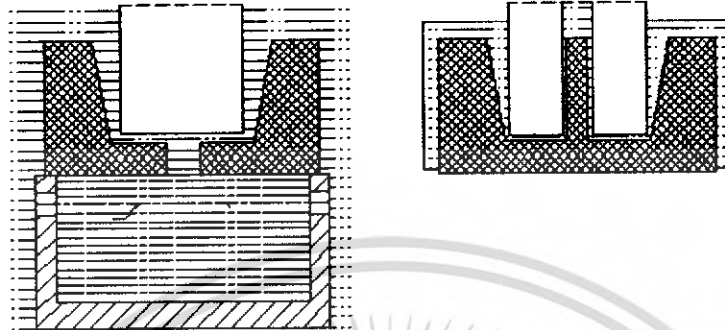
2.5.1 ระบบการไหลของไดอิเล็กตริกในกรรมวิธีอีเอ็ม พิจารณาแบ่งออกได้ดังนี้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

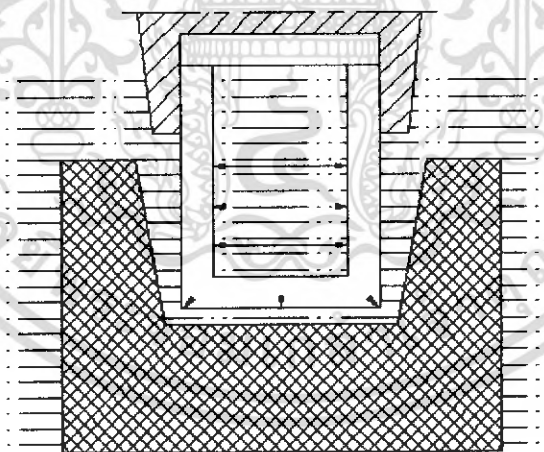
2.5.1.1 การไหลแบบเจ็ด

การไหลแบบนี้ไดอิเล็กทริกจะถูกฉีดเข้าไปในบริเวณช่องว่างของชิ้นงานและอิเล็กโทรด



รูปที่ 2-8 การไหลของไดอิเล็กทริกแบบเจ็ด

การไหลของไดอิเล็กทริกแบบเจ็ดจะใช้กับชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นรีขวยหรือใช้กับอิเล็กโทรดที่มีลักษณะแนวตั้งคองที่ สำหรับลักษณะของรีขวยที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากการดิสชาร์จทางด้านข้างของอิเล็กโทรด ระบบการไหลที่ดีจะทำให้สามารถเจาะรูลึกๆได้ โดยใช้อิเล็กโทรดกราวไฟต์ดึงความดันของไดอิเล็กทริกให้สูงขึ้นและไหลเข้าไปในอิเล็กโทรด กราวไฟต์ รูปทรงของกราวไฟต์จะทำให้ไดอิเล็กทริกไหลผ่านออกมาซึ่งบริเวณช่องว่างได้

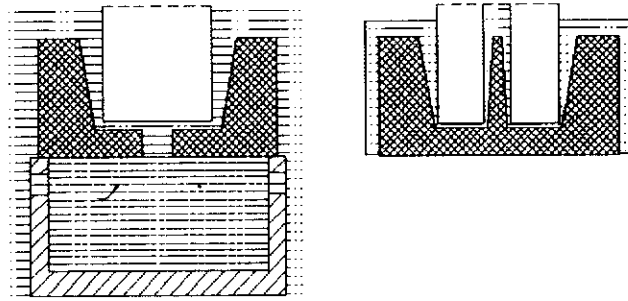


รูปที่ 2-10 ไดอิเล็กทริกไหลผ่านรูพุนกราวไฟต์ออกมาที่บริเวณช่องว่าง

2.5.1.2 การไหลแบบคูด

การไหลแบบนี้ไดอิเล็กทริกจะถูกคูดออกผ่านรูของชิ้นงาน หรือรูของอิเล็กโทรด เมื่อเปรียบเทียบกับ การไหลแบบเจ็ดจะเห็นว่าแบบคูดหลักเล็ขงผลกระทบของรีขวยจากการเกิดดิสชาร์จทางด้านข้างของอิเล็กโทรด รูที่เจาะจึงเป็นทรงกระบอกกลม ความดันของการคูดสูญญากาศต้องไม่มากกว่า 0.8-0.9 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

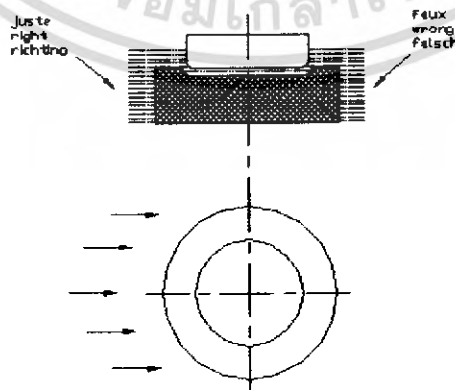


รูปที่ 2-11 การไหลของไดอิเล็กตริกแบบจุด

การใช้งานของการไหลแบบจุดจะสามารถใช้ลักษณะเดียวกับการไหลแบบฉีด แต่การไหลแบบจุดนิยมให้ไดอิเล็กตริกไหลผ่านอิเล็กโทรดมากกว่าที่จะผ่านชิ้นงาน

2.5.1.3 การไหลด้านข้าง

วิธีนี้จะใช้เมื่อไม่สามารถเจาะรูของอิเล็กโทรดหรือชิ้นงานได้ เช่นกรณีของแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ ร่องลึกที่แคบของแบบหล่อพลาสติก จึงต้องให้การไหลของไดอิเล็กตริกกระทำทางด้านข้างโดยการใช้หัวฉีด ซึ่งต้องระมัดระวังในการปรับให้พื้นผิวของการทำงานของอิเล็กโทรดมีการไหลที่เท่าๆกัน เทคนิคนี้จะใช้ร่วมกับการกระเพื่อมของอิเล็กโทรด เพื่อช่วยให้การไหลดีขึ้น เมื่อทำการแปรรูปพื้นผิวหน้าเรียบ ทิศทางการไหลของไดอิเล็กตริกจะต้องสอดคล้องกับมุมฉีดไดอิเล็กตริกเข้า สำหรับแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญเมื่อรูปแบบตามยาวไม่เรียบจะต้องใช้หัวฉีดแบบพิเศษมาใช้ และเมื่อทิศทางการไหลของไดอิเล็กตริกไม่ขนานกับด้านข้างของอิเล็กโทรดจะทำให้การไหลปั่นป่วนขึ้น ดังนั้นจะมีไดอิเล็กตริกจำนวนน้อยเข้าไปภายในช่องว่างเท่านั้นจึงทำให้ระบบการไหลไม่ดี แต่การไหลของไดอิเล็กตริกมีทิศทางเข้าไปในช่องว่างโดยตรง จะทำให้ปริมาณของไดอิเล็กตริกเข้าไปจำนวนมาก ทำให้การไหลมีประสิทธิภาพดีขึ้น ระบบการไหลทางด้านข้างจะไม่ใช้พร้อมกันทั้งสองด้านของอิเล็กโทรด เพราะจะทำให้อนุภาคโลหะที่บริเวณส่วนล่างของชิ้นงานไม่สามารถจะถูกขับออกมาจากช่องว่างได้



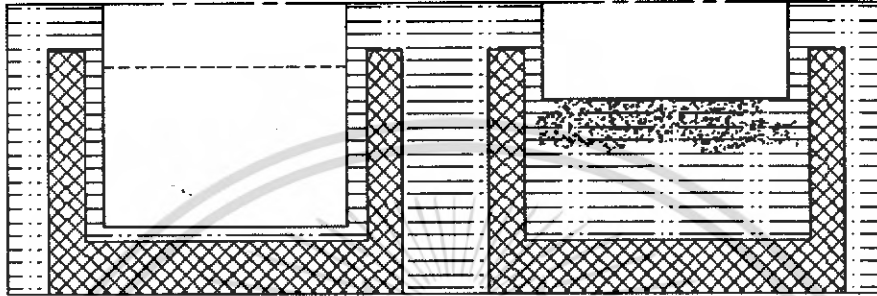
71994

รูปที่ 2-12 การไหลของไดอิเล็กตริกทางด้านข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1.4 การไหลที่ใช้การขึ้น-ลงของอิเล็กโทรด

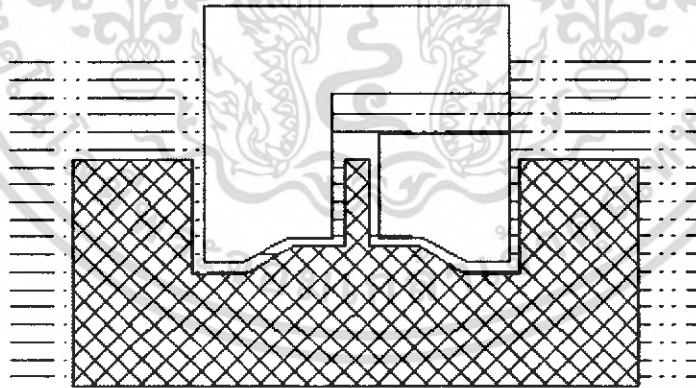
การไหลของไดอิเล็กตริกแบบนี้จะอาศัยการยกขึ้น-ลงของอิเล็กโทรด เมื่ออิเล็กโทรดถูกยกขึ้นจะทำให้ช่องว่างกว้างขึ้น ไดอิเล็กตริกที่สะอาดจะถูกดูดเข้าไปผสมกับอนุภาคโลหะ และเมื่ออิเล็กโทรดเคลื่อนที่ลงอนุภาคโลหะก็จะถูกขับออกไป วิธีการนี้จะใช้กับชิ้นงานที่มีความลึก และในระบอบการไหลต้องไม่มีความดัน



รูปที่ 2-13 การไหลของไดอิเล็กตริกโดยอาศัยการขึ้น-ลงของอิเล็กโทรด

2.5.1.5 การไหลแบบฉีดพร้อมกับการยกอิเล็กโทรดขึ้น

เมื่อทำการแปรรูปโลหะโดยใช้อิเล็กโทรดชนิดโลหะจะเห็นความผิดปกติของอิเล็กโทรดที่ใช้ในระบอบการไหลแบบฉีด มีการสึกหรอมาก และเพิ่มขึ้นตามความดันในบริเวณที่ฉีด



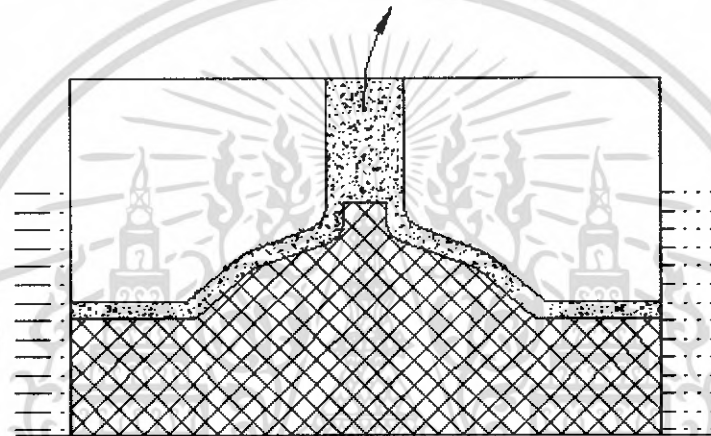
รูปที่ 2-14 การไหลแบบฉีดพร้อมกับการเลื่อนอิเล็กโทรดขึ้น

การที่จะป้องกันการสึกหรอที่เกิดจากความดันจะใช้วิธีการฉีดไดอิเล็กตริกเข้าไปในช่องว่าง ในขณะที่ยกอิเล็กโทรดก็เคลื่อนที่ยกขึ้นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 ปัญหาแก๊ส (Gas Problem)

ในระบอบการไหลแบบบีบอัดระหว่างการแปรรูปจะมีการสะสมของแก๊ส ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการระเบิดและจะทำให้ชิ้นงานเคลื่อนได้ จึงต้องระมัดระวังไม่ให้เกิดขึ้น ที่สำคัญคือต้องหลีกเลี่ยงแนวโน้มที่จะเป็นสาเหตุของการระเบิด เช่น แก๊ส อากาศ ดังนั้นก่อนจะเริ่มทำการแปรรูป ต้องมั่นใจว่าภายในอุปกรณ์ฉีดมีไดอิเล็กทริกเต็ม และภายในถังบรรจุมีไดอิเล็กทริกตามที่กำหนด เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดอากาศเข้าไป เพื่อที่จะลดปริมาณการสะสมของแก๊สในอุปกรณ์ ต้องพยายามให้ทางดูดของอุปกรณ์อยู่ในจุดที่สูงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เมื่อทำการแปรรูปด้วยอิเล็กโทรดแบบวันซ์ จะทำให้มีการสะสมของแก๊สภายในส่วนที่วันซ์ จึงต้องทำการเจาะรูอิเล็กโทรดเพื่อระบายแก๊สออกไป



รูปที่ 2-15 การเจาะรูอิเล็กโทรดเพื่อระบายแก๊สที่เกิดขึ้น

2.5.3 ระบบเซอร์โว (Servo System)

ระบบเซอร์โวคือระบบควบคุมบังคับกลไกการป้อนอิเล็กโทรด โดยอาศัยสัญญาณความแตกต่างของโวลต์เทจจากช่องว่างคิซาร์จกับโวลต์เทจอ้างอิงเป็นตัวเปรียบเทียบ เพื่อทำการควบคุมกลไกการป้อนอิเล็กโทรดให้เหมาะสมกับอัตราการกัดเนื้อโลหะงาน

เนื่องจากช่องว่างจะมีเศษอนุภาคโลหะจากการคิซาร์จ แก๊สและสารที่เกิดจากการแตกตัวของไดอิเล็กทริกเนื่องจากความร้อน จะทำให้การเกิดคิซาร์จครั้งต่อไปขาดเสถียรภาพและอาจทำให้เกิดลัดวงจร การสัมผัสโดยตรงระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงานจะทำให้เกิดการลัดวงจรด้วย ทำให้การคิซาร์จขาดหายไป ประสิทธิภาพการกัดจะจึงลดลง เมื่อช่องว่างมีความห่างพอเหมาะ ปริมาณการกัดเนื้อโลหะจะคงที่ แต่เมื่อช่องว่างแคบลงพลังงานคิซาร์จที่ช่องว่างก็จะลดลง ทำให้ประสิทธิภาพการกัดเนื้อโลหะต่ำลง

เพื่อที่จะรักษาการกัดเนื้อโลหะให้เหมาะสม จะต้องทำการควบคุมกลไกการป้อนอิเล็กโทรดให้มีระยะช่องว่างคงที่ ในขณะที่เดียวกันก็ป้องกันการสัมผัสระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงาน ขณะที่อิเล็กโทรดและชิ้นงานจะเคลื่อนที่เข้าหากัน เนื่องจากช่องว่างนี้จะแคบมากจึงไม่สามารถรักษาให้คงที่ได้ตามสัดส่วนของการสึก ดังนั้นการป้อนอิเล็กโทรดจะใช้ระบบควบคุมแบบ Adaptive Control

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.3.1 ระบบควบคุมการป้อนอิเล็กทรอนิกส์ในกรรมวิธีอัตโนมัติแบบออกเป็น

1. ควบคุมการป้อนอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้ชลินอยด์
2. ควบคุมการป้อนอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้เซอร์โวไฟฟ้า
3. ควบคุมการป้อนอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้เซอร์โวไฮดรอลิก

2.6 หลักการออกแบบการทดลอง

ถ้าต้องการให้การทดลองให้การทดลองเกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการวิเคราะห์ให้ได้ผลสูงสุด เราจะต้องนำวิธีการทางวิทยาศาสตร์เข้ามาช่วยในการวางแผนการทดลอง โดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (Statistical Design of Experiments) เพื่อจะได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมที่จะสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีทางสถิติ ซึ่งจะทำให้เราสามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลได้

2.6.1 การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล

การออกแบบการทดลองแบบ แฟกทอเรียล เป็นการศึกษากิ่งผลของปัจจัยตั้งแต่สองปัจจัยขึ้นไป หมายถึงการทดลองที่พิจารณา ถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้นๆ รูปแบบทั่วไปของการออกแบบแฟกทอเรียลในกรณีที่มี ปัจจัย A จำนวน a ระดับ ปัจจัย B จำนวน b ระดับ และ ปัจจัย C จำนวน c ระดับ ต่อไปเช่นนี้เรื่อยๆและทั้งหมดนี้ถูกจัดให้อยู่ในลักษณะของการทดลองเชิงแฟกทอเรียลซึ่งจะมีจำนวนข้อมูลที่ได้ทั้งหมดเท่ากับ $abc\dots n$ และจะต้องมีเรพลิเคต (Replicate) อย่างน้อย 2 เรพลิเคต เพื่อจะทำให้สามารถหาค่าผลรวมกำลังสองที่เกิดจากความผิดพลาดได้ ถ้าอันตรกิริยาที่เป็นไปได้ทั้งหมดถูกนำเข้าพิจารณาในแบบทดลอง

ถ้าปัจจัยทั้งหมดในการทดลองเป็นแบบตายตัว จะสามารถที่จะหาสูตรและทดสอบสมมุติฐานที่เกี่ยวข้องกับผลหลักได้ง่ายสำหรับแบบจำลองแบบผลตายตัว ตัวทดสอบเชิงสถิติสำหรับผลหลักและอันตรกิริยาสามารถหาได้โดยสร้างค่ากำลังสองเฉลี่ยของค่านั้นขึ้น จากนั้นหารด้วยค่ากำลังสองเฉลี่ยของความผิดพลาด การทดสอบสมมุติฐานจะใช้ F-test แบบทดสอบบนปลายหนึ่งด้าน จำนวนระดับความเสรีสำหรับผลหลักของปัจจัยใดๆมีค่าเท่ากับระดับของปัจจัยลบด้วยหนึ่ง และจำนวนชั้นความเสรีของอันตรกิริยามีค่าเท่ากับผลคูณของระดับความเสรีของส่วนประกอบของอันตรกิริยานั้นๆ

รูปแบบของการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลยังแบ่งย่อยได้กรณีที่แผนการทดลองมีลักษณะตัวเฉพาะตัวอีกดังต่อไปนี้

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 เป็นการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่มีอิทธิพลเบื้องต้นจะช่วยในการทดลองที่เจาะลึกต่อไป
2. การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 3^k (3^k Factorial Design) การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 3^k เป็นการทดลองที่มี k ปัจจัย แต่ละปัจจัยจะมีแต่ละระดับของปัจจัยอยู่ 3 ระดับ คือ ระดับต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้สัญลักษณ์ -1 หรือ (-1) ระดับกลาง ใช้สัญลักษณ์ 0 หรือ (0) และระดับสูง ใช้สัญลักษณ์ 1 หรือ (+) การทดลองแบบที่เหมาะสมเมื่อทดลองกำลังสนใจผลตอบสนองที่มีลักษณะเป็นส่วนโค้ง

3. การออกแบบการทดลองเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล (Fractional Factorial Design) การออกแบบการทดลองเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล เป็นการออกแบบที่ใช้ในกรณีเมื่อการทดลองมีหลายปัจจัยทำให้ต้องเสียเวลาต้องเก็บข้อมูลมาก ดังนั้นจะทำให้ความสัมพันธ์ของทรีทเมนต์ (Treatment) ซึ่งจะทำให้ข้อมูลที่ใช้ในการทดลองนั้นลดลง

2.6.1.1 ข้อดีของการทดลองแบบแฟกทอเรียล

1. ในกรณีที่แต่ละปัจจัยเป็นอิสระต่อกัน (ไม่มีอิทธิพลร่วมกัน) ค่าของอิทธิพลเดี่ยวจะเท่ากับค่าของอิทธิพลหลักจึงใช้เฉพาะอิทธิพลหลักในการอธิบายบทบาทของปัจจัยนั้นได้ และมีความแม่นยำเท่ากับเสมือนผู้ทดลองใช้แต่ละปัจจัยในการทดลองเท่านั้น
2. ในกรณีที่แต่ละปัจจัยมีอิทธิพลร่วมกันจะทำให้สามารถศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆไปพร้อมกันได้ และรู้จักปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยเหล่านั้นด้วย ทำให้สรุปผลได้ถูกต้องยิ่งขึ้น

2.6.1.2 ข้อเสียของการทดลองแบบแฟกทอเรียล

1. เมื่อจำนวนของปัจจัยมากขึ้นหรือระดับของปัจจัยมากขึ้นจะทำให้การทดลองมีขนาดใหญ่ทำให้ความแปรปรวนในการทดลองมากขึ้น
2. การทดลองขนาดใหญ่จะแปรผลได้ยากโดยเฉพาะเมื่อแต่ละปัจจัยมีอิทธิพลร่วมกัน

2.6.2 การทำแบบสุ่ม

การทำแบบสุ่ม (Randomization) คือ การให้โอกาสในการเก็บข้อมูลของข้อมูลแต่ละตัวให้เท่ากัน เพื่อกระจายผลของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ให้กับข้อมูลทุกระดับในการทดลองให้เท่าๆกัน การทำแบบสุ่มสามารถแบ่งออกได้ 3 วิธีดังนี้

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

2.6.3 การเลือกขนาดของตัวอย่าง

ในปัญหาที่เกี่ยวกับการออกแบบการทดลอง หนึ่งในประเด็นที่สำคัญก็คือ การเลือกขนาดของตัวอย่าง (Sample Size) นั่นคือ การหาจำนวนของเรพลิคต (Replicate) ของการทดลอง โดยทั่วไปถ้าผู้ทดลองสนใจที่จะตรวจสอบผลที่มีขนาดเล็ก จำนวนเรพลิคตที่ใช้จะต้องมากกว่าการตรวจสอบผลที่มีขนาดใหญ่ ในส่วนนี้จะบรรยายให้ทราบถึงวิธีการต่างๆสำหรับใช้ในการหาขนาดของตัวอย่าง ถึงแม้จะมุ่งไปที่การออกแบบที่ปัจจัยเดียว แต่ทว่าวิธีการที่จะกล่าวกันนี้ยังสามารถนำไปใช้กับการออกแบบที่ซับซ้อนยิ่งกว่านี้ได้อีกด้วย

2.6.4 เส้นโค้งลักษณะสมบัติของการดำเนินการ

เส้นโค้งลักษณะสมบัติของการดำเนินการ (Operation Characteristic Curve) เป็นการพล็อตความน่าจะเป็นของความผิดพลาดประเภท 2 ของการทดสอบทางสถิติสำหรับตัวอย่างขนาดหนึ่ง กับพารามิเตอร์ที่สะท้อนให้เห็นว่าสมมติฐานหลักที่ตั้งไว้เป็นเท็จ ส่วนโค้งเหล่านี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางสำหรับผู้ทดลองในการเลือกจำนวนของเรพลิเคชันได้ เพื่อว่าการออกแบบจะได้รับความไวต่อความแตกต่างของระดับที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ

พิจารณาความน่าจะเป็นของความผิดพลาดประเภท 2 ของแบบจำลองแบบผลงที่ สำหรับกรณีที่ใช้ขนาดของตัวอย่างต่อหนึ่งระดับเท่ากับ n นั่นคือ

$$\begin{aligned}\beta &= 1 - P \quad \{\text{Reject } H_0 \mid H_0 \text{ is false}\} \\ &= 1 - P \quad \{F_0 > F_{\alpha, a-1, N-a} \mid H_0 \text{ is false}\}\end{aligned}\quad (2.1)$$

เพื่อหาค่าความน่าจะเป็นในสมการที่ 2.1 เราต้องทราบถึงการแจกแจงของตัวทดสอบทางสถิติ F_0 ถ้าสมมติฐานหลักเป็นเท็จ เราสามารถแสดงได้ว่า ถ้า H_0 เป็นเท็จ ดังนั้น สถิติ $F_0 = MS_{\text{treatment}} / MS_{\text{error}}$ จะเป็นตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงแบบ F ที่มีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ $a - 1$ และ $N - a$ และมีพารามิเตอร์ของความไม่ตรงศูนย์กลาง (Non-Centrality) คือ δ และถ้า $\delta = 0$ แล้ว การแจกแจง F ที่ไม่ตรงศูนย์กลางจะกลายเป็นการแจกแจง F (ตรงศูนย์กลาง) ตามปกติ

เส้นโค้งลักษณะดำเนินการที่แสดงไว้ในภาคผนวกจะใช้หาค่าความน่าจะเป็นในสมการที่ 2.2 ส่วนโค้งเหล่านี้จะพล็อตระหว่างความน่าจะเป็นของความผิดพลาดประเภท 2 (β) กับพารามิเตอร์ Φ โดยที่

$$\Phi^2 = \frac{bn \sum_{i=1}^b \tau_i^2}{a\sigma^2}\quad (2.2)$$

เมื่อ

Φ^2	คือ พารามิเตอร์ของความไม่ตรงศูนย์กลาง δ
n	คือ จำนวนซ้ำที่ใช้ในการทดลอง
τ_i^2	คือ ค่าเฉลี่ยของแต่ละระดับ
σ^2	คือ ค่าความแปรปรวน
a, b	คือ ระดับของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

ปริมาณ Φ^2 จะเกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์ของความไม่ตรงศูนย์กลาง δ ส่วนโค้งนี้ถูกสร้างไว้แล้วสำหรับ $\alpha = 0.05$ และ $\alpha = 0.1$ และช่วงหนึ่งของระดับความเสรีสำหรับทั้งตัวตั้งและตัวหาร

ในการใช้งานเส้นโค้งลักษณะดำเนินการ ผู้ทดลองจะต้องกำหนดพารามิเตอร์ Φ ซึ่งเป็นสิ่งที่ทำได้ยากในทางปฏิบัติ วิธีหนึ่งที่ใช้ในการหา Φ คือ ให้เลือกค่าจริงของค่าเฉลี่ยของระดับที่เร ำต้องการจะปฏิเสธสมมติฐานเอกสารถีนี้เป็นเอกสารถีที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักด้วยความน่าจะเป็นที่สูง ดังนั้น ถ้า $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_r$ เป็นค่าเฉลี่ยของระดับตามที่กำหนด เราจะหา τ_c ในสมการที่ 2.2 โดยที่ $\tau_c = \mu_c - \mu$ ซึ่ง $\mu = (1/a) \sum \mu_i$ เป็นค่าเฉลี่ยของแต่ละระดับ นอกจากนั้นเรายังต้องหาปริมาณของ σ^2 อีกด้วย ซึ่งบางครั้งค่าเหล่านี้สามารถหาได้จากประสบการณ์การทดลองที่ผ่านมาหรือการประมาณอย่างมีเหตุผล แต่เมื่อไม่แน่ใจเกี่ยวกับค่า σ^2 แล้ว เราควรหาขนาดของตัวอย่างที่เราสามารถใช้ได้กับช่วงที่น่าจะเป็นไปได้ของ σ^2 เพื่อศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์นี้ตามขนาดตัวอย่างที่ต้องการก่อนเลือกครั้งสุดท้าย

2.7 การใช้หลักทางสถิติในการทดลอง

การใช้หลักทางสถิติในการทดลองนั้นผู้ทำการทดลองต้องมีความเข้าใจในประเด็นต่างๆ

ดังต่อไปนี้

1. ผู้ทำการทดลอง ต้องมีความรู้เกี่ยวกับงานในสาขาที่จะทำการทดลอง โดยใช้ความรู้ที่ไม่ใช่วิธีการทางสถิติในการพิจารณาปัญหาที่เกิดขึ้น
2. ผู้ทำการทดลอง ควรเลือกการออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ที่ง่ายและไม่ซับซ้อน
3. ผู้ทำการทดลองควรเข้าใจความแตกต่างระหว่างนัยสำคัญในทางปฏิบัติและนัยสำคัญทางสถิติ เพราะค่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในการทดลองซึ่งเรียกว่าความแตกต่างทางด้านสถิตินั้น ไม่สามารถประกั้นได้ว่าจะมีความแตกต่างมากเพียงพอที่จะใช้ในทางปฏิบัติ และจะต้องคำนึงถึงต้นทุนว่าคุ้มค่าในการลงทุนหรือไม่
4. ผู้ทำการทดลอง ควรทำการทดลองซ้ำๆ หลายๆ ครั้งเพื่อให้แน่ใจว่าผลที่ได้ถูกต้อง

2.8 การตั้งสมมติฐานในการตรวจสอบ

สมมติฐาน คือ ความเชื่อมั่นของบุคคลใดบุคคลหนึ่งหรือของกลุ่มของบุคคลใดๆ หรืออาจกล่าวได้ว่าสมมติฐานเป็นสิ่งที่บุคคลหรือองค์กรคาดว่าจะเกิดขึ้น ความเชื่อมั่นหรือสิ่งที่คาดนั้นอาจเป็นจริงหรือไม่ก็ได้

2.8.1 ชนิดของสมมติฐาน

สมมติฐานแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ดังต่อไปนี้

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

สมมติฐานหลักที่ตั้งขึ้น เพื่อทดสอบว่าจะยอมรับหรือไม่ว่าเป็นจริง การปฏิเสธไม่ยอมรับ

สมมติฐานหลักก็คือการยอมรับสมมติฐานอื่นๆ ว่าเป็นจริง

ประเภทของสมมติฐาน สมมติฐานแบ่งออกเป็น 2 ประเภทดังต่อไปนี้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.2 ความผิดพลาดในการทดสอบสมมติฐาน

ความผิดพลาดในการทดสอบสมมติฐาน แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังต่อไปนี้

1. ความผิดพลาดประเภทที่ 1 (Type I Error) หรือเรียกโดยทั่วไปว่าระดับนัยสำคัญ (Level of Significance) ใช้สัญลักษณ์ α เป็นความผิดพลาดที่เกิดจากการปฏิเสธสมมติฐานหลักและยอมรับสมมติฐานอื่นๆ โดยที่สมมติฐานหลักเป็นจริง
2. ความผิดพลาดประเภทที่ 2 (Type II Error) ใช้สัญลักษณ์ β เป็นความผิดพลาดที่เกิดจากการยอมรับสมมติฐานอื่นๆ โดยที่สมมติฐานอื่นๆ เป็นจริง

ในการทดสอบแต่ละครั้ง ผู้ทดสอบย่อมต้องการให้มีความผิดพลาดทั้งสองประเภท (α และ β) น้อยที่สุดแต่เมื่อค่าของ α ลดลง ค่าของ β จะเพิ่มขึ้นในทางตรงกันข้าม เมื่อค่าของ α เพิ่มขึ้น ค่าของ β จะลดลง ดังนั้นเมื่อต้องการลดค่าความผิดพลาดทั้งสองประเภทให้ลดลงได้พร้อมๆ กันทำได้ด้วยการเพิ่มจำนวนข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ให้มากขึ้น

2.8.3 การตั้งสมมติฐานในการออกแบบการทดลอง

การตั้งสมมติฐานในการออกแบบการทดลอง สามารถแบ่งเป็น 3 กรณี ดังต่อไปนี้

1. การออกแบบการทดลองแบบผลกระทบทงที่ (Fixed Effect Model) จะทำการตรวจสอบว่าปัจจัยต่างๆ มีผลกระทบต่อกระบวนการหรือไม่ สามารถตั้งสมมติฐานได้ดังต่อไปนี้

H_0 : ปัจจัยไม่มีผลต่อกระบวนการ

H_1 : ปัจจัยมีผลต่อกระบวนการ

หรือสามารถเขียนอยู่ในรูปสัญลักษณ์ μ เมื่อ μ ค่าเฉลี่ยของปัจจัย

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

$H_1: \tau_i \neq 0$: อย่างน้อยที่สุดครั้งหนึ่ง

2. การออกแบบการทดลองแบบผลกระทบทงแบบสุ่ม (Random Effect Model) จะทำการตรวจสอบว่า ความแปรปรวน (σ^2_τ) จะมีค่าเท่ากับ 0 หรือไม่ เพราะไม่สามารถหาค่าของอิทธิพล (Effect) ของระดับของปัจจัยที่เกิดขึ้นมาแน่นอน สามารถตั้งสมมติฐานดังต่อไปนี้

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

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

3. การออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixed Effect Model) เมื่อปัจจัยในการทดลองเป็นแบบผลกระทบทงที่ (Fixed Level) และแบบสุ่ม (Random Level) รวมกันจะต้องใช้การตั้งสมมติฐานของ 2 กรณีที่กล่าวข้างต้น โดยแยกตามลักษณะรูปแบบของปัจจัยนั้นๆ

2.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวน คือ เทคนิคที่ใช้ในการจัดสรรความแปรปรวนหรือความผันแปรที่เกิดขึ้นในข้อมูลออกเป็นส่วนย่อยๆ ตามแหล่งที่คาดว่าทำให้เกิดความผันแปร ความผันแปรที่เกิดในข้อมูลเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ความผันแปรทั้งหมด} = \text{ความผันแปรเนื่องจากปัจจัย} + \text{ความผันแปรโดยธรรมชาติของข้อมูล} \quad (2.3)$$

สมการ 2.3 ได้จากข้อคิดที่ว่า ความแตกต่างกันของข้อมูลไม่น่าจะมาจากสาเหตุของความผันแปรโดยธรรมชาติ หรือที่เรียกกันว่าความผิดพลาดแบบสุ่มของข้อมูลแต่เพียงอย่างเดียวแต่น่าจะมาจากปัจจัยหนึ่งปัจจัยใดหรือหลายๆ ปัจจัยที่ทำให้เกิดความผันแปร ดังนั้นความผันแปรทั้งหมดที่เกิดขึ้นกับข้อมูลจึงเนื่องมาจากอิทธิพลของปัจจัยและธรรมชาติของข้อมูล

ปัจจัยที่คาดว่าจะมีอิทธิพลต่อความผันแปรของข้อมูลถือได้ว่าเป็นตัวแปรอิสระซึ่งมีผลต่อตัวแปรตาม โดยเป็นข้อมูลที่วัดผลหรือเก็บรวบรวมมา ตัวแปรอิสระดังกล่าวมักจะไม่ได้นับแค่เพียงค่าเดียวแต่จะมีหลายค่าซึ่งเรียกว่าระดับของปัจจัย ถ้าปัจจัยนั้นมีผลต่อตัวแปรตามจริงๆ แต่ละระดับก็จะมีผลต่อตัวแปรตามไม่เหมือนกัน การวิเคราะห์จึงทำโดยการทดลองกำหนดค่าตัวแปรอิสระที่ระดับต่างๆ เพื่อหาตัวแปรตามที่เกิดขึ้นจากการทดลองนั้นๆ แล้วนำไปวิเคราะห์เพื่อดูว่าความผันแปรที่เกิดขึ้นจากความแตกต่างของการทดลองนั้นมีนัยสำคัญหรือไม่เมื่อเทียบกับความผันแปรโดยธรรมชาติของตัวแปรตาม และเพื่อที่จะช่วยให้ผู้วิเคราะห์มีความเชื่อมั่นในผลของการวิเคราะห์ที่ได้จากการทดลอง มักจะต้องทำการทวนซ้ำให้ได้จำนวนข้อมูลที่แต่ละการทดลองมากพอ การเลือกระดับของปัจจัยถ้าเป็นการเจาะจงรูปแบบของการทดลองจะถูกเรียกว่าแบบผลกระทบบคงที่ (Fixed Effect Model) ผลที่ได้จากการทดลองจะสรุปได้เฉพาะอิทธิพลของปัจจัยที่ระดับที่นำมาทดลอง แต่ถ้าเลือกระดับของปัจจัยเป็นการเลือกแบบสุ่ม รูปแบบของการทดลองจะเป็นแบบสุ่ม (Random Effect Model) ผลที่ได้จากการทดลองจะสรุปอิทธิพลโดยรวมของปัจจัย

จาก ความผันแปรทั้งหมด = ความผันแปรเนื่องจากปัจจัย + ความผันแปรโดยธรรมชาติของข้อมูล หรือเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ได้เป็น

$$SS_T = SS_T + SSE \quad (2.4)$$

โดยที่

SS_T คือ ผลบวกกำลังสองทั้งหมด

SS_T คือ ผลบวกกำลังสองเนื่องจากอิทธิพลของปัจจัย

SS_E คือ ผลบวกกำลังสองเนื่องจากความผิดพลาดแบบสุ่ม

การวัดความผันแปรของข้อมูลจะใช้ตัวประมาณค่าของความแปรปรวน (Variance) ที่ดีที่สุดคือค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสอง (Mean Square : MS) โดยที่ค่า MS สามารถคำนวณได้จาก

$$MS = \frac{SS}{DF} \quad (2.5)$$

เมื่อ

SS คือ ผลบวกกำลังสอง (Sum of Square)

DF คือ ชั้นของความอิสระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถิติทดสอบ (Test Statistic) ที่นำมาเปรียบเทียบกับค่าความผันแปรคือ

$$F = \frac{MS_{TR}}{MS_E} \quad (2.6)$$

เมื่อ

MS_{TR} คือ ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสองของปัจจัย
 MS_E คือ ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสองของความผิดพลาดแบบสุ่ม

เปรียบเทียบค่าสถิติสำหรับทดสอบ F กับค่า F_{α, v_1, v_2}

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

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

เมื่อ

α คือ ระดับนัยสำคัญ (Level of Significance)

v_1 คือ ชั้นของความอิสระของปัจจัย

v_2 คือ ชั้นของความอิสระของความผิดพลาดแบบสุ่ม

2.9.1 รูปแบบเชิงเส้นทางสถิติ

ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนนั้นจำเป็นต้องสร้างรูปแบบเชิงเส้นทางสถิติ (Linear Statistical Model) ขึ้นด้วย ซึ่งรูปแบบเชิงเส้นทางสถิติจะขึ้นอยู่กับรูปแบบของแผนการออกแบบการทดลอง จะแสดงดังตัวอย่างต่อไปนี้

การวิเคราะห์ความแปรปรวนกรณีที่มี 3 ปัจจัย รูปแบบเชิงเส้นคือ

$$y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \epsilon_{ijkl} \quad (2.7)$$

โดยที่

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

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

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

$l = 1, 2, 3, \dots, n$ (จำนวนซ้ำ)

และ

y_{ijkl} คือ ค่าตัวแปรตอบสนองหรือตัวแปรตาม

μ คือ ค่าเฉลี่ยซึ่งเป็นค่าคงที่

τ_i คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัย A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- β_i คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัย B
- γ_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
- ϵ_{ijk} คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของความผิดพลาดแบบสุ่ม

โดยข้อมูลจะถูกนำมาคำนวณแล้วใส่ไว้ในตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัย แสดงได้

ดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 การคำนวณการวิเคราะห์ความแปรปรวน

Source of Variation	Sum of Square	Degree of Freedom	Mean Square	F ₀
A	SS _A	a-1	SS _A / DF	MS _A / MS _E
B	SS _B	b-1	SS _B / DF	MS _B / MS _E
C	SS _C	c-1	SS _C / DF	MS _C / MS _E
AB	SS _{AB}	(a-1)(b-1)	SS _{AB} / DF	MS _{AB} / MS _E
AC	SS _{AC}	(a-1)(c-1)	SS _{AC} / DF	MS _{AC} / MS _E
BC	SS _{BC}	(b-1)(c-1)	SS _{BC} / DF	MS _{BC} / MS _E
ABC	SS _{ABC}	(a-1)(b-1)(c-1)	SS _{ABC} / DF	MS _{ABC} / MS _E
Error	SS _E	Abc(n-1)	SS _E / DF	
Total	SS _T	Abcn-1		

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

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$SS_{AB} = \frac{1}{cn} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b Y_{ij...}^2 - \frac{Y_{...}^2}{abcn} = SS_A + SS_B$$

$$SS_{AC} = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^c Y_{ik...}^2 - \frac{Y_{...}^2}{abcn} = SS_A + SS_C$$

$$SS_{BC} = \frac{1}{an} \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^c Y_{ik...}^2 - \frac{Y_{...}^2}{abcn} = SS_B + SS_C$$

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

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

การทดสอบสมมติฐานของการทดลอง จะใช้ค่าสถิติที่มีการกระจายแบบเอฟ (F-Distribution) โดยกำหนดค่า α ก่อน หากค่า $F < F_{\alpha, v_1, v_2}$ ขอมรับ H_0 แสดงว่าปัจจัยนั้นไม่มีผลต่อค่าตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น $(1-\alpha)\%$ แต่ถ้าหาก $F \geq F_{\alpha, v_1, v_2}$ ปฏิเสธ H_0 แสดงว่าปัจจัยนั้นมีผลต่อค่าตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น $(1-\alpha)\%$

2.9.2 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model Adequacy Checking) เป็นวิธีตรวจสอบที่ทำให้ทราบว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนมีความน่าเชื่อถือเป็นไปตามหลักสถิติหรือไม่ โดยอาศัยข้อสมมติฐานที่สำคัญ ซึ่งอธิบายได้โดยใช้แบบจำลองดังต่อไปนี้

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad (2.8)$$

โดยที่

- y_{ij} คือ ค่าตัวแปรตอบสนองหรือตัวแปรตาม
- μ คือ ค่าเฉลี่ยซึ่งเป็นค่าคงที่
- τ_i คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัย
- ε_{ij} คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของความผิดพลาดแบบสุ่ม

โดยความผิดพลาดแบบสุ่ม (Random Error) จะต้องมีการแจกแจงแบบปกติและเป็นอิสระต่อกัน ด้วยค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และ σ^2 มีค่าคงตัวแต่ไม่ทราบค่าซึ่งเขียนเป็นสัญลักษณ์ได้ดังนี้ $\varepsilon_{ij} \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$ ถ้าสมมติฐานเหล่านี้เป็นจริง กระบวนการวิเคราะห์ความแปรปรวนนี้ก็จะเป็นการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับการไม่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในระดับที่ถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางปฏิบัติสมมติฐานมักจะไม่เป็นเช่นนั้น ซึ่งจะเชื่อก็คือผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนได้ก็ต่อเมื่อสามารถตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐานว่าเป็นจริงเสียก่อน โดยสามารถตรวจสอบสมมติฐานขั้นต้นและความถูกต้องของแบบจำลองได้โดยการตรวจสอบส่วนตกค้าง (Residual) สำหรับค่าสังเกต j ของระดับที่ i ส่วนตกค้างจะมีค่าเป็น

$$e_{ij} = y_{ij} - \hat{y}_{ij} \quad (2.9)$$

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

$$\begin{aligned} \hat{y}_{ij} &= \mu + \tau_i \\ &= \bar{y}_{.i} + (\bar{y}_{.j} - \bar{y}_{.i}) \\ &= \bar{y}_{.j} \end{aligned}$$

จากสมการค่าประมาณของค่าสังเกตใดๆ ในระดับที่ i ก็คือค่าเฉลี่ยของระดับนั้นๆ ดังนั้นการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบมีอยู่ 3 ประเภท คือ

2.9.2.1 การตรวจสอบการแจกแจงของข้อมูลว่าเป็นการกระจายแบบปกติหรือไม่

โดยนำส่วนตกค้าง (Residual) ไปทดสอบโดยใช้วิธีดังต่อไปนี้

1. การทดสอบแบบไครสแควร์ (χ^2 - Goodness of Fit Test)
2. การทดสอบแบบโคลโกโมรอฟ - สเมอโรนอฟ (Kolmogorov - Smirnov Test)
3. การทดสอบโดยใช้กระดวยตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติ (NOPP)

2.9.2.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

เป็นการตรวจสอบข้อมูลว่ามีความเป็นอิสระซึ่งกันและกันหรือไม่ทดสอบโดยใช้แผนภูมิกระจาย (Scatter Plot) ระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลแล้วคุณลักษณะของข้อมูลว่ามีการกระจายตัวเป็นอิสระหรือมีลักษณะเป็นรูปแบบใดๆ

2.9.2.3 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน

เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูลทดสอบโดยใช้แผนภูมิการกระจาย (Scatter Plot) ระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับค่าที่ถุกฟิต (Fitted Value) ถ้าหากข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวนหรือมีความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของข้อมูล รูปที่พล็อตขึ้นมาจะกระจายอยู่ทั่วไป ไม่มีรูปแบบหรือโครงสร้างใดๆทั้งสิ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรอื่นใด และทดสอบโดยใช้แผนภูมิการกระจาย (Scatter Plot) ระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับระดับของปัจจัยแต่ละปัจจัย ถ้าหากข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวนหรือมีความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของข้อมูล รูปที่พล็อตขึ้นมาจะมีลักษณะเป็นทรงกระบอก แต่ถ้า

รูปที่พล็อตขึ้นมาเป็นการเพิ่มขึ้นหรือลดลงเป็นลำดับแสดงว่าข้อมูลนั้นไม่มีความเสถียรของภาพปรากฏหรือไม่ มีความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

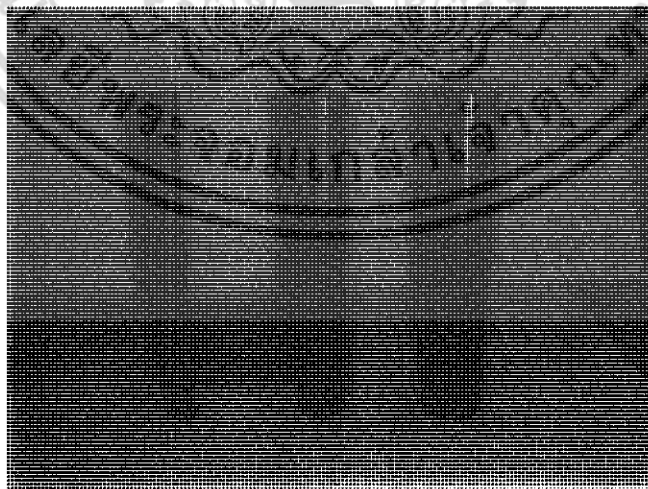
ในอุตสาหกรรมนิยมใช้ขั้วอิเล็กทรอนิกส์ส่วนหนึ่งเป็นทองแดง ซึ่งทองแดงที่นิยมใช้จะเป็นหน้าตัดวงกลม การทดลองครั้งนี้จะใช้ขั้วอิเล็กทรอนิกส์ทองแดงหน้าตัดวงกลม และทำการสปาร์ตขึ้นลงโดยให้กินเวลา 30 นาที โดยมีพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน ซึ่งจะทำการบันทึกค่าเข้าบันทึกก่อนและหลังการทดลอง

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

การทดลองได้นำวัสดุเครื่องมือ DC53 มาทดลองเพราะเนื่องจากเหล็ก DC53 มีคุณสมบัติมีความแข็งสูง การขึ้นรูปด้วยวิธีทางกลแบบธรรมดาทำได้ยากจึงนิยมขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีอื่น และใช้แท่งอิเล็กทรอนิกส์ทองแดงเพราะเป็นที่นิยมและขึ้นรูปได้ง่าย

3.1.1 อิเล็กโทรด

อิเล็กโทรดมีหลายขนาดและหลายประเภท ในการทดลองจะใช้แท่งอิเล็กโทรดทองแดง โดยมีรูปร่างหน้าตัดวงกลมเป็นรูปทรงทรงแท่งกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.5 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร และ 18.5 มิลลิเมตร มีความยาว 100 มิลลิเมตร

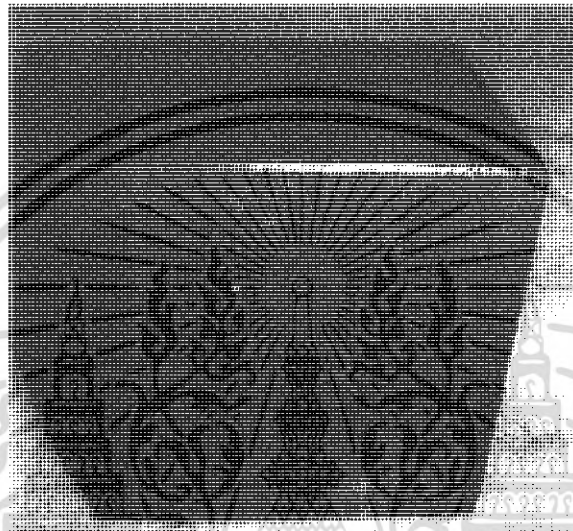


รูปที่ 3-1 แท่งอิเล็กโทรดทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 ชั้นงานทดลอง

เหล็กกล้าเครื่องมือ DC53 มีส่วนผสมทางเคมีในเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก C = 0.97, Cr = 8.05, Mo = 1.93 ชั้นงานทดลองมีความกว้าง 40 มิลลิเมตร ยาว 30 มิลลิเมตร สูง 30 มิลลิเมตร นำทำการทดสอบสปาร์กด้วยเครื่อง ดีดีเอ็ม



รูปที่ 3-2 ชั้นงานทดลอง

3.1.3 สารไดอิเล็กตริก

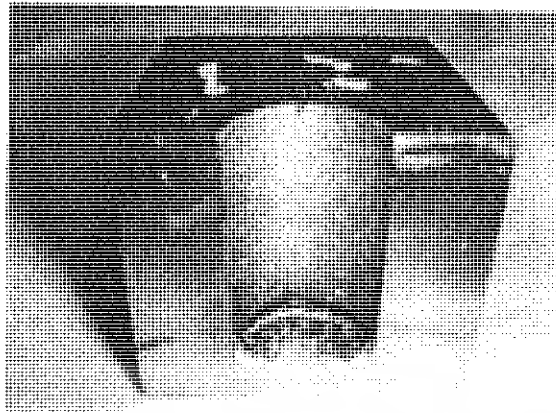
เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ผลิตจากบริษัททอทอลโล (ประเทศไทย) จำกัด ยี่ห้อ IDEMITSU รุ่น คาฟเนอดีเอ็ม – 18S (DN EDM – S)

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

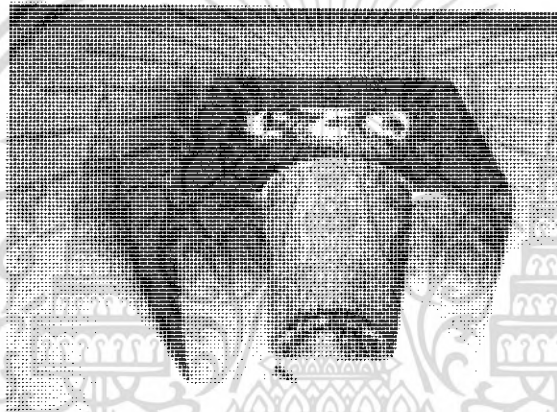
ในการทดลองไม่สามารถนำชิ้นงานมาทดสอบได้ทันที เพราะต้องนำชิ้นงานและอิเล็กโทรดมาขึ้นรูป เพื่อให้ได้ลักษณะรูปร่างและขนาดตามที่ต้องการ จึงจำเป็นต้องใช้เครื่องมือและอุปกรณ์จำนวนมากในขั้นตอนต่าง ๆ ของการทดลอง

3.2.1 เครื่องดีดีเอ็ม

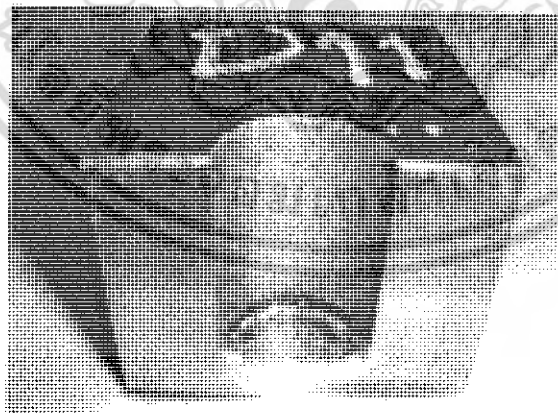
เป็นเครื่องรุ่น AQ35L มีระบบไฮดรอลิกในการขับเคลื่อน แกน XYZ และระบบควบคุมโดยใช้ระบบการสัมผัส แทนหน้าจอแผงควบคุม ซึ่งเป็นระบบอัตโนมัติ ขนาดของโต๊ะเขรามีก 600x400 มิลลิเมตร สามารถจับอิเล็กโทรดหนัก 50 กิโลกรัม รับน้ำหนักของชิ้นงานได้สูงสุด 550 กิโลกรัม ช่วงยึดหยุ่นของชุดหัวจับจากกลางถึงบนสุด 212 มิลลิเมตร ถึง 462



รูปที่ ผง 89 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 79 ลำดับชิ้นงานที่ 42



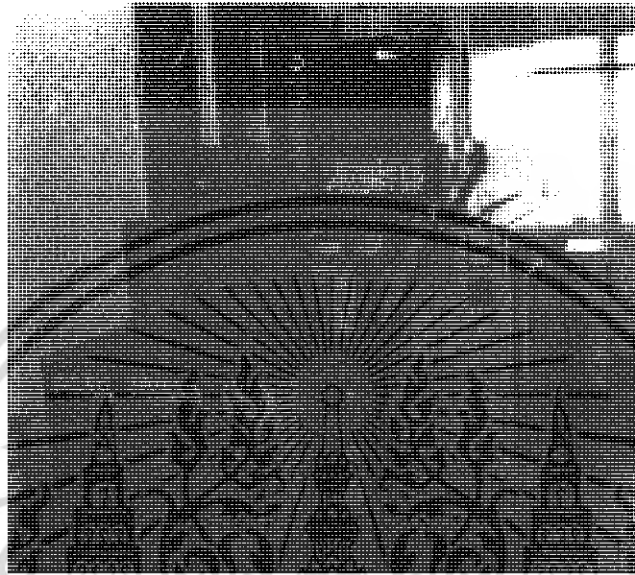
รูปที่ ผง 90 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 80 ลำดับชิ้นงานที่ 54



รูปที่ ผง 91 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 81 ลำดับชิ้นงานที่ 49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงแก้ไข และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

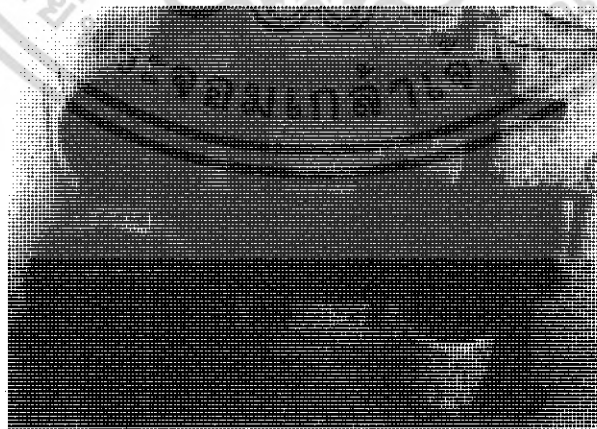
มิลลิเมตร น้ำหนักของชุดเครื่องมือ 3900 กิโลกรัม ความดันอากาศ 0.65 เมกะปาสกาล ความยาวการเคลื่อนที่ของแกน X = 350 มิลลิเมตร Y = 250 มิลลิเมตร Z = 250 มิลลิเมตร



รูปที่ 3-3 เครื่องอีซีเอ็ม

3.2.2 เครื่องเลื่อยไฟฟ้าตัดโลหะ

เครื่องยี่ห้อ HERO เป็นเครื่องมือเลื่อยแบบ Hack Swing Machine มีระบมน้ำหล่อเย็นช่วยลดการสึกหรอของใบเลื่อย และช่วยพิชิตพละสมรรถนะที่เกิดกับ ไซ้เนื่องจากเหล็กกล้าเครื่องมือ DC53 และแท่งทองแดงที่ได้จัดซื้อมามีความยาวมาก จึงจำเป็นต้องตัดแบ่งให้ได้ขนาดความยาวใกล้เคียงกับที่ต้องการ

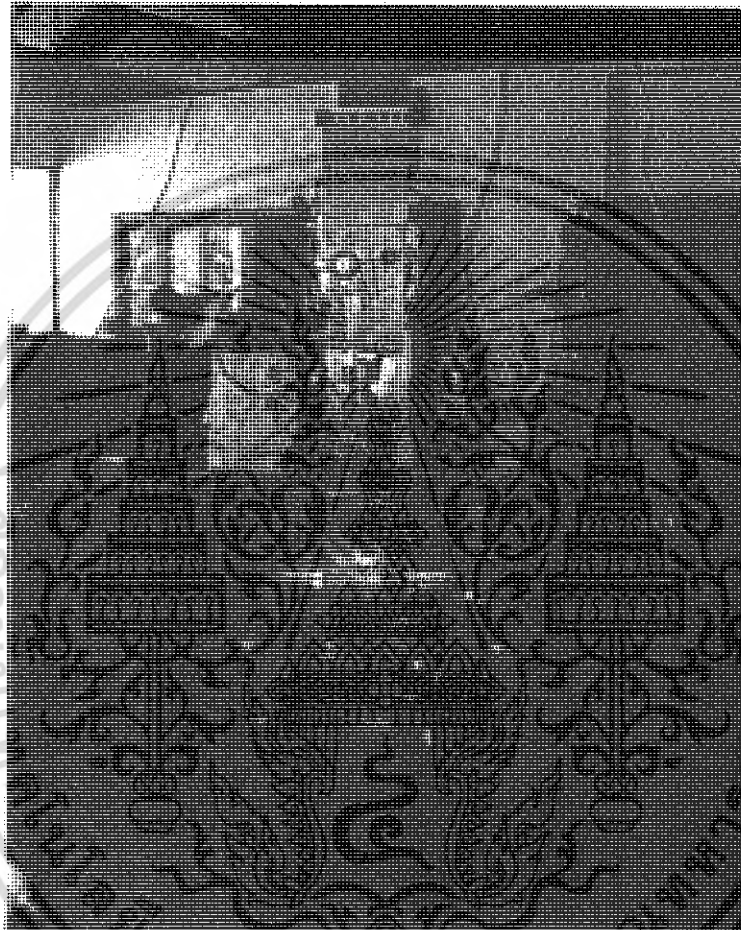


รูปที่ 3-4 เครื่องเลื่อยไฟฟ้าตัดโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 เครื่องกีด

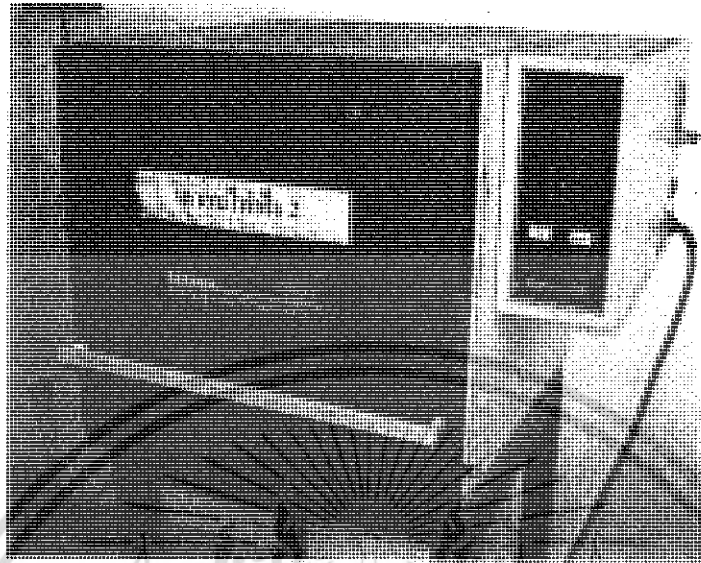
หลังจากการตัดชิ้นงานได้ขนาดใกล้เคียงกับที่ต้องการแล้ว จึงนำมาเข้าเครื่องกีดเพื่อปรับผิวหน้าชิ้นงานให้เรียบและได้ระดับ



รูปที่ 3-5 เครื่องกีด

3.2.4 เตาอบไฟฟ้า

เป็นเครื่องยี่ห้อ Linn Elektro Therm รุ่น LK 312.24 สามารถทนอุณหภูมิได้สูงสุด 1200 องศาเซลเซียส ใช้สำหรับอบคลายความเค้นภายในของชิ้นงานทดสอบที่เกิดขึ้นจากการขึ้นรูป



รูปที่ 3-6 เต้าถ่านไฟฟ้า

3.2.5 เครื่องกลึง

เครื่องกลึงแบบ Manual ยี่ห้อ LIANGDIA รุ่น LD 1540A ใช้กลึงแท่งทองแดงเพื่อให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ต้องการ และเพื่อขจัดคราบออกไซด์บริเวณผิวหน้าของแท่งทองแดง

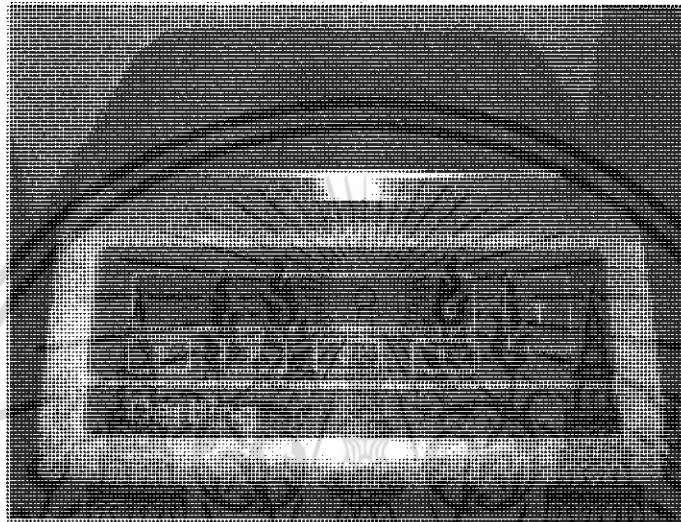


รูปที่ 3-7 เครื่องกลึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.6 เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล

เครื่องชั่ง Oertling (มีความละเอียด 0.001 กรัม) เพื่อให้ได้ค่าจากการชั่งน้ำหนักของชิ้นงานทดสอบ และแท่งอิเล็กโทรดมีความแม่นยำถูกต้อง จึงจำเป็นต้องใช้เครื่องชั่งที่มีความละเอียดมาก และในการชั่งน้ำหนักไม่ควรรชั่งในบริเวณที่มีลมแรง เพราะลมอาจทำให้ค่าน้ำหนักที่อ่านได้มีความคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริงได้



รูปที่ 3-8 เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล

3.3 หลักการออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองที่ใช้เครื่องอิเล็กโตรเป็นตัวสปาร์คนั้น จะต้องเป็นตามขั้นตอนต่างๆที่ได้วางแผนไว้ ซึ่งตัวพารามิเตอร์ที่เลือกใช้นั้นมีมากกว่า 1 ปัจจัย โดยแต่ละพารามิเตอร์มีอยู่หลายระดับ (พารามิเตอร์) ที่จะต้องดำเนินการทดลอง กล่าวคือ เป็นการจัดทริทเมนต์ที่ใช้ในการทดลองมีทั้งหมด 3 ปัจจัย แบ่งเป็นพารามิเตอร์ภายใน 2 ปัจจัย 3 ระดับและพารามิเตอร์ภายนอก 1 ปัจจัย 3 ระดับ เรียกว่าการทดลองแบบแฟกทอเรียล 3³ ดังนั้น การจัดกลุ่มของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองคือ 27 และมีการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ซึ่งจะทำให้การทดลองทั้งหมดคือ 81 ครั้งการทดลอง

ตารางที่ 3-1 ระดับพารามิเตอร์ในการทดลอง

Parameters	Level 1	Level 2	Level 3
ON Electric Discharge Time (μsec)	125	190	250
IP Electric Discharge Peak Current (A)	50	75	90
Electrode Size (mm.)	9.5	15	18.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3-2 ตัวแปรที่สภาวะงานที่โดยกำหนดค่าที่ตลอดการทดลอง

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

ตารางที่ 3-3 การออกแบบและลำดับการทดลองหาพารามิเตอร์ตอบสนอง

ลำดับการทดลอง	ลำดับชิ้นงาน	ON (μsec)	IP (A)	Electrode Size (mm.)
1	66	125	75	18.5
2	25	250	75	9.5
3	38	125	75	15.0
4	76	190	50	18.5
5	48	125	90	15.0
6	65	125	75	18.5
7	62	250	90	18.5
8	52	250	75	15.0
9	2	125	50	9.5
10	78	190	50	18.5
11	12	125	75	9.5
12	80	250	75	18.5
13	19	125	90	9.5
14	13	190	90	9.5
15	75	125	90	18.5
16	39	125	75	15.0
17	57	125	50	18.5
18	6	190	75	9.5
19	21	125	90	9.5
20	35	250	90	15.0
21	72	250	50	18.5
22	60	190	75	18.5
23	51	190	50	15.0
24	30	125	50	15.0
25	41	190	90	15.0
26	71	250	50	18.5
27	9	250	90	9.5
28	27	250	75	9.5
29	64	125	75	18.5

ตารางที่ 3-3 การออกแบบและลำดับการทดลองหาพารามิเตอร์คอมมอน (ต่อ)

ลำดับการทดลอง	ลำดับชิ้นงาน	ON (μ sec)	IP (A)	Electrode Size (mm.)
30	67	190	90	18.5
31	59	190	75	18.5
32	58	190	75	18.5
33	22	190	50	9.5
34	14	190	90	9.5
35	40	190	90	15.0
36	31	190	75	15.0
37	69	190	90	18.5
38	23	190	50	9.5
39	36	250	90	15.0
40	10	125	75	9.5
41	46	125	90	15.0
42	3	125	50	9.5
43	77	190	50	18.5
44	26	250	75	9.5
45	73	125	90	18.5
46	53	250	75	15.0
47	4	190	75	9.5
48	34	250	90	15.0
49	61	250	90	18.5
50	55	125	50	18.5
51	44	250	50	15.0
52	37	125	75	15.0
53	20	125	90	9.5
54	50	190	50	15.0
55	11	125	75	9.5
56	24	190	50	9.5
57	7	250	90	9.5
58	29	125	50	15.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3-3 การออกหมายและลำดับการทดลองหาพารามิเตอร์ตอบสนอง (ต่อ)

ลำดับการทดลอง	ลำดับชิ้นงาน	ON (μsec)	IP (A)	Electrode Size (mm.)
59	18	250	50	9.5
60	74	125	90	18.5
61	70	250	50	18.5
62	81	250	75	18.5
63	15	190	90	9.5
64	68	190	90	18.5
65	17	250	50	9.5
66	33	190	75	15.0
67	79	250	75	18.5
68	8	250	90	9.5
69	5	190	75	9.5
70	47	125	90	15.0
71	56	125	50	18.5
72	43	250	50	15.0
73	32	190	75	15.0
74	1	125	50	9.5
75	16	250	50	9.5
76	45	250	50	15.0
77	63	250	90	18.5
78	28	125	50	15.0
79	42	190	90	15.0
80	54	250	75	15.0
81	49	190	50	15.0

3.4 ขั้นตอนการทดลอง

การทดลองนี้มีขั้นตอนต่างๆมากมายซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นส่วนหลักๆได้ 3 ขั้นตอนดังนี้

3.4.1 ขั้นตอนก่อนการทดลอง

1. จัดการเตรียมชิ้นงานทดสอบคือเหล็กกล้าที่ใช้ทำแม่พิมพ์ DC 53 โดยการตัดชิ้นงานทดสอบให้มีขนาด กว้าง 40 มิลลิเมตร ยาว 30 มิลลิเมตร และสูง 30 มิลลิเมตร
2. นำชิ้นงานเข้ามาเพื่อตรวจสอบความผันผวนที่ก่เกิดขึ้นจากการขึ้นรูป ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ให้อุณหภูมิคงที่ไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นตัวลงในเตาอบ
3. จัดการเตรียมอิเล็กโทรด นำแท่งของเบงรูปทรงกระบอกหน้าตัดวงกลมมาลึงขึ้นรูปให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.5 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร และ 18.5 มิลลิเมตร โดยให้แท่งอิเล็กโทรดทุกขนาดมีความยาว 100 มิลลิเมตร
4. นำชิ้นงานทดสอบและอิเล็กโทรดทำการชั่งน้ำหนักก่อนการทดลองเพื่อบันทึกผล

3.4.2 ขั้นตอนระหว่างทดลอง

1. ทำการจํายัดอิเล็กโทรดเข้ากับเพลลาหัวจับของเครื่องอัดฉีด ขึ้นให้แน่นพอควร
2. จํายัดชิ้นงานทดสอบเข้ากับปากกาจับงานในอ่างที่ใส่วัสดุสารไดอิเล็กตริก และจัดตำแหน่งปากหัวฉีดให้เข้าที่ (ต้องให้ตำแหน่งของหัวฉีดตรงตำแหน่งเดิมตลอดการทดลอง)
3. ทำการตั้งศูนย์ปลายอิเล็กโทรดกับชิ้นงาน
4. ปลดปล่อยสารไดอิเล็กตริกให้ไหลเข้าสู่อ่างบรรจุ
5. ทำการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ตามแผนการทดลองที่ได้วางแผนไว้และเดินเครื่องอัดฉีด
6. ดำเนินการทดลองให้เครื่องอัดฉีดทำการสปาร์คขึ้นงานเป็นเวลา 30 นาที
7. เมื่อครบเวลาจึงปลดปล่อยสารไดอิเล็กตริกลงสู่ถังเก็บด้านล่างเครื่อง
8. ถอดอิเล็กโทรดออกจากเพลลาหัวจับและนำชิ้นงานทดสอบออกจากเครื่องอัดฉีด
9. ทำความสะอาดชิ้นงานและนำชิ้นงานทดสอบและอิเล็กโทรดชุดใหม่มาติดตั้งและทำการทดลองต่อ

3.4.3 ขั้นตอนหลังการทดลอง

1. นำชิ้นงานทดสอบกับอิเล็กโทรดที่ผ่านกรรมวิธีอัดฉีดมาเสร็จเรียบร้อยแล้วมาทำการชั่งน้ำหนัก
2. นำค่าที่ได้มาใส่ในตารางบันทึกผลการทดลอง
3. ค่าที่ได้จากการทดลองมาคำนวณหาค่าอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR) และอัตราการสึกหรอของแท่งอิเล็กโทรด (EWR)
4. นำค่าที่คำนวณได้มาสร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งอิเล็กโทรดกับอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอิเล็กโทรดกับอัตราการสึกหรอของแท่งอิเล็กโทรด

5. นำค่าอัตราการตัดเนื้อชิ้นงานและค่าอัตราการสึกหรอของแท่งอิเล็กทรอนิกส์ที่ได้ มาทำการประมวลผลและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ทางสถิติ
6. สรุปผลการทดลอง



บทที่ 4

ผลการทดลอง

การทดลองทำตามขั้นตอนการทดลองที่ออกแบบไว้ ในบทที่ 3 โดยกำหนดปัจจัยไว้ 3 ปัจจัย ใช้ตัวแปรภายใน 2 ตัวคือ ช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) และกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ค (IP) ตัวแปรภายนอกคือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอิเล็กโทรด (ทองแดง) จะมี 3 ขนาดคือ 9.5 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร 18.5 มิลลิเมตร เพื่อนำผลการศึกษาค้นคว้าการตัดเนื้อชิ้นงาน (Material Removal Rate) อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (Electrode Wear Rate) โดยศึกษาเฉพาะเหล็กกล้าเครื่องมือ DC53 ดังนั้นผลการทดลองได้ผลออกมาดังนี้

4.1 ตารางบันทึกผลการทดลอง

ตารางที่ 4-1 ค่าอัตรา การตัดเนื้อชิ้นงาน อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด

ลำดับการทดลอง	ลำดับชิ้นงาน	ON (μsec)	IP (A)	ขนาดอิเล็กโทรด (mm.)	MRR (g/s)	EWR (g/s)
1	66	125	75	18.5	0.0100556	0.0003889
2	25	250	75	9.5	0.0043073	0.0000590
3	38	125	75	15.0	0.0090556	0.0002222
4	76	190	50	18.5	0.0082778	0.0000556
5	48	125	90	15.0	0.0094444	0.0003889
6	65	125	75	18.5	0.0099444	0.0002778
7	62	250	90	18.5	0.0125556	0.0001667
8	52	250	75	15.0	0.0096111	0.0000556
9	2	125	50	9.5	0.0040713	0.0001180
10	78	190	50	18.5	0.0082222	0.0000556
11	12	125	75	9.5	0.0047204	0.0002360
12	80	250	75	18.5	0.0110000	0.0000556
13	19	125	90	9.5	0.0044254	0.0004720
14	13	190	90	9.5	0.0044254	0.0002950

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ขึ้นตามการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4-1 ลำดับการตัดบ็อกซ์งาน ถัดจากการสึกหรอของอิเล็กโทรด (ต่อ)

ลำดับการ ทดลอง	ลำดับชิ้นงาน	ON (μsec)	IP (A)	ขนาด อิเล็กโทรด (mm.)	MRR (g/s)	EWR (g/s)
15	75	125	90	18.5	0.0118889	0.0005556
16	39	125	75	15.0	0.0089444	0.0002778
17	57	125	50	18.5	0.0077778	0.0001111
18	6	190	75	9.5	0.0043664	0.0001180
19	21	125	90	9.5	0.0043073	0.0005310
20	35	250	90	15.0	0.0103889	0.0002222
21	72	250	50	18.5	0.0087222	0.0000556
22	60	190	75	18.5	0.0104444	0.0001111
23	51	190	50	15.0	0.0075000	0.0000556
24	30	125	50	15.0	0.0065556	0.0000556
25	41	190	90	15.0	0.0088333	0.0001667
26	71	250	50	18.5	0.0082222	0.0000556
27	9	250	90	9.5	0.0046614	0.0001770
28	27	250	75	9.5	0.0044844	0.0001180
29	64	125	75	18.5	0.0113333	0.0003333
30	67	190	90	18.5	0.0121667	0.0002222
31	59	190	75	18.5	0.0108889	0.0001667
32	58	190	75	18.5	0.0103889	0.0002222
33	22	190	50	9.5	0.0037173	0.0000590
34	14	190	90	9.5	0.0042483	0.0002360
35	40	190	90	15.0	0.0106667	0.0002222
36	31	190	75	15.0	0.0095000	0.0001667
37	69	190	90	18.5	0.0121667	0.0002222
38	23	190	50	9.5	0.0039533	0.0000590
39	36	250	90	15.0	0.0101111	0.0001111
40	10	125	75	9.5	0.0041893	0.0002360
41	46	125	90	15.0	0.0097778	0.0005000
42	3	125	50	9.5	0.0041893	0.0001180
43	77	190	50	18.5	0.0079444	0.0000556
44	26	250	75	9.5	0.0044254	0.0001180

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4-1 ค่าอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน อัตรา การสึกหรบของอิเล็กโทรด (ต่อ)

ลำดับการทดลอง	กำลังขิ้นงาน	ON (μsec)	IP (A)	ขนาดอิเล็กโทรด (mm.)	MRR (g/s)	FWR (g/s)
45	73	125	90	18.5	0.0115556	0.0006667
46	53	250	75	15.0	0.0094444	0.0001667
47	4	190	75	9.5	0.0046024	0.0001180
48	34	250	90	15.0	0.0102778	0.0001111
49	61	250	90	18.5	0.0126111	0.0001111
50	55	125	50	18.5	0.0078333	0.0000556
51	44	250	50	15.0	0.0076667	0.0000556
52	37	125	75	15.0	0.0050000	0.0001111
53	20	125	90	9.5	0.0044254	0.0004130
54	50	190	50	15.0	0.0068889	0.0000556
55	11	125	75	9.5	0.0048384	0.0002950
56	24	190	50	9.5	0.0035403	0.0001180
57	7	250	90	9.5	0.0047794	0.0002360
58	29	125	50	15.0	0.0066667	0.0000556
59	18	250	50	9.5	0.0038353	0.0000590
60	74	125	90	18.5	0.0116111	0.0006111
61	70	250	50	18.5	0.0086111	0.0000556
62	81	250	75	18.5	0.0106111	0.0001667
63	15	190	90	9.5	0.0045434	0.0002360
64	68	190	90	18.5	0.0122222	0.0003333
65	17	250	50	9.5	0.0035403	0.0000590
66	33	190	75	15.0	0.0096111	0.0001111
67	79	250	75	18.5	0.0107778	0.0001111
68	8	250	90	9.5	0.0044844	0.0002360
69	5	190	75	9.5	0.0042483	0.0000590
70	47	125	90	15.0	0.0087222	0.0003889
71	56	125	50	18.5	0.0081667	0.0001111
72	43	250	50	15.0	0.0072222	0.0000556
73	32	190	75	15.0	0.0091111	0.0001667
74	1	125	50	9.5	0.0039533	0.0000590

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

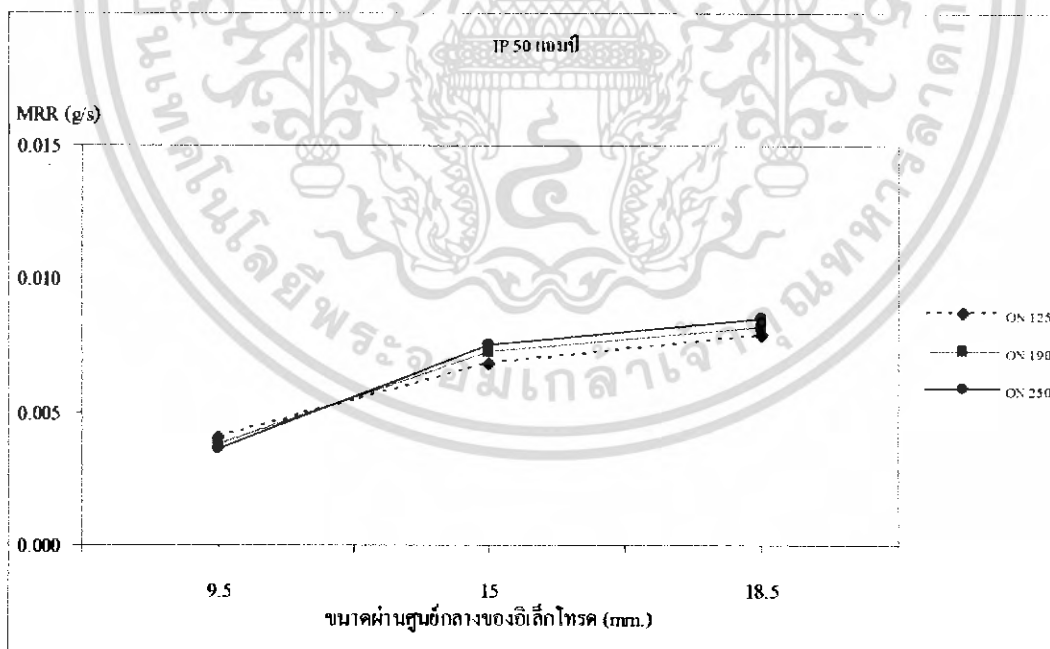
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4-1 ค่าอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (ต่อ)

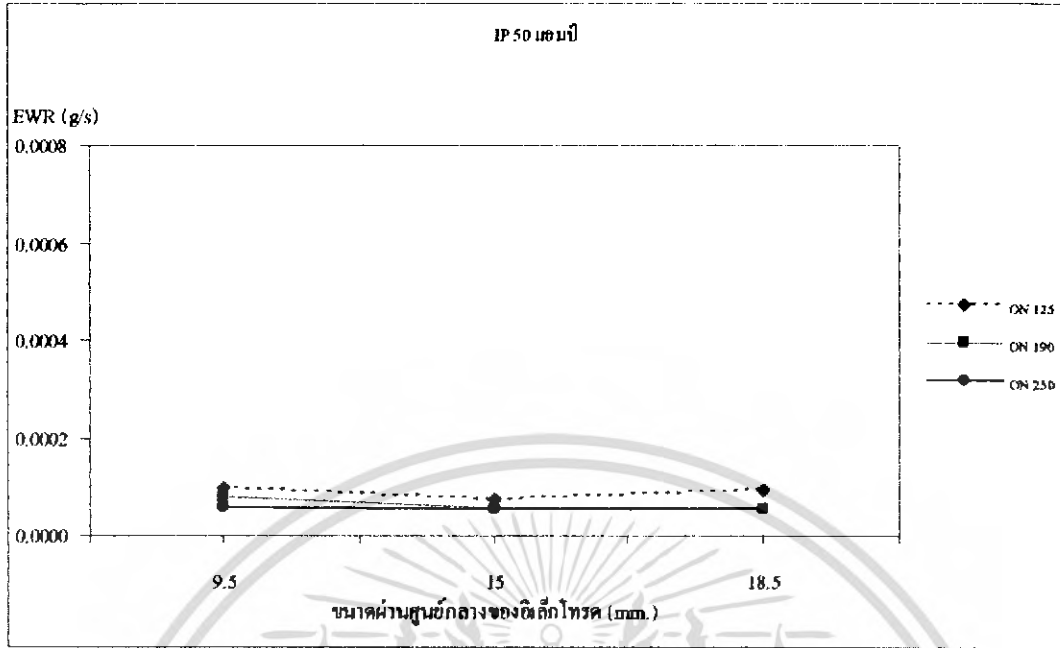
ลำดับการทดลอง	ลำดับชิ้นงาน	ON (μsec)	IP (A)	ขนาดอิเล็กโทรด (mm.)	MRR (g/s)	EWR (g/s)
75	16	250	50	9.5	0.0034813	0.0000590
76	45	250	50	15.0	0.0077222	0.0000556
77	63	250	90	18.5	0.0125556	0.0001667
78	28	125	50	15.0	0.0071667	0.0001111
79	42	190	90	15.0	0.0109444	0.0002778
80	54	250	75	15.0	0.0094444	0.0001111
81	49	190	50	15.0	0.0074444	0.0000556

4.2 การวิเคราะห์ผลด้วยกราฟ

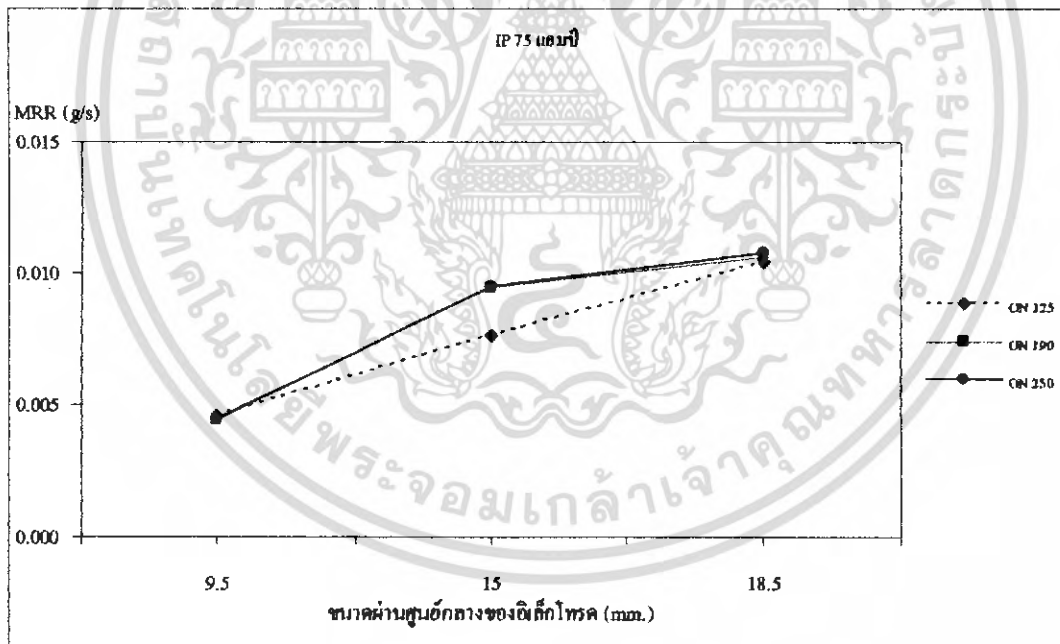
ค่าที่ได้จากการทดสอบมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งอิเล็กโทรดและอัตรา การตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR) กับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอิเล็กโทรดและอัตราการสึกหรอของแท่งอิเล็กโทรด (EWR) เพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบความสัมพันธ์ในแต่ละปัจจัยและระดับที่ต่างกัน



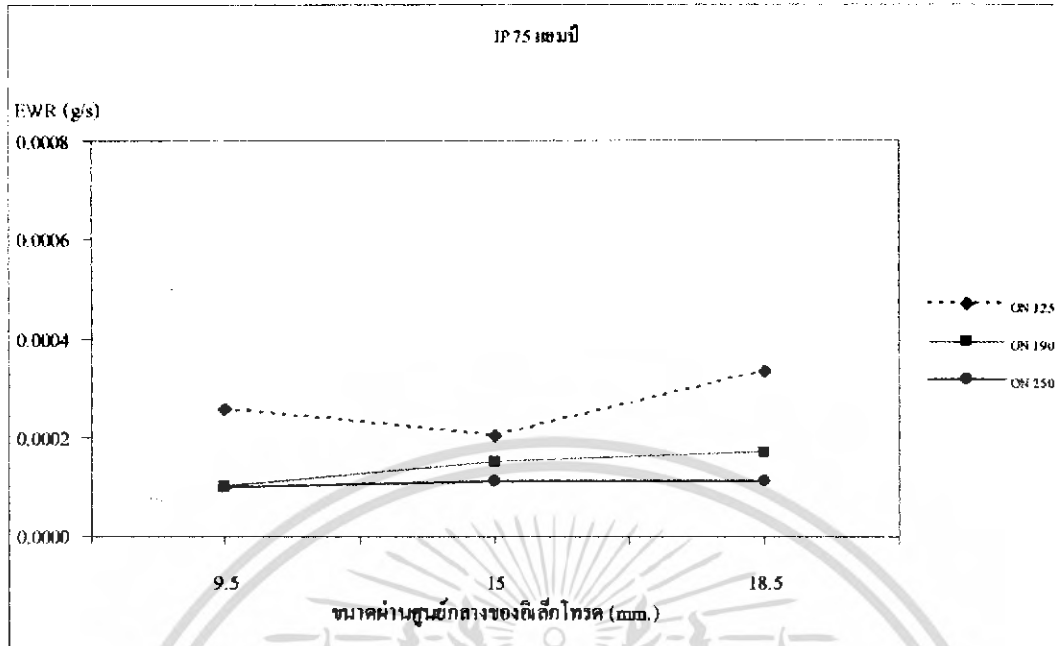
รูปที่ 4-1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง DIAMETER กับ MRR ที่ IP 50 แอมป์



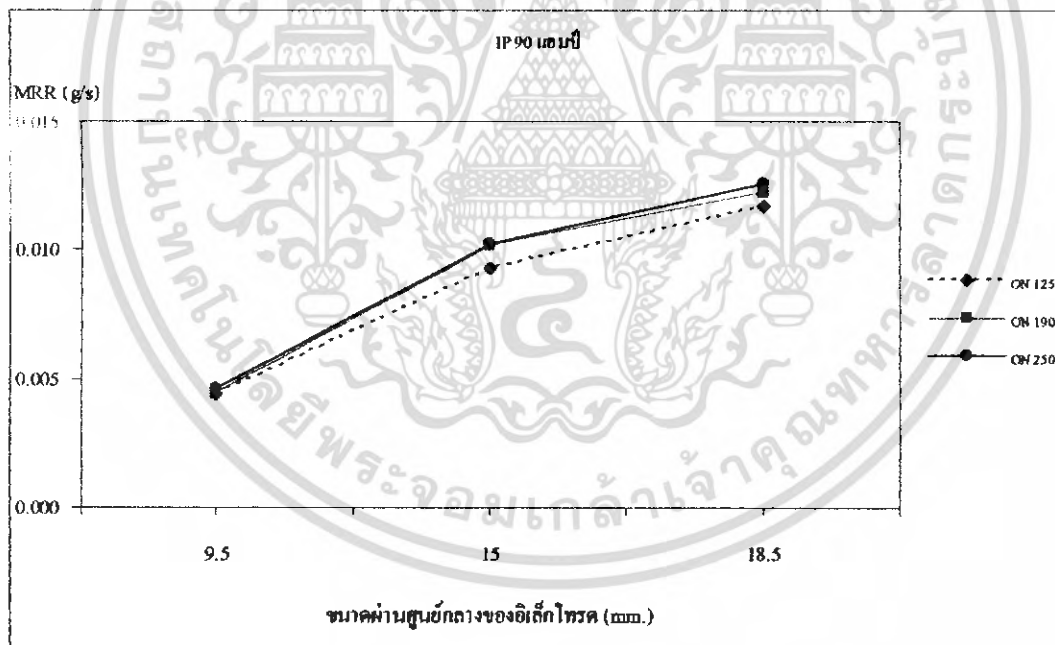
รูปที่ 4-2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง DIAMETER กับ EWR ที่ IP 50 แอมป์



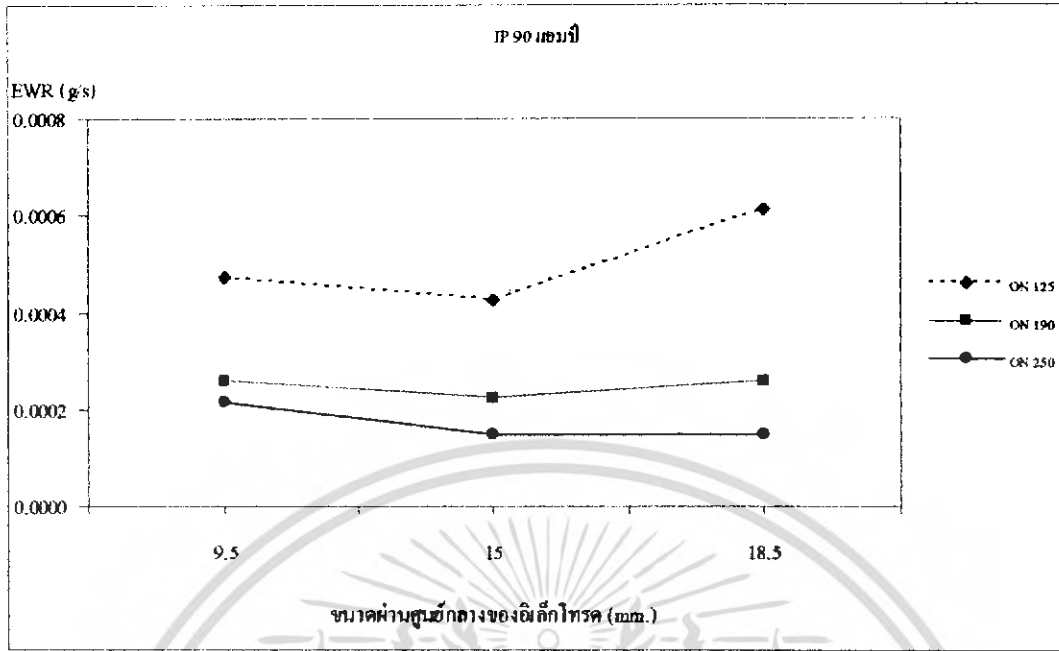
รูปที่ 4-3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง DIAMETER กับ MRR ที่ IP 75 แอมป์



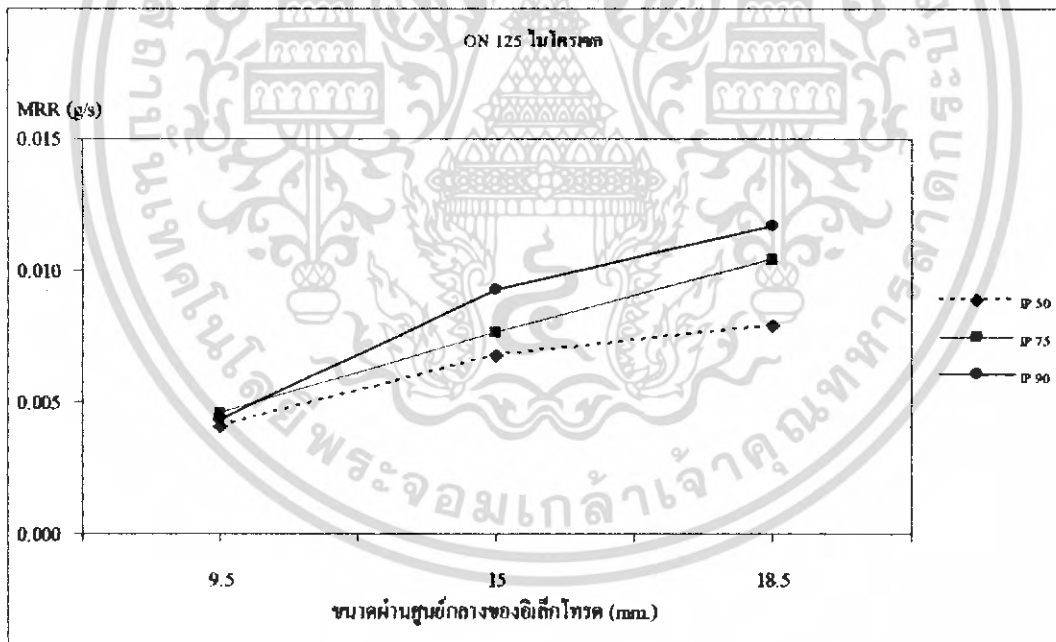
รูปที่ 4-4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง DIAMETER กับ EWR ที่ IP 75 แอมป์



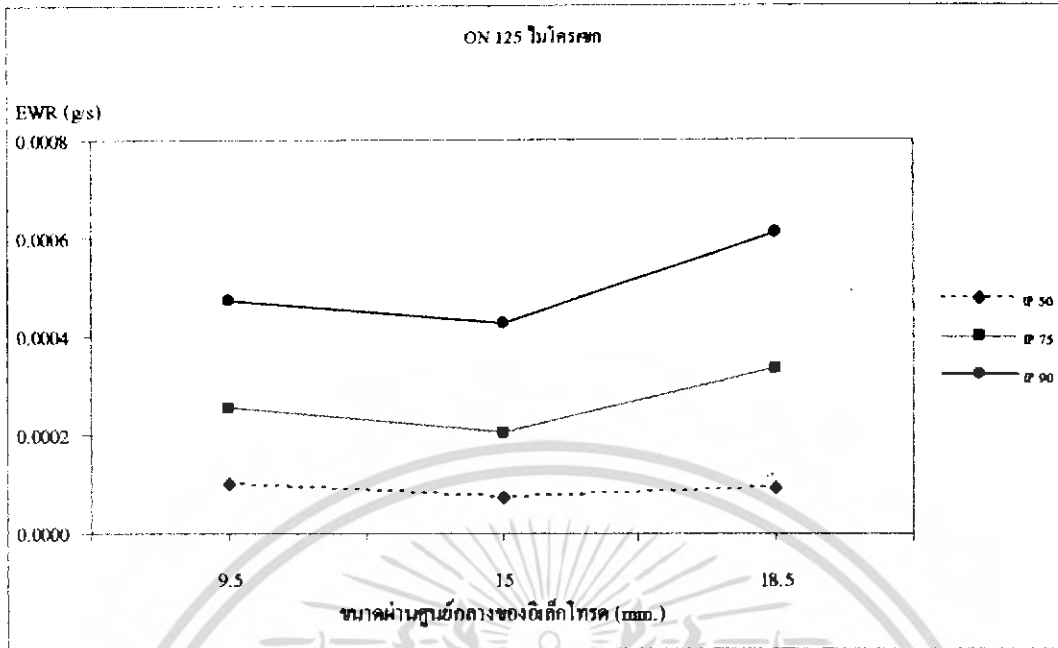
รูปที่ 4-5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง DIAMETER กับ MRR ที่ IP 90 แอมป์



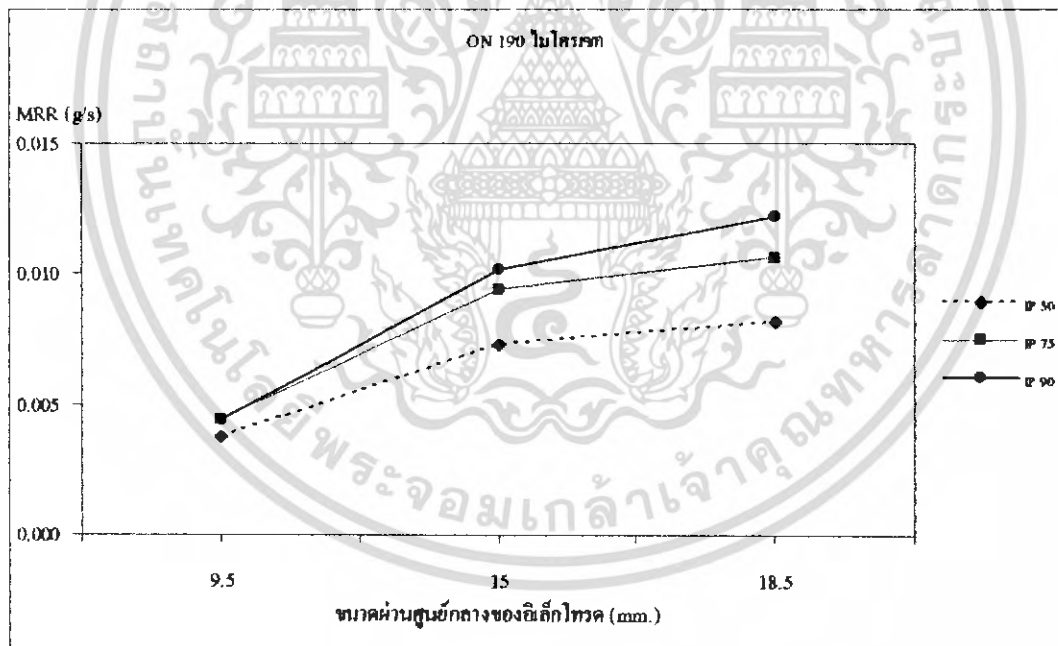
รูปที่ 4-6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง DIAMETER กับ EWR ที่ IP 90 เอมปี



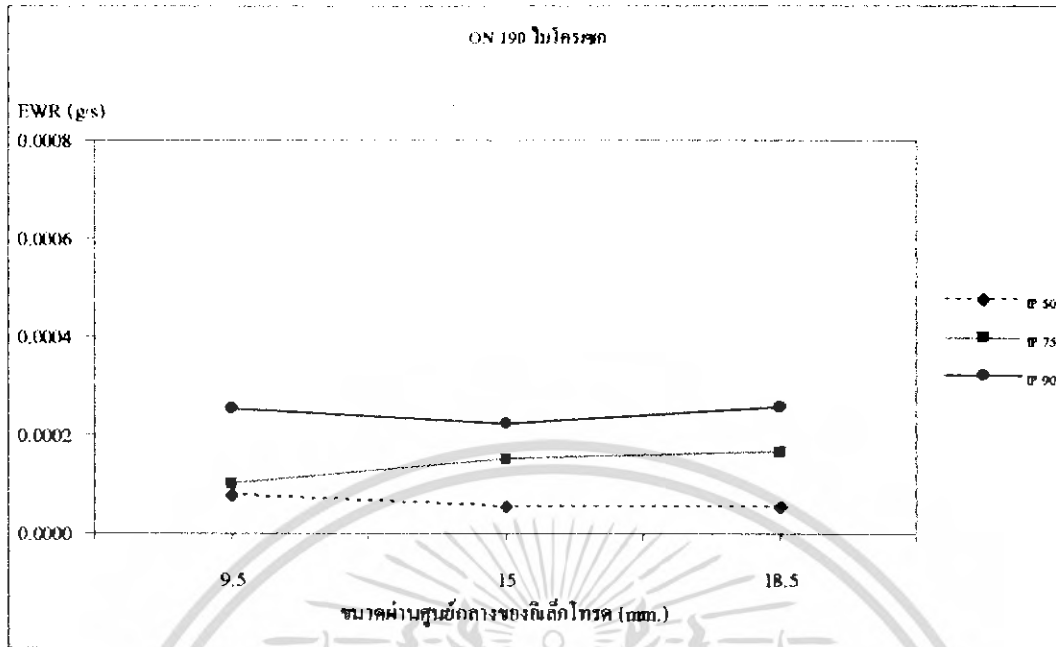
รูปที่ 4-7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง DIAMETER กับ MRR ที่ ON 125 ไมโครเซก



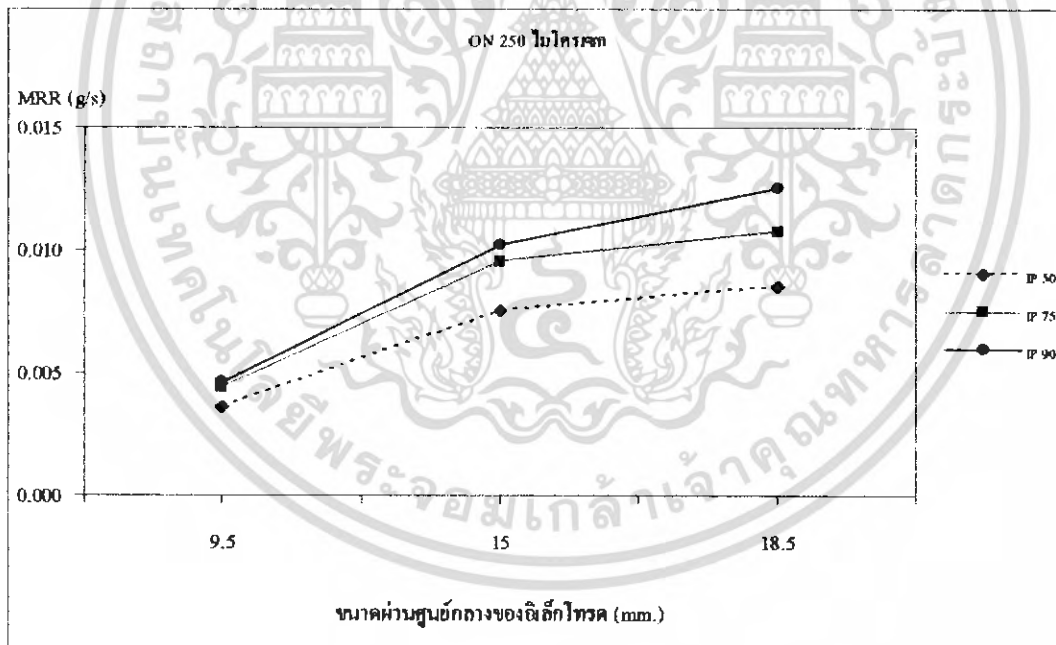
รูปที่ 4-8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง DIAMETER กับ EWR ที่ ON 125 ไมโครเซก



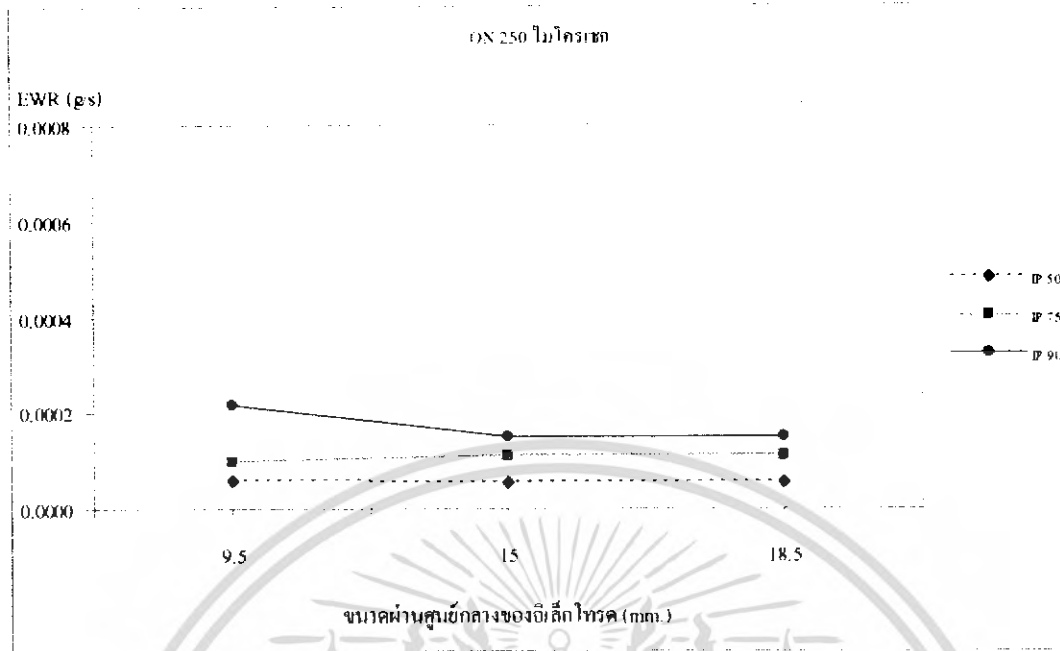
รูปที่ 4-9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง DIAMETER กับ MRR ที่ ON 190 ไมโครเซก



รูปที่ 4-10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง DIAMETER กับ EWR ที่ ON 190 ไมโครเซต



รูปที่ 4-11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง DIAMETER กับ MRR ที่ ON 250 ไมโครเซต



รูปที่ 4-12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง DIAMETER กับ EWR ที่ ON 250 ไมโครเชก

4.3 การวิเคราะห์การทดลอง

การวิเคราะห์การทดลองเป็นค่าที่ตอบสนองในการทดสอบพารามิเตอร์ที่เหมาะสม โดยวิธีการวิเคราะห์จะแบ่งออกได้เป็นมี 3 ขั้นตอน

4.3.1 การวิเคราะห์ ANOVA

เป็นการวิเคราะห์เพื่อดูว่าปัจจัยใดที่มีผลต่อการหาค่าตอบที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ โดยจะใช้โปรแกรม Statgraphics เป็นโปรแกรมช่วยในการวิเคราะห์

จากสมมติฐาน

$$H_0 : \mu_i = \mu_j ; i \neq j$$

$$H_1 : \mu_i \neq \mu_j \text{ อย่างน้อย 1 คู่ ; } i \neq j$$

กำหนดระดับนัยสำคัญไว้ที่ 0.05

ถ้าค่า P-value ในตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนมีค่ามากกว่า 0.05 จะยอมรับสมมติฐานหลักหรือ H_0 คือไม่มีความแตกต่างเชิงสถิติ

ถ้าค่า P-value ในตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนมีค่าน้อยกว่า 0.05 จะยอมรับสมมติฐานรองหรือ H_1 คือ อย่างน้อย 1 คู่ที่ทำให้มีความแตกต่างเชิงสถิติ

ตารางที่ 4-2 ผลการวิเคราะห์ MRR ด้วย ANOVA

Analysis of Variance for MRR - Type III Sums of Squares					
Source of Variation	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A : DIAMETER	0.000530724	2	0.000265362	840.34	0.0000
B : IP	0.0000826702	2	0.0000413351	130.90	0.0000
C : ON	0.00000432119	2	0.0000021606	6.84	0.0022
INTERACTIONS					
AB	0.0000247589	4	0.00000618973	19.60	0.0000
AC	0.00000826702	4	0.00000120104	3.80	0.0085
BC	6.48798E-7	4	1.622E-7	0.51	0.7259
ABC	0.00000150572	8	1.88215E-7	-0.60	0.7769
RESIDUAL	0.0000170521	54	3.15779E-7		
Total	0.000666485	80			

จากค่า P-value ในตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนจะเห็นได้ว่าปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter) กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการสปาร์ก (IP) และระยะเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) เนื่องจากค่า P-value ของทั้งสามปัจจัยนี้มีค่าน้อยกว่า 0.05

ตารางที่ 4-3 ผลการวิเคราะห์ EWR ด้วย ANOVA

Analysis of Variance for EWR - Type III Sums of Squares					
Source of Variation	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F- Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A : DIAMETER	2.52129E-8	2	1.26064E-8	6.33	0.0034
B : IP	7.6489E-7	2	3.82445E-7	192.01	0.0000
C : ON	4.51348E-7	2	2.25674E-7	113.30	0.0000
INTERACTIONS					
AB	1.7448E-8	4	4.36199E-9	2.19	0.0823
AC	3.57971E-8	4	8.94926E-9	4.49	0.0033
BC	2.25213E-7	4	5.63032E-8	28.27	0.0000
ABC	2.45287E-8	8	3.06608E-9	1.54	0.1656
RESIDUAL	1.07559E-7	54	1.99184E-9		
Total	0.000001652	80			

จากค่า P-value ในตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนจะเห็นได้ว่าปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์ (EWR) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter) กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการสปาร์ค (IP) และระยะเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) เนื่องจากค่า P-value ของทั้งสามปัจจัยนี้มีค่าน้อยกว่า 0.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 การวิเคราะห์ Duncan's Multiple Range Test

เป็นการวิเคราะห์เพื่อดูว่าระดับปัจจัยใดที่มีความแตกต่างกับระดับปัจจัยอื่นๆ ที่นัยสำคัญ 0.05

ตารางที่ 4-4 ผลการวิเคราะห์ MRR ด้วย Duncan's Multiple Range Test

Multiple Range Tests for MRR by DIAMETER			
Method : 95.0 percent Duncan			
DIAMETER	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
9.5	27	0.00425053	X
15	27	0.00865638	X
18.5	27	0.0103169	X
Contrast			Difference
9.5 - 15			*-0.00440585
9.5 - 18.5			*-0.00606635
15 - 18.5			*-0.00166049

จากผลการวิเคราะห์ Duncan's Multiple Range Test ของค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอิเล็กโทรด (Diameter) พบว่าค่าที่ได้จากระดับทั้ง 3 ระดับ เป็นระดับปัจจัยที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เป็นผลให้อัตรการสึกกร่อน (MRR) แตกต่าง

ตารางที่ 4-5 ผลการวิเคราะห์ MRR ด้วย Duncan's Multiple Range Test

Multiple Range Tests for MRR by ON			
Method : 95.0 percent Duncan			
ON	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
125	27	0.00743037	X
190	27	0.0078099	X
250	27	0.0079835	X
Contrast			Difference
125 - 190			*-0.000379525
125 - 250			*-0.000553131
190 - 250			-0.000173606

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการวิเคราะห์ Duncan's Multiple Range Test ของค่าระยะเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) พบว่าค่าที่ได้จากระดับทั้ง 3 ระดับ เป็นระดับปัจจัยที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ โดยที่ระดับ 190 และ 250 ให้ค่า อัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR) ไม่แตกต่าง แต่ระดับที่ 125 มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4-6 ผลการวิเคราะห์ MRR ด้วย Duncan's Multiple Range Test

Multiple Range Tests for MRR by IP			
Method : 95.0 percent Duncan			
IP	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
50	27	0.00640344	X
75	27	0.00797589	X
90	27	0.00884445	X
Contrast	Difference		
50 - 75	*-0.00157245		
50 - 90	*-0.00244102		
75 - 90	*-0.000868569		

จากผลการวิเคราะห์ Duncan's Multiple Range Test ของค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการสปาร์ก (IP) พบว่าค่าที่ได้จากระดับทั้ง 3 ระดับ เป็นระดับปัจจัยที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เป็นผลให้อัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR) แตกต่าง

ตารางที่ 4-7 ผลการวิเคราะห์ EWR ด้วย Duncan's Multiple Range Test

Multiple Range Tests for EWR by DIAMETER			
Method : 95.0 percent Duncan			
DIAMETER	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
15	27	0.000160511	X
9.5	27	0.00018137	XX
18.5	27	0.000203719	X
Contrast	Difference		
9.5 - 15	0.0000208593		
9.5 - 18.5	-0.0000223481		
15 - 18.5	*-0.00166049		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการวิเคราะห์ Duncan's Multiple Range Test ของค่าระยะเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) พบว่าค่าที่ได้จากระดับทั้ง 3 ระดับ เป็นระดับปัจจัยที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ โดยที่ระดับ 15 และ 9.5 ให้ค่าอัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์โทรด (EWR) ไม่แตกต่างกัน และระดับ 9.5 และ 18.5 ให้ค่าอัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์โทรด (EWR) ไม่แตกต่างกัน แต่ที่ระดับ 15 และ 18.5 ให้ค่าอัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์โทรด (EWR) แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4-8 ผลการวิเคราะห์ EWR ด้วย Duncan's Multiple Range Test

Multiple Range Tests for EWR by ON			
Method : 95.0 percent Duncan			
ON	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
250	27	0.000111493	X
190	27	0.000148907	X
125	27	0.0002852	X
Contrast			Difference
125 - 190			*0.000136293
125 250			*0.000173707
190 250			*0.000374148

จากผลการวิเคราะห์ Duncan's Multiple Range Test ของค่าระยะเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) พบว่าค่าที่ได้จากระดับทั้ง 3 ระดับ เป็นระดับปัจจัยที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เป็นผลให้อัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์โทรด (EWR) แตกต่าง

ตารางที่ 4-9 ผลการวิเคราะห์ EWR ด้วย Duncan's Multiple Range Test

Multiple Range Tests for EWR by IP			
Method : 95.0 percent Duncan			
IP	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
50	27	0.0000694556	X
75	27	0.000169607	X
90	27	0.000306537	X
Contrast			Difference
50 - 75			*-0.000100152
50 - 90			*-0.000237081
75 - 90			*-0.00013693

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

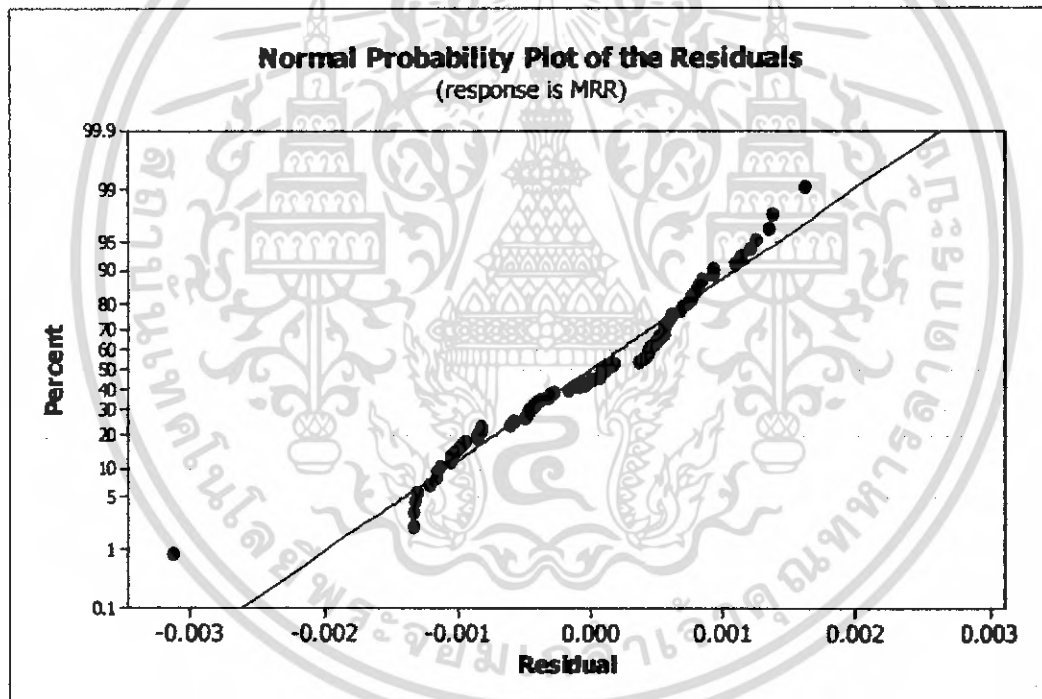
จากผลการวิเคราะห์ Duncan's Multiple Range Test ของค่าระยะเวลาในการปลอ่อกกระแสไฟฟ้า (ON) พบว่าค่าที่ได้จากระดับทั้ง 3 ระดับ เป็นระดับปัจจัยที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เป็นผลให้อัตรการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์ (EWR) แตกต่าง

4.3.3 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model Adequacy Checking) เป็นวิธีการตรวจสอบที่ทำให้ทราบว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนมีความน่าเชื่อถือเป็นไปตามหลักทางสถิติหรือไม่ โดยการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ 3 ประเภท คือ

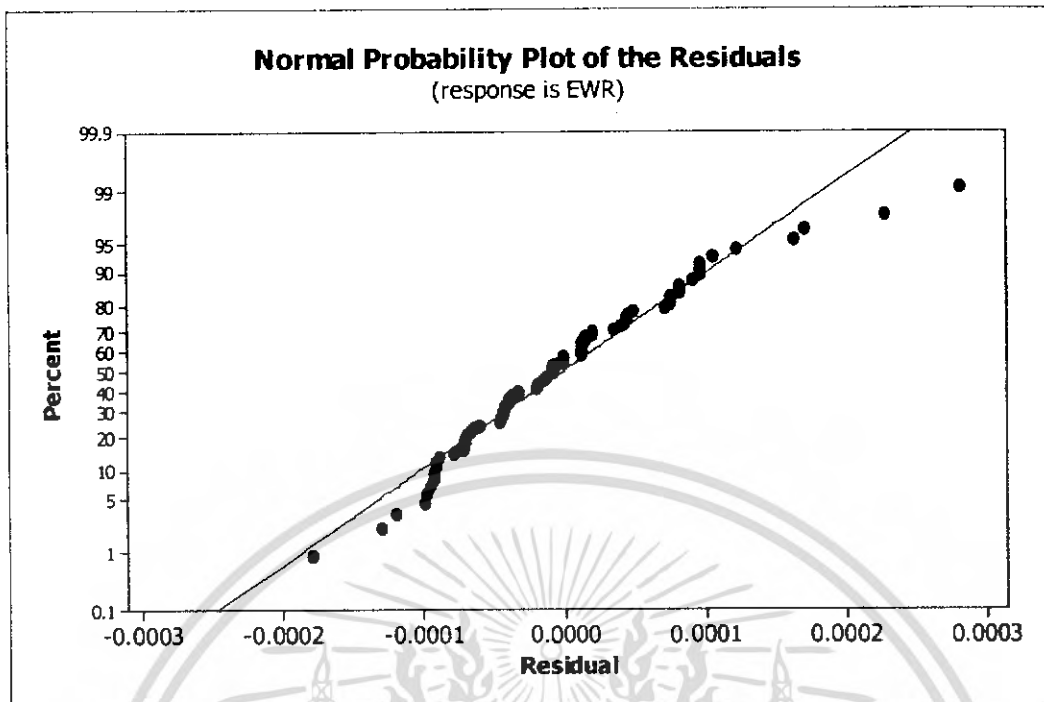
4.3.3.1 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบว่าเป็นการแจกแจงปกติ

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



รูปที่ 4-13 การแจกแจงแบบปกติสำหรับค่าส่วนตกค้างของอัตราการสึกเมื่อใช้งาน (MRR)

เมื่อพิจารณาจาก Normal Probability plot ที่ได้จากการทดลองค่าของอัตราการสึกเมื่อใช้งาน (MRR) พบว่ากราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรง แสดงว่าข้อมูลที่เก็บจากการทดลองมีการกระจายตัวแบบปกติ หรือจะมีการกระจายตัวอย่างสมมาตรรอบค่าๆหนึ่งจึงสามารถเชื่อถือได้



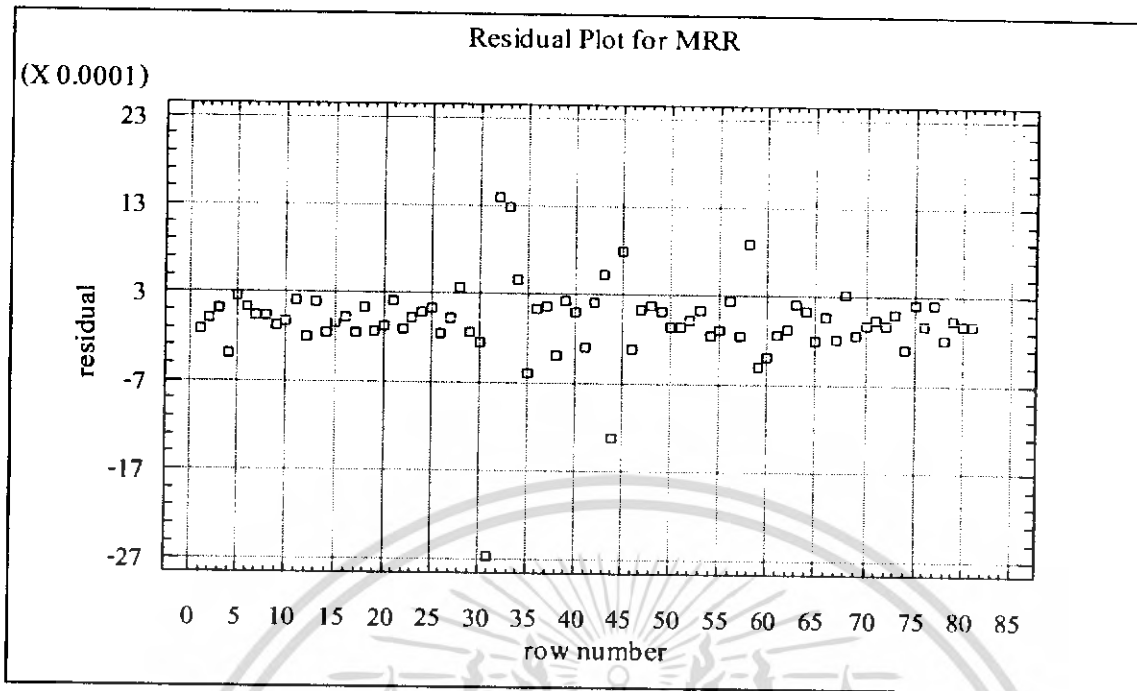
รูปที่ 4-14 การแจกแจงแบบปกติสำหรับค่าส่วนตกค้างของอัตราการศึกษาหรือของอิเล็กทรอนิกส์ (EWR)

เมื่อพิจารณาจาก Normal Probability plot ที่ได้จากการทดลองค่าของอัตราการศึกษาหรือของอิเล็กทรอนิกส์ (EWR) พบว่ากราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรง แสดงว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีการกระจายตัวแบบปกติ หรือจะมีการกระจายตัวอย่างสมมาตรรอบค่าหนึ่งจึงสามารถเชื่อถือได้

4.3.3.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

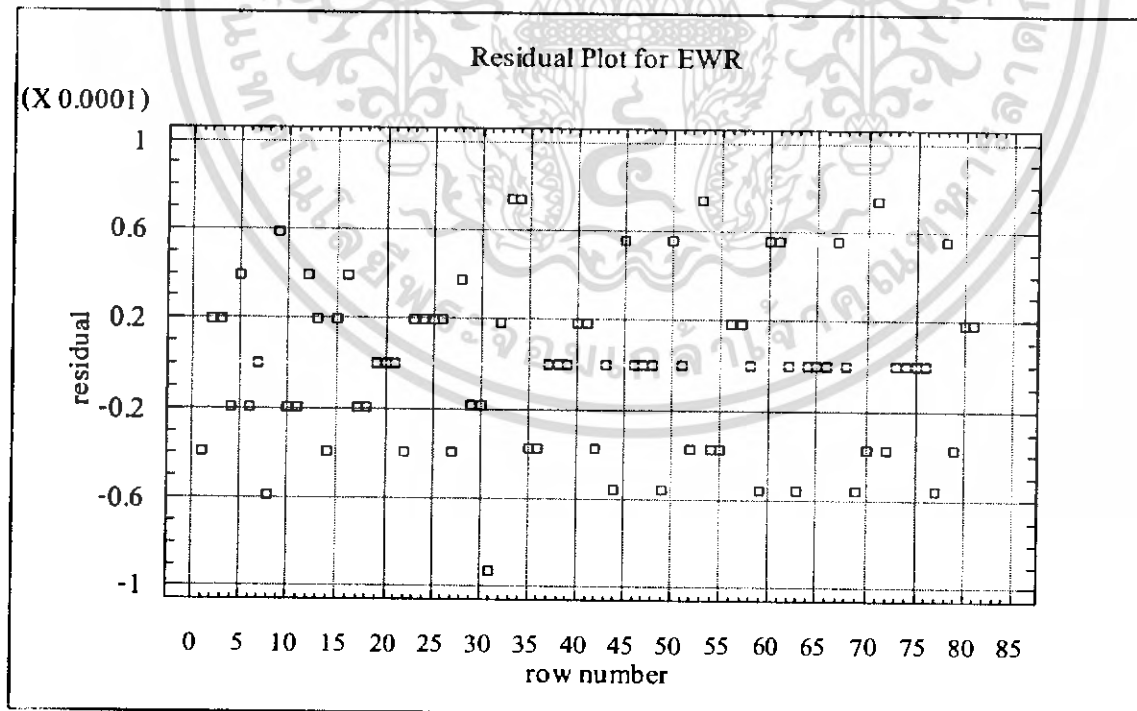
โดยนำส่วนตกค้าง (Residuals) มาพล็อตตามลำดับเวลาที่เก็บข้อมูล ซึ่งมีประโยชน์อย่างมากในการหาความเกี่ยวข้องกับระหว่างส่วนตกค้าง ถ้าแบบจำลองถูกต้องส่วนตกค้างจะต้องไม่มีรูปแบบหรือแนวโน้มใดๆ

เมื่อพิจารณาค่าของอัตราการศึกษาต่อเนื่องกัน (MRR) จากรูปที่ 4.15 พบว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้เป็นอิสระต่อกันและกระจายตัวเป็นแบบสุ่ม ไม่แสดงแนวโน้มหรือรูปแบบแต่ประการใด



รูปที่ 4-15 ค่าส่วนตกค้างของอัตราการผลิตเนื้อชิ้นงาน (MRR) กับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล

เมื่อพิจารณาค่าของอัตราการผลิตเนื้อชิ้นงาน (MRR) จากรูปที่ 4-16 พบว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้เป็นอิสระต่อกันและกระจายตัวเป็นแบบสุ่ม ไม่แสดงแนวโน้มหรือรูปแบบแต่ประการใด



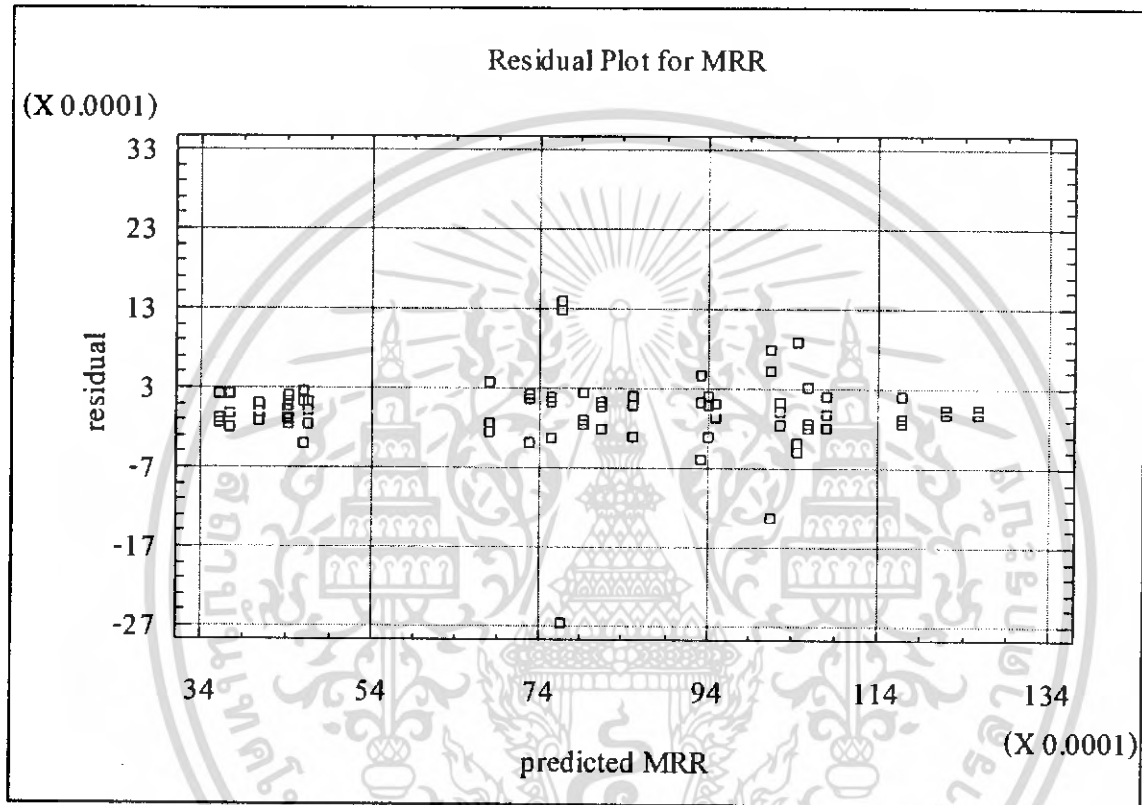
รูปที่ 4-16 ค่าส่วนตกค้างของอัตราการผลิตของอิเล็กทรอนิกส์ (EWR) กับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3.3 การตรวจสอบความมีเสถียรภาพของข้อมูล

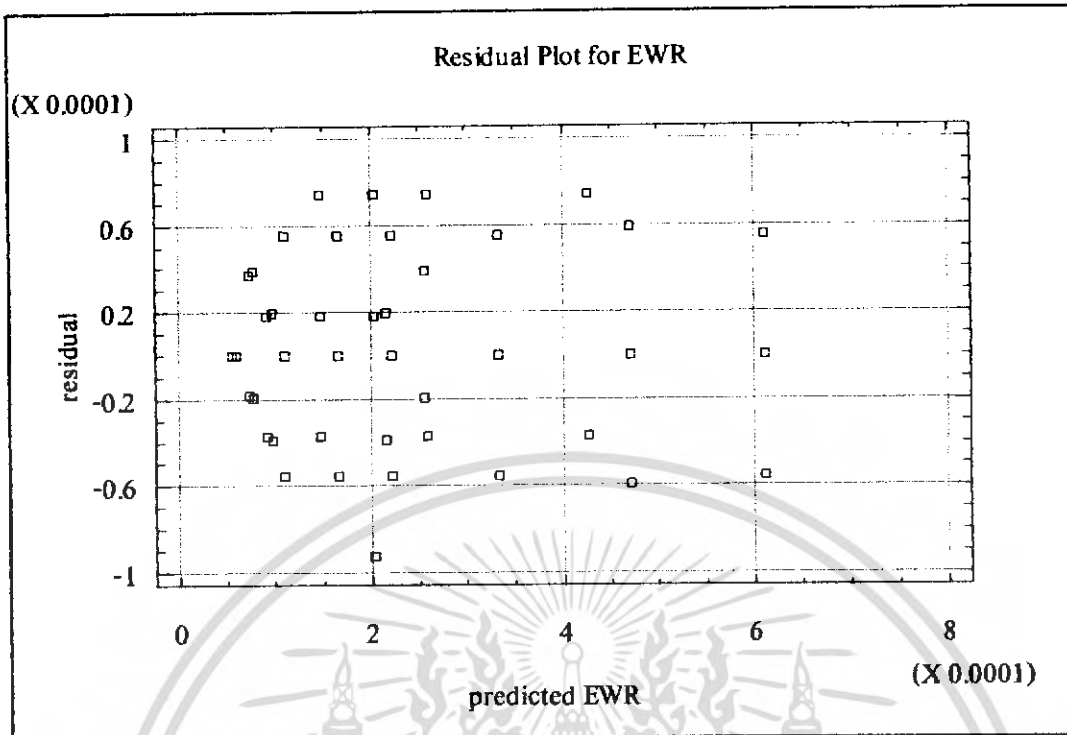
โดยพล็อตส่วนตกค้างกับค่าที่ได้จากการทำนาย (Predicted Values) การตรวจสอบความมีเสถียรภาพของข้อมูล หากแบบจำลองถูกต้องแล้วจากกราฟระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ได้จากการทำนายไม่ควรแสดงรูปแบบหรือโครงสร้างใดๆ

เมื่อพิจารณาค่าของอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR) จากรูป 4-17 กราฟที่ได้ไม่แสดงรูปแบบหรือโครงสร้างใดๆ แสดงให้เห็นถึงข้อมูลมีความสม่ำเสมอหรือข้อมูลที่ได้นี้มีความเสถียรภาพ



รูปที่ 4-17 กราฟค่าส่วนตกค้างกับค่าการทำนายอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR)

เมื่อพิจารณาค่าของอัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์ (EWR) จากรูป 4-18 กราฟที่ได้ไม่แสดงรูปแบบหรือโครงสร้างใดๆ แสดงให้เห็นถึงข้อมูลมีความสม่ำเสมอหรือข้อมูลที่ได้นี้มีความเสถียรภาพ

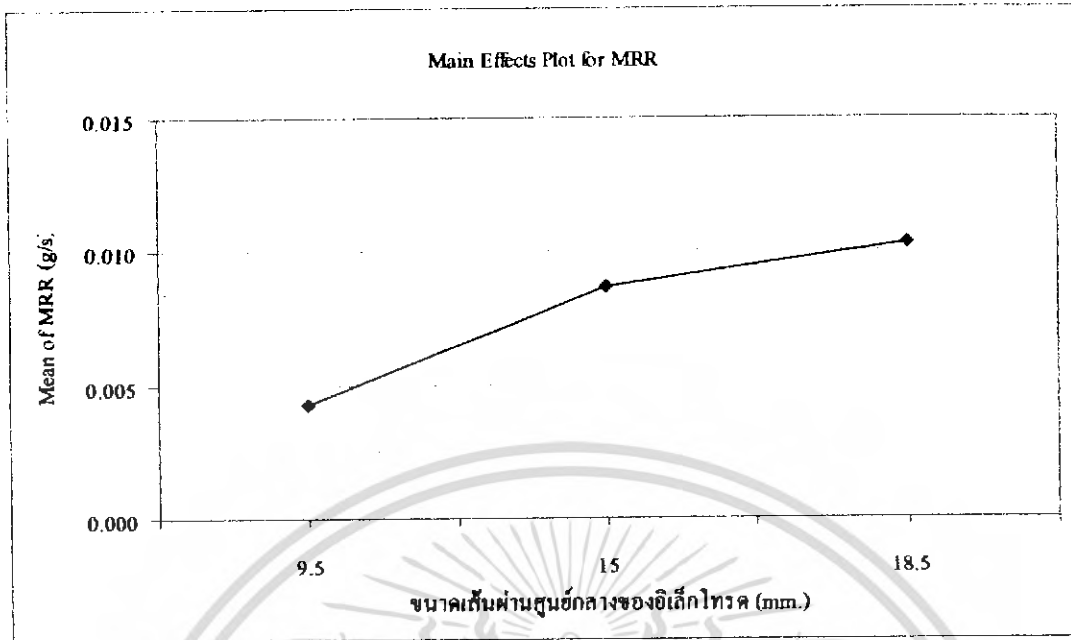


รูปที่ 4-18 กราฟค่าส่วนตกค้างกับค่าการทำนายอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR)

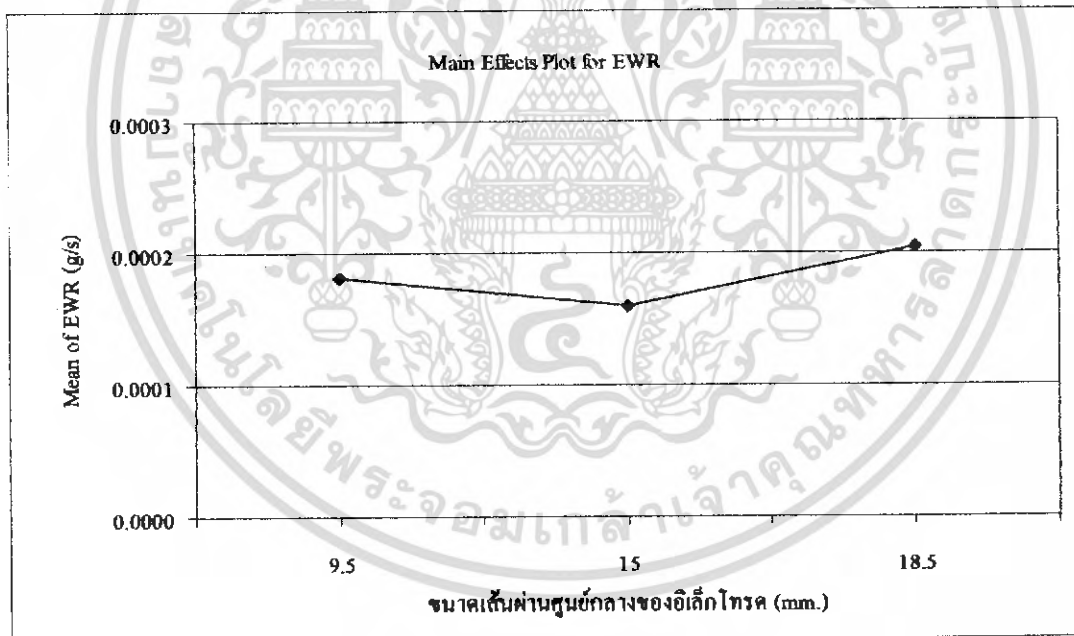
จากการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบทั้ง 3 ข้อ มีคุณภาพพอที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนอย่างเชื่อถือได้

4.3.4 การเปรียบเทียบระดับปัจจัย

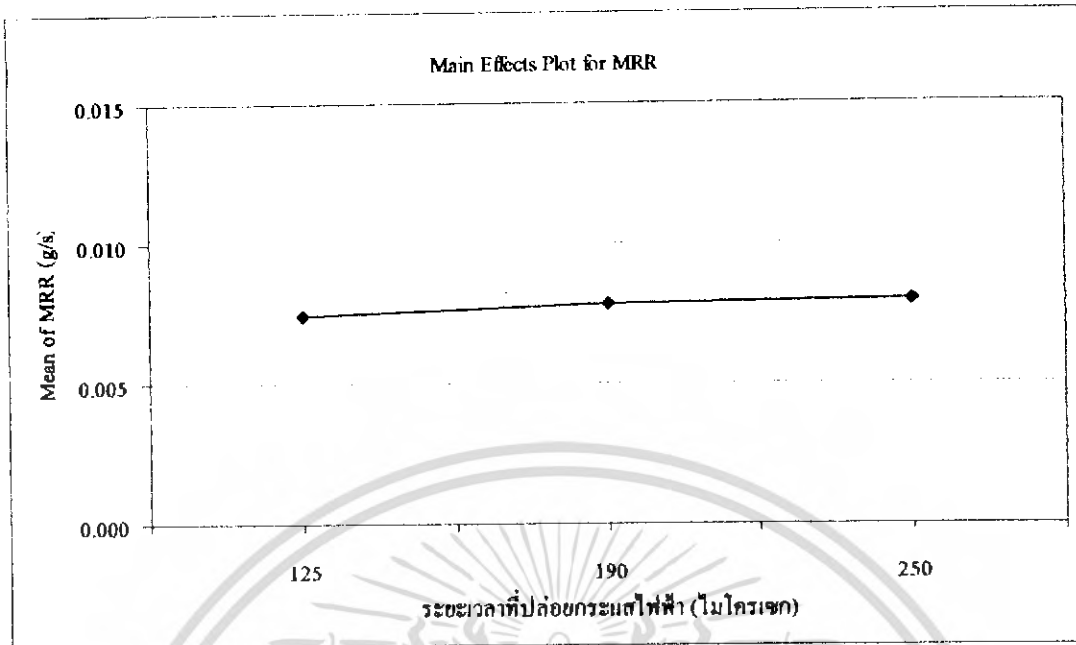
ในระดับปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อค่าตอบสนอง อัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (Material Removal Rate) และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (Electrode Wear Rate) จะแสดงดังรูปต่อไปนี้



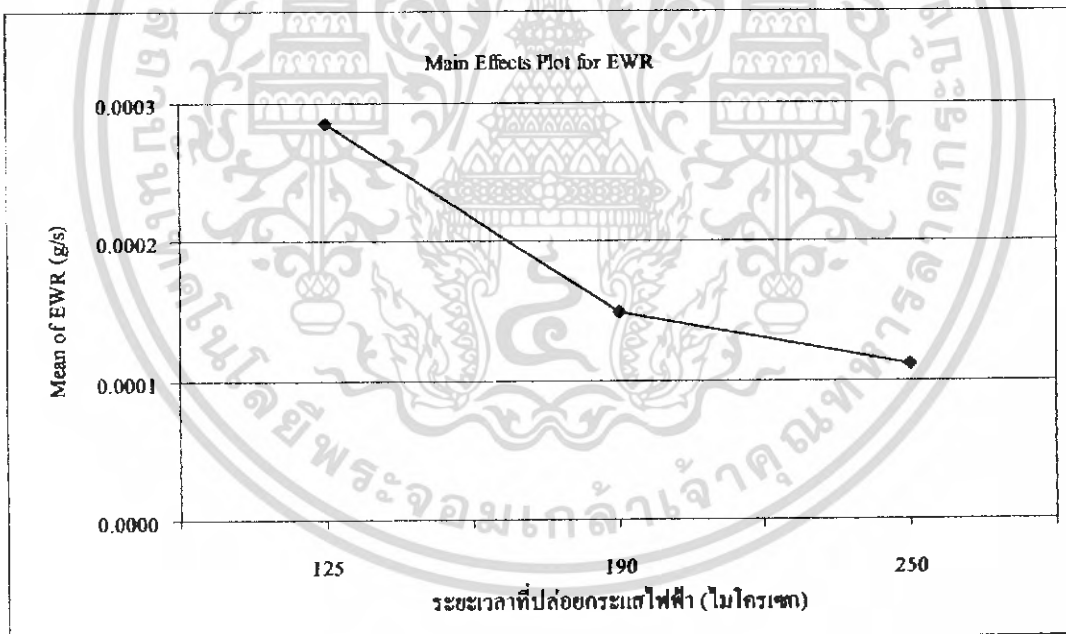
รูปที่ 4-19 ระดับของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR)



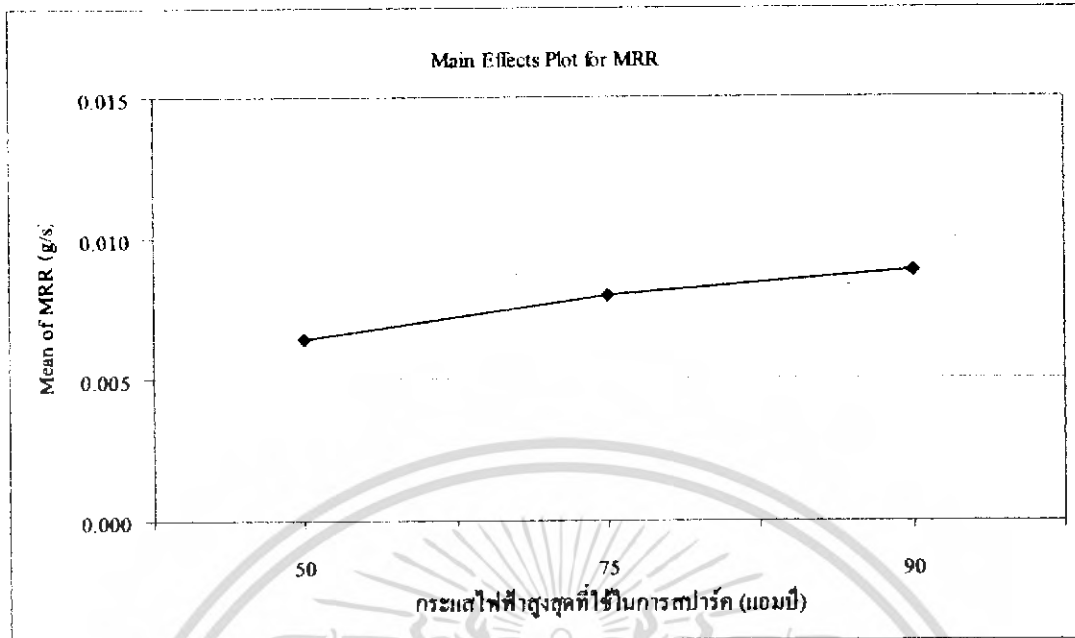
รูปที่ 4-20 ระดับของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR)



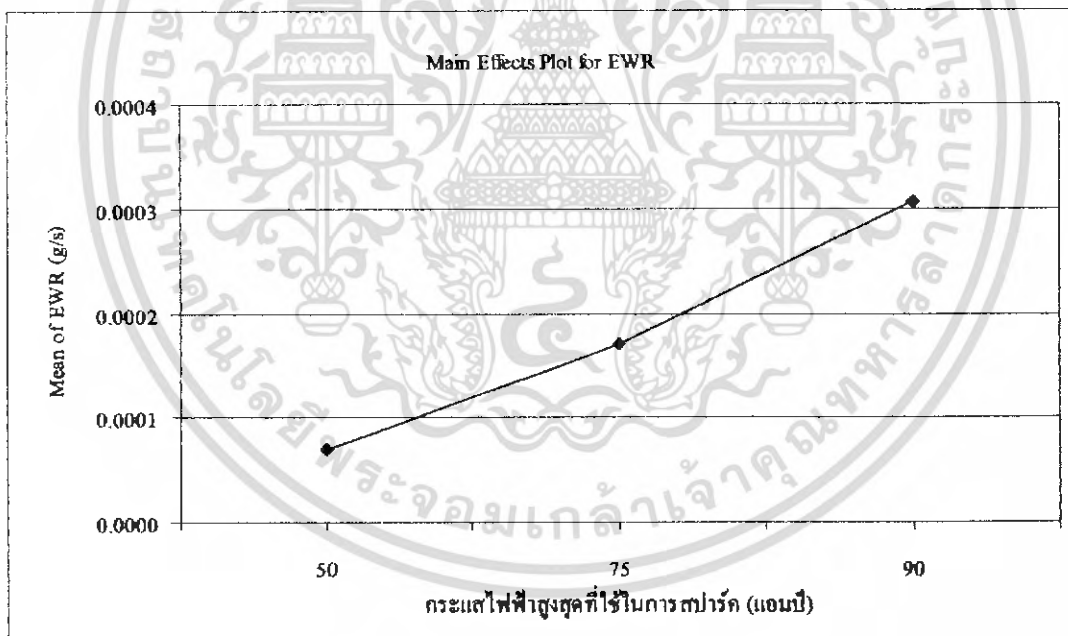
รูปที่ 4-21 ระดับของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR)



รูปที่ 4-22 ระดับของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR)

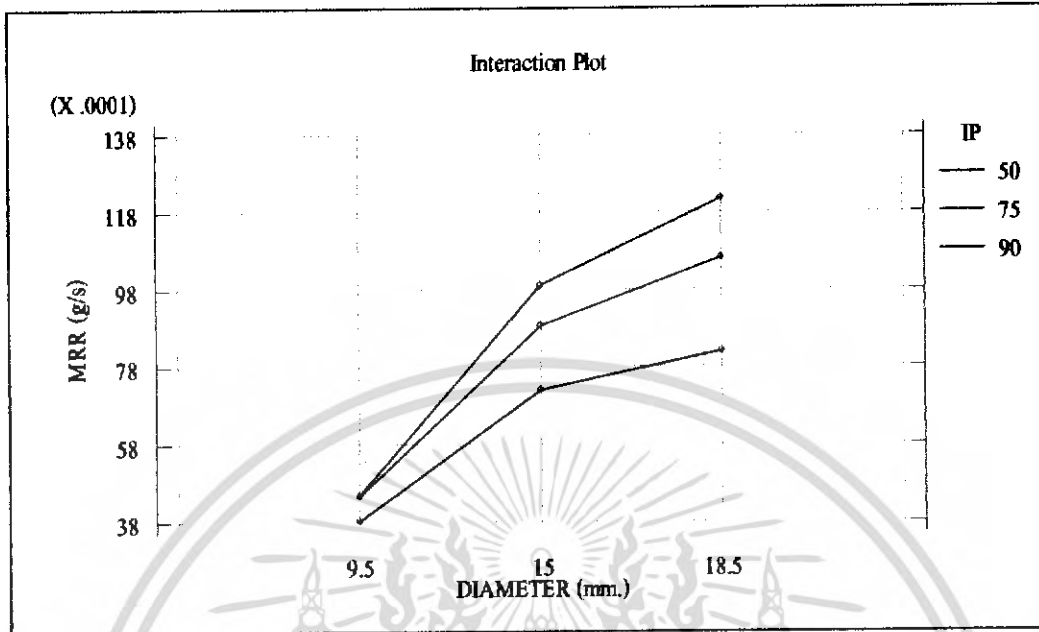


รูปที่ 4-23 ระดับของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการกัดเนื้อชิ้นงาน (MRR)

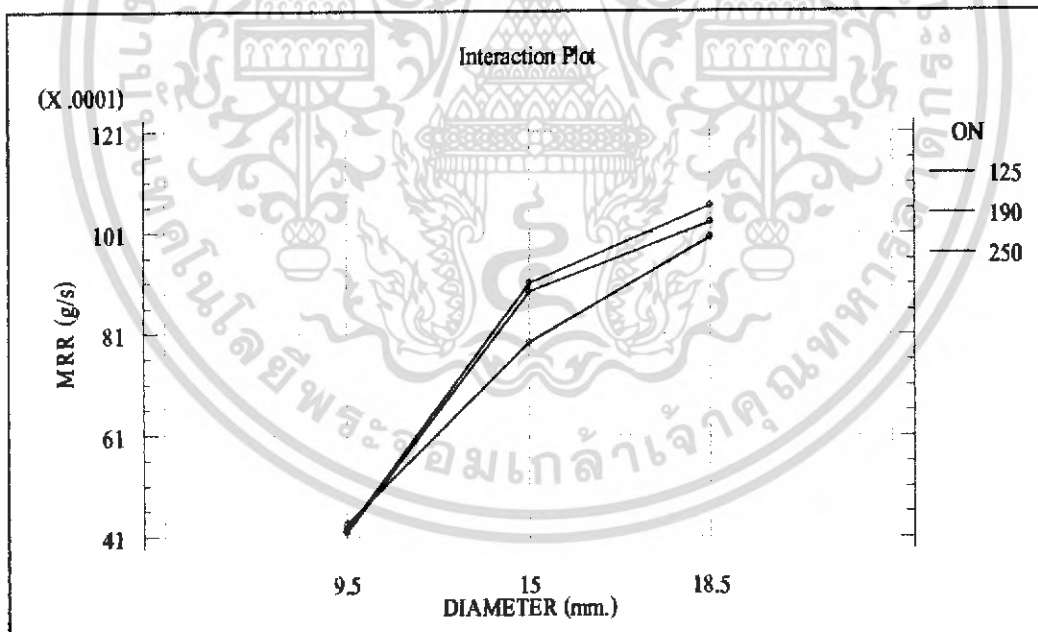


รูปที่ 4-24 ระดับของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR)

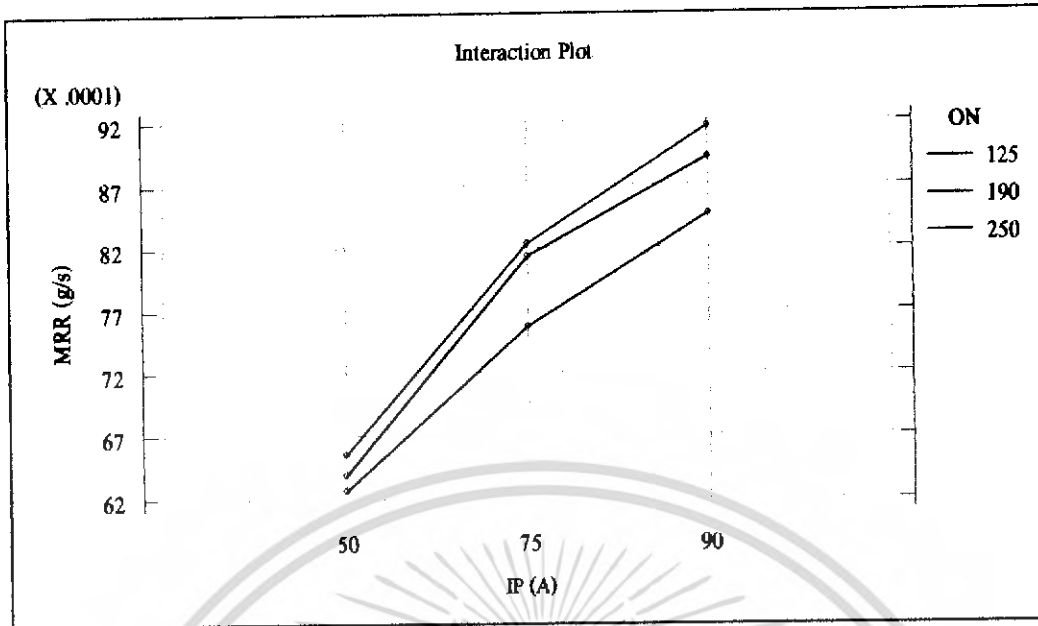
4.3.5 Interaction ของอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR) และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR)



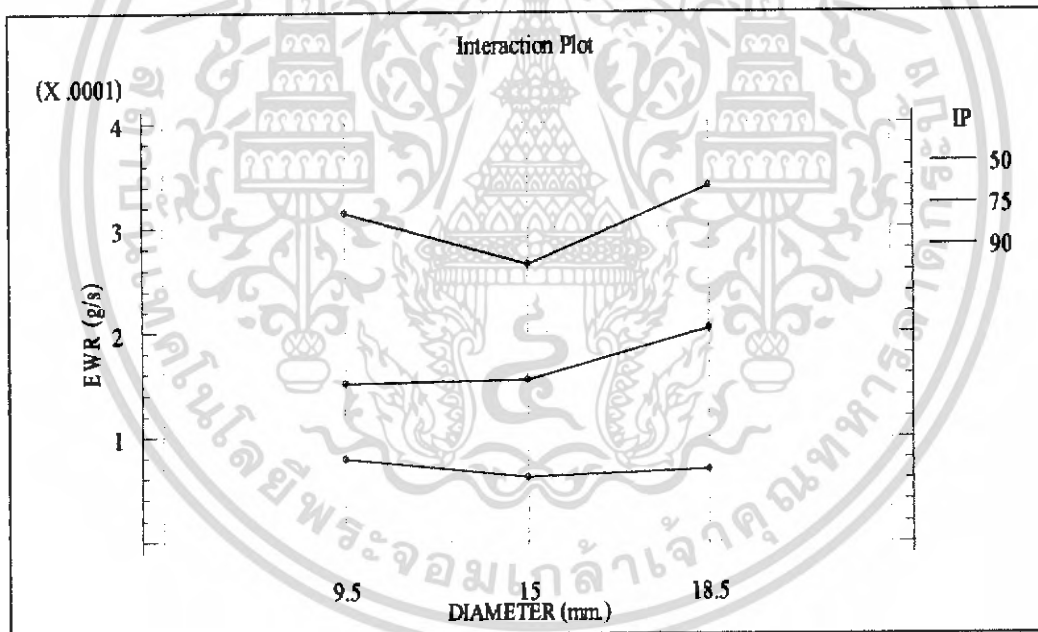
รูปที่ 4-25 Interaction ของอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR)



รูปที่ 4-26 Interaction ของอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR) (ต่อ)

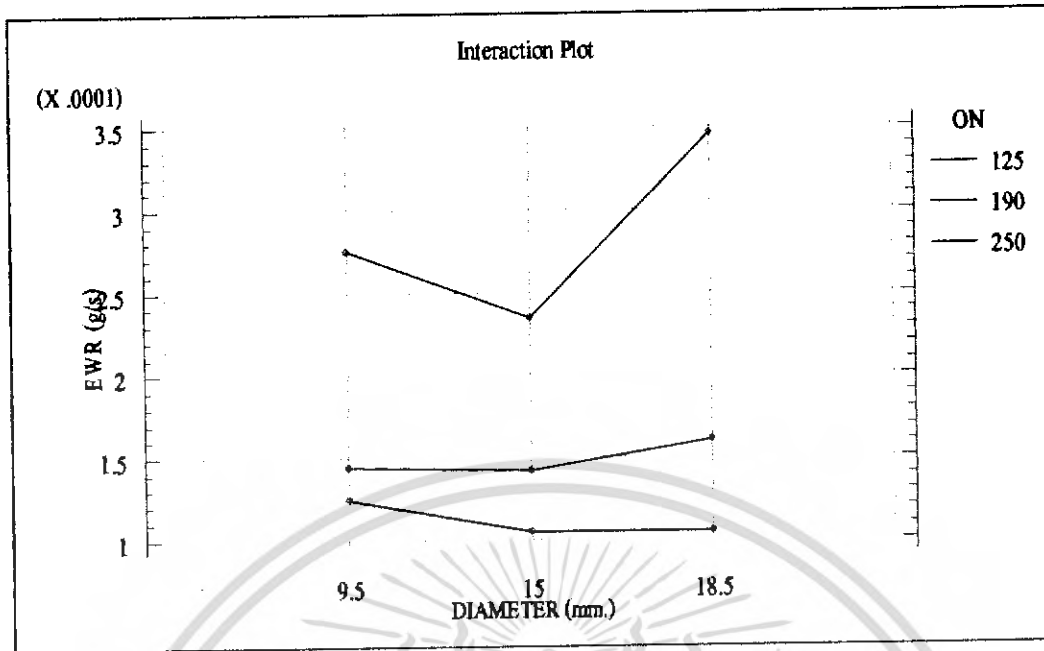


รูปที่ 4-27 Interaction ของอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR) (ต่อ)

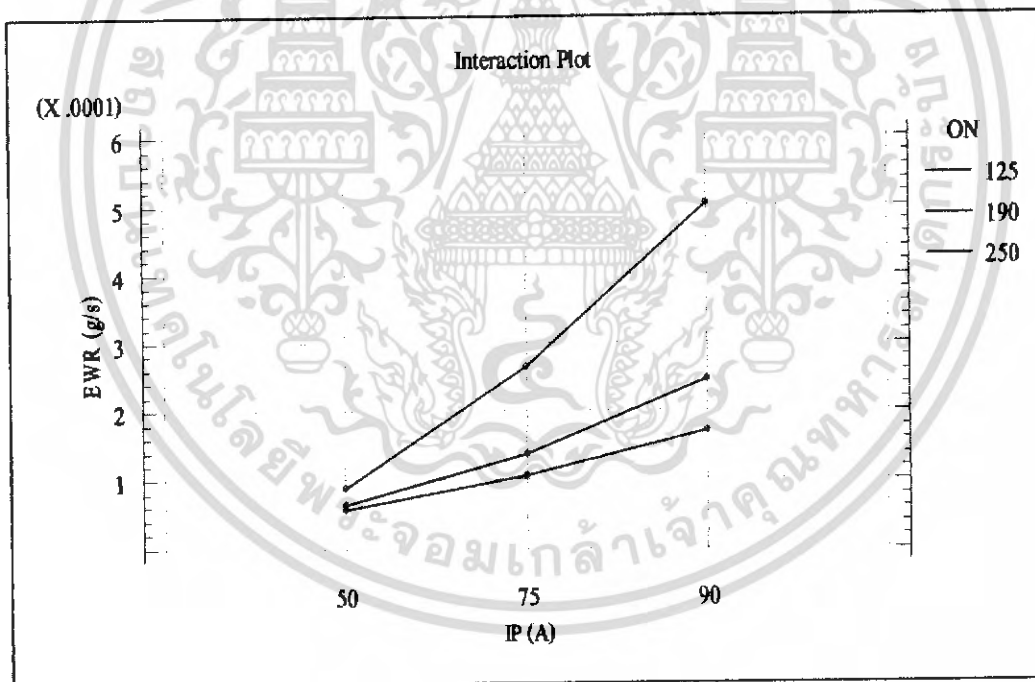


รูปที่ 4-28 Interaction ของอัตราการสึกหรอของแท่งอิเล็กโทรด (EWR)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-29 Interaction ของอัตราการสึกหรอของแท่งอิเล็กโทรด (EWR) (ต่อ)



รูปที่ 4-30 Interaction ของอัตราการสึกหรอของแท่งอิเล็กโทรด (EWR) (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาผลกระทบบนค่าอัตราการตัดเนื้อชิ้นงานและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด จานเหล็กกล้าเครื่องมือ DC 53 ที่ผ่านกรรมวิธีดัดเนื้อชิ้นงานในการทดลองครั้งนี้ เพื่อให้การใช้งานของเครื่องมือที่ดัดเนื้อชิ้นงาน มีประสิทธิภาพและเกิดประโยชน์สูงสุดจึงควรทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่าอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR) อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR) และความสัมพันธ์ในการทดลองครั้งนี้คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอิเล็กโทรดเพราะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอิเล็กโทรดที่ต่างกันจะเป็นตัวกำหนดอัตราการตัดเนื้อชิ้นงานและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดให้เปลี่ยนแปลงไปตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอิเล็กโทรดและเมื่อทราบอัตราการตัดเนื้อชิ้นงานและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอิเล็กโทรดที่ต่างกัน ทำให้สามารถวางแผนกระบวนการผลิตและความคุ้มค่าเกี่ยวกับต้นทุนในการผลิตได้สะดวกขึ้น

5.1 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลจากการวิเคราะห์กราฟและการวิเคราะห์ความแปรปรวนจากโปรแกรมทางสถิติ โดยกำหนดค่านัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$ หรือความเชื่อมั่น 95 % สามารถสรุปได้ว่า

1. เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการตัดเนื้อชิ้นงานเพิ่มขึ้นไปตามขนาดของอิเล็กโทรด ปัจจัยอีกอย่างที่มีผลต่ออัตราการตัดเนื้อชิ้นงานคือ กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ค (IP) ที่ใช้ในการสปาร์ค เมื่อกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ค (IP) เพิ่มขึ้น อัตราการตัดเนื้อชิ้นงานก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน ส่วนช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) ไม่มีผลมากนัก
2. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอิเล็กโทรดจะมีอิทธิพลต่ออัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดไม่มากนัก แต่ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดมากที่สุดจะขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ค (IP) ที่ใช้ในการสปาร์ค และระยะเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) เมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ค (IP) และช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) จะทำให้อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดเปลี่ยนแปลงไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการยกชิ้นงานเพื่อคลายความเค้นตกค้างในการทดลองครั้งนี้อาจไม่สมบูรณ์เนื่องจากผู้อบเกิดการขัดข้องระหว่างยกชิ้นงาน คือ อุณหภูมิภายในตู้อบไม่คงที่
2. เครื่องชั่งน้ำหนักบอกค่าในการชั่งน้ำหนักไม่คงที่ ดังนั้นในการชั่งน้ำหนักชิ้นงานและหมั่งอิ๊กก็ควรลดค่าที่ได้ก่อนและหลังทำการทดลองอาจคาดเคลื่อนจากความไม่จริง
3. การปรับตั้งตำแหน่งของหัวฉีดในการเป่าเศษชิ้นงานที่หลุดออกจากชิ้นงานที่เกิดจากการสปาร์กนั้นยังไม่ตรงตามตำแหน่งเดิม เพราะเมื่อมีการเปลี่ยนชิ้นงานใหม่ตลอดการทดลอง คือ 81 ชิ้นงานก็จะเกิดการขยับของหัวฉีดทำให้ตำแหน่งของหัวฉีดเคลื่อนที่ไปจากตำแหน่งเดิม ดังนั้นค่าที่ได้อาจมีความคลาดเคลื่อน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

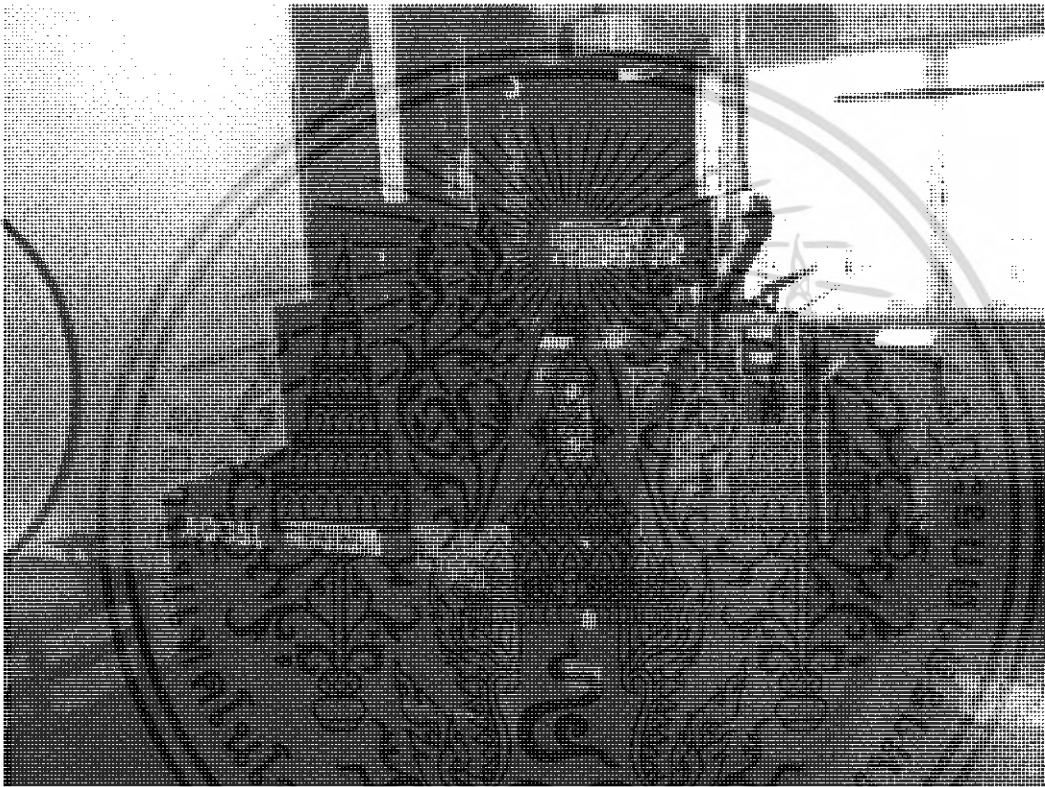
- ธนาภรณ์ ไกรยาภรณ์, ณรงค์ รัตนะ, จุฑาทพ ขจรไชยกุล และ กิตติพันธ์ อ้นบานานนท์, 2547. การวิจัยสนับสนุนการจัดทำแผนแม่บทอุตสาหกรรมแม่พิมพ์และอุตสาหกรรมเครื่องจักรขึ้นรูปที่ขงตรงสูง. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.
- ปารเมศ ชูติมา, 2545. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. หน้า 115-116, 178.
- ชาวลิต หามนตรี, 2545. การกำหนดตารางผลิต โดยใช้วิธีวิริยทัศน์ร่วมกับเกณฑ์กลไกอริมิ. กรณีศึกษา แผนกโลหะแผ่นในโรงงานเครื่องจักรอัตโนมัติ. วิทยานิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ หน้า 74-95
- ฉวีจวุฒิ โกสิยามันท์, พิเศษจุ ปรานี, พิมล สมาน, 2548. การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในการกลึงที่มีผลต่อความแข็งของผิวชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 1045. วิทยานิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. หน้า 35-37
- พร้อมสิน ยืนยง, วีระชัย บอระเอม และ สัญญา สุขพัฒนากุล, 2548. การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการตัดที่มีผลต่อความแข็งของเหล็กกล้าเครื่องมือ DC53. วิทยานิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. หน้า 1-20.
- เสรีชญ์ พิมพ์สวัสดิ์ และ วีระพงษ์ ตันหัน, 2544. การศึกษาการสึกกร่อนของขั้วอิเล็กทรอนิกส์ของเครื่องกัดด้วยไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. หน้า 3-4, 10-12.
- สมบัติ ชิวหา, 2549. พื้นฐานเทคโนโลยีซีเอ็นซี. พิมพ์ครั้งที่ 1 ปทุมธานี สำนักพิมพ์สกายบุ๊ก. หน้า 182
- สันติรัฐ นันตะอาจ และ สมจิตร ลาภโนนเขา, 2547. การศึกษาอิทธิพลของการแปรพารามิเตอร์ของกระบวนการกัดเจาะด้วยไฟฟ้าต่อคุณสมบัติของงาน. วิทยานิพนธ์ สาขาวิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- Callister, W.D., 2003. Materials Science and Engineering. John Wiley & Sons, New York, USA.
- Montgomery, D. Douglas, 2005. Design and Analysis of Experiments. 6 th Edition, New York, John Wiley & Sons, pp. 101-102, 131.
- Singh, S. Maheshwari, P.C. Pandey, 2004. Some investigations into the electric discharge machining of hardened tool steel using different electrode materials. Journal of Materials Processing Technology. Vol. 149, pp.272-277.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการใช้เครื่องอีดีเอ็ม



รูปที่ ผก 1 ภาพเครื่องอีดีเอ็มยี่ห้อ Sodick รุ่น AQ35L

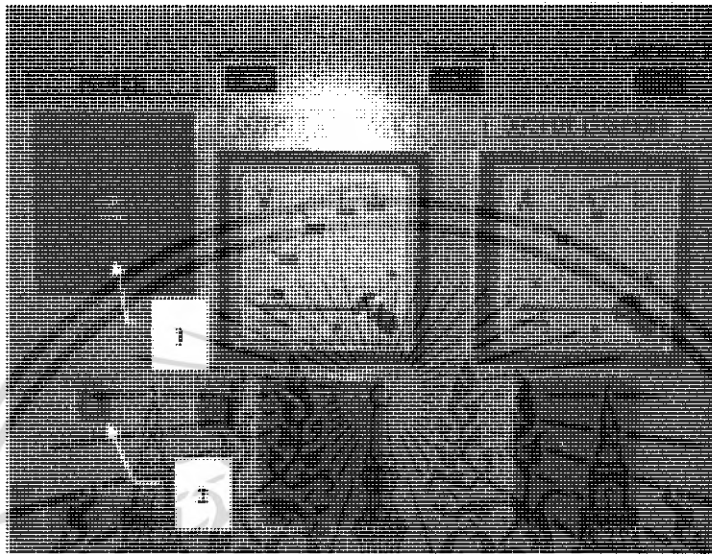
วิธีการใช้เครื่องอย่างง่าย ได้ทำการแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอนดังนี้

- 1 การเปิดเครื่อง
- 2 การติดตั้งชิ้นงานและการเซตศูนย์ชิ้นงาน
- 3 การการป้อนโค้ดต่างๆและการเริ่มทำงาน
- 4 การถอดชิ้นงานและการปิดเครื่อง

ผก 2

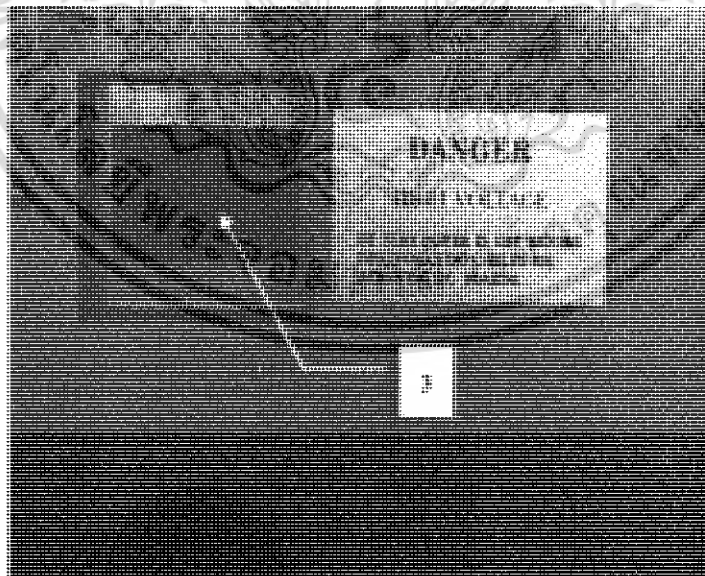
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การเปิดเครื่อง



รูปที่ ผก 2 รูปหน้าปิดต่างๆของเครื่องแปลงไฟ

1.1 เปิดสวิตช์หมายเลข 1 จากนั้นกดปุ่ม RESET หมายเลข 2

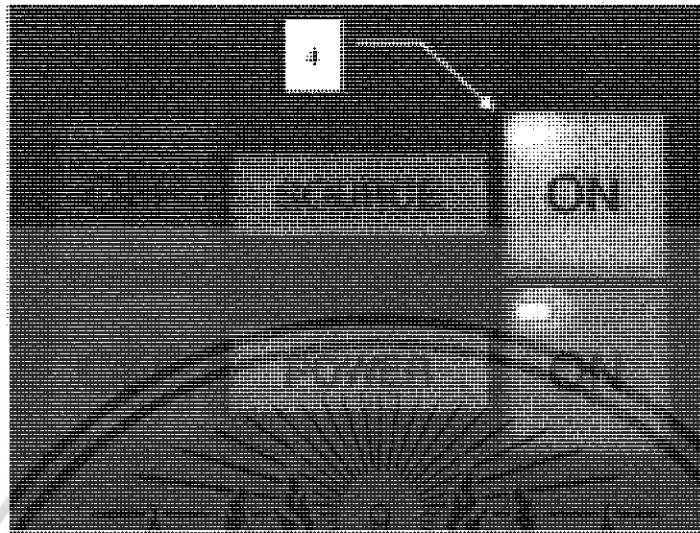


รูปที่ ผก 3 สวิตช์ด้านหลังเครื่องฮีเอ็ม

ผก 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 เปิดสวิทช์อยู่ด้านหลังเครื่องหมายเลข 3 ดังรูปที่ ผก 3



รูปที่ ผก 4 แสดงปุ่มเปิดเครื่อง

1.3 กดปุ่ม SOURCE ON หมายเลข 4 ดังในรูปที่ ผก 4

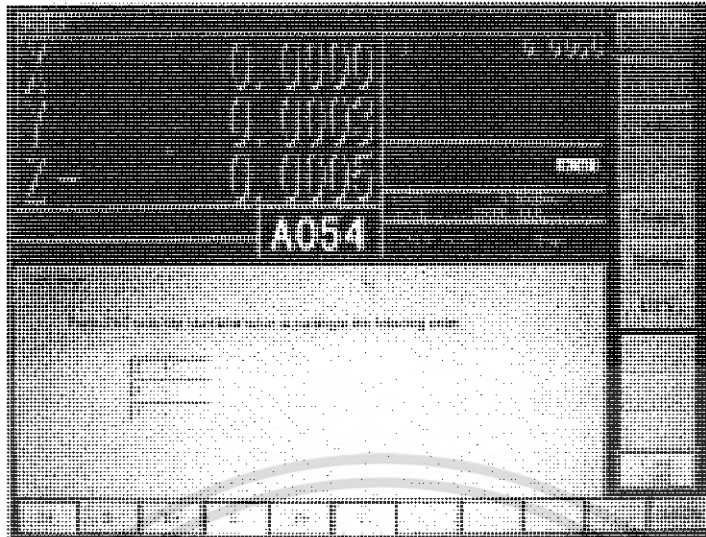


รูปที่ ผก 5 แสดงหน้าจอหลังจากเปิดโปรแกรมของเครื่อง

1.4 หน้าจอจะแสดงคำสั่ง Please press POWER ON switch ให้ทำการกดปุ่ม POWER ON ดังในรูปที่ ผก 4 เพื่อเปิดในส่วนของเบคคานิค

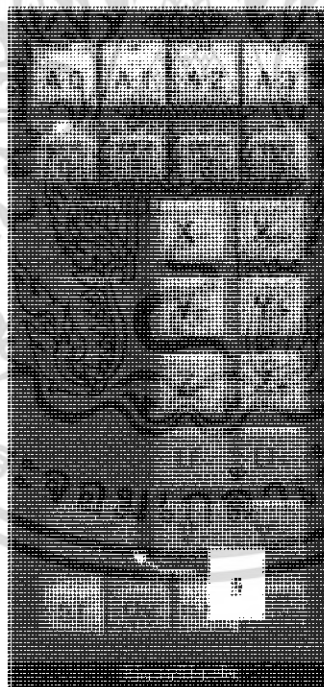
ผก 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผก 6 แสดงภาพหน้าจอหลังจากเปิดระบบแมตคณิต

1.5 เมื่อเห็นหน้าจอดังรูปที่ ผก 6 ให้กดปุ่ม ENT สีเขียวหมายเลข 5 ในรูปที่ ผก 7 เพื่อเครื่องจะทำการตรวจสอบความพร้อมก่อนการใช้งาน

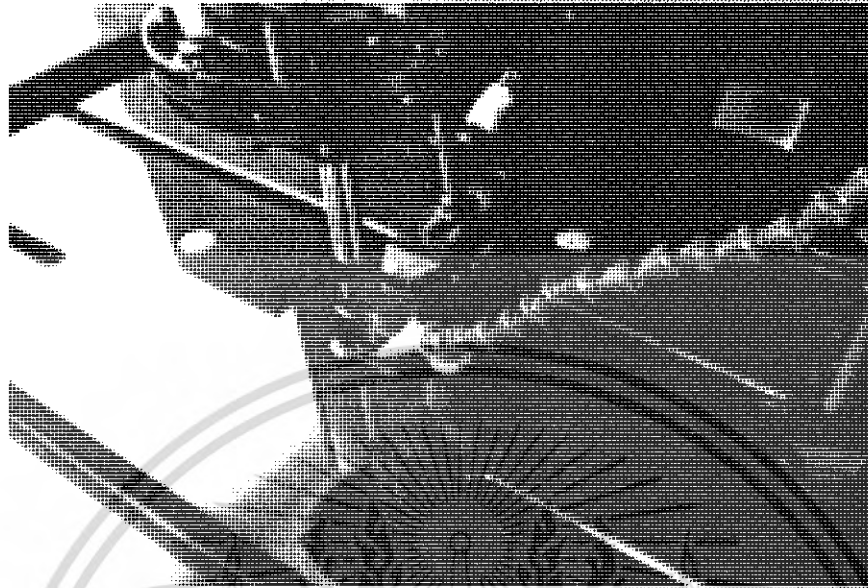


รูปที่ ผก 7 แสดงปุ่มควบคุมต่างๆ

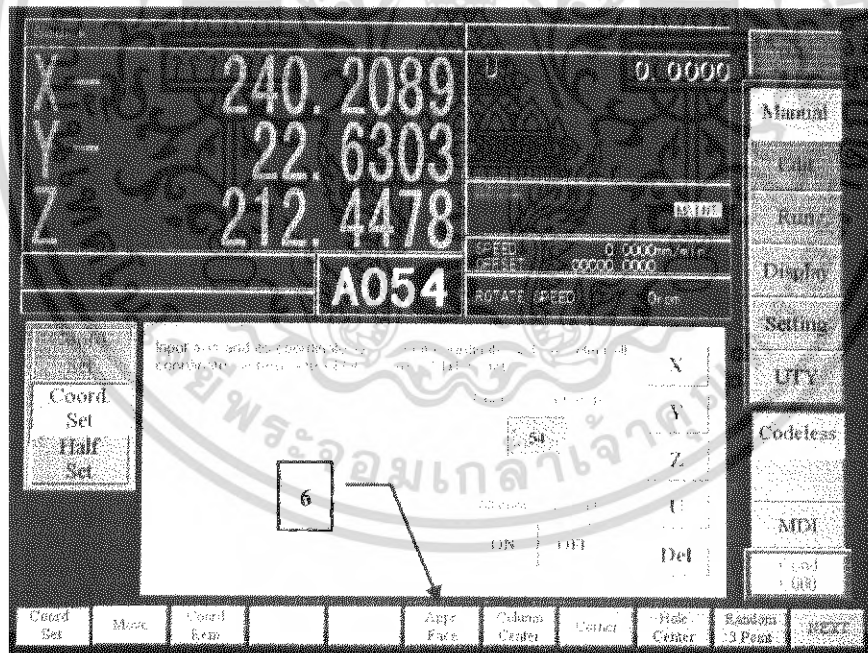
ผก 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การติดตั้งชิ้นงานและการเซ็ตศูนย์ชิ้นงาน



รูปที่ ผก 8 การติดตั้งชิ้นงาน และอิเล็กทรอนิกส์



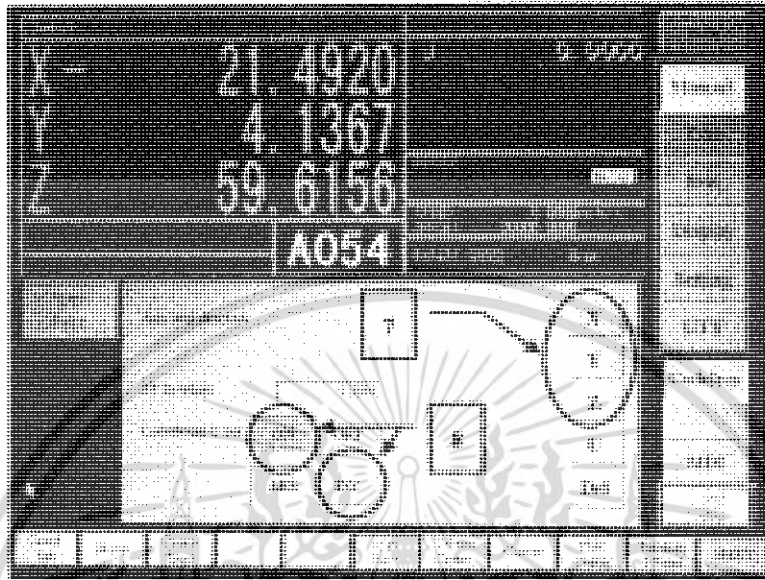
รูปที่ ผก 9 แสดงหน้าจอพร้อมใช้งานหลังจากเปิดเครื่อง

ผก 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

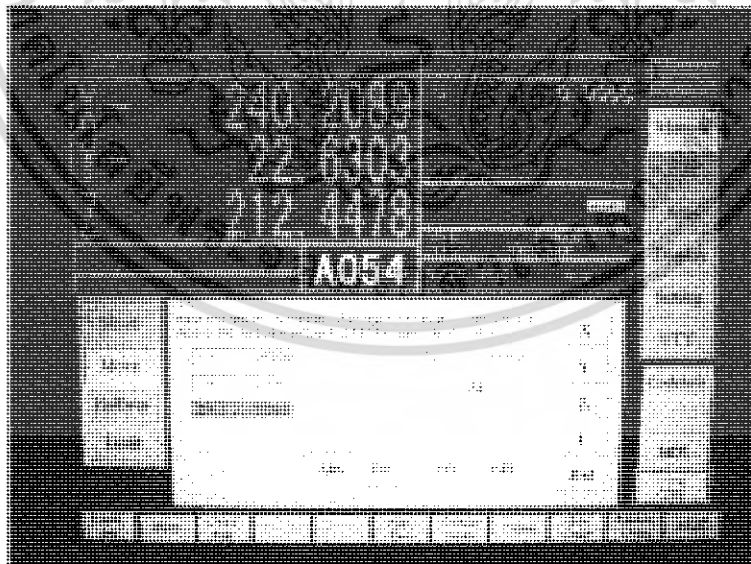
2.1 ทำการติดตั้งชิ้นงาน และอิเล็กทรอนิกส์ ดังรูปที่ ผก 8

2.2 เลือกโมเดล Appr Face หมายเลข 6 ในรูปที่ ผก 9 เพื่อทำการเชื่อมต่อชิ้นงาน



รูปที่ ผก 10 แสดงหน้าจอของ Appr Face

2.3 นำอิเล็กทรอนิกส์เข้าไปใกล้ชิ้นงานในแนวแกนที่ต้องการ หลังจากนั้น เลือก แกน ในหมายเลข 7 และ คำสั่ง ON, INC หมายเลข 8 ดังในรูปที่ ผก 10 แล้วคลิกปุ่ม ENT หมายเลข 5 ในรูปที่ ผก 7 ทำอย่างนี้ทั้ง 3 แกน



รูปที่ ผก 11 แสดงหน้าต่าง MOVE

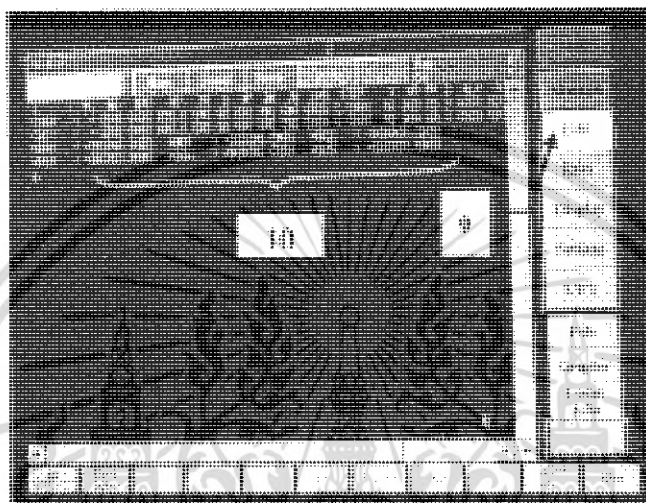
ผก 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ต้องการให้แท่งอิเล็กทรอนิกส์อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการหรือมรอสปาร์ค เครื่องไม่ MOVE ที่หน้าจอ จากนั้น
 ป้อนค่าแกน X Y Z กดปุ่ม ENT

3. การป้อนโค้ดต่างๆและการเริ่มทำงาน

3.1 เลือกเมนู EDIT ด้านขวาของจอ ดังหมายเลข 9 ในรูปที่ ผก 12



รูปที่ ผก 12 แสดงหน้าจอดัง EDIT

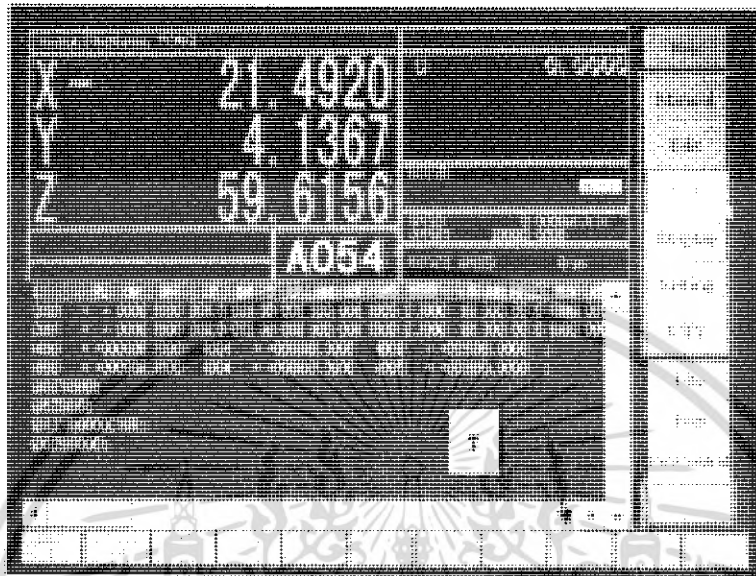
3.2 ทำการป้อนตัวเลขต่างๆที่ใช้งานบริเวณเหนือเส้นหมายเลข 10 และจีโค้ด เอ็มโค้ดที่ใช้งานใต้เส้น
 หมายเลข 10 ในรูปที่ ผก 12

ตารางที่ ผก 1 G - Code

G - Code พื้นฐาน	
โค้ด	คำสั่ง
G00 positioning (Rapid traverse)	การเคลื่อนที่แนวเส้นตรงจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุด โดยไม่โดน ชั้นงานด้วยความเร็วฟีดสูงสุด
G01 Linear Interpolation (Feed)	การเคลื่อนที่แนวเส้นตรงจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุด โดยไม่โดน ชั้นงานด้วยความเร็วฟีดสูงสุด
G02 Circular Interpolation CM	การเคลื่อนที่ในแนวเส้นโค้ง โดยโดนเมื่อขึ้นงานไปในทิศทางตามเข็มนาฬิกา
G03 Circular Interpolation CCM	การเคลื่อนที่ในแนวเส้นโค้ง โดยโดนเมื่อขึ้นงานไปในทิศทางตามเข็มนาฬิกา
G04 Dwell	หยุดการเคลื่อนที่ตามระยะเวลาที่กำหนด
G17 Plane Selection	กำหนดใช้ระนาบ XY

3.3 เลือกเมนู Cond C000 ป้อนค่า ON และ IP ดังรูปที่ ผก 13

3.4 เลือกเมนู RUN ที่ด้านขวาของจอ ในรูปที่ ผก 14



รูปที่ ผก 14 แสดงหน้าต่าง RUN

3.5 เลือกปุ่ม START G30 หมายเลข 7 ในรูปที่ ผก 14 แล้วกดปุ่ม ENT หมายเลข 5 ในรูปที่ ผก 7 หลังจากนั้น เครื่องจะเริ่มทำงาน

4 การถอดชิ้นงานและการปิดเครื่อง

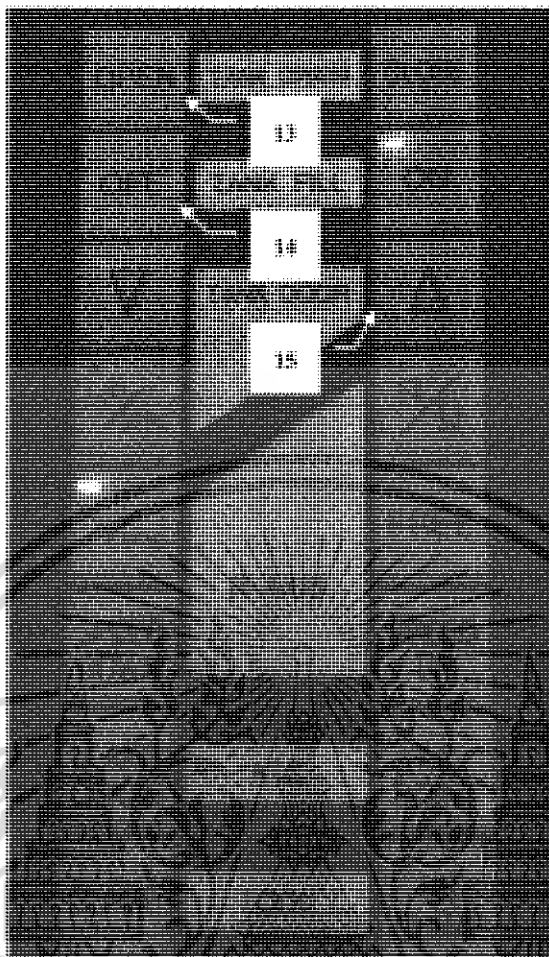
4.1 หลังจากทำการสปาร์ตเสร็จ ให้ทำการกดปุ่ม OFF TANK FILL หมายเลข 14 ตามด้วย OPEN TANK DRAIN หมายเลข 13 และเมื่อน้ำมันลดระดับจนแห้งกดปุ่ม TANK DOOR หมายเลข 15 ในรูปที่ ผก 15 เพื่อเอาถังค้ลง

4.2 ทำการถอดชิ้นงาน และอิเล็กทรอนิกส์ออกจากเครื่อง

4.3 ทำการปิดระบบแมคคานิค โดยกดปุ่ม POWER OFF

4.5 ปิดโปรแกรม โดยกดปุ่ม SOURCE OFF

4.6 ทำการปิดสวิทช์ด้านหลังของเครื่องตามลำดับ



รูปที่ ผก 15 ปุ่มควบคุมต่างๆ

ผก 11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหาขนาดของตัวอย่าง (Replicate)

ตารางที่ ผข 1 แสดงค่าเฉลี่ย ($\bar{\mu}$) และ ค่าความแปรปรวน (σ)

Parameters			material removal rate (g/s)	electrode wear rate (g/s)
Electric Discharge Time (A)	Electric Discharge Peak Current (μsec)	Electrode Size (mm.)		
250	90	18.5	1.25556×10^{-2}	1.66667×10^{-4}
250	90	18.5	1.26111×10^{-2}	1.11111×10^{-4}
250	90	18.5	1.25556×10^{-2}	1.66667×10^{-4}
190	75	15.0	9.50000×10^{-3}	1.66667×10^{-4}
190	75	15.0	9.61111×10^{-3}	1.11111×10^{-4}
190	75	15.0	9.11111×10^{-3}	1.66667×10^{-4}
125	50	9.5	4.07133×10^{-3}	1.18010×10^{-4}
125	50	9.5	4.18934×10^{-3}	1.18010×10^{-4}
125	50	9.5	3.95332×10^{-3}	5.90048×10^{-5}
ค่าเฉลี่ย ($\bar{\mu}$)			8.68427×10^{-3}	1.31546×10^{-4}
ค่าความแปรปรวน (σ)			3.72434×10^{-3}	3.77454×10^{-5}

โดยที่

$$\mu_1 = 1.25741 \times 10^{-2} \text{ กรัม/วินาที}$$

$$\mu_2 = 9.40741 \times 10^{-3} \text{ กรัม/วินาที}$$

$$\mu_3 = 4.07133 \times 10^{-3} \text{ กรัม/วินาที}$$

$$\bar{\mu} = 8.68427 \times 10^{-3} \text{ กรัม/วินาที}$$

$$\tau_1 = \mu_1 - \bar{\mu} = 1.25741 \times 10^{-2} - 8.68427 \times 10^{-3} = 3.88980 \times 10^{-3} \text{ กรัม/วินาที}$$

$$\tau_2 = \mu_2 - \bar{\mu} = 9.40741 \times 10^{-3} - 8.68427 \times 10^{-3} = 7.23137 \times 10^{-4} \text{ กรัม/วินาที}$$

$$\tau_3 = \mu_3 - \bar{\mu} = 4.07133 \times 10^{-3} - 8.68427 \times 10^{-3} = -4.61294 \times 10^{-3} \text{ กรัม/วินาที}$$

จากสูตร

$$\Phi^2 = \frac{bn \sum_{i=1}^n \tau_i^2}{a\sigma^2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

Φ^2 = ค่าความไม่ตรงศูนย์กลาง (Non-Centrality)

τ = ค่าความแตกต่างแต่ละค่าเฉลี่ย

a = ระดับปัจจัยตัวที่หนึ่ง

b = ระดับปัจจัยตัวที่สอง

n = ขนาดของตัวอย่าง (Sample Size)

σ^2 = ค่าความแปรปรวน (Variance)

แทนค่า

$$\Phi^2 = \frac{(3)(n)(3.69327 \times 10^{-5})}{(3)(1.38707 \times 10^{-5})}$$

$$\Phi^2 = (n)(2.66264)$$

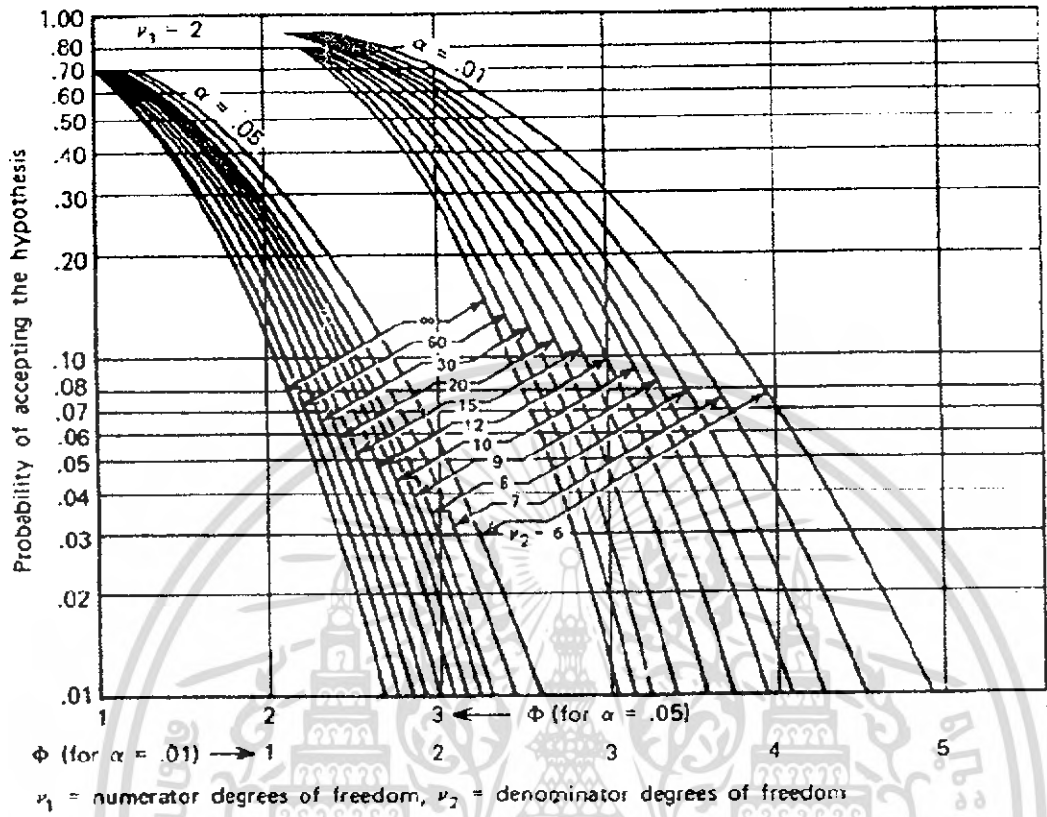
ตารางที่ ๒ แสดงผลการหาขนาดของตัวอย่างที่เหมาะสม

n	Φ^2	Φ	$V_1 = (n-1)$	$V_2 = a(n-1)$	α	β	Power(1- β)
3	7.988	2.826	2	6	0.05	0.090	0.910
4	10.651	3.264	2	9	0.05	0.013	0.987

กำหนดค่าความน่าจะเป็นที่ยอมรับได้ (Power of the test) เท่ากับ 0.90

∴ จากการหาขนาดของตัวอย่างที่เหมาะสม สามารถสรุปได้ว่าขนาดตัวอย่างที่เหมาะสม คือ n = 3 ครั้ง โดยมีความน่าจะเป็นของความถูกต้องของค่า MRR ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 มีค่า Power(1- β) = 0.910 ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าความน่าจะเป็นที่ยอมรับได้ (Power of the test) ที่ 0.90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผย 1 เส้นโค้งลักษณะสมบัติของการดำเนินการ (Operating Characteristic Curves)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงแก้ไข **พค. 1** และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INSPECTION CERTIFICATE

Messrs: NITDERSU SHOLE CO., LTD.

Date: AUG. 29, 2005

(6EP210) (6EP211) (6EP216)
Packing List No: 8-52

Contract No: 17X-73908

Customer No:

Condition: SPHEROIDIZED ANNEALD

Bundle No.	Type of Steel	Heat No.	Size ()	Length ()	P' ce	Weight (KGS)	Body Hardness	Quantity									
Item	Chemical Composition										Mechanical Properties/Type of Specimen						
	C %	CR %	NO %	%	%	%	%	%	%	%	%	Yield Strength	Tensile Strength	Elon. at Break	Redline Hardness	Impact Value	
Heat No.	Spec. Location																
3-4	DC53	5962D	DIA 26	4.900-4.940	101	1.922	223										
5	DC53	2C333	DIA 26	4.940	38	787	229										
1	DC53	1C398	DIA 46	4.900-4.920	16	1,022	217										
5962D	97	814	191														
2C333	99	821	193														
1C398	96	813	192														

It is hereby certified that the above results are true and correct in every detail.

Kawasaki Plant.
Daido Steel Co. Ltd.

Chief of Quality Assurance Section
T. Sugawara

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงแก้ไข และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผค 1 ใบแสดงส่วนผสมเหล็กกล้า DC53



JAMES COPPELL LEE

INSPECTION REPORT

CUSTOMER:

ORDER No	ALLOY No	DESCRIPTION	SIZE	QTY
IPOO-16007	J472 Cr, Zr, Cu.	Extruded and Drawn Section	5/8" DIA	2000 KGS
			3/4" DIA	1000 KGS
			1" DIA	1000 KGS

MECHANICAL PROPERTIES

	CONDUCTIVITY I.A.C.S.	HARDNESS H.R.B.
SPEC:		
5/8" DIA	84 - 88 I.A.C.S.	79 - 84 HRB
3/4" DIA	84 - 88 I.A.C.S.	79 - 82 HRB
1" DIA	84 - 88 I.A.C.S.	79 - 81 HRB

CHEMICAL COMPOSITION

	COPPER	CHROMIUM	ZIRCONIUM
SPEC:	Balance	Minimum .5	Minimum 0.03
5/8" DIA	Balance	.68 - .94	.031 - .039
3/4" DIA	Balance	.70 - .91	.031 - .041
1" DIA	Balance	.64 - .98	.030 - .037

Paul McMaster.

ตารางที่ ผศ 3 ใบแสดงส่วนผสมอิเล็กทรอนิกส์ทองแดง (ต่อ)

FAX NO. : 026394159

Jul. 13 2006 04:21

Certificate Number : OZ-CX-0657/06
 Customer Name : NGBCK SENG CHIANG METAL CO. LTD.
 Order Number : C/0604-015
 Date : 13 May 2006
 L/C Number :
 Specification :
 Product Description :
 Product Traceability Code :

JIS H3140 : 1992 CI100 BB HALF HARD TEMPER
 COPPER BUSBARS
 P.I. NO. ZY-0604-015

ORIENTAL COPPER CO., LTD.
 OFFICE : 21st Fl., Bangkok Insurance W.C.A. Building,
 75 South Sathorn Road, Tungsathorn, Sathorn,
 Bangkok 10120, Thailand
 TEL : +66 (0) 2286-3199, 2286-6186, 2286-6112
 FAX : +66 (0) 2286-3114
 E-MAIL :
 1. TOL :
 2. TEL :
 3. FAX :
 4. E-MAIL :
 5. WEBSITE :
 6. HEAD OFFICE :
 7. BRANCH OFFICE :
 8. CONTACT :
 9. CONTACT :
 10. CONTACT :

Size Thickness x Width x Length	Weight kgs	Conductivity % IACS	Copper %	Bend Test	Tensile Strength Mpa	Elongation %	Dimension Check
1/8" x 1/2" SE x 5000 mm	468.0	100.9	99.98 Min	PASSED	302.4	15.2	PASSED
3/16" x 1/2" SE x 5000 mm	518.1	100.7	99.98 Min	PASSED	309.4	15.4	PASSED
1/4" x 3/4" SE x 5000 mm	523.8	100.9	99.98 Min	PASSED	304.9	16.2	PASSED
1/4" x 2" SE x 5000 mm	1,192.0	100.3	99.98 Min	PASSED	305.2	21.5	PASSED
1/4" x 2 1/2" SE x 5000 mm	486.0	100.4	99.98 Min	PASSED	301.8	25.9	PASSED
1/4" x 3" SE x 5000 mm	496.8	100.2	99.98 Min	PASSED	297.8	16.4	PASSED
3/8" x 1" SE x 5000 mm	626.4	100.9	99.98 Min	PASSED	292.1	26.4	PASSED
3/8" x 2" SE x 5000 mm	950.1	100.3	99.98 Min	PASSED	287.3	34.4	PASSED
6 mm x 100 mm SE x 5000 mm	1,072.8	100.8	99.98 Min	PASSED	304.2	17.6	PASSED

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

Prepared by
 Quality Assurance

Approved by
 Plant Manager

FM-QA-001 : 10 : 15-11-02

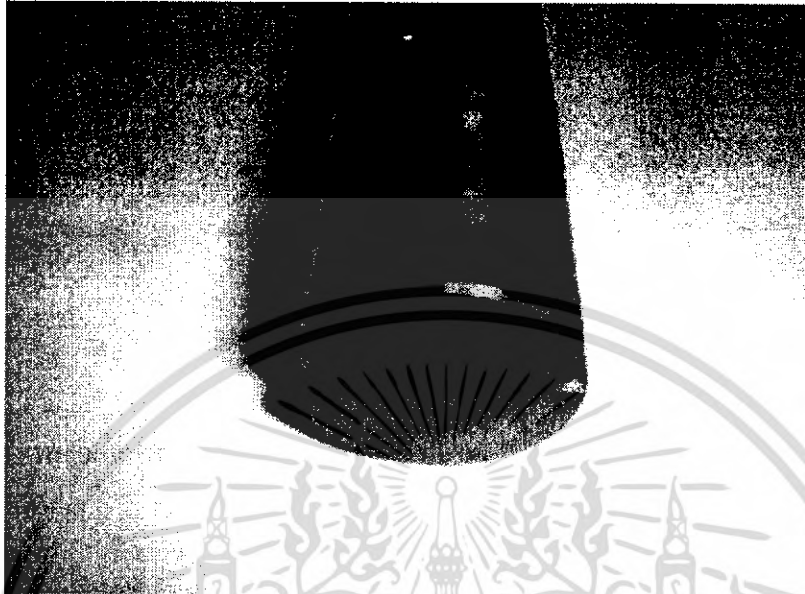
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่สามารถใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงแก้ไข ผศ 4 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การสึกหรอของแท่งอิเล็กโทรด

1.1 การสึกหรอของแท่งอิเล็กโทรดของอัตราการกัดเนื้อชิ้นงาน (MRR) มากที่สุด



รูปที่ ผง 1 การสึกหรอของแท่งอิเล็กโทรด ลำดับการทดลองที่ 49 ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18.5 มิลลิเมตร

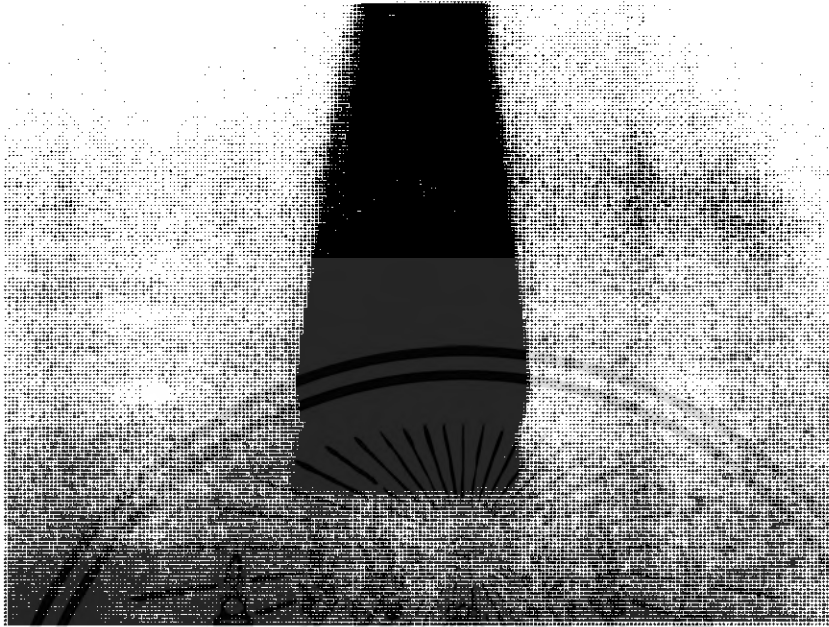
1.2 การสึกหรอของแท่งอิเล็กโทรดของอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR) มากที่สุด



รูปที่ ผง 2 การสึกหรอของแท่งอิเล็กโทรด ลำดับการทดลองที่ 45 ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18.5 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 การศึกษาของแท่งอิเล็กโทรดของอัตราการผลิตเนื้อชิ้นงาน (MRR) น้อยที่สุด



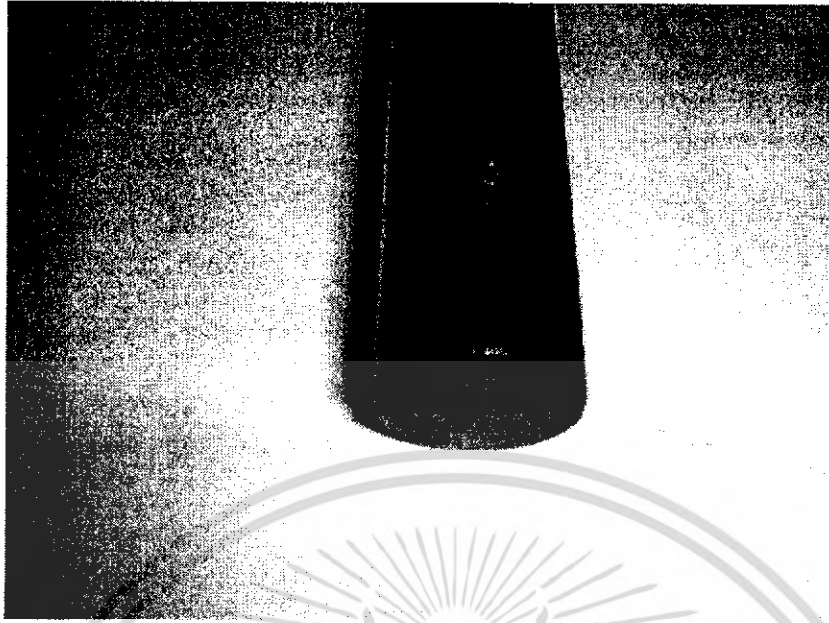
รูปที่ ผง 3 การศึกษาของแท่งอิเล็กโทรด ลำดับการทดลองที่ 75 ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.5 มิลลิเมตร

1.4 การศึกษาของแท่งอิเล็กโทรดของอัตราการศึกษาของอิเล็กโทรด (EWR) น้อยที่สุด



รูปที่ ผง 4 การศึกษาของแท่งอิเล็กโทรด ลำดับการทดลองที่ 81 ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา ผง 3 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

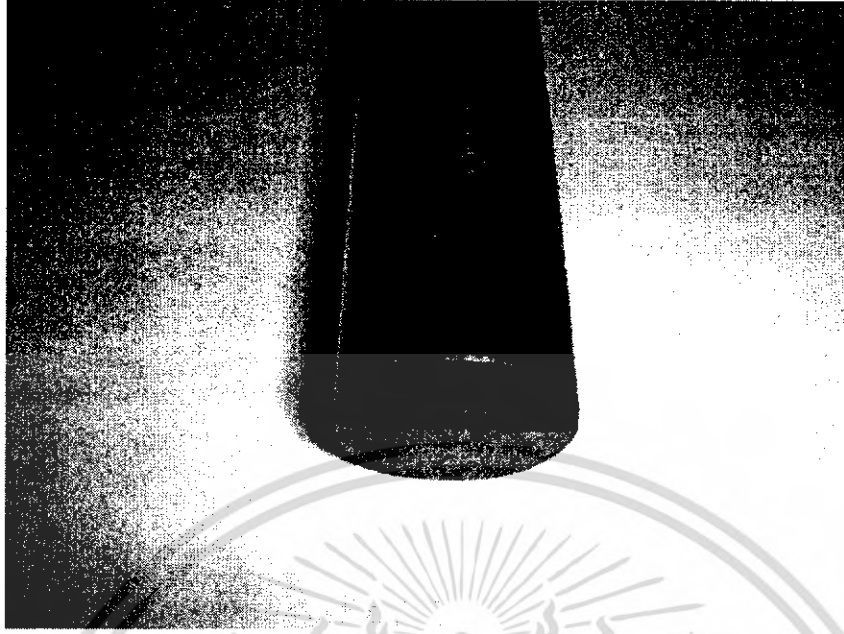


รูปที่ ผง 5 การศึกษาของแท่งอิเล็กโทรด ลำดับการทดลองที่ 72 ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร



รูปที่ ผง 6 การศึกษาของแท่งอิเล็กโทรด ลำดับการทดลองที่ 51 ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

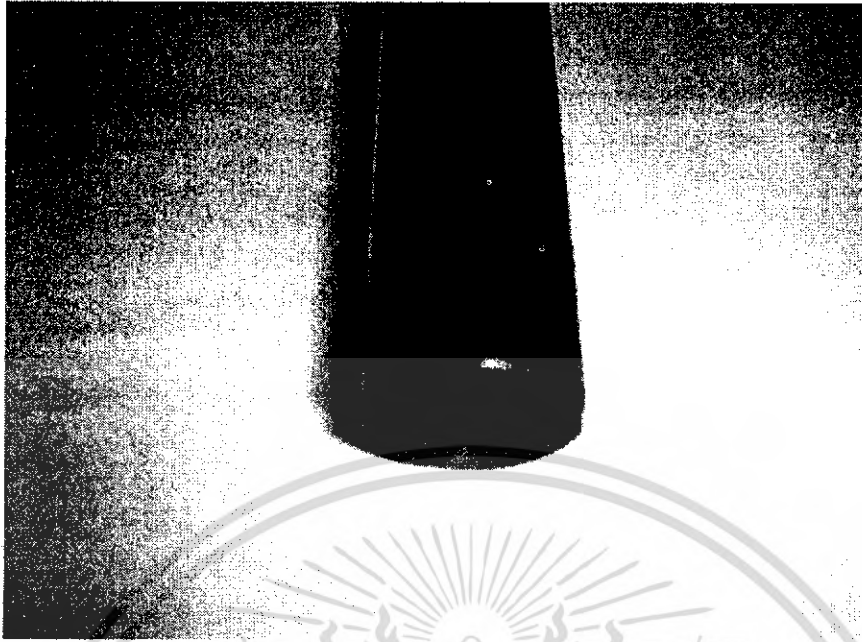


รูปที่ ผง 7 การสีกหระอของแแห่งอเล็กโทรด ลำค้บการทคดองที่ 26 ที่ขนาดเส้่นผ่านศุนย์ 18.5 มิลลลเมตร



รูปที่ ผง 8 การสีกหระอของแแห่งอเล็กโทรด ลำค้บการทคดองที่ 12 ที่ขนาดเส้่นผ่านศุนย์ 18.5 มิลลลเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงแก้ไข และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



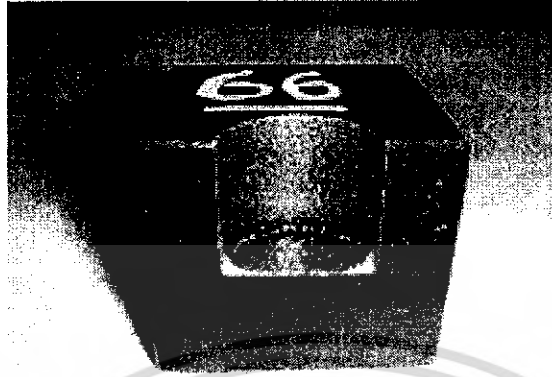
รูปที่ ผง 9 การสีกพรของแท่งอิเล็กโทรด ลำดับการทดลองที่ 8 ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 มิลลิเมตร



รูปที่ ผง 10 การสีกพรของแท่งอิเล็กโทรด ลำดับการทดลองที่ 4 ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18.5 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ชิ้นงานหลังการทดลอง



รูปที่ ผง 11 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 1 ลำดับชิ้นงานที่ 66



รูปที่ ผง 12 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 2 ลำดับชิ้นงานที่ 25



รูปที่ ผง 13 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 3 ลำดับชิ้นงานที่ 38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา ผง 7 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผง 14 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 4 ลำดับชิ้นงานที่ 76

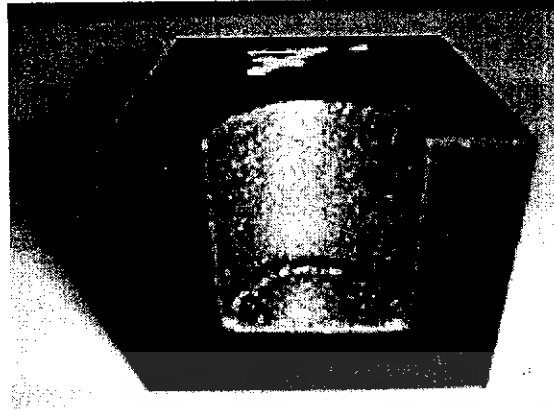


รูปที่ ผง 15 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 5 ลำดับชิ้นงานที่ 48



รูปที่ ผง 16 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 6 ลำดับชิ้นงานที่ 65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อ **ผง 8** และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผง 17 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 7 ลำดับชิ้นงานที่ 62

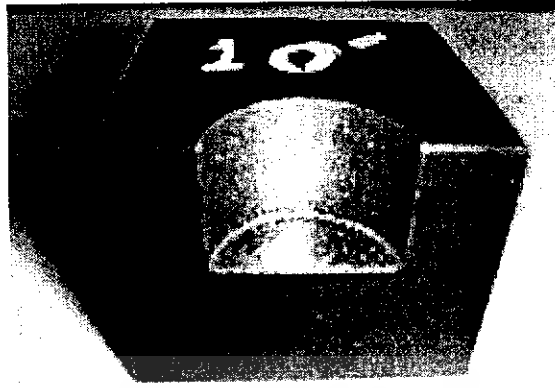


รูปที่ ผง 18 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 8 ลำดับชิ้นงานที่ 52



รูปที่ ผง 19 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 9 ลำดับชิ้นงานที่ 2

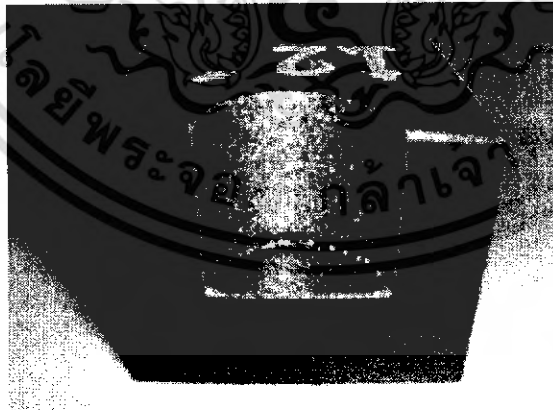
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อผง 9 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผง 20 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 10 ลำดับชิ้นงานที่ 78

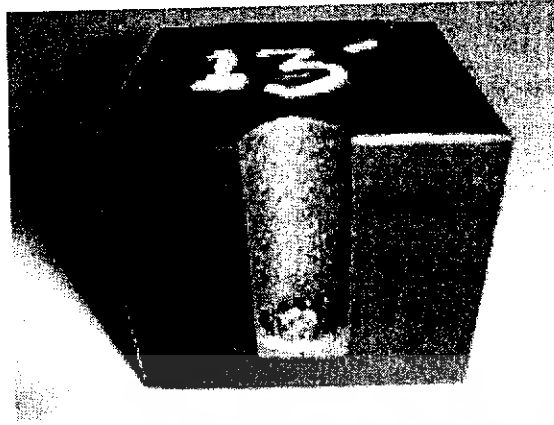


รูปที่ ผง 21 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 11 ลำดับชิ้นงานที่ 12



รูปที่ ผง 22 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 12 ลำดับชิ้นงานที่ 80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา ผง 10 ละต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผง 23 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 13 ลำดับชิ้นงานที่ 19

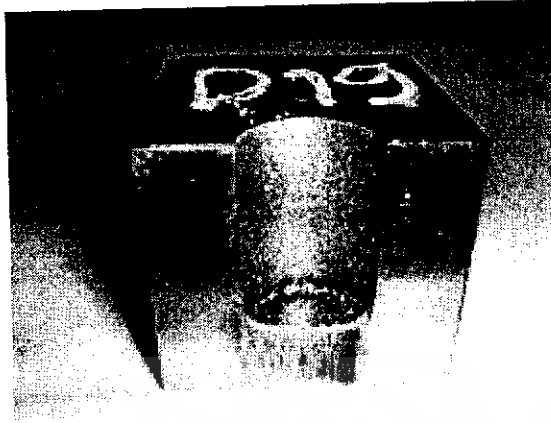


รูปที่ ผง 24 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 14 ลำดับชิ้นงานที่ 13



รูปที่ ผง 25 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 15 ลำดับชิ้นงานที่ 75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อผง 11 ละต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผง 26 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 16 ลำดับชิ้นงานที่ 39

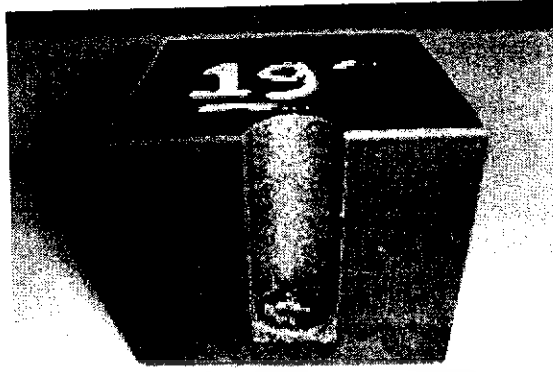


รูปที่ ผง 27 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 17 ลำดับชิ้นงานที่ 57



รูปที่ ผง 28 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 18 ลำดับชิ้นงานที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อผง 12 ละต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผง 29 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 19 ลำดับชิ้นงานที่ 21

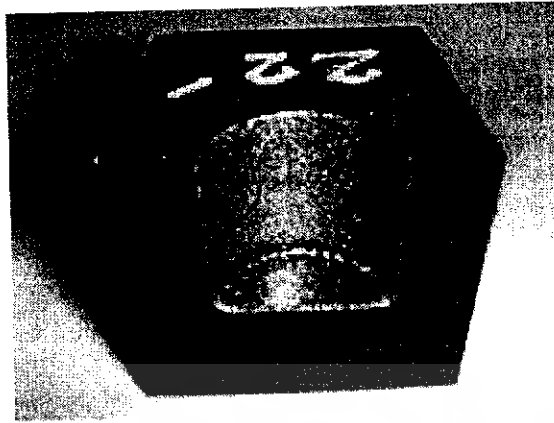


รูปที่ ผง 30 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 20 ลำดับชิ้นงานที่ 35



รูปที่ ผง 31 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 21 ลำดับชิ้นงานที่ 72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 13 ละต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผง 32 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 22 ลำดับชิ้นงานที่ 60

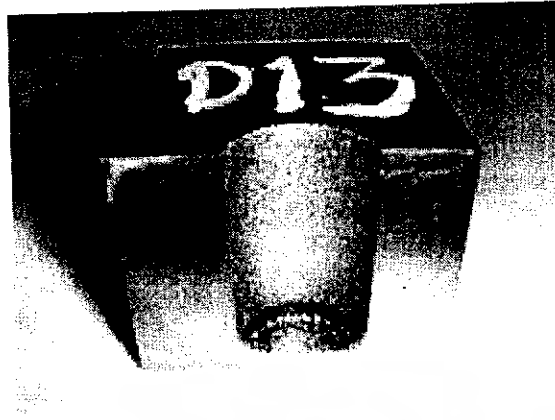


รูปที่ ผง 33 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 23 ลำดับชิ้นงานที่ 51

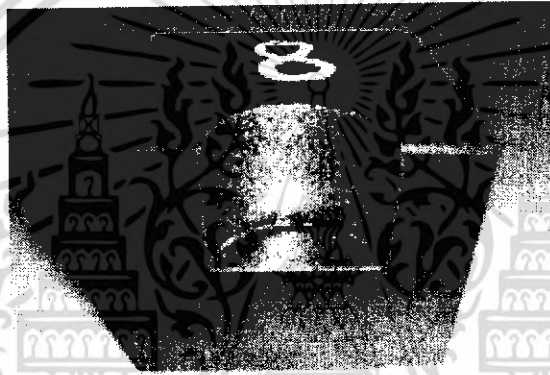


รูปที่ ผง 34 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 24 ลำดับชิ้นงานที่ 30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อ ผง 14 ละต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผง 35 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 25 ลำดับชิ้นงานที่ 41

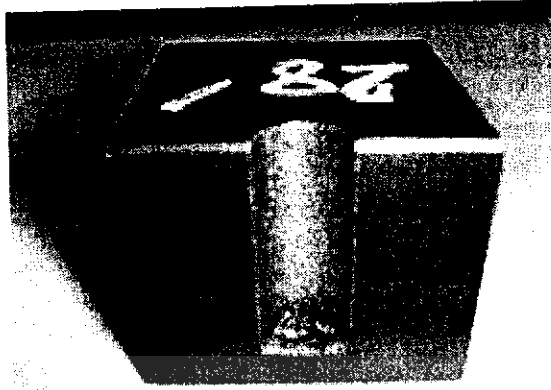


รูปที่ ผง 36 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 26 ลำดับชิ้นงานที่ 71

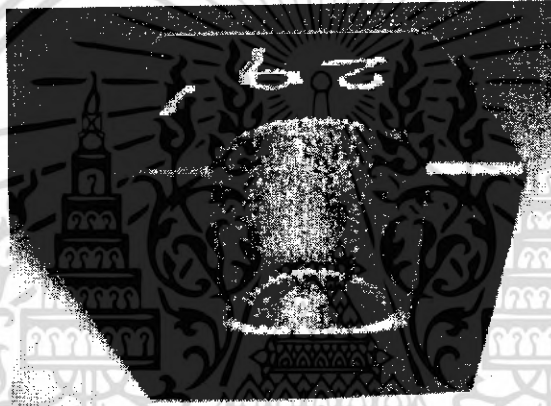


รูปที่ ผง 37 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 27 ลำดับชิ้นงานที่ 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อ ผง 15 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผง 38 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 28 ลำดับชิ้นงานที่ 27

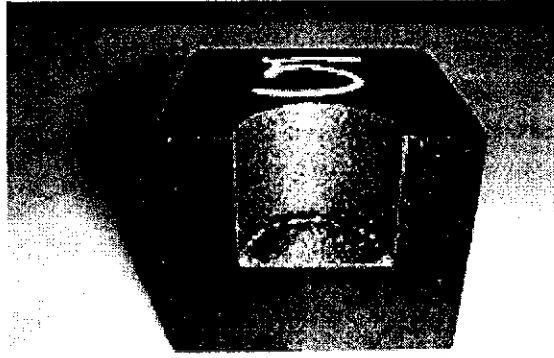


รูปที่ ผง 39 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 29 ลำดับชิ้นงานที่ 64



รูปที่ ผง 40 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 30 ลำดับชิ้นงานที่ 67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อ ผง 16 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผง 41 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 31 ลำดับชิ้นงานที่ 59

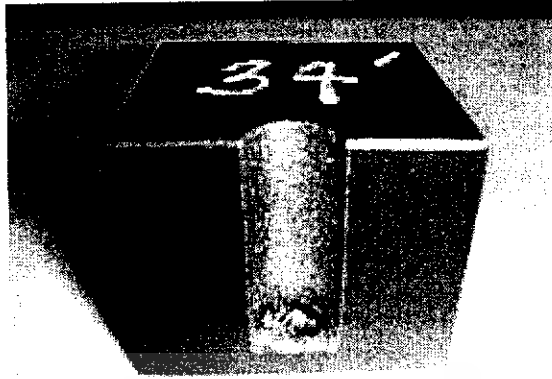


รูปที่ ผง 42 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 32 ลำดับชิ้นงานที่ 58



รูปที่ ผง 43 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 33 ลำดับชิ้นงานที่ 22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 17 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผง 44 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 34 ลำดับชิ้นงานที่ 14

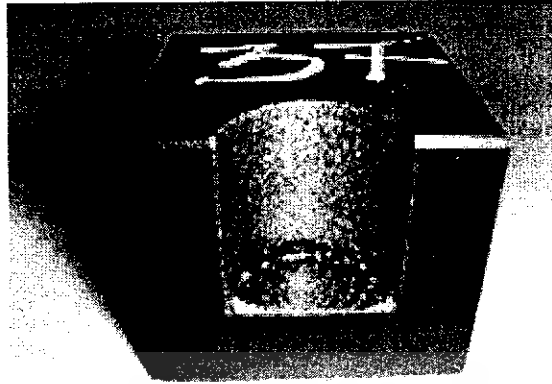


รูปที่ ผง 45 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 35 ลำดับชิ้นงานที่ 40



รูปที่ ผง 46 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 36 ลำดับชิ้นงานที่ 31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อ ผง 18 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผง 47 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 37 ลำดับชิ้นงานที่ 69

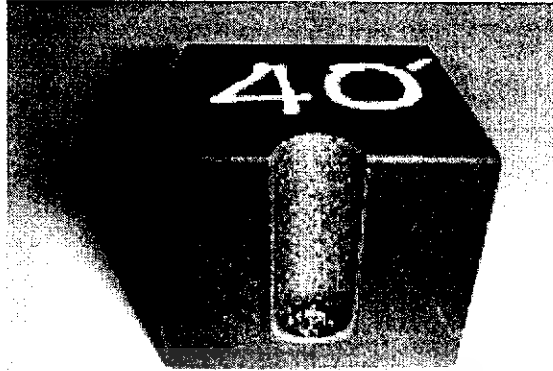


รูปที่ ผง 48 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 38 ลำดับชิ้นงานที่ 23



รูปที่ ผง 49 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 39 ลำดับชิ้นงานที่ 36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงแก้ไข ผง 19 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผง 50 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 40 ลำดับชิ้นงานที่ 10

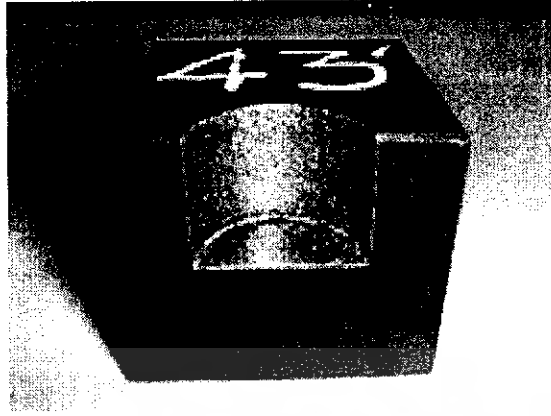


รูปที่ ผง 51 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 41 ลำดับชิ้นงานที่ 46

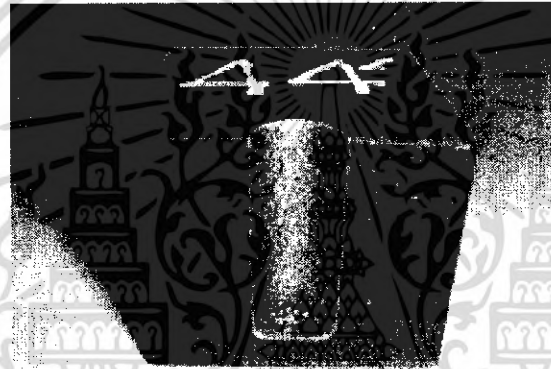


รูปที่ ผง 52 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 42 ลำดับชิ้นงานที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผง 53 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 43 ลำดับชิ้นงานที่ 77

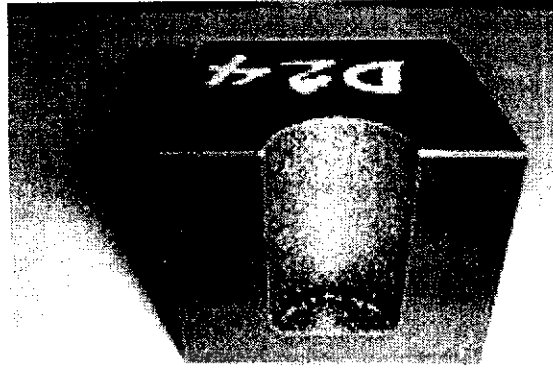


รูปที่ ผง 54 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 44 ลำดับชิ้นงานที่ 26



รูปที่ ผง 55 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 45 ลำดับชิ้นงานที่ 73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเป็น **ผง 21** และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผง 56 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 46 ลำดับชิ้นงานที่ 53

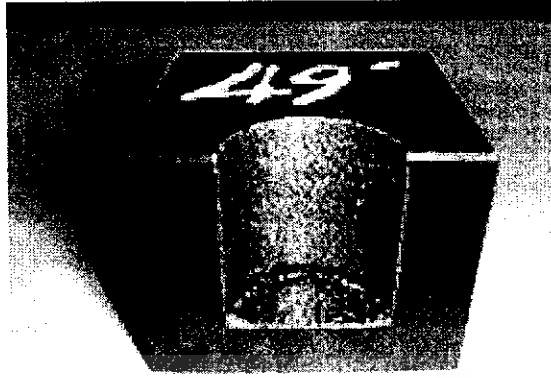


รูปที่ ผง 57 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 47 ลำดับชิ้นงานที่ 4

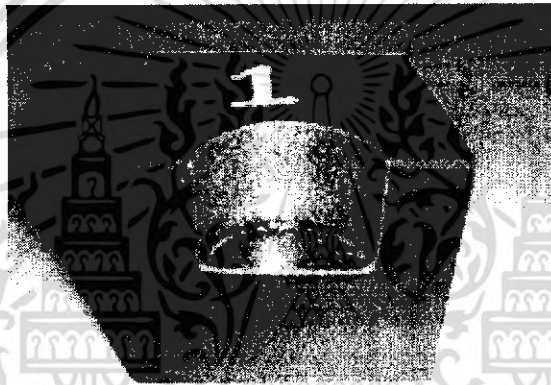


รูปที่ ผง 58 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 48 ลำดับชิ้นงานที่ 34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงแก้ไข ผง 22 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผง 59 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 49 ลำดับชิ้นงานที่ 61

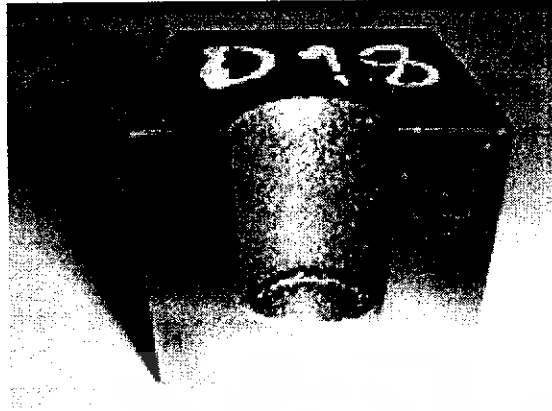


รูปที่ ผง 60 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 50 ลำดับชิ้นงานที่ 55

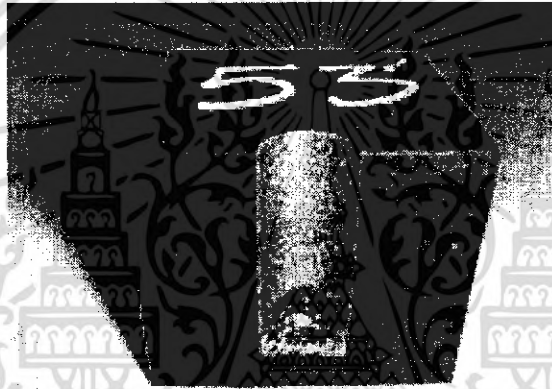


รูปที่ ผง 61 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 51 ลำดับชิ้นงานที่ 44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อ ผง 23 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผง 62 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 52 ลำดับชิ้นงานที่ 37

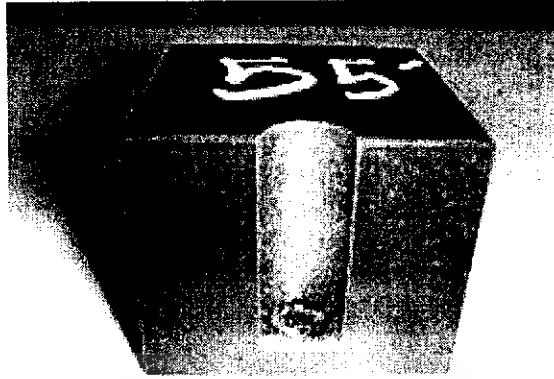


รูปที่ ผง 63 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 53 ลำดับชิ้นงานที่ 20

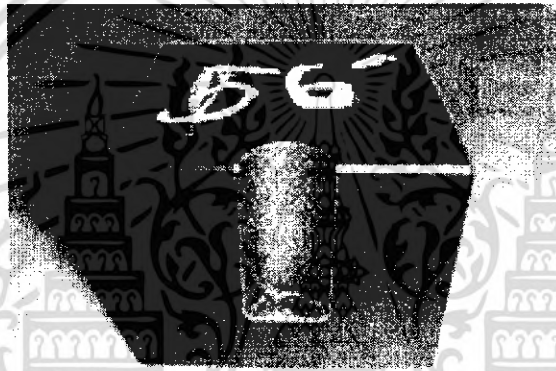


รูปที่ ผง 64 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 54 ลำดับชิ้นงานที่ 50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา ผง 24 ละต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผง 65 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 55 ลำดับชิ้นงานที่ 11

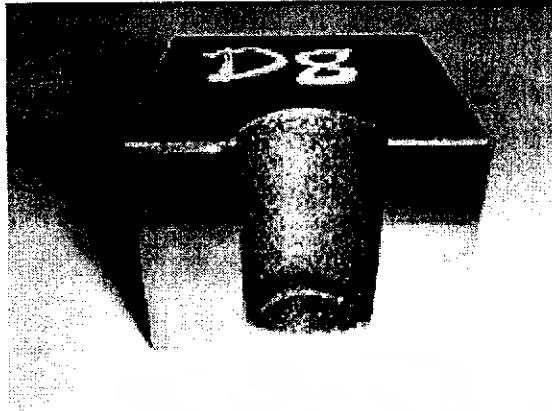


รูปที่ ผง 66 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 56 ลำดับชิ้นงานที่ 24



รูปที่ ผง 67 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 57 ลำดับชิ้นงานที่ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงแก้ไข ผง 25 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผง 68 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 58 ลำดับชิ้นงานที่ 29

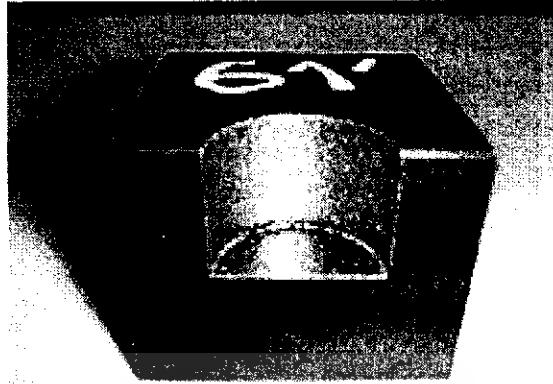


รูปที่ ผง 69 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 59 ลำดับชิ้นงานที่ 18

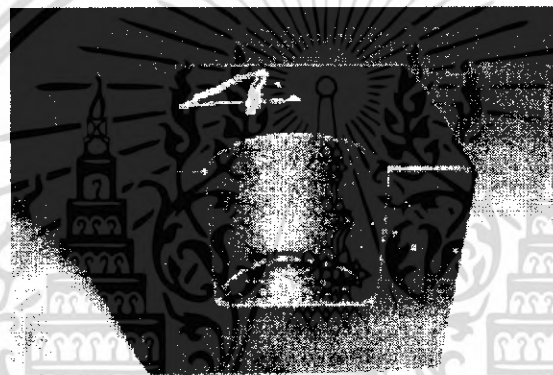


รูปที่ ผง 70 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 60 ลำดับชิ้นงานที่ 74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา ผง 26 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผง 71 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 61 ลำดับชิ้นงานที่ 70

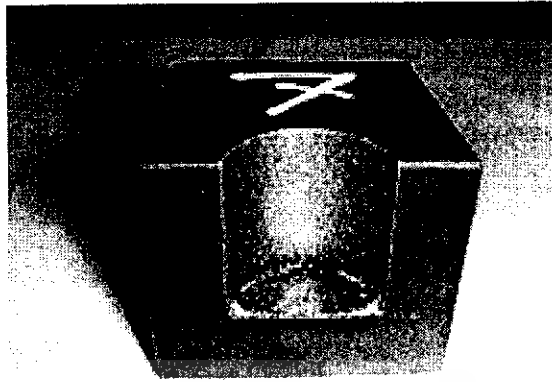


รูปที่ ผง 72 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 62 ลำดับชิ้นงานที่ 81



รูปที่ ผง 73 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 63 ลำดับชิ้นงานที่ 15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา ผง 27 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผง 74 ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 64 ลำดับชั้นงานที่ 68

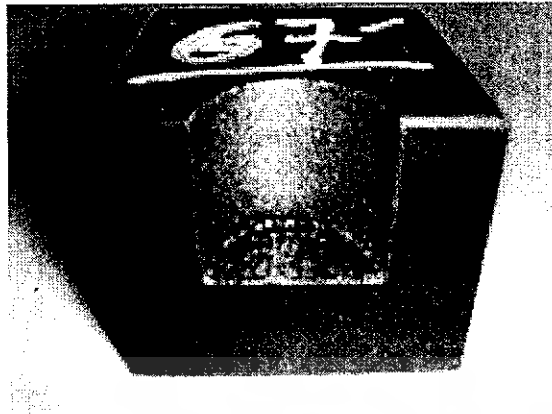


รูปที่ ผง 75 ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 65 ลำดับชั้นงานที่ 17



รูปที่ ผง 76 ชั้นงานลำดับการทดลองที่ 66 ลำดับชั้นงานที่ 33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา ผง 28 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผง 77 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 67 ลำดับชิ้นงานที่ 79

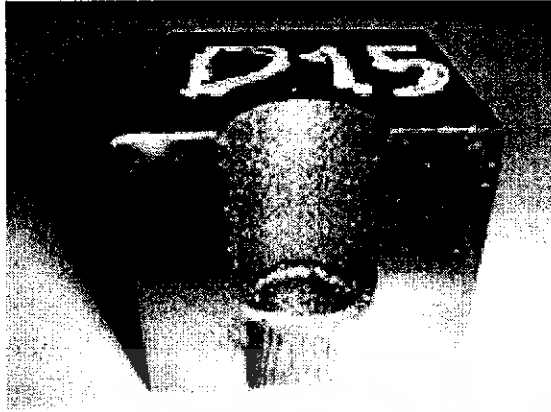


รูปที่ ผง 78 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 68 ลำดับชิ้นงานที่ 8



รูปที่ ผง 79 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 69 ลำดับชิ้นงานที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา ผง 29 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผง 80 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 70 ลำดับชิ้นงานที่ 47

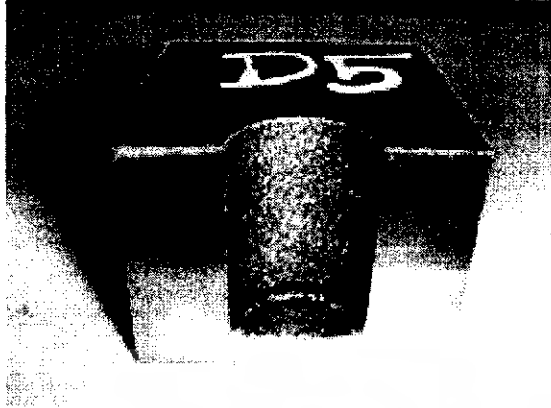


รูปที่ ผง 81 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 71 ลำดับชิ้นงานที่ 56



รูปที่ ผง 82 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 72 ลำดับชิ้นงานที่ 43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา ผง 30 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผง 83 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 73 ลำดับชิ้นงานที่ 32

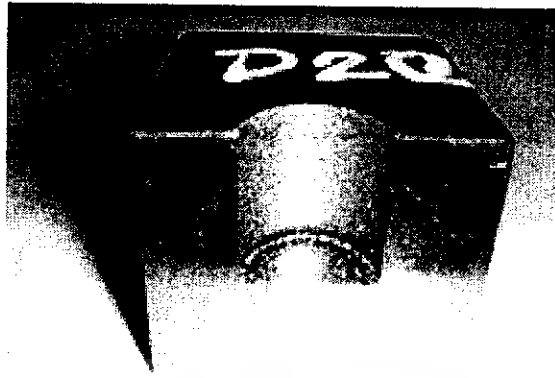


รูปที่ ผง 84 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 74 ลำดับชิ้นงานที่ 1

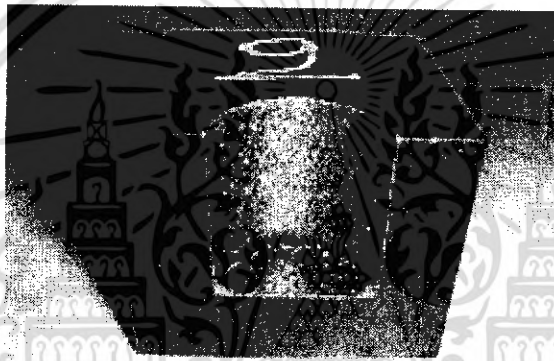


รูปที่ ผง 85 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 75 ลำดับชิ้นงานที่ 16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงแก้ไข 31 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผง 86 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 76 ลำดับชิ้นงานที่ 45



รูปที่ ผง 87 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 77 ลำดับชิ้นงานที่ 63



รูปที่ ผง 88 ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 78 ลำดับชิ้นงานที่ 28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลง **ผง 32** และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้