

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการตัดเหล็กกล้า SKD11
และ DC53 ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธี EDM

นายปิยวุฒิ เหมือนแร่
นายรณรงค์ ลิมสุวรรณ
นายสมบูรณ์ กิจบุญ

2011
216197
9549

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 71975
วัน,เดือน,ปี... - 7 ส.ย. 2550

b. 117 61246
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**A Comparative Study on Machinability of SKD11
and DC53 Tool Steels Machined by EDM**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2006**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญาโท

หัวข้อปริญญาโท

การศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการตัดเหล็กกล้า SKD11 และ DC53
ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธี EDM
A Comparative Study on Machinability of SKD 11 and DC 53 Tool Steels
Machined by EDM

นักศึกษา

นายปิยวุฒิ เหมือนเร่	รหัสประจำตัว	47015648
นายขรรชง ลิมสุวรรณ	รหัสประจำตัว	47015653
นายสมบุรณ์ กิจบุญ	รหัสประจำตัว	47015660

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาโท


(ผศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ)


(ดร.อนิรุท ไวยจารuwong)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์

การศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการตัดเหล็กกล้า SKD11 และ DC53 ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธี EDM

นักศึกษา

นายปิยวุฒิ เหมือนแร่	รหัสประจำตัว	47015648
นายขรรยง ลิ้มสุวรรณ	รหัสประจำตัว	47015653
นายสมบูรณ์ กิจบุญ	รหัสประจำตัว	47015660

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

ปีการศึกษา

2549

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์

ศศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ
ดร.อนิรุท ไชยจาวณิช

บทคัดย่อ

เหล็กกล้าเครื่องมือ DC53 เป็นเหล็กกล้าเครื่องมือชนิดใหม่ทีพัฒนาจากเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาความสามารถในการตัดเหล็กกล้าทั้งสองชนิดนี้ในแง่ของอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (Material Removal Rate) อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (Electrode Wear Rate) และความหยาบผิวของชิ้นงาน (Surface Roughness) โดยเปรียบเทียบระหว่างเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 และ DC53 ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีอีดีเอ็ม ตัวแปรที่พิจารณา 2 ตัว คือ ช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า (Electric Discharge Time) และกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ค (Electric Discharge Peak Current) จากการประมวลผลทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ สรุปได้ว่า ชนิดของเหล็กกล้าเครื่องมือคือ SKD11 และ DC53 มีผลต่อค่าอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด และอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน ส่วนค่าความหยาบผิว Ra Rz และ Rmax ไม่ขึ้นกับชนิดของเหล็กกล้าเครื่องมือ

Thesis Title A Comparative Study on Machinability of SKD11 and DC53 Tool Steels Machined by EDM

Student Mr. Piyawut Muanrae
Mr. Yanyong Limsuwan
Mr. Sumboon Kitbun

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

Academic Year 2006

Thesis Advisor Asst. Prof. Dr. Kannachai Kanlayasiri
Dr. Anirut Chaijaruwanch

ABSTRACT

DC53 is a new tool steel developed from the SKD11 tool steel. This thesis is studied to compare material removal rate (MRR), electrode wear rate (EWR) and surface roughness between DC53 and SKD11 which has been machined by EDM process. The process parameters, electrical discharge time and electrical discharge peak Current, are considered. From Analysis of Variance (ANOVA) at the confidence level of 95% ($\alpha = 0.05$), it can be concluded that a type of tool steel, DC53 and SKD11, had an effect on EWR and MRR, but no effect on the surface roughness.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จลงไปได้ด้วยดีเพราะได้รับคำแนะนำและการสนับสนุนของอาจารย์ทุกท่าน เป็นอย่างดีเสมอมาจนโครงการนี้สำเร็จสมบูรณ์ลงไปได้ด้วยดี กลุ่มผู้ทำวิจัยขอกราบขอบพระคุณ

ผศ.ดร. กรรณชัย กัลยาศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับการให้โอกาสในการศึกษาปริญญาโทฉบับนี้ รวมทั้งมอบความรู้ คำแนะนำ ความช่วยเหลือทุก ๆ ด้าน รวมถึงความเอาใจใส่ในการทำปริญญาโทเป็นอย่างดีและทุก ๆ สิ่งที่อาจารย์มอบให้แก่กลุ่มผู้วิจัยตลอดระยะเวลาที่ผ่านมาในการทำโครงการ

ดร. อนิรุท ไชยจาวณิช อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงสำหรับการให้คำปรึกษาและคำแนะนำต่าง ๆ ในการหาข้อมูล และเสียสละเวลามาให้ความรู้

ขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง รวมทั้งอาจารย์ทุก ๆ ท่าน

ขอบคุณบริษัท ชันมาร์ เอส.พี. (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการให้ใช้เครื่องวัดความหนาผิว ยี่ห้อ TOKYO SEIMITSU รุ่น SURFCOM 480A ในห้องปฏิบัติการของบริษัท ชันมาร์ เอส.พี. (ประเทศไทย) จำกัด

ขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ เป็นอย่างสูงที่สุดในการให้โอกาสในการศึกษาตลอดระยะเวลาที่ผ่านมาที่มอบให้แก่กลุ่มผู้วิจัยทำให้มีความสำเร็จที่สดใสในวันนี้

ขอบคุณเพื่อน ๆ พี่น้องชาวลาดกระบังทุกคนที่ให้ความรู้สึกลึก ๆ ที่มีให้กันตลอดระยะเวลาที่ผ่านมาและให้กำลังใจในการทำโครงการตลอดเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณหนังสือทุกเล่มที่ใช้ในการศึกษาข้อมูล ในการค้นคว้าทำปริญญาโทและแหล่งความรู้ทุกแหล่งข้อมูลอินเทอร์เน็ตทรงคุณค่าสำหรับทำโครงการนี้

นาย ปิยวุฒิ เหมือนแร่
นาย ชรรยง ลิ้มสุวรรณ
นาย สมบูรณ์ กิจบุญ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของการสปาร์ค.....	4
2.1.1 สภาพที่กระแสเริ่มไหล (Dark Current).....	5
2.1.2 การสปาร์คแบบโคโรน่า (Corona Discharge).....	5
2.1.3 การสปาร์คแบบโกลว์ (Glow Discharge).....	5
2.1.4 การสปาร์คแบบอาร์ค (Arc Discharge).....	5
2.2 หลักการของกรรมวิธีขึ้นรูปด้วยเครื่องอีซีเอ็ม.....	6
2.2.1 ใส่แรงดันไฟฟ้า.....	7
2.2.2 การสูญเสียความเป็นฉนวน.....	7
2.2.3 สปาร์คหลอมละลาย.....	7
2.2.4 เชื้อตัว.....	7
2.2.5 กลับคืนสู่ความเป็นฉนวน.....	7
2.2.6 ประโยชน์ของกรรมวิธีอีซีเอ็ม.....	8
2.2.7 การแบ่งประเภทของกรรมวิธีอีซีเอ็ม (Categories of EDM).....	8
2.2.8 อุปกรณ์ของกรรมวิธีอีซีเอ็ม.....	8
2.3 ระบบไดอิเล็กตริก (Dielectric System).....	9
2.3.1 หน้าที่ของสารไดอิเล็กตริก.....	9
2.3.2 ประเภทของสารไดอิเล็กตริก.....	10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.3 คุณสมบัติของสาร ไดอิเล็กทริก.....	11
2.4 ระบบการไหลของไดอิเล็กทริก (Flushing).....	11
2.4.1 ระบบการไหลของไดอิเล็กทริกในกรรมวิธีอีซีเอ็ม.....	12
2.4.2 ปัญหาแก๊ส (Gas Problem).....	15
2.5 ระบบเซอร์โว (Servo System).....	16
2.5.1 ระบบควบคุมการป้อนอิเล็กโทรดในกรรมวิธีอีซีเอ็ม.....	16
2.6 ความสำคัญของความหยาบผิว.....	17
2.6.1 ความหยาบผิว.....	17
2.6.2 การเกิดสภาพของผิว.....	17
2.6.3 ลักษณะการเบี่ยงเบนของผิวในงาน.....	18
2.6.4 รายละเอียดของเครื่องวัดค่าความหยาบผิว.....	20
2.6.5 ค่าที่เกี่ยวข้องกับความหยาบผิว.....	21
2.6.6 วิธีการแสดงค่าความหยาบผิว.....	22
2.7 หลักการออกแบบการทดลอง.....	24
2.7.1 ปัจจัยในการผลิต.....	25
2.7.2 วัตถุประสงค์ของการออกแบบการทดลอง.....	26
2.7.3 คำจำกัดความ.....	26
2.7.4 หลักในการออกแบบการทดลอง.....	26
2.7.5 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง.....	27
2.7.6 การใช้หลักทางสถิติในการทดลอง.....	28
2.7.7 การตั้งสมมติฐานในการตรวจสอบ.....	29
2.7.8 ชนิดของแผนการออกแบบการทดลอง.....	30
2.7.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	32
2.7.10 แบบจำลองการถดถอย.....	37
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	40
3.1.1 อิเล็กโทรด.....	40
3.1.2 ชิ้นงานทดลอง.....	41
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	42
3.2.1 เครื่องอีซีเอ็ม.....	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.2 เครื่องวัดความหยาบผิวชิ้นงาน.....	43
3.3 หลักการออกแบบการทดลอง.....	43
3.3.1 ทำความเข้าใจถึงปัญหา.....	43
3.3.2 เลือกพารามิเตอร์ ระดับ และขอบเขต.....	44
3.3.3 เลือกการออกแบบการทดลอง.....	44
3.3.4 แผนการทดลอง.....	44
3.4 ขั้นตอนการทดลอง.....	48
3.4.1 ขั้นตอนก่อนการทดลอง.....	48
3.4.2 ขั้นตอนระหว่างการทดลอง.....	50
3.4.3 ขั้นตอนหลังการทดลอง.....	50
บทที่ 4 ผลการทดลอง	
4.1 ผลของการทดลองเพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการตัดเหล็กกล้า SKD11 และ DC53.....	53
4.2 การวิเคราะห์ผลด้วยกราฟ.....	57
4.3 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ.....	67
4.3.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	67
4.3.2 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ.....	71
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	
5.1 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	81
5.1.1 ค่าผลตอบสนอง EWR.....	81
5.1.2 ค่าผลตอบสนอง MRR.....	82
5.1.3 ค่าผลตอบสนอง Ra.....	82
5.1.4 ค่าผลตอบสนอง Rz.....	82
5.1.5 ค่าผลตอบสนอง Rmax.....	82
หนังสืออ้างอิง.....	83
ภาคผนวก ก.....	ผก
ภาคผนวก ข.....	ผข
ภาคผนวก ค.....	ผค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงลักษณะการเบี่ยงเบนของผิวชิ้นงาน.....	19
ตารางที่ 2.2 แสดงการคำนวณการวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	35
ตารางที่ 3.1 แสดงระดับตัวแปรในการทดลอง.....	44
ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่สภาวะคงที่โดยกำหนดค่าคงที่ตลอดการทดลอง.....	45
ตารางที่ 3.3 ลำดับการทดลอง.....	46
ตารางที่ 4.1 ผลการเก็บค่าน้ำหนักก่อน-หลังการทดลอง.....	53
ตารางที่ 4.2 ค่าอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด และความหยาบผิวชิ้นงาน.....	55
ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าตอบสนองอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด.....	68
ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าตอบสนองอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน.....	68
ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าตอบสนองความหยาบผิว (Ra).....	69
ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าตอบสนองความหยาบผิว (Rz).....	70
ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าตอบสนองความหยาบผิว (Rmax).....	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 คุณสมบัติพิเศษแรงดันไฟฟ้า - กระแสไฟฟ้าของการสปาร์ก.....	4
รูปที่ 2.2 กระบวนการคิสซาร์จ.....	5
รูปที่ 2.3 สภาพของลำดับการสปาร์กในแต่ละครั้ง.....	6
รูปที่ 2.4 รูปร่างคลื่นของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในการขึ้นรูปด้วยเครื่องอีซีเอ็ม.....	6
รูปที่ 2.5 หลักการทำงานของระบบอีซีเอ็ม.....	9
รูปที่ 2.6 การสะสมของอนุภาคโลหะในช่องว่างเมื่อไม่ใช้ระบบการไหลของไดอิเล็กตริก.....	11
รูปที่ 2.7 อนุภาคโลหะก่อตัวเป็นสะพานคาน้ำไฟฟ้า.....	12
รูปที่ 2.8 การไหลของไดอิเล็กตริกแบบฉีด.....	12
รูปที่ 2.9 ไดอิเล็กตริกไหลผ่านรูพรุนกราฟที่บริเวณช่องว่าง.....	13
รูปที่ 2.10 การไหลของไดอิเล็กตริกแบบดูด.....	13
รูปที่ 2.11 การไหลของไดอิเล็กตริกทางด้านข้าง.....	14
รูปที่ 2.12 การไหลของไดอิเล็กตริกโดยอาศัยการขึ้น-ลงของอิเล็กโทรด.....	15
รูปที่ 2.13 การไหลแบบฉีดพร้อมกับเลื่อนอิเล็กโทรดขึ้น.....	15
รูปที่ 2.14 การเจาะรูอิเล็กโทรดเพื่อระบายแก๊สที่เกิดขึ้น.....	16
รูปที่ 2.15 ช่วงของการเบี่ยงเบนผิวชิ้นงาน.....	18
รูปที่ 2.16 ลักษณะความแตกต่างระหว่างหัวลากกับหัวสัมผัส.....	20
รูปที่ 2.17 จำแนกลักษณะการเบี่ยงเบนผิวชิ้นงาน.....	20
รูปที่ 2.18 รูปหน้าตัดที่เป็นผลและรูปหน้าตัดคัดแปลงของความหยาบ.....	22
รูปที่ 2.19 ค่าพารามิเตอร์ค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยทางคณิตศาสตร์ของพื้นที่หน้าตัดของค่าความหยาบผิว.....	23
รูปที่ 2.20 ค่าสูงที่สุดของส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลง 10 จุดของค่าความหยาบผิว.....	23
รูปที่ 2.21 รูปแบบของกระบวนการหรือระบบ.....	24
รูปที่ 2.22 แสดงอิทธิพลที่ไม่มีผลและอิทธิพลที่มีผลของปัจจัยต่อผลิตภัณฑ์.....	25
รูปที่ 2.23 แสดงการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่ไม่มีอันตรกิริยาระหว่างกัน.....	31
รูปที่ 2.24 แสดงการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่มีอันตรกิริยาระหว่างกัน.....	31
รูปที่ 3.1 อิเล็กโทรด.....	40
รูปที่ 3.2 เหล็กกล้า SKD11.....	41
รูปที่ 3.3 เหล็กกล้า DC53.....	41
รูปที่ 3.4 เครื่องอีซีเอ็ม.....	42
รูปที่ 3.5 เครื่องวัดความหยาบผิว.....	43
รูปที่ 3.6 การขึ้นรูปชิ้นงานโดยการไส.....	48
รูปที่ 3.7 การขึ้นรูปชิ้นงานโดยการกัด.....	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.8 การขึ้นรูปอิเล็กทรอนิกส์โดยการตัด.....	49
รูปที่ 3.9 ลักษณะการจับยึดชิ้นงานและอิเล็กทรอนิกส์.....	50
รูปที่ 3.10 ลักษณะการติดตั้งชิ้นงานเข้ากับเครื่องวัดความหนาผิว.....	51
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง MRR กับ IP ที่ ON 125.....	57
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง MRR กับ IP ที่ ON 190.....	57
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง MRR กับ IP ที่ ON 250.....	58
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง EWR กับ IP ที่ ON 125.....	58
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง EWR กับ IP ที่ ON 190.....	58
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง EWR กับ IP ที่ ON 250.....	59
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Ra กับ IP ที่ ON 125.....	59
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Ra กับ IP ที่ ON 190.....	59
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Ra กับ IP ที่ ON 250.....	60
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง Rz กับ IP ที่ ON 125.....	60
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง Rz กับ IP ที่ ON 190.....	60
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง Rz กับ IP ที่ ON 250.....	61
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง Rmax กับ IP ที่ ON 125.....	61
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง Rmax กับ IP ที่ ON 190.....	61
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง Rmax กับ IP ที่ ON 250.....	62
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง MRR กับ ON ที่ IP 50.....	62
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง MRR กับ ON ที่ IP 75.....	62
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง MRR กับ ON ที่ IP 90.....	63
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง EWR กับ ON ที่ IP 50.....	63
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง EWR กับ ON ที่ IP 75.....	63
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง EWR กับ ON ที่ IP 90.....	64
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง Ra กับ ON ที่ IP 50.....	64
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง Ra กับ ON ที่ IP 75.....	64
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่าง Ra กับ ON ที่ IP 90.....	65
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่าง Rz กับ ON ที่ IP 50.....	65
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่าง Rz กับ ON ที่ IP 75.....	65
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่าง Rz กับ ON ที่ IP 90.....	66
รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่าง Rmax กับ ON ที่ IP 50.....	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่าง R_{max} กับ ON ที่ IP 75	66
รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่าง R_{max} กับ ON ที่ IP 90	67
รูปที่ 4.31 การแจกแจงแบบปกติสำหรับค่าส่วนตกค้างของอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR)	71
รูปที่ 4.32 การแจกแจงแบบปกติสำหรับค่าส่วนตกค้างของอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR)	72
รูปที่ 4.33 การแจกแจงแบบปกติสำหรับค่าส่วนตกค้างของค่าความหยาบผิว (R_a)	72
รูปที่ 4.34 การแจกแจงแบบปกติสำหรับค่าส่วนตกค้างของค่าความหยาบผิว (R_z)	73
รูปที่ 4.35 การแจกแจงแบบปกติสำหรับค่าส่วนตกค้างของค่าความหยาบผิว (R_{max})	74
รูปที่ 4.36 ค่าส่วนตกค้างของอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล	75
รูปที่ 4.37 ค่าส่วนตกค้างของอัตราการตัดเนื้อชิ้นงานกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล	75
รูปที่ 4.38 ค่าส่วนตกค้างของความหยาบผิว (R_a) กับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล	76
รูปที่ 4.39 ค่าส่วนตกค้างของความหยาบผิว (R_z) กับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล	76
รูปที่ 4.40 ค่าส่วนตกค้างของความหยาบผิว (R_{max}) กับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล	77
รูปที่ 4.41 ค่าส่วนตกค้างกับค่าอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR)	78
รูปที่ 4.42 ค่าส่วนตกค้างกับค่าอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR)	78
รูปที่ 4.43 ค่าส่วนตกค้างกับค่าความหยาบผิว R_a	79
รูปที่ 4.44 ค่าส่วนตกค้างกับค่าความหยาบผิว R_z	79
รูปที่ 4.45 ค่าส่วนตกค้างกับค่าความหยาบผิว R_{max}	80
รูปที่ 4.46 ระดับของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR)	81
รูปที่ 4.47 ระดับของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR)	81
รูปที่ 4.48 ระดับของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความหยาบผิว (R_a)	82
รูปที่ 4.49 ระดับของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความหยาบผิว (R_z)	82
รูปที่ 4.50 ระดับของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความหยาบผิว (R_{max})	83
รูปที่ 4.51 การมีอันตรกิริยา (Interaction) ต่อค่าผลตอบสนองของอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR)	84
รูปที่ 4.52 การมีอันตรกิริยา (Interaction) ต่อค่าผลตอบสนองของอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR)	84
รูปที่ 4.53 การมีอันตรกิริยา (Interaction) ต่อค่าผลตอบสนองของความหยาบผิว (R_a)	85
รูปที่ 4.54 การมีอันตรกิริยา (Interaction) ต่อค่าผลตอบสนองของความหยาบผิว (R_z)	85
รูปที่ 4.55 การมีอันตรกิริยา (Interaction) ต่อค่าผลตอบสนองของความหยาบผิว (R_{max})	86

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาของงานวิจัย

อุตสาหกรรมหลักต่าง ๆ ของประเทศไทย เช่น อุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ อุตสาหกรรมการผลิตพลาสติก อุตสาหกรรมไฟฟ้า เป็นอุตสาหกรรมที่มีการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเหมือน ๆ กันเป็นจำนวนมาก ซึ่งในการผลิตชิ้นส่วนโลหะและผลิตภัณฑ์ให้มีปริมาณมาก ๆ มีขนาดที่แน่นอน และมีคุณภาพนั้นต้องอาศัยการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ทั้งสิ้น คุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้นั้นจึงขึ้นอยู่กับคุณภาพของแม่พิมพ์ แม่พิมพ์เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในการขึ้นรูปชิ้นส่วนโลหะหรือพลาสติก เช่น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ชิ้นส่วนคอมพิวเตอร์ ชิ้นส่วนรถยนต์ ดังนั้นถ้าการสร้างแม่พิมพ์ไม่มีคุณภาพแล้วชิ้นส่วนและอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้นก็จะไม่มีคุณภาพตามที่ต้องการเช่นกัน ในการผลิตแม่พิมพ์ที่ได้นั้นจึงจำเป็นต้องใช้เครื่องจักรที่มีประสิทธิภาพสูงในการสร้างแม่พิมพ์ ซึ่งก็คือ เครื่องกัดเจาะด้วยไฟฟ้า (Electrical Discharge Machine) เป็นเครื่องจักรที่มีบทบาทอย่างมากในอุตสาหกรรมการสร้างแม่พิมพ์ เครื่องกัดเจาะด้วยไฟฟ้าเป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับการกัดเจาะโลหะ โดยอาศัยพลังงานจากการปลดปล่อยประจุทางไฟฟ้า (Discharge) ที่เกิดขึ้นบนช่องว่างระหว่างชิ้นงานและอิเล็กโทรด ภายใต้สารไดอิเล็กทริกซึ่งทำหน้าที่เป็นฉนวน โดยที่ชิ้นงานและอิเล็กโทรดจะไม่มีสัมผัสกัน โดยจะมีกลไกการควบคุมการปล่อยกระแสไฟฟ้าออกมาเป็นช่วง ๆ ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อคุณภาพของงาน เช่น ช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) และกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ค (IP) ซึ่งเป็นปัจจัยที่จะใช้ในการศึกษา ฉะนั้นจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจที่จะทำการศึกษาดังปัจจัยเหล่านี้ที่มีผลต่ออัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR) อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR) และความหยาบผิว (Surface Roughness) โดยที่เหล็กกล้าเครื่องมือที่นิยมใช้ในการขึ้นรูปแม่พิมพ์ คือเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 และ DC53 ซึ่งเหล็กกล้าเครื่องมือ DC53 ได้พัฒนามาจากเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 ดังนั้นจึงสนใจในการเปรียบเทียบกันระหว่างเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 และ DC53 โดยที่อัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR) และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR) เป็นตัวแปรที่สำคัญในการกำหนดต้นทุนในการผลิต ในขณะที่ความหยาบผิวของชิ้นงานเป็นตัวแปรที่สำคัญตัวหนึ่งในการกำหนดคุณภาพของแม่พิมพ์ที่ผลิต

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด และความหยาบผิวของชิ้นงานเปรียบเทียบกันระหว่างเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 และ DC53

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองมี 2 ตัวแปรคือ ช่วงระยะเวลาของการปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) และกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ค (IP)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.2 ศึกษาเฉพาะเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 และ DC53 และใช้ทองแดงเป็นอิเล็กโทรดในการขึ้นรูปด้วยวิธี EDM

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้เรียนรู้ถึงกรรมวิธีในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการ EDM

1.4.2 ทราบความแตกต่างในแง่ของความสามารถในการตัดระหว่างเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 และ DC53



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การทำารทดลองในงานวิจัยนี้มีทฤษฎีที่เกี่ยวข้องมากมาย และเพื่อที่จะได้ปฏิบัติการทดลองได้อย่างถูกต้อง จึงมีทฤษฎีที่ทำการศึกษหลัก ๆ ในงานวิจัยดังนี้

1. ทฤษฎีเบื้องต้นของการสปาร์ค
2. หลักการของกรรมวิธีขึ้นรูปด้วยเครื่องอีดีเอ็ม
3. ระบบ ไดอิเล็กตริก (Dielectric System)
4. ระบบการไหลของไดอิเล็กตริก (Flushing)
5. ระบบเซอร์โว (Servo System)
6. ความสำคัญของความหนาผิว
7. หลักการออกแบบการทดลอง

กรรมวิธี Electrical Discharge Machining เป็นประเภทหนึ่งของกระบวนการเทคโนโลยีแยกอนุภาควัสดุโดยไม่ใช้วิธีกล (Non – Mechanical Means) กระบวนการแยกอนุภาคโดยไม่ใช้วิธีกล แบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท

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

อีดีเอ็ม (EDM) คือกระบวนการแยกอนุภาควัสดุโดยวิธีความร้อน ซึ่งความร้อนที่ได้เกิดจากการสปาร์คทางไฟฟ้า อนุภาควัสดุที่ถูกแยกออกมาอาจจะอยู่ในรูปของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส

การกัดเซาะไฟฟ้า (Electroerosion) เป็นคำที่ใช้ครอบคลุมทุกกระบวนการที่แยกอนุภาควัสดุที่เกี่ยวข้องกับการส่งผ่านประจุไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดที่อยู่ภายใต้ของเหลวไดอิเล็กตริก

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

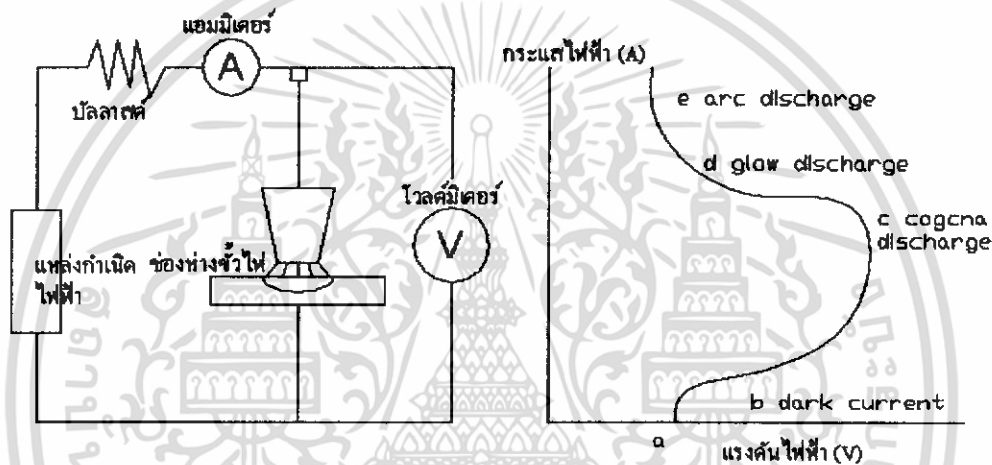
หลังความร้อนที่เกิดจากการปล่อยประจุไฟฟ้าออกมา จะหลอมละลายพื้นผิวของอิเล็กโทรดและชิ้นงานที่บริเวณช่องแคบของการปล่อยประจุไฟฟ้า โลหะหลอมเหลวจะถูกแรงหนีศูนย์กลางขับออกมา ในขณะที่พลังงานที่จัดให้ถูกขัดจังหวะหรือถูกตัด ความดันในบริเวณเส้นทางคิซาร์จจะขับอนุภาคที่หลอมเหลวออกมา และยังขับอนุภาคของแข็งออกมาด้วยโดยวิธีกระแทกทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของการสปาร์ก

ปรากฏการณ์การสปาร์ก เป็นชื่อโดยรวมของการสปาร์กต่าง ๆ ซึ่งเกิดขึ้นในกรณีที่ใส่แรงเคลื่อนไฟฟ้าประเภท ของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซคงอยู่ จนให้ฉนวนไฟฟ้าเหล่านี้สูญเสียความเป็นฉนวน (Dielectric Breakdown) และเกิดมีกระแสไหลอย่างรุนแรง

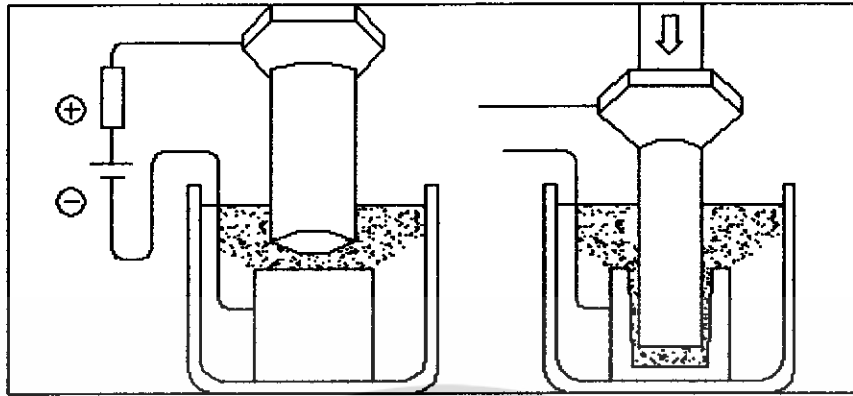
ดังนั้นปรากฏการณ์ดังกล่าว จึงหมายถึง การฝืนบังคับทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัสดุตัวกลางที่โดยปกติ กระแสจะไหลผ่านได้ยาก และเมื่อถึงเวลาที่มีการฝืนบังคับทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัสดุตัวกลางที่โดยปกติ กระแสจะไหลผ่านได้ยาก และเมื่อถึงเวลาที่มีการฝืนบังคับนี้ถึงขีดจำกัด ก็จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขนาดใหญ่ไหล ขึ้นมาอย่างกะทันหัน การนำเอาหลักการสปาร์กมาประยุกต์ใช้งาน ได้แก่ หลอดฟลูออเรสเซนต์ การเชื่อมแบบอาร์ค การ ขึ้นรูปด้วยวิธีการสปาร์กเครื่องซีดีเอ็ม



รูปที่ 2.2 คุณสมบัติพิเศษแรงดัน ไฟฟ้า - กระแสไฟฟ้าของการสปาร์ก (Inonue, K., 1977)

กระบวนการปล่อยประจุไฟฟ้า (Discharge Process) หลักการของการกักเซาะไฟฟ้า ขึ้นงานและอิเล็กโทรด ถูกนำมาวางไว้ในตำแหน่งที่พร้อมจะทำงานแต่ไม่สัมผัสกัน กระบวนการทั้งหมดจะเกิดในของเหลวที่เป็นฉนวน ไฟฟ้ากับขึ้นงานและอิเล็กโทรด ขึ้นงานและอิเล็กโทรดถูกค้ำกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง กระแสไฟฟ้านี้จะถูกตัด หรือขัดจังหวะด้วยสวิตช์เปิด เมื่อสวิตช์ปิด ศักย์ไฟฟ้าถูกสร้างขึ้นระหว่างอิเล็กโทรดกับขึ้นงาน ซึ่งเป็นการสร้าง สนามไฟฟ้าระหว่างแอโนดกับแคโทดเองจากตัวกลางไดอิเล็กตริกเป็นฉนวน จึงไม่มีกระแสไหลในตอนเริ่มต้น จาก ระบบความถี่ของเครื่องจักรทำให้อิเล็กโทรดและขึ้นงานเคลื่อนเข้าหากัน ดังนั้นจึงเกิดการสปาร์กที่จุดที่มี สนามไฟฟ้าสูงสุด การเกิดสปาร์กนี้เรียกว่า การปล่อยประจุไฟฟ้า กระบวนการนี้กระแสไฟฟ้าแปรผันเป็นความร้อน ทำให้พื้นผิวรอบ ๆ เส้นทางที่ปล่อยประจุที่มีความร้อนเกิดขึ้นสูง 8000°C ถึง 12000°C ถ้ากระแสที่ไหลอยู่ถูก ขัดจังหวะให้หยุดโดยการปิดสวิตช์ เส้นทางสปาร์กจะยุบพังลง การใช้สวิตช์ให้หยุดจ่ายพลังงานจะเป็นสาเหตุทำให้ ความดันที่บริเวณเส้นทางที่ปล่อยประจุไฟฟ้าลดลงอย่างทันทีทันใด มีผลทำให้โลหะหลอมเหลวเกิดการแตก กระจายเป็นไอ หลุดออกมาจากโลหะหลอมเหลว และของแข็งที่มีความสึกแน่นอน จึงเกิดเป็นหลุมบนพื้นผิวของการกัก เซาะไฟฟ้าของวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 กระบวนการเกิดสปาร์จ

2.1.1 สภาพที่กระแสเริ่มไหล (Dark Current)

ถ้าเพิ่มแรงดันไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า หรือ ลดช่องว่างระหว่างสปาร์คลงมาเรื่อย ๆ เมื่อถึงจุดหนึ่ง อากาศจะรวมตัวเป็นประจุไฟฟ้า และอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุเป็นลบจะถูกดูดจากฝั่งขั้วลบไปยังขั้วบวก ซึ่งในช่วงเวลา ระยะนี้จะมีกระแสไหลมากประมาณ $10^9 - 10^{11}$ A สภาพเช่นนี้มีชื่อเรียกว่า สภาพกระแสเริ่มไหล

2.1.2 การสปาร์คแบบโคโรน่า (Corona Discharge)

ถ้าเพิ่มแรงดันหรือลดช่องว่างลงอีกผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าบางส่วนที่เกิดสนามไฟฟ้าแรงเป็นพิเศษจะเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวน เราเรียกสภาพนี้ว่าการสปาร์คแบบ โคโรน่า ซึ่งเป็นการสปาร์คที่ขาดเสถียรภาพอย่างมาก

2.1.3 การสปาร์คแบบโกลว์ (Glow Discharge)

บริเวณที่เกิดการสูญเสียความเป็นฉนวนแล้วนั้นอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบจะไหลในส่วนนี้มากขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้กระแสไฟฟ้ามีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างรวดเร็วด้วยสภาพการสปาร์คที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงระยะเวลาที่สั้นมาก เช่นนี้ เรียกว่า การสปาร์คแบบ โกลว์

2.1.4 การสปาร์คแบบอาร์ค (Arc Discharge)

หลังจากที่ประจุไฟฟ้าที่สะสมอยู่ระหว่างขั้วถูกปลดปล่อยออกมา และการสปาร์คแบบ โกลว์ได้มีขนาด กระแสไฟฟ้าค่าสูงสุดแล้ว การสปาร์คจะเข้าสู่ขั้นตอนสุดท้าย สภาพการสปาร์ค เช่นนี้จะเกิดขึ้นในลักษณะที่ควบคุม ไม่ได้ ซึ่งเป็นสภาพที่ไม่เหมาะกับการขึ้นรูปด้วยวิธีการสปาร์ค ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องควบคุมพลังงานหรือ ระยะก่อนที่จะเข้าสู่สภาวะการสปาร์คแบบอาร์คนี้

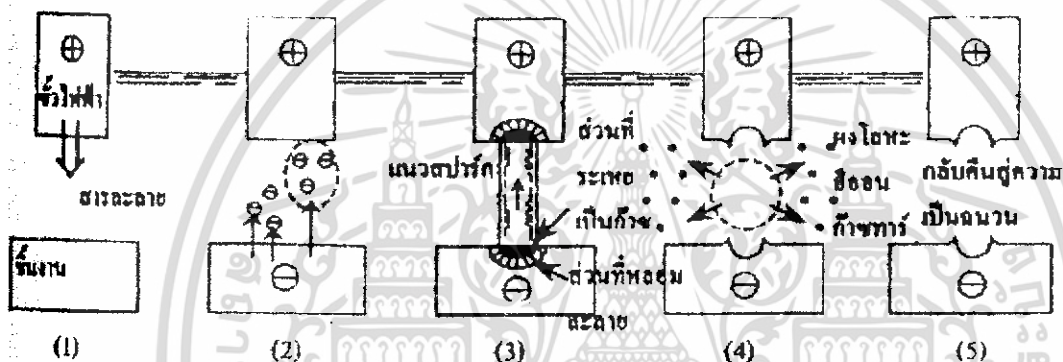
การสปาร์คที่เป็นประกายไฟ โดยทั่วไปแล้วนั้นเป็นการสปาร์คซึ่งเกิดขึ้นทุกขั้นตอน ตั้งแต่สภาพที่กระแส เริ่มไหล จนถึงสภาวะสปาร์คแบบการอาร์ค ภายในช่วงระยะเวลาที่สั้นมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

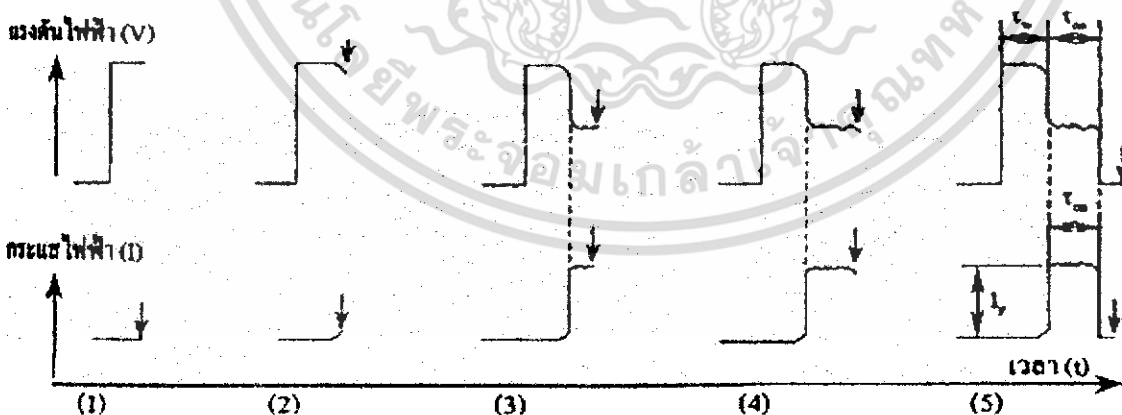
2.2 หลักการของกรรมวิธีขึ้นรูปด้วยเครื่องอีดีเอ็ม

กรรมวิธีการขึ้นรูปด้วยเครื่องอีดีเอ็ม ในทางปฏิบัติจะทำงานภายในสารละลาย โดยใช้ทองแดง ทองเหลือง กราไฟต์ เป็นขั้วไฟฟ้าและวัตถุที่นำมาขึ้นรูปได้จะไม่เกี่ยวกับความแข็งเพียงแต่ต้องเป็นวัตถุที่ไฟฟ้าไหลผ่านได้ จะไม่ปัดออกกระแสไฟฟ้าไหลอย่างต่อเนื่องเหมือนกับการเชื่อมแต่ต้องใช้วิธีการเปิด/ปิด กระแสไฟฟ้าเป็นช่วงจังหวะ เพื่อป้องกันไม่ให้ความร้อนจากการสปาร์คหลอมละลายวัสดุมากเกินไปจนเสียรูปทรง เครื่องอีดีเอ็มอาศัยการใช้พลังงานระดับสูงซึ่งปลดปล่อยออกมาในช่วงสั้นมาก ดังนั้นปัญหาที่สำคัญมาก คือทำอย่างไรจะทำให้เกิดการสปาร์คที่เป็นประกายไฟอย่างมีเสถียรภาพและมีประสิทธิภาพสูง

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



รูปที่ 2.3 สภาพของลำดับการสปาร์คในแต่ละครั้ง (Inonue, K., 1977)



รูปที่ 2.4 รูปร่างคลื่นของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในการขึ้นรูปด้วยเครื่องอีดีเอ็ม (Inonue, K., 1977)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 โหลดแรงดันไฟฟ้า

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

2.2.2 การสูญเสียความเป็นฉนวน

เมื่อย่นระยะระหว่างขั้วใกล้กันเรื่อย ๆ จนถึงระยะหนึ่ง (ระยะทางเป็นไมโครเมตร) สารละลายจะเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวนออกจนประจุลบจะถูกดึงไปอีกฝั่งที่เป็นบวก คือ เริ่มมีกระแสไหล

2.2.3 สปาร์คหลอมละลาย

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

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

2.2.4 เย็นตัว

ความดันที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้ส่วนที่หลอมละลายของชิ้นงานหลุดกระเด็นไป ซึ่งเมื่อถูกสารละลายรอบข้างดูดความร้อนออกไปก็จะเริ่มเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วกลายเป็นเศษผงชิ้นเล็ก ๆ ในช่วงที่เกิดการสปาร์คอยู่นั้นกระแสไฟฟ้าจะไหลอยู่ในระดับค่าหนึ่งแต่พอพลังงานที่สะสมอยู่ในระหว่างนั้นถูกปลดปล่อยออกมาแรงดันไฟฟ้าจะต่ำลงอย่างรวดเร็ว

2.2.5 กลับคืนสู่ความเป็นฉนวน

หลังจากที่การสปาร์คหนึ่งครั้งได้จบลงกระแสไฟฟ้าจะกลับกลายเป็นศูนย์ และจะรอจนกว่าสารละลายจะกลับคืนสู่ความเป็นฉนวนโดยไม่มีการแรงดันไฟฟ้าเข้าไป การรอในช่วงนี้จะช่วยป้องกันการเกิดสปาร์คแบบผิดปกติ เช่น การสปาร์คซ้ำหรือสปาร์คเป็นบางจุดอันเนื่องจากการสะสมหรือทับถมจับตัวกันของอิเล็กตรอนที่ตกค้างระหว่างขั้วหรือเศษผงที่เกิดจากการสปาร์ค ภายหลังจากที่กลับคืนสู่ความเป็นฉนวนแล้วก็จะทำการสปาร์คเช่นเดิมอีก โดยเริ่มต้นขึ้นตอนที่หนึ่งใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.6 ประโยชน์ของกรรมวิธีอีดีเอ็ม

1. ความสามารถในการแปรรูปโลหะแข็งหรือโลหะผสม ซึ่งไม่สามารถทำได้โดยวิธีธรรมดา กรรมวิธีอีดีเอ็ม จึงมีบทบาทสำคัญในการทำแม่พิมพ์ และเครื่องมือที่ทำจากโลหะแข็ง ทั้งสแตนคาร์ไบด์ สเตลโลท์

2. ความสามารถในการผลิตชิ้นรูปร่างใด ๆ ก็ได้ เนื่องจากการกัดเนื้อโลหะอาศัยการสปาร์ค จึงไม่ต้องการความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงาน นอกจากอิเล็กโทรดเคลื่อนที่ลงมาในชิ้นงานเท่านั้น ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะแปรรูปโลหะรูปร่างใดๆ โดยใช้เพียงหนึ่งอิเล็กโทรด

3. พื้นผิวจากกรรมวิธีอีดีเอ็มมีลักษณะเป็นหลุมจำนวนมาก จึงช่วยให้สามารถเก็บรักษาน้ำมันหล่อลื่นได้ดี จึงช่วยลดปัญหาเกี่ยวกับการหล่อลื่นได้

4. ในระหว่างทำการแปรรูปชิ้นงานจะไม่มีมีการเปลี่ยนรูปร่าง เนื่องจากไม่มีแรงจากการสัมผัสของอิเล็กโทรด หรือไม่มีแรงทางกล ทำให้สามารถแปรรูปชิ้นงานที่บอบบางหรือเปราะได้

5. แม้กรรมวิธีอีดีเอ็มจะมีผลกระทบของความร้อน แต่เป็นผลกระทบเฉพาะที่ไม่ได้มีผลกระทบต่อวัสดุส่วนใหญ่

2.2.7 การแบ่งประเภทของกรรมวิธีอีดีเอ็ม (Categories of EDM)

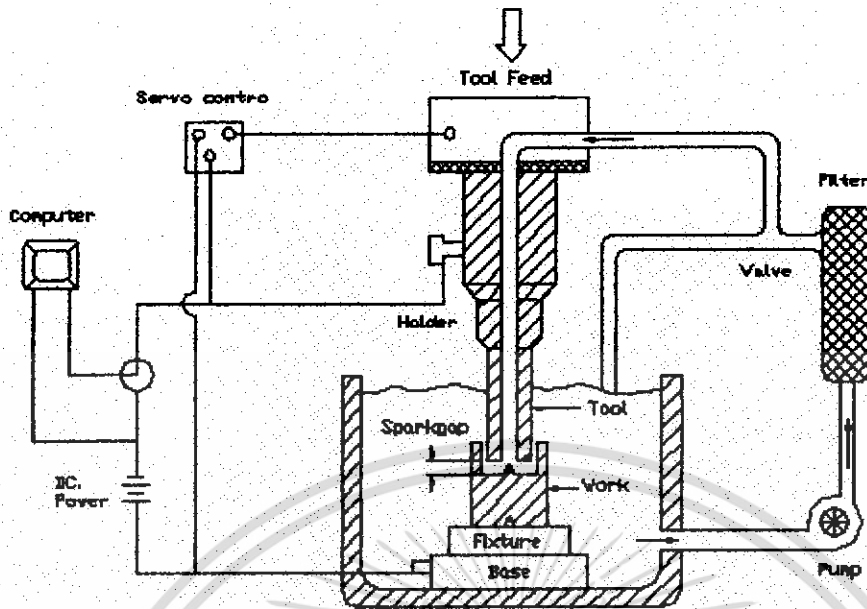
การแปรรูปโลหะ โดยอาศัยการสปาร์คสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท

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

2.2.8 อุปกรณ์ของกรรมวิธีอีดีเอ็ม

กรรมวิธีอีดีเอ็มจะเกี่ยวข้องกับการใช้ความร้อนที่มีความเข้มสูง ทำให้โลหะชิ้นงานหลอมละลายหรือกลายเป็นไอเฉพาะที่ จะมีอุปกรณ์ประกอบดังนี้

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



รูปที่ 2.5 หลักการทำงานของระบบอีดีเอ็ม

1. แหล่งจ่ายไฟทำหน้าที่ผลิตพลังงานคิสซาร์จเพื่อใช้ในการแยกอนุภาคโลหะ
2. ระบบโคอีเล็กตริก ทำหน้าที่เป็นฉนวน พัดพาเศษอนุภาคโลหะและระบายความร้อนที่เกิดขึ้น
3. อิเล็กโทรด ทำหน้าที่เป็นตัวสร้างแบบให้กับชิ้นงานหรือกัดเจาะโลหะงาน
4. ระบบเซอร์โว ทำการควบคุมการป้อนอิเล็กโทรด เพื่อรักษาระยะช่องว่างของคิสซาร์จให้คงที่ ดังนั้นกำลังงานเฉลี่ยจะลดลงโดยตัวประกอบช่วงเวลาประวิง และสัมพันธ์กับการเกิดลัดวงจร และกำลังงานเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นกับตัวประกอบหน้าที่กระแสพัลส์ กระแสเฉลี่ยจะลดลงโดยตัวประกอบหน้าที่ช่วงเวลาประวิง

2.3 ระบบโคอีเล็กตริก (Dielectric System)

ระบบโคอีเล็กตริกประกอบด้วย สารโคอีเล็กตริก ท่อส่ง มีม เครื่องกรอง และถังบรรจุสารโคอีเล็กตริก สารโคอีเล็กตริกมีหลายชนิด แต่ที่นิยมใช้กันมากคือน้ำมันไฮโดรคาร์บอน (น้ำหนัก 30 - 50) น้ำมันซิลิกอน และน้ำกำจัดไอออน น้ำกำจัดไอออนจะใช้ไม่มาก แม้ว่าจะมีอัตราการกัดเนื้อโลหะสูง และมีความสามารถหล่อเย็น แต่การสึกหรอของอิเล็กโทรดในการเจาะรู เมื่อทำงานเสร็จต้องตัดปลายลวดออกแล้วจึงเริ่มเจาะรูใหม่ได้ การใช้น้ำกำจัดไอออนใช้มากในกรรมวิธีของ Wire-EDM

2.3.1 หน้าที่ของสารโคอีเล็กตริก

1. ฉนวน (Insulation) จุดประสงค์หลักของสารโคอีเล็กตริก คือทำหน้าที่เป็นฉนวนระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงาน การคิสซาร์จไม่ควรจะเกิดขึ้นจนกว่าระยะช่องว่างจะน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้เพื่อให้ได้ความละเอียดถูกต้องมากที่สุด

2. ไอออน (Ionisation) สารโคอิเล็กตริกควรที่จะสร้างเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการเกิดดิซชาร์จเร็วที่สุด และเมื่อสวิตช์ออฟ (off) สารโคอิเล็กตริกจำเป็นต้องกำจัดไอออนในเส้นทางดิซชาร์จเพื่อให้เกิดการดิซชาร์จใหม่ในตำแหน่งอื่นต่อไป

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

4. พัดพาอนุภาคโลหะอนุภาคโลหะ จากกระบวนการอีทีเอ็มในช่องว่างดิซชาร์จจะถูกสารโคอิเล็กตริกพัดพาออกมา จึงช่วยกระบวนการให้ดำเนินไปได้ตามปกติมีประสิทธิภาพ ถ้าการไหลพัดพาอนุภาคโลหะไม่ก็จะทำให้เกิดการหยุดนิ่งของสารโคอิเล็กตริก ทำให้มีอนุภาคโลหะตกค้างในช่องว่างและอาจจะเกิดการลัดวงจรได้ เนื่องจากสารโคอิเล็กตริกที่ใช้งานแล้วต้องผ่านการทำความสะอาดโดยเครื่องกรอง กรองเอาอนุภาคโลหะออกจากสารโคอิเล็กตริกแล้วจึงนำกลับมาใช้งานใหม่ต่อไป

2.3.2 ประเภทของสารโคอิเล็กตริก

2.3.2.1 น้ำกำจัดไอออน

สารละลายน้ำหรือน้ำในสภาวะปกติจะมีไอออนผสมอยู่มาก จึงมีค่าความต้านทานต่ำ ดังนั้นเวลาที่จะแปรรูปโลหะจึงต้องผ่านกระบวนการทำให้มีความต้านทานสูงขึ้น เนื่องจากมีค่าความต้านทานต่ำกว่าน้ำมัน จึงทำให้กระแสไฟฟ้าโดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้น ความเร็วในการกัดโลหะจึงสูงกว่าน้ำมันประมาณ 2 – 10 เท่า แต่คุณภาพผิวงานจะหยาบปกติแล้วน้ำจะใช้เป็นสารโคอิเล็กตริกในเครื่องอีทีเอ็มประเภทคัดด้วยเส้นลวด

2.3.2.2 ไฮโดรคาร์บอน ที่นิยมใช้กันมีหลายชนิดคือ

1. น้ำมัน (Oils) ที่ใช้กันมากได้แก่น้ำมันแร่ (Mineral) ซึ่งให้ผลลัพท์ดี น้ำมันแร่จะไม่มี Aromatics หรือสารเพิ่มเติมอื่น ๆ ความหนืดของน้ำมันเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ เช่น น้ำมันที่มีความหนืดสูงจะไม่เหมาะสมกับงานขั้นตอนการกัดผิวสำเร็จเนื่องจากชั้นคอนนี้ต้องตั้งช่องว่างแคบลง จึงทำให้น้ำมันที่มีความหนืดสูงไหลเวียนได้ยากขึ้นในช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงาน สำหรับขั้นตอนการกัดหยาบจะใช้น้ำมันเตาเป็นสารโคอิเล็กตริก จุดวาบไฟของสารโคอิเล็กตริกก็มีความสำคัญ เพราะถ้าจุดเดือดต่ำ แนวน้ำมันที่จะกลายเป็นไอจะเกิดขึ้นได้ง่าย ทำให้เกิดแก๊สปริมาณมาก จึงต้องลดความเร็วการแปรรูปลง

2. น้ำมันก๊าด (Kerosene) มีความหนืดต่ำ ทำให้เหมาะกับขั้นตอนการกัดละเอียดและละเอียดมาก และนำไปใช้กับการแปรรูปโลหะทั้งสเตนคาร์ไบด์ เมื่อตั้งช่วงพัลส์และเมื่อต้องการกำจัดกลิ่นที่เกิดจากสารที่แตกตัว นอกจากนี้ยังมีน้ำมันอื่น ๆ อีกเช่น น้ำมันจักร (Spindle Oil) น้ำมันเครื่องกล (Machine Oil)

น้ำมันที่มีจุดวาบไฟสูงและจุดติดไฟสูงนิยมนำมาใช้งาน น้ำมันชนิดคอนจึงเป็นประโยชน์ในแง่คั้นและการขนถ่ายก็ปลอดภัยด้วย สารโคอิเล็กตริกต้องไม่เป็นอันตรายต่อผิวหนังและเสื้อผ้า แก๊สที่เกิดจากการแตกตัวทางความร้อนต้องไม่เป็นอันตราย โดยทั่วไปแก๊สจะค่อย ๆ ปรากฏขึ้นโดยดิซชาร์จในของเหลวไฮโดรคาร์บอน ส่วนใหญ่ได้แก่ อะเซทิลีน (C_2H_2) แอททิลีน (C_2H_4) มีเทน (CH_4) และไฮโดรเจน จึงต้องมีเครื่องมือตรวจแก๊สเพื่อความปลอดภัย

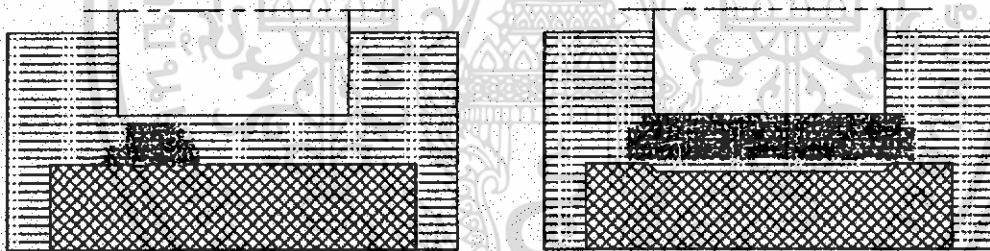
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 คุณสมบัติของสารโคอิเล็กทริก

- มีความหนืดต่ำ
- มีจุดเดือดสูง และจุดวาบไฟสูง
- มีคุณสมบัติความเป็นฉนวนสูง
- ไม่เป็นอันตรายต่อร่างกายและผิวหนัง
- ต้องไม่เกิดแก๊สที่เป็นอันตรายจากการแตกตัวหรือสลายตัวเนื่องจากความร้อน
- ไม่กัดกร่อนชิ้นงาน
- มีความสามารถในการระบายความร้อนได้ดี
- มีราคาถูกหรือประหยัด

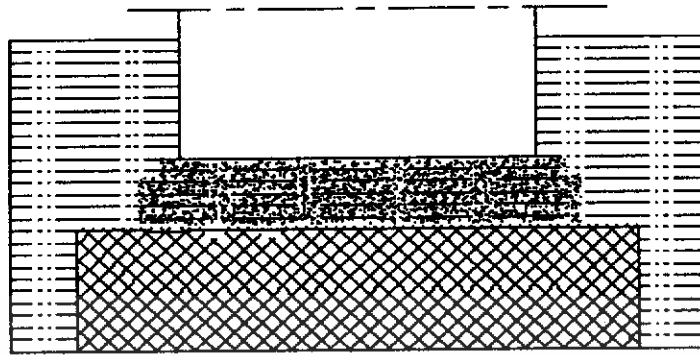
2.4 ระบบการไหลของโคอิเล็กทริก (Flushing)

การไหลที่ถูกต้องของสารโคอิเล็กทริกระหว่างอิเล็กโทรดและชิ้นงาน จะทำให้การทำงานของระบบอีซีเอ็มมีประสิทธิภาพ ถ้าหากกรรมวิธีอีซีเอ็มไม่ใช้ระบบการไหลของสารโคอิเล็กทริกจะมีผลกระทบดังนี้ ในตอนเริ่มต้นแรก สารโคอิเล็กทริกยังสะสมอยู่ ไม่มีอนุภาคโลหะและคาร์บอนที่เกิดจากการแตกตัวของโคอิเล็กทริก ทำให้ความคงทนต่อการเป็นฉนวนสูงกว่าโคอิเล็กทริกที่มีอนุภาคโลหะ ทำให้มีการประวิงก่อนที่ความเป็นฉนวนจะสิ้นสุดลง และเริ่มเกิดดิสชาร์จ อนุภาคโลหะที่เกิดจากดิสชาร์จในตอนแรกจะให้ความคงทนต่อการเป็นฉนวนของ โคอิเล็กทริกครั้งต่อมาลดลง และสามารถทำให้เกิดดิสชาร์จง่ายขึ้น



รูปที่ 2.6 การสะสมของอนุภาค โลหะในช่องว่างเมื่อไม่ใช้ระบบการไหลของโคอิเล็กทริก

ถ้าหากความหนาแน่นของอนุภาคโลหะในช่องว่างมีมากขึ้น ก็จะทำให้เกิดการสะสมของอนุภาคโลหะก่อรูปเป็นสะพานตัวนำไฟฟ้า ทำให้เกิดการดิสชาร์จที่ผิดปกติไปหรือเกิดการอาร์คขึ้น ทำให้ผิวของชิ้นงานและอิเล็กโทรดถูกทำลาย ด้วยเหตุนี้เองจึงต้องขจัดอนุภาคโลหะออกไปจากช่องว่างโดยระบบการไหลของโคอิเล็กทริกเข้าไปในช่องว่าง



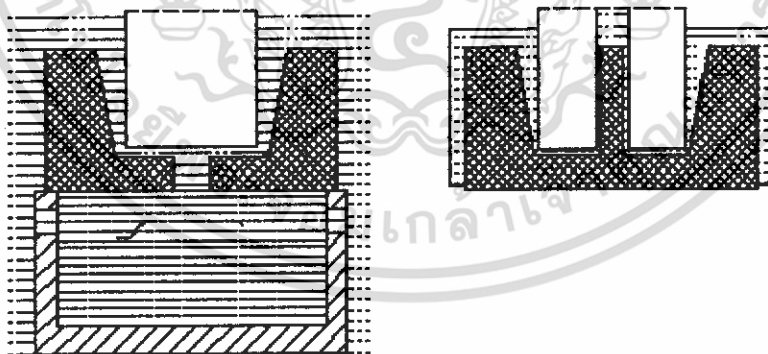
รูปที่ 2.7 อนุภาคโลหะก่อตัวเป็นสะพานตัวนำไฟฟ้า

2.4.1 ระบบการไหลของไดอิเล็กตริกในกรรมวิธีซีเอ็ม

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

2.4.1.1 การไหลแบบฉีด

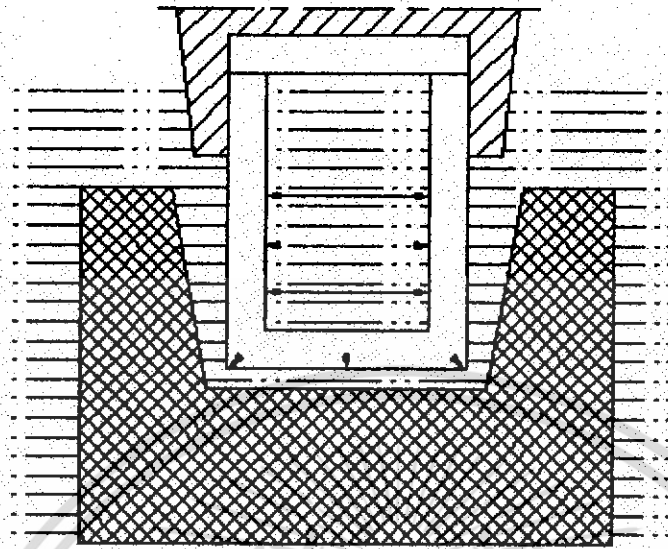
การไหลแบบนี้ ไดอิเล็กตริกจะถูกฉีดเข้าไปในบริเวณช่องว่างของชิ้นงานและอิเล็กโทรด



รูปที่ 2.8 การไหลของไดอิเล็กตริกแบบฉีด

การไหลของไดอิเล็กตริกแบบฉีดจะใช้กับชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นเรียวหรือใช้กับอิเล็กโทรดที่มีลักษณะแนวตั้งคดๆ สำหรับลักษณะของเรียวที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากการคดซาร่งทางด้านข้างของอิเล็กโทรด ระบบการไหลที่ดีจะทำให้สามารถเจาะรูลึก ๆ ได้โดยใช้อิเล็กโทรดกราไฟท์ตั้งความดันของไดอิเล็กตริกให้สูงขึ้นและไหลเข้าไปในแก่งของอิเล็กโทรดกราไฟท์ รูปทรงของกราไฟท์จะทำให้ไดอิเล็กตริกไหลผ่านออกมายังบริเวณช่องว่างได้

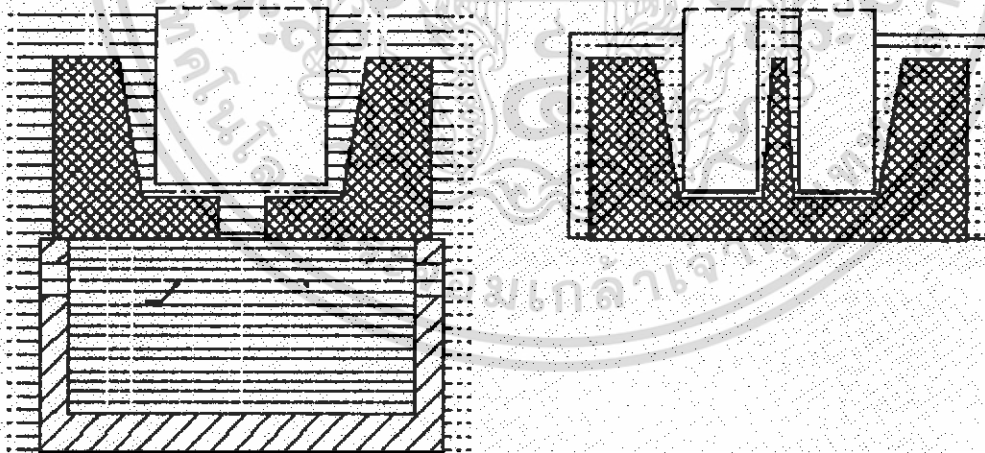
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 ใค้เหล็กทริกไหลผ่านรูพูนกรราไฟท์ออกมาที่บริเวณช่องว่าง

2.4.1.2 การไหลแบบคูด

การไหลแบบนี้ใค้เหล็กทริกจะถูกคูดออกผ่านรูของชิ้นงาน หรือรูของอิเล็คโทรด เมื่อเปรียบเทียบกับกรไหลแบบฉิดจะเห็นว่าแบบคูดหลักเลียงผลกระทบของเรียวจากการเกิดคิตซาร์จทางค้ำข้างของอิเล็คโทรด รูที่เจาะจึงเป็นทรงกระบอกกลม ความคั้นของการคูดสูญญากาศค้อง ไม่นานกว่า 0.8-0.9 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร



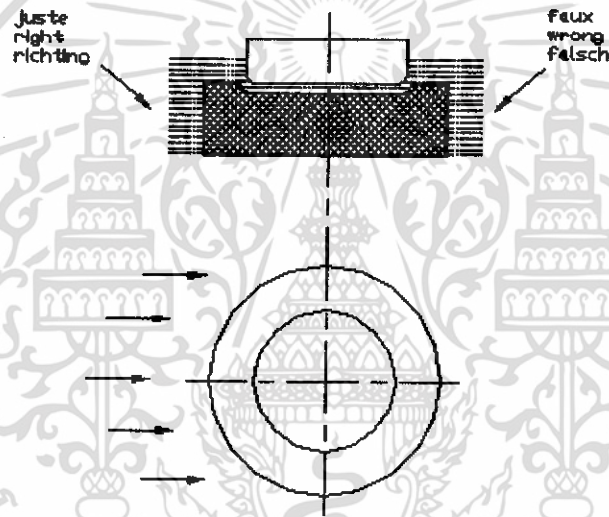
รูปที่ 2.10 การไหลของใค้เหล็กทริกแบบคูด

กรใช้งานของการไหลแบบคูดจะสามารถใช้ลักษณะเดียวกับกรไหลแบบฉิด แต่กรไหลแบบคูดนิยมให้ใค้เหล็กทริกไหลผ่านอิเล็คโทรดมากกว่าที่จะผ่านชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1.3 การไหลด้านข้าง

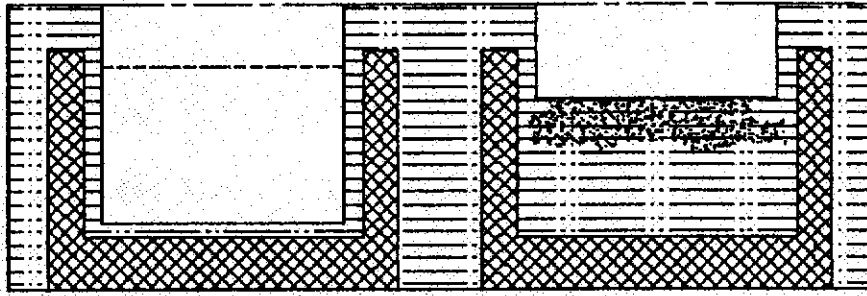
วิธีนี้จะใช้เมื่อไม่สามารถเจาะรูของอิเล็กโทรดหรือชิ้นงานได้ เช่นกรณีของแม่พิมพ์บีบเหรียญ ร่องลึกที่แคบของแบบหล่อพลาสติก จึงต้องให้การไหลของโคอิเล็กตริกกระทำทางด้านข้าง โดยการใช้หัวฉีด ซึ่งต้องระมัดระวังในการปรับให้พื้นผิวของการทำงานของอิเล็กโทรดมีการไหลที่เท่า ๆ กัน สำหรับเทคนิคนี้จะใช้ร่วมกับการกระเพื่อมของอิเล็กโทรด เพื่อช่วยให้การไหลดีขึ้น เมื่อทำการแปรรูปพื้นผิวหน้าเรียบ ทิศทางการไหลของโคอิเล็กตริกจะต้องสอดคล้องกับมุมฉีดโคอิเล็กตริกเข้า สำหรับแม่พิมพ์บีบเหรียญเมื่อรูปแบบตามยาวไม่เรียบจะต้องใช้หัวฉีดแบบพิเศษมาใช้ และเมื่อทิศทางการไหลของโคอิเล็กตริกไม่ขนานกับด้านข้างของอิเล็กโทรด จะทำให้การไหลปั่นป่วนขึ้น ดังนั้นจะมีโคอิเล็กตริกจำนวนน้อยเข้าไปภายในช่องว่างเท่านั้นจึงทำให้ระบบการไหลไม่ดี แต่ถ้าการไหลของโคอิเล็กตริกมีทิศทางเข้าไปในช่องว่างโดยตรง จะทำให้ปริมาณของโคอิเล็กตริกเข้าไปจำนวนมาก ทำให้การไหลมีประสิทธิภาพดีขึ้น ระบบการไหลทางด้านข้างจะไม่ใช้พร้อมกันทั้งสองด้านของอิเล็กโทรด เพราะจะทำให้อนุภาคโลหะที่บริเวณส่วนล่างของชิ้นงานไม่สามารถจะถูกขับออกมาจากช่องว่างได้



รูปที่ 2.11 การไหลของโคอิเล็กตริกทางด้านข้าง

2.4.1.4 การไหลที่ใช้การขึ้น-ลงของอิเล็กโทรด

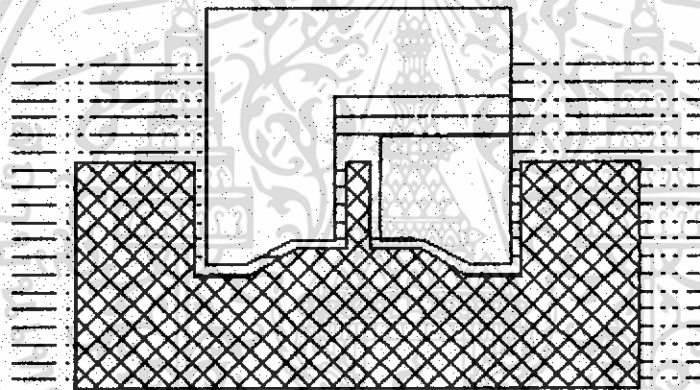
การไหลของโคอิเล็กตริกแบบนี้จะอาศัยการยกขึ้น-ลงของอิเล็กโทรด เมื่ออิเล็กโทรดถูกยกขึ้นจะทำให้ช่องว่างกว้างขึ้น โคอิเล็กตริกที่สะสมจะถูกดูดเข้าไปผสมกับอนุภาคโลหะ และเมื่ออิเล็กโทรดเคลื่อนที่ลง อนุภาคโลหะก็จะถูกขับออกไป วิธีการนี้จะใช้กับชิ้นงานที่มีความลึก และในระบบการไหลต้องไม่มีความดัน



รูปที่ 2.12 การไหลของคอนกรีตเสริมเหล็กโดยอาศัยการขึ้น-ลงของเหล็กโครง

2.4.1.5 การไหลแบบฉีดพร้อมกับการยกเหล็กโครงขึ้น

เมื่อทำการแปรรูปโลหะโดยใช้เหล็กโครงชนิดโลหะจะเห็นความผิดปกติของเหล็กโครงที่ใช้ในระบบการไหลแบบฉีด มีการตีกรอมมาก และเพิ่มขึ้นตามความดันในบริเวณที่ฉีด



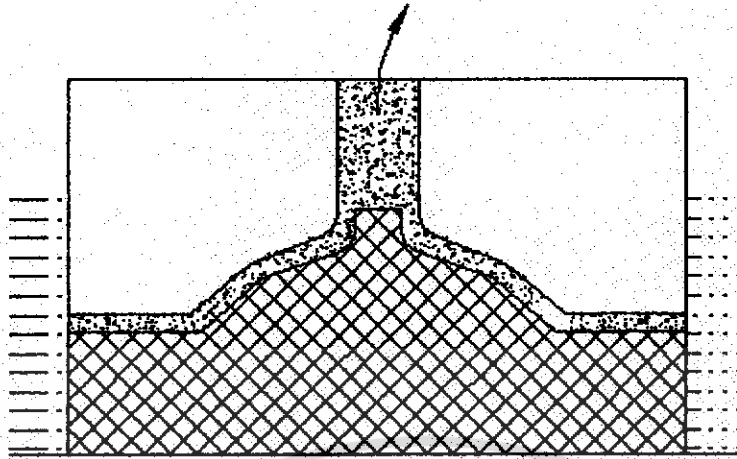
รูปที่ 2.13 การไหลแบบฉีดพร้อมกับการเลื่อนเหล็กโครงขึ้น

การที่จะป้องกันการตีกรอมที่เกิดจากความดันจะใช้วิธีการฉีดคอนกรีตเข้าไปในช่องว่าง ในขณะที่เดียวกันเหล็กโครงก็เคลื่อนที่ขึ้นด้วย

2.4.2 ปัญหาแก๊ส (Gas Problem)

ในระบบการไหลแบบฉีดระหว่างการแปรรูปจะมีการสะสมของแก๊ส ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการระเบิดและจะทำให้รันทันเลื่อนได้ จึงต้องระมัดระวังไม่ให้เกิดขึ้น ที่สำคัญคือต้องหลีกเลี่ยงแนวโน้มที่จะเป็นสาเหตุของการระเบิด เช่น แก๊ส อากาศ ดังนั้นก่อนจะเริ่มทำการแปรรูป ต้องมั่นใจว่าภายในอุปกรณ์ฉีดมีคอนกรีตเต็ม และภายในถังบรรจุมีคอนกรีตตามที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 การเจาะรูเล็กโทรคเพื่อระบายแก๊สที่เกิดขึ้น

กำหนด เพื่อป้องกันป๊อปไม่ให้อุณหภูมิอากาศเข้าไป เพื่อที่จะลดปริมาณการสะสมของแก๊สในอุปกรณ์ ต้องพยายามให้ทางออกของอุปกรณ์อยู่ในจุดที่สูงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เมื่อทำการแปรรูปด้วยอิเล็กทรอนิกส์แบบเว้าเข้า จะทำให้มีการสะสมของแก๊สภายในส่วนที่เว้า นั้น จึงต้องทำการเจาะรูเล็กโทรคเพื่อระบายแก๊สออกไป

2.5 ระบบเซอร์โว (Servo System)

ระบบเซอร์โวคือระบบควบคุมบังคับกลไกการป้อนอิเล็กทรอนิกส์ โดยอาศัยสัญญาณความแตกต่างของโวลต์ เทจจากช่องว่างคิซาร์จกับ โวลต์เทจอ้างอิงเป็นตัวเปรียบเทียบ เพื่อทำการควบคุมกลไกการป้อนอิเล็กทรอนิกส์ให้เหมาะสมกับอัตราการกัดเนื้อ โลหะงาน

เนื่องจากช่องว่างจะมีเศษอนุภาคโลหะจากการคิซาร์จ แก๊สและทาร์ที่เกิดจากการแตกตัวของโคอิเล็กทริก เนื่องจากความร้อน จะทำให้การเกิดคิซาร์จครั้งต่อไปขาดเสถียรภาพและอาจทำให้เกิดลัดวงจร การสัมผัสโดยตรงระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงานจะทำให้เกิดการลัดวงจรด้วย ทำให้การคิซาร์จขาดหายไป ประสิทธิภาพการกัดจะจึงลดลง เมื่อช่องว่างมีความห่างพอเหมาะ ปริมาณการกัดเนื้อโลหะจะคงที่ แต่เมื่อช่องว่างแคบลงพลั้งงานคิซาร์จที่ช่องว่างก็จะลดลง ทำให้ประสิทธิภาพการกัดเนื้อโลหะต่ำลง

เพื่อที่จะรักษาการกัดเนื้อโลหะให้เหมาะสม จะต้องทำการควบคุมกลไกการป้อนอิเล็กทรอนิกส์ให้มีระยะช่องว่างคงที่ ในขณะที่เดียวกันก็ป้องกันการสัมผัสระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงาน ขณะที่อิเล็กโทรดและชิ้นงานจะสึกไปด้วย เนื่องจากช่องว่างนี้จะแคบมากจึงไม่สามารถรักษาให้คงที่ได้ตามสัดส่วนของการสึก ดังนั้นการป้อนอิเล็กทรอนิกส์จะใช้ระบบควบคุมแบบ Adaptive Control

2.5.1 ระบบควบคุมการป้อนอิเล็กทรอนิกส์ในกรรมวิธีอีดีเอ็ม

1. ควบคุมการป้อนอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้โซลินอยด์
2. ควบคุมการป้อนอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้เซอร์โวไฟฟ้า
3. ควบคุมการป้อนอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้เซอร์โวไฮดรอลิก

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

2.6 ความสำคัญของความหยาบผิว

ความสำคัญของความหยาบผิวมีส่วนสำคัญต่อคุณภาพสูงสุดและความน่าเชื่อถือสูงสุดของผลิตภัณฑ์ เมื่อนำไปใช้งานผลของความเรียบของผิวงานสำเร็จมีส่วนสำคัญโดยค่าความเรียบผิว (Surface Roughness) จะมีผลหรือสามารถวิเคราะห์หาผลของกรรมวิธีการผลิต เช่น การควบคุมสภาพแวดล้อม ผลของประสิทธิภาพการทำงาน มองผ่านชิ้นงานที่เข้าสู่หรือที่ผ่านการผลิตเสร็จสิ้น ความเหมาะสมของขบวนการผลิต ที่จะทำให้สภาพแวดล้อมการผลิตเหมาะสมต่องาน ขนาดจริงแท้จริงของชิ้นงาน หลังจากชิ้นงานผ่านการใช้งานไประยะเวลาหนึ่งค่าความเรียบผิวที่เหมาะสมและค่าคุณสมบัติของผิว (Surface Parameter) และวิธีการผลิตที่ถูกต้อง จะทำให้ต้นทุนการผลิตลดลง หรือไม่สูงเกินไป จากการออกแบบขั้นตอนการผลิตที่เหมาะสมถูกต้อง เนื่องจาก การมีความเข้าใจอย่างถูกต้องต่อรูปทรงแบบต่าง ๆ ของคุณสมบัติของผิวและวิธีการวัดผิวและวิเคราะห์จะทำให้ผู้ออกแบบสามารถเลือกกำหนดค่าและวิธีการวัดความหยาบที่เหมาะสม ซึ่งไม่เพียงแต่จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ แต่จะทำให้เกิดขบวนการผลิตที่เหมาะสมและต้นทุนการผลิตที่ถูกต้อง

2.6.1 ความหยาบผิว

ความหยาบผิว (Surface Roughness) คือ ความหยาบผิวที่ได้จากชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแปรรูป เช่น งานกลึง งานกัด งานไส เป็นต้น ผ่านการตรวจจะสังเกตได้ว่าชิ้นงานขรุขระเป็นลอนคลื่น ชิ้นที่ลอนคลื่นสูงแสดงว่าชิ้นงานดังกล่าวมีผิวหยาบ ส่วนที่ลอนคลื่นต่ำแสดงว่าผิวชิ้นงานนั้นเรียบ ความหยาบผิวชิ้นงานมีผลต่อการใช้งานอย่างมาก เมื่อการผลิตมีคุณภาพผิวชิ้นงานไม่ตรงกับสภาพที่แท้จริงขณะทำงาน จะทำให้อายุการใช้งานของชิ้นงานสั้นลงหรือชิ้นงานบางชิ้นที่ผลิตขึ้นมาผิวที่ละเอียด แต่สภาพใช้งานจริงไม่จำเป็น เพราะจะทำให้เสียเวลาในการทำงานโดยเปล่าประโยชน์

หากนำเอาผิวของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแปรรูป โดยชิ้นงานได้รับการแปรรูปจาก งานกลึง งานกัด งานไส งานเจียรไน งานเลเซอร์ (Laser) และงานอีซีเอ็ม เป็นต้น ผ่านการตรวจด้วยแว่นขยายจะพบว่าผิวของชิ้นงานขรุขระเป็นลอนคลื่นชิ้นงานใดที่มีลอนคลื่นสูงแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานดังกล่าวมีผิวหยาบ ส่วนที่มีลอนคลื่นต่ำแสดงว่าผิวชิ้นงานนั้นเรียบ จะทำให้อายุการใช้งานของชิ้นงานสั้นลง หรือชิ้นงานบางชิ้นที่ผลิตขึ้นมาผิวที่ละเอียด แต่สภาพใช้งานจริงไม่จำเป็น เพราะจะทำให้เสียเวลาในการทำงานโดยเปล่าประโยชน์

2.6.2 การเกิดสภาพของผิว

ภายใต้กระบวนการขึ้นรูปด้วยเครื่องจักร เช่น กลึง กัด ไส บริเวณผิวงานสำเร็จที่มองเห็นและสัมผัสได้นั้นจะเป็นแหล่งที่รวมและสามารถบ่งบอกผลจากแหล่งกำเนิดหลายอย่างปะปนกันอยู่ โดยจะทราบได้ต่อเมื่อได้ทำการตรวจวัดและวิเคราะห์ผิว (Surface Analysis)

ความหยาบผิว (Surface Roughness) จะเกิดขึ้นเมื่อวัตถุถูกกระทำด้วยเครื่องจักร (Machining) โดยจะเกิดรอยทางเดินของเครื่องมือตัด (Tool) บริเวณเนื้อชิ้นงาน หากได้มีการขยายบริเวณพื้นผิวขึ้นมาดูจะพบรอยหยาบ ที่เกิดจากทางเดินของเครื่องมือกำจัดเนื้อวัสดุซึ่งบ่งบอกส่วนประกอบความหยาบผิว (Roughness Component) โดยปัจจัยที่ทำให้เกิดความหยาบผิว (Surface Roughness) ได้แก่ ค่าความเร็วลึกกุ่มตัด (Depth of Cut) และค่าความเร็วรอบ (Speed) และค่าอัตราป้อนชิ้นงาน (Feed Rate) ของเครื่องมือกำจัดเนื้อวัสดุ

2.6.3 ลักษณะการเบี่ยงเบนของผิวชิ้นงาน

การเบี่ยงเบนของผิวชิ้นงานสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่ม คือ บกพร่องทางด้านความราบ การเบี่ยงเบนผิวชิ้นงานที่เกิดจากลอนคลื่น การเบี่ยงผิวจากร่องโค้ง การเบี่ยงเบนผิวชิ้นงานจากแอ่งหรือรอยแตกเป็นจุดหยาบ ดังตารางที่ 2.1 แสดงลักษณะการเบี่ยงเบนของผิวชิ้นงานซึ่งบอกสาเหตุต่างๆที่ทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของผิวชิ้นงาน

2.6.3.1 บกพร่องทางด้านความราบ ความกลม

บกพร่องทางด้านความราบ ความกลม (Form Error) อีกส่วนประกอบหนึ่งของความหยาบผิวตัวอย่างเช่น เกิดจากการที่รางจับเคลื่อน หรือรางที่รองรับชุดเคลื่อนที่ของป้อนมีคเกิดการสึกหรอ ค่าความตรง (Straightness) ลดลง ผลที่ได้มักจะเป็นคลื่นที่มีช่วงความยาวมากอาจมากกว่าความยาวของรางเคลื่อนที่ โดยจะปรากฏรวมอยู่ในความหยาบผิว

2.6.3.2 การเบี่ยงเบนที่เกิดจากลอนคลื่น

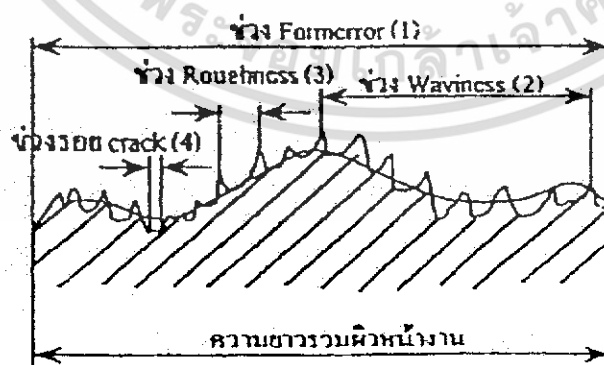
การเบี่ยงเบนที่เกิดจากลอนคลื่น (Waviness) หนึ่งลักษณะผิว คือความเป็นคลื่น (Waviness) ซึ่งมักจะเกิดจากการสั่นสะเทือนจากแหล่งกำเนิดต่าง ๆ โดยรอบ เช่น เครื่องมือไม่ได้วางแน่นป้องกันการสั่นสะเทือน หรือเกิดจากเครื่องเอียง เกิดจากการสึกหรอของลูกปืน (Bearing) คอเครื่อง เกียร์ทด ชุดจับยึด หรือส่วนอื่น ๆ ที่เริ่มสั่นคลอนตามอายุ หรือเวลาที่ใช้งาน ความสั่นสะเทือนเหล่านี้จะปรากฏแผ่อยู่ในลักษณะของผิวงาน

2.6.3.3 การเบี่ยงเบนจากร่องโค้ง

การเบี่ยงเบนจากร่องโค้ง (Roughness) ความหยาบ ความเป็นลอนคลื่น หรือความผิดเพี้ยนของรูปทรงอื่นเกิดขึ้นในระหว่างที่ทำงาน ผสมปนกันอยู่ในภาพของผิวงานที่เห็นหรือสัมผัสได้

2.6.3.4 ความไม่เรียบ ขรุขระเป็นจุดหยาบ

ไม่เรียบขรุขระเป็นจุดหยาบ (Crack) ลักษณะจะคล้ายกับการเบี่ยงเบนจากร่องโค้ง (Roughness) แต่จะมีความหยาบผิวที่มากกว่า



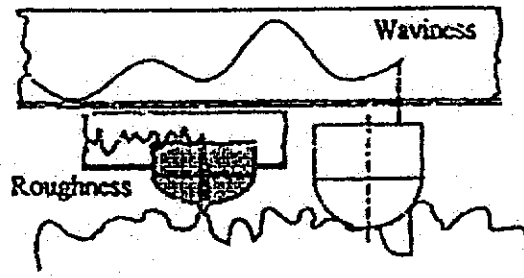
รูปที่ 2.15 ช่วงของการเบี่ยงเบนผิวชิ้นงาน

ตารางที่ 2.1 แสดงลักษณะการเบี่ยงเบนของผิวชิ้นงาน

แสดงการเบี่ยงเบนของผิวชิ้นงาน		ตัวอย่างการเบี่ยงเบนผิวของชิ้นงาน	สาเหตุที่ทำให้เบี่ยงเบน
	Form Error	บกพร่องทางด้านความราบ ความกลม	- ผิดพลาดจากระบบนำ เคลื่อนเครื่องมือ - การ โกงงอของเครื่องมือ หรือชิ้นงาน
	Waviness	การเบี่ยงเบนที่เกิดการลอนคลื่น	- การจับยึดที่เอียงศูนย์ของ ชิ้นงาน - การเบี่ยงเบนจากรูปทรงหรือ การหมุนของคมตัด
	Roughness	การเบี่ยงเบนจากร่อง ไค้	- รูปทรงคมตัด - การตั้งค่าอัตราป้อนชิ้นงาน หรือตั้งค่าความเร็วที่เกินมุด
	Crack	ความไม่เรียบ ขรุขระเป็น จุดหยาบหรือรอยแตก	- การไหลหรือการขาดของ เศษงาน - การเตรียมผิวด้วยกรรมวิธียิง ทราย

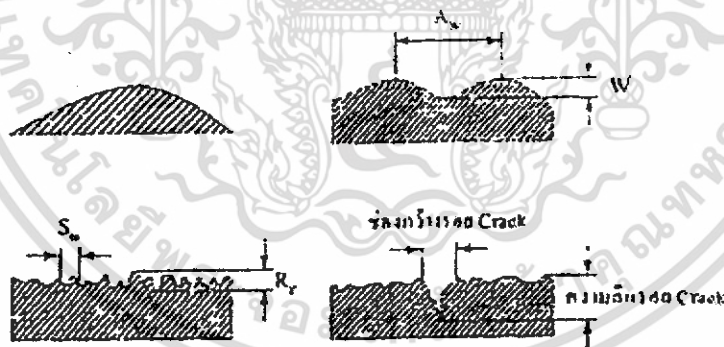
ข้อบกพร่องของผิวหน้าชิ้นงานที่มีขนาดเป็นตัวกำหนดให้มีรูปแบบความเบี่ยงเบนผิวชิ้นงานแบบต่าง ๆ ดังรูป 2.15 ช่วงการเบี่ยงเบนซึ่งจะแสดงให้เห็นลักษณะของช่วงความเบี่ยงเบนผิวชิ้นงานแบบต่างๆจากตารางที่ 2.1 แสดงลักษณะการเบี่ยงเบนของผิวชิ้นงานในแบบรูปบกพร่องทางด้านความราบความกลม (Form Error) และรูปแบบการเบี่ยงเบนที่เกิดจากลอนคลื่น (Waviness) เป็นไปในลักษณะมหภาค (Macro) ส่วนการเบี่ยงเบนผิวชิ้นงานรูปแบบ การเบี่ยงเบนจากร่อง ไค้ (Roughness) และรูปแบบ ไม่เรียบขรุขระเป็นจุดหยาบ (Crack) เป็นไปในลักษณะจุลภาค (Micro) ซึ่งมีช่องหรือช่องความหยาบแคบมาก ดังนั้นการวัดตรวจสอบเพื่อหาค่าที่ต้องการต้องใช้อุปกรณ์เครื่องวัดความหยาบผิว ซึ่งมีหลักการและส่วนประกอบเบื้องต้นในรูปที่ 2.16 ซึ่งเป็นลักษณะของหัวลากกับหัวสัมผัสของเครื่องวัดความหยาบที่ใช้ในการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 ลักษณะความแตกต่างระหว่างห้วงลาก (รูปด้านขวา) กับห้วงสัมผัส (รูปด้านซ้าย)

ข้อบกพร่องผิวหน้าชิ้นงานเกิดมาจากกรรมวิธีการผลิตชิ้นงานผิวหน้ามักจะมีการเบี่ยงเบนตลอดเวลาที่ทำการผลิตชิ้นงาน จากความคิดที่เกี่ยวกับรูปทรงต่าง ๆ ทางเรขาคณิต ซึ่งข้อเท็จจริงทั้งหลายความเบี่ยงเบนจากรูปแบบไม่เป็นจริงของผิวชิ้นงานเหตุนี้ผิวชิ้นงานเป็นเรื่องสำคัญ ดังนั้นที่ของชิ้นส่วนจักรกลพฤติกรรมการกัดกร่อนความสามารถในการแบ่งชั้น ความสามารถทำให้เกิดการตื่นการเสียดสีมีอยู่ที่การควบคุมคุณภาพผิวหน้า ซึ่งตามมาตรฐาน DIN 4760 มีการแบ่งรูปแบบการเบี่ยงเบนออกเป็น 6 แบบ สำหรับแบบที่ 5 และแบบที่ 6 เป็นองค์ประกอบที่หลุดออกอยู่ในโครงสร้างแบบที่ 1 ถึงแบบที่ 4 และเกิดเป็น โครงสร้างแบบตาข่าย และไม่มีตัวอย่างอธิบายที่แน่ชัด ขนาดเป็นคำกำหนดให้มีรูปแบบเบี่ยงเบน ซึ่งมีทั้ง 4 รูปแบบ อาจจะ ไม่เกี่ยวข้องกับหน้าที่ของผิวหน้า ณ เวลา ผิวหน้าที่ด้านไม่ควรจะมีหลายส่วนของรูปแบบเบี่ยงเบน ผิวหยาบต้องการความหยาบต่ำ ผิวหน้าที่เปลี่ยนแปลงควรจะมีรูปคลื่นที่ชัดเจน



รูปที่ 2.17 จำแนกลักษณะการเบี่ยงเบนผิวชิ้นงาน

2.6.4 รายละเอียดของเครื่องวัดค่าความหยาบผิว

รายละเอียดของเครื่องวัดค่าความหยาบผิว (Surface Profilometer)

2.6.4.1 หลักการทำงานของเครื่องวัดค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน

การทำงานของเครื่องวัดค่าความหยาบผิวจะเป็นการทำงานร่วมกันของหัวทดสอบกับชุดขยายสัญญาณและควบคุมที่การแปลงผลการสัมผัสของปลายวัด ซึ่งเคลื่อนที่ขึ้นลงตามลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานเปลี่ยน ไปเป็นสัญญาณเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งงานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางไฟฟ้ารวม ที่มีคลื่นของความถี่สูงและต่ำผสมกันอยู่ อันมีผลมาจากลักษณะโครงสร้างรวมของพื้นผิวที่วัดได้ ซึ่งการประมวลผลของผิว ตามคุณสมบัติการวัดจำเป็นต้องแยกลักษณะสัญญาณความถี่สูงและต่ำนี้ออกจากกัน เนื่องจากแต่ละลักษณะเป็นค่าที่แทนคุณสมบัติที่ต่างกัน คือ

- ย่านความถี่สูงจะเป็นค่าคุณสมบัติของความหยาบผิว (Roughness)
- ย่านความถี่ต่ำจะเป็นค่าคุณสมบัติของความเป็นลอนคลื่น (Waviness)

2.6.4.2 วิธีการทำงานของเครื่องวัดค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน

โดยตัวที่เป็นตัวทดสอบวัดค่าความหยาบผิวคือ หัวทดสอบใช้วัดค่าความหยาบผิวของชิ้นงานโดยจะมีแท่งโลหะด้าน ในมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่มีขนาดเล็กจะเชื่อมต่อกับหัวทดสอบคล้ายปากกาปากแหลม และแท่งโลหะด้านนอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่มีขนาดใหญ่โดยให้หัวทดสอบลากสัมผัสกับผิวชิ้นงาน โดยชิ้นงานที่นำมาหาค่าความหยาบผิวนั้นต้องมีของร่องทดสอบที่สามารถให้หัวทดสอบเข้าไปสัมผัสวัดได้แต่ก่อนที่จะวัดค่าความหยาบผิวนั้นต้องมีการปรับค่าการวัดค่าความหยาบ (Calibrate) ก่อนทุกครั้งที่ทำกรวัดค่าเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้อง

2.6.5 ค่าที่เกี่ยวข้องกับความหยาบผิว

2.6.5.1 ความหยาบผิว

ความหยาบผิว (Surface Roughness) คือปริมาณของลักษณะบนพื้นผิวชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีการแปรรูปด้วยเครื่องจักรและกำหนดเป็นสเกลด้วยค่าเบี่ยงเบนทางคณิตศาสตร์ (Arithmetical Mean Deviation) ของพื้นที่หน้าตัด (R_a) ความสูงของส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลง 10 จุด (R_z) ค่าที่สูงที่สุดของส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลง (R_t) และค่าความหยาบผิวที่ลึกที่สุด (R_{max}) ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับ R_t และ R_z

2.6.5.2 ความยาวอ้างอิง

ความยาวอ้างอิง (Reference Length) ความยาวอ้างอิง (l_e) กำหนดให้เป็นความยาวซึ่งจำเป็นต่อการหาค่าที่สุทธาระหว่างจุดสูงสุดและปริมาณค่าสูงที่สุดของส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลง (R_t) หรือความสูงที่สุดของส่วนที่เปลี่ยนแปลง 10 จุด (R_z) จากพื้นที่หน้าตัดคิดแปลงค่าความยาวของความยาวอ้างอิง ไม่มีผลต่อความเรียบของผิวชิ้นงานปกติ

2.6.5.3 เส้นค่าเฉลี่ย

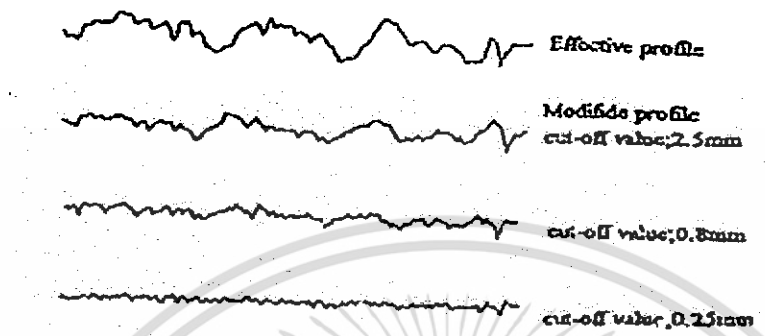
เส้นค่าเฉลี่ย (Mean Line) ถูกกำหนดให้เป็นเส้นตรงหรือเส้นโค้งซึ่งมีผลรวมทั้งหมดของค่ายกกำลัง 2 ของความสูงจากเส้นค่าเฉลี่ยถึงส่วนโค้งจากการวัด โดยแสดงเป็นค่าต่ำสุด เส้นเฉลี่ยถูกใช้เป็นเส้นอ้างอิงเพื่อหาค่าตัวแปรของความหยาบของผิวชิ้นงาน

2.6.5.4 รูปหน้าตัดที่เป็นผลและรูปหน้าตัดคดแปลง

รูปหน้าตัดที่เป็นผลและรูปหน้าตัดคดแปลง (Effective Profile and Modified Profile) ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการแปรรูปด้วยเครื่องอีเอ็มจะมีลักษณะนูนขึ้นเป็นแอ่งด้วยความสูง ช่วงห่าง และความเอียงแตกต่างกันมากมาย เมื่อความเรียบของผิวเหล่านี้ถูกวัดด้วยส่วนสัมผัสทางไฟฟ้าหรือหัวทดสอบ แล้วขจัดคลื่นความถี่ออกไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปหน้าตัดที่เปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นโค้งที่ลากด้วยปลายหัวทดสอบ ซึ่งมีความหมายความแตกต่างจากเส้นโค้งที่ลากโดยผ่าน Low Band Cut-off Filter หรือที่เรียกว่ารูปหน้าตัดที่เปลี่ยนแปลง ค่าของความถี่ที่ได้ค่าวัดออกด้วย Filter เรียกว่า ค่าตัดออกและรูปร่างของเส้นโค้งมีความแตกต่างกัน



รูปที่ 2.18 รูปหน้าตัดที่เป็นผลและรูปหน้าตัดที่เปลี่ยนแปลงของความหยาบ

2.6.6 วิธีการแสดงค่าความหยาบผิว

การศึกษาเกี่ยวกับความหยาบผิวของชิ้นงาน เป็นการเก็บค่าและหาค่าเฉลี่ยของความแรงสัญญาณ (Amplitude) จากรูปหน้าตัดและเมื่อศึกษาวิธีการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับใช้คลื่นเสียง จึงได้นำมาประยุกต์เพื่อวิเคราะห์ค่าความหยาบของผิวชิ้นงานและวิธีการคำนวณค่าต่าง ๆ ดังนี้

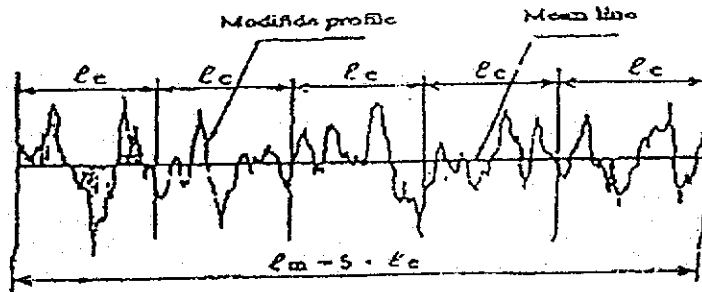
2.6.6.1 ค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยทางคณิตศาสตร์ของพื้นที่หน้าตัด

ค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยทางคณิตศาสตร์ของพื้นที่หน้าตัด (R_a) มีวิธีหาโดยแกน x ใช้กำหนดทิศทางเส้นค่าเฉลี่ยของเส้นโค้งจากการวัดและมีความยาวประเมินโดย ($l_m = 5 \cdot l_e$) โดยทั่วไปความยาวประเมิน (l_m) มีค่าเป็น 5 เท่าของความยาวอ้างอิง (l_e) การกำหนดตามแกน x ในรูปที่ 2.19 และแกน z มีทิศทางในแนวตั้งฉากกับแกน x และรูปพื้นที่หน้าตัดที่เปลี่ยนแปลงจะถูกริบายโดย $z = f(x)$ ค่า R_a หาได้จากสมการที่ 2.18 วิธีการหามีดังนี้

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

สมการ 2.1

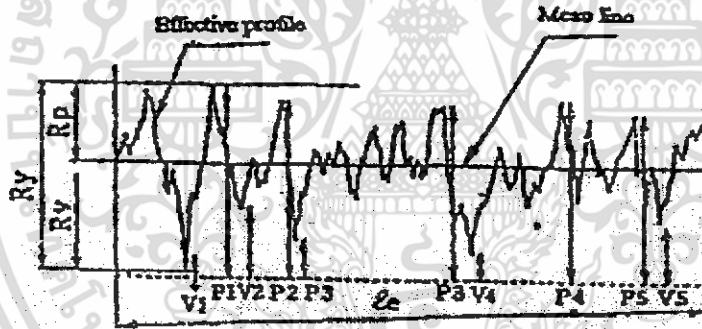
เมื่อ l_m = ความยาวประเมิน (ไมโครเมตร)
 l_e = ความยาวอ้างอิง (ไมโครเมตร)



รูปที่ 2.19 ค่าพารามิเตอร์ค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยทางคณิตศาสตร์ของพื้นที่หน้าตัดของค่าความหนาผิว

2.6.6.2 ค่าสูงที่สุดของส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลง

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



รูปที่ 2.20 ค่าสูงที่สุดของส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงและมีค่าความสูงของส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลง 10 จุด ของค่าความหนาผิว

วิธีการหามีดังนี้

R_p = ระยะจากเส้นค่าเฉลี่ยถึงจุดที่สูงที่สุดของปลายยอดแหลม (Peak)

R_v = ระยะจากเส้นค่าเฉลี่ยถึงจุดที่ลึกที่สุดของแอ่ง (Valley)

R_t = ระยะระหว่างจุดที่สูงที่สุดของปลายยอดแหลม (Peak) และจุดที่ลึกที่สุดของแอ่ง (Valley)

ถ้าค่า R_p และ R_v มีค่ามาก ๆ จะมีส่วนสำคัญต่อการสึกหรอของชิ้นส่วนของเครื่องจักร

2.6.6.3 ความสูงของส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลง 10 จุด

ความสูงของส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลง 10 จุด (R_z) มีวิธีการหาโดยส่วนของเส้นโค้งจากการวัดตัดออกด้วยความยาวอ้างอิงให้เลือกจุดสูงที่สุดของปลายยอดแหลม (Peak) 5 จุด และจุดที่ลึกที่สุดของแอ่ง (Valley) 5 จุด ดังรูปที่ 2.11 ค่า R_z หาได้จากสมการ 2.2

วิธีการหามีดังนี้

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

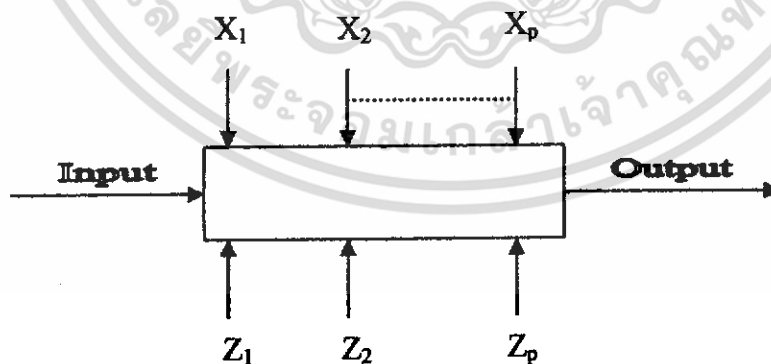
$V_{(1,2,3,4,5)}$ = เป็นค่าลึกที่สุดของแอ่ง (Valley)

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

เมื่อ P_i เป็นค่าสูงที่สุดของปลายยอดแหลม และ V_i เป็นค่าสูงที่สุดอันดับที่สองของรอยแตกหรือแอ่ง และเรียงลำดับค่านับไป สำหรับ R_z คือจุดสูงสุดและจุดต่ำสุดจำนวน 10 จุด ในความสูงของส่วนที่เปลี่ยนแปลงแสดงในรูปที่ 2.11 ลักษณะเสมือนภูเขาและหุบเขา ในเส้นโค้งที่ได้จากการวัดจะมียอดแหลมและแอ่งแต่ละส่วน 1 จุดเท่านั้น

2.7 หลักการออกแบบการทดลอง

การทดลองถูกสร้างขึ้นด้วยผู้ทดลอง ซึ่งมาจากหลายสาขาอาชีพที่ต้องการคำตอบจากกระบวนการหรือระบบที่ผู้ทดลองมีความสนใจ การทดลองในที่นี้อาจหมายถึงการทดสอบหรือชุดของการทดสอบที่คาดหมายว่าเมื่อเปลี่ยนตัวแปรป้อนเข้าของกระบวนการหรือระบบ จะเป็นผลให้ตัวแปรตอบสนองมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น ในงานทางด้านวิศวกรรมการทดลองมีบทบาทอย่างมากในการออกแบบผลิตภัณฑ์ใหม่ ๆ การพัฒนากรรมวิธีการผลิตของกระบวนการและการปรับปรุงกระบวนการผลิต บางกรณีอาจต้องการพัฒนากระบวนการที่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจากแหล่งภายนอกกระบวนการจะมีผลกระทบต่อกระบวนการ



รูปที่ 2.21 รูปแบบของกระบวนการหรือระบบ

โดยทั่วไป การทดลองถูกใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการหรือระบบ (Process or System) รูปที่ 2.21 แสดงรูปของกระบวนการหรือระบบส่วนใหญ่จะสามารถมองเห็นภาพของกระบวนการเป็นการรวมกันของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องจักร วิธีการ คน และทรัพยากรอื่น ๆ และเมื่อมีสิ่งป้อนเข้ามา (Input) สู่กระบวนการจะถูกเปลี่ยนรูปออกมาได้เป็นผลลัพธ์ (Output) ซึ่งผลลัพธ์ดังกล่าวอาจมีได้ตั้งแต่หนึ่งหรือมากกว่าหนึ่ง

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

2.7.1 ปัจจัยในการผลิต

ปัจจัยในการผลิตสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

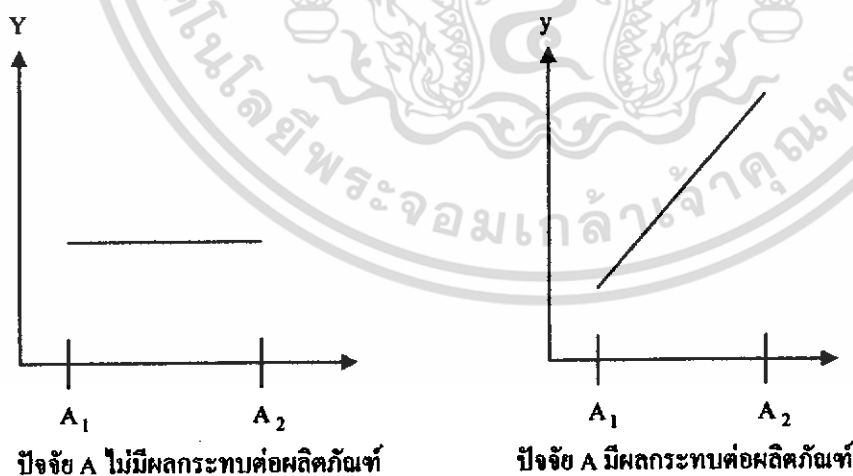
2.7.1.1 ปัจจัยที่ควบคุมได้

ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factor) หมายถึง ปัจจัยที่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในกระบวนการ ซึ่งเป็นผลดีต่อการทดลองเพราะ โดยส่วนใหญ่ผู้ทำการทดลองต้องการกำหนดค่าต่างๆ ที่คิดว่ามีผลต่อค่าตอบสนองที่เราสนใจ

2.7.1.2 ปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้

ปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable) หมายถึง ปัจจัยที่ไม่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในกระบวนการ อันเนื่องมาจากเทคโนโลยีที่ไม่ทันสมัยพอหรือต้นทุนในการควบคุมสูงมาก ผู้ทดลองควนกำจัดปัจจัยลักษณะนี้เพื่อให้เปลี่ยนเป็นปัจจัยที่ควบคุมได้ จึงจะเป็นประโยชน์ต่อการทดลอง

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



รูปที่ 2.22 แสดงอิทธิพลที่ไม่มีผลและอิทธิพลที่มีผลของปัจจัยต่อผลิตภัณฑ์

2.7.2 วัตถุประสงค์ของการออกแบบการทดลอง

วัตถุประสงค์ในการออกแบบการทดลอง มีดังนี้

1. หาตัวแปรที่มีผลต่อค่าตอบสนอง y มากที่สุด
2. กำหนดค่า x ที่ทำให้ค่า y ใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการ
3. กำหนดค่า x ที่ทำให้ค่า y สมการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด
4. กำหนดค่า x ที่ทำให้ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้มีผลน้อยที่สุด

2.7.3 คำจำกัดความ

2.7.3.1 อิทธิพลหรือผล

อิทธิพลหรือผล (Effect) หมายถึง ผลของตัวแปรต้นที่มีผลต่อตัวแปรตาม

2.7.3.2 ปัจจัย

ปัจจัย (Factor) หมายถึง สิ่งทีคาดว่าอิทธิพลต่อการทดลองของคุณสมบัติในตัวผลิตภัณฑ์

2.7.3.3 ระดับของปัจจัย

ระดับของปัจจัย (Level of factor) หมายถึง สถานะต่างๆ ของปัจจัยหนึ่งที่ทำกรกำหนดในการทดลอง

2.7.3.4 ปัจจัยรบกวน

ปัจจัยรบกวน (Noise Factor) หมายถึง ปัจจัยที่ก่อให้เกิดผลกระทบเล็กๆ น้อยๆ และไม่สามารถควบคุมได้

2.7.4 หลักในการออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองเป็นกระบวนการวางแผนของการทดลองซึ่งข้อมูลในการลองนั้นจะถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติ จนได้ข้อมูลสรุปของวัตถุประสงค์ที่ได้ตั้งไว้ หลักการทางสถิติถูกนำมาใช้ในการออกแบบการทดลองเพื่อทำความเข้าใจในข้อมูล และหาผลสรุปออกมาในเอง หลักในการออกแบบการทดลองมีดังนี้

2.7.4.1 การทำซ้ำ

การทำซ้ำ (Replication) คือ การทดลองซ้ำในแต่ละข้อมูลเพื่อที่จะกำจัดผลของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ออกไป การทำซ้ำมีความสำคัญ 2 ประการ เพื่อประมาณค่าความผิดพลาดของการทดลอง และเพื่อประมาณค่าเฉลี่ยนั้นให้มีความมั่นใจมากขึ้น

2.7.4.2 การทำแบบสุ่ม

การทำแบบสุ่ม (Randomization) คือ การให้โอกาสในการเก็บข้อมูลของข้อมูลในแต่ละตัวให้เท่ากันเพื่อกระจายผลของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ให้กับข้อมูลทุกระดับในการทดลองให้เท่า ๆ กันการทำแบบสุ่มสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 วิธีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

2.7.4.3 การบล็อก

การบล็อก (Blocking) คือ การจัดกลุ่มทำการเก็บข้อมูลเป็นช่วงเพื่อลดผลจากปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ ทำให้การทดลองนั้นมีความเที่ยงตรงมากขึ้น การบล็อกส่วนใหญ่เกิดขึ้นกับวัสดุที่ใช้ในการทดลองนั้นไม่มีความสม่ำเสมอ จึงจำเป็นต้องแยกเอาผลวัสดุที่แตกต่างกันออกไปจะสนใจการทดลองที่เกิดขึ้นในแต่ละบล็อกเท่านั้น

2.7.5 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

การใช้หลักการทางสถิติในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองเป็นสิ่งจำเป็น ผู้ทำการทดลองต้องมีความเข้าใจวิธีในการเก็บข้อมูลตลอดการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้มา

2.7.5.1 การนิยามปัญหา

การนิยามปัญหา คือ การระบุว่าความต้องการในการผลิตคืออะไรและต้องการรู้อะไรบ้างในการผลิต ซึ่งการนิยามปัญหานี้จะเชื่อมโยงไปถึงวัตถุประสงค์ของการทดลอง

2.7.5.2 การเลือกปัจจัยที่มีผลและระดับของปัจจัย

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

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

2.7.5.3 การเลือกตัวแปรตอบสนอง

การเลือกตัวแปรตอบสนอง (Response Variables) ผู้ทำการทดลองต้องมีความมั่นใจว่าเลือกตัวแปรที่สามารถให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อกระบวนการที่ทำการศึกษาค่าเฉลี่ยหรือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าที่จะใช้วัดเป็นตัวแปรตอบสนอง โดยทั่วไปจะเก็บข้อมูลของตัวแปรตอบสนองเพียงค่าเดียว แต่ก็มีบางการทดลองที่ทำการวัดค่าตัวแปรตอบสนองหลายค่า การวัดค่าจะต้องมีความแม่นยำทั้งความถูกต้องของเครื่องมือวัดด้วย

2.7.5.4 การเลือกแบบการทดลอง

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

2.7.5.5 การคำนวณการทดลอง

เมื่อทำการทดลอง ต้องทำการตรวจสอบการทดลองอย่างระมัดระวังว่ามี การดำเนินการตามที่วางไว้ ข้อควรระวังในการทดลองคือความถูกต้องของกระบวนการเครื่องมือวัด และความสม่ำเสมอในการทดลองเพื่อให้เกิดความผิดพลาดน้อยที่สุดเพราะความผิดพลาดในขั้นตอนนี้มักจะทำให้การทดลองล้มเหลวได้

2.7.5.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

หลักการทางสถิติถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลการทดลอง การวิเคราะห์ข้อมูลอาจใช้ซอฟต์แวร์เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ด้วย ซึ่งปัจจุบันมีซอฟต์แวร์อยู่หลายประเภทที่สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ได้ วิธีการถูกนำมาใช้อย่างได้ผลคือกราฟอย่างง่ายคือช่วยในการวิเคราะห์และตีความข้อมูลจากการทดลอง การตรวจสอบความเพียงพอของโมเดล (Model Adequacy Checking) เป็นสิ่งที่จำเป็นต้องทำการวิเคราะห์เพื่อเชื่อมั่นของข้อมูลที่เก็บมาจากการทดลอง จึงจำไว้ว่าวิธีทางสถิติไม่สามารถพิสูจน์ได้ว่าปัจจัยมีอิทธิพล ได้อย่างแน่นอนเพียงแต่เป็นเครื่องมือที่ช่วยให้แนวทางในการวิเคราะห์ภายใต้ความเชื่อมั่น โดยระบุเป็นเปอร์เซ็นต์ในการสรุปผลการทดลอง แต่อย่างไรก็ตามการใช้หลักการทางสถิติช่วยให้การตัดสินใจเป็นนามธรรมมากยิ่งขึ้น

2.7.5.7 สรุปผลและข้อเสนอแนะ

เมื่อข้อมูลถูกวิเคราะห์จะต้องสรุปผลจากการวิเคราะห์ซึ่งอาจจะแสดงในรูปแบบของกราฟ ตาราง แผนภูมิ ตลอดจนให้ข้อเสนอแนะจากการทดลองเพื่อสรุปผลและควรที่จะมีการทดสอบเพื่อยืนยันผลจากการทดลองอีกครั้ง

2.7.6 การใช้หลักทางสถิติในการทดลอง

การใช้หลักทางสถิติในการทดลองนั้นผู้ทำการทดลองต้องมีความเข้าใจในประเด็นต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. ผู้ทำการทดลอง ต้องมีความรู้เกี่ยวกับงานในสาขาที่จะทำการทดลอง โดยใช้ความรู้ที่ไม่ใช่วิธีการทางสถิติในการพิจารณาปัญหาที่เกิดขึ้น
2. ผู้ทำการทดลอง ควรเลือกการออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ที่ง่ายและไม่ซับซ้อน
3. ผู้ทำการทดลองควรเข้าใจความแตกต่างระหว่างนัยสำคัญในทางปฏิบัติและนัยสำคัญทางสถิติ เพราะว่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในการทดลองซึ่งเรียกว่าความแตกต่างทางด้านสถิติ นั้นไม่สามารถประกันได้ว่ามีความแตกต่างมากเพียงพอที่จะใช้ในทางปฏิบัติ และจะต้องคำนึงถึงต้นทุนว่าคุ้มค่าในการลงทุนหรือไม่
4. ผู้ทำการทดลอง ควรทำการทดลองซ้ำๆ หลายๆ ครั้งเพื่อให้แน่ใจว่าผลที่ได้ถูกต้อง

2.7.7 การตั้งสมมติฐานในการตรวจสอบ

2.7.7.1 ความหมายของสมมติฐานทางสถิติ

สมมติฐาน คือ ความเชื่อมั่นของบุคคลใดบุคคลหนึ่งหรือของกลุ่มของบุคคลใด ๆ หรืออาจกล่าวได้ว่าสมมติฐานเป็นสิ่งที่บุคคลหรือองค์กรคาดว่าเกิดขึ้น ความเชื่อมั่นหรือสิ่งที่คาดนั้นอาจเป็นจริงหรือไม่ก็ได้

2.7.7.2 ชนิดของสมมติฐาน

สมมติฐานแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ดังต่อไปนี้

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

สมมติฐานหลักที่ตั้งขึ้น เพื่อทดสอบว่าจะยอมรับหรือไม่ว่าเป็นจริง การปฏิเสธไม่ยอมรับสมมติฐานหลักก็คือการยอมรับสมมติฐานอื่น ๆ ว่าเป็นจริง

ประเภทของสมมติฐาน สมมติฐานแบ่งออกเป็น 2 ประเภทดังต่อไปนี้

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

2.7.7.3 ความผิดพลาดในการทดสอบสมมติฐาน

ความผิดพลาดในการทดสอบสมมติฐาน แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังต่อไปนี้

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

2. ความผิดพลาดประเภทที่ 2 (Type II Error) ใช้สัญลักษณ์ β เป็นความผิดพลาดที่เกิดจากการยอมรับสมมติฐานอื่น ๆ โดยที่สมมติฐานอื่น ๆ เป็นจริง

ในการทดสอบแต่ละครั้ง ผู้ทดสอบย่อมต้องการให้มีความผิดพลาดทั้งสองประเภท (α และ β) น้อยที่สุด แต่เมื่อค่าของ α ลดลง ค่าของ β จะเพิ่มขึ้นในทำนองเดียวกัน เมื่อค่าของ α เพิ่มขึ้น ค่าของ β จะลดลง ดังนั้นเมื่อต้องการลดค่าความผิดพลาดทั้งสองประเภทให้ลดลงได้พร้อม ๆ กันทำได้ด้วยการเพิ่มจำนวนข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ให้มากขึ้น

2.7.7.4 การตั้งสมมติฐานในการออกแบบการทดลอง

การตั้งสมมติฐานในการออกแบบการทดลอง สามารถแบ่งเป็น 3 กรณี ดังต่อไปนี้

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

H_0 : ปัจจัยไม่มีผลต่อกระบวนการ

H_1 : ปัจจัยมีผลต่อกระบวนการ

หรือสามารถเขียนอยู่ในรูปสัญลักษณ์ μ เมื่อ μ ค่าเฉลี่ยของปัจจัย

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

$$H_1: \tau_i \neq 0; \text{ อย่างน้อยที่สุดครั้งหนึ่ง}$$

2. การออกแบบการทดลองแบบผลกระทบแบบสุ่ม (Random Effects 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) เมื่อปัจจัยในการทดลองเป็นแบบผลกระทบคงที่ (Fixed Level) และแบบสุ่ม (Random Level) รวมกันจะต้องใช้การตั้งสมมติฐานของ 2 กรณีที่กล่าวข้างต้น โดยแยกตามลักษณะรูปแบบของปัจจัยนั้น ๆ

2.7.8 ชนิดของแผนการออกแบบการทดลอง

2.7.8.1 แผนการออกแบบการทดลองแบบปัจจัยเดียว

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

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

2. การทดลองแบบสุ่มโดยสมบูรณ์ภายในบล็อก (Completely Randomized Block Design) เป็นการทดลองที่มีปัจจัยเดียวและมีปัจจัยรบกวนที่มีผลกระทบต่อค่าตอบสนองและต้องทำการกำจัดปัจจัยรบกวนดังกล่าวทิ้งบางครั้งปัจจัยรบกวนนั้นไม่ทราบและสามารถควบคุมได้จึงต้องใช้วิธีการบล็อก (Blocking) ในการกำจัดผลของปัจจัยรบกวนนั้นออกไป

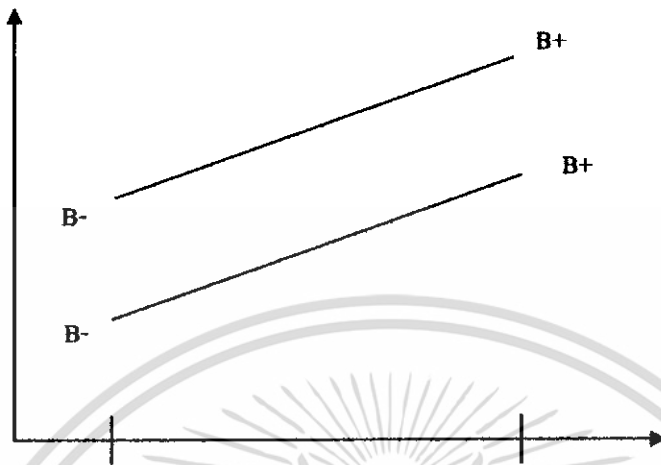
2.7.8.2 แผนการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล

แผนการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design) เป็นการทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับ (Level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้นๆ จึงเป็นการทดลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุดโดยใช้ในการศึกษาถึงผลของปัจจัยตั้งแต่สองปัจจัยขึ้นไปตัวอย่างเช่น กรณี 3 ปัจจัย A ประกอบด้วย 2 ระดับ ปัจจัย B ระดับและปัจจัย C ประกอบด้วย 2 ระดับในการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง จะประกอบด้วยการทดลองทั้งหมด $2 \times 2 \times 2 \times 3 = 24$ การทดลอง และเมื่อปัจจัยที่เกี่ยวข้องถูกนำมาให้อยู่ในรูปแบบของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล จึงกล่าวได้ว่าปัจจัยเหล่านี้มีการไขว้ (Crossed) ซึ่งกันและกัน

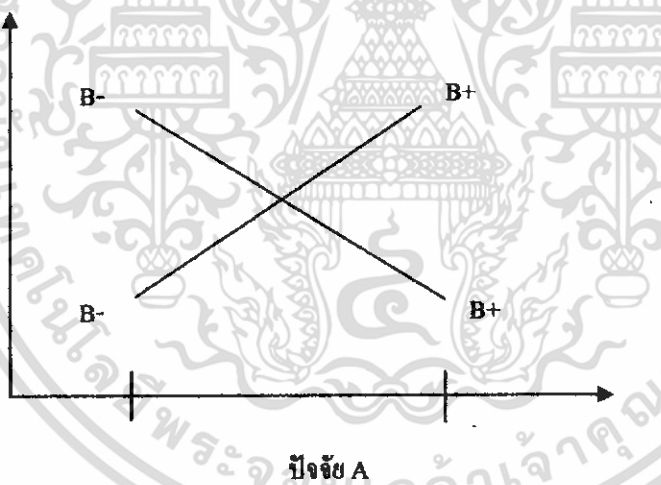
ผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งหมายถึง การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับผลตอบสนอง (Response) ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยนั้น ๆ ซึ่งเรียกว่าปัจจัยหลัก (Main Effect) และหากผลตอบสนองของปัจจัยหนึ่งขึ้นกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระดับของปัจจัยอื่นๆ ซึ่งเรียกว่าการมีอันตรกิริยา (Interaction) ต่อกันระหว่างปัจจัยที่เกี่ยวข้อง แนวคิดดังกล่าวสามารถแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.23 และ 2.24



รูปที่ 2.23 แสดงการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่ไม่มีอันตรกิริยาระหว่างกัน



รูปที่ 2.24 แสดงการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่มีอันตรกิริยาระหว่างกัน

จากรูปที่ 2.23 จะเห็นได้ว่าเส้นของ B- และ B+ จะประมาณได้ว่าขนานกัน ซึ่งลักษณะของกราฟเช่นนี้จะบ่งบอกถึงการไม่มีอันตรกิริยาซึ่งกันและกันของปัจจัยทั้งสองในทำนองเดียวกัน จากรูปที่ 2.24 จะเห็นได้ว่า เส้นของ B- และ B+ ไม่ขนานกันและสามารถกล่าวได้ว่าปัจจัยทั้งสองมีอันตรกิริยาต่อกัน บ่อยครั้งที่กราฟลักษณะเช่นนี้จะถูกนำมาใช้เพื่อแสดงถึงการมีนัยสำคัญของอันตรกิริยา อย่างไรก็ตามกราฟเช่นนี้ไม่ควรนำมาใช้แทนเทคนิคการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ เพราะว่าการตีความจากกราฟค่อนข้างที่จะขึ้นกับความเห็นส่วนบุคคล ซึ่งอาจทำให้เกิดความเข้าใจผิดหรือวิเคราะห์ผิดพลาดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบของการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลยังแบ่งย่อยไว้กรณีที่แผนการทดลองมีลักษณะตัวเฉพาะตัวอีกดังต่อไปนี้

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

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

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

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

3. การออกแบบการทดลองเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล (Fractional Factorial Design)

การออกแบบการทดลองเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล เป็นการออกแบบที่ใช้ในกรณีเมื่อการทดลองมีหลายปัจจัยทำให้ต้องเสียเวลาดูแลกับข้อมูลมาก ดังนั้นจะทำให้ความสัมพันธ์ของทรีตเมนต์ (Treatment) ซึ่งจะทำให้ข้อมูลที่ใช้ในการทดลองนั้นลดลง

2.7.8.3 แผนการออกแบบการทดลองอื่นๆ

แผนการออกแบบการทดลองอื่นๆ มีดังนี้

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

2.7.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance : ANOVA) คือ เทคนิคที่ใช้ในการจัดสรรความแปรปรวนหรือความผันแปรที่เกิดขึ้นในข้อมูลออกเป็นส่วนย่อยๆ ตามแหล่งที่คาดว่าทำให้เกิดความผันแปร ความผันแปรที่เกิดในข้อมูลเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

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

สมการ 2.3 ได้จากข้อคิดที่ว่า ความแตกต่างกันของข้อมูลไม่น่าจะมาจากสาเหตุของความผันแปร โดยธรรมชาติ หรือที่เรียกกันว่าความผิดพลาดแบบสุ่มของข้อมูลแต่เพียงอย่างเดียวแต่น่าจะมาจากปัจจัยหนึ่งปัจจัยใดหรือหลายๆ ปัจจัยที่ทำให้เกิดความผันแปร ดังนั้นความผันแปรทั้งหมดที่เกิดขึ้นกับข้อมูลจึงเนื่องมาจากอิทธิพลของปัจจัยของธรรมชาติของข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจัยที่คาดว่าจะมีอิทธิพลต่อความผันแปรของข้อมูลคือได้ว่าเป็นตัวแปรอิสระซึ่งมีผลต่อตัวแปรตาม โดยเป็นข้อมูลที่วัดผลหรือเก็บรวบรวมมา ตัวแปรอิสระดังกล่าวมักจะไม่ได้มีเพียงค่าเดียวแต่จะมีหลายค่าซึ่งเรียกว่าระดับของปัจจัย ถ้าปัจจัยนั้นมีผลต่อตัวแปรตามจริงๆ แต่ละระดับก็จะมีผลต่อตัวแปรตามไม่เหมือนกัน การวิเคราะห์จึงทำโดยการทดลองกำหนดค่าตัวแปรอิสระที่ระดับต่าง ๆ เพื่อหาตัวแปรตามที่เกิดขึ้นจากการทดลองนั้น ๆ แล้วนำไปวิเคราะห์ดูว่าความผันแปรที่เกิดขึ้นจากความแตกต่างของการทดลองนั้นมีนัยสำคัญหรือไม่เมื่อเทียบกับความผันแปรโดยธรรมชาติของตัวแปรตาม และเพื่อที่จะช่วยให้ผู้วิเคราะห์มีความเชื่อมั่นในผลของการวิเคราะห์ที่ได้จากการทดลอง มักจะต้องทำการทวนซ้ำให้ได้จำนวนข้อมูลที่แต่ละการทดลองมากพอ การเลือกระดับของปัจจัยถ้าเป็นการเจาะจงรูปแบบของการทดลองจะถูกเรียกว่าแบบผลกระทบบคงที่ (Fixed Effect Model) ผลที่ได้จากการทดลองจะสรุปเฉพาะอิทธิพลของปัจจัยที่ระดับที่นำมาทดลอง แต่ถ้าเลือกระดับของปัจจัยเป็นการเลือกสุ่ม รูปแบบของการทดลองจะเป็นแบบสุ่ม (Random Effect Model) ผลที่ได้จากการทดลองจะสรุปอิทธิพลโดยรวมของปัจจัย

จาก ความผันแปรทั้งหมด = ความผันแปรเนื่องจากปัจจัย + ความผันแปรโดยธรรมชาติของข้อมูลหรือเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ได้เป็น

$$SS_T = SS_{Tr} + SS_E \quad \text{สมการ 2.4}$$

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

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

$$MS = \frac{SS}{DF} \quad \text{สมการ 2.5}$$

เมื่อ SS คือ ผลบวกกำลังสอง (Sum of Square)
 DF คือ ชั้นของความอิสระ

สถิติทดสอบ (Test Statistic) ที่นำมาเปรียบเทียบค่าความผันแปรคือ

$$F = \frac{MS_{Tr}}{ME_E} \quad \text{สมการ 2.6}$$

เมื่อ MS_{Tr} คือ ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสองของปัจจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เมื่อ

α คือ ระดับนัยสำคัญ (Level of Significance)

v_1 คือ ชั้นของความอิสระปัจจัย

v_2 คือ ชั้นของความอิสระของความผิดพลาดแบบสุ่ม

2.7.9.1 รูปแบบเชิงเส้นทางสถิติ

ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนนั้นจำเป็นต้องสร้างรูปแบบเชิงเส้นทางสถิติ (Linear Statistical Model) ขึ้น
 ด้วย ซึ่งรูปแบบเชิงเส้นทางสถิติจะขึ้นอยู่กับรูปแบบของแผนการออกแบบการทดลอง จะแสดงดังตัวอย่างต่อไปนี้

การวิเคราะห์ความแปรปรวนกรณีที่มี 3 ปัจจัย รูปแบบเชิงเส้นคือ

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

โดยที่

$i = 1, 2, 3$, a (ระดับของปัจจัย A)

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

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

$l = 1, 2, 3, \dots, n$ (จำนวนซ้ำ)

และ

y_{ijk} คือ ค่าตัวแปรตอบสนองหรือตัวแปรตาม

μ คือ ค่าเฉลี่ยซึ่งเป็นค่าคงที่

τ_i คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัย A

β_j 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 แสดงได้ดังตารางที่ 2.2
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 แสดงการคำนวณการวิเคราะห์ความแปรปรวน

Source of Variation	Sum of Square	Degree of Freedom	Mean Square	F 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		

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

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

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

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

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

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

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

2.7.9.2 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model Adequacy Checking) เป็นวิธีการตรวจสอบที่ทำให้ทราบว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนมีความน่าเชื่อถือเป็นไปตามหลักการสถิติหรือไม่ โดยอาศัยข้อสมมติฐานที่สำคัญซึ่งอธิบายได้โดยใช้แบบจำลองดังต่อไปนี้

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \epsilon_{ij}$$

สมการ 2.8

โดยที่

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

โดยความผิดพลาดแบบสุ่ม (Random Error) จะต้องการแจกแจงแบบปกติและเป็นอิสระต่อกันด้วยค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และ σ^2 มีค่าคงตัวแต่ไม่ทราบค่าซึ่งเขียนเป็นสัญลักษณ์ได้ดังนี้ $\epsilon_{ij} \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$ ถ้าสมมติฐานเหล่านี้เป็นจริงกระบวนการวิเคราะห์ความแปรปรวนนี้ก็จะเป็นการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับการ ไม่มีความแตกต่างในค่าเฉลี่ยของระดับที่ถูกต้อง

ในทางปฏิบัติสมมติฐานมักจะไม่เป็นเช่นนั้น ซึ่งจะเชื่อถือผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน ได้ก็ต่อเมื่อสามารถตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐานว่าเป็นจริงเสียก่อน โดยสามารถตรวจสอบสมมติฐานขั้นต้นและความถูกต้องของแบบจำลองได้โดยการตรวจสอบส่วนตกค้าง (Residual) สำหรับค่าสังเกต j ของระดับที่ i ส่วนตกค้างจะมีค่าเป็น

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

สมการ 2.9

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

$$\begin{aligned} \hat{y}_{ij} &= \hat{\mu} + \hat{\tau}_i \\ &= \hat{y} + (\hat{y}_i - \hat{y}) \\ &= \hat{y}_i \end{aligned}$$

จากสมการค่าประมาณของค่าสังเกตใด ๆ ในระดับที่ i ก็คือค่าเฉลี่ยของระดับนั้น ๆ ดังนั้นการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบมีอยู่ 3 ประเภท คือ

1. การตรวจสอบการแจกแจงของข้อมูลว่าเป็นการกระจายแบบปกติหรือไม่ โดยนำส่วนตกค้าง (Residual) ไปทดสอบโดยใช้วิธีดังต่อไปนี้

- การทดสอบแบบไคร้สแควร์ (χ^2 - Goodness of Fit Test)
- การทดสอบแบบโคลโกโมรอฟ - สเมอรันอฟ (Kolmogorov - Smirnov Test)
- การทดสอบโดยใช้กระดาษตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติ (NOPP)

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

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

2.7.10 แบบจำลองการถดถอย

สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ ดังต่อไปนี้

2.7.10.1 แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย

แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Single Liner Regression Model) เป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระหนึ่งตัว โดยที่ความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสองเป็นเส้นตรง ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองได้ดังต่อไปนี้

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \epsilon$$

สมการ 2.10

2.7.10.2 แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นเชิงซ้อน

แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นเชิงซ้อน (Multiple Liner Regression Model) เป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระตั้งแต่สองตัวขึ้นไป โดยที่ความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสองเป็นเส้นตรง ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสองได้ดังต่อไปนี้

$$y = \beta_0 + \sum \beta_i x_i + \epsilon$$

สมการ 2.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.10.3 แบบจำลองการถดถอยอย่างอื่น

แบบจำลองการถดถอยอย่างอื่น (Other Regression Model) ได้แก่

1. แบบจำลองการถดถอยเส้นโค้งเอกโปเนนเชียล (Exponential) ที่มี 1 ตัวแปรอิสระ ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองได้ดังต่อไปนี้

$$y = e^{\beta_0 + \beta_1 x} + \varepsilon$$

สมการ 2.15

2. แบบจำลองการถดถอยเส้นโค้งไฮเพอโบลิก (Hyperbolic) ที่มี 1 ตัวแปรอิสระ ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองได้ดังต่อไปนี้

$$y = \frac{\beta_0 + \beta_1}{x + \varepsilon}$$

สมการ 2.16

3. แบบจำลองการถดถอยเส้นโค้งโพลิโนเมียล (Polynomial) ดีกรี n ที่มี 1 ตัวแปรอิสระซึ่งเขียนความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองได้ดังต่อไปนี้

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

สมการ 2.17

วิธีการหาแบบจำลองการถดถอยแล้ว ทำได้โดยการแปลงลักษณะความสัมพันธ์ของตัวแปรให้อยู่ในรูปของเส้นตรงก่อน หลังจากวิเคราะห์หาแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นตรงได้แล้ว จึงเปลี่ยนรูปความสัมพันธ์ของตัวแปรไปอยู่รูปเดิม

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

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

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

ถ้า R-Square มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่า ความแปรปรวนทั้งหมดที่เกิดขึ้นในตัวแปรตามไม่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระ

ถ้า R-Square มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่า ความแปรปรวนทั้งหมดที่เกิดขึ้นในตัวแปรตามไม่สามารถอธิบาย

2.7.10.4 การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลอง เป็นเครื่องมือที่สำคัญในงานด้านวิศวกรรมสำหรับการเพิ่มสมรรถนะของวิธีการผลิตของกระบวนการ ซึ่งมักจะทำให้เกิดการพัฒนาในกระบวนการใหม่ การประยุกต์ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองในการพัฒนากระบวนการสามารถพิจารณาในรูปแบบต่อไปนี้

- การเพิ่มผลผลิตของกระบวนการ
- การลดความผันแปรของกระบวนการและกระบวนการมีค่าใช้จ่ายใกล้เคียงกับเป้าหมายที่ต้องการ
- การลดเวลาที่ต้องใช้ในการพัฒนา
- การลดต้นทุนโดยรวมของกระบวนการ

วิธีการออกแบบการทดลอง มีบทบาทอย่างมากในการออกแบบทางวิศวกรรมทำให้มีการพัฒนา

ผลิตภัณฑ์ใหม่ออกมา การประยุกต์การออกแบบการทดลองในการออกแบบทางวิศวกรรมจะรวมถึงสิ่งดังต่อไปนี้

- การประเมินและเปรียบเทียบของพื้นฐานการออกแบบ
- การประเมินทางเลือกของวัสดุ
- เลือกพารามิเตอร์ของการออกแบบที่เมื่อพารามิเตอร์นั้นมีการเปลี่ยนแปลงจะไม่มีผลกระทบต่อ

ผลิตภัณฑ์

การใช้การออกแบบการทดลองในลักษณะนี้ สามารถส่งผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์คือ ทำให้ผลิตภัณฑ์มีกรรมวิธีการผลิตที่ง่ายกว่า มีความน่าเชื่อถือ มีต้นทุนการผลิตต่ำกว่า และระยะเวลาในการออกแบบและผลิตภัณฑ์ใหม่สั้นกว่า

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

จากการทำการทดลองเกี่ยวกับการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (Material Removal Rate) อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (Electrode Wear Rate) และความหยาบผิวของชิ้นงาน (Surface Roughness) ทำให้ทราบถึงหลักการทำงานของเครื่องอีดีเอ็ม (EDM) เครื่องวัดค่าความหยาบผิว กรรมวิธีการทดลอง วัสดุและขั้นตอนต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งสามารถแบ่งเป็นหัวข้อหลัก ๆ ได้ดังนี้

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

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

ในกรรมวิธีการสปาร์คของเครื่องอีดีเอ็ม วัสดุที่นำมาใช้ในการทดลองโดยกรรมวิธีการสปาร์คของเครื่องอีดีเอ็ม จะเป็นชิ้นงานเหล็กกล้าที่ใช้ทำแม่พิมพ์ ซึ่งเหล็กกล้าที่นิยมนำมาใช้คือ เหล็กกล้า SKD11 ในปัจจุบันนี้ มีเหล็กกล้าชนิดใหม่ที่มีการพัฒนามาจากเหล็กกล้า SKD11 นั่นคือ เหล็กกล้า DC53 ส่วนอิเล็กโทรด (Electrode) ที่นำมาใช้ในการทดลองทำมาจากแท่งทองแดงมีหน้าตัดเป็นวงกลม เป็นลักษณะแท่งทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร

3.1.1 อิเล็กโทรด

อิเล็กโทรดมีหลายขนาดและหลายประเภท แต่ในการทดลองจะมีรูปร่างหน้าตัดวงกลมเป็นรูปทรงแท่งทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร โดยมีส่วนผสมทางเคมี $Cr = 0.70 - 0.96 \text{ wt\%}$ $Zr = 0.31 - 0.42 \text{ wt\%}$ และที่เหลือเป็นทองแดงบริสุทธิ์ (Cu)



รูปที่ 3.1 อิเล็กโทรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 ชิ้นงานทดลอง

ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง มี 2 ชนิด ดังนี้

3.1.2.1 เหล็กกล้า SKD11

ชิ้นงานมีขนาด 30 x 30 x 30 มิลลิเมตร โดยมีส่วนผสมทางเคมี C = 1.49 wt% Si = 0.28 wt% Mn = 0.39 wt% P = 0.017 wt% S = 0.009 wt% Cr = 12.05 wt% Mo = 0.80 wt% V = 0.21 wt% และที่เหลือเป็นธาตุเหล็ก (Fe)



รูปที่ 3.2 เหล็กกล้า SKD11

3.1.2.2 เหล็กกล้า DC53

ชิ้นงานมีขนาด 30 x 40 x 30 มิลลิเมตร โดยมีส่วนผสมทางเคมี C = 1.00 wt% Si = 1.00 wt% Mn = 0.40 wt% P = 0.017 wt% S = 0.002 wt% Cr = 8.00 wt% Mo = 2.00 wt% V = 0.30 wt% และที่เหลือเป็นธาตุเหล็ก (Fe)



รูปที่ 3.3 เหล็กกล้า DC53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 เครื่องอีซีเอ็ม

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



รูปที่ 3.4 เครื่องอีซีเอ็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 เครื่องวัดความหยาบผิวชิ้นงาน

เป็นเครื่องวัดความหยาบผิวของชิ้นงานที่วัดความหยาบผิวของชิ้นงานที่เกิดจากการสปาร์คของเครื่องอีดีเอ็ม และเป็นเครื่องที่สามารถวัดค่าความหยาบผิวได้ละเอียดในระดับไมครอน เป็นเครื่องยี่ห้อ TOKYO SEIMITSU รุ่น SURFCOM 480 A โดยได้ทำการวัดที่ห้องปฏิบัติการของบริษัท ชันมาร์ เอส.พี. (ประเทศไทย) จำกัด



รูปที่ 3.5 เครื่องวัดความหยาบผิว

3.3 หลักการออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองที่ใช้เครื่องอีดีเอ็มเป็นตัวสปาร์คนั้น จะต้องเป็นไปตามขั้นตอนต่าง ๆ ที่ได้วางแผนไว้แล้ว และค่าอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (Material Removal Rate) อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (Electrode Wear Rate) และความหยาบผิวของชิ้นงาน (Surface Roughness) ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการทดลองจะนำไปวิเคราะห์เปรียบเทียบความสามารถในการตัดระหว่างเหล็กกล้า SKD11 และ DC53 เนื่องจากว่ามีปัจจัยที่ใช้ในการศึกษามากกว่า 1 ปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยมีอยู่ด้วยกันหลายระดับที่ต้องการทดลอง โดยในการทดลองนี้มีปัจจัยภายในที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด 2 ปัจจัย และมีปัจจัยภายนอก 1 ปัจจัย คือช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า (Electric Discharge Time) 3 ระดับ กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ค (Electric Discharge Peak Current) 3 ระดับ และชนิดของเหล็กกล้า 2 ระดับ

3.3.1 ทำความเข้าใจถึงปัญหา

ปัญหาเป็นแนวคิดเกี่ยวกับวัตถุประสงค์ของการทดลอง โดยต้องการการศึกษานเปรียบเทียบความสามารถในการตัดเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 และ DC53 ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธี EDM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1.1 ปัจจัยที่ควบคุมได้

ในการออกแบบการทดลองเราต้องหาปัจจัยที่สามารถควบคุมได้มาใช้ในการทดลองเพื่อป้องกันการผิดพลาดของผลการทดลอง โดยปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ ได้แก่ ช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ก (IP) อัตราการฉีดไล่เศษชิ้นงานที่เกิดจากการสปาร์ก ขนาดของชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง และขนาดของอิเล็กโทรด ในการทดลองนี้ได้กำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง คือ ช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ก ซึ่งปัจจัยสองตัวนี้สามารถปรับเปลี่ยนได้อย่างแม่นยำโดยการตั้งการจากคอมพิวเตอร์ ที่อยู่ในเครื่องอีซีเอ็ม

3.3.1.2 ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้

ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้เป็นปัจจัยที่ไม่อยากให้เกิดขึ้นในการทดลอง เพราะเมื่อเกิดขึ้นแล้วจะส่งผลกระทบต่อผลของการทดลอง ทำให้ผลของการทดลองผิดพลาดไป และสร้างความไม่น่าเชื่อถือให้กับรูปแบบ (Model) ของการทดลอง โดยปัจจัยเหล่านี้ ได้แก่ ความผิดพลาดของเครื่องอีซีเอ็ม อุณหภูมิสภาพแวดล้อม ความผิดพลาดจากผู้ทำการทดลอง

3.3.2 เลือกพารามิเตอร์ ระดับ และขอบเขต

การเลือกพารามิเตอร์หรือปัจจัยที่จะนำมาใช้ในการทดลอง โดยในการทดลองนี้เลือกทั้งหมดสามพารามิเตอร์ คือ ช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ก (IP) และ ชนิดของเหล็กกล้า เครื่องมือ การกำหนดระดับของพารามิเตอร์ได้นำค่าในแต่ละระดับจากงานวิจัยอื่น ซึ่งมีความคล้ายคลึงกันมาประยุกต์ใช้

3.3.3 เลือกการออกแบบการทดลอง

ในการเลือกการออกแบบการทดลองได้เลือกการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล จำนวนของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองมี 3 ปัจจัย และต้องตัดสินใจว่าจะทำการบล็อกกิง (Blocking) หรือ ทำการสุ่ม (Randomization) อย่างใดอย่างหนึ่งหรือไม่ โดยในการทดลองนี้ได้เลือกทำการสุ่ม (Randomization) ถ้าดับการทดลอง และทำการหาขนาดของตัวอย่างคือการหาจำนวนการทดลองซ้ำ (Replication)

3.3.4 แผนการทดลอง

ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองคือ ช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) และกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ก (IP) โดยมีระดับของตัวแปร 3 ระดับ ดังที่แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงระดับตัวแปรในการทดลอง

ตัวแปร	Level 1	Level 2	Level 3
Electric Discharge Time (μsec)	125	190	250
Electric Discharge Peak Current (A)	50	75	90

ในส่วนตัวแปรที่นอกเหนือจากตัวแปร ON และ IP จะกำหนดเป็นค่าคงที่ตลอดการทดลองทุกครั้งที่ทำการทดลอง โดยจะยึดตามค่ามาตรฐานของเงื่อนไข C100 (Condition C100) ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ใช้สำหรับอิเล็กทรอนิกส์ของเครื่องจักรงานเหล็กกล้าในการตัดเนื้อชิ้นงานโดยแสดงดังตารางที่ 3.2 และตัวแปรที่เป็นค่าคงที่อีกตัวก็คือ เวลาที่ทำการตัดชิ้นงานคือ 30 นาทีต่อชิ้น ซึ่งสามารถกำหนดได้โดยการป้อนจีโค้ดลงไป โปรแกรมควบคุมการตัด ส่วนการตั้งความเป็นขั้วจะให้อิเล็กทรอนิกส์เป็นขั้วลบ และชิ้นงานเป็นขั้วบวก ในการทดลองมีตัวแปร ON=3 ระดับ, IP=3 ระดับ และเหล็กกล้าเครื่องมือสองชนิดทำให้จะต้องมีจำนวนชิ้นงาน 18 ชิ้น จากการคำนวณการทำซ้ำ 3 ครั้ง จะได้จำนวนการทดลองทั้งหมด 54 ครั้ง

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่สภาวะคงที่โดยกำหนดค่าคงที่ตลอดการทดลอง

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

ในการทดลองทั้งหมด 54 ครั้ง จะต้องมีการสุ่มลำดับของการทดลองเพื่อให้ค่าความผิดพลาดของการทดลองเกิดการกระจายตัวอย่างเท่า ๆ กัน เป็นการหลีกเลี่ยงค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเป็นลักษณะแนวโน้มหรือมีการกระจุกตัวของค่าความผิดพลาด ซึ่งลำดับในการทดลองตามการออกแบบการทดลอง แสดงดังตารางที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 ลำดับการทดลอง

ลำดับการทดลอง	ลำดับส้อม	ON (μ sec)	IP (A)	ชนิดเหล็กกล้า
1	3	125	50	DC 53
2	18	125	75	DC 53
3	26	125	90	DC 53
4	11	190	50	DC 53
5	1	190	75	DC 53
6	17	190	90	DC 53
7	20	250	50	DC 53
8	24	250	75	DC 53
9	4	250	90	DC 53
10	8	125	50	DC 53
11	19	125	75	DC 53
12	15	125	90	DC 53
13	21	190	50	DC 53
14	2	190	75	DC 53
15	22	190	90	DC 53
16	10	250	50	DC 53
17	27	250	75	DC 53
18	6	250	90	DC 53
19	9	125	50	DC 53
20	12	125	75	DC 53
21	25	125	90	DC 53
22	14	190	50	DC 53
23	5	190	75	DC 53
24	13	190	90	DC 53
25	16	250	50	DC 53
26	23	250	75	DC 53
27	7	250	90	DC 53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 ลำดับการทดลอง (ต่อ)

ลำดับการทดลอง	ลำดับสุ่ม	ON (μsec)	IP (A)	ชนิดเหล็กกล้า
28	30	125	50	SKD 11
29	52	125	75	SKD 11
30	54	125	90	SKD 11
31	34	190	50	SKD 11
32	29	190	75	SKD 11
33	39	190	90	SKD 11
34	33	250	50	SKD 11
35	40	250	75	SKD 11
36	46	250	90	SKD 11
37	51	125	50	SKD 11
38	44	125	75	SKD 11
39	36	125	90	SKD 11
40	28	190	50	SKD 11
41	45	190	75	SKD 11
42	47	190	90	SKD 11
43	43	250	50	SKD 11
44	31	250	75	SKD 11
45	49	250	90	SKD 11
46	38	125	50	SKD 11
47	48	125	75	SKD 11
48	41	125	90	SKD 11
49	32	190	50	SKD 11
50	35	190	75	SKD 11
51	37	190	90	SKD 11
52	50	250	50	SKD 11
53	42	250	75	SKD 11
54	53	250	90	SKD 11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการทดลองครบทั้ง 54 การทดลอง ตามแผนการทดลองข้างต้น จะต้องคำนวณหาอัตราการตัดเนื้อชิ้นงานหาได้โดยการเอาน้ำหนักชิ้นงานก่อนการทดลองลบด้วยน้ำหนักหลังการทดลองลบกันแล้วหารด้วยเวลา ส่วนอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดหาได้โดยการเอาน้ำหนักอิเล็กโทรดก่อนการทดลองลบด้วยน้ำหนักหลังการทดลองลบกันแล้วหารด้วยเวลา และความหนาผิวของชิ้นงานสามารถหาได้โดยใช้เครื่องวัดความหนาผิว

ผลการทดลองทั้งหมดจะต้องนำไปวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล (Residual) โดยใช้โปรแกรม Minitab

3.4 ขั้นตอนการทดลอง

ในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการทดลองจะต้องมีการวางแผนการทดลองหรือมีการจัดลำดับขั้นของการทดลอง เพื่อที่จะให้การทดลองเป็นไปตามขั้นตอนที่ได้ออกแบบไว้ และในการทดลองก่อนที่จะทำการทดลองจะต้องมีการเตรียมชิ้นงานให้ได้ขนาดตามความต้องการมีลักษณะสมมาตรกันทุกชิ้น

3.4.1 ขั้นตอนก่อนการทดลอง

3.4.1.1 การเตรียมชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง

การเตรียมชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง ก่อนที่จะทำการทดลองต้องมีการเตรียมชิ้นงานให้ได้ขนาดตามที่กำหนดไว้ โดยนำเหล็กกล้าทั้งสองชนิดมาตัดให้ได้ขนาด 30 มิลลิเมตร แล้วนำไปเข้าเครื่องไสเพื่อปรับระดับชิ้นงานดังรูปที่ 3.6 สุดท้ายนำไปเข้าเครื่องกัดเพื่อให้ชิ้นงานสมมาตรดังรูปที่ 3.7 แล้วได้ขนาดตามที่กำหนด คือเหล็กกล้า SKD11 ขนาด 30 x 30 x 30 มิลลิเมตร เหล็กกล้า DC53 ขนาด 30 x 40 x 30 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.6 การขึ้นรูปชิ้นงานโดยการไส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 การขึ้นรูปชิ้นงานโดยการกัด

3.4.1.2 ขั้นตอนการเตรียมอิเล็กโทรด

การเตรียมอิเล็กโทรด นำอิเล็กโทรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร ตัดให้ได้ทั้งหมด 54 แท่ง โดยแต่ละแท่งตัดให้ได้ความยาว 100 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปปาดหน้าด้วยเครื่องกลึง

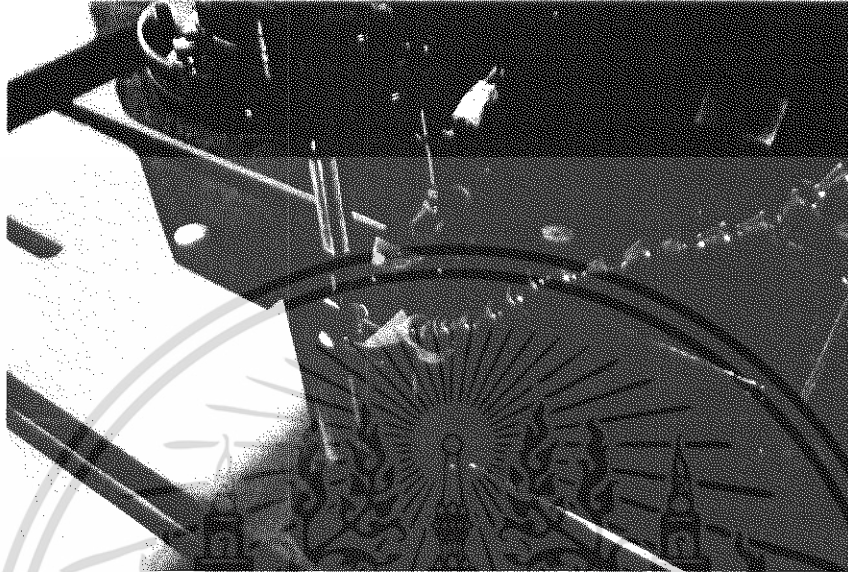


รูปที่ 3.8 การขึ้นรูปอิเล็กโทรดโดยการตัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 ขั้นตอนระหว่างการทดลอง

1. นำชิ้นงานและอิเล็กโทรด ไปซังน้ำหนักรวบรวมเพื่อบันทึกค่าน้ำหนักก่อนการตัด
2. ทำการจับยึดชิ้นงานและอิเล็กโทรดเข้ากับหัวจับของเครื่องอีซีเอ็ม ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ลักษณะการจับยึดชิ้นงานและอิเล็กโทรด

3. ทำการตั้งค่าศูนย์ของระบบพิกัดแกนทั้ง 3 แกน (XYZ) ซึ่งเป็นจุดอ้างอิงในการเดินของอิเล็กโทรด
4. กำหนดตำแหน่งของหัวฉีดสาร ไดอิเล็กทริกในตำแหน่งเดิมทุกครั้งของการทดลอง
5. ทำการเขียนจีโค้ด (G-Code) กำหนดเวลาการตัด 30 นาที และกำหนดเงื่อนไข C100 (Condition C100)
6. ป้อนค่าตัวแปรตามลำดับการสุ่มการทดลองคือ ตัวแปร ON และ IP
7. ทำการทดสอบ โปรแกรม (Run) ที่ได้เขียนจีโค้ด ไว้แล้วเริ่มทำการสปาร์ค
8. ปลดสาย ไดอิเล็กทริกกลับเข้าสู่ถังเก็บจนหมด แล้วจึงถอดอิเล็กโทรดและชิ้นงานออกได้
9. ทำความสะอาดอิเล็กโทรดและชิ้นงานจนแห้งสนิทแล้วนำไปซังน้ำหนักรวบรวมเพื่อเก็บบันทึกค่าการ

ทดลอง

10. ทำการทดลองตามแผนการทดลองจนครบทั้ง 54 การทดลอง

3.4.3 ขั้นตอนหลังการทดลอง

ในส่วนขั้นตอนหลังการทดลอง จะทำการตรวจสอบและตรวจเช็คชิ้นงานที่สปาร์คเสร็จแล้ว โดยชิ้นงานที่ทำการสปาร์คเสร็จแล้วจะมีคราบน้ำมันและเศษผงที่เกิดจากการสปาร์คเข้ามาที่เกิดจากการสปาร์ค มาทำความสะอาดชิ้นงานโดยการเป่าลม แล้วเช็ดด้วยผ้าสะอาดให้แห้ง จากนั้นนำผลน้ำหนักที่ได้จากการบันทึกในขั้นตอนระหว่างการทดลอง ไปคำนวณอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (Material Removal Rate) อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (Electrode Wear Rate)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3.1 การวัดค่าความหยาบผิวชิ้นงาน

นำชิ้นงานมาทำการวัดค่าความหยาบผิวด้วยเครื่องวัดค่าความหยาบผิวด้วยเครื่องวัดค่าความหยาบผิว โดยลักษณะของการวัดต้องทำการควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ให้เหมือนกันโดยปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้ เช่น ความสูงของการวางชิ้นงาน ตำแหน่งของการเก็บค่าความหยาบผิว เป็นต้น ซึ่งในการวัดค่าความหยาบผิวนี้อาจใช้ผู้ทำการวัดเพียงคนเดียวเพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนซึ่งเกิดจากผู้ทำการวัด และก่อนการใช้เครื่องวัดค่าความหยาบผิวเมื่อเปิดเครื่องแล้วต้องทำการปรับค่าการวัดค่าความหยาบผิวเครื่องทุกครั้ง เพื่อให้ผลการวัดค่าความหยาบผิวที่ออกมาถูกต้องและแม่นยำแล้วจึงทำการวัดค่าความหยาบผิว ซึ่งในการวัดค่าความหยาบผิวจะได้ผลออกมา 3 ค่า คือ Ra Rz และ Rmax



รูปที่ 3.10 ลักษณะการติดตั้งชิ้นงานเข้ากับเครื่องวัดความหยาบผิว

3.4.3.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

เมื่อได้ค่าอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (Material Removal Rate) อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (Electrode Wear Rate) และค่าความหยาบผิว Ra Rz และ Rmax โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$ หรือที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % และกำหนดสมมติฐาน

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$$

แล้วนำค่าผลตอบสนองไปวิเคราะห์ความแปรปรวน วิเคราะห์ส่วนตกค้าง (Residuals) ด้วยโปรแกรม Minitab 14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

ในการดำเนินการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้ ทำได้โดยกำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง 3 ปัจจัย ดังแสดงในตารางที่ 4.1 โดยจะมีปัจจัยภายในคือ ON กับ IP และปัจจัยภายนอก คือชนิดของเหล็กกล้า เพื่อทำการการศึกษาอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (Material Removal Rate) อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (Electrode Wear Rate) และความหยาบผิวของชิ้นงาน (Surface Roughness) เปรียบเทียบกันระหว่างเหล็กกล้า SKD11 และ DC53 ซึ่งทำการทดลองตามวิธีการทดลองที่ออกแบบไว้ในบทที่ 3

ทำการทดลองด้วยกรรมวิธีการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดฉีด โดยใช้ทองแดงผสมเป็นอิเล็กโทรด ส่วนชิ้นงานประกอบด้วยเหล็กกล้าเครื่องมือ 2 ชนิด คือเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 และ DC53 ในการทดลองจะใช้ระยะเวลาคงที่ทุกการทดลองเป็นเวลา 30 นาที จะมีจำนวนครั้งของการทดลองทั้งหมด 54 การทดลอง

4.1 ผลของการทดลองเพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการตัดเหล็กกล้า SKD11 และ DC53

ตารางที่ 4.1 ผลการเก็บค่าน้ำหนักก่อน-หลังการทดลอง

ลำดับการทดลอง	ON (μsec)	IP (A)	ชนิดเหล็กกล้า	น้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์ (กรัม)		น้ำหนักชิ้นงาน (กรัม)	
				ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
1	190	75	DC 53	155.40	155.20	317.00	299.70
2	190	75	DC 53	155.90	155.60	307.30	290.20
3	125	50	DC 53	156.80	156.60	327.90	315.00
4	250	90	DC 53	157.80	157.60	311.90	293.40
5	190	75	DC 53	157.20	156.90	305.20	288.80
6	250	90	DC 53	155.50	155.30	308.10	289.90
7	250	90	DC 53	157.00	156.60	310.60	291.90
8	125	50	DC 53	156.50	156.40	319.10	307.10
9	125	50	DC 53	157.40	157.30	308.50	296.70
10	250	50	DC 53	154.10	154.00	325.50	312.50
11	190	50	DC 53	153.90	153.80	310.70	297.80
12	125	75	DC 53	157.30	156.90	318.90	302.60
13	190	90	DC 53	158.20	157.90	316.10	300.20
14	190	50	DC 53	155.90	155.80	320.50	307.00
15	125	90	DC 53	154.30	153.60	369.60	353.60
16	250	50	DC 53	154.60	154.50	311.10	297.30
17	190	90	DC 53	156.80	156.40	342.60	323.40
18	125	75	DC 53	158.20	157.70	357.30	341.50
19	125	75	DC 53	156.50	156.00	352.60	336.50
20	250	50	DC 53	157.30	157.20	339.30	325.40
21	190	50	DC 53	157.00	156.90	323.70	311.30
22	190	90	DC 53	157.30	156.80	335.20	315.50
23	250	75	DC 53	154.80	154.60	314.10	297.10
24	250	75	DC 53	157.00	156.70	333.40	316.40
25	125	90	DC 53	158.10	157.40	318.80	301.80
26	125	90	DC 53	153.30	152.40	335.00	317.40
27	250	75	DC 53	154.40	154.30	321.60	304.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลการเก็บค่าน้ำหนักก่อน-หลังการทดลอง (ต่อ)

ลำดับการทดลอง	ON (μsec)	IP (A)	ชนิดเหล็กกล้า	น้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์ (กรัม)		น้ำหนักชิ้นงาน (กรัม)	
				ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
28	190	50	SKD 11	156.60	156.50	266.40	250.60
29	190	75	SKD 11	158.40	158.00	261.10	240.80
30	125	50	SKD 11	153.60	153.20	317.50	302.40
31	250	75	SKD 11	156.40	156.30	259.60	238.80
32	190	50	SKD 11	158.50	158.40	261.00	244.80
33	250	50	SKD 11	157.30	157.10	288.30	271.60
34	190	50	SKD 11	156.60	156.20	312.60	296.40
35	190	75	SKD 11	156.10	155.50	296.90	276.40
36	125	90	SKD 11	155.50	154.10	285.70	266.40
37	190	90	SKD 11	156.30	155.70	328.40	307.40
38	125	50	SKD 11	156.60	156.20	325.10	309.60
39	190	90	SKD 11	157.00	156.60	297.60	275.80
40	250	75	SKD 11	157.10	156.70	300.60	279.60
41	125	90	SKD 11	157.00	155.80	319.10	300.30
42	250	75	SKD 11	156.60	156.40	299.40	278.60
43	250	50	SKD 11	156.60	156.50	274.20	257.50
44	125	75	SKD 11	156.10	155.30	277.60	259.90
45	190	75	SKD 11	155.90	155.50	314.20	293.70
46	250	90	SKD 11	156.50	156.30	288.30	266.10
47	190	90	SKD 11	156.60	155.90	322.80	300.10
48	125	75	SKD 11	153.50	152.60	318.00	299.40
49	250	90	SKD 11	158.30	157.90	314.80	291.90
50	250	50	SKD 11	145.80	145.60	287.90	271.30
51	125	50	SKD 11	153.50	153.00	288.00	272.60
52	125	75	SKD 11	157.00	156.30	280.60	261.90
53	250	90	SKD 11	156.50	156.10	291.00	268.10
54	125	90	SKD 11	156.90	155.70	281.50	263.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ค่าอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน อัตราการสึกหรอของอิลีกโทรด และความหยาบผิวชิ้นงาน

ลำดับการทดลอง	ON (μsec)	IP (A)	EWR (mm ³ /min)	MRR (mm ³ /min)	Ra (μm)	Rz (μm)	Rmax (μm)	ชนิดเหล็กกล้า
1	125	50	0.7528	41.3462	7.294	25.419	60.975	DC 53
2	125	75	1.8764	50.6423	7.240	26.157	54.200	DC 53
3	125	90	3.3708	56.4135	7.238	25.438	52.613	DC 53
4	190	50	0.3708	41.3461	6.971	24.860	52.400	DC 53
5	190	75	0.7528	55.4423	9.540	34.204	62.713	DC 53
6	190	90	1.4944	61.5385	8.740	32.448	61.662	DC 53
7	250	50	0.3708	44.5481	7.836	32.440	92.863	DC 53
8	250	75	1.1236	54.4904	9.366	28.792	60.975	DC 53
9	250	90	0.7528	59.2981	5.942	23.105	60.738	DC 53
10	125	50	0.3708	38.4615	7.764	30.512	81.188	DC 53
11	125	75	1.8764	51.6058	7.344	26.191	47.863	DC 53
12	125	90	2.6180	51.2788	9.992	33.011	82.500	DC 53
13	190	50	0.3708	39.7404	7.817	33.767	64.988	DC 53
14	190	75	1.1236	54.8077	5.115	17.941	39.288	DC 53
15	190	90	1.8764	63.1442	7.191	22.061	44.850	DC 53
16	250	50	0.3708	41.6635	8.824	28.701	55.800	DC 53
17	250	75	0.3708	55.4519	9.619	36.637	76.250	DC 53
18	250	90	0.7528	58.3365	10.354	37.951	52.010	DC 53
19	125	50	0.3708	37.8173	4.624	19.291	36.775	DC 53
20	125	75	1.4944	52.2404	8.309	29.055	46.875	DC 53
21	125	90	2.6180	54.4904	8.523	28.624	73.826	DC 53
22	190	50	0.3708	43.2692	7.289	25.728	56.363	DC 53
23	190	75	1.1236	52.5673	10.052	36.147	76.362	DC 53
24	190	90	1.1236	50.9615	6.944	24.571	69.588	DC 53
25	250	50	0.3708	44.2308	8.247	23.912	64.938	DC 53
26	250	75	0.7528	54.4904	7.650	25.339	65.025	DC 53
27	250	90	1.4944	59.9327	8.991	30.418	54.762	DC 53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ค่าอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด และความหยาบผิวชิ้นงาน (ต่อ)

ลำดับการทดลอง	ON (μsec)	IP (A)	EWR (mm ³ /min)	MRR (mm ³ /min)	Ra (μm)	Rz (μm)	Rmax (μm)	ชนิดเหล็กกล้า
28	125	50	1.4944	64.6915	6.334	23.347	46.900	SKD 11
29	125	75	2.6180	80.1157	7.781	32.881	57.963	SKD 11
30	125	90	4.4944	78.8303	6.731	24.136	59.075	SKD 11
31	190	50	1.4944	69.4087	7.597	26.562	51.650	SKD 11
32	190	75	1.4944	86.9794	9.630	36.266	83.000	SKD 11
33	190	90	1.4944	93.4062	8.791	32.590	63.000	SKD 11
34	250	50	0.7528	71.5553	6.198	23.501	56.000	SKD 11
35	250	75	1.4944	89.9743	6.859	26.033	71.950	SKD 11
36	250	90	0.7528	95.1157	9.318	42.395	70.700	SKD 11
37	125	50	1.8764	65.9769	7.007	25.125	46.150	SKD 11
38	125	75	3.0000	75.8355	5.861	21.744	41.188	SKD 11
39	125	90	5.2472	82.6864	6.517	22.991	44.975	SKD 11
40	190	50	0.3708	67.6992	7.062	25.213	50.912	SKD 11
41	190	75	1.4944	87.8278	13.342	43.472	88.413	SKD 11
42	190	90	2.6180	97.2622	9.386	31.506	67.125	SKD 11
43	250	50	0.3708	71.5553	7.715	26.394	76.675	SKD 11
44	250	75	0.3708	89.1131	8.370	31.254	78.300	SKD 11
45	250	90	1.4944	98.1105	10.244	36.842	95.438	SKD 11
46	125	50	1.4944	66.4139	5.441	20.865	47.575	SKD 11
47	125	75	3.3708	79.6915	6.159	21.783	56.275	SKD 11
48	125	90	4.4944	80.5527	5.318	19.777	48.262	SKD 11
49	190	50	0.3708	69.4087	6.790	25.169	52.138	SKD 11
50	190	75	2.2472	87.8278	6.711	25.688	71.325	SKD 11
51	190	90	2.2472	89.9743	7.729	30.784	62.075	SKD 11
52	250	50	0.7528	71.1183	8.685	30.139	64.900	SKD 11
53	250	75	0.7528	89.1131	8.805	34.046	63.550	SKD 11
54	250	90	1.4944	98.1105	6.731	24.136	59.075	SKD 11

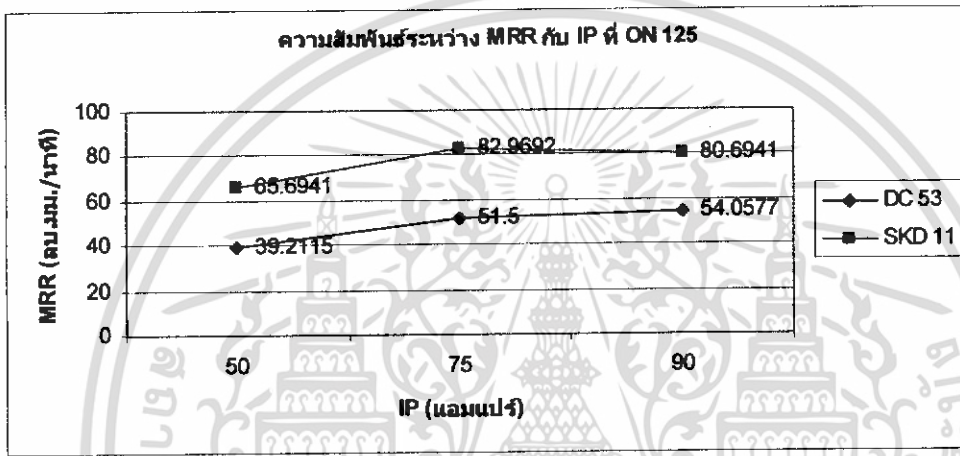
จากตารางที่ 4.1 แสดงผลการเก็บค่าน้ำหนักอิเล็กโทรด น้ำหนักชิ้นงานก่อนและหลังการทดลอง เพื่อนำไปคำนวณหาอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (Material Removal Rate) อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

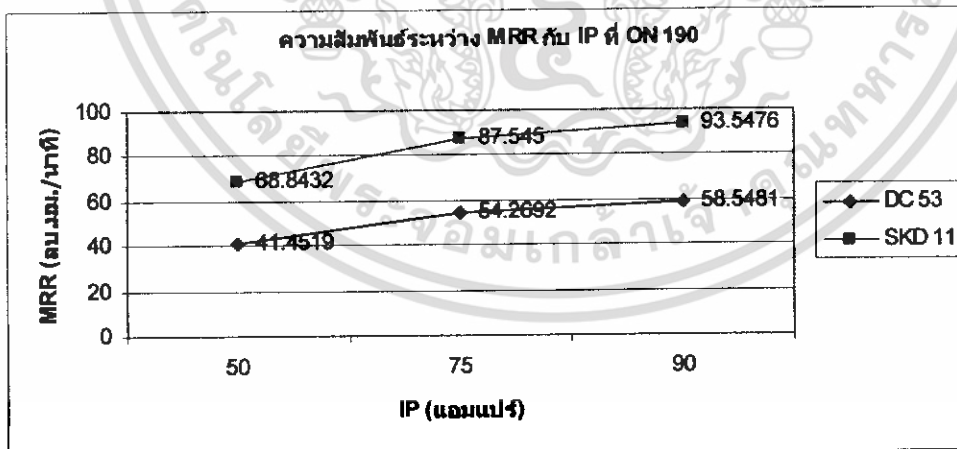
(Electrode Wear Rate) และนำชิ้นงานที่ได้หลังการทดลองไปวัดค่าความหยาบผิวของชิ้นงานด้วยเครื่องวัดความหยาบผิว ซึ่งผลการคำนวณและค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 และ DC53 แสดงดังตารางที่ 4.2

4.2 การวิเคราะห์ผลด้วยกราฟ

การวิเคราะห์ผลจากกราฟจะสามารถทำให้เข้าใจได้มากขึ้น ในการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยว่ามีผลอย่างไรกับค่าผลตอบสนองแต่ละค่า ในการสร้างกราฟจะนำค่าเฉลี่ยของค่าอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (Material Removal Rate) ค่าอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (Electrode Wear Rate) และค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน (Surface Roughness) มาสร้างกราฟ โดยกราฟที่ได้จะมีทั้งหมด 30 กราฟ ดังต่อไปนี้

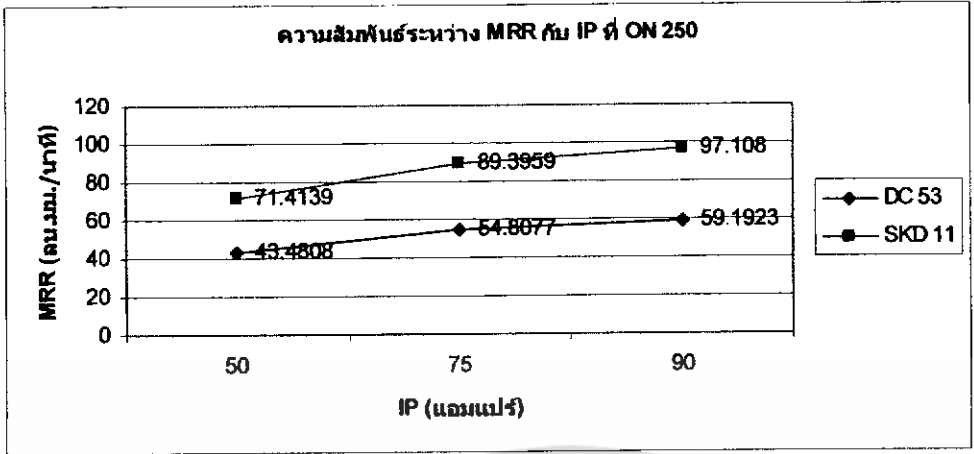


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง MRR กับ IP ที่ ON 125

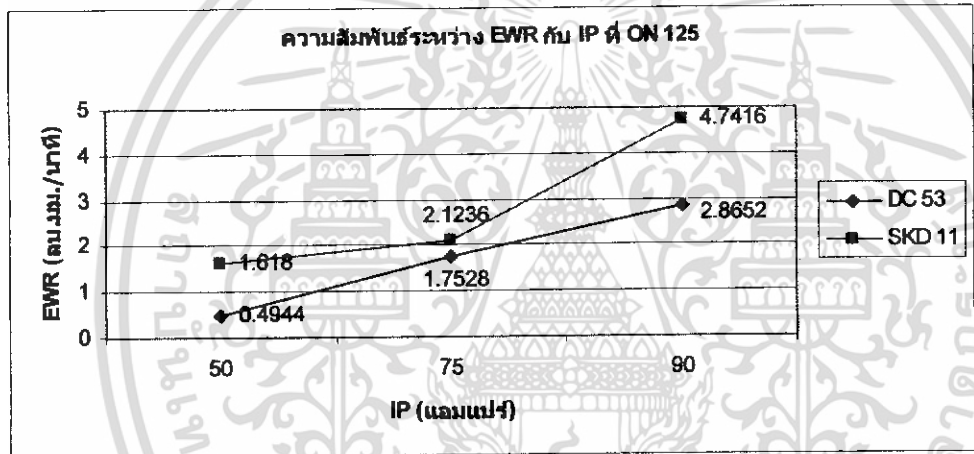


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง MRR กับ IP ที่ ON 190

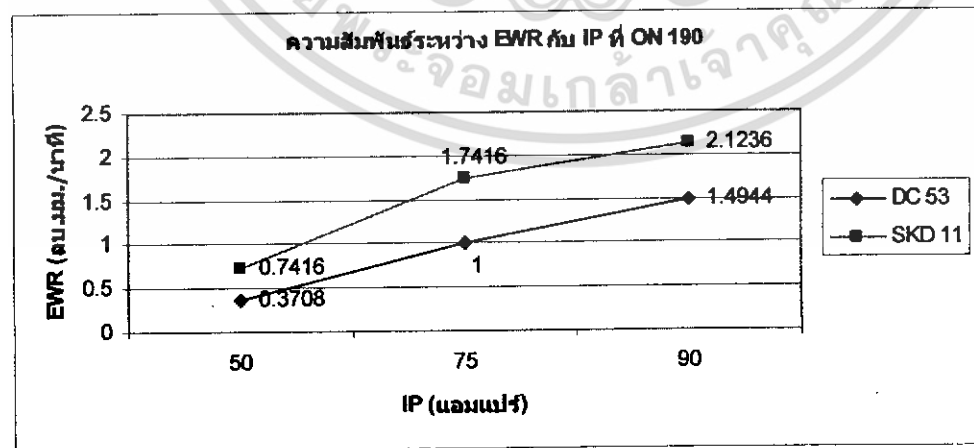
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง MRR กับ IP ที่ ON 250

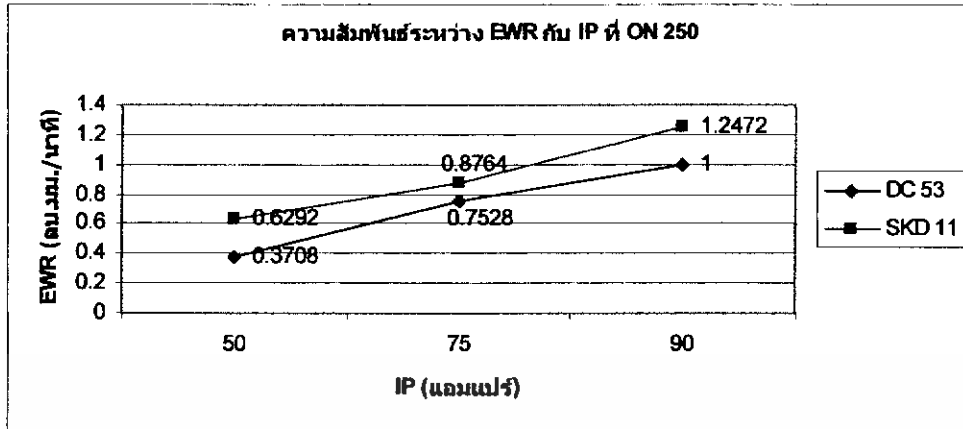


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง EWR กับ IP ที่ ON 125

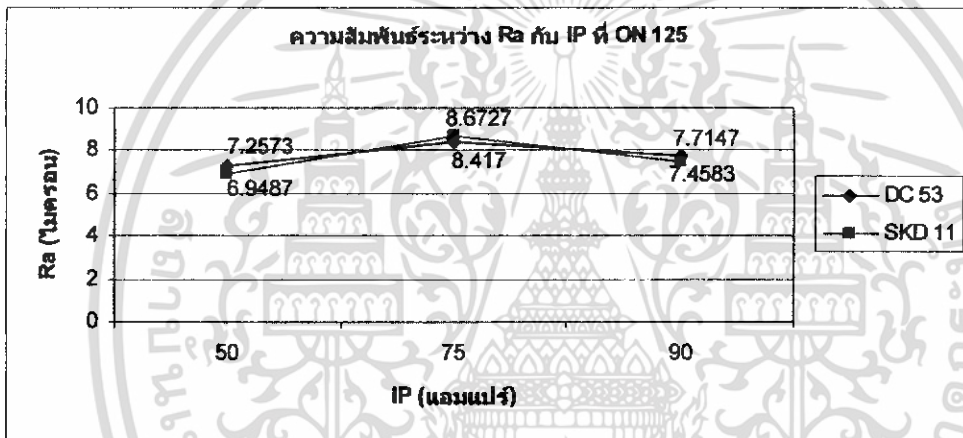


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง EWR กับ IP ที่ ON 190

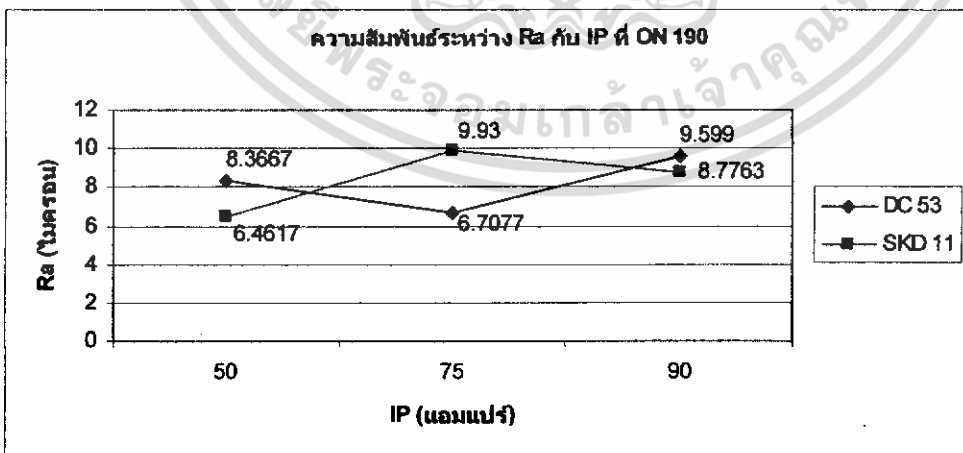
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง EWR กับ IP ที่ ON 250

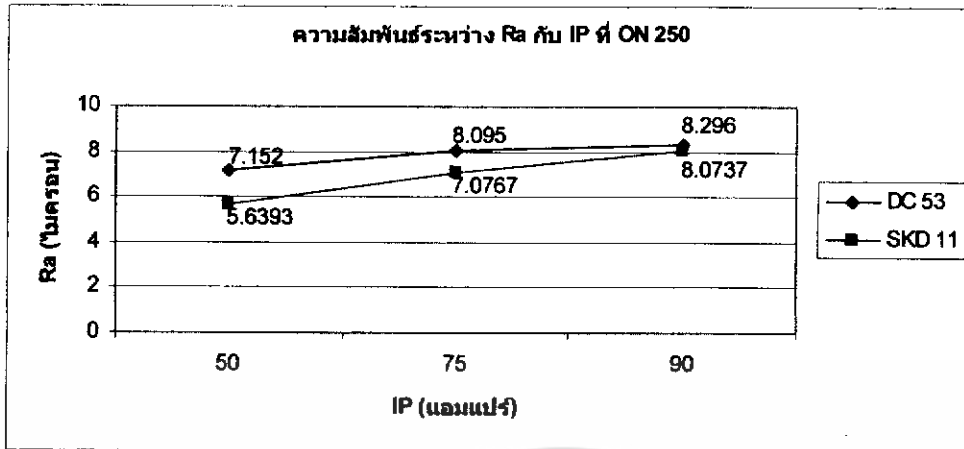


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Ra กับ IP ที่ ON 125

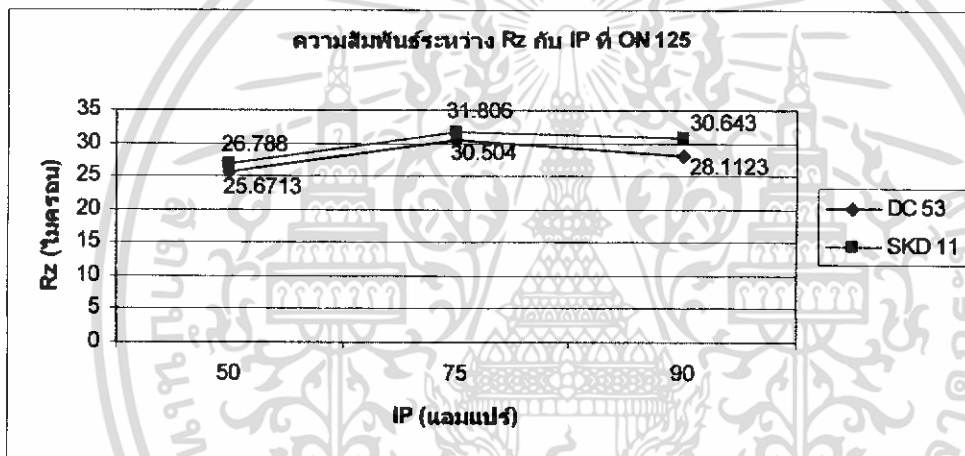


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Ra กับ IP ที่ ON 190

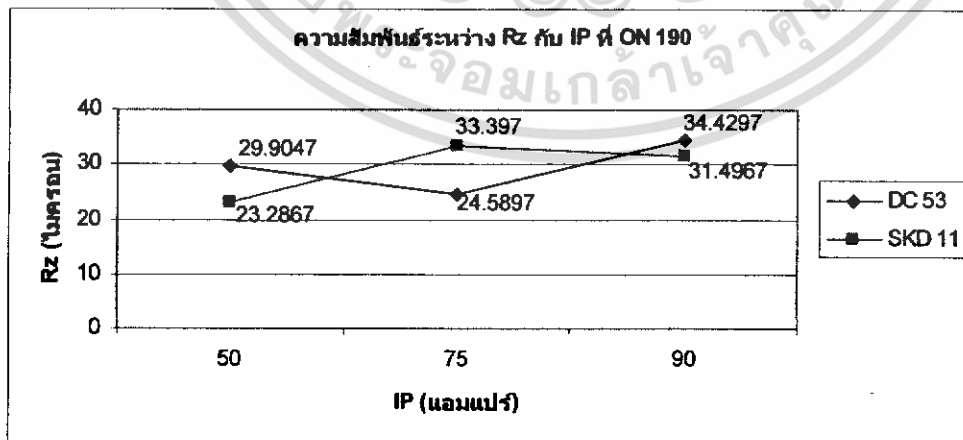
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Ra กับ IP ที่ ON 250

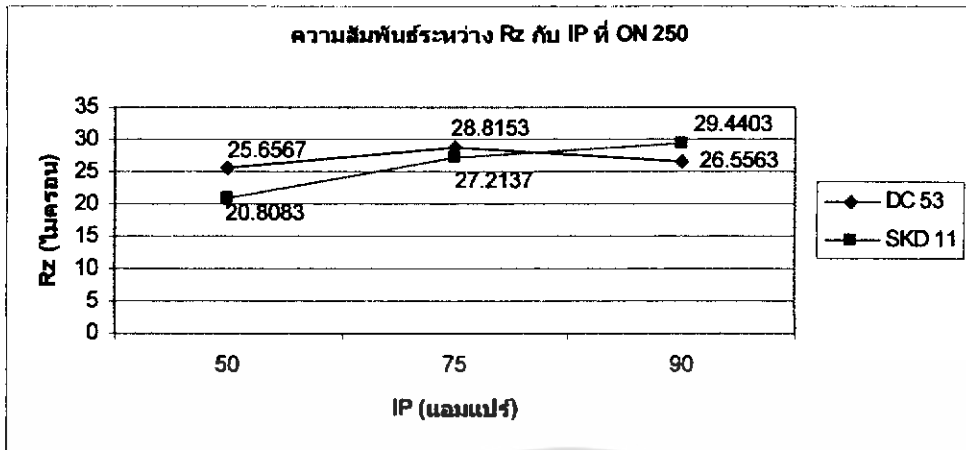


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง Rz กับ IP ที่ ON 125

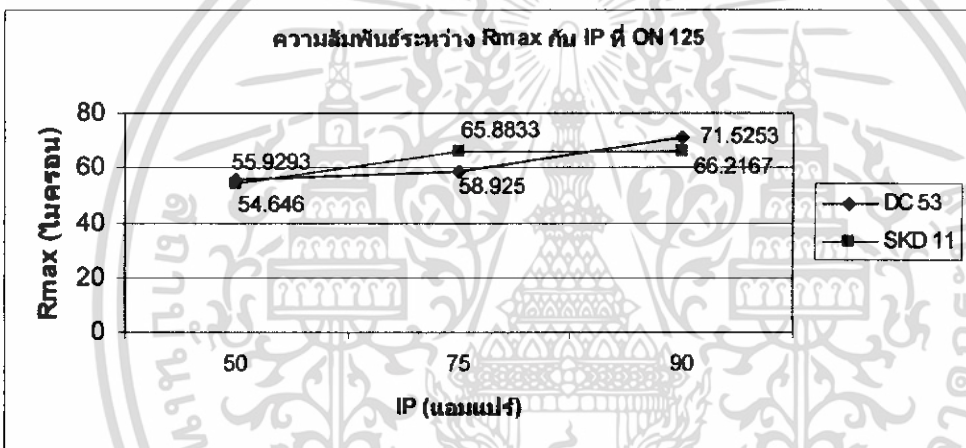


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง Rz กับ IP ที่ ON 190

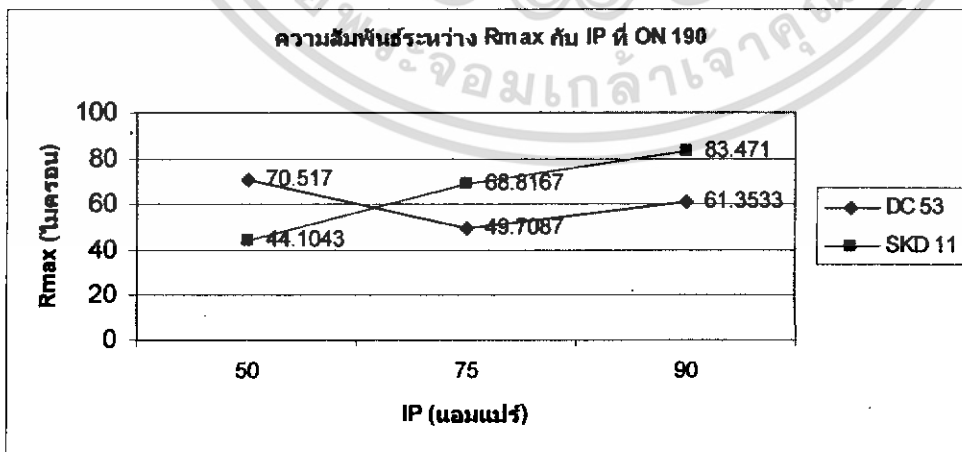
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง Rz กับ IP ที่ ON 250

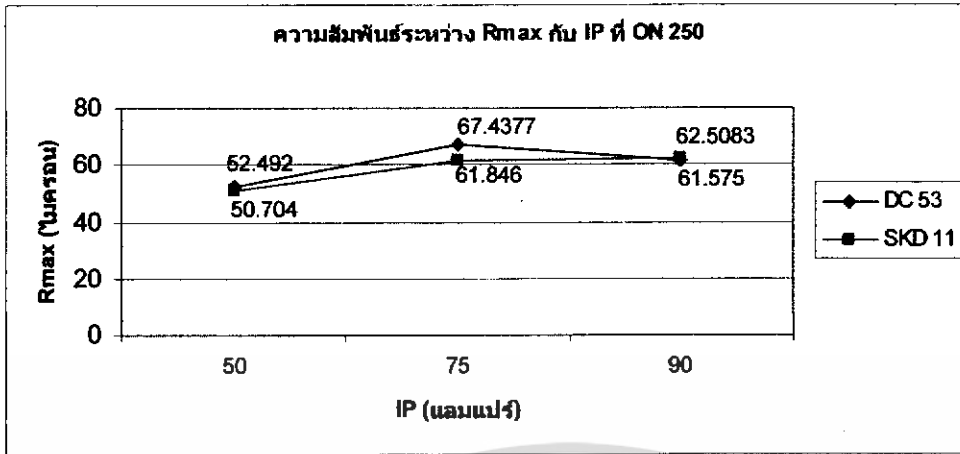


รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง Rmax กับ IP ที่ ON 125

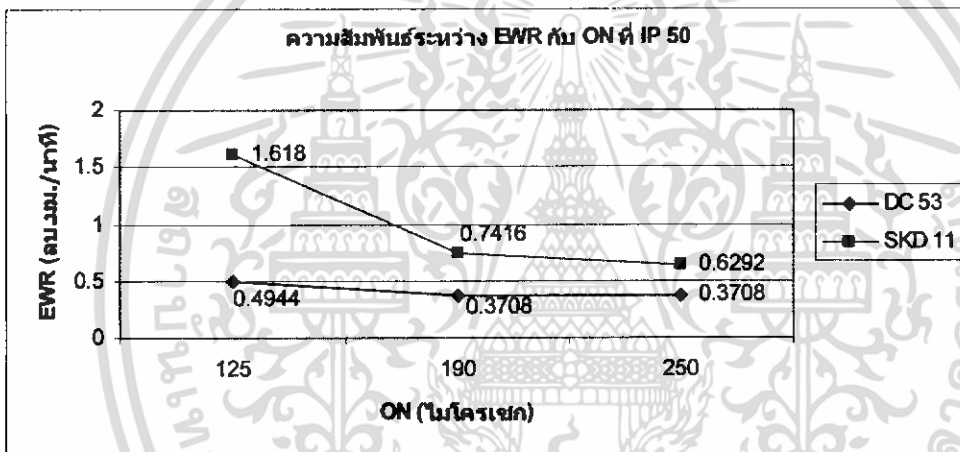


รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง Rmax กับ IP ที่ ON 190

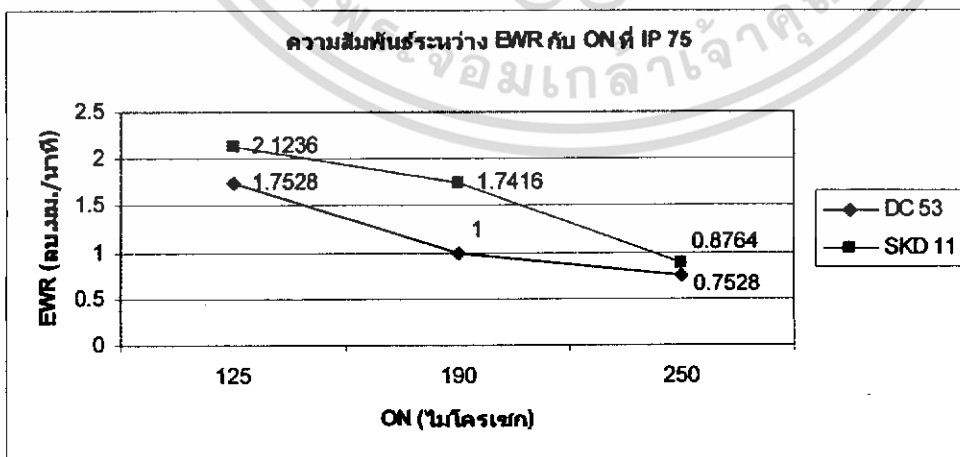
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง Rmax กับ IP ที่ ON 250

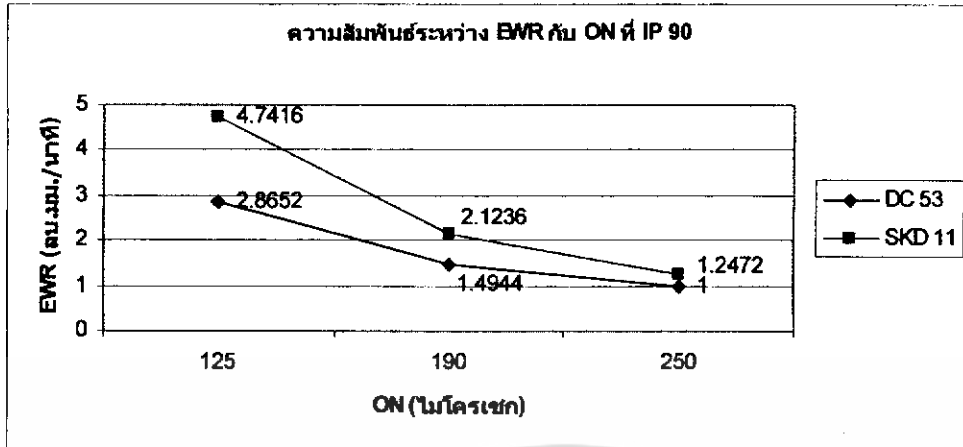


รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง EWR กับ ON ที่ IP 50

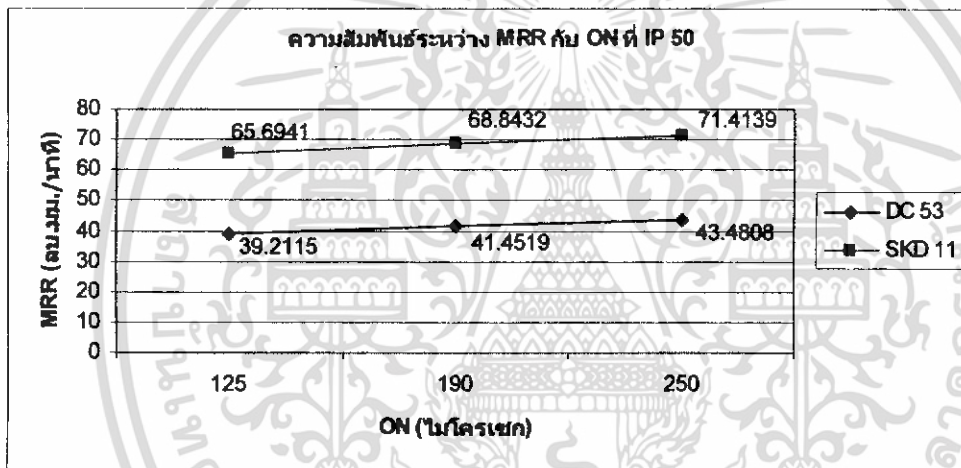


รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง EWR กับ IP ที่ IP 75

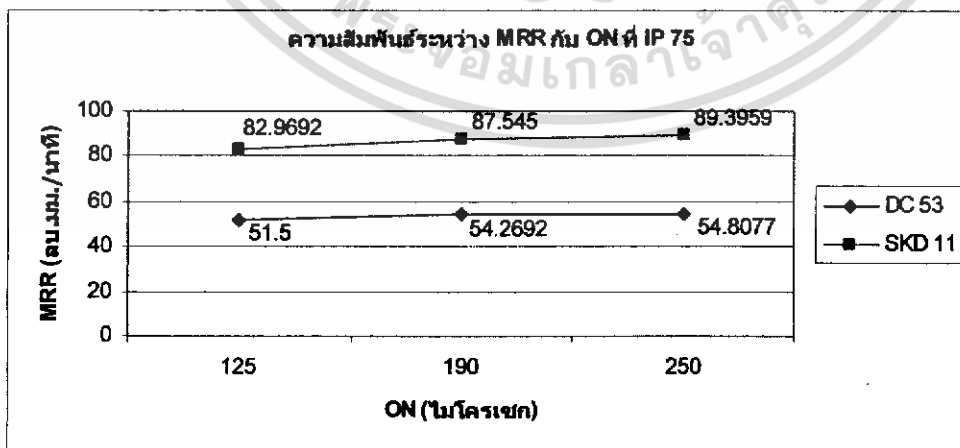
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง EWR กับ IP ที่ IP 90

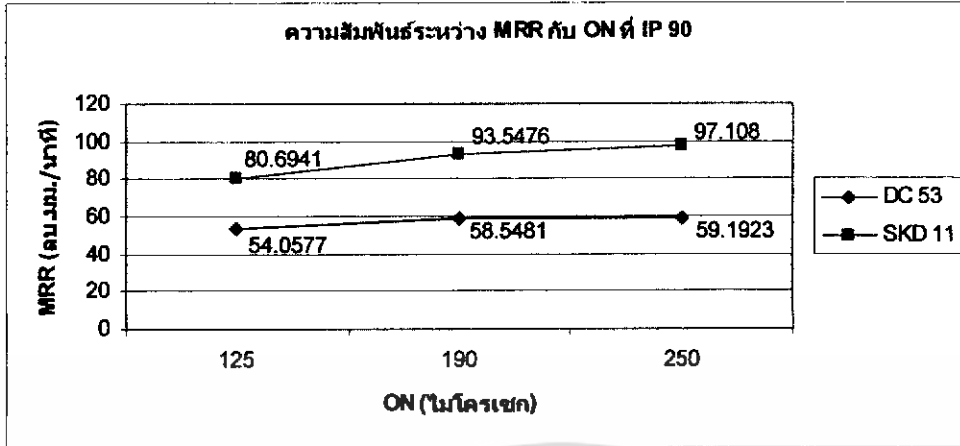


รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง MRR กับ IP ที่ IP 50

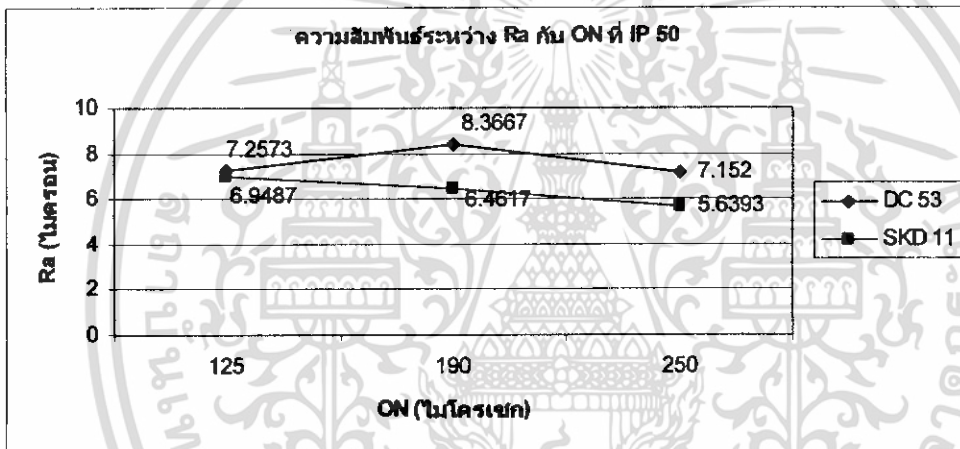


รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง MRR กับ IP ที่ IP 75

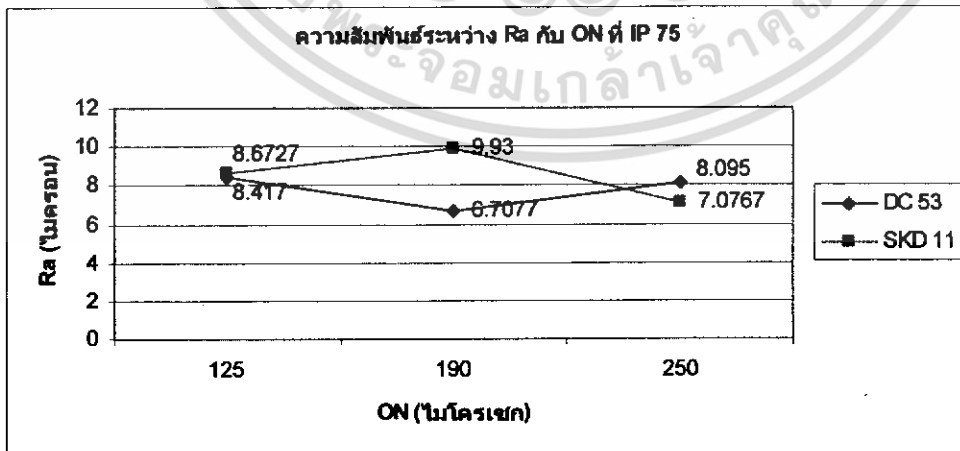
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง MRR กับ IP ที่ IP 90

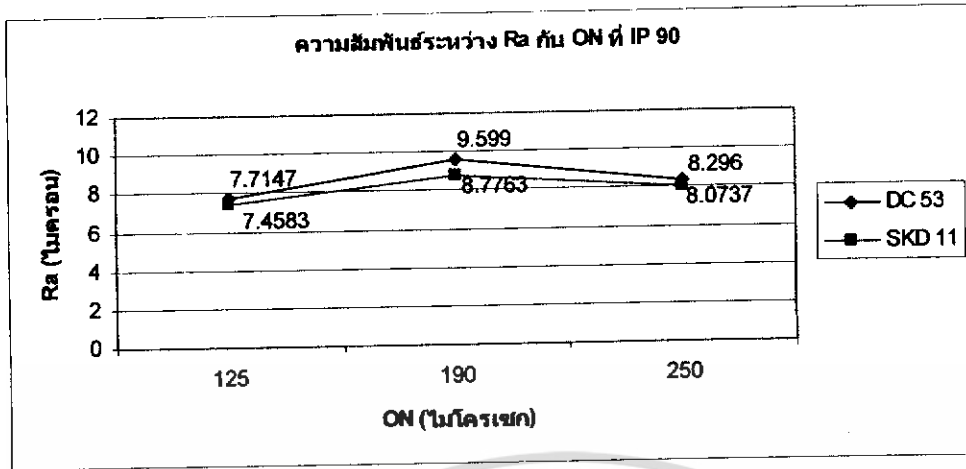


รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง Ra กับ IP ที่ IP 50

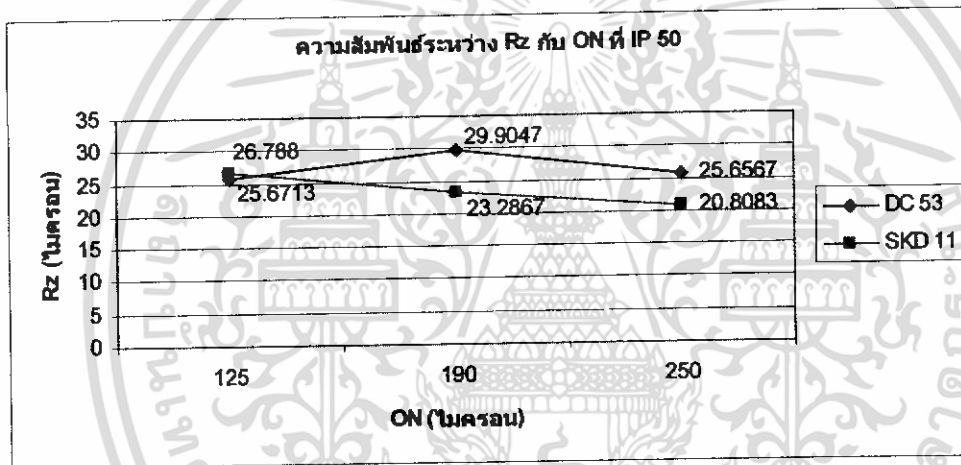


รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง Ra กับ IP ที่ IP 75

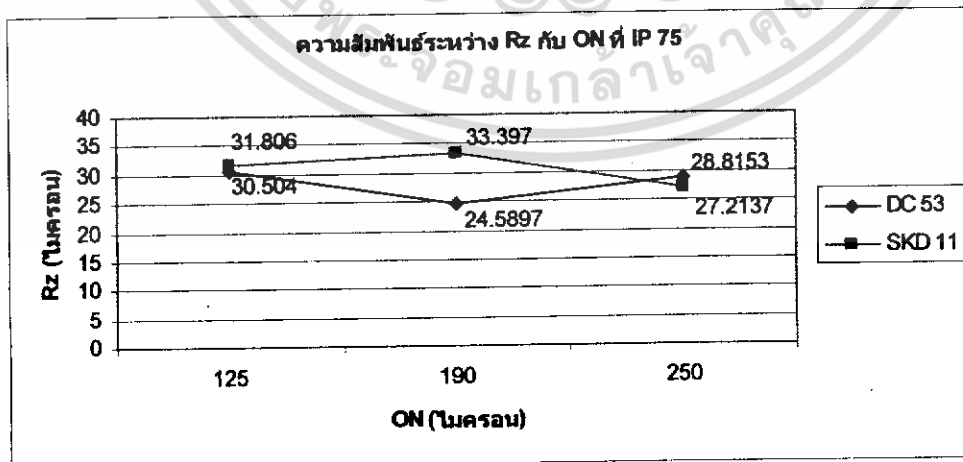
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่าง Ra กับ IP ที่ IP 90

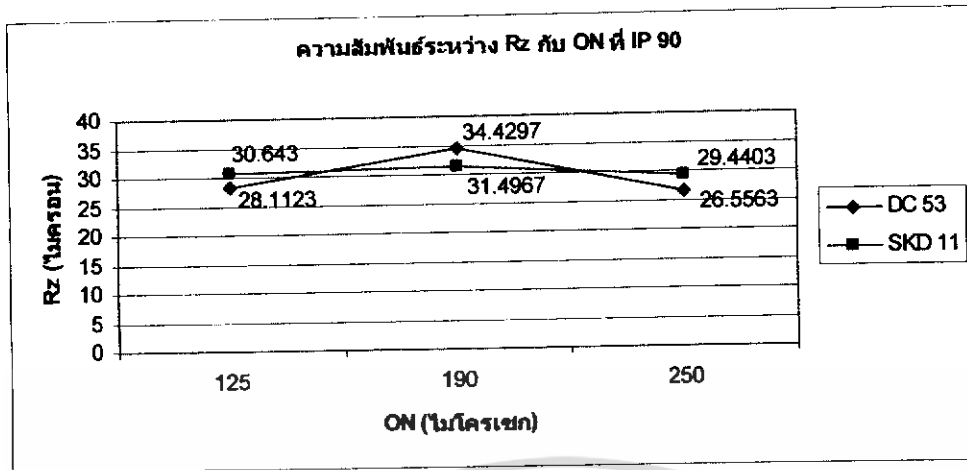


รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่าง Rz กับ IP ที่ IP 50

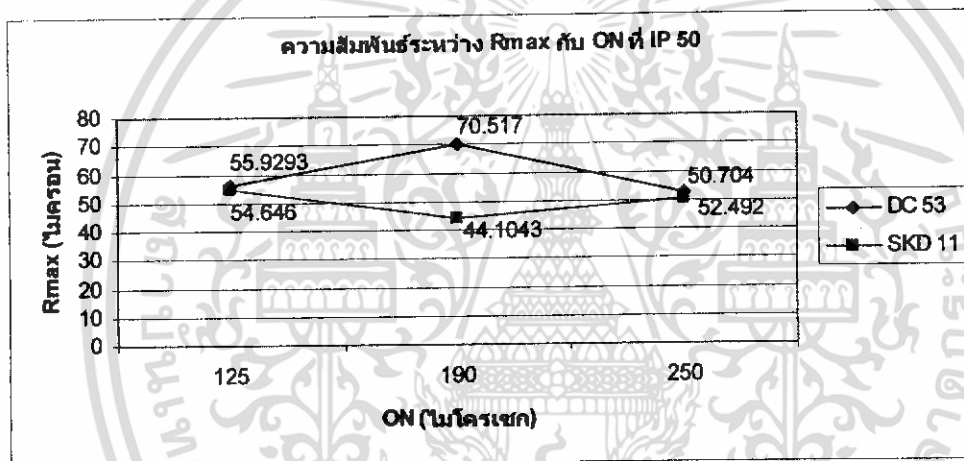


รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่าง Rz กับ IP ที่ IP 75

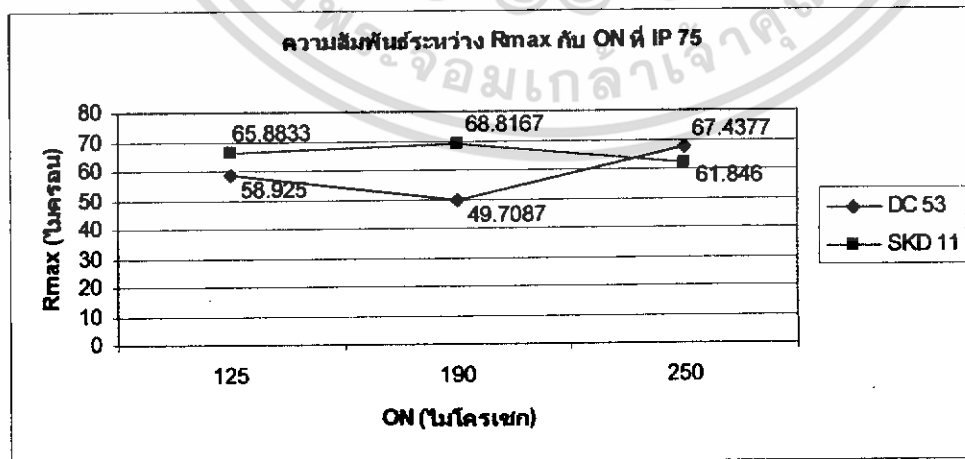
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่าง Rz กับ IP ที่ IP 90

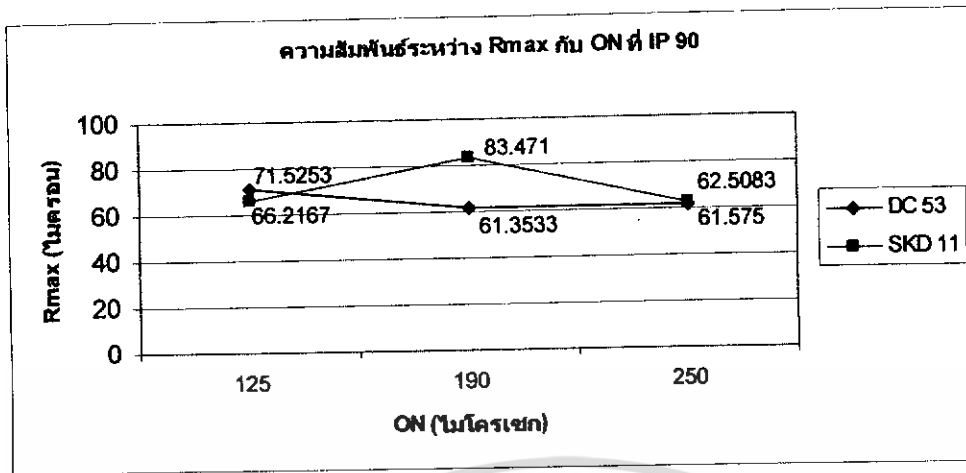


รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่าง Rmax กับ IP ที่ IP 50



รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่าง Rmax กับ IP ที่ IP 75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่าง Rmax กับ IP ที่ IP 90

ในการวิเคราะห์กราฟสามารถค่าตอบสนองอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (Material Removal Rate) อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (Electrode Wear Rate) และความหยาบผิวของชิ้นงาน (Surface Roughness) ได้ในแต่ละระดับของปัจจัย ว่าเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 หรือ DC53 มีอิทธิพลมากน้อยเพียงใดในแต่ละระดับของปัจจัย

4.3 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

จากตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดลองค่าอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด และความหยาบผิวชิ้นงาน ซึ่งเป็นผลตอบสนองที่ต้องการ เพื่อที่จะนำไปวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model Adequacy Checking) โดยจะใช้โปรแกรมเข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ โปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ โปรแกรม Minitab14

4.3.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

หลักการวิเคราะห์ความแปรปรวน คือการหาความผันแปร โดยรวมแล้วแยกออกเป็นความผันแปรเนื่องจากทรีทเมนต์ (Treatment) สำหรับแต่ละปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม และความผันแปรเนื่องจากสาเหตุที่ไม่ได้รับการควบคุม แล้วพิจารณาความผันแปรเนื่องจากทรีทเมนต์ว่ามีปริมาณมากหรือ น้อยเมื่อเทียบกับสาเหตุที่ไม่ได้รับการควบคุมในระหว่างเงื่อนไขในการทดลองแล้วนำมาสร้างเป็นตาราง ANOVA จะเริ่มจากการพิจารณาความมีนัยสำคัญทางสถิติ (Signification) ของอิทธิพลร่วมที่ระดับสูงก่อน ซึ่งถ้าพบว่าอิทธิพลร่วมมีนัยสำคัญทางสถิติ หมายความว่า ถ้าเปลี่ยนระดับของปัจจัยตัวใด โดยให้ปัจจัยตัวอื่นคงที่แล้วจะส่งผลให้ตัวแปรตอบสนองเปลี่ยนไปด้วย ซึ่งกล่าวไว้ว่าปัจจัยหลักที่เกิดจากปัจจัยร่วมจะมีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้วยนั่นเอง ดังนั้นเมื่ออิทธิพลร่วมมีนัยสำคัญทางสถิติแล้วก็ไม่จำเป็นต้องพิจารณาอิทธิพลหลักอีก เพราะแม้ว่าอิทธิพลหลักดูแล้ว ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติแต่แท้จริงแล้วมีอิทธิพลมาก

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนกำหนดให้ A=ชนิดเหล็กกล้า B=ON C=IP

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าตอบสนองอัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์ (EWR)

Source of Variation	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F ₀	P-Value
A	7.2914	1	7.2914	49.09	0.000
B	24.7114	2	12.3557	83.18	0.000
C	21.3996	2	10.6998	72.03	0.000
AB	3.4401	2	1.7201	11.58	0.000
AC	0.2522	2	0.1261	0.85	0.436
BC	7.2677	4	1.8169	12.23	0.000
ABC	0.3600	4	0.0900	0.61	0.661
Error	5.3476	36	0.1485		
Total	70.0701	53			

ในการวิเคราะห์ทุกค่าผลตอบสนองจะกำหนดระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ จากตารางที่ 4.3 เป็นผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าอัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์ (EWR) เมื่อพิจารณาแล้วพบว่าปัจจัยที่มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 คือ ชนิดเหล็กกล้า ช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ก (IP) และชนิดเหล็กกล้ากับช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า และช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ก จึงสรุปได้ว่าทั้งปัจจัยหลักและปัจจัยรวมเหล่านี้มีผลต่ออัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์ (EWR) อย่างมีนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าตอบสนองอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR)

Source of Variation	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F ₀	P-Value
A	12720.5	1	12720.5	2502.90	0.000
B	567.5	2	283.8	55.83	0.000
C	2485.1	2	1742.5	342.87	0.000
AB	112.3	2	56.2	11.05	0.000
AC	84.7	2	42.4	8.34	0.001
BC	71.5	4	17.9	3.52	0.016
ABC	41.0	4	10.2	2.02	0.113
Error	183.0	36	5.1		
Total	17265.6	53			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.4 เป็นผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR) เมื่อพิจารณาแล้วพบว่าปัจจัยที่มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 คือ ชนิดเหล็กกล้า ช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ค (IP) และชนิดเหล็กกล้ากับช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า และชนิดเหล็กกล้ากับกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ค จึงสรุปได้ว่าทั้งปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมเหล่านี้มีผลต่ออัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR) อย่างมีนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าตอบสนองความหยาบผิว (Ra)

Source of Variation	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F ₀	P-Value
A	1.099	1	1.099	0.49	0.488
B	19.426	2	9.713	4.35	0.020
C	10.618	2	5.309	2.38	0.107
AB	9.715	2	4.858	2.17	0.128
AC	0.299	2	0.149	0.07	0.935
BC	3.791	4	0.948	0.42	0.790
ABC	7.133	4	1.783	0.80	0.534
Error	80.448	36	2.235		
Total	132.529	53			

จากตารางที่ 4.5 เป็นผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความหยาบผิว (Ra) เมื่อพิจารณาแล้วพบว่าปัจจัยที่มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 คือ ช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) จึงสรุปได้ว่าปัจจัยหลักมีผลต่อค่าความหยาบผิว (Ra) อย่างมีนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$ ส่วนปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมที่เหลือ ไม่มีผลต่อค่าความหยาบผิว (Ra)

ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าตอบสนองความหยابผิว (Rz)

Source of Variation	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F ₀	P-Value
A	0.07	1	0.07	0.00	0.963
B	236.82	2	118.41	3.83	0.031
C	124.71	2	62.35	2.02	0.148
AB	92.76	2	46.38	1.50	0.237
AC	30.68	2	15.34	0.50	0.613
BC	54.08	4	13.52	0.44	0.781
ABC	81.76	4	20.44	0.66	0.623
Error	1113.44	36	30.93		
Total	1734.31	53			

จากตารางที่ 4.6 เป็นผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความหยابผิว(Rz) เมื่อพิจารณาแล้วพบว่าปัจจัยที่มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 คือ ช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) จึงสรุปได้ว่าปัจจัยหลักมีผลต่อค่าความหยابผิว (Rz) อย่างมีนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$ ส่วนปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมที่เหลือ ไม่มีผลต่อค่าความหยابผิว (Rz)

ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าตอบสนองความหยابผิว (Rmax)

Source of Variation	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F ₀	P-Value
A	12.7	1	12.7	0.09	0.763
B	1539.7	2	769.8	5.57	0.008
C	206.1	2	103.0	0.75	0.481
AB	788.9	2	394.5	2.86	0.071
AC	680.2	2	340.1	2.46	0.099
BC	853.6	4	213.4	1.55	0.210
ABC	718.6	4	179.6	1.30	0.288
Error	4971.8	36	138.1		
Total	9771.6	53			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

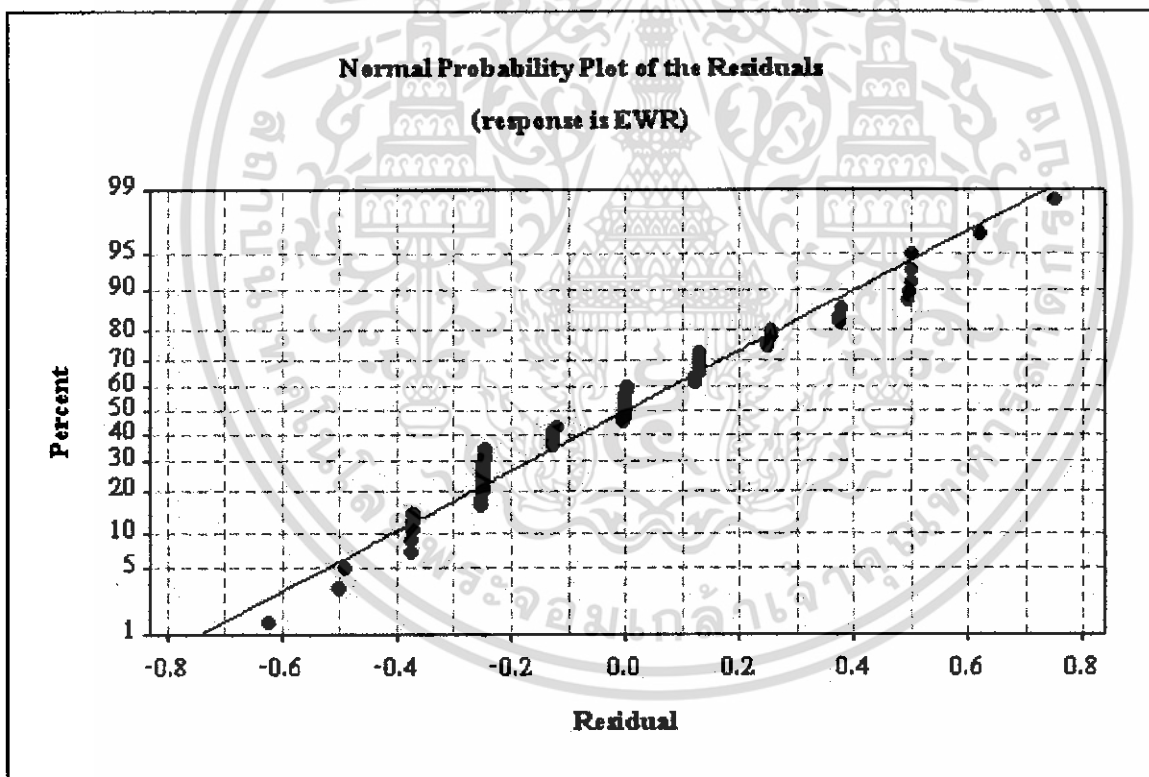
จากตารางที่ 4.7 เป็นผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความหยาบผิว (Rmax) เมื่อพิจารณาแล้วพบว่า มีปัจจัยที่มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 คือ ช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) จึงสรุปได้ว่าปัจจัยหลักมีผลต่อค่าความหยาบผิว (Rmax) อย่างมีนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$ ส่วนปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมที่เหลือไม่มีผลต่อค่าความหยาบผิว (Rmax)

4.3.2 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model Adequacy Checking) เป็นวิธีการตรวจสอบที่ทำให้ทราบว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนมีความน่าเชื่อถือเป็นไปตามหลักทางสถิติหรือไม่ โดยการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ 2 ประเภท คือ

4.3.2.1 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบว่าเป็นการแจกแจงปกติ

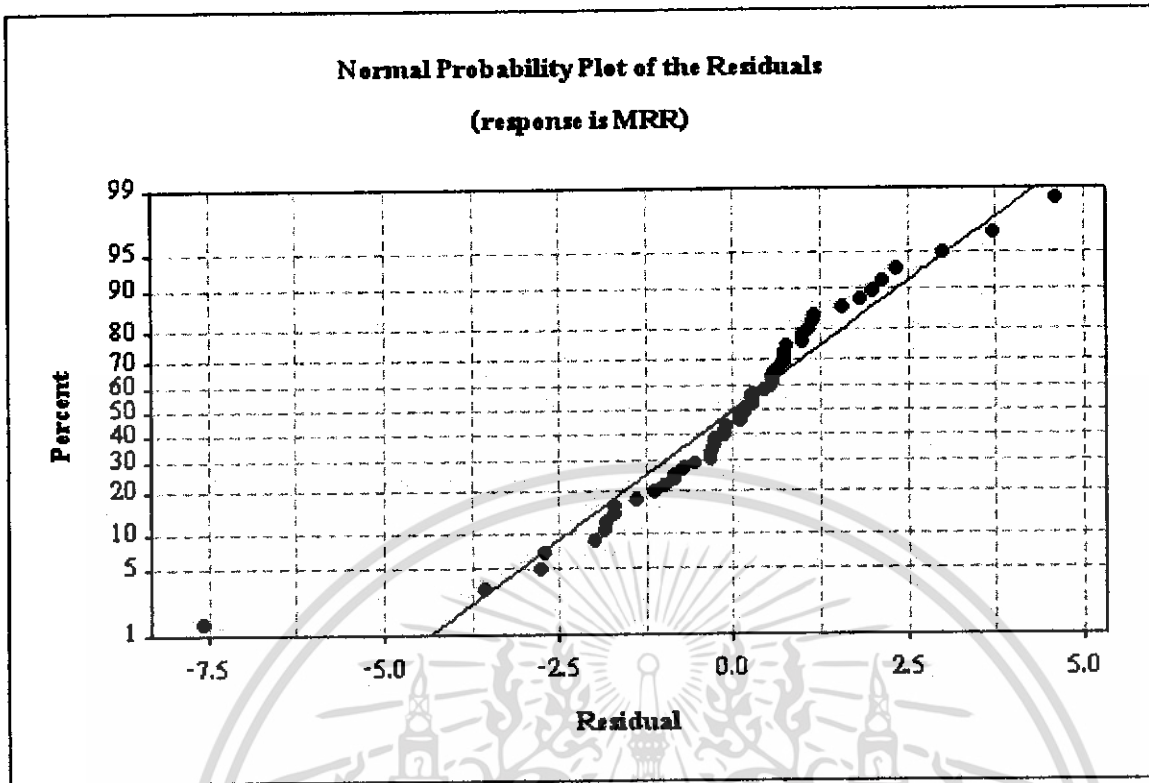
โดยการใช้ค่าส่วนตกค้าง (Residual) พล็อตลงบนกราฟทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability Paper: NOPP) หากลักษณะของกราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรงหรือเกือบจะตรงแสดงว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ



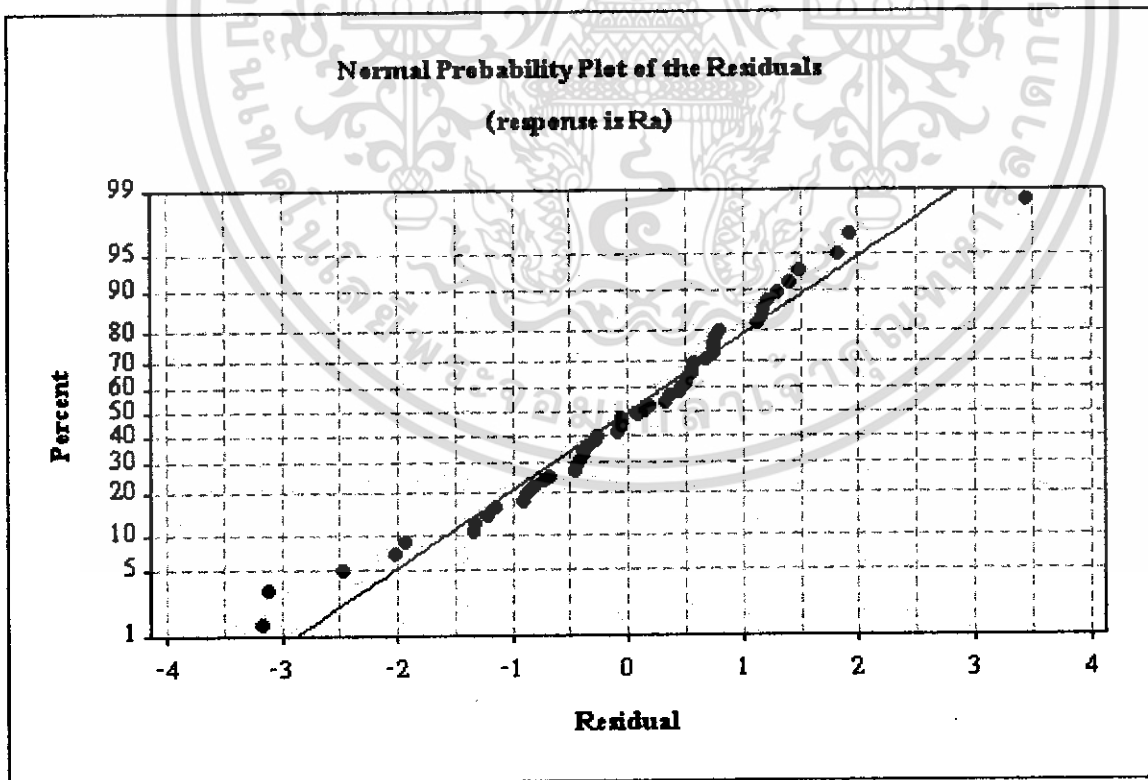
รูปที่ 4.31 การแจกแจงแบบปกติสำหรับค่าส่วนตกค้างของอัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์ (EWR)

จากรูปที่ 4.31 เป็นรูปกราฟการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability) สำหรับค่าส่วนตกค้างของอัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์ (EWR) จะเห็นได้ว่าค่าส่วนตกค้างเกาะกลุ่มกันไปในลักษณะเส้นตรง แสดงว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้มีลักษณะของการกระจายตัวแบบปกติ นั่นหมายถึงข้อมูลการวิเคราะห์สามารถเชื่อถือได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.32 การแจกแจงแบบปกติสำหรับค่าส่วนตกค้างของอัตราการผลิตเนื้อชิ้นงาน (MRR)

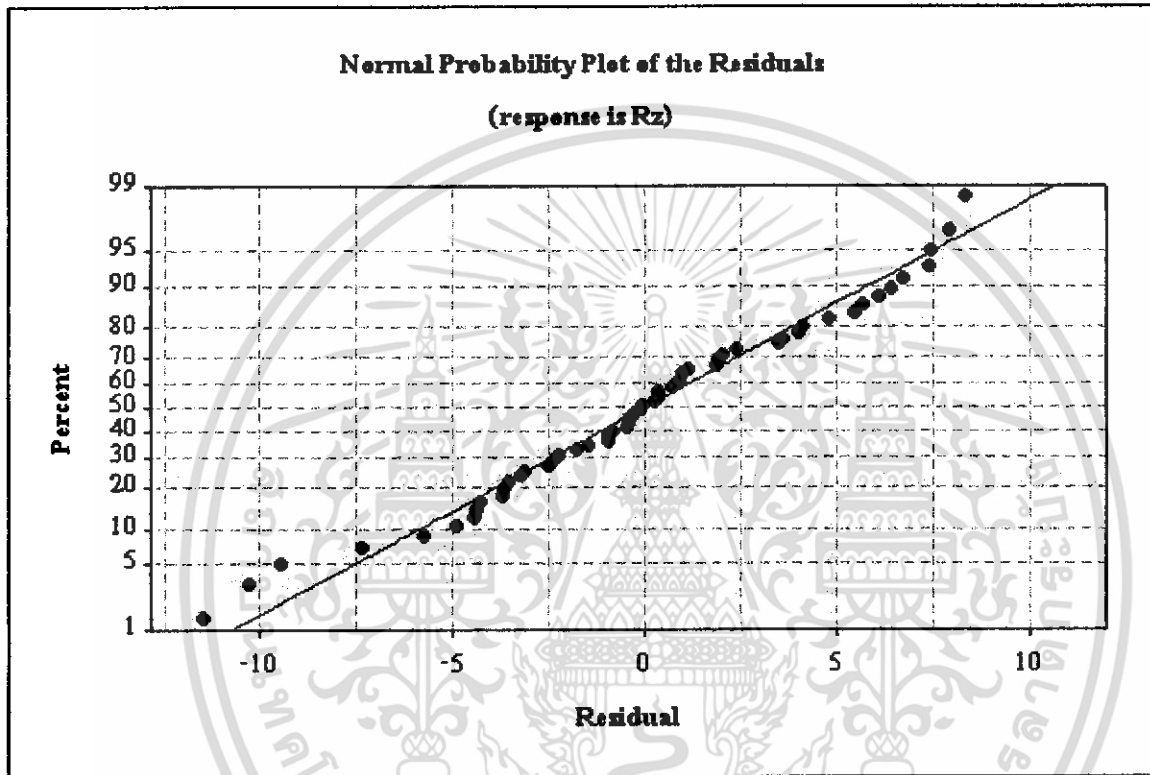


รูปที่ 4.33 การแจกแจงแบบปกติสำหรับค่าส่วนตกค้างของค่าความหยาบผิว (Ra)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.32 เป็นรูปกราฟการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability) สำหรับค่าส่วนตกค้างของอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR) จะเห็นได้ว่าค่าส่วนตกค้างเกาะกลุ่มกันไปในลักษณะเส้นตรง แสดงว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้มีลักษณะของการกระจายตัวแบบปกติ นั่นหมายถึงข้อมูลการวิเคราะห์สามารถเชื่อถือได้

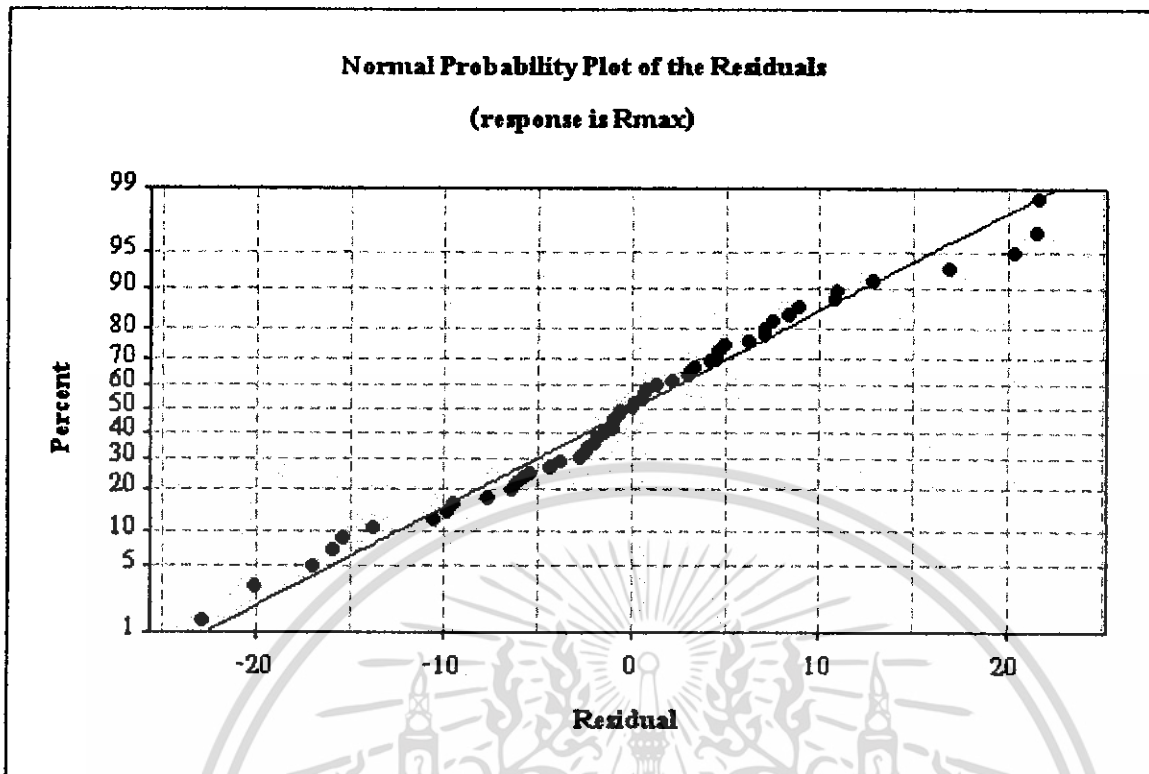
จากรูปที่ 4.33 เป็นรูปกราฟการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability) สำหรับค่าส่วนตกค้างของอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR) จะเห็นได้ว่าค่าส่วนตกค้างเกาะกลุ่มกันไปในลักษณะเส้นตรง แสดงว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้มีลักษณะของการกระจายตัวแบบปกติ นั่นหมายถึงข้อมูลการวิเคราะห์สามารถเชื่อถือได้



รูปที่ 4.34 การแจกแจงแบบปกติสำหรับค่าส่วนตกค้างของค่าความหยาบผิว (R_z)

จากรูปที่ 4.34 เป็นรูปกราฟการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability) สำหรับค่าส่วนตกค้างของค่าความหยาบผิว (R_z) จะเห็นได้ว่าค่าส่วนตกค้างเกาะกลุ่มกันไปในลักษณะเส้นตรง แสดงว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้มีลักษณะของการกระจายตัวแบบปกติ นั่นหมายถึงข้อมูลการวิเคราะห์สามารถเชื่อถือได้

จากรูปที่ 4.35 เป็นรูปกราฟการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability) สำหรับค่าส่วนตกค้างของค่าความหยาบผิว (R_{max}) จะเห็นได้ว่าค่าส่วนตกค้างเกาะกลุ่มกันไปในลักษณะเส้นตรง แสดงว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้มีลักษณะของการกระจายตัวแบบปกติ นั่นหมายถึงข้อมูลการวิเคราะห์สามารถเชื่อถือได้



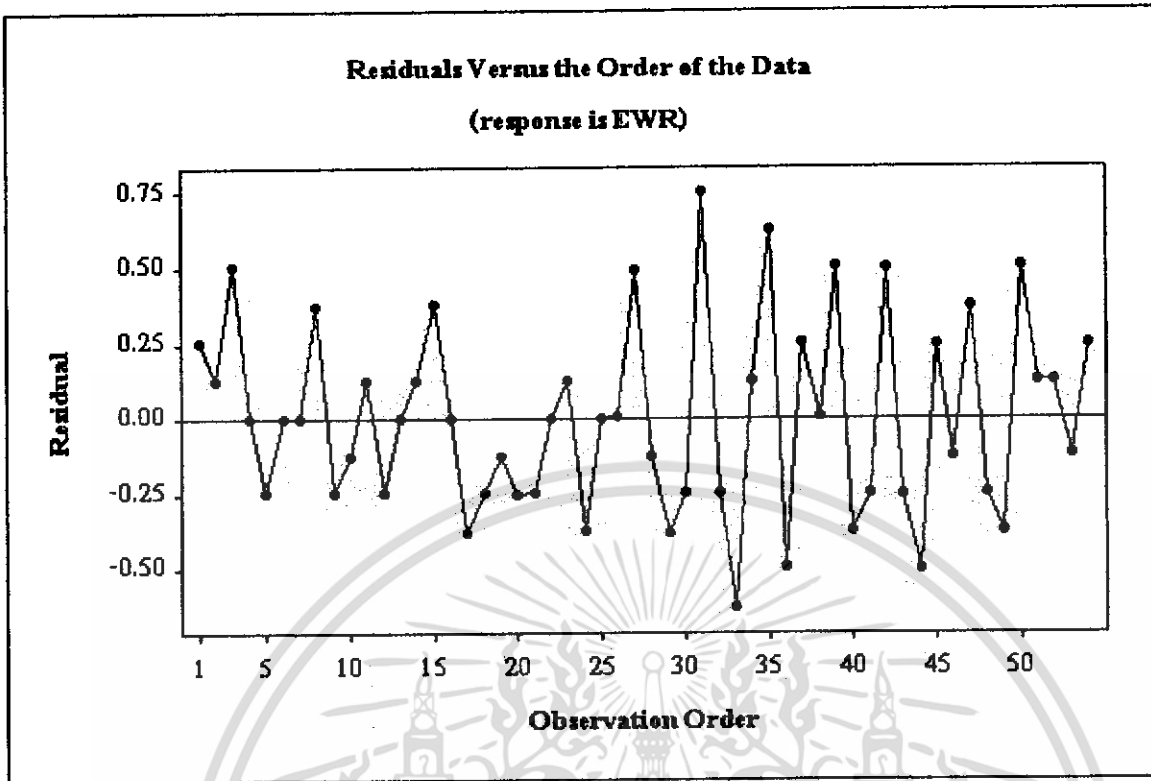
รูปที่ 4.35 การแจกแจงแบบปกติสำหรับค่าส่วนตกค้างของค่าความหยาบผิว (Rmax)

4.3.2.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

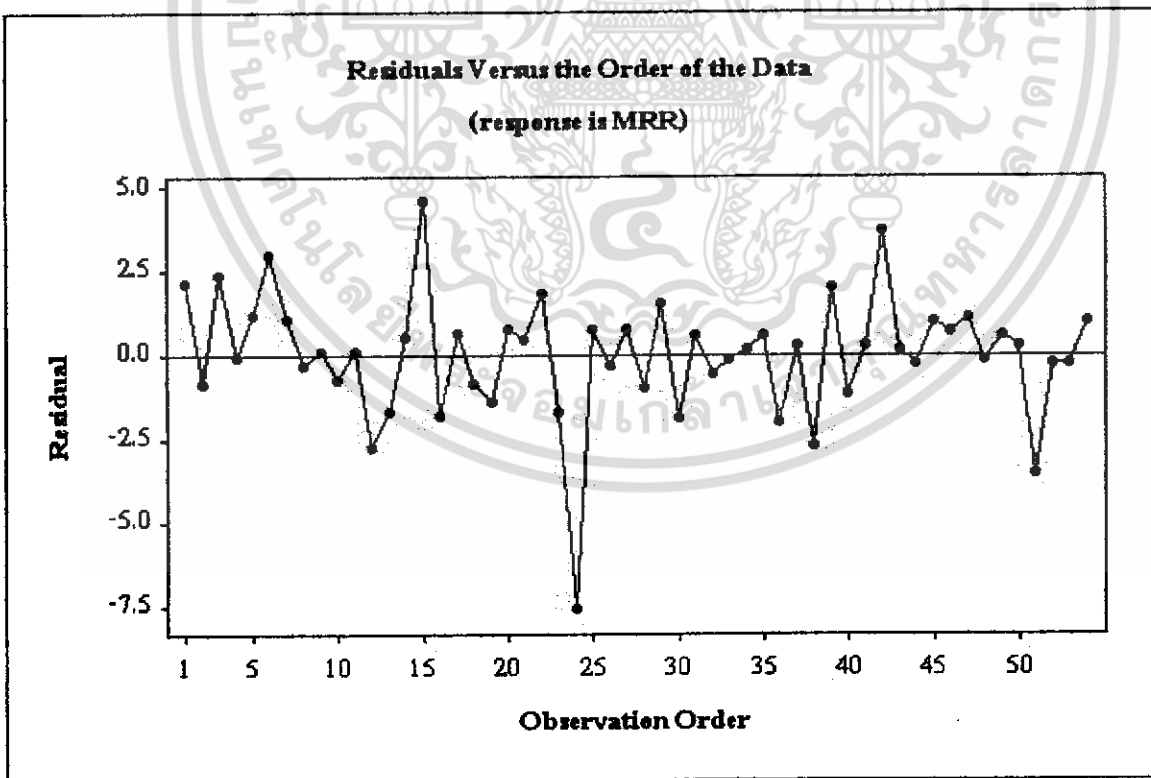
เป็นการทดสอบความสัมพันธ์ของค่าส่วนตกค้าง โดยใช้ค่าส่วนตกค้างและลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล มาทำการพล็อตกราฟค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้งและลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลอยู่บนแกนนอน

จากรูปที่ 4.36 เป็นรูปที่แสดงค่าส่วนตกค้างของอัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์กับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งลักษณะของกราฟมีการกระจายตัวอย่างไม่มีรูปแบบแสดงว่าข้อมูลในการทดลองมีความเป็นอิสระต่อกัน

จากรูปที่ 4.37 เป็นรูปที่แสดงค่าส่วนตกค้างของอัตราการตัดเนื้อชิ้นงานกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งลักษณะของกราฟมีการกระจายตัวอย่างไม่มีรูปแบบแสดงว่าข้อมูลในการทดลองมีความเป็นอิสระต่อกัน

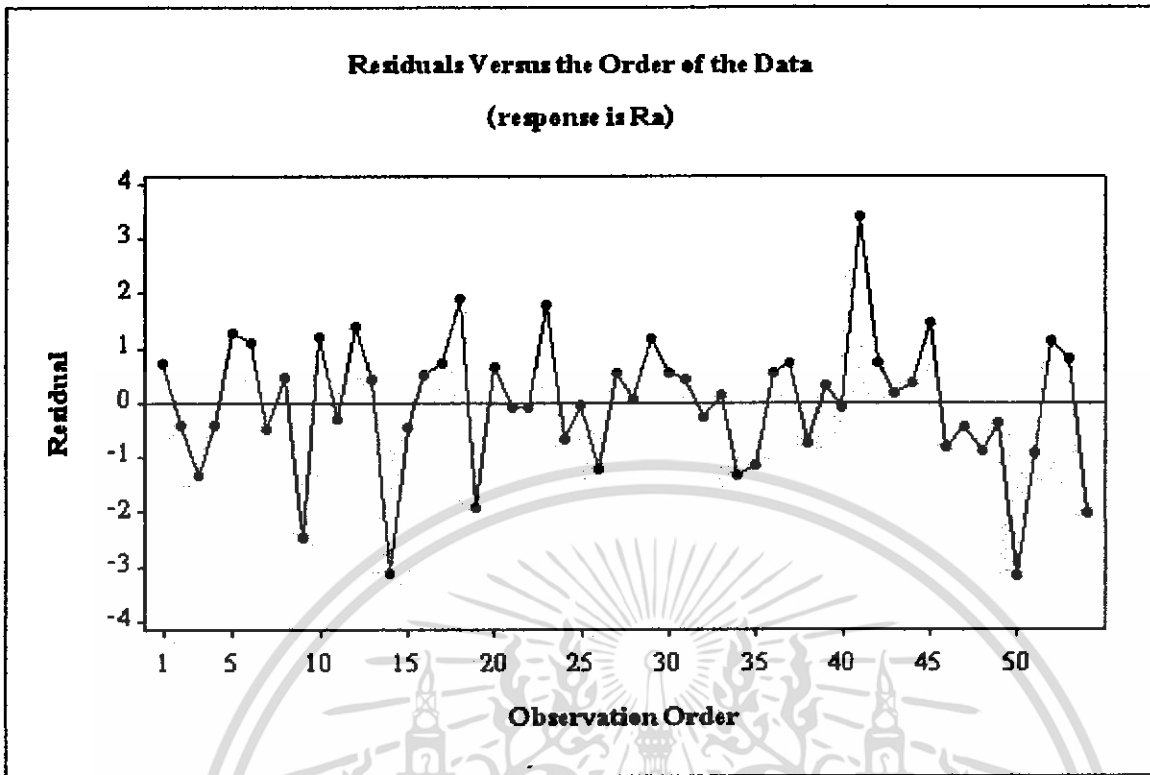


รูปที่ 4.36 ค่าส่วนตกค้างของอัตราการศึกษาหรือของอิเล็กทรอนิกส์กับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล

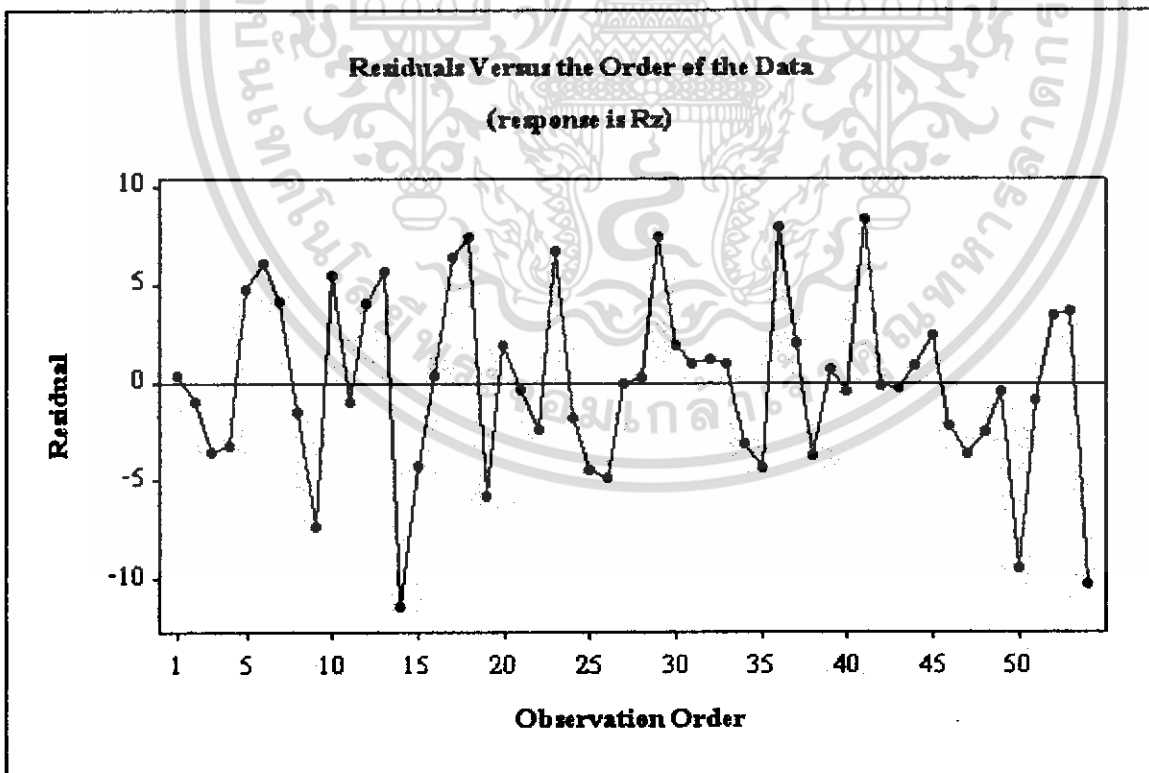


รูปที่ 4.37 ค่าส่วนตกค้างของอัตราการผลิตเมื่อขึ้นงานกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.38 ค่าส่วนตกค้างของความหยาบผิว (Ra) กับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล

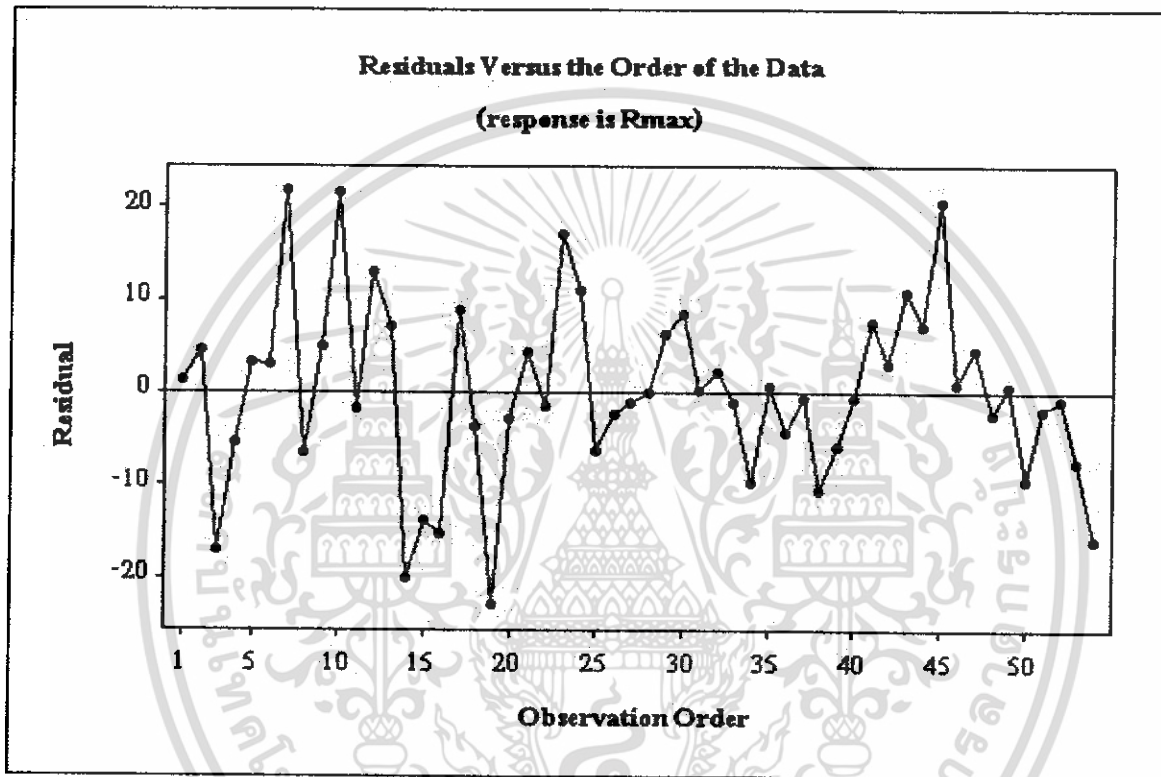


รูปที่ 4.39 ค่าส่วนตกค้างของความหยาบผิว (Rz) กับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.38 เป็นรูปที่แสดงค่าส่วนตกค้างของความหยาบผิว (R_a) กับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งลักษณะของกราฟมีการกระจายตัวอย่างไม่มีรูปแบบแสดงว่าข้อมูลในการทดลองมีความเป็นอิสระต่อกัน

จากรูปที่ 4.39 เป็นรูปที่แสดงค่าส่วนตกค้างของความหยาบผิว (R_z) กับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งลักษณะของกราฟมีการกระจายตัวอย่างไม่มีรูปแบบแสดงว่าข้อมูลในการทดลองมีความเป็นอิสระต่อกัน



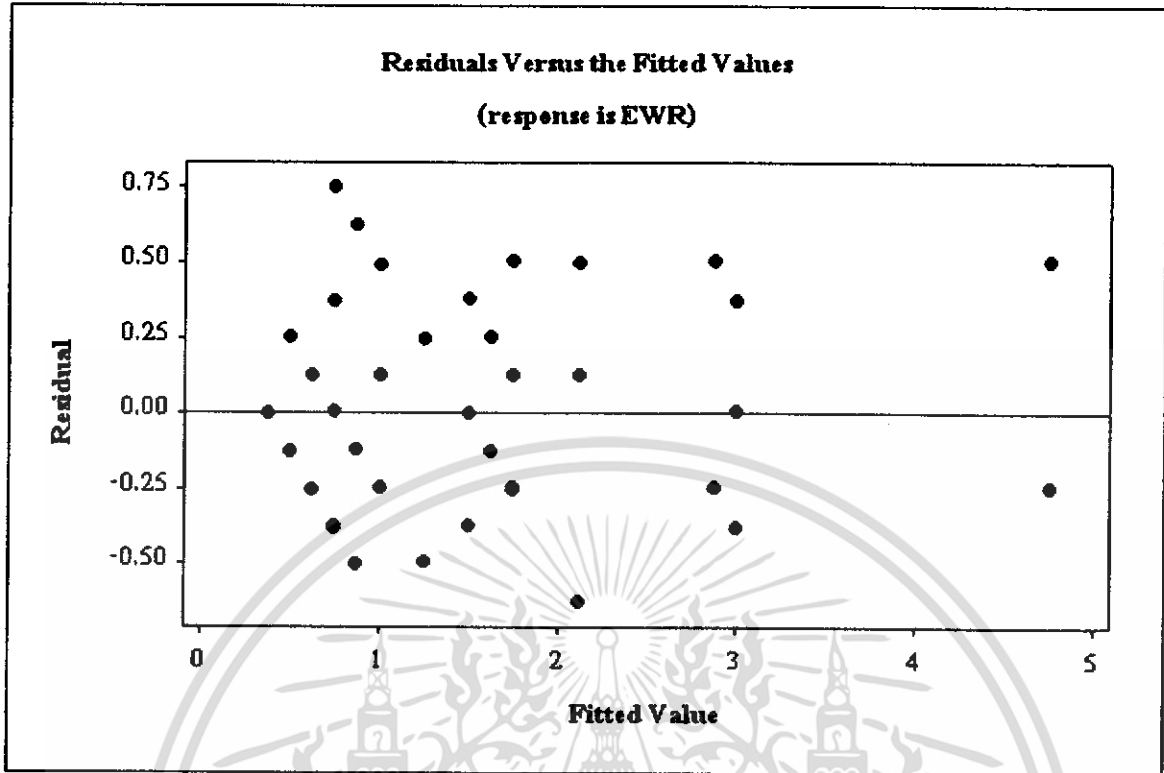
รูปที่ 4.40 ค่าส่วนตกค้างของความหยาบผิว (R_{max}) กับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล

จากรูปที่ 4.40 เป็นรูปที่แสดงค่าส่วนตกค้างของความหยาบผิว (R_{max}) กับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งลักษณะของกราฟมีการกระจายตัวอย่างไม่มีรูปแบบแสดงว่าข้อมูลในการทดลองมีความเป็นอิสระต่อกัน

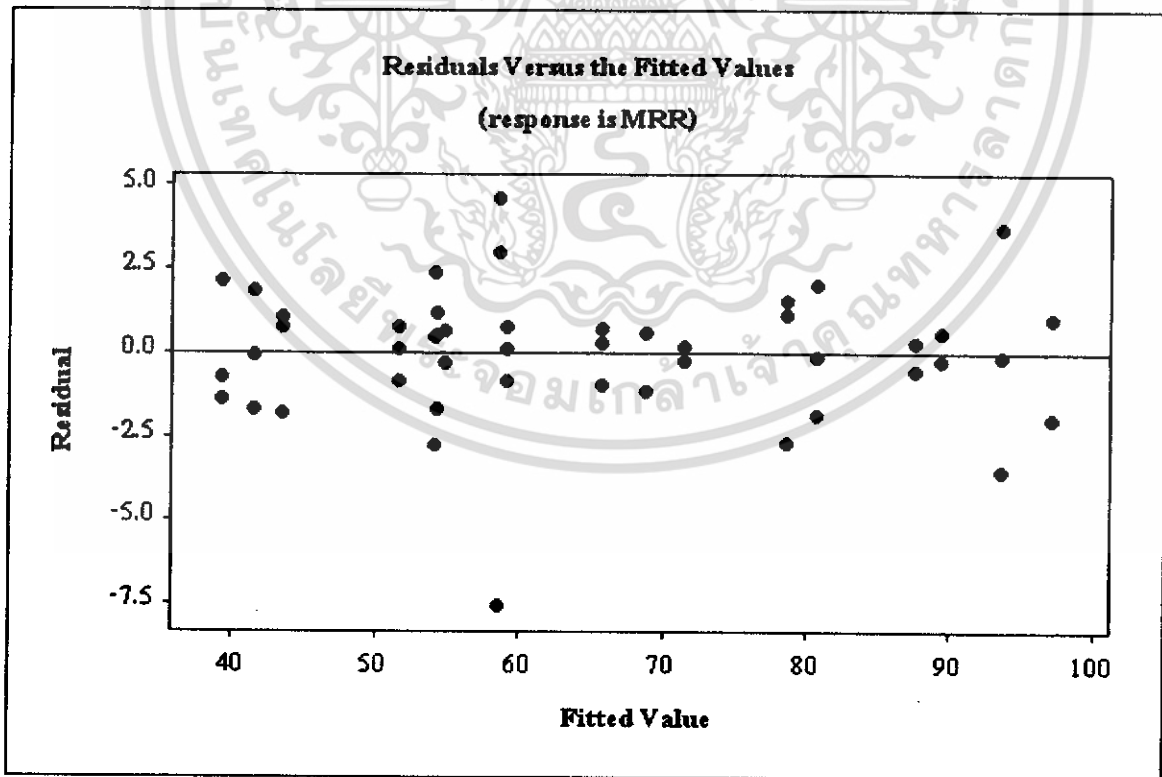
4.3.2.3 การตรวจสอบความเสถียรภาพของความแปรปรวน

เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของข้อมูล โดยการใช้ข้อมูลค่าส่วนตกค้างและค่าที่ถูกฟิต (Fitted) ในที่นี้คือ ค่าอัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์ (EWR) ค่าอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR) และค่าความหยาบผิว R_a R_z และ R_{max} นำมาสร้างกราฟระหว่างค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิต (Fitted) ซึ่งจะแสดงดังรูปที่ 4.41 – รูปที่ 4.45 จากลักษณะของกราฟสรุปได้ว่า ข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติมีความเป็นอิสระของข้อมูลไม่มีแนวโน้มในลักษณะรูปแบบใด ๆ และมีความสม่ำเสมอของความแปรปรวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

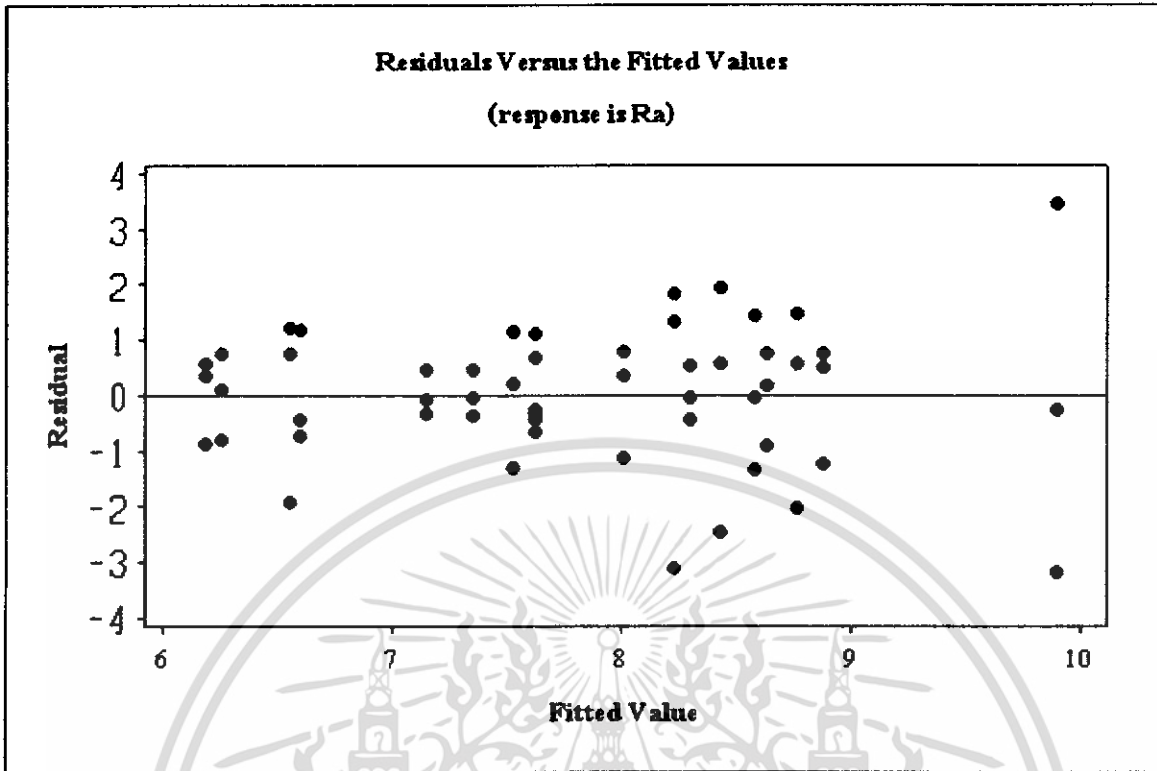


รูปที่ 4.41 ค่าส่วนตกค้างกับค่าอัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์ (EWR)

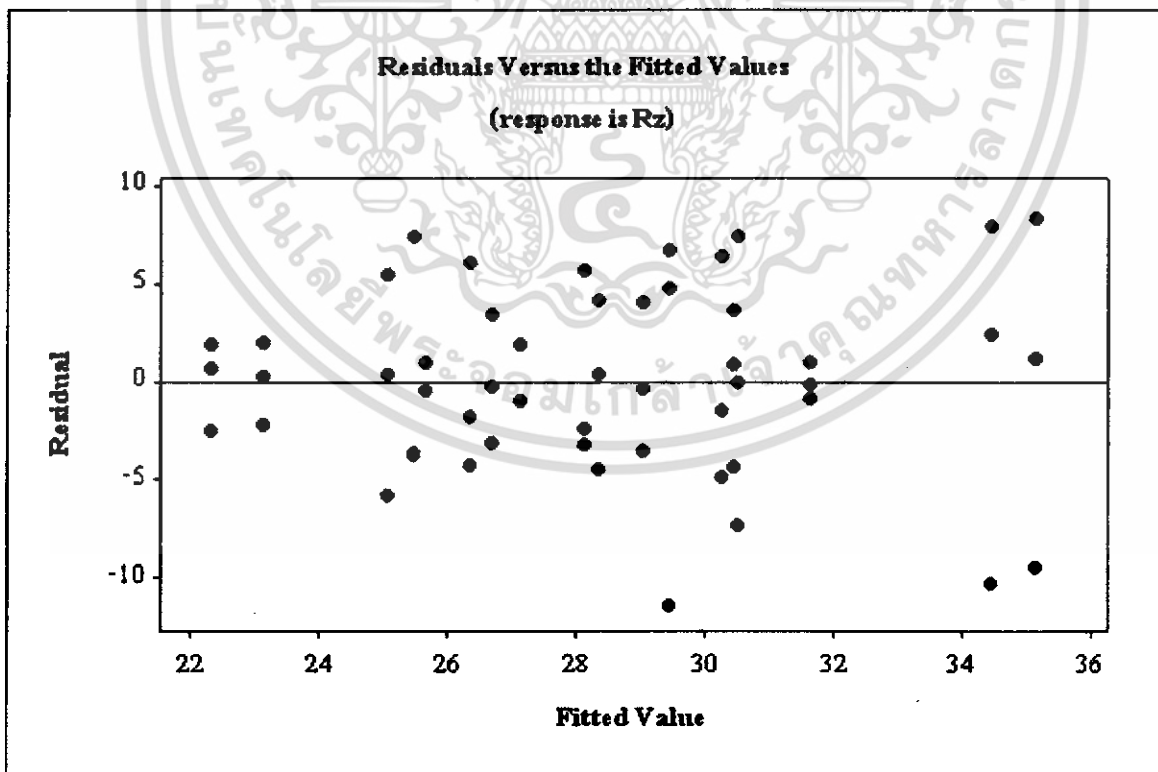


รูปที่ 4.42 ค่าส่วนตกค้างกับค่าอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

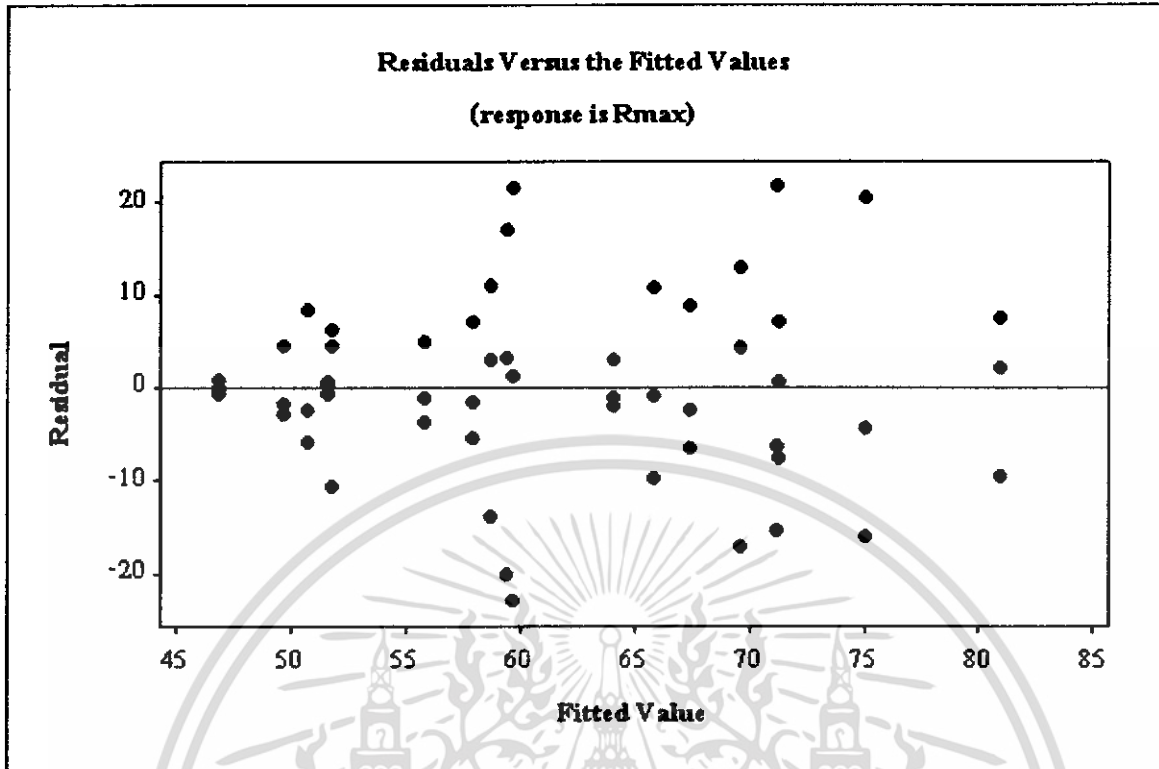


รูปที่ 4.43 ค่าส่วนตกค้างกับค่าความหยาบผิว Ra



รูปที่ 4.44 ค่าส่วนตกค้างกับค่าความหยาบผิว Rz

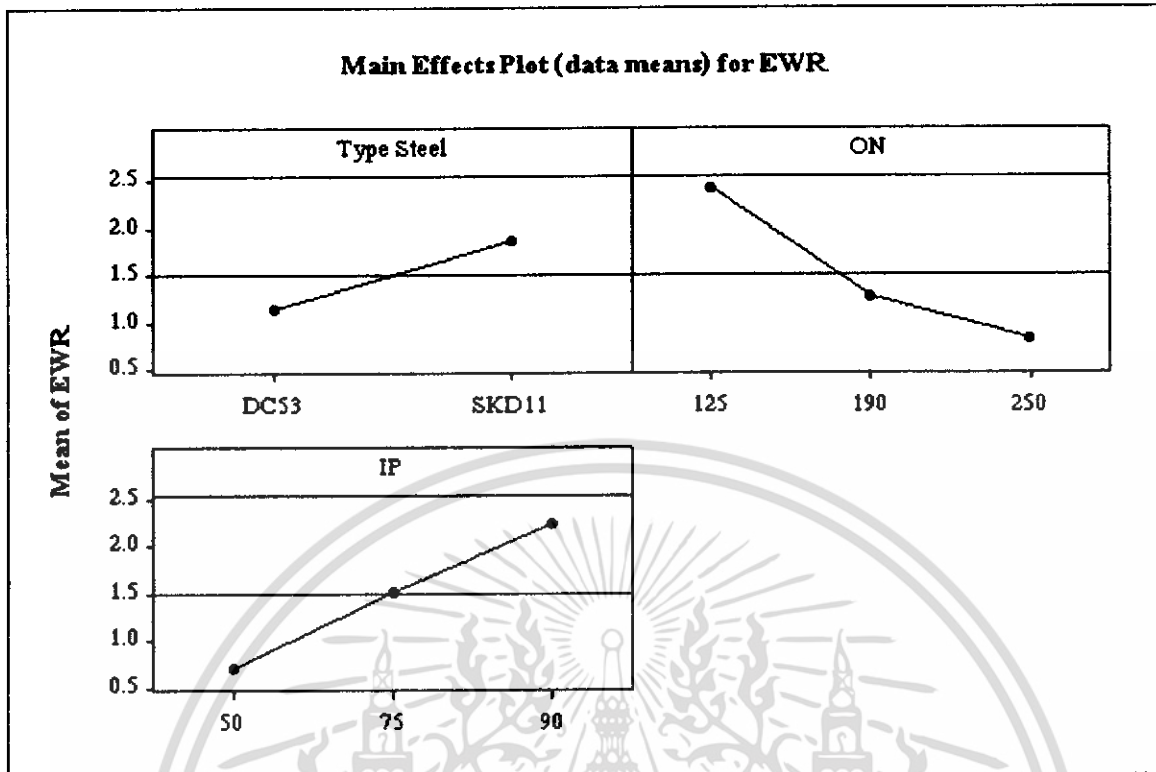
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



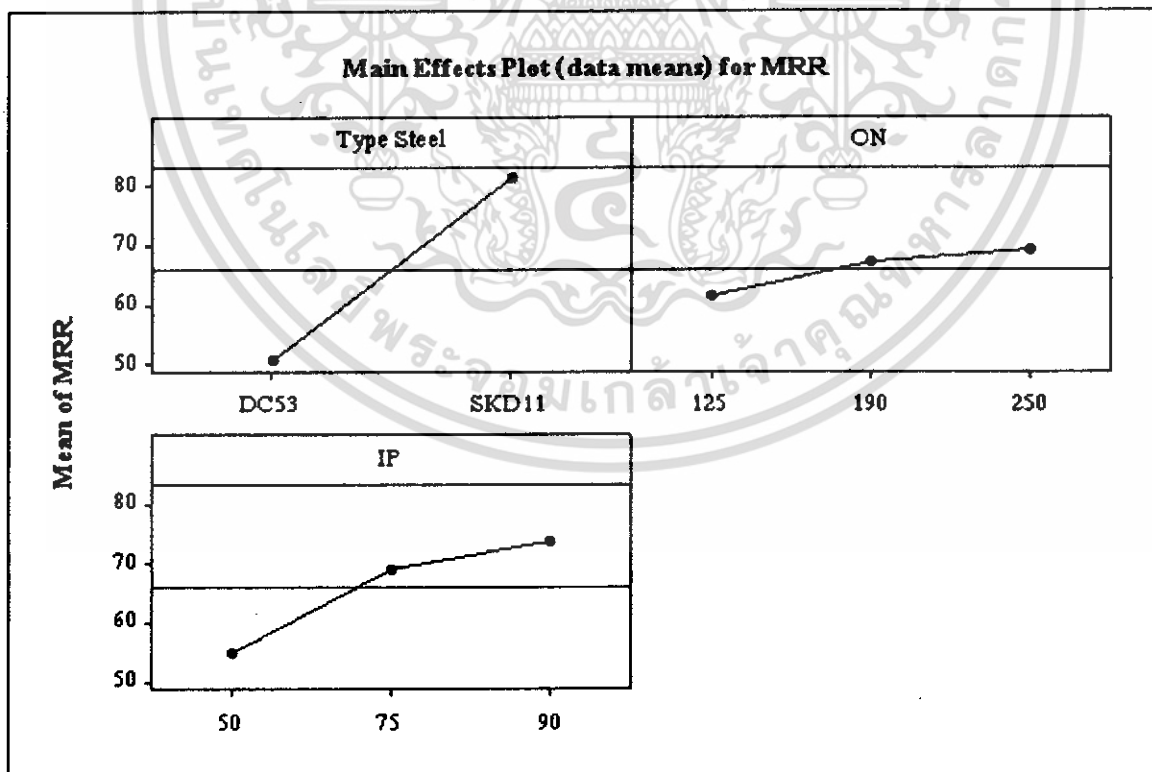
รูปที่ 4.45 ค่าส่วนตกค้างกับค่าความหยาบผิว Rmax

ในระดับปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อค่าตอบสนอง อัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (Material Removal Rate) อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (Electrode Wear Rate) และความหยาบผิวของชิ้นงาน (Surface Roughness) จะแสดงดังรูปที่ 4.46 – รูปที่ 4.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

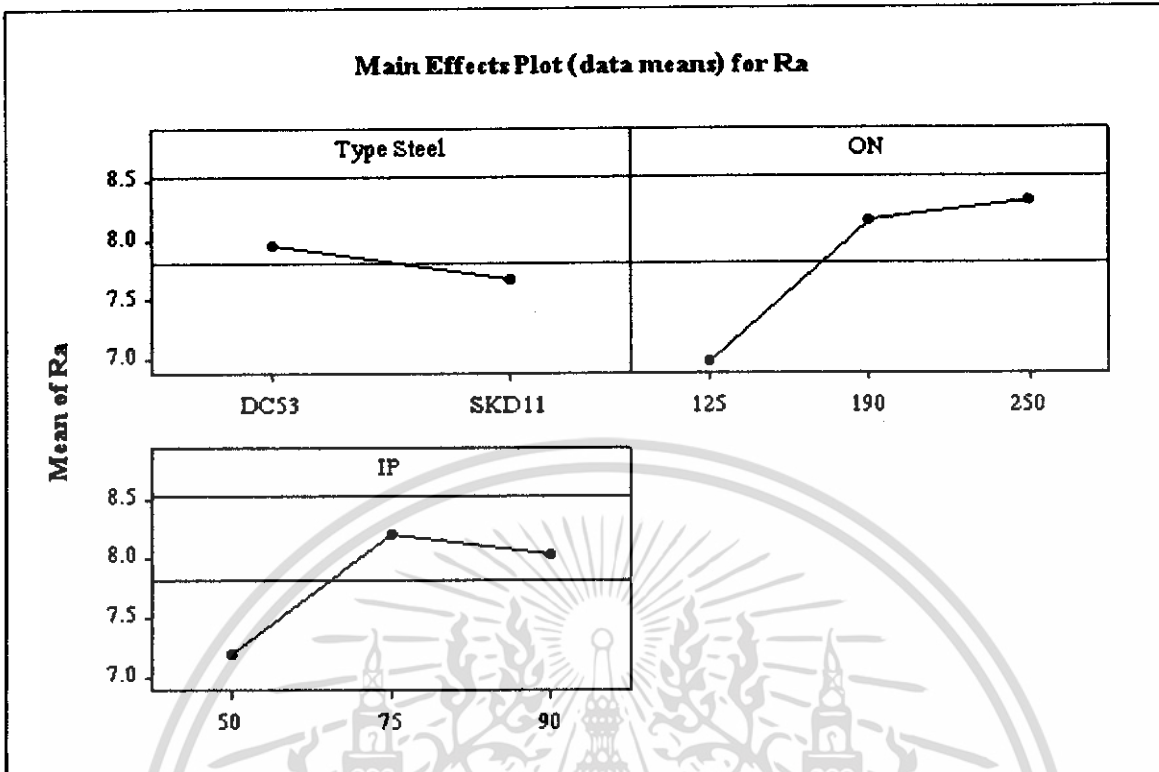


รูปที่ 4.46 ระดับของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR)

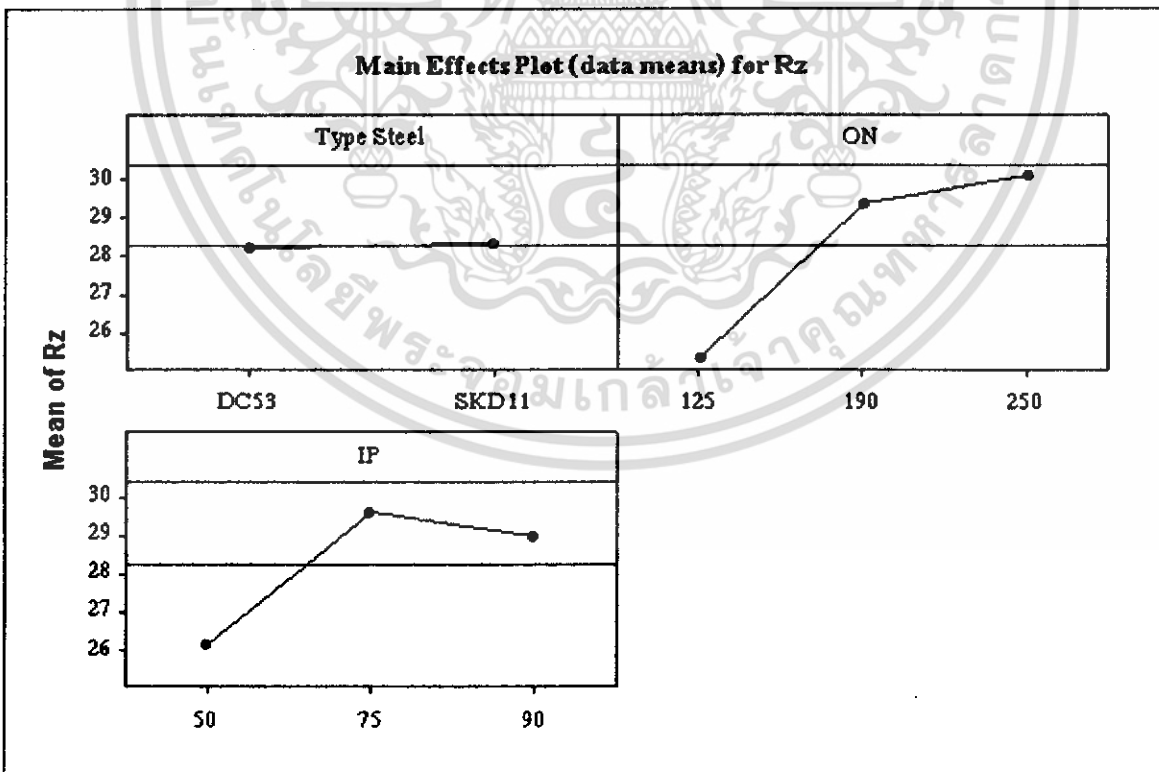


รูปที่ 4.47 ระดับของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

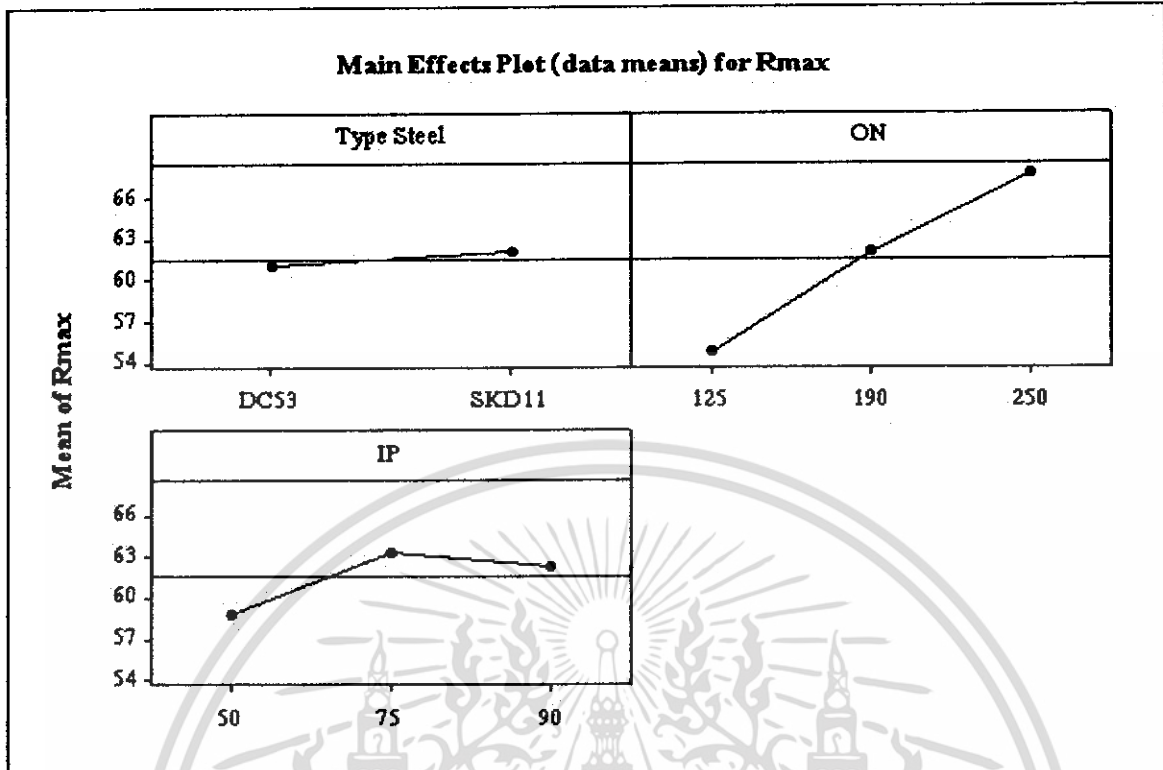


รูปที่ 4.48 ระดับของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความหยาบผิว (Ra)



รูปที่ 4.49 ระดับของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความหยาบผิว (Rz)

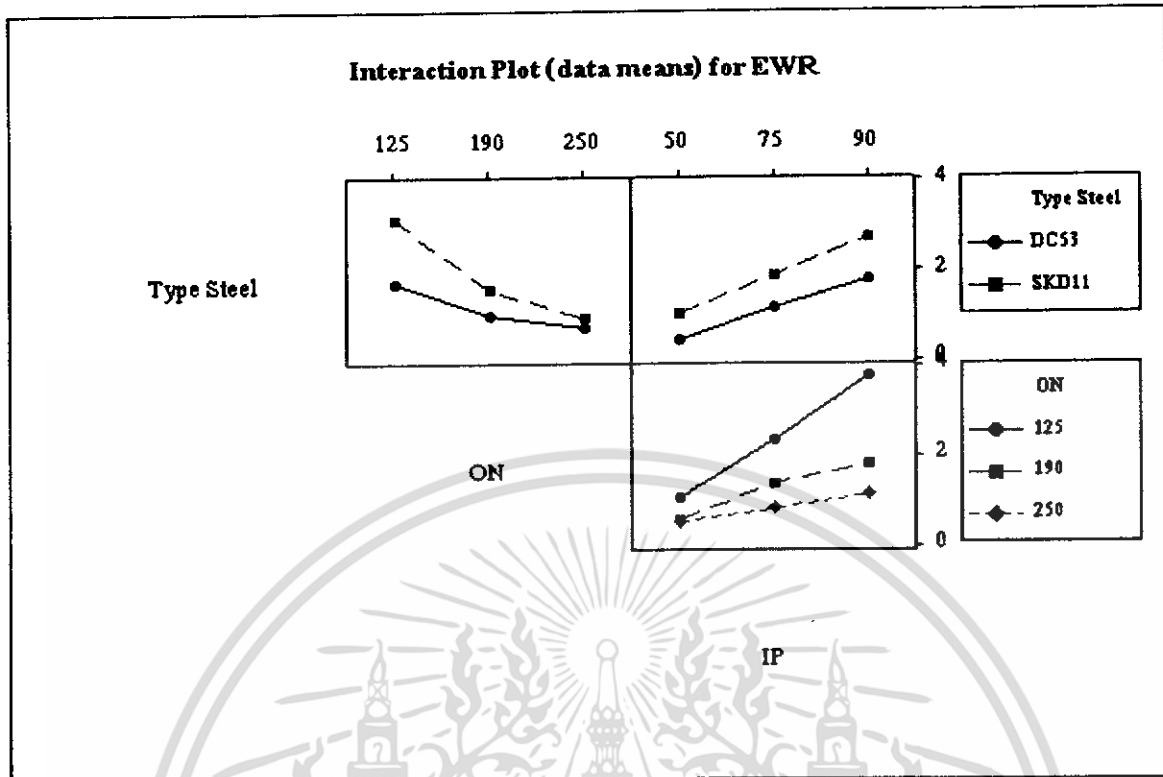
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



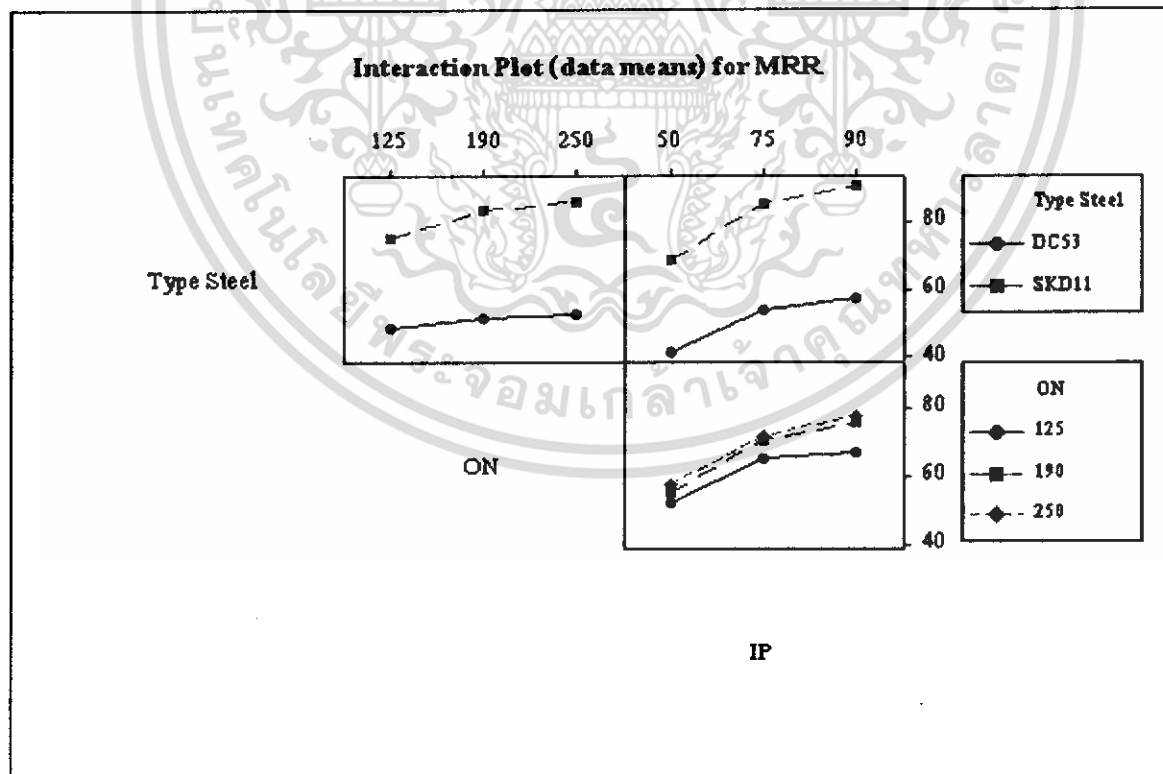
รูปที่ 4.50 ระดับของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความหยาบผิว (Rmax)

ในการทดลองสามารถดูผลตอบสนองที่เกิดขึ้นบนระดับต่าง ๆ ของปัจจัยหนึ่งจะมีค่าไม่เท่ากันที่ระดับอื่น ๆ ทั้งหมดของปัจจัยอื่น ซึ่งหมายความว่า ผลตอบสนองของปัจจัยหนึ่งจะขึ้นกับระดับของปัจจัยอื่น ๆ ซึ่งเรียกเหตุการณ์นี้ว่า การมีอันตรกิริยา (Interaction) ต่อกันระหว่างปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งการมีอันตรกิริยา (Interaction) ของแต่ละค่าของค่าผลตอบสนอง คือ อัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (Material Removal Rate) อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (Electrode Wear Rate) และความหยาบผิวของชิ้นงาน (Surface Roughness) แสดงดังรูปที่ 4.51 – รูปที่ 4.55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

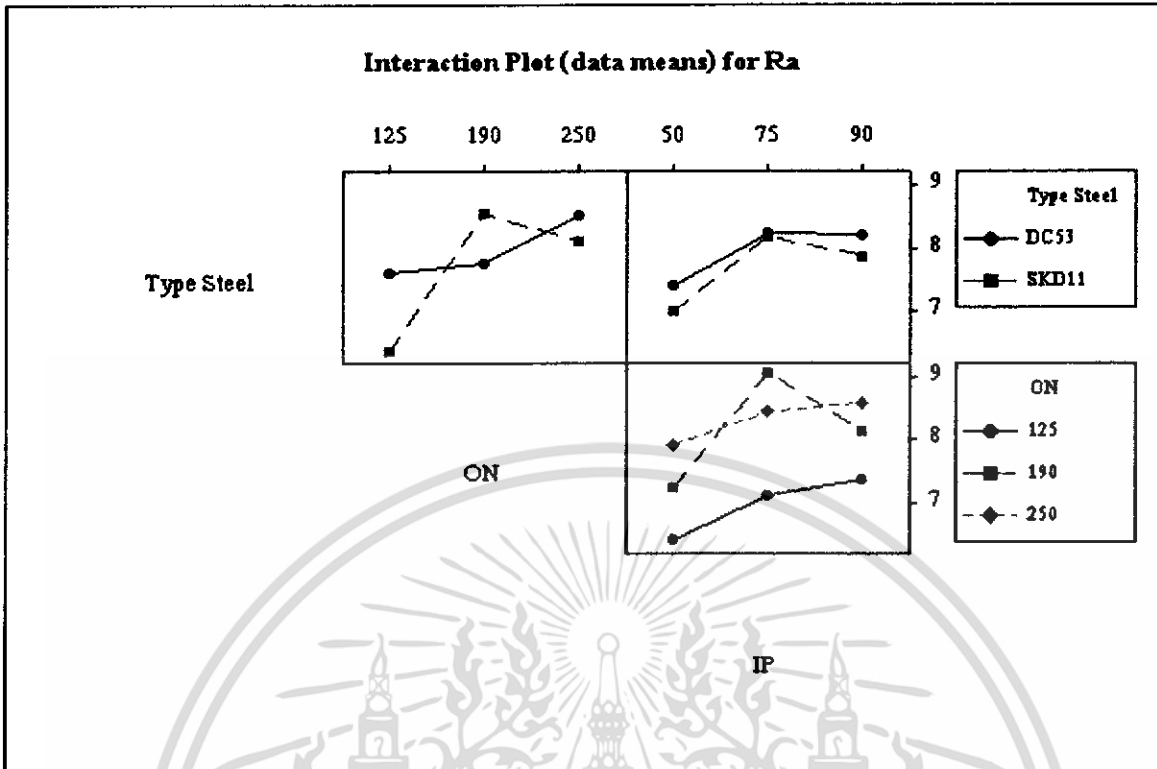


รูปที่ 4.51 การมีอันตรกิริยา (Interaction) ต่อค่าผลตอบสนองอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR)

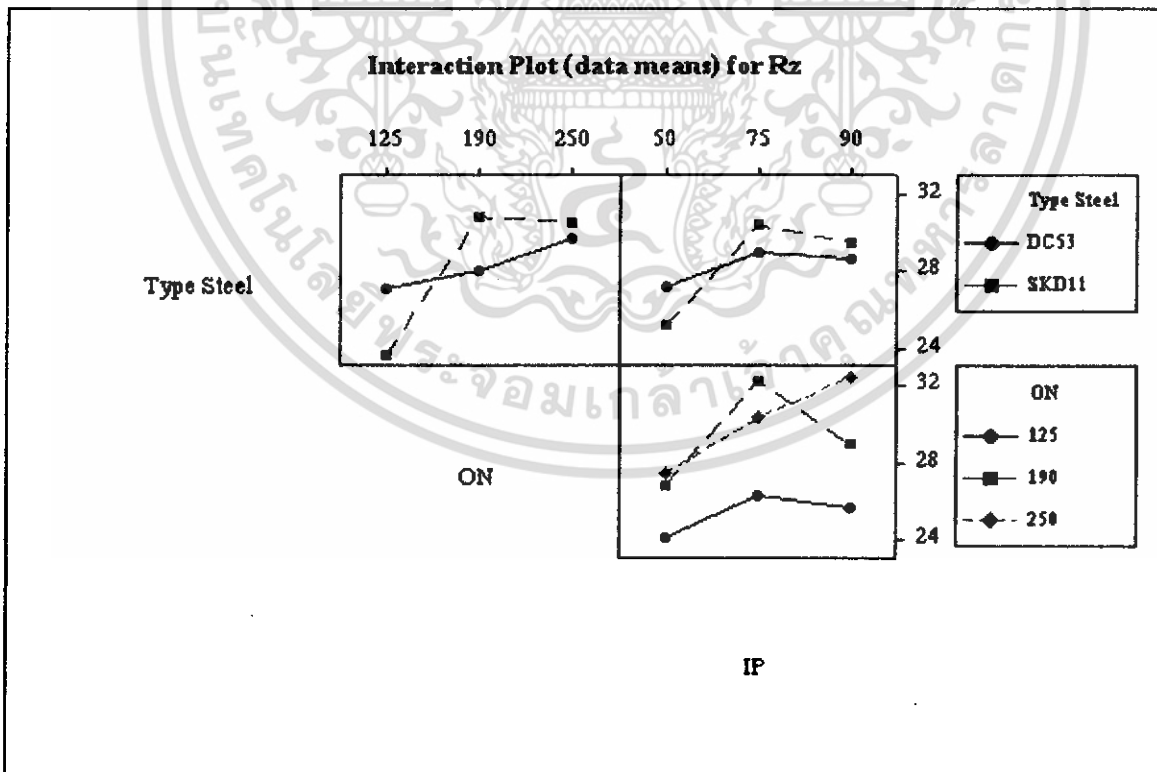


รูปที่ 4.52 การมีอันตรกิริยา (Interaction) ต่อค่าผลตอบสนองอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

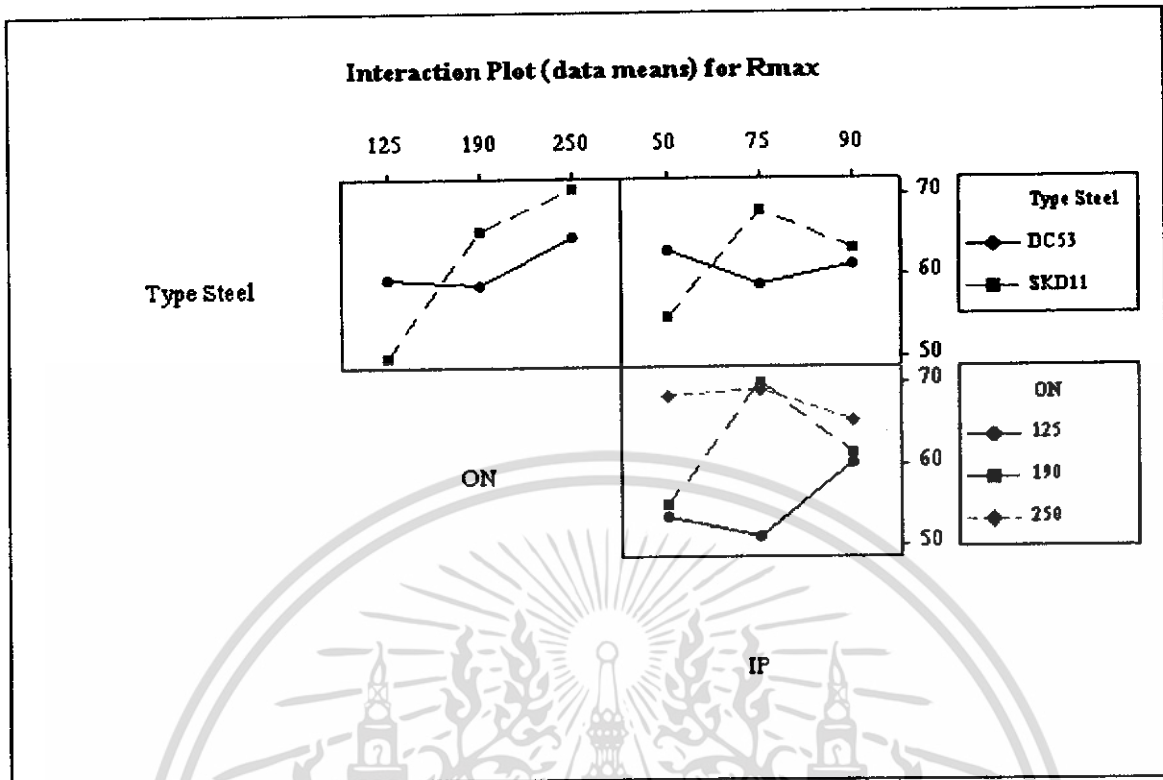


รูปที่ 4.53 การมีอันตรกิริยา (Interaction) ต่อค่าผลตอบสนองของความหยาบผิว (Ra)



รูปที่ 4.54 การมีอันตรกิริยา (Interaction) ต่อค่าผลตอบสนองของความหยาบผิว (Rz)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.55 การมีอันตรกิริยา (Interaction) ต่อค่าผลตอบสนองความหยาบผิว (Rmax)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

สำหรับการทดลองและการวิจัยในครั้งนี้เป็นการศึกษาอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR) อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR) และความหยาบผิวของชิ้นงาน (Surface Roughness) เปรียบเทียบกันระหว่างเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD 11 และ DC 53 ที่ทำการตัดขึ้นรูปด้วยอีดีเอ็ม (Electrical Discharge Machining) ดังนั้นเพื่อให้การใช้งานของเครื่องอีดีเอ็ม เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและเกิดประโยชน์สูงสุดจึงควรทำการศึกษายิ่งวิจัยที่มีผลต่อค่า อัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR) อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR) และความหยาบผิวของชิ้นงาน (Surface Roughness) เพื่อเปรียบเทียบกันระหว่างเหล็กกล้า SKD 11 และ DC 53 โดยที่อัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR) และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR) เป็นตัวแปรที่สำคัญในการกำหนดต้นทุนในการผลิต ในขณะที่ความหยาบผิวของชิ้นงานเป็นตัวแปรที่สำคัญตัวหนึ่งในการกำหนดคุณภาพของแม่พิมพ์ที่ผลิต เพราะแม่พิมพ์ต้องการความละเอียดของผิวชิ้นส่วนที่ใช้ในการผลิตค่อนข้างสูง

จากการทดลองตัวแปรที่ใช้ในการทดลองคือ ช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) และกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ก (IP) โดยมีระดับของตัวแปร 3 ระดับ ส่วนตัวแปรที่นอกเหนือจากตัวแปร ON และ IP จะกำหนดเป็นค่าคงที่ตลอดการทดลองทุกครั้งทำการทดลองโดยจะยึดตามค่ามาตรฐานของเงื่อนไข C100 (Condition C100) ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ใช้สำหรับอิเล็กโทรดทองแดงกับชิ้นงานเหล็กกล้าในการตัดเนื้อชิ้นงาน และตัวแปรที่เป็นค่าคงที่อีกตัวก็คือ เวลาทำการตัดชิ้นงานคือ 30 นาทีต่อชิ้น ซึ่งสามารถกำหนดได้โดยการป้อนจีโค้ดลงไปโปรแกรมควบคุมการตัด ส่วนการตั้งความเป็นขั้วจะให้อิเล็กโทรดเป็นขั้วลบ และชิ้นงานเป็นขั้วบวก ในการทดลองมีตัวแปร ON=3 ระดับ IP=3 ระดับ และเหล็กกล้าเครื่องมือสองชนิดทำให้จะต้องมีจำนวนชิ้นงาน 18 ชิ้น จากการดำเนินการทำซ้ำ 3 ครั้ง จะได้จำนวนการทดลองทั้งหมด 54 ครั้ง

5.1 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยกำหนดระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ หรือความเชื่อมั่น 95 % พบว่า ปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม ที่มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 ในการวิเคราะห์ค่าผลตอบสนองต่าง ๆ มีดังนี้

5.1.1 ค่าผลตอบสนอง EWR

ชนิดเหล็กกล้า ช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ก (IP) และชนิดเหล็กกล้ากับช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า และช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ก จึงสรุปได้ว่าทั้งปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมเหล่านี้มีผลต่ออัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR) อย่างมีนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.2 ค่าผลตอบสนอง MRR

ชนิดเหล็กกล้า ช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ค (IP) และชนิดเหล็กกล้ากับช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า และชนิดเหล็กกล้ากับกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ค จึงสรุปได้ว่าทั้งปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมเหล่านี้มีผลต่ออัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR) อย่างมีนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$

5.1.3 ค่าผลตอบสนอง Ra

ช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) จึงสรุปได้ว่าปัจจัยหลักมีผลต่อค่าความหยาบผิว (Ra) อย่างมีนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$ ส่วนปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมที่เหลือไม่มีผลต่อค่าความหยาบผิว (Ra)

5.1.4 ค่าผลตอบสนอง Rz

ช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) จึงสรุปได้ว่าปัจจัยหลักมีผลต่อค่าความหยาบผิว (Rz) อย่างมีนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$ ส่วนปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมที่เหลือไม่มีผลต่อค่าความหยาบผิว (Rz)

5.1.5 ค่าผลตอบสนอง Rmax

ช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) จึงสรุปได้ว่าปัจจัยหลักมีผลต่อค่าความหยาบผิว (Rmax) อย่างมีนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$

ส่วนปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมที่มีค่า P-Value มากกว่า 0.05 แสดงว่าปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมเหล่านั้น ไม่มีผลต่อค่าผลตอบสนอง EWR MRR Ra Rz และ Rmax

จากการศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการตัดเหล็กกล้าเครื่อง SKD11 กับ DC53 พบว่า

1. เหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 มีอัตราการสึกหรอ (EWR) มากกว่าเหล็กกล้าเครื่องมือ DC53
2. เหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 มีอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR) มากกว่าเหล็กกล้าเครื่องมือ DC53
3. เหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 และ DC53 ไม่มีผลต่อค่าความหยาบผิว Ra Rz และ Rmax

หนังสืออ้างอิง

- ชนากรณ์ โกรษณัฐ, ณรงค์ รัตนะ, จุลเทพ ขจรไชยกุล และ กิตติพันธ์ อันนามนท์, 2547. การวิจัยสนับสนุนการจัดทำแผนแม่บทอุตสาหกรรมแม่พิมพ์และอุตสาหกรรมเครื่องจักรขึ้นรูปเที่ยงตรงสูง. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.
- ปารเมศ ชูติมา, 2545. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หน้า 115-116, 178.
- พร้อมสิน ชื่นขง, วีระชัย บอระเฮม และ สัญญา สุขพัฒนากุล, 2548. การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการตัดที่มีผลต่อความแข็งแรงของเหล็กกล้าเครื่องมือ DCS3. วิทยานิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. หน้า 1-20.
- พีรวิชัย พิมพ์สวัสดิ์ และ วีระพงษ์ ตันหัน. 2544. การศึกษาการสึกกร่อนของขั้วอิเล็กโทรดของเครื่องกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. หน้า 3-4, 10-12.
- สันติรัฐ นันสะอาจ และ สมจิตร ลาภโนนเขวา. 2547. การศึกษาอิทธิพลของการแปรพารามิเตอร์ของกระบวนการกัดเจาะด้วยไฟฟ้าต่อคุณสมบัติของงาน. วิทยานิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม 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 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหาขนาดของตัวอย่าง (Replicate)

ตารางที่ ผก 1 แสดงค่าตัวแปรและค่า MRR ของเหล็กกล้า SKD11

พารามิเตอร์		อัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (กรัม/นาที)			
Electric Discharge Time (μsec)	Electric Discharge Peak Current (A)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย (μ)
125	50	0.5033	0.5133	0.5167	0.5111
190	75	0.6767	0.6833	0.6833	0.6811
250	90	0.7400	0.7633	0.7633	0.7555

ตารางที่ ผก 2 แสดงค่าเฉลี่ย ($\bar{\mu}$) และ ค่าความแปรปรวน (σ^2)

พารามิเตอร์		อัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (กรัม/นาที)
Electric Discharge Time (μsec)	Electric Discharge Peak Current (A)	
125	50	0.5033
125	50	0.5133
125	50	0.5167
190	75	0.6767
190	75	0.6833
190	75	0.6833
250	90	0.7400
250	90	0.7633
250	90	0.7633
ค่าเฉลี่ย ($\bar{\mu}$)		0.6492
ค่าความแปรปรวน (σ^2)		0.1026

โดยที่

$$\mu_1 = 0.5111 \text{ กรัม/นาที}$$

$$\mu_2 = 0.6811 \text{ กรัม/นาที}$$

$$\mu_3 = 0.7555 \text{ กรัม/นาที}$$

$$\therefore \bar{\mu} = 0.6492 \text{ กรัม/นาที}$$

$$\tau_1 = \mu_1 - \bar{\mu} = 0.5111 - 0.6492 = -0.1381$$

$$\tau_2 = \mu_2 - \bar{\mu} = 0.6811 - 0.6492 = 0.0319$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\tau_3 = \mu_3 - \bar{\mu} = 0.7555 - 0.6492 = 0.1063$$

จากสูตร

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

โดยที่

Φ^2 = ค่าความไม่ตรงศูนย์กลาง (Non-Centrality)

τ_i = ค่าความแตกต่างแต่ละค่าเฉลี่ย

a = ระดับปัจจัยตัวที่หนึ่ง

b = ระดับปัจจัยตัวที่สอง

n = ขนาดของตัวอย่าง (Sample Size)

σ^2 = ค่าความแปรปรวน (Variance)

แทนค่า

$$\Phi^2 = \frac{(3)(n)(3.1389 \times 10^{-2})}{(3)(1.0527 \times 10^{-2})}$$

$$\Phi^2 = (n)(2.9818)$$

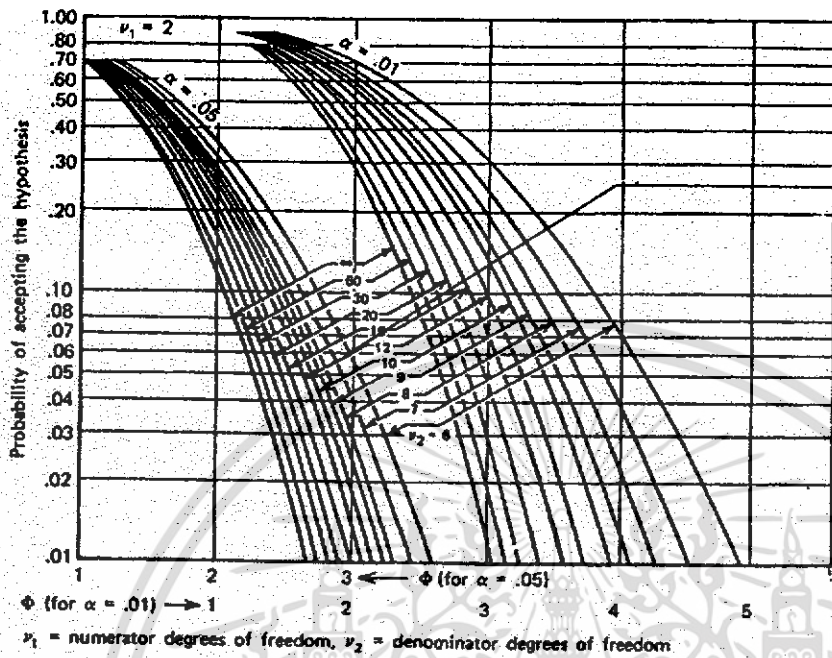
ตารางที่ ผก 3 แสดงผลการหาขนาดของตัวอย่างที่เหมาะสม

n	Φ^2	Φ	$V_1 = (n-1)$	$V_2 = a(n-1)$	α	β	Power(1- β)
3	8.9453	2.9908	2	6	0.05	0.06	0.94
4	11.9272	3.4535	2	9	0.05	0.01	0.99
5	14.9090	3.8612	2	12	0.05	0.01	0.99

กำหนดค่าความน่าจะเป็นที่ยอมรับได้ (Power of the test) เท่ากับ 0.90

∴ จากการหาขนาดของตัวอย่างที่เหมาะสม สามารถสรุปได้ว่าขนาดตัวอย่างที่เหมาะสม คือ n = 3 ครั้ง โดยมีความน่าจะเป็นของความถูกต้องของค่า MRR ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 มีค่า Power (1- β) = 0.94 ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าความน่าจะเป็นที่ยอมรับได้ (Power of the test) ที่ 0.90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จุดที่ได้ค่า β
เท่ากับ 0.06

รูปที่ ผก 1 เส้นโค้งลักษณะสมบัติของการดำเนินการ (Operating Characteristic Curves)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



JAMES COPPELL LEE

INSPECTION REPORT

CUSTOMER:

ORDER No	ALLOY No	DESCRIPTION	SIZE	QTY
IPOO-16007	J47Z 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.R.
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.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผข 2 ใบแสดงส่วนผสมอิเล็กทรอนิกส์ทองแดง (ต่อ)

FORM 4 NBECK

FRX NO. : 026394159

Jul. 13 2006 04:21

Certificate Number
Customer Name
Order Number
Date
L/C Number
Specification
Product Description
Product Traceability Code

OC-CC-063706
NBECK SENG CHIANG METAL CO. LTD.
C7-3A04-015
17 May 2006
JIS H3140 : 1992 C1100 BB HALF HARD TEMPER
COPPER BUSBARS
P.L. NO. ZY-0604-015

ORIENTAL COPPER CO., LTD.
OFFICE : 27th Fl. Bangkok Insurance Bldg. Building,
25 South Sathon Road, Thungmahavej, Sathon,
Bangkok 10120, Thailand
Tel: (66) 2286-3199, 2286-6188, 2286-6911
Fax: (66) 2286-3144
P.O. BOX :
TMC'S 146 Ariya Nakhon Industrial Estate
Bangkok Sub-District, Bangkok, Thailand
Linn: 10200, Thailand
Tel: (66) 742-4414, 742-4415
Fax: (66) 742-2132, 213236
www.oriental-copper.com

Size Thickness x Width x Length	Weight kg	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	1,152.0	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	950.4	100.3	99.98 Min	PASSED	287.3	34.4	PASSED
6 mm x 100 mm SE x 5000 mm	1,072.0	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 MILS R3140.

Prepared by
Quality Assurance

Approved by
Plant Manager

FM-0A-037 : 10 : 15-11-02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผข 3 ใบแสดงส่วนผสมเหล็กกล้า SKD11

03/13/1997 23:31

023811523

PACIFIC

PAGE 01



Head Office

1-2-2-chemie, Marunouchi
Chiyodoku, Tokyo, Japan

TEST CERTIFICATE

Contractor: _____
Contract No. AS-71291
Production No. _____

Material: JIS SKD 11
Condition: Hot Rolled & Annealed

Report No. T77965
Date _____

Month: _____ Day: 31 Year: 00

Item No.	Case No.	Size in (mm)	Number of Piece	Weight in (kg)	Specification Charge No.	C		Si	Mn	P	S	Chemical Composition (%)		W	Mo	V	Remarks
						C	Si					Cr	Ni				
1	235	D6	9	440		1.49	0.28	0.39	0.017	0.009	12.05	0.80	0.20				
2																	
3																	
4																	
5																	
6																	
7																	
8																	
9																	
10																	
Spec. Annealed Hardness (Hv)		Preheat (C)	Quenched		Hardening Test		Tempered		Decarburization Test		Micro Structure Test		Remarks				
		Temperature (C)	Temperature (C)	Hardness (HRC)	Temperature (C)	Hardness (HRC)	Hardness (HRC)	Hardness (HRC)	Test	Micro Structure Test							
			1000 AIR	65.7	150 AIR	60	Good	Good									

Signature: T. Kishida
T. Kishida
Manager of Quality Control Section,
Yasugi Works, Hitachi Metals, Ltd.

BANK OF AYUDHYA LTD.
SARAYAK BRANCH
22297

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการใช้เครื่องอีดีเอ็ม



รูปที่ ผค 1 ภาพเครื่องอีดีเอ็มยี่ห้อ Sodick รุ่น AQ35L

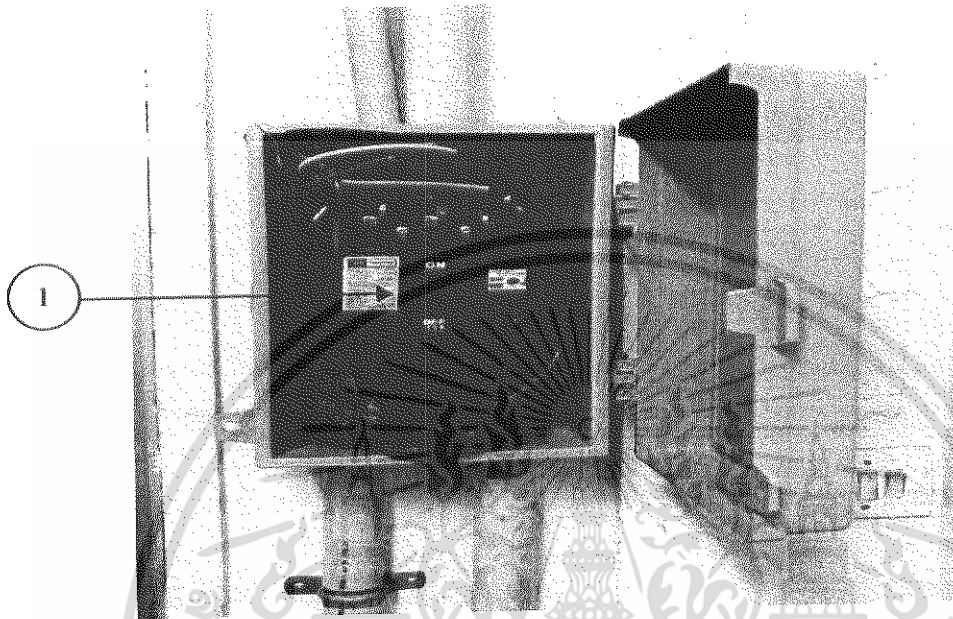
วิธีการใช้เครื่องสามารถแบ่งได้เป็น 5 ขั้นตอนดังนี้

1. การเปิดเครื่อง
2. การติดตั้งอิเล็กโทรดและชิ้นงาน
3. การเซ็ตอัพเครื่อง การป้อนโค้ดต่าง ๆ และการเริ่มทำการสปาร์ค
4. การถอดคอดีเล็ก โทรดและชิ้นงาน
5. การปิดเครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การเปิดเครื่อง

1.1 เปิดสวิตช์เบรกเกอร์ (Breaker) หมายเลข 1 ดังรูปที่ ผศ 1



รูปที่ ผศ 1 สวิตช์เบรกเกอร์ (Breaker)

1.2 เปิดสวิตช์เครื่องแปลงไฟฟ้า หมายเลข 2 จากนั้นกดปุ่ม RESET หมายเลข 3 ดังรูปที่ ผศ 2



รูปที่ ผศ 2 เครื่องแปลงไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 เปิดสวิตช์เบรกเกอร์ (Breaker) ด้านหลังเครื่องอีซีเอ็ม หมายเลข 4 ดังรูปที่ ผศ 3



รูปที่ ผศ 3 สวิตช์เบรกเกอร์ (Breaker) ด้านหลังเครื่องอีซีเอ็ม

1.4 กดปุ่ม SOURCE ON (สีขาว) หมายเลข 5 เพื่อบูทระบบปฏิบัติการของเครื่องอีซีเอ็ม เวลาที่ใช้ในการบูทประมาณ 3 นาที ดังรูปที่ ผศ 4



รูปที่ ผศ 5 ปุ่ม เปิด/ปิด ระบบเครื่องอีซีเอ็ม

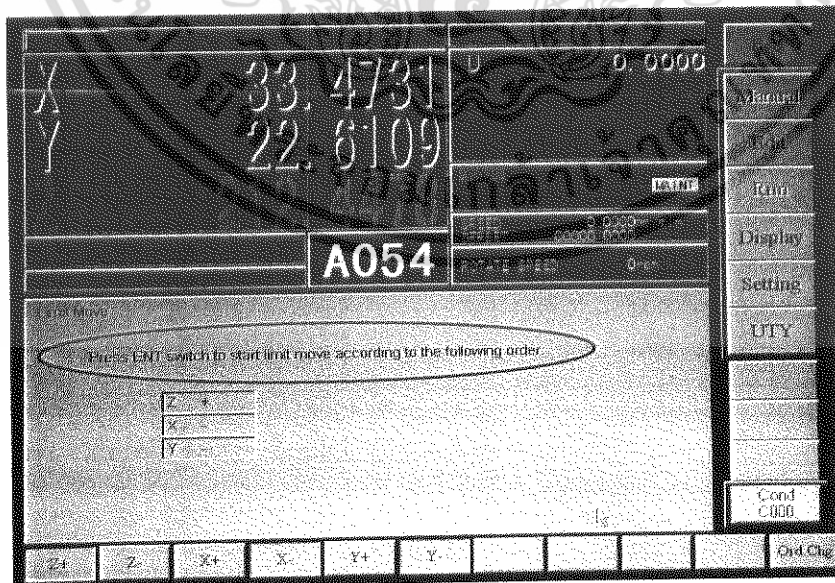
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 จากนั้นจะปรากฏข้อความแสดงที่หน้าจอ Please press POWER ON switch ให้ทำการกดปุ่ม POWER ON (สีเขียว)
หมายเลข 6 ดังรูปที่ ผศ 5 เพื่อเปิดในส่วนของแมคคาร์นิค



รูปที่ ผศ 6 หน้าจอแสดงคำสั่งให้กดปุ่ม POWER ON หลังจากบูทระบบเสร็จแล้ว

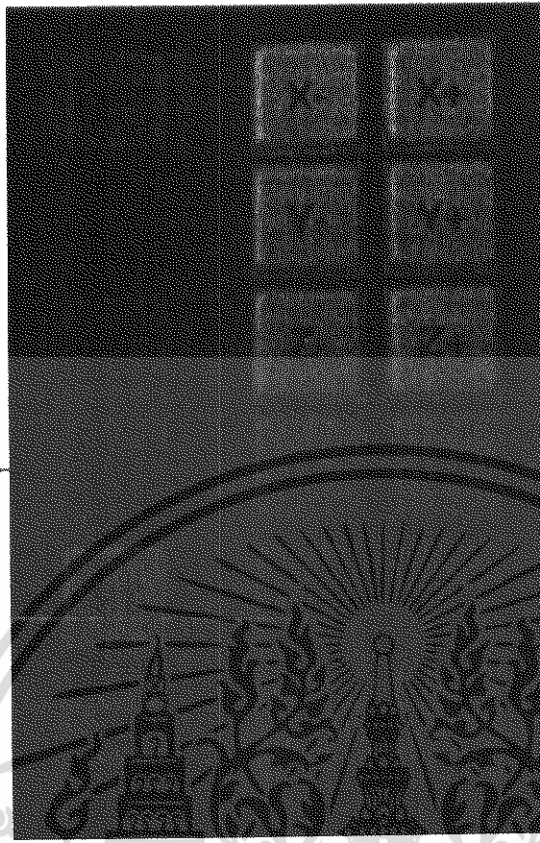
1.6 เมื่อกดปุ่ม POWER ON หน้าจอจะปรากฏแสดงข้อความ Press ENT switch to start limit move according to the following order ดังรูปที่ ผศ 7 เป็นคำสั่งให้กดปุ่ม ENT หมายเลข 7 ดังรูป ผศ 8 เพื่อให้ส่วนของแมคคาร์นิคเคลื่อนหา
ลิมิตสวิทช์ในทิศทางของเครื่อง



รูปที่ ผศ 7 หน้าจอแสดงคำสั่งให้กดปุ่ม ENT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

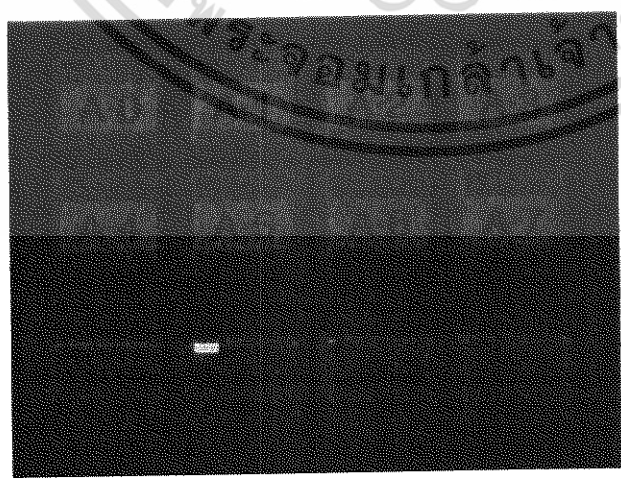
7



ปุ่มบังคับการเคลื่อนที่ของชุดหัวจับอิเล็กทรอนิกส์

รูปที่ ผศ 8 ปุ่มควบคุมต่างๆ ของเครื่องฮีดรีม

เมื่อชุดหัวจับอิเล็กทรอนิกส์เคลื่อนหาลิ้มรสเสร็จเรียบร้อยแล้ว สถานะของเครื่องในขณะนี้สามารถบังคับชุดหัวจับอิเล็กทรอนิกส์ไปตามแนวแกน XYZ ได้อย่างอิสระ โดยการกดปุ่มบังคับการเคลื่อนที่ของชุดหัวจับอิเล็กทรอนิกส์ ดังรูปที่ ผศ 8 และสามารถเลือกความเร็วฟีด (Feed) ในการเคลื่อนที่ของชุดหัวจับอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งจะมีอยู่ 4 ระดับ ดังรูปที่ ผศ 9



ปุ่มปรับระดับความเร็วฟีด

รูปที่ ผศ 9 ปุ่มควบคุมความเร็วฟีด (Feed)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การติดตั้งอิเล็กทรอนิกส์และชิ้นงาน

ทำการเคลื่อนชุดหัวจับอิเล็กทรอนิกส์มายังจุดที่พร้อมจะติดตั้งอิเล็กทรอนิกส์

2.1 ทำการติดตั้งอิเล็กทรอนิกส์และชิ้นงาน ดังรูปที่ ผศ 10 ในส่วนของท่อฉีดสารไดอิเล็กทริก เพื่อทำการฉีดใส่เศษโลหะ ในระหว่างทำการสปาร์ค จะต้องเช็ดตำแหน่งให้มีอัตราการฉีดใส่เศษโลหะคงที่ในทุก ๆ ครั้งของการทดลอง (กรณีที่ไม่สนใจปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับอัตราการฉีดใส่เศษโลหะที่เกิดขึ้นจากการสปาร์ค)



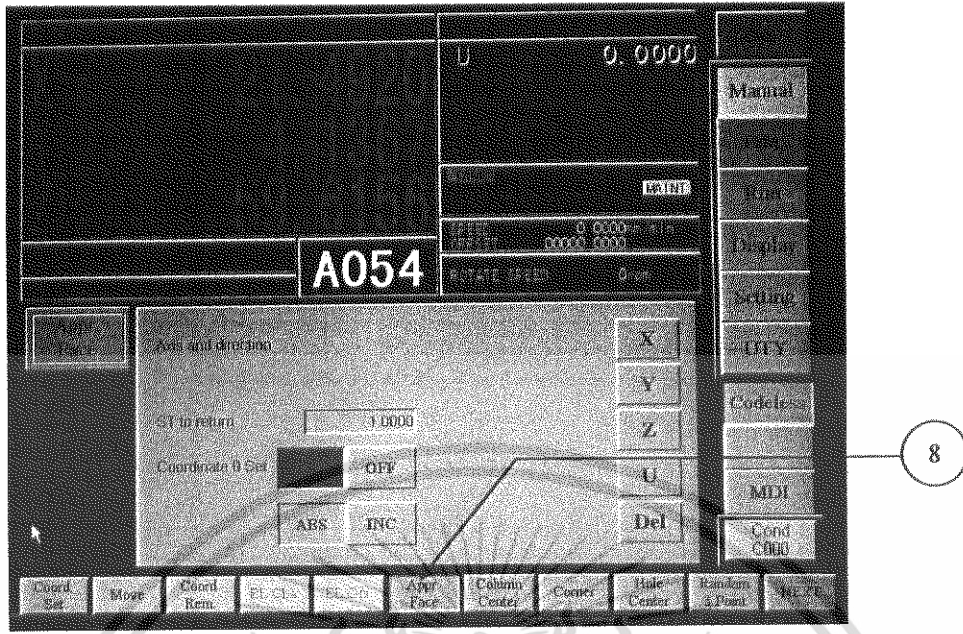
รูปที่ ผศ 10 การติดตั้งอิเล็กทรอนิกส์และชิ้นงาน

3. การเชื่อมต่อเครื่อง การป้อนโค้ดต่าง ๆ และการเริ่มทำการสปาร์ค

การเลือกฟังก์ชันต่าง ๆ จะเป็นแบบระบบสัมผัสหน้าจอ โดยจะแสดงการเชื่อมต่อเครื่องและการป้อนโค้ดต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

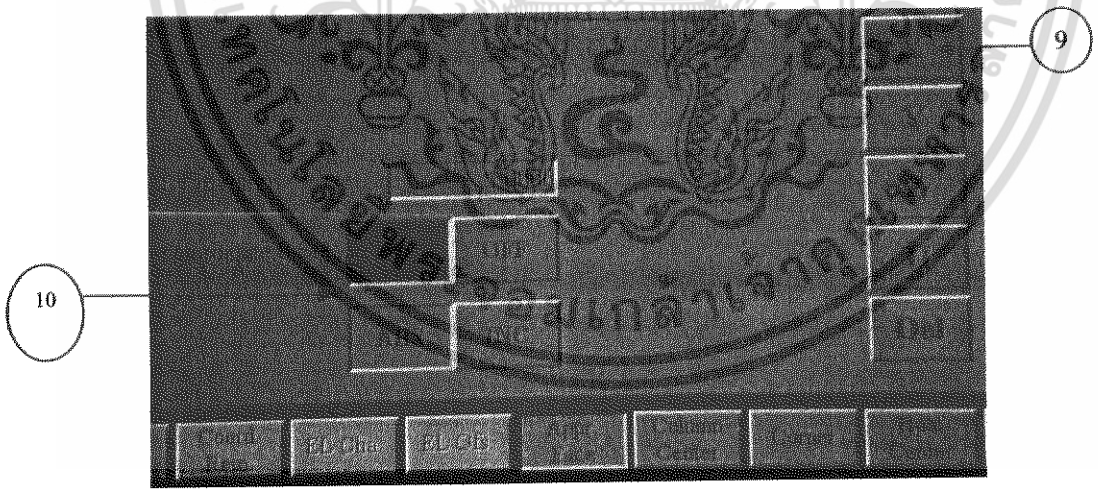
3.1 ทำการตั้งค่าศูนย์ชิ้นงานในระบบพิกัดแกน XYZ ทั้ง 3 แกน ซึ่งจะเป็นจุดอ้างอิงในการเดินของแท่งอิเล็กทรอนิกส์ ผู้ทำการทดลองจะต้องกำหนดตำแหน่งจุดเริ่มต้น (จุด Origin) เองว่าจะเลือกตำแหน่งใด จากนั้นเลือกกดปุ่ม Appr Face หมายเลข 8 ดังรูปที่ ผศ 11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผค 11 หน้าจอแสดงการเข้าฟังก์ชัน Appr Face

จากนั้นเคลื่อนอิเล็กโทรดเข้าใกล้ชิ้นงาน (ต้องไม่ชนชิ้นงาน) ในแนวแกน X ในฟังก์ชันของ Appr Face ให้กดเลือกแกน X หมายเลข 9 เพื่อป้อนทิศทางในการเดินเข้าหาชิ้นงาน แล้วกำหนดการเคลื่อนที่เป็นแบบ ABS (Absolute) ตามด้วยการกดเลือก ON หมายเลข 10 ดังรูปที่ ผค 12 จากนั้นสั่งให้เริ่มทำการเซตค่าศูนย์ในแนวแกน X โดยการกดปุ่ม ENT หมายเลข 7 ดังรูป ผค 8 ส่วนการเซตค่าศูนย์ชิ้นงานตามแนวแกน YZ ดำเนินตามวิธีการเดียวกัน



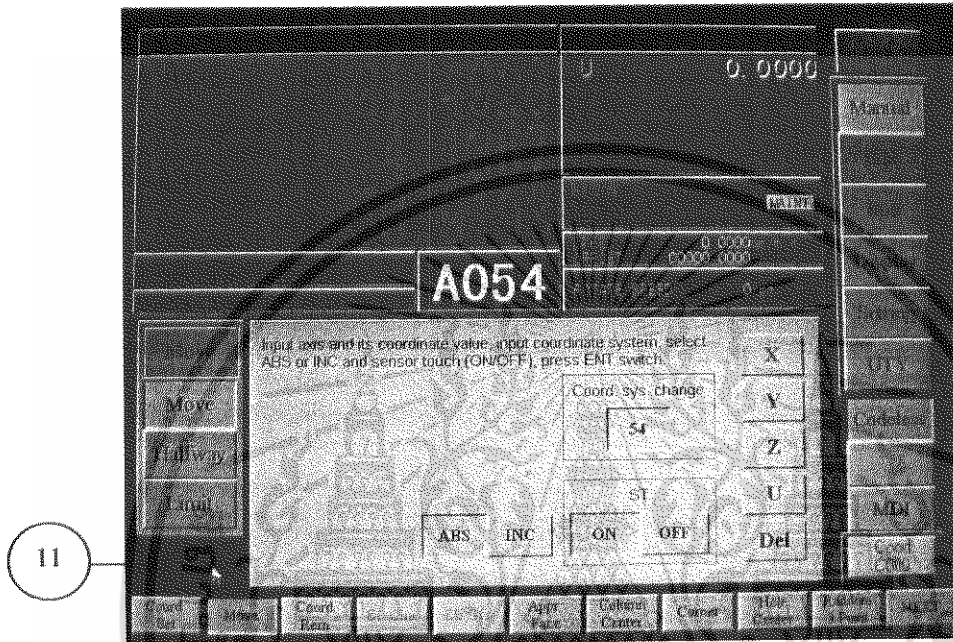
รูปที่ ผค 12 หน้าจอแสดงฟังก์ชัน Appr Face

หมายเหตุ : กรณีอิเล็กโทรดชนกับชิ้นงานจะมีสัญญาณเตือนดังขึ้น และอิเล็กโทรดจะไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ แก้ไขโดยการกดปุ่ม ACK แล้วกด ปุ่ม ST ค้างไว้ จากนั้นกดปุ่มบังคับทิศทางให้อิเล็กโทรดออกจากชิ้นงาน ซึ่งคำสั่งของปุ่มต่างๆ เหล่านี้แสดงในรูปที่ ผค 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีต้องการยกเลิกคำสั่งใด ๆ ที่กระทำอยู่ล่าสุด ให้กดปุ่ม HALT OFF และACK ตามลำดับ ซึ่งปุ่มต่าง ๆ เหล่านี้แสดงไว้ในรูปที่ ผศ 8

3.2 เมื่อทำการเซตค่าศูนย์ชิ้นงานครบทั้ง 3 แกนแล้ว สามารถเคลื่อนอิเล็กโทรด ไปยังตำแหน่งเริ่มต้นที่ต้องการจะสปาร์คชิ้นงานได้โดยฟังก์ชัน Move ให้กดฟังก์ชัน Move หมายเลข 11 ดังรูปที่ ผศ 13 จากนั้นป้อนทีกัด XYZ ตามที่ต้องการ โดยอ้างอิงจากจุดเริ่มต้นแบบสัมบูรณ์ (Absolute)



รูปที่ ผศ 13 หน้าจอแสดงฟังก์ชัน Move

3.2 เขียน G-Code โดยการเข้าแถบเมนู Edit ด้านขวาของจอ หมายเลข 12 ดังรูปที่ ผศ 14 การเขียน G-Code ในการสปาร์คมี 2 วิธีที่สำคัญคือ

3.2.1 ทำการสปาร์คชิ้นงาน โดยการกำหนดระยะเวลาสิ้นสุดการสปาร์คในช่วงเวลาหนึ่ง ๆ สามารถเขียน G-Code โดยการป้อน G85 Z3000 หมายถึง ทำการสปาร์คตัดชิ้นงาน ตามแนวแกน Z เป็นเวลา 30 นาที

ตัวอย่าง G-Code ในการทดลอง

```
G00 Z10000
G00 X150000 Y150000
G85 Z3000
G01 Z-280000 C100
G00 Z200000
G00 X0000 Y0000
```

ในการกำหนดเวลาในการตัดชิ้นงานนั้น จะต้องใช้ร่วมกับ G01 เป็นโค้ดที่ใช้ในการตัด จากตัวอย่าง G01 Z-280000 หมายถึงการตัดชิ้นงานในแนวแกน Z ไปในทิศทางลบ เป็นระยะทาง 28 มิลลิเมตร การกำหนดระยะนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะต้องกำหนดให้ใกล้เคียงกับความสูงของชิ้นงาน เพื่อป้องกันการตัด โคนแทนรองชิ้นงาน และการสิ้นสุดการตัด จะต้องไม่จบที่ โท๊ต G01 นั้นหมายถึง ระยะเวลาในการตัดจะไม่ครบ 30 นาที ส่วน G00 เป็นการเคลื่อนที่อย่างรวดเร็ว โดยไม่ตัดเนื้อชิ้นงาน

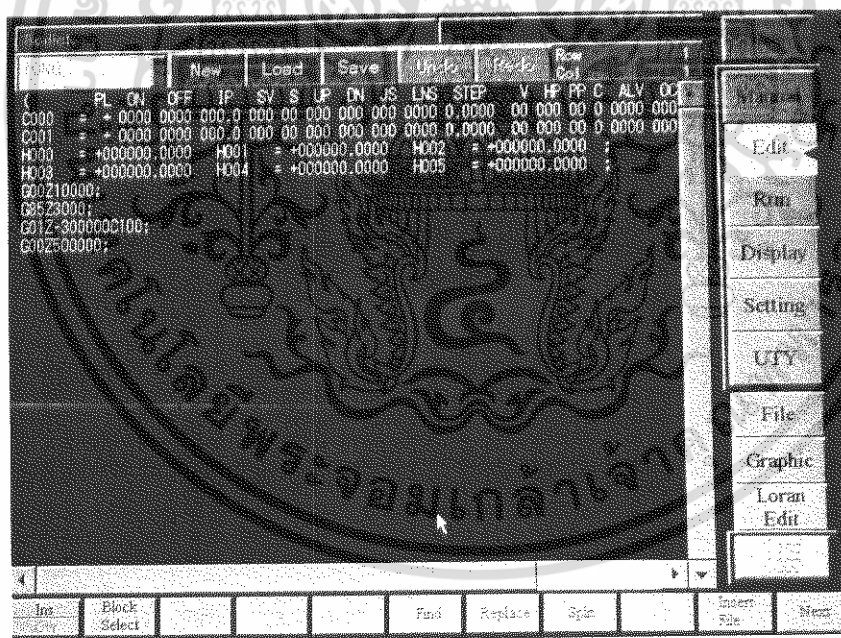
หมายเหตุ : การใช้โท๊ต G85 ร่วมกับโท๊ต G01 G02 G03 เครื่องจะทำการหยุดตัดงานเมื่อทำงานครบข้อกำหนดของโท๊ตใดโท๊ตหนึ่งก่อน

3.2.3 กำหนดการตัดชิ้นงานโดยกำหนดเป็นความลึกเป็นค่าใด ๆ จะไม่มีเวลาในการตัดเข้ามาเกี่ยวข้อง การสิ้นสุดการตัดชิ้นงานจะขึ้นอยู่กับระยะความลึกที่กำหนด โท๊ตที่ใช้ในการตัดชิ้นงาน คือ G01

ตัวอย่าง G-Code ในการทดลอง

```
G00 Z10000
G00 X150000 Y150000
G01 Z-280000 C100
G00 Z200000
G00 X0000 Y0000
```

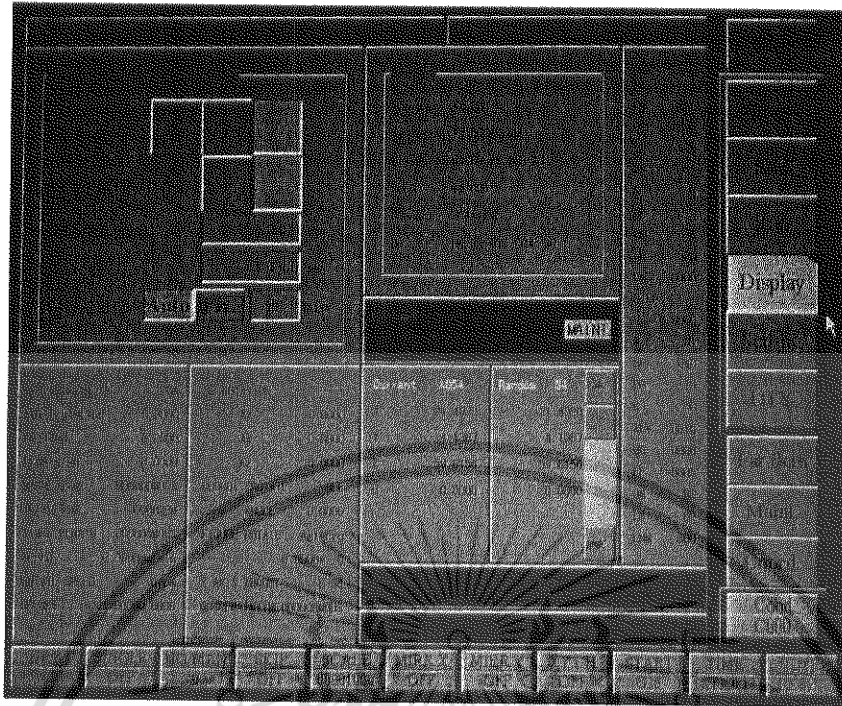
จากตัวอย่าง ในการสปาร์คจะสิ้นสุดการตัดก็ต่อเมื่อ ทำการตัดในแนวแกน Z ไปในทิศทางลบจนถึงระยะ -28 มิลลิเมตร ก็จะหยุดทำการสปาร์ค



รูปที่ ผศ 14 หน้าจอสำหรับเขียน G-Code ในฟังก์ชัน Edit

3.3 กำหนดเงื่อนไข C100 (Condition C100) ในการตัดชิ้นงาน ซึ่งเป็นเงื่อนไขในการตัดระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ที่ป้อนแดงกับชิ้นงานที่เป็นเหล็กกล้า (กรณีถ้าป้อนเงื่อนไขอื่นจะต้องพิจารณาจากคู่มือการใช้เครื่องอีซีเอ็ม Section 11: Machining Condition Table) ในการป้อนเงื่อนไขในการตัด กดเลือก Cond C000 หมายเลข 13 ดังรูปที่ ผศ 15

จากนั้นป้อนเงื่อนไขในการตัดที่ต้องการ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผศ 16 หน้าจอแสดงข้อมูลของการตัด

4. การถอดอิเล็กทรอนิกส์โทรคและชิ้นงาน

ก่อนจะถอดอิเล็กทรอนิกส์ โทรคและชิ้นงานออก จะต้องทำการระบายสาร ไดอิเล็กทริกออกจากแท็งค์ให้หมดก่อน

4.1 กดปุ่ม OFF TANK FILL หมายเลข 17 ตามด้วย OPEN TANK DRAIN หมายเลข 18 และเมื่อสาร ไดอิเล็กทริกลดระดับจนแห้งกดปุ่ม TANK DOOR หมายเลข 19 ในรูปที่ ผศ 13 เพื่อเอาแท็งค์ลง

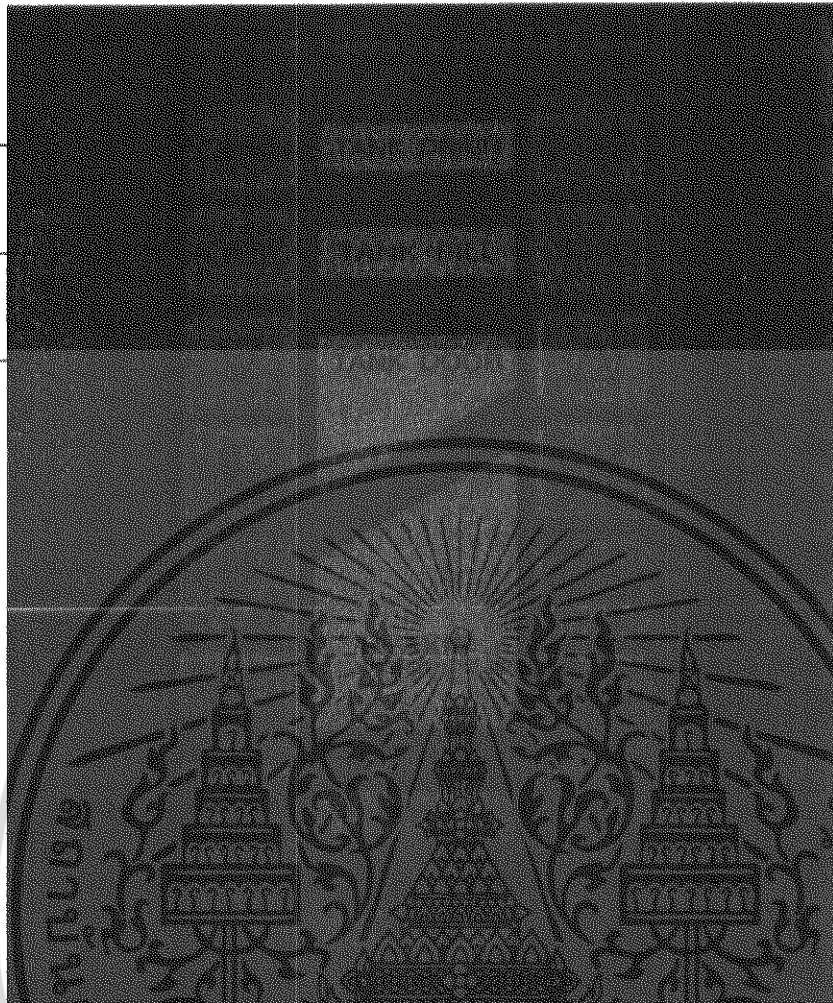
4.2 ทำการถอดอิเล็กทรอนิกส์ โทรคและชิ้นงานออกจากตัวจับยึด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

18

17

19



รูปที่ ผค 17 แสดงความคุมแท่งค้ด้านหน้าเครื่อง

5. การปิดเครื่อง

ทำการปิดได้ย้อนกลับ โดยมีขั้นตอนดังนี้

- 5.1 ทำการปิดระบบแมตคาร์นิค โดยการกดปุ่ม POWER OFF หมายเลข 6 ดังรูปที่ ผค 5
- 5.2 ปิดโปรแกรม โดยการกดปุ่ม SOURCE OFF หมายเลข 5 ดังรูปที่ ผค 5
- 5.3 ทำการปิดสวิตซ์ด้านหลังเครื่องฮีตฮีม หมายเลข 4 ดังรูปที่ ผค 3
- 5.4 ปิดสวิตซ์เครื่องแปลงไฟฟ้า หมายเลข 2 ดังรูปที่ ผค 2
- 5.5 ปิดสวิตซ์เบรกเกอร์ (Breaker) หมายเลข 1 ดังรูปที่ ผค 1
- 5.6 ทำความสะอาดเครื่องฮีตฮีม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้