

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

**การศึกษาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยในการตัดเหล็กกล้าเครื่องมือ AUD11
ด้วยวิธี EDM**



นายทวีชัย พงศ์ไพฑูรย์สิน
นายนพรัตน์ สิงหะ
นายอนุสรณ์ อารักษ์
นายเอกฉัตรชัย เฟื่องเอม

รฟ.
ช. 193 ก
2550

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

83175

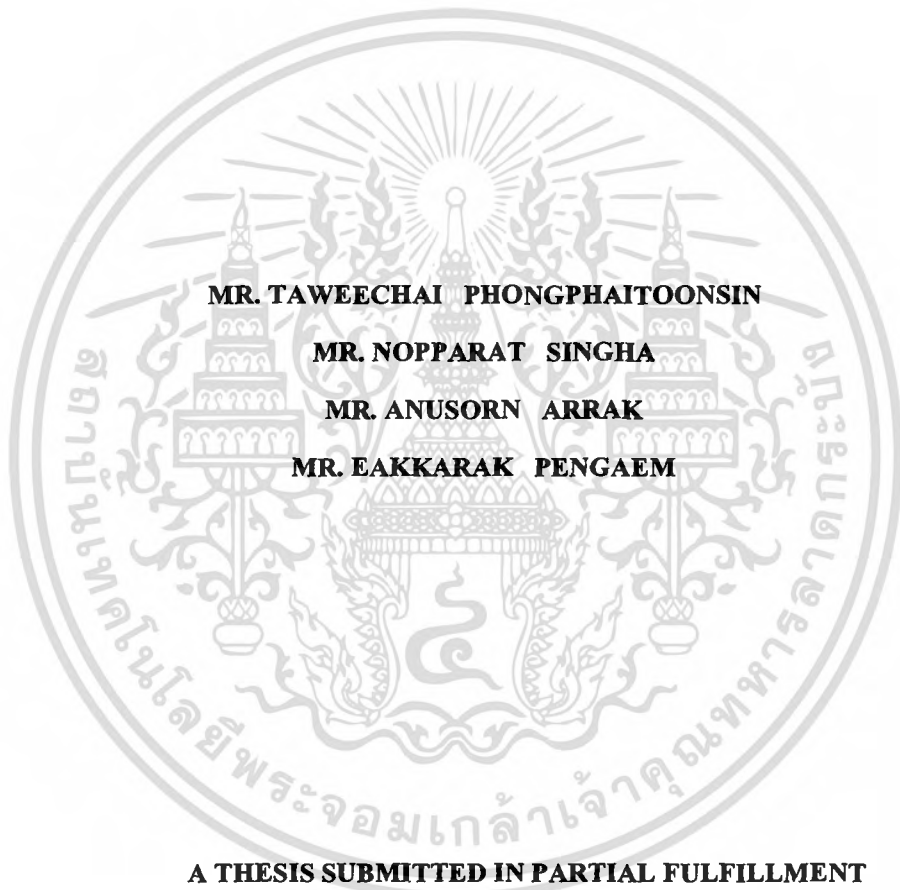
- 6 ส.ค. 2551

b. 11960528
i.

**ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2550**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Optimization of EDM Parameters for Machining of AUD11 Tool Steel



**MR. TAWEECHAI PHONGPHAITOONSIN
MR. NOPPARAT SINGHA
MR. ANUSORN ARRAK
MR. EAKKARAK PENGAEM**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2007**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญาโท

หัวข้อปริญญาโท

ศึกษาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยในการตัดเหล็กกล้า AUD11 ด้วย
เครื่อง EDM

Optimization of EDM Parameters for Machining of AUD11

Tool Steel

นักศึกษา

นายทวีชัย พงศ์ไพฑูรย์สิน

รหัสประจำตัว

48015663

นายนพรัตน์ สิงหะ

รหัสประจำตัว

48015666

นายอนุสรณ์ อารักษ์

รหัสประจำตัว

48015690

นายเอกลักษณ์ เฟื่องเอม

รหัสประจำตัว

48015694

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาโท



(ผศ. ดร. กรรณชัย กัลยาศิริ)



(ดร. อนิรุท ไชยจารูวิช)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การศึกษาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยในการตัดเหล็กกล้าเครื่องมือ AUD11 ด้วยวิธี EDM
นักศึกษา	นายทวีชัย พงศ์ไพฑูรย์สิน นายนพรัตน์ สิงหะ นายอนุสรณ์ อารักษ์ นายเอกลักษณ์ เฟื่องเอม
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา	2550
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	ผศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ ดร.อนิรุท ไชยจารวณิช

บทคัดย่อ

โครงการนี้ได้ทำการศึกษาความสามารถในการตัดเหล็กกล้า AUD 11 ที่ผ่านกระบวนการการขึ้นรูปด้วยวิธี EDM ในแง่ของ อัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (Material Removal Rate: MRR) อัตราการสึกหรอของแท่งอิเล็กโทรด (Electrode Wear Rate: EWR) และความหยาบของผิวชิ้นงาน (Surface Roughness) ตัวแปรที่พิจารณา มี 2 ตัวคือ ช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า (Electric Discharge Peak Current: ON) และ กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ค (Electric Discharge Peak Current: IP) จากการประมวลผลทางสถิติและทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธี พื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology: RSM) แสดงให้เห็นถึงช่วงที่ต้องการของ อัตราการตัดเนื้อชิ้นงานสูงสุด คือ กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ค 56-60 A และช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า 250-260 μsec อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดต่ำสุด คือ กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ค 20-37 A และ 49-60 A ช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า 250-350 μsec และ 250-258 μsec ความหยาบผิวของชิ้นงานดีที่สุด คือ กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ค 20-28 A และ ช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า 250-315 μsec

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title Optimization of EDM Parameters for Machining of
AUD11 Tool Steel

Student Mr. Taweechai Phongphaitoonsin
Mr. Nopparat Singha
Mr. Anusorn Arrak
Mr. Aekkarak Pengaem

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

Academic Year 2007

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

ABSTRACT

This project studied on machining of AUD11 tool steel by EDM process. The machining characteristics investigated were material removal rate (MRR), electrode wear rate (EWR) and surface roughness. The process parameters, electrical discharge time and electrical discharge peak current, were considered. From statistical and mathematical analyses determination by using response surface methodology, results showed that the highest MRR is obtained when operated in the range of 56 – 60 (A) and ON 250 – 260 (μsec), EWR the lowest IP is in the range of 20 – 37 (A) and 49 – 60 (A), ON 250 – 350 (μsec) and 250 – 258 (μsec), surface roughness the best IP is in the range of 20 – 28 (A) and ON 250 – 315 (μsec).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เพราะได้รับคำแนะนำและการสนับสนุนของอาจารย์ทุกท่านเป็นอย่างดีเสมอมาจนโครงการนี้สำเร็จสมบูรณ์ลุล่วงไปได้ด้วยดี กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ

ผศ.ดร. กรรณชัย กัลยาศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท กลุ่มผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับการให้โอกาสในการศึกษาปริญญาโทฉบับนี้ รวมทั้งการมอบความรู้ คำแนะนำ ความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน รวมถึงความเอาใจใส่ในการทำปริญญาโทเป็นอย่างดีและทุก ๆ สิ่งที่ยอมรับมอบให้แก่กลุ่มผู้วิจัยตลอดระยะเวลาที่ผ่านมาในการทำโครงการ

ดร.อนิรุท ไชยจารุวิช อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงสำหรับการให้คำปรึกษาและคำแนะนำต่าง ๆ ในการหาข้อมูล และเสียสละเวลาในการให้ความรู้กับกลุ่มผู้วิจัย

ขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เอื้อเฟื้อต่อสถานที่ในการทำปริญญาโท รวมทั้งอาจารย์ทุก ๆ ท่าน

ขอบคุณบริษัท โชคติก เอ็นจิเนียริง เซอร์วิส (ประเทศไทย) จำกัด ที่ช่วยอนุเคราะห์สิทธิพิเศษในการให้บริการ

ขอบคุณบริษัท ชันมาร์ เอส.พี. (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการให้ใช้เครื่องวัดความหยาบผิวยี่ห้อ TOKYO SIEMITSU รุ่น SURFCOM 480A ในห้องปฏิบัติการของบริษัท ชันมาร์ เอส.พี. (ประเทศไทย) จำกัด

ขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องชั่งน้ำหนัก

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวของกลุ่มผู้ทำการวิจัยที่ได้มอบความรัก ความอบอุ่น และเป็นกำลังใจแก่กลุ่มผู้วิจัยตลอดเวลา ตลอดจนเพื่อนที่ดีทุกคน และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการทุกท่านที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ด้านการติดต่อประสานงานกับบริษัทต่าง ๆ จนทำให้การศึกษาในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณหนังสือทุกเล่มที่ทางกลุ่มผู้วิจัยใช้ในการหาข้อมูล ในการค้นคว้าทำปริญญาโทและแหล่งความรู้ทุกแหล่งข้อมูลอันทรงคุณค่าสำหรับทำโครงการนี้

นาย ทวีชัย พงศ์ไพฑูรย์สิน

นาย นพรัตน์ สิงหะ

นาย อนุสรณ์ อารักษ์

นาย เอกลักษณ์ เพ็งเอม

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของการสปาร์ค.....	4
2.2 หลักการของกรรมวิธีขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดเอน.....	6
2.3 อิเล็กโทรด (Electrode).....	9
2.4 ระบบไดอิเล็กตริก (Dielectric System).....	14
2.5 ระบบการไหลของไดอิเล็กตริก (Flushing).....	15
2.6 ระบบเซอร์โว (Servo System).....	21
2.7 ความสำคัญของความหยาบผิว.....	22
2.8 หลักการออกแบบการทดลอง.....	30
2.9 ชนิดของแผนการออกแบบการทดลอง.....	36
2.10 ผลตอบหลายตัว.....	38
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	40
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 การออกแบบการทดลอง	43
3.4 ขั้นตอนการทดลอง	47
3.5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	48
3.6 การทำการทดลองซ้ำ	49
3.7 สรุปผลการทดลอง	49
บทที่ 4 ผลการทดลอง	
4.1 ผลการทดลองที่ได้หลังจากทำการทดลอง	51
4.2 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทางสถิติ	53
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	68
หนังสืออ้างอิง	69
ภาคผนวก	กผก
ภาคผนวก	ขผข
ภาคผนวก	คผค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงลักษณะการเบี่ยงเบนของผิวชิ้นงาน	24
ตารางที่ 2.2 บอกราคาผลตอบที่ดีที่สุดของแต่ละผลลัพธ์ที่ได้จากทดลอง	39
ตารางที่ 3.1 แสดงระดับตัวแปรในการทดลอง	44
ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่สภาวะคงที่โดยกำหนดค่าคงที่ตลอดการทดลอง	45
ตารางที่ 3.3 ลำดับการทดลอง	46
ตารางที่ 4.1 ผลการเก็บค่าน้ำหนักก่อน-หลังการทดลอง	51
ตารางที่ 4.2 ผลที่ได้จากการคำนวณ	52
ตารางที่ 4.3 ตารางค่าที่ได้จากการทดสอบซ้ำของ อัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR) และอัตราการสึกหรอ ของอิเล็กโทรด (EWR) ที่ได้จากรูปโครงร่างทั้งสองกราฟซ้อนทับ.....	67
ตารางที่ 4.4 ตารางค่าที่ได้จากการทดสอบซ้ำของ อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR) และความหยาบ ผิวชิ้นงาน (Surface Roughness) ที่ได้จากรูปโครงร่างทั้งสองกราฟซ้อนทับ	67

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 กระบวนการคิซซาร์จ	4
รูปที่ 2.2 คุณสมบัติพิเศษแรงดันไฟฟ้า - กระแสไฟฟ้าของการสปาร์ค (Inonue, K., 1977).....	5
รูปที่ 2.3 สภาพของลำดับการสปาร์คในแต่ละครั้ง (Inonue, K., 1977)	6
รูปที่ 2.4 รูปร่างคลื่นของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในการขึ้นรูปด้วยเครื่องอีดีเอ็ม (Inonue, K., 1977).....	6
รูปที่ 2.5 หลักการทำงานของระบบอีดีเอ็ม	9
รูปที่ 2.6 การสะสมของอนุภาคโลหะในช่องว่างเมื่อไม่ใช้ระบบการไหลของโคอีเล็กทริก	16
รูปที่ 2.7 อนุภาคโลหะก่อตัวเป็นสะพานตัวนำไฟฟ้า	16
รูปที่ 2.8 การไหลของโคอีเล็กทริกแบบฉีด.....	17
รูปที่ 2.9 โคอีเล็กทริกไหลผ่านรูพรุนกราไฟท์ออกมาที่บริเวณช่องว่าง	17
รูปที่ 2.10 การไหลของโคอีเล็กทริกแบบคูด.....	18
รูปที่ 2.11 การไหลของโคอีเล็กทริกทางด้านข้าง	19
รูปที่ 2.12 การไหลของโคอีเล็กทริกโดยอาศัยการขึ้น-ลงของอิเล็กโทรด.....	19
รูปที่ 2.13 การไหลแบบฉีดพร้อมกับเลื่อนอิเล็กโทรดขึ้น	20
รูปที่ 2.14 การเจาะรูอิเล็กโทรดเพื่อระบายแก๊สที่เกิดขึ้น	20
รูปที่ 2.15 ช่วงของการเบี่ยงเบนผิวชิ้นงาน	24
รูปที่ 2.16 ลักษณะความแตกต่างระหว่างหัวลาก (รูปค้อนขวา) กับหัวสัมผัส (รูปด้านซ้าย)	25
รูปที่ 2.17 จำแนกลักษณะการเบี่ยงเบนผิวชิ้นงาน	26
รูปที่ 2.18 รูปหน้าตัดที่เป็นผลและรูปหน้าตัดคัดแปลงของความหยาบ.....	28
รูปที่ 2.19 ค่าพารามิเตอร์ค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยทางคณิตศาสตร์ของพื้นที่หน้าตัดของความหยาบผิว	28
รูปที่ 2.20 ค่าสูงสุดที่สุดของส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงและมีค่าความสูงของส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลง 10 จุด ของค่าความหยาบผิว	29
รูปที่ 2.21 รูปแบบของกระบวนการหรือระบบ.....	30
รูปที่ 2.22 อิทธิพลที่ไม่มีผลและอิทธิพลที่มีผลของปัจจัยต่อผลิตภัณฑ์	31
รูปที่ 2.23 กราฟเส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบ.....	37
รูปที่ 2.24 การออกแบบส่วนประกอบกลาง สำหรับ $k = 2$	37
รูปที่ 2.25 พื้นที่ซึ่งทำให้ได้ผลตอบแทนดีที่สุด ซึ่งหาได้จากการนำเอาผิวผลตอบของผลผลิต ความหนืด และน้ำหนักโมเลกุลมาวางซ้อนทับกัน	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.1 อิเล็กโทรดและชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง.....	40
รูปที่ 3.2 เครื่องอีดีเอ็ม	41
รูปที่ 3.3 เครื่องเจียรไนราบ ปรับขนาดชิ้นงาน	42
รูปที่ 3.4 เครื่องวัดความหยาบผิว	42
รูปที่ 3.5 เครื่องซั่งน้ำหนักชิ้นงานและอิเล็กโทรด.....	43
รูปที่ 4.1 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ Response Surface Method โดย Minitab.....	53
รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ Response Surface Method โดย Minitab.....	54
รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ Response Surface Method โดย Minitab.....	55
รูปที่ 4.4 การแจกแจงแบบปกติสำหรับค่าส่วนตค้ำของอัตราการตัดของเนื้อชิ้นงาน (MRR).....	56
รูปที่ 4.5 การแจกแจงแบบปกติสำหรับค่าส่วนตค้ำของอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR).....	57
รูปที่ 4.6 การแจกแจงแบบปกติสำหรับค่าส่วนตค้ำของค่าความหยาบผิวของเนื้อชิ้นงาน (Surface Roughness).....	58
รูปที่ 4.7 ค่าส่วนตค้ำของอัตราการตัดของเนื้อชิ้นงานกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล.....	59
รูปที่ 4.8 ค่าส่วนตค้ำของอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล.....	59
รูปที่ 4.9 ค่าส่วนตค้ำของค่าความหยาบผิวชิ้นงานกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล	60
รูปที่ 4.10 ค่าส่วนตค้ำกับค่าอัตราการตัดของเนื้อชิ้นงาน (MRR).....	61
รูปที่ 4.11 ค่าส่วนตค้ำกับค่าอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR).....	61
รูปที่ 4.12 ค่าส่วนตค้ำกับค่าความหยาบผิวของเนื้อชิ้นงาน (Surface Roughness).....	62
รูปที่ 4.13 กราฟโครงร่างของอัตราการตัดของเนื้อชิ้นงาน (MRR).....	63
รูปที่ 4.14 กราฟโครงร่างของอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR).....	64
รูปที่ 4.15 กราฟโครงร่างของค่าความหยาบผิวของเนื้อชิ้นงาน (Surface Roughness).....	65
รูปที่ 4.16 ช่วงที่ดีที่สุดระหว่างอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR) และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR).....	66
รูปที่ 4.17 ช่วงที่ดีที่สุดของอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR) และความหยาบผิวชิ้นงาน (Surface Roughness).....	66

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาของงานวิจัย

อุตสาหกรรมหลักต่างๆ ของประเทศไทย เช่น อุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ อุตสาหกรรมการฉีดพลาสติก อุตสาหกรรมไฟฟ้า เป็นอุตสาหกรรมที่มีการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเหมือนๆ กันเป็นจำนวนมาก ซึ่งในการผลิตชิ้นส่วนโลหะและผลิตภัณฑ์ให้มีปริมาณมากๆ มีขนาดที่แน่นอน และมีคุณภาพนั้นต้องอาศัยการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ทั้งสิ้นคุณภาพของผลิตภัณฑ์นั้นจึงขึ้นอยู่กับคุณภาพของแม่พิมพ์ แม่พิมพ์เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในการขึ้นรูปชิ้นส่วนโลหะหรือพลาสติก เช่น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ชิ้นส่วนคอมพิวเตอร์ ชิ้นส่วนรถยนต์ ดังนั้นการสร้างแม่พิมพ์ไม่มีคุณภาพแล้ว ชิ้นส่วนและอุปกรณ์ต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้นก็จะไม่มีคุณภาพตามที่เรารต้องการเช่นกัน ในการผลิตแม่พิมพ์ที่ดีนั้น จึงจำเป็นต้องใช้เครื่องจักรที่มีประสิทธิภาพสูงในการสร้างแม่พิมพ์ซึ่งก็คือ เครื่องกัดเจาะด้วยไฟฟ้า (Electrical Discharge Machine) เป็นเครื่องจักรที่มีบทบาทอย่างมากในอุตสาหกรรมการสร้างแม่พิมพ์ เครื่องกัดเจาะด้วยไฟฟ้าเป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับการกัดเจาะโลหะโดยอาศัยพลังงานจากการปลดปล่อยประจุทางไฟฟ้า (Discharge) ที่เกิดขึ้นบนช่องว่างบนชิ้นงานระหว่างอิเล็กโทรดภายใต้ไอเล็กตริก ซึ่งทำหน้าที่เป็นฉนวนโดยที่ชิ้นงาน และอิเล็กโทรดจะไม่มีการสัมผัสกัน โดยจะมีกลไกการควบคุมการปล่อยกระแสไฟฟ้าออกเป็นช่วงๆ ปัจจุบันที่มีผลกระทบต่อคุณภาพของงาน เช่น ช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า ON และกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ค (IP), ที่เป็นปัจจัยที่ใช้ในการศึกษาจะนั้นจึงเป็นสิ่งที่ที่น่าสนใจ ที่จะทำการศึกษาดังปัจจัยเหล่านี้ ที่มีผลต่ออัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR) และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR) และความหยาบผิว (Surface Roughness) โดยที่เหล็กกล้าเครื่องมือที่ใช้ในการขึ้นรูปแม่พิมพ์ คือ เหล็กกล้าเครื่องมือ AUD11

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยในการตัดเนื้อชิ้นงาน (Material Removal Rate: MRR)
2. เพื่อทำการศึกษการสึกหรอของหัวอิเล็กโทรด Electrode Wear Rate (EWR)
3. เพื่อศึกษาความหยาบผิวของชิ้นงาน (Surface Roughness) ของเหล็ก AUD 11

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

- ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองคือเหล็กกล้า AUD 11 และ อีเล็ก โทรด
- ค่าตัวแปร ที่จะใช้เปลี่ยนแปลงในการทดลอง คือ ค่า ON: 250 300 350 และ IP: 20 40 60

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- ได้เรียนรู้ถึงกรรมวิธีในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการ EDM
- ได้ทราบถึงจุดที่ดีที่สุดในการตั้งค่าตัวแปรในเครื่อง EDM ที่จะทำให้งานที่ขึ้นรูปมีประสิทธิภาพที่ดี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ 2 ห้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การทำการทดลองเพื่อให้ได้ค่าตามที่ต้องการได้นั้น จำเป็นต้องมีทฤษฎีที่เกี่ยวข้องมากมาย ดังนั้นจึงมีทฤษฎีที่ทำการศึกษามีดังนี้

1. ทฤษฎีเบื้องต้นของการสปาร์ค
2. หลักการของกรรมวิธีขึ้นรูปด้วยเครื่องอีดีเอ็ม
3. อิเล็กโทรด (Electrode)
4. ระบบไดอิเล็กตริก (Dielectric System)
5. ระบบการไหลของไดอิเล็กตริก (Flushing)
6. ระบบเซอร์โว (Servo System)

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

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

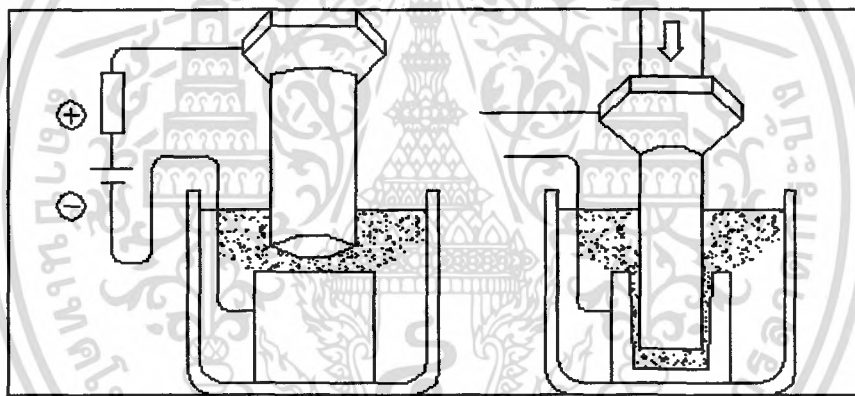
อีดีเอ็ม (EDM) คือกระบวนการแยกอนุภาควัสดุโดยวิธีความร้อน ซึ่งความร้อนที่ได้เกิดจากการสปาร์คทางไฟฟ้า อนุภาควัสดุที่ถูกแยกออกมาอาจจะอยู่ในรูปของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส

การกัดเซาะไฟฟ้า (Electroerosion) เป็นคำที่ใช้ครอบคลุมทุกกระบวนการที่แยกอนุภาควัสดุที่เกี่ยวข้องกับการส่งผ่านประจุไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดที่อยู่ภายใต้ของเหลวไดอิเล็กตริก

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

พลังความร้อนที่เกิดจากการปล่อยประจุไฟฟ้าออกมา จะหลอมละลายพื้นผิวของอิเล็กโทรดและชิ้นงานที่บริเวณช่องแคบของการปล่อยประจุไฟฟ้า โลหะหลอมเหลวจะถูกแรงหนีศูนย์กลางขับออกมา ในขณะที่พลังงานที่จัดให้ถูกขัดจังหวะหรือถูกตัด ความดันในบริเวณเส้นทางคิสซาร์จะขับอนุภาคที่หลอมเหลวออกมา และยังขับอนุภาคของแข็งออกมาด้วยโดยวิธีกระแทกทางกล

กระบวนการปล่อยประจุไฟฟ้า (The Discharge Process) หลักการของการกัดเซาะไฟฟ้า ชีงงานและอิเล็กโทรดถูกนำมาวางไว้ในตำแหน่งที่พร้อมจะทำงานแต่ไม่สัมผัสกัน กระบวนการทั้งหมดจะเกิดในของเหลวที่เป็นฉนวนให้กับชีงงานและอิเล็กโทรด ชีงงานและอิเล็กโทรดถูกต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง กระแสไฟฟ้านี้จะถูกตัดหรือขัดจังหวะด้วยสวิตช์ปิดเปิด เมื่อสวิตช์ปิด ศักย์ไฟฟ้าถูกสร้างขึ้นระหว่างอิเล็กโทรดกับชีงงาน ซึ่งเป็นการสร้างสนามไฟฟ้าระหว่างแอโนดกับแคโทดเองจากตัวกลางไดอิเล็กตริกเป็นฉนวน จึงไม่มีกระแสไหลในตอนเริ่มต้นจากระบบความก้าวหน้าของเครื่องจักรทำให้อิเล็กโทรดและชีงงานเคลื่อนเข้าหากัน ดังนั้นจึงเกิดการสปาร์กที่จุดที่มีสนามไฟฟ้าสูงสุด การเกิดสปาร์กนี้เรียกว่า การปล่อยประจุไฟฟ้า กระบวนการนี้กระแสไฟฟ้าแปรผันเป็นความร้อนทำให้พื้นผิวรอบๆ เส้นทางที่ปล่อยประจุไฟฟ้ามืดร้อนเกิดขึ้นสูง 8000°C ถึง 12000°C ถ้ากระแสที่ไหลอยู่ถูกขัดจังหวะให้หยุดโดยการปิดสวิตช์ เส้นทางสปาร์กจะยุบพังลง การใช้สวิตช์ให้หยุดอย่างพล่งงานจะเป็นสาเหตุทำให้ความดันที่บริเวณเส้นทางที่ปล่อยประจุไฟฟ้าลดลงอย่างทันทีทันใด มีผลทำให้โลหะหลอมเหลวเกิดการแตกกระจายเป็นไอหลุดออกมาจากโลหะหลอมเหลว และของแข็งที่ความลึกแน่นอน จึงเกิดเป็นหลุมบนพื้นผิวของการกัดเซาะไฟฟ้าของวัสดุ

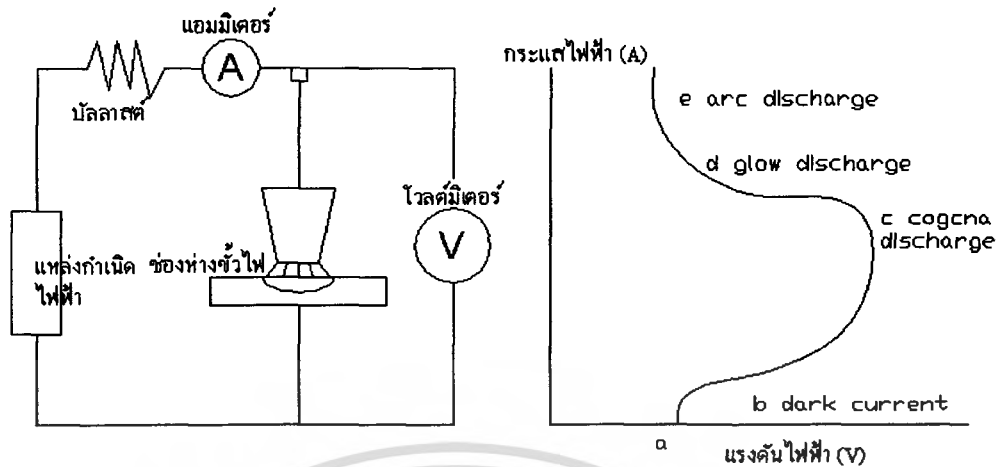


รูปที่ 2.1 กระบวนการคิสร่าง

2.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของการสปาร์ก

ปรากฏการณ์การสปาร์ก เป็นชื่อโดยรวมของการสปาร์กต่างๆ ซึ่งเกิดขึ้นในกรณีที่ได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าประเภท ของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซตั้งอยู่ จนให้ฉนวนไฟฟ้าเหล่านี้สูญเสียความเป็นฉนวน (Dielectric Breakdown) และเกิดมีกระแสไหลอย่างรุนแรง

ดังนั้นปรากฏการณ์ดังกล่าว จึงหมายถึง การฝืนบังคับทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัสดุตัวกลางที่โดยปกติ กระแสจะไหลผ่านได้ยาก และเมื่อถึงเวลาที่มีการฝืนบังคับทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัสดุตัวกลางที่โดยปกติ กระแสจะไหลผ่านได้ยาก และเมื่อถึงเวลาที่มีการฝืนบังคับนี้ถึงขีดจำกัด ก็จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขนาดใหญ่ไหลขึ้นมาอย่างกระทันหัน การนำเอาหลักการสปาร์กมาประยุกต์ใช้งาน ได้แก่ หลอดฟลูออเรสเซนต์ การเชื่อมแบบอาร์ค การขึ้นรูปด้วยวิธีการสปาร์ก เครื่อง EDM



รูปที่ 2.2 คุณสมบัติพิเศษแรงดันไฟฟ้า - กระแสไฟฟ้าของการสปาร์ก (Inonue, K., 1977)

2.1.1 สภาพที่กระแสเริ่มไหล (Dark Current)

ถ้าเพิ่มแรงดันไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า หรือ ลดช่องว่างระหว่างสปาร์กลงมาเรื่อยๆ เมื่อถึงจุดหนึ่งอากาศจะรวมตัวเป็นประจุไฟฟ้า และอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุเป็นลบจะถูกดูดจากฝั่งขั้วลบ ไปยังขั้วบวก ซึ่งในช่วงเวลาขณะนี้จะมีการแสไหลมากประมาณ 10^{-8} - 10^{-11} A สภาพเช่นนี้มีชื่อเรียกว่า สภาพกระแสเริ่มไหล

2.1.2 การสปาร์กแบบโคโรน่า (Corona Discharge)

ถ้าเพิ่มแรงดันหรือลดช่องว่างลงอีกผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าบางส่วนที่เกิดสนามไฟฟ้าแรงเป็นพิเศษจะเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวน เราเรียกสภาพนี้ว่าการสปาร์กแบบโคโรน่า ซึ่งเป็นการสปาร์กที่ขาดเสถียรภาพอย่างมาก

2.1.3 การสปาร์กแบบโกลว์ (Glow Discharge)

บริเวณที่เกิดการสูญเสียความเป็นฉนวนแล้วนั้นอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบจะไหลในส่วนนี้มากขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้กระแสไฟฟ้ามีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างรวดเร็วด้วยสภาพการสปาร์กที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงระยะเวลาที่สั้นมาก เช่นนี้ เรียกว่า การสปาร์กแบบโกลว์

2.1.4 การสปาร์กแบบอาร์ค (Arc Discharge)

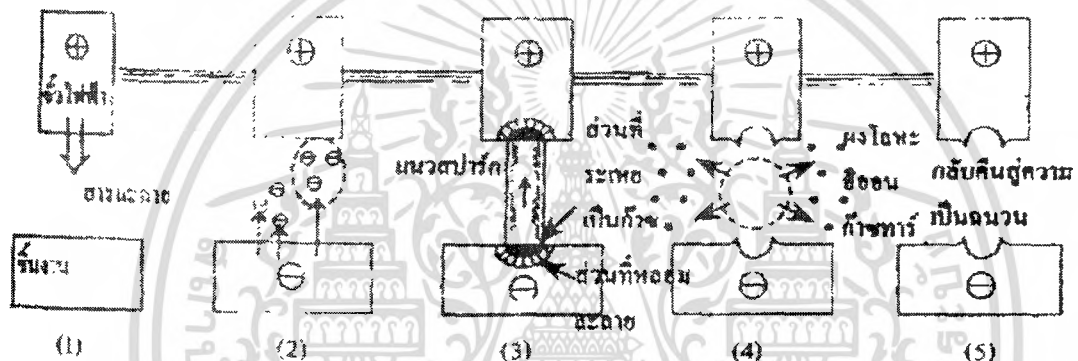
หลังจากที่ประจุไฟฟ้าที่สะสมอยู่ระหว่างขั้วถูกปลดปล่อยออกมา และการสปาร์กแบบโกลว์ได้มีขนาดกระแสไฟฟ้าค่าสูงสุดแล้ว การสปาร์กจะเข้าสู่ขั้นตอนสุดท้าย สภาพการสปาร์ก เช่นนี้จะเกิดขึ้นในลักษณะที่ควบคุมไม่ได้ ซึ่งเป็นสภาพที่ไม่เหมาะกับการขึ้นรูปด้วยวิธีการสปาร์ก ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องควบคุมพลังงานหรือระยะก่อนที่จะเข้าสู่ภาวะการสปาร์กแบบอาร์คนี้

การสปาร์กที่เป็นประกายไฟ โดยทั่วไปแล้วนั้นเป็นการสปาร์กซึ่งเกิดขึ้นทุกขั้นตอน ตั้งแต่สภาพที่กระแสเริ่มไหล จนถึงภาวะสปาร์กแบบการอาร์ค ภายในช่วงระยะเวลาที่สั้นมาก

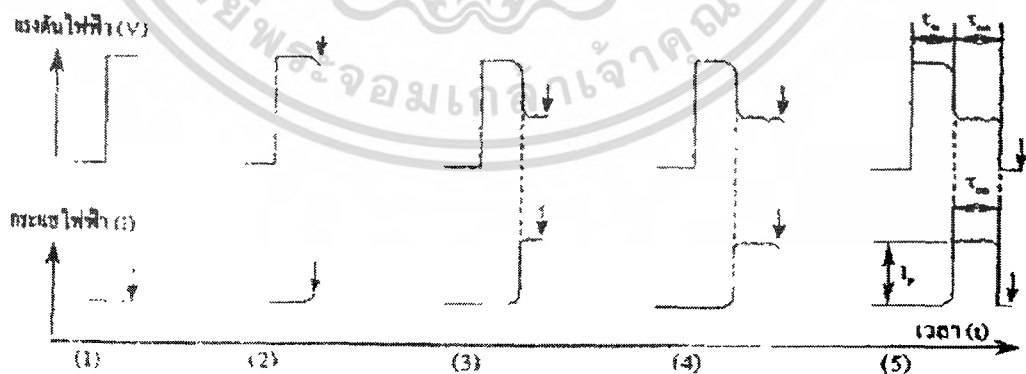
2.2 หลักการของกรรมวิธีขึ้นรูปด้วยเครื่องอีดีเอ็ม

กรรมวิธีขึ้นรูปด้วยเครื่องอีดีเอ็ม ในทางปฏิบัติจะทำงานในสารละลาย โดยใช้ทองแดง ทองเหลือง กราไฟต์ เป็นขั้วไฟฟ้าและวัตถุที่นำมาขึ้นรูปได้จะไม่เกี่ยวกับความแข็งเพียงแต่ต้องเป็นวัตถุที่ไฟฟ้าไหลผ่านผ่านได้ จะไม่ปล่อยกระแสไฟฟ้าไหลอย่างต่อเนื่องเหมือนกับการเชื่อมแต่ต้องใช้วิธีการเปิด/ปิด กระแสไฟฟ้าเป็นช่วงจังหวะ เพื่อป้องกัน ไม่ให้ความร้อนจากการสปาร์กหลอมละลายวัสดุมากเกินไปจนเสียรูปทรง เครื่องอีดีเอ็มอาศัยการใช้พลังงานระดับสูงซึ่งปลดปล่อยออกมาในช่วงสั้นมาก ดังนั้นปัญหาที่สำคัญมาก คือทำอย่างไรจะทำให้เกิดการสปาร์กที่เป็นประกายไฟอย่างมีเสถียรภาพและมีประสิทธิภาพสูง

ในการใช้งานจะใช้ระบบ NC (Numerical Control) ควบคุมให้เกิดการสปาร์กหลายแสนครั้งใน 1 วินาที สภาพของพัลส์ (Pulse) แต่ละลูกของการสปาร์กจะเป็นดังรูป



รูปที่ 2.3 สภาพของลำดับการสปาร์คในแต่ละครั้ง (Inonue, K., 1977)



รูปที่ 2.4 รูปร่างคลื่นของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในการขึ้นรูปด้วยเครื่องอีดีเอ็ม (Inonue, K., 1977)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 ใส่แรงดันไฟฟ้า

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

2.2.2 การสูญเสียความเป็นฉนวน

เมื่อขั้วระยะระหว่างขั้วใกล้กันเรื่อย ๆ จนถึงระยะหนึ่ง (ระยะทางเป็นไมโครเมตร) สารละลายจะเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวนอ่อนประจุลบจะถูกดึง ไปอีกฝั่งที่เป็นบวก คือ เริ่มมีกระแสไหล

2.2.3 สปาร์คหลอมละลาย

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

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

2.2.4 เย็นตัว

ความดันที่เกิดขึ้นนี้ จะทำให้ส่วนที่หลอมละลายของชิ้นงานหลุดกระเด็นไป ซึ่งเมื่อถูกสารละลายรอบข้าง ดูดความร้อนออกไปก็จะเริ่มออกไปก็จะเริ่มเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วกลายเป็นเศษผงชิ้นเล็กๆ ในช่วงที่เกิดการสปาร์คอยู่นั้นกระแสไฟฟ้าจะไหลอยู่ในระดับค่าหนึ่งแต่ทว่าเมื่อพลังงานที่สะสมอยู่ในระหว่างนั้นถูกปลดปล่อยออกมาแรงดันไฟฟ้าจะต่ำลงอย่างรวดเร็ว

2.2.5 กลับคืนสู่ความเป็นฉนวน

หลังจากที่การสปาร์คหนึ่งครั้งได้จบลงกระแสไฟฟ้าจะกลับกลายเป็นศูนย์ และจะรองจนกว่าสารละลายจะกลับคืนสู่ความเป็นฉนวนโดยไม่มีกระแสไฟฟ้าเข้าไป การรอในช่วงนี้จะช่วยป้องกันการเกิดสปาร์คแบบผิดปกติ เช่น การสปาร์คซ้ำหรือสปาร์คเป็นบางจุดอันเนื่องจากการสะสมหรือทับถมจับตัวกันของอิเล็กตรอนที่ตกค้างระหว่างขั้วหรือเศษผงที่เกิดจากการสปาร์ค ภายหลังจากที่กลับคืนสู่ความเป็นฉนวนแล้วก็จะทำการสปาร์คเช่นเดิมอีก โดยเริ่มต้นที่ 1 ใหม่

2.2.6 ประโยชน์ของกรรมวิธีอีดีเอ็ม

1. ความสามารถในการแปรรูปโลหะแข็งหรือ โลหะผสม ซึ่งไม่สามารถทำได้โดยวิธีธรรมดา กรรมวิธีอีดีเอ็ม จึงมีบทบาทสำคัญในการทำแม่พิมพ์ และเครื่องมือที่ทำจากโลหะแข็ง ทั้งสะเตนคาร์ไบด์ สเตลโลท
2. ความสามารถในการผลิตชิ้นรูปร่างใดๆก็ได้ เนื่องจากการกัดเนื้อโลหะอาศัยการสปาร์ก จึงไม่ต้องการ ความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงาน นอกจากอิเล็กโทรดเคลื่อนที่ลงมาในชิ้นงานเท่านั้น ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะแปรรูปโลหะรูปร่างใดๆ โดยใช้เพียงหนึ่งอิเล็กโทรด
3. พื้นผิวจากกรรมวิธีอีดีเอ็มมีลักษณะเป็นหลุมเป็นจำนวนมาก จึงช่วยให้สามารถเก็บรักษาน้ำมันหล่อลื่นได้ดี จึงช่วยลดปัญหาเกี่ยวกับการหล่อลื่นได้
4. ในระหว่างทำการแปรรูปชิ้นงานจะ ไม่มีการเปลี่ยนรูปร่าง เนื่องจาก ไม่มีแรงจากการสัมผัสของอิเล็กโทรด หรือ ไม่มีแรงทางกล ทำให้สามารถแปรรูปชิ้นงานที่บอบบางหรือเปราะได้
5. แม้กรรมวิธีอีดีเอ็มจะมีผลกระทบของความร้อน แต่เป็นผลกระทบเฉพาะที่ไม่ได้มีผลกระทบต่อวัสดุส่วนใหญ่

2.2.7 การแบ่งประเภทของกรรมวิธีอีดีเอ็ม (Categories of EDM)

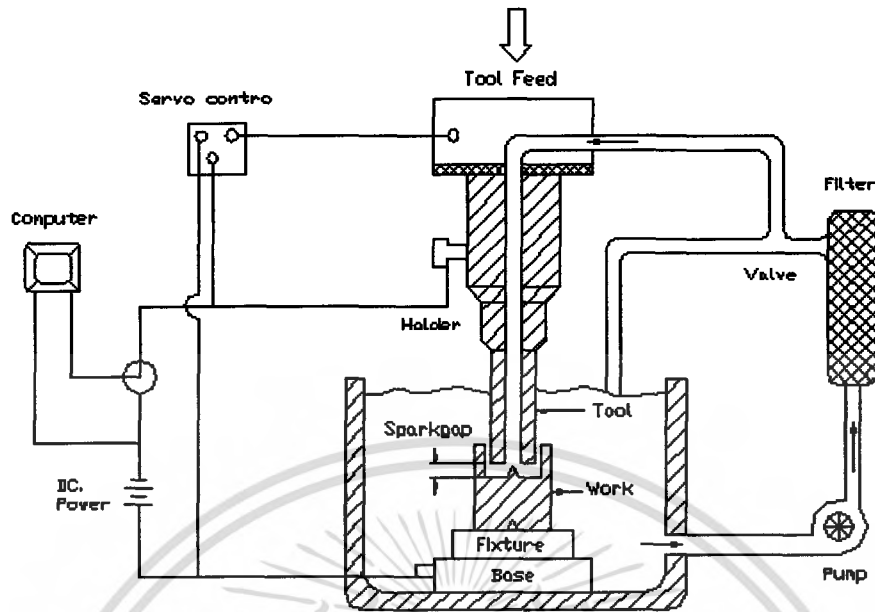
การแปรรูปโลหะโดยอาศัยการสปาร์กสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท

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

2.2.8 อุปกรณ์ของกรรมวิธีอีดีเอ็ม

กรรมวิธีอีดีเอ็มจะเกี่ยวข้องกับการใช้ความร้อนที่มีความเข้มสูง ทำให้โลหะชิ้นงานหลอมละลายหรือกลายเป็นไอเฉพาะที่ จะมีอุปกรณ์ประกอบดังนี้

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



รูปที่ 2.5 หลักการทำงานของระบบอีดีเอ็ม

1. แหล่งจ่ายไฟทำหน้าที่ผลิตพลังงานคิสซาร์จเพื่อใช้ในการแยกอนุภาค โลหะ
2. ระบบไดอิเล็กตริก ทำหน้าที่เป็นฉนวน พัดพาเศษอนุภาค โลหะและระบายความร้อนที่เกิดขึ้น
3. อิเล็กโทรด ทำหน้าที่เป็นตัวสร้างแบบให้กับชิ้นงานหรือกัดเซาะ โลหะงาน
4. ระบบเซอร์โว ทำการควบคุมการป้อนอิเล็กโทรดเพื่อรักษาระยะช่องว่างของคิสซาร์จให้คงที่ ดังนั้นกำลังงานเฉลี่ยจะลดลงโดยตัวประกอบช่วงเวลาประวิง และสัมพันธ์กับการเกิดลัดวงจร และกำลังงานเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นกับตัวประกอบหน้าที่กระแสพัลส์ กระแสเฉลี่ยจะลดลงโดยตัวประกอบหน้าที่ช่วงเวลาประวิง

2.3 อิเล็กโทรด (Electrode)

อิเล็กโทรดในกรรมวิธีอีดีเอ็มจะใช้กำหนดรูปร่างของชิ้นงานหรือรูที่ต้องการเจาะ ดังนั้นจึงต้องพิจารณา ส่วนประกอบของอิเล็กโทรดและชนิดของวัสดุที่ใช้ ปรกติแล้วค่าใช้จ่ายในการทำอิเล็กโทรดจะประมาณเท่ากับหรือมากกว่า 50% ของค่าใช้จ่ายในการแปรรูปทั้งหมด จะเห็นว่าการเลือกจำนวนอิเล็กโทรดที่ใช้งานมีความสำคัญมาก

2.3.1 คุณสมบัติของอิเล็กโทรดในกรรมวิธีอีดีเอ็ม

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ 9 อังอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 วัสดุที่ทำอิเล็กทรอนิกส์ สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ

2.3.2.1 อิเล็กทรอนิกส์โลหะ

ทองแดง (Electrolytic Copper)

ความหนาแน่น 8.9 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

จุดเดือด 1083°C

ความต้านทานไฟฟ้า 0.0167 โอห์ม มม.²/ม.

ข้อดี ทองแดงสามารถใช้งานทั้งประเภทงานกักขยับและงานกักละเอียด ให้อัตราการกัดเนื้อโลหะสูง แต่การสึกหรอต่ำ

ข้อเสีย มีน้ำหนัก การขยายตัวทางความร้อนสูง รูปทรงไม่เสถียรเมื่อมีขนาดบาง

การผลิต การสร้างอิเล็กทรอนิกส์ อาจจะใช้การขึ้นรูปโดยวิธี Stamping และ Coining ทองแดงสามารถแปรรูปได้โดยการกลึงหรือการกัด เพื่อที่หลีกเลี่ยงรอยจากมิดกึ่งหรือมิดกัด จะต้องมีกรหล่อเย็นด้วยน้ำมันหล่อเย็นชนิดพิเศษ หรือ Fat oil 50% ผสมกับ Petroleum 50% การเจียรระไนทองแดง จะใช้ใบเจียรระไนคือ

สารขัดถู : คาร์บอร์รันดัม (Carborundum)

เกรน : 46 ถึง 80 ตามผิวสำเร็จที่ต้องการ

โครงสร้าง : ความแข็ง H-K, รูพรุน 13 - 15

ความเร็วรอบ : 30 เมตร/วินาที

สิ่งจำเป็น : มีการหล่อเย็นหรือใช้น้ำมันหล่อเย็น

ทองแดงผสมทั้งสะเตน

ความหนาแน่น 15-18 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

จุดเดือด 2,500 °C

ความต้านทานไฟฟ้า 0.045-0.055 โอห์ม.มม.²/ม.

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

ข้อดี คุณภาพผิวงานดี มีความต้านทานการกัดเซาะ และมีเสถียรภาพทางความร้อน อัตราการกัดเนื้อโลหะสูง

ข้อเสีย ราคาแพง, ขนาดจำกัด, กระบวนการจะยากกว่าทองแดง

การผลิต การทำอิเล็กทรอนิกส์ใช้วิธีการธรรมดาคือ การกลึง การเจียรระไน

การกลึง

มิดกึ่ง คาร์ไบด์ เหล็กเครื่องมือ

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

มุมคายหลบ 6 – 8 องศา 8 – 10 องศา

มุมหลบ 4 – 6 องศา 4 – 6 องศา

ปกติแล้ว กราฟไฟท์จะถูกอัดมาเป็นก้อนใหญ่ในระหว่างการผลิตตามความดันที่ใช้ ความหนาแน่นสามารถเปลี่ยนแปลงได้ กราฟไฟท์ความหนาแน่นต่ำจะเป็นแอนไอโซทรอปิก ส่วนกราฟไฟท์ความหนาแน่นสูงจะเป็นไอโซทรอปิก ความหนาแน่นของกราฟไฟท์สามารถที่จะระบุลักษณะที่สำคัญของกรรมวิธีอัดเม็ด เช่น กราฟไฟท์ความหนาแน่นต่ำ (1.6 – 1.7) จะให้อัตราการกัด โลหะสูงกว่ากราฟไฟท์ความหนาแน่นสูง (1.8 – 1.85)

ส่วนอัตราการสึกหรอที่มุม กราฟไฟท์ความหนาแน่นสูงจะให้ผลลัพธ์ดีกว่าขนาดเกรนของกราฟไฟท์จะมีผลโดยตรงกับผิวของกราฟไฟท์และบนผิวที่กัดเซาะด้วย กราฟไฟท์ที่มีเกรนละเอียดจะมีผิวเรียบกว่ากราฟไฟท์ที่มีเกรนหยาบ และผิวที่ถูกกัดเซาะก็จะมีคุณภาพดีกว่าด้วย

ข้อดี

- ไม่มีผลกระทบต่อที่เกิดจากการเปลี่ยนอุณหภูมิโดยฉับพลัน และคงรักษาคุณสมบัติทางกลไว้ได้
- ไม่มีการบดงหรือการเบี่ยงเบน
- สามารถแปรรูปได้ง่ายด้วยวิธีธรรมดา
- ราคาถูกทำให้ประหยัด

ข้อเสีย

- วัสดุเป็นสารขัดถู จึงต้องระมัดระวัง ในการป้องกันการสึกของเครื่องจักรจากผงกราฟไฟท์
- กราฟไฟท์มักจะเปราะ ดังนั้นในการผลิตต้องระมัดระวังเป็นพิเศษ โดยเฉพาะที่บริเวณมุมต่างๆ
- ไม่เหมาะกับการหล่อและการขึ้นรูป
- ฝุ่นละอองของกราฟไฟท์ที่เกิดขึ้นระหว่างการขึ้นรูป ต้องมีระบบกำจัดที่เหมาะสมกับโรงงานและเป็นสิ่งจำเป็น

ข้อสังเกต

- กราฟไฟท์ไม่สามารถใช้กับเครื่องกำเนิดพัลส์แบบแลกเซชัน (Relaxation) ได้
- การแปรรูปทั้งสะเตนคาร์ไบด์จะทำได้ยาก และมีความเสี่ยงต่อความผิดปกติของคิสซาร์สูงกว่าการใช้โลหะเป็นอิเล็กโทรด
- กราฟไฟท์ความหนาแน่นสูงจะใช้เมื่อการสึกหรอและความแข็งแรงที่มุมเป็นวิกฤต ในขณะที่กราฟไฟท์อื่นๆ ไซในกรณีการสึกหรอมีความสำคัญรองลงไป และภายในของแบบ ไม่มีรายละเอียดมากนัก
- กราฟไฟท์ที่มีเกรนละเอียดจะใช้สำหรับการแปรรูปที่มีรายละเอียด เช่น ขอบ มุมต่างๆ

การผลิต ในการทำอิเล็กโทรดกราฟไฟท์จะใช้วิธีการแปรรูปแบบธรรมดา คือ การกลึง การเจียรไน และการกัด

การกลึง การกลึงกราฟไฟท์จะใช้มีดกลึงทำด้วยเหล็กเครื่องมือ ทั้งสะเตนคาร์ไบด์ หรือถ้าผลิตจำนวนมากอาจใช้มีดกลึงเพชร มีรายละเอียดดังนี้

	เหล็กเครื่องมือ	คาร์ไบด์	เพชร
มุมเผื่อ (Clearance Angle)	8 – 10 องศา	8 – 10 องศา	10 – 20 องศา
มุมคาย (Rake Angle)	16 – 20 องศา	16 – 20 องศา	10 องศา
ความเร็วตัด	80 เมตร/นาที	150 เมตร/นาที	250 – 400 เมตร/นาที

กราฟไฟท์เป็นสารขัด ดังนั้นมีดกลึงเหล็กเครื่องมือต้องลับบ่อยๆ

การเจียรไน กราฟท์สามารถทำการเจียรไนได้โดยใช้ล้อหินเจียรไนดังนี้

สารขัดถู	:	คาบอรั้นคัมเขี้ยว
การยึดเหนี่ยว	:	สารเคลือบ
เกรน	:	60 สำหรับงานละเอียด 36 สำหรับงานหยาบ
ความแข็ง	:	J
โครงสร้าง	:	5

การกัด เป็นข้อได้เปรียบของกราฟท์เมื่อผลิตอิเล็กทรอนิกส์โทรคมนาคมแบบจำลองเช่น ใช้เครื่องกัดตัดลอก อาจควบคุมด้วยมือหรือควบคุมอัตโนมัติ ความเร็วกัดสูง(100 – 200 เมตร/นาทีก) และอัตราป้อน (100 – 200 มม./นาทีก) ซึ่งสามารถทำอิเล็กทรอนิกส์กราฟท์ได้เร็วกว่าทองแดงหรือทองแดงเคลือบถึง 5- 10 เท่า

2.3.2.3 โลหะและอโลหะผสมกัน

ทองแดงผสมกราฟท์

ใช้สำหรับจุดประสงค์พิเศษ ในวิธีสูญญากาศ จะทองแดงเข้าไปในรูพรุนของกราฟท์ ทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

ความหนาแน่น : 2.4 – 3.2 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

ความต้านทานไฟฟ้า : 3 – 5 โอห์ม.มม²./ม.

ความแข็งแรงแตกหัก : 700 – 900 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร

ข้อดี ทองแดงผสมกราฟท์มีข้อดีเหมือนกับกราฟท์ นอกจากนี้ยังมี

- การแปรรูปด้วยวิธีธรรมดาจะง่ายกว่า เพราะมีความเปราะน้อยลง และที่มุมมีโอกาสแตกน้อยลง ดังนั้นจึงแนะนำสำหรับอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กที่มีรายละเอียด

ข้อเสีย ทองแดงผสมกราฟท์มีข้อเสียเหมือนกราฟท์ และที่เพิ่มเติมคือราคาแพงกว่า

ข้อสังเกต การเปรียบเทียบกราฟท์กับทองแดงผสมกราฟท์

- โอกาสที่เกิดความผิดปกติของดิซซาร์จจะลดลง
- สามารถแปรรูปทั้งสะเตนคาร์ไบด์ได้
- สามารถใช้กับ Microfin Relaxation ได้
- อัตราการสึกหรอต่ำกว่า
- ให้คุณภาพผิวงานดีกว่า และนำไปใช้กับขั้นตอนการกัดละเอียด
- ให้อัตราการกัดโลหะสูงกว่าในทั้งสะเตนคาร์ไบด์ (10 – 15%) เมื่อแปรรูปเหล็กอัตราการกัดจะต่ำกว่าเมื่อใช้อิเล็กทรอนิกส์โทรคมนาคมเป็นขั้วลบ และจะเท่ากันเมื่ออิเล็กทรอนิกส์โทรคมนาคมเป็นขั้วบวก

2.4 ระบบไดอิเล็กตริก (Dielectric System)

ระบบไดอิเล็กตริกประกอบด้วย สารไดอิเล็กตริก ท่อส่ง ป้อน เครื่องกรอง และถังบรรจุสารไดอิเล็กตริก สารไดอิเล็กตริกมีหลายชนิด แต่ที่นิยมใช้กันมากคือน้ำมันไฮโดรคาร์บอน (น้ำหนัก 30 – 50) น้ำมันซิลิกอน และน้ำกำจัดไอออน น้ำกำจัดไอออนจะใช้ไม่มาก แม้ว่าจะมีอัตราการกัดเนื้อโลหะสูง และมีความสามารถหล่อเย็น แต่การสึกหรอของอิเล็กโทรดในการเจาะรู เมื่อทำงานเสร็จต้องตัดปลายลวดออกแล้วจึงเริ่มเจาะรูใหม่ได้ การใช้ น้ำกำจัดไอออนใช้มากในกรรมวิธีของ Wire-EDM

2.4.1 หน้าที่ของสารไดอิเล็กตริก

สารไดอิเล็กตริกจะมีหน้าที่ดังนี้

1. ฉนวน (Insulation) จุดประสงค์หลักของสารไดอิเล็กตริกคือทำหน้าที่เป็นฉนวนระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงาน การดีสชาร์จไม่ควรจะเกิดขึ้นจนกว่าระยะช่องว่างจะน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้เพื่อให้ได้ความละเอียดถูกต้องมากที่สุด
2. ไอออน (Ionisation) สารไดอิเล็กตริกควรที่จะสร้างเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการเกิดดีสชาร์จเร็วที่สุด และเมื่อสวิตช์ออฟ (off) สารไดอิเล็กตริกจำเป็นต้องกำจัด ไอออนในเส้นทางดีสชาร์จเพื่อให้เกิดการดีสชาร์จใหม่ในตำแหน่งอื่นต่อไป
3. การหล่อเย็น (Cooling) อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในช่องว่างประมาณ $10,000^{\circ}\text{C}$ ภายในเวลาเศษส่วนล้านของวินาที ความร้อนที่เกิดขึ้นต้องระบายออก ดังนั้นสารไดอิเล็กตริกจึงทำหน้าที่ระบายความร้อนจากชิ้นงานและอิเล็กโทรด ความร้อนที่สูงเกินไปจะทำให้อิเล็กโทรดสึกหรอมากในเวลาเดียวกันไอของโลหะก็จะกลั่นตัวในสารไดอิเล็กตริกด้วย
4. พัดพาอนุภาคโลหะอนุภาคโลหะ จากกระบวนการอีดีเอ็มในช่องว่างดีสชาร์จจะถูกสารไดอิเล็กตริกพัดพาออกมา จึงช่วยกระบวนการให้ดำเนินไปได้ตามปกติมีประสิทธิภาพ ถ้าการไหลพัดพาอนุภาคโลหะไม่ดีจะทำให้เกิดการหยุดนิ่งของสารไดอิเล็กตริก ทำให้มีอนุภาคโลหะตกค้างในช่องว่างและอาจเกิดการลัดวงจรได้ เนื่องจากสารไดอิเล็กตริกที่ใช้งานแล้วต้องผ่านการทำความสะอาดโดยเครื่องกรอง กรองเอาอนุภาคโลหะออกจากสารไดอิเล็กตริกแล้วจึงนำกลับมาใช้งานใหม่ต่อไป

2.4.2 ประเภทของสารไดอิเล็กตริก

สารไดอิเล็กตริกแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

2.4.2.1 น้ำกำจัดไอออน

สารละลายน้ำหรือน้ำในสภาวะปกติจะมีไอออนผสมอยู่มาก จึงมีค่าความต้านทานต่ำ ดังนั้นเวลาที่จะแปรรูปโลหะจึงต้องผ่านกระบวนการทำให้มีความต้านทานสูงขึ้น เนื่องจากน้ำมีค่าความต้านทานต่ำกว่าน้ำมัน จึงทำให้กระแสไฟฟ้าโดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้น ความเร็วในการกัดโลหะจึงสูงกว่าน้ำมันประมาณ 2 – 10 เท่า แต่คุณภาพผิวงานจะหยาบปกติแล้วน้ำจะใช้เป็นสารไดอิเล็กตริกในเครื่องอีดีเอ็มประเภทตัดด้วยเส้นลวด

2.4.2.2 ไฮโดรคาร์บอน ที่นิยมใช้กันมีหลายชนิดคือ

1. น้ำมัน (Oils) ที่ใช้กันมากได้แก่น้ำมันแร่ (Mineral) ซึ่งให้ผลลัพท์ดี น้ำมันแร่จะไม่มี aromatics หรือสารเพิ่มเติมอื่นๆ ความหนืดของน้ำมันเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ เช่น น้ำมันที่มีความหนืดสูงจะไม่เหมาะสมกับงาน ขั้นตอนการกัดผิวสำเร็จเนื่องจากขั้นตอนนี้ต้องตั้งช่องว่างแคบลง จึงทำให้น้ำมันที่มีความหนืดสูงไหลเวียนได้ยากขึ้น ในช่องว่างระหว่างอเล็กโทรดกับชิ้นงาน สำหรับขั้นตอนการกัดหยาบจะใช้น้ำมันเตาเป็นสารโคอิเล็คทริก จูควาไฟฟ้าของสารโคอิเล็คทริกก็มีความสำคัญ เพราะถ้าจุดเดือดต่ำ แนวน้ำมันที่จะกลายเป็นไอจะเกิดขึ้นได้ง่าย ทำให้เกิดแก๊สปริมาณมาก จึงต้องลดความเร็วการแปรรูปลง

2. น้ำมันก๊าด (Kerosene) มีความหนืดต่ำ ทำให้เหมาะกับการขั้นตอนการกัดละเอียดและละเอียดมาก แนะนำให้ใช้กับการแปรรูปโลหะทั้งสะเตนคาร์ไบด์ เมื่อตั้งช่วงพัลส์และเมื่อต้องการกำจัดกลิ่นที่เกิดจากสารที่แตกตัว นอกจากน้ำมันก๊าดแล้วยังมีน้ำมันอื่นๆอีกเช่น น้ำมันจักร (Spindle oil) น้ำมันเครื่องกล (Machine oil)

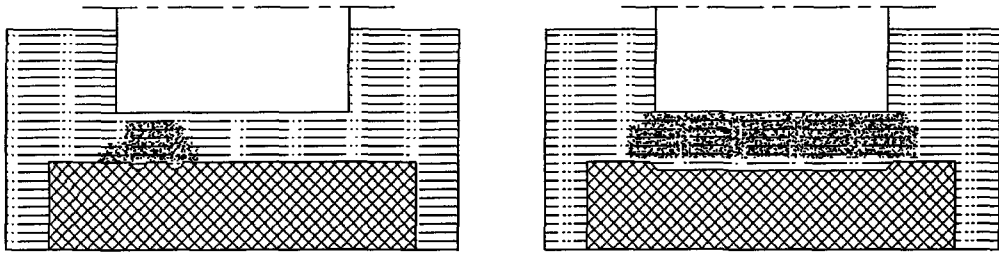
น้ำมันที่มีจูควาไฟฟ้าสูงและจุดติดไฟสูงนิยมนำมาใช้งาน น้ำมันซิลิคอนจึงเป็นประโยชน์ในแง่คิณีและการขนส่งก็ปลอดภัยด้วย สารโคอิเล็คทริกต้องไม่เป็นอันตรายต่อผิวหนังและเสื้อผ้า แก๊สที่เกิดจากการแตกตัวของความร้อนต้องไม่เป็นอันตราย โดยทั่วไปแก๊สจะค่อยๆ ปรากฏขึ้นโดยคิณีสารจในของเหลวไฮโดรคาร์บอนด์ ส่วนใหญ่ได้แก่ อาเซทิลีน(C_2H_2) แอททิลีน(C_2H_4) มีเทน(CH_4) และ ไฮโดรเจน จึงต้องมีเครื่องมือตรวจแก๊สเพื่อความปลอดภัย

2.4.3 คุณสมบัติของสารโคอิเล็คทริก

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

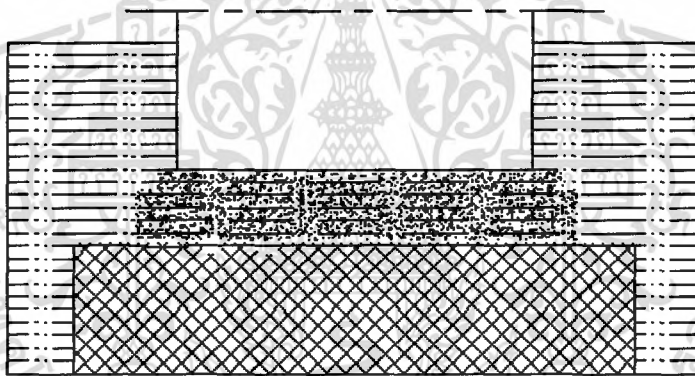
2.5 ระบบการไหลของโคอิเล็คทริก (Flushing)

การไหลที่ถูกต้องของสารโคอิเล็คทริกระหว่างอเล็กโทรดและชิ้นงาน จะทำให้การทำงานของระบบอิตีเอ็มมีประสิทธิภาพ ถ้าหากกรรมวิธีอิตีเอ็มไม่ใช้ระบบการไหลของสารโคอิเล็คทริกจะมีผลกระทบดังนี้ ในตอนเริ่มต้นแรก สารโคอิเล็คทริกยังสะสมอยู่ ไม่มีอนุภาคโลหะและคาร์บอนที่เกิดจากการแตกตัวของโคอิเล็คทริก ทำให้ความคงทนต่อการเป็นฉนวนสูงกว่าโคอิเล็คทริกที่มีอนุภาคโลหะ ทำให้มีการประวิงก่อนที่ความเป็นฉนวนจะสิ้นสุดลง และเริ่มเกิดคิณีสารจ อนุภาคโลหะที่เกิดจากคิณีสารจในตอนแรกจะให้ความคงทนต่อการเป็นฉนวนของ โคอิเล็คทริกครั้งต่อมาลดลง และสามารถทำให้เกิดคิณีสารจง่ายขึ้น



รูปที่ 2.6 การสะสมของอนุภาคโลหะในช่องว่างเมื่อไม่ใช้ระบบการไหลของไดอิเล็กตริก

ถ้าหากความหนาแน่นของอนุภาคโลหะในช่องว่างมีมากขึ้น ก็จะทำให้เกิดการสะสมของอนุภาคโลหะก่อรูปเป็นสะพานตัวนำไฟฟ้า ทำให้เกิดการคิซาร์จที่ผิดปกติไปหรือเกิดการอาร์คขึ้น ทำให้ผิวของชิ้นงานและอิเล็กโทรดถูกทำลาย ด้วยเหตุนี้เองจึงต้องขจัดอนุภาคโลหะออกไปจากช่องว่างโดยระบบการไหลของไดอิเล็กตริกเข้าไปในช่องว่าง



รูปที่ 2.7 อนุภาคโลหะก่อตัวเป็นสะพานตัวนำไฟฟ้า

2.5.1 ระบบการไหลของไดอิเล็กตริกในกรรมวิธีอีทีเอ็ม

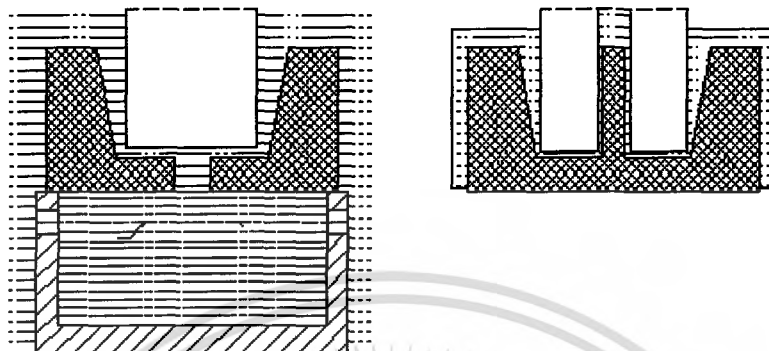
พิจารณาแบ่งออกได้ดังนี้

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

สารกึ่งตัวนำชนิดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

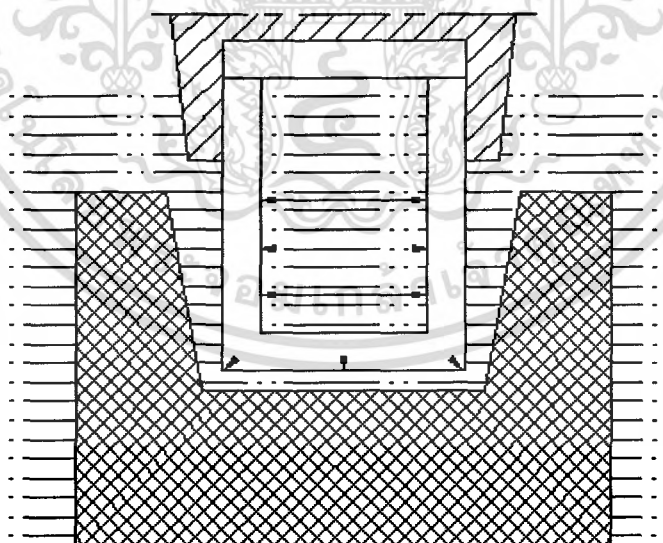
2.5.1.1 การไหลแบบฉีด

การไหลแบบนี้ ไดโอดเล็กทรอนิกส์จะถูกฉีดเข้าไปในบริเวณช่องว่างของชิ้นงานและอิลีกโทรด



รูปที่ 2.8 การไหลของไดโอดเล็กทรอนิกส์แบบฉีด

การไหลของไดโอดเล็กทรอนิกส์แบบฉีดจะใช้กับชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นรีเวียวหรือใช้กับอิลีกโทรดที่มีลักษณะแนวโค้งคองที่ สำหรับลักษณะของรีเวียวที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากการคิสรารัจทางด้านข้างของอิลีกโทรด ระบบการไหลที่ดีจะทำให้สามารถเจาะรูเล็กๆ ได้ โดยใช้อิลีกโทรดกราไฟท์ตั้งความดันของไดโอดเล็กทรอนิกส์ให้สูงขึ้นและไหลเข้าไปในอิลีกโทรดกราไฟท์ รูพรุนของกราไฟท์จะทำให้ไดโอดเล็กทรอนิกส์ไหลผ่านออกมายังบริเวณช่องว่างได้



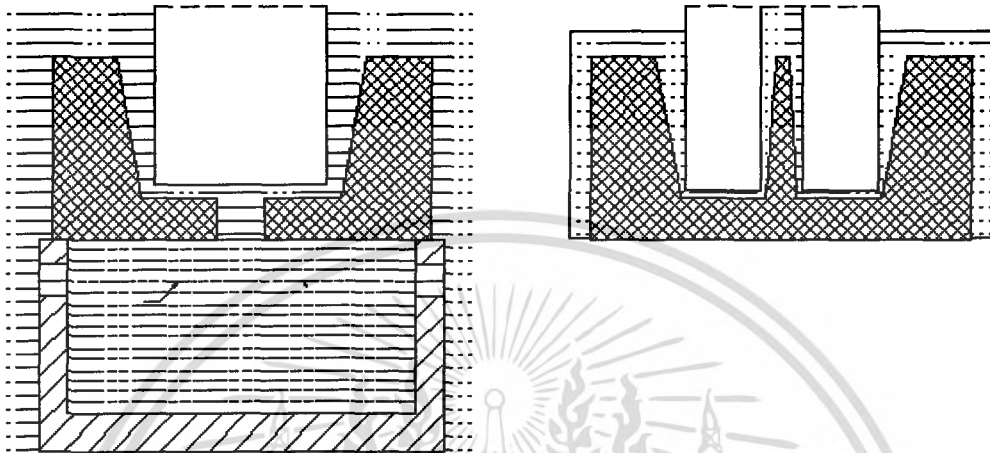
รูปที่ 2.9 ไดโอดเล็กทรอนิกส์ไหลผ่านรูพรุนกราไฟท์ออกมาที่บริเวณช่องว่าง

83175

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1.2 การไหลแบบคูด

การไหลแบบนี้ไดอิเล็กทริกจะถูกคูดออกผ่านรูของชิ้นงาน หรือรูของอิเล็กโทรด เมื่อเปรียบเทียบกับ การไหลแบบฉีดจะเห็นว่าแบบคูดหลีกเลี่ยงผลกระทบของความเร็วจากการเกิดคิซาร์จทางด้านข้างของอิเล็กโทรด รูที่เจาะจึงเป็นทรงกระบอกกลม ความดันของการคูดสูญญากาศต้องไม่นานกว่า 0.8-0.9 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร

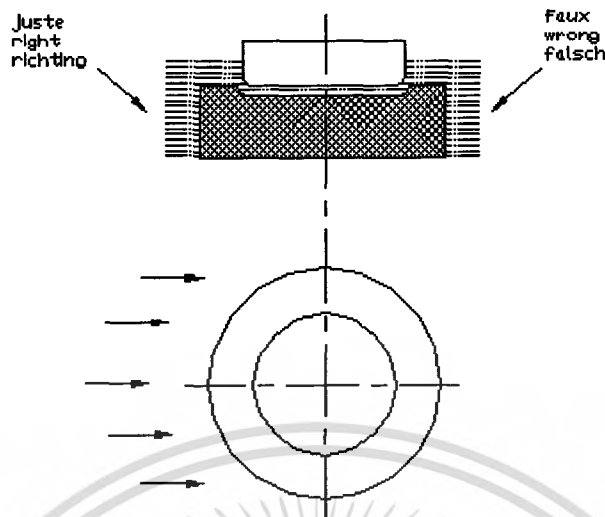


รูปที่ 2.10 การไหลของไดอิเล็กทริกแบบคูด

การใช้งานของการไหลแบบคูดจะสามารถใช้ลักษณะเดียวกับการไหลแบบฉีด แต่การไหลแบบคูดนิยมให้ไดอิเล็กทริกไหลผ่านอิเล็กโทรดมากกว่าที่จะผ่านชิ้นงาน

2.5.1.3 การไหลด้านข้าง

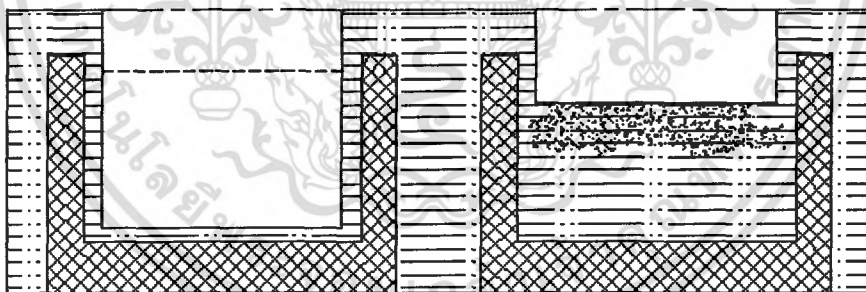
วิธีนี้จะใช้เมื่อไม่สามารถเจาะรูของอิเล็กโทรดหรือชิ้นงานได้ เช่นกรณีของแม่พิมพ์บีบเหรียญ ร่องลึกที่แคบของแบบหล่อพลาสติก จึงต้องให้การไหลของไดอิเล็กทริกกระทำทางด้านข้างโดยการใช้หัวฉีด ซึ่งต้องระมัดระวังในการปรับให้พื้นผิวของการทำงานของอิเล็กโทรดมีการไหลที่เท่าๆกัน เทคนิคนี้จะใช้ร่วมกับการกระเพื่อมของอิเล็กโทรด เพื่อช่วยให้การไหลดีขึ้น เมื่อทำการแปรรูปพื้นผิวหน้าเรียบ ทิศทางการไหลของไดอิเล็กทริกจะต้องสอดคล้องกับมุมฉีดไดอิเล็กทริกเข้า สำหรับแม่พิมพ์บีบเหรียญเมื่อรูปแบบตามยาวไม่เรียบจะต้องใช้หัวฉีดแบบพิเศษมาใช้ และเมื่อทิศทางการไหลของ ไดอิเล็กทริกไม่ขนานกับด้านข้างของอิเล็กโทรดจะทำให้การไหลปั่นป่วนขึ้น ดังนั้นจะมีไดอิเล็กทริกจำนวนน้อยเข้าไปภายในช่องว่างเท่านั้นจึงทำให้ระบบการไหลไม่ดี แต่ถ้าการไหลของไดอิเล็กทริกมีทิศทางเข้าไปในช่องว่างโดยตรง จะทำให้ปริมาณของไดอิเล็กทริกเข้าไปจำนวนมาก ทำให้การไหลมีประสิทธิภาพดีขึ้น ระบบการไหลทางด้านข้างจะไม่ใช้พร้อมกันทั้งสองด้านของอิเล็กโทรด เพราะจะทำให้อนุภาคโลหะที่บริเวณส่วนล่างของชิ้นงานไม่สามารถจะถูกขับออกมาจากช่องว่างได้



รูปที่ 2.11 การไหลของไดอิเล็กตริกทางด้านข้าง

2.5.1.4 การไหลที่ใช้การขึ้น-ลงของอิเล็กโทรด

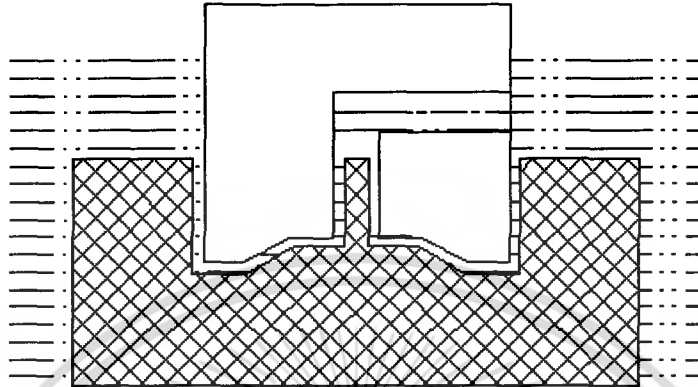
การไหลของไดอิเล็กตริกแบบนี้จะอาศัยการยกขึ้น-ลงของอิเล็กโทรด เมื่ออิเล็กโทรดถูกยกขึ้นจะทำให้ช่องว่างกว้างขึ้น ไดอิเล็กตริกที่สะอาดจะถูกดูดเข้าไปผสมกับอนุภาคโลหะ และเมื่ออิเล็กโทรดเคลื่อนที่ลง อนุภาคโลหะก็จะถูกขับออกไป วิธีการนี้จะใช้กับชิ้นงานที่มีความลึก และในระบบการไหลต้องไม่มีความดัน



รูปที่ 2.12 การไหลของไดอิเล็กตริกโดยอาศัยการขึ้น-ลงของอิเล็กโทรด

2.5.1.5 การไหลแบบฉีดพร้อมกับการยกอิเล็กโทรดขึ้น

เมื่อทำการแปรรูปโลหะโดยใช้อิเล็กโทรดชนิดโลหะจะเห็นความผิดปกติของอิเล็กโทรดที่ใช้ในระบบการไหลแบบฉีด มีการสึกหรอมาก และเพิ่มขึ้นตามความดันในบริเวณที่ฉีด

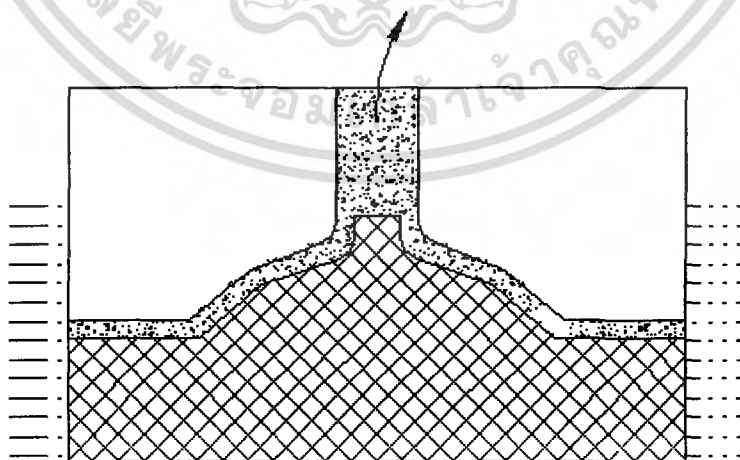


รูปที่ 2.13 การไหลแบบฉีดพร้อมกับการเลื่อนอิเล็กโทรดขึ้น

การที่จะป้องกันการสึกหรอที่เกิดจากความดันจะใช้วิธีการฉีด ไคโอเล็กตริกเข้าไปในช่องว่าง ในขณะที่ยกขึ้น อิเล็กโทรดก็เคลื่อนที่ยกขึ้นด้วย

2.5.2 ปัญหาแก๊ส (Gas Problem)

ในระบบการไหลแบบฉีดระหว่างการแปรรูปจะมีการสะสมของแก๊ส ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการระเบิดและจะทำให้ชิ้นงานเลื่อนได้ จึงต้องระมัดระวังไม่ให้เกิดขึ้น ที่สำคัญคือต้องหลีกเลี่ยงแนวโน้มที่จะเป็นสาเหตุของการระเบิด เช่น แก๊ส อากาศ ดังนั้นก่อนจะเริ่มทำการแปรรูป ต้องมั่นใจว่าภายในอุปกรณ์ฉีดมีไคโอเล็กตริกเต็ม และภายในถังบรรจุมีไคโอเล็กตริกตามที่



รูปที่ 2.14 การเจาะรูอิเล็กโทรดเพื่อระบายแก๊สที่เกิดขึ้น

กำหนด เพื่อป้องกันบีมไม่ให้ดูดเอาอากาศเข้าไป เพื่อที่จะลดปริมาณการสะสมของแก๊สในอุปกรณ์ ต้องพยายามให้ทางดูดของอุปกรณ์อยู่ในจุดที่สูงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เมื่อทำการแปรรูปด้วยอิเล็กทรอนิกส์แบบเว้าเข้า จะทำให้มีการสะสมของแก๊สภายในส่วนที่เว้า นั้น จึงต้องทำการเจาะรูอิเล็กทรอนิกส์เพื่อระบายแก๊สออกไป

2.6 ระบบเซอร์โว (Servo System)

ระบบเซอร์โวคือระบบควบคุมบังคับกลไกการป้อนอิเล็กทรอนิกส์ โดยอาศัยสัญญาณความแตกต่างของโวลต์ เทจจากช่องว่างคิซาร์จกับโวลต์เทจอ้างอิงเป็นตัวเปรียบเทียบ เพื่อทำการควบคุมกลไกการป้อนอิเล็กทรอนิกส์ให้เหมาะสมกับอัตราการกัดเนื้อโลหะงาน

เนื่องจากช่องว่างจะมีเศษอนุภาคโลหะจากการคิซาร์จ แก๊สและทาร์ที่เกิดจากการแตกตัวของไดอิเล็กตริก เนื่องจากความร้อน จะทำให้การเกิดคิซาร์จครั้งต่อไปขาดเสถียรภาพและอาจทำให้เกิดลัดวงจร การสัมผัสโดยตรงระหว่างอิเล็กทรอนิกส์กับชิ้นงานจะทำให้เกิดการลัดวงจรด้วย ทำให้การคิซาร์จขาดหายไป ประสิทธิภาพการกัดจะช้าลง เมื่อช่องว่างมีความห่างพอเหมาะ ปริมาณการกัดเนื้อโลหะจะคงที่ แต่เมื่อช่องว่างแคบลงพลังงานคิซาร์จที่ช่องว่างก็จะลดลง ทำให้ประสิทธิภาพการกัดเนื้อโลหะต่ำลง

เพื่อที่จะรักษาการกัดเนื้อโลหะให้เหมาะสม จะต้องทำการควบคุมกลไกการป้อนอิเล็กทรอนิกส์ให้มีระยะช่องว่างคงที่ ในขณะที่ขั้วกันก็ป้องกันการสัมผัสระหว่างอิเล็กทรอนิกส์กับชิ้นงาน ขณะที่อิเล็กทรอนิกส์และชิ้นงานจะสึกไปด้วย เนื่องจากช่องว่างนี้จะแคบมากจึงไม่สามารถรักษาให้คงที่ได้ตามสัดส่วนของการสึก ดังนั้นการป้อนอิเล็กทรอนิกส์จะใช้ระบบควบคุมแบบ Adaptive Control

2.6.1 ระบบควบคุมการป้อนอิเล็กทรอนิกส์ในกรรมวิธีอีเอ็ม แบ่งออกเป็น

1. ควบคุมการป้อนอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้โซลินอยด์
2. ควบคุมการป้อนอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้เซอร์โวไฟฟ้า
3. ควบคุมการป้อนอิเล็กทรอนิกส์โดยการใช้เซอร์โวไฮดรอลิก

2.7 ความสำคัญของความหยาบผิว

ความสำคัญของความหยาบผิวมีผลสำคัญต่อคุณภาพสูงสุดและความน่าเชื่อถือสูงสุดของการผลิตภัณฑ์ เมื่อนำไปใช้งานผลของความเรียบของผิวงานสำเร็จมีส่วนสำคัญโดยค่าความเรียบผิว (Surface Roughness) จะมีผลหรือสามารถวิเคราะห์หาผลของกรรมวิธีการผลิต เช่น การควบคุมสภาพแวดล้อม ผลของประสิทธิภาพการทำงาน มองผ่านชิ้นงานที่เข้าสู่หรือผ่านการผลิตเสร็จสิ้น ความเหมาะสมของขบวนการผลิต ที่จะทำให้สภาพแวดล้อมการผลิตเหมาะสมต่องาน ขนาดจริงแท้จริงของชิ้นงาน หลังจากชิ้นงานผ่านการใช้งานไประยะเวลาหนึ่งค่าความเรียบผิวที่เหมาะสมและค่าคุณสมบัติของผิว (Surface Parameter) และวิธีการผลิตที่ถูกต้อง จะทำให้ต้นทุนการผลิตลดลง หรือไม่สูงเกินไป จากการออกแบบขั้นตอนการผลิตที่เหมาะสมถูกต้อง เนื่องจาก การมีความเข้าใจอย่างถูกต้องต่อรูปทรงแบบต่างๆ ของคุณสมบัติของผิวและวิธีการวัดผิวและวิเคราะห์จะทำให้ผู้ออกแบบสามารถเลือกกำหนดค่าและวิธีการวัดความหยาบที่เหมาะสม ซึ่งไม่เพียงแต่จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ แต่จะทำให้เกิดขบวนการผลิตที่เหมาะสมและต้นทุนการผลิตที่ถูกต้อง

2.7.1 ความหยาบผิว

ความหยาบผิว (Surface Roughness) คือ ความหยาบผิวที่ได้จากชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแปรรูป เช่น งานกลึง งานกัด งานไส เป็นต้น ผ่านการตรวจจะสังเกตได้ว่าชิ้นงานขรุขระเป็นคลื่น ขึ้นที่ลอนคลื่นสูงแสดงว่าชิ้นงานดังกล่าวมีผิวหยาบ ส่วนที่ลอนคลื่นต่ำแสดงว่าผิวชิ้นงานนั้นเรียบ ความหยาบผิวชิ้นงานมีผลต่อการใช้งานอย่างมาก เมื่อการผลิตมีคุณภาพผิวชิ้นงาน ไม่ตรงกับสภาพที่แท้จริงขณะทำงาน จะทำให้อายุการใช้งานของชิ้นงานสั้นลงหรือชิ้นงานบางชิ้นที่ผลิตขึ้นไม่มีผิวที่ละเอียด แต่สภาพการใช้งานจริงไม่จำเป็น เพราะจะทำให้เสียเวลาในการทำงาน โดยเปล่าประโยชน์

หากนำเอาผิวของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแปรรูป โดยชิ้นงานได้รับการแปรรูปจาก งานกลึง งานกัด งานไส งานเจียรระโน งานเลเซอร์ (Laser) และงานอีดีเอ็ม เป็นต้น ผ่านการตรวจจากแว่นขยายจะพบว่าผิวของชิ้นงานจะขรุขระเป็นลอนคลื่นชิ้นงานใดที่มีลอนคลื่นสูงแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานดังกล่าวมีผิวหยาบ ส่วนที่มีลอนคลื่นต่ำแสดงว่าผิวชิ้นงานนั้นเรียบ จะทำให้อายุการใช้งานของชิ้นงานนั้นสั้นลง หรือชิ้นงานบางชิ้นที่ผลิตขึ้นไม่มีผิวที่ละเอียด แต่สภาพการใช้งานจริงไม่จำเป็น เพราะจะทำให้เสียเวลาในการทำงาน โดยเปล่าประโยชน์

2.7.2 การเกิดสภาพของผิว

ภายใต้กระบวนการขึ้นรูปด้วยเครื่องจักร เช่น กลึง กัด ไส บริเวณผิวงานสำเร็จที่มองเห็นและสัมผัสได้นั้นจะเป็นแหล่งที่รวมและสามารถบ่งบอกผลจากการแหล่งกำเนิดหลายอย่างปะปนกันอยู่ โดยจะทราบได้ต่อเมื่อได้ทำการตรวจวัดและวิเคราะห์ผิว (Surface Analysis)

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

2.7.3 ลักษณะเบี่ยงเบนของผิวชิ้นงาน

การเบี่ยงเบนของผิวชิ้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่ม คือ บกพร่องทางด้านความราบ การเบี่ยงเบนของชิ้นงานที่เกิดจากลอนคลื่น การเบี่ยงเบนจากร่องโค้ง การเบี่ยงเบนผิวชิ้นงานจากแอ่งหรือรอยแตกเป็นจุดหยาบ ตารางที่ แสดงลักษณะการเบี่ยงเบนของผิวชิ้นงานซึ่งบอกสาเหตุต่างๆที่ทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของผิวงาน

2.7.3.1 บกพร่องทางด้านความราบ ความกลม

บกพร่องทางด้านความราบ ความกลม (Form Error) อีกส่วนประกอบหนึ่งของความหยาบผิวตัวอย่างเช่น จากการที่รางขับเคลื่อน หรือรางที่รองรับชุดเคลื่อนที่ของป้อมมีคเคการสึกหรอ ค่าความตรง (Straightness) ที่ได้มักจะเป็นคลื่นที่มีช่วงความยาวมากกว่าความยาวของรางเคลื่อนที่ โดยจะปรากฏรวมอยู่ในความหยาบ

2.7.3.2 การเบี่ยงเบนที่เกิดจากลอนคลื่น

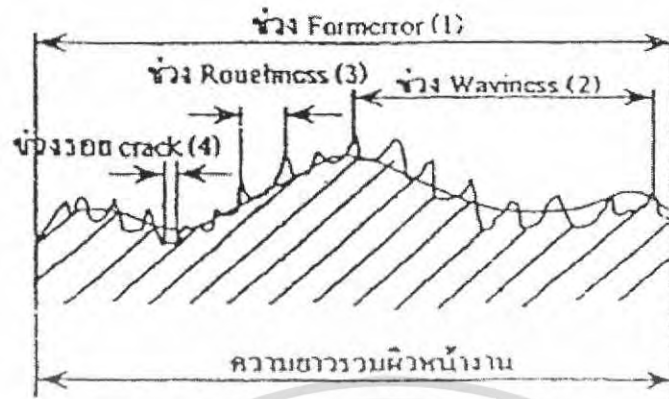
การเบี่ยงเบนที่เกิดจากลอนคลื่น (Waviness) ความผิวก็คือความเป็นคลื่น (Waviness) ซึ่งมักจะเกิดจากการสั่นสะเทือนจากแหล่งกำเนิดต่างๆ โดยรอบ เช่น เครื่องมือไม่ได้วางแผ่นป้องกันการสั่นสะเทือน หรือเกิดจากเครื่องเอียง เกิดจากการสึกหรอของลูกปืน (Bearing) ท่อเครื่อง เกียร์ทด ชุดจับยึด หรือส่วนอื่นๆ ที่เริ่มสั่นคลอนตามอายุหรือการเวลาที่ใช้งาน ความสั่นสะเทือนเหล่านี้จะปรากฏแฝงอยู่ในลักษณะของผิวงาน

2.7.3.3 การเบี่ยงเบนจากร่องโค้ง

การเบี่ยงเบนจากร่องโค้ง (Roughness) ความหยาบ ความเป็นลอนคลื่น หรือความผิดเพี้ยนของรูปทรงอันเกิดขึ้นระหว่างที่ทำงาน ผสมปนกันอยู่ในภาพผิวงานที่เห็นหรือสัมผัสได้

2.7.3.4 ความเรียบ ขรุขระเป็นจุดหยาบ

ความเรียบ ขรุขระเป็นจุดหยาบ (Crack) ลักษณะจะคล้ายกับการเบี่ยงเบนจากร่องโค้ง (Roughness) แต่จะมีความหยาบผิวที่มากกว่า



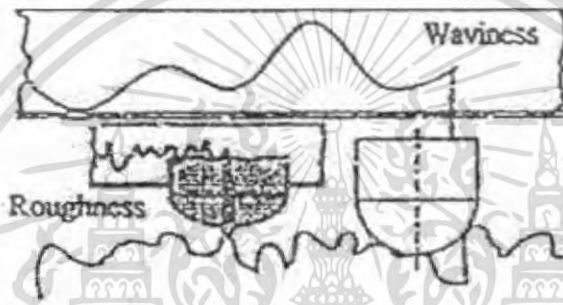
รูปที่ 2.15 ช่วงของการเบี่ยงเบนผิวชิ้นงาน

ตารางที่ 2.1 แสดงลักษณะการเบี่ยงเบนของผิวชิ้นงาน

แสดงการเบี่ยงเบนของผิวชิ้นงาน	ตัวอย่างการเบี่ยงเบนผิวของชิ้นงาน	สาเหตุที่ทำให้เบี่ยงเบน
	Form Error บกพร่องทางด้านความราบ ความกลม	- ผิดพลาดจากระบบน้ำ เคลื่อนเครื่องมือ - การ โกงงอของเครื่องมือ หรือชิ้นงาน
	Waviness การเบี่ยงเบนที่เกิดการดัดงอ	- การจับยึดที่เอียงของ ชิ้นงาน - การเบี่ยงเบนจากรูปทรงหรือ การหมุนของคมตัด
	Roughness การเบี่ยงเบนจากร่องโค้ง	- รูปทรงคมตัด - การตั้งค่าอัตราป้อนชิ้นงาน หรือตั้งค่าความเร็วถนัด
	Crack ความไม่เรียบ ขรุขระเป็น จุดหยุมหรือรอยแตก	- การไหลหรือการขาดของ เศษงาน - การเตรียมผิวด้วยกรรมวิธีอื่น ทราย

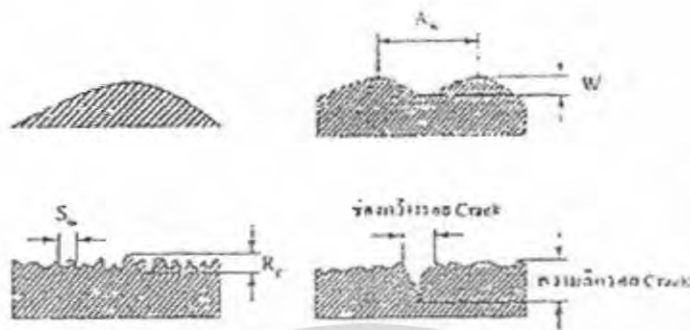
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อบกพร่องของผิวชิ้นงานที่มีขนาดเป็นตัวกำหนดให้มีรูปแบบความเบี่ยงเบนผิวชิ้นงานแบบต่างๆ ดังรูป ช่วงการเบี่ยงเบนซึ่งจะแสดงให้เห็นลักษณะของช่วงการเบี่ยงเบนผิวชิ้นงานแบบต่างๆจากตารางที่ แสดง ลักษณะการเบี่ยงเบนของผิวชิ้นงานในแบบรูปบกพร่องทางด้านความราบความกลม (Form Error) และรูปแบบการเบี่ยงเบนที่เกิดจากลอนคลื่น (Waviness) เป็นไปในลักษณะมหภาค (Macro) ส่วนการเบี่ยงเบนผิวชิ้นงานในรูปแบบการเบี่ยงเบนจากร่องโค้ง (Roughness) และรูปแบบไม่เรียบขรุขระเป็นจุดหยาบ (Crack) เป็นไปในลักษณะจุลภาค (Micro) จะมีช่องหรือช่องความหยาบแคบมาก ดังนั้นการวัดตรวจสอบเพื่อหาค่าที่ต้องการต้องใช้อุปกรณ์เครื่องวัดความหยาบผิว ซึ่งมีลักษณะและส่วนประกอบเบื้องต้นในรูปที่ ซึ่งเป็นลักษณะของหัวลากกับหัวสัมผัสของเครื่องวัดความหยาบที่ใช้ในการวิจัย



รูปที่ 2.16 ลักษณะความแตกต่างระหว่างหัวลาก (รูปด้านบน) กับหัวสัมผัส (รูปด้านล่าง)

ข้อบกพร่องผิวหน้าชิ้นงานเกิดมาจากกรรมวิธีการผลิตชิ้นงานผิวหน้ามักจะมีการเบี่ยงเบนตลอดเวลาที่ทำการผลิตชิ้นงาน จากความคิดที่เกี่ยวกับรูปทรงต่างๆ ทางเรขาคณิต ซึ่งข้อเท็จจริงทั้งหลายความเบี่ยงเบนจากรูปแบบไม่เป็นจริงของผิวชิ้นงานเหตุนี้ผิวชิ้นงานเป็นเรื่องสำคัญ ดังนั้นที่ของชิ้นงานส่วนจักรกลพฤติกรรมการกัดกร่อนความสามารถในการแบ่งชิ้น ความสามารถในการทำให้เกิดการสิ้นเปลืองสึกที่มีอยู่กับการควบคุมภาพผิวหน้า ซึ่งตามมาตรฐาน DIN 4760 มีการแบ่งรูปแบบการเบี่ยงเบนออกเป็น 6 แบบ สำหรับแบบที่ 5 และแบบที่ 6 เป็นองค์ประกอบที่หลุดอยู่ใน โครงสร้างแบบที่ 1 ถึงแบบที่ 4 และเกิดเป็น โครงสร้างแบบดวชาญ และไม่มีตัวอย่างอธิบายที่แน่ชัดขนาดเป็นตัวกำหนดให้มีรูปแบบเบี่ยงเบน ซึ่งมี 4 รูปแบบ อาจจะ ไม่เกี่ยวข้องกันกับหน้าที่ของผิวหน้า ณ เวลา ผิวหน้าที่ด้านไม่ ควรจะมีหลายส่วนของรูปแบบเบี่ยงเบน ผิวหยาบต้องการความหยาบต่ำผิวหน้าที่เปลี่ยนแปลงควรจะมีรูปคลื่นที่ชัดเจน



รูปที่ 2.17 จำแนกลักษณะการเบี่ยงเบนผิวชิ้นงาน

2.7.4 รายละเอียดของเครื่องวัดค่าความหยาบผิว

รายละเอียดของเครื่องวัดค่าความหยาบผิว (Surface Profilometer)

2.7.4.1 หลักการทำงานของเครื่องวัดค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน

การทำงานของเครื่องวัดค่าความหยาบผิวจะเป็นการทำงานร่วมกันของหัวทดสอบกับชุดขยายสัญญาณและควบคุมที่การแปลงผลสัมผัสของปลายวัด ซึ่งเคลื่อนที่ขึ้นลงตามลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานเป็นไปเป็นสัญญาณทางไฟฟ้ารวมที่มีคลื่นของความถี่สูงและต่ำผสมกันอยู่อันมีผลมาจากลักษณะ โครงสร้างรวมของพื้นที่ผิวที่วัดได้ ซึ่งการประมวลผลของผิว ตามคุณสมบัติการวัดจำเป็นต้องแยกลักษณะสัญญาณความถี่สูงและต่ำนี้ออกจากกัน เนื่องจากแต่ละลักษณะเป็นค่าที่แทนคุณสมบัติที่ต่างกัน คือ

- ย่านความถี่สูงจะเป็นค่าคุณสมบัติของความหยาบผิว (Roughness)
- ย่านความถี่ต่ำจะเป็นค่าคุณสมบัติของความเป็นลอนคลื่น (Waviness)

2.7.4.2 วิธีการทำงานของเครื่องวัดค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน

โดยตัวที่เป็นตัวทดสอบวัดค่าความหยาบผิวคือ หัวทดสอบใช้วัดค่าความหยาบผิวของชิ้นงานโดยมีจะมีแท่งโลหะด้านไม่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่มีขนาดเล็กจะเชื่อมต่อกับหัวทดสอบคล้ายปากกาแหลม และแท่งโลหะด้านนอกมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่มีมีขนาดใหญ่โดยใช้หัวทดสอบลากสัมผัสกับผิวชิ้นงาน โดยที่ชิ้นงานที่นำมาหาค่าความหยาบผิวนั้นต้องมีของร่องทดสอบที่สามารถให้หัวทดสอบเข้าไปสัมผัสวัดได้แต่ก่อนที่จะวัดค่าความหยาบผิวนั้นต้องมีปรับค่าการวัดค่าความหยาบ (Calibrate) ก่อนทุกครั้งที่ทำกรวัดค่าเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้อง

2.7.5 ค่าที่เกี่ยวข้องกับความหยาบผิว

2.7.5.1 ความหยาบผิว

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

2.7.5.2 ความยาวอ้างอิง

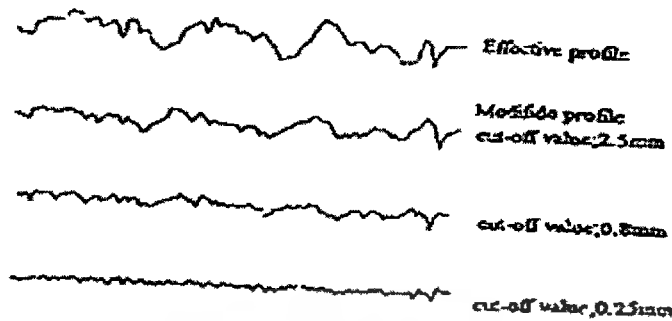
ความยาวอ้างอิง (Reference Length) ความยาวอ้างอิง (l_e) กำหนดให้เป็นความยาวซึ่งจำเป็นต่อการหาค่าที่สุดระหว่างจุดสูงสุดและปริมาณค่าสูงที่สุดของส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลง (Rt) หรือความสูงที่สุดของส่วนที่เปลี่ยนแปลง 10 จุด (Rz) จากพื้นที่หน้าตัดตัดแปลงค่าความยาวของความยาวอ้างอิง ไม่มีผลต่อความเรียบของผิวชิ้นงานปกติ

2.7.5.3 เส้นค่าเฉลี่ย

เส้นค่าเฉลี่ย (Mean Line) ถูกกำหนดให้เป็นเส้นตรงหรือเส้นโค้งซึ่งมีผลรวมทั้งหมดของค่ายกกำลัง 2 ของความสูงจากเส้นค่าเฉลี่ยถึงส่วนโค้งจากการวัด โดยแสดงเป็นค่าต่ำสุด เส้นเฉลี่ยถูกใช้เป็นเส้นอ้างอิงเพื่อหาค่าตัวแปรของความหยาบของผิวชิ้นงาน

2.7.5.4 รูปร่างตัดที่เป็นผลและรูปร่างตัดดัดแปลง

รูปร่างตัดที่เป็นผลและรูปร่างตัดดัดแปลง (Effective Profile and Modified Profile) ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการแปรรูปด้วยเครื่องอีดีเอ็มจะมีลักษณะนูนขึ้นเป็นแอ่งด้วยความสูง ช่วงห่าง และความเอียงแตกต่างกันมากมาย เมื่อความเรียบของผิวเหล่านี้ถูกวัดด้วยส่วนสัมผัสทางไฟฟ้าหรือหัวทดสอบ แล้วขจัดคลื่นความถี่ออกไปด้วยรูปร่างตัดดัดแปลงจะเกิดเส้นโค้งที่ลากด้วยปลายหัวทดสอบ ซึ่งมีความหมายความแตกต่างจากเส้นโค้งที่ลากโดยผ่าน Low Band Cut-off Filter หรือที่เรียกว่ารูปร่างตัดดัดแปลง ค่าของความถี่ที่ได้ค่าวัดออกด้วย Filter เรียกว่า ค่าตัดออก และรูปร่างของเส้นโค้งมีความแตกต่างกัน



รูปที่ 2.18 รูปหน้าตัดที่เป็นผลและรูปหน้าตัดดัดแปลงของความหยาบ

2.7.6 วิธีการแสดงค่าความหยาบผิว

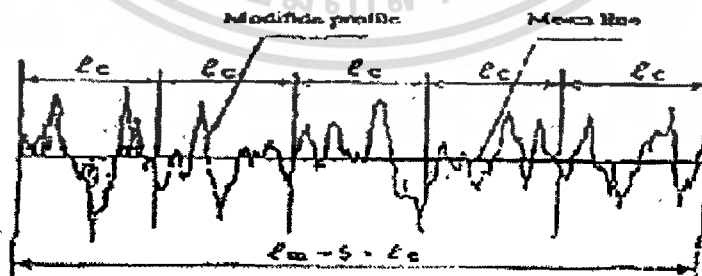
การศึกษาเกี่ยวกับความหยาบผิวของชิ้นงาน เป็นการเก็บค่าและค่าเฉลี่ยของความแรงสัญญาณ (Amplitude) จากรูปหน้าตัดและเมื่อศึกษาวิธีการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับใช้คลื่นเสียง จึงได้นำมาประยุกต์เพื่อวิเคราะห์ค่าความหยาบของผิวชิ้นงานและวิธีการคำนวณค่าต่างๆ ดังนี้

2.7.6.1 ค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยทางคณิตศาสตร์ของพื้นที่หน้าตัด

ค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยทางคณิตศาสตร์ของพื้นที่หน้าตัด (R_a) มีวิธีหาโดยแกน x ใช้กำหนดเส้นค่าเฉลี่ยของเส้นโค้งจากการวัดและมีความยาวประเมิน โดย ($l_m = 5 \cdot l_e$) โดยทั่วไปความยาวประเมิน (l_m) มีค่าเป็น 5 เท่าของความยาวอ้างอิง (l_e) การกำหนดตามแกน x ในรูปที่ และแกน z มีทิศทางในแนวตั้งฉากกับแกน x และรูปพื้นที่หน้าตัดดัดแปลงจะถูกอธิบาย โดย $z = f(x)$ ค่า R_a หาได้จากสมการที่ วิธีการหาวิธีนี้

เมื่อ l_m = ความยาวประเมิน (ไมโครเมตร)

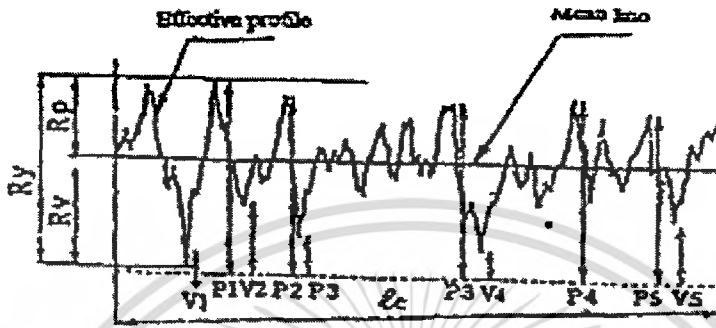
l_e = ความยาวอ้างอิง (ไมโครเมตร)



รูปที่ 2.19 ค่าพารามิเตอร์ค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยทางคณิตศาสตร์ของพื้นที่หน้าตัดของความหยาบผิว

2.7.6.2 ค่าสูงที่สุดของส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลง

ค่าสูงที่สุดของส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลง (R_t) มีวิธีการหาโดยการตัดออกเส้นโค้งจากการวัดช่วงห่างของความยาวอ้างอิงแล้วลากเส้น 2 เส้นขนานกับเส้นค่าเฉลี่ยของรูปหน้าตัวตัดแปลงให้หน้าสัมผัสกับส่วนที่สูงสุดปลายยอดแหลม (peak) และอีกเส้นสัมผัสกับส่วนที่ลึกที่สุดของแอ่ง (Valley) ค่า R_t ได้จากระยะความยาวช่วงห่างเส้นขนานทั้งนี้ทั้งรูป



รูปที่ 2.20 ค่าสูงที่สุดของส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงและมีค่าความสูงของส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลง 10 จุดของค่าความหยابผิว

การหาค่ามีดังนี้

R_p = ระยะจากเส้นค่าเฉลี่ยถึงจุดที่สูงที่สุดของปลายยอดแหลม (Peak)

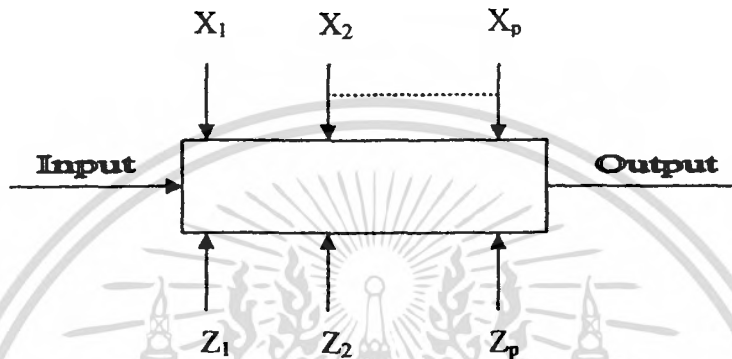
R_v = ระยะจากเส้นค่าเฉลี่ยถึงจุดที่สูงที่สุดของแอ่ง (Valley)

R_t = ระยะระหว่างจุดที่สูงที่สุดของปลายยอดแหลม (Peak) และจุดที่ลึกที่สุดของแอ่ง (Valley)

ถ้าค่า R_p และ R_v มีค่ามากๆ จะมีส่วนสำคัญต่อการสึกหรอของชิ้นส่วนของเครื่องจักร

2.8 หลักการออกแบบการทดลอง

การทดลองถูกสร้างขึ้นด้วยผู้ทดลอง ซึ่งมาจากหลายสาขาอาชีพที่ต้องการคำตอบจากระบวนการหรือระบบที่ผู้ทดลองมีความสนใจ การทดลองในที่นี้อาจหมายถึงการทดสอบหรือชุดของการทดสอบที่คาดหมายว่าเมื่อเปลี่ยนตัวแปรป้อนเข้าของกระบวนการหรือระบบ จะเป็นผลให้ตัวแปรตอบสนองมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น ในงานทางด้านวิศวกรรมการทดลองมีบทบาทอย่างมากในการออกแบบผลิตภัณฑ์ใหม่ ๆ การพัฒนากรรมวิธีการผลิตของกระบวนการและการปรับปรุงกระบวนการและการปรับปรุงกระบวนการผลิต บางกรณีอาจต้องการพัฒนากระบวนการที่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจากแหล่งภายนอกกระบวนการจะมีผลกระทบไม่มากต่อกระบวนการ



รูปที่ 2.21 รูปแบบของกระบวนการหรือระบบ

โดยทั่วไป การทดลองถูกใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการหรือระบบ (Process or System)

รูป 2.23 แสดงรูปของกระบวนการหรือระบบส่วนใหญ่จะสามารถมองเห็นภาพของกระบวนการเป็นการรวมกันของเครื่องจักร คน วิธีการ และทรัพยากรอื่น ๆ และเมื่อมีสิ่งป้อนเข้ามา (Input) สู่กระบวนการจะถูกเปลี่ยนรูปออกมาได้เป็นผลลัพธ์ (Output) ซึ่งผลลัพธ์ดังกล่าวอาจมีได้ตั้งแต่หนึ่งหรือมากกว่าหนึ่ง

จากรูปที่ 2.23 จะเห็นได้ว่ากระบวนการหรือระบบยังประกอบด้วยปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable - Factors) คือ X_1, X_2, X_p และปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factors) คือ Z_1, Z_2, Z_p

2.8.1 ปัจจัยในการผลิต

ปัจจัยในการผลิตสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

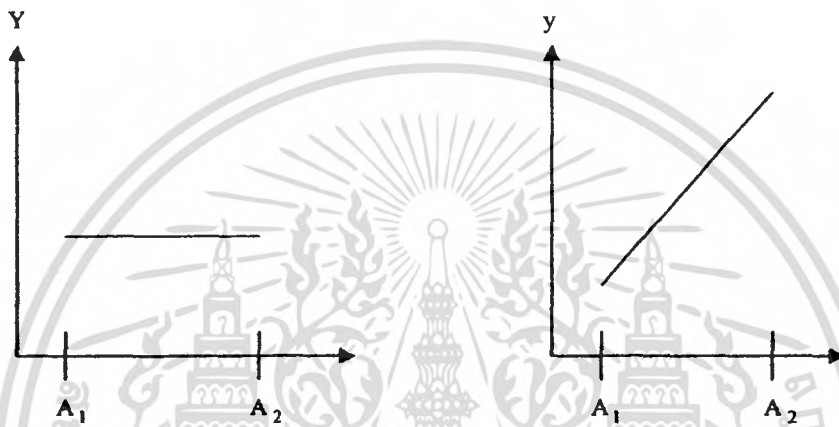
2.8.1.1 ปัจจัยที่ควบคุมได้

ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factor) หมายถึง ปัจจัยที่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในกระบวนการซึ่งเป็นผลดีต่อการทดลองเพราะโดยส่วนใหญ่ผู้ทำการทดลองต้องการกำหนดค่าต่าง ๆ ที่มีผลต่อค่าตอบสนองที่สนใจ

2.8.1.2 ปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้

ปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable Factor) หมายถึง ปัจจัยที่ไม่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในกระบวนการ อันเนื่องมาจากเทคโนโลยีที่ไม่ทันสมัยพอหรือต้นทุนในการควบคุมสูงมาก ผู้ทดลองควรกำจัดปัจจัยลักษณะนี้เพื่อให้เปลี่ยนเป็นปัจจัยที่ควบคุมได้ จึงจะเป็นประโยชน์ต่อการทดลอง

การออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์ให้ได้ว่าปัจจัยใดมีอิทธิพลต่อผลลัพธ์หรือไม่ ต้องทำการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยอย่างน้อย 2 ระดับ แล้วทำการทดลองจากนั้นจึงวิเคราะห์ผลการทดลอง ตัวอย่าง เช่น ให้ y เป็นค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน A เป็นปัจจัยหนึ่งที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งจะสรุปผลเมื่อได้กราฟ ดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.22 อิทธิพลที่ไม่มีผลและอิทธิพลที่มีผลของปัจจัยต่อผลิตภัณฑ์

2.8.2 วัตถุประสงค์ของการออกแบบการทดลอง

วัตถุประสงค์ของการออกแบบการทดลองมีดังนี้

1. หาค่าแปรที่มีผลต่อค่าตอบสนอง y มากที่สุด
2. กำหนดค่า x ที่ทำให้ค่า y ใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการ
3. กำหนดค่า x ที่ทำให้ค่า y สมการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด
4. กำหนดค่า x ที่ทำให้ปัจจัยที่ควบคุมได้มีผลน้อยที่สุด

2.8.3 คำจำกัดความ

2.8.3.1 อิทธิพลหรือผล

อิทธิพลหรือผล หมายถึง ผลของตัวแปรต้นที่มีผลต่อตัวแปรตาม

2.8.3.2 ปัจจัย

ปัจจัย หมายถึง สิ่งที่เราคิดว่ามีอิทธิพลต่อการทดลองของคุณสมบัติในตัวผลิตภัณฑ์

2.8.3.3 ระดับของปัจจัย

ระดับของปัจจัย หมายถึง สภาวะต่าง ๆ ของปัจจัยหนึ่งที่ทำกรกำหนดในการทดลอง

2.8.3.4 ปัจจัยรบกวน

ปัจจัยรบกวน หมายถึง ปัจจัยที่ก่อให้เกิดผลกระทบเล็ก ๆ น้อย ๆ และไม่สามารถควบคุมได้

2.8.4 หลักในการออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองเป็นกระบวนการวางแผนของการทดลองซึ่งข้อมูลในการทดลองนั้นจะถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติ จนได้ข้อมูลสรุปของวัตถุประสงค์ที่ได้ตั้งไว้ หลักการทางสถิติถูกนำมาใช้ในการออกแบบการทดลองเพื่อทำความเข้าใจในข้อมูล และหาผลสรุปออกมานั่นเอง หลักในการออกแบบการทดลองมีดังนี้

2.8.4.1 การทำซ้ำ

การทำซ้ำ (Replication) คือ การทดลองซ้ำในแต่ละข้อมูลเพื่อที่จะกำจัดผลของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ออกไป การทำซ้ำมีความสำคัญ 2 ประการ

1. เพื่อประมาณค่าความผิดพลาดของการทดลอง
2. เพื่อประมาณค่าเฉลี่ยนั้นให้มีความมั่นใจมากขึ้น

2.8.4.2 การทำแบบสุ่ม

การทำแบบสุ่ม (Randomization) คือการให้โอกาสในการเก็บข้อมูลของข้อมูลในแต่ละตัวให้เท่ากันเพื่อกระจายผลของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ให้กับข้อมูลทุกระดับในการทดลองให้เท่า ๆ กัน การทำแบบสุ่มสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 วิธีดังนี้

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

2.8.5 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

การใช้หลักการทางสถิติในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองเป็นสิ่งจำเป็น ผู้ทำการทดลองต้องมีความเข้าใจวิธีในการเก็บข้อมูลตลอดการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้มา

2.8.5.1 การนิยามปัญหา

การนิยามปัญหา คือ การระบุว่าความต้องการในการผลิตคืออะไรและต้องการรู้อะไรบ้างในการผลิต ซึ่งการนิยามปัญหานี้จะเชื่อมโยงไปถึงวัตถุประสงค์ของการทดลอง

2.8.5.2 การเลือกปัจจัยที่มีผลและระดับของปัจจัย

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

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

2.8.5.3 การเลือกตัวแปรตอบสนอง

การเลือกตัวแปรตอบสนอง (Response Variables) ผู้ทำการทดลองต้องมีความมั่นใจว่าเลือกตัวแปรที่สามารถให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อกระบวนการที่ทำการศึกษาค่าเฉลี่ยหรือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าที่จะใช้วัดเป็นตัวแปรตอบสนอง โดยทั่วไปจะเก็บข้อมูลของตัวแปรตอบสนองเพียงค่าเดียว แต่ก็มีบางการทดลองที่ทำการวัดค่าตัวแปรตอบสนองหลายค่า การวัดค่าจะต้องมีความแม่นยำทั้งความถูกต้องของเครื่องมือวัดด้วย

2.8.5.4 การเลือกแบบการทดลอง

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

2.8.5.5 การดำเนินการทดลอง

เมื่อทำการทดลอง ต้องทำการตรวจสอบการทดลองอย่างระมัดระวังว่ามีการดำเนินการตามที่วางไว้ ข้อควรระวังในการทดลองคือความถูกต้องของกระบวนการเครื่องมือวัด และความสม่ำเสมอในการทดลองเพื่อให้เกิดความผิดพลาดน้อยที่สุดเพราะความผิดพลาดในขั้นตอนนี้จะทำให้การทดลองล้มเหลวได้

2.8.5.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

หลักการในทางสถิติถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลการทดลอง การวิเคราะห์ข้อมูลอาจใช้ซอฟต์แวร์เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ด้วย ซึ่งปัจจุบันมีซอฟต์แวร์อยู่หลายประเภทที่สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ได้ วิธีการถูกนำมาใช้อย่างได้ผลคือกราฟอย่างง่ายคือช่วยในการวิเคราะห์และตีความข้อมูลจากการทดลอง การตรวจสอบความเพียงพอของโมเดล (Model Adequacy Checking) เป็นสิ่งที่จำเป็นต้องทำการวิเคราะห์เพื่อความเชื่อมั่นของข้อมูลที่เก็บมาจากการทดลอง จึงจำไว้ว่าวิธีทางสถิติไม่สามารถพิสูจน์ได้ว่าปัจจัยมีอิทธิพล ได้อย่างแน่นอนเพียงพอแต่เป็นเครื่องมือที่ช่วยให้แนวทางในการวิเคราะห์ภายใต้ความเชื่อมั่น โดยระบุเป็นเปอร์เซ็นต์ในการสรุปผลการทดลอง แต่อย่างไรก็ดีในการใช้หลักการทางสถิติช่วยให้การตัดสินใจเป็นนามธรรมมากยิ่งขึ้น

2.8.5.7 สรุปผลและข้อเสนอแนะ

เมื่อข้อมูลถูกวิเคราะห์จะต้องสรุปผลจากการวิเคราะห์ซึ่งอาจจะแสดงในรูปแบบของกราฟ ตาราง แผนภูมิ ตลอดจนให้ข้อเสนอแนะจากการทดลองเพื่อสรุปผลและควรที่จะมีการทดสอบเพื่อยืนยันผลจากการทดลองอีกครั้ง

2.8.6 การใช้หลักการทางสถิติในการทดลอง

การใช้หลักการทางสถิติในการทดลองนั้นผู้ทำการทดลองต้องมีความเข้าใจในประเด็นต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. ผู้ทำการทดลอง ต้องมีความรู้เกี่ยวกับงานในสาขาที่จะทำการทดลอง โดยใช้ความรู้ที่ไม่ใช่วิธีการทางสถิติในการพิจารณาปัญหาที่เกิดขึ้น
2. ผู้ทำการทดลอง ควรเลือกการออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ที่ง่ายและไม่ซับซ้อน
3. ผู้ทำการทดลองควรเข้าใจความแตกต่างระหว่างนัยสำคัญทางสถิติ เพราะความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในการทดลองซึ่งเรียกว่าความแตกต่างทางด้านสถิตินั้นไม่สามารถประกันได้ว่าความแตกต่างมากเพียงพอที่จะใช้ในทางปฏิบัติ และจะต้องคำนึงถึงต้นทุนว่าคุ้มค่าในการลงทุนหรือไม่
4. ผู้ทำการทดลอง ควรทำการทดลองซ้ำ ๆ หลาย ๆ ครั้งเพื่อให้แน่ใจว่าผลที่ได้ถูกต้อง

2.8.7 การตั้งสมมติฐานในการตรวจสอบ

2.8.7.1 ความหมายของสมมติฐานทางสถิติ

สมมติฐาน คือ ความเชื่อมั่นของบุคคลใดบุคคลหนึ่งหรือของกลุ่มของบุคคลใด ๆ หรืออาจกล่าวได้ว่าสมมติฐานเป็นสิ่งที่บุคคลหรือองค์กรคาดว่าจะเกิดขึ้น ความเชื่อมั่นหรือสิ่งที่คาดนั้นอาจเป็นจริงหรือไม่ก็ได้

2.8.7.2 ชนิดของสมมติฐาน

สมมติฐานแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ดังต่อไปนี้

1. สมมติฐานหลัก (Null Hypothesis) หรือใช้สัญลักษณ์ H_0
 2. สมมติฐานอื่น ๆ (Alternative Hypothesis) ใช้สัญลักษณ์ H_1
- สมมติฐานหลักที่ตั้งขึ้น เพื่อทดสอบว่าจะยอมรับหรือไม่ยอมรับว่าเป็นจริง การปฏิเสธ ไม่ยอมรับสมมติฐานหลักก็เป็นการยอมรับสมมติฐานอื่น ๆ ว่าเป็นจริง

ประเภทของสมมติฐาน แบ่งออกเป็น 2 ประเภทดังต่อไปนี้

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

2.8.8 ความผิดพลาดในการทดสอบสมมติฐาน

ความผิดพลาดในการทดสอบสมมติฐาน แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังต่อไปนี้

1. ความผิดพลาดประเภทที่ 1 (Type I Error) หรือเรียกโดยทั่วไปว่าระดับนัยสำคัญ (Level of Significance) สัญลักษณ์ α เป็นความผิดพลาดที่เกิดจากการปฏิเสธสมมติฐานหลักและยอมรับสมมติฐานอื่น ๆ โดยที่สมมติฐานหลักเป็นจริง
2. ความผิดพลาดประเภทที่ 2 (Type II Error) ใช้สัญลักษณ์ β เป็นความผิดพลาดที่เกิดจากการยอมรับสมมติฐานอื่น ๆ โดยที่สมมติฐานอื่น ๆ ไม่เป็นจริง

ในการทดสอบแต่ละครั้ง ผู้ทดสอบย่อมต้องการให้มีความผิดพลาดทั้งสองประเภทย่อยที่สุด แต่เมื่อค่าของ α ลดลง ค่าของ β จะเพิ่มขึ้นในทำนองเดียวกัน เมื่อค่าของ α เพิ่มขึ้น ค่าของ β จะลดลง ดังนั้นเมื่อต้องการลดค่าความผิดพลาดทั้งสองประเภทให้ลดลงได้พร้อม ๆ กันทำได้ด้วยการเพิ่ม จำนวนข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ให้มากขึ้น

2.8.9 การตั้งสมมติฐานในการออกแบบการทดลอง

สามารถแบ่งเป็น 3 กรณี ดังต่อไปนี้

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

$$H_0 : \text{ปัจจัยไม่มีผลต่อกระบวนการ}$$

$$H_1 : \text{ปัจจัยมีผลต่อกระบวนการ}$$

หรือสามารถเขียนอยู่ในรูปสัญลักษณ์ μ เมื่อค่า μ ค่าเฉลี่ยของปัจจัย

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

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

2. การออกแบบการทดลองแบบผลกระทบแบบสุ่ม (Random Effects Model) จะทำการตรวจสอบว่าความแปรปรวน (σ_r^2) จะมีค่าเท่ากับ 0 หรือไม่ เพราะไม่สามารถหาค่าของอิทธิพล (Effect) ของระดับของปัจจัยที่เกิดขึ้นมาแน่นอน สามารถตั้งสมมติฐานดังต่อไปนี้

$$H_0 : \sigma_r^2 = 0$$

$$H_1 : \sigma_r^2 > 0$$

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

2.9 ชนิดของแผนการออกแบบการทดลอง

2.9.1 พื้นผิวตอบ

วิธีพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology , RSM) เป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหาโดยที่ผลตอบที่เราสนใจขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร และเรามีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบนี้ ตัวอย่างเช่น สมมติว่าวิศวกรเคมีคนหนึ่งต้องการที่จะหาระดับของอุณหภูมิ (x_1) และความดัน (x_2) ที่จะทำให้ผลผลิตของกระบวนการมีค่ามากที่สุด ซึ่งผลผลิตของกระบวนการนี้เป็นฟังก์ชันของระดับของอุณหภูมิและความดัน กล่าวคือ

$$y = f(x_1, x_2) + \varepsilon \quad (2.1)$$

โดยที่ ε คือค่าความผิดพลาดของผลตอบ y ที่เป็นผลมาจากการทดลอง ถ้าเรากำหนดว่า

$E(y) = f(x_1, x_2) = \eta$ ดังนั้น เราสามารถเขียนสมการของพื้นผิวได้คือ

$$\eta = f(x_1, x_2)$$

ซึ่งเราจะเรียกว่า “พื้นผิวตอบ (Response Surface)”

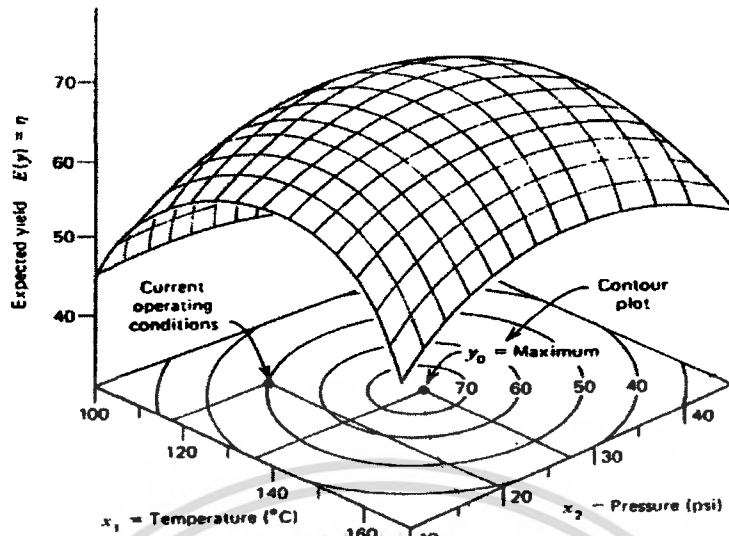
โดยมากแล้วเราจะแสดงพื้นผิวผลตอบในรูปแบบของกราฟฟิก โดยที่ η จะถูกพล็อตกับระดับของ x_1 และ x_2 เพื่อจะช่วยให้เรามองรูปร่างของพื้นผิวตอบได้ดียิ่งขึ้น โดยมากแล้วเราจะพล็อตเส้นโครงร่าง (Contour Plot) ของพื้นผิวตอบดังแสดงในรูปที่ 2 ในการสร้างเส้นโครงร่างเช่นนี้ เส้นที่มีค่าของผลตอบคงที่จะถูกวาดอยู่บนระนาบ x_1 และ x_2 เส้นโครงร่างจะมีความสูงของพื้นที่ผิวตอบที่เท่ากันค่าหนึ่ง

ในปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวผลตอบส่วนมาก เราจะไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบและตัวแปรอิสระ ดังนั้น ขั้นตอนแรกก็คือ เราจะหาตัวประมาณที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวแทนสำหรับแสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่าง y และเซตของตัวแปรอิสระ ถ้าแบบจำลองของผลตอบมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันที่จะใช้ในการประมาณความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันที่จะใช้ในการประมาณความสัมพันธ์ก็คือแบบจำลองกำลังหนึ่ง

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (2.2)$$

แต่ถ้ามีส่วนโค้งเข้ามาเกี่ยวข้องในระบบ เราจะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังสูงขึ้น เช่น พหุนามกำลังสอง

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2.3)$$

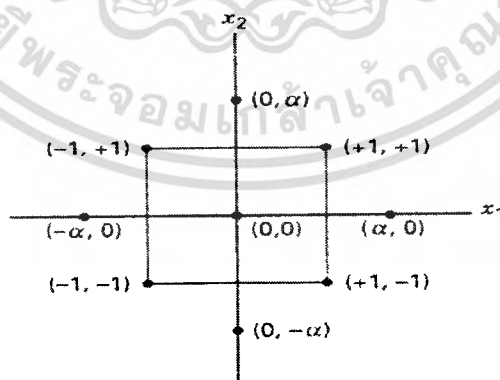


รูปที่ 2.23 กราฟเส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบ

2.9.2 การออกแบบส่วนประสมกลาง หรือ Central Composite Design (CCD)

การออกแบบนี้เป็นประเภทหนึ่งของการออกแบบที่นิยมกันมากสำหรับการพิตแบบจำลองลักษณะเช่นนี้ โดยทั่วไป CCD จะประกอบด้วย 2^k แฟกทอเรียลที่มี n_c รันในแนวแกนหรือในแนวรูปดาว (Star) และ n_c รันที่จุดศูนย์กลาง รูปที่ 2 แสดง CCD สำหรับ $k=2$

การพัฒนาของ CCD ในทางปฏิบัติส่วนมากจะเกิดขึ้นจากการทดลองแบบเป็นอันดับ นั่นคือ การออกแบบ 2^k ถูกนำมาใช้เพื่อพิตเป็นแบบจำลองอันดับหนึ่ง แล้วพบว่า แบบจำลองนี้ไม่เหมาะสมที่จะใช้กับข้อมูลนี้ ดังนั้น จึงได้มีการรันการทดลองเพิ่มในแนวแกนเพื่อทำให้เราสามารถใส่พจน์ควอดราติกลงในแบบจำลองได้ CCD เป็นการออกแบบที่มีประสิทธิภาพมากในการพิตแบบจำลองอันดับสอง มีตัวแปรอยู่ 2 ตัวในการออกแบบที่จะต้องถูกกำหนด นั่นคือ ระยะทาง α ของการรันในแนวแกนจากจุดศูนย์กลางของการออกแบบ และจำนวนของจุดศูนย์กลาง n_c



รูปที่ 2.24 การออกแบบส่วนประกอบกลาง สำหรับ $k=2$

2.9.3 ความสามารถในการหมุน

เป็นความสำคัญอย่างหนึ่งของแบบจำลองอันดับที่สอง ที่จะต้องมีความสามารถในการพยากรณ์ได้ตลอดบริเวณที่สนใจอยู่ วิธีการหนึ่งที่จะบอกว่า แบบจำลองนี้ “ดี” ก็คือแบบจำลองนี้จะต้องอยู่กับร่องกับรอยอย่างมีเหตุและผล และมีความแปรปรวนที่มีเสถียรภาพของผลตอบแทนที่จุด x ซึ่งอยู่ในความสนใจ ความแปรปรวนของผลตอบที่ถูกพยากรณ์ที่บางจุด x คือ

$$V[\hat{y}(x)] = \sigma^2 x'(x'x)x \quad (2.4)$$

ซึ่งถูกแนะนำว่าการออกแบบพื้นผิวผลตอบอันดับที่สองควรจะสามารถในการหมุน (Rotatable) ซึ่งหมายความว่า $V[\hat{y}(x)]$ คือจุด x ทุกจุดที่มีระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของการออกแบบเท่ากัน นั่นคือ ค่าความแปรปรวนของผลตอบที่ถูกพยากรณ์จะมีค่าตรงตัวบนรูปทรงกลม

สำหรับแบบจำลองอันดับที่สองที่ถูกพิดโดยใช้ CCD สังเกตว่า เส้นโครงร่างของส่วนเขียนเบนมาตรฐานที่มีค่าคงตัวของผลตอบที่ถูกพยากรณ์จะเป็นวงกลมที่มีศูนย์กลางร่วมกัน การออกแบบที่มีคุณสมบัติเช่นนี้จะทำให้ค่าความแปรปรวนของ \hat{y} ไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อการออกแบบถูกหมุนรอบจุดศูนย์กลาง $(0, 0, \dots, 0)$ ดังนั้นทำให้เราเรียกการออกแบบเช่นนี้ว่า การออกแบบที่สามารถหมุนได้ (Rotatable Design)

ความสามารถในการหมุนเป็นพื้นฐานเบื้องต้นสำหรับการเลือกการออกแบบพื้นผิวผลตอบเพราะว่าวัตถุประสงค์ของ RSM คือ การหาค่าที่ดีที่สุด และเราไม่ถือตำแหน่งใดเป็นตำแหน่งที่ดีที่สุดก่อนที่จะรันการทดลอง ดังนั้นจะมีเหตุผลที่ดีกว่า ที่จะใช้การออกแบบที่ทำให้เกิดตัวประมาณที่มีความเที่ยงตรงเท่ากันในทุกทิศทาง (เราสามารถแสดงได้ว่า การออกแบบเชิงตั้งฉากอันดับหนึ่งจะเป็นแบบที่สามารถหมุนได้)

การออกแบบส่วนประกอบกลาง สามารถทำให้หมุนได้โดยการเลือกค่าของ α ค่าของ α สำหรับความสามารถหมุนได้จะขึ้นอยู่กับจำนวนของจุดในส่วนของแฟกทอเรียลของการออกแบบ ความจริงแล้ว $\alpha = (n_f)^{1/4}$ จะทำให้เกิดการออกแบบส่วนประกอบกลาง ที่สามารถหมุนได้ โดยที่ n_f คือ จำนวนของจุดที่ถูกใช้ในส่วนแฟกทอเรียลของการออกแบบ

2.9.4 จุดศูนย์กลางของการรันใน CCD

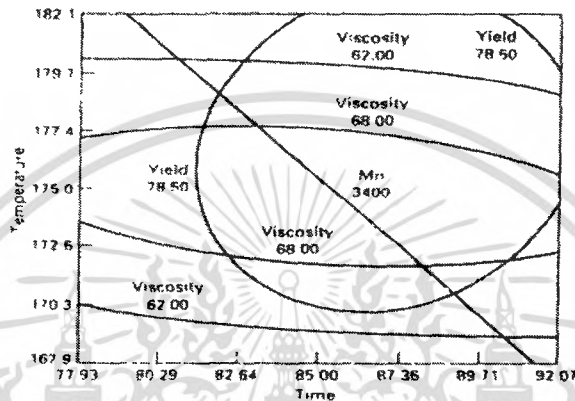
การเลือก α ใน CCD จะถูกกำหนดโดยบริเวณที่เราสนใจ เมื่อบริเวณนี้เป็นรูปทรงกลม การออกแบบจะต้องรวมเอาจุดศูนย์กลางของการรันเข้าไว้ด้วย ทั้งนี้เพื่อจะทำให้ค่าความแปรปรวนของผลตอบที่พยากรณ์ได้มีเสถียรภาพอย่างเต็มที่ยอมรับได้ ตามปกติแล้ว ขอแนะนำให้ใช้ 3–5 รัน

2.10 ผลตอบหลายตัว

ปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวผลตอบจำนวนมากเกี่ยวกับการวิเคราะห์ผลตอบหลายตัว ตัวอย่างเช่น มีผลตอบ 3 ตัวที่อยู่ในความสนใจสำหรับการทดลอง ในตัวอย่างนั้นเราหาเงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสมที่สุดทำให้มีผลผลิตสูงสุด

การพิจารณาผลตอบหลายตัวพร้อมๆกันทำได้โดยการสร้างแบบจำลองของพื้นผิวผลตอบที่เหมาะสมสำหรับผลตอบแต่ละตัว และหลังจากนั้นจะหาเซ็ทของเงื่อนไขการทำงานที่จะทำให้ผลตอบทั้งหมดมีค่าดีที่สุด y_i หรืออย่างน้อยที่สุด ให้ผลตอบทั้งหมดอยู่ภายใต้ขอบเขตที่ยอมรับได้

วิธีที่ตรงไปตรงมาสำหรับการหาค่าที่ดีที่สุดสำหรับผลตอบหลายตัวเมื่อมีตัวแปรของกระบวนการจำนวนน้อยก็คือ การนำเอากราฟโครงร่างของผลตอบแต่ละตัวมาวางซ้อนทับกัน รูปที่ 3 แสดงกราฟที่มีการซ้อนทับกันของผลตอบทั้งสาม ที่มีเส้นโครงร่างของ y_1 (ผลผลิต) $\geq 78.5, 62 \leq y_2$ (ความหนืด) ≤ 68 , และ y_3 (น้ำหนักโมเลกุล) ≤ 3400 ถ้าขอบเขตเหล่านี้แทนเงื่อนไขที่สำคัญที่กระบวนการจะต้องเป็นไป ดังนั้น ส่วนที่ไม่ได้แรเงาของรูปที่ 3 จะแสดงถึงอาณาเขตของเวลาและอุณหภูมิที่จะทำให้เกิดการทำงานของกระบวนการตามที่ต้องการ



รูปที่ 2.25 พื้นที่ซึ่งทำให้ได้ผลตอบแทนดีที่สุด ซึ่งหาได้จากการนำเอาผิวผลตอบของผลผลิต ความหนืด และน้ำหนักโมเลกุลมาวางซ้อนทับกัน

ตารางที่ 2.2 บอกค่าผลตอบที่ดีที่สุดของแต่ละผลลัพธ์ ที่ได้จากการทดลอง

เส้นโครงร่างของ y_i	ค่าผลตอบที่ดีที่สุดของ y_i
1. ผลผลิต	$\geq 78.5, 62 \leq$
2. ความหนืด	≤ 68
3. น้ำหนักโมเลกุล	≤ 3400

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

จากการทำการทดลองเกี่ยวกับการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (Material Removal Rate) อัตราการสึกหรอของหัวอิเล็กโทรด (Electrode Wear Rate) และค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน (Surface Roughness) ทำให้ทราบถึงหลักการการทำงานของเครื่อง (EDM) เครื่องวัดค่าความหยาบผิว กรรมวิธีการทดลอง วัสดุและขั้นตอนต่างๆที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งสามารถแบ่งเป็นหัวข้อหลักๆ ได้ดังนี้

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

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

ในกรรมวิธีการสปาร์คของเครื่องอีดีเอ็ม วัสดุที่นำมาใช้ในการทดลอง จะเป็นชิ้นงานเหล็กกล้า AUD 11 ส่วนแท่งอิเล็กโทรด (Electrode) ที่นำมาใช้ในการทดลองทำมาจากแท่งทองแดงที่มีหน้าตัดเป็นวงกลม เป็นลักษณะแท่งทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 9.6 มิลลิเมตร และยาว 100 มิลลิเมตร

3.1.1 อิเล็กโทรด

อิเล็กโทรดมีหลายขนาดและหลายประเภท แต่อิเล็กโทรดที่จะนำมาทดลองนั้นจะมีรูปร่างหน้าตัดเป็นวงกลม เป็นรูปทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลาง 9.6 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร โดยมีส่วนผสมทางเคมี Cr = 0.70 – 0.96 wt% Zr = 0.31 – 0.42 wt% และที่เหลือเป็นทองแดงบริสุทธิ์ (Cu)

3.1.2 ชิ้นงานการทดลอง

ชิ้นงานการทดลองที่นำมาใช้ในการทดลองนั้นเป็นเหล็กกล้า AUD 11 ขนาดของชิ้นงาน คือ 35 x 35 x 35 มิลลิเมตร โดยมีส่วนผสมทางเคมี คือ C = 0.064% , SL = 0.062% , Mn = 0.034% , P = 0.113% , S = 0.030% , Cr = 0.59% , Mo = 0.090% , Cu = 0.001120% , Ni = 0.00958%



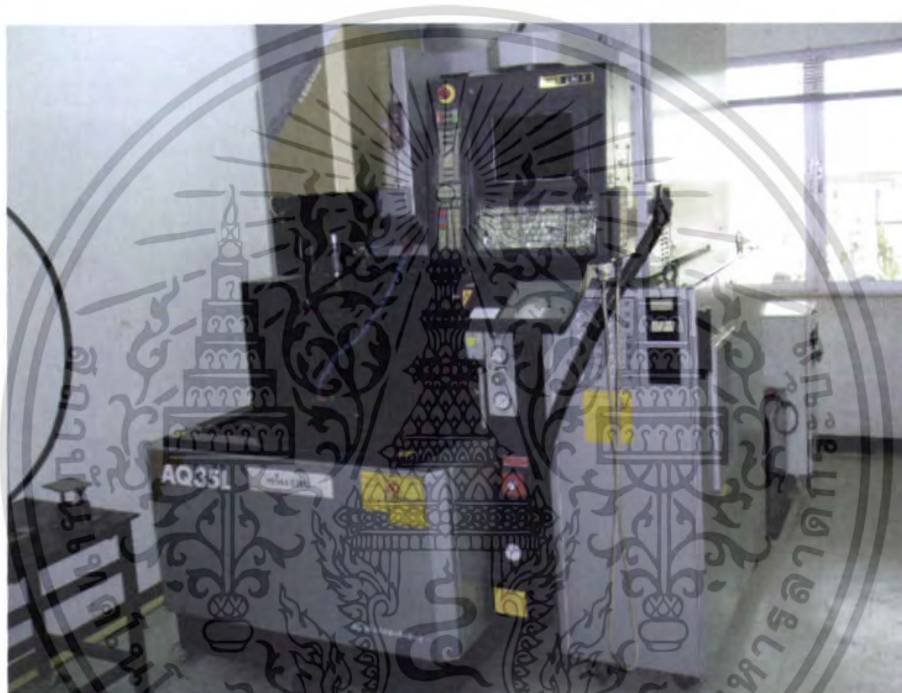
รูปที่ 3.1 อิเล็กโทรดและชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 เครื่องอีทีเอ็ม

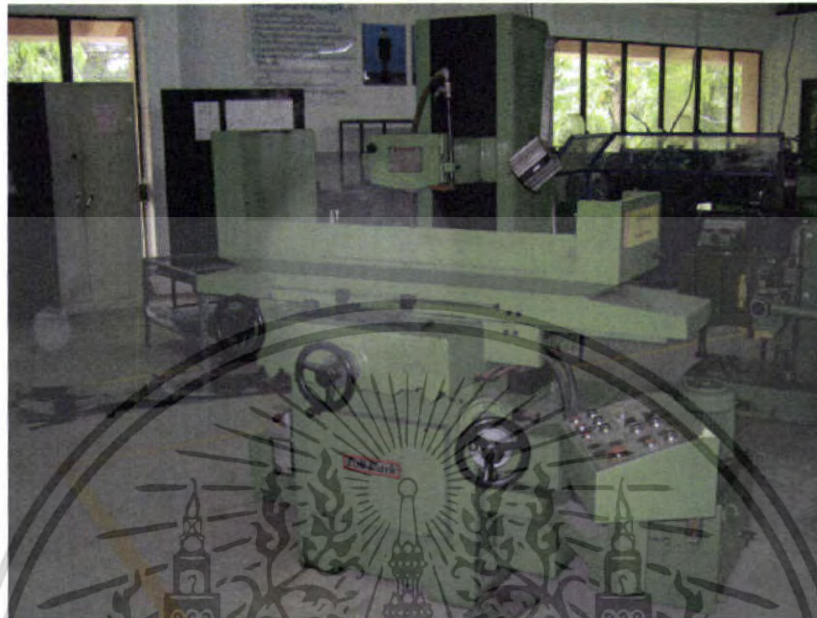
เป็นเครื่องรุ่น AQ35L มีระบบไฮดรอลิกในการขับเคลื่อน แกน XYZ และระบบควบคุมโดยใช้ระบบการสัมผัสบนหน้าจอแผงควบคุม ซึ่งเป็นระบบอัตโนมัติ ขนาดของโต๊ะเซรามิก 600x400 มิลลิเมตร สามารถจับยึดอิเล็กโทรดหนัก 50 กิโลกรัม รับน้ำหนักของชิ้นงานได้สูงสุด 550 กิโลกรัม ช่วงยึดหยุ่นของชุดหัวจับจากล่างถึงบนสุด 212 มิลลิเมตร ถึง 462 มิลลิเมตร น้ำหนักของชุดเครื่องมือ 3900 กิโลกรัม ความดันอากาศ 0.65 เมกกะปาสคาล ความยาวการเคลื่อนที่ของแกน X = 350 มิลลิเมตร Y = 250 มิลลิเมตร Z = 250 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.2 เครื่องอีทีเอ็ม

3.2.2 เครื่องเจียระไนราบ ปรับขนาดชิ้นงาน

เป็นเครื่องจักรที่ใช้ขึ้นรูปชิ้นงานให้ ได้ขนาดตามที่ต้องการ คือ 35 x 35 x 35 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.3 เครื่องเจียระไนราบ ปรับขนาดชิ้นงาน

3.2.3 เครื่องวัดความหยาบผิว

เครื่องวัดความหยาบผิวเป็นเครื่องที่ใช้วัดความหยาบผิวของชิ้นงานหลังการทดลอง แล้วนำค่าที่ได้นั้นมาหาค่าความหยาบผิวเป็นลำดับต่อไป

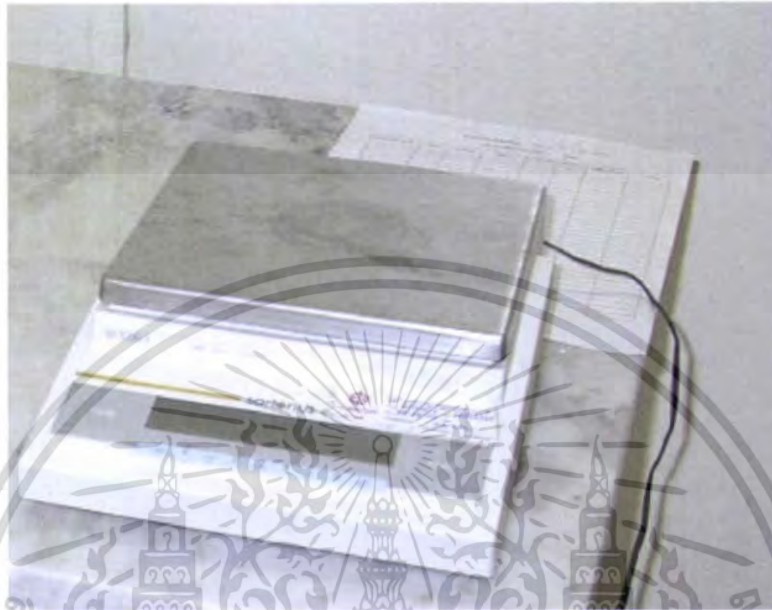


รูปที่ 3.4 เครื่องวัดความหยาบผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4 เครื่องชั่งน้ำหนักชิ้นงานและอิเล็กทรอนิกส์

เครื่องชั่งน้ำหนักจะใช้ชั่งน้ำหนักของชิ้นงานและอิเล็กทรอนิกส์ ก่อนทำการทดลองและหลังทำการทดลอง โดยเครื่องชั่งที่ใช้ในการทดลองจะเป็นแบบ ทศนิยมสามตำแหน่ง ดังนั้รูป 3.4



รูปที่ 3.5 เครื่องชั่งน้ำหนักชิ้นงานและอิเล็กทรอนิกส์

3.3 การออกแบบการทดลอง

3.3.1 ปัจจัยที่สามารถควบคุมได้

ในการออกแบบการทดลองเราต้องหปัจจัยที่สามารถควบคุมได้มาใช้ในการทดลองเพื่อป้องกันการผิดพลาดของผลการทดลอง โดยปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ ได้แก่ ช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ก (IP) การฉีกไล่เศษชิ้นงานที่เกิดจากการสปาร์ก ขนาดของชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง และขนาดของอิเล็กทรอนิกส์ ในการทดลองนี้ ได้กำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง คือ ช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ก ซึ่งปัจจัยทั้ง 2 ตัวนี้สามารถปรับเปลี่ยนได้อย่างแม่นยำ โดยการสั่งการจากคอมพิวเตอร์ ที่อยู่ในเครื่อง อีดีเอ็ม

3.3.1 ปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้

ปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้เป็นปัจจัยที่ไม่อยากให้เกิดขึ้นในการทดลอง เพราะเมื่อเกิดขึ้นแล้วจะส่งผลกระทบต่อผลการทดลอง ทำให้ผลการทดลองผิดพลาด และสร้างความไม่น่าเชื่อถือให้กับรูปแบบ (Model) ของการทดลอง ปัจจัยเหล่านี้ ได้แก่ ความผิดพลาดของเครื่อง อีดีเอ็ม อุณหภูมิสภาพแวดล้อม ความผิดพลาดจากผู้ทำการทดลอง

3.3.2 เลือกพารามิเตอร์ ระดับ และขอบเขต

การเลือกพารามิเตอร์หรือปัจจัยที่จะนำมาทดลอง โดยในการทดลองนี้เลือกทั้งหมดสองพารามิเตอร์ คือ ช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ค (IP) การกำหนดค่าพารามิเตอร์นั้นได้นำค่าในแต่ละระดับมาจากงานวิจัยอื่น ซึ่งมีความคล้ายคลึงกันมาประยุกต์ใช้

3.3.3 เลือกการออกแบบการทดลอง

ในการเลือกการออกแบบการทดลอง ได้เลือกการออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวตอบ (Response Surface) จำนวนปัจจัยที่ใช้ในการทดลองมี 2 ปัจจัย และต้องตัดสินใจว่าจะต้องทำการบล็อกกิง (Blocking) หรือทำการสุ่ม (Randomization) อย่างใดอย่างหนึ่ง หรือไม่ โดยในการทดลองนี้ได้เลือกทำการสุ่ม (Randomization) ลำดับการทดลอง และทำการหาขนาดของตัวอย่าง คือ การหาจำนวนครั้งการทดลอง (Replication)

3.3.4 แผนการทดลอง

ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองคือ ช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) และกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ค (IP) โดยระดับของตัวแปร 3 ระดับดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงระดับตัวแปรในการทดลอง

ตัวแปร	Level 1	Level 2	Level 3
Electric Discharge Time (μsec)	20	40	60
Electric Discharge Peak Current (A)	250	300	350

ส่วนตัวแปรที่นอกเหนือจากตัวแปร ช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) และ กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ค (IP) จะกำหนดเป็นค่าคงที่ตลอดการทดลองทุกครั้งที่ทำการศึกษา โดยจะยึดตามค่ามาตรฐานของเงื่อนไข C100 (Condition C100) ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ใช้สำหรับอิเล็กโทรดของแท่งทองแดงกับชิ้นงานเหล็กกล้าในการตัดเนื้อชิ้นงาน โดยแสดงดังตารางที่ 3.2 และตัวแปรที่เป็นค่าคงที่อีกตัวก็คือ ความลึกของการตัดเนื้อชิ้นงาน คือ 15 มิลลิเมตร ซึ่งสามารถกำหนดโดยการป้อนจีโค๊ตลงในโปรแกรมควบคุมการตัด ส่วนการตั้งความเป็นขั้วจะให้ อิเล็กโทรดเป็นขั้วลบ และชิ้นงานเป็นขั้วบวก ในการทดลองมีตัวแปร ON = 3 ระดับ และ IP = 3 ระดับ ทำให้จะต้องใช้ชิ้นงานทั้งหมด 12 ชิ้น จากการดำเนินงานตารางที่ได้วางแผนการทดลองไว้

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่สภาวะคงที่โดยกำหนดค่าคงที่ตลอดการทดลอง

Parameter	Function	ค่า
PL	Polarity	PL(-)
OFF	Electric discharge stop time	40
SV	Servo voltage	55
SV	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 12 ครั้ง จะต้องมีการสุ่มลำดับการทดลองเพื่อให้ค่าความผิดพลาดของการทดลองเกิดการกระจายตัวอย่างเท่าๆกัน เป็นการหลีกเลี่ยงค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเป็นลักษณะแนวโน้ม หรือมีการกระจุกตัวของค่าความผิดพลาด ซึ่งลำดับในการทดลองตามการออกแบบการทดลอง แสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ลำดับการทดลอง

จำนวนครั้ง	IP (A)	OFF (μsec)	ON (μsec)
1	40	40	300
2	40	40	300
3	60	40	300
4	25.86	40	335.36
5	40	40	300
6	40	40	300
7	25.86	40	264.64
8	40	40	350
9	54.14	40	264.64
10	20	40	300
11	40	40	250
12	54.14	40	335.36

เมื่อทำการทดลองครบทั้ง 12 การทดลอง ตามแผนการทดลองข้างต้น จะต้องคำนวณหา อัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR) และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR) หาได้จากสมการดังนี้ และความหนาผิวของชิ้นงานสามารถหาได้โดยใช้เครื่องวัดความหนาผิว

$$\rho = \frac{m_1}{V_1} \quad (3.1)$$

$$V_2 = \frac{(m_1 - m_2)}{\rho} \quad (3.2)$$

$$MRR, EWR = \frac{V_2}{t} \quad (3.3)$$

ρ = ความหนาแน่นของเหล็ก และ/หรือ ทองแดง

m_1 = น้ำหนักของเหล็ก และ/หรือ ทองแดง ก่อนสปาร์ก

V_1 = ปริมาตรก่อนสปาร์กของเหล็ก และ/หรือ ทองแดง

V_2 = ปริมาตรหลังการสปาร์กของเหล็ก และ/หรือ ทองแดง

m_2 = น้ำหนักหลังการสปาร์กของเหล็ก และ/หรือ ทองแดง

t = เวลาที่ใช้ในการสปาร์ก

และความหนาแน่นของชิ้นงานสามารถหาได้โดยใช้เครื่องวัดความหนาแน่น

ผลการทดลองทั้งหมดจะต้องนำไปวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล (Residual) โดยใช้โปรแกรม Minitab

3.4 ขั้นตอนการทดลอง

ในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการทดลองจะต้องมีการวางแผนการทดลองหรือมีการจัดลำดับของการทดลอง เพื่อที่จะให้การทดลองเป็นไปตามขั้นตอนที่ได้ออกแบบไว้ และก่อนที่จะทำการทดลองจะต้องมีการเตรียมชิ้นงานให้ได้ขนาดตามความต้องการ โดยมีลักษณะสมมาตรกันทุกชิ้น

3.4.1 ขั้นตอนก่อนการทดลอง

ขั้นตอนก่อนการทดลองนั้นเราสามารถแบ่งออกได้เป็นขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

3.4.1.1 การเตรียมชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง

การเตรียมชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง ก่อนที่จะทำการทดลองต้องมีการเตรียมชิ้นงานให้ได้ตามขนาดที่กำหนดไว้ โดยนำเหล็กกล้ามาตัดให้ได้ขนาด 33 มิลลิเมตร แล้วนำไปเข้าเครื่องไสเพื่อปรับระดับชิ้นงานสุดท้ายนำไปเข้าเครื่องกัดเพื่อให้ชิ้นงานสมมาตรดังรูป ที่ 3.0 แล้วจะได้ขนาดตามที่กำหนด คือ เหล็กกล้า AUD 11 ขนาด 33 x 33 x 33 มิลลิเมตร

3.4.1.2 ขั้นตอนการเตรียมอิเล็กโทรด

การเตรียมอิเล็กโทรด โดยนำอิเล็กโทรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.6 มิลลิเมตร ตัดให้ได้ทั้งหมด 12 แท่ง โดยแต่ละแท่ง ตัดให้ได้ความยาว 100 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปปาดหน้าด้วยเครื่องกลึง

3.4.1.3 ชั่งน้ำหนักเหล็ก AUD 11 และน้ำหนักของแท่งอิเล็กโทรดก่อนการสปาร์ก

ก่อนที่จะทำการทดลองสปาร์กนั้นจะต้องรู้ค่าน้ำหนักของชิ้นงานและแท่งอิเล็กโทรดก่อน เพื่อที่จะนำไปคำนวณหาค่าการทดลองดังนั้นจะต้องทำการชั่งน้ำหนักก่อนการทดลอง โดยเครื่องชั่งนั้นจะใช้เป็นเครื่องชั่งที่บอกทศนิยมได้ 3 ตำแหน่ง เพื่อความละเอียดในการคำนวณ

3.4.2 ทำการสปาร์กชิ้นงาน

หลังจากที่ทำการซักรีดชิ้นงานเหล็ก AUD 11 และแท่งอิเล็กโทรดเรียบร้อยแล้วจึงทำการสปาร์ก ชิ้นงาน ตามการวางแผนที่ได้กำหนดไว้แล้ว 12 ครั้ง โดยขั้นตอนระหว่างการทดลองมีดังนี้

- 1.ทำการจับยึดชิ้นงานและแท่งอิเล็กโทรดเข้ากับหัวจับของเครื่องอีดีเอ็ม
- 2.ทำการตั้งค่าศูนย์ของระบบพิกัดแกนทั้ง 3 แกน (XYZ) ซึ่งเป็นจุดอ้างอิงในการเดินของแท่งอิเล็กโทรด
- 3.กำหนดตำแหน่งของหัวฉีดสาร ไดอิเล็กทริกในตำแหน่งที่จะฉีดเศษ โลหะจากสปาร์กให้อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม

4.ทำการเขียนจีโค้ด (G-Code) กำหนดความลึกในการตัด 15 มิลลิเมตร และกำหนดเงื่อนไข C100 (Condition C100)

- 5.ป้อนค่าตัวแปรตามลำดับการสุ่มการทดลอง คือ ตัวแปร ON และ IP
- 6.ทำการทดสอบ โปรแกรม (Run) ที่เขียนจีโค้ดไว้ แล้วเริ่มทำการสปาร์ก
- 7.หลังจากเครื่องทำการสปาร์กเสร็จเรียบร้อยแล้วทำการเก็บบันทึกค่าเวลาที่ใช้ในการสปาร์กไว้เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณค่าของการทดลอง
- 8.ปล่อยสาร ไดอิเล็กทริกกลับเข้าสู่ถังเก็บจนหมด แล้วจึงถอดอิเล็กโทรดและชิ้นงานออก
- 9.ทำความสะอาดอิเล็กโทรดและชิ้นงาน

3.4.3 ขั้นตอนหลังการทดลอง

3.4.3.1 ซักรีดชิ้นงานเหล็ก AUD 11 และแท่งอิเล็กโทรดหลังการสปาร์ก

หลังจากทำการสปาร์กชิ้นงานทั้ง 12 ชิ้นแล้วจะต้องนำเหล็ก AUD 11 และแท่งอิเล็กโทรดไปซักรีดชิ้นงานหลังการทดลองด้วยเครื่องซักรีดชิ้นงาน 3 ตำแหน่ง เพื่อนำค่าน้ำหนักมาคำนวณหาค่า

3.4.3.2 การวัดค่าความหยาบผิว (Surface Roughness)

นำชิ้นงานมาทำการวัดค่าความหยาบผิวด้วยเครื่องวัดค่าความหยาบผิว โดยลักษณะของการวัดต้องทำการควบคุมปัจจัยต่างๆ ให้เหมือนกัน โดยปัจจัยต่างๆเหล่านี้ประกอบด้วย ความสูงของการวางชิ้นงาน ตำแหน่งของการเก็บค่าความหยาบผิว เป็นต้น ซึ่งในการวัดค่าความหยาบผิวนี้นี้จะใช้น้ำที่ในการวัดเพียงคนเดียวเพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนซึ่งอาจเกิดขึ้นหากทำการวัดหลายคน และก่อนการใช้เครื่องวัดค่าความหยาบผิว เมื่อเปิดเครื่องแล้วต้องทำการปรับค่าความหยาบผิวเครื่องทุกครั้ง เพื่อให้ผลการวัดค่าความหยาบผิวที่ออกมาถูกต้องและแม่นยำ แล้วจึงทำการวัดค่าความหยาบผิว ซึ่งในการวัดค่าความหยาบผิวจะได้ผลออกมา 3 ค่า คือค่า Ra , Rz และ Rmax แต่ค่าที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์คือ Ra

3.5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในส่วนของการวิเคราะห์ผลการทดลองนั้นจะใช้ข้อมูลต่างๆที่ได้จากการทดลองมาคำนวณหาค่า อัตราการหลุดของเนื้อชิ้นงาน ค่าการสึกหรอของหัวอิเล็กโทรด และ ค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.1 คำนำผลตอบด้วยวิธีพื้นผิวตอบ (Response Surface)

ในการคำนวณผลโดยใช้พื้นผิวผลตอบนั้นจะต้องใช้การพิจารณาด้วยว่าจะใช้สมการใดเป็นสมการที่สามารถคำนวณผลแล้วได้ค่าตอบออกมาได้ดีและถูกต้องที่สุด โดยสมการพื้นผิวผลตอบที่ใช้ในการคำนวณผลการทดลองนั้นจะมีอยู่สองชนิด คือ สมการพื้นผิวผลตอบกำลังหนึ่ง (First – Order Model) และ สมการพื้นผิวผลตอบกำลังสอง (Second – Order Model) ในการทดลองนี้การคำนวณผลตอบได้นำเอาโปรแกรม Minitab มาใช้ในการคำนวณเพื่อความถูกต้องของผลตอบยิ่งขึ้น

3.5.2 วิเคราะห์การทดลองด้วยกราฟ

หลังจากที่ทำการคำนวณหาอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน อัตราการสึกหรอของหัวอิเล็กโทรด ค่าวัดความหยาบผิวของชิ้นงาน และ ค่าการตัดเกิน (Over Cut) โดยใช้วิธีการคำนวณ หาพื้นผิวผลตอบแล้วจะต้องนำค่าเหล่านี้มาสร้างกราฟเพื่อวิเคราะห์หาค่าที่ดีที่สุดในการขึ้นรูปเหล็ก AUD 11 ว่าในการเปลี่ยนแปลงตัวแปร ON และ IP มีผลอย่างไรกับอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน อัตราการสึกหรอของหัวอิเล็กโทรด ค่าวัดความหยาบผิวของชิ้นงาน และ ค่าการตัดเกิน โดยในการสร้างกราฟนั้นเราจะทำการพล็อตกราฟ ของผลการทดลองทั้ง 3 ค่าออกมา กราฟที่ถูกนำมาพล็อตคือ ค่าการตัดเนื้อชิ้นงาน (Material Removal Rate) อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (Electrode Wear Rate) และค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน หลังจากนั้นจะนำกราฟทั้ง 3 กราฟนี้มาวางซ้อนกันแล้วดูพื้นที่ที่ดีที่สุดของการซ้อนทับรวมกันของกราฟทั้ง 3 กราฟนี้

3.6 การทำการทดลองซ้ำ

ในการทำการทดลองซ้ำนั้นจะเป็นการทำการทดลองซ้ำตรงพื้นที่ที่ดีที่สุดของการซ้อนทับของกราฟโครงร่างทั้ง 3 กราฟ โดยจะต้องกำหนดค่าการทดลองขึ้นมาใหม่ แต่ค่าที่กำหนดขึ้นมานั้นต้องอยู่ในขอบเขตพื้นที่ที่ดีที่สุดในการซ้อนทับของกราฟโครงร่าง

3.6.1 วิเคราะห์ผลการทดลองจากการทดลองซ้ำ

หลังจากทำการทดลองซ้ำบริเวณพื้นที่จุดซ้อนทับที่ดีที่สุดแล้ว นำค่าที่ได้ขึ้นมาทำการคำนวณด้วยพื้นผิวผลตอบ เพื่อยืนยันว่าค่าที่ได้นั้นเป็นค่าที่ดีที่สุดและถูกต้องที่สุดในการทดลอง

3.7 สรุปผลการทดลอง

สรุปผลตามกราฟโครงร่างที่นำค่าที่ดีที่สุดของแต่ละคำตอบมาซ้อนกันและระบุช่วงที่ดีที่สุดของอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR) อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR) และค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน (Surface Roughness)

บทที่ 4

ผลการทดลอง

ในการดำเนินการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้ ได้กำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทำการทดลอง 2 ปัจจัย นั่นก็คือ ค่า ON และ IP โดยในการทดลองนี้จะมุ่งเน้นที่จะทำการศึกษาอัตราการตัดของเนื้อชิ้นงาน (Material Removal Rate) อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (Electrode Wear Rate) และความหยาบผิวของเนื้อชิ้นงาน (Surface Roughness) โดยจะทำการทดลองตามวิธีการทดลองที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 3

ทำการทดลองด้วยกรรมวิธีการขึ้นรูปด้วยเครื่อง EDM โดยใช้ทองแดงผสมเป็นอิเล็กโทรด ส่วนชิ้นงานที่ใช้คือ เหล็กกล้าเครื่องมือ AUD11 ในการทดลองนี้จะใช้ระยะการตัดที่ลึกลงไปเท่ากันทุกชิ้นงาน นั่นคือ 15 มิลลิเมตร



4.1 ผลการทดลองที่ได้หลังจากทำการทดลอง

ตารางที่ 4.1 ผลการเก็บค่าน้ำหนักก่อน – หลังการทดลอง

ครั้งที่	IP (A)	ON (μsec)	เวลาที่ใช้ในการสปาร์ก (sec)	น้ำหนักเหล็ก		น้ำหนักทองแดง	
				ก่อนสปาร์ก (g)	หลังสปาร์ก (g)	ก่อนสปาร์ก (g)	หลังสปาร์ก (g)
1	40	300	2,242	328.522	322.335	63.758	63.716
2	40	300	2,307	327.368	322.145	63.793	63.663
3	60	300	1,371	328.018	321.74	63.612	63.53
4	25.68	335.36	6,031	327.85	321.778	63.737	63.688
5	40	300	2,212	328.461	322.304	62.966	62.884
6	40	300	2,338	328.652	322.316	63.921	63.857
7	25.86	264.64	4,410	328.183	321.783	63.92	63.86
8	40	350	2,522	326.255	319.894	63.679	63.635
9	54.14	264.64	1,361	329.067	322.076	63.619	63.595
10	20	300	111,029	327.368	320.509	63.643	63.633
11	40	250	1,684	328.56	321.535	62.831	62.819
12	54.14	335.36	1,447	329.283	322.188	63.944	63.899

จากตารางที่ 4.1 แสดงผลการเก็บค่าน้ำหนักของอิเล็กโทรด น้ำหนักชิ้นงานก่อนและหลังการทดลอง เพื่อนำไปคำนวณหาอัตราการตัดของเนื้อชิ้นงาน (Material Removal Rate) อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (Electrode Wear Rate)

ตารางที่ 4.2 ผลที่ได้จากการคำนวณ

IP (A)	ON (μsec)	MRR(mm^3/min)	EWR (mm^3/min)	SF (μm)
40	300	0.326	0.00221	7.831
40	300	0.307	0.00399	7.93
60	300	0.664	0.00369	9.426
25.86	335.36	0.12	0.00153	6.677
40	300	0.333	0.00305	7.291
40	300	0.312	0.00308	6.413
25.86	264.64	0.158	0.00125	5.829
40	350	0.357	0.00535	7.717
54.14	264.64	0.523	0.00347	9.468
20	300	0.008	0.00101	5.9
40	250	0.532	0.0016	7.816
54.14	335.36	0.415	0.00777	7.582

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการคำนวณที่ได้จากการทดลองของ ค่าอัตราการตัดของเนื้อชิ้นงาน (Material-Removal Rate) อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (Electrode Wear Rate) และค่าความหยาบผิวที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดความหยาบผิว

4.2 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทางสถิติ

4.2.1 การวิเคราะห์ผลจาก Response Surface Method

4.2.1.1 ผลที่ได้ของอัตราการตัดของเนื้อชิ้นงาน (Material Removal Rate)

Response Surface Regression: MRR versus IP, ON

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for MRR

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.33792	0.01939	17.431	0.000
IP	0.28070	0.03358	8.359	0.000
ON	-0.06955	0.03357	-2.072	0.068

S = 0.06715 R-Sq = 89.2% R-Sq(adj) = 86.8%

Analysis of Variance for MRR

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	2	0.334470	0.334470	0.167235	37.08	0.000
Linear	2	0.334470	0.334470	0.167235	37.08	0.000
Residual Error	9	0.040587	0.040587	0.004510		
Lack-of-Fit	6	0.040150	0.040150	0.006692	45.94	0.005
Pure Error	3	0.000437	0.000437	0.000146		
Total	11	0.375057				

Estimated Regression Coefficients for MRR using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	0.193844
IP	0.0140349
ON	-0.00139107

รูปที่ 4.1 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ Response Surface Method โดย Minitab

จากรูปที่ 4.1 เป็นการวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยวิธี Response Surface โดยใช้สมการรูปแบบที่ทดลองคือ Linear Model โดยผลที่ได้ออกมาดังนี้ $y = 0.193844 + 0.0140349(x_1) + (-0.00139107)(x_2)$

จากการวิเคราะห์ทางสถิตินี้ส่งผลให้ทราบว่า ปัจจัยทั้งสองตัวนั้นคือ ค่า ON และ IP มีผลต่อค่าอัตราการหลุดของเนื้อชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญ โดยสังเกตได้จากค่า R^2 และ R_{adj}^2 มีค่ามากกว่า 80%

4.2.1.2 ผลที่ได้ของอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (Electrode Wear Rate)

Response Surface Regression: EWR versus IP, ON

The analysis was done using uncoded units.

Estimated Regression Coefficients for EWR

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.012474	0.011093	1.124	0.293
IP	-0.000495	0.000269	-1.839	0.103
ON	-0.000045	0.000037	-1.234	0.252
IP*ON	0.000002	0.000001	2.249	0.055

S = 0.0008936 R-Sq = 84.6% R-Sq(adj) = 78.8%

Analysis of Variance for EWR

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	0.000035	0.000035	0.000012	14.61	0.001
Linear	2	0.000031	0.000006	0.000003	3.96	0.064
Interaction	1	0.000004	0.000004	0.000004	5.06	0.055
Residual Error	8	0.000006	0.000006	0.000001		
Lack-of-Fit	5	0.000005	0.000005	0.000001	1.82	0.330
Pure Error	3	0.000002	0.000002	0.000001		
Total	11	0.000041				

รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ Response Surface Method โดย Minitab

จากรูปที่ 4.2 เป็นการวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยวิธี Response Surface โดยใช้สมการรูปแบบที่ทดลองคือ Linear Interaction เนื่องจากไม่สามารถใช้รูปแบบของ Linear Model ได้ เพราะค่าของ R^2 และ R_{adj}^2 ไม่ถึง 80 % ดังนั้นจึงต้องใช้ Linear Interaction ในการทดลอง โดยผลที่ได้ออกมาดังนี้

$$y = 0.012474 + (-0.000495)(x_1) + (-0.000045)(x_2) + 0.000002(x_1)(x_2)$$

จากการวิเคราะห์ทางสถิตินี้ส่งผลให้ทราบว่า ปัจจัยทั้งสองตัวนั้นคือ ค่า ON และ IP มีผลต่อค่าอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดอย่างมีนัยสำคัญ โดยสังเกตได้จากค่า R^2 และ R_{adj}^2 มีค่ามากกว่า 80%

4.2.1.3 ผลที่ได้ของค่า ความหยาบผิวของเนื้อชิ้นงาน (Surface Roughness)

Response Surface Regression: SF versus IP, ON

The analysis was done using uncoded units.

Estimated Regression Coefficients for SF

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-11.0347	6.03057	-1.830	0.105
IP	0.4944	0.14625	3.380	0.010
ON	0.0505	0.02003	2.522	0.036
IP*ON	-0.0014	0.00049	-2.814	0.023

S = 0.4858 R-Sq = 87.6% R-Sq(adj) = 83.0%

Analysis of Variance for SF

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	13.3961	13.3961	4.46536	18.92	0.001
Linear	2	11.5274	4.7078	2.35388	9.97	0.007
Interaction	1	1.8687	1.8687	1.86869	7.92	0.023
Residual Error	8	1.8882	1.8882	0.23602		
Lack-of-Fit	5	0.4400	0.4400	0.08800	0.18	0.951
Pure Error	3	1.4482	1.4482	0.48272		
Total	11	15.2842				

รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ Response Surface Method โดย Minitab

จากรูปที่ 4.3 เป็นการวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยวิธี Response Surface โดยใช้สมการรูปแบบที่ทดลองคือ Linear Interaction เนื่องจากไม่สามารถใช้รูปแบบของ Linear Model ได้ เพราะค่าของ R^2 และ R_{adj}^2 ไม่ถึง 80 % ดังนั้นจึงต้องใช้ Linear Interaction ในการทดลอง โดยผลที่ได้ออกมาดังนี้

$$y = (-11.0347) + 0.4944(x_1) + 0.0505(x_2) + (-0.0014)(x_1)(x_2)$$

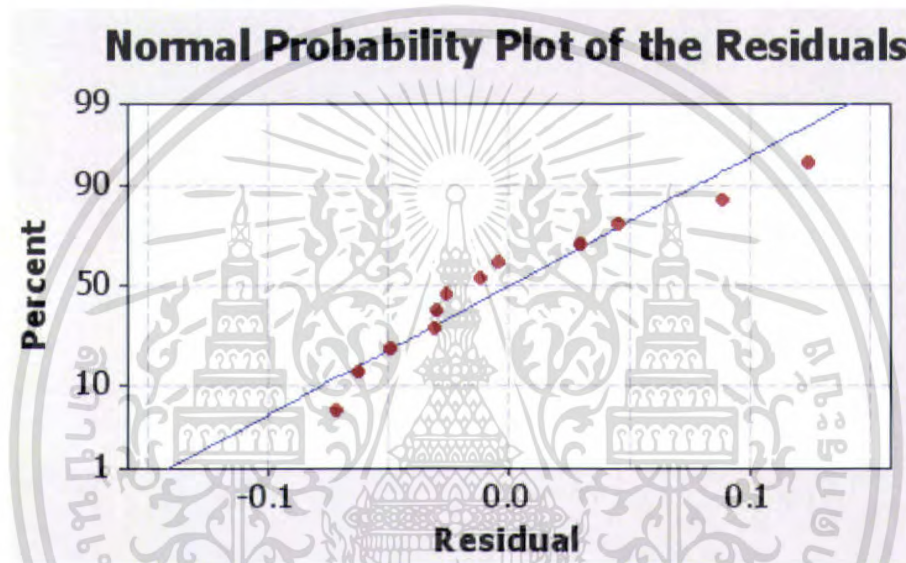
จากการวิเคราะห์ทางสถิตินี้ส่งผลให้ทราบว่า ปัจจัยทั้งสองตัวนั้นคือ ค่า ON และ IP มีผลต่อค่าอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดอย่างมีนัยสำคัญ โดยสังเกตได้จากค่า R^2 และ R_{adj}^2 มีค่ามากกว่า 80%

4.2.2 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model Adequacy Checking) เป็นวิธีการตรวจสอบที่ทำให้ทราบ ว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ Response Surface มีความน่าเชื่อถือเป็นไปตามหลักทางสถิติหรือไม่ โดยการตรวจสอบ ความถูกต้องของรูปแบบ 3 แบบคือ

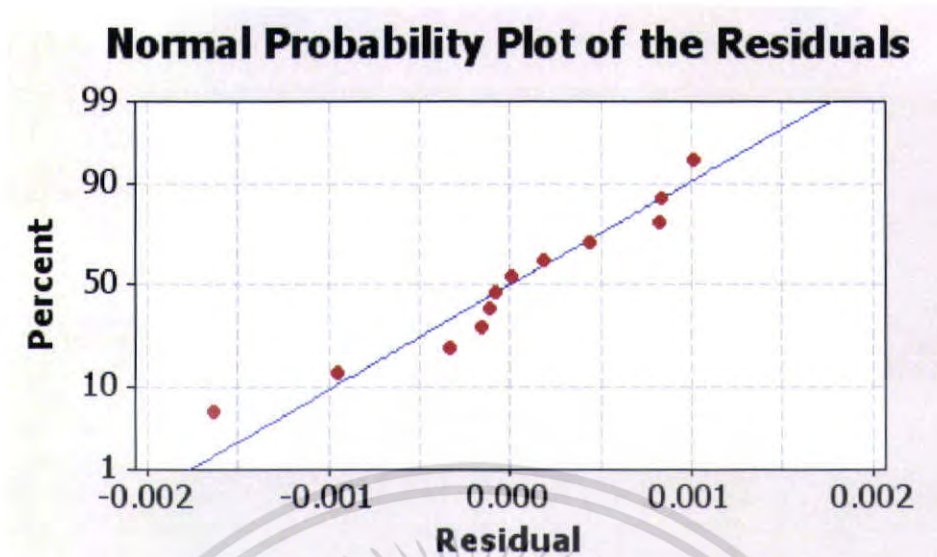
4.2.2.1 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบว่าเป็นการแจกแจงปกติ

โดยการใช้ค่าส่วนตกค้าง (Residual) พล็อตลงบนกราฟทดสอบการแจกแจงปกติ หากลักษณะของกราฟมี ลักษณะเป็นเส้นตรงหรือเกือบตรงแสดงว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ



รูปที่ 4.4 การแจกแจงแบบปกติสำหรับค่าส่วนตกค้างของอัตราการผลิตของเนื้อชิ้นงาน (MRR)

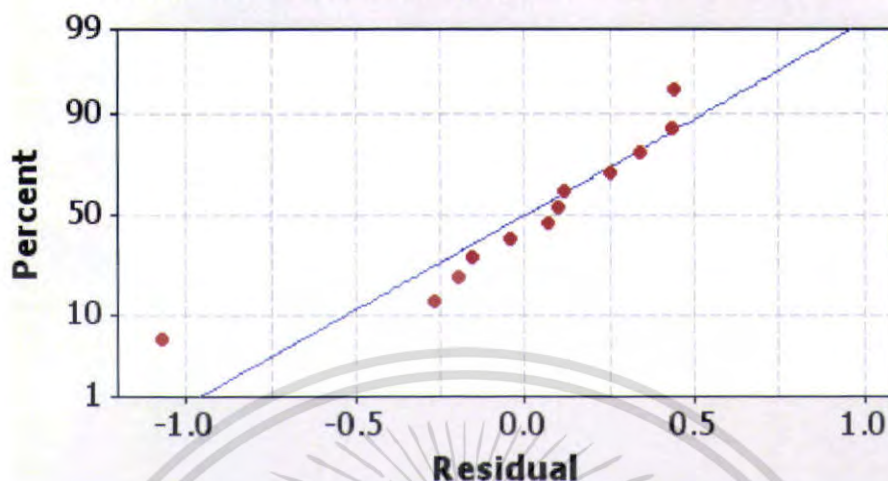
จากรูปที่ 4.4 เป็นรูปกราฟการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability) สำหรับค่าส่วนตกค้างของอัตรา การตัดของเนื้อชิ้นงาน (MRR) จะเห็นได้ว่าค่าส่วนตกค้างเกาะกลุ่มกันใกล้ลักษณะเส้นตรง แสดงว่าข้อมูลที่ได้จาก การทดลองนี้มีลักษณะของการกระจายตัวแบบปกติ นั่นหมายถึงข้อมูลที่วิเคราะห์นี้สามารถเชื่อถือได้



รูปที่ 4.5 การแจกแจงแบบปกติสำหรับค่าส่วนตกค้างของอัตราการศึกษาหรือของอิเล็กทรอนิกส์ (EWR)

จากรูปที่ 4.5 เป็นรูปกราฟการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability) สำหรับค่าส่วนตกค้างของอัตราการศึกษาหรือของอิเล็กทรอนิกส์ (EWR) จะเห็นได้ว่าค่าส่วนตกค้างเกาะกลุ่มกันในลักษณะเส้นตรง แสดงว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้มีลักษณะของการกระจายตัวแบบปกติ นั่นหมายถึงข้อมูลที่วิเคราะห์นี้สามารถเชื่อถือได้

Normal Probability Plot of the Residuals



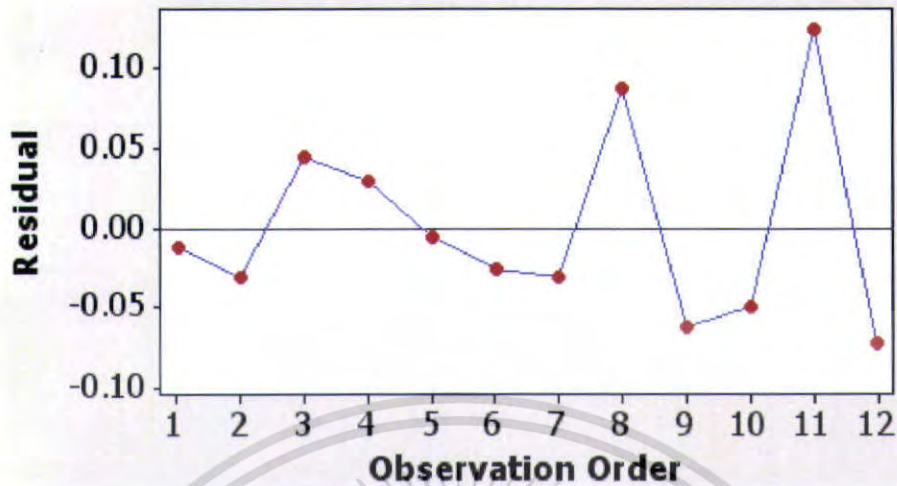
รูปที่ 4.6 การแจกแจงแบบปกติสำหรับค่าส่วนตกค้างของค่าความหยาบผิวของเนื้อชิ้นงาน (Surface Roughness)

จากรูปที่ 4.6 เป็นรูปกราฟการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability) สำหรับค่าส่วนตกค้างของความหยาบผิวของเนื้อชิ้นงาน (Surface Roughness) จะเห็นได้ว่าค่าส่วนตกค้างเกาะกลุ่มกันใกล้ๆ เส้นตรง แสดงว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้มีลักษณะของการกระจายตัวแบบปกติ นั่นหมายถึงข้อมูลที่วิเคราะห์นี้สามารถเชื่อถือได้

4.2.2.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

เป็นการทดสอบความสัมพันธ์ของค่าส่วนตกค้างโดยใช้ค่าส่วนตกค้างและลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล มาทำการพล็อตกราฟค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้งและลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลอยู่บนแกนนอน

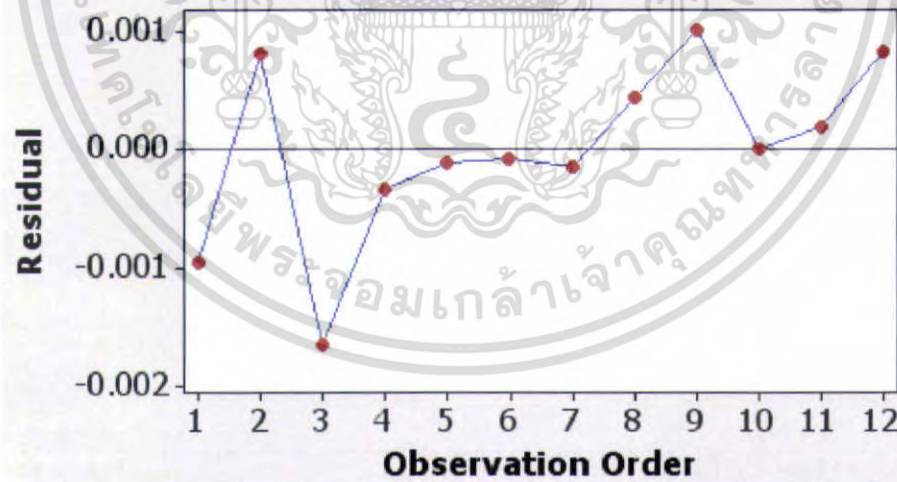
Residuals Versus the Order of the Data



รูปที่ 4.7 ค่าส่วนตกค้างของอัตราการจัดของเนื้อหาในงานกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล

จากรูปที่ 4.7 เป็นรูปที่แสดงค่าส่วนตกค้างของอัตราการจัดของเนื้อหาในงานกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย Response Surface ซึ่งลักษณะของกราฟมีการกระจายตัวอย่างไม่มีรูปแบบแสดงว่าข้อมูลในการทดลองมีความเป็นอิสระต่อกัน

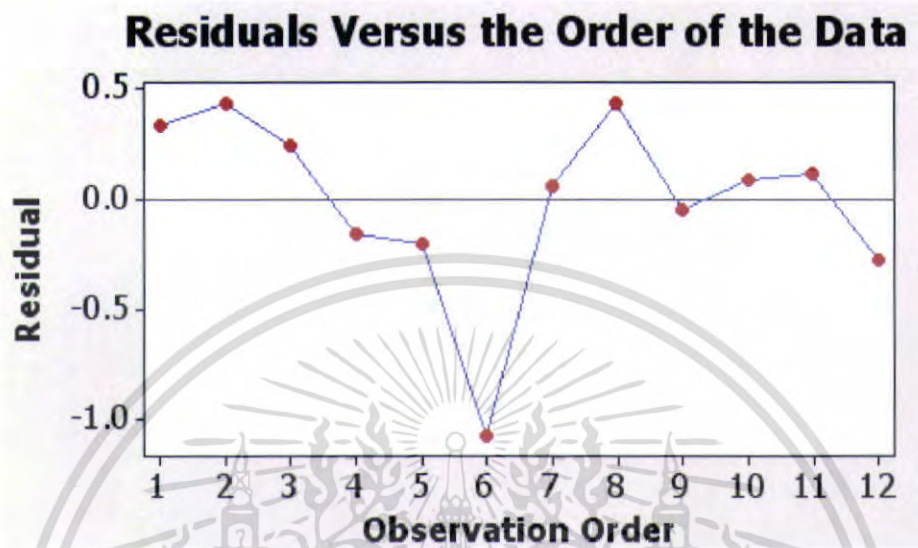
Residuals Versus the Order of the Data



รูปที่ 4.8 ค่าส่วนตกค้างของอัตราการศึกษาหรือของอิเล็กทรอนิกส์กับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.8 เป็นรูปที่แสดงค่าส่วนตกค้างของอัตราการศึกษาหรือของอิเล็กทรอนิกส์กับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย Response Surface ซึ่งลักษณะของกราฟมีการกระจายตัวอย่างไม่มีรูปแบบแสดงว่าข้อมูลในการทดลองมีความเป็นอิสระต่อกัน



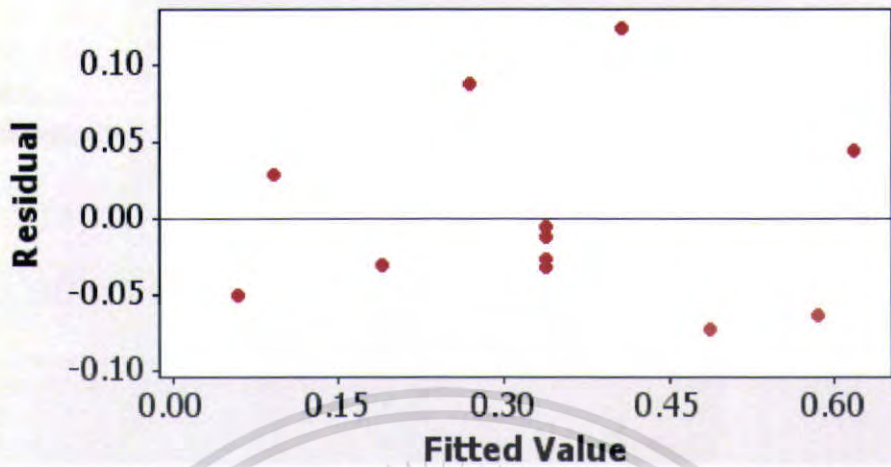
รูปที่ 4.9 ค่าส่วนตกค้างของค่าความหยาบผิวชิ้นงานกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล

จากรูปที่ 4.9 เป็นรูปที่แสดงค่าส่วนตกค้างของค่าความหยาบผิวชิ้นงานกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย Response Surface ซึ่งลักษณะของกราฟมีการกระจายตัวอย่างไม่มีรูปแบบแสดงว่าข้อมูลในการทดลองมีความเป็นอิสระต่อกัน

4.2.2.3 การตรวจสอบความเสถียรภาพของความแปรปรวน

เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของข้อมูล โดยการใช้ข้อมูลค่าส่วนตกค้างและค่าที่ถูกพิดในที่นี้คือ ค่าอัตราการศึกษาของเนื้อชิ้นงาน (MRR) ค่าอัตราการศึกษาหรือของอิเล็กทรอนิกส์ (EWR) และค่าความหยาบผิว (Surface Roughness) นำมาสร้างกราฟระหว่างค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกพิด

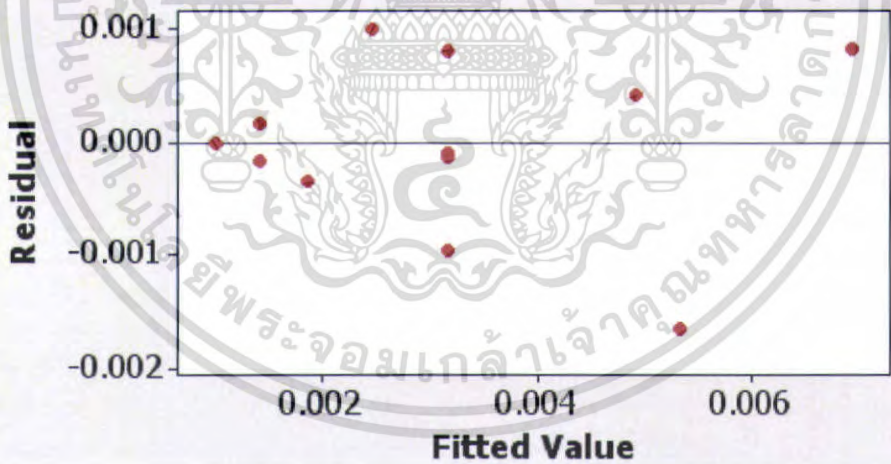
Residuals Versus the Fitted Values



รูปที่ 4.10 ค่าส่วนตกค้างกับค่าอัตราการผลิตของเนื้อชิ้นงาน (MRR)

จากรูป 4.10 ลักษณะของกราฟสรุปได้ว่า ข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติมีความเป็นอิสระของข้อมูลไม่มีแนวโน้มในลักษณะรูปแบบต่างๆ และมีความสม่ำเสมอของความแปรปรวน

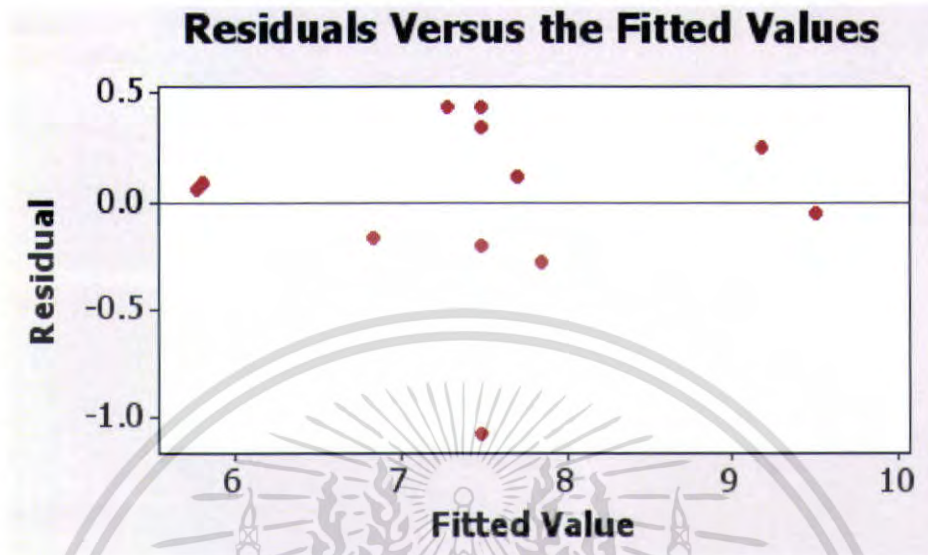
Residuals Versus the Fitted Values



รูปที่ 4.11 ค่าส่วนตกค้างกับค่าอัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์ (EWR)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 4.11 ลักษณะของกราฟสรุปได้ว่า ข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติมีความเป็นอิสระของข้อมูลไม่มีแนวโน้มในลักษณะรูปแบบต่างๆ และมีความสม่ำเสมอของความแปรปรวน



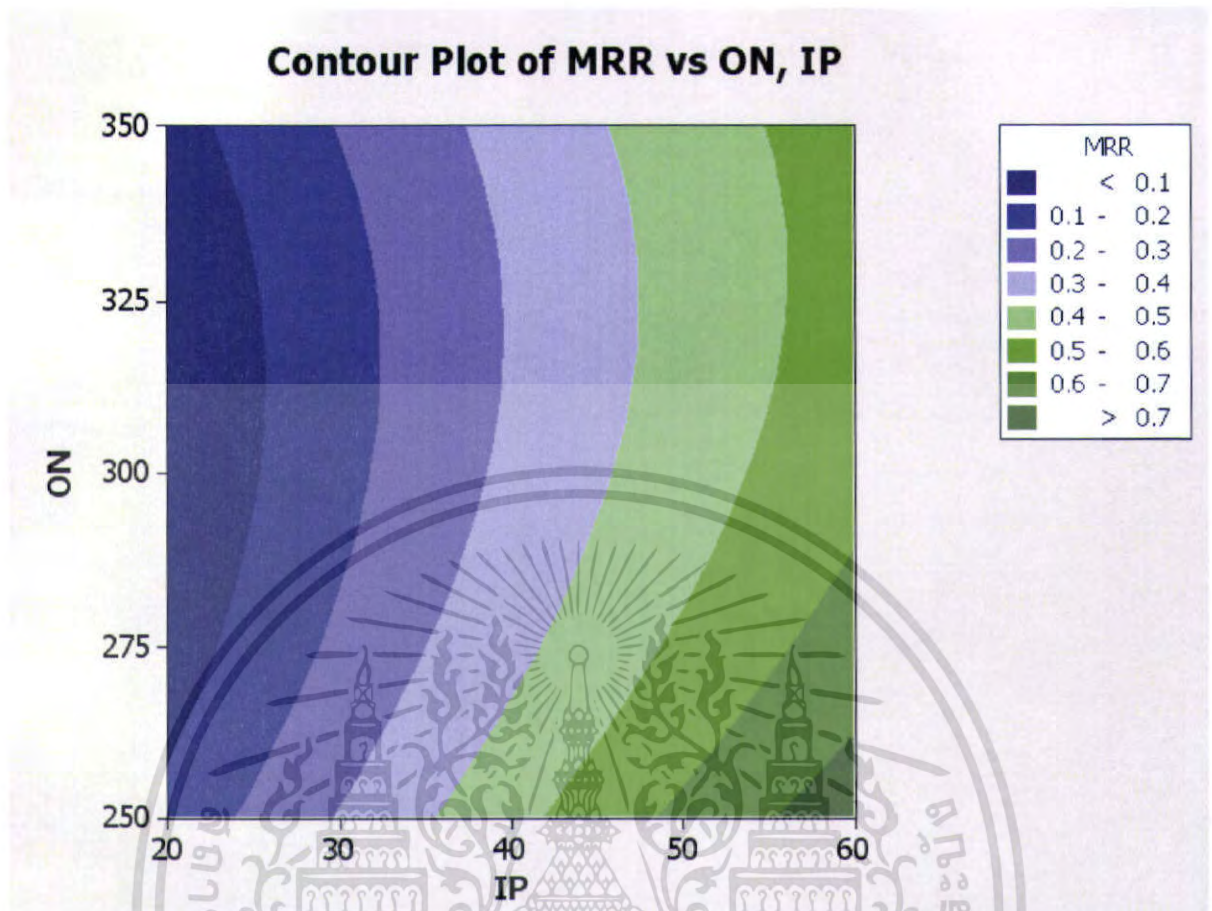
รูปที่ 4.12 ค่าส่วนตกค้างกับค่าความหยาบผิวของเนื้อชิ้นงาน (Surface Roughness)

จากรูป 4.12 ลักษณะของกราฟสรุปได้ว่า ข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติมีความเป็นอิสระของข้อมูลไม่มีแนวโน้มในลักษณะรูปแบบต่างๆ และมีความสม่ำเสมอของความแปรปรวน

4.2.3 การหาค่าที่ดีที่สุดด้วยกราฟโครงร่าง (Contour Plot)

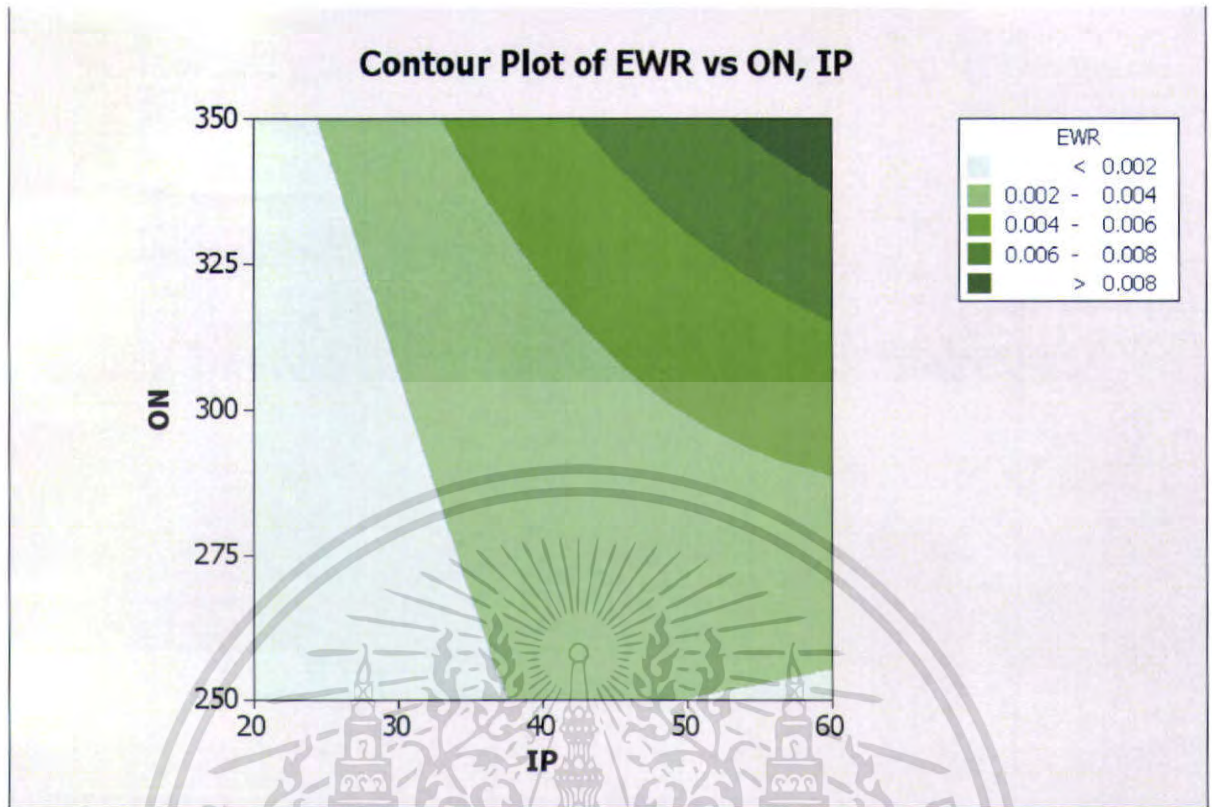
กราฟโครงร่าง (Contour Plot) มีความสำคัญมากในการวิเคราะห์พื้นผิวตอบ (Response Surface) ซึ่งจะช่วยให้ทราบถึงรูปร่างของพื้นผิวตอบและตำแหน่งของจุดที่ดีที่สุดได้ค่อนข้างแม่นยำ

ในการสร้างกราฟจะใช้โปรแกรม Minitab ในการสร้าง โดยแกนแนวนอนก็คือค่า IP และ แกนแนวตั้งก็คือค่า ON ส่วนพื้นที่ข้างในกราฟ คือ ผลลัพธ์ที่ต้องการ



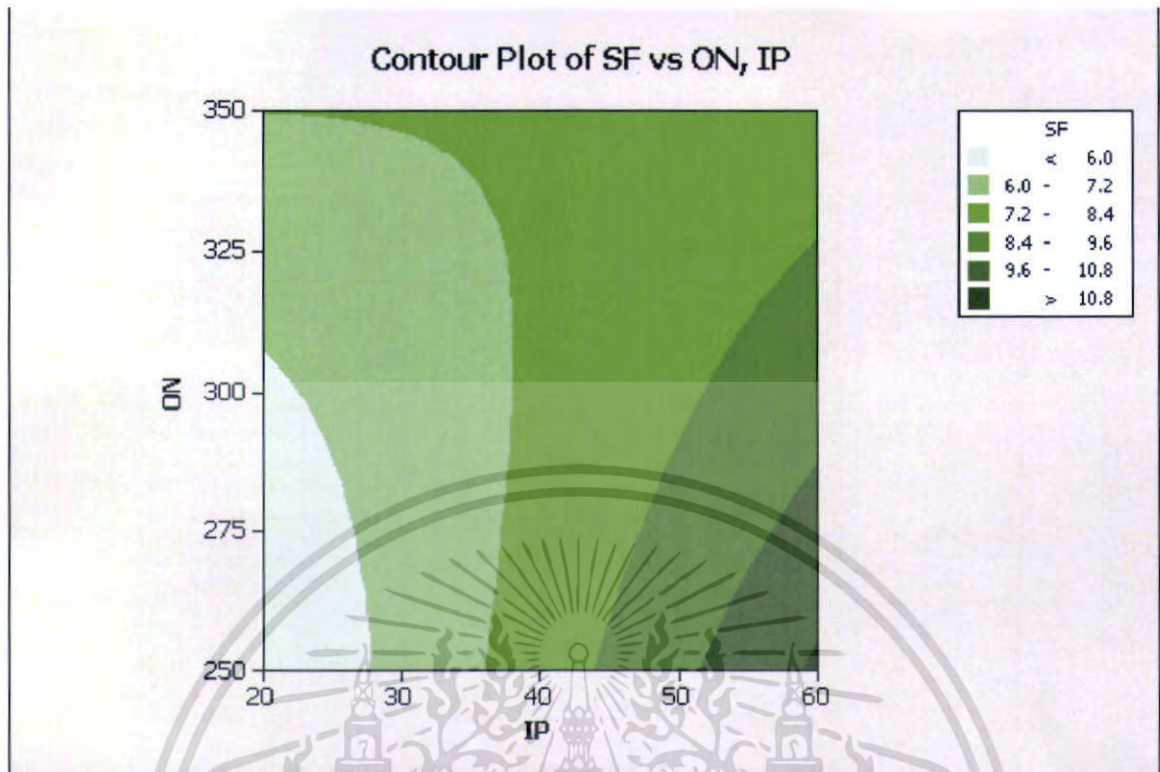
รูปที่ 4.13 กราฟโครงร่างของอัตราการตัดของเนื้อชิ้นงาน (MRR)

จากรูปที่ 4.13 ช่วงที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลอง นั่นคือค่า IP 56 – 60 A และค่า ON 250 – 260 μsec ซึ่งค่าในช่วงนี้จะส่งผลให้อัตราการตัดชิ้นงาน มีการตัดชิ้นงานที่เร็วที่สุด



รูปที่ 4.14 กราฟโครงร่างของอัตราการศึกษาหรือของอิเล็กทรอนิกส์ (EWR)

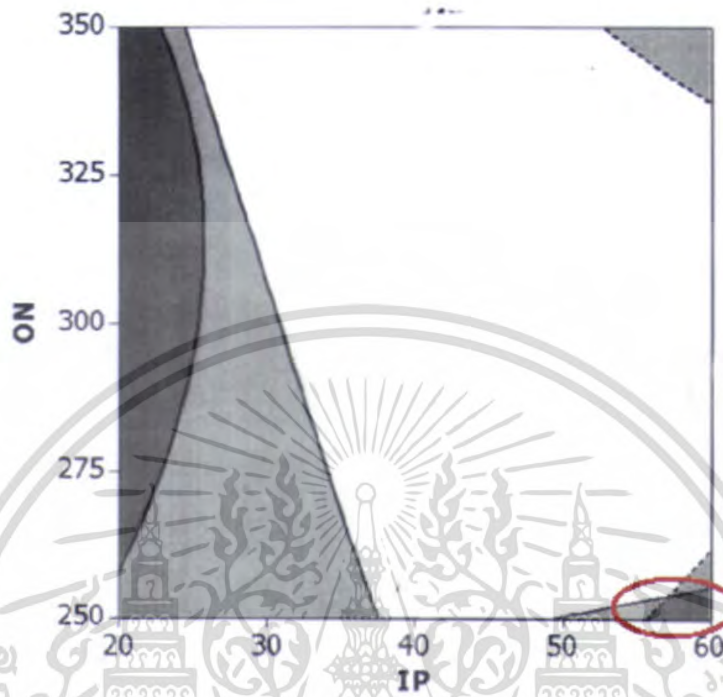
จากรูปที่ 4.14 ช่วงที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลอง นั้นคือค่า IP 20 – 37 A , 49 – 60 A และค่า ON 250 – 350 μsec , 250 – 258 μsec ซึ่งค่าในช่วงนี้จะส่งผลให้อัตราการศึกษาหรือของอิเล็กทรอนิกส์ มีการศึกษาหรือของอิเล็กทรอนิกส์ที่น้อยที่สุด



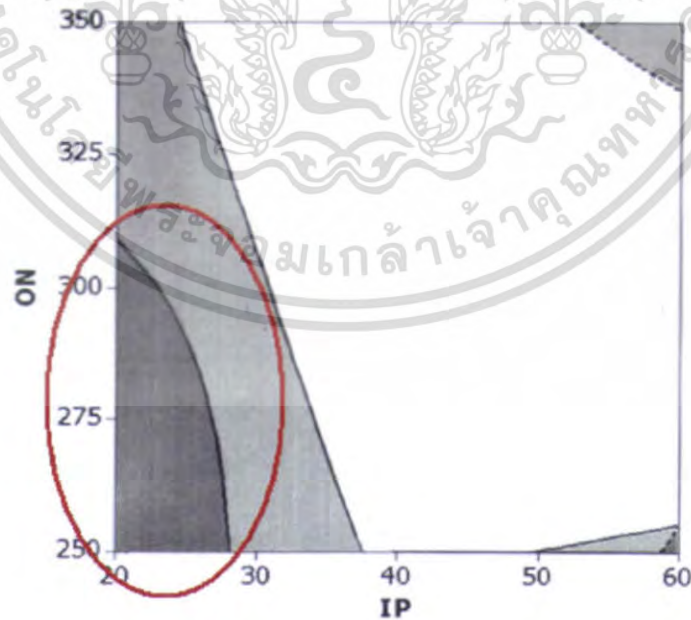
รูปที่ 4.15 กราฟโครงสร้างของค่าความหยาบผิวของเนื้อชิ้นงาน (Surface Roughness)

จากรูปที่ 4.15 ช่วงที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลอง นั่นคือค่า IP 20 – 28 A และค่า ON 250 – 315 μsec ซึ่งค่าในช่วงนี้จะส่งผลให้ค่าความหยาบผิวของเนื้อชิ้นงาน มีความเรียบของเนื้อชิ้นงานที่ดีที่สุด

4.2.4 ผลการทดลองยืนยันค่าที่ดีที่สุดของการซ้อนทับของกราฟโครงร่าง (Contour Plot)



รูปที่ 4.16 ช่วงที่ดีที่สุดระหว่างอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR) และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR)



รูปที่ 4.17 ช่วงที่ดีที่สุดของอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR) และความหยาบผิวชิ้นงาน

(Surface Roughness)

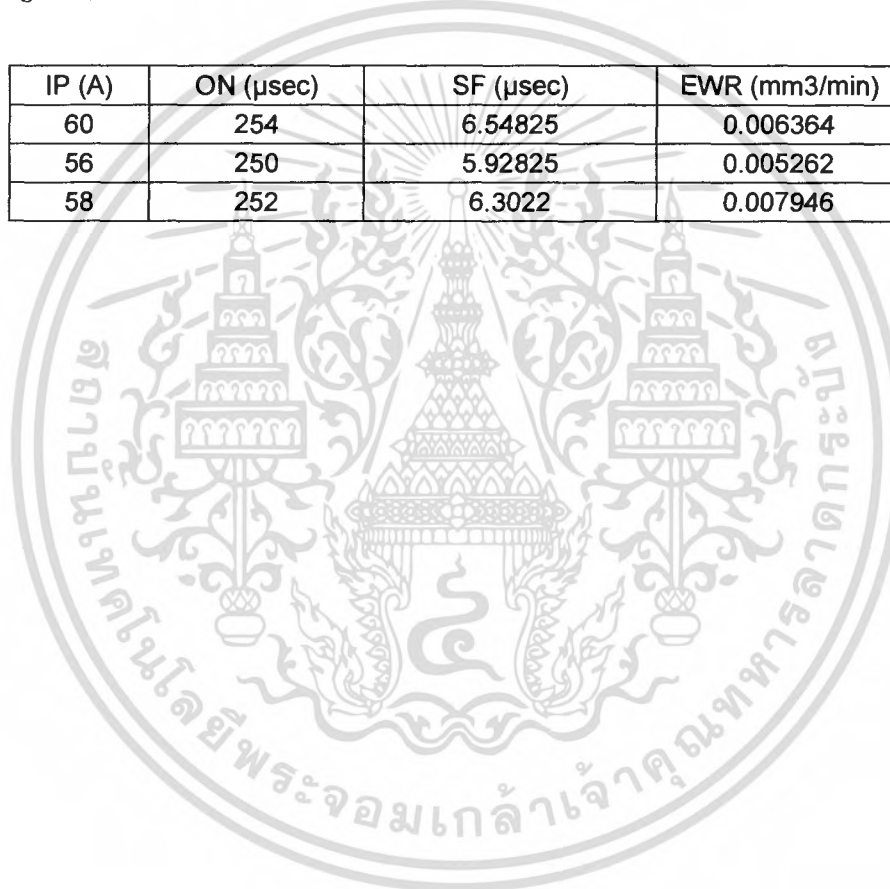
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ตารางค่าที่ได้จากการทดสอบซ้ำของ อัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR) และอัตราการสึกหรอของ อิเล็กโทรด (EWR) ที่ได้จากกราฟโครงร่างทั้งสองกราฟซ้อนทับ

IP (A)	ON (μsec)	MRR (mm^3/min)	EWR (mm^3/min)
60	254	0.777987	0.006364
56	250	0.79798	0.005262
58	252	0.877117	0.007946

ตารางที่ 4.4 ตารางค่าที่ได้จากการทดสอบซ้ำของ อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR) และความหยาบผิวชิ้นงาน (Surface Roughness) ที่ได้จากกราฟโครงร่างทั้งสองกราฟซ้อนทับ

IP (A)	ON (μsec)	SF (μsec)	EWR (mm^3/min)
60	254	6.54825	0.006364
56	250	5.92825	0.005262
58	252	6.3022	0.007946



บทที่ 5

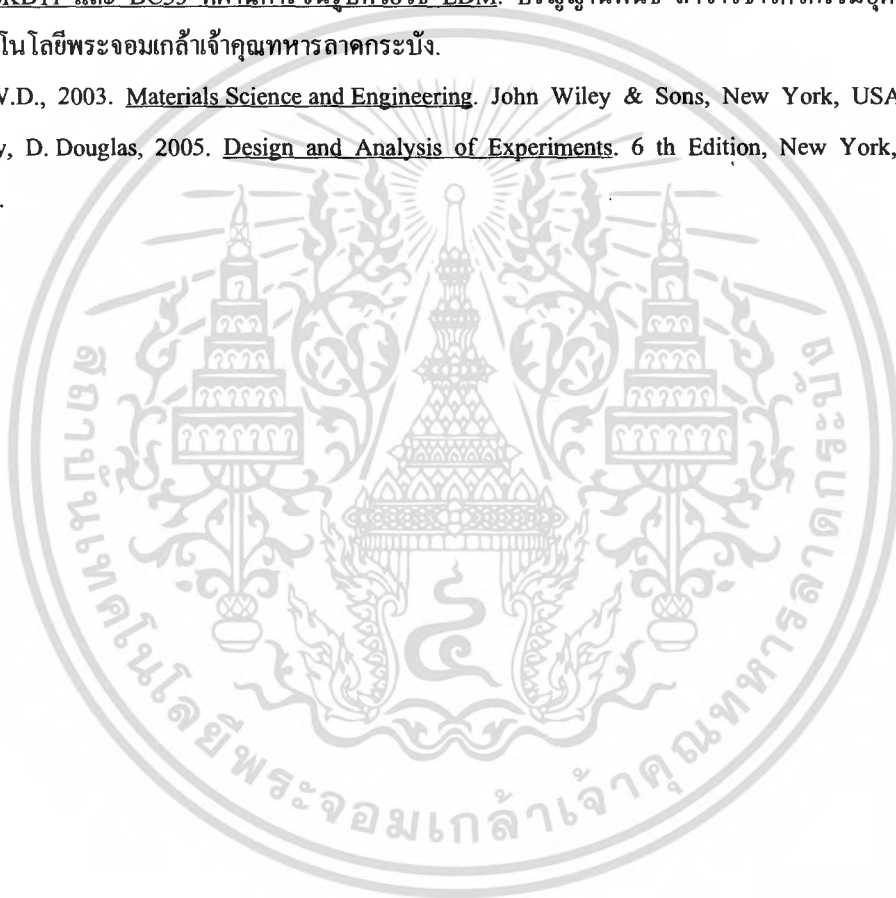
สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองเพื่อหาค่า อัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR) อัตราการสึกหรอของแท่งอิเล็กโทรด (EWR) และความหยาบผิวของชิ้นงาน (Surface Roughness) ที่ดีที่สุด ทางกลุ่มผู้จัดทำโครงการได้ทำการวางแผน ออกแบบ ทำการทดลอง และนำค่าที่ได้จากการทดลองมาหาค่า อัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR) อัตราการสึกหรอของแท่งอิเล็กโทรด (EWR) และความหยาบผิวของชิ้นงาน (Surface Roughness) หลังจากนั้นนำค่าต่างๆนี้มาวิเคราะห์ผลโดยพล็อต เป็น กราฟ Contour Plot ทั้ง 3 ค่า และนำกราฟโครงร่าง (Contour Plot) นี้มาซ้อนทับกันเพื่อหาช่วงของค่าที่ดีที่สุดในการสปาร์คชิ้นงาน แต่ในการซ้อนทับของกราฟโครงร่าง (Contour Plot) นั้นปรากฏว่าบริเวณค่าที่ดีที่สุดในการทดลองไม่อยู่ตรงบริเวณเดียวกัน ดังนั้นจึงต้องแบ่งผลการทดลองออกเป็น 2 คำตอบ ผลการทดลองที่ 1 นั้นประกอบด้วยกราฟโครงร่าง (Contour Plot) ของอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR) และ อัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR) มาซ้อนทับกัน โดยช่วงของค่าที่ดีที่สุดในการซ้อนทับนั้นมีค่า ช่วงเวลาการปล่อยกระแสไฟฟ้า (IP) อยู่ที่ 56 – 60 A และ ค่าการปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) อยู่ที่ 250 – 255 μsec ดังรูปที่ 5.1 ส่วนผลการทดลองที่ 2 นั้นประกอบด้วยกราฟ Contour Plot ของอัตราการสึกหรอของแท่งอิเล็กโทรด (EWR) และ ค่าความหยาบผิว (Surface Roughness) มาซ้อนทับกัน โดยช่วงของค่าที่ดีที่สุดในการซ้อนทับนั้นมีค่า ช่วงเวลาการปล่อยกระแสไฟฟ้า (IP) อยู่ที่ 20 – 28 A ค่าการปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) อยู่ที่ 250 – 305 μsec ดังรูปที่ 5.2

หลังจากที่ได้ช่วงของค่าที่ดีที่สุด ทั้ง 2 คำตอบ ออกมาแล้ว จึงทำการยืนยันค่าที่ได้มาว่าเป็นช่วงที่ดีที่สุดจริง โดยทำการสุ่มทำการทดลองซ้ำภายในช่วงค่าที่ดีที่สุดของ อัตราการสึกหรอของแท่งอิเล็กโทรด (EWR) กับ อัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR) ดังแสดงตารางที่ 5.1 และ อัตราการสึกหรอของแท่งอิเล็กโทรด (EWR) กับ ค่าความหยาบผิว (Surface Roughness) ดังแสดงตารางที่ 5.2 แล้วทำการวิเคราะห์ผลคำตอบ ปรากฏว่าค่าที่ได้มานั้นมีค่าใกล้เคียงกับช่วงของค่าที่ดีที่สุด จึงสามารถสรุปได้ว่า ช่วงของค่าที่ดีที่สุดของ อัตราการสึกหรอของแท่งอิเล็กโทรด (EWR) กับ อัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR) คือช่วง (IP) อยู่ที่ 56 – 60 A และ (ON) อยู่ที่ 250 – 255 μsec ส่วนค่าที่ดีที่สุดของ อัตราการสึกหรอของแท่งอิเล็กโทรด (EWR) กับ ค่าความหยาบผิว (Surface Roughness) คือช่วง (IP) อยู่ที่ 20 – 28 A และ (ON) อยู่ที่ 250 – 305 μsec

หนังสืออ้างอิง

- ปารเมศ ชูติมา, 2545. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปิยวุฒิ เหมือนแร่, ชรรยง ลี้มสุวรรณ และ สมบูรณ์ กิจบุญ, 2549. การศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการตัดเหล็กกล้า SKD11 และ DC53 ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธี EDM. ปรินญาณิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- 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.





ภาคผนวก ก
การคำนวณหาสัมประสิทธิ์ความถดถอย (Regression Coefficient)
และความหมายของสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ
(Coefficient of Determination: R^2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหาสัมประสิทธิ์ความถดถอย (Regression Coefficient)

ตัวอย่างการคำนวณ

ข้อมูลเกี่ยวกับอัตราการหยุดของเนื้อชิ้นงาน (y) จำนวน 12 ข้อมูลได้ถูกเก็บขึ้น โดยมีตัวแปรของกระบวนการ 2 ตัว คือ กระแสไฟฟ้าสูงสุด (IP) (x_1) และช่วงระยะเวลาการปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) (x_2) ซึ่งข้อมูลทั้งหมดแสดงในตารางที่ ผก 1 ทำการสร้างแบบจำลองการถดถอยแบบเชิงเส้นพหุนามให้แก่ข้อมูลเหล่านี้ แบบจำลองนี้มีรูปแบบคือ

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \varepsilon$$

โดยที่ เมทริกซ์ X และ เวกเตอร์ y คือ

$$X = \begin{bmatrix} 1 & 40 & 300 \\ 1 & 40 & 300 \\ 1 & 60 & 300 \\ 1 & 25.86 & 335.36 \\ 1 & 40 & 300 \\ 1 & 40 & 300 \\ 1 & 25.86 & 264.64 \\ 1 & 40 & 350 \\ 1 & 54.14 & 264.64 \\ 1 & 20 & 300 \\ 1 & 40 & 250 \\ 1 & 54.14 & 335.36 \end{bmatrix} \quad y = \begin{bmatrix} 0.326 \\ 0.307 \\ 0.664 \\ 0.12 \\ 0.333 \\ 0.312 \\ 0.158 \\ 0.357 \\ 0.523 \\ 0.008 \\ 0.532 \\ 0.415 \end{bmatrix}$$

ตารางที่ ผก 1 ข้อมูลของอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน

ลำดับที่	ช่วงระยะเวลาการปล่อยกระแสไฟฟ้า (μsec)	กระแสไฟฟ้าสูงสุด (A)	อัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (mm^3/min)
1	300	40	0.326
2	300	40	0.307
3	300	60	0.664
4	335.36	25.86	0.12
5	300	40	0.333
6	300	40	0.312
7	264.64	25.86	0.158
8	350	40	0.357
9	264.64	54.14	0.523
10	300	20	0.008
11	250	40	0.532
12	335.26	54.14	0.415

เมทริกซ์ $X'X$

$$X'X = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 40 & 40 & \dots & 54.14 \\ 300 & 300 & \dots & 335.26 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 40 & 300 \\ 1 & 40 & 300 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 54.14 & 335.26 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 12 & 480 & 3600 \\ 480 & 20799.76 & 144000 \\ 3600 & 144000 & 1090001.32 \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเวกเตอร์ $x'y$ คือ

$$x'y = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 40 & 40 & \dots & 54.14 \\ 300 & 300 & \dots & 335.36 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 7.831 \\ 7.93 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 7.582 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 89.93 \\ 3729.97 \\ 26922.35 \end{bmatrix}$$

ตัวประมาณกำลังสองน้อยสุดของ β คือ

$$\hat{\beta} = (x'x)^{-1}x'y$$

หรือ

$$\hat{\beta} = \begin{bmatrix} 10.082 & -0.025 & -0.03 \\ -0.025 & 0.001 & 0 \\ -0.03 & 0 & 0.0001 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 89.93 \\ 3729.97 \\ 26922.35 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 5.8737 \\ 0.0830 \\ -0.0057 \end{bmatrix}$$

สมการกำลังสองน้อยสุด และค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ คือ

$$\hat{y} = 5.8737 + 0.0830x_1 + (-0.0057)x_2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

β_1 = สัมประสิทธิ์ความถดถอย (Regression Coefficient)

$\beta_1 > 0$ x และ y มีความสัมพันธ์ในทางเดียวกัน

$\beta_1 < 0$ x และ y มีความสัมพันธ์ในทางตรงกันข้าม

$\beta_1 \rightarrow 0$ x และ y สัมพันธ์กันน้อย

$\beta_1 = 0$ x และ y ไม่มีความสัมพันธ์กัน

สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination: R^2)

เป็นตัวบอกให้ทราบถึงว่าสัดส่วนที่ตัวแปร x สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลง y ได้

$R^2 =$ ความแปรปรวนของ y ที่เกิดจาก x / ความแปรปรวนของ y ทั้งหมด

คุณสมบัติของ R^2 ถ้า R^2 มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าเปอร์เซ็นต์ที่ x สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงค่าของ y มีค่ามาก หรือ x และ y มีความสัมพันธ์กันมาก





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



MILL TEST CERTIFICATE

ORIENTAL COPPER CO., LTD.

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

OFFICE : 27th Fl., Bangkok Insurance/W.C.A. Building,
 25 South Sathon Road, Tungmahamek, Sathon,
 Bangkok 10120, Thailand
 TEL : +66 (0) 2697-5100
 FAX : +66 (0) 2697-5199
 PLANT : 70045 M.6 Anusara Nakhon Industrial Estate
 Klongsamru Sub-District, Anusara Muang,
 Chonburi 20000, Thailand
 TEL : (66 38) 743-444 (Auto 10 Lines)
 FAX : (66 38) 213-256
 Web Site : www.orientalcopper.com

ตารางที่ ผจ 1 ใบแสดงส่วนผสมอิเล็กทรอนิกส์โทรทองแดง

Size	Weight	Conductivity	Copper	Bend Test	Tensile Strength	Elongation	Dimension
Thickness x Width x Length	kgs	%IACS	%		MPa	%	Check
DIA 3/8" RB x 5000 mm	532.2	101.0	99.90 min		288.8	17.9	PASSED
DIA 12 mm RB x 5000 mm	487.5	100.8	99.98 min		285.7	21.0	PASSED
1/8" x 5/8" SE x 5000 mm	583.1	100.5	99.90 min	PASSED	298.5	15.5	PASSED
3/16" x 3/4" SE x 5000 mm	523.9	100.9	99.98 min	PASSED	300.4	16.4	PASSED
3/16" x 1 1/4" SE x 5000 mm	529.3	100.8	99.98 min	PASSED	302.7	15.2	PASSED
1/4" x 1" SE x 5000 mm	505.3	100.9	99.98 min	PASSED	298.8	19.0	PASSED
3/8" x 1 1/2" SE x 5000 mm	713.9	101.1	99.98 min	PASSED	297.7	16.2	PASSED
3/8" x 2" SE x 5000 mm	495.8	101.1	99.98 min	PASSED	288.4	18.7	PASSED

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

Prepared by
 Quality Assurance

Approved by
 Plant Manager

ตารางที่ ผข 2 ใบแสดงส่วนผสมเหล็กกล้าเครื่องมือ AUD11

Aug. 17 2007 08:25PM P1

FAX NO. : 6622941888

TES CERTIFICATE



AICHI STEEL CORPORATION

KARIYA PLANT:KARIYA-CITY,
AICHI-PREF.,JAPAN
Date : MAR.19.2004 No K-0745

Messrs : _____

Material	Size (NOM)	Section Code	Charge No	Condition Code	Bundle No	No of Piece	Netweight (KGS)
AUD11	75.00 X 75.00	20	12644	Q	FLOG07	7	870

Ladle Analysis(%)										
C.	Si.	Mn.	P.	S.	Cu.	Ni.	Cr.	Mo.	B.	V X 100
x100	x100	x100	x100	x100	x100	x100	x100	x100	x10000	
			MAX		MAX					
108	105	58	19	5	2	16	986	150		S

Mechanical Properties								
Heat Treatment (°C)		Tensile Test				Impact Test	Hardness Test	Bend Test
2nd Quenching	Tempering	Yield Strength kgf/cm ² , 1000psi	Tensile Strength kgf/cm ² , 1000psi	Elongation %	Reduction of Area %	Charpy test J/cm ² -R		

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

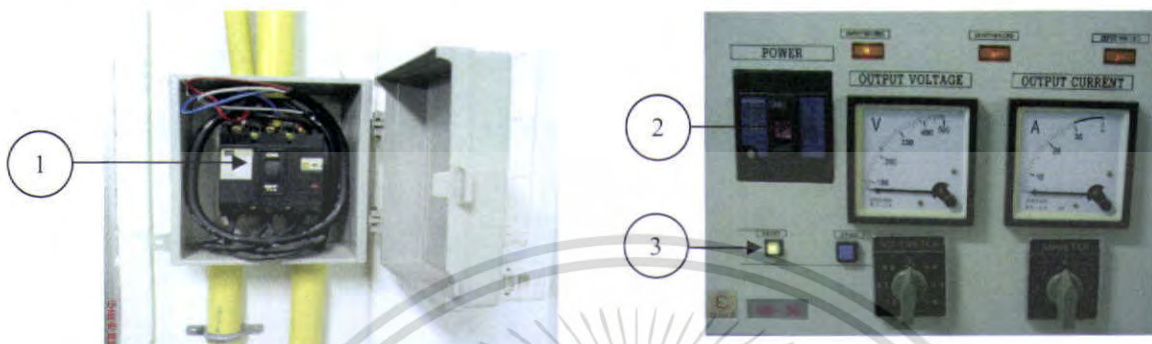
Hardness Test (As delivered)	Grain Size Test	Micro Structure	Macro Structure	Remark

Section	10 : Round Bar 20 : Square Bar 30 : Hexagonal Bar	60 : Flat Bar(Stainless steel) 61 : Equal Leg Angle Bar(Stainless steel) 62 : Unequal Leg Angle Bar(Stainless steel)	Condition	A : Annealed B : Low Temperature Annealed D : Solution Heat Treated G : Centerless Ground H : Quenched and Tempered N : Normalized	P : Cold Drawn Q : Spheroidized R : Hot Rolled S : Pickled T : Bar Turned
Code	50 : Flat Bar(Round edge) 51 : Flat Bar(Square edge) 54 : Flat Bar(Parabolic type)	63 : Channel Bar 66 : Sheet Bar(Stainless steel) 91 : Wire Rod	Code	 Chief, Quality Control Dept. AICHI STEEL CORPORATION	

1. การเปิดเครื่อง

1.1 เปิดสวิตช์เบรกเกอร์ ตามหมายเลข 1 ที่อยู่บริเวณมุมห้องด้านหน้าประตูทางเข้า

1.2 เปิดสวิตช์ POWER คู่แปลงไฟฟ้า ตามหมายเลข 2 ที่อยู่บริเวณด้านหลังเครื่องอิตีเอ็ม จากนั้นให้กดปุ่ม RESET ตามหมายเลข 3 เมื่อมีเสียงบี๊บดังขึ้น



1.3 เปิดสวิตช์เบรกเกอร์ด้านหลังเครื่องอิตีเอ็ม ตามหมายเลข 4

1.4 กดปุ่ม SOURCE: ON (สีเขียว) ที่แผงควบคุมด้านหน้าเครื่องอิตีเอ็ม ตามหมายเลข 5 แล้วรอนเครื่องบูทระบบเสร็จ

1.5 กดปุ่ม POWER: ON (สีเขียว) ตามหมายเลข 6 แล้วรอนมอเตอร์ปรากฏข้อความให้กดปุ่ม ENT (สีเขียว) ตรงแผงควบคุมด้านซ้าย



1.6 เมื่อเครื่องอยู่ในสถานะที่พร้อมใช้งานแล้ว ให้ผู้ใช้เครื่อง ทำการติดตั้งชิ้นงาน และอิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การตั้งค่าศูนย์หรือการกำหนดจุดเริ่มต้น

ในการตั้งค่าศูนย์นั้นจะต้องดำเนินการตั้งค่าศูนย์ทีละแกน โดยจะมีรายละเอียดดังนี้

2.1 เริ่มต้นโดยการตั้งค่าศูนย์ในแนวแกน X ก่อน ให้เคลื่อนอิลีกโทรคโดยกดปุ่มบังคับทิศทาง (อยู่ตรงแผงควบคุมข้างซ้าย) เข้าใกล้ชิ้นงานตามแนวแกน X ห่างจากชิ้นงานประมาณ 1-2 เซนติเมตร

2.2 เมื่ออิลีกโทรคอยู่ในจุดที่พร้อมจะตั้งค่าศูนย์แล้ว ให้เลือกคำสั่ง Appr Face ตามหมายเลข 7 ซึ่งเป็นคำสั่งที่ใช้ในการตั้งค่าศูนย์ชิ้นงาน

2.3 ให้กดเลือกแกน X บนหน้าจอมอนิเตอร์ ตามหมายเลข 8 แล้วป้อนทิศของแกน X เป็นบวก (+)

2.4 กดปุ่ม ON ตามหมายเลข 9

2.5 กำหนดการเคลื่อนที่เป็นแบบ ABS (Absolute) หรือ INC (Increment) โดยกดเลือกตามหมายเลข 10

2.6 กดปุ่ม ENT (สีเขียว) ตรงแผงควบคุมด้วยซ้าย จากนั้นหัวอิลีกโทรคจะเข้าทำการเคลื่อนที่ค้นหาจุดอ้างอิงตามแกน X จนกระทั่งอิลีกโทรคชนกับชิ้นงาน แล้วอิลีกโทรคจะถอยห่างออกจากชิ้นงานเป็นระยะ 1 มม. โดยอัตโนมัติ

2.7 ทำการตั้งค่าศูนย์ของชิ้นงานในแกน Y และแกน Z ต่อ ไป ตามขั้นตอนที่ 2.2 ถึง 2.6



3.8 เมื่อทำการตั้งค่าศูนย์ของชิ้นงานครบทั้ง 3 แกนแล้ว ผู้ใช้สามารถบังคับอิลีกโทรคมายังจุดเริ่มต้น (Origin Point) ได้โดยใช้คำสั่ง Move ตามหมายเลข 11 จากนั้นกดปุ่ม XYZ ตามลำดับ ตามหมายเลข 12 หน้าจอมอนิเตอร์จะแสดงพิกัดเริ่มต้นที่ X=0, Y=0, Z=0 ต่อไปให้กดปุ่ม ENT (สีเขียว) ตรงแผงควบคุมด้วยซ้าย อิลีกโทรคก็จะเคลื่อนที่มายังจุดเริ่มต้น (Origin Point)

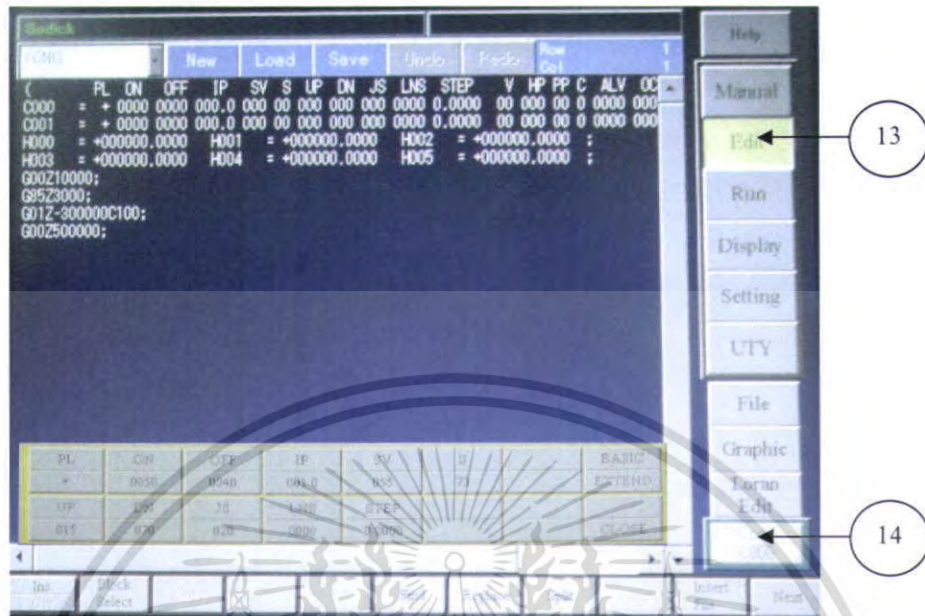


3. วิธีการป้อนโค้ดต่างๆ และการเริ่มสปาร์ก

3.1 ป้อน G-Code โดยการเข้าโหมด Edit ด้านขวาของจอคอมพิวเตอร์ ตามหมายเลข 13 ในโหมด Edit นี้ การป้อนพิกัดในแนวแกน XYZ จะต้องมีคณด้วย 10000 เสมอ

3.2 กำหนดเงื่อนไขในการสปาร์ก กรณีที่ต้องการเปลี่ยนแปลงค่าของเงื่อนไขในการสปาร์กให้กดปุ่มเงื่อนไขตามหมายเลข 14 แล้วทำการเปลี่ยนแปลงค่าเงื่อนไขที่ต้องการ แต่สำหรับผู้ใช้ที่ไม่สนใจเงื่อนไขในการสปาร์กสามารถใช้ค่าดีฟอลต์ (default) ของเครื่องในการสปาร์กได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



3.3 เข้าแถบเมนู Run เพื่อทำการทดสอบ G-Code และเงื่อนไขในการสปาร์ก ตามหมายเลข 15

3.4 เมื่อทดสอบโปรแกรมผ่านแล้ว กดเลือก START G30 หมายเลข 16

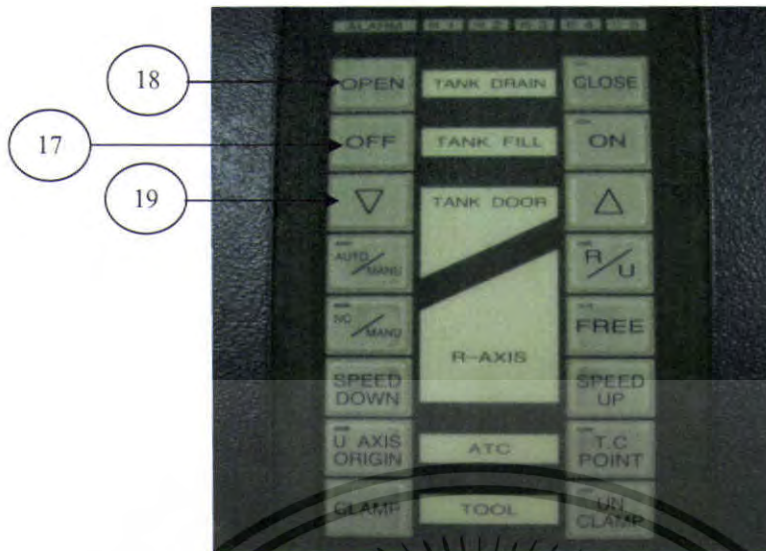
3.5 กดปุ่ม ENT (สีเขียว) ตรงแผงควบคุมด้วยซ้ำ จากนั้นเครื่องก็จะเริ่มทำการสปาร์กขึ้นงาน ตามโค้ดที่ผู้ใช้ได้
ป้อนเข้าไป



4. การถอดอิเล็กโทรดและชิ้นงาน

ก่อนจะถอดอิเล็กโทรดและชิ้นงานออก จะต้องทำการระบายสารไดอิเล็กตริกออกจากแท่งก้ำให้หมดก่อน โดยปฏิบัติดังต่อไปนี้

- 4.1 กดปุ่ม OFF TANK FILL หมายเลข 17
- 4.2 กดปุ่ม OPEN TANK DRAIN หมายเลข 18 แล้วรอนสารไดอิเล็กตริกไหลกลับสู่ถังเก็บจนหมด
- 4.3 กดปุ่ม TANK DOOR หมายเลข 19 เพื่อนำแท่งก้ำตั้ง
- 4.2 ทำการถอดอิเล็กโทรดและชิ้นงานออกจากตัวจับยึด
- 4.3 บังคับอิเล็กโทรดมายังตำแหน่งกึ่งกลางของเครื่อง



5. การปิดเครื่อง

5.1 ทำการปิดระบบเมคคานิก โดยการกดปุ่ม POWER OFF

5.2 ปิดโปรแกรม โดยการกดปุ่ม SOURCE OFF

5.3 ทำการปิดสวิทช์ด้านหลังเครื่องอดีเอ็ม หมายเลข 4

5.4 ปิดสวิทช์เครื่องแปลงไฟฟ้า หมายเลข 2

5.5 ปิดสวิทช์เบรกเกอร์ (Breaker) หมายเลข 1

5.6 ทำความสะอาดเครื่องอดีเอ็ม

ข้อควรระวัง !

- กรณีหน้าจอมอนิเตอร์แสดงข้อความ Error เนื่องจากผู้ใช้งานบังคับอดีเอ็ม ทรูดไปชนกับชิ้นงาน เมื่อเกิดการชนกันเกิดขึ้น ผู้ใช้จะไม่สามารถบังคับอดีเอ็ม ทรูดให้เคลื่อนที่ออกจากชิ้นงานได้ วิธีการให้ปฏิบัติดังนี้

1. กดปุ่ม ACK ตรงแผงควบคุมด้านซ้าย เพื่อยกเลิกคำสั่งล่าสุด

2. กดปุ่ม ST ค้างไว้ตามด้วยปุ่ม X หรือ Y หรือ Z ในแผงควบคุม เพื่อบังคับอดีเอ็ม ทรูดให้ออกห่างจากชิ้นงาน

- กรณีที่แท่งค้ำไม่ยกขึ้น ให้สังเกตที่แรงกดดันจะต้องอยู่ในช่วง 0.2-0.4 MPa ถ้าไม่อยู่ในช่วงนี้สามารถปรับได้ที่ตัววาล์วปรับความดัน ตามรูปด้านล่างนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้