

การศึกษาการสึกกร่อนของขั้วอิเล็กโทรดของเครื่องกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า  
The Study of Electrode Wear in Electrical Discharge Machine



นาย พีรวิชญ์ พิมพ์สวัสดิ์  
Mr. Peerawitch Pimsaward

นาย วีระพงศ์ ตันหัน  
Mr. Weerapong Tunhun

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ปี

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

พ.ศ.

คณะวิศวกรรมศาสตร์

2544

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขหมู่.....

ปีการศึกษา 2544

เลขทะเบียน..... 45805

.b.....

ฉบับ, เดือน, ปี..... 18 ก.พ. 2546

.i.....

เอกสารฉบับนี้ได้รับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาการสึกกร่อนของขั้วอิเล็กโทรมของเครื่องกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า

The Study of Electrode Wear in Electrical Discharge Machine

นักศึกษา

นาย พีรวิชญ์ พิมพ์สวัสดิ์ รหัสประจำตัว 41014608

นาย วีระพงษ์ ตันหัน รหัสประจำตัว 41014748

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

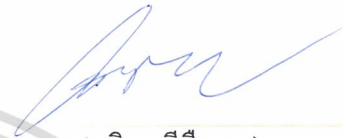
สาขาวิชา

วิศวกรรมอุตสาหกรรม

ปีการศึกษา

2544

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์



(อ.วิภู ศรีสืบสาย)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การศึกษาการสึกกร่อนของขั้วอิเล็กโทรคของเครื่องกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า
นักศึกษา	นาย พีรวิษณุ พิมพ์สวัสดิ์ นาย วีระพงษ์ ตันหัน
ระดับการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา	2544
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	อ.วิญ ศรีสืบสาย

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาการสึกกร่อนขั้วอิเล็กโทรคและชิ้นงานของเครื่อง EDM (Electrical Discharge Machine) หรือเครื่องกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า โดยมีวัตถุประสงค์คือ ต้องการหาอัตราการสึกกร่อนของขั้วอิเล็กโทรคและชิ้นงานด้วยปัจจัยที่แตกต่างกัน ได้แก่ รูปแบบหน้าตัดของขั้วอิเล็กโทรค วิธีการเดินของขั้วอิเล็กโทรคที่แตกต่างกันทั้งแกน Z และ XYZ และสภาวะในการทำงานที่แตกต่างกัน โดยการนำข้อมูลจากการทดลองมาประมวลผลทางสถิติด้วยวิธี ANOVA Analysis เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการสึกกร่อนของขั้วอิเล็กโทรค รวมถึงความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นและนำเสนอออกมาในรูปของกราฟ ซึ่งสามารถนำผลการทดลองดังกล่าวมาประยุกต์ได้ โดยสามารถใช้ทำนายอัตราการสึกกร่อนของขั้วอิเล็กโทรคและชิ้นงานล่วงหน้าได้ เมื่อทราบถึงปัจจัยต่างๆ สามารถที่จะใช้คำนวณค่าใช้จ่ายและมูลค่าชิ้นงานที่เกิดขึ้นได้อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	The Study of Electrode Wear in Electrical Discharge Machine
Student	Mr. Peerawitch Pimsaward Mr. Weerapong Tunhun
Degree	Bachelor of Engineering in Industrial Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic Year	2001
Advisor	Mr. Wipoo Sriseubsai

## ABSTRACT

This Thesis is concerned about a study of electrode wear in EDM machine. The purpose of this paper is to determine the metal wear ratio between electrode of EDM and work piece with different parameter. The parameter is such as the different of level of current, the ways of electrode movement: x-axis and x, y, z-axis. The experimental data are utilized to statistic calculation by ANOVA analysis. The result of these is the factors of electrode wear. This relationship that occur by ANOVA analysis are present by graph. We can use the result to predict the wear of electrode and work pieces. Besides they can be utilized to calculate the cost and value of work pieces.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ II ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

การทำโครงการนี้ คณะผู้ดำเนินโครงการงานขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ วิภู ศรีสืบสาย เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างสูง สำหรับความรู้ คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และความเอาใจใส่ทุกด้าน

ขอบคุณ ผศ.พรศักดิ์ อรรถวานิช, คร. สรรพสิทธิ์ ลิ้มนรรรัตน์, อ.พลชัย โชติปราชญ์กุล, อ.เอกพจน์ ต้นตราภีวัฒน์, อ. อุคม จันทร์จรัสสุข เป็นอย่างสูงเช่นกันสำหรับคำแนะนำความช่วยเหลือในการแก้ปัญหาทุกด้าน และให้คำปรึกษาเป็นอย่างดี

นาย พีรวิชญ์ พิมพ์สวัสดิ์

นาย วีระพงษ์ ตันหัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ III ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	VII

## บทที่ 1 บทนำ

1.1	ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2	วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3	ขอบเขตของการศึกษา.....	1
1.4	ประโยชน์ที่ได้จากการศึกษา.....	2

## บทที่ 2 ทฤษฎี

2.1	ทฤษฎีเกี่ยวกับ EDM.....	3
2.2	ทฤษฎีเกี่ยวกับหลักการ ANOVA.....	10
2.3	ทฤษฎีการหาขนาดตัวอย่าง.....	18

## บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1	การออกแบบการทดลอง.....	20
3.2	วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการทดลอง.....	20
3.3	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	20
3.4	วิธีการทดลอง.....	20
3.5	ขั้นตอนการทดลอง.....	23

## บทที่ 4 ผลการทดลอง

4.1	ผลการทดลอง.....	25
-----	-----------------	----

## บทที่ 5 การวิเคราะห์ผลการทดลองและประมวลผลโดยใช้ โปรแกรม SPSS

5.1	การประมาณขนาดตัวอย่าง.....	38
-----	----------------------------	----

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2	การวิเคราะห์ข้อมูล.....	40
5.3	การประมวลผลด้วยโปรแกรม SPSS 10.0.1.....	41
บทที่ 6 สรุปผล / การประยุกต์ใช้		
6.1	สรุปผล.....	51
6.2	การประยุกต์ใช้.....	52
	บรรณานุกรม.....	56
	ภาคผนวก.....	57



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา แลvต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1	เปอร์เซ็นต์การใช้วัสดุชนิดต่างๆทำขั้วอิเล็กทรอนิกส์ โทรค..... 7
ตารางที่ 2.2	คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำชิ้นงาน และลักษณะเฉพาะบางอย่าง..... 8
ตารางที่ 2.3	ค่าการสึกกร่อนที่มุมของอิเล็กทรอนิกส์แต่ละชนิดเมื่อใช้ในสภาพประจุไฟฟ้าแบบต่างๆกับชิ้นงานที่ทำจากวัสดุชนิดต่างๆ..... 8
ตารางที่ 2.4	ผลการทดลองสำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวน..... 12
ตารางที่ 2.5	ANOVA สำหรับตัวแบบแบบอิทธิพลคงที่ประเภทจำแนกทางเดียว..... 13
ตารางที่ 4.1	ผลที่ได้จากการทดลองสปาร์กในแนวแกน Z ของเหล็ก (ชิ้นงาน) ด้วยระดับต่างๆกัน 10 ระดับ ของหน้าตัดวงกลม..... 26
ตารางที่ 4.2	ผลที่ได้จากการทดลองสปาร์กในแนวแกน Z ของทองแดง (ขั้วอิเล็กทรอนิกส์ โทรค) ด้วยระดับต่างๆกัน 10 ระดับ ของหน้าตัดวงกลม..... 27
ตารางที่ 4.3	ผลที่ได้จากการทดลองสปาร์กในแนวแกน XYZ ของเหล็ก (ชิ้นงาน) ด้วยระดับต่างๆกัน 10 ระดับ ของหน้าตัดวงกลม..... 29
ตารางที่ 4.4	ผลที่ได้จากการทดลองสปาร์กในแนวแกน XYZ ของทองแดง (ขั้วอิเล็กทรอนิกส์ โทรค) ด้วยระดับต่างๆกัน 10 ระดับ ของหน้าตัดวงกลม..... 30
ตารางที่ 4.5	ผลที่ได้จากการทดลองสปาร์กในแนวแกน Z ของเหล็ก (ชิ้นงาน) ด้วยระดับต่างๆกัน 10 ระดับ ของหน้าตัดสี่เหลี่ยม..... 32
ตารางที่ 4.6	ผลที่ได้จากการทดลองสปาร์กในแนวแกน Z ของทองแดง (ขั้วอิเล็กทรอนิกส์ โทรค) ด้วยระดับต่างๆกัน 10 ระดับ ของหน้าตัดสี่เหลี่ยม..... 33
ตารางที่ 4.7	ผลที่ได้จากการทดลองสปาร์กในแนวแกน XYZ ของเหล็ก (ชิ้นงาน) ด้วยระดับต่างๆกัน 10 ระดับ ของหน้าตัดสี่เหลี่ยม..... 35
ตารางที่ 4.8	ผลที่ได้จากการทดลองสปาร์กในแนวแกน XYZ ของทองแดง (ขั้วอิเล็กทรอนิกส์ โทรค) ด้วยระดับต่างๆกัน 10 ระดับ ของหน้าตัดสี่เหลี่ยม..... 36
ตารางที่ 5.1	Univariate Analysis of Variance Between-Subjects Factors..... 41
ตารางที่ 5.2	Tests of Between-Subjects Effects. Dependent Variable: ABC..... 42
ตารางที่ 5.3	Post Hoc Tests..... 43
ตารางที่ 5.4	Homogeneous Subsets..... 49

## สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1	สภาพของการสปาร์คในแต่ละครั้ง..... 4
รูปที่ 2.2	แสดงอัตราการสึกกร่อนของขั้วอิเล็กโทโรดและชิ้นงาน..... 5
รูปที่ 3.1	ชิ้นงานและขั้วอิเล็กโทโรดหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยม..... 17
รูปที่ 3.2	ชิ้นงานและขั้วอิเล็กโทโรดหน้าตัดรูปวงกลม..... 17
รูปที่ 3.3	ชั่งน้ำหนักชิ้นงานและขั้วอิเล็กโทโรด..... 17
รูปที่ 3.4	การจับยึดชิ้นงานหน้าตัดรูปวงกลม..... 18
รูปที่ 3.5	การจับยึดชิ้นงานหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยม..... 18
รูปที่ 3.6	การตั้งค่าพิกัดของเครื่อง EDM..... 18
รูปที่ 4.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์อัตราการสึกกร่อนเฉลี่ยที่สภาวะต่างๆ ด้วยเงื่อนไข การสปาร์คแนวแกน Z หน้าตัดวงกลม..... 24
รูปที่ 4.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์อัตราการสึกกร่อนเฉลี่ยที่สภาวะต่างๆ ด้วยเงื่อนไข การสปาร์คแนวแกน XYZ หน้าตัดวงกลม..... 27
รูปที่ 4.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์อัตราการสึกกร่อนเฉลี่ยที่สภาวะต่างๆ ด้วยเงื่อนไข การสปาร์คแนวแกน Z หน้าตัดสี่เหลี่ยม..... 30
รูปที่ 4.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์อัตราการสึกกร่อนเฉลี่ยที่สภาวะต่างๆ ด้วยเงื่อนไข การสปาร์คแนวแกน XYZ หน้าตัดสี่เหลี่ยม..... 33

# บทที่ 1

## บทนำ (Introduction)

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา(Statement and Significant of Problem)

ปัจจุบันในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนของเครื่องกลได้รับการพัฒนาให้ทันสมัยยิ่งขึ้น โดยการใช้คอมพิวเตอร์มาประยุกต์เข้าด้วยกัน เรียกว่า CIM (Computer Integrated Manufacturing) ซึ่งสามารถควบคุมและแปลงสัญญาณไฟฟ้า ทำให้เครื่องจักรเคลื่อนที่ได้ตามต้องการ ระบบนี้เรียกว่า Computerized Numerical Control หรือ CNC ในปัจจุบันนี้เครื่องจักรที่ใช้ CNC ควบคุมได้แก่ เครื่องกลึง เครื่องกัด เครื่องเจาะคว้าน เครื่องเชื่อม เครื่องเจียรนัย รวมถึงเครื่องกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า หรือ EDM (Electrical Discharge Machine) ด้วย แต่มีข้อจำกัดอยู่ว่า การขึ้นรูปด้วยเครื่องจักรธรรมดา เช่น กลึง ตะไบ ไส ตัดเจาะ เจียรนัย ถ้าชิ้นงานมีความแข็งมาก (เกิน 35 HRC) การขึ้นรูปก็ทำได้ยากลำบาก หรือ ถ้าชิ้นงานมีความแข็งน้อยการขึ้นรูปก็อาจทำให้เกิดการโค้งงอได้ เป็นต้น เครื่อง EDM จึงมีประโยชน์มากสามารถขึ้นรูปได้หลากหลายและสลัดซับซ้อนได้เป็นอย่างดี ด้วยการอาศัยหลักการสปาร์คของไฟฟ้า หลักการดังกล่าวจะทำให้ขั้วอิเล็กโทรดเกิดการสึกกร่อนโดยจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับลักษณะของการใช้งาน ดังนั้น เพื่อให้การใช้งานเครื่อง EDM และการใช้ขั้วอิเล็กโทรดเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ และเกิดประโยชน์สูงสุด จึงควรวางปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการสึกกร่อนของขั้วอิเล็กโทรดว่าปัจจัยตัวใดบ้างที่มีผลต่อการสึกกร่อนของ ขั้วอิเล็กโทรด และมีผลกระทบอย่างไร มีความสำคัญมากน้อยเพียงใด เหตุผลดังกล่าวนี้จึงเป็นที่มาของ “การศึกษาการสึกกร่อนของขั้วอิเล็กโทรดเครื่องกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า”

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา (Objectives)

- 1.2.1 เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการสึกกร่อนที่เกิดขึ้นที่ภาวะต่างๆกัน อันได้แก่ รูปแบบหน้าตัดของขั้วอิเล็กโทรด กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการสปาร์คงานและวิธีการเดินของขั้วอิเล็กโทรดที่แตกต่างกันทั้งแกน Z และ XYZ
- 1.2.2 นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการสึกกร่อนและอัตราการสึกกร่อนที่เกิดขึ้น

### 1.3 ขอบเขตของการศึกษา(Scope of the Study)

ทำการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการสึกกร่อนของขั้วอิเล็กโทรดที่เกิดขึ้นที่ภาวะต่างๆกัน อันได้แก่ รูปแบบหน้าตัดของขั้วอิเล็กโทรด สภาวะการทำงานและวิธีการเดินของขั้วอิเล็กโทรดที่แตกต่างกันทั้งแกน Z และ XYZ มีปัจจัยหรือ พารามิเตอร์ ได้แก่

สภาวะในการขึ้นรูปงาน มี ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกัน 10 ระดับ ได้แก่ 6, 8, 10, 12, 14, 17, 20, 22, 27 และ 30 แอมแปร์

รูปแบบหน้าตัดของขั้วอิเล็กโทรด ได้แก่ หน้าตัดสี่เหลี่ยมขนาด 7.70 x 7.70 มม.<sup>2</sup> และ หน้าตัดขนาดวงกลม  $\varnothing$  12 มม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการเดินของขั้วอิเล็กโทรม มี 2 ลักษณะ คือ เดินเฉพาะแนวคิ่ง (แกน Z) โดยขนาดขั้วอิเล็กโทรมและขนาดชิ้นงานเท่ากันพอดี และเดินทั้ง 3 แกน (แกน XYZ) โดยกั๊ดเป็นหลุมซึ่งมีรูปร่างเดียวกันกับหน้าตัดขั้วอิเล็กโทรม

เมื่อ อัตราการสึกกร่อน = น้ำหนักของขั้วอิเล็กโทรมที่สึกไป (g) / น้ำหนักของชิ้นงานที่สึกไป (g)

เมื่อได้ค่าการสึกกร่อนที่เกิดขึ้นแล้ว นำค่าที่ได้มาทำการวิเคราะห์โดยวิธีการทางสถิติโดยใช้โปรแกรม SPSS for window เพื่อทำการวิเคราะห์ว่าปัจจัยตัวใดบ้างที่มีผลต่อการสึกกร่อน

## 1.4 ประโยชน์ที่ได้จากการศึกษา(Advantage from Study)

- 1.4.1 สามารถนำมาประยุกต์ในการใช้งานได้โดยสามารถทำนายอัตราการสึกกร่อนทั้งขั้วอิเล็กโทรมและชิ้นงานก่อนการใช้งาน และสามารถนำมาประเมินค่าใช้จ่ายในการขึ้นรูปแต่ละครั้งได้
- 1.4.2 สร้างทักษะในการออกแบบการทดลอง การวางแผนและการดำเนินงาน
- 1.4.3 ได้รับความรู้และประสบการณ์ในการใช้งานเครื่อง EDM
- 1.4.4 เพิ่มประสบการณ์ในการทำงานที่มีการนำเอาสถิติมาวิเคราะห์ข้อมูล
- 1.4.5 ส่งเสริมการใช้ความคิดในการทำงาน
- 1.4.6 ฝึกทักษะการทำงานเป็นทีมและเป็นระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎี (Theory)

#### 2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับ EDM

EDM เป็นกระบวนการเคลื่อนย้ายเศษวัสดุออกจากชิ้นงานที่นำไฟฟ้าได้ โดยจะเกิดขึ้นด้วยการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้เกิดพัลส์ที่มีความถี่สูง ส่งไปยังขั้วอิเล็กโทรดแล้วผ่านไปยังชิ้นงานที่ต้องการด้วยระยะที่ใกล้กันมากแต่ไม่ติดหรือสัมผัสกัน เกิดปรากฏการณ์การสปาร์ค โดยการสปาร์คที่เกิดขึ้นจะต้องสปาร์คอยู่ในของเหลวที่เป็นฉนวนไฟฟ้า เช่น น้ำหรือน้ำมัน เช่น Paraffin, kerosene เป็นต้น และมีอุณหภูมิขณะสปาร์คประมาณ 8000-12000 °C (14432-21632 °F) ทำให้ชิ้นงานถูกหลอมละลาย

##### 2.1.1 ปรากฏการณ์การสปาร์ค

ปรากฏการณ์การสปาร์ค เป็นชื่อเรียกโดยรวมของปรากฏการณ์ต่างๆ ซึ่งเกิดขึ้นในกรณีที่ใส่แรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าที่มีฉนวนไฟฟ้า ประเภทของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซกั้นกลางอยู่จนทำให้ฉนวนไฟฟ้าเหล่านี้เกิดการสูญเสียความเป็นฉนวน และเกิดมีกระแสไฟฟ้าไหลขึ้นอย่างรุนแรง

ดังนั้น ปรากฏการณ์การสปาร์ค จึงหมายถึง การผิบบังคับ ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัสดุตัวกลางที่ปกคลุมแล้ว ไฟฟ้าจะไหลผ่านยาก และเมื่อถึงเวลาที่มีการผิบบังคับนี้ถึงขีดจำกัด ก็จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขนาดใหญ่ ไหลขึ้นมาอย่างกะทันหัน

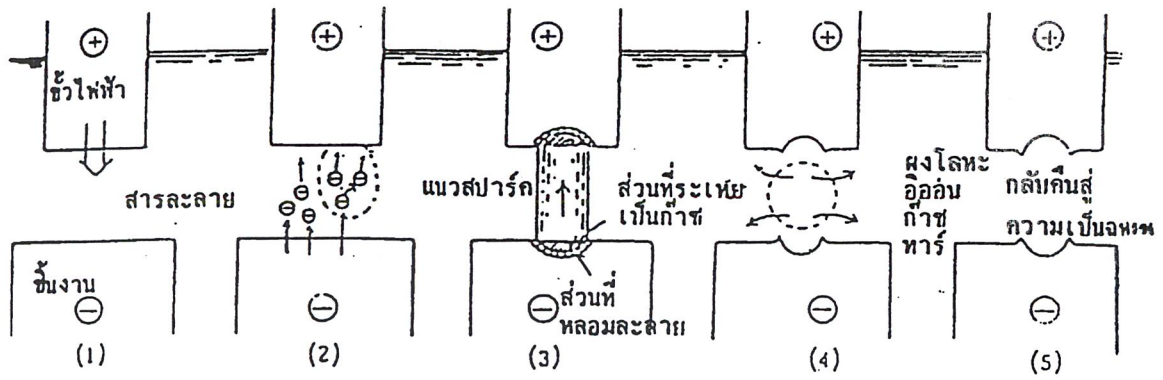
การทำให้เกิดการสปาร์คโดยมนุษย์สร้างขึ้น และได้นำมาประยุกต์ใช้งานในชีวิตประจำวันนั้น ได้แก่ หลอดฟลูออเรสเซนต์ หรือหลอดนีออน ซึ่งเป็นปรากฏการณ์การสปาร์คในสูญญากาศ และมีการนำหลักการดังกล่าวนี้มาประยุกต์ใช้ในทางอุตสาหกรรม ได้แก่ การเชื่อมแบบอาร์ค การขึ้นรูปด้วยวิธีสปาร์ค(EDM)

##### 2.1.2 ทฤษฎีการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่อง EDM

การขึ้นรูปด้วยเครื่อง EDM หมายถึง วิธีการขึ้นรูป ซึ่งใช้กับมักใช้กับโลหะเป็นส่วนใหญ่ โดยใช้หลักการสปาร์ค ดังที่ได้กล่าวมาในข้างต้น โดยจะทำขึ้นในสารละลาย โดยใช้ทองแดง, แกรไฟต์ เป็นขั้วไฟฟ้า และวัตถุที่จะนำมาขึ้นรูปได้นั้น จะไม่เกี่ยวกับความแข็ง เพียงแต่ต้องเป็นวัตถุที่ไฟฟ้าไหลผ่านได้

ในการขึ้นรูปด้วยเครื่อง EDM จะไม่ปล่อยให้กระแสไฟฟ้าไหลอย่างต่อเนื่องกัน เหมือนกับการเชื่อมแบบอาร์ค แต่จะใช้การเปิด/ปิดกระแสไฟฟ้าเป็นช่วงจังหวะ เพื่อป้องกันมิให้ความร้อนจากการสปาร์คหลอมละลายวัสดุมากเกินไปจนเสียรูปทรง

ในการใช้งานจริงนั้นจะใช้ระบบ NC (numerical control) ควบคุมให้เกิดการสปาร์คถึงหลายแสนครั้งใน 1 วินาที โดยสภาพของพัลส์(pulse) แต่ละลูกของการสปาร์คจะเป็นดังรูป 2.1 โดยมีกระบวนการดังนี้



รูปที่ 2.1 สภาพของการสปาร์คในแต่ละครั้ง

ก. ใส่แรงดันไฟฟ้า

เริ่มต้นด้วยการใส่แรงดันไฟฟ้า(ประมาณ 60-280 V) ที่ระหว่างชิ้นงานกับขั้วไฟฟ้า (เรียกว่า ระหว่างขั้ว) ในการขึ้นรูปนั้น โดยปกติจะใช้ น้ำมัน เพื่อที่จะรักษาให้ความต้านทานของฉนวนระหว่างขั้วมีค่าสูง (ช่องว่างการสปาร์ค) ให้แคบลงได้ ซึ่งจะมีผลดีในการขึ้นรูปที่มีความละเอียดสูง

ข. สูญเสียความเป็นฉนวน

เมื่อย่นระยะระหว่างขั้วให้เข้าใกล้กันเรื่อยๆ จนถึงระยะหนึ่ง (หลายµm-หลายสิบลµm) สารละลายจะเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวน อีออนประจุลบจะถูกดึงไปสู่ขั้วที่เป็นบวก

ค. สปาร์คหลอมละลาย

เมื่อเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวนขึ้นแล้ว อิเล็กตรอน ซึ่งเป็นประจุลบ จะเริ่มไหลเป็นจำนวนมากอย่างรุนแรง ซึ่งก็คือ การสปาร์คนั่นเอง บริเวณส่วนที่เกิดการสปาร์คขึ้นนี้จะมีกระแสไฟฟ้าที่มีความหนาแน่นสูงมาก ๆ ไหลในช่วงเวลาสั้นๆ ซึ่งในการขึ้นรูปจริงนั้น กระแสไฟฟ้าจะมีขนาดตั้งแต่ 0.1 แอมแปร์จนถึงหลายร้อยแอมแปร์ พลังงานที่ถูกปล่อยออกมาในช่วงนี้ จะทำให้บริเวณที่เกิดการสปาร์คมีอุณหภูมิสูงมาก (3,000 °Cขึ้นไป)จนบางส่วนของชิ้นงานถูกหลอมละลาย นอกจากนั้นแล้วสารละลายบริเวณที่เกิดการสปาร์คก็จะถูกความร้อนที่เกิดขึ้นทำให้กลายเป็นก๊าซไป และเกิดความดันที่สูงมากเป็นบางส่วน

ง. เย็นตัว

ความดันที่เกิดขึ้นนี้ จะทำให้ส่วนที่หลอมละลายของชิ้นงานหลุดกระเด็นออกไป ซึ่งเมื่อถูกสารละลายรอบข้างดูดแย่งความร้อนไปก็จะเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วกลายเป็นเศษผงเล็กๆ

จ. กลับสู่ความเป็นฉนวน

หลังจากที่การสปาร์คหนึ่งครั้ง แล้วจบลง จะรองกันว่าสารละลายจะกลับคืนสู่ความเป็นฉนวน โดยไม่มีกระแสแรงดันไฟฟ้าเข้าไป การรอในเวลานี้จะช่วยป้องกันการสปาร์คแบบผิดปกติ เช่น การสปาร์คซ้ำ หรือสปาร์คเฉพาะเป็นบางจุด อันเนื่องมาจาก การสะสมหรือที่บวมจับตัวกันของอีออนที่ตกค้างอยู่ระหว่างขั้วหรือเศษผงที่เกิดจากการสปาร์คภายหลังที่กลับคืนสู่ความเป็นฉนวนแล้วก็จะทำการสปาร์คเช่นเดิมอีก โดยเริ่มจากขั้น ก.

2.1.3 วัสดุที่ใช้ทำขั้วอิเล็กโทรด

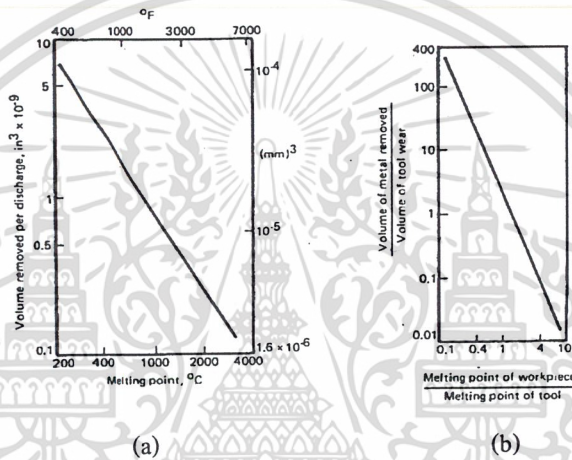
วัสดุที่ใช้ทำขั้วอิเล็กโทรดที่ดี ต้องมีคุณสมบัติ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เป็นสื่อนำไฟฟ้าที่ดี
- มีอัตราการสึกกร่อนต่ำ
- ง่ายต่อการ machine
- ให้ผิวสำเร็จที่ดีต่อพื้นผิวชิ้นงาน

ในการสปาร์กแต่ละครั้งจะต้องเกิดการสึกกร่อนของทั้งขั้วอิเล็กโทรดและชิ้นงาน อัตราการสึกกร่อนจะคิดจากปริมาตรขั้วอิเล็กโทรดที่สึกกร่อนไปต่อปริมาตรของชิ้นงานที่สึกกร่อนไป อัตราการสึกกร่อนจะมากขึ้นอยู่กับชนิดของอิเล็กโทรดและชิ้นงานที่ใช้ด้วย ตัวอย่างเช่น ขั้วอิเล็กโทรดและชิ้นงานที่ทำจากทองเหลืองทั้งคู่จะมีอัตราส่วนการสึกกร่อนประมาณ 0.5 หรือขั้วอิเล็กโทรดทองเหลืองกับชิ้นงานที่เป็นทั้งสแตนคาร์ไบด์ อัตราการสึกกร่อนจะมากกว่า 3 ถ้ามีการเลือกใช้อย่างเหมาะสม ค่าอัตราการสึกกร่อนก็จะไม่เกิน 0.1

จากรูปที่ 2.2 จะเห็นว่าปริมาตรที่ถูกกัดออกไปในการสปาร์กแต่ละครั้ง จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อจุดหลอมละลายเพิ่มขึ้น นั่นหมายความว่า ที่จุดหลอมละลายสูงๆ จะให้ค่า อัตราการสึกกร่อนที่สูงด้วย



รูปที่ 2.2 แสดงอัตราการสึกกร่อนของขั้วอิเล็กโทรดและชิ้นงาน

- (a) ปริมาตรเศษอิเล็กโทรดต่อจุดหลอมละลายในการสปาร์กแต่ละครั้ง  
 (b) อัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโทรดต่อชิ้นงานกับ อัตราส่วนของจุดหลอมละลาย

### 2.1.4 การเลือกขั้วอิเล็กโทรด

การเลือกขั้วอิเล็กโทรดเป็นส่วนหนึ่งในการใช้งานเครื่อง EDM โดยจะต้องเลือกวัสดุที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการทำขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งคุณสมบัติที่จะพิจารณากันโดยทั่วไปคือ มีการสึกหรอน้อย และมีประสิทธิภาพในการทำงานสูง ซึ่งในที่นี้เราจะพิจารณาวัสดุที่นิยมใช้ในการทำขั้วอิเล็กโทรดซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ โลหะ และแกรไฟต์ แต่ละชนิดต่างมีลักษณะเฉพาะในตัวเอง

#### 2.1.4.1 คุณสมบัติทั่วไปของโลหะที่ใช้ทำขั้วอิเล็กโทรด และแกรไฟต์

##### โลหะ (Metallic)

- 1) Brass/Zinc ทองเหลืองเป็นโลหะชนิดแรกที่ใช้ทำขั้วอิเล็กโทรด แต่เนื่องจากมันมีอัตราการสึกกร่อนสูง ทองเหลืองจึงมีอายุการใช้งานสั้น (ยกเว้นการนำไปทำเป็นแท่งทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กๆ เพื่อนำไปใช้ในการเจาะรู) ส่วนสังกะสีจะเป็นส่วนผสมกับทองแดงในการทำเป็นขั้วอิเล็กโทรด

- 2) Tellurium Copper เป็น โลหะที่ใช้ทำขั้วอิเล็กโทรดกันมากที่สุด จะมีส่วนผสมของTellurium อยู่ 0.5-1 % มันมีอัตราการทำงานและอัตราการสึกกร่อนที่ยอมรับได้ บางครั้งจะเรียกโลหะชนิดนี้ว่า “Telco”
- 3) Copper Tungsten มักใช้กับงาน EDM วัสดุที่ทำจากคาร์ไบด์และโลหะแข็ง(เช่น โคบอลต์ ,โมเลเดียม เป็นต้น) มันมีอัตราการสึกหรอต่ำ มีจุดหลอมละลายอยู่ที่ 3370 °C (6098 °F) โดยทั่วไปอัตราส่วนระหว่าง ทังสเทน/ทองแดงที่นิยมใช้กัน คือ 70/30
- 4) Silver Tungsten ใช้เมื่อต้องการความเป็นสื่อไฟฟ้าสูง ซึ่งเป็นคุณสมบัติของเงิน โลหะชนิดนี้จะมีราคาแพงจึงมักจะใช้กับงานที่ถูกออกแบบไว้เป็นพิเศษ
- 5) Tungsten ใช้เมื่อพิจารณาที่อัตราการสึกหรอและความแข็งแรงเป็นหลัก โดยไม่คำนึงถึงความเร็ว ทั้งสแตนบริสุทธิจะมีความเร็วในการทำงานEDMต่ำ เมื่อเทียบกับโลหะชนิดอื่นๆ แต่เมื่อนำไปผสมกับทองแดงก็จะมีอัตราการทำงานที่สูงขึ้น มันมีราคาแพงมากเมื่อเปรียบเทียบกับ โลหะผสมชนิดอื่น โดยที่นิยมใช้กันทั่วไปจะใช้ในการเจาะรูขนาดเล็ก

#### ข้อดีและข้อเสียของ ขั้วอิเล็กโทรด ที่ทำจากโลหะ

**ข้อดี** มีราคาถูก , ความแข็งแรงสูง มีความปลอดภัยในการทำงานเหมาะกับผู้ใช้ที่ไม่มีประสบการณ์

**ข้อเสีย** มีอัตราการสึกกร่อนสูง , มีความเร็วในการทำงานต่ำ

#### แกรไฟต์(Graphite)

- 1) Straight Graphite ในทางการค้ามีอยู่หลายระดับซึ่งความหนาแน่นและขนาดเกรนจะเป็นปัจจัยหลักต่อราคาและคุณภาพ ถ้าไม่ต้องการผิวสำเร็จที่ดี หรือรายละเอียดที่ตึงนักก็สามารถใช้ แกรไฟต์ชนิดถูกได้ แต่ถ้าต้องการงานที่มีผิวสำเร็จดี ก็ควรเลือกแกรไฟต์ที่มีขนาดเกรนเล็ก และความหนาแน่นสูง หลักพิจารณาโดยทั่วไปที่ทำให้เราเลือกใช้แกรไฟต์ คือมีอัตราการสึกหรอต่ำ ให้ผิวสำเร็จที่ดีและรายละเอียดที่ดีกว่า
- 2) Infiltrated Graphite จะมีทองแดงเป็นส่วนผสมอยู่ด้วย ซึ่งจะใช้กับงานที่เฉพาะเจาะจง เช่น งานที่มีรูปร่างซับซ้อน

#### ข้อดีและข้อเสียของ ขั้วอิเล็กโทรด ที่ทำจากแกรไฟต์

**ข้อดี** มีความแข็งแรงสูง , มีความสามารถในการทำงานดี , มีความเร็วในการทำงานสูง , มีอัตราการสึกหรอต่ำ

**ข้อเสีย** มีราคาสูง , เกิดฝุ่นและผงในการปฏิบัติงาน , ในการเตรียม ขั้วอิเล็กโทรดโดยใช้เครื่อง Wire-cuts จะใช้เวลานาน

#### เปรียบเทียบข้อดี ข้อเสียระหว่างโลหะและแกรไฟต์

##### ข้อดี

โลหะ : ราคาถูก , ความแข็งแรงสูง , ปลอดภัยสำหรับผู้ที่ไม่มีประสบการณ์ในการทำงานน้อย , สะอาด และการทำรูปร่าง ขั้วอิเล็กโทรดโดยใช้เครื่อง Wire-cut ทำได้สะดวกและรวดเร็ว

แกรไฟต์ : มีความแข็งแรงสูง , มีความสามารถในการทำงานดี , มีความเร็วในการปฏิบัติงานสูง และมีอัตราการสึกหรอต่ำ สามารถ เตรียม ขั้วอิเล็กโทรดโดยใช้เครื่องอุตสาหกรรมได้

##### ข้อเสีย

โลหะ : มีความเร็วในการปฏิบัติงานต่ำ , มีอัตราการสึกหรอสูง มีความสามารถในการถูกเจาะรูในต่ำ

แกรไฟต์ : ราคาสูง, มีความปลอดภัยต่ำในการปฏิบัติงานในสภาวะที่ยุ่งยาก, เกิดฝุ่นและผงในการปฏิบัติงาน และในการเตรียม ขั้วอิเล็กโทรดโดยใช้เครื่อง wire-cuts จะใช้เวลานาน โดยปริมาณการใช้วัสดุชนิดต่างๆทำขั้วอิเล็กโทรดจะเป็นไปตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 เปอร์เซ็นต์การใช้วัสดุชนิดต่างๆทำขั้วอิเล็กโทรด [1]

วัสดุ	ปริมาณการใช้
Graphite	85 %
Copper	6 %
Infiltrated Graphite	4 %
Copper Tungsten	3 %
Tungsten	1 %
Others	1 %

#### 2.1.4.2 กระบวนการในการเลือกขั้วอิเล็กโทรด

ในเบื้องต้นเราได้พิจารณาคุณสมบัติที่แตกต่างกันระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่ทำมาจากโลหะและแกรไฟต์ต่อไปจะเป็นหลักการพิจารณาเลือกขั้วอิเล็กโทรด โดยมีปัจจัยหลักๆ 5 ปัจจัย คือ

2.1.4.2.1 อัตราการเอาเนื้องานออก(Metal Removal Rate) เป็นการวัดอัตราการนำเนื้องานออกไปซึ่งโดยปกติจะเปรียบเทียบกันเป็น ลูกบาศก์นิ้ว/ชั่วโมง เรียกโดยย่อว่า MRR

2.1.4.2.2 ความต้านทานการสึกกร่อน (Resistance to Wear) เป็นหนึ่งในหลักเกณฑ์สำคัญที่ใช้ในการเลือกวัสดุทำขั้วอิเล็กโทรด ลักษณะการสึกมีอยู่ 4 ประเภท คือ ปริมาตร, มุม, ปลาย และการสึกด้านข้าง โดยการสึกที่มุมจะเป็นที่สนใจกันมากที่สุด

2.1.4.2.3 ความต้องการผิวสำเร็จ (Surface Finish Desired) ในบางครั้งความต้องการพื้นผิวสำเร็จก็เป็นส่วนหนึ่งในการเลือกวัสดุทำขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งถ้าต้องการผิวสำเร็จที่ดีก็ควรเลือกใช้แกรไฟต์

2.1.4.2.4 ราคาที่ใช้ในการทำรูปร่างขั้วอิเล็กโทรด (Fabrication Costs) ค่าใช้จ่ายนี้จะขึ้นอยู่กับรูปร่างขั้วอิเล็กโทรด ยิ่งรูปร่างของขั้วอิเล็กโทรดมีความซับซ้อนมากเท่าไร ค่าใช้จ่ายในการทำก็ยิ่งสูง

2.1.4.2.5 ราคาของวัสดุที่ใช้ทำขั้วอิเล็กโทรด (Raw Material Costs) ราคาของวัสดุที่จะใช้ทำ ขั้วอิเล็กโทรดก็เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในการพิจารณาวัสดุมาทำขั้วอิเล็กโทรด

#### 2.1.5 อุณหภูมิหลอมละลาย

บางครั้งในงานEDM ต้องรู้จักหลอมละลายของชิ้นงาน และอุณหภูมิ การทำงานของขั้ว อิเล็กโทรด ถ้าโลหะผสมมีจุดหลอมเหลวต่ำ เช่น อลูมิเนียม วัสดุที่ควรจะใช้ทำขั้วอิเล็กโทรดเป็นอันดับแรกควรจะเป็นทองแดง ทองแดงมีจุดหลอมเหลวที่ 1082 °C (1980°F) ดังตารางที่ 2.2 เมื่อผสมกับเทลลูเรียมจะมีจุดหลอมเหลวเพิ่มขึ้นเป็น 1095 °C (2003°F) ซึ่งใกล้เคียงกับจุดหลอมเหลวของอลูมิเนียม (660°C/1220°F) มากกว่าแกรไฟต์ ซึ่งมีจุดหลอมเหลวที่ 3500°C(6332°F) ซึ่งแตกต่างจากจุดหลอมเหลวของอลูมิเนียมถึง 5เท่า

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำชิ้นงาน และลักษณะเฉพาะบางอย่าง [1]

วัสดุ	ค่าความถ่วงจำเพาะ	จุดหลอมเหลว(°C)	จุดหลอมเหลว(°F)	ค่าความนำไฟฟ้า
Aluminum	2.70	1220	660	63.00
Cobalt	8.71	2696	1480	16.93
Copper	8.89	1980	1082	97.61
Manganese	7.30	2300	1260	15.75
Molybdenum	10.20	4757	2625	17.60
Nickel	8.80	2651	1455	12.89
Carbon Steel	-	2500	1371	12.00
Titanium	4.50	3308	1820	12.73
Tungsten	18.85	6098	3370	14.00

จากการพิจารณาจุดหลอมเหลว จะเห็นได้ว่าการทำงาน EDM กับ โลหะผสมที่มี อุณหภูมิต่ำ เช่น อลูมิเนียม, ทองเหลือง และทองแดงควรใช้ อิเล็กโทรดที่ทำจากโลหะที่มีอุณหภูมิต่ำ ส่วนโลหะผสมที่มีอุณหภูมิสูง เช่นคาร์บอน และเหล็กออกสเตนดิก ควรใช้แกรไฟต์ เป็นขั้วอิเล็กโทรดซึ่งมีอุณหภูมิในการทำงานสูงกว่า กฎโดยทั่วไป

โลหะผสมที่มีอุณหภูมิต่ำ = อิเล็กโทรดที่ทำจากโลหะ  
โลหะผสมที่มีอุณหภูมิสูง = อิเล็กโทรดที่ทำจากแกรไฟต์

### 2.1.6 การสึกกร่อนของขั้วอิเล็กโทรด

ในการทำนการสึกกร่อนของขั้วอิเล็กโทรด ตัวแปรหลายตัวเป็นตัวทำให้เกิดการสึกกร่อน อันได้แก่ ความร้อน, ความหนาแน่น,สภาพประจุไฟฟ้า และความถี่ที่ใช้ในการทำงาน

แกรไฟต์ มีความต้านทานการสึกกร่อนสูงต่อความร้อนและที่ความถี่ต่ำ แต่จะมีการสึกกร่อนมากขึ้นเมื่อ ใช้ที่ความถี่สูง หรือใช้เป็นในสภาพขั้วลบ การใช้แกรไฟต์ที่ความถี่สูงมักจะใช้กับการทำผิวสำเร็จ ซึ่งจะกัดเนื้องานออกไปเพียงเล็กน้อยเพื่อให้ได้ผิวสำเร็จที่ดี ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ค่าการสึกกร่อนที่มุมของอิเล็กโทรดแต่ละชนิดเมื่อใช้ในสภาพประจุไฟฟ้าแบบต่างๆ กับ ชิ้นงานที่ทำจากวัสดุชนิดต่างๆ [1]

อิเล็กโทรด	สภาพประจุของอิเล็กโทรด	ชิ้นงาน	การสึกที่มุม	ความจุไฟฟ้า
Copper	+	Steel	2-10%	ไม่มี
Copper	+	Inconel	2-10%	ไม่มี
Copper	+	Aluminum	< 3%	ไม่มี
Copper	-	Titanium	20-40%	มี
Copper	-	Carbide	35-60%	มี
Copper	-	Copper	35-45%	มี
Copper	-	Copper Tungsten	40-60%	มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กโทรด	สภาพประจุของอิเล็กโทรด	ชิ้นงาน	การสึกที่มุม	ความจุไฟฟ้า
Copper Tungsten	+	Steel	1-10%	ไม่มี
Copper Tungsten	-	Copper	20-40%	มี
Copper Tungsten	-	Copper Tungsten	30-50%	มี
Copper Tungsten	-	Titanium	15-25%	มี
Copper Tungsten	-	Carbide	35-50%	มี
Graphite	+	Steel	< 1%	ไม่มี
Graphite	-	Steel	30-40%	ไม่มี
Graphite	+	Inconel	< 1%	ไม่มี
Graphite	-	Inconel	30-40%	ไม่มี
Graphite	+	Aluminum	< 1%	ไม่มี
Graphite	-	Aluminum	10-20%	ไม่มี
Graphite	-	Titanium	40-70%	มี

### 2.1.7 พื้นผิวสำเร็จ

จากข้อเท็จจริงในการทำงาน EDM เพียงพอที่จะกล่าวได้ว่าในงานการทำผิวสำเร็จจะทำได้โดยใช้ความถี่ที่สูงขึ้น ซึ่งการเพิ่มความถี่นี้จะทำให้การสึกหรอของ ขั้วอิเล็กโทรด เพิ่มขึ้น ไม่ว่าจะเป็น อิเล็กโทรดชนิดใดก็ตามโดยการสึกหรอจะขึ้นอยู่กับชนิดและคุณภาพของวัสดุที่ใช้ทำ ขั้วอิเล็กโทรด และคุณภาพของพื้นผิวสำเร็จที่ต้องการ

แกรไฟต์ ในการใช้งานจะมีความต้านทานต่อการสึกกร่อนจากความร้อนสูง มีความหนาแน่นน้อยกว่าทองแดง ทำมาจากวัสดุชั้นดี(ขึ้นอยู่กับเกรด) มันมักจะมีการสึกหรอมากกว่าอิเล็กโทรดที่ทำจากโลหะเมื่อนำไปใช้ในการทำผิวสำเร็จ

ทองแดง มีโครงสร้างเกรนที่คิดว่า เนื่องจากมันเป็นโลหะ เมื่อเปรียบเทียบ โครงสร้างของทองแดงและแกรไฟต์ โครงสร้างของแกรไฟต์ จะไม่หนาแน่นเท่ากับของทองแดงหรือโลหะผสมของมัน และแม้ว่ามันจะไม่ทนต่อความร้อนเท่ากับ แกรไฟต์ แต่ในการทำผิวสำเร็จจะมีความร้อนเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังนั้น ในการใช้งานที่ความถี่สูงทองแดงจึงมีการสึกหรอน้อยกว่าแกรไฟต์

### 2.1.8 การทำรูปร่าง ขั้วอิเล็กโทรด

ทองแดง ทองแดงจะไม่ง่ายในการทำรูปร่างเท่ากับ แกรไฟต์ ถึงแม้ว่ามันจะค่อนข้างอ่อนเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็ก แต่มันจะมีเศษเหนียวออกมาซึ่งจะไปเกาะติดที่คมมีดตัด ทำให้ได้ผิวออกมาไม่ดี ส่วนการทำขั้วอิเล็กโทรด โดยการใช้เครื่อง Wire-cut จะสามารถทำได้รวดเร็ว มีความแน่นอนและมีประสิทธิภาพ

แกรไฟต์ การกัด, กลึง และเจียรระในสามารถทำได้อย่างรวดเร็วใน แกรไฟต์ แต่จะต้องระวังเศษของมัน ไปติดที่คมมีดตัด ส่วนการทำขั้วอิเล็กโทรด โดยใช้เครื่อง จะทำได้ค่อนข้างช้า อย่างไรก็ตาม ความเร็วในการตัดจะเพิ่มขึ้น เมื่อใช้แกรไฟต์ ที่มีคุณภาพดีขึ้น นอกจากนี้แล้วยังสามารถทำได้โดยใช้เครื่อง Ultrasonic ได้ ซึ่งจะทำให้ได้พิทกที่แน่นอนขึ้น

ราคาวัสดุดิบ

ปัจจัยตัวสุดท้ายในการพิจารณาวัสดุมาทำขั้วอิเล็กโทรด ก็คือราคาของวัสดุดิบที่จะใช้ทำขั้วอิเล็กโทรด โดยราคาจะขึ้นอยู่กับชนิดและคุณสมบัติของวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และ 9 อย่างไม่ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับหลักการ ANOVA

สำหรับงานวิจัยนี้ เนื่องจากมีปัจจัยที่จะศึกษามากกว่า 1 ปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยมีอยู่หลายระดับ(ทรีทเมนต์) ที่จะต้องดำเนินการทดลองกันควบคู่กันไปด้วย ทำให้ต้องจัดการทดลองแบบ แฟคทอเรียล กล่าวคือ เป็นการจัดทรีทเมนต์ตั้งแต่ 2 ปัจจัยหรือมากกว่าที่ระดับต่างๆ ให้แก่หน่วยทดลองพร้อมกัน เรียกผลการจัดทรีทเมนต์เหล่านี้ว่า treatment combination เช่นการทดลองที่มี 2 ปัจจัย โดยที่แต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ เรียกว่า การทดลองแบบแฟคทอเรียลขนาด 2x2 หรือ 2<sup>2</sup> ดังนั้น ทรีทเมนต์ ทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองก็จะมียู่ทั้งหมด 4

treatment combination

นิยมเขียนสัญลักษณ์ของปัจจัยด้วยตัวอักษรพิมพ์ใหญ่เช่น A, B, C เป็นต้น ส่วนระดับของปัจจัยจะใช้ตัวอักษรเขียนเล็ก พร้อมทั้งมีหมายเลขแสดงถึงระดับต่างๆ จากน้อยไปหามาก หรือจากต่ำ ไปสูง เช่น a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>, b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub> เป็นต้น

วิธีการเขียน treatment combination ในการทดลองแบบแฟคทอเรียลขนาด 2x2 ได้ดังนี้

		A					
		รูปเต็ม			รูปย่อ		
B	ระดับ	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>
	b <sub>1</sub>	a <sub>1</sub> b <sub>1</sub>	a <sub>2</sub> b <sub>1</sub>	(1)	a	00	10
	b <sub>2</sub>	a <sub>1</sub> b <sub>2</sub>	a <sub>2</sub> b <sub>2</sub>	b	ab	01	11

### 2.2.1 อิทธิพลหลัก(Main effects) และอิทธิพลร่วม(Interaction)

การวัดการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนอง ของปัจจัยหนึ่งทีละระดับของปัจจัยหนึ่งนั้น เป็นการวัดอิทธิพลของปัจจัย ปกติจะวัดค่าอยู่ในรูปของค่าเฉลี่ยของอิทธิพลของปัจจัยหนึ่ง ที่ระดับของอีกปัจจัยหนึ่ง เรียกว่า อิทธิพลหลักของปัจจัย นอกจากนี้ หากความแตกต่างของผลตอบสนองระหว่างของแฟคเตอร์หนึ่ง วัดที่ระดับของอีกแฟคเตอร์หนึ่ง จะมีค่าไม่เท่ากับความแตกต่างระหว่างระดับของแฟคเตอร์นั้น วัดที่ระดับของอีกแฟคเตอร์หนึ่ง ความแตกต่างของผลตอบสนองดังกล่าวนี้เรียกว่า การเกิดอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย

### 2.2.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน(ANOVA)

มีการตัดสินใจในงานวิศวกรรมจำนวนมากที่ต้องการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับ ค่าเฉลี่ยของประชากรที่มากกว่า 2 จุด เช่น ในการทดสอบว่าวัตถุดิบจากผู้ส่งมอบแต่ละรายมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์หรือไม่ อุณหภูมิในเตาอบมีผลต่อค่าความแข็งของงานที่อบได้หรือไม่ ส่วนผสมของวัตถุดิบมีผลต่อคุณสมบัติด้านความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์หรือไม่ ฯลฯ โดยส่วนใหญ่จะเป็นปัญหาด้านการวินิจฉัยกระบวนการ ที่มีความจำเป็นต้องมีการออกแบบการทดลองด้วยเทคนิคที่มีความซับซ้อนยิ่งขึ้น

ในการตัดสินใจสำหรับกรณีปัญหาดังกล่าว เช่น กรณีการทดสอบวัตถุดิบจากผู้ส่งมอบแต่ละรายว่ามีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์หรือไม่ ถ้าหากมีผู้ส่งมอบอยู่ 3 รายแล้ว การทดสอบดังกล่าวจะอยู่ภายใต้สมมติฐาน คือ

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

$$H_1 : \mu_i \neq \mu_j \text{ อย่างน้อย 1 คู่ของ } i, j \text{ ที่ } i \neq j$$

ในการทดสอบข้างบนนี้ ถ้าหากจะดำเนินการทดสอบด้วยความมีนัยสำคัญของตัวสถิติแบบปกติ และแบบ t ก็มีความจำเป็นต้องแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 การทดสอบย่อย คือ  $\mu_1$  แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับ  $\mu_2$  หรือไม่  $\mu_1$  แตก

ต่างอย่างมีนัยสำคัญกับ  $\mu_1$  หรือไม่ และ  $\mu_2$  ต่างอย่างมีนัยสำคัญกับ  $\mu_3$  หรือไม่ และโดยที่การทดสอบความมีนัยสำคัญดังกล่าวจะต้องได้มาจากการกำหนดค่า  $\alpha$  ดังนั้น ถ้าหากผู้ทดสอบตั้งใจจะทดสอบสมมติฐานด้วยระดับนัยสำคัญโดยรวมเท่ากับ 0.05 แต่เนื่องจากต้องแยกการทดสอบดังกล่าวออกเป็น 3 การทดสอบย่อย จึงต้องทำการทดสอบแต่ละการทดสอบย่อยด้วยระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งเท่ากับมีโอกาสในการตัดสินใจยอมรับ  $H_0$  อย่างถูกต้องในแต่ละการทดสอบย่อยเท่ากับ 0.95 และโดยที่การยอมรับ  $H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$  อย่างถูกต้อง จะต้องได้จากการตัดสินใจยอมรับ  $H_0$  อย่างถูกต้องพร้อมกันทั้ง 3 การทดสอบย่อย จึงทำให้โอกาสในการยอมรับ  $H_0$  อย่างถูกต้องเท่ากับ  $(0.95)^3 = 0.8573$  ซึ่งหมายความว่า จะมีโอกาสผิดพลาดในการปฏิเสธสมมติฐาน  $H_0$  ที่ผิดพลาด (ซึ่งเท่ากับ ระดับความมีนัยสำคัญ) เท่ากับ  $1 - 0.8573 = 0.1427$  ทีเดียว ที่กำหนดระดับความมีนัยสำคัญโดยรวมไว้เท่ากับ 0.05 ดังนั้น ถ้าหากมีการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับค่าเฉลี่ยของประชากรที่มีจำนวนประชากรมากกว่า 2 ชุดแล้ว จะมีผลเสียคือ ทำให้ระดับความมีนัยสำคัญมีค่าสูงขึ้น ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่เป็นผลดีต่อการตัดสินใจ จึงมีความจำเป็นต้องพัฒนาวิธีการทดสอบใหม่เพื่อจะไม่ให้ระดับความมีนัยสำคัญสูงขึ้น ทั้งนี้ก็ด้วยการวิเคราะห์ถึงผลที่เกิดขึ้นโดยอาศัยการแยกความแปรปรวนที่เกิดขึ้นทั้งหมดออกเป็นความแปรปรวนย่อยเพื่อการตัดสินใจ จึงเรียกรวีกดังกล่าวนี้ว่า “การวิเคราะห์ความแปรปรวน” (Analysis of Variance; ANOVA)

### 2.2.3 แนวคิดและหลักการของ ANOVA

ANOVA เป็นการหาความแปรปรวนโดยรวม แล้วแยกออกเป็นความแปรปรวนเนื่องจาก ทรีทเมนต์ และความแปรปรวนเนื่องจากสาเหตุที่ไม่ได้รับการควบคุมซึ่งหมายถึงรีพีทาทิบลิตี แล้วพิจารณาหาความแปรปรวนเนื่องจากทรีทเมนต์ว่ามีปริมาณมากหรือไม่เมื่อเทียบกับผลจากสาเหตุที่ไม่สามารถควบคุมได้ในระหว่างเงื่อนไขการทดลอง หรือรีโพรดิวซิบลิตี(Reproducibility)

### 2.2.4 ตัวแบบทางสถิติเชิงเส้นตรง

สมมติว่า ในการศึกษาเปรียบเทียบครั้งนี้มีจำนวนทรีทเมนต์ที่ต้องการเปรียบเทียบจำนวน a ทรีทเมนต์ และทำการทดลองซ้ำอย่างสุ่มทรีทเมนต์ละ n ครั้ง (เรียกการออกแบบการทดลองแบบนี้ว่าการออกแบบสมดุล (Balance Design) จะได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 2.4

ข้อมูลในตารางที่ 2.4 นี้จะได้รับการอธิบายด้วยตัวแบบทางสถิติเชิงเส้นตรง (Linear Statistical Model) คือ

$$Y_{ij} = \mu + \epsilon_{ij}$$

$$= \mu + \tau_i + \epsilon_{ij}; i = 1, 2, \dots, a; j = 1, 2, \dots, n \quad \dots\dots\dots(2.1)$$

โดยที่  $Y_{ij}$  = ผลจากการทดลองของทรีทเมนต์ i ในการซ้ำครั้งที่ j

$\mu$  = พารามิเตอร์ร่วมสำหรับทุกทรีทเมนต์ ซึ่งหมายถึงค่าเฉลี่ยทั้งหมด

$\tau_i$  (อ่านว่า Tau) = พารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายทรีทเมนต์ตัวที่ i (โดยปกติเรียกว่า ผลจากทรีทเมนต์ (Treatment Effects ที่ i))

$\epsilon_{ij}$  = ผลจากสาเหตุด้านรีพีทาทิบลิตีของการทดลอง

ตารางที่ 2.4 ผลการทดลองสำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวน

ทรีทเมนต์	ข้อมูลจากการทดลอง		ผลรวม	ค่าเฉลี่ย
	1	2.....n		
1	$Y_{11}$	$Y_{12} \dots Y_{1n}$	$Y_{1.}$	$\bar{Y}_{1.}$
2	$Y_{21}$	$Y_{22} \dots Y_{2n}$	$Y_{2.}$	$\bar{Y}_{2.}$
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
A	$Y_{a1}$	$Y_{a2} \dots Y_{an}$	$Y_{a.}$	$\bar{Y}_{a.}$
	ผลรวม		$Y_{..}$	$\bar{Y}_{..}$

ตัวแบบในสมการที่ (2.1) นี้ มีชื่อเรียกว่า “ตัวแบบการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-Way Classification ANOVA Model)” ทั้งนี้เนื่องจากมีปัจจัยที่ต้องการศึกษาเพียงตัวเดียว และตัวแบบตามสมการที่ (2.1) นี้ ยังอาจจำแนกออกได้เป็นอีก 2 ประเภทแล้วแต่การออกแบบการทดลอง กล่าวคือถ้ามีการออกแบบการทดลองด้วยการ กำหนดทรีทเมนต์ที่คงที่แน่นอน จะได้ว่า  $\tau_i$  แต่ละค่าเป็นค่าคงที่ตามคุณสมบัติของฟิเคเจอร์แต่ละตัว ในกรณีนี้จะเรียกตัวแบบตามสมการที่ (2.1) ว่าตัวแบบแบบอิทธิพลคงที่ (Fixed Effect Model) แต่ในทางตรงข้ามถ้ามีความจำเป็นต้องทดลองด้วยการสุ่มฟิเคเจอร์ที่มีทั้งหมดมาทดลอง โดยอาศัยฟิเคเจอร์ตัวอย่าง ซึ่งจะมีผลทำให้  $\tau_i$  เป็นตัวแปรสุ่มขึ้นกับผลการชักสิ่งตัวอย่างตัวฟิเคเจอร์ ในกรณีเช่นนี้จะเรียกตัวแบบตามสมการที่ (2.1) ว่า ตัวแบบแบบอิทธิพลสุ่ม (Random Effect Model)

2.2.5 ตัวแบบอิทธิพลคงที่

สามารถกำหนดสมมติฐานได้ว่า

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

$$H_1 : \tau_i \neq 0 \quad ; \text{อย่างน้อย 1 ค่าของ } I$$

.....(2.2)

สูตรการคำนวณสามารถสรุปได้เป็นตาราง ANOVA ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ANOVA สำหรับตัวแบบแบบอิทธิพลคงที่ประเภทจำแนกทางเดียว

แหล่งความผันแปร	SS	DF	MS	$F_0$
ทรีทเมนต์	$\sum_i \frac{Y_i^2}{n} - \frac{Y^2}{an}$	a-1	$\frac{SS_{tr}}{a-1} = MS(tr)$	$\frac{MS(tr)}{MS(E)}$
รีพีทะบิลิตี้	$SS_T - SS_{tr}$	a(n-1)	$\frac{SS_E}{a(n-1)} = MS(E)$	
ทั้งหมด	$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n Y_{ij}^2 - \frac{Y^2}{an}$	an-1		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ 12 ร้องอังก้องถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมมติฐานในสมการที่ (2.2) พบว่า ถ้าหากสมมติฐานเป็นจริง ค่าของ F จะมีค่าเข้าใกล้ 1 แต่ถ้าหากสมมติฐานไม่เป็นจริง ค่าของ F จะมีค่าที่มากเสมอเนื่องจากเทอมผลรวมกำลังสองของ T, ดังนั้น การทดสอบนี้จึงเป็นวิธีการตัดสินใจแบบด้านเดียวด้านบน โดยที่จะปฏิเสธสมมติฐานเพื่อยืนยันว่าปัจจัยที่พิจารณามีผลอย่างมีนัยสำคัญเมื่อ

$$F_0 > F_{\alpha; a-1, a(n-1)}$$

### 2.2.5.1 การประมาณค่าพารามิเตอร์ของตัวแบบ

สามารถหาช่วงความเชื่อมั่นของ  $\mu_i$  ได้ว่า

$$\bar{y}_i \pm t_{\alpha/2; a(n-1)} \sqrt{\frac{MS(E)}{n}}$$

นอกจากนี้ ยังสามารถประมาณช่วงความเชื่อมั่นของผลต่างของค่าเฉลี่ยของทรีทเมนต์ 2 ตัวใดๆ ได้จาก

$$\left[ (\bar{y}_i - \bar{y}_j) \pm t_{\alpha/2; a(n-1)} \sqrt{\frac{2MS(E)}{n}} \right]$$

### 2.2.5.2 การทดสอบเชิงซ้อนด้วยวิธีการพิสัยของคันทัน

ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยตัวแบบแบบอิทธิพลคงที่นี้ เมื่อมีการปฏิเสธสมมติฐานจะได้สารสนเทศได้เพียงมีทรีทเมนต์อย่างน้อย 1 คู่ที่มีความแตกต่างกัน แต่ยังไม่ทราบว่า ทรีทเมนต์ใดบ้างที่แตกต่างกัน และควรจะเลือกทรีทเมนต์ใด

ในการวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบผลจากทรีทเมนต์แต่ละคู่ จะดำเนินการเปรียบเทียบด้วยจำนวน  $\binom{a}{2}$  คู่ จึงเรียกการศึกษานี้ว่า “การเปรียบเทียบเชิงซ้อน (Multiple Comparison Test)” และการเปรียบเทียบนี้อาจดำเนินการด้วยการตั้งกฎเกณฑ์การตัดสินใจไว้ก่อนการทดลองจะเกิดขึ้นก็ได้ ด้วยวิธีการคอนทราสต์ (Contrast) หรือการเปรียบเทียบเชิงซ้อนภายหลังจากการทดลองได้เสร็จสิ้นแล้ว ซึ่งจะประกอบด้วยวิธีการต่างๆ หลายวิธี โดยในที่นี้จะขอกกล่าวเพียงวิธีการเดียวคือวิธีการของคันทัน ทั้งนี้เพราะว่าทุกวิธีจะมีหลักการเหมือนกัน คือทำการพิจารณาว่าทรีทเมนต์แต่ละคู่ที่เปรียบเทียบมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่น้อยที่สุด (Least Significant Difference) หรือ LSD เท่ากับเท่าใด แล้วทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของสิ่งตัวอย่าง  $(\bar{y}_i - \bar{y}_j)$  กับค่า LSD ดังกล่าว

หลังการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบเชิงซ้อน โดยวิธีการของคันทันนี้จะดำเนินการภายใต้ขนาดสิ่งตัวอย่างเท่ากันในแต่ละทรีทเมนต์ และโดยที่แต่ละค่าเฉลี่ยของทรีทเมนต์เป็นตัวสถิติซึ่งมีความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

ในการหาค่าความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่น้อยที่สุดของคันทันนี้ จะอาศัยการกำหนดความแตกต่างให้อยู่ในรูปของพิสัย จึงอาจเรียกว่าพิสัยที่มีนัยสำคัญที่น้อยที่สุด ( $R_p$ ) โดยที่

$$R_p = r_{\alpha}(p, f) S_{\bar{y}_i}$$

โดย  $r_{\alpha}(p, f)$  คือ ค่าพิสัยที่มีนัยสำคัญ (Significant Range) โดยที่ p คือจำนวนทรีทเมนต์ที่ทำการศึกษา และ f คือ ค่า DF ของตัวประมาณค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

## 2.2.6 ตัวแบบแบบอิทธิพลสุ่ม

ในการศึกษาทางวิศวกรรมด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนนี้ จะมีอยู่หลายกรณีด้วยกันที่ผู้ศึกษาไม่สามารถกำหนดทริทเมนต์ได้ เนื่องจากทริทเมนต์มีจำนวนมากเกินกว่าที่จะสามารถทดสอบได้ครบ ในกรณีนี้มีความจำเป็นต้องทำการชักตัวอย่างจากประชากรของทริทเมนต์ จึงมีผลทำให้  $\tau_i$  เป็นตัวแปรสุ่มตามทริทเมนต์ที่ได้รับการสุ่มมาศึกษา ดังนั้น ตัวแบบทางสถิติเชิงเส้นตรงตามสมการที่ (2.1) จะมีตัวแปรสุ่ม 2 ตัวคือ  $\tau_i$  และ  $\epsilon_{ij}$  และจากสมการที่ (2.1) จะได้ค่าความผันแปรของข้อมูลจากการทดลอง คือ

$$\sigma_y^2 = \sigma_{\tau}^2 + \sigma^2 \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

โดยที่จะเรียก  $\sigma_{\tau}^2$  และ  $\sigma^2$  (ซึ่งหมายถึงความผันแปรจากสาเหตุที่ได้รับการควบคุม และความผันแปรจากสาเหตุที่ไม่ได้รับการควบคุม โดยลำดับ) ว่า องค์ประกอบของความแปรปรวน (Variance Components) และจะเรียกตัวแบบตามสมการที่ (2.3) ว่าตัวแบบแบบอิทธิพลสุ่ม หรือตัวแบบองค์ประกอบของความแปรปรวน (Components of Variance Model) และจะสามารถตั้งสมมติฐานสำหรับการทดสอบเพื่อยืนยันความมีผลของปัจจัยที่พิจารณาว่า

$$\begin{aligned} H_0 : \sigma_{\tau}^2 &= 0 \\ H_1 : \sigma_{\tau}^2 &> 0 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

ในการวิเคราะห์ผลจากการทดลองยังคงวิเคราะห์ได้เช่นเดียวกับกรณีตัวแบบแบบอิทธิพลคงที่ แต่ในกรณีนี้ค่าที่ควรจะเป็นของ MS(tr) และ MS(E) จะเปลี่ยนไปจากเดิม

$$\begin{aligned} E(MS(tr)) &= \sigma^2 + n\sigma_{\tau}^2 \\ E(MS(E)) &= \sigma^2 \\ F &= \frac{MS(tr)}{MS(E)} = \frac{\sigma^2 + n\sigma_{\tau}^2}{\sigma^2} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

จากสมมติฐานตามสมการที่ (2.4) พบว่า ถ้าหากสมมติฐานเป็นจริง ค่าของ F ตามสมการที่ (2.5) จะมีค่าเข้าใกล้ 1 แต่ถ้าหากสมมติฐานไม่เป็นจริง ค่าของ F จะมีค่าที่มากเสมอเนื่องจากเทอม  $\sigma_{\tau}^2$  ดังนั้น การทดสอบนี้จึงเป็นวิธีการการตัดสินใจแบบด้านบนด้านเดียวเหมือนกรณีตัวแบบแบบอิทธิพลคงที่ โดยที่จะปฏิเสธสมมติฐานเพื่อยืนยันว่าปัจจัยที่พิจารณามีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อเมื่อ

$$F_0 > F_{\alpha; a-1, a(n-1)}$$

### 2.2.6.1 การประมาณค่าพารามิเตอร์ของตัวแบบ

แม้ว่าในการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแบบแบบอิทธิพลคงที่ และตัวแบบแบบอิทธิพลสุ่มจะมีเหมือนกันก็ตาม แต่การสรุปผลจะมีความแตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากว่า ในขณะที่กรณีตัวแบบแบบอิทธิพลคงที่เป็นการศึกษาที่มีการระบุถึงทริทเมนต์ที่ต้องการศึกษา ดังนั้นเมื่อมีการปฏิเสธสมมติฐานจึงต้องมีการเปรียบเทียบเชิงซ้อนเพื่อหาว่าทริทเมนต์ใดแตกต่างกัน แต่สำหรับกรณีตัวแบบแบบอิทธิพลสุ่มนั้น ทริทเมนต์ที่ศึกษาเป็นเพียงทริทเมนต์ตัวอย่างที่สุ่มได้จากประชากรของทริทเมนต์เท่านั้น เมื่อมีการปฏิเสธสมมติฐาน จึงมีความจำเป็นต้องพิจารณาว่าค่าความแตกต่างของทริทเมนต์ในประชากรทริทเมนต์มีค่าเท่าใด จึงมีความจำเป็นที่จะต้องประมาณค่าขององค์ประกอบความแปรปรวนในตัวแบบ และจะใช้การประมาณค่าด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน

ในบางครั้ง การประมาณค่าพารามิเตอร์ที่เป็นองค์ประกอบของความแปรปรวนนี้อาจมีค่าติดลบได้ ซึ่งเป็นไปได้ในทางทฤษฎีเพราะค่าความแปรปรวนหมายถึงค่าผลรวมกำลังสอง ย่อมจะไม่สามารถติดลบได้ ในกรณีนี้อาจจะ

ประมาณให้เท่ากับศูนย์ ถ้าหากจะอนุมานได้ว่าค่าคิดคลบดังกล่าวเกิดขึ้นจากความผันแปรในการแจกแจงของสิ่งตัวอย่าง แต่อย่างไรก็ดี ในบางครั้งอาจเกิดมาจากสาเหตุที่กำหนดให้ทริทเมนต์ที่ใช้ทดลองมีความใกล้เคียงกันมาก

## 2.2.7 การทดลองแบบแฟคทอเรียลที่มี 3 ปัจจัย ในแผนการทดลอง

### 2.2.7.1 แบบสุ่มตลอด

ในการทดลองนี้ ให้ A, B, C เป็นปัจจัยที่มีจำนวนระดับ a, b, c ตามลำดับ ใช้แผนการทดลองแบบสุ่มตลอด ที่มีจำนวนซ้ำ r เท่ากัน

#### 1. ตัวแบบ

ตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์เขียนได้เป็น

$$Y_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\alpha\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}$$

$$i = 1, 2, \dots, a \quad j = 1, 2, \dots, b \quad k = 1, 2, \dots, c \quad \text{และ} \quad l = 1, 2, \dots, r$$

$\alpha_i, \beta_j, \gamma_k$

เป็นอิทธิพลหลักของ A, B, C ตามลำดับ

$(\alpha\beta)_{ij}, (\alpha\gamma)_{ik}, (\beta\gamma)_{jk}$

เป็นอิทธิพลร่วมของปัจจัย AB, AC, BC ตามลำดับ

$(\alpha\beta\gamma)_{ijk}$

เป็นอิทธิพลร่วมของ 3 ปัจจัย ABC

$\varepsilon_{ijkl}$

เป็นความคลาดเคลื่อนของการทดลอง

มีข้อกำหนดเพิ่มเติมคือ

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^a \alpha_i &= \sum_{j=1}^b \beta_j = \sum_{k=1}^c \gamma_k = \sum_{i=1}^a (\alpha\beta)_{ij} = \sum_{j=1}^b (\alpha\beta)_{ij} = \sum_{j=1}^b (\beta\gamma)_{jk} = \sum_{k=1}^c (\beta\gamma)_{jk} \\ &= \sum_{i=1}^a (\alpha\gamma)_{ik} = \sum_{k=1}^c (\alpha\gamma)_{ik} = \sum_{i=1}^a (\alpha\beta\gamma)_{ijk} = \sum_{j=1}^b (\alpha\beta\gamma)_{ijk} = \sum_{k=1}^c (\alpha\beta\gamma)_{ijk} \\ &= 0 \end{aligned}$$

การวิเคราะห์

ใช้หลักการเช่นเดียวกับกรณี 2 ปัจจัย กล่าวคือในแผนการทดลองแบบสุ่มตลอดที่ได้ว่า

$$SST = SS_{tr} + SSE$$

ดังนั้น  $SS_{tr}$  จะประกอบด้วย 7 ส่วน ได้แก่

$$SS_{tr} = SS(A) + SS(B) + SS(C) + SS(AB) + SS(AC) + SS(BC) + SS(ABC)$$

ในกรณีนี้ ต้องสร้างตาราง (ย่อย) ผลรวม A X B ขึ้นมาจากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง c ตาราง

ตาราง (ย่อย) ผลรวม A X B

A	B				รวม
	$b_1$	$b_2$	.....	$b_b$	
$a_1$	$Y_{11k}$	$Y_{12k}$	.....	$Y_{1bk}$	$Y_{1.k}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และแจ้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$a_2$	$Y_{21k}$	$Y_{22k}$	.....	$Y_{2bk}$	$Y_{2.k}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$
$a_a$	$Y_{a1k}$	$Y_{a2k}$	.....	$Y_{abk}$	$Y_{a.k}$
รวม	$Y_{.1k}$	$Y_{.2k}$	.....	$Y_{.bk}$	$Y_{.k}$

$k = 1, 2, \dots, c$

จากตาราง (ย่อย) ผลรวมทั้งหมด  $c$  ตาราง ทำให้สามารถสร้างตารางผลรวม  $A \times B$ ,  $A \times C$  และ  $B \times C$  เพื่อการคำนวณขั้นต่อไป ดังนี้

**ตารางผลรวม  $A \times B$**

	<b>B</b>				รวม
<b>A</b>	$b_1$	$b_2$	.....	$b_b$	
$a_1$	$Y_{11.}$	$Y_{12.}$	.....	$Y_{1b.}$	$Y_{1..}$
$a_2$	$Y_{21.}$	$Y_{22.}$	.....	$Y_{2b.}$	$Y_{2..}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$
$a_a$	$Y_{a1.}$	$Y_{a2.}$	.....	$Y_{ab.}$	$Y_{a..}$
รวม	$Y_{.1.}$	$Y_{.2.}$	.....	$Y_{.b.}$	$Y_{...}$

**ตารางผลรวม  $A \times C$**

	<b>C</b>				รวม
<b>A</b>	$c_1$	$c_2$	.....	$c_c$	
$a_1$	$Y_{1.1}$	$Y_{1.2}$	.....	$Y_{1.c}$	$Y_{1..}$
$a_2$	$Y_{2.1}$	$Y_{2.2}$	.....	$Y_{2.c}$	$Y_{2..}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$
$a_a$	$Y_{a.1}$	$Y_{a.2}$	.....	$Y_{a.c}$	$Y_{a..}$
รวม	$Y_{.1.}$	$Y_{.2.}$	.....	$Y_{.c.}$	$Y_{...}$

**ตารางผลรวม  $A \times C$**

	<b>C</b>				รวม
<b>B</b>	$c_1$	$c_2$	.....	$c_c$	
$b_1$	$Y_{.11}$	$Y_{.12}$	.....	$Y_{.1c}$	$Y_{1..}$
$b_2$	$Y_{.21}$	$Y_{.22}$	.....	$Y_{.2c}$	$Y_{2..}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$
$b_a$	$Y_{.b1}$	$Y_{.b2}$	.....	$Y_{.bc}$	$Y_{b..}$
รวม	$Y_{.1.}$	$Y_{.2.}$	.....	$Y_{.c.}$	$Y_{...}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ 16 อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โดยที่  $Y_{\dots}$  = ผลรวมทั้งหมด  
 $Y_{i\dots}$  = ผลรวมของค่าสังเกตที่ระดับ  $i$  ของแฟกเตอร์ A  
 $Y_{\dots j\dots}$  = ผลรวมของค่าสังเกตที่ระดับ  $j$  ของแฟกเตอร์ B  
 $Y_{\dots k\dots}$  = ผลรวมของค่าสังเกตที่ระดับ  $k$  ของแฟกเตอร์ C  
 $Y_{ij\dots}$  = ผลรวมของค่าสังเกตที่ระดับ  $i$  และ  $j$  ของแฟกเตอร์ A และ B  
 $Y_{i\dots k\dots}$  = ผลรวมของค่าสังเกตที่ระดับ  $i$  และ  $k$  ของแฟกเตอร์ A และ C  
 $Y_{\dots j\dots k\dots}$  = ผลรวมของค่าสังเกตที่ระดับ  $j$  และ  $k$  ของแฟกเตอร์ B และ C  
 $Y_{ijk\dots}$  = ผลรวมของค่าสังเกตที่ระดับ  $(ijk)$  ของ treatment combination

สำหรับผลรวมกำลังสองต่างๆ คำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} SST &= \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^r Y_{ijkl}^2 - \frac{Y_{\dots}^2}{abcr} \\ SS(A) &= \frac{\sum_{i=1}^a Y_{i\dots}^2}{bcr} - C.F.; \quad C.F. = \frac{Y_{\dots}^2}{abcr} \\ SS(B) &= \frac{\sum_{j=1}^b Y_{\dots j\dots}^2}{acr} - C.F. \\ SS(C) &= \frac{\sum_{k=1}^c Y_{\dots k\dots}^2}{abr} - C.F. \\ SS(AB) &= \frac{\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b Y_{ij\dots}^2}{cr} - C.F. - SS(A) - SS(B) \\ SS(AC) &= \frac{\sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^c Y_{i\dots k\dots}^2}{br} - C.F. - SS(A) - SS(C) \\ SS(BC) &= \frac{\sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c Y_{\dots j\dots k\dots}^2}{ar} - C.F. - SS(B) - SS(C) \\ SS(ABC) &= \frac{\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c Y_{ijk\dots}^2}{r} - C.F. + SS(A) + SS(B) + SS(C) \\ &\quad - SS(AB) - SS(AC) - SS(BC) \\ SSE &= SST - SS(A) - SS(B) - SS(C) - SS(AB) - SS(AC) - SS(BC) - SS(ABC) \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ 17 อังอาจอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน

SOV	df	SS	MS	F <sub>o</sub>
<b>อิทธิพลหลัก</b>				
A	a-1	SS(A)	MS(A)	MS(A) / MSE
B	b-1	SS(B)	MS(B)	MS(B) / MSE
C	c-1	SS(C)	MS(C)	MS(C) / MSE
<b>อิทธิพลร่วม</b>				
<b>(2 แฟกเตอร์)</b>				
AB	(a-1)(b-1)	SS(AB)	MS(AB)	MS(AB) / MSE
SOV	df	SS	MS	F <sub>o</sub>
AC	(a-1)(c-1)	SS(AC)	MS(AC)	MS(AC) / MSE
BC	(b-1)(c-1)	SS(BC)	MS(BC)	MS(BC) / MSE
<b>อิทธิพลร่วม</b>				
<b>(3 แฟกเตอร์)</b>				
ABC	(a-1)(b-1)(c-1)	SS(ABC)	MS(ABC)	MS(ABC) / MSE
ความคลาดเคลื่อน	abc(r-1)	SSE	MSE	
รวม	acbr-1	SST		

การตรวจสอบความมีนัยสำคัญของอิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วมเป็นการทดสอบแบบค้ำเดียวทางด้านขวา โดยค่าสถิติจากตารางเพื่อใช้เปรียบเทียบคือ ค่าสถิติ F ที่เป็นจำนวนองศาความเป็นอิสระของอิทธิพลที่ต้องการทดสอบ กับจำนวนองศาความเป็นอิสระของความคลาดเคลื่อน เช่น ต้องการตรวจสอบความมีนัยสำคัญของอิทธิพลหลัก A ค่าสถิติที่ใช้เปรียบเทียบกับ  $F_o = MS(A) / MSE$  คือ  $F_{\alpha}(a-1, abc, (r-1))$  เป็นต้น

### 2.3 ทฤษฎีการหาขนาดตัวอย่าง

ในการตัดสินใจแบบการทดสอบสมมติฐานนั้น การตัดสินใจโดยคำนึงถึงความเสี่ยงในการตัดสินใจทั้ง  $\alpha$  และ  $\beta$  ถือเป็นสิ่งที่มีความสำคัญมาก และการทดสอบสมมติฐานจะต้องควบคุมความเสี่ยงในการตัดสินใจด้วยการกำหนดให้  $\alpha$  คงที่ แล้วพยายามออกแบบให้  $\beta$  มีค่าต่ำที่สุด ซึ่งการจะทำให้  $\beta$  มีค่าลดลง ก็ด้วยการพยายามให้ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานมีขนาดเล็กลง ทั้งนี้ด้วยการพิจารณาถึงค่าเหมาะสมของขนาดตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง โดยที่  $\beta = P(\text{การยอมรับ } H_0; H_0 \text{ ไม่ถูกต้อง})$

ดังนั้น ในการพิจารณา  $\beta$  จะต้องเริ่มต้นมาจากการใช้ความรู้ในด้านวิศวกรรม เพื่อกำหนดว่าพารามิเตอร์มีค่าเท่าใดจึงทำให้  $H_0$  ไม่ถูกต้อง จากนั้นจะทำการพิจารณาขนาดตัวอย่างที่เหมาะสมจากเส้นโค้งโอซี

#### 2.3.1 ตัวแบบแบบอิทธิพลคงที่

ในการหาขนาดตัวอย่างจากตัวแบบแบบอิทธิพลคงที่ จะพิจารณาได้จากหลายวิธีด้วยกันแล้วแต่ว่าผู้ตัดสินใจมีสารสนเทศอย่างไร

2.3.1.1 การกำหนดในรูปความเบี่ยงเบนของค่าเฉลี่ยของทรีทเมนต์ ในกรณีนี้ ผู้ตัดสินใจจะต้องทราบถึงความเบี่ยงเบนของค่าเฉลี่ยทรีทเมนต์แต่ละทรีทเมนต์ที่เบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยทั้งหมดจนทำให้เกิดการปฏิเสธสมมติฐาน โดยสมมติให้แต่ละทรีทเมนต์มีค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนไป  $\tau_i / \sigma$

2.3.1.2 การกำหนดในรูปความแตกต่างมากที่สุดของค่าเฉลี่ยของทรีทเมนต์ ทางเลือกอีกประการหนึ่งสำหรับการกำหนดความแตกต่างของทรีทเมนต์จนทำให้เกิดการปฏิเสธสมมติฐาน โดยกำหนดให้ D หมายถึง ค่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของทรีทเมนต์ใดๆ 2 ทรีทเมนต์จนทำให้เกิดการปฏิเสธสมมติฐาน

2.3.1.3 การกำหนดในรูปความเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลที่เพิ่มขึ้น ภายใต้แนวทางการหาขนาดสิ่งตัวอย่างนี้ จะอาศัยแนวคิดจากสมการตัวแบบเชิงสถิติแบบเส้นโค้ง คือ

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$$

หรือ  $\sigma_y^2 = \sigma_\tau^2 + \sigma^2$

### 2.3.2 ตัวแบบแบบอิทธิพลสุ่ม

ในการหาขนาดสิ่งตัวอย่างจากตัวแบบแบบอิทธิพลสุ่ม จะพิจารณาได้หลายวิธีด้วยกันเหมือนกับกรณีตัวแบบแบบอิทธิพลคงที่ ซึ่งขึ้นอยู่กับว่าผู้ตัดสินใจมีสารสนเทศอย่างไร

2.3.2.1 การกำหนดค่าความผันแปรของความเบี่ยงเบนของค่าเฉลี่ยของทรีทเมนต์ ในกรณีนี้ผู้ตัดสินใจจะต้องทราบถึงความเบี่ยงเบนของค่าเฉลี่ยทรีทเมนต์ในรูปของความแปรปรวนต่อค่าความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน คือ  $\sigma_\tau^2 / \sigma^2$  ซึ่งจะทำให้สามารถกำหนดพารามิเตอร์ของเส้นโค้ง โอลซีที่ทำให้เกิดการปฏิเสธสมมติฐาน  $H_0$  ได้

2.3.2.2 การกำหนดในรูปความเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลที่เพิ่มขึ้น การพิจารณาในกรณีนี้จะคล้ายกับกรณีตัวแบบแบบอิทธิพลคงที่ กล่าวคือ ถ้าหากทรีทเมนต์ไม่มีความแตกต่างกันแล้ว ( $\sigma_\tau^2 = 0$ ) ความเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าสังเกตจากการทดลองควรมีค่าเท่ากับผลจากสาเหตุที่มีได้รับการควบคุม

## บทที่ 3

### อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

#### 3.1 การออกแบบการทดลอง

จากข้อมูลเกี่ยวกับวัสดุที่นิยมใช้ทำขั้วอิเล็กโทรด รวมถึงการขอข้อมูลจากผู้ที่ใช้งานเครื่อง EDM ในกระบวนการอุตสาหกรรม ทำให้เราได้ข้อมูลว่าวัสดุที่นิยมใช้ทำขั้วอิเล็กโทรดมี 2 ชนิด คือ ทองแดง และ แกรไฟต์ ดังนั้น ในการทดลองนี้จึงเลือกใช้ ทองแดงมาทำเป็นขั้วอิเล็กโทรด โดยจะทำเป็นรูปร่างหน้าตัดที่แตกต่างกัน แล้วทำการสปาร์คในรูปแบบการเดินทั้งการเดินในแนวแกนเดี่ยวย (ในแนวแกน Z) และการเดินของขั้วอิเล็กโทรดทั้ง 3 แกน (ในแนวแกน XYZ) แล้วทำการเก็บค่าการสึกกร่อนทั้งของขั้วอิเล็กโทรดและของชิ้นงาน เพื่อทำการหาค่าอัตราการสึกกร่อนของขั้วอิเล็กโทรด

#### 3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

##### 3.2.1 ทองแดง 99.9% โดยแบ่งออกเป็น

3.2.1.1 ทองแดงแท่งสี่เหลี่ยมขนาดหน้าตัด  $7.70 \times 7.70$  มม.<sup>2</sup>

3.2.1.2 ทองแดงแท่งทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหน้าตัดวงกลมเท่ากับ 12 มม.

##### 3.2.2 เหล็ก โดยแบ่งออกเป็น

3.2.2.1 เหล็กแท่งสี่เหลี่ยมขนาดหน้าตัด  $7.70 \times 7.70$  มม.<sup>2</sup>

3.2.2.2 เหล็กแท่งทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหน้าตัดวงกลมเท่ากับ 12 มม.

3.2.2.2 เหล็กแผ่นขนาดหน้าตัด กว้าง 42 มม. ยาว 85 มม.หนา 5 มม.

#### 3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.3.1 เครื่อง Electrical Discharge Machine

3.3.2 เครื่องชั่งน้ำหนัก

3.3.3 ตัวจับยึดชิ้นงาน(Fixture)

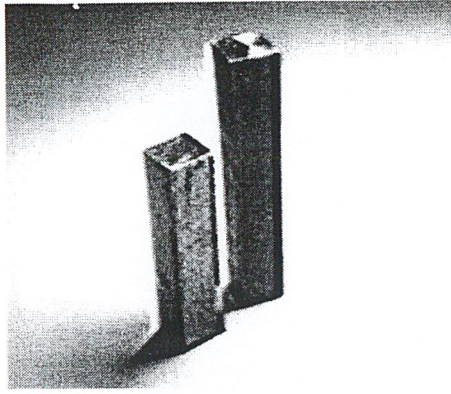
#### 3.4 วิธีการทดลอง

3.4.1 เตรียมชิ้นงานและขั้วอิเล็กโทรดให้สอดคล้องกัน โดยแบ่งเป็น

3.4.1.1 เมื่อทำการสปาร์คในแนวแกน Z

- ขั้วอิเล็กโทรด หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยม กับชิ้นงานเหล็กหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยม
- ขั้วอิเล็กโทรด หน้าตัดรูปวงกลม กับชิ้นงานเหล็กหน้าตัดรูปวงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 ชิ้นงานและตัวอย่างผงโรดหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยม

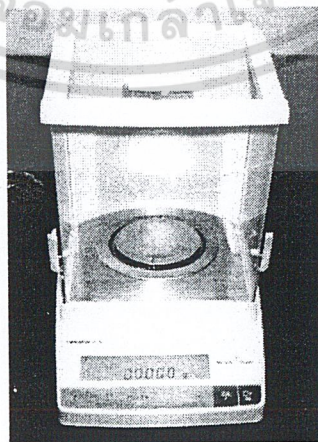


รูปที่ 3.2 ชิ้นงานและตัวอย่างผงโรดหน้าตัดรูปวงกลม

3.4.1.2 เมื่อทำการสปาร์คในแนวแกน XYZ

- ตัวอย่างโรด หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยม กับชิ้นงานเหล็กแผ่นรูปสี่เหลี่ยม
- ตัวอย่างโรด หน้าตัดรูปวงกลม กับชิ้นงานเหล็กแผ่นรูปสี่เหลี่ยม

3.4.2 นำชิ้นงานและตัวอย่างโรดที่เตรียมไว้ไปชั่งน้ำหนักก่อนสปาร์ค

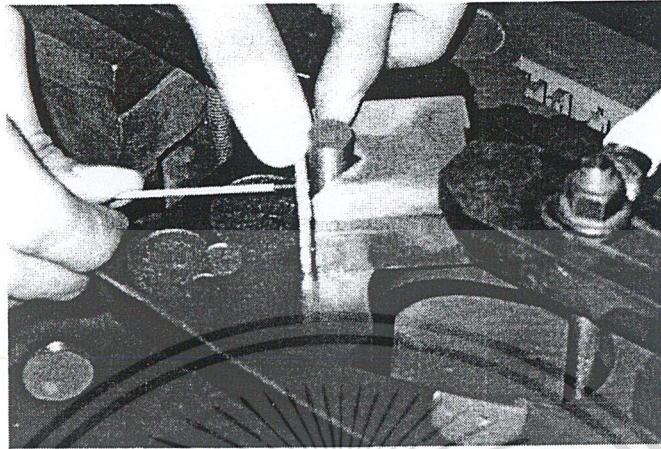


รูปที่ 3.3 ชั่งน้ำหนักชิ้นงานและตัวอย่างโรด

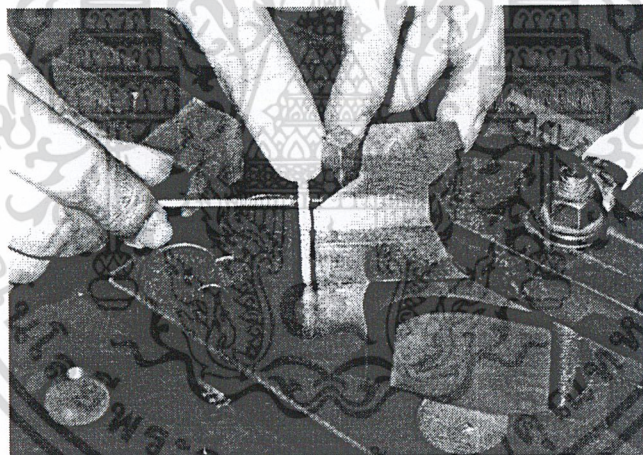
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 ทำการติดตั้งขั้วอิเล็กโทรมเข้ากับตัวจับขั้วอิเล็กโทรมของเครื่องEDM

3.4.4 ใส่ชิ้นงานเข้ากับตัวจับยึด แล้วล็อกให้แน่น



รูปที่ 3.4 การจับยึดชิ้นงานหน้าตัดรูปวงกลม



รูปที่ 3.5 การจับยึดชิ้นงานหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยม

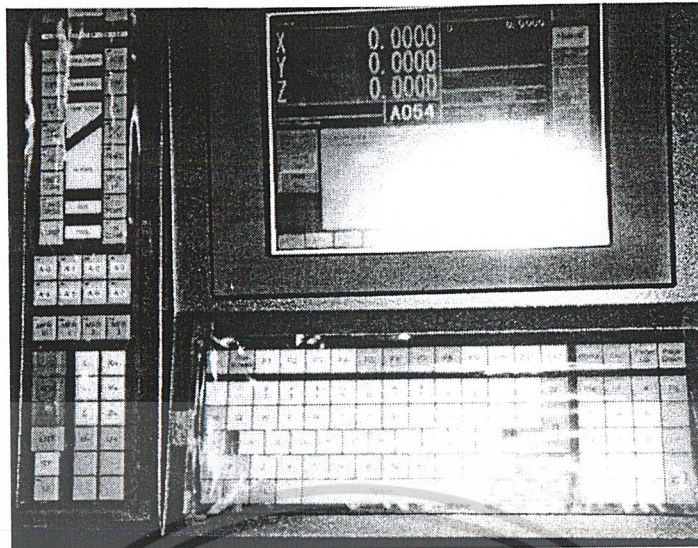
3.4.5 ตั้งค่าพิกัด(0,0,0)ของขั้วอิเล็กโทรม โดยใช้เครื่อง โดยในการสปาร์กในแนวแกน Z เครื่องจะตั้งค่าให้จุดศูนย์กลางของ ขั้วอิเล็กโทรม และจุดศูนย์กลางของชิ้นงานอยู่ตรงกันพอดี

3.4.6 เปิดโปรแกรมสำหรับการสปาร์ก (โดยการสปาร์กในแนวแกน Z จะทำการสปาร์กลงไป 2 มม. ส่วนการสปาร์กในแนว XYZ จะสปาร์กชิ้นงานเป็นรูปตัว I) แล้วใส่ค่า กระแสไฟฟ้า ตามที่ต้องการลงไป

3.4.7 ทำการรันโปรแกรม ชิ้นงานจะถูกสปาร์กตาม โปรแกรมที่ตั้งไว้

3.4.8 เมื่อสปาร์กเสร็จ ถอดชิ้นงานและขั้วอิเล็กโทรมออกจากตัวจับยึด แล้วนำไปเจ็ดให้แห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 การตั้งค่าพิกัดของเครื่อง EDM

3.4.9 นำชิ้นงานและขั้วอิเล็กโทรดที่แห้งแล้วไปชั่งน้ำหนักหลังสปาร์ค

3.4.10 นำค่าที่ได้มาบันทึกลงตาราง

3.4.11 ทำการทดลองจนครบตามจำนวนที่ต้องการ

### 3.5 ขั้นตอนการทดลอง

#### 3.5.1 การทดลองที่ 1

การหาการสึกกร่อนของขั้วอิเล็กโทรดทองแดงหน้าตัดรูปวงกลม สปาร์คในแนวแกน Z ตัวแปรที่ต้องการศึกษา คือ น้ำหนักของขั้วอิเล็กโทรด และน้ำหนักของชิ้นงานก่อนทำการสปาร์คและหลังทำการสปาร์ค มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

3.5.1.1 เตรียมขั้วอิเล็กโทรดและชิ้นงาน

3.5.1.2 ชั่งน้ำหนักขั้วอิเล็กโทรดและชิ้นงานและบันทึกค่า

3.5.1.3 ติดตั้งขั้วอิเล็กโทรดและชิ้นงานเข้ากับตัวจับยึด

3.5.1.4 ตั้งค่าพิกัดของขั้วอิเล็กโทรด

3.5.1.5 เปิดโปรแกรมที่จะใช้ในการสปาร์ค แล้วแก้ไขค่า กระแสไฟฟ้า ตามที่ต้องการ

3.5.1.6 รันโปรแกรม รอจะเครื่องทำงานเสร็จ

3.5.1.7 ถอดชิ้นงานและขั้วอิเล็กโทรดออกจากตัวจับยึด แล้วนำไปเช็ดให้แห้ง

3.5.1.8 นำชิ้นงานและขั้วอิเล็กโทรดที่แห้งแล้วไปชั่งน้ำหนักหลังสปาร์คแล้วบันทึกน้ำหนักหลังสปาร์ค

#### 3.5.2 การทดลองที่ 2

การหาการสึกกร่อนของขั้วอิเล็กโทรดทองแดงหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยม สปาร์คในแนวแกน Z ตัวแปรที่ต้องการศึกษา คือ น้ำหนักของขั้วอิเล็กโทรด และน้ำหนักของชิ้นงานก่อนทำการสปาร์คและหลังทำการสปาร์ค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยขั้นตอนการทดลองจะทำเช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 เพียงแต่เปลี่ยนขั้วอิเล็กโทรมและชิ้นงานเป็นแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยม

### 3.5.3 การทดลองที่ 3

การหาการสึกกร่อนของขั้วอิเล็กโทรมทองแดงหน้าตัดรูปวงกลม สปาร์คในแนวแกน XYZ ตัวแปรที่ต้องการศึกษา คือ น้ำหนักของขั้วอิเล็กโทรม และน้ำหนักของชิ้นงานก่อนทำการสปาร์คและหลังทำการสปาร์ค โดยขั้นตอนการทดลองจะทำเช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 เพียงแต่เปลี่ยนขั้วอิเล็กโทรมเป็นแบบหน้าตัดวงกลมและชิ้นงานเป็นแบบแผ่นสี่เหลี่ยม

### 3.5.4 การทดลองที่ 4

การหาการสึกกร่อนของขั้วอิเล็กโทรมทองแดงหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมสปาร์คในแนวแกน XYZ ตัวแปรที่ต้องการศึกษา คือ น้ำหนักของขั้วอิเล็กโทรม และน้ำหนักของชิ้นงานก่อนทำการสปาร์คและหลังทำการสปาร์ค โดยขั้นตอนการทดลองจะทำเช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 เพียงแต่เปลี่ยนขั้วอิเล็กโทรมเป็นแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมและชิ้นงานเป็นแบบแผ่นสี่เหลี่ยม โดยแต่ละการทดลอง จะทำทั้งหมดที่ 10 ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ต่างกัน ได้แก่ 6, 8, 10, 12, 14, 17, 20, 22, 27 และ 30 แอมแปร์ แต่ละปริมาณไฟฟ้าจะทำทั้งหมด 3 ครั้ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 ผลการทดลอง

จากการทดลองทั้งหมด ได้ค่าจากการทดลองคือ น้ำหนักของชิ้นงานและข้อผิดพลาดก่อนและหลังสปาร์กในเงื่อนไขและสถานะต่างๆ นำค่าน้ำหนักที่ได้พร้อมทั้งหาอัตราการสึกกร่อนในแต่ละครั้งและอัตราการสึกกร่อนเฉลี่ยที่มาจากแสดงในรูปแบบตาราง และแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ของอัตราการสึกกร่อนเฉลี่ยที่สถานะต่างๆ ด้วยเงื่อนไขการสปาร์กในแบบต่างๆกันได้ดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลที่ได้จากการทดลองสปาร์ตในแนวแกน Z ของเหล็ก (ชิ้นงาน) ด้วยระดับต่างๆกัน 10 ระดับ ของหน้าตัดวงกลม

ชั้นงานที่	กระแสไฟ (A)	steel						difference			diff average (g)
		Before(g)		After(g)		1	2	3			
1	26.027	25.066	23.445	24.288	21.739	1.739	1.728	1.706	1.72433		
2	25.652	24.700	24.123	23.912	22.370	1.740	1.757	1.753	1.75000		
3	26.121	25.264	23.771	24.366	21.991	1.755	1.755	1.780	1.76333		
4	26.069	25.809	24.010	24.366	22.291	1.703	1.676	1.719	1.69933		
5	27.363	25.338	26.602	25.531	23.509	1.832	1.829	1.827	1.82933		
6	26.724	24.178	30.672	25.012	22.481	1.712	1.697	1.723	1.71067		
7	26.296	26.038	30.943	24.493	24.262	1.803	1.776	1.757	1.77867		
8	26.355	25.830	29.855	24.482	23.989	1.873	1.841	1.868	1.86067		
9	26.821	25.728	30.204	25.014	23.903	1.807	1.825	1.825	1.81900		
10	26.564	26.730	32.113	24.692	24.887	1.872	1.843	1.830	1.84833		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ผลที่ได้จากการทดลองสปาร์กอินแนกแทน Z ของทองแดง (ซีวอิลโคโทรด) ด้วยระดับต่างๆกัน 10 ระดับ ของหน้าตัดวงกลม

จำนวนที่	กระแสไฟฟ้	copper						difference			diff average (g)
		Before(g)		After(g)		1	2	3			
1	6	47.151	49.575	48.117	47.148	49.573	48.115	0.003	0.002	0.002	0.00233
2	8	47.455	46.002	45.687	47.453	45.999	45.684	0.002	0.003	0.003	0.00267
3	10	47.517	47.413	47.705	47.515	47.412	47.699	0.002	0.001	0.006	0.00300
4	12	46.406	44.777	47.425	46.367	44.732	47.395	0.039	0.045	0.030	0.03800
5	14	47.725	49.502	46.111	47.720	49.491	46.106	0.005	0.011	0.005	0.00700
6	17	49.128	50.087	43.405	49.112	50.071	43.402	0.016	0.016	0.003	0.01167
7	20	49.872	47.515	47.021	49.864	47.507	47.012	0.008	0.008	0.009	0.00833
8	22	49.205	47.453	45.224	49.196	47.445	45.219	0.009	0.008	0.005	0.00733
9	27	49.832	47.148	45.273	49.810	47.128	45.260	0.022	0.020	0.013	0.01833
10	30	49.271	44.965	47.628	49.192	44.886	47.325	0.315	0.305	0.303	0.30767

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแส (A)	ratio
6	0.001352
8	0.001523
10	0.001693
12	0.022401
14	0.003827
17	0.006838
20	0.004688
22	0.003942
27	0.010086
30	0.166445

กราฟแสดงความสัมพันธ์อัตราการสึกกร่อนที่สภาวะต่างๆ ด้วยเงื่อนไขการสปาร์ค  
แนวแกน Z หน้าตัดวงกลม



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์อัตราการสึกกร่อนที่สภาวะต่างๆ ด้วยเงื่อนไขการสปาร์คแนวแกน Z หน้าตัดวงกลม

ตารางที่ 4.3 ผลที่ได้จากการทดลองสปาร์ตในแนวแกน XYZ ของเหล็ก (ชิ้นงาน) ด้วยระดับต่างกัน 10 ระดับ ของหน้าตัดวงกลม

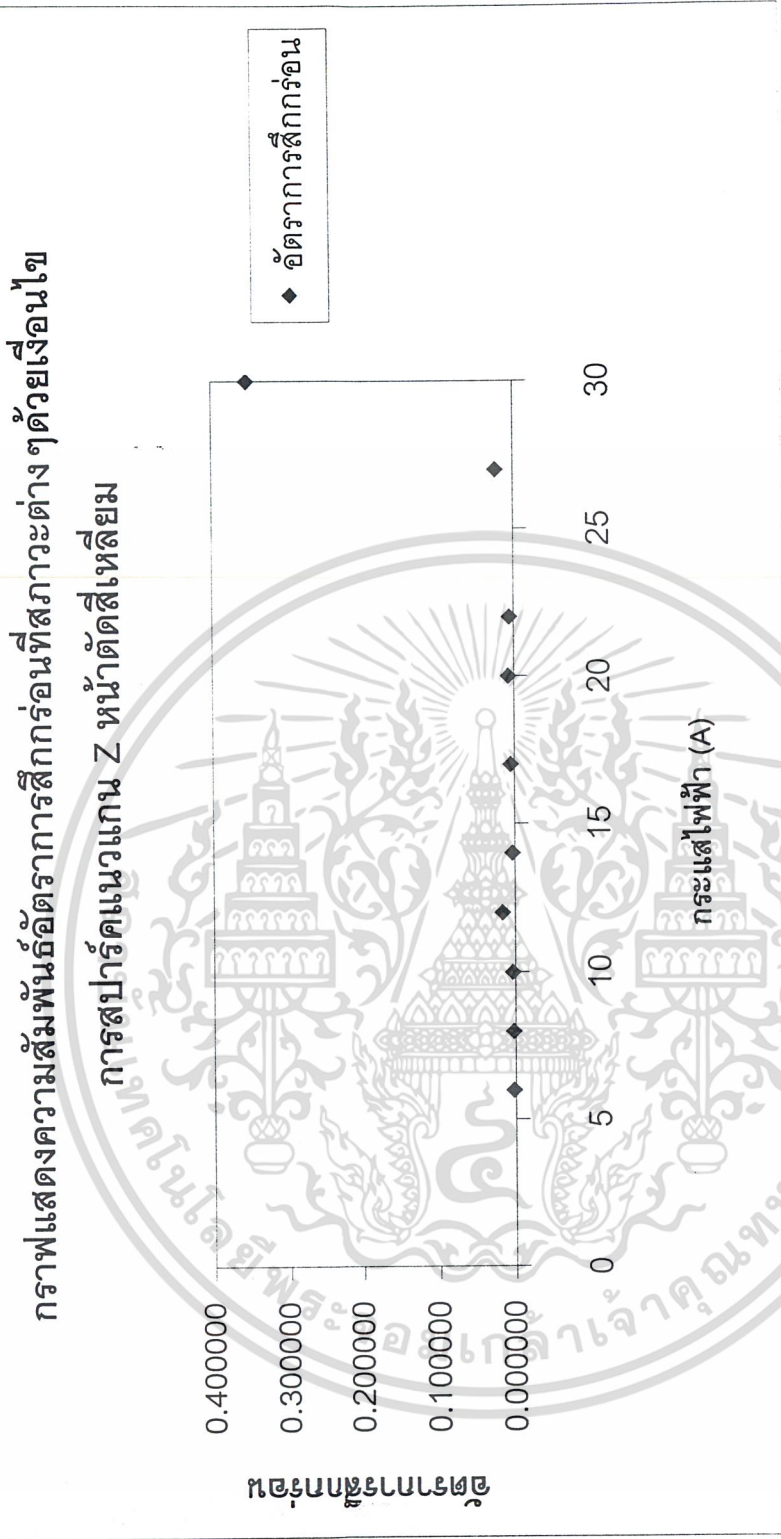
ชั้นงานที่	กระแสไฟ (A)	steel						difference			diff average (g)
		Before(g)	After(g)	1	2	3					
1	86.570	85.721	87.000	84.519	83.706	84.989	2.051	2.015	2.011	2.026	
2	86.489	84.295	81.770	84.445	82.236	79.714	2.044	2.059	2.056	2.053	
3	85.581	83.567	84.288	83.367	81.330	82.066	2.214	2.237	2.222	2.224	
4	88.179	86.086	81.737	86.111	84.014	79.694	2.068	2.072	2.043	2.061	
5	87.779	85.507	84.241	85.507	83.268	81.970	2.272	2.239	2.271	2.261	
6	88.017	85.569	85.575	85.569	83.120	83.095	2.448	2.449	2.480	2.459	
7	85.993	83.655	85.828	83.655	81.272	83.473	2.338	2.383	2.355	2.359	
8	86.645	84.164	84.321	84.164	81.667	81.837	2.481	2.497	2.484	2.487	
9	85.736	83.346	84.713	83.646	81.238	82.618	2.090	2.108	2.095	2.098	
10	84.039	81.554	86.900	81.854	79.408	84.727	2.185	2.146	2.173	2.168	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ที่ออกทั้งหมดมีให้คิดเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ผลที่ได้จากการทดลองสปาร์ตในแนวแกน XYZ ของทองแดง (ซีวิลเคิลโทรต) ด้วยระดับต่างกัน 10 ระดับ ของหม้อต้มน้ำดีดวงกลม

ชั้นงานที่	กระแส (A)	copper			difference			diff average (g)			
		Before(g)	After(g)		1	2	3				
1	6	46.880	49.202	48.161	46.844	49.169	48.117	0.036	0.033	0.044	0.038
2	8	47.283	47.239	44.341	47.239	47.193	44.287	0.044	0.046	0.054	0.048
3	10	47.370	47.273	46.142	47.273	47.215	46.093	0.097	0.058	0.049	0.068
4	12	49.326	49.153	48.056	49.153	48.991	47.891	0.173	0.162	0.165	0.167
5	14	45.822	45.729	44.442	45.729	45.642	44.341	0.093	0.087	0.101	0.094
6	17	47.329	47.200	47.535	47.200	47.092	47.425	0.129	0.108	0.110	0.116
7	20	49.319	49.169	47.923	49.128	48.978	47.705	0.191	0.191	0.218	0.200
8	22	49.000	48.858	48.200	48.858	48.717	48.056	0.142	0.141	0.144	0.142
9	27	49.601	49.307	45.947	49.307	49.007	45.687	0.294	0.300	0.260	0.285
10	30	45.534	45.219	46.407	45.219	44.914	46.111	0.315	0.305	0.296	0.305

กระแสไฟฟ้ (A)	ratio
6	0.002691
8	0.002695
10	0.003007
12	0.016759
14	0.003191
17	0.004743
20	0.007270
22	0.006171
27	0.023036
30	0.353717



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์พื้นที่อัตราการศึกษาที่สภาวะต่างๆ ด้วยเงื่อนไขการสปาร์ตแนวแกน XYZ หน้าตีสี่เหลี่ยม

ตารางที่ 4.5 ผลที่ได้จากการทดลองสปาร์กอินแนวกาน Z ของเหล็ก (ชิ้นงาน) ด้วยระดับต่างๆกัน 10 ระดับ ของหน้าตัดสี่เหลี่ยม

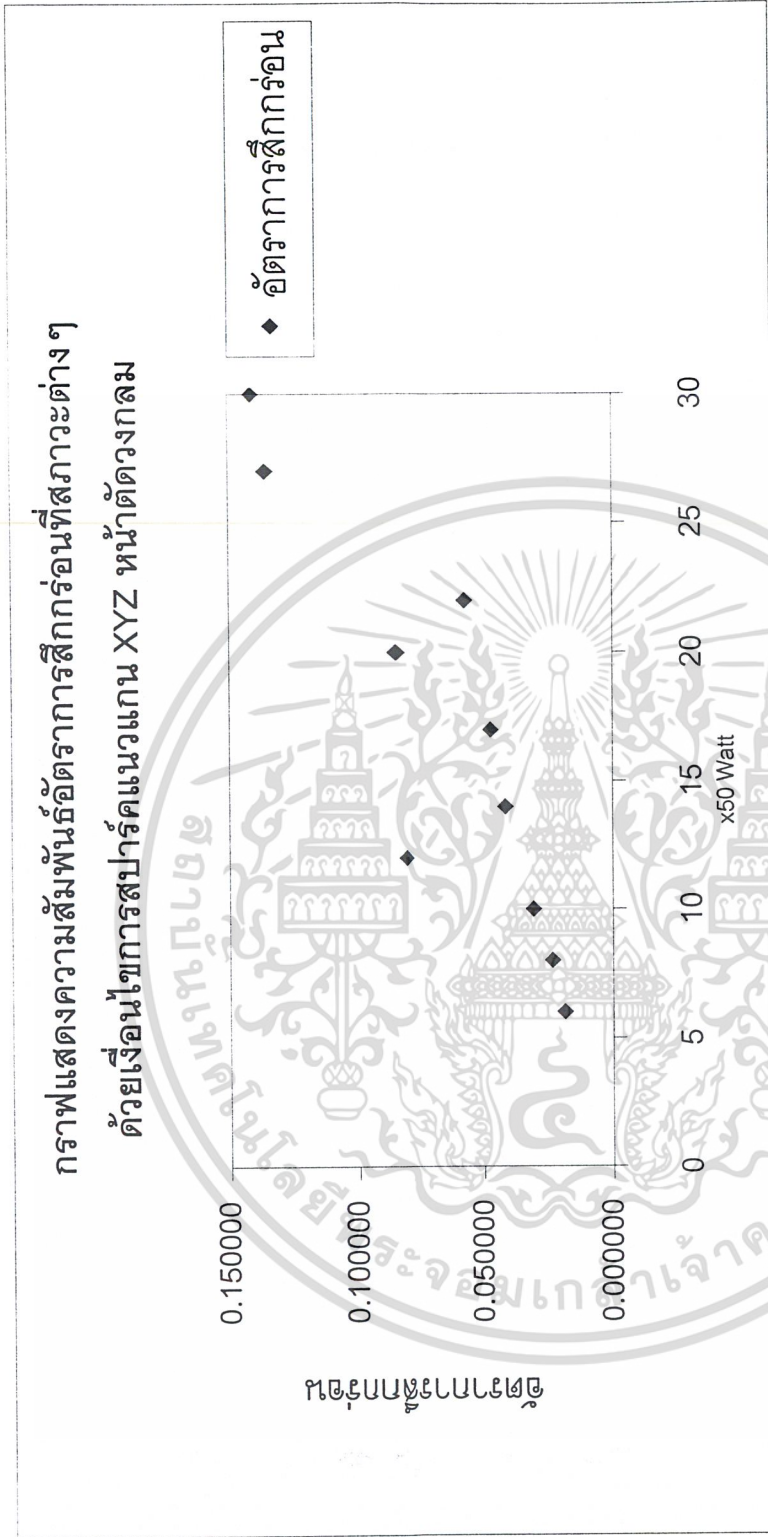
จำนวนที่	กระแสไฟ (A)	steel			After(g)	1	difference		diff average (g)	
		Before(g)					2	3		
1	6	12.531	11.605	10.817	11.672	10.741	9.942	0.859000	0.875000	0.866000
2	8	12.270	11.439	10.648	11.549	10.673	9.886	0.721000	0.762000	0.749667
3	10	12.588	11.631	10.638	11.705	10.718	9.762	0.883000	0.876000	0.890667
4	12	12.952	12.347	10.668	12.090	11.496	9.814	0.862000	0.854000	0.855667
5	14	12.694	12.116	17.833	11.730	11.200	16.891	0.964000	0.942000	0.940667
6	17	12.704	11.638	10.654	11.949	10.866	9.861	0.755000	0.772000	0.773333
7	20	12.968	11.774	17.901	12.116	10.893	17.016	0.852000	0.885000	0.872667
8	22	12.468	11.846	17.460	11.613	10.966	16.605	0.855000	0.880000	0.863333
9	27	12.700	11.743	17.210	11.839	10.915	16.385	0.861000	0.828000	0.838000
10	30	12.883	11.673	17.480	12.033	10.841	16.625	0.850000	0.832000	0.845667

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ผลที่ได้จากการทดลองสปาร์กในแนวแกน Z ของทองแดง (ซีวอิลเลคโทรด) ด้วยระดับต่างๆกัน 10 ระดับ ของหน้าต่างดีทีเอเอ็ม

ชั้นงานที่	กระแสไฟ (A)	copper			After(g0)			difference			diff average (g)
		Before(g)						1	2	3	
1	6	21.757	21.338	13.581	21.755	21.336	13.578	0.002000	0.002000	0.003000	0.002333
2	8	21.502	22.783	14.032	21.499	22.781	14.031	0.003000	0.002000	0.001000	0.002000
3	10	23.447	20.652	22.118	23.445	20.650	22.114	0.002000	0.002000	0.004000	0.002667
4	12	19.486	22.799	23.892	19.473	22.783	23.878	0.013000	0.016000	0.014000	0.014333
5	14	16.282	21.341	25.546	16.279	21.338	25.543	0.003000	0.003000	0.003000	0.003000
6	17	14.687	16.070	18.386	14.683	16.067	18.382	0.004000	0.003000	0.004000	0.003667
7	20	21.764	20.659	19.004	21.757	20.652	18.999	0.007000	0.007000	0.005000	0.006333
8	22	21.507	22.168	20.608	21.502	22.162	20.603	0.005000	0.006000	0.005000	0.005333
9	27	23.470	14.682	25.574	23.447	14.675	25.546	0.023000	0.007000	0.028000	0.019333
10	30	22.214	19.471	26.745	22.168	19.308	26.468	0.315000	0.305000	0.277000	0.299000

กระแส (A)	ratio
6	0.018603
8	0.023377
10	0.030597
12	0.080868
14	0.041421
17	0.047050
20	0.084805
22	0.057225
27	0.135697
30	0.140836



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์อัตราการสึกกร่อนเฉลี่ยที่สภาวะต่างๆ ด้วยเงื่อนไขการสปาร์คแนวแกน Z หน้าตัดสี่เหลี่ยม

ตารางที่ 4.7 ผลที่ได้จากการทดลองสปาร์คในแนวแกน XYZ ของเหล็ก (ชิ้นงาน) ด้วยระดับต่างกัน 10 ระดับ ของหน้าตัดสี่เหลี่ยม

ชิ้นงานที่	กระแสไฟฟ้	steel			difference			diff average			
		Before(g)			After(g)						
		1	2	3	1	2	3				
1	6	88.830	84.490	81.307	87.229	82.904	79.738	1.601000	1.586000	1.569000	1.585333
2	8	47.952	47.354	84.399	46.490	45.891	82.938	1.462000	1.463000	1.461000	1.462000
3	10	83.766	87.214	88.280	82.076	85.564	86.586	1.690000	1.650000	1.694000	1.678000
4	12	48.578	83.806	85.239	47.168	82.406	83.803	1.410000	1.400000	1.436000	1.415333
5	14	88.407	86.582	84.456	86.705	84.857	82.742	1.702000	1.725000	1.714000	1.713667
6	17	89.122	84.700	78.623	87.467	83.081	76.988	1.655000	1.619000	1.635000	1.636333
7	20	46.022	87.466	85.978	44.659	86.082	84.596	1.363000	1.384000	1.382000	1.376333
8	22	88.171	44.629	84.727	86.586	43.053	83.187	1.585000	1.576000	1.540000	1.567000
9	27	85.616	86.705	76.878	84.416	85.465	75.650	1.200000	1.240000	1.228000	1.222667
10	30	84.972	47.168	78.035	83.686	45.916	76.778	1.286000	1.252000	1.257000	1.265000

ตารางที่ 4.8 ผลที่ได้จากการทดลองสปาร์กในแนวแกน XYZ ของทองแดง (ซิวอิลเดคโทเรด) ด้วยระดับต่างๆกัน 10 ระดับ ของหน้าตัดสี่เหลี่ยม

จำนวนที่	กระแส (A)	copper			difference			diff average (g)	
		Before(g)	After(g)	1	2	3			
1	6	14.076	19.937	14.027	19.207	19.882	0.049000	0.049000	
2	8	19.980	18.435	19.938	21.389	18.386	0.042000	0.049000	0.044000
3	10	21.079	23.941	21.026	21.430	23.892	0.053000	0.047000	0.049667
4	12	22.619	22.235	22.497	20.254	22.118	0.122000	0.131000	0.123333
5	14	21.170	21.875	21.096	17.152	21.812	0.074000	0.069000	0.068667
6	17	17.937	19.561	17.849	14.033	19.466	0.088000	0.094000	0.092333
7	20	20.443	18.324	20.296	19.250	18.169	0.147000	0.168000	0.156667
8	22	15.838	20.725	15.711	20.164	20.608	0.127000	0.132000	0.125333
9	27	18.108	19.195	17.937	20.956	19.004	0.171000	0.140000	0.167333
10	30	21.314	17.151	21.079	22.260	16.849	0.315000	0.305000	0.307333

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้นหากท่านมีให้คิดเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงความสัมพันธ์อัตราการสึกกร่อนที่สภาวะต่างๆ ด้วยเงื่อนไข  
การสปาร์คแวนแกน XYZ หน้าตัดสี่เหลี่ยม



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์อัตราการสึกกร่อนเฉลี่ยที่สภาวะต่างๆ ด้วยเงื่อนไขการสปาร์คแวนแกน XYZ หน้าตัดสี่เหลี่ยม

กระแสด (A)	ratio
6	0.030924
8	0.030097
10	0.029590
12	0.087191
14	0.040078
17	0.056446
20	0.113798
22	0.079952
27	0.136980
30	0.242937

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### การวิเคราะห์ผลการทดลองและการประมวลผลโดยใช้โปรแกรม SPSS

#### 5.1 การประมาณขนาดตัวอย่าง

การยอมรับความผิดพลาด - มีเพียงแต่ผู้ที่ทำการศึกษาในเรื่องนั้นเท่านั้นที่จะบอกได้ว่าต้องการความเที่ยงตรงแม่นยำเท่าใด โดยความเที่ยงตรงที่ต้องการจะแสดงออกมาในรูป

$$P(|\bar{y} - y_u| \leq e) = 1 - \alpha$$

ผู้ทำการศึกษาต้องตัดสินใจอย่างมีเหตุผล ในการกำหนดค่า  $\alpha$  และ  $e$

โดยที่  $e$  คือ ค่าเพื่อความผิดพลาดจากการสำรวจ

โดยทั่วไปมักใช้  $e = 0.03$  และ  $\alpha = 0.05$

ในบางครั้งที่ต้องการให้ได้ความเที่ยงตรงมากขึ้น จะเป็น

$$P\left(\frac{|\bar{y} - y_u|}{y_u} \leq e\right) = 1 - \alpha$$

##### 5.1.1 สมการการหาจำนวนกลุ่มตัวอย่าง

สมการการหาขนาดกลุ่มตัวอย่างจะหาได้จากการใช้ช่วงความเชื่อมั่น โดยขนาดของกลุ่มตัวอย่างจะได้มาจากสมการ

$$e = Z_{\alpha/2} \sqrt{\left(1 - \frac{n}{N}\right) \left(\frac{s}{\sqrt{n}}\right)^2}$$

ทำให้อยู่ในรูปค่า  $n$

$$n = \frac{Z_{\alpha/2}^2 S^2}{e^2 + \frac{Z_{\alpha/2}^2 S^2}{N}} = \frac{n_0}{1 + \frac{n_0}{N}} \dots \dots \dots (5.1)$$

เมื่อ  $n_0 = \frac{Z_{\alpha/2}^2 S^2}{e^2}$

##### 5.1.2 การหาค่าขนาดตัวอย่างที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดความถูกต้องในการทดลอง

จากสมการที่ (5.1) จะมีความเที่ยงตรงและมีความแม่นยำเมื่อ ค่า  $N$  (จำนวนข้อมูลของประชากร) มีค่ามากๆ ในการวิจัยนี้ไม่สามารถหาจำนวนประชากรได้ จึงสมมติให้  $N$  มีค่ามากๆ (infinity) ดังนั้นจาก

$$n = \frac{Z_{\alpha/2}^2 S^2}{e^2 + \frac{Z_{\alpha/2}^2 S^2}{N}} = \frac{n_0}{1 + \frac{n_0}{N}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ 38 อังอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{จะได้ } n = \frac{n_0}{1 + \frac{n_0}{\infty}}$$

$$n = n_0 = \frac{Z_{\alpha/2}^2 S^2}{e^2} \dots\dots\dots(2)$$

จากตารางผลการทดลองที่ได้คำนวณเป็นค่า Standard Deviation ดังนี้  
หน้าตัดวงกลมแนวแกน Z

กระแส(A)	6	8	10	12	14	17	20	22	27	30
S(Steel)	0.016803	0.008888	0.014434	0.021733	0.002517	0.013051	<b>0.023116</b>	0.017214	0.010392	0.021502
S(Copper)	0.000577	0.000577	0.002646	0.00755	0.003464	0.007506	0.000577	0.002082	0.004726	0.006429

กำหนด  $\alpha = 0.05$ , จากสมการที่ 5.1

$$n(\text{steel}) = \frac{Z_{\alpha/2}^2 S^2}{e^2} = \frac{1.96^2 * 0.023116^2}{0.03^2} = 2.281$$

หน้าตัดวงกลมแนวแกน XYZ

กระแส(A)	6	8	10	12	14	17	20	22	27	30
S(Steel)	0.02203	0.007937	0.011676	0.015716	0.018771	0.018193	<b>0.022723</b>	0.008505	0.009292	0.019975
S(Copper)	0.005686	0.005292	0.025515	0.005686	0.007024	0.01159	0.015588	0.001528	0.021572	0.009504

$$n(\text{steel}) = \frac{Z_{\alpha/2}^2 S^2}{e^2} = \frac{1.96^2 * 0.022723^2}{0.03^2} = 2.203$$

หน้าตัดสี่เหลี่ยมแนวแกน Z

กระแส(A)	6	8	10	12	14	17	20	22	27	30
S(Steel)	0.008185	<b>0.024906</b>	0.019655	0.005686	0.024028	0.019035	0.018009	0.014434	0.019975	0.012097
S(Copper)	0.000577	0.001000	0.001155	0.001528	0.000000	0.000577	0.001155	0.000577	0.010970	0.019698

$$n(\text{steel}) = \frac{Z_{\alpha/2}^2 S^2}{e^2} = \frac{1.96^2 * 0.024906^2}{0.03^2} = 2.648$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้าตัดสี่เหลี่ยมแนวแกน XYZ

กระแส(A)	6	8	10	12	14	17	20	22	27	30
S(Steel)	0.016010	0.001000	0.024331	0.018583	0.011504	0.018037	0.011590	0.023812	0.020526	0.018358
S(Copper)	0.006000	0.004359	0.003055	0.007095	0.005508	0.003786	0.010599	0.007638	0.025697	0.006807

$$n(\text{steel}) = \frac{Z_{\alpha/2}^2 S^2}{e^2} = \frac{1.96^2 * 0.024331^2}{0.03^2} = 2.527$$

จะเห็นว่า ค่า n แต่ละตัวมีค่าน้อยกว่า  $n_0$  ซึ่งเท่ากับ 3  
 ดังนั้น Sample Size ที่เหมาะสมคือ 3 (จึงไม่จำเป็นต้องเก็บตัวอย่างเพิ่มอีก)

## 5.2 การวิเคราะห์ข้อมูล

### 5.2.1 กำหนดสมมติฐาน

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 0$$

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

### 5.2.2 กำหนดระดับนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$ หรือที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

### 5.2.3 ทำการสุ่มตัวอย่างจากทฤษฎีที่ได้กล่าวข้างต้นแล้ว

### 5.2.4 เลือกค่าสถิติที่เหมาะสม

เลือกค่าสถิติแบบ F ใช้ในการทดสอบ ด้วยเหตุผล ดังนี้

5.2.4.1 ขนาดตัวอย่างที่นำมาเปรียบเทียบกันมีจำนวนเท่ากัน ( n เท่ากัน ) แม้จะมีขนาดตัวอย่างน้อย ก็พออนุมานได้ว่าการแจกแจงเป็นโค้งปกติ (Roscoe, 1975 : 300)

5.2.4.2 เนื่องจากข้อมูลที่ได้ มาจากประชากรที่มีความแปรปรวนเท่ากัน ในที่นี้จะทดสอบเพียงส่วนหนึ่ง โดยใช้วิธี Hartley  $F_{\max}$  Test ดังนี้

$$F_{\max} = \text{Largest } S^2 / \text{Smallest } S^2$$

ข้อมูลที่ได้จากการสปาร์คในแนวแกน Z ด้วยหน้าตัดวงกลม ของเหล็ก (ชิ้นงาน) ได้ว่าที่

กระแสไฟ	$S^2$
140	0.000282333
150	0.000795664
160	0.000208333
173	0.000472333

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ 170 ชิ้นงานเพื่อการ 0.000633333 นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสไฟ	S <sup>2</sup>
280	0.000170333
180	0.000534333
290	0.000282333
190	0.000158000
193	0.000462333

$$\begin{aligned} \therefore F_{\max} &= 0.000795664 / 0.000158000 \\ &= 5.035 \end{aligned}$$

จากค่า  $F_{\max}$  ที่คำนวณได้นำไปเปรียบเทียบกับค่า  $F_{\max}$  ในตารางที่  $\alpha = 0.05$  และ  $df = n - 1 = 10 - 1 = 9$  นั้น จะมีค่า 5.12 แสดงว่า ค่าที่คำนวณได้ไม่มากกว่าค่าในตาราง ฉะนั้นจึงสรุปได้ว่า กลุ่มตัวอย่างทั้ง 10 นั้นสุ่มเลือกมาจากประชากรที่มีความแปรปรวนเท่ากัน

### 5.3 การประมวลผลด้วยโปรแกรม SPSS 10.0.1

นำค่าที่ได้จากการทดลองมาใส่ค่าในโปรแกรม เพื่อให้โปรแกรมทำการประมวลผล ซึ่งผลที่ได้จากการประมวลเป็นดังนี้

ตารางที่ 5.1 Univariate Analysis of Variance Between-Subjects Factors

		Value Label	N
รูปแบบหน้าตัด	1.00	วงกลม	60
	2.00	สี่เหลี่ยม	60
รูปแบบการเดิน	1.00	z	60
	2.00	xyz	60
กระแสไฟ	1.00	6	12
	2.00	8	12
	3.00	10	12
	4.00	12	12
	5.00	14	12
	6.00	17	12
	7.00	20	12
	8.00	22	12
	9.00	27	12
	10.00	30	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 Tests of Between-Subjects Effects. Dependent Variable: ABC

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	0.635115466	39	0.016285012	344.1680808	0
Intercept	0.348154881	1	0.348154881	7357.918911	0
A	0.01129074	1	0.01129074	238.6189368	0
B	0.055779818	1	0.055779818	1178.852851	0
C	0.440144428	9	0.048904936	1033.558844	0
A * B	1.26169E-05	1	1.26169E-05	0.266647023	0.60701436
A * C	0.053108941	9	0.005900993	124.7118258	0
B * C	0.068086215	9	0.007565135	159.8818602	0
A * B * C	0.006692708	9	0.000743634	15.7159938	1.8985E-14
Error	0.003785363	80	4.7317E-05		
Total	0.987055709	120			
Corrected Total	0.638900828	119			

a.R Squared = .994 (Adjusted R Squared = .991)

เมื่อ A คือ รูปแบบหน้าตัดของขั้วอิเล็กโทรด

B คือ รูปแบบทางเดินของขั้วอิเล็กโทรด

C คือ สภาวะหรือระดับกระแสไฟ ต่างๆ

และ เครื่องหมาย “\*” แทน การมีปฏิสัมพันธ์กัน (interaction)

ส่วนตารางที่ 5.3 เป็นการวิเคราะห์ความแตกต่างโดยวิธี LSD, Duncan และ Turkey ผ่าน โปรแกรม SPSS ใช้หลักการดังนี้

LSD จะทำการเปรียบเทียบตัวอย่างเป็นคู่ โดยตัวอย่าง 1 เทียบกับตัวอย่าง 2 และ 3, ตัวอย่าง 2 เทียบกับตัวอย่าง 1 และ 3 และตัวอย่าง 3 เทียบกับตัวอย่าง 1 และ 2 โดยตัวอย่างที่แตกต่างกันนั้นค่า Sig. จะน้อยกว่า 0.05 หรือสังเกตได้จากคอลัมน์ Mean Difference ถ้าปรากฏมี \* เกิดขึ้นแสดงว่าตัวอย่งนั้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

Duncan จะทำการจัดกลุ่มตัวอย่าง โดยตัวอย่างที่อยู่ใน subset เดียวกัน จะถือว่าไม่แตกต่างกัน

Tukey จะแสดงผลเปรียบเทียบเป็นคู่ๆ ลักษณะเดียวกับ LSD และจัดกลุ่มเป็น subset ลักษณะเดียวกับ

Duncan

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 Post Hoc Tests

กระแสไฟ

Multiple Comparisons

Dependent Variable: ABC

			Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
	(I) กระแสไฟ	(J) กระแสไฟ				Lower Bound	Upper Bound
Tukey HSD	6	8	-0.00103	0.002808	0.999998	-0.01017	0.008109
		10	-0.00283	0.002808	0.990995	-0.01197	0.00631
		12	-0.03841	0.002808	5.96E-06	-0.04755	-0.02927
		14	-0.00874	0.002808	0.073069	-0.01788	0.000403
		17	-0.01538	0.002808	2.64E-05	-0.02452	-0.00624
		20	-0.03925	0.002808	5.96E-06	-0.04839	-0.03011
		22	-0.02343	0.002808	5.96E-06	-0.03257	-0.01429
		27	-0.06306	0.002808	5.96E-06	-0.0722	-0.05392
		30	-0.21259	0.002808	5.96E-06	-0.22173	-0.20345
	8	6	0.001031	0.002808	0.999998	-0.00811	0.01017
		10	-0.0018	0.002808	0.999732	-0.01094	0.007341
		12	-0.03738	0.002808	5.96E-06	-0.04652	-0.02824
		14	-0.00771	0.002808	0.174363	-0.01685	0.001434
		17	-0.01435	0.002808	9.58E-05	-0.02349	-0.00521
		20	-0.03822	0.002808	5.96E-06	-0.04736	-0.02908
		22	-0.0224	0.002808	5.96E-06	-0.03154	-0.01326
		27	-0.06203	0.002808	5.96E-06	-0.07117	-0.05289
		30	-0.21156	0.002808	5.96E-06	-0.2207	-0.20242
	10	6	0.00283	0.002808	0.990995	-0.00631	0.01197
		8	0.001799	0.002808	0.999732	-0.00734	0.010939
		12	-0.03558	0.002808	5.96E-06	-0.04472	-0.02644
		14	-0.00591	0.002808	0.530665	-0.01505	0.003233
		17	-0.01255	0.002808	0.001024	-0.02169	-0.00341

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	(I) กระแสไฟ	(J) กระแสไฟ	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
		20	-0.03642	0.002808	5.96E-06	-0.04556	-0.02728
		22	-0.0206	0.002808	5.96E-06	-0.02974	-0.01146
		27	-0.06023	0.002808	5.96E-06	-0.06937	-0.05109
		30	-0.20976	0.002808	5.96E-06	-0.2189	-0.20062
	12	6	0.038412	0.002808	5.96E-06	0.029272	0.047552
		8	0.037382	0.002808	5.96E-06	0.028242	0.046522
		10	0.035582	0.002808	5.96E-06	0.026443	0.044722
		14	0.029676	0.002808	5.96E-06	0.020536	0.038815
		17	0.023035	0.002808	5.96E-06	0.013896	0.032175
		20	-0.00084	0.002808	1	-0.00998	0.008304
		22	0.014982	0.002808	4.23E-05	0.005842	0.024122
		27	-0.02464	0.002808	5.96E-06	-0.03378	-0.01551
		30	-0.17418	0.002808	5.96E-06	-0.18332	-0.16504
	14	6	0.008737	0.002808	0.073069	-0.0004	0.017877
		8	0.007706	0.002808	0.174363	-0.00143	0.016846
		10	0.005907	0.002808	0.530665	-0.00323	0.015047
		12	-0.02968	0.002808	5.96E-06	-0.03882	-0.02054
		17	-0.00664	0.002808	0.360853	-0.01578	0.0025
		20	-0.03051	0.002808	5.96E-06	-0.03965	-0.02137
		22	-0.01469	0.002808	6.11E-05	-0.02383	-0.00555
		27	-0.05432	0.002808	5.96E-06	-0.06346	-0.04518
		30	-0.20385	0.002808	5.96E-06	-0.21299	-0.19471
	17	6	0.015377	0.002808	2.64E-05	0.006237	0.024517
		8	0.014346	0.002808	9.58E-05	0.005206	0.023486
		10	0.012547	0.002808	0.001024	0.003407	0.021687
		12	-0.02304	0.002808	5.96E-06	-0.03218	-0.0139
		14	0.00664	0.002808	0.360853	-0.0025	0.01578
		20	-0.02387	0.002808	5.96E-06	-0.03301	-0.01473

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

			Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
	(I) กระแสไฟ	(I) กระแสไฟ				Lower Bound	Upper Bound
		22	-0.00805	0.002808	0.132322	-0.01719	0.001087
		27	-0.04768	0.002808	5.96E-06	-0.05682	-0.03854
		30	-0.19721	0.002808	5.96E-06	-0.20635	-0.18807
	20	6	0.039248	0.002808	5.96E-06	0.030108	0.048388
		8	0.038217	0.002808	5.96E-06	0.029077	0.047357
		10	0.036418	0.002808	5.96E-06	0.027278	0.045558
		12	0.000836	0.002808	1	-0.0083	0.009975
		14	0.030511	0.002808	5.96E-06	0.021371	0.039651
		17	0.023871	0.002808	5.96E-06	0.014731	0.033011
		22	0.015818	0.002808	1.65E-05	0.006678	0.024957
		27	-0.02381	0.002808	5.96E-06	-0.03295	-0.01467
		30	-0.17334	0.002808	5.96E-06	-0.18248	-0.1642
	22	6	0.02343	0.002808	5.96E-06	0.01429	0.03257
		8	0.0224	0.002808	5.96E-06	0.01326	0.031539
		10	0.0206	0.002808	5.96E-06	0.011461	0.02974
		12	-0.01498	0.002808	4.23E-05	-0.02412	-0.00584
		14	0.014693	0.002808	6.11E-05	0.005554	0.023833
		17	0.008053	0.002808	0.132322	-0.00109	0.017193
		20	-0.01582	0.002808	1.65E-05	-0.02496	-0.00668
		27	-0.03963	0.002808	5.96E-06	-0.04877	-0.03049
		30	-0.18916	0.002808	5.96E-06	-0.1983	-0.18002
	27	6	0.063057	0.002808	5.96E-06	0.053917	0.072197
		8	0.062027	0.002808	5.96E-06	0.052887	0.071166
		10	0.060227	0.002808	5.96E-06	0.051088	0.069367
		12	0.024645	0.002808	5.96E-06	0.015505	0.033785
		14	0.05432	0.002808	5.96E-06	0.045181	0.06346
		17	0.04768	0.002808	5.96E-06	0.03854	0.05682
		20	0.023809	0.002808	5.96E-06	0.014669	0.032949

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	(I) กระแสไฟ	(J) กระแสไฟ	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
		22	0.039627	0.002808	5.96E-06	0.030487	0.048767
		30	-0.14953	0.002808	5.96E-06	-0.15867	-0.14039
	30	6	0.212591	0.002808	5.96E-06	0.203451	0.221731
		8	0.211561	0.002808	5.96E-06	0.202421	0.2207
		10	0.209761	0.002808	5.96E-06	0.200622	0.218901
		12	0.174179	0.002808	5.96E-06	0.165039	0.183319
		14	0.203854	0.002808	5.96E-06	0.194715	0.212994
		17	0.197214	0.002808	5.96E-06	0.188074	0.206354
		20	0.173343	0.002808	5.96E-06	0.164204	0.182483
		22	-0.189161	0.002808	5.96E-06	0.180021	0.198301
		27	0.149534	0.002808	5.96E-06	0.140394	0.158674
LSD	6	8	-0.00103	0.002808	0.714581	-0.00662	0.004558
		10	-0.00283	0.002808	0.31664	-0.00842	0.002759
		12	-0.03841	0.002808	0	-0.044	-0.03282
		14	-0.00874	0.002808	0.002583	-0.01433	-0.00315
		17	-0.01538	0.002808	4.88E-07	-0.02097	-0.00979
		20	-0.03925	0.002808	0	-0.04484	-0.03366
		22	-0.02343	0.002808	1.71E-12	-0.02902	-0.01784
		27	-0.06306	0.002808	0	-0.06865	-0.05747
		30	-0.21259	0.002808	0	-0.21818	-0.207
	8	6	0.001031	0.002808	0.714581	-0.00456	0.006619
		10	-0.0018	0.002808	0.523559	-0.00739	0.003789
		12	-0.03738	0.002808	0	-0.04297	-0.03179
		14	-0.00771	0.002808	0.007488	-0.01329	-0.00212
		17	-0.01435	0.002808	2.16E-06	-0.01993	-0.00876
		20	-0.03822	0.002808	0	-0.04381	-0.03263
		22	-0.0224	0.002808	9E-12	-0.02799	-0.01681
		27	-0.06203	0.002808	0	-0.06762	-0.05644

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

			Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
	(I) กระแสไฟ	(J) กระแสไฟ				Lower Bound	Upper Bound
		30	-0.21156	0.002808	0	-0.21715	-0.20597
	10	6	0.00283	0.002808	0.31664	-0.00276	0.008418
		8	0.001799	0.002808	0.523559	-0.00379	0.007388
		12	-0.03558	0.002808	0	-0.04117	-0.02999
		14	-0.00591	0.002808	0.038569	-0.0115	-0.00032
		17	-0.01255	0.002808	2.57E-05	-0.01814	-0.00696
		20	-0.03642	0.002808	0	-0.04201	-0.03083
		22	-0.0206	0.002808	1.6E-10	-0.02619	-0.01501
		27	-0.06023	0.002808	0	-0.06582	-0.05464
		30	-0.20976	0.002808	0	-0.21535	-0.20417
	12	6	0.038412	0.002808	0	0.032824	0.044001
		8	0.037382	0.002808	0	0.031793	0.04297
		10	0.035582	0.002808	0	0.029994	0.041171
		14	0.029676	0.002808	0	0.024087	0.035264
		17	0.023035	0.002808	3.24E-12	0.017447	0.028624
		20	-0.00084	0.002808	0.76683	-0.00642	0.004753
		22	0.014982	0.002808	8.67E-07	0.009393	0.020571
		27	-0.02464	0.002808	2.42E-13	-0.03023	-0.01906
		30	-0.17418	0.002808	0	-0.17977	-0.16859
	14	6	0.008737	0.002808	0.002583	0.003148	0.014325
		8	0.007706	0.002808	0.007488	0.002118	0.013295
		10	0.005907	0.002808	0.038569	0.000318	0.011496
		12	-0.02968	0.002808	0	-0.03526	-0.02409
		17	-0.00664	0.002808	0.020477	-0.01223	-0.00105
		20	-0.03051	0.002808	0	-0.0361	-0.02492
		22	-0.01469	0.002808	1.31E-06	-0.02028	-0.0091
		27	-0.05432	0.002808	0	-0.05991	-0.04873
		30	-0.20385	0.002808	0	-0.20944	-0.19827

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

			Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
	(I) กระแสไฟ	(J) กระแสไฟ				Lower Bound	Upper Bound
	17	6	0.015377	0.002808	4.88E-07	0.009788	0.020966
		8	0.014346	0.002808	2.16E-06	0.008758	0.019935
		10	0.012547	0.002808	2.57E-05	0.006959	0.018136
		12	-0.02304	0.002808	3.24E-12	-0.02862	-0.01745
		14	0.00664	0.002808	0.020477	0.001052	0.012229
		20	-0.02387	0.002808	8.43E-13	-0.02946	-0.01828
		22	-0.00805	0.002808	0.005283	-0.01364	-0.00246
		27	-0.04768	0.002808	0	-0.05327	-0.04209
		30	-0.19721	0.002808	0	-0.2028	-0.19163
	20	6	0.039248	0.002808	0	0.033659	0.044836
		8	0.038217	0.002808	0	0.032629	0.043806
		10	0.036418	0.002808	0	0.030829	0.042007
		12	0.000836	0.002808	0.76683	-0.00475	0.006424
		14	0.030511	0.002808	0	0.024922	0.0361
		17	0.023871	0.002808	8.43E-13	0.018282	0.029459
		22	0.015818	0.002808	2.55E-07	0.010229	0.021406
		27	-0.02381	0.002808	9.31E-13	-0.0294	-0.01822
		30	-0.17334	0.002808	0	-0.17893	-0.16775
	22	6	0.02343	0.002808	1.71E-12	0.017842	0.029019
		8	0.0224	0.002808	9E-12	0.016811	0.027988
		10	0.0206	0.002808	1.6E-10	0.015012	0.026189
		12	-0.01498	0.002808	8.67E-07	-0.02057	-0.00939
		14	0.014693	0.002808	1.31E-06	0.009105	0.020282
		17	0.008053	0.002808	0.005283	0.002465	0.013642
		20	-0.01582	0.002808	2.55E-07	-0.02141	-0.01023
		27	-0.03963	0.002808	0	-0.04522	-0.03404
		30	-0.18916	0.002808	0	-0.19475	-0.18357
	27	6	0.063057	0.002808	0	0.057469	0.068646

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	(I) กระแสไฟ	(J) กระแสไฟ	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
		8	0.062027	0.002808	0	0.056438	0.067615
		10	0.060227	0.002808	0	0.054639	0.065816
		12	0.024645	0.002808	2.42E-13	0.019056	0.030233
		14	0.05432	0.002808	0	0.048732	0.059909
		17	0.04768	0.002808	0	0.042092	0.053269
		20	0.023809	0.002808	9.31E-13	0.018221	0.029398
		22	0.039627	0.002808	0	0.034038	0.045215
		30	-0.14953	0.002808	0	-0.15512	-0.14395
	30	6	0.212591	0.002808	0	0.207003	0.21818
		8	0.211561	0.002808	0	0.205972	0.217149
		10	0.209761	0.002808	0	0.204173	0.21535
		12	0.174179	0.002808	0	0.16859	0.179767
		14	0.203854	0.002808	0	0.198266	0.209443
		17	0.197214	0.002808	0	0.191626	0.202803
		20	0.173343	0.002808	0	0.167755	0.178932
		22	0.189161	0.002808	0	0.183572	0.19475
		27	0.149534	0.002808	0	0.143945	0.155123

Based on observed means.

\* The mean difference is significant at the .05 level.

ตารางที่ 5.4 Homogeneous Subsets

ABC

		N		Subset		
	กระแสไฟ		1	2	3	4
Tukey HSD	6	12	0.013392			
	8	12	0.014423			
	10	12	0.016222			
	14	12	0.022129			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

		N	Subset			
	กระแสไฟ		1	2	3	4
Tukey HSD	17	12	0.028769			
	22	12	0.036823	0.0368226		
	12	12	0.051805	0.0518046		
		N	Subset			
	กระแสไฟ		1	2	3	4
Tukey HSD	20	12	0.05264	0.0526402		
	27	12		0.0764495		
	30	12			0.225984	
	Sig.		0.175949	0.1659912	1	
Duncan	6	12	0.013392			
	8	12	0.014423			
	10	12	0.016222			
	14	12	0.022129	0.0221291		
	17	12	0.028769	0.0287693		
	22	12	0.036823	0.0368226		
	12	12		0.0518046	0.051805	
	20	12		0.0526402	0.05264	
	27	12			0.07645	
	30	12				0.225984
	Sig.		0.159864	0.0598773	0.108342	1

Means for groups in homogeneous subsets are displayed. Based on Type III Sum of Squares

The error term is Mean Square(Error) = 4.732E-05.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 12.000.

b Alpha = .05.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### สรุปผล / การประยุกต์

#### 6.1 การสรุปผลการทดลองจากผลโปรแกรม SPSS

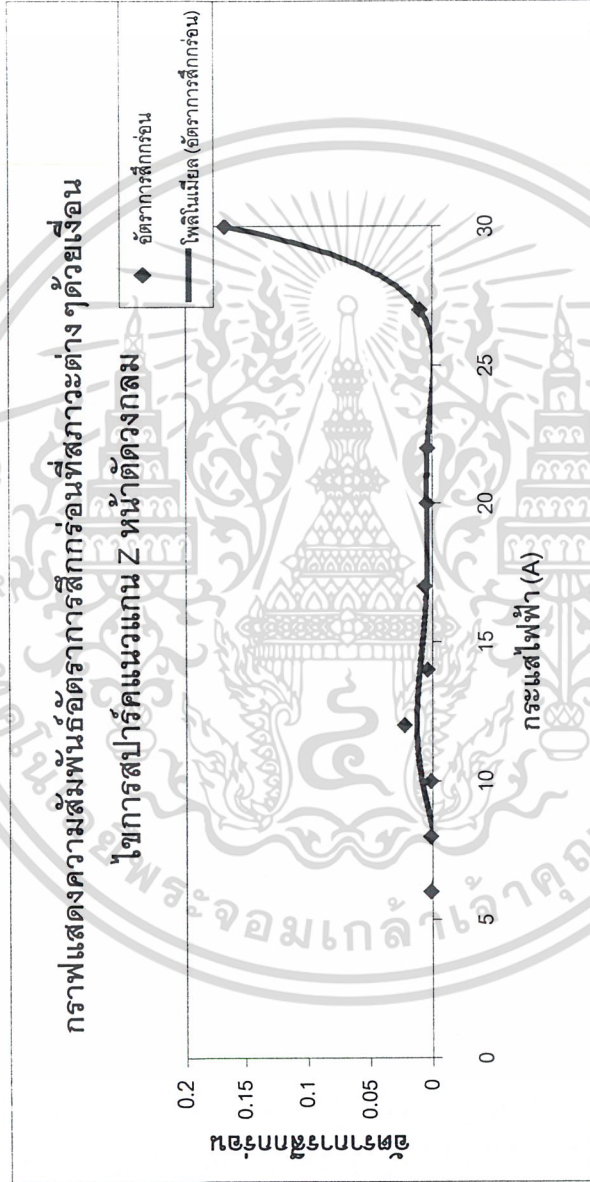
สรุปได้ดังนี้

1. รูปแบบหน้าตัดของขั้วอิเล็กโทรด ทำให้เกิดอัตราการสึกกร่อนที่แตกต่างกัน อย่างมีระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05
2. รูปแบบทางเดินของขั้วอิเล็กโทรดทำให้เกิดอัตราการสึกกร่อนที่แตกต่างกัน อย่างมีระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05
3. สถานะหรือระดับ กระแสไฟ ต่างๆทำให้เกิดอัตราการสึกกร่อนที่แตกต่างกัน อย่างมีระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05
4. เมื่อมีปัจจัยร่วมระหว่างรูปแบบหน้าตัดของขั้วอิเล็กโทรดและรูปแบบทางเดินของขั้วอิเล็กโทรดจะ *ไม่*ทำให้เกิดอัตราการสึกกร่อนที่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 เช่น  
หน้าตัดวงกลม + ทางเดินแบบ Z ที่ กระแสไฟ 6 A  
หน้าตัดสี่เหลี่ยม + ทางเดินแบบ XYZ ที่ กระแสไฟ 6 A  
จะทำให้เกิดการสึกกร่อนไม่แตกต่างกันหรือยอมรับว่าเท่ากัน
5. เมื่อมีปัจจัยร่วมระหว่างรูปแบบหน้าตัดของขั้วอิเล็กโทรดและระดับกระแสไฟ จะทำให้เกิดอัตราการสึกกร่อนที่แตกต่างกัน อย่างมีระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 เช่น  
หน้าตัดวงกลม + กระแสไฟ 27 A เเดินแบบ XYZ  
หน้าตัดสี่เหลี่ยม + กระแสไฟ 30 A เเดินแบบ XYZ  
จะทำให้เกิดอัตราการสึกกร่อนที่แตกต่างกัน
6. เมื่อมีปัจจัยร่วมระหว่างรูปแบบการเดินของขั้วอิเล็กโทรดและ ระดับกระแสไฟ จะทำให้เกิดอัตราการสึกกร่อนที่แตกต่างกัน อย่างมีระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 เช่น  
เดินแบบ Z + กระแสไฟ 17 A โดยใช้หน้าตัดสี่เหลี่ยม  
เดินแบบ XYZ + กระแสไฟ 12 A โดยใช้หน้าตัดสี่เหลี่ยม  
จะทำให้เกิดอัตราการสึกกร่อนที่แตกต่างกัน
7. เมื่อมีปัจจัยร่วมทั้ง 3 ปัจจัย คือ รูปแบบหน้าตัดของขั้วอิเล็กโทรดและรูปแบบทางเดินของขั้วอิเล็กโทรดและระดับกระแสไฟ จะทำให้เกิดอัตราการสึกกร่อนที่แตกต่างกัน อย่างมีระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 เช่น  
หน้าตัดสี่เหลี่ยม + เเดินแบบ Z + กระแสไฟ 20 A  
หน้าตัดวงกลม + เเดินแบบ XYZ + กระแสไฟ 17 A  
จะทำให้เกิดอัตราการสึกกร่อนที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.2 การประยุกต์

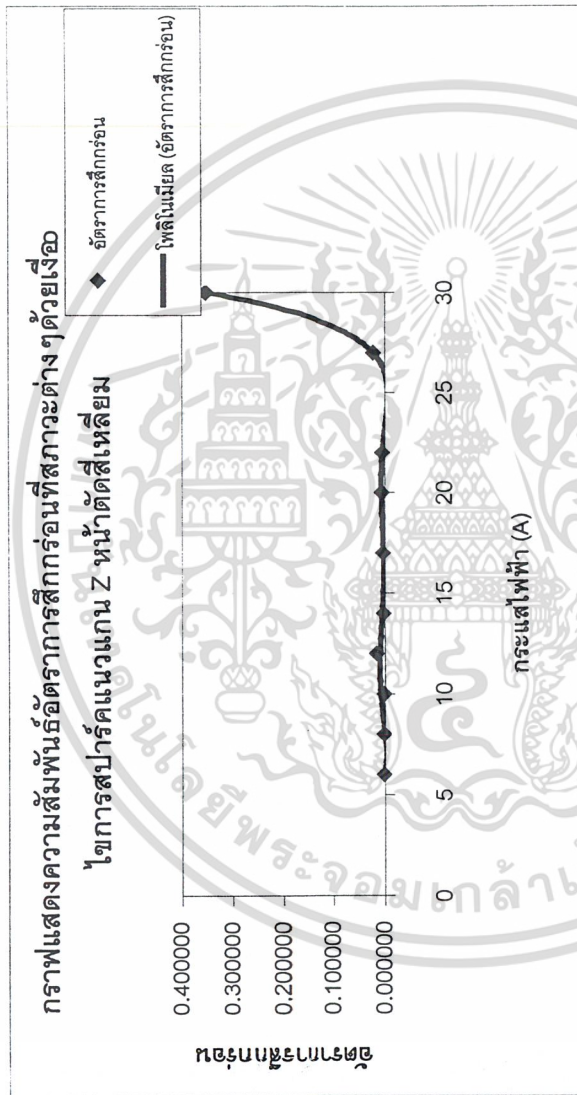
จากกราฟที่ได้เขียนกราฟได้ดังรูปที่ 4.1 – 4.4 ในขั้นตอนของการประยุกต์จะประมาณฟังก์ชันของกราฟด้วยสมการ คีร์รี 6 ดังต่อไปนี้ เพื่อประโยชน์ในการใช้พยากรณ์ หรือดูแนวโน้มของการทดลองดังกล่าว



$$Y = (8x 10^{-8})X^6 - (8x 10^{-6})X^5 + (3x 10^{-4})X^4 - (6.7x 10^{-3})X^3 + (7.32x 10^{-2})X^2 - 0.3981 X + 0.8414$$

$$R^2 = 0.9918$$

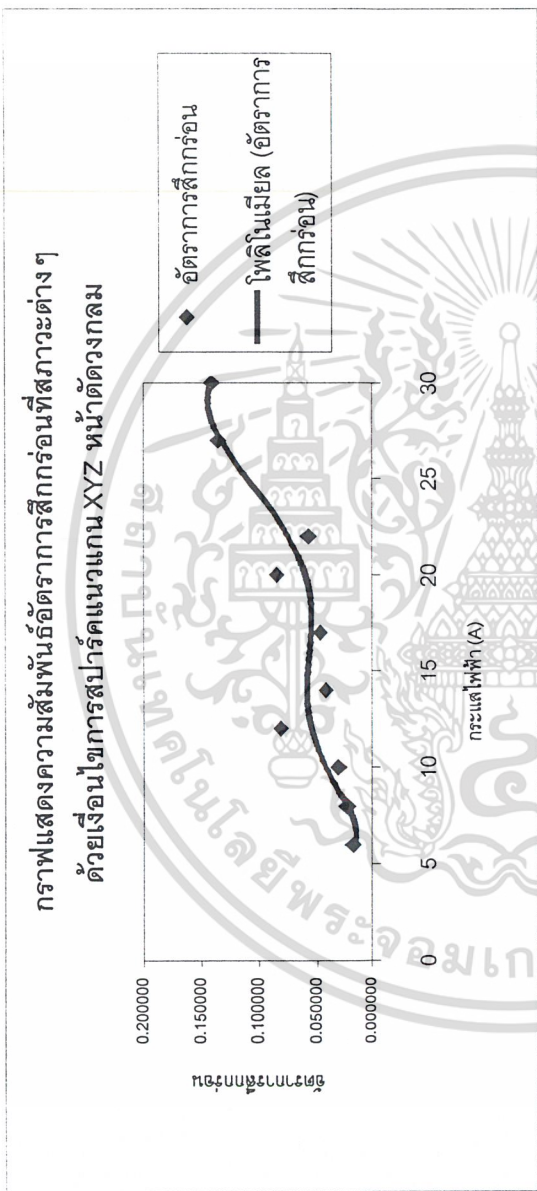
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$$Y = (1 \times 10^{-7})X^6 - (1 \times 10^{-5})X^5 + (5 \times 10^{-4})X^4 - (9.3 \times 10^{-3})X^3 + (9.76 \times 10^{-2})X^2 - 0.5126 X + 1.055$$

$$R^2 = 0.9991$$

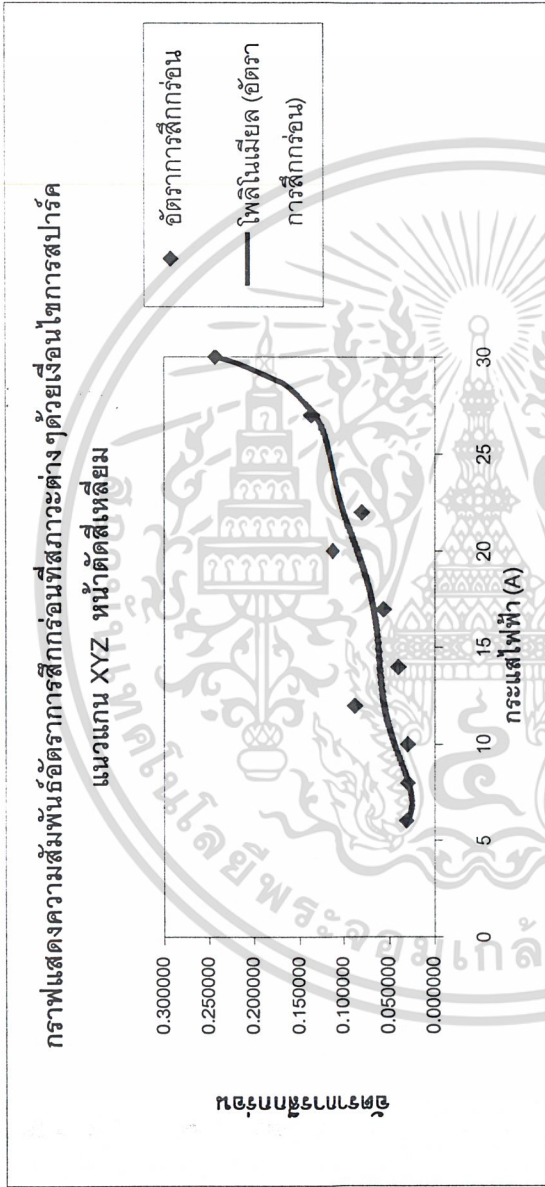
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$$Y = (2 \times 10^{-8})X^6 - (3 \times 10^{-6})X^5 + (2 \times 10^{-4})X^4 - (3.7 \times 10^{-3})X^3 + (4.59 \times 10^{-2})X^2 - 0.2695X + 0.6081$$

$R^2 = 0.88$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$$Y = (8 \times 10^{-8})X^6 - (8 \times 10^{-6})X^5 + (3 \times 10^{-4})X^4 - (7.1 \times 10^{-3})X^3 + (7.92 \times 10^{-2})X^2 - 0.4389X + 0.9675$$

$$R^2 = 0.9258$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] Winston A. Knight, “Fundamentals of Machining and Machine Tools”, Section Edition, Marcel Dekker Inc. 1989.
- [2] E. Bud Guitrau, “The EDM Handbook”, Hanser Gardner Publications. 1997.
- [3] รองศาสตราจารย์ คำรงค์ ทิพย์โยธา “การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วย SPSS Windows version 9.0” ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พิมพ์ครั้งที่ 1 โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร 2543
- [4] รังสรรค์ เนียมสนิท “การวางแผนการทดลอง” ภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น พิมพ์ครั้งที่ 2 2541
- [5] ศาสตราจารย์ ดร. ปราโมทย์ เคชะอำไพ “ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม” ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พิมพ์ครั้งที่ 1 โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร 2541



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

การใช้โปรแกรม SPSS 10.0.1

1. ป้อนข้อมูลที่ได้จากการทดลองดังรูป 120 ข้อมูล

	a	b	c	var00001	abc	var	var	var	var	var	var	var
1	1.00	1.00	1.00	1.00	.001725							
2	1.00	1.00	1.00	2.00	.001157							
3	1.00	1.00	1.00	3.00	.001172							
4	1.00	1.00	2.00	1.00	.001149							
5	1.00	1.00	2.00	2.00	.001707							
6	1.00	1.00	2.00	3.00	.001711							
7	1.00	1.00	3.00	1.00	.001140							
8	1.00	1.00	3.00	2.00	.000570							
9	1.00	1.00	3.00	3.00	.003371							
10	1.00	1.00	4.00	1.00	.022901							
11	1.00	1.00	4.00	2.00	.026850							
12	1.00	1.00	4.00	3.00	.017452							
13	1.00	1.00	5.00	1.00	.002729							

## 2. ใช้เมนูคำสั่ง Analyze / General Linear Model / Univariate

The screenshot shows the SPSS Data Editor interface. The 'Analyze' menu is open, and the path 'General Linear Model > Univariate' is selected. The data table contains the following values for variables 'a' and 'b':

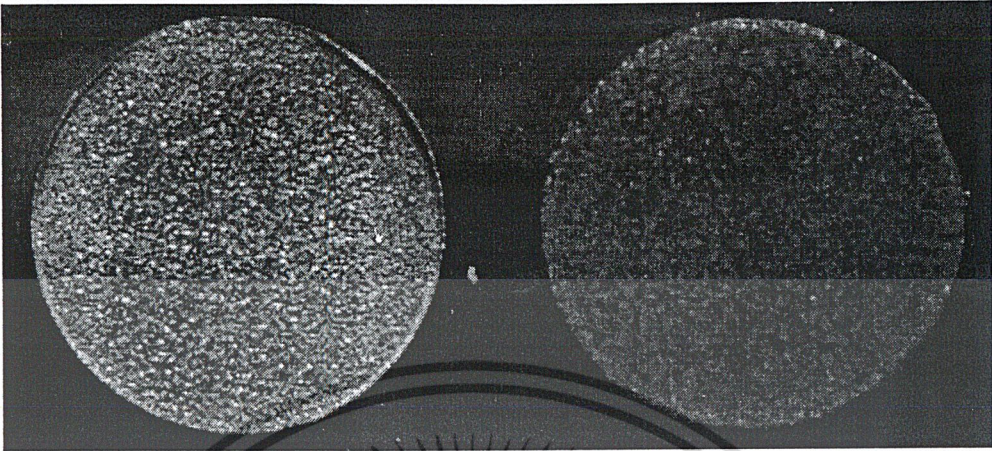
Case	a	b			
1	1.00				
2	1.00				
3	1.00				
4	1.00				
5	1.00	1.00	2.00	2.00	.001707
6	1.00	1.00	2.00	3.00	.001711
7	1.00	1.00	3.00	1.00	.001140
8	1.00	1.00	3.00	2.00	.000570
9	1.00	1.00	3.00	3.00	.003371
10	1.00	1.00	4.00	1.00	.022901
11	1.00	1.00	4.00	2.00	.026850
12	1.00	1.00	4.00	3.00	.017452
13	1.00	1.00	5.00	1.00	.002729

The screenshot shows the 'Univariate: Post Hoc Multiple Comparisons for Observed Means' dialog box. The 'Factor(s)' list includes 'a', 'b', 'c', and 'var00001'. The 'Post Hoc Tests for:' list includes 'LSD', 'Bonferroni', 'Sidak', 'Scheffe', 'R-E-G-W-F', 'R-E-G-W-Q', 'SN-K', 'Tukey', 'Tukey's-b', 'Duncan', 'Hochberg's GT2', 'Gabriel', 'Waller-Duncan', 'Dunnnett', 'Games-Howell', and 'Dunnnett's C'. The 'Type II Error Ratio' is set to 100, and the 'Control Category' is set to 'Last'.

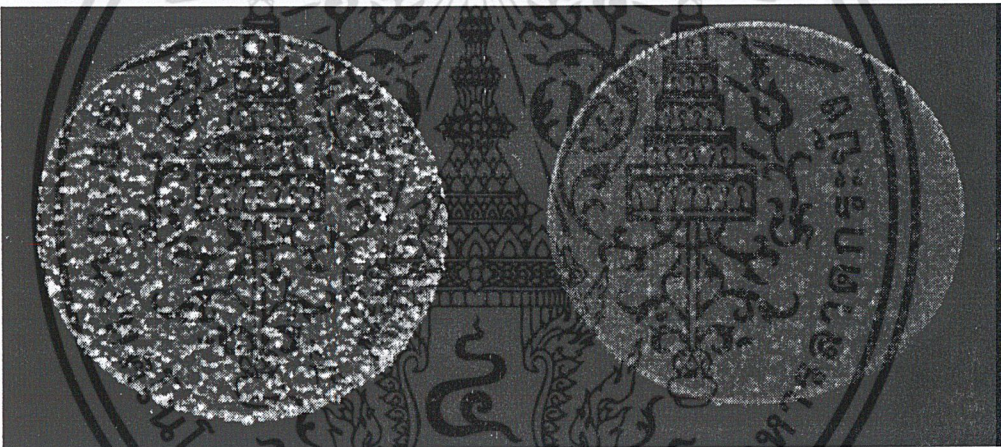
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 42  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

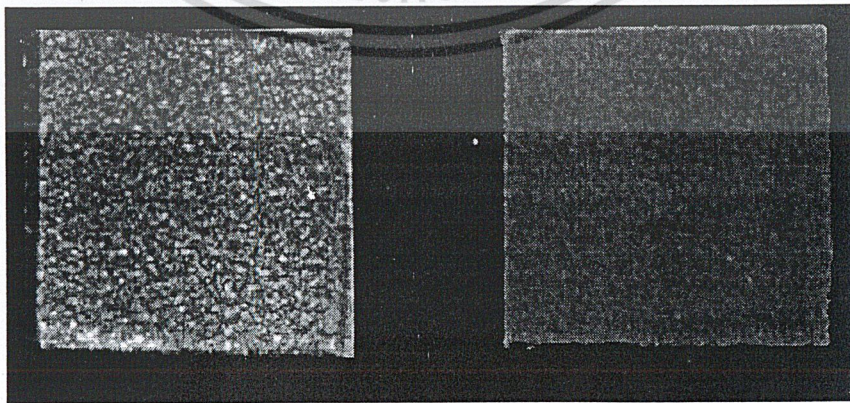
ลักษณะชิ้นงานเหล็กและขั้วอิเล็กโทรดทองแดงภายใต้การสปาร์ก



รูปที่ 1 ชิ้นงานเหล็กและขั้วอิเล็กโทรดทองแดงรูปวงกลมภายใต้การสปาร์กที่กระแสไฟ 8 A

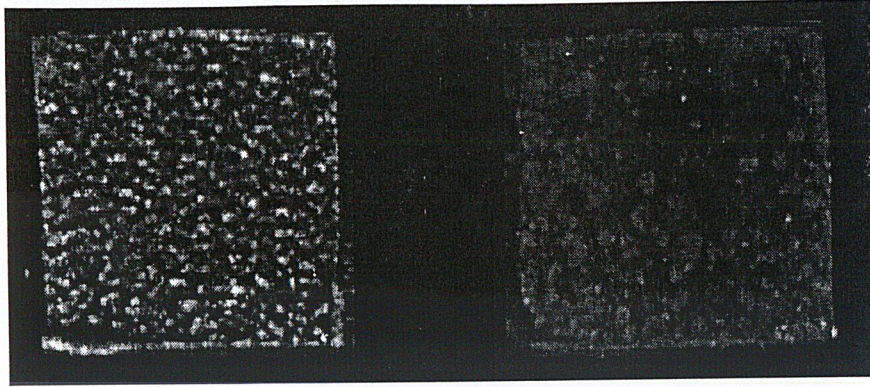


รูปที่ 2 ชิ้นงานเหล็กและขั้วอิเล็กโทรดทองแดงรูปวงกลมภายใต้การสปาร์กที่กระแสไฟ 22A

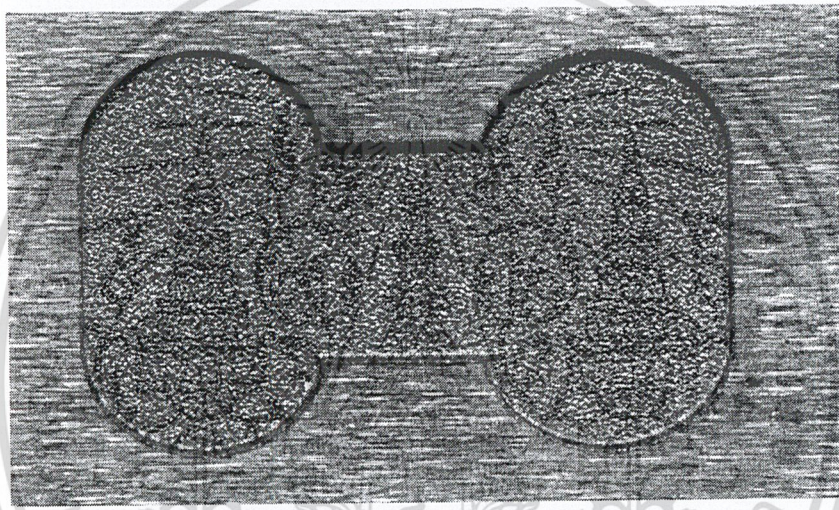


รูปที่ 3 ชิ้นงานเหล็กและขั้วอิเล็กโทรดทองแดงรูปสี่เหลี่ยมภายใต้การสปาร์กที่กระแสไฟ 10 A

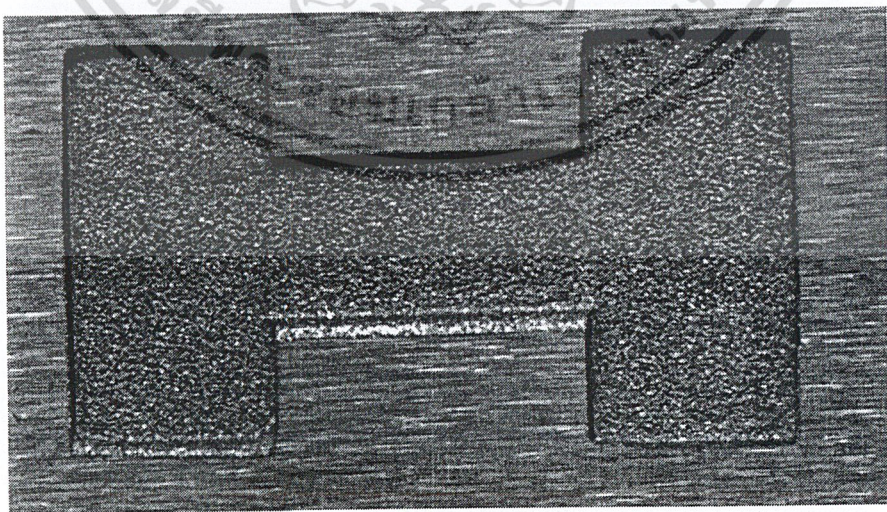
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4 ซึ้นงานเหล็กและขั้วอิเล็กโทรดทองแดงรูปสี่เหลี่ยมภายใต้การสปาร์คที่กระแสไฟ 27 A



รูปที่ 5 ซึ้นงานเหล็กภายใต้การสปาร์คที่กระแสไฟ 14 A ด้วยขั้วอิเล็กโทรดทองแดงหน้าตัดวงกลม ในแนวแกน XYZ



รูปที่ 6 ซึ้นงานเหล็กภายใต้การสปาร์คที่กระแสไฟ 14 A ด้วยขั้วอิเล็กโทรดทองแดงหน้าตัดสี่เหลี่ยม ในแนวแกน XYZ

เอกสกรีนนี้จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เผยแพร่เห็นใบเซอร์จะยื่นคืนการคืนค่า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้