# บทที่ 3

# วิธีดำเนินงานวิจัย

วิธีดำเนินงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาเพื่อหาเงื่อนไขความสัมพันธ ที่เหมาะสม จากตัวแปร ตางๆ คือ ขั้วอิเล็กโตรด, ความตางศักยวงจรเปด, เวลาเปด, เวลาปด และกระแสไฟฟา เมื่อทราบค่าที่เหมาะสมจากแนวโน้มทั้งหมดจึงนำมาออกแบบการทดลองด้ วยวิธีทากูชิและหาค่าความแปรปรวน (ANOVA) โดยในบทนี้จะกล่าวถึง อุปกรณ์ และเครื่องมือในการทดลอง การเตรียมชิ้นงานก่อนการกัดอาร์ค ขั้นตอนในการทดลอง และการตรวจสอบชิ้นงานหลังการกัดอาร์ค

## 3.1 อุปกรณ และเครื่องมือการทดลอง

1. ชิ้นงาน คือ ซิลิคอนไนไตรด์ ($Si_3N_4$) เกรด ASN1 บริษัท Ceratech Corporation

2. อิเล็กโตรด คือ ทองแดงและทองเหลืองแบบกลวง เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร กัดชิ้นงานลึก 3 มิลลิเมตร

3. เครื่องกัดโลหะดวยไฟฟาที่ใชในการทดลองเปนเครื่องจักรรุน Model 2-LC ของบริษัท Charmilles Technologies จำกัด

4. ของเหลวตัวกลางที่ใชเปนแบบน้ำมันแรของ บริษัท เชลลแหงประเทศไทย จำกัด เกรด Shell EDM Fluid 2 A

5. ใช้วัสดุช่วยสปาร์ค (Assisting Electrode) ประเภทคอลลอยด์คาร์บอนกับแผ่นทองแดง

## 3.2 การเตรียมชิ้นงานก่อนการกัดอาร์ค

เนื่องจากชิ้นงาน ซิลิคอนไนไตรด์ ($Si_3N_4$) เป็นวัสดุที่เป็นฉนวน ดังนั้น จึงต้องอาศัยวัสดุช่วยสปาร์ค เพื่อเป็ นการสร้างชั้นเหนี่ยวนำ โดยการนำ คอลลอยด์คาร์บอน ทาบนชิ้นงานแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส โดยอบ 3 ครั้ง แต่ละครั้งใช้เวลาประมาณ 7 นาที จากนั้นให้นำแผ่นทองแดงกดแนบกับชิ้นงานซิลิคอนไนไตรด์ ($Si_3N_4$) เพื่อให้การสปาร์คง่ายขึ้น อิเล็กโตรดจะสปาร์คบนวัสดุช่วยสปาร์คก่อน จากนั้นจะผ่านมายังชิ้นงานซิลิคอนไนไตรด์ ($Si_3N_4$) โดยมีชั้นตัวนำที่สร้างจากกระบวนการสปาร์ค

### 3.3 ขั้นตอนการทดลอง

ขั้นตอนสามารถดูได้จากภาพที่ 3.1 โดยทำการทดลอง 2 ช่วง ในช่วงแรกทำการทดลองเพื่อหาแนวโน้มจากตัวแปรตางๆ คือ ขั้วอิเล็กโตรด , ความตางศักยวงจรเปด, กระแสไฟฟา, เวลาเปด และเวลาปด เมื่อทราบค่าที่เหมาะสมจากแนวโน้มทั้งหมด มาทำการทดลองในช่วงที่ 2 โดยการออกแบบการทดลองด้วยวิธีทากูชิและหาค่าความแปรปรวนอีกครั้ง ดังต่อไปนี้

1. ทำการติดตั้งชิ้นงาน และโดยวางชิ้นงานในแนวราบ และจับยึดให คงที่ จากนั้นจึงติดตั้งอิเล็กโตรดให ตั้งฉากกับชิ้นงาน โดยที่จุดจับยึดอิเล็กโตรด จะมีตัวปรับตั้งและบอกระดับอยูดวย เมื่อติดตั้งเสร็จ จึงทำการปล อยของเหลวตัวกลางเข าไปในพื้นที่ทดลอง โดยให ของเหลวตัวกลางท วมชิ้นงานและอิเล็กโตรด ที่สำคัญต องให ทวมจุดที่ทำการสปาร ค การสปาร คจึงจะเปนไปอยางมีประสิทธิภาพ

2. เริ่มการทดลอง ในการสปาร์คซิลิคอนไนไตรด์ ($Si_3N_4$) โดยกำหนดตัวแปรของขั้วอิเล็กโตรดทั้งขั้วบวกและขั้วลบทั้ง 2 อิเล็กโตรดเพื่อดูผลกระทบและค่าที่เ หมาะสมในการสปาร์คซิลิคอนไนไตรด์ ($Si_3N_4$)

3. จากการทดลองในข้อที่ 2 จะทราบถึงขั้วอิเล็กโตรดที่เหมาะสมในการสปาร์คซิลิคอนไนไตรด์ ($Si_3N_4$) และศึกษาผลกระทบของปัจจัยตามขั้นตอน ดังต่อไปนี้

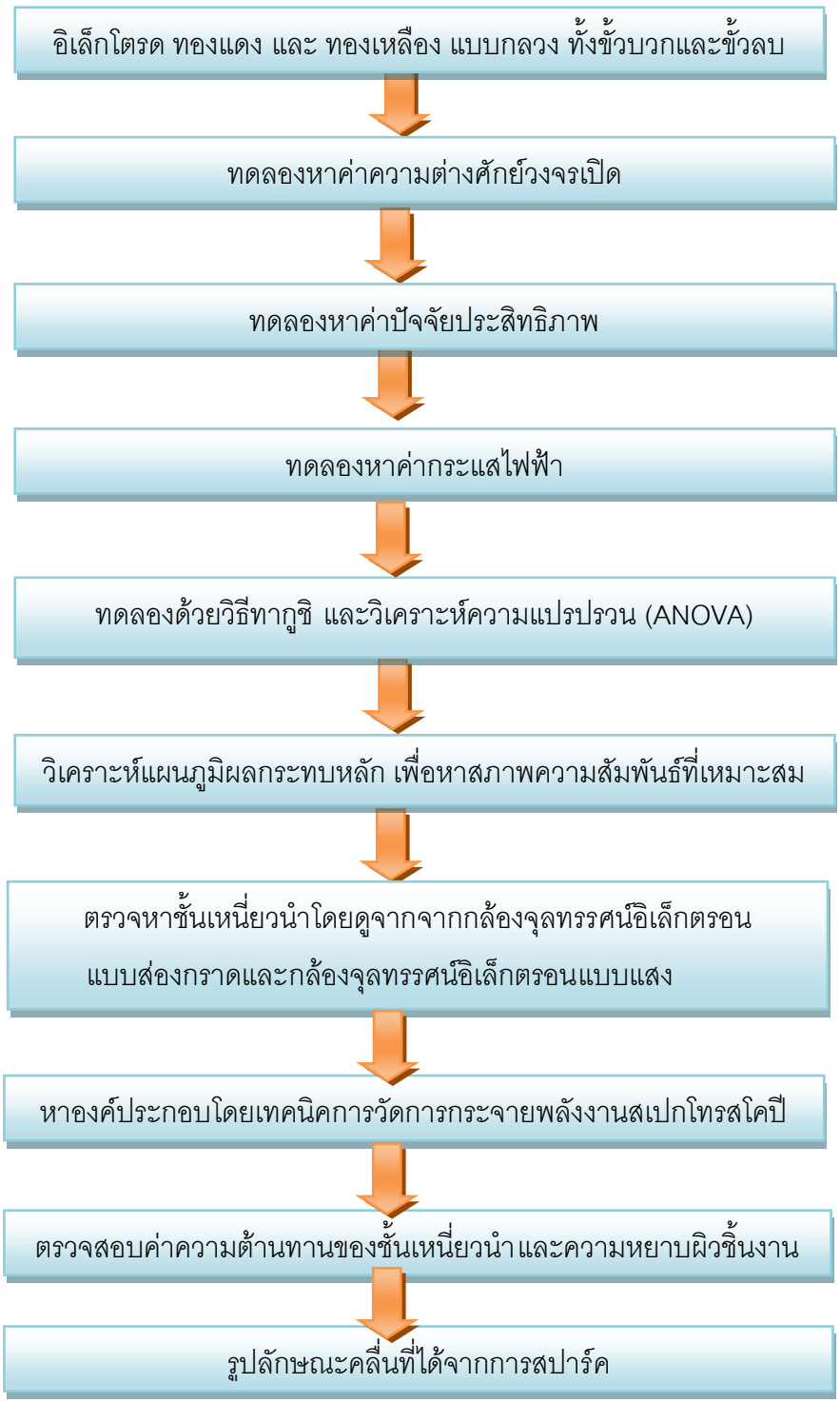
3.1 ทำการหาค่าความต่างศักย์วงจรเปิดที่เหมาะสมในการสปาร์คซิลิคอนไนไตรด์ ($Si_3N_4$) ซึ่งค่าความต่างศักย์วงจรเปิด สามารถปรับได้สองค่าคือ 90 โวล์ท และ 250 โวล์ท โดยเปรียบเทียบกับขั้ว อิเล็กโตรด ที่ทำการทดลองมาจากขั้นตอนที่ 2 ในการสปาร์คซิลิคอนไนไตรด์ ($Si_3N_4$)

3.2 ได้ค่าความต่างศักย์วงจรเปิดที่เหมาะสมจากการทดลองก่อนหน้านี้ จึงทำการหาค่าปัจจัยประสิทธิภาพที่เหมาะสม ในการสปาร์คซิลิคอนไนไตรด์ ($Si_3N_4$)

3.3 เมื่อทราบขั้วอิเล็ กโตรด , ค่า ความต่างศักย์วงจรเปิด และค่าปัจจัยประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลองข้างต้น จึงมากำหนดหาค่ากระแสฟ้าที่เหมาะสมในการสปาร์คซิลิคอนไนไตรด์ ($Si_3N_4$)

3.4 เมื่อไดผลการทดลองแล วจึง พิจารณาตัวแปร จากการแผนภูมิผลกระทบหลักเพื่อหาสภาพความสัมพันธที่เหมาะสม

3.5 วิเคราะห์และพิจารณา ค่าความหนาของชั้นเหนี่ยวนำ , หาองค์ประก ของธาตุ, ความต้านทาน, ความหยาบผิวชิ้นงาน และดูลักษณะรูปคลื่นจากการสปาร์ค




ภาพที่ 3.1
สรุปขั้นตอนแผนงานวิจัย

## 3.4 การทดลองด้วยวิธีทากูชิ

การทดลองแบบวิธีทากูชิ จะใช้โปรแกรมมินิเทป 15 ช่วยในการคำนวณ

### 3.4.1 กำหนดตัวแปรที่สงผลกระทบตอการกัดชิ้นงาน

โดยสมมติตัวแปรที่จะพิจารณาในการทดลอง มีดังนี้

1. กระแสไฟฟา
2. เวลาเปิด ณ ปัจจัยประสิทธิภาพที่ 50%

### 3.4.2 กำหนดระดับของตัวแปรที่จะนำมาพิจารณา

เมื่อกำหนดตัวแปรไดแลว จึงกำหนดระดับ และคาในแตละระดับของตัวแปรนั้นๆ ตามตารางที่ 3.1 สมมติการทดลองตองการ 3 ระดับ ซึ่งระดับ 1 หมายถึง ระดับที่ต่ำ และระดับ 2 หมายถึง ระดับกลาง และระดับ 3 คือ ระดับสูง

ตารางที่ 3.1

ตัวแปรที่ใชในการทดลองดวยวิธีทากูชิ และระดับของตัวแปร

| สัญลักษณ์ | ตัวแปร | หน่วย | ระดับ 1 | ระดับ 2 | ระดับ 3 |
|---|---|---|---|---|---|
| $I_p$ | กระแสไฟฟ้า | แอมแปร์ | $I_1$ | $I_2$ | $I_3$ |
| $T_{on}$ | เวลาเปิด | ไมโครวินาที | $T_{on\,1}$ | $T_{on\,2}$ | $T_{on\,3}$ |

หมายเหตุ : ปัจจัยประสิทธิภาพที่ 50%

### 3.4.3 กำหนดแผนการทดลองแบบทากูชิ

หลังจากกำหนดระดับ และคาของแตละระดับแลว จึงกำหนดแผนผังการทดลอง (Orthogonal array) โดยแผนผังการทดลองทั้งหมดนั้น กระบวนการของทากูชิไดกำหนดไวแลวซึ่งแสดงดังตารางที่ 3.2 [R.K.Roy, 1990] ดังนี้

ตารางที่ 3.2
แผนผังการทดลองทั้งหมดของการทดลองโดยวิธีทากูชิ

| แผนผังการทดลอง | จำนวนตัวแปรสูงสุด | จำนวนระดับของตัวแปรสูงสุด |
|---|---|---|
| L 4 | 3 | 2 |
| L8 | 7 | 2 |
| L12 | 11 | 2 |
| L16 | 15 | 2 |
| L32 | 31 | 2 |
| L9 | 4 | 3 |
| L18 | 1<br>7 | 2<br>3 |
| L27 | 13 | 3 |
| L16 | 5 | 4 |
| L32 | 1<br>9 | 2<br>4 |
| L64 | 21 | 4 |

จากตารางข างตนจำนวนตัวเลขของ L หมายถึงจำนวนครั้งของการทดลอง เช น L8 จะมีการทดลอง 8 ครั้ง หรือ L 16 จะมีการทดลอง 16 ครั้ง เป นตน จำนวนครั้งของการทดลองยิ่งมาก ความสามารถในการตรวจสอบยิ่งมากตามไปด วย หรือกล าวอีกนัยหนึ่งคือ การทดลองนั้นยิ่งมีความถูกตอง โดยปกติแลวปจจัยในการเลือกขึ้นอยูกับ [P.J.Ross,1996]

1. จำนวนของตัวแปรที่สนใจ
2. จำนวนระดับของตัวแปรที่ตองการ
3. ความตองการของผูทดลอง, งบประมาณ และขอจำกัดในดานอื่นๆ

การทดลองควรเลือกแผนผังการทดลองที่มีจำนวนการทดลองมากที่สุด และเลือกแผนผังที่ใชงบประมาณ และขอจำกัดที่ต่ำที่สุด ในตัวอยาง มีตัวแปรอยู 3 ตัวแปร มีระดับของตัวแปร 4 ระดับ จากตารางสามารถเลือกใช L16, L32 และ L64 ได สมมติเลือกใช แผนผังการทดลอง L16 ซึ่งแผนผังการทดลองแบบ L9 สำหรับ 2 ตัวแปร และ 3 ระดับ แสดงตามตารางที่ 3.3 และ 3.4 ดังนี้

ตารางที่ 3.3

แผนผังการทดลอง L9

| การทดลองที่ | ระดับของตัวแปร | |
|---|---|---|
| | ค่ากระแสไฟฟ้า | เวลาเปิด |
| 1 | 1 | 1 |
| 2 | 1 | 2 |
| 3 | 1 | 3 |
| 4 | 2 | 1 |
| 5 | 2 | 2 |
| 6 | 2 | 3 |
| 7 | 3 | 1 |
| 8 | 3 | 2 |
| 9 | 3 | 3 |

ตารางที่ 3.4

แผนผังการทดลอง L9 พรอมกับแสดงคาของแตระดับ

| การทดลองที่ | ค่ากระแสไฟฟ้า | | เวลาเปิด | | อัตราการขจัดเนื้องาน (ลูกบาศก์มิลลิเมตร/นาที) | อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด(%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ระดับ | ค่า | ระดับ | ค่า | | |
| 1 | 1 | I-1 | 1 | $T_{on}$ -1 | $MRR_1$ | $EWR_1$ |
| 2 | 1 | I-1 | 2 | $T_{on}$ -2 | $MRR_2$ | $EWR_2$ |
| 3 | 1 | I-1 | 3 | $T_{on}$ -3 | $MRR_3$ | $EWR_3$ |
| 4 | 2 | I-2 | 1 | $T_{on}$ -1 | $MRR_4$ | $EWR_4$ |
| 5 | 2 | I-2 | 2 | $T_{on}$ -2 | $MRR_5$ | $EWR_5$ |
| 6 | 2 | I-2 | 3 | $T_{on}$ -3 | $MRR_6$ | $EWR_6$ |
| 7 | 3 | I-3 | 1 | $T_{on}$ -1 | $MRR_7$ | $EWR_7$ |
| 8 | 3 | I-3 | 2 | $T_{on}$ -2 | $MRR_8$ | $EWR_8$ |
| 9 | 3 | I-3 | 3 | $T_{on}$ -3 | $MRR_9$ | $EWR_9$ |

ผลการทดลองที่ I-1 คือ แทนค่ากระแสไฟฟ้าที่ 3 A

I-2 คือ แทนค่ากระแสไฟฟ้าที่ 9 A

I-3 คือ แทนค่ากระแสไฟฟ้าที่ 12.5 A

ผลการทดลองที่ $T_{on}$ -1 คือ แทนค่า เวลาเปิดที่ 3.5 µs ณ ปัจจัยประสิทธิภาพที่ 50%

$T_{on}$ -2 คือ แทนค่า เวลาเปิดที่ 6 µs ณ ปัจจัยประสิทธิภาพที่ 50%

$T_{on}$ -3 คือ แทนค่า เวลาเปิดที่ 25 µs ณ ปัจจัยประสิทธิภาพที่ 50%

จากตัวอย่างของผลการทดลอง นำผลอัตราการขจัดเนื้อชิ้นงาน และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดทั้งหมดมาหาค่าเฉลี่ยรวมทั้งหมด

1. ค่าเฉลี่ยอัตราการแปรรูปของชิ้นงาน ทั้งหมด คือ

$$\sum_{i=1}^{9} MRR_i / 9 = (MRR_1+MRR_2+MRR_3+MRR_4+MRR_5+MRR_6+MRR_7+MRR_8 +MRR_9) / 9$$

$$= M \text{ มม.}^3/\text{นาที}$$

2. ค่าเฉลี่ยอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด รวมทั้งหมด คือ

$$\sum_{i=1}^{9} EWR_i / 9 = (EWR_1+EWR_2+EWR_3+EWR_4+EWR_5+EWR_6+EWR_7+EWR_8 +MRR_9) / 9$$

$$= E \%$$

จากนั้นจึงหาค่าเฉลี่ยในแต่ละตัวแปรซึ่งเรียกว่าผลกระทบของตัวแปรหลัก และผลต่างของผลกระทบของตัวแปรหลักแต่ละตัวแปร และนำมาสรุปได้ ดังนี้

1. อัตราการขจัดเนื้องาน

- ผลกระทบหลักของตัวแปร กระแสไฟฟ้า ระดับที่ 1 คือ

  $MI_1 = (MRR_1+MRR_2+MRR_3) / 3$

- ผลกระทบหลักของตัวแปร กระแสไฟฟ้า ระดับที่ 2 คือ

  $MI_2 = (MRR_4+MRR_5+MRR_6) / 3$

- ผลกระทบหลักของตัวแปร กระแสไฟฟ้า ระดับที่ 3 คือ

  $MI_3 = (MRR_7+MRR_8+MRR_9) / 3$

- ผลต่างของผลกระทบหลักของตัวแปร กระแสไฟฟ้า คือ

  $MI = (MI_{max}-MI_{min})$

- ผลกระทบหลักของตัวแปร ปัจจัยประสิทธิภาพ 50% ระดับที่ 1 คือ

  $M\ T_{on\ 1} = (MRR_1+MRR_4+MRR_7) / 3$
- ผลกระทบหลักของตัวแปร ปัจจัยประสิทธิภาพ 50% ระดับที่ 2 คือ

  $M\ T_{on\ 2} = (MRR_2+MRR_5+MRR_8) / 3$
- ผลกระทบหลักของตัวแปร ปัจจัยประสิทธิภาพ 50% ระดับที่ 3 คือ

  $M\ T_{on\ 3} = (MRR_3+MRR_6+MRR_9) / 3$
- ผลต่างของผลกระทบหลักของตัวแปร ปัจจัยประสิทธิภาพ 50% คือ

  $M\ T_{on} = (MD_{max}-MD_{min})$

ตารางที่ 3.5

ผลกระทบหลักของตัวแปรและผลต่างของผลกระทบหลักของตัวแปร
แต่ละตัวแปรสำหรับอัตราการขจัดเนื้องาน

| ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง | ระดับ 1 (L1) | ระดับ 2 (L2) | ระดับ 3 (L3) | ผลต่าง ($L_{max}$-$L_{min}$) |
|---|---|---|---|---|
| กระแสไฟฟ้า | $MI_1$ | $MI_2$ | $MI_3$ | MI |
| เวลาเปิด | $M\ T_{on\ 1}$ | $M\ T_{on\ 2}$ | $M\ T_{on\ 3}$ | $M\ T_{on}$ |

2. อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด

- ผลกระทบหลักของตัวแปร กระแสไฟฟ้า ระดับที่ 1 คือ

  $EI_1 = (EWR_1+EWR_2+EWR_3) / 3$
- ผลกระทบหลักของตัวแปร กระแสไฟฟ้า ระดับที่ 2 คือ

  $EI_2 = (EWR_4+EWR_5+EWR_6) / 3$
- ผลกระทบหลักของตัวแปร กระแสไฟฟ้า ระดับที่ 3 คือ

  $EI_3 = (EWR_7+EWR_8+EWR_9) / 3$
- ผลต่างของผลกระทบหลักของตัวแปร กระแสไฟฟ้า คือ

  $EI = (EI_{nax}-EI_{min})$

- ผลกระทบหลักของตัวแปร ปัจจัยประสิทธิภาพ 50% ระดับที่ 1 คือ

  $E\,T_{on\,1} = (EWR_1+EWR_4+EWR_7) / 3$

- ผลกระทบหลักของตัวแปร ปัจจัยประสิทธิภาพ 50% ระดับที่ 2 คือ

  $E\,T_{on\,2} = (EWR_2+EWR_5+EWR_8) / 3$

- ผลกระทบหลักของตัวแปร ปัจจัยประสิทธิภาพ 50 % ระดับที่ 3 คือ

  $E\,T_{on\,3} = (EWR_3+EWR_6+EWR_9) / 3$

- ผลต่างของผลกระทบหลักของตัวแปร ปัจจัยประสิทธิภาพ 50% คือ

  $E\,T_{on} = (ETon_{max}-ETon_{min})$

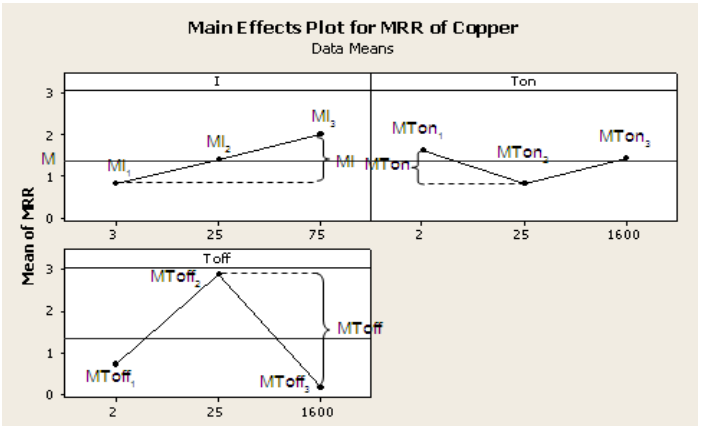
ตารางที่ 3.6

ผลกระทบหลักของตัวแปร และผลต่างของผลกระทบหลักของตัวแปร

แต่ละตัวแปรสำหรับอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด

| ตัวแปร | ระดับ 1 (L1) | ระดับ 2 (L2) | ระดับ 3 (L3) | ผลต่าง ($L_{max}$-$L_{min}$) |
|---|---|---|---|---|
| กระแสไฟฟ้า | $EI_1$ | $EI_2$ | $EI_3$ | EI |
| เวลาเปิด | $E\,T_{on\,1}$ | $E\,T_{on\,2}$ | $E\,T_{on\,3}$ | $E\,T_{on}$ |

จากนั้นจึงนำผลที่ได้ดังตารางที่ 3.5 และ ตารางที่ 3.6 ไปเขียนแผนภูมิผลกระทบหลักของตัวแปร เพื่อหาสภาพความสัมพันธ์ที่เหมาะสม ซึ่งจะแสดงตัวอย่าง ดังนี้




ภาพที่ 3.2

ตัวอย่างแผนภูมิผลกระทบหลักของแต่ละตัวแปรสำหรับอัตราการขจัดเนื้องาน

จากตัวอย่างภาพที่ 3.2 จะเห็นว่า ผลต่างของผลกระทบของตัวแปรกระแสไฟฟ้า (MI) มีค่าเป็นบวก ส่วนผลต่างของผลกระทบของตัวแปรเวลาเปิด (M $T_{on}$) และเวลาปิด ($MT_{off}$) มีค่าเป็นลบ และจากรูปจะเห็นว่ากระแสไฟฟ้าที่ระดับ 3 จะให้อัตราการขจัดเนื้องานมากที่สุด เวลาเปิดที่ระดับ 1 จะมีอัตราให้อัตราการขจัดเนื้องานมากที่สุด และเวลาปิดที่ระดับ 2 จะให้อัตราการขจัดเนื้องานมากที่สุด

## 3.5 ขั้นตอนการตรวจสอบชิ้นงานหลังการกัดอาร์ค

หลังจากทำการทดลองกัดชิ้นงานด้วยไฟฟ้าแล้ว นำชิ้นงานนั้นมาพิจารณาและศึกษาถึงลักษณะพื้ นผิวที่เกิดจากการกัดด้วยไฟฟ้า โดยนำชิ้นงานไปส่องดูผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Micrograph : SEM) รุ่น JEOL JSM-5410 ของบริษัท Kosaka Labaratory จำกัด หลังจากนั้นนำไปวัดหาคาความของหยาบผิวเฉลี่ยของพื้นผิว ($R_a$) ดวยเครื่อง Surfcorder SE-40C ของบริษัท Kosaka Labaratory จำกัด แล้วนำไปวัดลักษณะรูปคลื่นที่เกิดขึ้นจากเครื่องออสซิลโลสโคป ยี่ห้อ GWInstek รุ่น GDS-1000A Ser และนำชิ้นงานไปหาค่าความต้านทานไฟฟ้าจากเครื่องโอห์มมิเตอร์ของ บริษัทโปรโทรนิกส์ อินเตอร์เทรดจำกัด จากนั้นก็ทำการวิเคราะห์ และเปรียบเทียบผลของการทดลอง

ภาพที่ 3.3

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Micrograph : SEM)