

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

วิธีดำเนินงานวิจัยนี้ ใช้อิเล็กโตรด 3 ชนิดด้วยกันคือ แกรไฟต์, ทองแดง-แกรไฟต์ และ ทองแดง-ทังสเทน ศึกษาเพื่อหาเงื่อนไขความสัมพันธ์ที่เหมาะสม จากตัวแปรต่างๆ คือ เวลาเปิด, เวลาปิด, ความต่างศักย์วงจรเปิด, กระแสไฟฟ้า, ชนิดวัสดุอิเล็กโตรด และขั้วอิเล็กโตรด นำผลการทดลองมาเปรียบเทียบ อัตราการขจัดเนื้องาน, อัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโตรด, ความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่ และความหยาบผิวเฉลี่ย เพื่อดูว่า อิเล็กโตรดชนิดใดที่นำมาแปรรูปทังสเทนคาร์ไบด์ได้ดีที่สุด จากนั้นจึงทดลองแบบวิธีทางสถิติด้วยอิเล็กโตรดนั้น นำผลการทดลองมาเปรียบเทียบผลการทดลองเพื่อหาผลกระทบหลักจากปัจจัยต่างๆ ต่อไป

3.1 อุปกรณ์ และเครื่องมือการทดลอง

1. ชิ้นงาน คือ ทังสเทนคาร์ไบด์ เกรด 10WC - 10Co ที่มีส่วนประกอบของทังสเทน 90% และ โคบอลต์ 10%



ภาพที่ 3.1 ชิ้นงานทังสเทนคาร์ไบด์ ที่ใช้ในการทดลอง

2. อิเล็กโตรด คือ แกรไฟต์เกรด EDM-3, ทองแดง-แกรไฟต์ เกรด EDM-C3 และ ทองแดง-ทังสเทน เกรด CTR-08375 เส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร กัดชิ้นงานลึก 3 มิลลิเมตร



ภาพที่ 3.2 ตัวอย่างของ อิเล็กโทรดแกรไฟต์ ที่ใช้ในการทดลอง

3. เครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า ที่ใช้ในการทดลอง เป็นเครื่องจักรรุ่น Model 2-LC ของ บริษัท Charmilles Technologies จำกัด สามารถปรับค่ากระแสไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 1.5 ถึง 75 แอมแปร์, ปรับค่าความต่างศักย์วงจรเปิดได้ 90 และ 250 โวลต์ และปรับค่าเวลาเปิด และเวลาปิด ได้ตั้งแต่ 2 ถึง 1600 ไมโครวินาที



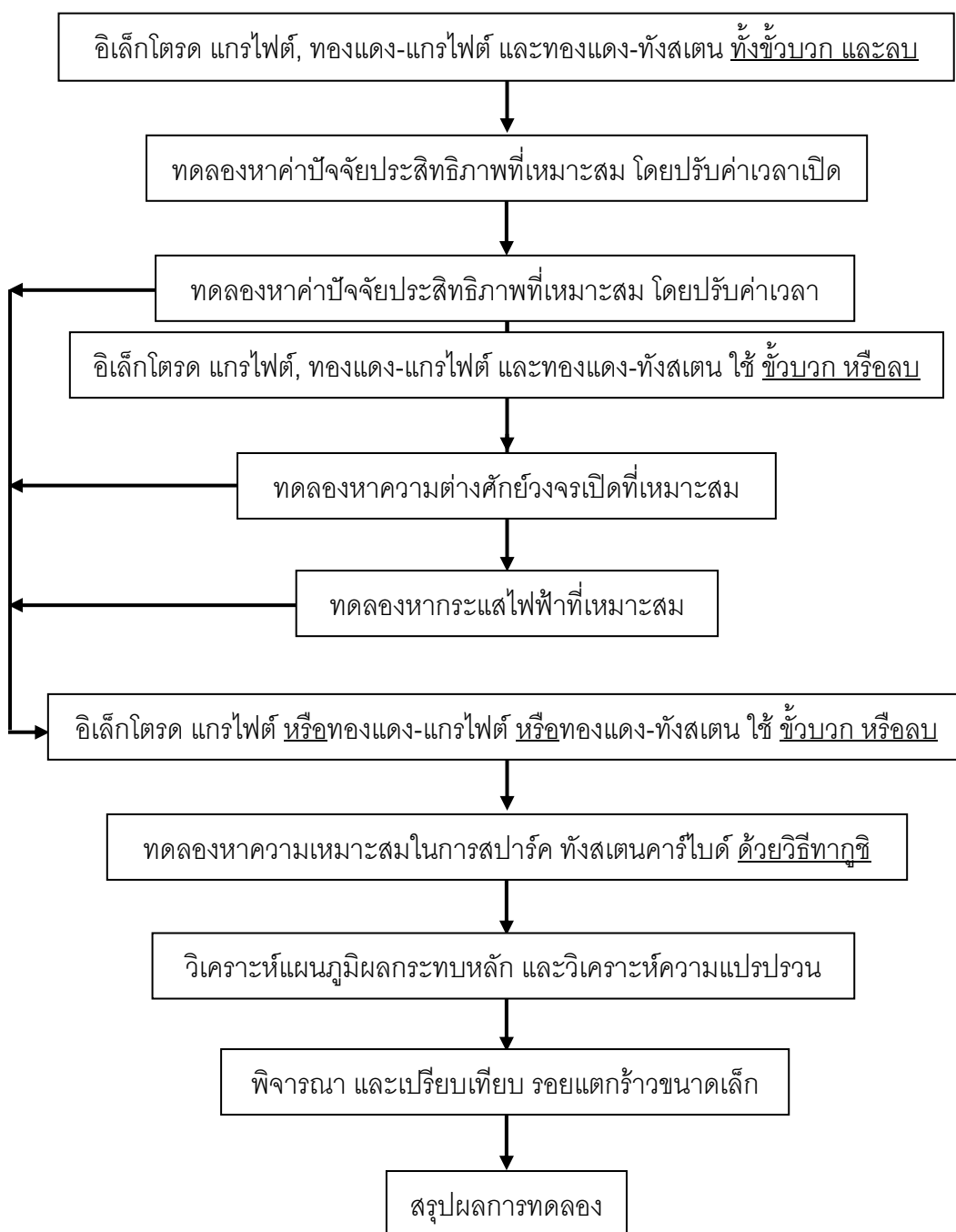
ภาพที่ 3.3 เครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า ที่ใช้ในการทดลอง

4. ของเหลวตัวกลางที่ใช้ เป็นแบบน้ำมันแร่ของ บริษัท เชลล์แห่งประเทศไทย จำกัด เกรด Shell EDM Fluid 2A

3.2 ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการติดตั้งชิ้นงาน และโดยวางชิ้นงานในแนวราบ และจับยึดให้คงที่ จากนั้นจึงติดตั้งอิเล็กทรอนิกส์ให้ตั้งฉากกับชิ้นงาน โดยที่จุดจับยึดอิเล็กทรอนิกส์ จะมีตัวปรับตั้งและบอกระดับอยู่ด้วย เมื่อติดตั้งเสร็จ จึงทำการปล่อยของเหลวตัวกลางเข้าไปในพื้นที่ทดลอง โดยให้ของเหลวตัวกลางท่วมชิ้นงานและอิเล็กทรอนิกส์ ที่สำคัญต้องให้ท่วมจุดที่ทำการสปาร์ค การสปาร์คจึงจะเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ
2. เริ่มการทดลอง โดยทำการหาค่าปัจจัยประสิทธิภาพที่เหมาะสม ในการสปาร์คทั้งสแตนคาร์ไบด์ โดยกำหนดกระแสไฟฟ้า และความต่างศักย์วงจรเปิดให้คงที่ โดยเปลี่ยนแปลง เวลาเปิด, เวลาปิด และชั่วอิเล็กทรอนิกส์ ทั้ง 3 อิเล็กทรอนิกส์
3. จากการทดลองในข้อ 2 จะทำให้ทราบถึงค่าปัจจัยประสิทธิภาพ และชั่วอิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสมในการสปาร์คทั้งสแตนคาร์ไบด์ และใช้เพียงค่าที่เหมาะสมนี้ ในการทดลองหาความต่างศักย์วงจรเปิด และกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อไป
4. ทำการหาความต่างศักย์วงจรเปิดที่เหมาะสม ในการสปาร์คทั้งสแตนคาร์ไบด์ โดยการกำหนดกระแสไฟฟ้า, เวลาเปิด และเวลาปิด คงที่ โดยเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์วงจรเปิด ทั้ง 3 อิเล็กทรอนิกส์
5. ทำการหากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม ในการสปาร์คทั้งสแตนคาร์ไบด์ โดยการกำหนดความต่างศักย์วงจรเปิด, เวลาเปิด และเวลาปิด คงที่ แล้วเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้า ทั้ง 3 อิเล็กทรอนิกส์
6. จากการทดลองทั้ง 3 ชุดข้างต้น ทำให้สามารถทราบถึงชนิดของอิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสมในการสปาร์คทั้งสแตนคาร์ไบด์ และนำไปใช้ทดลองด้วยวิธีทางสถิติต่อไป
7. กำหนดตัวแปรที่ใช้ในการทดลองด้วยวิธีทางสถิติ ได้แก่ ค่าปัจจัยประสิทธิภาพ, ความต่างศักย์วงจรเปิด และกระแสไฟฟ้า เพื่อหาแผนผังการทดลองที่เหมาะสมกับจำนวนและระดับของตัวแปร จากตารางมาตรฐานของทางสถิติ ซึ่งแผนผังที่เหมาะสมกับการทดลองนี้ คือ แผนผัง L8 (L8 Orthogonal Array)
8. ทำการทดลองด้วยวิธี ทางสถิติ ตามแผนผังที่ได้ออกแบบไว้
9. เมื่อได้ผลการทดลองแล้วจึง พิจารณาตัวแปร จากการแผนภูมิผลกระทบหลัก เพื่อหาสภาพความสัมพันธ์ที่เหมาะสม

10. ตรวจสอบความแตกต่าง และความสัมพันธ์ ต่อผลการทดลองในแต่ละตัวแปรด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อหาข้อสรุปผลการทดลอง
11. พิจารณา และเปรียบเทียบ รอยแตกร้าวขนาดเล็ก จากการทดลองด้วยวิธีทาคุชิ
12. สรุปผลการทดลอง



ภาพที่ 3.4 ขั้นตอนแผนงานวิจัย

3.3 การทดลองด้วยวิธีทาภูชิ

ถึงแม้ในขั้นตอนการทดลองแบบทาภูชิ จะใช้โปรแกรม MINITAB 14.0 ช่วยคำนวณก็ตาม แต่ในรายงานฉบับนี้จะแสดงขั้นตอนการคำนวณไว้ด้วย เป็นดังนี้

3.3.1 กำหนดตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อการกัดขึ้นงาน

โดยสมมุติตัวแปรที่จะพิจารณาในการทดลอง มีดังนี้

1. กระแสไฟฟ้า
2. เวลาปิด
3. ความต่างศักย์วงจรเปิด

3.3.2 กำหนดระดับของตัวแปรที่จะนำมาพิจารณา

เมื่อกำหนดตัวแปรได้แล้ว จึงกำหนดระดับ และค่าในแต่ละระดับ ของตัวแปรนั้นๆ ตามตารางที่ 3.1 สมมติการทดลองต้องการ 2 ระดับ ซึ่งระดับ 1 หมายถึง ระดับที่ต่ำ และระดับ 2 หมายถึงระดับสูง ตามที่เราต้องการ

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองด้วยวิธีทาภูชิ และระดับของตัวแปร

สัญลักษณ์	ตัวแปร	หน่วย	ระดับ 1	ระดับ 2
I_p	กระแสไฟฟ้า	แอมแปร์	I-1	I-2
T-off	เวลาปิด	ไมโครวินาที	T-1	T-2
V_g	ความต่างศักย์วงจรเปิด	โวลต์	V-1	V-2

3.3.3 กำหนดแผนการทดลองแบบทาภูชิ

หลังจากกำหนดระดับ และค่าของแต่ละระดับแล้ว จึงกำหนดแผนผังการทดลอง (Orthogonal array) โดยแผนผังการทดลองทั้งหมดนั้น กระบวนการของทาภูชิได้กำหนดไว้แล้ว ซึ่งแสดงดังตารางที่ 3.2 [R.K.Roy, 1990] ดังนี้

ตารางที่ 3.2 แผนผังการทดลองทั้งหมดของการทดลองโดยวิธีทาคุชิ

แผนผังการทดลอง	จำนวนตัวแปรสูงสุด	จำนวนระดับของตัวแปรสูงสุด
L4	3	2
L8	7	2
L12	11	2
L16	15	2
L32	31	2
L9	4	3
L18	1	2
	7	3
L27	13	3
L16	5	4
L32	1	2
	9	4
L64	21	4

จากตารางข้างต้นจำนวนตัวเลขของ L หมายถึงจำนวนครั้งของการทดลอง เช่น L8 จะมีการทดลอง 8 ครั้ง หรือ L27 จะมีการทดลอง 27 ครั้ง เป็นต้น จำนวนครั้งของการทดลองยิ่งมาก ความสามารถในการตรวจสอบยิ่งมากตามไปด้วย หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ การทดลองนั้นยังมีความถูกต้อง โดยปกติแล้วปัจจัยในการเลือกขึ้นอยู่กับ [P.J.Ross, 1996]

1. จำนวนของตัวแปรที่สนใจ
2. จำนวนระดับของตัวแปรที่ต้องการ
3. ความต้องการของผู้ทดลอง, งบประมาณและ ข้อจำกัดในด้านอื่นๆ

ดังนั้นในอุดมคติผู้ทดลองควรเลือกแผนผังการทดลองที่มีจำนวนการทดลองมากที่สุด และเลือกแผนผังที่ใช้งบประมาณ และข้อจำกัดที่ต่ำที่สุด ในตัวอย่าง มีตัวแปรอยู่ 3 ตัวแปร มีระดับของตัวแปร 2 ระดับ จากตารางสามารถเลือกใช้ L4, L8, L12, L16 และ L32 ได้ สมมุติ

เลือกใช้แผนผังการทดลอง L8 (L8 Orthogonal array) ซึ่งแผนผังการทดลองแบบ L8 สำหรับ 3 ตัวแปร และ 2 ระดับ แสดงตามตารางที่ 3.3 และ 3.4 ดังนี้

ตารางที่ 3.3 แผนผังการทดลอง L8

การทดลองที่	ระดับของตัวแปร		
	กระแสไฟฟ้า	เวลาปิด	ความต่างศักย์วงจรเปิด
1	1	1	1
2	1	1	2
3	1	2	1
4	1	2	2
5	2	1	1
6	2	1	2
7	2	2	1
8	2	2	2

ตารางที่ 3.4 แผนผังการทดลอง L8 พร้อมกับแสดงค่าของแต่ละระดับ

การทดลองที่	กระแสไฟฟ้า		เวลาปิด		ความต่างศักย์วงจรเปิด	
	ระดับ	ค่า	ระดับ	ค่า	ระดับ	ค่า
1	1	I-1	1	T-1	1	V-1
2	1	I-1	1	T-1	2	V-2
3	1	I-1	2	T-2	1	V-1
4	1	I-1	2	T-2	2	V-2
5	2	I-2	1	T-1	1	V-1
6	2	I-2	1	T-1	2	V-2
7	2	I-2	2	T-2	1	V-1
8	2	I-2	2	T-2	2	V-2

3.3.4 พิจารณาแผนภูมิผลกระทบหลัก

เมื่อทำการทดลองแล้ว โดยสมมุติผลการทดลอง เป็นดังตารางที่ 3.5 ดังนี้

ตารางที่ 3.5 ตัวอย่างของผลการทดลองด้วยวิธีทาทุชี

การทดลองที่	อัตราการขจัดเนื้องาน (ลูกบาศก์มิลลิเมตร/นาทีก)	อัตราการสึกกร่อน ของอิเล็กโตรด (%)	ความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็ก ต่อพื้นที่ (ไมโครเมตร/ตารางมิลลิเมตร)
1	MRR_1	$EW R_1$	CR_1
2	MRR_2	$EW R_2$	CR_2
3	MRR_3	$EW R_3$	CR_3
4	MRR_4	$EW R_4$	CR_4
5	MRR_5	$EW R_5$	CR_5
6	MRR_6	$EW R_6$	CR_6
7	MRR_7	$EW R_7$	CR_7
8	MRR_8	$EW R_8$	CR_8

จากตัวอย่างของผลการทดลอง นำผลอัตราการขจัดเนื้องาน และอัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโตรดทั้งหมดมาหาค่าเฉลี่ยรวมทั้งหมด ดังนี้

1. ค่าเฉลี่ย ของอัตราการขจัดเนื้องาน $\bar{T}$ คือ

$$\begin{aligned} \left(\sum_{i=1}^8 MRR_i \right) / 8 &= (MRR_1 + MRR_2 + MRR_3 + MRR_4 + MRR_5 + MRR_6 + MRR_7 + MRR_8) / 8 \\ &= \bar{M} \text{ ลูกบาศก์มิลลิเมตร/นาทีก} \end{aligned}$$

2. ค่าเฉลี่ย ของอัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโตรด $\bar{T}$ คือ

$$\begin{aligned} \left(\sum_{i=1}^8 EW R_i \right) / 8 &= (EW R_1 + EW R_2 + EW R_3 + EW R_4 + EW R_5 + EW R_6 + EW R_7 + EW R_8) / 8 \\ &= \bar{E} \% \end{aligned}$$

3. ค่าเฉลี่ย ของความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่ $\bar{T}$ คือ

$$\begin{aligned} \left(\sum_{i=1}^8 CR_i \right) / 8 &= (CR_1 + CR_2 + CR_3 + CR_4 + CR_5 + CR_6 + CR_7 + CR_8) / 8 \\ &= \bar{C} \text{ ไมโครเมตร/ตารางมิลลิเมตร} \end{aligned}$$

จากนั้นจึงหาค่าเฉลี่ยในแต่ละตัวแปร ซึ่งเรียกว่าผลกระทบของตัวแปรหลัก และผลต่างของผลกระทบของตัวแปรหลักแต่ละตัวแปร และนำมาสรุปได้ตามตารางที่ 3.6 ถึง 3.8 ดังนี้

1. อัตราการจัดเนื้องาน

- ผลกระทบหลัก ของตัวแปรกระแสไฟฟ้า ระดับที่ 1 (L1) คือ

$$(MRR_1 + MRR_2 + MRR_3 + MRR_4) / 4 = MI_1$$
- ผลกระทบหลัก ของตัวแปรกระแสไฟฟ้า ระดับที่ 2 (L2) คือ

$$(MRR_5 + MRR_6 + MRR_7 + MRR_8) / 4 = MI_2$$
- ผลต่างของผลกระทบหลัก ของตัวแปรกระแสไฟฟ้า คือ $(MI_1 - MI_2) = MI$

- ผลกระทบหลัก ของตัวแปรเวลาปิด ระดับที่ 1 (L1) คือ

$$(MRR_1 + MRR_2 + MRR_5 + MRR_6) / 4 = MT_1$$
- ผลกระทบหลัก ของตัวแปรเวลาปิด ระดับที่ 2 (L2) คือ

$$(MRR_3 + MRR_4 + MRR_7 + MRR_8) / 4 = MT_2$$
- ผลต่างของผลกระทบหลัก ของตัวแปรเวลาปิด คือ $(MT_1 - MT_2) = MT$

- ผลกระทบหลัก ของตัวแปรความต่างศักย์วงจรเปิด ระดับที่ 1 (L1) คือ

$$(MRR_1 + MRR_3 + MRR_5 + MRR_7) / 4 = MV_1$$
- ผลกระทบหลัก ของตัวแปรความต่างศักย์วงจรเปิด ระดับที่ 2 (L2) คือ

$$(MRR_2 + MRR_4 + MRR_6 + MRR_8) / 4 = MV_2$$
- ผลต่างของผลกระทบหลัก ของตัวแปรความต่างศักย์วงจรเปิด
 คือ $(MV_1 - MV_2) = MV$

ตารางที่ 3.6 ผลกระทบของตัวแปรหลัก และผลต่างของผลกระทบของตัวแปรหลักของแต่ละตัวแปร สำหรับอัตราการขาดเนืองาน

ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง	ระดับ 1 (L1)	ระดับ 2 (L2)	ผลต่าง (L2-L1)
กระแสไฟฟ้า	MI_1	MI_2	MI
เวลาปิด	MT_1	MT_2	MT
ความต่างศักย์วงจรเปิด	MV_1	MV_2	MV

2. อัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโทรด

- ผลกระทบหลัก ของตัวแปรกระแสไฟฟ้า ระดับที่ 1 (L1) คือ

$$(EWR_1 + EWR_2 + EWR_3 + EWR_4) / 4 = EI_1$$
- ผลกระทบหลัก ของตัวแปรกระแสไฟฟ้า ระดับที่ 2 (L2) คือ

$$(MRR_5 + MRR_6 + MRR_7 + MRR_8) / 4 = EI_2$$
- ผลต่างของผลกระทบหลัก ของตัวแปรกระแสไฟฟ้า คือ $(EI_1 - EI_2) = EI$

- ผลกระทบหลัก ของตัวแปรเวลาปิด ระดับที่ 1 (L1) คือ

$$(EWR_1 + EWR_2 + EWR_5 + EWR_6) / 4 = ET_1$$
- ผลกระทบหลัก ของตัวแปรเวลาปิด ระดับที่ 2 (L2) คือ

$$(EWR_3 + EWR_4 + EWR_7 + EWR_8) / 4 = ET_2$$
- ผลต่างของผลกระทบหลัก ของตัวแปรเวลาปิด คือ $(ET_1 - ET_2) = ET$

- ผลกระทบหลัก ของตัวแปรความต่างศักย์วงจรเปิด ระดับที่ 1 (L1) คือ

$$(EWR_1 + EWR_3 + EWR_5 + EWR_7) / 4 = EV_1$$
- ผลกระทบหลัก ของตัวแปรความต่างศักย์วงจรเปิด ระดับที่ 2 (L2) คือ

$$(EWR_2 + EWR_4 + EWR_6 + EWR_8) / 4 = EV_2$$
- ผลต่างของผลกระทบหลัก ของตัวแปรความต่างศักย์วงจรเปิด คือ $(EV_1 - EV_2) = EV$

ตารางที่ 3.7 ผลกระทบของตัวแปรหลัก และผลต่างของผลกระทบของตัวแปรหลักของแต่ละตัวแปร สำหรับอัตราการสึกกร่อนของอิเล็กทรอนิกส์

ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง	ระดับ 1 (L1)	ระดับ 2 (L2)	ผลต่าง (L2-L1)
กระแสไฟฟ้า	EI_1	EI_2	EI
เวลาปิด	ET_1	ET_2	ET
ความต่างศักย์วงจรเปิด	EV_1	EV_2	EV

3. ความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่

- ผลกระทบหลัก ของตัวแปรกระแสไฟฟ้า ระดับที่ 1 (L1) คือ

$$(CR_1 + CR_2 + CR_3 + CR_4) / 4 = CI_1$$
- ผลกระทบหลัก ของตัวแปรกระแสไฟฟ้า ระดับที่ 2 (L2) คือ

$$(CR_5 + CR_6 + CR_7 + CR_8) / 4 = CI_2$$
- ผลต่างของผลกระทบหลัก ของตัวแปรกระแสไฟฟ้า คือ $(CI_1 - CI_2) = CI$

- ผลกระทบหลัก ของตัวแปรเวลาปิด ระดับที่ 1 (L1) คือ

$$(CR_1 + CR_2 + CR_5 + CR_6) / 4 = CT_1$$
- ผลกระทบหลัก ของตัวแปรเวลาปิด ระดับที่ 2 (L2) คือ

$$(CR_3 + CR_4 + CR_7 + CR_8) / 4 = CT_2$$
- ผลต่างของผลกระทบหลัก ของตัวแปรเวลาปิด คือ $(CT_1 - CT_2) = CT$

- ผลกระทบหลัก ของตัวแปรความต่างศักย์วงจรเปิด ระดับที่ 1 (L1) คือ

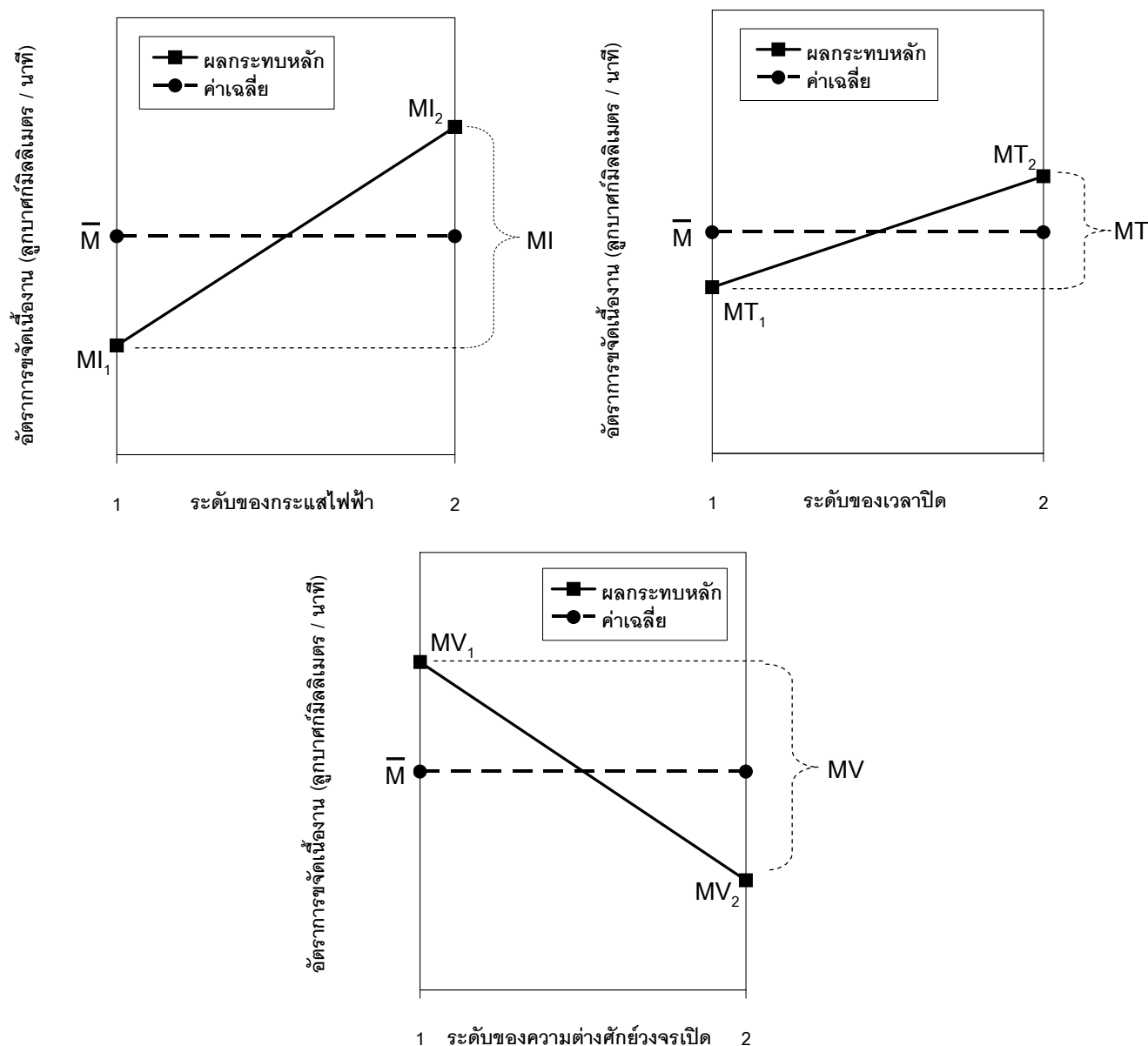
$$(CR_1 + CR_3 + CR_5 + CR_7) / 4 = CV_1$$
- ผลกระทบหลัก ของตัวแปรความต่างศักย์วงจรเปิด ระดับที่ 2 (L2) คือ

$$(CR_2 + CR_4 + CR_6 + CR_8) / 4 = CV_2$$
- ผลต่างของผลกระทบหลัก ของตัวแปรความต่างศักย์วงจรเปิด
 คือ $(CV_1 - CV_2) = CV$

ตารางที่ 3.8 ผลกระทบของตัวแปรหลัก และผลต่างของผลกระทบของตัวแปรหลักของแต่ละตัวแปร สำหรับความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่

ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง	ระดับ 1 (L1)	ระดับ 2 (L2)	ผลต่าง (L2-L1)
กระแสไฟฟ้า	CI_1	CI_2	CI
เวลาปิด	CT_1	CT_2	CT
ความต่างศักย์วงจรเปิด	CV_1	CV_2	CV

จากนั้นจึงเขียนแผนภูมิผลกระทบหลัก เพื่อหาสภาพความสัมพันธ์ที่เหมาะสม โดยจะแสดงตัวอย่างเฉพาะแผนภูมิผลกระทบหลัก สำหรับอัตราการขจัดเนื้องานในตารางที่ 3.6 ได้ แผนภูมิ ดังภาพที่ 3.5 ดังนี้



ภาพที่ 3.5 ตัวอย่างแผนภูมิผลกระทบหลัก ของแต่ละตัวแปร สำหรับอัตราการจัดเนื้องาน

จากตัวอย่าง แผนภูมิผลกระทบหลัก ในภาพที่ 3.5 ตัวอย่างจะแสดงให้เห็นว่า ผลต่างของผลกระทบของตัวแปรกระแสไฟฟ้า (MI) และเวลาปิด (MT) มีค่าเป็นบวก ส่วนผลต่างของตัวแปรความต่างศักย์วงจรเปิด (MV) มีค่าเป็นลบ และจากตัวอย่างจะเห็นว่ากระแสไฟฟ้า และเวลาปิด ที่ระดับ 2 จะทำให้มีอัตราการจัดเนื้องานที่มากกว่า ในทางกลับกัน ความต่างศักย์วงจรเปิด ที่ระดับ 1 จะทำให้มีอัตราการจัดเนื้องานมากกว่า

โดยอีก 2 ผลกระทบ คือ อัตราการสึกกร่อนของอิเล็กทรอนิกส์ และความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่ ทำตามกระบวนการนี้ เช่นเดียวกัน และเมื่อได้แผนภูมินี้แล้วจึงทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน ในแต่ละผลกระทบ ว่าตัวแปรทั้ง 3 ให้ผลที่แตกต่างกันหรือไม่ ต่อไป

3.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวน เป็นอีกขั้นตอนที่อยู่ในกระบวนการคำนวณ โดยเราสามารถนำข้อมูลผลจากการศึกษา หรือผลการทดลอง ที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อแยกแยะตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของการสปาร์คทั้งสแตนคาร์ไบด์ ซึ่งในการทดลองจริงในขั้นตอนนี้ใช้โปรแกรม MINITAB 14.0 ด้วยเช่นกัน

แนวความคิดของ การวิเคราะห์ความแปรปรวน กล่าวได้ว่าเป็นการหาความแปรปรวนโดยรวม แล้วทำการแยกความแปรปรวนออกมาได้ว่า เป็นความแปรปรวนเนื่องมาจากตัวแปร และความแปรปรวนเนื่องมาจากสาเหตุที่ไม่ได้รับการควบคุม แล้วทำการเปรียบเทียบกันระหว่างความแปรปรวนเนื่องมาจากตัวแปร และความแปรปรวนเนื่องมาจากสาเหตุที่ไม่ได้รับการควบคุม โดยพิจารณาว่าค่าความแปรปรวนเนื่องมาจากตัวแปรมีค่ามาก หรือไม่เป็นไปตามธรรมชาติ จนมีผลทำให้ผลการทดลองมีความแตกต่างกันมากหรือไม่ หากมีผลต่อการทดลองแสดงว่าอิทธิพลของตัวแปรมีผลต่อการทดลองอย่างมีนัยสำคัญ

3.4.1 ตั้งสมมติฐานการทดลอง

ทำการทดสอบสมมติฐานสำหรับ อัตราการจัดเนื้องาน, อัตราการสึกกร่อนของอิเล็กทรอนิกส์ และความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่ กับตัวแปรทั้ง 3 คือ กระแสไฟฟ้า, เวลาปิด และความต่างศักย์วงจรเปิด ว่ามีผลต่อกันหรือไม่ สมมติมีระดับความเชื่อมั่นที่ 95 % ดังนั้นค่านัยสำคัญ α เท่ากับ 0.05 โดยตั้งสมมติฐาน ดังนี้

1. อัตราการจัดเนื้องาน

- H_0 : อัตราการจัดเนื้องาน ของตัวแปรทั้ง 3 ตัวแปร ไม่แตกต่างกัน หรือ

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 \text{ โดยที่}$$

μ_1 = อัตราการจัดเนื้องาน ของตัวแปรกระแสไฟฟ้า

μ_2 = อัตราการจัดเนื้องาน ของตัวแปรเวลาปิด

μ_3 = อัตราการจัดเนื้องาน ของตัวแปรความต่างศักย์วงจรเปิด

- H_1 : อัตราการขจัดเนื้องาน ของตัวแปรอย่างน้อย 1 ตัว มีค่าแตกต่างจากตัวแปรอื่น

2. อัตราการสึกกร่อนของอิเล็กทรอนิกส์

- H_0 : อัตราการสึกกร่อนของอิเล็กทรอนิกส์ ของตัวแปรทั้ง 3 ตัวแปร ไม่แตกต่างกัน หรือ $H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$ เมื่อ
 - μ_1 = อัตราการสึกกร่อนของอิเล็กทรอนิกส์ ของตัวแปรกระแสไฟฟ้า
 - μ_2 = อัตราการสึกกร่อนของอิเล็กทรอนิกส์ ของตัวแปรเวลาปิด
 - μ_3 = อัตราการสึกกร่อนของอิเล็กทรอนิกส์ ของตัวแปรความต่างศักย์วงจรเปิด
- H_1 : อัตราการสึกกร่อนของอิเล็กทรอนิกส์ ของตัวแปรอย่างน้อย 1 ตัว มีค่าแตกต่างจากตัวแปรอื่น

3. ความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่

- H_0 : ความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่ ของตัวแปรทั้ง 3 ตัวแปร ไม่แตกต่างกัน หรือ $H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$ เมื่อ
 - μ_1 = ความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่ ของตัวแปร - กระแสไฟฟ้า
 - μ_2 = ความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่ ของตัวแปรเวลาปิด
 - μ_3 = ความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่ ของตัวแปรความ - ต่างศักย์วงจรเปิด
- H_1 : ความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่ ของตัวแปรอย่างน้อย 1 ตัว มีค่าแตกต่างจากตัวแปรอื่น

3.4.2 ค่าผลรวมแต่ละผลกระทบ (T)

การคำนวณเริ่มจากการคำนวณหาผลรวม (T) ทั้งหมดของแต่ละผลกระทบ โดยจากตารางผลการทดลอง ตารางที่ 3.5 ค่าผลรวม เป็นดังนี้

1. ผลรวม ของอัตราการขจัดเนื้องาน คือ

$$= MRR_1 + MRR_2 + MRR_3 + MRR_4 + MRR_5 + MRR_6 + MRR_7 + MRR_8$$

$$= M \text{ ลูกบาศก์มิลลิเมตร/นาท}$$

2. ผลรวม ของอัตราการใช้กรรมสิทธิ์ของอิเล็กทรอนิกส์ คือ

$$= EWR_1 + EWR_2 + EWR_3 + EWR_4 + EWR_5 + EWR_6 + EWR_7 + EWR_8$$

$$= E \%$$
3. ผลรวม ของความยาวรวมของรอยแตกกว้างขนาดเล็กต่อพื้นที่ คือ

$$= CR_1 + CR_2 + CR_3 + CR_4 + CR_5 + CR_6 + CR_7 + CR_8$$

$$= C \text{ ไมโครเมตร/ตารางมิลลิเมตร}$$

3.4.3 ค่าองศาอิสระ (Degree of freedom, DF)

ค่าองศาอิสระ หมายถึง จำนวนข้อมูลที่อยู่ภายใต้เงื่อนไขให้ค่าเฉลี่ยของสิ่งตัวอย่างสามารถประมาณการค่าเฉลี่ยของประชากรได้ คำนวณได้ดังนี้

1. ค่าองศาอิสระ ของผลรวมทั้งหมด คือ

$$DF_{TOTAL} = \text{จำนวนการทดลองทั้งหมด} - 1$$

$$- DF_{TOTAL} = n - 1 = 8 - 1 = 7$$
2. ค่าองศาอิสระ ของตัวแปรทั้ง 3 ตัวแปร คือ

$$DF_T = \text{จำนวนระดับของตัวแปร} - 1$$
 - DF_T ของตัวแปรกระแสไฟฟ้า = $t - 1 = 2 - 1 = 1$
 - DF_T ของตัวแปรเวลาปิด = $t - 1 = 2 - 1 = 1$
 - DF_T ของตัวแปรความต่างศักย์วงจรเปิด = $t - 1 = 2 - 1 = 1$
3. ค่าองศาอิสระ ของความคลาดเคลื่อน (Error variance) คือ

$$DF_E = \text{ค่าองศาอิสระ ของผลรวมทั้งหมด} - \text{ค่าองศาอิสระ ของตัวแปรทั้ง 3 ตัวแปร}$$

$$- DF_E = DF_{TOTAL} - DF_T = 7 - (1 + 1 + 1) = 4$$

เมื่อ n คือ จำนวนการทดลองทั้งหมด

เมื่อ t คือ จำนวนระดับของตัวแปร

ค่าองศาอิสระของแต่ละตัวแปรในกรณีของทางทฤษฎีนั้นมาจาก จำนวนระดับของตัวแปร ซึ่งก็คือ 2 แล้วนำมาลบ 1 ตามสมการ ค่าองศาอิสระจึงมีค่าเท่ากับ $2 - 1 = 1$ และค่าองศาอิสระ

ของความคลาดเคลื่อนมาจาก ค่าองศาอิสระของผลรวมทั้งหมด ลบด้วย ค่าองศาอิสระของแต่ละตัวแปร ซึ่งต้องนำมาคิดทั้ง 3 ตัวแปร ค่าองศาอิสระจึงมีค่าเท่ากับ $7-3 = 4$

3.4.4 ตัวปรับค่าสำหรับผลรวมกำลังสองของข้อมูล (Correction factor, C.F.)

ตัวปรับค่าสำหรับผลรวมกำลังสองของข้อมูล ตัวปรับค่าเพื่อแสดงค่าผลรวมกำลังสองของข้อมูลในรูปของค่าผลรวมกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ย เกิดจากการนำค่าผลรวมมายกกำลัง 2 แล้วหารด้วยจำนวนการทดลอง เป็นดังสมการที่ 4 ดังนี้

$$C.F. = T^2 / n \quad \dots\dots\dots (4)$$

เมื่อ T คือ ค่าผลรวมทั้งหมดของผลการทดลอง

เมื่อ n คือ จำนวนการทดลอง

โดยตัวปรับค่าสำหรับผลรวมกำลังสองของข้อมูล ของแต่ละผลกระทบ เป็นดังนี้

1. ตัวปรับค่าสำหรับผลรวมกำลังสองของข้อมูล ของอัตราการขจัดเนื้องาน คือ

$$M^2/8 = CF_M$$

2. ตัวปรับค่าสำหรับผลรวมกำลังสองของข้อมูล ของอัตราการสึกกร่อนของอิเล็คโตรด

$$\text{คือ } E^2/8 = CF_E$$

3. ตัวปรับค่าสำหรับผลรวมกำลังสองของข้อมูล ของความยาวรวมของรอยแตกร้าว

$$\text{ขนาดเล็กต่อพื้นที่ คือ } C^2/8 = CF_C$$

3.4.5 ค่าผลรวมกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของผลรวมทั้งหมด (Total sum of squares, SS_{TOTAL})

ค่าผลรวมกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของผลรวมทั้งหมดคือ ความแปรปรวนทั้งหมดที่เกิดขึ้นเนื่องจากตัวแปรทั้ง 3 และจากสาเหตุที่ไม่ได้รับการควบคุม มาจากการนำค่า ผลรวมของผลการทดลองในแต่ละการทดลองทั้ง 8 ครั้ง มายกกำลังสอง แล้วลบด้วยตัวปรับค่าสำหรับผลรวมกำลังสองของข้อมูล เป็นดังสมการที่ 5 ดังนี้

$$SS_{TOTAL} = \sum_{i=1}^8 Y_i^2 - C.F. \quad \dots\dots\dots (5)$$

เมื่อ Y_i คือ ผลการทดลองในแต่ละการทดลองทั้ง 8 ครั้ง

ค่าผลรวมกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของผลรวมทั้งหมด ของแต่ละผลกระทบ เป็นดังนี้

1. ค่าผลรวมกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของผลรวมทั้งหมด ของอัตราการขาดแรงงาน คือ

$$(MRR_1^2 + MRR_2^2 + MRR_3^2 + MRR_4^2 + MRR_5^2 + MRR_6^2 + MRR_7^2 + MRR_8^2) - CF_M = SS_{TOTAL-M}$$

2. ค่าผลรวมกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของผลรวมทั้งหมด ของอัตราการสึกกร่อนของอิเล็กทรอนิกส์ คือ

$$(EWR_1^2 + EWR_2^2 + EWR_3^2 + EWR_4^2 + EWR_5^2 + EWR_6^2 + EWR_7^2 + EWR_8^2) - CF_E = SS_{TOTAL-E}$$

3. ค่าผลรวมกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของผลรวมทั้งหมด ของความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่ คือ

$$(CR_1^2 + CR_2^2 + CR_3^2 + CR_4^2 + CR_5^2 + CR_6^2 + CR_7^2 + CR_8^2) - CF_C = SS_{TOTAL-C}$$

3.4.6 ค่าผลรวมกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของตัวแปร (Treatment sum of squares, SST)

ค่าผลรวมกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของตัวแปรคือ ความแปรปรวนที่เกิดขึ้นเฉพาะจากตัวแปรทั้ง 3 คำนวณได้โดยนำค่า ผลรวมของผลการทดลองในแต่ละระดับมา ยกกำลังสอง หารด้วยจำนวนซ้ำ แล้วลบด้วยค่าปรับสำหรับผลรวมกำลังสองของข้อมูล เป็นดังสมการที่ 6 ดังนี้

$$SS_T = \sum_{i=1}^2 Y_{i.}^2 - C.F. \quad \dots\dots\dots (6)$$

เมื่อ $Y_{i.}$ คือ ผลรวมของผลการทดลองในแต่ละระดับ

เมื่อ r คือ จำนวนซ้ำ

จำนวนซ้ำในกรณีนี้เท่ากับ 4 มาจาก มีระดับในแต่ละตัวแปร 2 ระดับ ระดับละ 4 ครั้ง จากการทดลองทั้ง 8 ครั้ง

การคำนวณค่าผลรวมกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของตัวแปร เริ่มจากการหาค่าผลรวมของผลการทดลองแต่ละผลกระทบ โดยแยกระดับของตัวแปร จากตารางผลการทดลอง ตารางที่ 3.5 ค่าผลรวม เป็นดังนี้

1. อัตราการจัดเนื้องาน

- ผลรวมของตัวแปร กระแสไฟฟ้า ระดับที่1 คือ

$$MRR_1 + MRR_2 + MRR_3 + MRR_4 = MI_1$$

- ผลรวมของตัวแปร กระแสไฟฟ้า ระดับที่2 คือ

$$MRR_5 + MRR_6 + MRR_7 + MRR_8 = MI_2$$

- ผลรวมของตัวแปร เวลาปิด ระดับที่1 คือ

$$MRR_1 + MRR_2 + MRR_5 + MRR_6 = MT_1$$

- ผลรวมของตัวแปร เวลาปิด ระดับที่2 คือ

$$MRR_3 + MRR_4 + MRR_7 + MRR_8 = MT_2$$

- ผลรวมของตัวแปร ความต่างศักย์วงจรเปิด ระดับที่1 คือ

$$MRR_1 + MRR_3 + MRR_5 + MRR_7 = MV_1$$

- ผลรวมของตัวแปร ความต่างศักย์วงจรเปิด ระดับที่2 คือ

$$MRR_2 + MRR_4 + MRR_6 + MRR_8 = MV_2$$

2. อัตราการสึกกร่อนของอิเล็กทรอนิกส์

- ผลรวมของตัวแปร กระแสไฟฟ้า ระดับที่1 คือ

$$EWR_1 + EWR_2 + EWR_3 + EWR_4 = EI_1$$

- ผลรวมของตัวแปร กระแสไฟฟ้า ระดับที่2 คือ

$$EWR_5 + EWR_6 + EWR_7 + EWR_8 = EI_2$$

- ผลรวมของตัวแปร เวลาปิด ระดับที่1 คือ

$$EWR_1 + EWR_2 + EWR_5 + EWR_6 = ET_1$$

- ผลรวมของตัวแปร เวลาปิด ระดับที่2 คือ

$$EWR_3 + EWR_4 + EWR_7 + EWR_8 = ET_2$$

- ผลรวมของตัวแปร ความต่างศักย์วงจรเปิด ระดับที่1 คือ

$$EWR_1 + EWR_3 + EWR_5 + EWR_7 = EV_1$$

- ผลรวมของตัวแปร ความต่างศักย์วงจรเปิด ระดับที่2 คือ

$$EWR_2 + EWR_4 + EWR_6 + EWR_8 = EV_2$$

3. ความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่

- ผลรวมของตัวแปร กระแสไฟฟ้า ระดับที่1 คือ

$$CR_1 + CR_2 + CR_3 + CR_4 = CI_1$$

- ผลรวมของตัวแปร กระแสไฟฟ้า ระดับที่2 คือ

$$CR_5 + CR_6 + CR_7 + CR_8 = CI_2$$

- ผลรวมของตัวแปร เวลาปิด ระดับที่1 คือ

$$CR_1 + CR_2 + CR_5 + CR_6 = CT_1$$

- ผลรวมของตัวแปร เวลาปิด ระดับที่2 คือ

$$CR_3 + CR_4 + CR_7 + CR_8 = CT_2$$

- ผลรวมของตัวแปร ความต่างศักย์วงจรเปิด ระดับที่1 คือ

$$CR_1 + CR_3 + CR_5 + CR_7 = CV_1$$

- ผลรวมของตัวแปร ความต่างศักย์วงจรเปิด ระดับที่2 คือ

$$CR_2 + CR_4 + CR_6 + CR_8 = CV_2$$

จากนั้นจึงนำค่าผลรวมดังกล่าวไปหาค่าผลรวมกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของตัวแปร โดยคำนวณจากผลบวกระหว่างผลรวมยกกำลังสองในระดับ 1 และระดับ 2หารด้วยจำนวนซ้ำ แล้วลบด้วยค่าปรับสำหรับผลรวมกำลังสองของข้อมูล ดังนี้

1. อัตราการจัดเนื้องาน

- ค่าผลรวมกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของตัวแปร กระแสไฟฟ้า คือ

$$(MI_1^2 + MI_2^2)/4 - CF_M = SS_{T-MI}$$

- ค่าผลรวมกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของตัวแปร เวลาปิด คือ

$$(MT_1^2 + MT_2^2)/4 - CF_M = SS_{T-MT}$$

- ค่าผลรวมกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของตัวแปร ความต่างศักย์

$$\text{วงจรเปิด คือ } (MV_1^2 + MV_2^2)/4 - CF_M = SS_{T-MV}$$

2. อัตราการสึกกร่อนของอิเล็กทรอนิกส์

- ค่าผลรวมกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของตัวแปร กระแสไฟฟ้า คือ

$$(EI_1^2 + EI_2^2)/4 - CF_E = SS_{T-EI}$$
- ค่าผลรวมกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของตัวแปร เวลาปิด คือ

$$(ET_1^2 + ET_2^2)/4 - CF_E = SS_{T-ET}$$
- ค่าผลรวมกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของตัวแปร ความต่างศักย์
 วงจรเปิด คือ $(EV_1^2 + EV_2^2)/4 - CF_E = SS_{T-EV}$

3. ความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่

- ค่าผลรวมกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของตัวแปร กระแสไฟฟ้า คือ

$$(CI_1^2 + CI_2^2)/4 - CF_C = SS_{T-CI}$$
- ค่าผลรวมกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของตัวแปร เวลาปิด คือ

$$(CT_1^2 + CT_2^2)/4 - CF_C = SS_{T-CT}$$
- ค่าผลรวมกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของตัวแปร ความต่างศักย์
 วงจรเปิด คือ $(CV_1^2 + CV_2^2)/4 - CF_C = SS_{T-CV}$

3.4.7 ค่าผลรวมกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อน (Error sum of squares, SSE)

ค่าผลรวมกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนคือ ความแปรปรวนที่เกิดขึ้นเนื่องจากสาเหตุที่ไม่ได้รับการควบคุม คำนวณได้โดยนำค่าผลรวมกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของผลรวมทั้งหมด ลบด้วยค่าผลรวมกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของตัวแปร เป็นดังสมการที่ 7

$$SS_E = SS_{TOTAL} - SS_T \quad \dots\dots\dots (7)$$

ผลรวมกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อน คำนวณดังนี้

1. ค่าผลรวมกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อน ของอัตรา
 การขจัดเนื้องาน คือ $SS_{TOTAL-M} - (SS_{T-MI} + SS_{T-MT} + SS_{T-MV}) = SS_{E-M}$

2. ค่าผลรวมกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อน ของอัตรา
การสึกกร่อนของอิเล็คโตรด คือ $SS_{TOTAL-E} - (SS_{T-EI} + SS_{T-ET} + SS_{T-EV}) = SS_{E-E}$
3. ค่าผลรวมกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อน ของความ
ยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่ คือ
 $SS_{TOTAL-C} - (SS_{T-CI} + SS_{T-CT} + SS_{T-CV}) = SS_{E-C}$

ตารางที่ 3.9 ตารางแสดงค่าผลรวมกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ย สำหรับอัตราการ
ขจัดเนื้องาน

Source of variation	DF	Sum of Squares
กระแสไฟฟ้า	1	SS_{T-MI}
เวลาปิด	1	SS_{T-MT}
ความต่างศักย์วงจรเปิด	1	SS_{T-MV}
Error	4	SS_{E-M}
Total	7	$SS_{TOTAL-M}$

ตารางที่ 3.10 ตารางแสดงค่าผลรวมกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ย สำหรับอัตราการ
สึกกร่อนของอิเล็คโตรด

Source of variation	DF	Sum of Squares
กระแสไฟฟ้า	1	SS_{T-EI}
เวลาปิด	1	SS_{T-ET}
ความต่างศักย์วงจรเปิด	1	SS_{T-EV}
Error	4	SS_{E-E}
Total	7	$SS_{TOTAL-E}$

ตารางที่ 3.11 ตารางแสดงค่าผลรวมกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ย สำหรับความยาวรวมของรอยแตกกว้างขนาดเล็กต่อพื้นที่

Source of variation	DF	Sum of Squares
กระแสไฟฟ้า	1	SS_{T-CI}
เวลาปิด	1	SS_{T-CT}
ความต่างศักย์วงจรเปิด	1	SS_{T-CV}
Error	4	SS_{E-C}
Total	7	$SS_{TOTAL-C}$

3.4.8 ค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของตัวแปร (Treatment mean squares, MST)

ค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของตัวแปรคือ ความแปรปรวนจากตัวแปรต่อหน่วยของข้อมูล คำนวณจากการนำค่าผลรวมกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของตัวแปรหารด้วยองศาอิสระของตัวแปร เป็นดังสมการที่ 8 ดังนี้

$$MS_T = SS_T / DF_T \quad \dots\dots\dots (8)$$

ค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของตัวแปร คำนวณดังนี้

1. อัตราการจัดเนื้องาน

- ค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของตัวแปร กระแสไฟฟ้า คือ

$$SS_{T-MI} / 1 = MS_{T-MI}$$

- ค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของตัวแปร เวลาปิด คือ

$$SS_{T-MT} / 1 = MS_{T-MT}$$

- ค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของตัวแปร ความต่างศักย์วงจรเปิด คือ $SS_{T-MV} / 1 = MS_{T-MV}$

2. อัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโทรด

- ค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของตัวแปร กระแสไฟฟ้า คือ

$$SS_{T-EI} / 1 = MS_{T-EI}$$

- ค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของตัวแปร เวลาปิด คือ

$$SS_{T-ET} / 1 = MS_{T-ET}$$

- ค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของตัวแปร ความต่างศักย์วงจรเปิด คือ $SS_{T-EV} / 1 = MS_{T-EV}$

3. ความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่

- ค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของตัวแปร กระแสไฟฟ้า คือ

$$SS_{T-CI} / 1 = MS_{T-CI}$$

- ค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของตัวแปร เวลาปิด คือ

$$SS_{T-CT} / 1 = MS_{T-CT}$$

- ค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของตัวแปร ความต่างศักย์วงจรเปิด คือ $SS_{T-CV} / 1 = MS_{T-CV}$

3.4.9 ค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อน (Error mean squares, MST)

ค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนคือ ความแปรปรวนจากสาเหตุที่ไม่ได้รับการควบคุมต่อหน่วยของข้อมูล คำนวณจากการนำค่า ค่าผลรวมกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนหารด้วยองศาอิสระของความคลาดเคลื่อน เป็นดังสมการที่ 9 ดังนี้

$$MS_E = SS_E / DF_E \quad \dots\dots\dots (9)$$

ค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อน เป็นดังนี้

1. ค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนของอัตราการจัดเนื้องาน คือ $SS_{E-M} / 4 = MS_{E-M}$

2. ค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนของอัตรา
การสึกกร่อนของอิเหล็กโตรด คือ $SS_{E-E} / 4 = MS_{E-E}$
3. ค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนของความ
ยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่ คือ $SS_{E-C} / 4 = MS_{E-C}$

ตารางที่ 3.12 ตารางแสดงค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ย สำหรับอัตราการขจัด
น้ำ

Source of variation	DF	Sum of Squares	Mean Squares
กระแสไฟฟ้า	1	SS_{T-MI}	MS_{T-MI}
เวลาปิด	1	SS_{T-MT}	MS_{T-MT}
ความต่างศักย์วงจรเปิด	1	SS_{T-MV}	MS_{T-MV}
Error	4	SS_{E-M}	MS_{E-M}
Total	7	$SS_{TOTAL-M}$	

ตารางที่ 3.13 ตารางแสดงค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ย สำหรับอัตราการสึก
กร่อนของอิเหล็กโตรด

Source of variation	DF	Sum of Squares	Mean Squares
กระแสไฟฟ้า	1	SS_{T-EI}	MS_{T-EI}
เวลาปิด	1	SS_{T-ET}	MS_{T-ET}
ความต่างศักย์วงจรเปิด	1	SS_{T-EV}	MS_{T-EV}
Error	4	SS_{E-E}	MS_{E-E}
Total	7	$SS_{TOTAL-E}$	

ตารางที่ 3.14 ตารางแสดงค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ย สำหรับความยาวรวมของรอยแตกกว้างขนาดเล็กต่อพื้นที่

Source of variation	DF	Sum of Squares	Mean Squares
กระแสไฟฟ้า	1	SS_{T-CI}	MS_{T-CI}
เวลาปิด	1	SS_{T-CT}	MS_{T-CT}
ความต่างศักย์วงจรเปิด	1	SS_{T-CV}	MS_{T-CV}
Error	4	SS_{E-C}	MS_{E-C}
Total	7	$SS_{TOTAL-C}$	

3.4.10 ค่าสถิติ F (F Ratio)

ค่าสถิติ F หรือค่า F ที่คำนวณมาจาก F-Test หรืออัตราส่วนของ MS สองค่า เป็นการคำนวณเพื่อทดสอบอิทธิพลเนื่องจากตัวแปร เนื่องมาจากว่าค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของตัวแปร หรือความแปรปรวนที่คำนวณมาก่อนหน้านี้ ไม่สามารถบอกได้ว่ามีค่ามากหรือน้อย ดังนั้นจึงต้องทำให้เป็นค่ามาตรฐานในรูปของค่า F โดยปกติแล้วค่า F จะอยู่ในรูปของ F_{α, v_1, v_2} โดย α หมายถึงระดับนัยสำคัญ, v_1 หมายถึง องศาอิสระของตัวแปร และ v_2 หมายถึง องศาอิสระของความคลาดเคลื่อน

ค่า F นั้นจะเป็นตัวบอกว่าจะยอมรับหรือปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) ซึ่งดูจากการที่ค่า F ที่คำนวณได้มีค่าเท่าไร ถ้าค่า F ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าค่า F ที่ได้จากตาราง นั้นแสดงว่าต้องปฏิเสธสมมติฐานหลัก หรือถ้าค่า F ที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าค่า F ที่ได้จากตาราง จึงยอมรับสมมติฐานหลัก ยกตัวอย่างเช่น สมมติค่า $F_{0.05, 2, 5}$ ที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 15 และค่า $F_{0.05, 2, 5}$ จากตารางค่า F มีค่าเท่ากับ 5.79 จึงทำการปฏิเสธสมมติฐานหลัก เป็นต้น

โดยค่า F คำนวณได้จาก นำค่าเฉลี่ยของผลรวมกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของตัวแปรหารค่าเฉลี่ยของผลรวมกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อน ดังสมการที่ 10 ดังนี้

$$F = MS_T / MS_E \quad \dots\dots\dots (10)$$

ค่าสถิติ F สำหรับแต่ละผลกระทบ คำนวณดังนี้

1. อัตราการจัดเนื้องาน

- ค่าสถิติ F ของตัวแปร กระแสไฟฟ้า คือ $MS_{T-MI} / MS_{E-M} = F_{MI}$
- ค่าสถิติ F ของตัวแปร เวลาปิด คือ $MS_{T-MT} / MS_{E-M} = F_{MT}$
- ค่าสถิติ F ความต่างศักย์วงจรเปิด คือ $MS_{T-MV} / MS_{E-M} = F_{MV}$

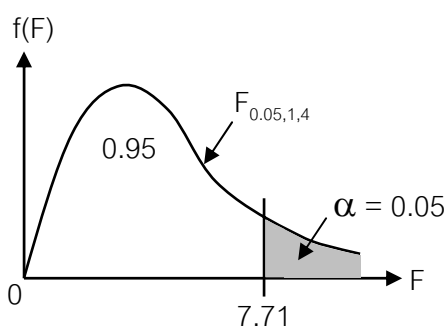
2. อัตราการสึกกร่อนของอิเล็กทรอนิกส์

- ค่าสถิติ F กระแสไฟฟ้า คือ $MS_{T-EI} / MS_{E-E} = F_{EI}$
- ค่าสถิติ F เวลาปิด คือ $MS_{T-ET} / MS_{E-E} = F_{ET}$
- ค่าสถิติ F ความต่างศักย์วงจรเปิด คือ $MS_{T-EV} / MS_{E-E} = F_{EV}$

3. ความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่

- ค่าสถิติ F กระแสไฟฟ้า คือ $MS_{T-CI} / MS_{E-C} = F_{CI}$
- ค่าสถิติ F เวลาปิด คือ $MS_{T-CT} / MS_{E-C} = F_{CT}$
- ค่าสถิติ F ความต่างศักย์วงจรเปิด คือ $MS_{T-CV} / MS_{E-C} = F_{CV}$

จากตัวอย่างค่าองศาอิสระของตัวแปรคือ 1 และองศาอิสระของความคลาดเคลื่อนคือ 4 ดังนั้นค่า F ที่ได้จากตารางควรมีค่าเท่ากับ $F_{0.05,1,4} = 7.71$ ถ้าความผันแปรของผลการทดลองเป็นไปโดยธรรมชาติ ค่า F จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 7.71 โดยเรียกช่วงดังกล่าวนี้ว่า พื้นที่แห่งการยอมรับ ถ้าค่า F จากตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งจากอัตราการจัดเนื้องานมีค่าน้อยกว่า 7.71 ซึ่งอยู่ในพื้นที่แห่งการยอมรับ จึงทำการยอมรับสมมติฐานหลัก (H_0) แต่ถ้าหากมีค่ามากกว่า 7.71 หรืออยู่นอกพื้นที่แห่งการยอมรับ ให้ทำการปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) ตามภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 แผนภูมิการแจกแจงความน่าจะเป็นของ $F_{0.05,1,4}$

3.4.11 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน

เพื่อให้การวิเคราะห์มีความสะดวก จึงควรแสดงผลการวิเคราะห์ข้างต้นในรูปของตาราง เรียกตารางนี้ว่า ตาราง ANOVA เป็นตารางแสดงถึงค่าความแปรปรวนในแต่ละแหล่งข้อมูลจากการคำนวณในข้อ 3.4.1 ถึง 3.4.10 สามารถเขียนตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน ได้ดังตารางที่ 3.15 ถึง 3.17 ดังนี้

ตารางที่ 3.15 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน สำหรับอัตราการขจัดเนื้องาน

Source of variation	DF	Sum of Squares	Mean Squares	F Ratio
กระแสไฟฟ้า	1	SS_{T-MI}	MS_{T-MI}	F_{MI}
เวลาปิด	1	SS_{T-MT}	MS_{T-MT}	F_{MT}
ความต่างศักย์วงจรเปิด	1	SS_{T-MV}	MS_{T-MV}	F_{MV}
Error	4	SS_{E-M}	MS_{E-M}	
Total	7	$SS_{TOTAL-M}$		

ตารางที่ 3.16 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน สำหรับอัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโตรด

Source of variation	DF	Sum of Squares	Mean Squares	F Ratio
กระแสไฟฟ้า	1	SS_{T-EI}	MS_{T-EI}	F_{EI}
เวลาปิด	1	SS_{T-ET}	MS_{T-ET}	F_{ET}
ความต่างศักย์วงจรเปิด	1	SS_{T-EV}	MS_{T-EV}	F_{EV}
Error	4	SS_{E-E}	MS_{E-E}	
Total	7	$SS_{TOTAL-E}$		

ตารางที่ 3.17 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน สำหรับความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่

Source of variation	DF	Sum of Squares	Mean Squares	F Ratio
กระแสไฟฟ้า	1	SS_{T-CI}	MS_{T-CI}	F_{CI}
เวลาปิด	1	SS_{T-CT}	MS_{T-CT}	F_{CT}
ความต่างศักย์วงจรเปิด	1	SS_{T-CV}	MS_{T-CV}	F_{CV}
Error	4	SS_{E-C}	MS_{E-C}	
Total	7	$SS_{TOTAL-C}$		

3.5 ผลคาดหวังที่เงื่อนไขความสัมพันธ์ที่ดีที่สุด

การคำนวณผลคาดหวังที่เงื่อนไขความสัมพันธ์ที่ดีที่สุด เป็นการคำนวณเพื่อทดสอบความถูกต้องของการทดลองแบบทากูชิ ในเบื้องต้นได้

การคำนวณต่อเนื่องมาจาก การคำนวณหาผลกระทบหลัก ในกระบวนการคำนวณของทากูชิ โดยใช้ผลของอัตราการขจัดเนื้องานในหัวข้อที่ 3.3.4 จากภาพที่ 3.5 ในตัวอย่างจะเห็นว่าตัวแปรกระแสไฟฟ้าที่ระดับ 2, เวลาปิดที่ระดับ 2 และความต่างศักย์วงจรเปิดที่ระดับ 1 จะทำให้มีประสิทธิภาพต่ออัตราการขจัดเนื้องานมากที่สุด ดังนั้นจึงนำผลจากตารางที่ 3.6 ถึง 3.8 ตารางผลกระทบของตัวแปรหลัก มาคำนวณหาส่วนเพิ่ม (Contribution) โดยเริ่มจากนำค่า L ในระดับที่มีผลกระทบมากที่สุดหรือตัวที่เลือก มาลบกับค่า L ในระดับที่มีผลกระทบน้อย แล้วหาร 2 โดยตัวอย่างจะแสดงการคำนวณเฉพาะอัตราการขจัดเนื้องาน ดังนี้

- ผลกระทบหลัก ของตัวแปรกระแสไฟฟ้า ระดับที่ 1 คือ MI_1
- ผลกระทบหลัก ของตัวแปรกระแสไฟฟ้า ระดับที่ 2 คือ MI_2
- ผลต่างของผลกระทบหลัก ของตัวแปรกระแสไฟฟ้า คือ $(MI_2-MI_1) = MI$
- ส่วนเพิ่ม ของตัวแปรกระแสไฟฟ้า คือ $MI / 2 = MI_C$

- ผลกระทบหลัก ของตัวแปรเวลาปิด ระดับที่ 1 คือ MT_1
- ผลกระทบหลัก ของตัวแปรเวลาปิด ระดับที่ 2 คือ MT_2
- ผลต่างของผลกระทบหลัก ของตัวแปรเวลาปิด คือ $(MT_2-MT_1) = MT$

- ส่วนเพิ่ม ของตัวแปรเวลาปิด คือ $MT / 2 = MT_C$
- ผลกระทบหลัก ของตัวแปรความต่างศักย์วงจรเปิด ระดับที่ 1 คือ MV_1
- ผลกระทบหลัก ของตัวแปรความต่างศักย์วงจรเปิด ระดับที่ 2 คือ MV_2
- ผลต่างของผลกระทบหลัก ของตัวแปรความต่างศักย์วงจรเปิด คือ $(MV_1 - MV_2) = MV$
- ส่วนเพิ่ม ของตัวแปรความต่างศักย์วงจรเปิด คือ $MV / 2 = MV_C$
- ดังนั้นผลรวมของส่วนเพิ่ม คือ $(MI_C + MT_C + MV_C) = M_C$ ลูกบาศก์มิลลิเมตร/นาที่

จากนั้นจึงคำนวณค่าเฉลี่ยของผลการทดลอง ซึ่งได้คำนวณไปแล้วในหัวข้อ 3.3.4

- ค่าเฉลี่ย ของอัตราการขจัดเนื้องาน คือ $\bar{M}$ ลูกบาศก์มิลลิเมตร/นาที่

สุดท้ายคำนวณค่าคาดหวังโดยนำเอาส่วนเพิ่มที่คำนวณได้ มาบวกกับค่าเฉลี่ย ดังนี้

- ค่าคาดหวัง ของอัตราการขจัดเนื้องานคือ $M_C + \bar{M} = M_{\text{EXPECT}}$

ตารางที่ 3.18 เงื่อนไขความสัมพันธ์ที่ดีที่สุด และผลคาดหวังที่เงื่อนไขความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดในอัตราการขจัดเนื้องาน

ตัวแปร	ระดับ	ค่าที่กำหนด จากระดับ	ส่วนเพิ่ม (ลูกบาศก์ มิลลิเมตร/นาที่)
กระแสไฟฟ้า	2	I-2 แอมแปร์	MI_C
เวลาปิด	2	T-2 μs	MT_C
ความต่างศักย์วงจรเปิด	1	V-1 โวลต์	MV_C
ผลรวมของส่วนเพิ่มจากตัวแปรทั้งหมด			M_C
ค่าเฉลี่ย			$\bar{M}$
ผลคาดหวังที่เงื่อนไขความสัมพันธ์ที่ดี ที่สุด			M_{EXPECT}
การทดลองที่ 7			MRR_7

ค่าคาดหวังที่คำนวณออกมานั้น นำมาใช้เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงได้ เพื่อดูว่าค่าคาดหวัง และค่าการทดลองจริงใกล้เคียงกันหรือไม่ โดยการเปรียบเทียบนั้น จะนำผลต่างของการทดลองจริง และค่าคาดหวัง มาเปรียบเทียบกับผลต่างของค่าคาดหวัง และค่าเฉลี่ย โดยนำค่ามากลบค่าน้อยเสมอ หากผลต่างไหนมีค่าน้อยกว่า แสดงว่าค่าคาดหวังจากผลต่างที่น้อยกว่า ใกล้เคียงกับค่าที่นำมาหักลบนั่นเอง

จากตัวอย่างข้างต้น ตัวแปรกระแสไฟฟ้าที่ระดับ 2, เวลาปิดที่ระดับ 2 และความตํ่าศักย์วงจรเปิดที่ระดับ 1 ตรงกับการทดลองที่ 7 (ตารางที่ 3.2) ซึ่งมีค่าเท่ากับ MRR_7 นำมาเปรียบเทียบกับค่าคาดหวังที่มีค่าเท่ากับ M_{EXPECT} และค่าเฉลี่ย M ดังนี้

- ผลต่างของค่าจากการทดลองจริง และค่าคาดหวัง คือ $MRR_7 - M_{EXPECT} = MRR_{7-E}$
- ผลต่างของค่าคาดหวัง และค่าเฉลี่ย คือ $M_{EXPECT} - M = MRR_{E-M}$

จากการคำนวณ ถ้าการทดลองมีความถูกต้อง ผลต่างของค่าจากการทดลองจริง และค่าคาดหวัง MRR_{7-E} จะต้องน้อยกว่าค่าผลต่างของค่าคาดหวัง และค่าเฉลี่ย MRR_{E-M} หรือพูดอีกนัยหนึ่งคือ ค่าจากการทดลองจริง MRR_7 และค่าคาดหวัง M_{EXPECT} ใกล้เคียงกัน

3.6 การนับรอยแตกร้าวขนาดเล็ก

หน่วยที่ใช้วัดรอยแตกร้าวขนาดเล็ก เรียกว่า ความหนาแน่นของรอยแตกร้าวขนาดเล็ก ซึ่งหน่วยการวัดนี้ สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แบบ ดังที่กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้หน่วยการวัดแบบ ความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่ หรือ Cr.S.Dn ซึ่งหมายถึง การหาค่าความยาวของรอยแตกร้าวขนาดเล็กทั้งหมด ในพื้นที่ที่ทำการวัดมารวมกัน และที่ไม่ใช้หน่วยการวัดแบบอื่น เนื่องมาจากทางผู้ทดลองได้ไปทดสอบการนับรอยแตกร้าวขนาดเล็กเบื้องต้นด้วยเครื่องนับรอยแตกร้าวแล้วพบว่า ภาพพื้นผิวทั้งสแตนคาร์ไบด์ ที่ผ่านการ EDM มาแล้วนั้น เครื่องวัดไม่สามารถแยกแยะรอยแตกร้าว หรือไม่สามารถนับรอยแตกร้าวได้ ดังนั้นจึงใช้หน่วยการวัดแบบที่ 1 ไม่ได้ และใช้วิธีวัดความยาวรอยแตกร้าวด้วยมือแทน

หน่วยการวัดที่ใช้นี้ แสดงหน่วยเป็น ไมโครเมตร/ 0.05 ตารางมิลลิเมตร สาเหตุที่พื้นที่เป็น 0.05 ตารางมิลลิเมตร ไม่ใช่ 1 ตารางมิลลิเมตร เนื่องมาจากว่า พื้นที่ที่ทำการวัดและถ่ายรูปนั้นมีขนาดเท่ากับ 0.05 ตารางมิลลิเมตร โดยขั้นตอนการนับรอยแตกร้าวขนาดเล็ก เป็นดังนี้

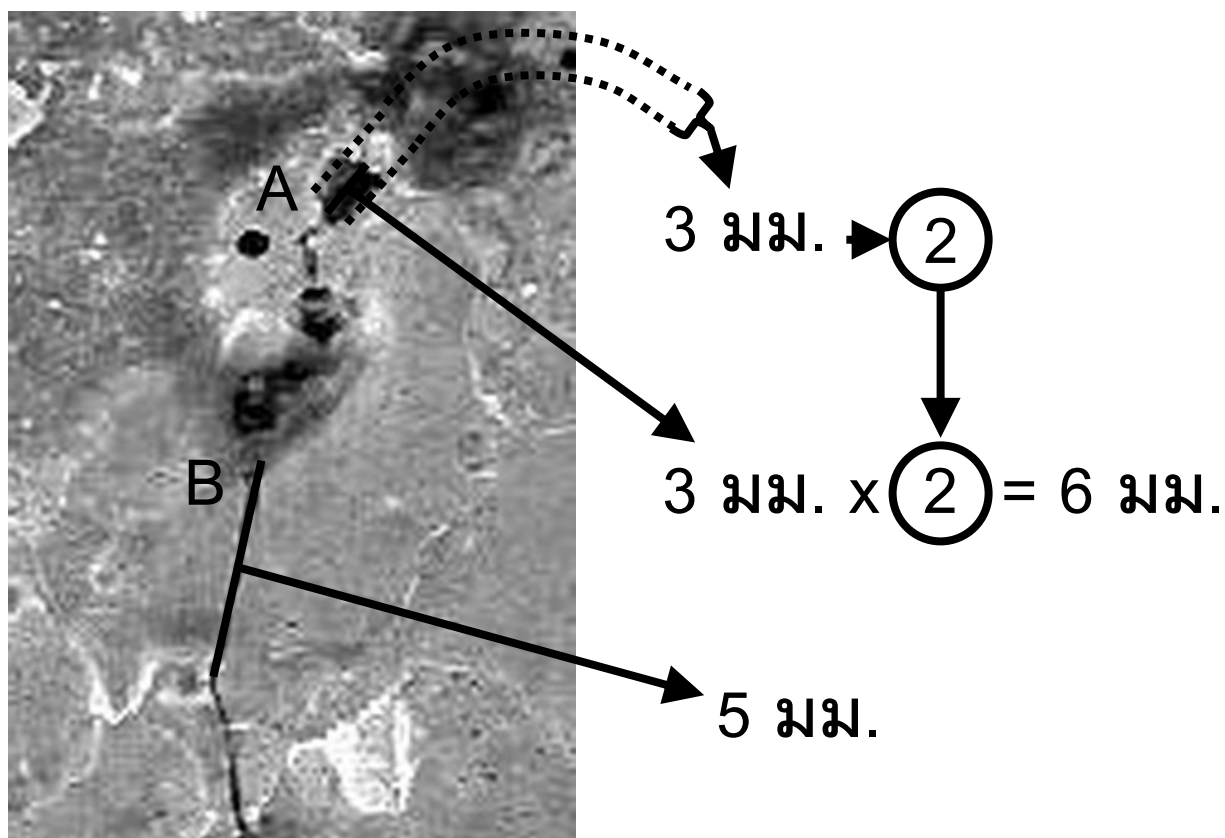
เมื่อพิมพ์ภาพถ่ายรอยแตกร้าวขนาดเล็กแล้ว นำมาพิจารณารอยแตกร้าวในภาพถ่าย โดยจะทำการวัดความยาวรอยแตกร้าวในภาพ ในหน่วยมิลลิเมตร โดยเริ่มจากวัดรอยแตกร้าว

ขนาดเล็กในด้านยาวก่อน แล้วจึงวัดความกว้างของรอยแตกนั้น จากนั้นนำความยาวในด้านยาว มาคูณกับตัวเลขน้ำหนักตามเกณฑ์ความกว้าง กำหนดตัวเลขจากความกว้าง [O'Brien, Fergal J.;2003] ดังนี้

ตารางที่ 3.19 คำนำน้หนักของความกว้าง ของรอยแตกร้าวขนาดเล็ก

ความกว้างของรอยร้าว	น้ำหนัก
ความกว้างน้อยกว่า 3.2 ไมโครเมตร	1
กว้าง 3.2-6.5 ไมโครเมตร	2
กว้าง 6.5-9.7 ไมโครเมตร	3
กว้าง 9.7-12.9 ไมโครเมตร	4
กว้าง 12.9-16.1 ไมโครเมตร	5

โดยความกว้างที่มากกว่า 10 มิลลิเมตร ให้คูณด้วยอัตราส่วนเช่นนี้ต่อไป เมื่อวัดความยาวรวมภายในพื้นที่ทั้งหมดแล้ว จึงเปรียบเทียบกับอัตราส่วนจริงในหน่วยของ ไมโครเมตร



ภาพที่ 3.7 ตัวอย่างภาพการนับรอยแตกร้าวขนาดเล็ก ที่จุด A คือจุดสมมุติรอยแตกที่มีความกว้าง 3 มิลลิเมตร และ ที่จุด B คือจุดสมมุติรอยแตกที่มีความกว้างน้อยกว่า 2 มิลลิเมตร

ยกตัวอย่างเช่น จากภาพที่ 3.7 ที่จุด A คือจุดสมมุติรอยแตกที่มีความยาว 3 มิลลิเมตร และมีความกว้าง 3 มิลลิเมตร ซึ่งนำมาคูณ 2 ดังนั้นจึงมีความยาวจริงคือ $3 \times 2 = 6$ มิลลิเมตร ส่วนที่จุด B ความกว้างน้อยกว่า 2 มิลลิเมตร จึงไม่ต้องคูณอะไร ที่จุด B จึงมีความยาว 5 มิลลิเมตร จากนั้นนำความยาวที่วัดได้ทั้งหมดมาเปรียบเทียบกับอัตราส่วนจริงต่อไป