

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง และการอภิปราย

การพิจารณาผลการทดลองประเมินจาก อัตราการจัดเนื้องาน, อัตราการสึกกร่อนของอิเล็กทรอนิกส์, ความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่ และความหนาผิวเฉลี่ย (ความหนาผิวเฉลี่ยวัดสำหรับการทดลองหาค่ากระแสไฟฟ้าเท่านั้น) จากตัวแปร เวลาเปิด, เวลาปิด, ความต่างศักย์วงจรเปิด, กระแสไฟฟ้า, ชนิดวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ และขั้วอิเล็กทรอนิกส์

#### 4.1 การทดลอง หาค่าปัจจัยประสิทธิภาพที่เหมาะสม ด้วยการปรับค่าเวลาเปิด

การทดลองนี้ เป็นการหาค่าปัจจัยประสิทธิภาพ ที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของสปาร์ค ทั้งสแตนด์บาย ด้วยการให้เวลาปิดคงที่ และปรับค่าเวลาเปิด โดยเวลาเปิดมีผลต่อช่วงเวลาในการสปาร์ค เพื่อให้เกิดการกักอาร์คหรือการจัดเนื้องานขึ้น เพราะฉะนั้นต้องกำหนดค่าปัจจัยประสิทธิภาพด้วยการปรับค่าเวลาเปิดให้เหมาะสม โดยกำหนดให้กระแสไฟฟ้า 6 แอมแปร์, ความต่างศักย์วงจรเปิด 90 โวลต์ อิเล็กทรอนิกส์เป็นขั้วบวกและลบ ตามตารางที่ 4.1 และได้ผลการทดลองตามตารางที่ 4.2 ถึง 4.7

ตารางที่ 4.1 ตารางการทดลอง โดยปรับค่าเวลาเปิด ใช้อิเล็กทรอนิกส์ทั้ง 3 ชนิด ขั้วบวกและลบ

| ปัจจัย<br>ประสิทธิภาพ (%) | เวลาเปิด<br>(ไมโครวินาที) | เวลาปิด<br>(ไมโครวินาที) |
|---------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 89                        | 200                       | 25                       |
| 67                        | 50                        | 25                       |
| 50                        | 25                        | 25                       |
| 32                        | 12                        | 25                       |
| 7                         | 2                         | 25                       |

ตารางที่ 4.2 ตารางผลการทดลองการปรับค่าเวลาเปิด ของอิเล็กทรอนิกส์เกรดไฟต์ ขั้วบวก

| ปัจจัย<br>ประสิทธิภาพ (%) | อัตราการขัดข้องงาน<br>(ลูกบาศก์มิลลิเมตร/นาทีก) | ความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อ<br>พื้นที่ (ไมโครเมตร/0.05 ตารางมิลลิเมตร) |
|---------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| 89                        | 0.084                                           | 1,061.290                                                                     |
| 67                        | 0.089                                           | 929.032                                                                       |
| 50                        | 0.108                                           | 590.323                                                                       |
| 32                        | 0.096                                           | 587.097                                                                       |
| 7                         | 0.097                                           | 388.710                                                                       |

ตารางที่ 4.3 ตารางผลการทดลองการปรับค่าเวลาเปิด ของอิเล็กทรอนิกส์เกรดไฟต์ ขั้วลบ

| ปัจจัย<br>ประสิทธิภาพ (%) | อัตราการขัดข้องงาน<br>(ลูกบาศก์มิลลิเมตร/นาทีก) | ความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อ<br>พื้นที่ (ไมโครเมตร/0.05 ตารางมิลลิเมตร) |
|---------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| 89                        | 0.353                                           | 1,108.065                                                                     |
| 67                        | 0.370                                           | 429.032                                                                       |
| 50                        | 0.409                                           | 224.194                                                                       |
| 32                        | 0.461                                           | 203.226                                                                       |
| 7                         | 0.507                                           | 356.452                                                                       |

ตารางที่ 4.4 ตารางผลการทดลองการปรับค่าเวลาเปิด ของอิเล็กทรอนิกส์เกรดไฟต์ ขั้วบวก

| ปัจจัย<br>ประสิทธิภาพ (%) | อัตราการขัดข้องงาน<br>(ลูกบาศก์มิลลิเมตร/นาทีก) | ความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อ<br>พื้นที่ (ไมโครเมตร/0.05 ตารางมิลลิเมตร) |
|---------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| 89                        | 0.086                                           | 1,448.387                                                                     |
| 67                        | 0.087                                           | 1,179.032                                                                     |
| 50                        | 0.089                                           | 982.258                                                                       |
| 32                        | 0.094                                           | 922.581                                                                       |
| 7                         | 0.100                                           | 856.452                                                                       |

ตารางที่ 4.5 ตารางผลการทดลองการปรับค่าเวลาเปิด ของอิเล็กทรอนิกส์ทรานสดักเตอร์แรงดัน-กระแสไฟฟ้า ขั้วลบ

| ปัจจัย<br>ประสิทธิภาพ (%) | อัตราการขจัดเนื้องาน<br>(ลูกบาศก์มิลลิเมตร/นาฬิกา) | ความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อ<br>พื้นที่ (ไมโครเมตร/0.05 ตารางมิลลิเมตร) |
|---------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| 89                        | 0.326                                              | 1,466.129                                                                     |
| 67                        | 0.357                                              | 598.387                                                                       |
| 50                        | 0.405                                              | 248.387                                                                       |
| 32                        | 0.424                                              | 296.774                                                                       |
| 7                         | 0.452                                              | 198.387                                                                       |

ตารางที่ 4.6 ตารางผลการทดลองการปรับค่าเวลาเปิด ของอิเล็กทรอนิกส์ทรานสดักเตอร์แรงดัน-ทั้งสแตนด์ ขั้วบวก

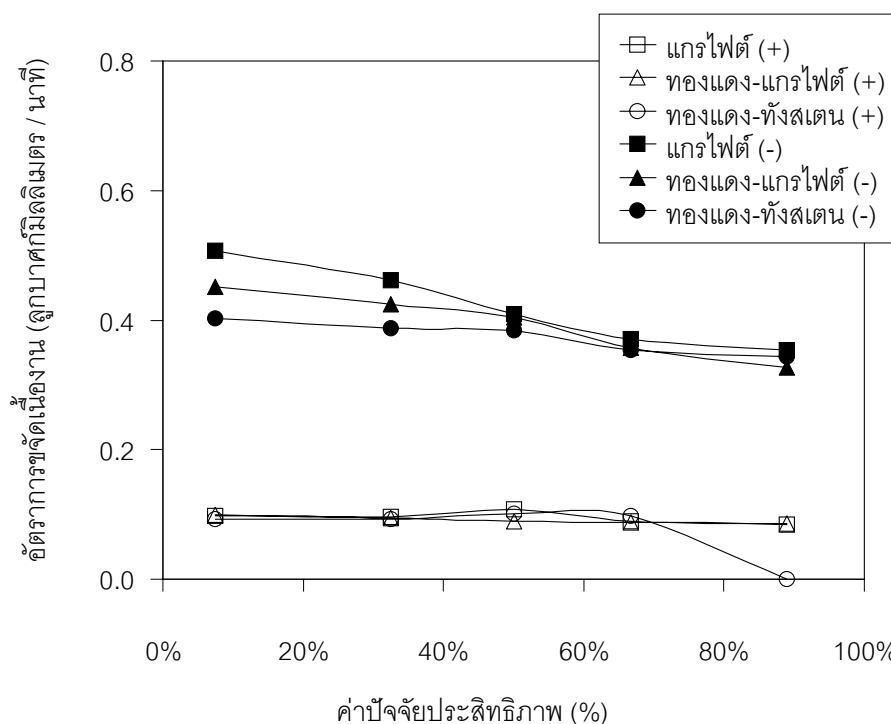
| ปัจจัย<br>ประสิทธิภาพ (%) | อัตราการขจัดเนื้องาน<br>(ลูกบาศก์มิลลิเมตร/นาฬิกา) | ความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อ<br>พื้นที่ (ไมโครเมตร/0.05 ตารางมิลลิเมตร) |
|---------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| 89                        | 0 *                                                | - *                                                                           |
| 67                        | 0.097                                              | 761.290                                                                       |
| 50                        | 0.101                                              | 645.161                                                                       |
| 32                        | 0.093                                              | 675.807                                                                       |
| 7                         | 0.093                                              | 400                                                                           |

\* ไม่สามารถทดลองได้จนแล้วเสร็จ โดยเงื่อนไขความสัมพันธ์ไม่เอื้อต่อการสปาร์ค

ตารางที่ 4.7 ตารางผลการทดลองการปรับค่าเวลาเปิด ของอิเล็กทรอนิกส์แดง-ทั้งสแตน ขั้วลบ

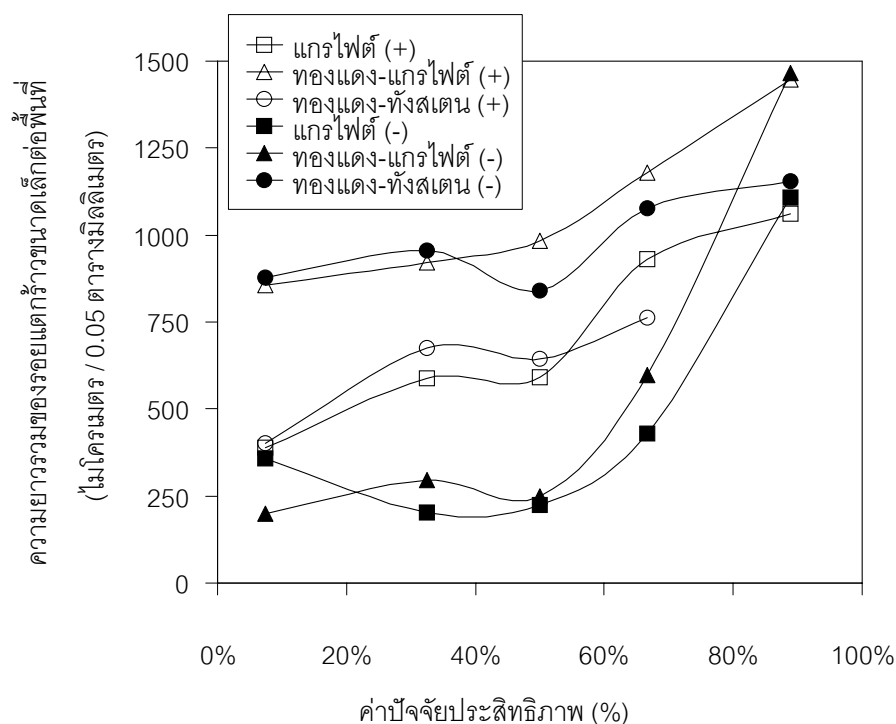
| ปัจจัย<br>ประสิทธิภาพ (%) | อัตราการขจัดเนื้องาน<br>(ลูกบาศก์มิลลิเมตร/นาท) | ความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อ<br>พื้นที่ (ไมโครเมตร/0.05 ตารางมิลลิเมตร) |
|---------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| 89                        | 0.343                                           | 1,154.839                                                                     |
| 67                        | 0.353                                           | 1,075.807                                                                     |
| 50                        | 0.384                                           | 840.323                                                                       |
| 32                        | 0.387                                           | 954.839                                                                       |
| 7                         | 0.402                                           | 877.419                                                                       |

จากตารางที่ 4.2 ถึง 4.7 เมื่อปรับค่าปัจจัยประสิทธิภาพแล้ว ค่าปัจจัยประสิทธิภาพที่มีค่าต่ำ จะทำให้มีอัตราการขจัดเนื้องานที่สูงกว่า ที่ค่าปัจจัยประสิทธิภาพที่ค่าสูง โดยอิเล็กทรอนิกส์แดงไฟต์ให้อัตราการขจัดเนื้องานสูงสุด ที่สำคัญขั้วลบจะมีอัตราการขจัดเนื้องานที่สูงกว่า ขั้วบวก สำหรับอิเล็กทรอนิกส์แดง-ทั้งสแตน ขั้วบวก ที่ค่าปัจจัยประสิทธิภาพ 89 % ไม่สามารถทดลองได้จนแล้วเสร็จ หรือก็คือ อัตราการขจัดเนื้องานมีค่าเท่ากับ 0 นั่นเอง เนื่องจากเงื่อนไขความสัมพันธ์ไม่เอื้อต่อการสปาร์ค ในภาพรวมแล้วทั้ง 3 อิเล็กทรอนิกส์แดง มีการเปลี่ยนแปลงผลการทดลองไปในทิศทางเดียวกัน ตามภาพที่ 4.1

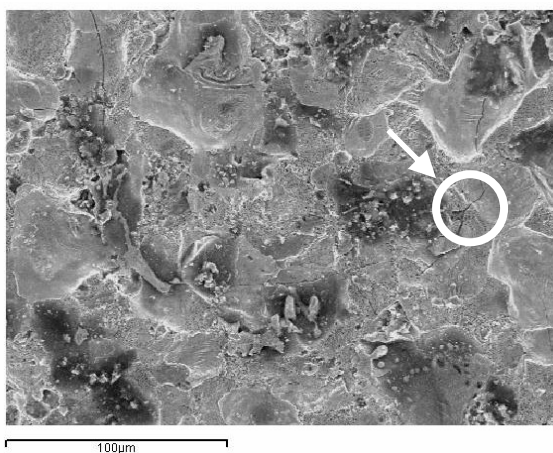


ภาพที่ 4.1 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยประสิทธิภาพ และอัตราการจัดเนื้องาน (การทดลองปรับค่าเวลาเปิด และให้เวลาปิดคงที่)

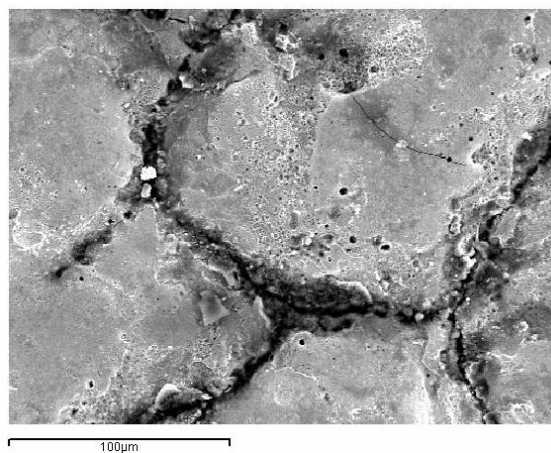
ผลทางด้านรอยแตกร้าวขนาดเล็กที่เกิดขึ้น จากภาพที่ 4.3 ถึง 4.5 พบว่าอิเล็กโตรดทั้งหมด ที่ค่าปัจจัยประสิทธิภาพต่ำ ความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่ต่ำกว่า ที่ค่าปัจจัยประสิทธิภาพที่ค่าสูง โดยอิเล็กโตรดแกรไฟต์ จะให้ความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่ต่ำที่สุด และขั้วลบจะมีความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่ต่ำกว่าขั้วบวก ดังภาพที่ 4.2 และภาพพื้นผิวของชิ้นงานดังภาพที่ 4.3 ถึง 4.5 โดยวงกลมสีขาวในภาพที่คือ รอยแตกร้าวขนาดเล็ก



ภาพที่ 4.2 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยประสิทธิภาพ และความยาวรวมของรอยแตกกว้างขนาดเล็กต่อพื้นที่ (การทดลองปรับค่าเวลาเปิด และให้เวลาปิดคงที่)

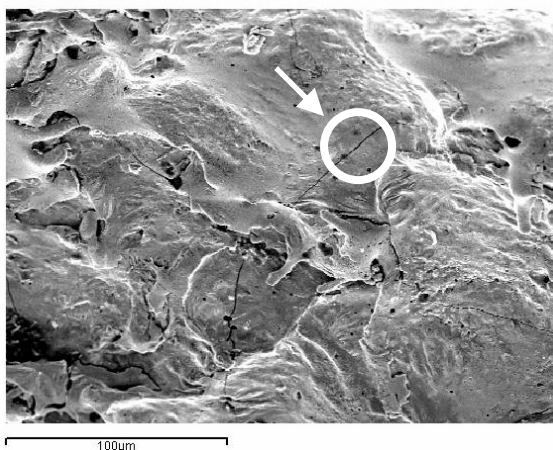


(ก) ปัจจัยประสิทธิภาพ 7 %

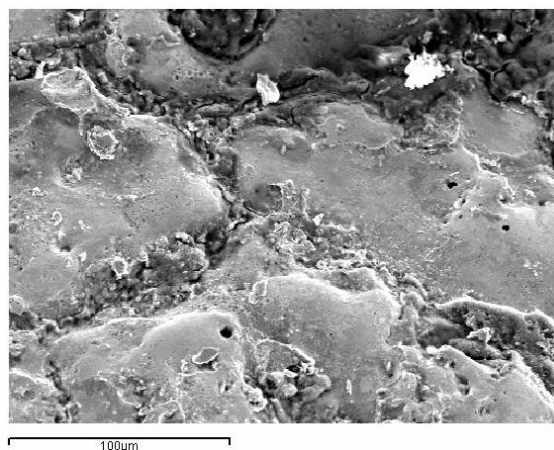


(ข) ปัจจัยประสิทธิภาพ 89 %

ภาพที่ 4.3 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงรอยแตกกว้างขนาดเล็ก ใช้อิเล็กโตรดแกรไฟต์ ขั้วบวก กระแสไฟฟ้า 6 แอมแปร์ ความต่างศักย์วงจรเปิด 90 โวลต์ ถ่ายด้วยกำลังขยาย 500 เท่า โดยภาพ (ก) ปัจจัยประสิทธิภาพ 7 % (ข) ปัจจัยประสิทธิภาพ 89 %

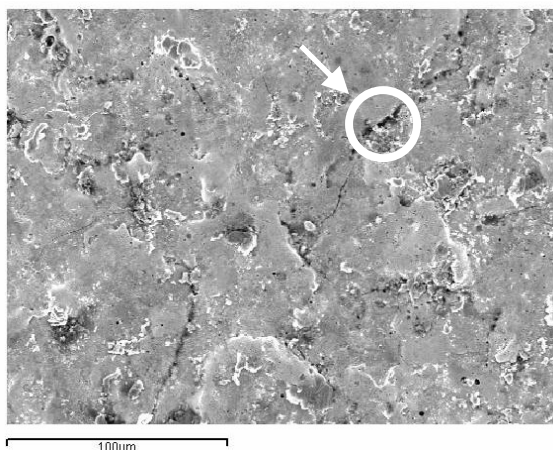


(ก) ปัจจัยประสิทธิภาพ 7 %

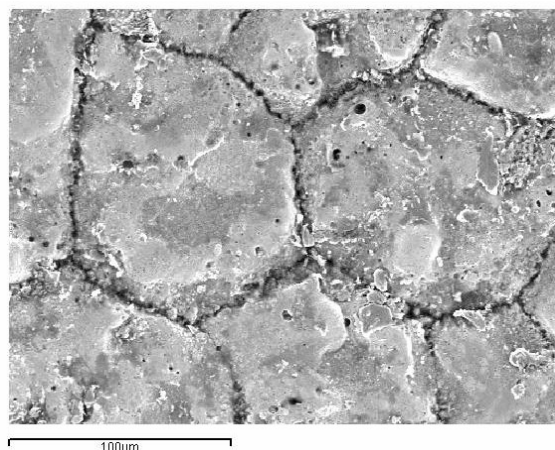


(ข) ปัจจัยประสิทธิภาพ 89 %

ภาพที่ 4.4 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงรอยแตกร้าวขนาดเล็ก ใช้อิเล็กทรอนิกส์  
ทองแดง-แกรไฟต์ ขั้วบวก กระแสไฟฟ้า 6 แอมแปร์ ความต่างศักย์วงจรเปิด 90 โวลต์ ถ่ายด้วย  
กำลังขยาย 500 เท่า โดยภาพ (ก) ปัจจัยประสิทธิภาพ 7 % (ข) ปัจจัยประสิทธิภาพ 89 %



(ก) ปัจจัยประสิทธิภาพ 7 %



(ข) ปัจจัยประสิทธิภาพ 67 %

ภาพที่ 4.5 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงรอยแตกร้าวขนาดเล็ก ใช้อิเล็กทรอนิกส์  
ทองแดง-ทังสเตน ขั้วบวก กระแสไฟฟ้า 6 แอมแปร์ ความต่างศักย์วงจรเปิด 90 โวลต์ ถ่ายด้วย  
กำลังขยาย 500 เท่า โดยภาพ (ก) ปัจจัยประสิทธิภาพ 7 % (ข) ปัจจัยประสิทธิภาพ 67 %

#### 4.2 การทดลอง หาค่าปัจจัยประสิทธิภาพที่เหมาะสม ด้วยการปรับค่าเวลาปิด

การทดลอง เป็นการหาค่าปัจจัยประสิทธิภาพ ด้วยการปรับค่าเวลาปิด โดยเวลาปิดมีผลต่อช่วงเวลาหยุดสปาร์ค เพื่อให้เกิดการระบายเศษชิ้นงานหลังการสปาร์ค และคืนสภาพความเป็นกลางเพื่อการ สปาร์คครั้งต่อไป ดังนั้นต้องกำหนดค่าปัจจัยประสิทธิภาพด้วยการปรับค่าเวลาปิดให้เหมาะสม โดยกำหนดให้กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 6 แอมแปร์, ความต่างศักย์วงจรเปิดที่ 90 โวลต์ และอิเล็กทรอนิกส์เป็นขั้วบวกและลบตามตารางที่ 4.8 โดยได้ผลการทดลองตามตารางที่ 4.9 ถึง 4.13

ตารางที่ 4.8 ตารางการทดลอง โดยปรับค่าเวลาปิด ใช้อิเล็กทรอนิกส์ทั้ง 3 ชนิด ขั้วบวกและลบ

| ปัจจัย<br>ประสิทธิภาพ (%) | เวลาเปิด<br>(ไมโครวินาที) | เวลาปิด<br>(ไมโครวินาที) |
|---------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 93                        | 25                        | 2                        |
| 68                        | 25                        | 12                       |
| 50                        | 25                        | 25                       |
| 33                        | 25                        | 50                       |
| 11                        | 25                        | 200                      |
| 2                         | 25                        | 1600                     |

ตารางที่ 4.9 ตารางผลการทดลองการปรับค่าเวลาปิด ของอิเล็กทรอนิกส์แกรไฟต์ ขั้วบวก

| ปัจจัย<br>ประสิทธิภาพ (%) | อัตราการขจัดเนื้องาน<br>(ลูกบาศก์มิลลิเมตร/นาที) | ความยาวรวมของรอยแตกกว้างขนาดเล็กต่อ<br>พื้นที่ (ไมโครเมตร/0.05 ตารางมิลลิเมตร) |
|---------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| 93                        | 0.100                                            | 1,385.484                                                                      |
| 68                        | 0.123                                            | 835.484                                                                        |
| 50                        | 0.144                                            | 735.484                                                                        |
| 33                        | 0.155                                            | 706.452                                                                        |
| 11                        | 0.166                                            | 500                                                                            |
| 2                         | 0.133                                            | 79.032                                                                         |

ตารางที่ 4.10 ตารางผลการทดลองการปรับค่าเวลาปิด ของอิเล็กทรอนิกส์เกรดไฟต์ ขั้วลบ

| ปัจจัย<br>ประสิทธิภาพ (%) | อัตราการขัดข้องงาน<br>(ลูกบาศก์มิลลิเมตร/นาทีก) | ความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อ<br>พื้นที่ (ไมโครเมตร/0.05 ตารางมิลลิเมตร) |
|---------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| 93                        | 0.306                                           | 945.161                                                                       |
| 68                        | 0.389                                           | 598.387                                                                       |
| 50                        | 0.472                                           | 398.387                                                                       |
| 33                        | 0.605                                           | 164.516                                                                       |
| 11                        | 0.724                                           | 83.871                                                                        |
| 2                         | 0.646                                           | 80.645                                                                        |

ตารางที่ 4.11 ตารางผลการทดลองการปรับค่าเวลาปิด ของอิเล็กทรอนิกส์ทองแดง-เกรดไฟต์ ขั้วบวก

| ปัจจัย<br>ประสิทธิภาพ (%) | อัตราการขัดข้องงาน<br>(ลูกบาศก์มิลลิเมตร/นาทีก) | ความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อ<br>พื้นที่ (ไมโครเมตร/0.05 ตารางมิลลิเมตร) |
|---------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| 93                        | 0.102                                           | 858.065                                                                       |
| 68                        | 0.125                                           | 1,166.129                                                                     |
| 50                        | 0.136                                           | 688.710                                                                       |
| 33                        | 0.152                                           | 898.387                                                                       |
| 11                        | 0.162                                           | 717.742                                                                       |
| 2                         | 0.127                                           | 101.613                                                                       |

ตารางที่ 4.12 ตารางผลการทดลองการปรับค่าเวลาปิด ของอิเล็กทรอนิกส์ทรอดทองแดง-แกรไฟต์ ขั้วลบ

| ปัจจัย<br>ประสิทธิภาพ (%) | อัตราการขจัดเนื้องาน<br>(ลูกบาศก์มิลลิเมตร/นาทึ) | ความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อ<br>พื้นที่ (ไมโครเมตร/0.05 ตารางมิลลิเมตร) |
|---------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| 93                        | 0.301                                            | 903.226                                                                       |
| 68                        | 0.358                                            | 1,079.032                                                                     |
| 50                        | 0.455                                            | 479.032                                                                       |
| 33                        | 0.578                                            | 287.097                                                                       |
| 11                        | 0.716                                            | 188.710                                                                       |
| 2                         | 0.642                                            | 125.806                                                                       |

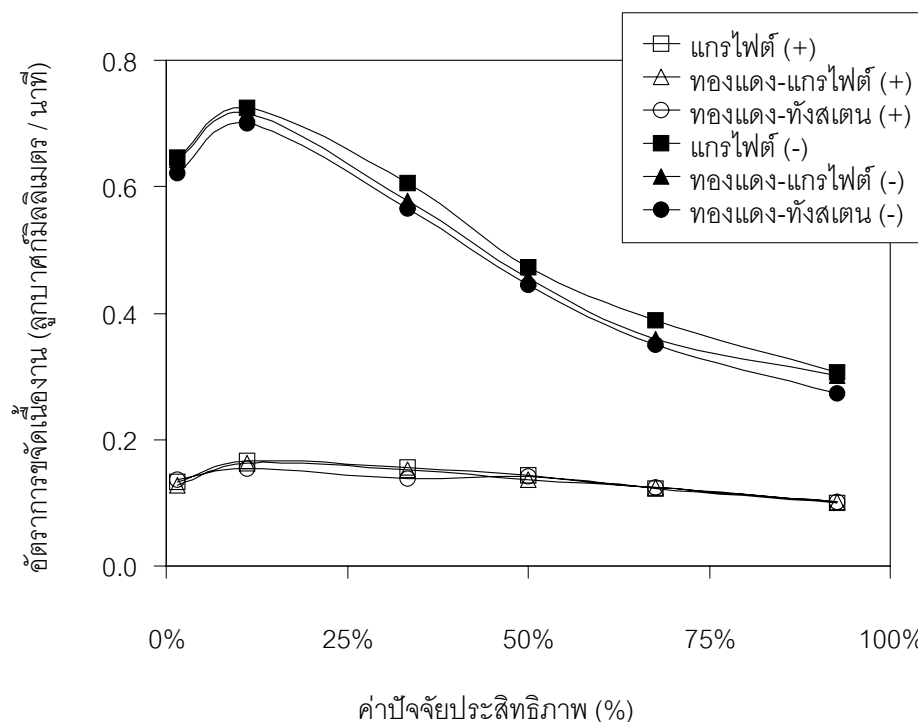
ตารางที่ 4.13 ตารางผลการทดลองการปรับค่าเวลาปิด ของอิเล็กทรอนิกส์ทรอดทองแดง-ทังสเทน ขั้วบวก

| ปัจจัย<br>ประสิทธิภาพ (%) | อัตราการขจัดเนื้องาน<br>(ลูกบาศก์มิลลิเมตร/นาทึ) | ความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อ<br>พื้นที่ (ไมโครเมตร/0.05 ตารางมิลลิเมตร) |
|---------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| 93                        | 0.101                                            | 1,153.226                                                                     |
| 68                        | 0.124                                            | 867.742                                                                       |
| 50                        | 0.141                                            | 995.161                                                                       |
| 33                        | 0.138                                            | 708.065                                                                       |
| 11                        | 0.154                                            | 329.032                                                                       |
| 2                         | 0.136                                            | 646.774                                                                       |

ตารางที่ 4.14 ตารางผลการทดลองการปรับค่าเวลาปิด ของอิเล็กทรอนิกส์แดง-ทั้งสแตนด์อัลบ

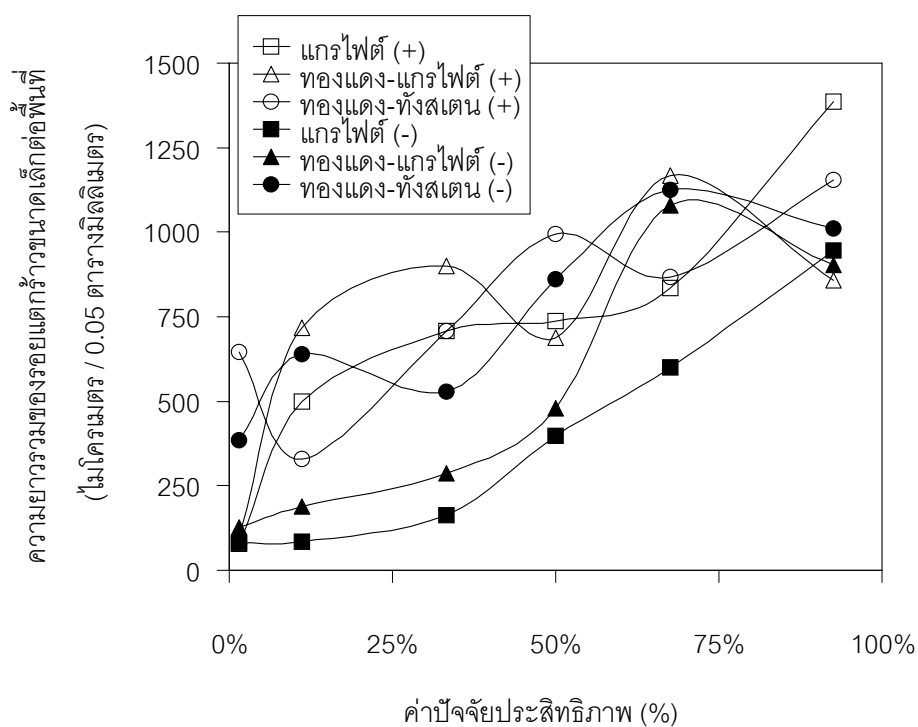
| ปัจจัย<br>ประสิทธิภาพ (%) | อัตราการขจัดเนื้องาน<br>(ลูกบาศก์มิลลิเมตร/นาที่) | ความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อ<br>พื้นที่ (ไมโครเมตร/0.05 ตารางมิลลิเมตร) |
|---------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| 93                        | 0.273                                             | 1,009.677                                                                     |
| 68                        | 0.350                                             | 1,125.807                                                                     |
| 50                        | 0.445                                             | 861.290                                                                       |
| 33                        | 0.566                                             | 529.032                                                                       |
| 11                        | 0.700                                             | 638.710                                                                       |
| 2                         | 0.622                                             | 383.871                                                                       |

จากตารางที่ 4.9 ถึง 4.14 ค่าปัจจัยประสิทธิภาพที่มีค่าต่ำๆ มีอัตราการขจัดเนื้องานที่สูงกว่า เช่นเดียวกับการทดลองปรับค่าเวลาเปิด เนื่องมาจากว่าที่ค่าปัจจัยประสิทธิภาพสูงหรือเวลาปิดน้อยจะทำให้กระบวนการสปาร์คเกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์ [Singh, Shankar;2004] อัตราการขจัดเนื้องานสูงสุดที่ 11 % โดยอิเล็กทรอนิกส์แดง-ทั้งสแตนด์อัลบ ให้อัตราการขจัดเนื้องานสูงสุด และอัลบมีอัตราการขจัดเนื้องานที่สูงกว่าอัลบวค ดังแผนภูมิในภาพที่ 4.6

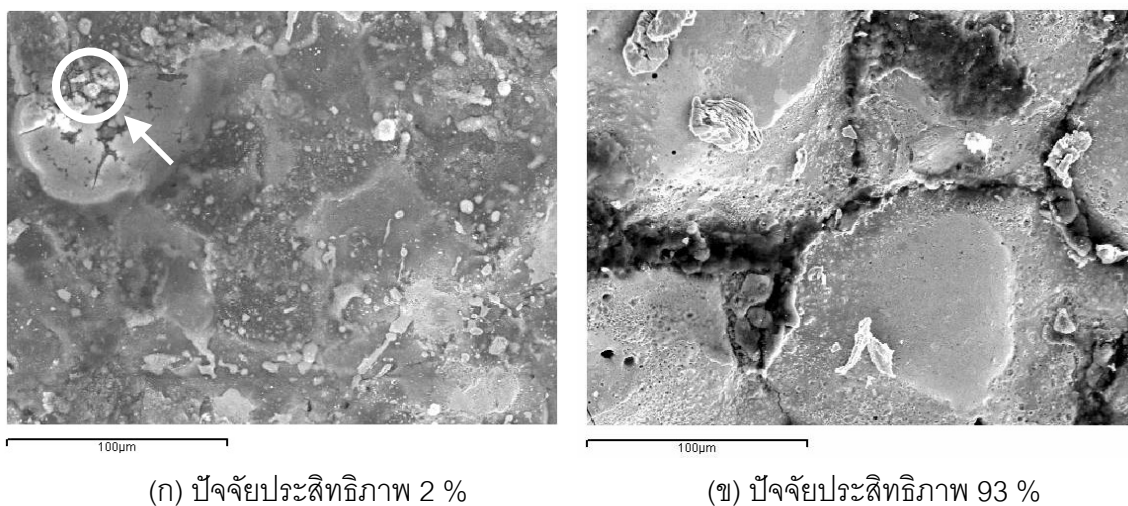


ภาพที่ 4.6 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยประสิทธิภาพ และอัตราการจัดเนื้องาน (การทดลองปรับค่าเวลาปิด และให้เวลาเปิดคงที่)

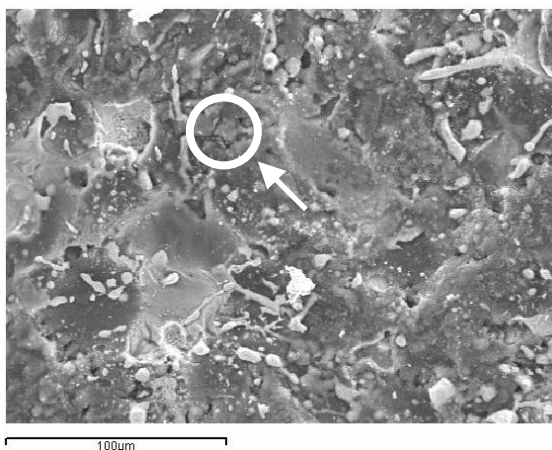
ในด้านรอยแตกร้าวขนาดเล็กที่เกิดขึ้น จากภาพที่ 4.8 ถึง 4.10 พบว่าความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่จะต่ำ เมื่อใช้ค่าปัจจัยประสิทธิภาพต่ำ และชั่วลบ โดยอิเล็กโตรดแกรไฟต์ ให้ความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่ต่ำที่สุด เช่นกันกับการทดลองปรับค่าเวลาเปิด เมื่อค่าปัจจัยประสิทธิภาพสูงให้ค่ารอยแตกร้าวขนาดเล็กมากขึ้นสามารถอธิบายได้ว่า ค่าเวลาปิดที่น้อยขึ้นงานไม่สามารถคายความร้อนได้ทันจึงเกิดความเค้นขึ้นที่ชิ้นงานและเกิดเป็นรอยแตกร้าวขนาดเล็กขึ้นดังภาพที่ 4.7 และภาพพื้นผิวของชิ้นงานดังภาพที่ 4.8 ถึง 4.10 โดยวงกลมสีขาวในภาพก็คือ รอยแตกร้าวขนาดเล็ก



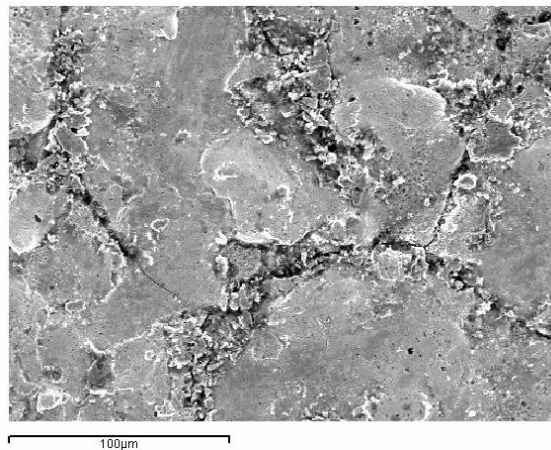
ภาพที่ 4.7 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยประสิทธิภาพ และความยาวรวมของรอยแตกกว้างขนาดเล็กต่อพื้นที่ (การทดลองปรับค่าเวลาปิด และให้เวลาเปิดคงที่)



ภาพที่ 4.8 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงรอยแตกกว้างขนาดเล็ก ใช้ไอเล็กโตรดแกรไฟต์ ขั้วบวก กระแสไฟฟ้า 6 แอมแปร์ ความต่างศักย์วงจรเปิด 90 โวลต์ ถ่ายด้วยกำลังขยาย 500 เท่า โดยภาพ (ก) ปัจจัยประสิทธิภาพ 2 % (ข) ปัจจัยประสิทธิภาพ 93 %

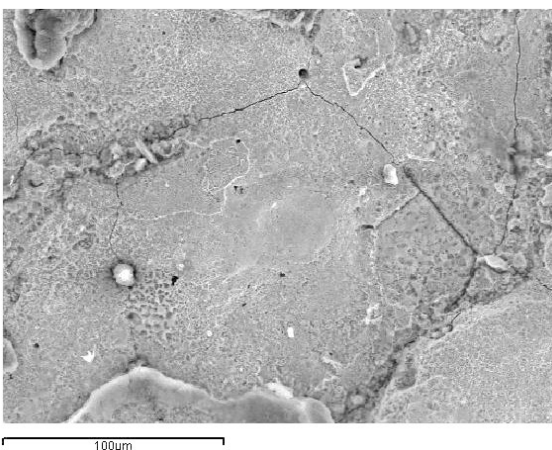


(ก) ปัจจัยประสิทธิภาพ 2 %

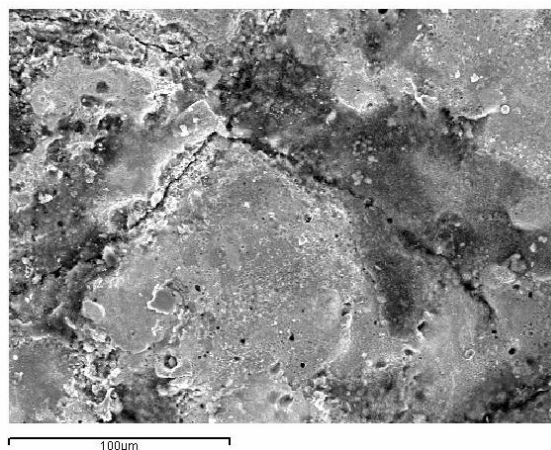


(ข) ปัจจัยประสิทธิภาพ 93 %

ภาพที่ 4.9 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงรอยแตกร้าวขนาดเล็ก ใช้อิเล็กโตรดทองแดง-แกรไฟต์ ขั้วบวก กระแสไฟฟ้า 6 แอมแปร์ ความต่างศักย์วงจรเปิด 90 โวลต์ ถ่ายด้วยกำลังขยาย 500 เท่า โดยภาพ (ก) ปัจจัยประสิทธิภาพ 2 % (ข) ปัจจัยประสิทธิภาพ 93 %



(ก) ปัจจัยประสิทธิภาพ 2 %



(ข) ปัจจัยประสิทธิภาพ 93 %

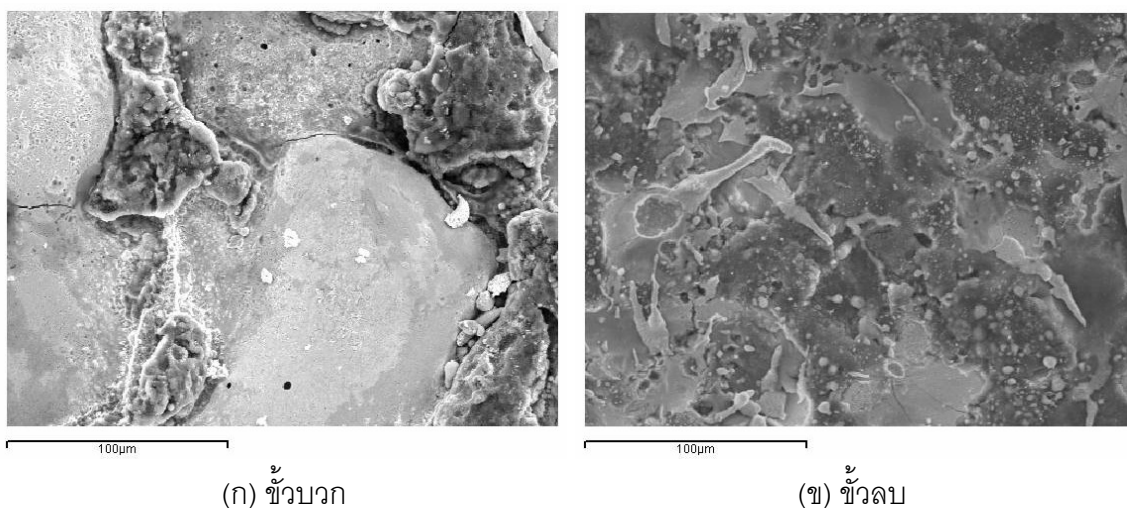
ภาพที่ 4.10 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงรอยแตกร้าวขนาดเล็ก ใช้อิเล็กโตรดทองแดง-ทังสเตน ขั้วบวก กระแสไฟฟ้า 6 แอมแปร์ ความต่างศักย์วงจรเปิด 90 โวลต์ ถ่ายด้วยกำลังขยาย 500 เท่า โดยภาพ (ก) ปัจจัยประสิทธิภาพ 2 % (ข) ปัจจัยประสิทธิภาพ 93 %

#### 4.3 ปัจจัยประสิทธิภาพ และข้ออิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสม

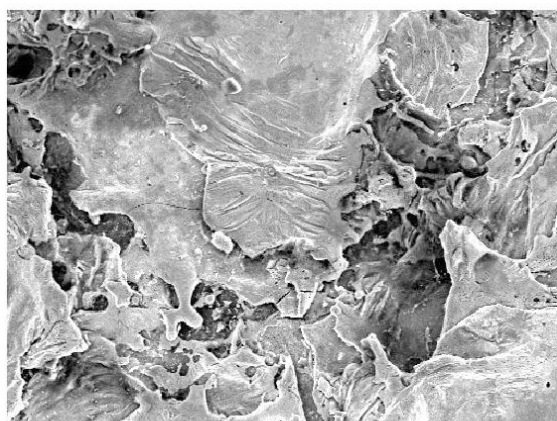
จากการทดลองหาค่าปัจจัยประสิทธิภาพที่เหมาะสมที่ผ่านมา ทั้งการปรับค่าเวลาเปิดและปิดนั้น พบว่าการปรับค่าเวลาเปิดที่ค่าปัจจัยประสิทธิภาพ 11 % จะให้อัตราการขจัดเนื้องานที่มากกว่าการปรับค่าเวลาเปิด ดังนั้นการทดลองตลอดจากนี้ไป จะใช้ค่าปัจจัยประสิทธิภาพ 11 % ด้วยเวลาเปิด 25 ไมโครวินาที และเวลาปิด 200 ไมโครวินาที

เรายังสามารถหาผลกระทบ ของข้ออิเล็กทรอนิกส์ จากการทดลองที่ผ่านมาได้ โดยพบว่าอิเล็กทรอนิกส์ข้อที่เหมาะสมที่จะใช้ทดลองต่อจากนี้ไป เนื่องจากข้อให้อัตราการขจัดเนื้องานที่สูง และความยาวรวมของรอยแตกร้าขนาดเล็กต่อพื้นที่ที่ต่ำ

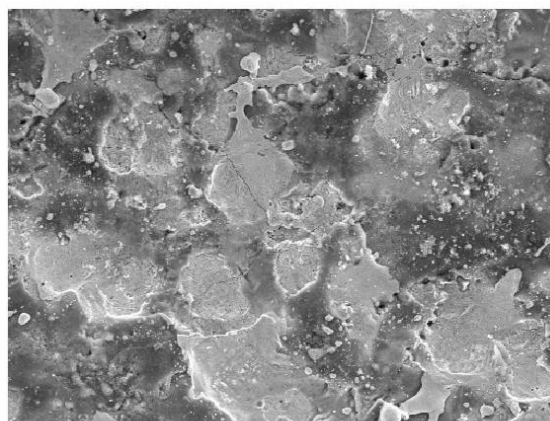
นอกจากนี้ข้ออิเล็กทรอนิกส์ยังมีผลต่อสภาพผิวของพื้นผิวด้วย จากภาพที่ 4.11 ถึง 4.13 พบว่าข้อจะมีสภาพที่คล้ำมีสีดำมากกว่าข้อววก เนื่องจากขณะทำการสปาร์คอยู่นั้น สารที่อยู่ในของเหลวตัวกลางบางส่วน จะกลายสภาพเป็น ไฮโดรเจนซึ่งมีประจุเป็นบวก และคาร์บอนซึ่งมีประจุเป็นลบ ดังนั้นเมื่อใช้ข้ออิเล็กทรอนิกส์เป็นข้อแล้ว คาร์บอนจะวิ่งเข้าจับผิวชิ้นงานซึ่งเป็นข้อววก จึงเกิดเป็นรอยสีดำขึ้น



ภาพที่ 4.11 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงรอยแตกร้าขนาดเล็ก ใช้ข้ออิเล็กทรอนิกส์ แกรไฟต์ ข้อววก กระแสไฟฟ้า 6 แอมแปร์ ความต่างศักย์วงจรเปิด 90 โวลต์ ค่าปัจจัยประสิทธิภาพ 11 % ถ่ายด้วยกำลังขยาย 500 เท่า โดยภาพ (ก) ข้อววก (ข) ข้อลบ

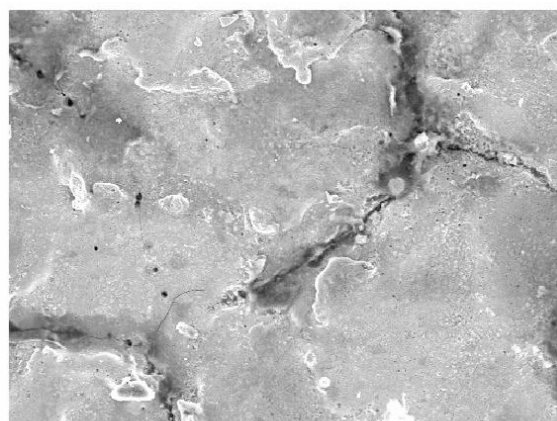


(ก) ขั้วบวก

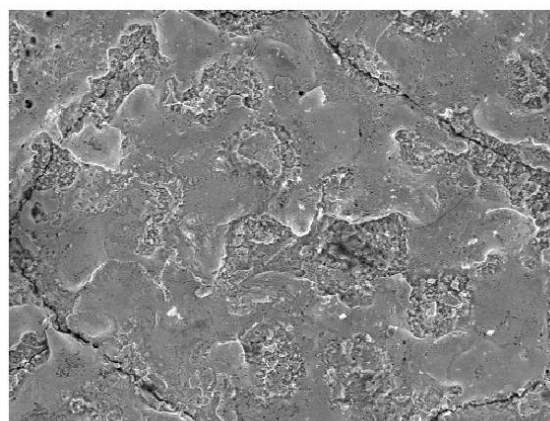


(ข) ขั้วลบ

ภาพที่ 4.12 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงรอยแตกร้าวขนาดเล็ก ใช้อิเล็กโทรดทองแดง-แกรไฟต์ ขั้วบวก กระแสไฟฟ้า 6 แอมแปร์ ความต่างศักย์วงจรเปิด 90 โวลต์ ค่าปัจจัยประสิทธิภาพ 11 % ถ่ายด้วยกำลังขยาย 500 เท่า โดยภาพ (ก) ขั้วบวก (ข) ขั้วลบ



(ก) ขั้วบวก



(ข) ขั้วลบ

ภาพที่ 4.13 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงรอยแตกร้าวขนาดเล็ก ใช้อิเล็กโทรดทองแดง-ทังสเตน ขั้วบวก กระแสไฟฟ้า 6 แอมแปร์ ความต่างศักย์วงจรเปิด 90 โวลต์ ค่าปัจจัยประสิทธิภาพ 11 % ถ่ายด้วยกำลังขยาย 500 เท่า โดยภาพ (ก) ขั้วบวก (ข) ขั้วลบ

#### 4.4 การทดลอง หาความต่างศักย์วงจรเปิดที่เหมาะสม

การทดลอง เป็นการหาความต่างศักย์วงจรเปิด ที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของสปาร์ค ทั้งสแตนด์บายด์ ด้วยการปรับความต่างศักย์วงจรเปิดที่ 90 โวลต์ และ 250 โวลต์ โดยกำหนดให้ กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 12 แอมแปร์ ค่าปัจจัยประสิทธิภาพที่ 11 % อิเล็กโตรดขั้วลบ ได้ผลการทดลองตามตารางที่ 4.15 ถึง 4.17

ตารางที่ 4.15 ตารางผลการทดลองการปรับความต่างศักย์วงจรเปิด ของอิเล็กโตรดแกรไฟต์ ขั้วลบ

| ความต่างศักย์<br>วงจรเปิด (โวลต์) | อัตราการขจัดเนื้องาน<br>(ลูกบาศก์มิลลิเมตร/นาทีก) | อัตราการสึกกร่อน<br>ของอิเล็กโตรด (%) | ความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อ<br>พื้นที่ (ไมโครเมตร/0.05 ตารางมิลลิเมตร) |
|-----------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| 90                                | 2.004                                             | 88.570                                | 447.000                                                                       |
| 250                               | 2.005                                             | 113.034                               | 511.290                                                                       |

ตารางที่ 4.16 ตารางผลการทดลองการปรับความต่างศักย์วงจรเปิด ของอิเล็กโตรดทองแดง-แกรไฟต์ ขั้วลบ

| ความต่างศักย์<br>วงจรเปิด (โวลต์) | อัตราการขจัดเนื้องาน<br>(ลูกบาศก์มิลลิเมตร/นาทีก) | อัตราการสึกกร่อน<br>ของอิเล็กโตรด (%) | ความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อ<br>พื้นที่ (ไมโครเมตร/0.05 ตารางมิลลิเมตร) |
|-----------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| 90                                | 1.751                                             | 73.916                                | 582.258                                                                       |
| 250                               | 1.596                                             | 76.814                                | 603.226                                                                       |

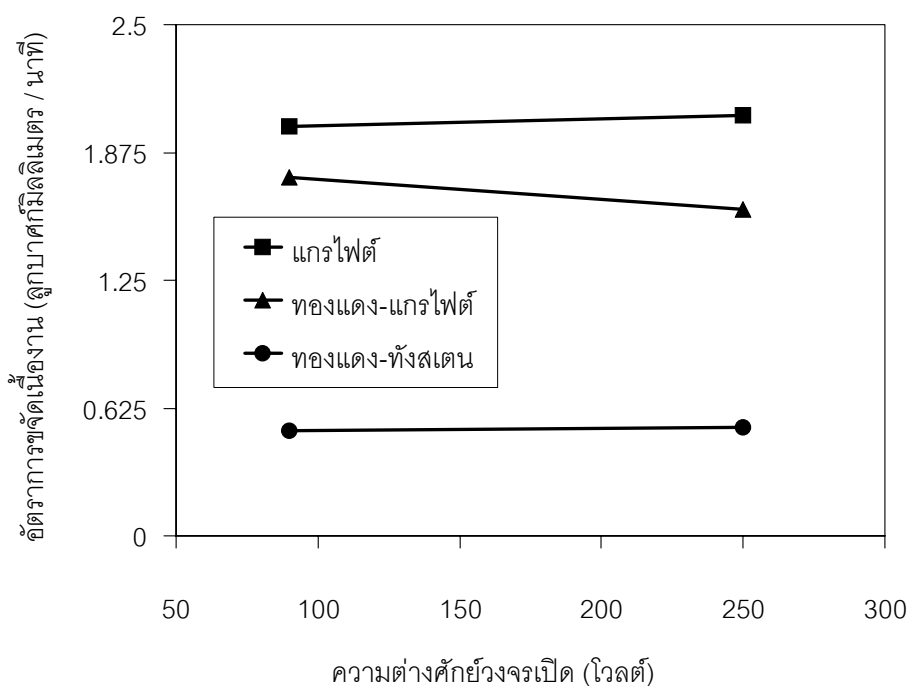
ตารางที่ 4.17 ตารางผลการทดลองการปรับความต่างศักย์วงจรเปิด ของอิเล็กโตรดทองแดง-ทั้งสแตนด์บายด์ ขั้วลบ

| ความต่างศักย์<br>วงจรเปิด (โวลต์) | อัตราการขจัดเนื้องาน<br>(ลูกบาศก์มิลลิเมตร/นาทีก) | อัตราการสึกกร่อน<br>ของอิเล็กโตรด (%) | ความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อ<br>พื้นที่ (ไมโครเมตร/0.05 ตารางมิลลิเมตร) |
|-----------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| 90                                | 0.513                                             | 21.044                                | 711.290                                                                       |
| 250                               | 0.530                                             | 21.208                                | 1056.452                                                                      |

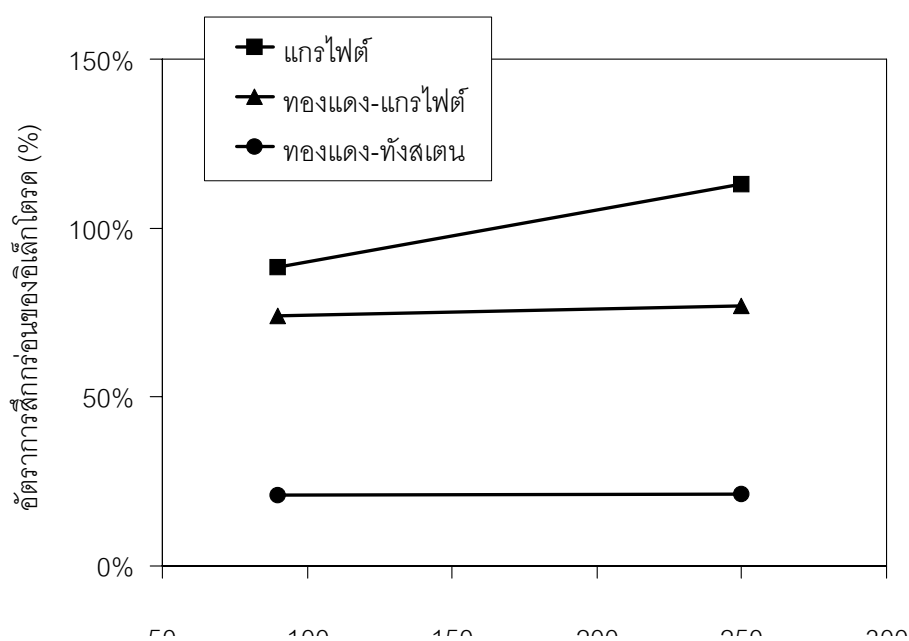
จากตารางที่ 4.15 ถึง 4.17 เมื่อปรับความต่างศักย์วงจรเปิดแล้ว อัตราการจัดเนื้องาน และอัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโทรด ไม่ได้เปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด ยกเว้นในกรณีของอิเล็กโทรดแกรไฟต์ ที่ความต่างศักย์วงจรเปิด 250 โวลต์ จะมีอัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโทรดสูงกว่าที่ 90 โวลต์

อิเล็กโทรดแกรไฟต์ให้อัตราการจัดเนื้องาน และอัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโทรด สูงที่สุด ในภาพรวมแล้วทั้ง 3 อิเล็กโทรด มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการจัดเนื้องาน และอัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโทรดที่น้อย ดังภาพที่ 4.14 และ 4.15

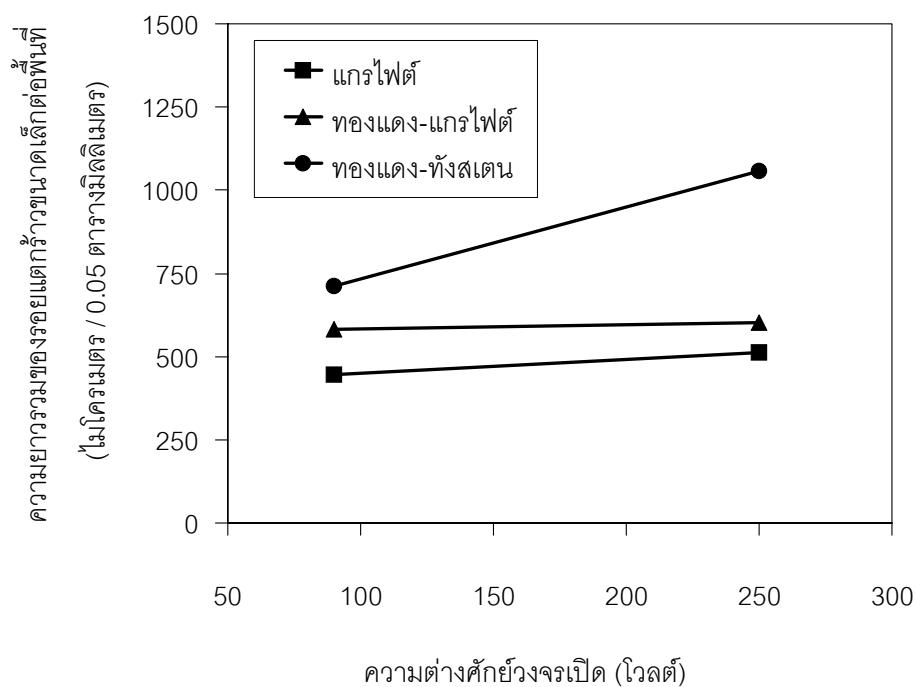
ด้านรอยแตกร้าวขนาดเล็ก จากภาพที่ 4.17 ถึง 4.19 พบว่าเมื่อปรับความต่างศักย์วงจรเปิดแล้ว มีเพียงอิเล็กโทรดทองแดง-ทังสเตนเท่านั้น ที่มีความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่ เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความต่างศักย์วงจรเปิด ส่วนอิเล็กโทรดอีก 2 ชนิด ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเท่าใดนัก ดังภาพที่ 4.16 และภาพพื้นผิวของชิ้นงานดังภาพที่ 4.17 ถึง 4.19 โดยวงกลมสีขาวในภาพก็คือ รอยแตกร้าวขนาดเล็ก



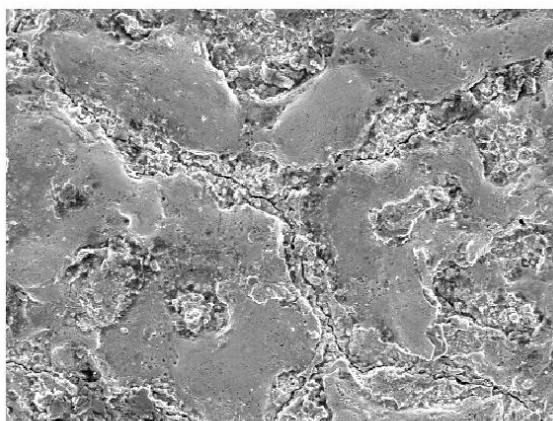
ภาพที่ 4.14 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์วงจรเปิด และอัตราการจัดเนื้องาน



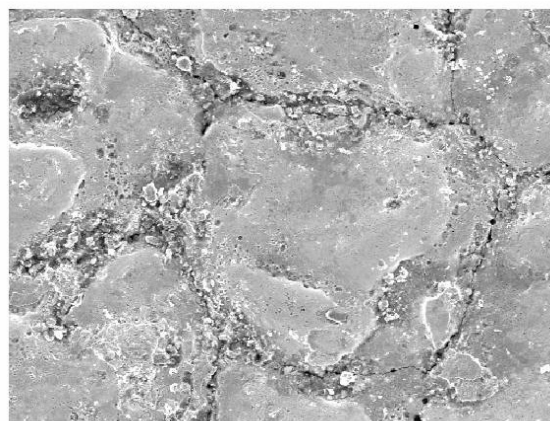
ภาพที่ 4.15 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์วงจรเปิด และอัตราการสีกกร้อนของอิเล็กโตรด



ภาพที่ 4.16 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์วงจรเปิด และความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่



(ก) ความต่างศักย์วงจรเปิด 90 โวลต์

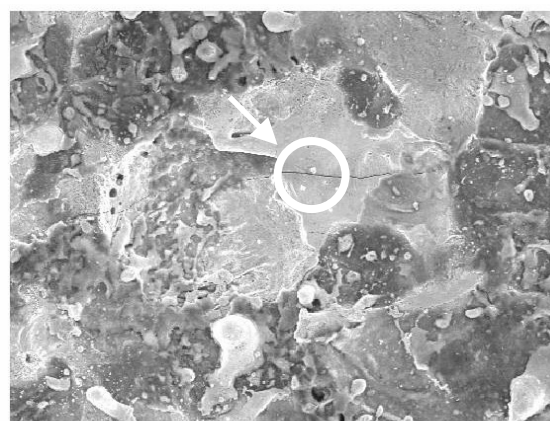


(ข) ความต่างศักย์วงจรเปิด 250 โวลต์

ภาพที่ 4.17 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงรอยแตกร้าวขนาดเล็ก ใช้อิเล็กโตรดแกรไฟต์ ขั้วลบ ค่าปัจจัยประสิทธิภาพ 11 % กระแสไฟฟ้า 12 แอมแปร์ ถ่ายด้วยกำลังขยาย 500 เท่า โดยภาพ (ก) ความต่างศักย์วงจรเปิด 90 โวลต์ (ข) ความต่างศักย์วงจรเปิด 250 โวลต์

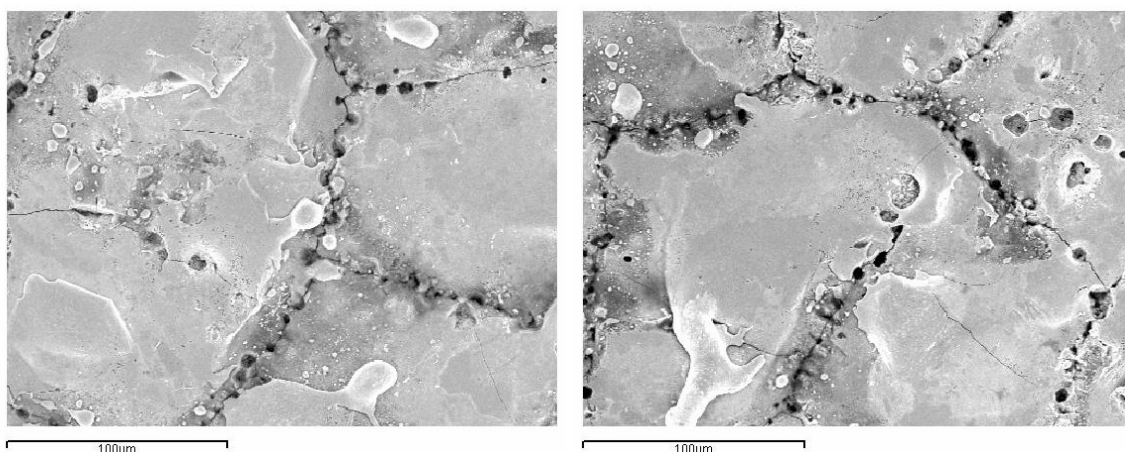


(ก) ความต่างศักย์วงจรเปิด 90 โวลต์



(ข) ความต่างศักย์วงจรเปิด 250 โวลต์

ภาพที่ 4.18 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงรอยแตกร้าวขนาดเล็ก ใช้อิเล็กโตรดทองแดง-แกรไฟต์ ขั้วลบ ค่าปัจจัยประสิทธิภาพ 11 % กระแสไฟฟ้า 12 แอมแปร์ ถ่ายด้วยกำลังขยาย 500 เท่า โดยภาพ (ก) ความต่างศักย์วงจรเปิด 90 โวลต์ (ข) ความต่างศักย์วงจรเปิด 250 โวลต์



(ก) ความต่างศักย์วงจรเปิด 90 โวลต์

(ข) ความต่างศักย์วงจรเปิด 250 โวลต์

ภาพที่ 4.19 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงรอยแตกร้าวขนาดเล็ก ใช้อิเล็กโตรดทองแดง-ทังสเตน ขั้วลบ ค่าปัจจัยประสิทธิภาพ 11 % กระแสไฟฟ้า 12 แอมแปร์ ถ่ายด้วยกำลังขยาย 500 เท่า โดยภาพ (ก) ความต่างศักย์วงจรเปิด 90 โวลต์ (ข) ความต่างศักย์วงจรเปิด 250 โวลต์

#### 4.5 การทดลอง หาค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม

การทดลองนี้เป็นการหาค่ากระแสไฟฟ้า ที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของสปาร์ค ทังสเตนคาร์ไบด์ ด้วยการปรับค่ากระแสไฟฟ้าที่ 6, 12, 25 และ 50 แอมแปร์ โดยกำหนดให้ความต่างศักย์วงจรเปิดเท่ากับ 90 โวลต์ ค่าปัจจัยประสิทธิภาพที่ 11 % อิเล็กโตรดขั้วลบ ได้ผลการทดลองตามตารางที่ 4.18 ถึง 4.20

ตารางที่ 4.18 ตารางผลการทดลองการปรับกระแสไฟฟ้า ของอิเล็กทรอนิกส์เกรดไฟต์ ขั้วลบ

| กระแสไฟฟ้า<br>(แอมแปร์) | อัตราการขจัดเนื้อ<br>งาน (ลูกบาศก์<br>มิลลิเมตร/นาที่) | อัตราการสึก<br>กร่อนของ<br>อิเล็กทรอนิกส์ (%) | ความหนา<br>ยวเฉลี่ย<br>(ไมโครเมตร) | ความยาวรวมของรอยแตก<br>ร้าว<br>ขนาดเล็กต่อพื้นที่<br>(ไมโครเมตร/0.05ตารางมิลลิเมตร) |
|-------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 6                       | 0.725                                                  | 139.187                                       | 1.11                               | 187.097                                                                             |
| 12                      | 1.679                                                  | 129.032                                       | 1.32                               | 503.226                                                                             |
| 25                      | 3.000                                                  | 118.676                                       | 1.4                                | 1019.355                                                                            |
| 50                      | 3.767                                                  | 93.341                                        | 1.46                               | 1154.839                                                                            |

ตารางที่ 4.19 ตารางผลการทดลองการปรับกระแสไฟฟ้า ของอิเล็กทรอนิกส์ทองแดง-เกรดไฟต์ ขั้วลบ

| กระแสไฟฟ้า<br>(แอมแปร์) | อัตราการขจัดเนื้อ<br>งาน (ลูกบาศก์<br>มิลลิเมตร/นาที่) | อัตราการสึก<br>กร่อนของ<br>อิเล็กทรอนิกส์ (%) | ความหนา<br>ยวเฉลี่ย<br>(ไมโครเมตร) | ความยาวรวมของรอยแตก<br>ร้าว<br>ขนาดเล็กต่อพื้นที่<br>(ไมโครเมตร/0.05 ตารางมิลลิเมตร) |
|-------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 6                       | 0.636                                                  | 90.451                                        | 0.95                               | 248.387                                                                              |
| 12                      | 1.916                                                  | 73.924                                        | 1.23                               | 550                                                                                  |
| 25                      | 2.434                                                  | 57.673                                        | 1.29                               | 948.387                                                                              |
| 50                      | 2.989                                                  | 46.601                                        | 1.32                               | 1014.516                                                                             |

ตารางที่ 4.20 ตารางผลการทดลองการปรับกระแสไฟฟ้า ของอิเล็กทรอนิกส์ทองแดง-ทั้งสเดน ขั้วลบ

| กระแสไฟฟ้า<br>(แอมแปร์) | อัตราการขจัดเนื้อ<br>งาน (ลูกบาศก์<br>มิลลิเมตร/นาที่) | อัตราการสึก<br>กร่อนของ<br>อิเล็กทรอนิกส์ (%) | ความหนา<br>ยวเฉลี่ย<br>(ไมโครเมตร) | ความยาวรวมของรอยแตก<br>ร้าว<br>ขนาดเล็กต่อพื้นที่<br>(ไมโครเมตร/0.05 ตารางมิลลิเมตร) |
|-------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 6                       | 0.171                                                  | 17.457                                        | 0.73                               | 429.032                                                                              |
| 12                      | 0.505                                                  | 18.881                                        | 0.94                               | 753.226                                                                              |
| 25                      | 1.270                                                  | 20.042                                        | 1.12                               | 872.581                                                                              |
| 50                      | 2.233                                                  | 23.178                                        | 1.21                               | 979.032                                                                              |

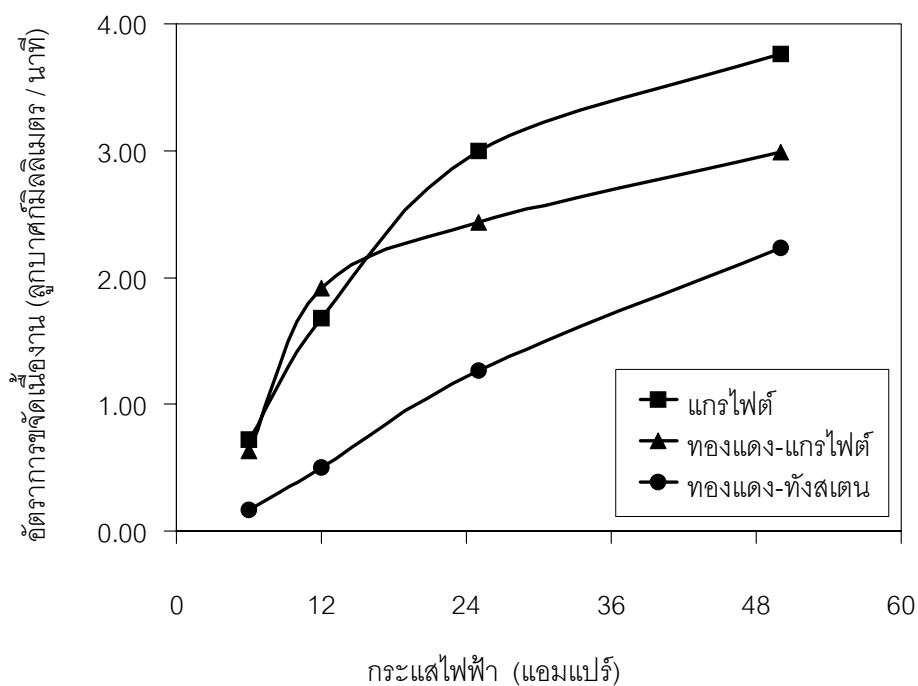
จากภาพที่ 4.20 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้า ทำให้อัตราการขจัดเนื้องานสูงขึ้น โดยอิเล็กโตรดแกรไฟต์ จะให้อัตราการขจัดเนื้องานสูงที่สุดที่ 50 แอมแปร์ ซึ่งการเพิ่มกระแสไฟฟ้า ย่อมเพิ่มพลังงานในการกัดชิ้นงาน และมีผลต่ออัตราการขจัดชิ้นงานโดยตรง

ด้านอัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโตรด ตามภาพที่ 4.21 ผลการทดลองพบว่า การเพิ่มค่ากระแสไฟฟ้า ทำให้อัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโตรดลดลง ยกเว้นกรณีของทองแดง-ทังสเทน ที่อัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโตรดจะสูงขึ้นเล็กน้อย อิเล็กโตรดทองแดง-ทังสเทน ให้อัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโตรดต่ำที่สุดที่ 6 แอมแปร์ ในกรณีของแกรไฟต์ เมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าอัตราการสึกกร่อนของแกรไฟต์กลับมีค่าต่ำลง เนื่องจากจุดหลอมเหลวของแกรไฟต์มีค่าสูง และการสึกกร่อนของแกรไฟต์ประกอบไปด้วยการหลอม และการหลุดร่วงของผงแกรไฟต์ระหว่างการสปาร์ค เมื่อสปาร์คด้วยกระแสไฟฟ้า 50 แอมแปร์ การร่วงของผงแกรไฟต์ระหว่างสปาร์คเกิดขึ้นได้น้อยกว่าการใช้กระแสไฟฟ้า 6 แอมแปร์ การร่วงของผงแกรไฟต์มีส่วนสำคัญในการเกิดการเกิดการช็อต (Short) หรือการสปาร์คเฉพาะจุด โดยทำให้เกิดการสปาร์คได้ไม่สมบูรณ์ [Lee, S.H.;2003, Aas, Kristian L.;15]

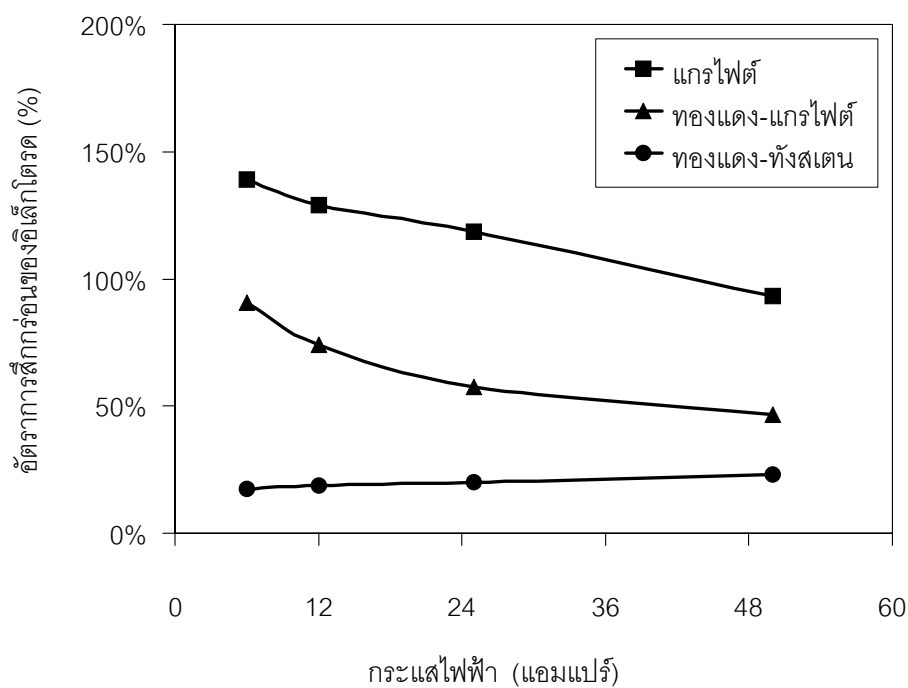
ภาพที่ 4.22 แสดงผลความหนาผิวเฉลี่ยพบว่า พื้นผิวชิ้นงานจะหนาขึ้นเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้า อิเล็กโตรดทองแดง-ทังสเทน ให้ความหนาผิวเฉลี่ยที่ 6 แอมแปร์ โดยการเพิ่มกระแสไฟฟ้า เป็นการเพิ่มพลังงานในการกัดชิ้นงาน และความรุนแรงของพลังงานที่ส่งผลต่อพื้นผิวชิ้นงานให้หนาขึ้น

ในผลทางความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่ จากภาพที่ 4.24 ถึง 4.26 เห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าแล้ว ความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่จะเพิ่มขึ้นในทุกอิเล็กโตรด เนื่องมาจากพลังงานที่มากขึ้นส่งผลให้เกิดความเค้นที่ผิวชิ้นงาน และเกิดเป็นรอยแตกร้าวขนาดเล็กขึ้นมา อิเล็กโตรดแกรไฟต์ และทองแดง-แกรไฟต์ให้ค่าใกล้เคียงกันมาก ส่วนอิเล็กโตรดทองแดง-ทังสเทน ให้ค่าความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่สูง จากภาพที่ 4.23 พบว่าเมื่อใช้กระแสน้อยกว่า 20 แอมแปร์ แต่ถ้าให้กระแสไฟฟ้ามากกว่า 20 แอมแปร์ อิเล็กโตรดทองแดง-ทังสเทน จะให้ค่าความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่ต่ำที่สุด โดยทั่วไปแล้วอิเล็กโตรดแกรไฟต์ และทองแดง-แกรไฟต์ ให้รอยแตกร้าวขนาดเล็กน้อยกว่าอิเล็กโตรดทองแดง-ทังสเทน เนื่องมาจากอิเล็กโตรดที่ขึ้นรูปด้วยการอัดโลหะจะมีความหนาแน่นน้อยกว่าอิเล็กโตรดที่เป็นแท่งโลหะ ดังนั้นจึงให้การสึกกร่อนได้ง่ายกว่า การสึกกร่อนระหว่างการสปาร์คจะช่วยลดการเกิดความเค้นที่ผิวอิเล็กโตรดรวมไปถึงที่ชิ้นงานที่ถูกสปาร์คด้วย และอีกเหตุผลหนึ่งคือ ขณะที่ทำการสปาร์ค กระแสไฟฟ้าจะสปาร์คต่อเนื่องกันระหว่างผงโลหะที่หลุดออกมาและ

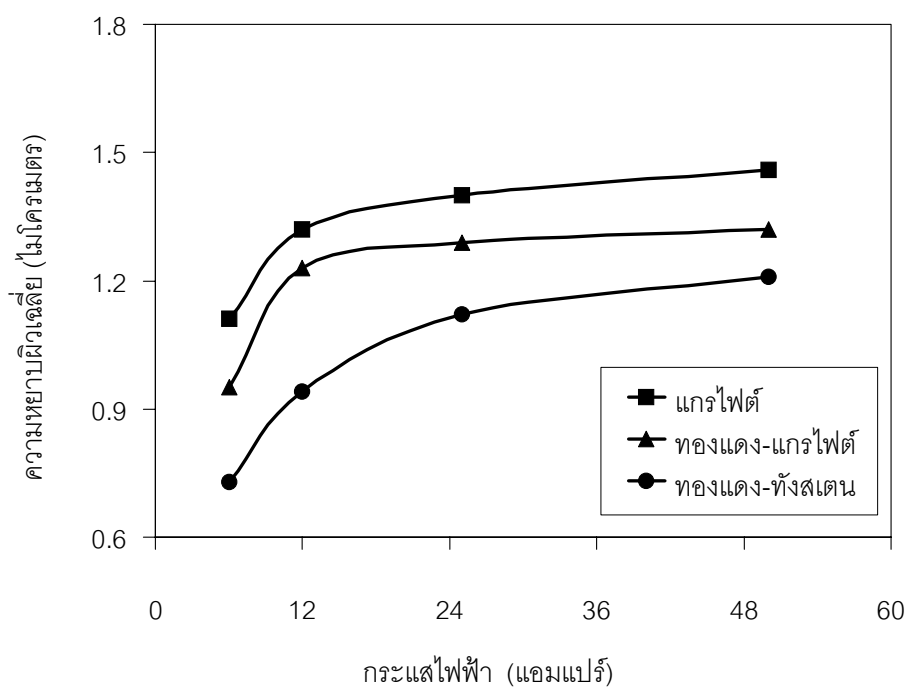
ขึ้นงานทำให้ระยะช่องไฟที่ทำการสปาร์คมีมากขึ้น จึงทำให้กระแสไฟฟ้าที่สปาร์คมีค่าต่ำลงไป ผลที่ได้คือ ความหนาแน่นของรอยแตกร้าวขนาดเล็กน้อยตามลงไปด้วย [Puertas, I.;2004, Lee, S.H.;2003]



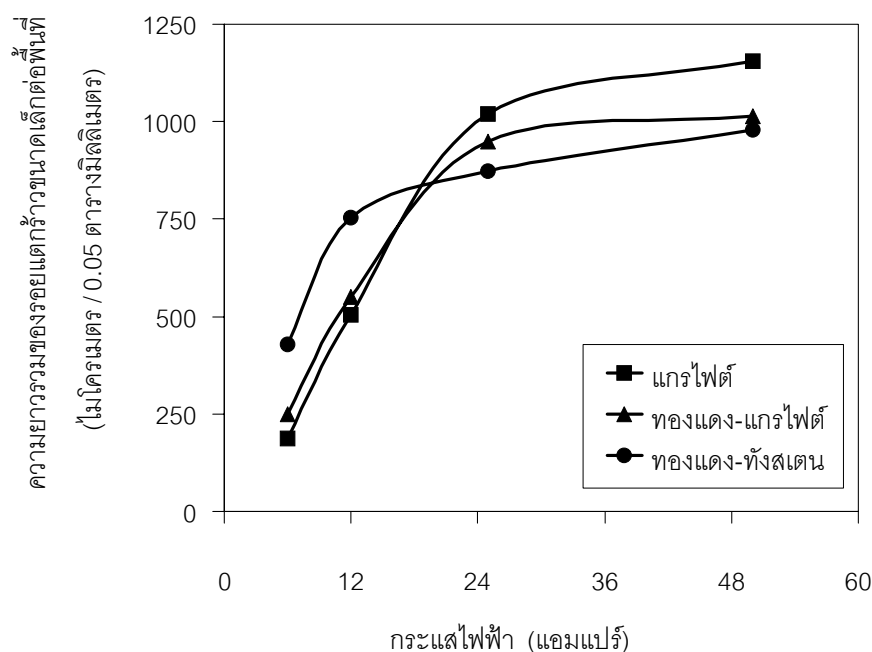
ภาพที่ 4.20 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า และอัตราการขจัดเนื้องาน



ภาพที่ 4.21 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า และอัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโทรด

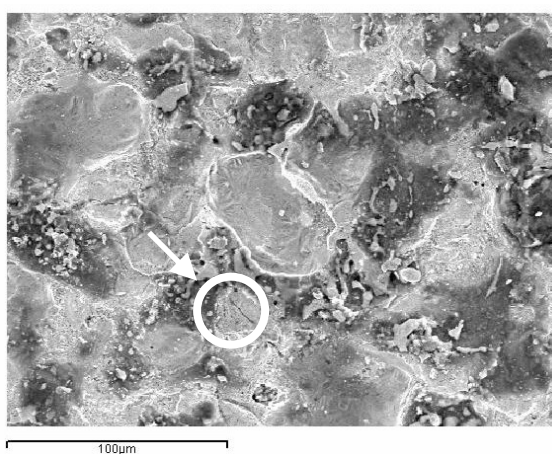


ภาพที่ 4.22 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า และความหนาแน่นของอิเล็กโทรด

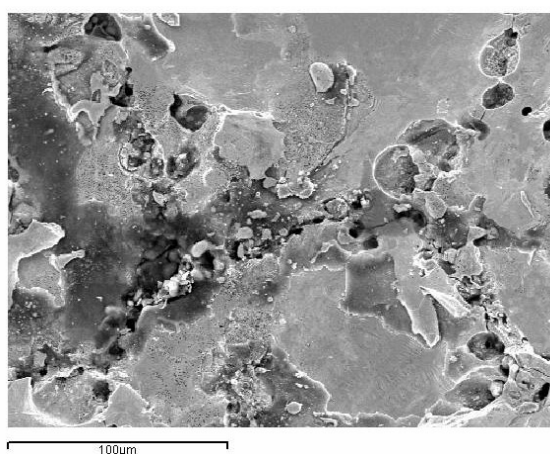


ภาพที่ 4.23 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า และความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่

ภาพพื้นผิวของชิ้นงานแสดงดังภาพที่ 4.24 ถึง 4.26 โดยวงกลมสีขาวในภาพที่คือ รอยแตกร้าวขนาดเล็ก

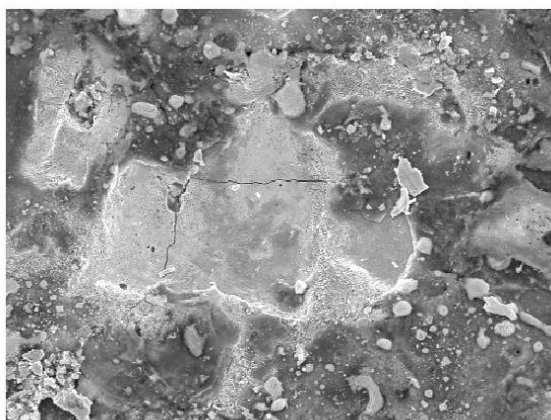


(ก) กระแสไฟฟ้า 6 แอมแปร์

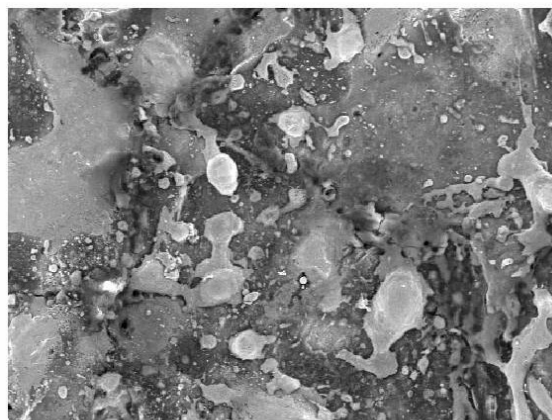


(ข) กระแสไฟฟ้า 50 แอมแปร์

ภาพที่ 4.24 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงรอยแตกร้าวขนาดเล็ก ใช้อิเล็กทรอนิกส์ แกรไฟต์ ขั้วลบ ค่าปัจจัยประสิทธิภาพ 11 % ความต่างศักย์วงจรเปิด 90 โวลต์ ถ่ายด้วย กำลังขยาย 500 เท่า โดยภาพ (ก) กระแสไฟฟ้า 6 แอมแปร์ (ข) กระแสไฟฟ้า 50 แอมแปร์

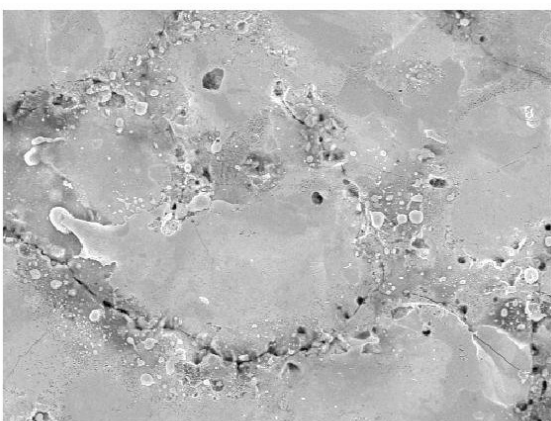


(ก) กระแสไฟฟ้า 6 แอมแปร์

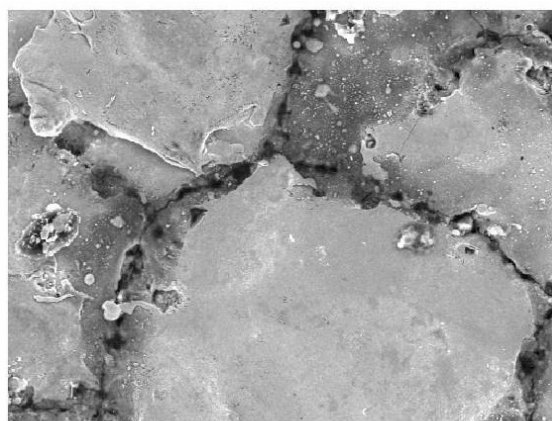


(ข) กระแสไฟฟ้า 50 แอมแปร์

ภาพที่ 4.25 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงรอยแตกร้าวขนาดเล็ก ใช้อิเล็กโตรด ทองแดง-แกรไฟต์ ขั้วลบ ค่าปัจจัยประสิทธิภาพ 11 % ความต่างศักย์วงจรเปิด 90 โวลต์ ถ่ายด้วย กำลังขยาย 500 เท่า โดยภาพ (ก) กระแสไฟฟ้า 6 แอมแปร์ (ข) กระแสไฟฟ้า 50 แอมแปร์



(ก) กระแสไฟฟ้า 6 แอมแปร์



(ข) กระแสไฟฟ้า 50 แอมแปร์

ภาพที่ 4.26 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงรอยแตกร้าวขนาดเล็ก ใช้อิเล็กโตรด ทองแดง-ทังสเตน ขั้วลบ ค่าปัจจัยประสิทธิภาพ 11 % ความต่างศักย์วงจรเปิด 90 โวลต์ ถ่ายด้วย กำลังขยาย 500 เท่า โดยภาพ (ก) กระแสไฟฟ้า 6 แอมแปร์ (ข) กระแสไฟฟ้า 50 แอมแปร์

#### 4.6 การทดลองด้วยวิธีทาคุชิ

##### 4.6.1 ผลการทดลอง

จากผลการทดลอง หาผลกระทบที่เกิดจากค่าปัจจัยประสิทธิภาพ, ความต่างศักย์ วงจรเปิด และกระแสไฟฟ้า พบว่า อิเล็กทรอนิกส์เกรดไฟต์ จะให้อัตราการขจัดเนื้องานที่มากกว่า อิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ ดังนั้นในการทดลองนี้ จะใช้อิเล็กทรอนิกส์เกรดไฟต์เพียงอย่างเดียว และในการทดลองด้วยวิธีทาคุชินั้น จะไม่ใช้ความหนาแน่นผิวเฉลี่ยมาเป็นตัววัดผลด้วย เนื่องมาจากเหตุผลทางเทคนิค บางประการในห้องทดลอง

อย่างไรก็ตาม พบว่าตัวแปรทั้ง 3 คือ กระแสไฟฟ้า, เวลาปิด และความต่างศักย์วงจรเปิด มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการสปาร์คทั้งสแตนคาร์ไบด์ แตกต่างกันไปไม่มากนักน้อย ดังนั้นจึงกำหนดให้ตัวแปรทั้ง 3 เป็นตัวแปรสำหรับการทดลองด้วยวิธีทาคุชิ และเมื่อกำหนดตัวแปรได้แล้ว จึงกำหนดระดับ และค่าในแต่ละระดับ ของตัวแปรนั้นๆ ตามตารางที่ 4.21 โดยการทดลองต้องการ 2 ระดับ ซึ่งระดับ 1 หมายถึง ระดับที่ต่ำที่สุด และระดับ 2 หมายถึงระดับที่สูงที่สุด ที่เครื่องจักรสามารถปรับได้

ตารางที่ 4.21 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองด้วยวิธีทาคุชิ และระดับของตัวแปร

| สัญลักษณ์ | ตัวแปร                | หน่วย       | ระดับ 1 | ระดับ 2 |
|-----------|-----------------------|-------------|---------|---------|
| Ip        | กระแสไฟฟ้า            | แอมแปร์     | 1.5     | 75      |
| T-off     | เวลาปิด               | ไมโครวินาที | 2       | 1,600   |
| Vg        | ความต่างศักย์วงจรเปิด | โวลต์       | 90      | 250     |

จากนั้นจึงกำหนดแผนผังการทดลองจากตารางมาตรฐานของทาคุชิ โดยเลือกแผนผังการทดลองตามตารางขอบเขตการเลือกใช้แผนผังการทดลอง ดังตารางที่ 3.3

จากในตารางจะเห็นได้ว่าจำนวนตัวแปรเท่ากับ 3 จะสามารถเลือกใช้แผนผังการทดลองได้ทั้ง L4, L8, L12, L16 และ L32 ได้ ในการทดลองนี้เลือกใช้แผนผังการทดลองแบบ L8 เนื่องจากข้อจำกัดด้านปริมาณของชิ้นงานทดสอบ โดยแผนผังการทดลองแบบ L8 สำหรับ 3 ตัวแปร และ 2 ระดับ แสดงดังตารางที่ 4.22 ดังนี้

ตารางที่ 4.22 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                     |

ในการทดลองให้ อิเล็กโตรดเป็นแกรไฟต์, เวลาเปิดคือ 25 ไมโครวินาที และหัวเป็นลบ โดยทำการทดลองตามการออกแบบการทดลองโดยวิธีทางกฏิตามตารางที่ 4.23 โดยทำการรวบรวมผลการทดลอง ได้ผลการทดลอง ดังตารางที่ 4.24

ตารางที่ 4.23 ระดับของตัวแปรแต่ละตัวแปรที่แตกต่างกัน ใช้อิเล็กโตรดแกรไฟต์ หัวลบ

| การทดลองที่ | กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์) |     | เวลาปิด (ไมโครวินาที) |       | ความต่างศักย์วงจรเปิด (โวลต์) |     |
|-------------|----------------------|-----|-----------------------|-------|-------------------------------|-----|
|             | ระดับ                | ค่า | ระดับ                 | ค่า   | ระดับ                         | ค่า |
| 1           | 1                    | 1.5 | 1                     | 2     | 1                             | 90  |
| 2           | 1                    | 1.5 | 1                     | 2     | 2                             | 250 |
| 3           | 1                    | 1.5 | 2                     | 1,600 | 1                             | 90  |
| 4           | 1                    | 1.5 | 2                     | 1,600 | 2                             | 250 |
| 5           | 2                    | 75  | 1                     | 2     | 1                             | 90  |
| 6           | 2                    | 75  | 1                     | 2     | 2                             | 250 |
| 7           | 2                    | 75  | 2                     | 1,600 | 1                             | 90  |
| 8           | 2                    | 75  | 2                     | 1,600 | 2                             | 250 |

ตารางที่ 4.24 ผลการทดลองด้วยวิธีทาทุชิ

| การทดลองที่ | อัตราการขจัดเนื้องาน<br>(ลูกบาศก์มิลลิเมตร/นาทีก) | อัตราการสึกกร่อน<br>ของอิเล็กโตรด (%) | ความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่ (ไมโครเมตร/0.05 ตารางมิลลิเมตร) |
|-------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| 1           | 0.163                                             | 401.217                               | 166.129                                                                   |
| 2           | 0.171                                             | 470.217                               | 298.387                                                                   |
| 3           | 0.045                                             | 71.314                                | 124.194                                                                   |
| 4           | 0.052                                             | 73.604                                | 720.968                                                                   |
| 5           | 1.662                                             | 3.722                                 | 1,687.097                                                                 |
| 6           | 2.210                                             | 4.546                                 | 1,759.677                                                                 |
| 7           | 3.804                                             | 39.961                                | 438.71                                                                    |
| 8           | 4.882                                             | 41.850                                | 767.742                                                                   |

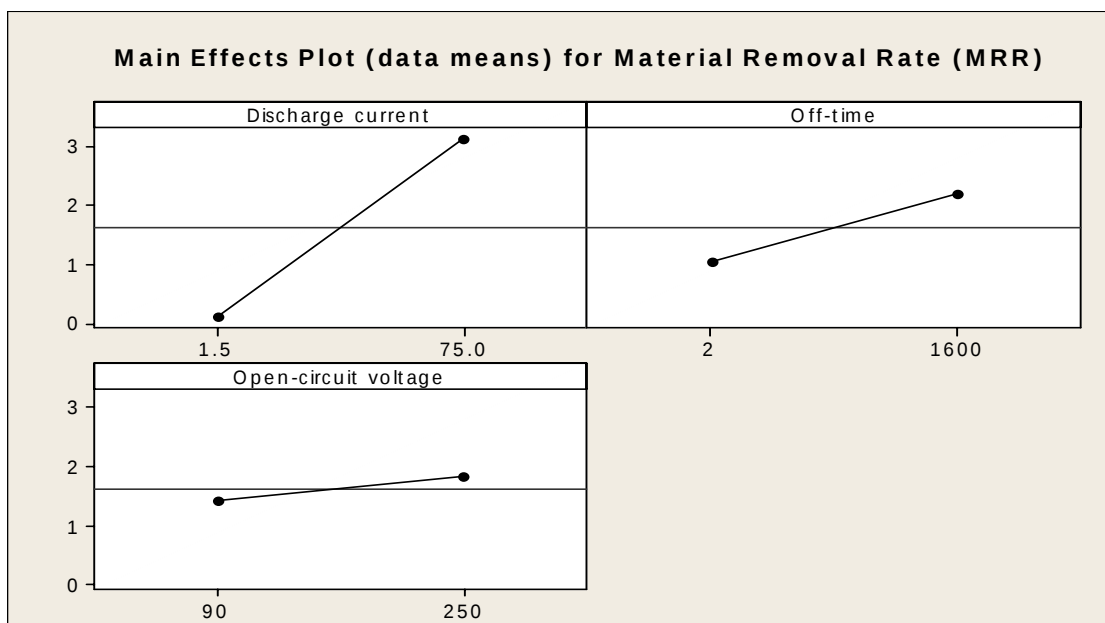
## 4.6.2 การวิเคราะห์ผลกระทบหลักโดยเครื่องมือทางสถิติ

โดยหลังจากการทดลองแบบวิธีทาทุชิ นำผลอัตราการขจัดเนื้องาน, อัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโตรด และความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่ทั้งหมดมาวิเคราะห์ถึงผลกระทบหลักด้วยโปรแกรม MINITAB 14.0 ดังนี้

## 1. ผลกระทบของตัวแปรหลักต่ออัตราการขจัดเนื้องาน

ตารางที่ 4.25 ผลกระทบของตัวแปรหลัก และผลต่างของผลกระทบของตัวแปรหลักแต่ละตัวแปรต่ออัตราการขจัดเนื้องาน

| หน่วย                  | (ลูกบาศก์มิลลิเมตร/นาทีก) |              |                |
|------------------------|---------------------------|--------------|----------------|
| ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง | ระดับ 1 (L1)              | ระดับ 2 (L2) | ผลต่าง (L2-L1) |
| กระแสไฟฟ้า             | 0.108                     | 3.140        | 3.032          |
| เวลาปิด                | 1.052                     | 2.196        | 1.144          |
| ความต่างศักย์วงจรเปิด  | 1.419                     | 1.829        | 0.410          |



ภาพที่ 4.27 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ผลกระทบหลักของ ตัวแปรกระแสไฟฟ้า, เวลาปิด และความต่างศักย์วงจรเปิด ต่ออัตราการขจัดเนื้องาน

จากภาพที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลตอบสนองในแต่ละระดับตัวแปร สามารถอธิบายผลได้ดังนี้

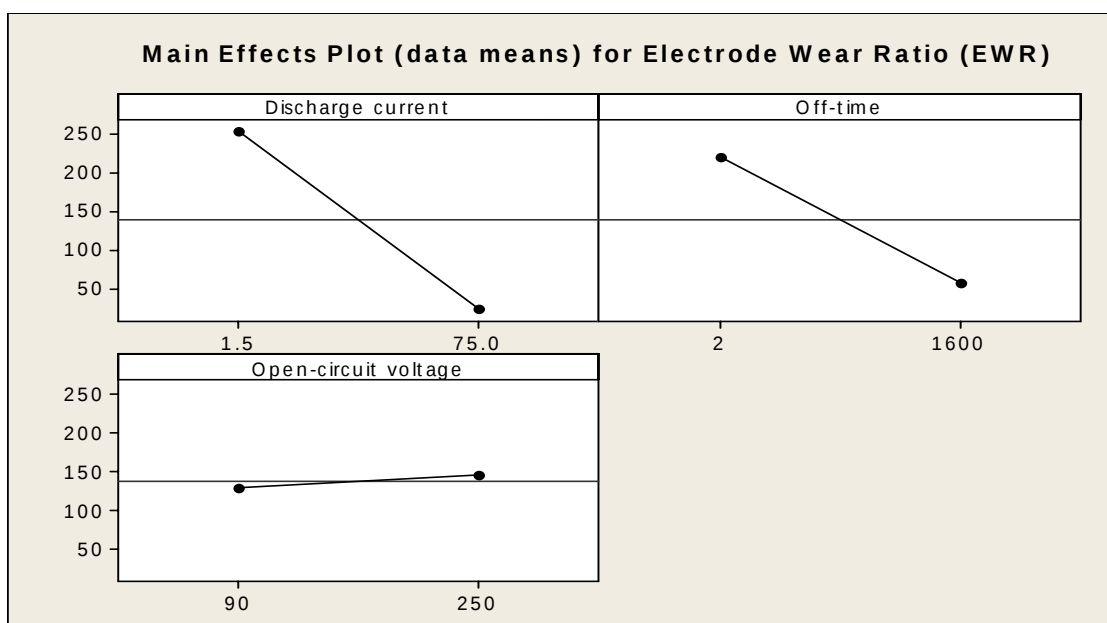
- ตัวแปรกระแสไฟฟ้า พิจารณาระหว่าง ช่วง 1.5 ถึง 75 แอมแปร์ จะพบว่าที่ กระแสไฟฟ้า เท่ากับ 75 แอมแปร์ ให้ค่าอัตราการขจัดเนื้องานสูงสุด เนื่องจากการกำหนดให้มีปริมาณกระแสไฟฟ้ามาก จึงทำให้มีการไหลของกระแสไฟฟ้า อย่างหนาแน่น เพื่อลงไปสปรัดกับชิ้นงาน มากกว่าปกติ
- ตัวแปรค่าเวลาปิด พิจารณาระหว่าง ช่วง 2 ถึง 1,600 ไมโครวินาที จะพบว่าที่ เวลาปิด เท่ากับ 1,600 ไมโครวินาที ให้ค่าอัตราการขจัดเนื้องานสูงสุด เนื่องจาก เวลาปิด จะเกี่ยวข้องกับช่วงเวลาหยุดการสปรัด เพื่อระบายเศษชิ้นงานออก ทั้ง สเตนคาร์ไบด์เป็นชิ้นงานที่มีความแข็งสูง ดังนั้นการให้เวลาหยุดพักมาก ทำให้ ประสิทธิภาพในการสปรัดดีกว่าการให้เวลาพักน้อย
- ตัวแปรความต่างศักย์วงจรเปิด พิจารณาที่ 90 และ 250 โวลต์ จะพบว่าเมื่อค่า ความต่างศักย์วงจรเปิดเท่ากับ 250 โวลต์ ให้ค่าอัตราการขจัดเนื้องานสูงกว่าที่ 90 โวลต์ แต่ให้ผลที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

- กระแสไฟฟ้าที่ระดับ 2, ค่าเวลาปิดที่ระดับ 2 และความต่างศักย์วงจรเปิดที่ระดับ 2 หรือการทดลองที่ 8 คือ เงื่อนไขความสัมพันธ์ที่ทำให้อัตราการกัดเนื้องานมีค่ามากที่สุด

## 2. ผลกระทบของตัวแปรหลักต่ออัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโทรด

ตารางที่ 4.26 ผลกระทบของตัวแปรหลัก และผลต่างของผลกระทบของตัวแปรหลักแต่ละตัวแปรต่ออัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโทรด

| หน่วย                  | %            |              |                |
|------------------------|--------------|--------------|----------------|
| ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง | ระดับ 1 (L1) | ระดับ 2 (L2) | ผลต่าง (L2-L1) |
| กระแสไฟฟ้า             | 254.088      | 22.520       | -231.568       |
| เวลาปิด                | 219.926      | 56.682       | -163.244       |
| ความต่างศักย์วงจรเปิด  | 129.054      | 147.554      | 18.500         |



ภาพที่ 4.28 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ผลกระทบหลักของ ตัวแปรกระแสไฟฟ้า, เวลาปิด และความต่างศักย์วงจรเปิด ต่ออัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโทรด

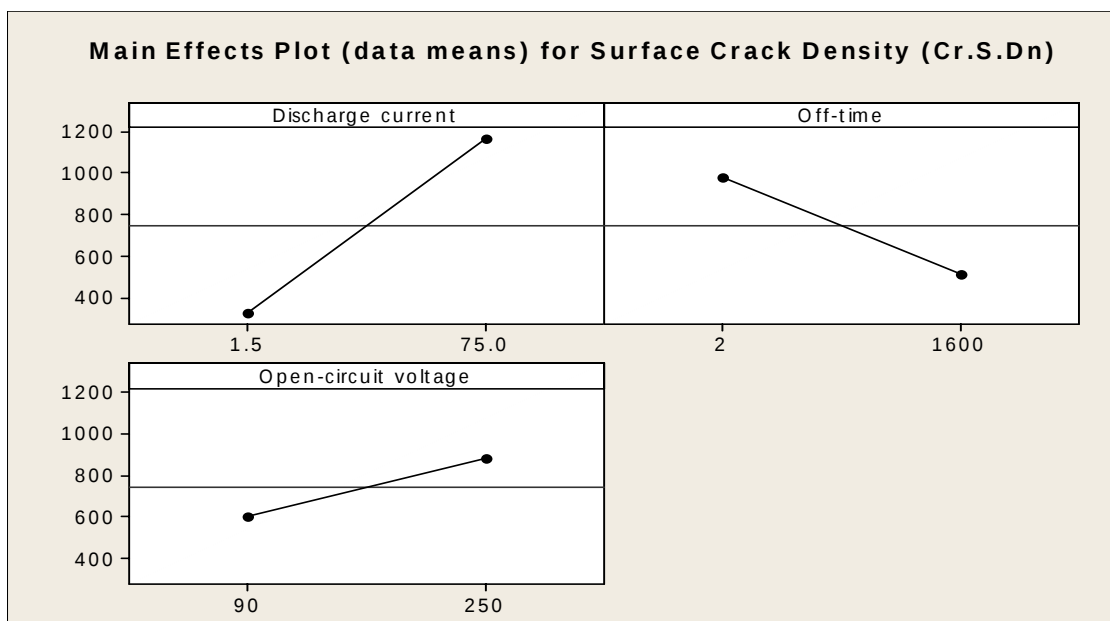
จากภาพที่ 4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลตอบแทนในแต่ละระดับตัวแปร สามารถอธิบายผลได้ดังนี้

- ตัวแปรกระแสไฟฟ้า พิจารณาระหว่าง ช่วง 1.5 ถึง 75 แอมแปร์ พบว่าที่ กระแสไฟฟ้า เท่ากับ 75 แอมแปร์ ทำให้อัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโทรดต่ำที่สุด เนื่องมาจากการหลุดร่วงของผงแกรไฟต์ระหว่างการสปาร์ค ที่ได้กล่าวไปแล้ว
- ตัวแปรค่าเวลาปิด พิจารณาระหว่าง ช่วง 2 ถึง 1,600 ไมโครวินาที จะพบว่าที่ เวลาปิด เท่ากับ 1,600 ไมโครวินาที ทำให้อัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโทรดที่ต่ำที่สุด เหตุผลคือ ช่วงเวลาหยุด สปาร์คเพื่อระบายเศษชิ้นงานออกหรือเวลาหยุดพักมาก อิเล็กโทรดย่อมคายความร้อนได้มาก และมีเวลาให้คืนสภาพเพื่อการสปาร์คครั้งต่อไปได้อย่างเต็มที่
- ตัวแปรความต่างศักย์วงจรเปิด พิจารณาที่ 90 และ 250 โวลต์ จะพบว่าเมื่อที่ ความต่างศักย์วงจรเปิด 250 โวลต์ ให้ค่าอัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโทรดสูงกว่า ที่ 90 โวลต์ เพียงเล็กน้อย เช่นเดียวกับอัตราการขจัดเนื้องาน
- กระแสไฟฟ้าที่ระดับ 2, ค่าเวลาปิดที่ระดับ 2 และความต่างศักย์วงจรเปิดที่ระดับ 1 หรือการทดลองที่ 7 คือ เงื่อนไขความสัมพันธ์ ที่ทำให้อัตราการสึกกร่อนของ อิเล็กโทรดมีค่าน้อยที่สุด

### 3. ผลกระทบของตัวแปรหลักต่อความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่

ตารางที่ 4.27 ผลกระทบของตัวแปรหลัก และผลต่างของผลกระทบของตัวแปรหลักแต่ละตัวแปร ต่อความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่

| หน่วย                  | ไมโครเมตร/0.05 ตารางมิลลิเมตร |              |                |
|------------------------|-------------------------------|--------------|----------------|
| ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง | ระดับ 1 (L1)                  | ระดับ 2 (L2) | ผลต่าง (L2-L1) |
| กระแสไฟฟ้า             | 327.420                       | 1,163.307    | 835.887        |
| เวลาปิด                | 977.823                       | 512.904      | -464.919       |
| ความต่างศักย์วงจรเปิด  | 604.033                       | 886.694      | 282.661        |



ภาพที่ 4.29 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ผลกระทบหลักของ ตัวแปรกระแสไฟฟ้า, เวลาปิด และความต่างศักย์วงจรเปิด ต่อความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่

จากภาพที่ 4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลตอบสนองในแต่ละระดับตัวแปร สามารถอธิบายผลได้ดังนี้

- ตัวแปรกระแสไฟฟ้า พิจารณาระหว่าง ช่วง 1.5 ถึง 75 แอมแปร์ จะพบว่าที่ กระแสไฟฟ้า เท่ากับ 1.5 แอมแปร์ ให้ความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่ต่ำที่สุด เนื่องจากปริมาณของกระแสไฟฟ้าเบาบาง ไม่มีการสปาร์คที่รุนแรง ซึ่งย่อมทำร้ายพื้นผิวชิ้นงานเพียงเล็กน้อยเท่านั้น
- ตัวแปรค่าเวลาปิด พิจารณาระหว่าง ช่วง 2 ถึง 1,600 ไมโครวินาที จะพบว่าที่ เวลาปิด เท่ากับ 1,600 ไมโครวินาที ให้ความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่ต่ำที่สุด เนื่องจากทุกครั้งที่มีการสปาร์ค ย่อมมีการทำร้ายพื้นผิวชิ้นงาน หากช่วงเวลาหยุดสปาร์คมีมาก พื้นผิวชิ้นงานย่อมมีเวลาหยุดพักจากการทำร้าย พื้นผิวชิ้นงาน และคายความร้อนเพื่อปรับสภาพได้มากขึ้น
- ตัวแปรความต่างศักย์วงจรเปิด พิจารณาที่ 90 และ 250 โวลต์ จะพบว่าเมื่อค่า ความต่างศักย์วงจรเปิดเท่ากับ 90 โวลต์ ให้ความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่น้อยกว่าที่ 250 โวลต์

- ค่ากระแสไฟฟ้าที่ระดับ 1, ค่าเวลาปิดที่ระดับ 2 และค่าความต่างศักย์วงจรเปิดที่ระดับ 1 หรือการทดลองที่ 3 คือ เงื่อนไขความสัมพันธ์ที่ดีที่สุด ที่ทำให้ความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่มีค่าต่ำที่สุด

#### 4.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

ผลจากการศึกษาปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยคือ กระแสไฟฟ้า, เวลาปิด และความต่างศักย์วงจรเปิด ที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการสปาร์คทั้งสแตนคาร์ไบด์นั้น สามารถนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน ด้วยโปรแกรม MINITAB 14.0 เพื่อทำการแยกความแปรปรวนออกมาเป็น ความแปรปรวนเนื่องมาจากตัวแปรทั้ง 3 ตัวแปร และความแปรปรวนเนื่องมาจากสาเหตุที่ไม่ได้รับการควบคุม โดยพิจารณาว่าค่าความแปรปรวนเนื่องมาจากตัวแปรทั้ง 3 มีค่ามากหรือไม่เป็นไปตามธรรมชาติ จนมีผลทำให้ผลการทดลองมีความแตกต่างกันมากหรือไม่ หากมีผลต่อการทดลอง แสดงว่าอิทธิพลของตัวแปรทั้ง 3 มีผลต่อการทดลองอย่างมีนัยสำคัญ

ทำการทดสอบสมมติฐานสำหรับ อัตราการจัดنيعงาน, อัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโตรด และยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่ กับตัวแปรทั้ง 3 คือ กระแสไฟฟ้า, เวลาปิด และความต่างศักย์วงจรเปิด ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 % ตั้งสมมติฐาน ดังนี้

##### 1. อัตราการจัดنيعงาน

- $H_0$  : อัตราการจัดنيعงาน ของตัวแปรทั้ง 3 ตัวแปร ไม่แตกต่างกัน หรือ  
 $H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$  โดยที่  
 $\mu_1$  = อัตราการจัดنيعงาน ของตัวแปรกระแสไฟฟ้า  
 $\mu_2$  = อัตราการจัดنيعงาน ของตัวแปรเวลาปิด  
 $\mu_3$  = อัตราการจัดنيعงาน ของตัวแปรความต่างศักย์วงจรเปิด
- $H_1$  : อัตราการจัดنيعงาน ของตัวแปรอย่างน้อย 1 ตัว มีค่าแตกต่างจากตัวแปรอื่น

โดยจะทำการปฏิเสธสมมติฐานหลัก ( $H_0$ ) หากค่าสถิติ F ที่คำนวณได้นั้นมีค่ามากกว่าค่า F ที่ได้จากตาราง หรือก็คือตัวแปรอย่างน้อย 1 ตัว มีผลต่ออัตราการจัดنيعงาน

## 2. อัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโตรด

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

ทำการปฏิเสธสมมติฐานหลัก ( $H_0$ ) หากค่าสถิติ F ที่คำนวณได้นั้นมีค่ามากกว่าค่า F ที่ได้จากตาราง หรือก็คือตัวแปรอย่างน้อย 1 ตัว มีผลต่ออัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโตรด

## 3. ความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่

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

โดยจะทำการปฏิเสธสมมติฐานหลัก ( $H_0$ ) หากค่าสถิติ F ที่คำนวณได้นั้นมีค่ามากกว่าค่า F ที่ได้จากตาราง หรือก็คือตัวแปรอย่างน้อย 1 ตัว มีผลต่อความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่

### 4.7.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน ของอัตราการจัดเนื้องาน

ผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4.28

ตารางที่ 4.28 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน สำหรับอัตราการขจัดเนื้องาน

| Analysis of Variance for MRR |    |         |         |       |
|------------------------------|----|---------|---------|-------|
| Source                       | DF | SS      | MS      | F     |
| Discharge current            | 1  | 18.3830 | 18.3830 | 20.52 |
| Off-time                     | 1  | 2.6186  | 2.6186  | 2.92  |
| Open-circuit voltage         | 1  | 0.3366  | 0.3366  | 0.38  |
| Error                        | 4  | 3.5837  | 0.8959  |       |
| Total                        | 7  | 24.9220 |         |       |

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับอัตราการขจัดเนื้องานพบว่า ผลรวมกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของผลรวม หรือความแปรปรวนทั้งหมดที่เกิดขึ้นเนื่องจากทั้ง 3 ตัวแปร และจากสาเหตุที่ไม่ได้รับการควบคุม มีค่าเท่ากับ 24.9220 แบ่งออกเป็น

1. ความแปรปรวนจากกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 18.3830
2. ความแปรปรวนจากเวลาปิดเท่ากับ 2.6186
3. ความแปรปรวนจากความต่างศักย์วงจรเปิดเท่ากับ 0.3366 และ
4. ความแปรปรวนจากความคลาดเคลื่อน หรือจากสาเหตุที่ไม่ได้รับการควบคุมเท่ากับ 3.5837

ค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของตัวแปร หรือความแปรปรวนต่อหน่วย สำหรับตัวแปรแล้วจะมีค่าเท่าเดิมเนื่องมาจากค่าองศาอิสระของตัวแปรเท่ากับ 1 โดย

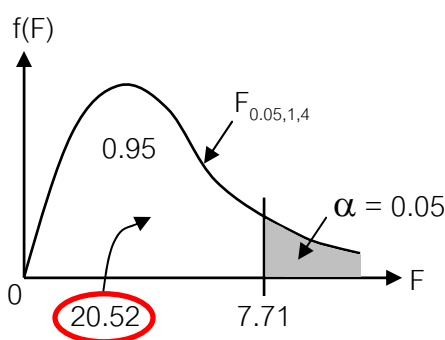
1. ความแปรปรวนจากกระแสไฟฟ้าต่อหน่วยเท่ากับ 18.3830
2. ความแปรปรวนจากเวลาปิดต่อหน่วยเท่ากับ 2.6186
3. ความแปรปรวนจากความต่างศักย์วงจรเปิดต่อหน่วยเท่ากับ 0.3366 และ
4. ความแปรปรวนจากความคลาดเคลื่อน หรือจากสาเหตุที่ไม่ได้รับการควบคุมต่อหน่วยเท่ากับ 0.8959

ค่าสถิติ F หรือค่าความแปรปรวนต่อหน่วยในรูปของมาตรฐานค่า F จากตารางมี

1. ค่า F ของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 20.52
2. ค่า F ของเวลาปิดเท่ากับ 2.92 และ

### 3. ค่า F ของความต่างศักย์วงจรเปิดเท่ากับ 0.38

ค่าสถิติ F ของกระแสไฟฟ้าที่คำนวณได้เท่ากับ 20.52 มีค่ามากกว่า ค่า  $F_{0.05,1,4}$  ที่ได้จากตารางซึ่งมีค่าเท่ากับ 7.71 ตามรูปที่ 4.30 ดังนั้น จึงทำการปฏิเสธสมมติฐานหลัก ( $H_0$ ) โดยถือว่าความผันแปรของผลการทดลองไม่ได้เป็นไปโดยธรรมชาติ แต่เกิดจากตัวแปรกระแสไฟฟ้า ทำให้ความผันแปรของผลการทดลองที่ได้มีความแตกต่างกัน สรุปได้ว่าอิทธิพลของตัวแปรกระแสไฟฟ้ามีนัยสำคัญที่ 0.05



ภาพที่ 4.30 แผนภูมิการแจกแจงความน่าจะเป็นของ  $F_{0.05,1,4}$  โดยค่า F ที่คำนวณได้ มีค่าที่อยู่นอกพื้นที่แห่งการยอมรับ

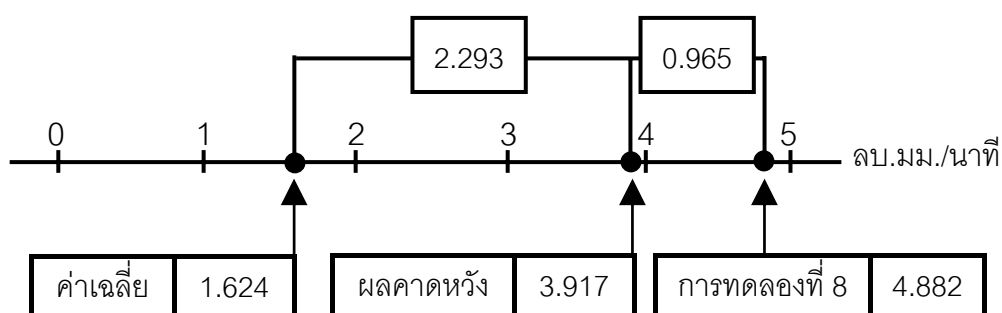
จากนั้นจึงคำนวณ ผลคาดหวังที่เสนอไขความสัมพันธ์ที่ดีที่สุด และสถานะเงื่อนไขความสัมพันธ์ที่ดีที่สุด ของตัวแปรที่ใช้ในการทดลองและระดับของตัวแปรแต่ละตัว ตามตารางที่ 4.29 เพื่อทำการทดสอบการทดลอง

ตารางที่ 4.29 เปรียบเทียบความสัมพัทธ์ที่ดีที่สุด และผลคาดหวังที่เปรียบเทียบความสัมพัทธ์ที่ดีที่สุดในการจัดการหนี้

| ตัวแปร                | ระดับ | ค่าที่กำหนด<br>จากระดับ | ส่วนเพิ่ม (ลูกบาศก์<br>มิลลิเมตร/นาที่) |
|-----------------------|-------|-------------------------|-----------------------------------------|
| กระแสไฟฟ้า            | 2     | 75 แอมแปร์              | 1.516                                   |
| เวลาปิด               | 2     | 1,600 ไมโครวินาที       | 0.572                                   |
| ความต่างศักย์วงจรเปิด | 2     | 250 โวลต์               | 0.205                                   |
| ผลรวมของส่วนเพิ่ม     |       |                         | 2.293                                   |
| ค่าเฉลี่ย             |       |                         | 1.624                                   |
| ผลคาดหวัง             |       |                         | 3.917                                   |
| การทดลองที่ 8         |       |                         | 4.882                                   |

จากตารางที่ 4.29 ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.624 ลูกบาศก์มิลลิเมตร/นาที่, ค่าการจัดการหนี้  
หนี้ที่คาดหวังคือ 3.917 ลูกบาศก์มิลลิเมตร/นาที่ และค่าจริงจากการทดลองที่ 8 คือ 4.882  
ลูกบาศก์มิลลิเมตร/นาที่ นำค่าทั้ง 3 มาเปรียบเทียบกัน หรือแสดง ตามภาพที่ 4.31 ดังนี้

- ผลต่างของค่าจากการทดลองที่ 8 และค่าคาดหวัง คือ  $4.882 - 3.917 = 0.965$
- ผลต่างของค่าคาดหวัง และค่าเฉลี่ย คือ  $3.917 - 1.624 = 2.293$



ภาพที่ 4.31 เส้นจำนวนแสดงการเปรียบเทียบกันระหว่างค่าเฉลี่ย, ผลค่าหวัง และการทดลองที่ 8  
สำหรับการจัดการหนี้

ค่า 0.965 น้อยกว่า 2.293 ดังนั้น ค่าคาดหวังใกล้เคียงกับผลการทดลองจริง สภาวะที่ดีที่สุดเมื่อต้องการอัตราการขจัดเนื้องานสูงสุด จากการทดลองสปาร์คทั้งสแตนคาร์ไบด์ คือ

1. กระแสไฟฟ้า : 75 แอมแปร์
2. เวลาปิด : 1,600 ไมโครวินาที
3. ความต่างศักย์วงจรเปิด : 250 โวลต์

#### 4.7.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน ของอัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโทรด

ตารางที่ 4.30 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน สำหรับอัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโทรด

| Analysis of Variance for EWR |    |        |        |      |
|------------------------------|----|--------|--------|------|
| Source                       | DF | SS     | MS     | F    |
| Discharge current            | 1  | 107248 | 107248 | 5.25 |
| Off-time                     | 1  | 53297  | 53297  | 2.61 |
| Open-circuit voltage         | 1  | 685    | 685    | 0.03 |
| Error                        | 4  | 81712  | 20428  |      |
| Total                        | 7  | 242941 |        |      |

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับอัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโทรดพบว่า ผลรวมกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของผลรวม มีค่าเท่ากับ 242,941 แบ่งออกเป็น

1. ความแปรปรวนจากกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 107,248
2. ความแปรปรวนจากเวลาปิดเท่ากับ 53,297
3. ความแปรปรวนจากความต่างศักย์วงจรเปิดเท่ากับ 685 และ
4. ความแปรปรวนจากความคลาดเคลื่อน หรือจากสาเหตุที่ไม่ได้รับการควบคุมเท่ากับ 81,712

ค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของตัวแปร มีค่าดังนี้

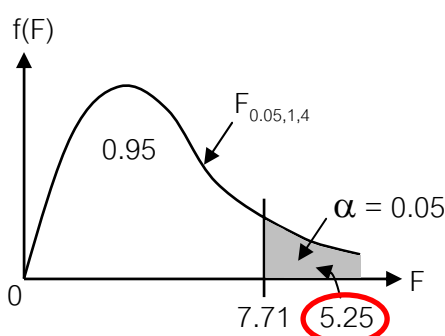
1. ความแปรปรวนจากกระแสไฟฟ้าต่อหน่วยเท่ากับ 107,248
2. ความแปรปรวนจากเวลาปิดต่อหน่วยเท่ากับ 53,297
3. ความแปรปรวนจากความต่างศักย์วงจรเปิดต่อหน่วยเท่ากับ 685 และ

4. ความแปรปรวนจากความคลาดเคลื่อน หรือจากสาเหตุที่ไม่ได้รับการควบคุมต่อหน่วยเท่ากับ 20,428

ค่าสถิติ F หรือค่าความแปรปรวนต่อหน่วยในรูปของมาตรฐานค่า F จากตารางมี

1. ค่า F ของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 5.25
2. ค่า F ของเวลาปิดเท่ากับ 2.61 และ
3. ค่า F ของความต่างศักย์วงจรเปิดเท่ากับ 0.03

ค่าสถิติ F ของกระแสไฟฟ้าที่คำนวณได้เท่ากับ 5.25 มีค่าน้อยกว่า ค่า  $F_{0.05,1,4}$  ที่ได้จากตารางซึ่งมีค่าเท่ากับ 7.71 ตามรูปที่ 4.32 ดังนั้น จึงทำการยอมรับสมมติฐานหลัก ( $H_0$ ) โดยความผันแปรของผลการทดลองเป็นไปโดยธรรมชาติ และสรุปได้ว่าอิทธิพลของตัวแปรไม่มีผลต่อผลการทดลอง



ภาพที่ 4.32 แผนภูมิการแจกแจงความน่าจะเป็นของ  $F_{0.05,1,4}$  โดยค่า F ที่คำนวณได้ มีค่าที่อยู่ในพื้นที่แห่งการยอมรับ

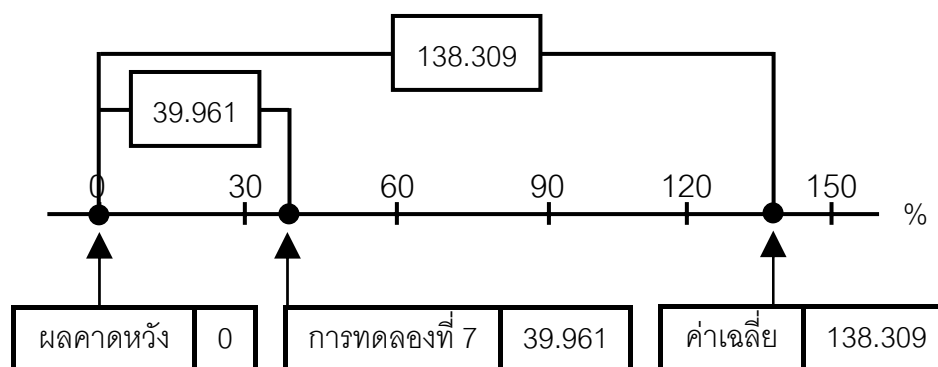
ผลคาดหวังที่เงื่อนไขความสัมพันธ์ที่ดีที่สุด และสภาวะเงื่อนไขความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดของตัวแปรที่ใช้ในการทดลองและระดับของตัวแปรแต่ละตัว ดังตารางที่ 4.31

ตารางที่ 4.31 เปรียบเทียบความสัมพัทธ์ที่ดีที่สุด และผลคาดหวังที่เปรียบเทียบความสัมพัทธ์ที่ดีที่สุดใน อัตราการสึกกร่อนของอิเล็กทรอนิกส์

| ตัวแปร                | ระดับ | ค่าที่กำหนดจากระดับ | ส่วนเพิ่ม (%) |
|-----------------------|-------|---------------------|---------------|
| กระแสไฟฟ้า            | 2     | 75 แอมแปร์          | -115.784      |
| เวลาปิด               | 2     | 1,600 ไมโครวินาที   | -81.622       |
| ความต่างศักย์วงจรเปิด | 1     | 90 โวลต์            | -9.250        |
| ผลรวมของส่วนเพิ่ม     |       |                     | -206.656      |
| ค่าเฉลี่ย             |       |                     | 138.309       |
| ผลคาดหวัง             |       |                     | 0.000         |
| การทดลองที่ 7         |       |                     | 39.961        |

จากตารางที่ 4.31 ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 138.309 % ค่าอัตราการสึกกร่อนของอิเล็กทรอนิกส์ที่คาดหวังคือ 0 % และค่าจริงจากการทดลองที่ 7 คือ 39.961 % นำค่าทั้ง 3 มาเปรียบเทียบกัน หรือแสดง ตามภาพที่ 4.33 ดังนี้

- ผลต่างของค่าจากการทดลองที่ 7 และค่าคาดหวัง คือ  $39.961 - 0 = 39.961$
- ผลต่างของค่าคาดหวัง และค่าเฉลี่ย คือ  $138.309 - 0 = 138.309$



ภาพที่ 4.33 เส้นจำนวนแสดงการเปรียบเทียบกันระหว่างค่าเฉลี่ย, ผลค่าหวัง และการทดลองที่ 7 สำหรับอัตราการสึกกร่อนของอิเล็กทรอนิกส์

ค่า 39.961 น้อยกว่า 138.309 ดังนั้น ค่าคาดหวังใกล้เคียงกับผลการทดลองจริง  
สภาวะที่ดีที่สุดเมื่อต้องการอัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโทรดที่ต่ำสุด จากการสปาร์คทั้งสแตนคาร์  
ไบด์ เป็นดังนี้

1. กระแสไฟฟ้า : 75 แอมแปร์
2. เวลาปิด : 1,600 ไมโครวินาที
3. ความต่างศักย์วงจรเปิด : 90 โวลต์

#### 4.7.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน ของความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่

ตารางที่ 4.32 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน สำหรับความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็ก  
ต่อพื้นที่

| Analysis of Variance for Cr.S.Dn |    |         |         |      |
|----------------------------------|----|---------|---------|------|
| Source                           | DF | SS      | MS      | F    |
| Discharge current                | 1  | 1397414 | 1397414 | 5.93 |
| Off-time                         | 1  | 432299  | 432299  | 1.83 |
| Open-circuit voltage             | 1  | 159794  | 159794  | 0.68 |
| Error                            | 4  | 942470  | 235618  |      |
| Total                            | 7  | 2931978 |         |      |

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อ  
พื้นที่พบว่า ผลรวมกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของผลรวม มีค่าเท่ากับ 2,931,978  
แบ่งออกเป็น

1. ความแปรปรวนจากกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 1,397,414
2. ความแปรปรวนจากเวลาปิดเท่ากับ 432,299
3. ความแปรปรวนจากความต่างศักย์วงจรเปิดเท่ากับ 159,794 และ
4. ความแปรปรวนจากความคลาดเคลื่อน หรือจากสาเหตุที่ไม่ได้รับการควบคุมเท่ากับ 942,470

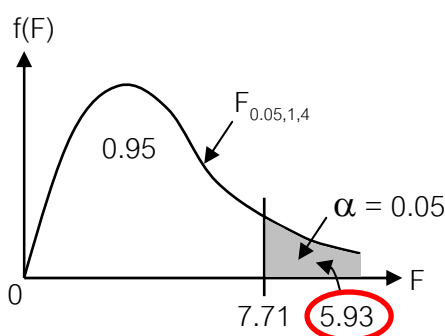
ค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของตัวแปร มีค่าดังนี้

1. ความแปรปรวนจากกระแสไฟฟ้าต่อหน่วยเท่ากับ 1,397,414
2. ความแปรปรวนจากเวลาปิดต่อหน่วยเท่ากับ 432,299
3. ความแปรปรวนจากความต่างศักย์วงจรเปิดต่อหน่วยเท่ากับ 159,794 และ
4. ความแปรปรวนจากความคลาดเคลื่อน หรือจากสาเหตุที่ไม่ได้รับการควบคุมต่อหน่วยเท่ากับ 235,618

ค่าสถิติ F หรือค่าความแปรปรวนต่อหน่วยในรูปของมาตรฐานค่า F จากตารางมี

1. ค่า F ของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 5.93
2. ค่า F ของเวลาปิดเท่ากับ 1.83 และ
3. ค่า F ของความต่างศักย์วงจรเปิดเท่ากับ 0.68

ค่าสถิติ F ของกระแสไฟฟ้าที่คำนวณได้เท่ากับ 5.93 มีค่าน้อยกว่า ค่า  $F_{0.05,1,4}$  ที่ได้จากตารางซึ่งมีค่าเท่ากับ 7.71 ตามรูปที่ 4.34 ดังนั้น จึงทำการยอมรับสมมติฐานหลัก ( $H_0$ ) โดยความผันแปรของผลการทดลองเป็นไปโดยธรรมชาติ และสรุปได้ว่าอิทธิพลของตัวแปรไม่มีผลต่อผลการทดลอง



ภาพที่ 4.34 แผนภูมิการแจกแจงความน่าจะเป็นของ  $F_{0.05,1,4}$  โดยค่า F ที่คำนวณได้ มีค่าที่อยู่ในพื้นที่แห่งการยอมรับ

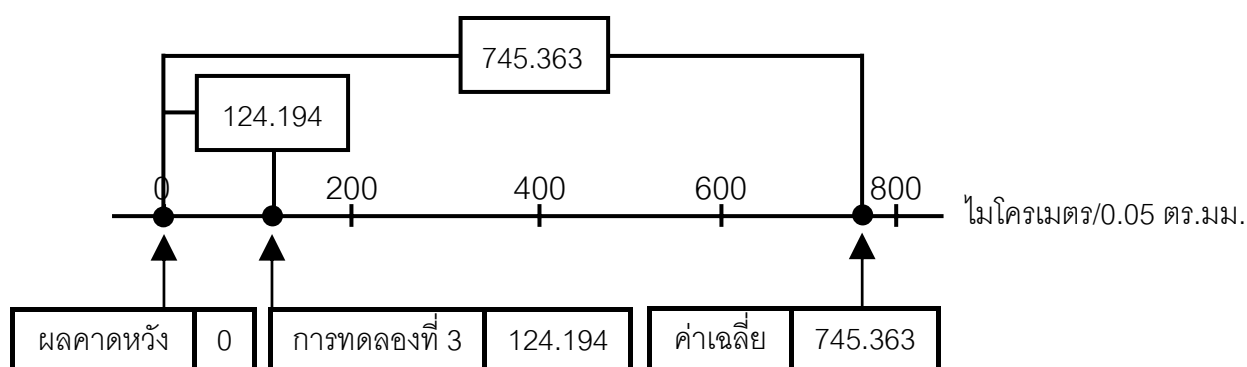
ผลคาดหวังที่เงื่อนไขความสัมพันธ์ที่ดีที่สุด และสภาวะเงื่อนไขความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดของตัวแปรที่ใช้ในการทดลองและระดับของตัวแปรแต่ละตัว ดังตารางที่ 4.33

ตารางที่ 4.33 เงื่อนไขความสัมพันธ์ที่ดีที่สุด และผลคาดหวังที่เงื่อนไขความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดในความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่

| ตัวแปร                | ระดับ | ค่าที่กำหนด<br>จากระดับ | ส่วนเพิ่ม (ไมโครเมตร<br>/0.05 ตารางมิลลิเมตร) |
|-----------------------|-------|-------------------------|-----------------------------------------------|
| กระแสไฟฟ้า            | 1     | 1.5 แอมแปร์             | -417.944                                      |
| เวลาปิด               | 2     | 1,600 ไมโครวินาที       | -232.460                                      |
| ความต่างศักย์วงจรเปิด | 1     | 90 โวลต์                | -141.331                                      |
| ผลรวมของส่วนเพิ่ม     |       |                         | -791.734                                      |
| ค่าเฉลี่ย             |       |                         | 745.363                                       |
| ผลคาดหวัง             |       |                         | 0.000                                         |
| การทดลองที่ 3         |       |                         | 124.194                                       |

จากตารางที่ 4.33 ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 745.363 ไมโครเมตร/0.05 ตารางมิลลิเมตร, ค่าความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่ที่คาดหวังเท่ากับ 0 ไมโครเมตร/0.05 ตารางมิลลิเมตร และค่าจริงจากการทดลองที่ 3 เท่ากับ 124.194 ไมโครเมตร/0.05 ตารางมิลลิเมตร นำค่าทั้ง 3 มาเปรียบเทียบกัน หรือแสดง ตามภาพที่ 4.35 ดังนี้

- ผลต่างของค่าจากการทดลองที่ 3 และค่าคาดหวัง คือ  $124.194 - 0 = 124.194$
- ผลต่างของค่าคาดหวัง และค่าเฉลี่ย คือ  $745.363 - 0 = 745.363$



ภาพที่ 4.35 เส้นจำนวนแสดงการเปรียบเทียบกันระหว่างค่าเฉลี่ย, ผลค่าหวัง และการทดลองที่ 3 สำหรับความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่

ค่า 124.194 น้อยกว่า 745.363 ดังนั้น ค่าคาดหวังใกล้เคียงกับผลการทดลองจริง  
สภาวะที่ดีที่สุดเมื่อต้องการความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่ที่ต่ำสุด เป็นดังนี้

1. กระแสไฟฟ้า : 1.5 แอมแปร์
2. เวลาปิด : 1,600 ไมโครวินาที
3. ความต่างศักย์วงจรเปิด : 90 โวลต์

#### 4.7.4 ตรวจสอบผลกระทบหลัก

จากแผนภูมิผลกระทบหลักในหัวข้อ 4.6.2 ลักษณะของแผนภูมิที่ได้มานั้น บางครั้งอาจเกิดคำถามว่า เส้นแผนภูมิที่ได้จะเป็นลักษณะแบบนั้นจริงหรือไม่ เนื่องจาก การทดลองแบบทาคุชิ นั้น มีการทดลองแบบที่ระดับของตัวแปรมากกว่า 2 ระดับด้วย ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่า หากทำการทดลองที่ 3 ระดับ ลักษณะเส้นของแผนภูมิอาจไม่ต่อเนื่อง หรืออาจไม่ไปในทางเดียวกันได้ ในการตรวจสอบเรื่องดังกล่าวนี้ สามารถตรวจสอบในเบื้องต้นได้จากการทดลองหาตัวแปรที่เหมาะสม ในหัวข้อที่ 4.1 ถึง 4.5 แต่ไม่สามารถบอกได้อย่างชัดเจน ซึ่งการตรวจสอบที่ดีที่สุด คือ การทดลองที่กำหนดตัวแปรทั้ง 3 ให้มีค่าอยู่ในระดับกึ่งกลาง จากระดับที่ 1 และระดับที่ 2 ในการทดลองแบบทาคุชิ

ดังนั้น เพื่อเพิ่มความมั่นใจในการวิเคราะห์ จึงมีการทดลองเพิ่มที่ 9 เข้ามา ซึ่งเป็นการทดลองเลือกใช้เงื่อนไขความสัมพันธ์ที่ระดับกลาง โดยตัวแปรทั้ง 3 ใช้ค่ากึ่งกลางทั้งหมด แล้วนำมาเปรียบเทียบควบคู่กันไปด้วยกับผลการทดลองเดิม และค่าคาดหวัง ระดับของตัวแปรแสดงดังตารางที่ 4.34 และผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.35

ตารางที่ 4.34 ระดับของตัวแปร ในเงื่อนไขความสัมพันธ์ที่ระดับกลาง

| การทดลองที่ | กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์) |     | เวลาปิด (ไมโครวินาที) |     | ความต่างศักย์วงจรเปิด (โวลต์) |     |
|-------------|----------------------|-----|-----------------------|-----|-------------------------------|-----|
|             | ระดับ                | ค่า | ระดับ                 | ค่า | ระดับ                         | ค่า |
| 9           | กลาง                 | 12  | กลาง                  | 25  | กลาง                          | 90  |

ตารางที่ 4.35 ผลการทดลองด้วยวิธีทาгухи ของการทดลองในเงื่อนไขความสัมพันธ์ที่ระดับกลาง

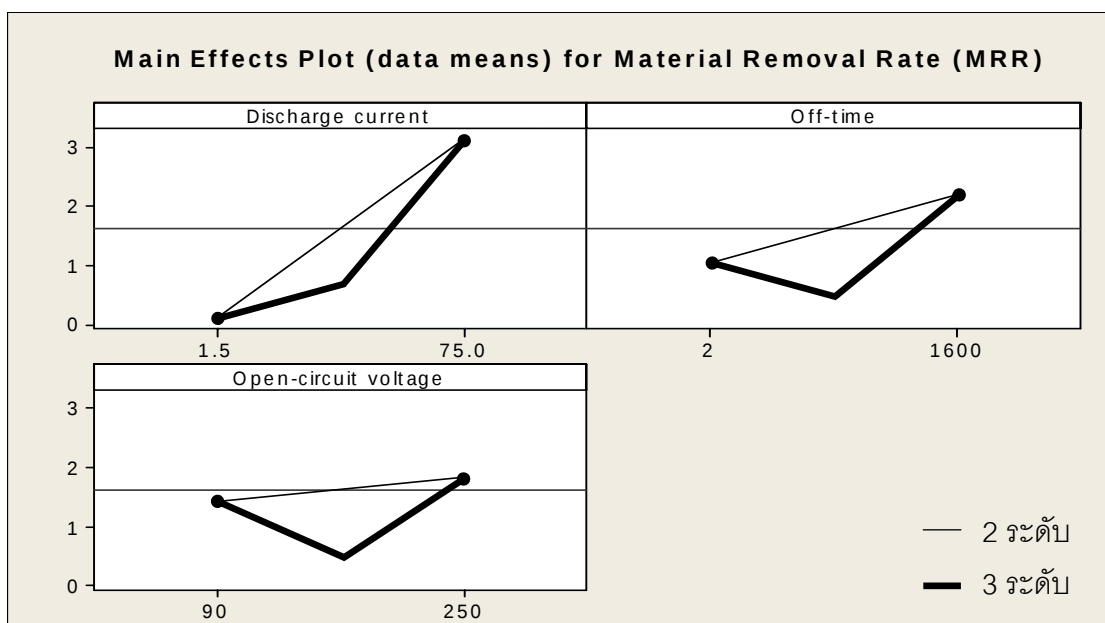
| การทดลองที่ | อัตราการขจัดเนื้องาน<br>(ลูกบาศก์มิลลิเมตร/นาทึ) | อัตราการสึกกร่อน<br>ของอิเล็กโตรด (%) | ความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่ (ไมโครเมตร/0.05 ตารางมิลลิเมตร) |
|-------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| 9           | 0.578                                            | 134.393                               | 558.065                                                                   |

เมื่อทดลองแล้วจึงนำผลมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองเดิม ดังนี้

1. อัตราการขจัดเนื้องาน

ตารางที่ 4.36 ตารางการเปรียบเทียบระหว่าง ผลการทดลองเดิม และผลการทดลองที่ระดับกลางของอัตราการขจัดเนื้องาน

| หน่วย                  | ลูกบาศก์มิลลิเมตร/นาทึ |                  |              |
|------------------------|------------------------|------------------|--------------|
| ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง | ระดับ 1 (L1)           | ระดับกลาง (LMID) | ระดับ 2 (L2) |
| กระแสไฟฟ้า             | 0.108                  | 0.578            | 3.140        |
| เวลาปิด                | 1.052                  |                  | 2.196        |
| ความต่างศักย์วงจรเปิด  | 1.419                  |                  | 1.829        |



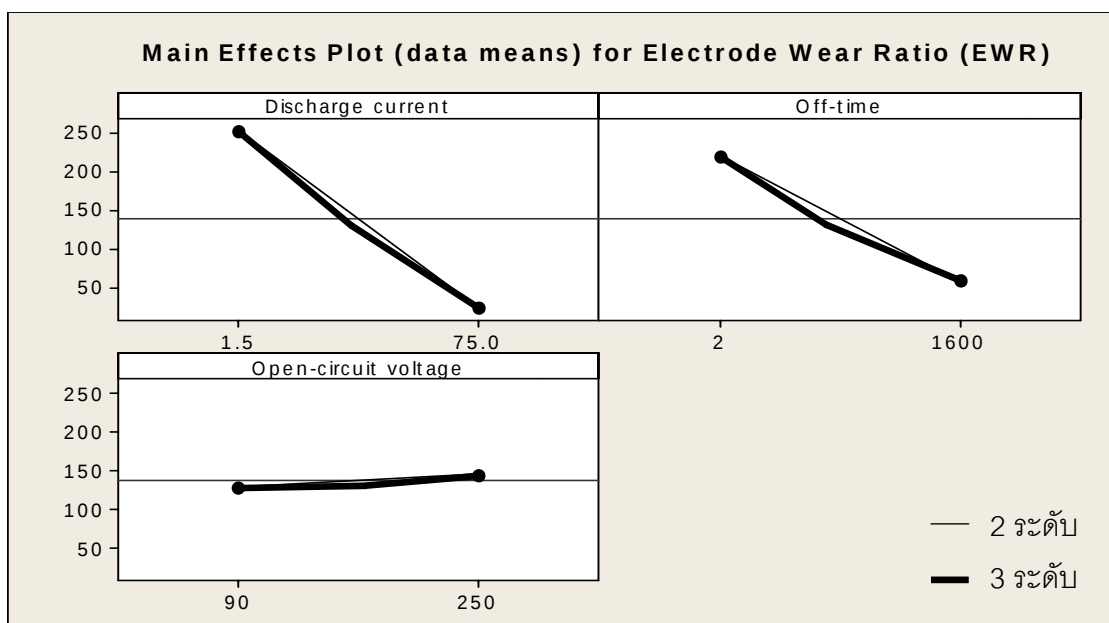
ภาพที่ 4.36 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ผลกระทบหลัก ต่ออัตราการขจัดเนื้องาน  
เปรียบเทียบระดับกันระหว่าง 2 ระดับ และ 3 ระดับ

สำหรับอัตราการขจัดเนื้องาน หลังจากเปรียบเทียบกันพบว่า การทดลองเงื่อนไข ความสัมพันธ์ที่ระดับกลาง มีค่าอัตราการขจัดเนื้องานเท่ากับ 0.578 ลูกบาศก์มิลลิเมตร/นาที ซึ่ง อยู่กึ่งกลางระหว่างผลการทดลองเดิมที่ระดับ 1 และ 2 แต่เฉพาะกับตัวแปรกระแสไฟฟ้าเท่านั้น

## 2. อัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโทรด

ตารางที่ 4.37 ตารางการเปรียบเทียบระหว่าง ผลการทดลองเดิม และผลการทดลองที่ระดับกลาง ของอัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโทรด

| หน่วย                  | %            |                  |              |
|------------------------|--------------|------------------|--------------|
| ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง | ระดับ 1 (L1) | ระดับกลาง (LMID) | ระดับ 2 (L2) |
| กระแสไฟฟ้า             | 254.088      | 134.393          | 22.520       |
| เวลาปิด                | 219.926      |                  | 56.682       |
| ความต่างศักย์วงจรเปิด  | 129.054      |                  | 147.554      |



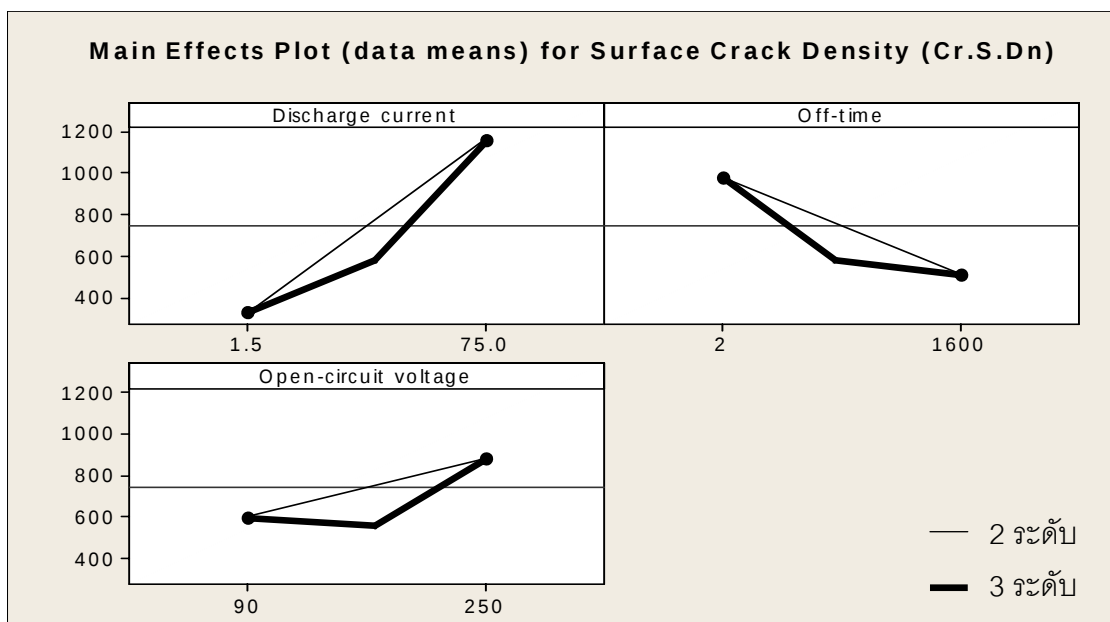
ภาพที่ 4.37 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ผลกระทบหลักของ ต่ออัตราการสึกกร่อนของ อิเล็กโทรด เปรียบเทียบระดับกันระหว่าง 2 ระดับ และ 3 ระดับ

การทดลองเงื่อนไขความสัมพันธ์ที่ระดับกลาง ของอัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโทรด จากตาราง มีค่าอัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโทรดเท่ากับ 134.393 % ซึ่งอยู่กึ่งกลางระหว่างผลการทดลองเดิมที่ระดับ 1 และ 2 ในทุกตัวแปร

### 3. ความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่

ตารางที่ 4.38 ตารางการเปรียบเทียบระหว่าง ผลการทดลองเดิม และผลการทดลองที่ระดับกลาง ของความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่

| หน่วย                  | ไมโครเมตร/0.05 ตารางมิลลิเมตร |                  |              |
|------------------------|-------------------------------|------------------|--------------|
| ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง | ระดับ 1 (L1)                  | ระดับกลาง (LMID) | ระดับ 2 (L2) |
| กระแสไฟฟ้า             | 327.420                       | 558.065          | 1,163.307    |
| เวลาปิด                | 977.823                       |                  | 512.904      |
| ความต่างศักย์วงจรเปิด  | 604.033                       |                  | 886.694      |



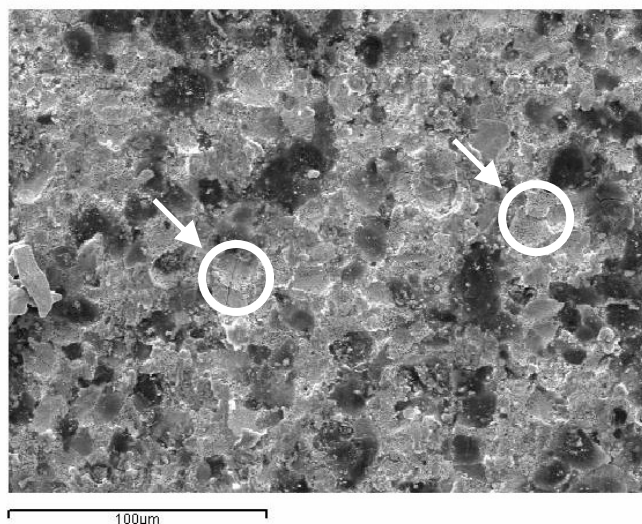
ภาพที่ 4.38 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ผลกระทบหลักของ ต่อความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่ เปรียบเทียบระดับกันระหว่าง 2 ระดับ และ 3 ระดับ

ด้านของความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่พบว่า การทดลองเงื่อนไขความสัมพันธ์ที่ระดับกลาง มีความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่เท่ากับ 558.065 ไมโครเมตร/0.05 ตารางมิลลิเมตร โดยอยู่กึ่งกลางระหว่างผลการทดลองเดิมที่ระดับ 1 และ 2 ยกเว้นตัวแปรความต่างศักย์วงจรเปิด ซึ่งมีค่าต่ำกว่าระดับที่ 1 เล็กน้อย

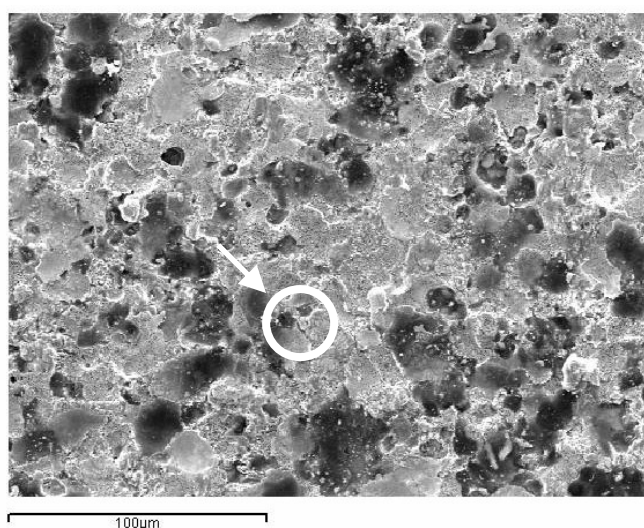
จากทั้ง 3 ผลกระทบ พบว่าค่าผลการทดลองที่ระดับกลางส่วนใหญ่ อยู่กึ่งกลางระหว่างผลการทดลองเดิมที่ระดับ 1 และ 2 ซึ่งมีบางส่วนที่ไม่อยู่ในกึ่งกลางตามที่ต้องการ อาจเป็นเพราะว่าระดับของความต่างศักย์วงจรเปิดปรับค่าได้น้อยเกินไป คือ ปรับได้เพียง 90 โวลต์ และ 250 โวลต์ เท่านั้น จึงอาจทำให้ผลที่ได้ไม่อยู่กึ่งกลางเท่าที่ควร อย่างไรก็ตาม ลักษณะเส้นของแผนภูมิผลกระทบหลักส่วนใหญ่แล้ว จะต่อเนื่อง หรือไปในทางเดียวกัน ตามที่ได้ทดลองไว้

#### 4.8 ภาพพื้นผิวชิ้นงานจากการทดลองด้วยวิธีทาคุชิ

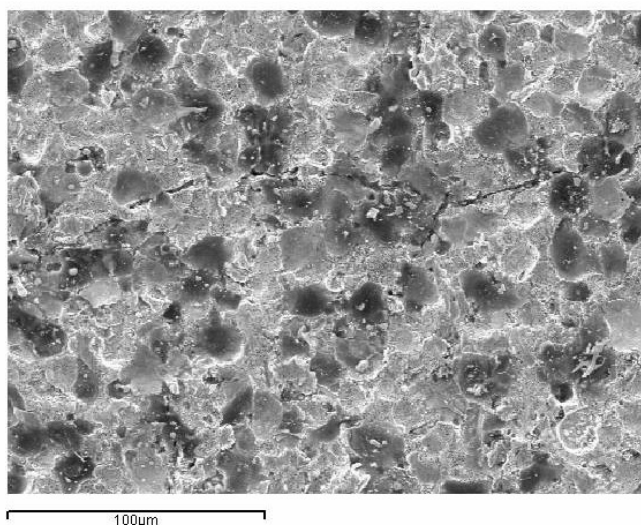
รอยแตกร้าวขนาดเล็กจากการทดลองทั้ง 8 ครั้ง แสดงดังภาพที่ 4.39 ถึง 4.46



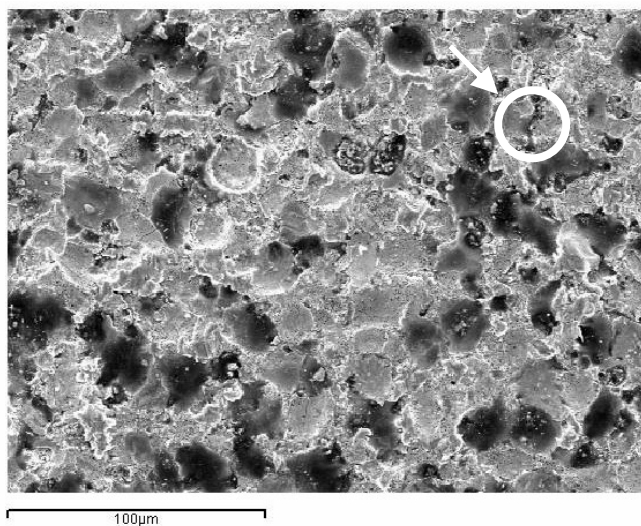
ภาพที่ 4.39 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงรอยแตกร้าวขนาดเล็ก ของการทดลองที่ 1  
ใช้อิเล็กทรอนิกส์แรงไฟต์ ขั้วลบ กระแสไฟฟ้า 1.5 แอมแปร์ เวลาเปิด 25 ไมโครวินาที เวลาปิด 2  
ไมโครวินาที ความต่างศักย์วงจรมเปิด 90 โวลต์ ถ่ายด้วยกำลังขยาย 500 เท่า



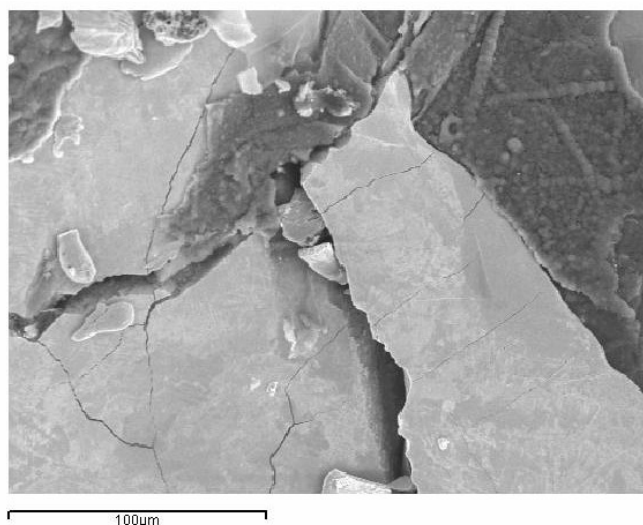
ภาพที่ 4.40 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงรอยแตกร้าวขนาดเล็ก ของการทดลองที่ 2  
ใช้อิเล็กทรอนิกส์แรงไฟต์ ขั้วลบ กระแสไฟฟ้า 1.5 แอมแปร์ เวลาเปิด 25 ไมโครวินาที เวลาปิด 2  
ไมโครวินาที ความต่างศักย์วงจรมเปิด 250 โวลต์ ถ่ายด้วยกำลังขยาย 500 เท่า



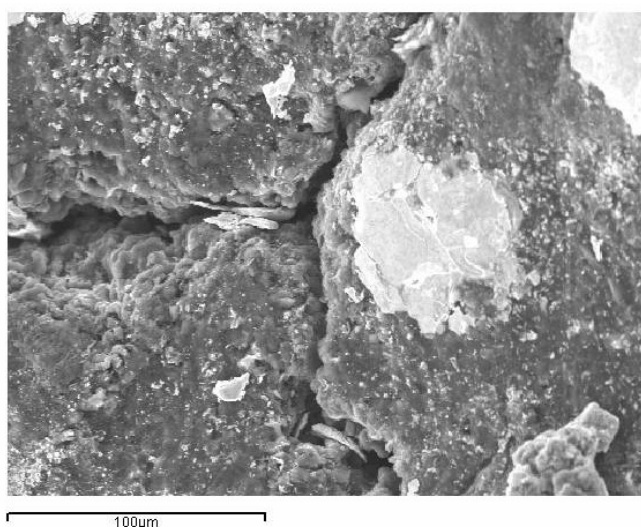
ภาพที่ 4.41 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงรอยแตกร้าวขนาดเล็ก ของการทดลองที่ 3 ใช้โอเล็กโตรดแกรไฟต์ ขั้วลบ กระแสไฟฟ้า 1.5 แอมแปร์ เวลาเปิด 25 ไมโครวินาที เวลาปิด 1,600 ไมโครวินาที ความต่างศักย์วงจรเปิด 90 โวลต์ ถ่ายด้วยกำลังขยาย 500 เท่า



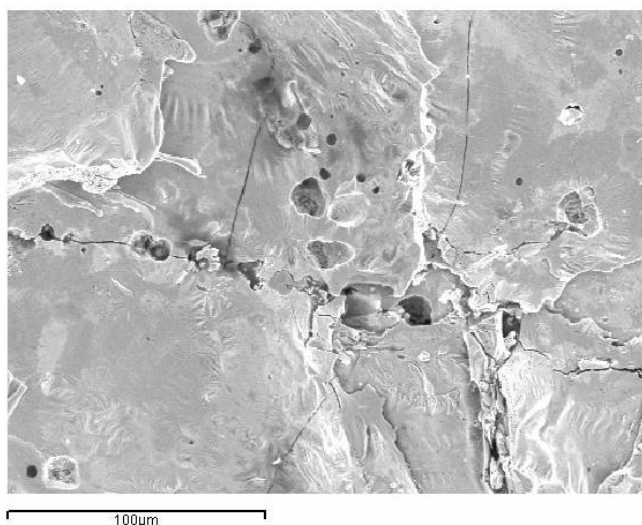
ภาพที่ 4.42 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงรอยแตกร้าวขนาดเล็ก ของการทดลองที่ 4 ใช้โอเล็กโตรดแกรไฟต์ ขั้วลบ กระแสไฟฟ้า 1.5 แอมแปร์ เวลาเปิด 25 ไมโครวินาที เวลาปิด 1,600 ไมโครวินาที ความต่างศักย์วงจรเปิด 250 โวลต์ ถ่ายด้วยกำลังขยาย 500 เท่า



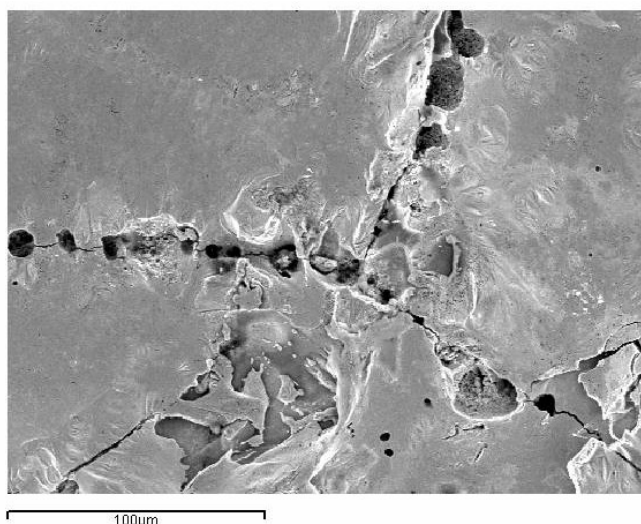
ภาพที่ 4.43 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงรอยแตกร้าวขนาดเล็ก ของการทดลองที่ 5  
ใช้อิเล็กโตรดแกรไฟต์ ขั้วลบ กระแสไฟฟ้า 75 แอมแปร์ เวลาเปิด 25 ไมโครวินาที เวลาปิด 2  
ไมโครวินาที ความต่างศักย์วงจรเปิด 90 โวลต์ ถ่ายด้วยกำลังขยาย 500 เท่า



ภาพที่ 4.44 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงรอยแตกร้าวขนาดเล็ก ของการทดลองที่ 6  
ใช้อิเล็กโตรดแกรไฟต์ ขั้วลบ กระแสไฟฟ้า 75 แอมแปร์ เวลาเปิด 25 ไมโครวินาที เวลาปิด 2  
ไมโครวินาที ความต่างศักย์วงจรเปิด 250 โวลต์ ถ่ายด้วยกำลังขยาย 500 เท่า



ภาพที่ 4.45 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงรอยแตกร้าวขนาดเล็ก ของการทดลองที่ 7  
ใช้โอเล็กโตรดแกรไฟต์ ขั้วลบ กระแสไฟฟ้า 75 แอมแปร์ เวลาเปิด 25 ไมโครวินาที เวลาปิด 1,600  
ไมโครวินาที ความต่างศักย์วงจรเปิด 90 โวลต์ ถ่ายด้วยกำลังขยาย 500 เท่า



ภาพที่ 4.46 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงรอยแตกร้าวขนาดเล็ก ของการทดลองที่ 8  
ใช้โอเล็กโตรดแกรไฟต์ ขั้วลบ กระแสไฟฟ้า 75 แอมแปร์ เวลาเปิด 25 ไมโครวินาที เวลาปิด 1,600  
ไมโครวินาที ความต่างศักย์วงจรเปิด 250 โวลต์ ถ่ายด้วยกำลังขยาย 500 เท่า

จากภาพที่ 4.39 ถึง 4.46 วงกลมสีขาวในภาพคือ รอยแตกร้าวขนาดเล็ก โดยที่ค่ากระแสไฟฟ้า 1.5 แอมแปร์ มีความหนาแน่นของรอยแตกร้าวขนาดเล็ก น้อยกว่าที่ 75 แอมแปร์มาก แสดงให้เห็นว่ากระแสไฟฟ้ามีผลต่อลักษณะ และความหนาแน่นของรอยแตกร้าวขนาดเล็กมากที่สุด ที่น่าสังเกตคือ การทดลองที่ 7 และ 8 ที่ถึงแม้ว่าจะใช้ค่ากระแสไฟฟ้า 75 แอมแปร์ กลับมีลักษณะ และความหนาแน่น ของรอยแตกร้าวขนาดเล็ก ที่น้อยกว่า การทดลองที่ 5 และ 6 แสดงถึงความสำคัญของเวลาปิด ว่าถ้าหากใช้ค่าเวลาปิดสูง (ค่าปัจจัยประสิทธิภาพต่ำ) จะเหมาะกับการสปาร์คทั้งสแตนคาร์ไบด์มากที่สุด ส่วนผลกระทบจากความต่างศักย์วงจรเปิดนั้น ไม่แสดงออกมาอย่างชัดเจนเท่าที่ควร