

สารบัญภาพประกอบ

ภาพที่	หน้า
2.1 เครื่องกักโลหะด้วยไฟฟ้า.....	4
2.2 หลักการทำงานเบื้องต้นของเครื่องกักโลหะด้วยไฟฟ้า	6
2.3 ขั้นตอนการทดลองด้วยวิธีทาทุชิ	10
2.4 อิเล็กโตรดแกรไฟต์	13
2.5 อิเล็กโตรดทองแดง-ทังสเทน	14
2.6 ทังสเทนคาร์ไบด์.....	15
2.7 ตัวอย่างภาพรอยแตกร้าวขนาดเล็ก บนพื้นผิวบริเวณที่ทำการสปาร์คของ ทังสเทนคาร์ไบด์ จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงรอยแตกร้าวขนาดเล็ก ใช้อิเล็กโตรดทองแดง-ทังสเทน ขั้วลบ ค่าปัจจัยประสิทธิภาพ 11 % กระแสไฟฟ้า 6 แอมแปร์ ความต่างศักย์วงจรเปิด 90 โวลต์ ถ่ายด้วย กำลังขยาย 500 เท่า	18
3.1 ชิ้นงานทังสเทนคาร์ไบด์ ที่ใช้ในการทดลอง	21
3.2 ตัวอย่างของ อิเล็กโตรดแกรไฟต์ ที่ใช้ในการทดลอง	22
3.3 เครื่องกักโลหะด้วยไฟฟ้า ที่ใช้ในการทดลอง.....	22
3.4 ขั้นตอนแผนงานวิจัย.....	24
3.5 ตัวอย่างแผนภูมิผลกระทบหลัก ของแต่ละตัวแปร สำหรับอัตราการขาด เนื่องงาน	33
3.6 แผนภูมิการแจกแจงความน่าจะเป็นของ $F_{0.05,1,4}$	47
3.7 ตัวอย่างภาพการนํารอยแตกร้าวขนาดเล็ก ที่จุด A คือจุดสมมุติรอยแตกที่มี ความกว้าง 3 มิลลิเมตร และ ที่จุด B คือจุดสมมุติรอยแตกที่มีความกว้าง น้อยกว่า 2 มิลลิเมตร	53
4.1 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยประสิทธิภาพ และอัตราการ ขาดเนื่องงาน (การทดลองปรับค่าเวลาเปิด และให้เวลาปิดคงที่)	58
4.2 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยประสิทธิภาพ และความยาวรวม ของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่ (การทดลองปรับค่าเวลาเปิด และให้เวลา ปิดคงที่)	59

4.3	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงรอยแตกร้าวขนาดเล็ก ใช้อิเล็กโตรดแกรไฟต์ขั้วบวก กระแสไฟฟ้า 6 แอมแปร์ ความต่างศักย์ วงจรเปิด 90 โวลต์ ถ่ายด้วยกำลังขยาย 500 เท่า โดยภาพ (ก) ปัจจัยประสิทธิภาพ 7 % (ข) ปัจจัยประสิทธิภาพ 89 %	59
4.4	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงรอยแตกร้าวขนาดเล็ก ใช้อิเล็กโตรดทองแดง-แกรไฟต์ ขั้วบวก กระแสไฟฟ้า 6 แอมแปร์ ความต่างศักย์วงจรเปิด 90 โวลต์ ถ่ายด้วยกำลังขยาย 500 เท่า โดยภาพ (ก) ปัจจัยประสิทธิภาพ 7 % (ข) ปัจจัยประสิทธิภาพ 89 %	60
4.5	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงรอยแตกร้าวขนาดเล็ก ใช้อิเล็กโตรดทองแดง-ทังสเตน ขั้วบวก กระแสไฟฟ้า 6 แอมแปร์ ความต่างศักย์วงจรเปิด 90 โวลต์ ถ่ายด้วยกำลังขยาย 500 เท่า โดยภาพ (ก) ปัจจัยประสิทธิภาพ 7 % (ข) ปัจจัยประสิทธิภาพ 67 %	60
4.6	แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยประสิทธิภาพ และอัตราการ ขจัดเนื้องาน (การทดลองปรับค่าเวลาปิด และให้เวลาเปิดคงที่)	65
4.7	แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยประสิทธิภาพ และความยาว รวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่ (การทดลองปรับค่าเวลาปิด และให้ เวลาเปิดคงที่)	66
4.8	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงรอยแตกร้าวขนาดเล็ก ใช้อิเล็กโตรดแกรไฟต์ ขั้วบวก กระแสไฟฟ้า 6 แอมแปร์ ความต่างศักย์ วงจรเปิด 90 โวลต์ ถ่ายด้วยกำลังขยาย 500 เท่า โดยภาพ (ก) ปัจจัยประสิทธิภาพ 2 % (ข) ปัจจัยประสิทธิภาพ 93 %	66
4.9	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงรอยแตกร้าวขนาดเล็ก ใช้อิเล็กโตรดทองแดง-แกรไฟต์ ขั้วบวก กระแสไฟฟ้า 6 แอมแปร์ ความต่างศักย์วงจรเปิด 90 โวลต์ ถ่ายด้วยกำลังขยาย 500 เท่า โดยภาพ (ก) ปัจจัยประสิทธิภาพ 2 % (ข) ปัจจัยประสิทธิภาพ 93 %	67
4.10	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงรอยแตกร้าวขนาดเล็ก ใช้อิเล็กโตรดทองแดง-ทังสเตน ขั้วบวก กระแสไฟฟ้า 6 แอมแปร์ ความต่างศักย์วงจรเปิด 90 โวลต์ ถ่ายด้วยกำลังขยาย 500 เท่า โดยภาพ (ก) ปัจจัยประสิทธิภาพ 2 % (ข) ปัจจัยประสิทธิภาพ 93 %	67

4.11	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงรอยแตกร้าวขนาดเล็ก ใช้อิเล็กโตรดแกรไฟต์ ขั้วบวก กระแสไฟฟ้า 6 แอมแปร์ ความต่างศักย์ วงจรเปิด 90 โวลต์ ค่าปัจจัยประสิทธิภาพ 11 % ถ่ายด้วยกำลังขยาย 500 เท่า โดยภาพ (ก) ขั้วบวก (ข) ขั้วลบ	68
4.12	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงรอยแตกร้าวขนาดเล็ก ใช้อิเล็กโตรดทองแดง-แกรไฟต์ ขั้วบวก กระแสไฟฟ้า 6 แอมแปร์ ความต่างศักย์วงจรเปิด 90 โวลต์ ค่าปัจจัยประสิทธิภาพ 11 % ถ่ายด้วยกำลังขยาย 500 เท่า โดยภาพ (ก) ขั้วบวก (ข) ขั้วลบ	69
4.13	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงรอยแตกร้าวขนาดเล็กใช้ อิเล็กโตรดทองแดง-ทังสเทน ขั้วบวก กระแสไฟฟ้า 6 แอมแปร์ ความต่างศักย์วงจรเปิด 90 โวลต์ ค่าปัจจัยประสิทธิภาพ 11 % ถ่ายด้วยกำลังขยาย 500 เท่า โดยภาพ (ก) ขั้วบวก (ข) ขั้วลบ	69
4.14	แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์วงจรเปิด และอัตราการกัดกร่อน.....	71
4.15	แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์วงจรเปิด และอัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโตรด	72
4.16	แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์วงจรเปิด และความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่.....	72
4.17	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงรอยแตกร้าวขนาดเล็ก ใช้อิเล็กโตรดแกรไฟต์ ขั้วลบ ค่าปัจจัยประสิทธิภาพ 11 % กระแสไฟฟ้า 12 แอมแปร์ ถ่ายด้วยกำลังขยาย 500 เท่าโดยภาพ (ก) ความต่างศักย์ วงจรเปิด 90 โวลต์ (ข) ความต่างศักย์วงจรเปิด 250 โวลต์.....	73
4.18	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงรอยแตกร้าวขนาดเล็ก ใช้อิเล็กโตรดทองแดง-แกรไฟต์ ขั้วลบ ค่าปัจจัยประสิทธิภาพ 11 % กระแสไฟฟ้า 12 แอมแปร์ ถ่ายด้วยกำลังขยาย 500 เท่า โดยภาพ (ก) ความต่างศักย์วงจรเปิด 90 โวลต์ (ข) ความต่างศักย์วงจรเปิด 250 โวลต์	73

4.19	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงรอยแตกร้าวขนาดเล็ก ใช้อิเล็กโตรดทองแดง-ทังสเตน ขั้วลบ ค่าปัจจัยประสิทธิภาพ 11 % กระแสไฟฟ้า 12 แอมแปร์ ถ่ายด้วยกำลังขยาย 500 เท่า โดยภาพ (ก) ความต่างศักย์วงจรเปิด 90 โวลต์ (ข) ความต่างศักย์วงจรเปิด 250 โวลต์	74
4.20	แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า และอัตราการขจัดเนื้องาน.....	77
4.21	แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า และอัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโตรด	78
4.22	แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า และความหนาผิวเฉลี่ย	78
4.23	แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า และความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่.....	79
4.24	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงรอยแตกร้าวขนาดเล็ก ใช้อิเล็กโตรดแกรไฟต์ ขั้วลบ ค่าปัจจัยประสิทธิภาพ 11 % ความต่างศักย์วงจรเปิด 90 โวลต์ ถ่ายด้วยกำลังขยาย 500 เท่า โดยภาพ (ก) กระแสไฟฟ้า 6 แอมแปร์ (ข) กระแสไฟฟ้า 50 แอมแปร์	79
4.25	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงรอยแตกร้าวขนาดเล็ก ใช้อิเล็กโตรดทองแดง-แกรไฟต์ ขั้วลบ ค่าปัจจัยประสิทธิภาพ 11 % ความต่างศักย์วงจรเปิด 90 โวลต์ ถ่ายด้วยกำลังขยาย 500 เท่า โดยภาพ (ก) กระแสไฟฟ้า 6 แอมแปร์ (ข) กระแสไฟฟ้า 50 แอมแปร์	80
4.26	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงรอยแตกร้าวขนาดเล็ก ใช้อิเล็กโตรดทองแดง-ทังสเตน ขั้วลบ ค่าปัจจัยประสิทธิภาพ 11 % ค่าความต่างศักย์ 90 โวลต์ ถ่ายด้วยกำลังขยาย 500 เท่า โดยภาพ (ก) กระแสไฟฟ้า 6 แอมแปร์ (ข) กระแสไฟฟ้า 50 แอมแปร์	80
4.27	แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ผลกระทบหลักของ ตัวแปรกระแสไฟฟ้า, เวลาปิด และความต่างศักย์วงจรเปิด ต่ออัตราการขจัดเนื้องาน.....	84
4.28	แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ผลกระทบหลักของ ตัวแปรกระแสไฟฟ้า, เวลาปิด และความต่างศักย์วงจรเปิด ต่ออัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโตรด....	85

4.29	แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ผลกระทบหลักของ ตัวแปรกระแสไฟฟ้า, เวลาปิด และความต่างศักย์วงจรเปิด ต่อความยาวรวมของรอยแตกร้าว ขนาดเล็กต่อพื้นที่	87
4.30	แผนภูมิการแจกแจงความน่าจะเป็นของ $F_{0.05,1,4}$ โดยค่า F ที่คำนวณได้ มีค่า ที่อยู่นอกพื้นที่แห่งการยอมรับ.....	91
4.31	เส้นจำนวนแสดงการเปรียบเทียบกันระหว่างค่าเฉลี่ย, ผลค่าหวัง และการ ทดลองที่ 8 สำหรับอัตราการขจัดเนื้องาน.....	92
4.32	แผนภูมิการแจกแจงความน่าจะเป็นของ $F_{0.05,1,4}$ โดยค่า F ที่คำนวณได้ มีค่า ที่อยู่ในพื้นที่แห่งการยอมรับ	94
4.33	เส้นจำนวนแสดงการเปรียบเทียบกันระหว่างค่าเฉลี่ย, ผลค่าหวัง และการ ทดลองที่ 7 สำหรับอัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโตรด.....	95
4.34	แผนภูมิการแจกแจงความน่าจะเป็นของ $F_{0.05,1,4}$ โดยค่า F ที่คำนวณได้ มีค่า ที่อยู่ในพื้นที่แห่งการยอมรับ	97
4.35	เส้นจำนวนแสดงการเปรียบเทียบกันระหว่างค่าเฉลี่ย, ผลค่าหวัง และการ ทดลองที่ 3 สำหรับความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่.....	98
4.36	แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ผลกระทบหลัก ต่ออัตราการขจัดเนื้องาน เปรียบเทียบระดับกันระหว่าง 2 ระดับ และ 3 ระดับ	101
4.37	แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ผลกระทบหลักของ ต่ออัตราการ สึกกร่อนของอิเล็กโตรด เปรียบเทียบระดับกันระหว่าง 2 ระดับ และ 3 ระดับ .	102
4.38	แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ผลกระทบหลักของ ต่อความยาวรวม ของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่ เปรียบเทียบระดับกันระหว่าง 2 ระดับ และ 3 ระดับ	103
4.39	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงรอยแตกร้าวขนาดเล็ก ของการ ทดลองที่ 1 ใช้อิเล็กโตรดแกรไฟต์ ขั้วลบ กระแสไฟฟ้า 1.5 แอมแปร์เวลาเปิด 25 μ s เวลาปิด 2 μ s ความต่างศักย์วงจรเปิด 90 โวลต์ ถ่ายด้วยกำลังขยาย 500 เท่า	104

4.40	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงรอยแตกร้าวขนาดเล็ก ของการ ทดลองที่ 2 ใช้อิเล็กทรอนิกส์เกรดไฟต์ ซีวอลบ กระแสไฟฟ้า 1.5 แอมแปร์ เวลาเปิด 25 μ s เวลาปิด 2 μ s ความต่างศักย์วงจรเปิด 250 โวลต์ ถ่ายด้วยกำลังขยาย 500 เท่า	104
4.41	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงรอยแตกร้าวขนาดเล็ก ของการ ทดลองที่ 3 ใช้อิเล็กทรอนิกส์เกรดไฟต์ ซีวอลบ กระแสไฟฟ้า 1.5 แอมแปร์ เวลาเปิด 25 μ s เวลาปิด 1,600 μ s ความต่างศักย์วงจรเปิด 90 โวลต์ ถ่ายด้วยกำลัง ขยาย 500 เท่า	105
4.42	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงรอยแตกร้าวขนาดเล็ก ของการ ทดลองที่ 4 ใช้อิเล็กทรอนิกส์เกรดไฟต์ ซีวอลบ กระแสไฟฟ้า 1.5 แอมแปร์ เวลาเปิด 25 μ s เวลาปิด 1,600 μ s ความต่างศักย์วงจรเปิด 250 โวลต์ ถ่ายด้วยกำลัง ขยาย 500 เท่า	105
4.43	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงรอยแตกร้าวขนาดเล็ก ของการ ทดลองที่ 5 ใช้อิเล็กทรอนิกส์เกรดไฟต์ ซีวอลบ กระแสไฟฟ้า 75 แอมแปร์ เวลาเปิด 25 μ s เวลาปิด 2 μ s ความต่างศักย์วงจรเปิด 90 โวลต์ ถ่ายด้วยกำลังขยาย 500 เท่า	106
4.44	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงรอยแตกร้าวขนาดเล็ก ของการ ทดลองที่ 6 ใช้อิเล็กทรอนิกส์เกรดไฟต์ ซีวอลบ กระแสไฟฟ้า 75 แอมแปร์ เวลาเปิด 25 μ s เวลาปิด 2 μ s ความต่างศักย์วงจรเปิด 250 โวลต์ ถ่ายด้วยกำลังขยาย 500 เท่า	106
4.45	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงรอยแตกร้าวขนาดเล็ก ของการ ทดลองที่ 7 ใช้อิเล็กทรอนิกส์เกรดไฟต์ ซีวอลบ กระแสไฟฟ้า 75 แอมแปร์ เวลาเปิด 25 μ s เวลาปิด 1,600 μ s ความต่างศักย์วงจรเปิด 90 โวลต์ ถ่ายด้วยกำลัง ขยาย 500 เท่า	107
4.46	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงรอยแตกร้าวขนาดเล็ก ของการ ทดลองที่ 8 ใช้อิเล็กทรอนิกส์เกรดไฟต์ ซีวอลบ กระแสไฟฟ้า 75 แอมแปร์ เวลาเปิด 25 μ s เวลาปิด 1,600 μ s ความต่างศักย์วงจรเปิด 250 โวลต์ ถ่ายด้วยกำลัง ขยาย 500 เท่า	107