



การปรับปรุงพื้นผิวของโลหะผสมไทเทเนียม ด้วย EDM ในสารละลาย
เอทานอลเอมีน โดยใช้วัสดุอิเล็กโทรดต่างชนิด

โดย

นางสาวนงลักษณ์ เพชรรุณ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ปีการศึกษา 2560
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

การปรับปรุงพื้นผิวของโลหะผสมไทเทเนียม ด้วย EDM ในสารละลาย
เอทานอลเอมีน โดยใช้วัสดุอิเล็กโตรดต่างชนิด

โดย

นางสาวนงลักษณ์ เพชรธูณ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ปีการศึกษา 2560
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

SURFACE MODIFICATION ON TITANIUM ALLOY WITH EDM IN
ETHANOLAMINE SOLUTION USING DIFFERENT ELECTRODE
MATERIALS

BY

MISS NONGLUK PECHROON



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING IN
INDUSTRIAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF INDUSTRIAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
THAMMASAT UNIVERSITY
ACADEMIC YEAR 2017
COPYRIGHT OF THAMMASAT UNIVERSITY

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์

วิทยานิพนธ์

ของ

นางสาวนงลักษณ์ เพชรรุณ

เรื่อง

การปรับปรุงพื้นผิวของโลหะผสมไทเทเนียม ด้วย EDM ในสารละลายเอทานอลเอมีน
โดยใช้วัสดุอิเล็กโทรดต่างชนิด

ได้รับการตรวจสอบและอนุมัติ ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

เมื่อ วันที่ 10 กรกฎาคม พ.ศ. 2561

ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(อาจารย์ ดร. สุภมาศ สุขตานนท์)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์




(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อภิวัฒน์ มุตตามระ)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชัย จันทร์มณี)

คณบดี



(รองศาสตราจารย์ ดร. ชีร์ เจียศิริพงษ์กุล)

| | |
|-----------------------------|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การปรับปรุงพื้นผิวของโลหะผสมไทเทเนียม ด้วย EDM ในสารละลายเอทานอลเอมีน โดยใช้วัสดุอิเล็กโทรดต่างชนิด |
| ชื่อผู้เขียน | นางสาวนงลักษณ์ เพชรรุณ |
| ชื่อปริญญา | วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต |
| สาขาวิชา/คณะ/มหาวิทยาลัย | สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อภิวัฒน์ มุตตามระ |
| ปีการศึกษา | 2560 |

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการปรับปรุงพื้นผิวของโลหะผสมไทเทเนียมด้วยกระบวนการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าในสารละลายเอทานอลเอมีน โดยใช้วัสดุอิเล็กโทรดไทเทเนียมเกรด 2 และกราไฟท์อีดีเอ็ม 3 ซึ่งปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ ขั้วอิเล็กโทรด ค่ากระแสไฟฟ้า เวลาเปิด และปัจจัยประสิทธิภาพ ความหนาของชั้นเคลือบผิวหลังกระบวนการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้อิเล็กโทรดไทเทเนียมและกราไฟท์ มีค่าความหนาเท่ากับ 35 ไมโครเมตร และ 52 ไมโครเมตร ตามลำดับค่าความแข็งระดับจุลภาควิกเกอร์ที่บริเวณชั้นเคลือบผิวโดยเฉลี่ยเท่ากับ 1123 วิคเกอร์ส และ 906 วิคเกอร์สตามลำดับ ผลของการวิเคราะห์สารประกอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จากเครื่องเอ็กซ์อาร์ดีพบสารประกอบไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) และไทเทเนียมคาร์ไบด์ไนไตรด์ (TiCN) บริเวณชั้นเคลือบผิวและยังพบสารไทเทเนียมคาร์ไบด์ (TiC) เมื่อใช้อิเล็กโทรดกราไฟท์

คำสำคัญ: กระบวนการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า, เอทานอลเอมีน, การเคลือบผิว, ไทเทเนียมไนไตรด์, ไทเทเนียมคาร์ไบด์ไนไตรด์

| | |
|--------------------------------|--|
| Thesis Title | SURFACE MODIFICATION ON TITANIUM ALLOY WITH EDM IN ETHANALAMINE SOLUTION USING DIFFERENT ELECTRODE MATERIALS |
| Author | Miss Nongluk Pechroon |
| Degree | Master of Engineering |
| Major Field/Faculty/University | Industrial Engineering Faculty of Engineering Thammasat University |
| Thesis Advisor | Asst. Prof. Dr. Apiwat Muttamara |
| Academic Years | 2017 |

ABSTRACT

The objective of this research is to improve the surface of titanium alloys with Electrical Discharge Machining (EDM) in ethanolamine solution using titanium grade 2 and graphite grade EDM 3 for electrode materials. The EDM process factors were currents, on time, and duty factors. The results showed that the modified layer can be created on a surface area, the thickness of the coating layers are 35 μm for a titanium electrode and 52 μm for a graphite electrode. The average micro-hardness for the modified layer are 1123 HV when using the titanium electrode and 906 HV when using the graphite electrode. The results of X-ray diffraction shows that titanium nitride (TiN) and titanium carbonitride (TiCN) are found on the modified layer when using the titanium electrode. Titanium carbide (TiC) product is also found when using the graphite electrode.

Keywords: Electrical Discharge Machine, Ethanolamine, Coating, Titanium Nitride, Titanium Carbonitride

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความอนุเคราะห์ที่ดีจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อภิวัฒน์ มุตตามระ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้คำแนะนำ ชี้แนะแนวทางและให้คำปรึกษา วิธีการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น อีกทั้งยังได้รับความกรุณาในการปรับปรุง แก้ไขเนื้อหา แนะนำแนวทางในการจัดทำ วิทยานิพนธ์ และให้กำลังใจที่ดีแก่ผู้ดำเนินงานวิจัยเสมอมาตลอดการดำเนินงานการวิจัยทำให้งานวิจัย สำเร็จลุล่วงไปได้ จึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ อาจารย์ ดร. สุภมาศ สุชาติตานนท์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชัย จันทร์มณี ที่ให้ความกรุณาเป็นกรรมการสอบในครั้งนี้ ที่ให้ข้อคิดข้อเสนอแนะ และให้คำแนะนำในการปรับปรุงเนื้อหาให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่สนับสนุนทุนสนับสนุนโครงการวิจัยเพื่อทำวิทยานิพนธ์ระดับบัณฑิตศึกษา และขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่าน ที่ได้ ประสิทธิ์ประสาทความรู้ตลอดเวลา และขอขอบคุณ คุณชมพูนุช พิกุล เจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรม อุตสาหกรรม ในการติดต่อประสานงาน และช่วยตรวจรูปแบบเล่มจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณนิพนธ์ ชุ่มเขย และคุณอนุพงษ์ พรพิจิตร เจ้าหน้าที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะ และวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ที่ช่วยอำนวยความสะดวก และทดสอบชิ้นงานตลอดการศึกษา ในครั้งนี้ให้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณจรรยาพรธน ทองขัน รุ่นพี่นักศึกษาปริญญาเอก ที่ช่วยให้คำปรึกษาและ คำแนะนำเกี่ยวกับขั้นตอนของกระบวนการกักตอร์คด้วยไฟฟ้า และช่วยสอนใช้เครื่องกักตอร์คด้วย ไฟฟ้า อีกทั้งยังคอยให้กำลังใจตั้งแต่เริ่มทำงานวิจัยจนสำเร็จ

สุดท้ายนี้ผู้ดำเนินการวิจัยหวังว่า วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจศึกษา หรือเป็นแนวทางในการศึกษาเพิ่มเติม คุณประโยชน์ใดๆ ที่เกิดขึ้นขอมอบแด่ บิดา มารดา ครอบครัว ญาติมิตร คนรอบข้าง และเพื่อนๆ ที่ช่วยส่งเสริม สนับสนุน ให้กำลังใจ ผู้วิจัยมาโดยตลอด และเป็น แรงผลักดันให้การวิจัยในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นางสาวนงลักษณ์ เพชรรุณ

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย | (1) |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | (2) |
| กิตติกรรมประกาศ | (3) |
| สารบัญตาราง | (8) |
| สารบัญภาพ | (9) |
| รายการสัญลักษณ์และคำย่อ | (11) |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญ | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ | 2 |
| 1.3 ขอบเขตการวิจัย | 2 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 3 |
| 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน | 3 |
| 1.6 ระยะเวลาดำเนินงานวิจัย | 4 |
| บทที่ 2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 6 |
| 2.1 ประวัติความเป็นมาของเครื่องกัตอาร์คด้วยไฟฟ้า | 6 |
| 2.2 หลักการทำงานของกระบวนการกัตอาร์คด้วยไฟฟ้า | 6 |

| | |
|--|----|
| 2.3 ส่วนประกอบของเครื่องกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า | 7 |
| 2.3.1 ระบบเซอร์โว | 7 |
| 2.3.2 อิเล็กทรอนิกส์ | 8 |
| 2.3.3 ฐานรอง | 10 |
| 2.3.4 ระบบไดอิเล็กตริก | 10 |
| 2.3.5 แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า | 12 |
| 2.4 ขั้นตอนการสปาร์คขึ้นงาน | 12 |
| 2.4.1 การใส่แรงดันไฟฟ้า | 12 |
| 2.4.2 การสูญเสียความต้านทาน | 12 |
| 2.4.3 การกัดอาร์คหลอมละลาย | 12 |
| 2.4.4 การเย็นตัว | 12 |
| 2.4.5 การกลับสู่ความเป็นฉนวน | 13 |
| 2.5 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องในกระบวนการกัดโลหะด้วยไฟฟ้า | 13 |
| 2.5.1 กระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์วงจรเปิด | 13 |
| 2.5.2 เวลาเปิดและเวลาปิด | 14 |
| 2.6 ชั้นหลอมสีขาว (White layer) | 15 |
| 2.7 การประเมินผลด้วยเครื่องมือ | 15 |
| 2.7.1 ลักษณะการหลอม ลักษณะรอยแตกกร้าว | 15 |
| 2.7.2 ลักษณะความหนาของชั้นเคลือบผิว | 16 |
| 2.7.3 ตรวจสอบหาสารประกอบบริเวณพื้นผิวหลังกัดอาร์ค | 16 |
| 2.7.4 การตรวจวัดความแข็งบริเวณพื้นผิวขึ้นงานหลังกัดอาร์ค | 17 |
| 2.7.5 การวัดความหยาบผิวเฉลี่ย | 18 |
| 2.8 วรรณกรรมปริทรรศน์ | 19 |
| | |
| บทที่ 3 วิธีการวิจัย | 21 |
| | |
| 3.1 แผนการวิจัยดำเนินงาน | 21 |
| 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง | 21 |
| 3.2.1 ชิ้นงานสำหรับการวิจัย | 21 |
| 3.2.2 อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการทดลอง | 22 |

| | | |
|---------|---|----|
| 3.2.3 | ของเหลวตัวกลาง | 23 |
| 3.2.4 | เครื่องกักโลหะด้วยไฟฟ้า | 23 |
| 3.2.5 | ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง | 24 |
| 3.3 | ดำเนินการทดลองกัตอาร์คด้วยไฟฟ้า | 24 |
| 3.3.1 | จัดเตรียมวัสดุอุปกรณ์สำหรับการทดลอง | 24 |
| 3.3.2 | จัดเตรียมวัสดุอุปกรณ์สำหรับการทดลอง | 25 |
| 3.3.3 | เตรียมชิ้นงานสำหรับศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาค | 25 |
| 3.3.4 | วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค | 26 |
| 3.3.5 | บันทึกและวิเคราะห์ผลการทดลอง | 26 |
| 3.3.6 | สรุปค่าตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง | 26 |
| 3.4 | เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาค | 26 |
| 3.4.1 | กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด | 26 |
| 3.4.2 | กล้องจุลทรรศน์แบบแสง | 27 |
| 3.4.3 | เครื่องเอ็กซ์อาร์ตี | 28 |
| 3.4.4 | ตรวจวัดความแข็งด้วยเครื่อง | 28 |
| 3.4.5 | วัดความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) | 29 |
| บทที่ 4 | ผลการวิจัยและอภิปรายผล | 30 |
| 4.1 | ความหยาบผิว | 30 |
| 4.1.1 | ความหยาบผิวเมื่อใช้ขั้วอิเล็กโตรดต่างกัน | 30 |
| 4.1.2 | ความหยาบผิวเมื่อกระแสไฟฟ้าต่างกัน | 35 |
| 4.1.3 | ความหยาบผิวเมื่อปัจจัยประสิทธิภาพต่างกัน | 37 |
| 4.1.4 | ความหยาบผิวเมื่อใช้อิเล็กโตรดต่างกัน | 39 |
| 4.2 | รอยแตกร้าว | 41 |
| 4.2.1 | รอยแตกร้าวเมื่อใช้ขั้วอิเล็กโตรดต่างกัน | 41 |
| 4.2.2 | รอยแตกร้าวเมื่อกระแสไฟฟ้าต่างกัน | 43 |
| 4.2.3 | รอยแตกร้าวเมื่อปัจจัยประสิทธิภาพต่างกัน | 44 |
| 4.2.4 | รอยแตกร้าวเมื่อใช้อิเล็กโตรดต่างกัน | 47 |
| 4.3 | ความหนาของชั้นเคลือบผิวเมื่อค่าปัจจัยประสิทธิภาพต่างกัน | 48 |

| | |
|--|----|
| 4.4 การวิเคราะห์ธาตุและสารประกอบเมื่ออิเล็กโตรดต่างชนิดกันที่ปัจจัย ประสิทธิภาพ 75% | 52 |
| 4.4.1 การวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคอิตีเอส | 52 |
| 4.4.2 การวิเคราะห์สารประกอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ | 53 |
| 4.5 ความแข็งของชั้นเคลือบผิวเมื่อใช้ขั้วอิเล็กโตรดต่างกัน | 56 |
| 4.6 การอภิปรายผลการทดลอง | 57 |
| | |
| บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ | 60 |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง | 60 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ | 60 |
| | |
| รายการอ้างอิง | 61 |
| | |
| ภาคผนวก | |
| ภาคผนวก ก แผนการทดลองและการประเมินผล | 65 |
| ภาคผนวก ข การเตรียมชิ้นงานเพื่อศึกษาโครงสร้างชั้นเคลือบผิว | 66 |
| ภาคผนวก ค ภาพจากการวัดความหยาบผิวเฉลี่ย | 68 |
| ภาคผนวก ก ความหนาของชั้นเคลือบผิว | 69 |
| | |
| ประวัติผู้เขียน | 70 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|--|------|
| 1.1 แผนการดำเนินงาน | 4 |
| 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมไทเทเนียมเกรด 5 | 21 |
| 3.2 ส่วนผสมทางเคมีของไทเทเนียมเกรด 2 | 22 |
| 3.3 สมบัติของอิเล็กโตรด | 22 |
| 3.4 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง | 24 |
| 3.5 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองเบื้องต้น | 25 |
| 4.1 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองในกระบวนการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าบนชิ้นงานโลหะผสมไทเทเนียมในสารละลายเอทานอลเอมีนเมื่อใช้ขั้วอิเล็กโตรดต่างกัน | 31 |
| 4.2 ผลการวัดความหยาบผิวเฉลี่ยเมื่อใช้ขั้วอิเล็กโตรดต่างกัน กระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์ ปัจจัยประสิทธิภาพ 50% | 33 |
| 4.3 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองในกระบวนการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าบนชิ้นงานโลหะผสมไทเทเนียมในสารละลายเอทานอลเอมีนเมื่อใช้กระแสไฟฟ้าต่างกัน | 35 |
| 4.4 ผลการวัดความหยาบผิวเฉลี่ยเมื่อใช้ค่ากระแสไฟฟ้าต่างกันปัจจัยประสิทธิภาพ 50% | 35 |
| 4.5 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองเมื่อค่าปัจจัยประสิทธิภาพที่ต่างกัน | 37 |
| 4.6 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย ที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 25%, 50% และ 75% ที่กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ | 38 |
| 4.7 ความหนาชั้นเคลือบผิว ที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 25%, 50% และ 75% กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ | 48 |

สารบัญภาพ

| ภาพที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.1 ส่วนประกอบของเครื่องกัดอาร์ค | 7 |
| 2.2 ขั้นตอนในการสปาร์คชิ้นงานในแต่ละครั้ง | 13 |
| 2.3 ช่วงระยะเวลาเปิด และปิดเพื่อให้เกิดการถ่ายเทประจุ | 14 |
| 2.4 ชั้นหลอมสีขาวที่เกิดจากการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า | 15 |
| 2.5 กฎของแบรกก์ | 16 |
| 2.6 รอยกดในการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส | 18 |
| 2.7 กราฟและสมการคำนวณความหยาบผิวเฉลี่ย | 19 |
| 3.1 เครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า | 23 |
| 3.2 วิธีติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง | 24 |
| 3.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด | 27 |
| 3.4 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง | 27 |
| 3.5 เครื่องเอ็กซ์อาร์ตี | 28 |
| 3.6 เครื่องวัดความแข็ง | 28 |
| 3.7 เครื่อง LEXT 3D Measuring Laser Microscope OLS5000 | 29 |
| 4.1 พื้นผิวหลังกระบวนการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าเมื่อใช้แท่งไทเทเนียม | 31 |
| 4.2 พื้นผิวหลังกระบวนการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าเมื่อใช้กราไฟท์ | 31 |
| 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสีกับความหนาของชั้นฟิล์มไทเทเนียมออกไซด์ | 33 |
| 4.4 ความหยาบผิวเฉลี่ยเมื่อใช้ขั้วอิเล็กโตรดต่างชนิดกัน | 34 |
| 4.5 การไหลของกระแสไฟฟ้าเมื่อใช้ขั้วอิเล็กโตรดต่างกัน | 34 |
| 4.6 ความหยาบผิวเมื่อค่ากระแสไฟฟ้าต่างกัน | 36 |
| 4.7 ความหยาบผิวเฉลี่ย เมื่อปรับค่าปัจจัยประสิทธิภาพ | 38 |
| 4.8 ภาพความถี่ต่ำ | 39 |
| 4.9 การหลุดร่อนของอนุภาคจากความร้อน | 40 |
| 4.10 อิเล็กโตรด ไทเทเนียมและกราไฟท์ หลังกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า | 40 |
| 4.11 ลักษณะการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออน เมื่อใช้ขั้วอิเล็กโตรดต่างกัน | 42 |

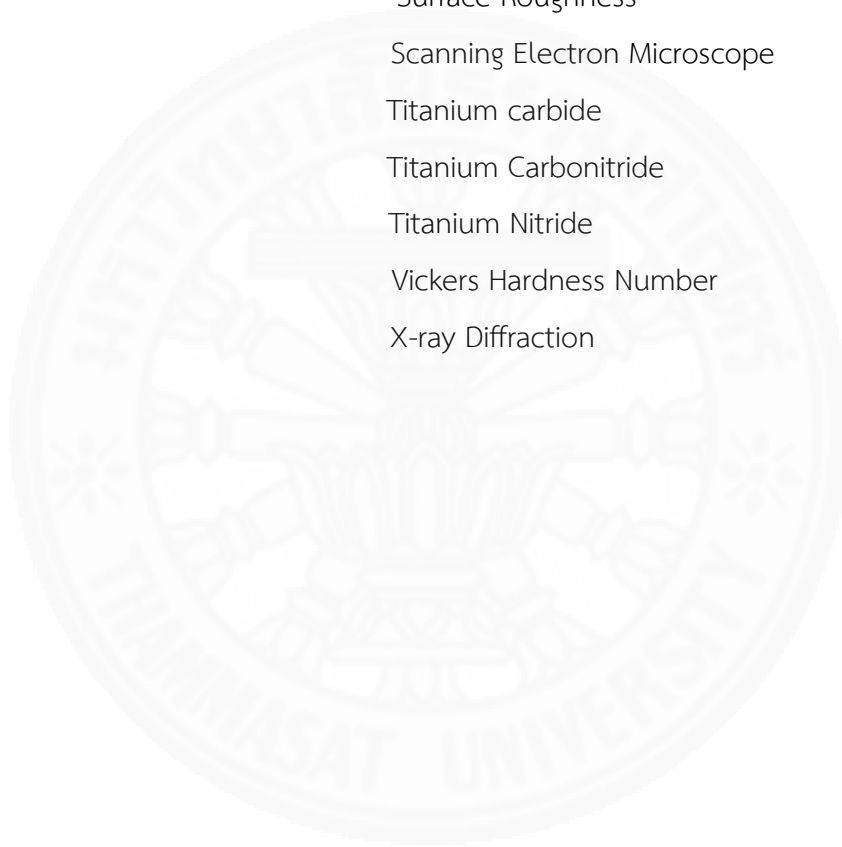
| | | |
|------|---|----|
| 4.12 | อิเล็กทรอนิกส์โทรดไทเทเนียม กระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์ ปัจจัยประสิทธิภาพ 50% | 42 |
| 4.13 | อิเล็กทรอนิกส์กราฟไฟท์ กระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์ ปัจจัยประสิทธิภาพ 50% | 42 |
| 4.14 | อิเล็กทรอนิกส์โทรดไทเทเนียมขั้วลบ ปัจจัยประสิทธิภาพ 50% | 43 |
| 4.15 | อิเล็กทรอนิกส์กราฟไฟท์ขั้วลบ ปัจจัยประสิทธิภาพ 50% | 43 |
| 4.16 | อิเล็กทรอนิกส์โทรดไทเทเนียมขั้วลบ กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ | 45 |
| 4.17 | อิเล็กทรอนิกส์กราฟไฟท์ขั้วลบ กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ | 46 |
| 4.18 | อิเล็กทรอนิกส์โทรดขั้วลบ กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ ปัจจัยประสิทธิภาพ 75% | 47 |
| 4.19 | พื้นผิวหลังกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า ที่ปรับค่าปัจจัยประสิทธิภาพ | 48 |
| 4.20 | ความหนาของชั้นเคลือบผิว เมื่อปรับค่าปัจจัยประสิทธิภาพ | 49 |
| 4.21 | ความหนาของชั้นเคลือบเมื่อปรับค่าปัจจัยประสิทธิภาพ ที่ใช้แท่งไทเทเนียม กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ | 50 |
| 4.22 | ความหนาของชั้นเคลือบเมื่อปรับค่าปัจจัยประสิทธิภาพ ที่ใช้แท่ง กราไฟท์ กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ | 51 |
| 4.23 | ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคอีดีเอส เมื่อใช้อิเล็กโทรดไทเทเนียม กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ เวลาเปิด 390 ไมโครวินาที ปัจจัยประสิทธิภาพ 75% | 52 |
| 4.24 | ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคอีดีเอส เมื่อใช้อิเล็กโทรด กราไฟท์ กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ เวลาเปิด 390 ไมโครวินาที ปัจจัยประสิทธิภาพ 75% | 52 |
| 4.25 | ผลการวิเคราะห์ XRD ชิ้นงานก่อนกัดอาร์ค | 54 |
| 4.26 | ผลการวิเคราะห์ XRD บริเวณพื้นผิวใช้แท่งไทเทเนียมและกราฟไฟท์ | 55 |
| 4.27 | ความแข็งบริเวณชั้นเคลือบผิวเมื่อใช้ไทเทเนียมและกราฟไฟท์ กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ ปัจจัยประสิทธิภาพ 75% | 56 |
| 4.28 | ความพรุนเมื่อใช้แท่งกราฟไฟท์ กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ ปัจจัยประสิทธิภาพ 75% | 56 |
| 4.29 | รอยกดรูปพีระมิด น้ำหนักกดหัวเพชร 50 gf นาน 20 วินาที ที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 75% | 57 |

รายการสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์

คำเต็ม/คำจำกัดความ

| | |
|------|--------------------------------|
| EDM | Electrical Discharge Machining |
| EDS | Energy Dispersive Spectroscopy |
| Ra | Surface Roughness |
| SEM | Scanning Electron Microscope |
| TiC | Titanium carbide |
| TiCN | Titanium Carbonitride |
| TiN | Titanium Nitride |
| VHN | Vickers Hardness Number |
| XRD | X-ray Diffraction |



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

กระบวนการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า (Electrical Discharge Machining) เป็นกระบวนการที่ได้รับการยอมรับด้านมาตรฐานการผลิตตั้งแต่สมัยสงครามโลกครั้งที่ 2 มาจนถึงปัจจุบัน ซึ่งปัจจุบันกระบวนการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้านิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตแม่พิมพ์ ชิ้นส่วนยานยนต์ วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ รวมไปถึงชิ้นส่วนที่ต้องการการผลิตที่มีความซับซ้อนและแม่นยำเที่ยงตรงสูง จากการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าทำให้เกิดความสนใจในด้านการปรับปรุงคุณสมบัติของพื้นผิวชิ้นงานให้ทนต่อการกัดกร่อน ทนต่อการเสียดสี และปรับปรุงพื้นผิวให้มีความแข็งมากขึ้น โดยชิ้นงานโลหะที่ต้องการปรับปรุงพื้นผิวสำหรับงานวิจัยนี้คือชิ้นงานโลหะไทเทเนียม เนื่องจากไทเทเนียมเป็นโลหะที่ได้รับความนิยมอย่างสูงในปัจจุบันด้วยคุณสมบัติที่มีความแข็งแรงมากกว่าอลูมิเนียมถึง 2 เท่า มีสีเทาขาวเนื้อเงามีน้ำหนักเบากว่าเหล็กถึง 50% ไม่เกิดสนิม และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ใหม่ ไทเทเนียมนิยมใช้ทำเป็นชิ้นส่วนและวัสดุสำหรับอุตสาหกรรมผลิตสินค้าในด้านต่างๆ ได้แก่ ด้านการบินและอวกาศเนื่องจากมีน้ำหนักเบา ด้านการแข่งรถเนื่องจากมีความยืดหยุ่นสูง ด้านการแพทย์เนื่องจากไม่มีการต่อต้านจากระบบภูมิคุ้มกันของร่างกายมนุษย์ ด้านเครื่องใช้ ได้แก่ นาฬิกา และแว่นตาเนื่องจากคุณสมบัติที่ไม่สร้างความระคายเคืองแก่ผิวหนังไม่ทำให้เกิดอาการแพ้ต่างๆ อุตสาหกรรมไทเทเนียมแบ่งออกเป็นหลายเกรดโดยไทเทเนียมเกรด 1 เกรด 2 เกรด 3 และ เกรด 4 มีส่วนประกอบของไทเทเนียมถึง 99% ที่เหลือเป็นโลหะอื่นๆ ส่วนไทเทเนียมเกรด 5 ขึ้นไปมีส่วนประกอบของไทเทเนียม 90% ที่เหลือเป็นอะลูมิเนียม วานาเดียม (Vanadium) คาร์บอน ไฮโดรเจน เหล็ก ไนโตรเจน และออกซิเจน ซึ่งเราเรียกโลหะผสมเหล่านี้รวมๆ ว่า “อัลลอย” (Alloy) การเพิ่มอัลลอยเหล่านี้เข้าไปในเนื้อไทเทเนียมเนื่องจากต้องการให้เนื้อโลหะมีความทนทานในการใช้งานมากขึ้นซึ่งสูงถึง 2 - 3 เท่าเมื่อเทียบกับไทเทเนียมเกรด 1 หรือ เกรด 2 หรือแม้กระทั่งเหล็ก

จากคุณสมบัติของไทเทเนียมที่กล่าวมาจึงเลือกปรับปรุงชิ้นงานโลหะไทเทเนียมเกรด 5 และการเพิ่มความแข็งให้กับพื้นผิวไทเทเนียมในกระบวนการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าจึงเหมาะกับอุตสาหกรรมการบิน และยานยนต์เนื่องจากการคุณสมบัติของไทเทเนียมมีความเบา และมีความแข็งแรงทนทาน

การพัฒนาพื้นผิวของชิ้นงานโลหะผสมไททาเนียมด้วยกระบวนการ EDM เป็นการเคลือบผิว (Surface coating) ให้กับชิ้นงาน โดยอาศัยหลักการเกิดชั้นหลอมสีขาว (White layer) บนผิวของชิ้นงาน หลังจากผ่านกระบวนการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า จะซึ่งบริเวณชั้นหลอมสีขาวนี้จะมีลักษณะแข็งกว่าชิ้นงานปกติ เนื่องจากเป็นชั้นที่หลอมกลับมาใหม่หลังการกัดโลหะด้วยไฟฟ้าและผสมกับคาร์บอน (N. Mohri, 1993) แต่บางครั้งอาจพบรอยแตกกร้าวบนชั้นหลอมนี้ทำให้มีผลต่ออายุการที่สั้นลง (Singh, Maheshwari, 2004; Lee, Rehbach, et al., 2004) ด้วยเหตุนี้จึงต้องปรับปรุงคุณสมบัติของชั้นเคลือบผิวให้มีความแข็งแรงมากขึ้นและลดรอยแตกกร้าว การเพิ่มความแข็งแรงสำหรับการเคลือบผิวทำได้โดยการเคลือบไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) และการเคลือบไทเทเนียมคาร์ไบด์ไนไตรด์ (TiCN) ซึ่งมีการนำมาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม เนื่องจากเป็นชั้นเคลือบที่มีความแข็งแรงสูงมากมีความทนทาน ต้านทานต่อการขีดถู จุดหลอมเหลวสูง ทำให้เครื่องมืออายุการใช้งานที่ยาวนาน และยังมีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำด้วย (Y. Hwang, C. Kuo, et al., 2010) โดยงานวิจัยนี้ใช้กราไฟท์เป็นอิเล็กโทรด และสารละลายเอทานอลเอมีนเป็นตัวกลางในการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าเนื่องจากในสารละลายเอทานอลเอมีนมี ไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบทำให้มีโอกาสเกิดธาตุประกอบไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) และการเคลือบไทเทเนียมคาร์ไบด์ไนไตรด์ (TiCN)

ดังนั้น จุดมุ่งหมายของงานวิจัยนี้คือการปรับปรุงพื้นผิวของชิ้นงานโลหะผสมไทเทเนียมด้วยกระบวนการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า โดยการใช้สารละลายเอทานอลเอมีนเป็นตัวกลางเพื่อให้ได้ชั้นเคลือบผิวที่มีความแข็งแรงมากขึ้น โดยมีธาตุประกอบไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) และไทเทเนียมคาร์ไบด์ไนไตรด์ (TiCN) ในบริเวณชั้นเคลือบผิว

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อปรับปรุงพื้นผิวชิ้นงานโลหะผสมไทเทเนียมด้วยกระบวนการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าในสารละลายเอทานอลเอมีน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ชิ้นงานโลหะที่ใช้ในการทดลองคือโลหะผสมไทเทเนียม (Ti6Al4V)
- 1.3.2 ใช้อิเล็กโทรดไทเทเนียมเกรด 2 และกราไฟท์อีดีเอ็ม 3 ในการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า
- 1.3.3 ใช้สารละลายเอทานอลเอมีนเป็นของเหลวตัวกลาง

1.3.4 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดขึ้นเคลือบผิวในกระบวนการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า ได้แก่ ค่ากระแสไฟฟ้า (Discharge current, Ip) เวลาเปิด (On time, T-on), เวลาปิด (Off-time, T-off) และความต่างศักย์วงจรถัด (Open-circuit voltage, Vg)

1.3.5 การประเมินผลวัดจาก ความหยาบของผิว รอยแตก ความหนา ความแข็ง และสารประกอบไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) และไทเทเนียมคาร์บอนไนไตรด์ (TiCN) ในโครงสร้างชั้นเคลือบผิว

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงโครงสร้างชั้นเคลือบผิวของชิ้นงานโลหะผสมไทเทเนียมหลังกระบวนการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า

1.4.2 พื้นผิวโลหะผสมไทเทเนียมมีคุณสมบัติดีขึ้น

1.4.3 เป็นองค์ความรู้ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมได้

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.5.1 ศึกษาทฤษฎี งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และกระบวนการทำงานของเครื่องกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า

1.5.2 ศึกษาวิธีการใช้งานเครื่องกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า

1.5.2.1 ศึกษาการตั้งค่าและการกำหนดตัวแปรของค่าปัจจัยต่างๆที่ป้อนเข้าไปในเครื่องกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า

1.5.3 จัดเตรียมวัสดุอุปกรณ์สำหรับการทดลอง

1.5.3.1 เตรียมชิ้นงานโลหะผสมไทเทเนียม (Ti6Al4V) ขนาดกว้าง 12 ยาว 15 หนา 3 มิลลิเมตร

1.5.3.2 เตรียมสารละลายเอทานอลเอมีน 1000 มิลลิลิตร

1.5.3.3 เตรียมภาชนะพลาสติกสำหรับใส่สารละลายเอทานอลเอมีน

1.5.3.4 เตรียมเครื่องกรองเศษชิ้นงานและระบบไหลเวียนน้ำ

1.5.3.5 เตรียมอิเล็กโทรดไทเทเนียมและกราไฟท์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร

1.5.4 ดำเนินการทดลอง

1.5.5 สังเกต บันทึกและเก็บข้อมูลเบื้องต้นหลังทำ

1.5.6 ประเมินผลการทดลองด้วยเครื่องมือต่างๆ

1.5.6.1 พิจารณารอยแตกร้าวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy : SEM)

1.5.6.2 ความหนาของชั้นเคลือบผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope : OM)

1.5.6.3 ตรวจวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคอีดีเอส (Energy Dispersive Spectroscopy)

1.5.6.4 ตรวจสอบโครงสร้างหาธาตุประกอบ (TiN และ TiCN) ด้วย X-ray diffraction (XRD)

1.5.6.5 ตรวจวัดความแข็งด้วยเครื่อง Micro Hardness Tester

1.5.6.5 วัดความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ด้วยเครื่อง LEXT 3D Measuring Laser Microscope OLS5000

1.5.7 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

1.5.8 จัดทำรูปเล่ม

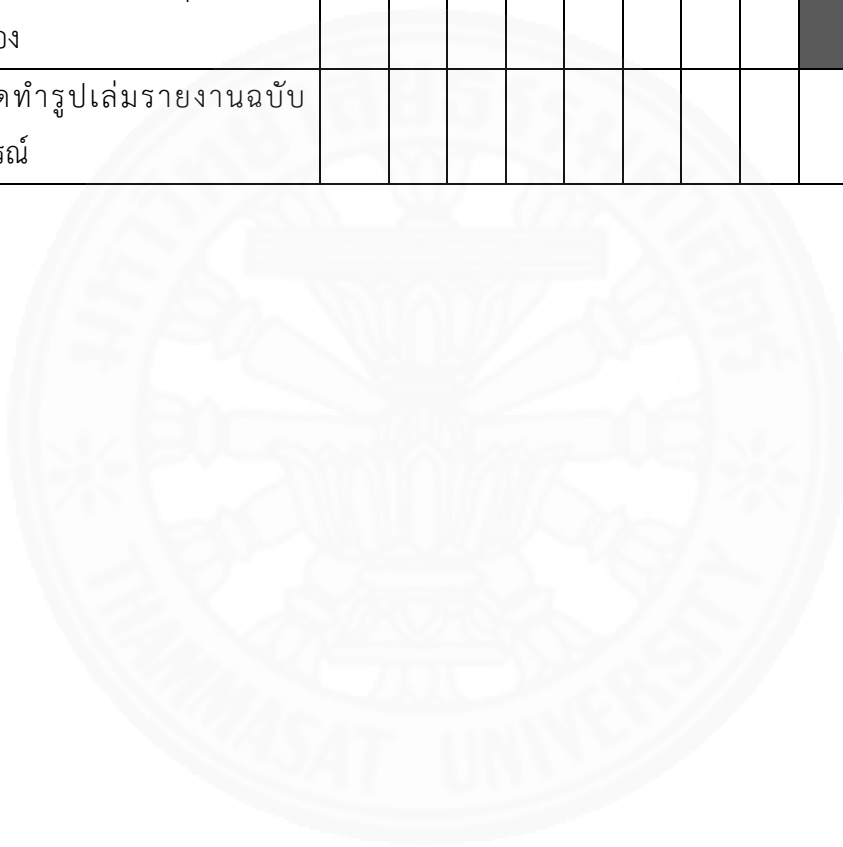
1.6 ระยะเวลาดำเนินงานวิจัย

ตารางที่ 1.1

แผนการดำเนินงาน

| ขั้นตอนการดำเนินงาน | เดือน | | | | | | | | | | | |
|---|-------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 1. ศึกษาทฤษฎีงานวิจัยการทำงานเครื่องกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | | | | | |
| 2. ศึกษาวิธีการใช้งานเครื่องกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า | | | | ■ | ■ | | | | | | | |
| 3. จัดเตรียมวัสดุอุปกรณ์สำหรับการทดลอง | | | | | ■ | ■ | | | | | | |
| 4. ทำการทดลองกัดชิ้นงานด้วยเครื่องกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า | | | | | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | |

| ขั้นตอนการดำเนินงาน | เดือน | | | | | | | | | | | |
|--|-------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 5. สังเกตและเก็บข้อมูลเบื้องต้น หลังทดลอง | | | | | | | ■ | ■ | | | | |
| 6. ประเมินผลการทดลองด้วย เครื่องมือ | | | | | | | | ■ | ■ | ■ | | |
| 7. วิเคราะห์และสรุปผลการ ทดลอง | | | | | | | | | ■ | ■ | ■ | |
| 8. จัดทำรูปเล่มรายงานฉบับ สมบูรณ์ | | | | | | | | | | | ■ | ■ |



บทที่ 2

วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ประวัติความเป็นมาของเครื่องกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า(Electrical discharge machine)

เครื่องกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า (Electrical discharge machine) หรือกระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า ถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1770 โดยนายโจเซฟ เพรสตี (Joseph Priestly) ได้ทำการทดลองปล่อยกระแสไฟฟ้าจากขั้วอิเล็กโตรดเข้าสู่ชิ้นงาน จากนั้นทำให้ชิ้นงานเกิดการกัดกร่อน และต่อมาในปี 1940 ช่วงสมัยสงครามโลกครั้งที่ 2 ประเทศรัสเซียได้ทำการพัฒนาเครื่องกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าขึ้นมาอีกครั้ง ปรากฏว่าการพัฒนาครั้งนั้นเกิดความสำเร็จและเป็นแบบแผนการใช้งานเครื่องกัดอาร์คด้วยไฟฟ้ามาจนถึงปัจจุบัน การทำงานของเครื่องกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าเป็นการทำงานของกระแสไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์สูง ซึ่งไหลผ่านโลหะสองชิ้น ได้แก่ ชิ้นงานและอิเล็กโตรด เหมาะกับงานที่ต้องการความเที่ยงตรง งานที่ทำการขึ้นรูปโดยวิธีการตัด เฉือนแบบปกติได้ยาก หรือชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็ง เครื่องกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าเป็นเครื่องจักรที่ทำงานอัตโนมัติสามารถผลิตชิ้นงานที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาด หรือรูปร่างบ่อยๆ ได้ดีเพราะสามารถแก้ไขข้อมูลต่างๆ โดยตรงที่โปรแกรม ดังนั้นจึงเหมาะกับการผลิตชิ้นงานต้นแบบ (Prototype) หรือผลิตชิ้นงานในระบบสายงานการผลิตที่มีกำลังการผลิตปานกลาง ซึ่งเหมาะสมกับอุตสาหกรรมขนาดกลาง (วิชาญ วัชรชัยสุนทร)

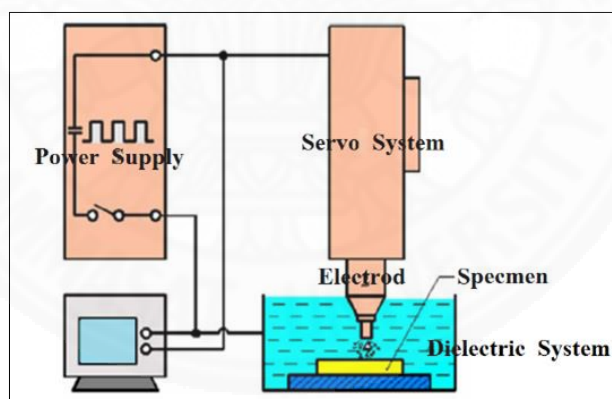
2.2 หลักการทำงานของกระบวนการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า

กระบวนการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า เป็นเทคนิคที่ควบคุมการกัดโลหะโดยการสปาร์คของกระแสไฟฟ้าซึ่งเป็นตัวกัดเซาะชิ้นงาน โดยให้เครื่องมือตัดหรืออิเล็กโตรดมีรูปร่างตรงกันข้ามกับชิ้นงาน อิเล็กโตรดทำขึ้นมาจากวัสดุที่เป็นสื่อไฟฟ้า โดยปกติจะใช้ทองแดง และกราไฟท์ เนื่องจากถ้างานที่ต้องการทำมีขนาดใหญ่จะมีน้ำหนักมากทำให้อิเล็กโตรดที่ทำจากทองแดง มีน้ำหนักมากตามด้วยทำให้ไม่สะดวกในการใช้งาน จึงเปลี่ยนมาใช้กราไฟท์แทนทองแดง อิเล็กโตรดจะถูกแปรรูปให้มีรูปร่างตามแบบงานที่ต้องการ อิเล็กโตรดและชิ้นงานจะจมอยู่ในของเหลวที่เป็นฉนวน ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้น้ำมันหล่อลื่นชนิดไฮดรอลิกหรือน้ำกลั่น ของเหลวนี้อาจไม่ใช่สื่อทางไฟฟ้า กลไกเซอร์โว (Server) จะเป็นตัวรักษาระยะช่องว่างระหว่างอิเล็กโตรดและชิ้นงานให้มีค่าความละเอียด ± 0.002 มิลลิเมตร เพื่อป้องกันไม่ให้อิเล็กโตรดและชิ้นงานสัมผัสกันโดยกระแสไฟฟ้าตรง แรงเคลื่อนต่ำ แอมแปร์สูง จะถูกปล่อยไปยังอิเล็กโตรด ด้วยอัตราประมาณ 2000 เอ็มพี โดยกลไกการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าส่วนใหญ่ใช้พลังงาน

ไฟฟ้าและพลังงานความร้อนผ่านชุดการปล่อยไฟฟ้าไม่ต่อเนื่องที่เกิดขึ้นระหว่างอิเล็กโทรดและชิ้นงาน ภายใต้ของเหลวไดอิเล็กตริก (H.C. Tsai และคณะ, 2003) ที่อุณหภูมิ 8000 ถึง 12000 °C (G. Boothroyd และคณะ, 1989) แรงกระตุ้นทางไฟฟ้าจะถูกเปลี่ยนเป็นประกายไฟสปาร์กขึ้นระหว่างช่องว่างของอิเล็กโทรดและชิ้นงานความร้อนจะเพิ่มมากขึ้นในพื้นที่ที่จำกัดของการสปาร์ค โลหะจะเกิดการหลอมละลายและอนุภาคเล็กๆ ของโลหะที่หลอมละลายถูกกำจัดออกจากผิวชิ้นงาน ของเหลวที่เป็นฉนวนซึ่งอยู่บริเวณรอบๆ ของการดีสชาร์จจะระเหยและแยกตัวออกเป็นความร้อนที่เกิดจากการสปาร์คของเหลวที่เป็นฉนวนจะต้องมีการไหลเวียนอย่างสม่ำเสมอ จะเอาชนะอุณหภูมิของโลหะให้ไหลออกไปตามแรงฉีดของของเหลวและยังช่วยควบคุมความร้อนในขณะเกิดจากการสปาร์ค

2.3 ส่วนประกอบของเครื่องกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า

ส่วนประกอบของเครื่องกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าประกอบด้วย ระบบเซอร์โว (Servo System) อิเล็กโทรด (Electrode) ฐานรอง (Specimen) ระบบไดอิเล็กตริก (Dielectric System) แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า (Power Supply) แสดงตำแหน่งของส่วนประกอบดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ส่วนประกอบของเครื่องกัดอาร์ค
(ที่มา : Y.H. Guu, M.T.-K. Hou, 2007)

2.3.1 ระบบเซอร์โว (Servo System)

ระบบเซอร์โวคือระบบควบคุมบังคับกลไกการป้อนอิเล็กโทรด โดยอาศัยสัญญาณความแตกต่างของโวลต์เทจจากช่องว่างดีสชาร์จกับโวลต์เทจอ้างอิงเป็นตัวเปรียบเทียบเพื่อทำการควบคุมกลไกการป้อนอิเล็กโทรดให้เหมาะสมกับอัตราการกัดเนื้องานโลหะ เนื่องจากช่องว่างจะมีเศษ

อนุภาคโลหะจากการดิสซาร์จแก๊สและทาร์ (Tar) ที่เกิดจากการแตกตัวของไดอิเล็กทริกเนื่องจากความร้อน จะทำให้การเกิดดิสซาร์จครั้งต่อไปขาดเสถียรภาพ และอาจทำให้เกิดลัดวงจร การสัมผัสโดยตรงระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงานจะทำให้เกิดการลัดวงจรด้วย ทำให้การดิสซาร์จจะขาดหายไป ประสิทธิภาพการกัดเซาะจึงลดลง เมื่อช่องว่างมีความพอเหมาะ ปริมาณการกัดเนื้อโลหะจะคงที่ แต่เมื่อช่องว่างแคบลงพลังงานดิสซาร์จที่ช่องว่างก็จะลดลง ทำให้ประสิทธิภาพการกัดเนื้อโลหะต่ำลง เพื่อที่จะรักษาการกัดเนื้อโลหะให้เหมาะสม จะต้องทำการควบคุมกลไกการป้อนอิเล็กโทรดให้มีระยะช่องว่างคงที่ ในขณะที่เดียวกันก็ป้องกันการสัมผัสระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงาน ขณะที่อิเล็กโทรดและชิ้นงานจะสึกไปด้วย เนื่องจากช่องว่างนี้จะแคบมากจึงไม่สามารถรักษาให้คงที่ได้ตามอัตราส่วนของการสึกหรอ

2.3.2 อิเล็กโทรด (Electrode)

2.3.2.1 สมบัติของอิเล็กโทรด

- (1) เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี
- (2) เป็นตัวนำความร้อนที่ดี
- (3) มีจุดหลอมละลายและจุดเดือดสูง
- (4) ต่อด้านการกัดเซาะจากไฟฟ้าหรือการสึกหรอต่ำ
- (5) มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ
- (6) มีความสามารถทำงานได้ดี ราคาควรจะประหยัด และมีความหนาแน่นต่ำ

เพื่อให้มีน้ำหนักเบา

2.3.2.2 วัสดุที่ทำอิเล็กโทรด สามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม

- (1) โลหะ เช่น ทองแดง ทองแดง ผสมทั้งสแตน อลูมิเนียมผสม ทองเหลือง และเหล็ก ไทเทเนียม เป็นต้น
- (2) อโลหะ เช่น กราไฟท์เกรดต่าง ๆ
- (3) โลหะและอโลหะผสมกัน เช่น ทองแดงผสมกับกราไฟท์

2.3.2.3 อิเล็กโทรดที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ แท่งไทเทเนียมเกรด 2 และแท่งกราไฟท์อีทีเอ็มเกรด 3

แท่งไทเทเนียม (Titanium, Ti) เป็นโลหะชนิดหนึ่งที่อุตสาหกรรมต่างให้ความสนใจ เนื่องจากโลหะชนิดนี้มีค่าสัดส่วน ระหว่างความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูงหรือพูดง่าย ๆ คือ มีความแข็งแรงสูงแต่น้ำหนักเบา ทั้งยังมีความทนทานต่อสารเคมีต่างๆ แต่เนื่องจากไทเทเนียมเป็นโลหะที่มีราคาสูง ทำให้การใช้งานโลหะชนิดนี้ยังจำกัดอยู่เพียงเฉพาะในบางอุตสาหกรรมเท่านั้น โดย

ไทเทเนียมเป็นธาตุที่มีมากเป็นลำดับที่ 9 ในชั้นเปลือกโลก แต่โลหะชนิดนี้สามารถเกิดปฏิกิริยากับธาตุอื่นๆ ได้ง่าย จึงไม่พบในรูปโลหะบริสุทธิ์ตามธรรมชาติ แต่จะพบในรูปสารประกอบในแร่ชนิดต่างๆ เช่น แร่รูไทล์ (Rutile) แร่อิลเมนไนต์ (Ilmenite) แร่อะนาทาส (Anatase) แร่บรูไคต์ (Brookite) แร่ไทเทไนต์ (Titanite) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการพบแร่ไทเทเนียมอยู่ร่วมกับแร่เหล็กด้วยประวัติการพบไทเทเนียมค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1791 โดยวิลเลียม เกรกอร์ (William Gregor) นักธรณีวิทยาชาวอังกฤษ วิลเลียมสังเกตเห็นว่าทรายสีดำในลำธารใกล้เมืองมาแนคแคน (Manaccan) ประเทศอังกฤษ มีสมบัติถูกแม่เหล็กดูดติดได้ เมื่อนำทรายสีดำนี้ไปทำการแยกองค์ประกอบ ผลที่ได้คือโลหะออกไซด์ 2 ชนิด โดยโลหะออกไซด์ชนิดหนึ่งคือ เหล็กออกไซด์ (Iron oxide) ที่มีสมบัติแม่เหล็กดูดติดได้ ส่วนโลหะออกไซด์อีกชนิดหนึ่งนั้น วิลเลียมไม่สามารถจำแนกได้ว่าเป็นโลหะอะไร และทำให้เขาตระหนักว่า โลหะออกไซด์ปริศยานั้นประกอบด้วยธาตุโลหะใหม่ที่มีสมบัติไม่เหมือนกับโลหะใดที่มีการบันทึกในขณะนั้น ดังนั้น วิลเลียมจึงเขียนรายงานสิ่งที่เขาพบและส่งไปที่ Royal Geological Society of Cornwall และส่งไปตีพิมพ์ลงใน Crell's Annalen ซึ่งเป็นนิตยสารวิทยาศาสตร์ของประเทศเยอรมนี ต่อมาในปี ค.ศ. 1795 นักเคมีชาวเยอรมันชื่อ มาร์ติน ไฮน์ริช คลาพรอท (Martin Heinrich Klaproth) ก็พบโลหะออกไซด์ปริศยานี้จากแร่รูไทล์เช่นกัน มาร์ตินจึงตั้งชื่อธาตุโลหะปริศยานี้ว่า ไทเทเนียม ตามชื่อยักษ์ ไททัน (Titan) ที่ปรากฏในตำนานกรีกโบราณ ในตอนหลังมาร์ตินได้ทราบเรื่องการพบโลหะออกไซด์ของวิลเลียมที่เกิดก่อนการพบของเขา มาร์ตินก็ได้รับตัวอย่างแร่มาแนคคาไนต์ (Manaccanite) มาทดลองซ้ำ และยืนยันว่าโลหะออกไซด์ปริศยานั้นประกอบด้วยไทเทเนียมเช่นกัน ซึ่งไทเทเนียมแบ่งเป็นหลายเกรดขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์ของเกรดนั้นๆ โดยไทเทเนียมเกรด 2 เป็นเกรดที่ค่อนข้างบริสุทธิ์ (ที่มา : <https://mtec.or.th/academic-services/mtec-knowledge/421>)

แท่งกราไฟท์ (Graphite) เป็นอิเล็กโตรดในการทำงานวิจัยครั้งนี้โดยกราไฟท์เป็นอัญรูปหนึ่งของธาตุคาร์บอน ชื่อสามัญเรียกว่า พลัมเบโก (Plumbago) หรือแร่ดินสอดำ มีลักษณะเป็นของแข็ง มีรูปผลึกเป็นแผ่นบางๆ ทึบแสง อ่อนนุ่ม สีเทาเข้มถึงดำ เนื้ออ่อน เป็นตัวนำความร้อนและไฟฟ้าได้ดี มักใช้ทำไส้ดินสอดำ เบ้าหลอมโลหะ น้ำมันหล่อลื่นบางชนิด ไส้ถ่านไฟฉาย ไส้ฟู่อาร์ค ใช้เป็นตัวลดความเร็ว ช่วยควบคุมจำนวนอนุภาคนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ถูกนำมาใช้เมื่อ 4 พันปีก่อนคริสตกาล ในงานทาสีตกแต่งเครื่องเซรามิกในทางตะวันออกเฉียงใต้ของยุโรป ได้มีการค้นพบแหล่งสะสมตัวของแร่กราไฟท์ขนาดใหญ่ที่รัฐคัมเบรีย ประเทศอังกฤษ แร่ที่พบมีลักษณะบริสุทธิ์ ไม่แข็ง แตกหักง่ายและมีรูปแบบการสะสมตัวอัดแน่นกัน ซึ่งแท่งกราไฟท์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ใช้เป็นกราไฟท์ 3 ชนิดพิเศษและนิยมนำมาใช้เป็นขั้วในการกัลดอาร์คด้วยไฟฟ้า

2.3.2.4 การสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์

การลดสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์ทำได้โดยการเลือกวัสดุที่มีคุณสมบัติต้านทานการสึกหรอจากการดิสชาร์จเช่น ซิลเวอร์ทั้งสแตน และทองแดงทั้งสแตน จะมีอัตราส่วนการสึกหรอประมาณ 10-50% โดยทั่วไปการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์จะเกิดขึ้นเร็วที่บริเวณขอบและมุม การกำหนดการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์สามารถพิจารณาได้จากอัตราการสึกหรอที่ปลาย (End wear ratio) อัตราการสึกหรอด้านข้าง (Side wear ratio) และอัตราการสึกหรอที่มุม (Corner wear ratio)

การสึกหรอน้ำหนักสัมพัทธ์ (Weight relative wear) คืออัตราส่วนของน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์ที่สึกกร่อนต่อน้ำหนักของชิ้นงานที่ถูกกัดออกมา

การสึกหรอปริมาณสัมพัทธ์ (Volume relative wear) คือ อัตราส่วนของปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ที่สึกกร่อนต่อปริมาตรของชิ้นงานที่ถูกกัดออกมาโดยปกติปริมาณการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์จะขึ้นอยู่กับพลังงานการดิสชาร์จ และคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ แสดงการสึกหรอของทองแดงเมื่อแปรรูปเหล็กแข็งต่อพัลส์เทียบกับกระแส เมื่อช่วงพัลส์เพิ่ม ปริมาณการสึกหรอและอัตราการกัดอาร์คโลหะจะเพิ่มขึ้น แต่เมื่อช่วงพัลส์เพิ่มขึ้นไปจนกระทั่งถึงค่าหนึ่ง ปริมาณการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์มีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เพราะคาร์ไบด์ที่เกิดจากการแตกตัวของไดอิเล็กตริกเนื่องจากความร้อน (สารผสมของกราไฟท์ คาร์บอน และอนุภาคเศษโลหะ) จะไปทับถมบนผิวของอิเล็กทรอนิกส์ทำให้เกิดขึ้นระหว่างคาร์ไบด์และชิ้นงานการที่เศษสปาร์คไปทับถมบนผิวของอิเล็กทรอนิกส์จะทำให้จุดดิสชาร์จขยายขึ้น ความหนาแน่นของกระแสจะลดลง การสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์จึงลดลงด้วย และควรปรับไดอิเล็กตริกให้ไหลโดยไม่ต้องใช้แรงบังคับเพื่อว่าการดิสชาร์จจะช่วยส่งเสริมการทับถมของคาร์ไบด์บนผิวของอิเล็กทรอนิกส์ และทำให้อุณหภูมิบนผิวอิเล็กทรอนิกส์ที่สรุปทองแดงและกราไฟท์ถือว่าเป็นอิเล็กทรอนิกส์ที่มีการสึกหรอต่ำในกรณีที่ต้องการการสึกหรอต่ำจะต้องใช้ช่วงพัลส์ยาวกระแสต่ำและอิเล็กทรอนิกส์เป็นขั้วบวก

2.3.3 ฐานรอง (Specimen)

ฐานรองเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวจับวางชิ้นงานในขณะที่เครื่องกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าทำการกัดชิ้นงาน

2.3.4 ระบบไดอิเล็กตริก (Dielectric System)

ระบบไดอิเล็กตริกประกอบด้วย สารไดอิเล็กตริก ท่อส่ง ป้อน เครื่องกรอง และถังบรรจุสารไดอิเล็กตริก สารไดอิเล็กตริกมีหลายชนิด แต่ปกตินิยมใช้กันมากคือน้ำมันไฮโดรคาร์บอน น้ำมัน

ซิลิกอน และน้ำกำจัดไอออน กำจัดไอออนจะใช้ไม่มาก แม้ว่าจะมีอัตราการกัดเนื้อโลหะสูง และมีความสามารถหล่อเย็นแต่การสึกหรอของอิเล็กโทรดสูง ดังนั้น น้ำกำจัดไอออนมักใช้มากในการเจาะรู เมื่อทำงานเสร็จต้องตัดปลายลวดออกแล้วจึงเริ่มเจาะรูใหม่ได้ การใช้น้ำกำจัดไอออนใช้มากในเครื่องตัดโลหะด้วยเส้นลวดโดยหน้าที่ของสารไดอิเล็กตริกมีหน้าที่ดังนี้

2.3.4.1 ฉนวน (Insulation)

วัตถุประสงค์หลักของสารไดอิเล็กตริกหรือของเหลวตัวกลางคือ การทำหน้าที่เป็นฉนวนระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงานโลหะ การดิสชาร์จจะไม่เกิดขึ้นไม่จนกว่าระยะช่องว่าง (Gap) จะน้อยที่สุดเท่าที่เป็นไปได้เพื่อให้ได้ความละเอียดและความถูกต้องมากที่สุด

2.3.4.2 ไอออน (Ionisation)

สารไดอิเล็กตริกหรือของเหลวตัวกลางควรที่จะสร้างเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการดิสชาร์จเร็วที่สุดและเมื่อสวิตปิด (off) สารไดอิเล็กตริกจำเป็นต้องกำจัดไอออนในเส้นทางดิสชาร์จเพื่อให้เกิดการดิสชาร์จใหม่ในตำแหน่งอื่นต่อไป

2.3.4.3 การหล่อเย็น (Cooling)

อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในช่องว่างประมาณ 10,000°C ภายในเวลาเศษส่วนล้านของวินาที ความร้อนที่เกิดขึ้นในการดิสชาร์จจำเป็นต้องระบายออก ดังนั้น สารไดอิเล็กตริกจึงทำหน้าที่เป็นตัวระบายความร้อนจากชิ้นงานและอิเล็กโทรด ซึ่งความร้อนที่สูงมากเกินไปจะทำให้อิเล็กโทรดสึกหรอมาก ในเวลาเดียวกันไอของความร้อนจะกลั่นตัวในสารไดอิเล็กตริกด้วย

2.3.4.4 การพัฒนาของอนุภาคเศษโลหะ

อนุภาคเศษโลหะจากกระบวนการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าในช่องว่างดิสชาร์จจะถูกสารไดอิเล็กตริกหรือของเหลวตัวกลางทำหน้าที่พัฒนาเศษอนุภาคโลหะออกมา จึงช่วยกระบวนการให้ดำเนินไปได้ปกติและมีประสิทธิภาพ หากลักษณะการไหลของเศษอนุภาคโลหะไม่ดีจะทำให้เกิดการหยุดนิ่งของสารไดอิเล็กตริก ทำให้มีอนุภาคโลหะในช่องว่างและอาจจะเกิดการลัดวงจรได้เนื่องจากสารไดอิเล็กตริกที่ใช้แล้วต้องผ่านการทำความสะอาดโดยเครื่องกรอง โดยกรองเอาอนุภาคโลหะออกจากสารไดอิเล็กตริกแล้วจึงนำกลับมาใช้งานใหม่ต่อไปโดยคุณสมบัติของสารไดอิเล็กตริกต้องมีความหนืดต่ำ มีจุดเดือดสูง จุดวาบไฟสูงมีความเป็นฉนวนสูง ไม่เป็นอันตรายต่อร่างกายหรือผิวหนัง ต้องไม่เกิดแก๊สที่เป็นอันตรายจากการแตกตัวหรือสลายตัวเนื่องจากความร้อน ไม่กัดกร่อนชิ้นงาน มีความสามารถในการระบายความร้อนได้ดี มีราคาถูกหรือประหยัด

2.3.5 แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า (Power Supply)

แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า (Power Supply) ทำหน้าที่ผลิตพลังงานดิซซาร์ทเพื่อใช้ในการแยกอนุภาคโลหะ

2.4 ขั้นตอนการกัตอาร์คด้วยไฟฟ้า

2.4.1 การใส่แรงดันไฟฟ้า

เริ่มจากการป้อนแรงดันไฟฟ้าระหว่างชิ้นงานกับอิเล็กโตรด (ขั้วไฟฟ้า) โดยของเหลว ตัวกลาง มักใช้น้ำมันเป็นตัวรักษา ให้ความต้านทานของฉนวนระหว่างขั้วมีค่าสูง สามารถลดระยะระหว่างขั้ว (ช่องว่างการกัตอาร์ค) ให้แคบลงได้

2.4.2 การสูญเสียความต้านทาน

เมื่อมีการลดระยะระหว่างขั้วชิ้นงานกับอิเล็กโตรด ให้เข้าใกล้เรื่อยๆ จนถึงระยะหนึ่งของเหลวตัวกลางเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวน ทำให้ไอออนประจุลบถูกดึงไปฝั่งที่เป็นประจุบวกเกิดการถ่ายเทพลังงาน

2.4.3 การกัตอาร์คหลอมละลาย

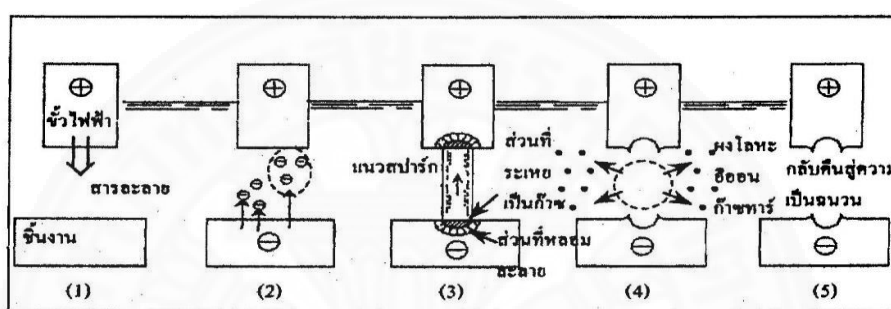
เมื่อความต่างศักย์ของอิเล็กโตรดและชิ้นงานสูงขึ้นจนเกิดความสูญเสียความเป็นฉนวน อิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบเริ่มไหลเป็นจำนวนมากอย่างรุนแรงซึ่งเรียกว่าการกัตอาร์ค และบริเวณส่วนที่เกิดการกัตอาร์คนี้ มีกระแสไฟฟ้าที่ความหนาแน่นสูงมากไหลในเวลาสั้นๆ พลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมาในช่วงนี้ ทำให้บริเวณที่เกิดการกัตอาร์คมีอุณหภูมิสูงขึ้นมากกว่า 3000 องศาเซลเซียส ชิ้นงานบางส่วนเกิดการหลอมละลาย พลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมา ในช่วงนี้ทำให้บริเวณที่เกิดการกัตอาร์คโดนความร้อนที่เกิดขึ้นทำให้กลายเป็นก๊าซไป และเกิดความดันสูงขึ้นมาเป็นบางส่วน (สารละลายที่เกิดการกัตอาร์ค ในการขึ้นรูปงานจริงนั้นกระแสไฟฟ้ามักมีขนาดตั้งแต่ 0.1 แอมแปร์ จนถึง 100 แอมแปร์)

2.4.4 การเย็นตัว

ความดันที่เกิดขึ้นทำให้ส่วนที่หลอมละลายของชิ้นงานหลุด เมื่อถูกของเหลวตัวกลางรอบข้างดูดความร้อนไป ทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วกลายเป็นเศษผงชิ้นเล็กๆ

2.4.5 การกลับสู่ความเป็นฉนวน

หลังจากที่การกัดอาร์คหนึ่งครั้งได้จบลงแล้ว รอยจางกว่า สารละลายกลับคืนสู่ความเป็นฉนวน โดยไม่มีการใส่แรงดันไฟฟ้าเข้าไป การรอในช่วงนี้ช่วยป้องกันการกัดอาร์คแบบผิดปกติ เช่นกัดอาร์คซ้ำ หรือกัดอาร์คเฉพาะเป็นบางจุดอันเนื่องมาจากการสะสมหรือทับถมจับตัวกันของไอออนที่ตกค้างอยู่ระหว่างขั้วหรือเศษผง ที่เกิดจากการกัดอาร์ค (กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2534; ทวีป จีระประดิษฐ์, 2538; พิบูลย์ กังตระกูล, 2552) จากขั้นตอนทั้งหมดแสดงได้ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 ขั้นตอนในการสปาร์คชิ้นงานในแต่ละครั้ง

(ที่มา : กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2534)

2.5 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องในกระบวนการกัดโลหะด้วยไฟฟ้า

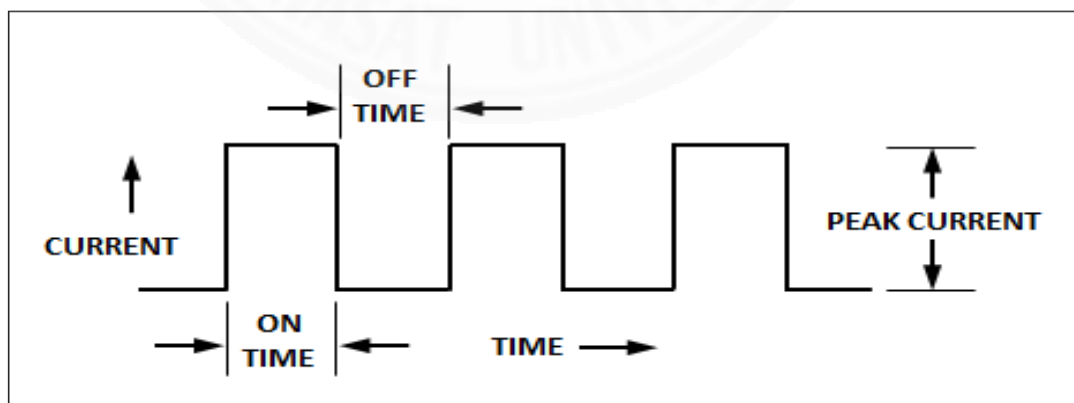
2.5.1 กระแสไฟฟ้า (Discharge current) และความต่างศักย์วงจรเปิด (Open-Circuit Voltage)

ความต่างศักย์วงจรเปิด (V_g) ที่ต่างกันระหว่างอิเล็กโตรดและชิ้นงาน ทำให้เกิดการถ่ายเทประจุและการไหลของกระแสไฟฟ้า (I_p) ในขณะที่กัดอาร์คด้วยไฟฟ้าจะมีกระแสไฟฟ้าที่ความหนาแน่นสูงมากไหลในช่วงเวลาสั้นๆ โดยกระแสไฟฟ้าอาจมีขนาดตั้งแต่ 0.1 แอมแปร์ ถึงหลายร้อยแอมแปร์ พลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมาในช่วงนี้ ทำให้บริเวณที่เกิดการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้ามีอุณหภูมิสูงมาก โดยอาจสูงถึง $20,000\text{ }^{\circ}\text{C}$. พลังงานที่ใช้ในการแปรรูปด้วย EDM มีอิทธิพลต่อความเค้นตกค้างในลักษณะแปรผันตาม ซึ่งถ้ามีการใช้พลังงานน้อยก็จะช่วยให้ความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นมีค่าน้อย ตามรอยแตกที่ราบบนพื้นผิวชิ้นงานก็จะน้อยลงด้วย (H.Gripenberg และคณะ, 2008)

2.5.2 เวลาเปิด (On time) และ เวลาปิด (Off time)

เวลาเปิด คือ ช่วงเวลาที่เกิดการถ่ายเทประจุของกระแสไฟฟ้า โดยเมื่อความต่างศักย์ระหว่างแสดงระยะเวลาเปิดกับการขจัดเนื้องานและการสึกหรอของอิเล็กโทรด เวลาปิด คือ ช่วงเวลาที่หยุดการถ่ายเทประจุของกระแสไฟฟ้า หรือช่วงเวลาที่ไม่มีกระแสไหลจากอิเล็กโทรดไปยังชิ้นงาน ทำให้ของเหลวตัวกลางสามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมก่อนแตกตัวได้ ทำให้เกิดความเสถียรในกระบวนการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า เมื่อเวลาปิดมากขึ้นทำให้ความเร็วในการทำงานลดลง แต่จะทำให้เกิดการระบายความร้อนและขจัดเศษอนุภาคที่หลุดออกจากชิ้นงานได้มากขึ้นทำให้เกิดความเสถียรในการรักษาค่าความต้านทานของของเหลวตัวกลาง ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญอย่างมากในการสร้างช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงานเพื่อให้พร้อมในการอาร์คในรอบถัดไป (E.Bud Guitrau. 1997) จากการทำงานดังภาพที่ 2.3 ทำให้เกิดความสัมพันธ์ระหว่างเวลาปล่อยประจุกระแสไฟฟ้าที่เรียกว่าเวลาเปิด (On-Time) กับเวลาหยุดจ่ายประจุของกระแสไฟฟ้าที่เรียกว่าเวลาปิด (Off-Time) โดยสามารถวัดประสิทธิภาพของการทำงานในหนึ่งรอบ (Duty Factor) (E.Bud Guitrau. 1997) ของการกัดอาร์คเท่ากับเวลาเปิดต่อเวลารวมในหนึ่งรอบ (Total Cycle Time = On-Time + Off-time) ดังแสดงในสมการที่ 1 เมื่อค่าของช่วงเวลากัดอาร์คเปลี่ยนไป จะส่งผลทำให้ค่าปัจจัยประสิทธิภาพ (Duty Factor) เปลี่ยนไปด้วย ค่าปัจจัยประสิทธิภาพ (Duty Factor) ซึ่งเวลาปิดเวลาเปิดมีหน่วยเป็นไมโครวินาทีที่มีสูตรการคำนวณ ดังนี้

$$\text{Duty Factor} = \left(\frac{\text{On - Time}}{\text{ON Time + OFF Time}} \right) \times 100(\%) \quad \text{สมการที่ 1}$$

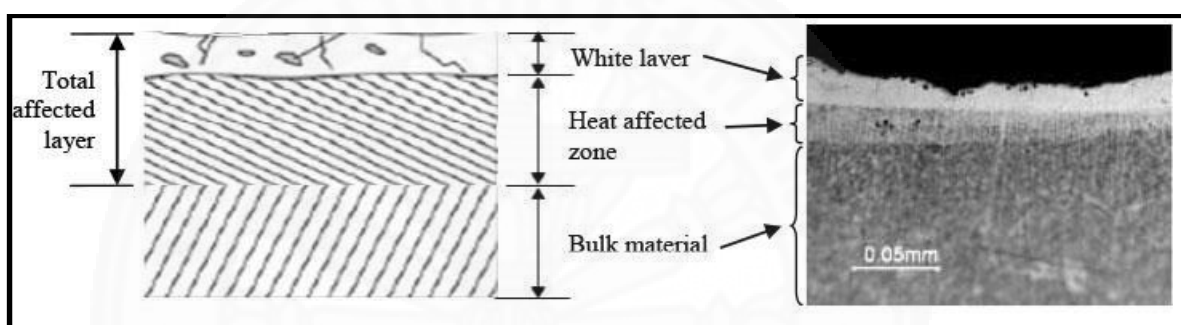


ภาพที่ 2.3 ช่วงระยะเวลาเปิด และปิดเพื่อให้เกิดการถ่ายเทประจุ

(ที่มา : The EDM Handbook, E. Bud Guitrau, 1997)

2.6 ชั้นลอมสีขาว (White layer)

ชั้นลอมสีขาว (White layer) และชั้นใต้ชั้นลอมสีขาวที่เกิดจากการกัดอาร์ค เป็นชั้นของแข็งที่เกิดจากการกัดโลหะด้วยไฟฟ้า ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการกัดอาร์คไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดกับชิ้นงาน ส่งผลทำให้อุณหภูมิของวัสดุทั้งสองถูกแยกออกมาด้วยความร้อนสูงมาก โดยได้รับความร้อนอย่างรวดเร็ว ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส แล้วเกิดการลอมละลายรวมตัวกันระหว่างอุณหภูมิของวัสดุทั้งสอง จากนั้นจะถูกทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยของเหลว แสดงได้ดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 ชั้นลอมสีขาวที่เกิดจากการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า
(ที่มา : <http://www.scielo.br/scielo.php>)

2.7 การประเมินผลด้วยเครื่องมือ

2.7.1 ลักษณะการลอม

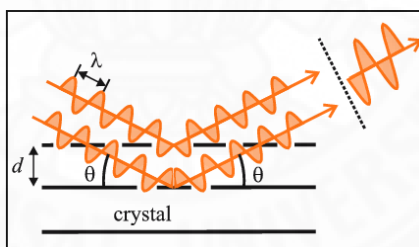
ลักษณะรอยแตกกร้าวและตรวจวิเคราะห์ธาตุบริเวณพื้นผิวชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และการตรวจวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) โดยใช้เทคนิคการตรวจจับอิเล็กตรอนที่สะท้อนออกมา แล้วแสดงผลออกมาบนจอ CRT เสมือนจอโทรทัศน์ โดยแสดงผลออกมาเป็นภาพของผิวชิ้นงานนั้น ชิ้นงานที่ทดสอบต้องสามารถนำไฟฟ้าได้ แต่เนื่องจากชิ้นงานอยู่ในเรซิน จึงต้องนำไปเคลือบผิวด้วยทองคำเป็นเวลา 1 นาที กำลังขยายของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดอยู่ระหว่าง 10 – 50000 เท่า และในงานวิจัยนี้ใช้กล้องจุลทรรศน์ สำหรับรอยแตกกร้าวขนาดเล็กทำได้โดยนำชิ้นงานส่องดูบริเวณที่ถูกการกัดอาร์คด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเช่นเดียวกัน

2.7.2 ลักษณะความหนาของชั้นเคลือบผิว

สามารถตรวจสอบได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงด้วยกำลังขยายที่แตกต่างกันซึ่งขั้นตอนการวัดความหนาเริ่มจากกำหนดกำลังขยายที่มีกำลังขยายต่ำสุดก่อนเพื่อกำหนดตำแหน่งที่ต้องการวัดก่อน จากนั้นจึงค่อยๆ เพิ่มกำลังขยายมากขึ้นบริเวณตำแหน่งที่ต้องการวัดความหนาโดยความหนาของชั้นเคลือบผิวมีหน่วยเป็นไมครอน

2.7.3 ตรวจสอบหาสารประกอบบริเวณพื้นผิวหลังกัดอาร์ค

โดยหลักการทำงานของเทคนิคการกระเจิงรังสีเอกซ์มีการนำมาใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์วัสดุที่มีสูตรโครงสร้างทางเคมีเหมือนกัน แต่มีโครงสร้างผลึกต่างกันโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์นี้สามารถบอกได้ว่าวัสดุมีโครงสร้างแบบใด หลักการทำงานสำหรับเทคนิคการกระเจิงรังสีเอกซ์นั้นใช้อาศัยหลักการของแบรกก์ ที่ว่าเมื่อรังสีเอกซ์พลังงานเดี่ยวตกกระทบผลึกหรือโครงสร้างที่มีการจัดเรียงตัวเป็นระนาบของอะตอมอย่างมีระเบียบ เกิดการสะท้อนบนระนาบของผลึกตามภาพที่ 2.5 และเมื่อผลต่างของระยะทางเดินของรังสีเอกซ์มีค่าเท่ากับจำนวนเท่า (n) ของความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ (λ) ทำให้เกิดรูปแบบการเลี้ยวเบนของห้วงที่ซึ่งรูปแบบดังกล่าวเรียกว่า Diffraction pattern ดังนั้น เมื่อเราทราบความยาวคลื่น และวัดมุมที่เกิดการเลี้ยวเบน (θ) เราก็สามารถคำนวณหาค่าระยะระหว่างระนาบของผลึกได้ (d)



ภาพที่ 2.5 กฎของแบรกก์ (Bragg's Law)

(ที่มา : <http://pd.chem.ucl.ac.uk/pdnn/powintro/braggs.htm>)

ปรากฏการณ์การเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray fluorescence) เกิดขึ้นจากการที่อิเล็กตรอนชั้นใน (K หรือ L-shell) ของอะตอมถูกกระตุ้นให้หลุดออกมา และเกิดการแทนที่ของอิเล็กตรอนในชั้นถัดมา ทำให้เกิดการคายพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ โดยที่รังสีเอกซ์ที่คายออกมานั้นเป็นคุณลักษณะเฉพาะของธาตุแต่ละธาตุ ทำให้เราสามารถนำเทคนิคนี้ไปใช้ในการหาองค์ประกอบทางอะตอมของสารตัวอย่างที่เราสนใจได้สำหรับเทคนิค Micro-XRF นั้นนอกจากทำการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางอะตอมได้แล้วยังสามารถที่ระบุตำแหน่งหรือการกระจายตัวของธาตุ

ต่างๆ บนตัวอย่างได้ เช่น การวิเคราะห์การกระจายของโลหะหนักในเมล็ดข้าว หรือการศึกษาการกระจายตัวของธาตุต่างๆ ในพืช เป็นต้น โดยรังสีเอกซ์จากแม่เหล็กสองขั้วซึ่งมีขนาดอยู่ในระดับมิลลิเมตรถูกโฟกัสด้วยเลนส์รังสีเอกซ์ ที่เรียกว่า Capillary lens ซึ่งเป็นอุปกรณ์สำคัญสำหรับเทคนิคนี้ ทำให้ได้ลำรังสีเอกซ์มีขนาดในระดับไมโครเมตร

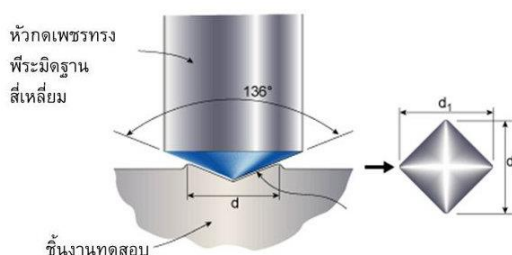
2.7.4 การตรวจวัดความแข็งบริเวณพื้นผิวชิ้นงานหลังกัดอาร์ค

ซึ่งความแข็ง คือ คุณสมบัติอย่างหนึ่งของวัสดุ หมายถึง ความต้านทานต่อแรงกด การขีดสีและการกรัด การทดสอบความแข็งจึงทำได้หลายวิธี ซึ่งในทางโลหะวิทยาการวัดความแข็งเป็นการทดสอบความสามารถของโลหะต่อการแปรรูปที่ถาวร เมื่อถูกแรงจากหัวกดกระทำลงบนชิ้นงานโดยวิธีในการทดสอบที่นิยมใช้ ได้แก่ Rockwell Hardness Test, Brinell Hardness Test และ Vickers Hardness Test และเครื่องทดสอบความแข็งถูกสร้างขึ้นมาเพื่อทดสอบของวัสดุตามวิธีต่างๆ ดังนี้

Rockwell Hardness เป็นวิธีวัดความแข็งของโลหะที่นิยมใช้มากที่สุดโดยจะวัดความแข็งจากความลึกของรอยที่ถูกลูกกดด้วยแรงคงที่

Brinell Hardness Test เป็นการวัดความแข็งโดยอาศัยแรงกดที่กระทำกับลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งลงบนผิวชิ้นงานทดสอบ ค่าความแข็งจะคำนวณจากแรงกดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิวโดยพื้นผิวมีลักษณะเป็นผิวโค้ง

Vickers Hardness Test เป็นการวัดความแข็งโดยใช้หัวกดเพชรที่มีลักษณะเป็นพีระมิดฐานสี่เหลี่ยม ที่ปลายหัวกดทำมุม 136 องศา (เป็นมุมที่มีองศาใกล้เคียงกับหัวกดลักษณะกลมมากที่สุด) เป็นเวลา 10-15 วินาที ที่ค่าความแข็งจะคำนวณจากแรงกดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิว เช่นเดียวกับการทดสอบแบบ Brinell แต่วิธีนี้ใช้หัวกดเพชรซึ่งมีความแข็งมากๆ ดังนั้น ในการใช้งานจึงสามารถใช้วัดความแข็งได้ตั้งแต่โลหะที่มีความนิ่มมาก (VHN ประมาณ 5) ไปจนถึงโลหะที่มีความแข็งมากๆ (VHN ประมาณ 1500) โดยไม่ต้องเปลี่ยนหัวกด จะเปลี่ยนก็เฉพาะแรงกดที่กระทำกับโลหะซึ่งแรงกดมีค่าตั้งแต่ 1-120 kgf ขึ้นอยู่กับความแข็งของโลหะ



ภาพที่ 2.6 รอยกดในการทดสอบความแข็งแบบ Vickers Hardness Testing

(ที่มา : <http://www.twiprofessional.com/content/jk74.html>)

การคำนวณหาค่าความแข็ง

ค่าความแข็งจากการวัดโดยใช้หัวกดประเภทนี้เรียกว่า Vickers hardness number (VHN) และสามารถคำนวณได้จากน้ำหนักกด (Load) ทหารด้วยพื้นที่ผิวของรอยกด ซึ่งโดยทั่วไปแล้วนิยมนำมาคำนวณจากเส้นทแยงมุม (Diagonal) ของรอยกดรูปพีระมิด ดังแสดงได้จากสมการ

$$\text{VHN} = \frac{2P \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}{d^2} = \frac{1.854P}{d^2}$$

โดยที่

P คือ น้ำหนักกด (Applied load), kg

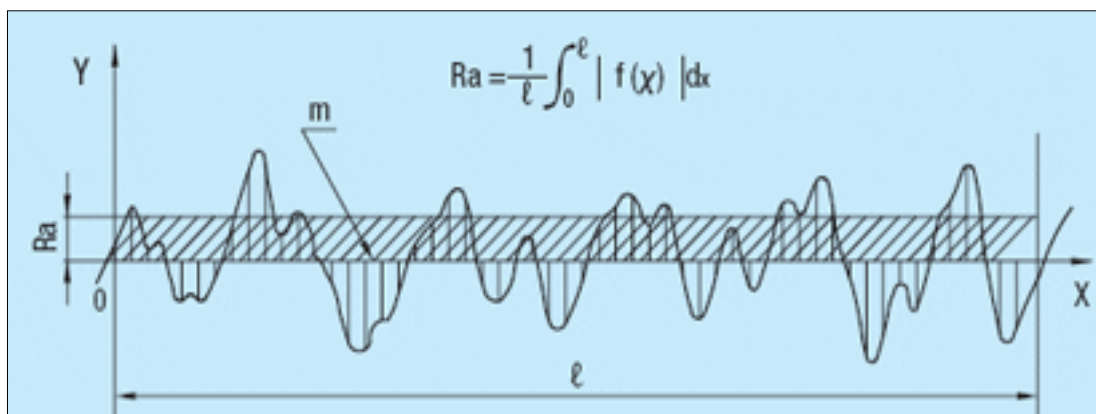
d คือ ค่าเฉลี่ยความยาวของเส้นทแยงมุม = $(d_1 + d_2)/2$ mm.

θ คือ มุมระหว่างหน้าตรงข้ามพีระมิด

มุมระหว่างหน้าตรงข้ามของเพชร = 136 องศา

2.7.5 การวัดความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra)

เป็นการวัดค่าความเรียบผิวชิ้นงานหลังผ่านการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าโดยค่าเฉลี่ยวัดได้จากกราฟความหยาบผิวที่อยู่บนเส้นอ้างอิง ระยะค่าเฉลี่ยนี้จะอยู่บนกราฟตามแนวแกน x ของเส้นอ้างอิง และแนวแกน y จะเป็นขนาดความหยาบผิว ค่า Ra หาได้จากสมการที่แสดงตามภาพที่ 2.7 มีหน่วยเป็นไมครอน เมื่อ $y = (x)$



ภาพที่ 2.7 กราฟและสมการคำนวณความหยาบผิวเฉลี่ย

(ที่มา : https://th.misumiec.com/maker/misumi/mech/campaign/email20130613/Surface_Roughness.html)

2.8 วรรณกรรมปริทรรศน์

กระบวนการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าเป็นกระบวนการกัดชิ้นงานโลหะด้วยไฟฟ้า เป็นที่ยอมรับในด้านมาตรฐานการผลิต ด้านความปลอดภัยและมีความแม่นยำในการผลิตสูง อีกทั้งยังสามารถผลิตชิ้นงานที่มีลักษณะเล็กๆ ได้แก่ อุปกรณ์ทางการแพทย์ที่ใส่เข้าไปในตัวมนุษย์ ชิ้นส่วนเครื่องจักร ชิ้นส่วนยานยนต์ ฯลฯ ในส่วนของอุปกรณ์ทางการแพทย์ได้มีการปรับปรุงชิ้นงานที่ทำจากไทเทเนียมเกรด 5 ให้กลายเป็นแคลเซียมไทเทเนต (CaTiO_3) เพื่อนำชิ้นงานไปใช้เป็นอุปกรณ์สำหรับกระดูกและฟันโดย (W.F.Sales, et al. 2016) ได้นำชิ้นงานไทเทเนียมเกรด 5 และใช้ของเหลวตัวกลางเป็นแคลเซียมคลอไรด์ในกระบวนการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า โดยผลการทดลองด้วยการส่องกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดและใช้เทคนิคตรวจหาธาตุด้วยเทคนิคอีดีเอสพบว่าเกิดธาตุแคลเซียมตัวอยู่ที่ผิวชิ้นงาน นอกจากนี้วัสดุและอุปกรณ์ทางการแพทย์ที่นิยมอีกชนิด คือ ทำรากฟันเทียมและอุปกรณ์จัดฟันซึ่งอุปกรณ์ทางการแพทย์จำเป็นต้องใช้ไทเทเนียมเนื่องจากคุณสมบัติของไทเทเนียมมีลักษณะเบาและไม่เป็นอันตรายต่อร่างกายมนุษย์ไม่ก่อให้เกิดการแพ้ ไทเทเนียมจึงสามารถนำมาใช้เป็นอุปกรณ์ในร่างกายมนุษย์ได้ (Muhammad P. Jahana et al. 2017) จึงได้ทำการศึกษาพื้นผิวของวัสดุสองชนิดที่มีส่วนประกอบเป็นไทเทเนียม คือ NiTi และ Ti6Al4V ที่เกิดขึ้นในกระบวนการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าและผลปรากฏว่าหลังเกิดกระบวนการ EDM กับชิ้นงานทั้งสองก่อให้เกิดชั้นเคลือบผิวโดยฟิล์มบางของออกไซด์ โดยฟิล์มบางเหล่านี้ช่วยให้ชิ้นงานมีความทนต่อการกัดกร่อนมากขึ้นและยืดอายุการใช้งานยาวขึ้นจึงเหมาะสมอย่างยิ่งในการนำชิ้นงานที่เกิดฟิล์มออกไซด์หลังจากกัดชิ้นงานด้วยเครื่องกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าไปใช้ในการทำรากฟันเทียมและอุปกรณ์ที่ใช้ในการจัดฟัน โดยชิ้นงาน Ti6Al4V เกิดชั้นฟิล์ม TiO_2 ที่มีความหนากว่าชั้นฟิล์ม NiO_3 บนชิ้นงาน NiTi และพื้นผิวชิ้นงาน Ti6Al4V มีความเรียบผิวมากกว่าพื้นผิวชิ้นงาน NiTi นอกจากการปรับปรุงพื้นผิวด้วยการสร้างชั้นฟิล์มออกไซด์แล้วยังมีการปรับปรุงพื้นผิวในชิ้นงานที่ได้รับการยอมรับในอุตสาหกรรมเคลือบผิว คือ การเคลือบไทเทเนียมไนไตรด์และการเคลือบไทเทเนียมคาร์บอนไนไตรด์ จากสมบัติของไทเทเนียมที่มีความแข็งและทนต่อการกัดกร่อนจึงนำไทเทเนียมมาใช้เคลือบชิ้นงานอื่นๆ เนื่องจากไทเทเนียมมีราคาค่อนข้างสูงและต้องการที่จะคงสภาพทางกายภาพของอุปกรณ์ต่างๆ จึงต้องการใช้ไทเทเนียมเพียง

เล็กน้อยเท่านั้นเพื่อไปใช้ในการเคลือบวัสดุอุปกรณ์โดย (Thamanarong : 2014) ได้นำเสนอการปรับปรุงพื้นผิวของเหล็กกล้าเครื่องมือ โดยการเคลือบไทเทเนียมไนไตรด์ลงบนชิ้นงานด้วยกระบวนการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า และใช้ของเหลวตัวกลาง คือ ยูเรียผลปรากฏว่า เกิดชั้นเคลือบผิวที่ชิ้นงานโดยชั้นเคลือบผิวที่เกิดขึ้นนั้นเมื่อนำไปตรวจวิเคราะห์หาธาตุด้วยเทคนิคเอ็กซ์อาร์ดี ปรากฏว่ามีไทเทเนียมไนไตรด์เป็นธาตุประกอบ และเมื่อทดสอบความแข็งของชั้นเคลือบผิวที่มีไทเทเนียมไนไตรด์กับชั้นที่ไม่มีไทเทเนียมไนไตรด์ปรากฏว่า ชั้นที่มีไทเทเนียมไนไตรด์มีความแข็งมากกว่า นอกจากการปรับปรุงพื้นผิวชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือโดยการใช้ตัวกลางเป็นยูเรียแล้วในปีเดียวกันนักวิจัยชาวจีน (Houqun Xiao et al. 2014) ได้ทำการทดลองใช้สารละลายเอทานอลลาไมน์เป็นของเหลวตัวกลางในการกัดโลหะด้วยไฟฟ้าผลปรากฏว่าบนชั้นเคลือบผิวของเหล็กกล้าเครื่องมือมีไทเทเนียมไนไตรด์และไทเทเนียมคาร์บอนไนไตรด์เป็นส่วนประกอบ จากนั้นพวกเขาจึงทำการทดสอบความแข็งผลปรากฏว่าบริเวณชั้นเคลือบที่มีไทเทเนียมคาร์บอนไนไตรด์มีความแข็งมากกว่าบริเวณชั้นเคลือบที่มีไทเทเนียมไนไตรด์ถึง 4 เท่า การปรับปรุงผิวให้มีความแข็งสามารถทำได้วิธีอื่นๆ เช่น การเติมผงต่างๆลงในของเหลวตัวกลางเพื่อให้ได้ธาตุประกอบที่ต้องการโดย (Sanjeev Kumar et al.2012) พวกเขานำผลทั้งสแตนใส่ลงไปลงในของเหลวตัวกลางสำหรับชิ้นงานเหล็กกล้าผลปรากฏว่าเมื่อเติมทั้งสแตนลงไปและนำชิ้นงานไปตรวจวิเคราะห์ธาตุประกอบด้วยเครื่องเอ็กซ์อาร์ดี พบ WC และ W₂C และช่วยให้ผิวมีความแข็งมากขึ้น

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

3.1 แผนการวิจัยดำเนินงาน

แผนการดำเนินงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงพื้นผิวโลหะผสมไทเทเนียม ให้เกิดไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) และไทเทเนียมคาร์บอนไนไตรด์ (TiCN) บนผิวชิ้นงาน เริ่มจากการศึกษา

ปัจจัยที่ส่งผลต่อการสร้างชั้นเคลือบผิวหลังเกิดกระบวนการ EDM ได้แก่ ค่าความต่างศักย์วงจรเปิด ค่ากระแสไฟฟ้า เวลาเปิด (On Time) เวลาปิด (Off Time) ขั้วอิเล็กโทรด (Electrode polarity) และของเหลวตัวกลางที่ใช้คือสารละลายเอทานอลเอมีน จากนั้นนำชิ้นงานไปวิเคราะห์ผลโดยใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งการประเมินผลการทดลอง ได้แก่ ความหนาของผิวเฉลี่ย รอยแตก ร้าวบนพื้นผิว ความหนาของชั้นเคลือบผิว และความแข็งระดับจุลภาค โดยแผนการทดลองและการประเมินผลแสดงในภาคผนวก ก

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง

3.2.1 ชิ้นงานสำหรับการวิจัย

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ ไทเทเนียมเกรด 5 และรายละเอียดส่วนประกอบทางเคมีแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1

ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมไทเทเนียมเกรด 5

| ส่วนประกอบทางเคมีไทเทเนียมเกรด 5 | |
|----------------------------------|----------|
| สัญลักษณ์ | Wt. % |
| Al | 6 |
| Fe | Max 0.25 |
| O | Max 0.2 |
| Ti | 90 |
| V | 4 |

3.2.2 อิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดลอง

อิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดลอง คือ แท่งไทเทเนียมเกรด 2 และแท่งกราไฟต์อีดีเอ็ม 3 โดยส่วนผสมทางเคมีของแท่งไทเทเนียมเกรด 2 แสดงดังตารางที่ 3.2 และคุณสมบัติของอิเล็กโทรดทั้งสองชนิดแสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.2

ส่วนผสมทางเคมีของไทเทเนียมเกรด 2

| ส่วนประกอบทางเคมีไทเทเนียมเกรด 2 | |
|----------------------------------|-----------|
| สัญลักษณ์ | Wt. % |
| C | Max 0.1 |
| Fe | Max 0.3 |
| H | Max 0.015 |
| N | 0.03 |
| O | 0.25 |
| Ti | 99.2 |

(ที่มา : Titanium Alloys, R. Boyer et al. 1994)

ตารางที่ 3.3

สมบัติของอิเล็กโตรด

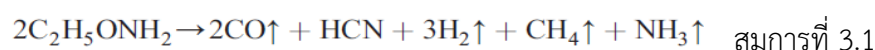
| คุณสมบัติ | ไทเทเนียมเกรด 2 | กราไฟต์อีดีเอ็ม 3 |
|----------------------------------|-----------------|-------------------|
| ขนาดอนุภาค | 45 < 100 | < 5 |
| ความหนาแน่น(g/cm ³) | 4.51 | 1.81 |
| จุดหลอมเหลว (°C) | 920 | 3,350 |
| จุดเดือด (°C) | 3287 | 4027 |
| ความร้อนของการหลอมเหลว(kJ/mol) | 18.7 | 105 |
| ความร้อนของการกลายเป็นไอ(kJ/mol) | 425 | 715 |

(ที่มา : Titanium Alloys1994. , L. Kristian, 2004)

(ที่มา : <http://periodictable.com/Properties/A/VaporizationHeat.an.html>)

3.2.3 ของเหลวตัวกลาง (Dielectric Fluid)

สำหรับการทดลองในครั้งนี้ใช้เอทานอนลามีนเป็นของเหลวตัวกลาง โดยมีสูตรโครงสร้างทางเคมีของเอทานอนลามีน HOCH₂CH₂NH₂ และสมการทางเคมีที่เกิดขึ้นในขณะเกิดความร้อนในกระบวนการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าแสดงได้ดังสมการที่ 3.1 (Houqun Xiao et al.2014)



3.2.4 เครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า

เครื่องจักรหรือเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้ารุ่น MITSUBISHI EA8 มาใช้ในการทดลอง เป็นเครื่องจักรของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต รุ่น EA8 - ADVANCE SERIES



ภาพที่ 3.1 เครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า (Electrical discharge machine : EDM)
(ที่มา : เครื่องกัดชิ้นงานด้วยไฟฟ้าแบบ Die sinking EDM, MITSUBISHI ELECTRIC., 2012)

3.2.5 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

ขอบเขตของตัวแปรที่ใช้สำหรับกระบวนการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าในสารละลายเอทานอลเอมีนเพื่อปรับปรุงพื้นผิวของโลหะผสมไทเทเนียมแสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4

ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

| ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง | ค่าที่ใช้ในการทดลอง |
|---------------------------------|--|
| สารละลายเอทานอลเอมีน | เอทานอลเอมีน |
| อิเล็กโตรด | แท่งไทเทเนียมเกรด 2 , แท่งกราไฟต์อีทีเอ็ม 3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร |
| ขั้วอิเล็กโตรด (polarity) | ขั้วลบ , ขั้วบวก |
| ความต่างศักย์ (โวลต์) | 250 |
| กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์) | 5 , 20 |
| เวลาเปิด (ไมโครวินาที) | 390 |
| ปัจจัยประสิทธิภาพ (เปอร์เซ็นต์) | 25 , 50 , 75 |

3.3 ขั้นตอนการทดลองกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า

3.3.1 จัดเตรียมวัสดุอุปกรณ์สำหรับการทดลอง

เตรียมชิ้นงานไทเทเนียมเกรด 5 ขนาดกว้าง 12 ยาว 15 หนา 3 มิลลิเมตร เตรียมสารละลายเอทานอลเอมีน 1000 มิลลิลิตร เตรียมภาชนะพลาสติกรูปทรงสี่เหลี่ยมสำหรับใส่สารละลายเอทานอลเอมีน เตรียมเครื่องกรองเศษชิ้นงานและระบบไหลเวียนน้ำเตรียมอิเล็กโตรดกราไฟต์ และอิเล็กโตรดไทเทเนียมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร แสดงดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 วิธีติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง

3.3.2 ดำเนินการทดลอง

3.3.2.1 ดำเนินการทดลองเบื้องต้น เพื่อศึกษาข้อผิดพลาดที่ 3.5

ตารางที่ 3.5

ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองเบื้องต้น

| ขั้ว | กระแสไฟฟ้า | เวลาเปิด | ปัจจัยประสิทธิภาพ | เวลา | อิเล็กโตรด |
|------|------------|-----------------|-------------------|---------|------------|
| (+) | 20 แอมแปร์ | 390 ไมโครวินาที | 50% | 20 นาที | ไทเทเนียม |
| (-) | 20 แอมแปร์ | 390 ไมโครวินาที | 50% | 20 นาที | ไทเทเนียม |
| (+) | 20 แอมแปร์ | 390 ไมโครวินาที | 50% | 20 นาที | กราไฟท์ |
| (-) | 20 แอมแปร์ | 390 ไมโครวินาที | 50% | 20 นาที | กราไฟท์ |

3.3.2.1 ดำเนินการทดลองปรับค่ากระแสไฟฟ้าเป็น 5 แอมแปร์

ศึกษาค่าความหนาผิวเมื่อปรับค่ากระแสไฟฟ้าเป็น 5 แอมแปร์และเปรียบเทียบกับค่าความหนาผิวเฉลี่ยที่กระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์ ทั้งการทดลองที่ใช้อิเล็กโตรดไทเทเนียมและการทดลองที่ใช้อิเล็กโตรดกราไฟท์และเปรียบเทียบความหนาผิวเฉลี่ยของการทดลองที่ใช้อิเล็กโตรดทั้งสอง

3.3.2.1 ดำเนินการทดลองปรับค่าปัจจัยประสิทธิภาพ

ศึกษาความหนาผิวเฉลี่ยและความหนาของชั้นเคลือบผิวเมื่อปรับค่าปัจจัยประสิทธิภาพเป็น 25%, 50% และ 75% ตามลำดับ

3.3.3 เตรียมชิ้นงานสำหรับศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาค

นำชิ้นงานที่กัดอาร์คไปตัดขวางแล้วนำไปหล่อในเรซินจากนั้นทำการขัดชิ้นงานด้วยเครื่องขัดเป็นแนวระนาบสลับด้านทำมุมตั้งฉากกับรอยขีดเดิมจนชิ้นงานใสเป็นกระจกแล้วทำการกัดกรดซึ่งส่วนผสมของกรดสำหรับกัดชิ้นงานโลหะผสมไทเทเนียม ประกอบด้วยน้ำกลั่นปริมาตร 20 มิลลิลิตร ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30% ปริมาตร 5 มิลลิลิตร และสารละลายโพแตสเซียมไฮดรอกไซด์ 40% ปริมาตร 10 มิลลิลิตร (Metallographic Etching 2nd Edition) หรือใช้กรดไฮโดรฟลูออริกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อย่างละ 50% ผสมกันและแช่ทิ้งไว้ 5-8 วินาที โดยน้ำยาที่ใช้กัดกรดนี้จะต้องใช้งานหลังจากที่ผสมเสร็จและทิ้งไว้ไม่เกิน 10 นาที หากทิ้งไว้นานเกินเวลาที่กำหนด ต้องเตรียมน้ำยาใหม่ นอกจากนี้ในขณะที่ทำการกัดกรดจะต้องใช้ไฟฟ้าเข้ามาช่วยในการกัดด้วย เพื่อให้การกัดกรดมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

3.3.4 นำชิ้นงานวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค (Microstructure)

ศึกษาโครงสร้างของชิ้นหลอมใหม่โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (optical microscope : OM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy : SEM) จากนั้นวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคอีดีเอส (Electro Dispersive Spectrum : EDS) จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อศึกษาธาตุต่างๆ ที่บริเวณพื้นผิวหลังกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า โดยการศึกษาโครงสร้างและศึกษาธาตุด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดหากชิ้นงานที่ใช้ศึกษาอยู่ในเรซินต้องทำการเคลือบด้วยทองคำก่อนเพื่อให้ชิ้นงานสามารถนำไฟฟ้าจึงสามารถทำการศึกษาได้ จากนั้นนำชิ้นงานไปวิเคราะห์เฟสโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X – Ray diffraction : XRD) และนำชิ้นงานไปวัดค่าความแข็งระดับจุลภาค (Micro Hardness Test)

3.3.5 บันทึกและวิเคราะห์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์ผลการทดลองบริเวณพื้นผิวหลังกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า ได้แก่ ความหยาบผิวเฉลี่ย และลักษณะการเกิดรอยแตกร้าว ส่วนการวิเคราะห์ผลการทดลองของโครงสร้างชั้นเคลือบผิวระดับจุลภาค ได้แก่ ความหนาของชั้นเคลือบผิวและความแข็งระดับบริเวณชั้นเคลือบผิว

3.3.6 สรุปค่าตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

3.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาค

3.4.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy : SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ใช้สังเกตลักษณะการหลอมสังเกตลักษณะรอยแตกร้าวบริเวณพื้นผิวชิ้นงาน และใช้ในการตรวจวิเคราะห์หาธาตุด้วยเทคนิคอีดีเอส (Energy Dispersive Spectroscopy : EDS) ในงานวิจัยนี้ใช้กล้องจุลทรรศน์ สำหรับตรวจสอบรอยแตกร้าวขนาดเล็กทำได้โดยนำชิ้นงานส่องดูผิวบริเวณที่ถูกกัดอาร์คด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเช่นเดียวกัน โดยชิ้นงานจะถูกใส่ไปในเครื่องทางด้านซ้ายในภาพที่ 3.3 ส่วนจอประมวลผลอยู่ทางขวามือ



ภาพที่ 3.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy : SEM)

3.4.2 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope : OM)

การวัดความหนาของชั้นเคลือบผิวสามารถตรวจสอบได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงด้วยกำลังขยายที่แตกต่างกันซึ่งขั้นตอนการวัดความหนาเริ่มจากกำหนดกำลังขยายที่มีกำลังขยายต่ำสุดก่อนเพื่อกำหนดตำแหน่งที่ต้องการวัดก่อน จากนั้นจึงค่อยๆ เพิ่มกำลังขยายมากขึ้นบริเวณตำแหน่งที่ต้องการวัดความหนาโดยความหนาของชั้นเคลือบผิวมีหน่วยเป็นไมคอน โดยภาพกล้องจุลทรรศน์แบบแสงแสดงดังภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope : OM)
(ที่มา : <http://www.microscopy.in.th/2629/trinocularmicroscope.html>)

3.4.3 เครื่องเอ็กซ์อาร์ดี (X-ray diffraction : XRD)

หลังจากวิเคราะห์ธาตุบริเวณพื้นผิวชิ้นงานหลังกัดอาร์คแล้ว นำชิ้นงานมาตรวจหาสารประกอบด้วยเครื่องเอ็กซ์อาร์ดี ซึ่งเป็นการยืนยันว่าสารประกอบที่พบบริเวณพื้นผิวเกิดสารประกอบชนิดใด เมื่อทราบชนิดของสารประกอบที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวก็สามารถวิเคราะห์ผลได้แม่นยำมากขึ้น ภาพเครื่องเอ็กซ์อาร์ดี แสดงดังภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 เครื่องเอ็กซ์อาร์ดี

(ที่มา : <http://nanothenevera.blogspot.com/2016/02/characterization-techniques.html>)

3.4.4 ตรวจวัดความแข็งด้วยเครื่อง (Micro Hardness Tester)

หลังจากกัดกรดชิ้นงานที่ผ่านการตัดขวางและนำไปขัดจนใสเป็นกระจก นำชิ้นงานมาวัดความแข็งบริเวณชั้นเคลือบผิวหลังกระบวนการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า ด้วยเครื่องวัดความแข็งระดับจุลภาคในหน่วยวิกเกอร์ส โดยเครื่องวัดความแข็งที่ใช้ในงานการทดลองนี้แสดงดังภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 เครื่องวัดความแข็ง (Micro Hardness Tester)

(ที่มา : <http://www.hollywood.co.th/html>)

3.4.5 วัดความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ด้วยเครื่อง LEXT 3D Measuring Laser Microscope OLS5000

เป็นการวัดค่าความเรียบผิวชิ้นงานหลังผ่านการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าในแต่ละตัวแปร ซึ่งในงานวิจัยได้ใช้เครื่องวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ย โดยกำหนดระยะในการลากเลเซอร์บนพื้นผิววัสดุที่ต้องการวัดค่าความเรียบผิวของวัสดุ ส่วนความยาวที่ใช้ในการวัดความหยาบผิวเท่ากับ 600 ไมโครเมตร ทำการวัดลากยาว 3 ครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ยของความหยาบผิวที่วัดได้จากเครื่องวัด



ภาพที่ 3.7 เครื่อง LEXT 3D Measuring Laser Microscope OLS5000

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การปรับปรุงพื้นผิวของโลหะผสมไทเทเนียมด้วยกระบวนการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าในสารละลายเอทานอลเอมีน โดยการใช้อิเล็กโทรดต่างๆ ซึ่งอิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้คือ แท่งไทเทเนียมเกรด 2 และแท่งกราฟไฟท์อีดีเอ็ม 3 โดยปัจจัยที่ใช้ในการศึกษาสำหรับงานวิจัยนี้ได้แก่ ขั้วอิเล็กโทรด (Pol) กระแสไฟฟ้า (Ip) ความต่างศักย์วงจรเปิด (Vg) เวลาเปิด (T-on) และปัจจัยประสิทธิภาพ (DF) โดยเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลหลังกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า ได้แก่ กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscopes : OM) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope : SEM) เครื่องวัดความแข็งระดับจุลภาค (Micro hardness) เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟกชัน (X-ray Diffractometer : XRD) โดยผลการทดลองที่ได้จากการดำเนินงานครั้งนี้ประกอบด้วย ความหยาบผิว รอยแตกร้าว ความหนาของชั้นเคลือบผิว การวิเคราะห์ธาตุ การวิเคราะห์สารประกอบบนชั้นเคลือบผิว และความแข็งของชั้นเคลือบผิว จากนั้นถัดไปจะกล่าวถึงการอภิปรายผลการทดลอง

4.1 ความหยาบผิว

การศึกษาความหยาบผิวสำหรับการปรับปรุงพื้นผิวของโลหะผสมไทเทเนียมด้วยกระบวนการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าในสารละลายเอทานอลเอมีนโดยการใช้อิเล็กโทรดไทเทเนียมและอิเล็กโทรดกราฟไฟท์ โดยการศึกษาความหยาบผิวเฉลี่ยสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ ประกอบไปด้วย การศึกษาความหยาบผิวเฉลี่ยเมื่อขั้วอิเล็กโทรดต่างกัน การศึกษาความหยาบผิวเฉลี่ยเมื่อกระแสไฟฟ้าต่างกัน การศึกษาความหยาบผิวเฉลี่ยเมื่อปัจจัยประสิทธิภาพต่างกัน และการศึกษาความหยาบผิวเฉลี่ยเมื่อใช้อิเล็กโทรดต่างกัน ซึ่งค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้อธิบายในข้อที่ 4.1.1- 4.1.4

4.1.1 ความหยาบผิวเมื่อใช้ขั้วอิเล็กโทรดต่างกัน

ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองสำหรับศึกษาความหยาบผิวในกระบวนการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าบนชิ้นงานโลหะผสมไทเทเนียมในสารละลายเอทานอลเอมีนเมื่อใช้ขั้วอิเล็กโทรดต่างกัน แสดงดังตารางที่ 4.1

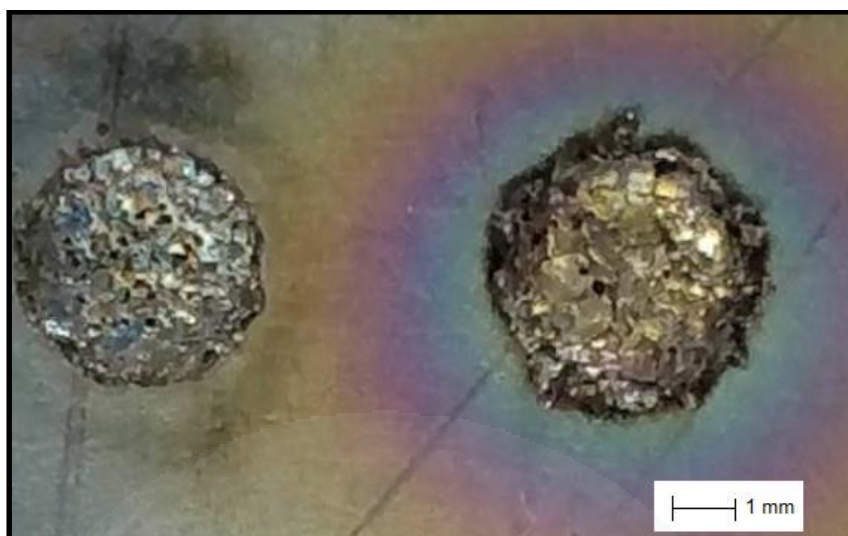
ตารางที่ 4.1

ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองในกระบวนการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าบนชิ้นงานโลหะผสมไทเทเนียมในสารละลายเอทานอลเอมีนเมื่อใช้ขั้วอิเล็กโตรดต่างกัน

| ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง | ค่าที่ใช้ |
|------------------------|-------------------------------------|
| ชนิดอิเล็กโตรด | ไทเทเนียมเกรด 2 , กราไฟท์อีดีเอ็ม 3 |
| เวลาเปิด | 390 ไมโครวินาที |
| ขั้วอิเล็กโตรด | บวก , ลบ |
| ความต่างศักย์วงจรเปิด | 250 โวลต์ |
| กระแสไฟฟ้า | 20 แอมแปร์ |
| ปัจจัยประสิทธิภาพ | 50% |
| เวลา | 20 นาที |

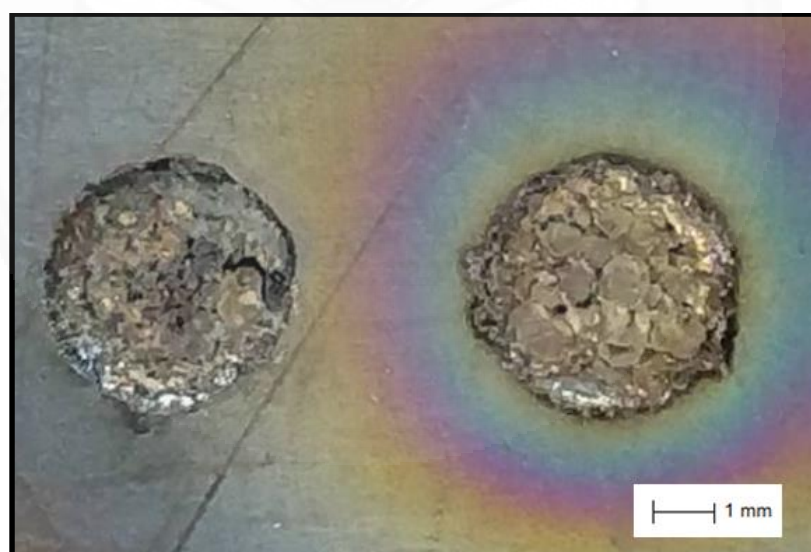
สังเกตลักษณะทางกายภาพบริเวณพื้นผิวหลังกระบวนการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า ก่อนทำการศึกษาความหยาบผิวโดยการทดลองที่ใช้อิเล็กโตรดเป็นแท่งไทเทเนียมขั้วบวกและขั้วลบ พบว่าสปีบริเวณรอบๆ รอยกัดอาร์คที่ใช้อิเล็กโตรดเป็นขั้วบวกมีเขม่าสีดำติดอยู่สามารถเช็ดออกได้ และสีของรอยกัดอาร์คลักษณะเป็นสีเงินส่วนใหญ่และมีสีทองปะปนอยู่เล็กน้อย ขนาดรอยกัดอาร์ค ประมาณ 4 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 4.1 ก) และบริเวณรอบๆ รอยกัดอาร์คที่ใช้อิเล็กโตรดเป็นขั้วลบมีสีม่วงติดอยู่รอบๆ และสีของรอยกัดอาร์คลักษณะเป็นสีทองโดยสีทองที่พบเป็นสารประกอบไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) (อภิวัฒน์, 2004) ขนาดรอยกัดอาร์คประมาณ 4.5 มิลลิเมตร ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าการทดลองที่ใช้อิเล็กโตรดไทเทเนียมเป็นขั้วบวก ดังภาพที่ 4.1 ข) ส่วนการทดลองที่ใช้อิเล็กโตรดเป็นแท่งกราไฟท์เป็นขั้วบวกลักษณะทางกายภาพบริเวณพื้นผิวหลังกระบวนการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าพบว่า บริเวณรอบๆ รอยกัดอาร์คที่ใช้อิเล็กโตรดเป็นขั้วบวกมีคราบเขม่าสีดำที่น้ำจะเกิดจากคาร์บอนติดอยู่รอบๆ และสีของรอยกัดอาร์คลักษณะเป็นสีเงินส่วนใหญ่และมีสีทองปะปนอยู่เล็กน้อยเช่นกันเหมือน การทดลองที่ใช้อิเล็กโตรดเป็นแท่งไทเทเนียมขั้วบวก และขนาดรอยกัดอาร์คมีขนาด ประมาณ 4 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 4.2 ก) ส่วนบริเวณรอบๆ รอยกัดอาร์คที่ใช้อิเล็กโตรดเป็นขั้วลบมีสีม่วงติดอยู่รอบๆ เหมือนการทดลองที่ใช้อิเล็กโตรดเป็นแท่งไทเทเนียมขั้วลบ และสีของรอยกัดอาร์คลักษณะเป็นสีทอง ขนาดรอยกัดอาร์คประมาณ 4.5 มิลลิเมตร ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าการทดลองที่ใช้อิเล็กโตรดกราไฟท์เป็นขั้วบวก ดังภาพที่ 4.2 ข)

ก) แท่งไทเทเนียมขั้วบวก ข) แท่งไทเทเนียมขั้วลบ



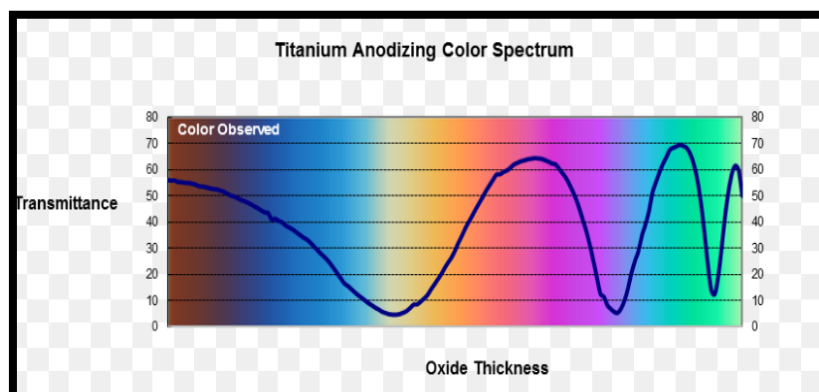
ภาพที่ 4.1 พื้นผิวหลังกระบวนการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าเมื่อใช้แท่งไทเทเนียม

ก) แท่งกราไฟท์ขั้วบวก ข) แท่งกราไฟท์ขั้วลบ



ภาพที่ 4.2 พื้นผิวหลังกระบวนการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าเมื่อใช้กราไฟท์

สีม่วงที่เกิดขึ้นรอบๆ รอยกัดอาร์คเป็นสีของชั้นฟิล์มไทเทเนียมออกไซด์ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสีกับความหนาของชั้นฟิล์มไทเทเนียมออกไซด์ดังภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสีกับความหนาของชั้นฟิล์มไทเทเนียมออกไซด์
(ที่มา : <http://techmetals.com/medadize-validated-color-and-gray-titanium-anodize/titanium-anodizing-color-spectrum>)

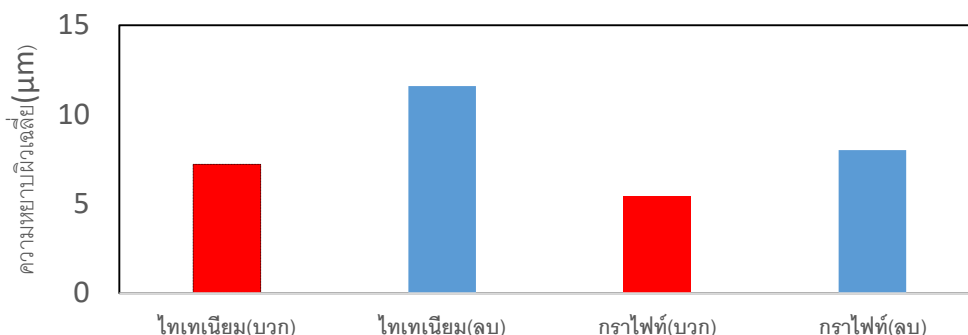
ขนาดของรอยกัดเมื่อใช้ขั้วอิเล็กโตรเป็นขั้วลบมีขนาดใหญ่กว่ารอยกัดอาร์คที่ใช้ขั้วอิเล็กโตรเป็นบวกเนื่องจากความร้อนบริเวณชิ้นงานเมื่อใช้ขั้วอิเล็กโตรเป็นลบเกิดความร้อนสะสมที่ชิ้นงาน 70% ส่วนการทดลองที่ใช้ขั้วอิเล็กโตรดเป็นบวกความร้อนสะสมที่ชิ้นงานมีเพียง 30% เมื่อความร้อนสะสมมากทำให้หลอมเกิดการหลอมได้ง่ายกว่ารอยกัดอาร์คจึงมีขนาดใหญ่กว่า โดยอธิบายลักษณะการเกิดความร้อนสะสมเมื่อใช้ขั้วอิเล็กโตรต่างต่อไปในข้อที่ 4.5.1

หลังจากสังเกตลักษณะทางกายภาพเบื้องต้นสำหรับการทดลองที่ใช้ขั้วอิเล็กโตรดต่างกัน จากนั้นทำการวัดค่าความหนาของชิ้นงานหลังกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าโดยผลการวัดความหนาผิวแสดงดังตารางที่ 4.2 และภาพที่ 4.4

ตารางที่ 4.2

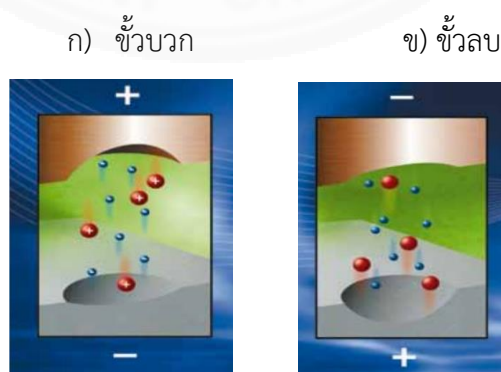
ผลการวัดความหนาผิวเฉลี่ยเมื่อใช้ขั้วอิเล็กโตรดต่างกัน กระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์ ปัจจัยประสิทธิภาพ 50%

| อิเล็กโตรด | ขั้ว | ความหนาผิวเฉลี่ย(μm) |
|------------|------|----------------------|
| ไทเทเนียม | บวก | 7.4 |
| | ลบ | 11.6 |
| กราไฟท์ | บวก | 5.4 |
| | ลบ | 8 |



ภาพที่ 4.4 ความหยาบผิวเฉลี่ยเมื่อใช้ขั้วอิเล็กโทรดต่างชนิดกัน

จากผลการวัดความหยาบผิวผลการวัดความหยาบผิวเฉลี่ยของพื้นผิวที่ใช้ขั้วอิเล็กโทรดต่างกัน แสดงดังตารางที่ 4.2 และภาพที่ 4.8 โดยพบว่าบริเวณพื้นผิวหลังกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าที่ใช้อิเล็กโทรดเป็นแท่งไทเทเนียมขั้วบวกวัดความหยาบผิวเฉลี่ยได้ 7.4 ไมโครเมตร และบริเวณพื้นผิวหลังกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าที่ใช้อิเล็กโทรดเป็นแท่งไทเทเนียมขั้วลบวัดความหยาบผิวเฉลี่ยได้ 11.6 ไมโครเมตร ส่วนบริเวณพื้นผิวหลังกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าที่ใช้อิเล็กโทรดเป็นแท่งไทกราฟท์ขั้วบวกวัดความหยาบผิวเฉลี่ยได้ 5.4 ไมโครเมตร และบริเวณพื้นผิวหลังกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าที่ใช้อิเล็กโทรดเป็นแท่งกราไฟท์เป็นขั้วลบวัดความหยาบผิวเฉลี่ยได้ 8 ไมโครเมตร โดยพื้นผิวหลังกัดอาร์คเมื่อใช้ขั้วอิเล็กโทรดเป็นขั้วบวกสังเกตได้ว่าค่าความหยาบผิวเฉลี่ยมีความเรียบกว่าการทดลองที่ใช้อิเล็กโทรดเป็นขั้วลบ เนื่องจากเมื่อกำหนดอิเล็กโทรดเป็นขั้วลบ ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปชนไปที่ชิ้นงานที่เป็นขั้วบวกทำให้เกิดแอ่งและรอยลึกมีผลทำให้ความหยาบผิวเฉลี่ยมากกว่าการทดลองที่เป็นขั้วบวกโดยลักษณะการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเมื่อใช้ขั้วอิเล็กโทรดต่างชนิดกันแสดงดังภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 การไหลของกระแสไฟฟ้าเมื่อใช้ขั้วอิเล็กโทรดต่างกัน

(ที่มา : Technology of spark erosion, Oelheld Innovative Fluid Technology)

จากศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าของอภิวัดน์ (2004) ธรรมรงค์ (2015) Samer (2016) F.Klocke (2016) และ D.Krastev (2016) พบว่าได้ใช้ขั้วอิเล็กโทรดลบเพื่อศึกษาสารประกอบบริเวณชั้นเคลือบผิว จึงเลือกใช้ขั้วอิเล็กโทรดเป็นลบสำหรับการทดลองต่อไปและทดลองปรับค่ากระแสไฟฟ้าเพื่อเปรียบเทียบค่าความหยาบผิว โดยตัวแปรที่ใช้แสดงดังตารางที่ 4.3

4.1.2 ความหยาบผิวเมื่อใช้กระแสไฟฟ้าต่างกัน

ตารางที่ 4.3

ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองในกระบวนการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าบนชิ้นงานโลหะผสมไทเทเนียมในสารละลายเอทานอลเอมีนเมื่อใช้กระแสไฟฟ้าต่างกัน

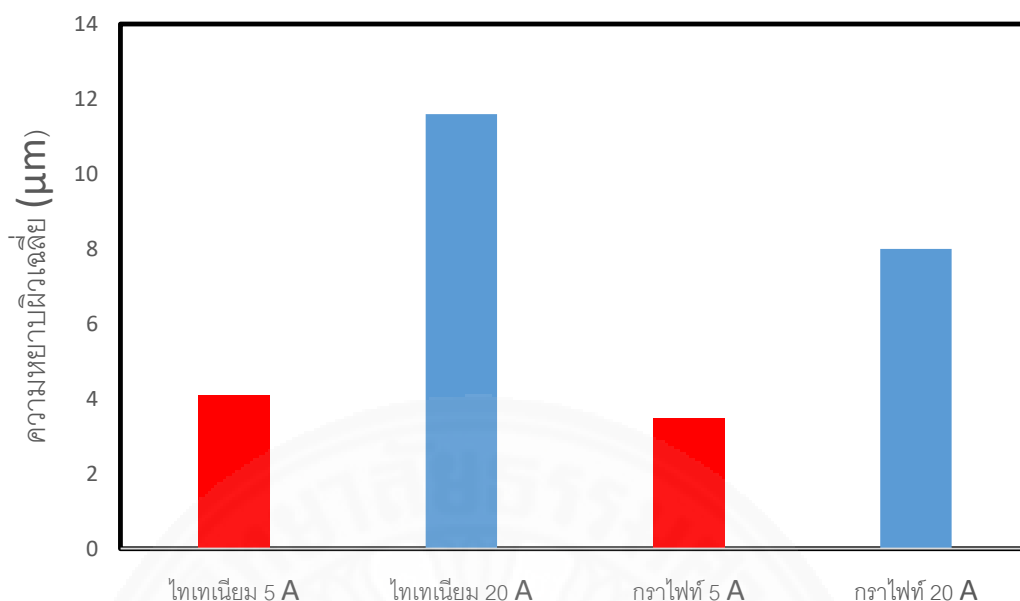
| ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง | ค่าที่ใช้ |
|------------------------|-------------------------------------|
| ชนิดอิเล็กโทรด | ไทเทเนียมเกรด 2 , กราไฟท์อีดีเอ็ม 3 |
| เวลาเปิด | 390 ไมโครวินาที |
| ขั้วอิเล็กโทรด | ลบ |
| ความต่างศักย์วงจรเปิด | 250 โวลต์ |
| กระแสไฟฟ้า | 5 , 20 แอมแปร์ |
| ปัจจัยประสิทธิภาพ | 50% |
| เวลา | 20 นาที |

เมื่อทดลองปรับค่ากระแสไฟฟ้าเป็น 5 แอมแปร์ทำการเปรียบเทียบผลของความหยาบผิวของชิ้นงานหลังกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า ที่กระแส 5 แอมแปร์กับ 20 แอมแปร์ โดยผลการวัดความหยาบผิวเมื่อใช้ค่ากระแสไฟฟ้าต่างกันแสดงดังตารางที่ 4.4 และภาพที่ 4.6

ตารางที่ 4.4

ผลการวัดความหยาบผิวเฉลี่ยเมื่อใช้ค่ากระแสไฟฟ้าต่างกันปัจจัยประสิทธิภาพ 50%

| อิเล็กโทรด | กระแสไฟฟ้า (A) | ความหยาบผิวเฉลี่ย (μm) |
|------------|----------------|-------------------------------------|
| ไทเทเนียม | 5 | 4.1 |
| | 20 | 11.6 |
| กราไฟท์ | 5 | 3.5 |
| | 20 | 8 |



ภาพที่ 4.6 ความหยาบผิวเมื่อค่ากระแสไฟฟ้าต่างกัน

ผลการวัดความหยาบผิวเฉลี่ยด้วยเครื่อง LEXT 3D Measuring Laser Microscope OLS 5000 โดยการทดลองที่ใช้แท่งไทเทเนียมเป็นอิเล็กโทรด ป้อนค่ากระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์ วัดความหยาบผิวเฉลี่ยได้ 11.6 ไมโครเมตร ทดลองที่ใช้แท่งไทเทเนียมเป็นอิเล็กโทรด ป้อนค่ากระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ วัดความหยาบผิวเฉลี่ยได้ 4.1 ไมโครเมตร การทดลองที่ใช้แท่งกราไฟท์เป็นอิเล็กโทรด ป้อนค่ากระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์วัดความหยาบผิวเฉลี่ยได้ 8 ไมโครเมตร และการทดลองที่ใช้แท่งกราไฟท์ เป็นอิเล็กโทรด ป้อนค่ากระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์วัดความหยาบผิวเฉลี่ยได้ 3.5 ไมโครเมตร จะเห็นว่าการทดลองที่ใช้อิเล็กโทรดไทเทเนียมและกราไฟท์ ค่ากระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์ ให้ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยมากกว่าการทดลองที่ใช้อิเล็กโทรดไทเทเนียม และกราไฟท์ ค่ากระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ เนื่องจากระดับของกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้นจะทำให้เกิดความรุนแรงของการกัดเซาะชิ้นงานโลหะและเกิดความลึกของการสปาร์ค มากขึ้นตามค่ากระแสไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้น จึงส่งผลต่อค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของชิ้นงานที่ทดสอบ (Pichai ; 2012) โดยขั้นตอนการวัดความหยาบผิวเฉลี่ยต้องวัดอย่างน้อยสามเส้น โดยเริ่มจากวัดความหยาบผิวบริเวณตรงกลางของพื้นผิวชิ้นงาน จากนั้นวัดขึ้นไปเหนือเส้นตรงกลางชิ้นงานหนึ่งเส้น และวัดถัดจากเส้นตรงกลางลงมาอีกหนึ่งเส้น จากนั้นนำค่าความหยาบผิวเฉลี่ยทั้งสามเส้นมาเฉลี่ยอีกครั้ง โดยภาพการวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ใช้อิเล็กโทรดไทเทเนียมและกราไฟท์ กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ และ 20 แอมแปร์ ที่ได้จากเครื่อง LEXT 3D Measuring Laser Microscope OLS 5000 แสดงในภาคผนวก ก

จากผลการวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ยสำหรับที่ใช้อิเล็กทรอนิกส์โทรดไทเทเนียมและอิเล็กทรอนิกส์กราไฟท์ เมื่อทดลองปรับค่ากระแสไฟฟ้าเป็น 5 แอมแปร์ เปรียบเทียบความหยาบผิวที่ค่ากระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์ พบว่าการทดลองที่ใช้ค่ากระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ ปัจจัยประสิทธิภาพ 50% ให้ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยน้อยกว่าการทดลองที่ใช้กระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์ ปัจจัยประสิทธิภาพ 50% ซึ่งค่าความหยาบผิวเฉลี่ยน้อยกว่าหมายความว่า พื้นผิวมีความเรียบมากกว่า จึงทำการทดลองต่อไปโดยเลือกใช้ค่ากระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ และทดลองปรับค่าปัจจัยประสิทธิภาพเป็น 25% และ 75% เพื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ใช้ค่ากระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ ปัจจัยประสิทธิภาพ 50%

4.1.3 ความหยาบผิวเมื่อปัจจัยประสิทธิภาพต่างกัน

สำหรับการทดลองต่อไปนี้ยังคงใช้อิเล็กทรอนิกส์โทรดไทเทเนียมและกราไฟท์ โดยการทดลองได้ทำการเลือกใช้ค่ากระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ และทดลองปรับค่าปัจจัยประสิทธิภาพเพื่อเปรียบเทียบความหยาบผิวเมื่อค่าปัจจัยประสิทธิภาพต่างกัน ซึ่งค่าปัจจัยประสิทธิภาพที่ใช้ในการทดลองคือ 25% 50% และ 75% ตามลำดับ โดยค่าแปรต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง เมื่อปรับค่าปัจจัยประสิทธิภาพ แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5

ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองเมื่อค่าปัจจัยประสิทธิภาพที่ต่างกัน

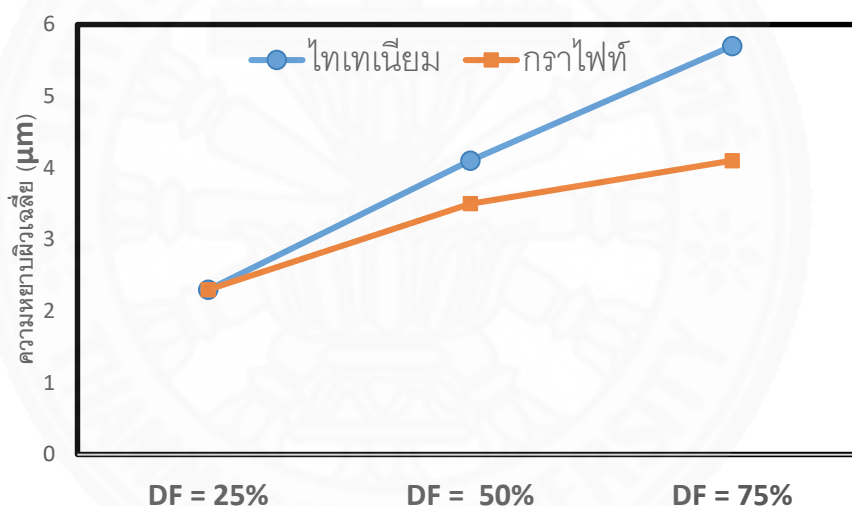
| ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง | ค่าที่ใช้ |
|------------------------|-------------------------------------|
| ชนิดอิเล็กทรอนิกส์โทรด | ไทเทเนียมเกรด 2 , กราไฟท์อีดีเอ็ม 3 |
| เวลาเปิด | 390 ไมโครวินาที |
| ขั้วอิเล็กทรอนิกส์โทรด | ลบ |
| ความต่างศักย์วงจรเปิด | 250 โวลต์ |
| กระแสไฟฟ้า | 5 แอมแปร์ |
| ปัจจัยประสิทธิภาพ | 25% , 50% , 75% |
| เวลา | 20 นาที |

ผลของการวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ย เมื่อปรับค่าปัจจัยประสิทธิภาพ เป็น 25% 50% และ 75% แสดงดังตารางที่ 4.6 และภาพที่ 4.7

ตารางที่ 4.6

ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย ที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 25% 50% และ 75% ที่กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์

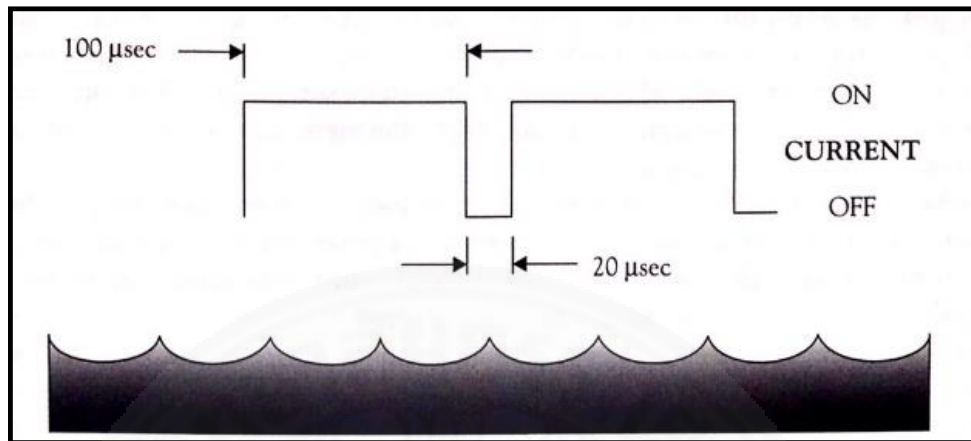
| อิเล็กโทรด | ปัจจัยประสิทธิภาพ | ความหยาบผิวเฉลี่ย(μm) |
|------------|-------------------|------------------------------------|
| ไทเทเนียม | 25 % | 3.8 |
| | 50 % | 4.1 |
| | 75 % | 5.7 |
| กราไฟท์ | 25 % | 2.3 |
| | 50 % | 3.5 |
| | 75 % | 4.1 |



ภาพที่ 4.7 ความหยาบผิวเฉลี่ย เมื่อปรับค่าปัจจัยประสิทธิภาพ

ผลความหยาบผิวเฉลี่ยเมื่อใช้อิเล็กโทรดไทเทเนียมขั้วลบ กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ เวลาเปิด 390 ไมโครวินาที ความหยาบผิวเฉลี่ย ที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 25%, 50% และ 75% คือ 3.8, 4.1 และ 5.7 ไมโครเมตรตามลำดับ ส่วนความหยาบผิวเฉลี่ย ที่ใช้อิเล็กโทรดกราไฟท์ขั้วลบ กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ เวลาเปิด 390 ไมโครวินาที ความหยาบผิวเฉลี่ย ที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 25%, 50% และ 75% คือ 2.3, 3.5 และ 4.1 ไมโครเมตร ตามลำดับ ซึ่งลักษณะของเวลาเปิดสูงและเวลาปิดต่ำ ส่งผลให้เกิดความถี่ต่ำตามภาพที่ 4.8 โดยความถี่ต่ำ จะทำให้ผิวชิ้นงานมีความหยาบมาก

เนื่องจากเวลาปล่อยประจุที่ยาวนานทำให้ความร้อนที่เกิดจากการสปาร์กระจายตัวเป็นแอ่งกว้าง และลึก(E. Bud Guitrau, 1997)

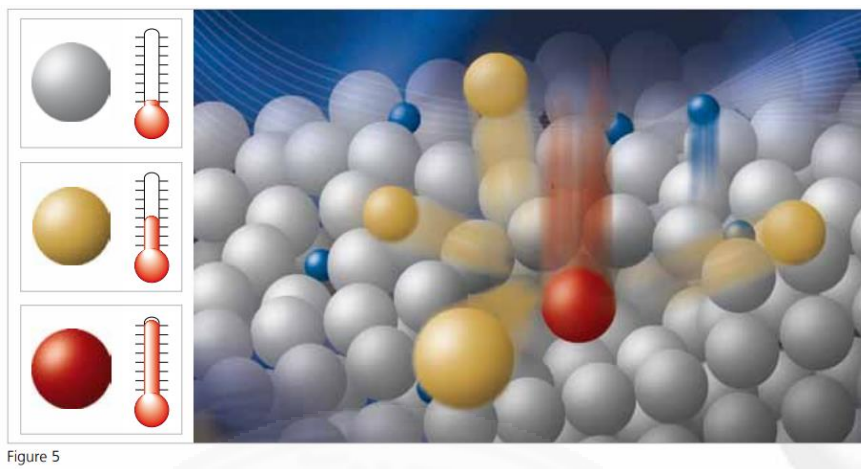


ภาพที่ 4.8 ภาพความถี่ต่ำ

(The EDM Handbook, E. Bud Guitrau, 1997)

4.1.4 ความหยาบผิวเมื่อใช้อิเล็กโตรดต่างชนิดกัน

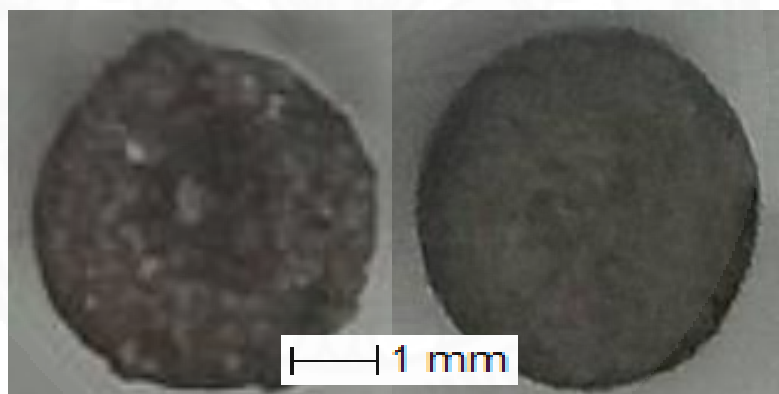
เมื่อใช้อิเล็กโตรดไทเทเนียมบริเวณพื้นผิวหลังกัดอาร์คของชิ้นงานมีความหยาบผิวมากกว่าบริเวณพื้นผิวของชิ้นงานที่ใช้อิเล็กโตรดกราไฟท์เนื่องจากอิเล็กโตรดไทเทเนียมที่ใช้เป็นไทเทเนียมเกรด 2 ซึ่งมีอนุภาคของธาตุอื่นผสมอยู่ด้วย เมื่ออิเล็กโตรดได้รับความร้อนจะเกิดการทำลายพันธะระหว่างธาตุต่างๆ ทำให้ธาตุที่ผสมอยู่ในอิเล็กโตรดได้รับความร้อนที่เท่ากัน และธาตุที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ ก็จะถูกขจัดออกได้ง่ายกว่าธาตุที่มีจุดหลอมเหลวสูง และอิเล็กโตรดไทเทเนียมขึ้นรูปโดยการรีดด้วยความร้อนทำให้อิเล็กโตรดไทเทเนียมเป็นเนื้อเดียวกันและเกิดแรงยึดกันระหว่างอนุภาคทำให้สึกได้ยาก ต่างอิเล็กโตรดกราไฟท์ที่มีอนุภาคของคาร์บอนเพียงอย่างเดียว ทำให้การหลอมและการขจัดออกของธาตุไปพร้อมกันอีกทั้งอิเล็กโตรดกราไฟท์ขึ้นรูปด้วยการอัดผงกราไฟท์ทำให้แรงยึดกันระหว่างโมเลกุลน้อยส่งผลให้อิเล็กโตรดสึกง่าย โดยการหลอมที่พร้อมกันของอนุภาคและลักษณะการสึกของอิเล็กโตรดมีผลต่อความหยาบพื้นผิวของชิ้นงานเนื่องจากการสปาร์คโดยปกติจะสปาร์คใกล้กับจุดผิวงานทำให้ผิวชิ้นงานเรียบตามไปด้วย โดยภาพการหลุดร้อนของผงอนุภาคจากความร้อนแสดงดังภาพที่ 4.9 และภาพอิเล็กโตรดหลังกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าดังภาพที่ 4.10 ซึ่งความหยาบผิวของหน้าอิเล็กโตรดส่งผลต่อพื้นผิวชิ้นงานหลังกัดอาร์ค



ภาพที่ 4.9 การหลอตร้อนของอนุภาคจากความร้อน
(ที่มา : Technology of spark erosion, Oelheld Innovative Fluid Technology)

ก) ไทเทเนียมด้านหน้า

ข) กราไฟท์ด้านหน้า



ค) ไทเทเนียมและกราไฟท์ด้านข้าง



ภาพที่ 4.10 อิเล็กโทรด ไทเทเนียมและกราไฟท์ หลังกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า

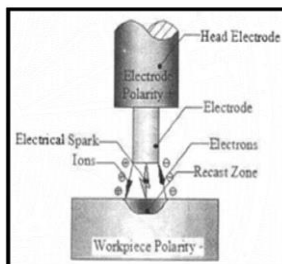
4.2 รอยแตกร้าว

การศึกษารอยแตกร้าวสำหรับการปรับปรุงพื้นผิวของโลหะผสมไทเทเนียมด้วยกระบวนการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าในสารละลายเอทานอลเอมีน โดยการศึกษารอยแตกร้าวประกอบไปด้วย การศึกษารอยแตกร้าวเมื่อใช้อิเล็กโตรดต่างกัน การศึกษารอยแตกร้าวเมื่อกระแสไฟฟ้าต่างกัน การศึกษารอยแตกร้าวเฉลี่ยเมื่อปัจจัยประสิทธิภาพต่างกัน และการศึกษารอยแตกร้าวเมื่อใช้อิเล็กโตรดต่างกัน ซึ่งผลอภิปรายความหยابผิวอภิปรายในข้อที่ 4.2.1- 4.2.4

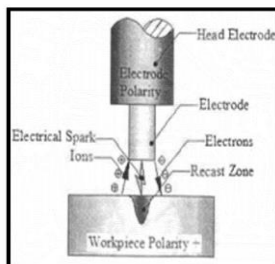
4.2.1 รอยแตกร้าวเมื่อใช้ขั้วอิเล็กโตรดต่างกัน

การทดลองเมื่อใช้อิเล็กโตรดไทเทเนียมและกราไฟท์ขั้วบวก กระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์ ปัจจัยประสิทธิภาพ 50% เกิดรอยแตกร้าวเป็นเส้นสั้นๆ ค่อยๆ แตก และพื้นผิวมีลักษณะเป็นรูพรุนจากฟองอากาศของไฮโดรเจน ซึ่งฟองอากาศเกิดการแตกตัวของไฮโดรเจนในสารละลายเอทานอลเอมีนเป็นไอออนบวก จึงมาจับกับชิ้นงานที่เป็นขั้วลบทำให้เกิดเป็นรูพรุน เมื่อเกิดรูพรุนส่งผลให้เกิดการคายความเค้นตกค้างได้บ้างทำให้เกิดรอยแตกร้าวเป็นเส้นสั้นๆ ส่วนการทดลองที่ขั้วลบทั้งสองอิเล็กโตรด กระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์ ปัจจัยประสิทธิภาพ 50% เกิดรอยแตกร้าวเป็นเส้นยาว เนื่องจากกระบวนการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าเป็นการควบคุมสภาวะเกิดการปล่อยของกระแสไฟฟ้าระหว่างผิวอิเล็กโตรดและผิวชิ้นงาน ซึ่งผลที่ได้จากการปล่อยกระแสไฟฟ้า คือ พลังงานความร้อนที่เกิดจากการเคลื่อนของอิเล็กตรอนที่ขั้วลบไปขั้วบวก ส่งผลให้ได้รับพลังงานความร้อนสูงสุดถึง 70 เปอร์เซ็นต์ ทำให้พลังงานความร้อนที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของไอออนที่ขั้วบวกไปขั้วลบ มีความร้อนเพียง 30 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น ผิวของวัสดุที่เป็นขั้วบวกจะทำให้เกิดความร้อนที่สูงถึง 70 เปอร์เซ็นต์ และอีก 30 เปอร์เซ็นต์ จะเกิดกับผิวของวัสดุที่เป็นขั้วลบ (A.Hascalik และ U.Caydas; 2007) ทำให้การทดลองที่ใช้ขั้วอิเล็กโตรดเป็นขั้วลบเกิดความร้อนสะสมมากและคายความเค้นไม่ทันจึงเกิดรอยแตกเป็นเส้นยาวโดยลักษณะการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออน เมื่อใช้อิเล็กโตรดต่างกัน แสดงดังภาพที่ 4.11 และลักษณะพื้นผิวหลังกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้วยกำลังขยาย 500 เท่าเมื่อใช้อิเล็กโตรดไทเทเนียมขั้วบวกและขั้วลบ แสดงดังภาพที่ 4.12 และอิเล็กโตรดกราไฟท์ขั้วบวกและขั้วลบแสดงดังภาพที่ 4.13

ก) โทเทเนียมขั้วบวก

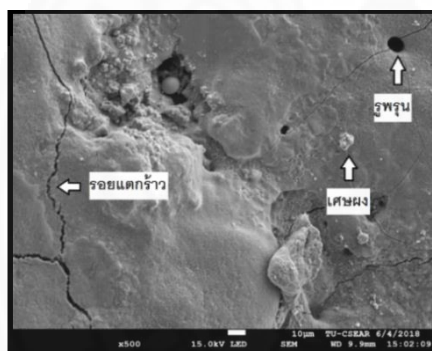


ข) โทเทเนียมขั้วลบ

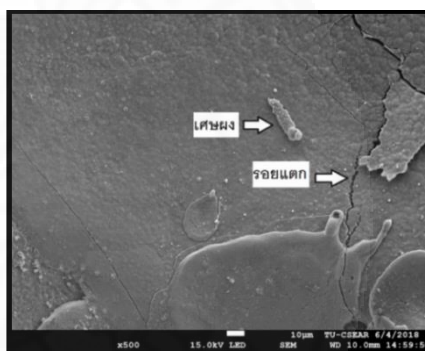


ภาพที่ 4.11 ลักษณะการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออน เมื่อขั้วอิเล็กโตรดต่างกัน (ที่มา : วิศวกรรมกรรมเชื่อม. สมบูรณ์, 2549)

ก) โทเทเนียมขั้วบวก

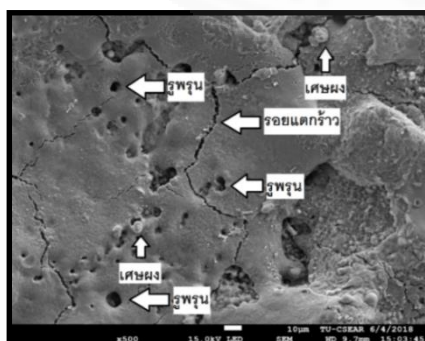


ข) โทเทเนียมขั้วลบ

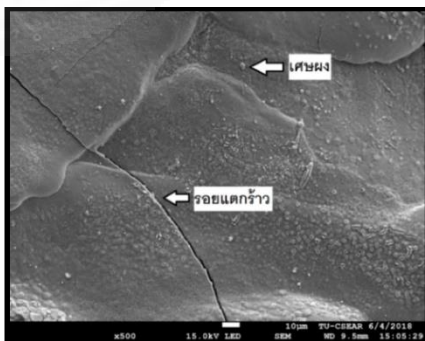


ภาพที่ 4.12 อิเล็กโตรดโทเทเนียม กระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์ ปัจจัยประสิทธิภาพ 50%

ก) กราไฟท์ขั้วบวก



ข) กราไฟท์ขั้วลบ

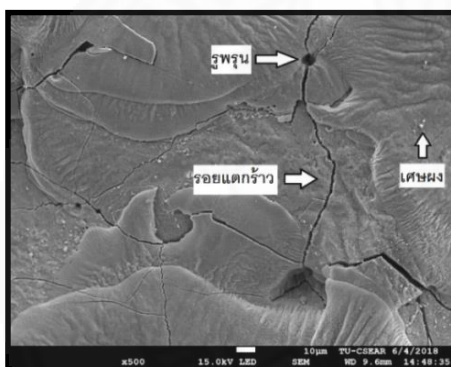


ภาพที่ 4.13 อิเล็กโตรดกราไฟท์ กระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์ ปัจจัยประสิทธิภาพ 50%

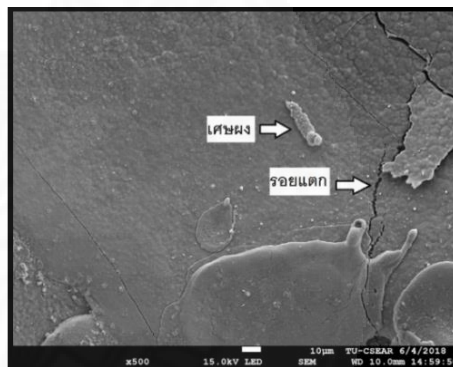
4.2.2 รอยแตกร้าวเมื่อใช้กระแสไฟฟ้าต่างกัน

การทดลองที่ใช้ขั้วลบ กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ ปัจจัยประสิทธิภาพ 50% เมื่อใช้อิเล็กโตรดไทเทเนียมและกราไฟท์พบว่าเกิดรอยแตกร้าวสั้นและกว้าง ดังภาพที่ 4.24 ก) และภาพที่ 4.25 ก) เนื่องจากที่กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ เกิดการหลอมน้อยทำให้เย็นตัวเร็วและเกิดรอยแตกร้าวเพราะคายความเค้นไม่ทัน ส่วนการทดลองที่ใช้ขั้วลบ กระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์ ปัจจัยประสิทธิภาพ 50% เมื่อใช้อิเล็กโตรดไทเทเนียมและกราไฟท์พบว่าเกิดรอยแตกร้าวเป็นเส้นยาวและแคบ ดังภาพที่ 4.14 ข) และภาพที่ 4.15 ข) เนื่องจากที่กระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์ เกิดการหลอมเยอะทำให้มีปริมาณน้ำที่หลอมมีปริมาณมากส่งผลให้การคายความเค้นเป็นไปได้ยากส่งผลให้เกิดรอยแตกร้าวเป็นเส้นยาว

ก) กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์

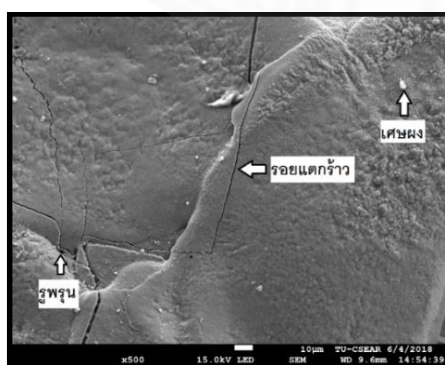


ข) กระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์

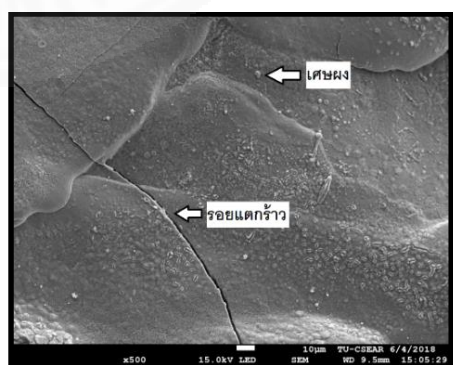


ภาพที่ 4.14 อิเล็กโตรดไทเทเนียมขั้วลบ ปัจจัยประสิทธิภาพ 50%

ก) กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์



ข) กระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์



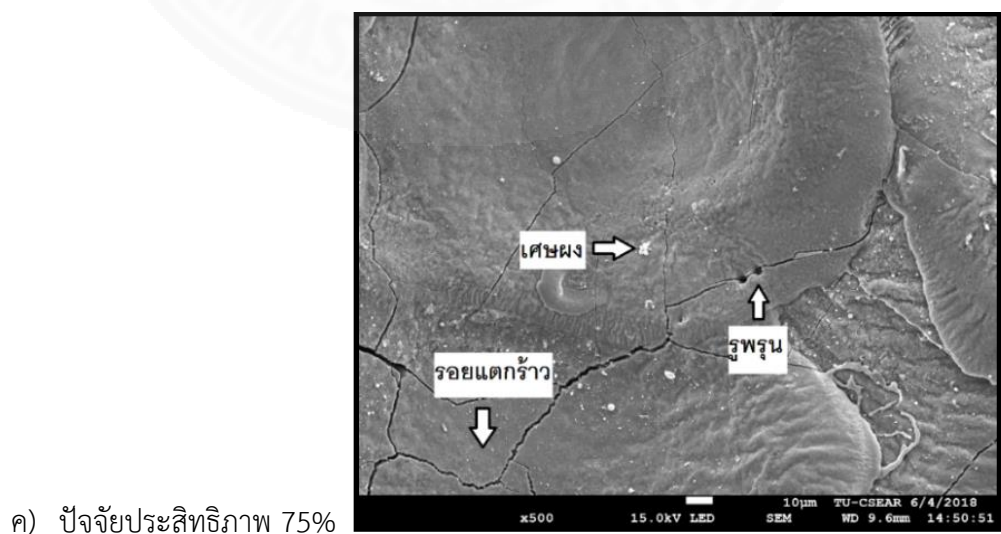
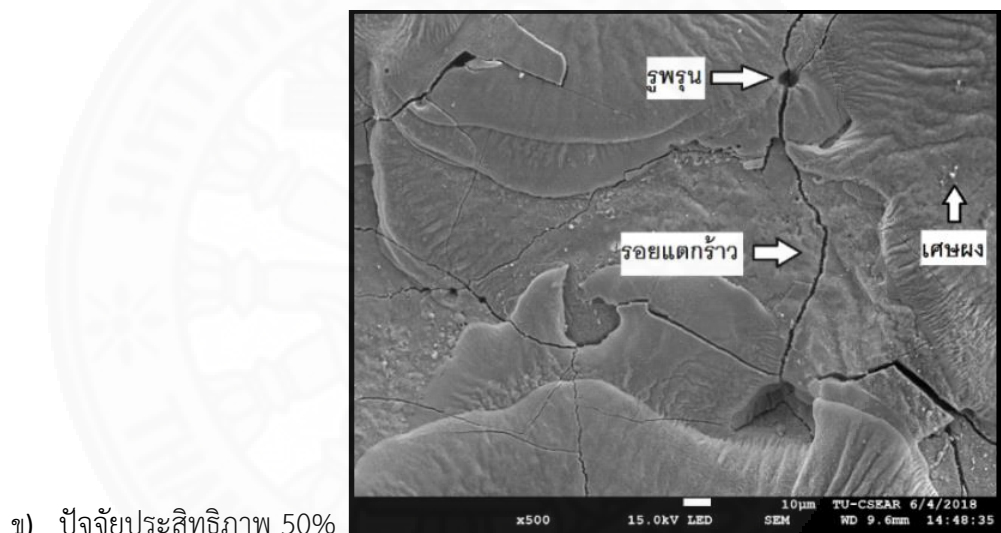
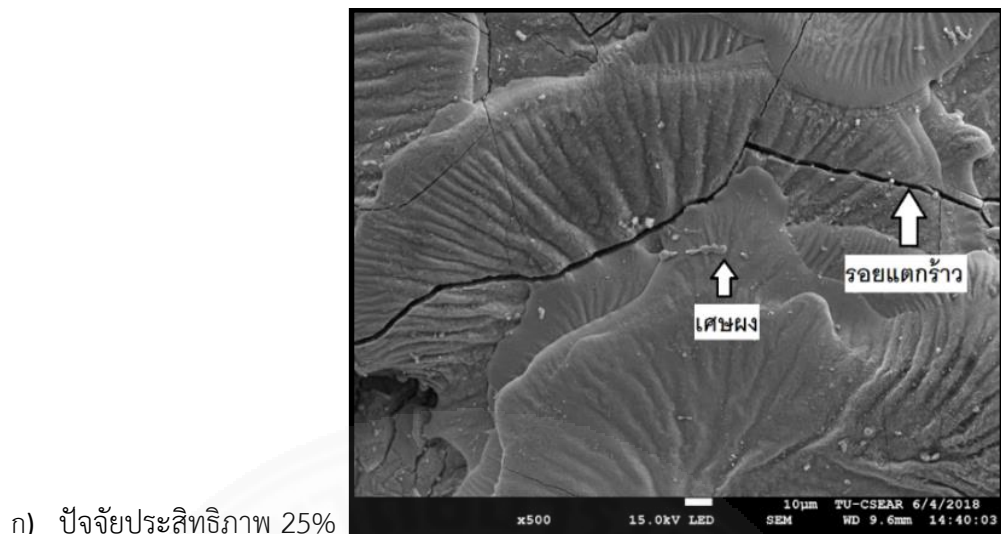
ภาพที่ 4.15 อิเล็กโตรดกราไฟท์ขั้วลบ ปัจจัยประสิทธิภาพ 50%

4.2.3 รอยแตกร้าวเมื่อปัจจัยประสิทธิภาพต่างกัน

การทดลองที่ใช้อิเล็กทรอนิกส์ไทเทเนียมและอิเล็กทรอนิกส์กราฟไฟท์ซิลิโคน กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ เวลาเปิด 390 ไมโครวินาที ปัจจัยประสิทธิภาพ 25% ลักษณะรอยแตกร้าวมีลักษณะกว้าง เนื่องจากที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 25% หมายถึง ช่วงเวลาที่เกิดการถ่ายเทประจุหรือการปล่อยกระแสไฟฟ้าจนกระทั่งเกิดความต่างศักย์ระหว่างอิเล็กทรอนิกส์และชิ้นงานสูงขึ้น นำไปสู่การปลดปล่อยพลังงานจนทำให้เกิดการกัดอาร์คเป็นเวลานาน 390 ไมโครวินาทีจากนั้นจะหยุดการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า (ช่วงเวลาที่ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลจากอิเล็กทรอนิกส์ไปที่ชิ้นงาน) เป็นเวลา 1170 ไมโครวินาที หรือเรียกอีกอย่างว่าเปิดต่ำและเวลาปิดสูง (ความถี่สูง) ซึ่งในช่วงเวลาเปิดจะเกิดการหลอมของชิ้นงาน และเมื่อถึงช่วงเวลาปิดที่ยาวทำให้เกิดการหล่อเย็นอย่างรวดเร็วเป็นเวลานานและทำให้เกิดรอยแตกร้าว

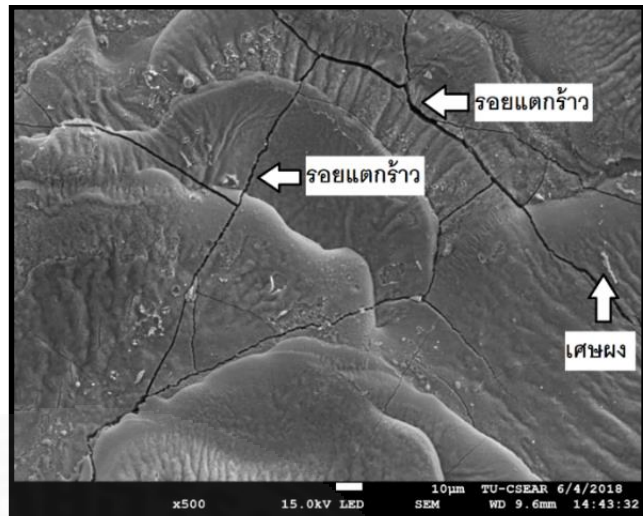
การทดลองที่ใช้ปัจจัยประสิทธิภาพ 50% ลักษณะรอยแตกร้าวมีลักษณะกว้างและเป็นเส้นสั้น เนื่องจากที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 50% หมายถึง ช่วงเวลาที่เกิดการถ่ายเทประจุหรือการปล่อยกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดการกัดอาร์คเป็นเวลานาน 390 ไมโครวินาทีจากนั้นจะหยุดการกัดอาร์คเป็นเวลา 390 ไมโครวินาที หรือเรียกอีกอย่างว่า เวลาเปิดเท่ากับเวลาปิด (ความถี่ปานกลาง) เมื่อถึงช่วงเวลาปิดทำให้เกิดการหล่อเย็นและเกิดรอยแตกร้าวทำนองเดียวกับการทดลองที่ใช้ปัจจัยประสิทธิภาพ 25%

การทดลองที่ใช้ปัจจัยประสิทธิภาพ 75% ลักษณะรอยแตกร้าวมีลักษณะสั้นกว่า เนื่องจากที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 75% หมายถึง ช่วงเวลาที่เกิดการถ่ายเทประจุหรือการปล่อยกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดการกัดอาร์คเป็นเวลานาน 390 ไมโครวินาที จากนั้นจะหยุดการกัดอาร์คเป็นเวลา 130 ไมโครวินาที หรือเรียกอีกอย่างว่าเวลาเปิดสูงและเวลาปิดต่ำ (ความถี่ต่ำ) ส่งผลให้เกิดการหลอมต่ออย่างต่อเนื่องและเมื่อถึงเวลาปิดที่สั้นทำให้ชิ้นงานไม่ทันได้หล่อเย็นตัวก็เกิดการหลอมขึ้นใหม่อีกครั้ง ลักษณะของรอยแตกร้าวจึงมีลักษณะค่อยๆ แตกและสั้นกว่าที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 25% และ 50% โดยสังเกตลักษณะพื้นผิวหลังกัดอาร์คที่ใช้อิเล็กทรอนิกส์ไทเทเนียมและอิเล็กทรอนิกส์กราฟไฟท์เมื่อค่าปัจจัยประสิทธิภาพต่างกัน ด้วยภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย 500 เท่า ดังภาพที่ 4.16 และภาพที่ 4.17

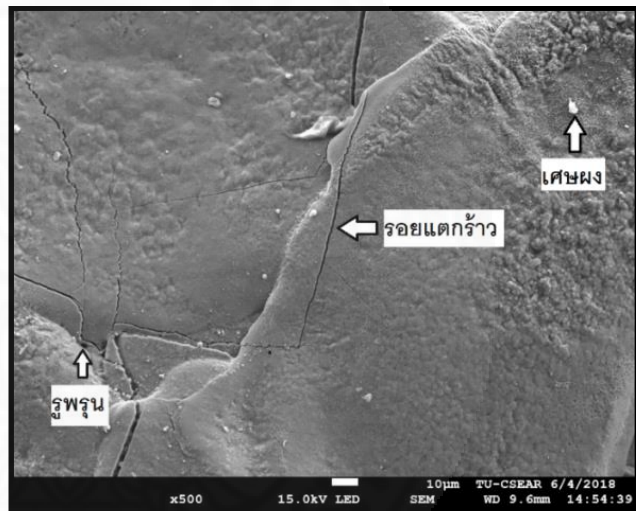


ภาพที่ 4.16 อิเล็กโตรดไทเทเนียมขั้วลบ กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์

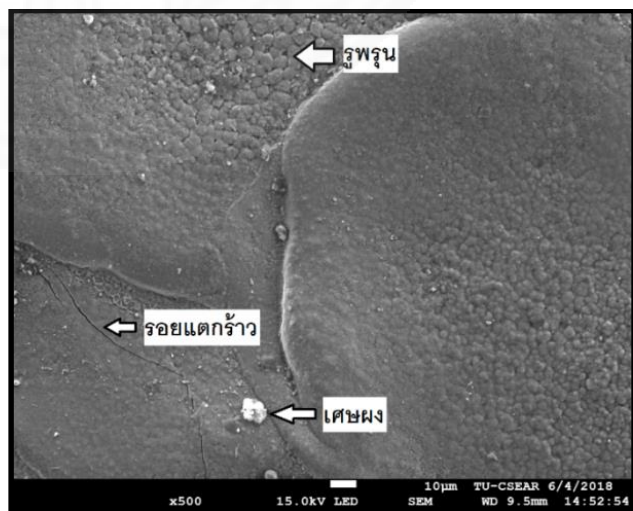
ก) ปัจจัยประสิทธิภาพ 25%



ข) ปัจจัยประสิทธิภาพ 50%



ค) ปัจจัยประสิทธิภาพ 75%

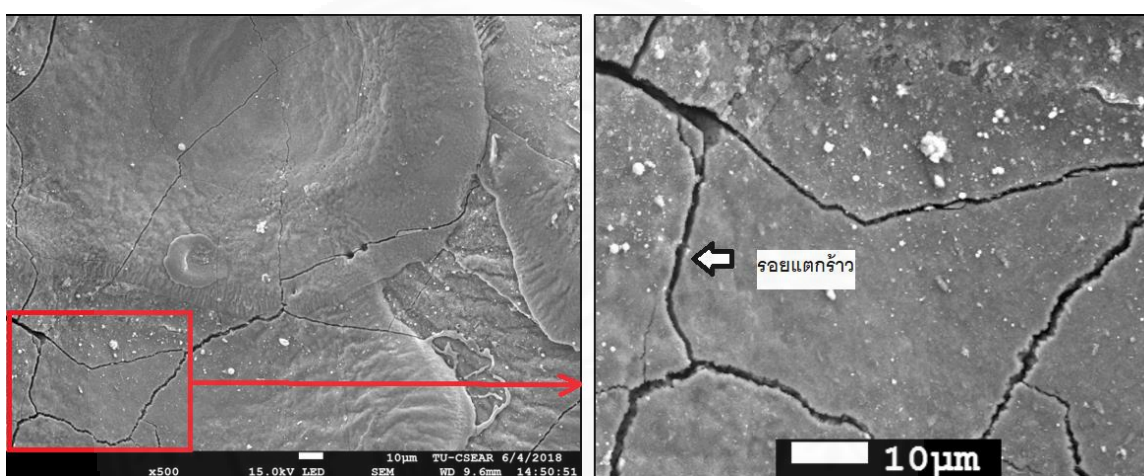


ภาพที่ 4.17 อิเล็กโตรดกราไฟท์ขั้วลบ กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์

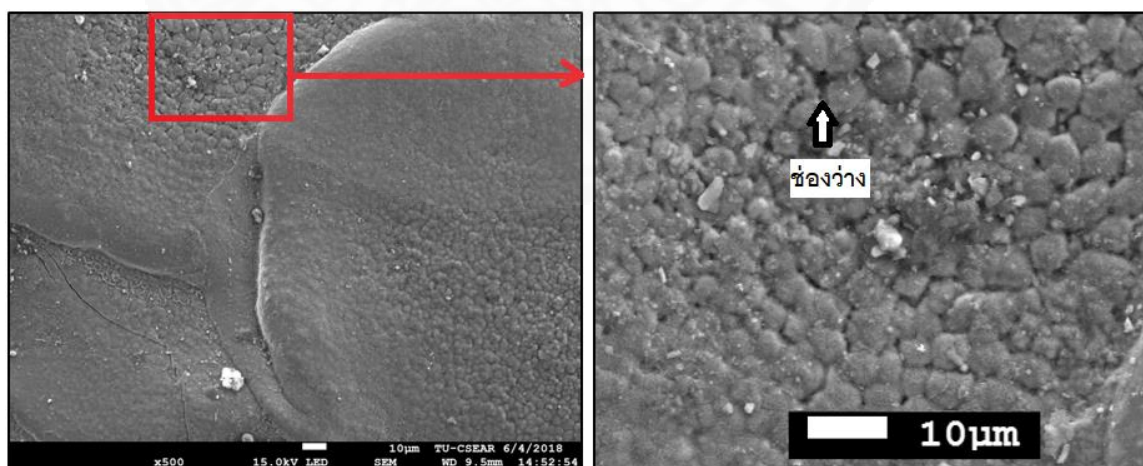
4.2.4 รอยแตกร้าวเมื่อใช้อิเล็กโตรดต่างชนิดกัน

การทดลองที่ใช้อิเล็กโตรดไทเทเนียมเกิดรอยแตกร้าวชัดเจนกว่าการทดลองที่ใช้อิเล็กโตรดกราไฟท์ โดยการทดลองที่ใช้อิเล็กโตรดไทเทเนียมเมื่อเกิดการหลอมและเกิดความร้อนส่งผลให้ความสามารถในการคายความเค้นที่เกิดจากความร้อนคายได้ยากกว่าการทดลองที่ใช้อิเล็กโตรดกราไฟท์เนื่องจากพื้นผิวหลังกัดอาร์คมีช่องว่างทำให้คายความเค้นที่เกิดจากความร้อนได้ง่ายกว่าดังภาพที่ 4.18

ก) อิเล็กโตรดไทเทเนียม



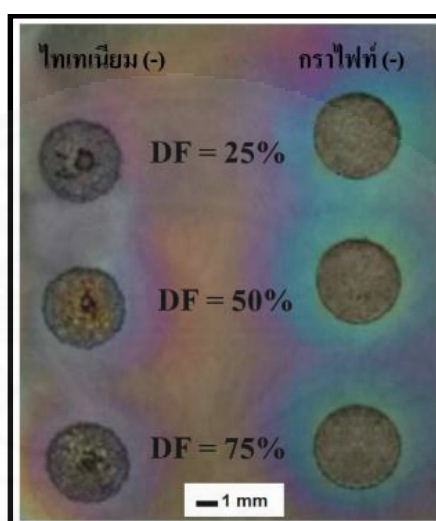
ข) อิเล็กโตรดกราไฟท์



ภาพที่ 4.18 อิเล็กโตรดขั้วลบ กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ ปัจจัยประสิทธิภาพ 75%

4.3 ความหนาของชั้นเคลือบผิวเมื่อค่าปัจจัยประสิทธิภาพต่างกัน

พื้นผิวหลังกัดอาร์คเมื่อปรับค่าปัจจัยประสิทธิภาพแสดงดังภาพที่ 4.19 และผลของความหนาของชั้นเคลือบผิว เมื่อปรับค่าปัจจัยประสิทธิภาพ เป็น 25% 50% และ 75% แสดงดังตารางที่ 4.7 และภาพที่ 4.20

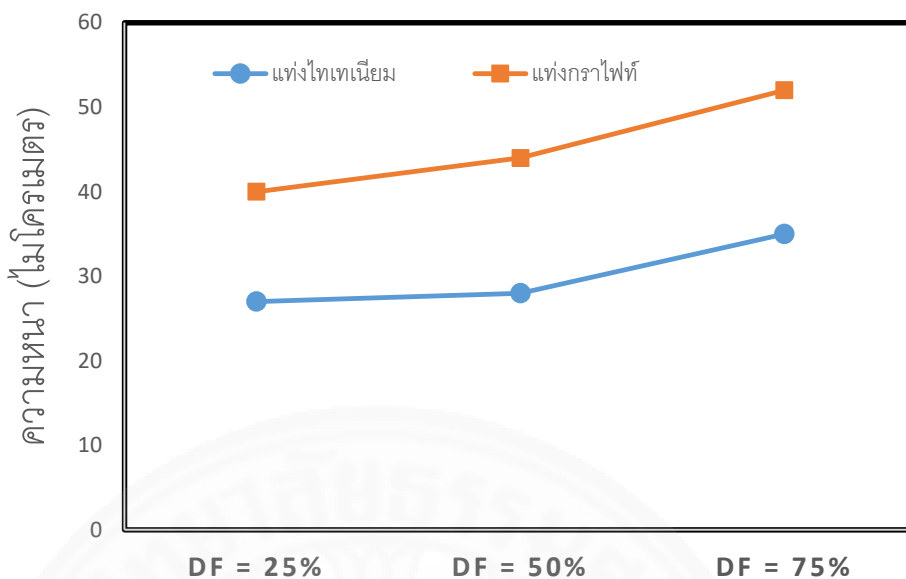


ภาพที่ 4.19 พื้นผิวหลังกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า ที่ปรับค่าปัจจัยประสิทธิภาพ

ตารางที่ 4.7

ความหนาชั้นเคลือบผิว ที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 25% 50% และ 75% กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์

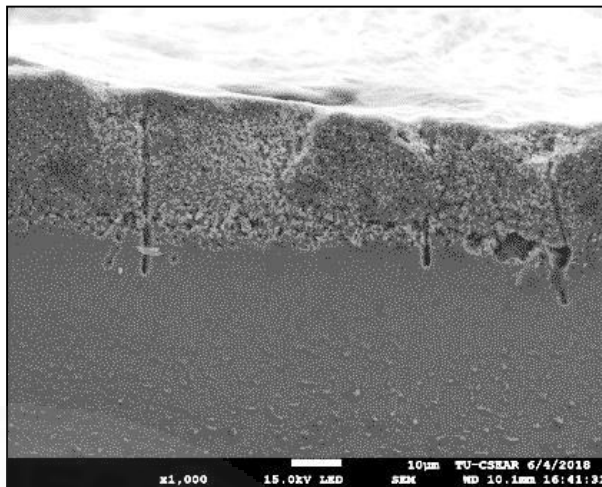
| อิเล็กโทรด | ปัจจัยประสิทธิภาพ | ความหนาของชั้นเคลือบผิว(μm) |
|------------|-------------------|--|
| ไทเทเนียม | 25 % | 27 |
| | 50 % | 28 |
| | 75 % | 35 |
| กราไฟท์ | 25 % | 40 |
| | 50 % | 44 |
| | 75 % | 52 |



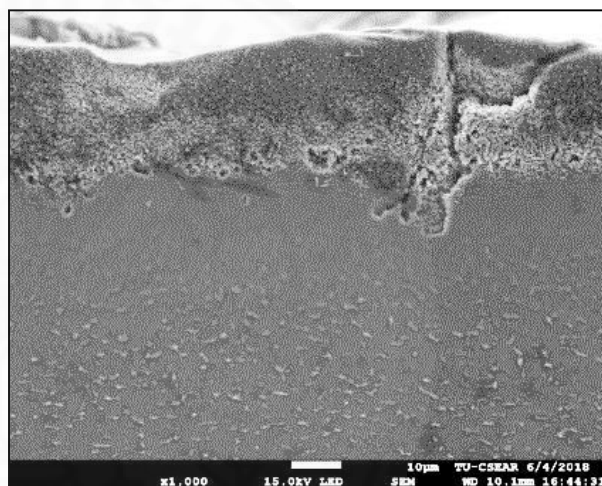
ภาพที่ 4.20 ความหนาของชั้นเคลือบผิว เมื่อปรับค่าปัจจัยประสิทธิภาพ

ผลการวัดความหนาของชั้นเคลือบผิวที่ใช้อิเล็กทรอนิกส์ไทเทเนียมขั้วลบ กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ เวลาเปิด 390 ไมโครวินาที ความหนา ที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 25%, 50% และ 75% คือ 27, 28 และ 35 ไมโครเมตร ตามลำดับ และผลการวัดความหนาของชั้นเคลือบผิวที่ใช้อิเล็กทรอนิกส์กรรไกรไฟท์ขั้วลบ กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ เวลาเปิด 390 ไมโครวินาที ความหนาของชั้นเคลือบผิว ที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 25%, 50% และ 75% คือ 40, 44 และ 52 ไมโครเมตร ตามลำดับซึ่งจะเห็นว่าเมื่อปรับค่าปัจจัยประสิทธิภาพมากขึ้น ความหนาของชั้นเคลือบผิวมากขึ้นตามปัจจัยประสิทธิภาพ เนื่องจากปัจจัยประสิทธิภาพ 75% ที่เวลาเปิด 390 ไมโครวินาที หมายถึง เวลาในการทำงาน 390 ไมโครวินาที และเวลาหยุดการทำงาน เป็น 130 ไมโครวินาที จากนั้นจึงเริ่มทำงานต่ออีก 390 ไมโครวินาที และหยุดอีก 130 ไมโครวินาที โดยทำงานและหยุดทำงานสลับกัน เมื่อครบรอบก็จะเริ่มทำงานใหม่ โดยรอบการทำงานนี้สามารถนำมาคำนวณความถี่ได้ ซึ่งลักษณะของเวลาเปิดสูงและเวลาปิดต่ำส่งผลให้เกิดความถี่ต่ำ โดยความถี่ต่ำจะส่งผลให้เกิดเป็นชั้นการหลอมเหลวและแข็งตัวใหม่ที่เรียกว่า Recasting ที่มีความหนาสูง ซึ่งเป็นเหตุให้บริเวณผลกระทบที่เกิดจากความร้อนลึกลงไปในเนื้อวัสดุงาน (Crookall et al, 1971) ทำให้เกิดชั้นเคลือบผิวที่หนามาก กว่าที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 25% และ 50% โดยภาพความหนาของชั้นเคลือบแสดงดังภาพที่ 4.21 และภาพที่ 4.22

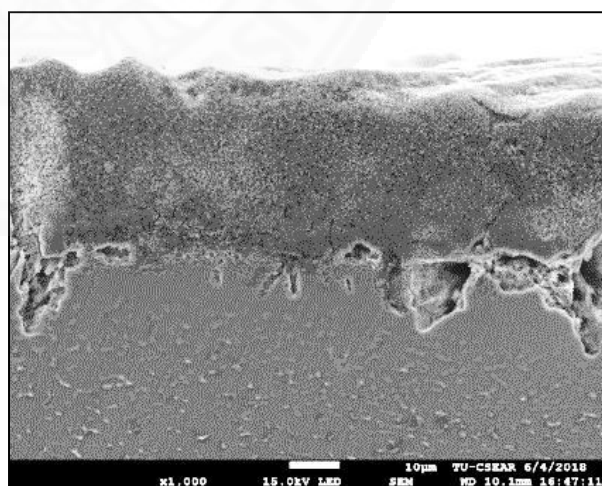
ก) ปัจจัยประสิทธิภาพ 25%



ข) ปัจจัยประสิทธิภาพ 50%

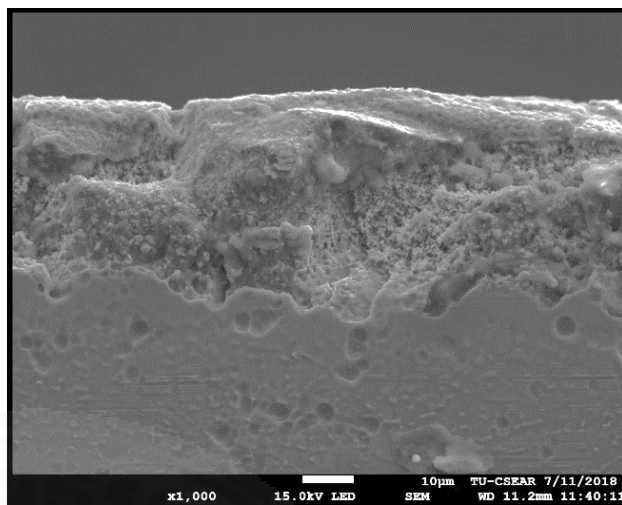


ค) ปัจจัยประสิทธิภาพ 75%

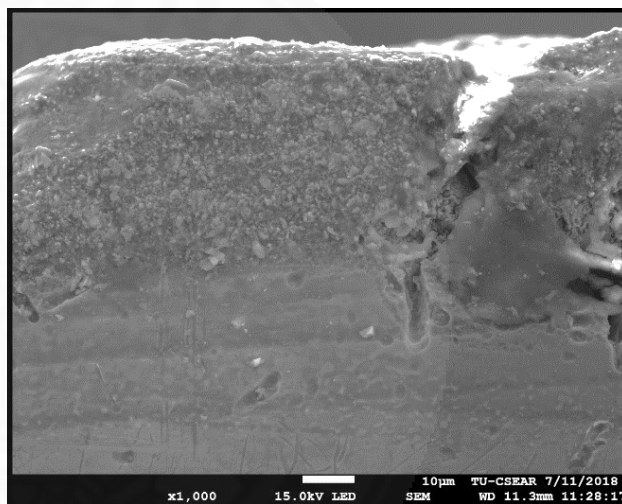


ภาพที่ 4.21 ความหนาของชั้นเคลือบเมื่อปรับค่าปัจจัยประสิทธิภาพ ที่ใช้แห่งไทเทเนียม
กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์

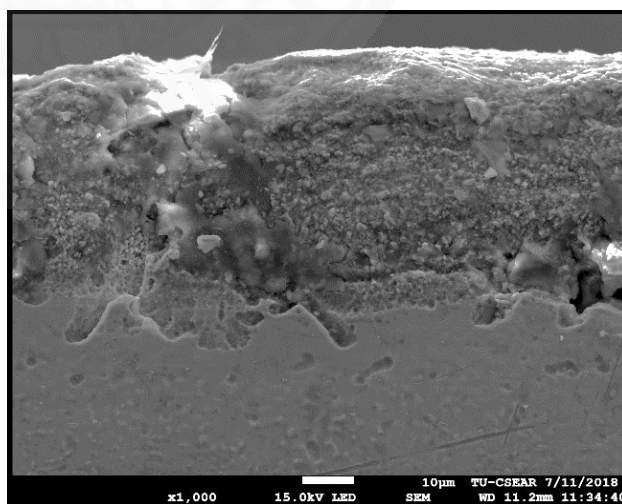
ก) ปัจจัยประสิทธิภาพ 25%



ข) ปัจจัยประสิทธิภาพ 50%



ค) ปัจจัยประสิทธิภาพ 75%

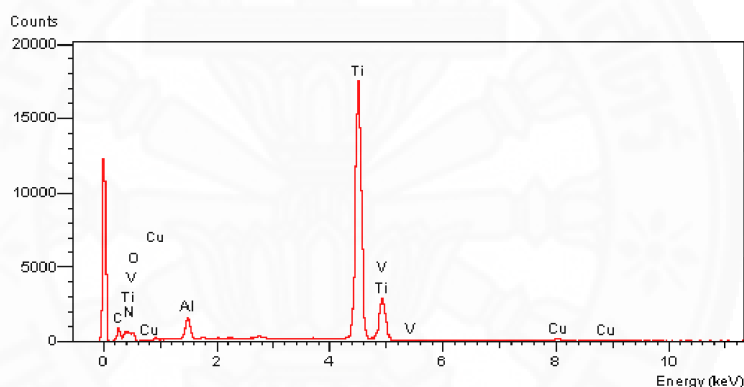


ภาพที่ 4.22 ความหนาของชั้นเคลือบเมื่อปรับค่าปัจจัยประสิทธิภาพ ที่ใช้แท่งกราฟไฟ
กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์

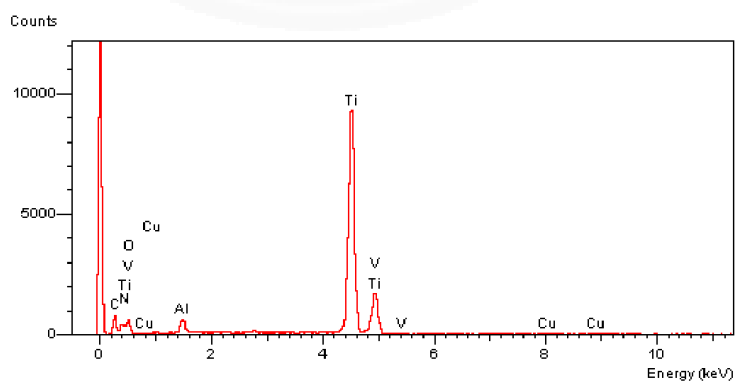
4.4 การวิเคราะห์ธาตุและสารประกอบเมื่อใช้ไอเล็กโตรดต่างชนิดกัน

4.4.1 การวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคอีดีเอส

จากผลค่าความหนาแน่นผิวที่ปัจจัยประสิทธิภาพให้ค่าความหนาแน่นผิวน้อยกว่าที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 50% และ 75% แต่รอยแตกร้าว และความหนาของชั้นเคลือบผิวที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 75% ให้ค่าดีกว่าที่ค่าปัจจัยประสิทธิภาพ 25% และ 50% จึงได้นำชิ้นงานที่ใช้ไอเล็กโตรดไทเทเนียม และกราไฟท์ขั้วลบ ค่ากระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ เวลาเปิด 390 ไมโครวินาที ปัจจัยประสิทธิภาพ 75% มาวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคอีดีเอสจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ผลการวิเคราะห์ธาตุพบธาตุไทเทเนียม อลูมิเนียม วานาเดียม ออกซิเจน คาร์บอน ไนโตรเจนและ ทองแดง อยู่บริเวณพื้นผิวหลังกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า แสดงดังภาพที่ 4.23 และภาพที่ 4.24

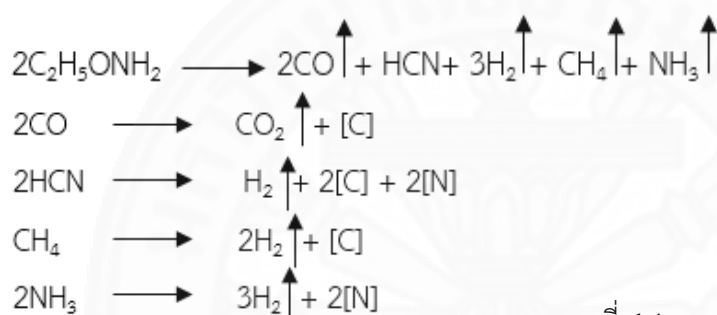


ภาพที่ 4.23 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคอีดีเอส เมื่อใช้ไอเล็กโตรดไทเทเนียม กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ เวลาเปิด 390 ไมโครวินาที ปัจจัยประสิทธิภาพ 75%



ภาพที่ 4.24 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคอีดีเอส เมื่อใช้ไอเล็กโตรดกราไฟท์ กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ เวลาเปิด 390 ไมโครวินาที ปัจจัยประสิทธิภาพ 75%

โดยธาตุพบธาตุไทเทเนียม อลูมิเนียม และวานาเดียม ที่พบเกิดจากชิ้นงานไทเทเนียมเกรด 5 ซึ่งมีธาตุไทเทเนียมเป็นส่วนประกอบหลักประมาณ 90% อลูมิเนียมประมาณ 6% และวานาเดียมประมาณ 4% จึงพบธาตุทั้งสามชนิดนี้ ในกรณีที่ใช้อิเล็กโตรดเป็นไทเทเนียม ธาตุไทเทเนียมเกิดจากชิ้นงานและอิเล็กโตรด ธาตุออกซิเจนที่พบเกิดจากอากาศและการแตกตัวของของเหลวตัวกลางโมโนเอทานอลามีน ธาตุคาร์บอนและไนโตรเจนเกิดจากการแตกตัวของของเหลวตัวกลางโมโนเอทานอลามีน ในกรณีที่ใช้กราฟไฟต์เป็นอิเล็กโตรด ธาตุไทเทเนียมเกิดจากชิ้นงานธาตุออกซิเจนเกิดจากอากาศและการแตกตัวของของเหลวตัวกลาง ธาตุคาร์บอนเกิดจากอิเล็กโตรดและการแตกตัวของของเหลวตัวกลาง และไนโตรเจนเกิดจากการแตกตัวของของเหลวตัวกลาง ซึ่งการแตกตัวของโมโนเอทานอลามีนเมื่อเกิดความร้อนแสดงสมการเคมีได้ดังนี้ ดังสมการที่ 4.1



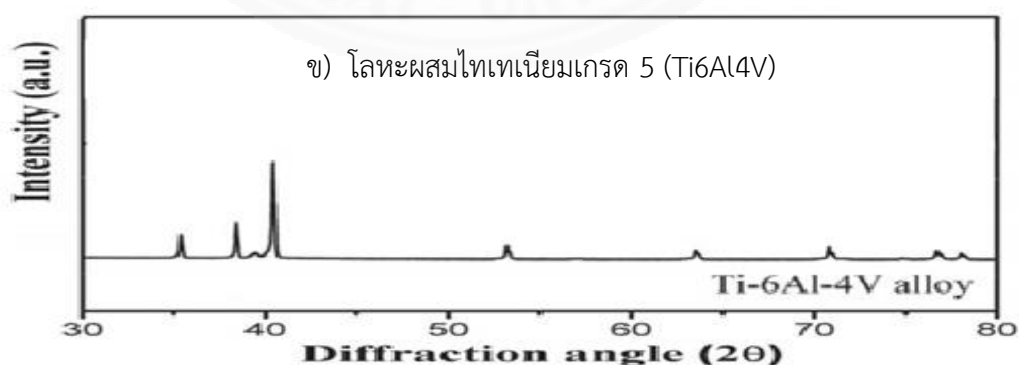
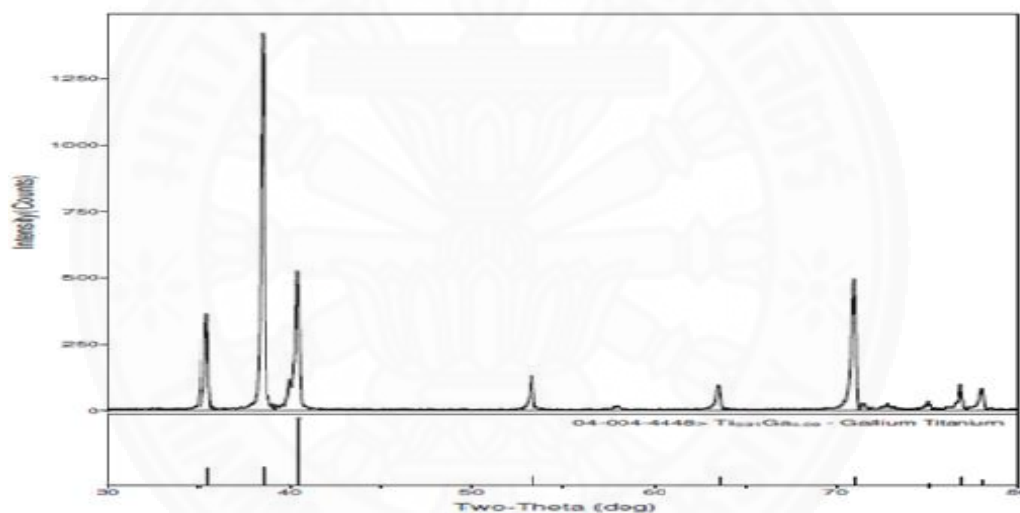
สมการที่ 4.1 สมการการแตกตัวของเอทานอลเอมีน

4.4.2 การวิเคราะห์สารประกอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

จากการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคอีดีเอส (Electron Dispersive Spectrum : EDS) บริเวณพื้นผิวชิ้นงานใช้อิเล็กโตรดไทเทเนียม และกราฟไฟต์ กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ เวลาเปิด 390 ไมโครวินาที ปัจจัยประสิทธิภาพ 75% พบธาตุ ไทเทเนียม อลูมิเนียม วานาเดียม ออกซิเจน คาร์บอน และไนโตรเจน ของอิเล็กโตรดไทเทเนียมและกราฟไฟต์ไปตรวจสอบโครงสร้างผลึก (Crystal structure) เพื่อหาสารประกอบ ด้วยการใช้นิคมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ใช้หลักการวัดค่าความเข้มของรังสี ที่สะท้อนออกมาที่มุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบ เพื่อทำนายรูปแบบโครงสร้างผลึก ว่าเป็นสารประกอบชนิดใด โดยหลักการทำงานของเอ็กซ์อาร์ดี ได้นำมาใช้ในการวิเคราะห์วัสดุที่มีโครงสร้างทางเคมีเหมือนกันแต่มีโครงสร้างผลึกต่างกัน โดยผลจากการนำชิ้นงานไปตรวจวิเคราะห์โครงสร้างผลึกเพื่อหาสารประกอบด้วยเครื่องเอ็กซ์อาร์ดี (X - ray Diffraction) สำหรับชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าแสดงผล XRD พบสารประกอบของโลหะผสมไทเทเนียมดังภาพที่ 4.25 ก) และได้ทำการเปรียบเทียบกับผล XRD พื้นผิวโลหะผสมไทเทเนียมเกรด 5 ของ Wen-Hou Wei พบว่าลักษณะรูปแบบการเกิดพีคมีลักษณะเดียวกันดังภาพที่ 4.25 ข) ทำให้สรุปเบื้องต้นได้ว่าชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองอาจเป็นโลหะผสมไทเทเนียมเกรด

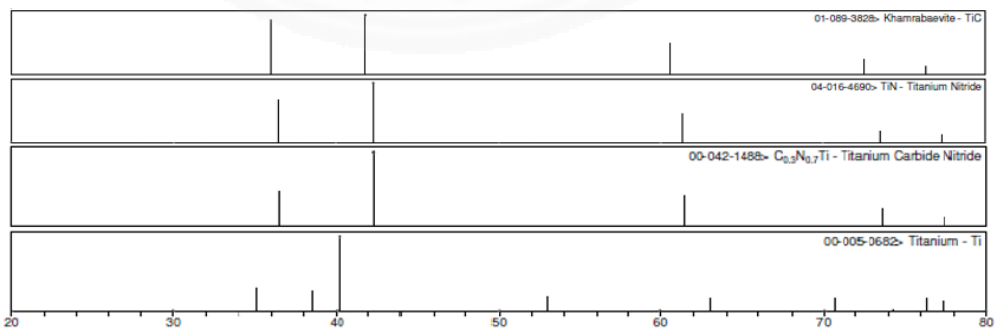
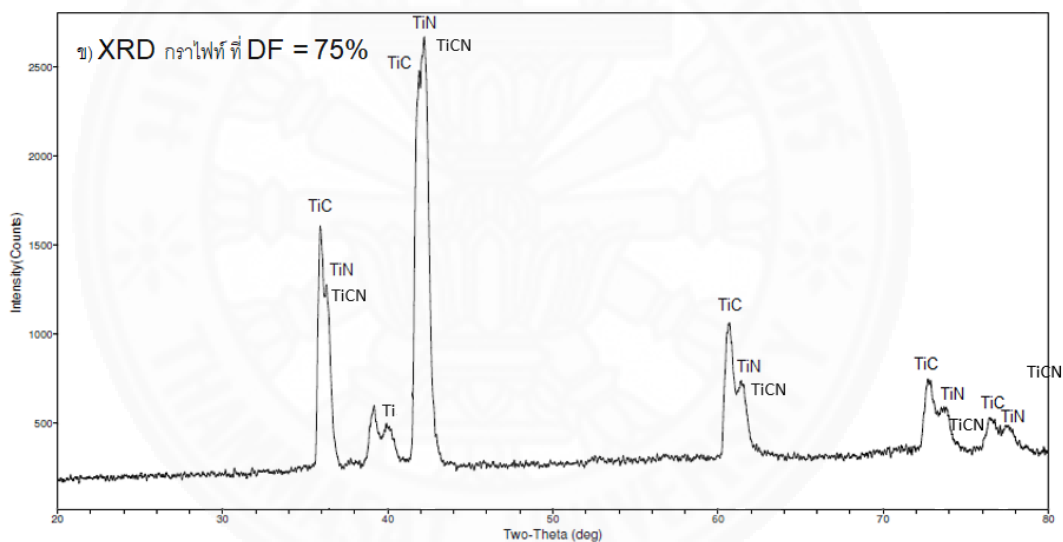
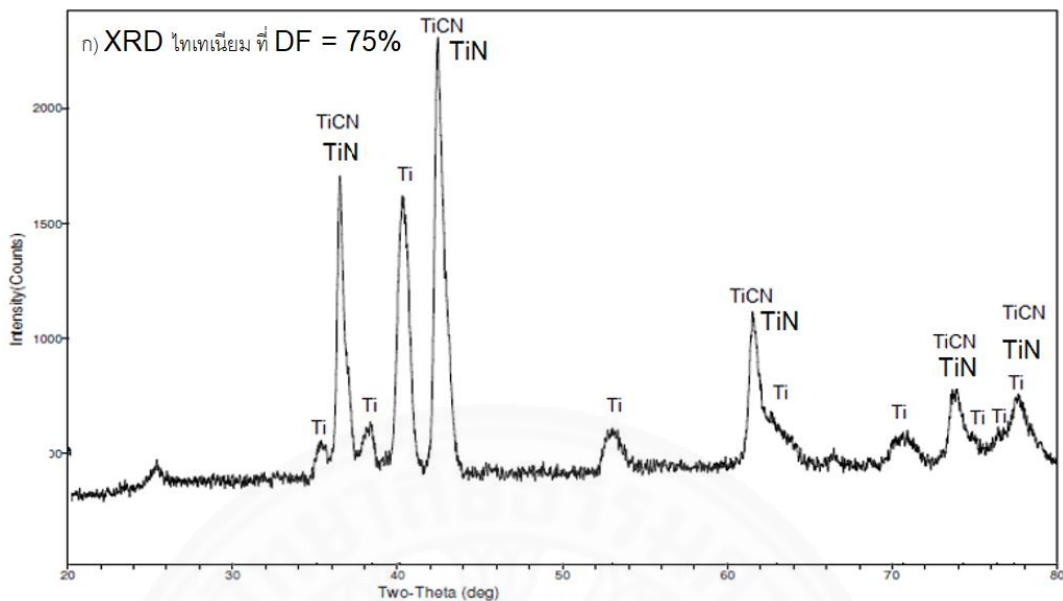
5 และผล XRD ของชิ้นงานหลังกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าในภาพที่ 4.26 ก) ที่ใช้อิเล็กโตรดไทเทเนียม กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ ปัจจัยประสิทธิภาพ 75% พบเฟสของชิ้นงานประกอบด้วยไทเทเนียม (Ti) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ Hexagonal พบไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) และไทเทเนียมคาร์ไบด์ (TiC) ส่วนภาพที่ 4.26 ข) ที่ใช้อิเล็กโตรดกราไฟท์ กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ ปัจจัยประสิทธิภาพ 75% พบเฟสของชิ้นงานประกอบด้วยไทเทเนียมคาร์ไบด์ (TiC) ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) และไทเทเนียมคาร์ไบด์ (TiCN) ซึ่งการทดลองที่ใช้อิเล็กโตรดไทเทเนียมและกราไฟท์พบสารประกอบไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) ทั้งสองการทดลองสังเกตได้จากรูปแบบการเกิดพีคที่ตำแหน่งเดียวกัน

ก) ก่อนการกัดอาร์ค



ภาพที่ 4.25 ผลการวิเคราะห์ XRD ชิ้นงานก่อนกัดอาร์ค

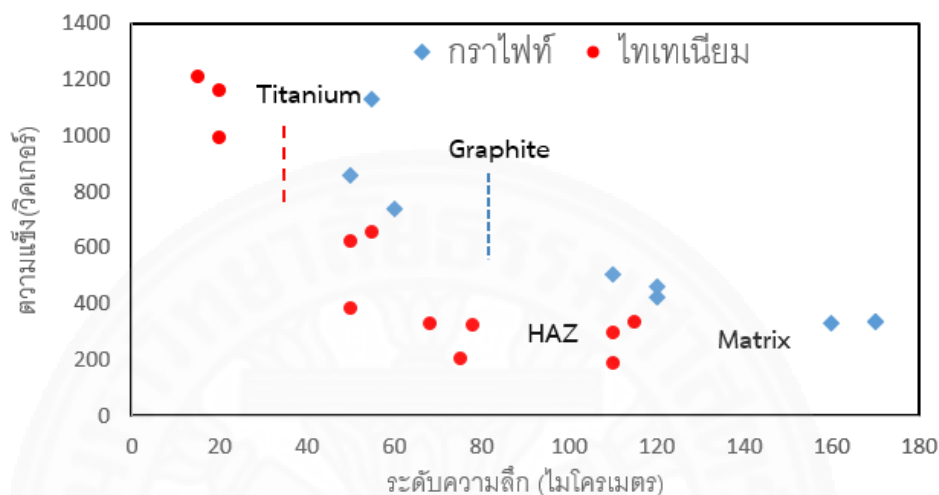
(ที่มา : Wen-Hou Wei et al.)



ภาพที่ 4.26 ผลการวิเคราะห์ XRD บริเวณพื้นผิวใช้แท่งไทเทเนียมและกราฟท์

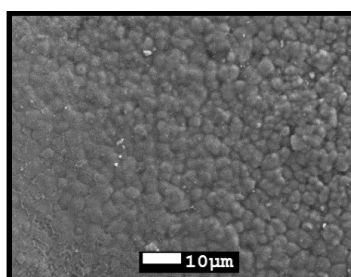
4.5 ค่าความแข็งเมื่อใช้หัวอิเล็กโตรดต่างชนิดกัน

ผลการวัดความแข็งที่ใช้แท่งไทเทเนียม และแท่งกราไฟท์ กระแสไฟฟ้า เวลาเปิด 390 ไมโครวินาที กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ และปัจจัยประสิทธิภาพ 75% แสดงดังภาพที่ 4.27



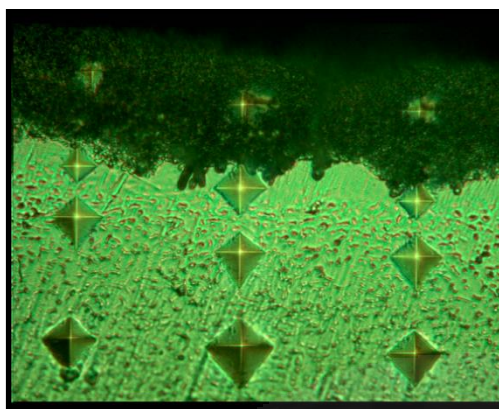
ภาพที่ 4.27 ความแข็งบริเวณชั้นเคลือบผิวเมื่อใช้ไทเทเนียมและกราไฟท์ กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ ปัจจัยประสิทธิภาพ 75%

บริเวณชั้นเคลือบผิวเมื่อใช้อิเล็กโตรดไทเทเนียมมีความแข็งเฉลี่ยประมาณ 1123 HV ซึ่งมากกว่าชั้นเคลือบผิวของการทดลองที่ใช้อิเล็กโตรดกราไฟท์มีความแข็งเฉลี่ยประมาณ 906 HV เนื่องจากพื้นผิวหลังกัดอาร์คที่ใช้อิเล็กโตรดกราไฟท์มีลักษณะพรุณแสดงดังภาพที่ 4.28 และภาพการวัดความแข็งแสดงดังภาพที่ 4.29

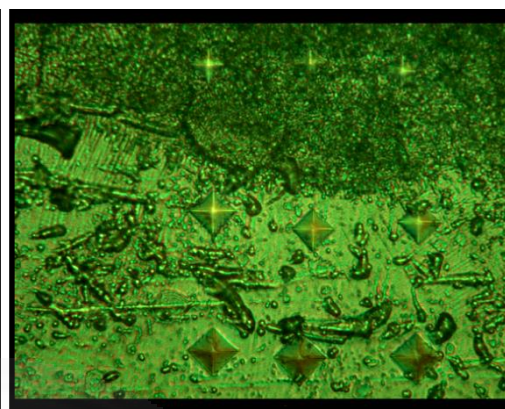


ภาพที่ 4.28 ลักษณะอนุภาคของกราไฟท์บนชั้นหลอม กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ ปัจจัยประสิทธิภาพ 75%

ก) ไทเทเนียม



ข) กราไฟท์



ภาพที่ 4.29 รอยกดรูปพีระมิด น้ำหนักกดหัวเพชร 50 gf นาน 20 วินาที ที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 75%

4.6 การอภิปรายผลการทดลอง

ความหยาบผิวและรอยแตกร้าวสำหรับการทดลองที่ใช้ขี้เหล็กโตรดไทเทเนียมและกราไฟท์ กระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์ ปัจจัยประสิทธิภาพ 50% เมื่อใช้ขี้เหล็กโตรดขั้วบวกและขั้วลบ พบว่าการทดลองที่ใช้ขี้เหล็กโตรดเป็นขั้วลบมีค่าความหยาบผิวเฉลี่ยมากกว่าการทดลองที่ใช้ขี้เหล็กโตรดเป็นขั้วบวก เนื่องจากลักษณะการปล่อยของกระแสไฟฟ้าในกระบวนการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากขี้เหล็กโตรดที่เป็นขั้วลบไปหาชิ้นงานที่เป็นขั้วบวก ทำให้เกิดเป็นแอ่งและรอยลึกส่งผลให้เกิดผิวเกิดความหยาบมากกว่าการทดลองที่เป็นขั้วบวก โดยความร้อนสะสมที่บริเวณชิ้นงานสำหรับการทดลองที่ใช้ขี้เหล็กโตรดเป็นลบจะมีความร้อนสะสม 70% และอีก 30% ความร้อนสะสมที่อิเล็กโตรด ส่งผลให้ชิ้นงานที่ได้รับความร้อนสะสมมาก คายความเค้นที่เกิดจากความร้อนไม่ทันจึงเกิดรอยแตกร้าวเป็นเส้นยาว ซึ่งการทดลองที่ใช้ขี้เหล็กโตรดเป็นขั้วบวกลักษณะรอยแตกร้าวเป็นเส้นสั้นค้อยๆ แตก และมีรูพรุน โดยรูพรุนนี้เกิดจากไฮโดรเจนที่อยู่ในสารละลายเอทานอลเอมีนที่เป็นสารประกอบอินทรีย์ในหมู่แอลคิลจัดเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดหนึ่งโดยสมบัติของแก๊สตัวสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเมื่อเกิดการแตกตัวของไฮโดรเจนจะเป็นลบไปจับกับชิ้นงานที่เป็นขั้วบวก (E.Bud Guitrau, 1997) จึงเกิดฟองอากาศของไฮโดรเจนที่ชิ้นงาน ในการทดลองต่อไปจึงเลือกใช้ขี้เหล็กโตรดลบเนื่องจากไม่ก่อให้เกิดรูพรุนจากฟองอากาศของไฮโดรเจน

ความหยาบผิวและรอยแตกร้าวเมื่อใช้ขี้เหล็กโตรดไทเทเนียมให้ค่าความหยาบผิวมากกว่าการทดลองที่ใช้ขี้เหล็กโตรดกราไฟท์เนื่องจากอิเล็กโตรดไทเทเนียมที่ใช้เป็นไทเทเนียมเกรด 2 ซึ่งมีอนุภาคของธาตุอื่นผสมอยู่ด้วย เมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการทำลายพันธะระหว่างธาตุทำให้ธาตุที่มี

จุดหลอมเหลวต่ำ ก็จะถูกขจัดออกได้ง่ายกว่าธาตุที่มีจุดหลอมเหลวสูง และอิเล็กโตรดไทเทเนียมขึ้นรูปโดยการรีดด้วยความร้อนทำให้อิเล็กโตรดไทเทเนียมเป็นเนื้อเดียวกันและเกิดแรงยึดกันระหว่างอนุภาคทำให้สึกได้ยาก ต่างอิเล็กโตรดกราไฟท์ที่มีอนุภาคของธาตุคาร์บอนเพียงอย่างเดียว ทำให้การหลอม และการขจัดออกของธาตุไปพร้อมกันอีกทั้งอิเล็กโตรดกราไฟท์ขึ้นรูปด้วยการอัดผงกราไฟท์ทำให้แรงยึดกันระหว่างโมเลกุลน้อยส่งผลให้อิเล็กโตรดสึกง่าย โดยการหลอมที่พร้อมกันของอนุภาคและลักษณะการสึกของอิเล็กโตรดมีผลต่อความหยาบพื้นผิวของชิ้นงาน เนื่องจากการสปาร์คด้วยเครื่องกัดอาร์คโดยปกติจะสปาร์คใกล้กับจุดผิวงานทำให้ผิวชิ้นงานเรียบตามไปด้วย และรอยแตกร้าวบนพื้นผิวเมื่อใช้อิเล็กโตรดกราไฟท์มีรอยแตกร้าวน้อยกว่าการทดลองที่ใช้แท่งไทเทเนียมเนื่องจากพื้นผิวของการทดลองที่ใช้อิเล็กโตรดกราไฟท์มีการหลอมไม่สมบูรณ์ทำให้ชิ้นหลอมที่เกิดขึ้นมีช่องว่างระหว่างอนุภาคส่งผลให้การคายความเค้นตกค้างได้ง่าย

ความหยาบผิวและรอยแตกร้าวเมื่อให้ค่ากระแสไฟฟ้าต่างกันค่ากระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ ให้ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยน้อยกว่า 20 แอมแปร์ เนื่องจากระดับของกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้นจะทำให้เกิดความรุนแรงของการกัดเซาะชิ้นงานโลหะและเกิดความสึกของการสปาร์ค มากขึ้นตามค่ากระแสไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้น จึงส่งผลต่อค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของชิ้นงานที่ทดสอบ (Pichai ;2012) และเกิดรอยแตกร้าว เป็นเส้นสั้นๆ เนื่องจากที่กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ เกิดการหลอมน้อยทำให้เย็นตัวเร็วและเกิดรอยแตกร้าวเพราะคายความเค้นไม่ทัน ส่วนการทดลองที่ใช้ขั้วลบ กระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์ ปัจจัยประสิทธิภาพ 50% เมื่อใช้อิเล็กโตรดไทเทเนียมและกราไฟท์พบว่า เกิดรอยแตกร้าวเป็นเส้นยาวและแคบ เนื่องจากที่กระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์ เกิดการหลอมเยอะทำให้มีปริมาณน้ำที่หลอมมีปริมาณมากส่งผลให้การคายความเค้นเป็นไปได้อย่างส่งผลให้เกิดรอยแตกร้าวเป็นเส้นยาว

ความหยาบผิวและรอยแตกร้าวเมื่อค่าปัจจัยประสิทธิภาพต่างกัน การทดลองที่ค่าปัจจัยประสิทธิภาพ 25% ให้ค่าความหยาบผิวน้อยที่สุด และที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 75% ค่าความหยาบผิวมากที่สุดเนื่องจากการทดลองที่ค่าปัจจัย 75% หมายถึง เวลาเปิดสูงและเวลาปิดต่ำหรือเรียกอีกอย่างว่าความถี่ต่ำ ซึ่งความถี่ต่ำจะส่งผลทำให้ผิวชิ้นงานมีความหยาบมาก เนื่องจากเวลาปล่อยประจุที่ยาวนานทำให้ความร้อนที่เกิดจากการสปาร์คกระจายตัวเป็นแอ่งกว้างและลึก (E. Bud Guitrau, 1997) รอยแตกร้าวที่ปัจจัย 75% เกิดรอยแตกร้าวรุนแรงน้อยที่สุดเนื่องจากที่ปัจจัย 75% เกิดการหลอมต่ออย่างต่อเนื่องและเมื่อถึงเวลาที่สั้นทำให้ชิ้นงานไม่ทันได้หล่อเย็นตัวก็เกิดการหลอมขึ้นใหม่อีกครั้ง ลักษณะของรอยแตกร้าวจึงมีลักษณะค่อยๆ แตกและสั้นกว่าที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 25% และ 50%

ความหนาของชั้นเคลือบผิวที่ปัจจัย 75% ซึ่งลักษณะของเวลาเปิดสูงและเวลาปิดต่ำส่งผลให้เกิดความถี่ต่ำ โดยความถี่ต่ำจะส่งผลให้เกิดเป็นชั้นการหลอมเหลวและแข็งตัวใหม่ที่เรียกว่า

Recasting ที่มีความหนาสูง ซึ่งเป็นเหตุให้บริเวณผลกระทบที่เกิดจากความร้อนลึกลงไปในเนื้อวัสดุงาน (Crookall et al,1971) ทำให้เกิดชั้นเคลือบผิวที่หนามาก กว่าที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 25% และ 50% โดยความหนาของการทดลองที่ใช้อิเล็กโตรดเป็นแท่งกราไฟท์มีหนามากกว่าการทดลองที่ใช้อิเล็กโตรดเป็นไทเทเนียมเพราะกราฟท์สึกง่ายเนื่องจากแรงยึดกันระหว่างอนุภาคน้อยทำให้หลุดง่าย และมีความร้อนจากการหลอมเหลวของกราฟท์สูงกว่าไทเทเนียมเมื่อเกิดการสปาร์คจึงทำให้เกิดความร้อนมากส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการหลอมมากเมื่อถึงช่วงหล่อเย็นทำให้เกิดชั้นเคลือบผิวที่มีความหนามากกว่าไทเทเนียม

ความแข็งของชั้นเคลือบผิวของการทดลองที่ใช้ไทเทเนียมมีแข็งกว่าเนื่องแท่งไทเทเนียมมีความหนาแน่นมากกว่าแท่งกราฟท์ส่งผลให้กราฟท์มีช่องว่างระหว่างอนุภาคเยอะกว่าไทเทเนียม และสมบัติของกราฟท์มีรูพรุนทำให้ความแข็งบริเวณชั้นเคลือบผิวแข็งน้อยกว่าการทดลองที่ใช้แท่งไทเทเนียม

จากการวิเคราะห์สารประกอบบริเวณชั้นเคลือบผิวด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์เมื่อใช้อิเล็กโตรดไทเทเนียม พบสารประกอบไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) และไทเทเนียมคาร์ไบด์ไนไตรด์ (TiCN) โดยรูปแบบพีคของสารประกอบทั้งสองอยู่ตำแหน่งเดียวกัน ส่วนการทดลองที่ใช้อิเล็กโตรดกราฟท์ พบสารประกอบไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) ไทเทเนียม (TiCN) เช่นเดียวกับการทดลองที่ใช้อิเล็กโตรดไทเทเนียม แต่พบสารประกอบอีกชนิดที่พบต่างออกไป คือ สารประกอบไทเทเนียมคาร์ไบด์ (TiC) โดยรูปแบบพีคของไทเทเนียมคาร์ไบด์ (TiC) ต่างจากรูปแบบพีคของไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) และไทเทเนียมคาร์ไบด์ไนไตรด์ (TiCN) อย่างชัดเจน เนื่องกราฟท์คืออะตอมของคาร์บอนเรียงตัวกันเป็นระเบียบอย่างหลวมๆ เมื่อการสปาร์คในกระบวนการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าเสร็จสิ้นเกิดการหล่อเย็นทำให้เกิดชั้นเคลือบผิวบนชิ้นงานโลหะผสมไทเทเนียมชิ้นงานจึงมีโอกาสเกิดสารประกอบไทเทเนียมคาร์ไบด์ (TiC) มากกว่าการทดลองที่ใช้ไทเทเนียม

บทที่ 5

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การดำเนินงานวิจัยเพื่อศึกษาและปรับปรุงพื้นผิวโลหะผสมไทเทเนียม เพื่อสร้างชั้นเคลือบผิวบนชิ้นงานโลหะผสมไทเทเนียม ที่เกิดจากระบวนการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า ด้วยอิเล็กโตรดไทเทเนียมและอิเล็กโตรดกราไฟท์ โดยใช้ของเหลวตัวกลางเป็นโมโนเอทานอลามีน ทำให้เกิดชั้นหลอมใหม่ (Recast layer) และสรุปผลได้ดังนี้

5.1.1 ชั้นหลอมใหม่หลังการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าเมื่อใช้แท่งไทเทเนียม เกิดสารประกอบไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) และไทเทเนียมคาร์ไบไบไนไตรด์ (TiCN) ส่วนชั้นหลอมใหม่หลังการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าเมื่อใช้กราไฟท์เกิดสารประกอบไทเทเนียมคาร์ไบด์ (TiC) ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) และไทเทเนียมคาร์ไบไบไนไตรด์ (TiCN)

5.1.2 ที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 75% ให้ค่าความหนาของชั้นหลอมใหม่มากกว่า การทดลองที่ใช้ค่าปัจจัย 25% และ 50% โดยความหนาของชั้นหลอมใหม่ที่ใช้แท่งไทเทเนียมประมาณ 35 ไมโครเมตร ส่วนการทดลองที่ใช้แท่งกราไฟท์หนาประมาณ 52 ไมโครเมตร

5.1.3 รอยแตกร้าวบนพื้นผิวเมื่อใช้แท่งกราไฟท์น้อยกว่าการทดลองที่ใช้ไทเทเนียม เนื่องจากชั้นเคลือบผิวที่เกิดจากอิเล็กโตรดกราไฟท์มีการหลอมไม่สมบูรณ์ทำให้ชั้นหลอมที่เกิดขึ้นมีช่องว่างระหว่างอนุภาคส่งผลให้คายความเค้นตกค้างได้

5.1.4 ความหยาบผิวเฉลี่ยเรียบมากขึ้นเมื่อปรับลดค่ากระแสไฟฟ้าลงเป็น 5 แอมแปร์ แต่เมื่อค่าปัจจัยประสิทธิภาพมากขึ้น ความหยาบผิวเพิ่มมากขึ้นตาม

5.1.5 ค่าความแข็งของการทดลองที่ใช้แท่งไทเทเนียมที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 75% มีค่าความแข็งเฉลี่ยอยู่ที่ 1123 HV ส่วนการทดลองที่ใช้แท่งกราไฟท์ที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 75% มีค่าความแข็งเฉลี่ยอยู่ที่ 906 HV

5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรมีอิเล็กโตรดที่เป็นไทเทเนียมไนไตรด์อัดแท่งมาทดลองและเปรียบเทียบผลการเกิดสารประกอบบริเวณชั้นเคลือบผิว

รายการอ้างอิง

หนังสือและบทความในหนังสือ

Titanium Alloys, R. Boyer, G. Welsch, and E. W. Collings, eds. ASM International, Materials Park, OH, 1994.

R. Boyer, G. Welsch, and E. W. Collings, eds. Materials Properties Handbook : Titanium Alloys, ASM International, Materials Park, OH, 1994.

Dr. Manfred Storr, Oelheld innovative fluid technology : Important fact about spark erosion, 2007

บทความวารสาร

อภิวัฒน์ มุตตามระและคณะ(2557) การปรับปรุงผิวชิ้นงานเหล็กเครื่องมือด้วยเครื่องกัดอาร์คทางไฟฟ้า การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28 (ME-NETT28) ณ โรงแรมพูลแมนขอนแก่น ราชอาอคิด จังหวัดขอนแก่น

Moro, Toshio et al. (2016), Machining Phenomena in EDM for Surface Modification with TiC Semi-sintered Electrode. Metallurgical and Materials Transactions A, 3248-3255.

L. Kristian, "Performance of two graphite electrode qualities in EDM of seal slots in a jet engine turbine vane," J. Mater. Process. Technol, vol. 149, issue 1-3, pp. 152-156, 2004.

Apiwat(2015) Comparison Performances of EDM on Ti6Al4V with Two Graphite Grades International Journal of Chemical Engineering and Applications

Pichai (2012) and et al. A Study of Surface Hardness Affecting in Electrical Discharge Machining on AISI P20 Plastic Mould Steel. Advanced Materials Research ; Vol.557-559: 1791-1796.

N. Mohri, et al. (1993), surface modification by electrical discharge machining with composite electrode, Annals of the CIRP 42, pp. 219-222.

- S. Singh et al. (2004) ,Some investigations into the electric discharge machining of hardened tool steel using different electrode materials, J. Mats. Proc. Techn., Vol.149 pp. 272-277.
- Hwang et ai. (2010), S.-F., The coating of TiC layer on the surface of nickel by electric discharge coating (EDC) with a multi-layer electrode. Journal of Materials Processing Technology 210, pp. 642–652
- Ekmekci et al. (2009), Heat Treatment, and Crack Formation in Electric Discharge Machining Process. Metallurgical and Materials Transactions B, 40(1) pp. 70-81.
- Houqun Xiao et al. (2014).Titanium carbonitride coating by pulsed electrical discharge in an aqueous solution of ethanolamine. Surface & Coatings Technology pp. 1006–1010.
- Wen-Hou Wei et al. (2018) Microstructure and mechanical properties of in situ formed TiC-reinforced Ti–6Al–4V matrix composites. Materais science and technology Vol.34,No.2,191-198

วิทยานิพนธ์

- ธรรมณรงค์ วงศ์ชัย (2558) การพัฒนาพื้นผิวเหล็กกล้าเครื่องมือด้วยเครื่องกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าในของเหลวตัวกลางยูเรีย วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการพัฒนางานอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- บุญธรรม ลิมป์ปิยพันธ์ (2544) การศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับงานอีดีเอ็ม, วิทยานิพนธ์ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- รัษฎนภรณ์ โพธิ์ใส (2554) ผลกระทบของสังกะสีในอิเล็กโตรดทองเหลืองของการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าบนเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- รัตติกรณ์ เสาร์แดน (2554) การศึกษาประสิทธิภาพวัสดุอิเล็กโตรดต่างชนิดในการอีดีเอ็มวัสดุทุกสแตนคาร์ไบด์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, คณะวิศวกรรมศาสตร์

Apiwat (2004) Electrical Discharge Machining of Oxide Insulating Ceramics Using the Surface Modification Phenomena of Electrical Discharge

สื่ออิเล็กทรอนิกส์

<http://techmetals.com/medadize-validated-color-and-gray-titanium-anodize/titanium-anodizing-color-spectrum>

เคมีภัณฑ์ "ข้อมูลสารเคมี" www.chemipan.com ค้นคว้าเมื่อวันที่ 20 กุมภาพันธ์ 2561

<https://mtec.or.th/academic-services/mtec-knowledge/421>

https://th.misumiec.com/maker/misumi/mech/campaign/email20130613/Surface_Roughness.html

<http://pd.chem.ucl.ac.uk/pdnn/powintro/braggs.htm>

<http://www.microscopy.in.th/2629/trinocularmicroscope.html>

<http://www.twiprofessional.com/content/jk74.html>

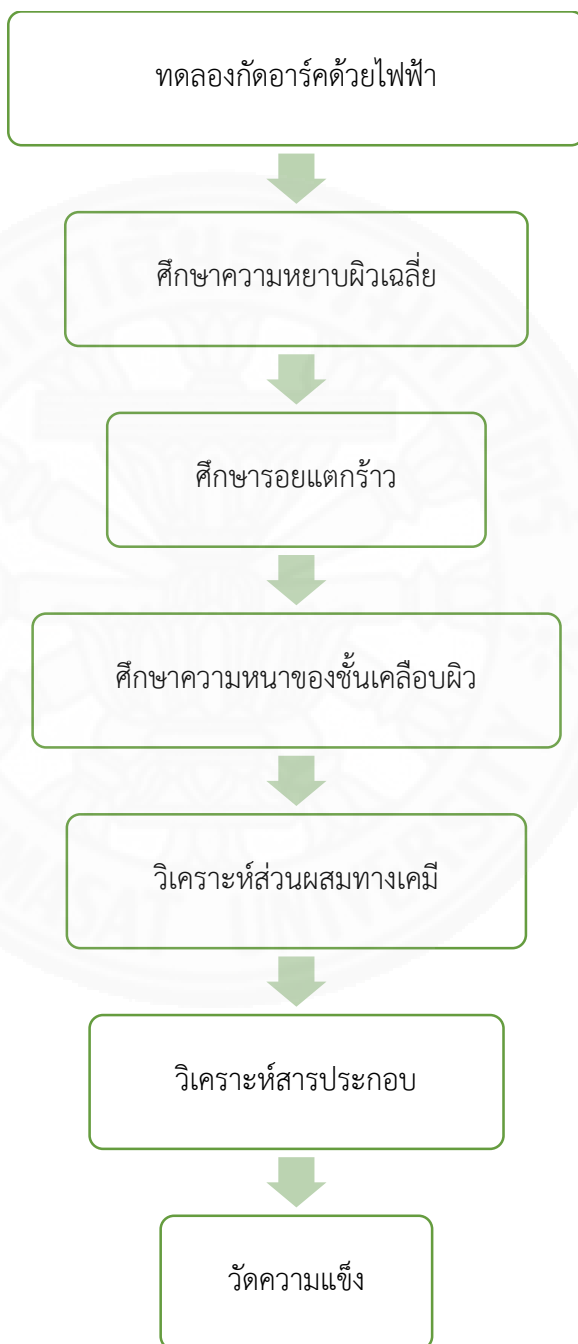
<http://www.hollywood.co.th/html>

<http://techmetals.com/medadize-validated-color-and-gray-titanium-anodize/titanium-anodizing-color-spectrum>



ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
แผนการทดลองและการประเมินผล

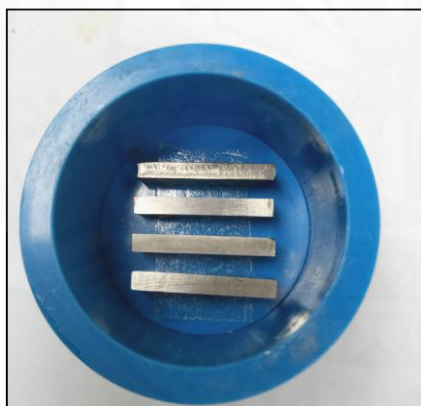


ภาคผนวก ข
การเตรียมชิ้นงานเพื่อศึกษาโครงสร้างชั้นเคลือบผิว

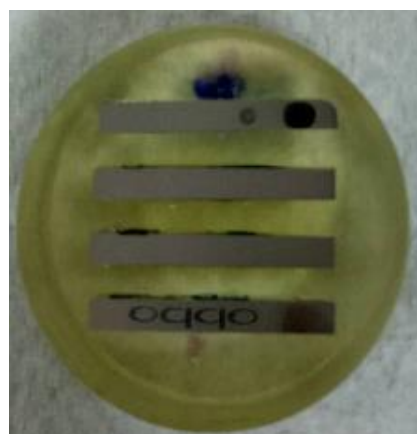
ก) ตัดขวางชิ้นงาน



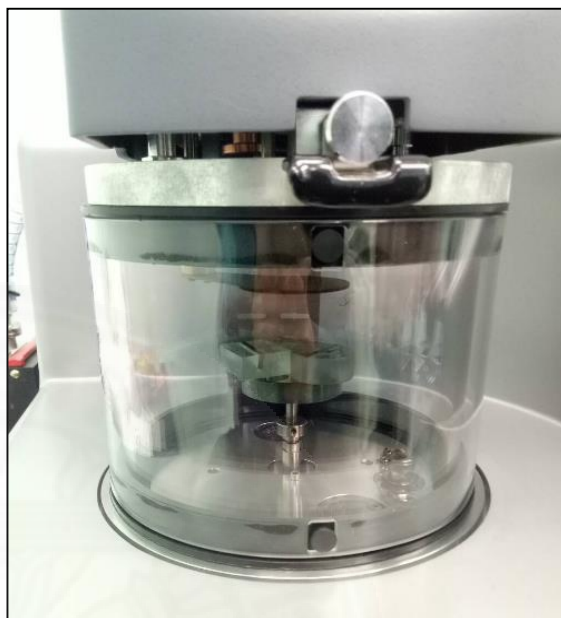
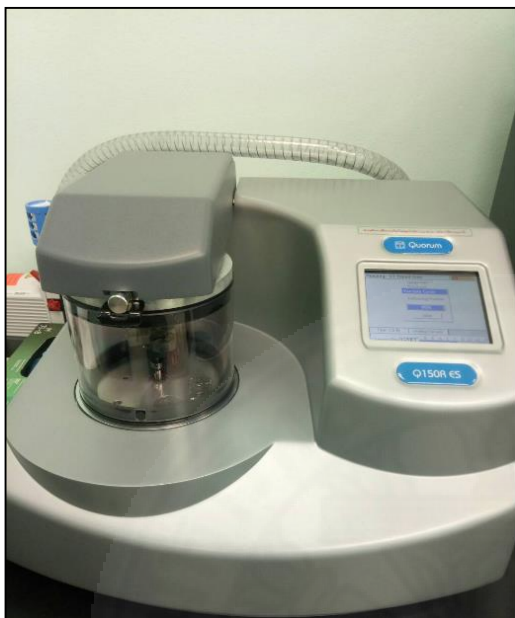
ข) หล่อเรซิน



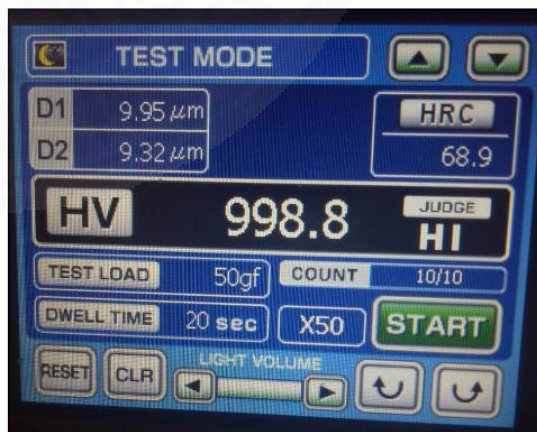
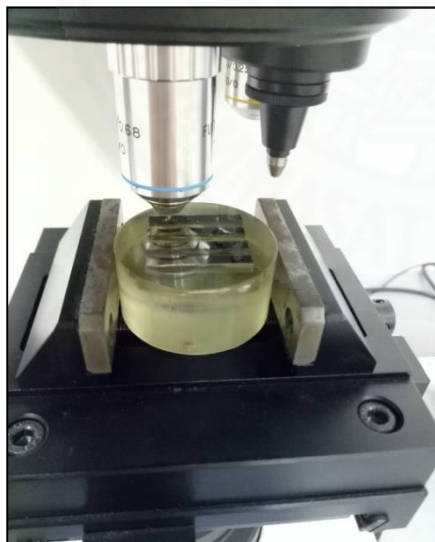
ค) ขัดชิ้นงานให้ใสเป็นกระจก



ง) การเคลือบด้วยทอง

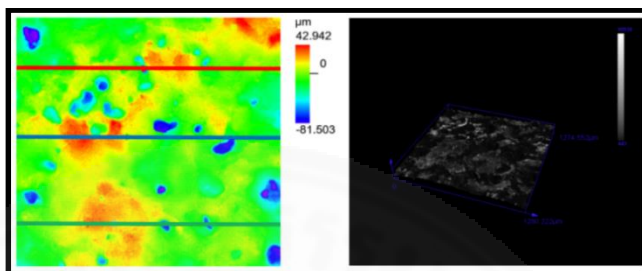


จ) การวัดความแข็ง

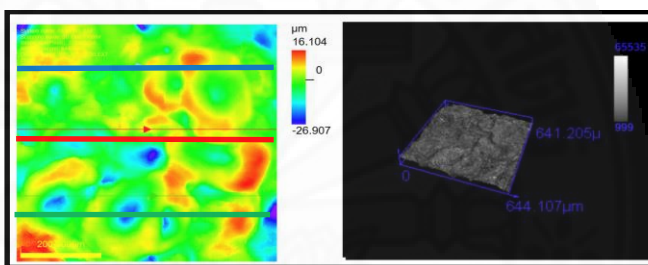


ภาคผนวก ค
การวัดความหยาบผิวเฉลี่ย

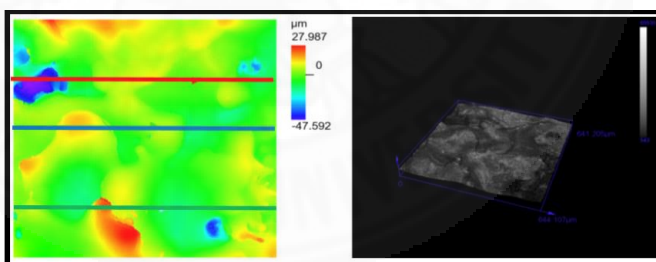
ก) แท่งไทเทเนียม กระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์



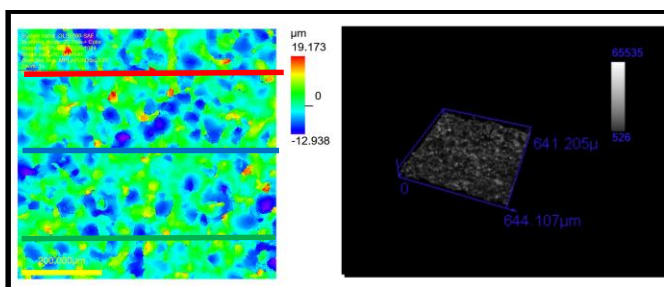
ข) แท่งไทเทเนียม กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์



ค) แท่งไทเทกราไฟท์ กระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์



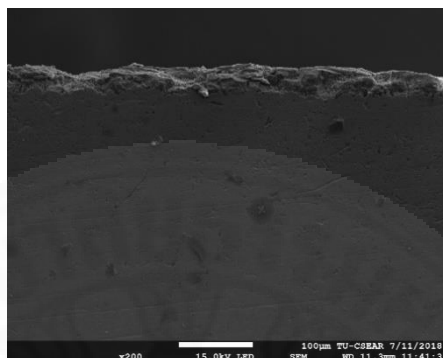
ง) แท่งกราไฟท์ขั้วลบ กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์



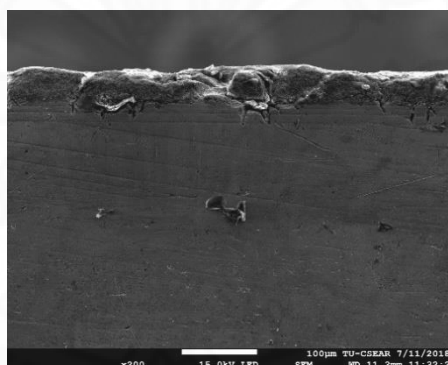
ภาพตัวอย่างการวัดความหยาบผิวเฉลี่ยที่ได้จากเครื่อง LEXT 3D Measuring Laser
Microscope OLS5000

ภาคผนวก ง
ความหนาของชั้นเคลือบผิว

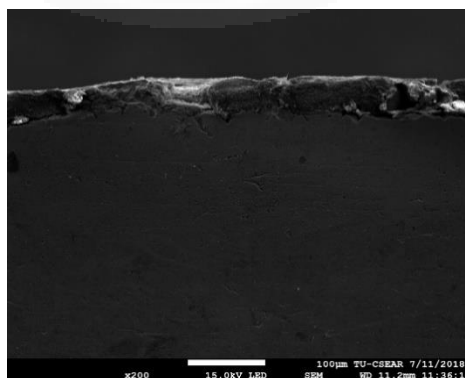
ก) แท่งกราไฟท์ กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ ปัจจัยประสิทธิภาพ 25%



ข) แท่งกราไฟท์ กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ ปัจจัยประสิทธิภาพ 50%



ค) แท่งกราไฟท์ กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ ปัจจัยประสิทธิภาพ 50%



ภาพความหนาของชั้นเคลือบผิว ที่กำลังขยาย 200 เท่า

ประวัติผู้เขียน

| | |
|----------------|---|
| ชื่อ | นางสาวนงลักษณ์ เพชรธรม |
| วันเดือนปีเกิด | 4 สิงหาคม พ.ศ. 2533 |
| วุฒิการศึกษา | ปีการศึกษา 2552: วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขา คณิตศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| ทุนการศึกษา | ปี พ.ศ. 2560 : กองทุนวิจัยคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ศูนย์รังสิต |

ผลงานทางวิชาการ

เรื่อง “การปรับปรุงพื้นผิวไทเทเนียมเกรด 5 ด้วยกระบวนการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าในสารละลายเอทานอลามีน” งานการประชุมวิชาการด้านการพัฒนาการดำเนินงานทางอุตสาหกรรมแห่งชาติ ครั้งที่ 9 ประจำปี 2561