

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปราย

ผลการทดลองเพื่อศึกษาการปรับปรุงผิวทั้งสแตนคาร์ไบด์ด้วยผงไททาเนียม โดยการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าจากตัวแปรเวลาในการแปรรูปกระแสไฟฟ้าและ ปัจจัยประสิทธิภาพจากเวลาเปิดและเวลาปิด โดยทำการพิจารณาผลการทดลองประเมินจากความยาวรวมของรอยแตกร้าวต่อพื้นที่ ความหยาบผิวเฉลี่ย ส่วนประกอบของชั้นผิวเคลือบ ความหนาและความแข็งของชั้นผิวเคลือบจากการปรับตัวแปรกระแสไฟฟ้าและปัจจัยประสิทธิภาพ โดยได้สรุปผลการทดลองเป็นสองส่วนคือ 1. ผลกระทบที่เกิดจากอนุภาคไททาเนียมในการเคลือบผิวชิ้นงานผ่านอิเล็กโตรดหมุนกัดอาร์คด้านข้างและ 2. ผลกระทบการเคลือบผิวชิ้นงานผ่านอิเล็กโตรดหมุนกัดอาร์คด้านบน

4.1 ผลการทดลองจากการเคลือบผิวชิ้นงานด้วยการกัดอาร์คผ่านอิเล็กโตรดหมุนกัดอาร์คด้านข้าง

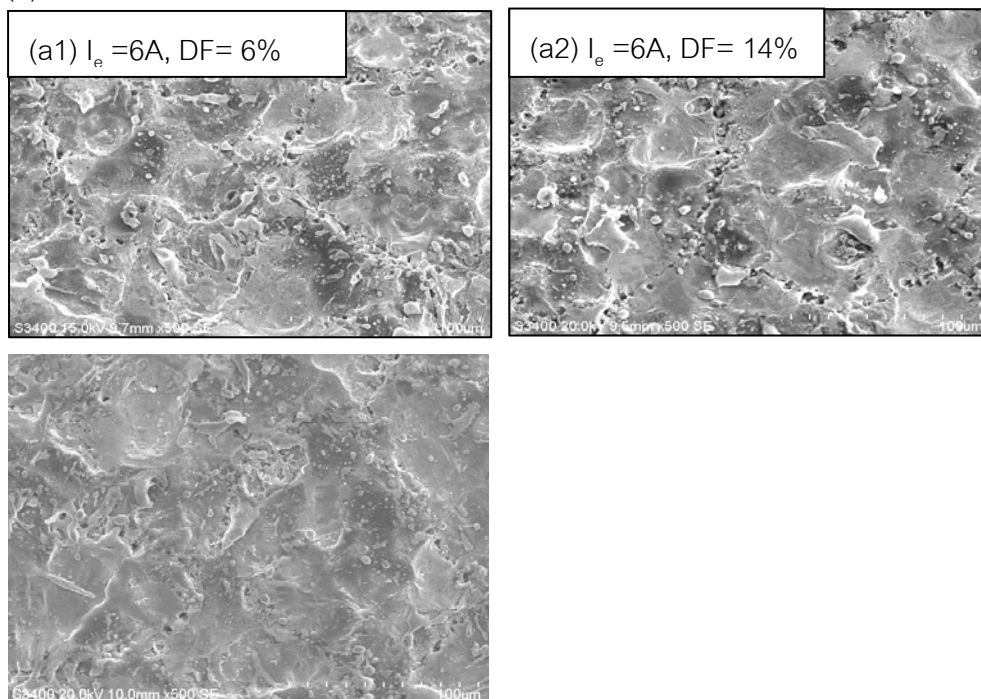
ในส่วนการทดลองนี้เกิดขึ้นจากแนวคิดที่ได้จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ในการปรับปรุงพื้นผิวชิ้นงาน โดยการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าที่ใช้การแพร่กระจายของผงอนุภาคในของเหลวตัวกลางระหว่างช่องว่างของอิเล็กโตรดกับชิ้นงาน โดยแนวคิดหนึ่งในการกัดอาร์คเพื่อปรับปรุงและเคลือบผิวชิ้นงานให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดคือ การแพร่กระจายของผงอนุภาคในของเหลวตัวกลางต้องมีความเสถียรระหว่างกัดอาร์คด้วยกลไกการหมุนของอิเล็กโตรดจะช่วยให้การแพร่กระจายเข้าสู่ช่องว่างระหว่างอิเล็กโตรดกับชิ้นงานเกิดประสิทธิภาพมากขึ้น (K.Furutani, 2003) ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการทดลองในส่วนของอิเล็กโตรดหมุนกัดอาร์คด้านข้าง โดยเน้นไปในส่วนของการกัดอาร์คเคลือบผิวชิ้นงานและศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงาน ซึ่งผลการทดลองถึงผลกระทบที่ได้คือ

4.1.1 ผลกระทบต่อรอยแตกร้าว

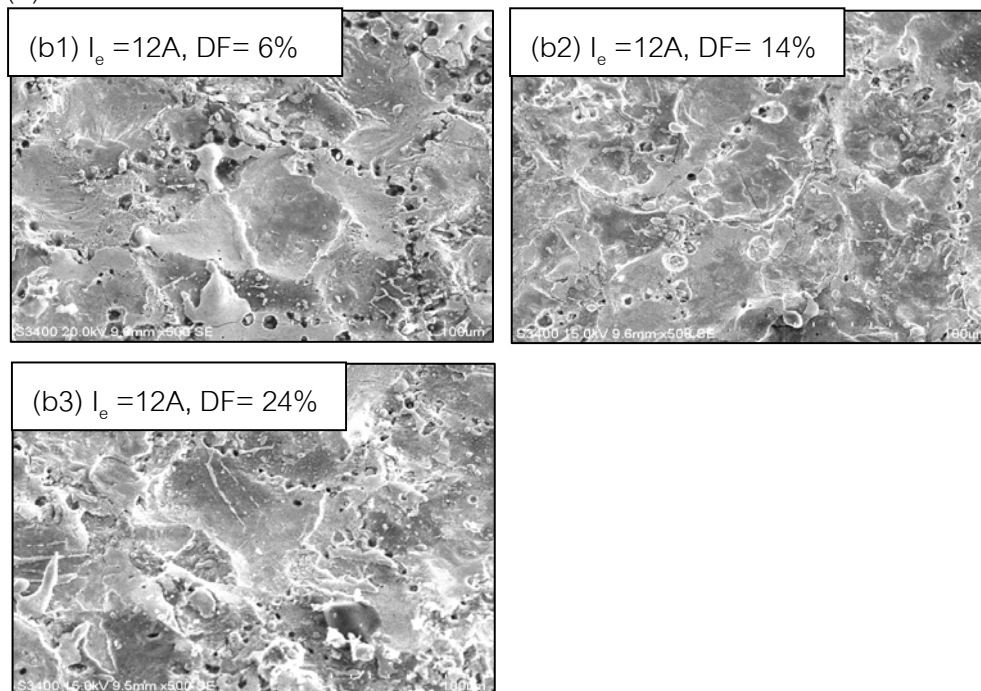
ภาพที่ 4.1 เป็นผลกระทบที่เกิดจากการกัดอาร์คบนพื้นผิวชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ในน้ำมันแร่ Shell EDM Fluid 2A ที่ใช้อิเล็กโตรดทองแดง-กราไฟต์ โดยกำหนดกระแสไฟฟ้าไว้ที่ 6, 12 และ 24 แอมแปร์ เวลาเปิด 32 ไมโครวินาที ปัจจัยประสิทธิภาพ 6, 14, 24 เปอร์เซ็นต์และความต่างศักย์วงจรเปิด 150 โวลต์ กำหนดให้อิเล็กโตรดเป็นขั้วลบ (K. Furutani, 2009) ซึ่งในการ

ปรับปรุงพื้นผิวชิ้นงาน ด้วยการเคลือบที่ใช้กระแสไฟฟ้าขั้วลบจะสามารถสร้างชั้นผิวเคลือบบนพื้นผิวชิ้นงานได้ (Sanjeev Kumar, 2009) จากการทดลองโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าเมื่อทำการเพิ่มกระแสไฟฟ้ามากกว่า 12 แอมแปร์ จะทำให้ผิวหน้าชิ้นงานเกิดรอยแตกกว้างสูงขึ้นซึ่งจะสังเกตเห็นภาพที่ 4.1 (a1) พื้นผิวหน้าชิ้นงานที่ผ่านการกัดอาร์คด้วยกระแส 6 แอมแปร์ ปัจจัยประสิทธิภาพ 6 เปอร์เซ็นต์ จะเกิดรูพรุนและรอยแตกกว้างที่มีความหนาแน่นน้อยกว่ากระแส 15 แอมแปร์ ที่ปัจจัยประสิทธิภาพเดียวกัน ในภาพที่ 4.1 (c1) พบว่าเมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดการอาร์คที่รุนแรง จนทำให้การกระจายตัวของผงไททาเนียมในของเหลวตัวกลางไม่เป็นรูปแบบ ซึ่งเป็นผลให้ระหว่างการกัดอาร์คกระแสไฟฟ้าไม่วิ่งผ่านผงอนุภาคไททาเนียมตัวนำแต่จะเกิดการกัดอาร์คกับชิ้นงานโดยตรง จึงเป็นสาเหตุทำให้เกิดรอยแตกกว้างบนพื้นผิวชิ้นงานและ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างปัจจัยประสิทธิภาพที่ต่างกันในภาพที่ 4.1 (a1), 4.1 (a2) และ 4.1 (a3) จะเห็นว่าเมื่อปัจจัยประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นรอยแตกกว้างและรูพรุนจะมีความหนาแน่นน้อยลงดังเช่นเดียวกับภาพที่ 4.1 (a3) (b3) และ 4.1 (c3) ซึ่งเป็นผลมาจากเวลาเปิดที่ยาวและเวลาปิดที่สั้นดังภาพที่ 4.2 (a) ทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นจะรวดเร็วและต่อเนื่องเป็นผลทำให้การหลอมละลายพื้นผิวบริเวณกัดอาร์คค่อนข้างที่จะสมบูรณ์กว่าการใช้เวลาเปิดสั้นและเวลาปิดที่ยาวหรือ ค่าปัจจัยประสิทธิภาพที่มีค่าต่ำดังภาพที่ 4.2 (b) ที่สำคัญต้องขึ้นอยู่กับกระแสที่เป็นตัวสร้างความร้อนในกระบวนการการปรับปรุงผิวทั้งสแตนคาร์ไบด์ด้วยผงไททาเนียมโดยใช้การกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า

(a) ภาพ SEM ที่กระแสไฟฟ้า 6 แอมแปร์



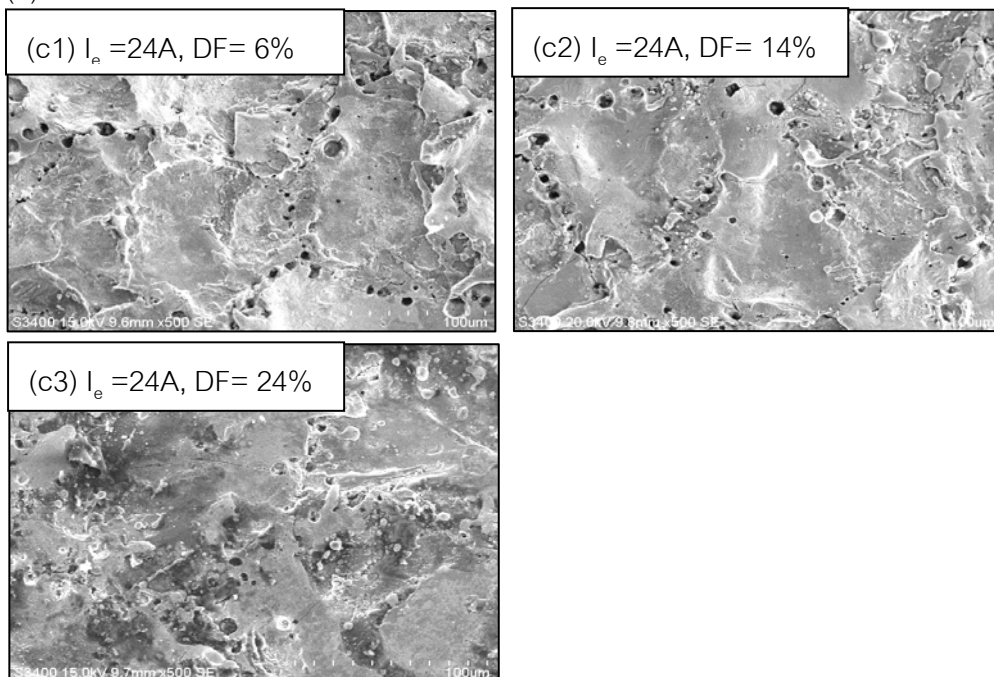
(b) ภาพ SEM ที่กระแสไฟฟ้า 12 แอมแปร์



ภาพที่ 4.1

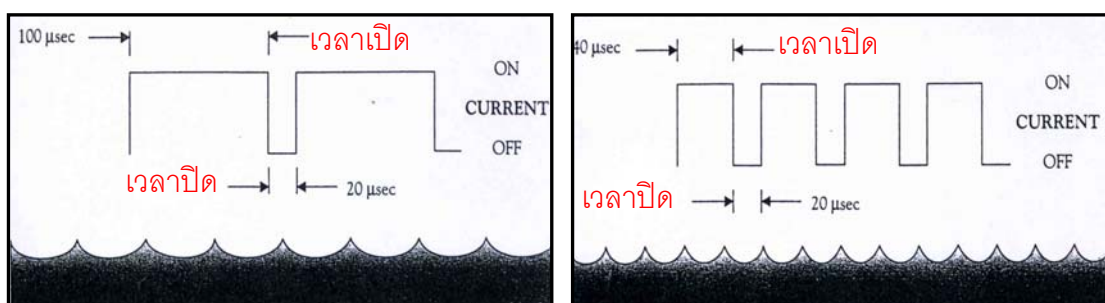
พื้นผิวที่กระแสไฟฟ้า 6, 12, 24 แอมแปร์ ปัจจัยประสิทธิภาพ 6, 14, 24 เปอร์เซ็นต์

(c) ภาพ SEM ที่กระแสไฟฟ้า 24 แอมแปร์



ภาพที่ 4.1 (ต่อ)

พื้นผิวที่กระแสไฟฟ้า 6, 12 และ 24 แอมแปร์ ปัจจัยประสิทธิภาพ 6, 14 และ 24 เปอร์เซ็นต์



(a) เวลาเปิดที่ยาวและเวลาปิดที่สั้น (DF=สูง) (b) เวลาเปิดที่ยาวและเวลาปิดที่สั้น (DF=ต่ำ)

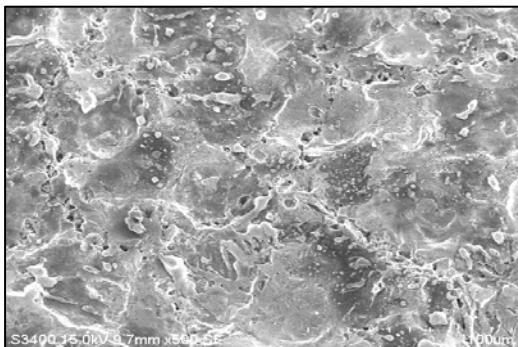
ภาพที่ 4.2

คุณภาพผิวงานที่เกิดจากความถี่หรือเวลาเปิดและปิดที่ต่างกัน

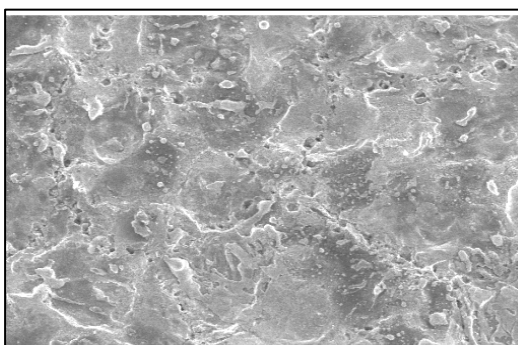
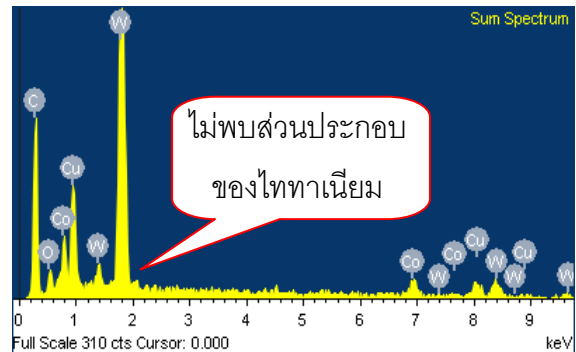
4.1.2 ส่วนประกอบของชั้นผิวเคลือบ

ภาพที่ 4.3 และ 4.4 แสดงผลของจากการวัดวิเคราะห์ได้ที่กระแส 6, 14 และ 24 แอมแปร์ตามลำดับ โดยเปรียบเทียบภาพที่ได้จากเทคนิคจุลวิเคราะห์กับกล้องจุลทรรศน์

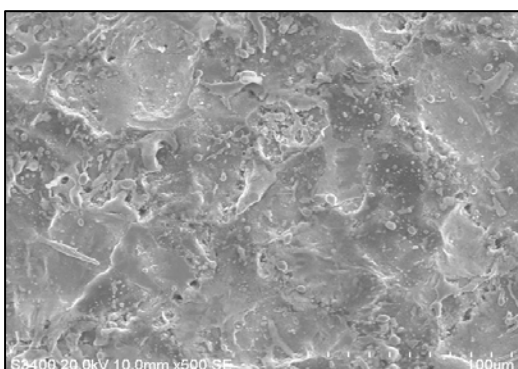
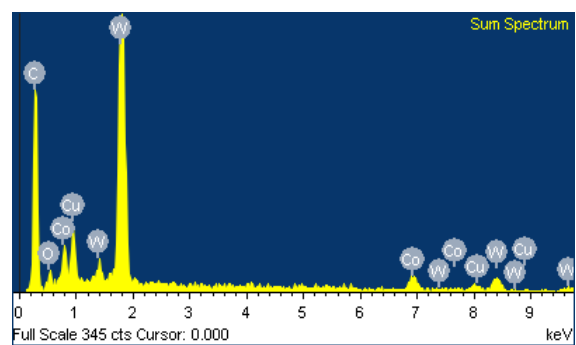
อิเล็กตรอนแบบส่องกราดปรากฏว่าไม่พบธาตุไททาเนียมบนพื้นผิวเคลือบ อาจสันนิษฐานได้ว่าการแพร่กระจายของผงไททาเนียม ให้เข้าไปในช่องว่างระหว่างอิเล็กโตรดกับชิ้นงานไม่เพียงพอเนื่องจากระบบหมุนเวียนทำให้ผงกระจายไม่ทั่วถึงในบริเวณที่ทำการกัดอาร์ค แต่ข้อสรุปในส่วนนี้สามารถสรุปได้ว่า ผงไททาเนียมสามารถช่วยปรับปรุงพื้นผิวชิ้นงานให้เกิดการแตกร้าวน้อยลงได้



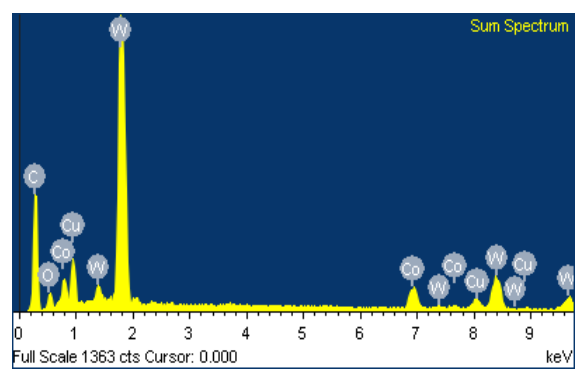
(a) ปัจจัยประสิทธิภาพ 6 เปอร์เซ็นต์



(b) ปัจจัยประสิทธิภาพ 14 เปอร์เซ็นต์

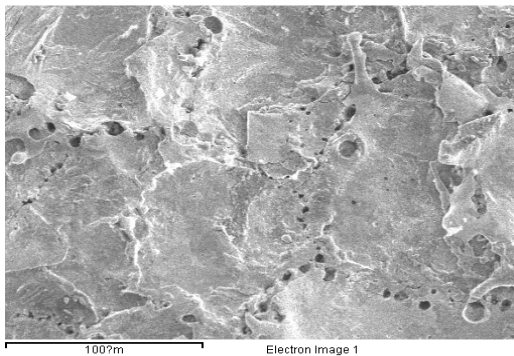


(c) ปัจจัยประสิทธิภาพ 24 เปอร์เซ็นต์

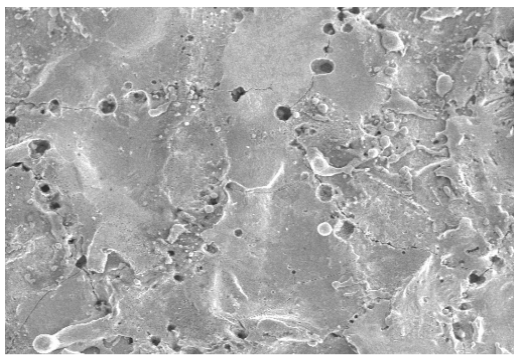
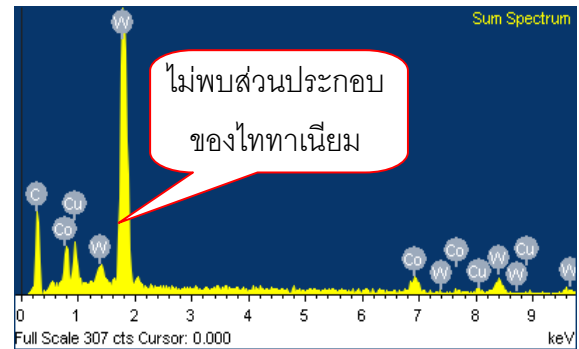


ภาพที่ 4.3

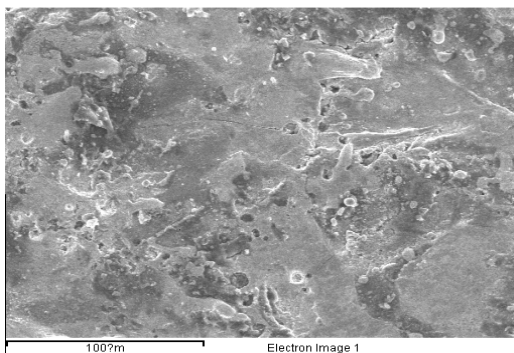
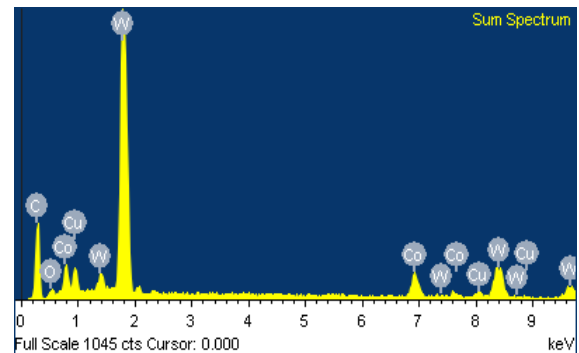
ธาตุที่ตรวจพบหลังการกัดอาร์คที่กระแส 6 แอมแปร์ ปัจจัยประสิทธิภาพ 6, 14 และ 24 เปอร์เซ็นต์



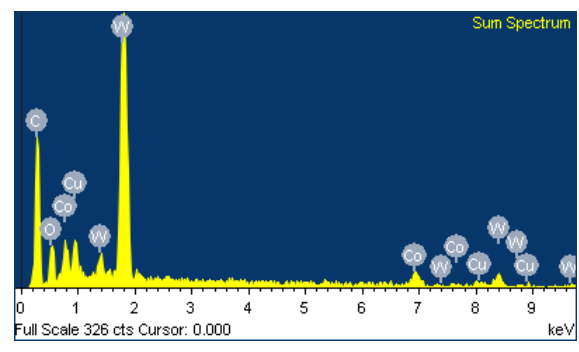
(a) ปัจจัยประสิทธิภาพ 6 เปอร์เซ็นต์



(b) ปัจจัยประสิทธิภาพ 14 เปอร์เซ็นต์



(c) ปัจจัยประสิทธิภาพ 24 เปอร์เซ็นต์

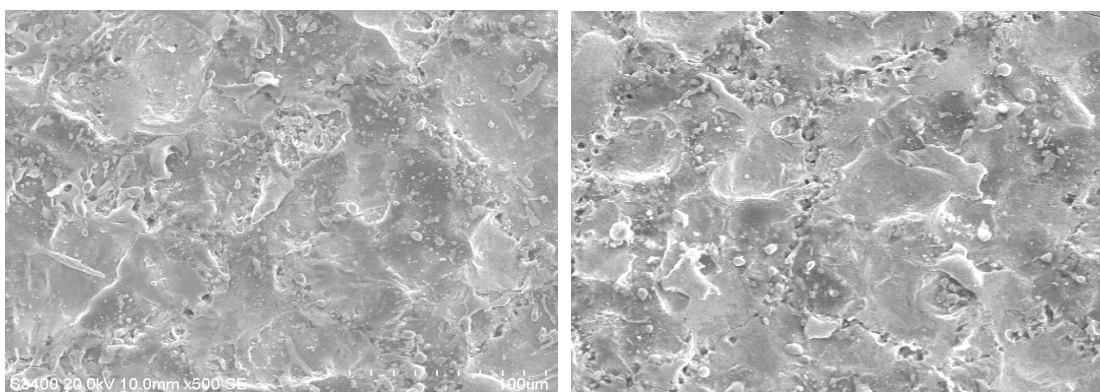


ภาพที่ 4.4

ธาตุที่ตรวจพบหลังการกักอาร์คที่กระแส 24 แอมแปร์ ปัจจัยประสิทธิภาพ 6, 14 และ 24 เปอร์เซ็นต์

และเพื่อยืนยันผลดังกล่าว จึงทำการทดลองกัดอาร์คโดยไม่ผสมผงไททาเนียมในของเหลวตัวกลางเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นจากตัวแปรกระแสไฟฟ้าและปัจจัยประสิทธิภาพเดียวกันกับการผสมผงไททาเนียมในของเหลวตัวกลางดังภาพที่ 4.5

ภาพที่ 4.5 ความแตกต่างระหว่างรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นโดยการกัดอาร์คที่ระดับตัวแปรกระแส 6 แอมแปร์ เวลาเปิด 32 ไมโครวินาที ปัจจัยประสิทธิภาพ 24 เปอร์เซนต์ ในการเคลือบทั้งสแตนคาร์ไบด์ โดยการใส่ผงไททาเนียมและไม่ใส่ผงไททาเนียมแพร่กระจายในของเหลวตัวกลาง ผลการทดลองพบว่า การใส่ผงไททาเนียมแพร่กระจายในของเหลวตัวกลางสามารถทำให้รอยแตกร้าวมีแนวโน้มลดลงได้ดังแสดงในภาพที่ 4.5 (a) และ 4.5 (b)



(a) กัดอาร์คในไททาเนียมผสมของเหลวตัวกลาง (b) กัดอาร์คในของเหลวตัวกลางอย่างเดียว

ภาพที่ 4.5

ความแตกต่างระหว่างรอยแตกร้าวที่ (a) การกัดอาร์คในไททาเนียมผสมของเหลวตัวกลาง

(b) การกัดอาร์คโดยไม่ผสมไททาเนียมในของเหลวตัวกลาง

กระแส 6 แอมแปร์ เวลาเปิด 32 ไมโครวินาที ปัจจัยประสิทธิภาพ 24 เปอร์เซนต์

หลังจากทำการทดลองตัวแปรและวิธีการเคลือบผิวชิ้นงาน โดยใช้อิเล็กโตรดหมุนกัดอาร์คด้านข้างนั้น ไม่สามารถที่จะทำการเคลือบผิวหรือเติมส่วนประกอบของไททาเนียมบนพื้นผิวชิ้นงานได้ เนื่องมาจากค่าความเข้มข้นของไททาเนียมมีไม่มากพอและไม่สามารถปรับระยะเวลาเปิดเกิน 510 ไมโครวินาทีได้ ดังนั้นเพื่อยืนยันค่าตัวแปรของเหล็กกล้าคาร์บอนในงานวิจัยของ K. Furutan จึงทำการทดลองโดยใช้ตัวแปรเดิมที่ใช้กับอิเล็กโตรดหมุนกัดอาร์คด้านข้างมาใช้กับ

อิเล็กโตรดหมุนกัต์อาร์คด้านหน้าเคลือบผิวชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและ ทังสเตนคาร์ไบด์ (K.Furutani, 2003) เพื่อเปรียบเทียบอ้างอิงผลการทดลองในส่วนนี้

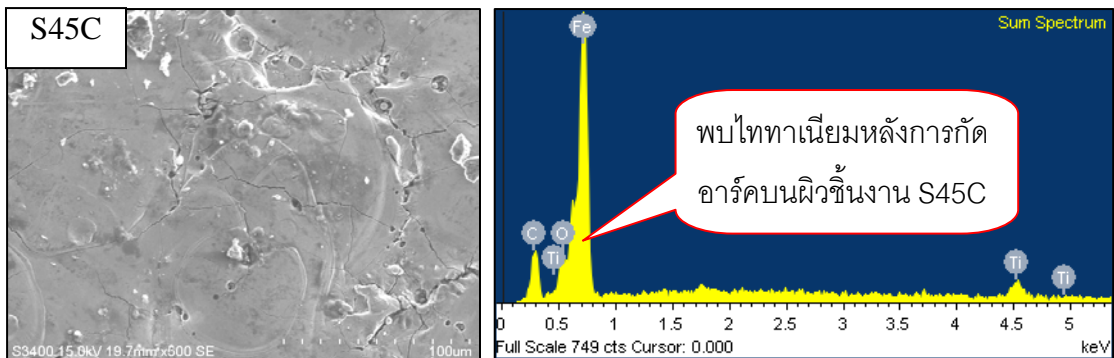
4.2 การกัต์อาร์คโดยใช้อิเล็กโตรดหมุนด้านหน้าแนวตั้ง

ในส่วนการทดลองนี้เกิดขึ้นจากหลังทำการทดลองตัวแปรและวิธีการเคลือบผิวชิ้นงาน โดยใช้อิเล็กโตรดหมุนกัต์อาร์คด้านข้างนั้นไม่สามารถที่จะทำการเคลือบผิวหรือ เติมส่วนประกอบของไททาเนียมบนพื้นผิวได้จากหัวข้อที่ 4.1 จึงได้ทำการทดลองในส่วนของอิเล็กโตรดหมุนกัต์อาร์คด้านหน้าแนวตั้งโดยเน้นไปในส่วนของการกัต์อาร์คเคลือบผิวชิ้นงานเช่นเดียวกับ อิเล็กโตรดหมุนกัต์อาร์คด้านข้าง

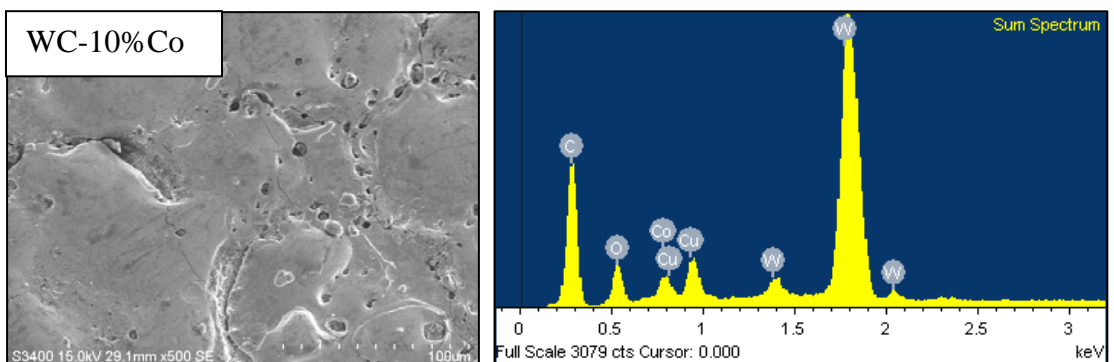
4.2.1 การทดลองเปรียบเทียบกับเหล็กคาร์บอนเพื่อเปรียบเทียบปริมาณไททาเนียมที่ได้จากการเคลือบโดยอิเล็กโตรดหมุนกัต์อาร์คด้านหน้าแนวตั้ง

การทดลองในส่วนนี้เพื่อศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานทังสเตนคาร์ไบด์ ซึ่งในการทดลอง จะเริ่มจากการทดสอบเปรียบเทียบตัวแปรเดิมที่ใช้กับอิเล็กโตรดหมุนกัต์อาร์คด้านข้างเปรียบเทียบกับอิเล็กโตรดหมุนกัต์อาร์คด้านหน้าแนวตั้งกับวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนที่ผู้วิจัยส่วนใหญ่เลือกใช้ในการกัต์อาร์คเคลือบหรือปรับปรุงพื้นผิวชิ้นงาน โดยจะทำการทดสอบเปรียบเทียบกับวัสดุทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผู้วิจัยใช้ในการทดลอง เพื่อทราบถึงความสามารถในการเคลือบผิวทังสเตนคาร์ไบด์และทราบถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงาน

ภาพที่ 4.6 การกัต์อาร์คเคลือบผิวชิ้นงานเหล็กคาร์บอนในภาพที่ 4.2 (a) และ ทังสเตนคาร์ไบด์ในภาพที่ 4.2 (b) ในสภาวะตัวแปรเดียวกันกับอิเล็กโตรดหมุนกัต์อาร์คด้านข้างพบว่ากระแสและเวลาเปิดในการกัต์อาร์คเคลือบผิวชิ้นงานเหล็กคาร์บอนนั้นสามารถทำได้โดยการวัดเทียบธาตุบนพื้นผิวโดยใช้เทคนิคจุลวิเคราะห์ แต่การกัต์อาร์คเคลือบผิวทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยไททาเนียมในสภาวะของตัวแปรเดียวกันนั้นไม่สามารถทำได้ ในส่วนนี้จึงสรุปได้ว่าตัวแปรที่ใช้กับวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนเพื่อเคลือบผิวชิ้นงานไม่สามารถใช้กับทังสเตนคาร์ไบด์ได้ เนื่องจากคุณสมบัติของตัววัสดุที่แตกต่างกันมากในเรื่องของจุดหลอมเหลวและคุณสมบัติทางกล (P. Pecas, E. Henriques: 2003) ซึ่งจากผลการทดลองที่ผ่านมาทำให้เกิดข้อสงสัยเกี่ยวกับเวลาที่ใช้ในการแปรรูปที่สามารถที่จะส่งผลกระทบต่อพื้นผิวชิ้นงานหลังการกัต์อาร์คเคลือบผิวชิ้นงานได้หรือไม่ ผู้วิจัยจึงได้ทำการทดลองเพื่อหาเวลาที่เหมาะสมต่อไปในหัวข้อที่ 4.2.2



(a) กระแสไฟฟ้า 10 แอมแปร์ ปัจจัยประสิทธิภาพ 6 เปอร์เซ็นต์



(b) กระแสไฟฟ้า 10 แอมแปร์ ปัจจัยประสิทธิภาพ 6 เปอร์เซ็นต์

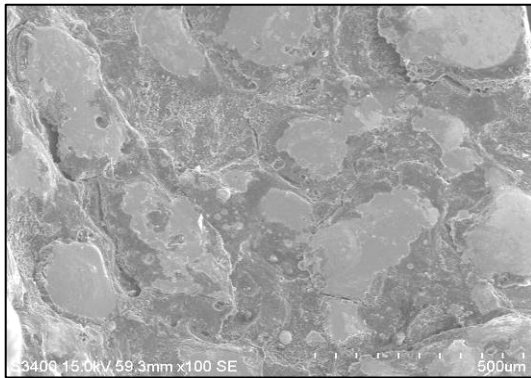
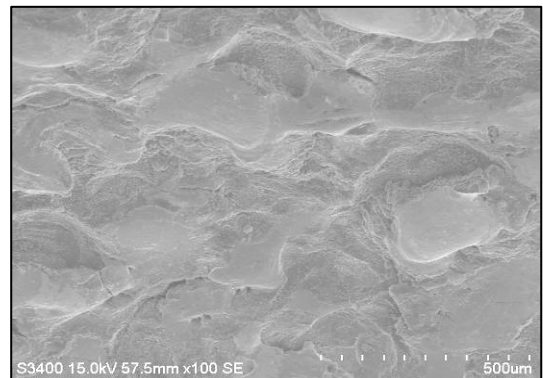
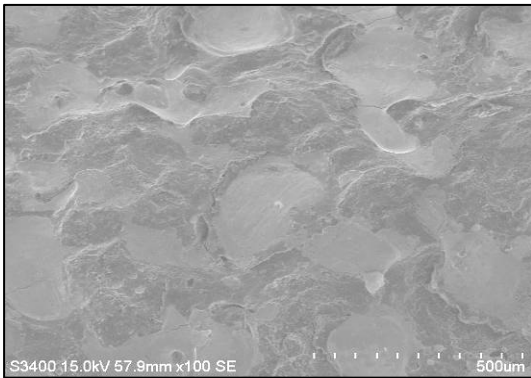
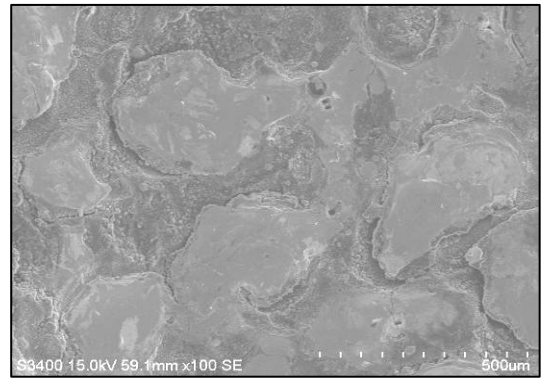
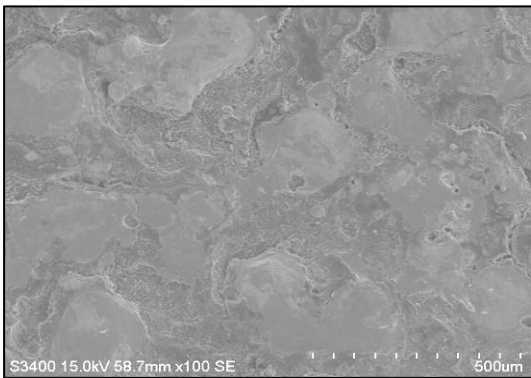
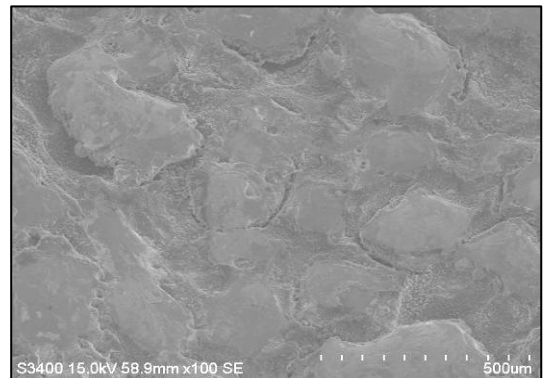
ภาพที่ 4.6

พื้นผิวหลังการกัดอาร์คเคลือบด้วยไททาเนียมของเหล็กกล้าคาร์บอนและทังสเตนคาร์ไบด์ที่ กระแส 10 แอมแปร์, ปัจจัยประสิทธิภาพ 6 เปอร์เซ็นต์

4.2.2 การทดลองเพื่อหากระแสและเวลาที่เหมาะสม

ในการทดลองนี้เป็นการทดลองหากระแสและเวลาที่เหมาะสมในการกัดอาร์คเคลือบผิวชิ้นงานทังสเตนคาร์ไบด์

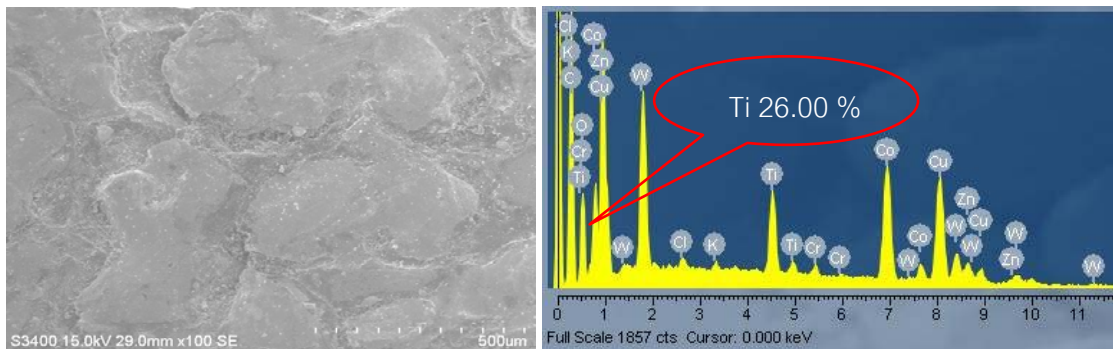
ภาพที่ 4.7 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบนพื้นผิวชิ้นงานทังสเตนคาร์ไบด์ ด้วยกระแสไฟฟ้า 15 และ 20 แอมแปร์ โดยกำหนดเวลาเปิด 510 ไมโครวินาที และเวลาปิด 510 ไมโครวินาที ความต่างศักย์วงจรเปิด 150 โวลต์ ที่เวลากัดอาร์คทั้งหมด 15, 30 และ 60 นาที จากภาพพบว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการกัดอาร์คลักษณะพื้นผิวชิ้นงานจะมีลักษณะไม่แตกต่างกันดังนั้นจึงทำการทดสอบ โดยใช้เทคนิคจุลวิเคราะห์กับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบนพื้นผิวชิ้นงานทังสเตนคาร์ไบด์และสรุปผลดังภาพที่ 4.8

(a) $I_e = 15$ แอมแปร์, MT=15 นาที(b) $I_e = 20$ แอมแปร์, MT=15 นาที(c) $I_e = 15$ แอมแปร์, MT=30 นาที(d) $I_e = 20$ แอมแปร์, MT=30 นาที(e) $I_e = 15$ แอมแปร์, MT=60 นาที(f) $I_e = 20$ แอมแปร์, MT=60 นาที

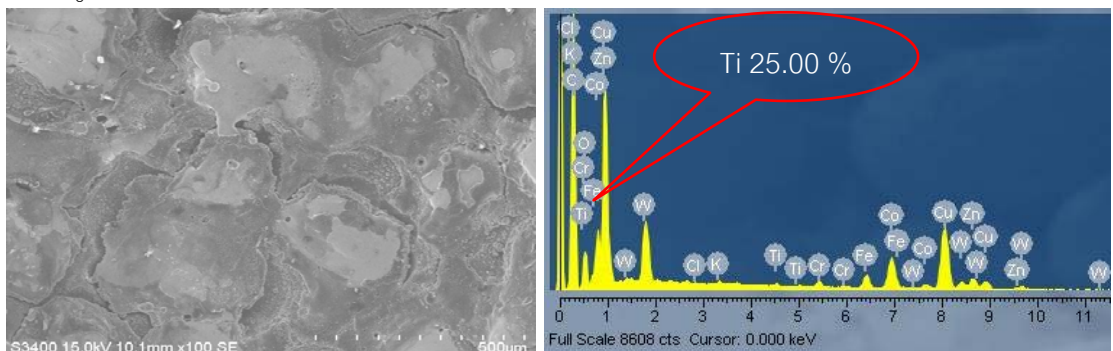
ภาพที่ 4.7

พื้นผิวชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์หลังการกัดอาร์คที่กระแส 15 และ 20 แอมแปร์
ปัจจัยประสิทธิภาพ 50 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลาการกัดอาร์ค 15, 30 และ 60 นาที

ภาพที่ 4.8 ภาพแสดงการทดสอบโดยใช้เทคนิคจุลวิเคราะห์กับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบนพื้นผิวชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ พบว่าเมื่อเพิ่มเวลาการกัดอาร์คจากภาพที่ 4.8 (a) กระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์ เวลาการกัดอาร์ค 15 นาทีไททาเนียม 26 เปอร์เซ็นต์ และภาพที่ 4.8 (b) กระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์ เวลาการกัดอาร์ค 60 นาที ไททาเนียม 25 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณของไททาเนียมบนพื้นผิวทั้งสแตนคาร์ไบด์มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย จึงสรุปได้ว่าเวลาการกัดอาร์คมีผลต่อการเคลือบผิวทั้งสแตนคาร์ไบด์น้อยมาก เพื่อหาผลกระทบของกระแสเมื่อลดกระแสเป็น 15 แอมแปร์ ในส่วนนี้จึงได้ทำการทดลองและแสดงในภาพที่ 4.9



(a) $I_e = 20$ แอมแปร์, MT=15 นาที



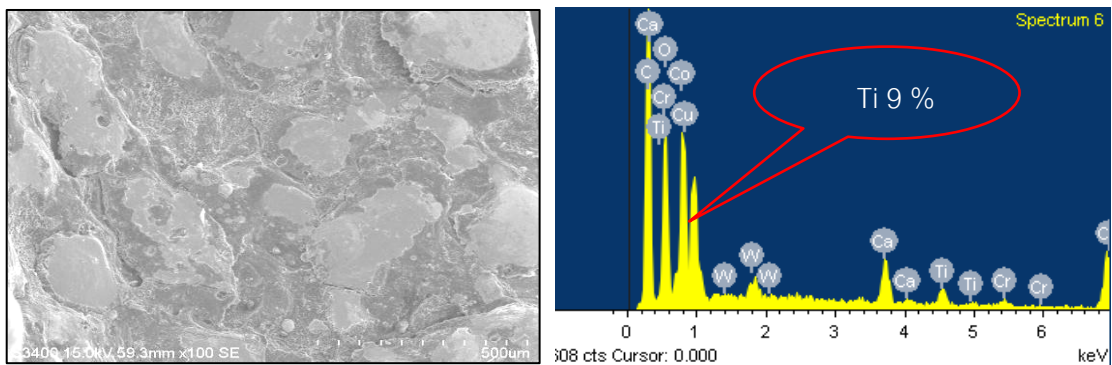
(b) $I_e = 20$ แอมแปร์, MT=60 นาที

ภาพที่ 4.8

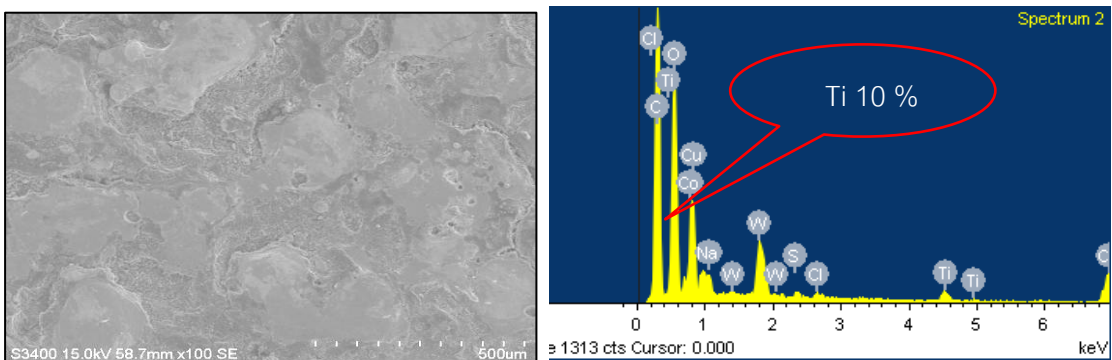
ปริมาณไททาเนียมบนพื้นผิวทั้งสแตนคาร์ไบด์หลังการกัดอาร์คที่กระแส 20 แอมแปร์

ปัจจัยประสิทธิภาพ 50 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลาการกัดอาร์ค 15 และ 60 นาที

ภาพที่ 4.9 ภาพแสดงการทดสอบโดยใช้เทคนิคจุลวิเคราะห์กับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบนพื้นผิวชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่กระแสไฟฟ้า 15 แอมแปร์ เวลาการกัดอาร์ค 15 นาทีพบไททาเนียม 9.00 เปอร์เซ็นต์ และ 60 นาทีพบไททาเนียม 10.00 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในภาพที่ 4.9 (a) และ 4.9 (b) ซึ่งสรุปได้ว่าปริมาณของไททาเนียมบนพื้นผิวทั้งสแตนคาร์ไบด์มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเช่นเดียวกับการใช้กระแส 20 แอมแปร์ (ในภาพที่ 4.8) ดังนั้นในส่วนนี้ จึงสรุปได้ว่าเวลาในการกัดอาร์คหรือเวลาในการแปรรูปนั้นไม่ทำให้ปริมาณไททาเนียมเพิ่มมากขึ้นและ เมื่อวิเคราะห์ที่ค่ากระแสไฟฟ้าต่างกันพบว่าไททาเนียมบนพื้นผิวชิ้นงานเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงเลือกใช้กระแส 20 แอมแปร์ ทำการทดลองต่อไป



(a) $I_e = 15$ แอมแปร์, MT=15 นาที



(e) $I_e = 15$ แอมแปร์, MT=60 นาที

ภาพที่ 4.9

ปริมาณไททาเนียมบนพื้นผิวทั้งสแตนคาร์ไบด์หลังการกัดอาร์ค 15 แอมแปร์
ปัจจัยประสิทธิภาพ 50 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลาการกัดอาร์ค 15 และ 60 นาที

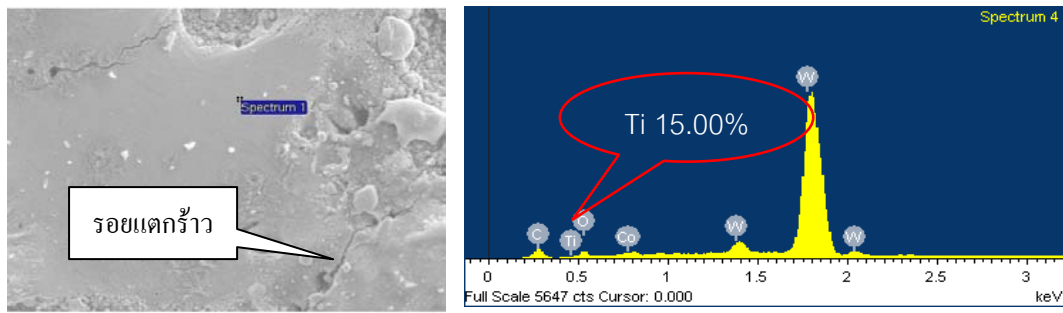
4.2.3 การทดลองหาปัจจัยประสิทธิภาพที่เหมาะสมในการเคลือบผิวชิ้นงาน

ในส่วนนี้ เป็นการทดสอบหาปัจจัยประสิทธิภาพที่เหมาะสมหลังจากที่ทำการทดสอบและทราบถึงกระแสที่สามารถเคลือบผิวชิ้นงานได้ปริมาณของไททาเนียมมากที่สุดที่เท่ากับ 20 แอมแปร์ ดังนั้นจึงใช้ค่ากระแสนี้ทำการทดสอบหาความสัมพันธ์ของปัจจัยประสิทธิภาพ เพื่อเคลือบผิวชิ้นงานโดยผลการทดลอง

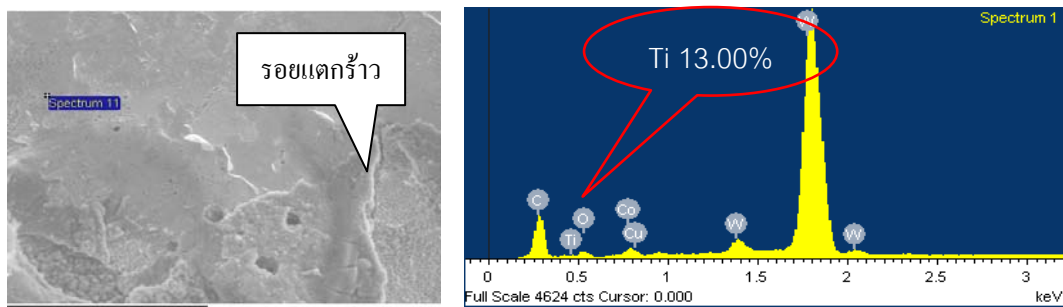
ภาพที่ 4.10 ภาพแสดงการทดสอบโดยใช้เทคนิคจุลวิเคราะห์แสดงปริมาณส่วนประกอบของธาตุที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการกัดอาร์คเคลือบด้วยกระแส 20 แอมแปร์ เวลาเปิด 510 ไมโครวินาที ที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 20, 40, 50 และ 80 เปอร์เซ็นต์จะสังเกตเห็นว่าภาพที่ 4.10 (c) ปัจจัยประสิทธิภาพ 50 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณของไททาเนียมมากที่สุดคือ 30 เปอร์เซ็นต์และเมื่อปัจจัยประสิทธิภาพมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ พบว่าปริมาณของไททาเนียมบนพื้นผิวชิ้นงานลดลง ดังนั้นการทดลองนี้สามารถสรุปได้ว่าในการกัดอาร์คเคลือบผิวทั้งสแตนคาร์ไบด์ ต้องใช้กระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์ เวลาเปิดมากกว่า 510 ไมโครวินาที ปัจจัยประสิทธิภาพ 50 เปอร์เซ็นต์

จากภาพแสดงผลการทดสอบ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบนพื้นผิวชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์พบว่าภาพที่ 4.10 (c) ความยาวรวมของรอยแตกกว้างมีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับภาพที่ 4.10 (a), 4.10 (b) และ 4.10 (d) ที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 20, 30 และ 80 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับและเมื่อดูความสัมพันธ์ของกระแสกับปัจจัยประสิทธิภาพที่ส่งผลกระทบต่อรอยแตกกว้างบนพื้นผิวชิ้นงานดังภาพที่ 4.11 พบว่าปัจจัยประสิทธิภาพส่งผลโดยตรงต่อรอยแตกกว้างบนผิวชิ้นงานทั้งที่กระแส 15 และ 20 แอมแปร์ โดยปัจจัยประสิทธิภาพ 50 เปอร์เซ็นต์มีแนวโน้มให้ผลดีที่สุดในที่เวลาเปิด 510 ไมโครวินาที

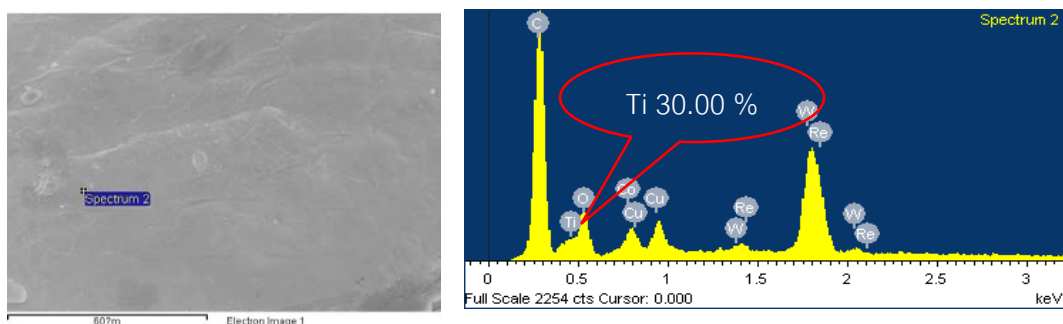
ดังนั้นในส่วนนี้จึงสรุปได้ว่า ปัจจัยประสิทธิภาพที่สามารถเคลือบผิวชิ้นงานได้ปริมาณไททาเนียมบนพื้นผิวชิ้นงานมากที่สุดและความรุนแรงของรอยแตกกว้างน้อยที่สุดคือ 50 เปอร์เซ็นต์



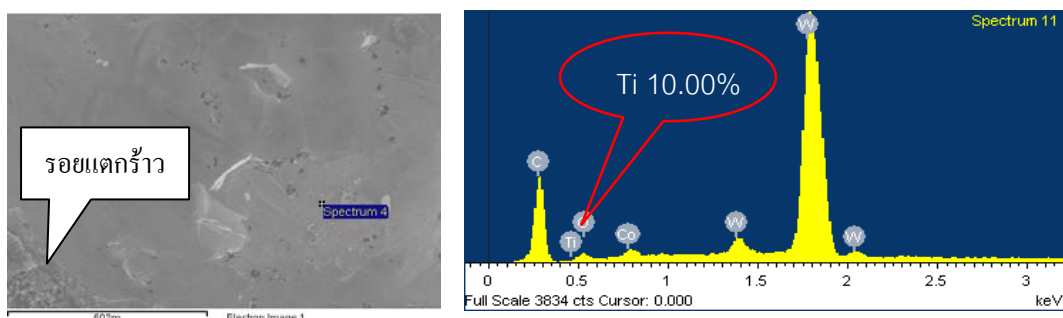
(a) กระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์ ปัจจัยประสิทธิภาพ 20 เปอร์เซ็นต์



(b) กระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์ ปัจจัยประสิทธิภาพ 40 เปอร์เซ็นต์



(c) กระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์ ปัจจัยประสิทธิภาพ 50 เปอร์เซ็นต์



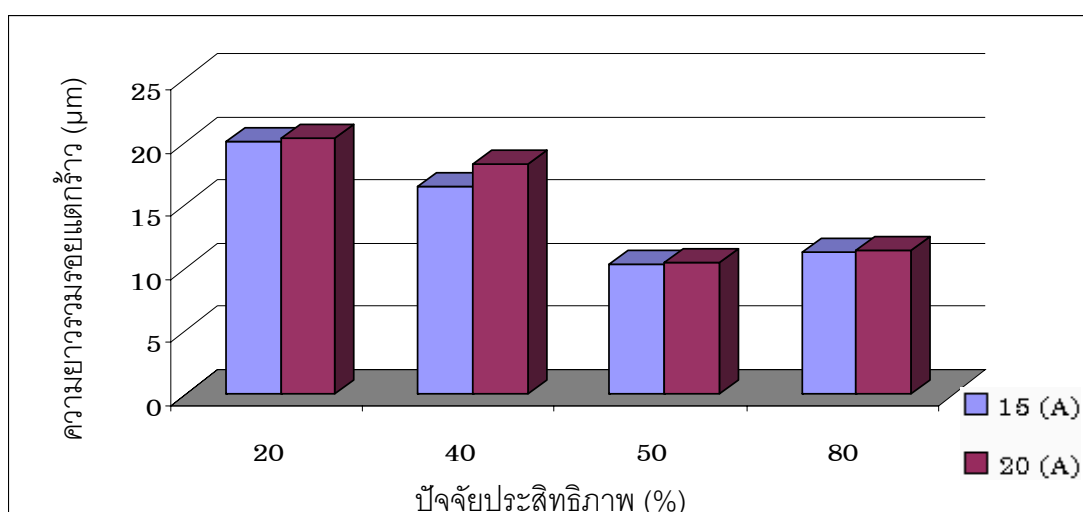
(d) กระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์ ปัจจัยประสิทธิภาพ 80 เปอร์เซ็นต์

ภาพที่ 4.10

ปริมาณไททานเนียมบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการกัดอาร์คที่

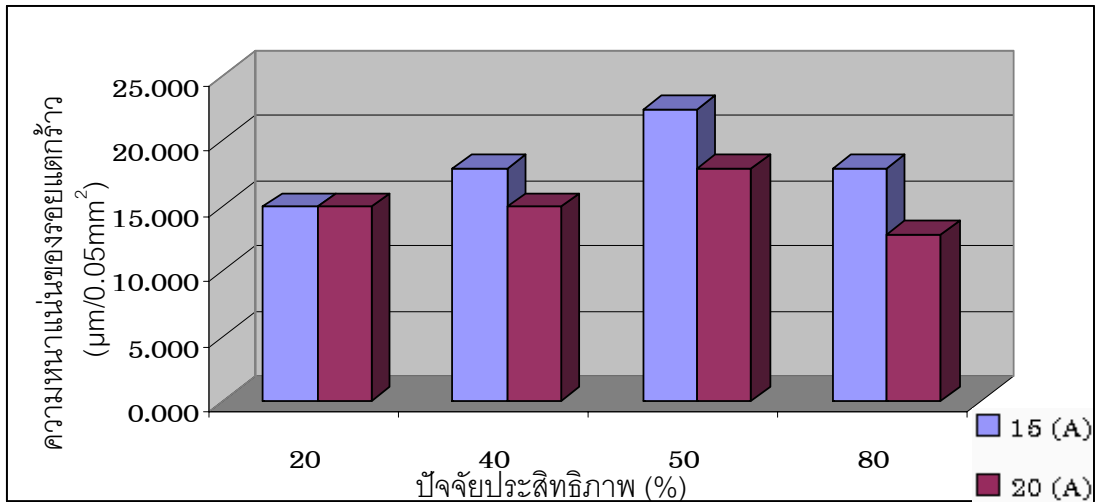
กระแส 20 แอมแปร์ ปัจจัยประสิทธิภาพ 20, 40, 50 และ 80 เปอร์เซ็นต์

ภาพที่ 4.11 แสดงถึงความแตกต่างของปัจจัยประสิทธิภาพที่ส่งผลกระทบต่อรอยแตกร้าวบนพื้นผิวชิ้นงาน เมื่อปัจจัยประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นความยาวรวมของรอยแตกร้าวมีแนวโน้มลดลงและภาพที่ 4.12 แสดงค่าเมื่อปัจจัยประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นความหนาแน่นของรอยแตกร้าวต่อพื้นที่มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นมากที่สุดที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 50 เปอร์เซ็นต์และมีแนวโน้มลดลงเมื่อปัจจัยประสิทธิภาพมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ แต่ในภาพที่ 4.13 (b) ระดับความรุนแรงมากที่สุดที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 80 เปอร์เซ็นต์เพราะมีความกว้างของรอยแตกร้าวมากโดยไม่คำนึงถึงความยาว ดังนั้นในส่วนนี้สามารถสรุปได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความยาวรวมของรอยแตกร้าวเพิ่มขึ้นและ ปัจจัยประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นระดับความรุนแรงของรอยแตกร้าวบนพื้นผิวชิ้นงานก็จะเพิ่มขึ้นโดยวิธีการคำนวณในตารางภาคผนวก ข



ภาพที่ 4.11

ความยาวรวมของรอยแตกร้าวที่กระแสไฟฟ้า 15 และ 20 แอมแปร์และ
ปัจจัยประสิทธิภาพ 20, 40, 50 และ 80 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 4.12

ความหนาแน่นของรอยแตกร้าวต่อพื้นที่ที่กระแสไฟฟ้า 15 และ 20 แอมแปร์
ปัจจัยประสิทธิภาพ 20, 40, 50 และ 80 เปอร์เซ็นต์



(a) ปัจจัยประสิทธิภาพ 50 เปอร์เซ็นต์

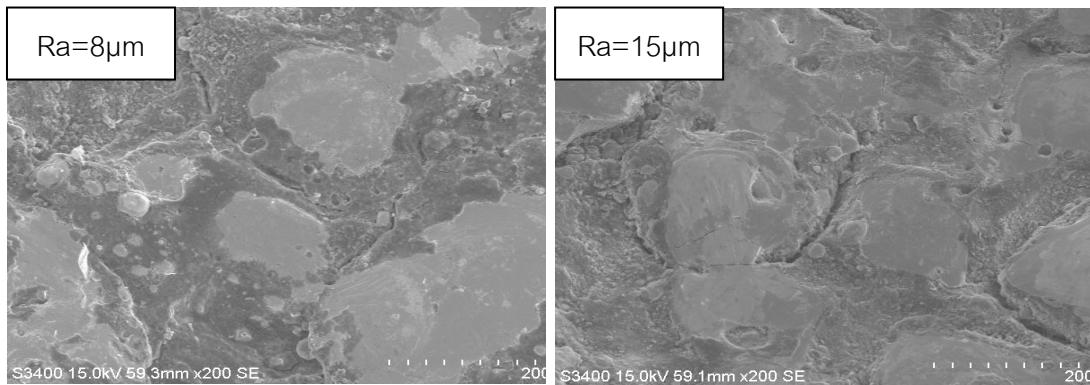
(b) ปัจจัยประสิทธิภาพ 80 เปอร์เซ็นต์

ภาพที่ 4.13

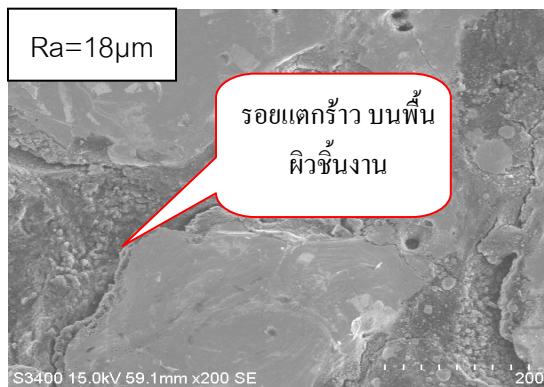
ความรุนแรงของรอยแตกร้าวต่อพื้นที่ที่กระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์และ
ปัจจัยประสิทธิภาพ 50 และ 80 เปอร์เซ็นต์

4.2.4 ผลกระทบต่อความหยาบผิวชิ้นงาน

ภาพที่ 4.14 แสดงความหยาบบนพื้นผิวชิ้นงานหลังจากการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า เคลือบผิวชิ้นงานที่กระแสไฟฟ้า 10, 15 และ 20 แอมแปร์ ด้วยปัจจัยประสิทธิภาพคงที่ที่ 50 เปอร์เซ็นต์ พบว่าเมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นความหยาบของพื้นผิวชิ้นงานเพิ่มขึ้นภาพที่ 4.14 (c) กระแสสูงสุด 20 แอมแปร์จะเกิดความหยาบบนพื้นผิวชิ้นงานมากที่สุด



(a) $I_e = 10$ แอมแปร์ ปัจจัยประสิทธิภาพ 50% (b) $I_e = 15$ แอมแปร์ ปัจจัยประสิทธิภาพ 50%



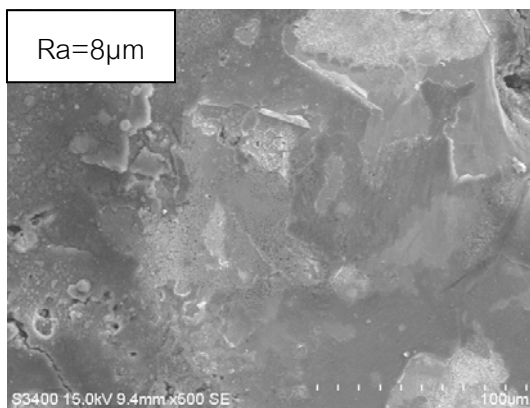
(c) $I_e = 20$ แอมแปร์ ปัจจัยประสิทธิภาพ 50%

ภาพที่ 4.14

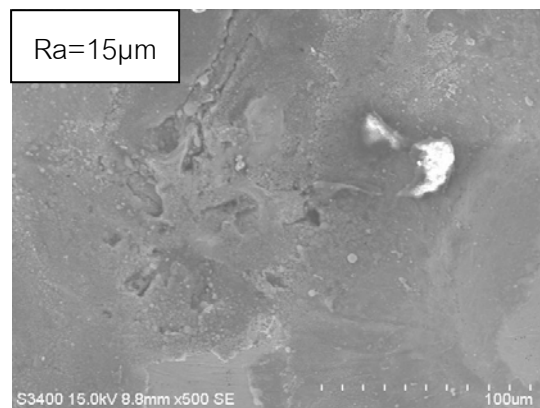
ความหยาบของพื้นผิวชิ้นงานที่กระแสไฟฟ้า 10, 15 และ 20 แอมแปร์
ที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 50 เปอร์เซ็นต์

ภาพที่ 4.15 แสดงความแตกต่างของปัจจัยประสิทธิภาพที่ปรับเปลี่ยนโดยคงที่ กระแสไฟฟ้าที่ 20 แอมแปร์ และทำการทดสอบปัจจัยประสิทธิภาพ 20, 40, 50 และ 80 เปอร์เซ็นต์

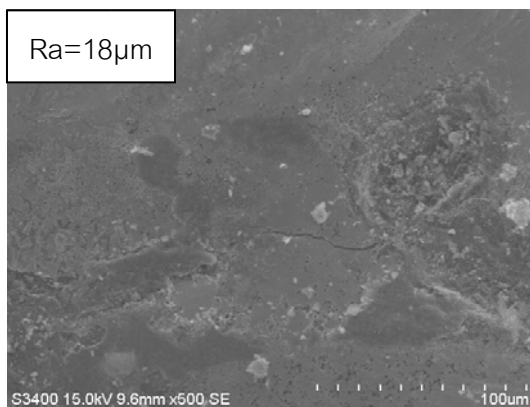
พบว่าเมื่อเพิ่มปัจจัยประสิทธิภาพตั้งแต่ 20, 40 จนถึงปัจจัยประสิทธิภาพถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ดังภาพที่ 4.15 (a), 4.15 (b), 4.15 (c) ความหยาบเพิ่มขึ้น 8, 15 และ 18 ไมโครเมตรตามลำดับ แต่จำนวนรอยแตกร้าวลดลง และเมื่อทำการเพิ่มไปถึง 80 เปอร์เซ็นต์ ดังภาพที่ 4.15 (d) คงที่ที่เวลาเปิดแต่ลดเวลาปิดลงจะทำให้ความหยาบของผิวชิ้นงานและรอยแตกร้าวยังคงเพิ่มขึ้น จึงทำให้สรุปผลได้ว่าปัจจัยประสิทธิภาพในการกัดอาร์คทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่กำหนดให้เวลาเปิดและเวลาปิดต่ำกว่า 510 ไมโครวินาที ส่งผลกระทบต่อพื้นผิวชิ้นงานที่มีแนวโน้มไปในทางลบที่กระแส 20 แอมแปร์



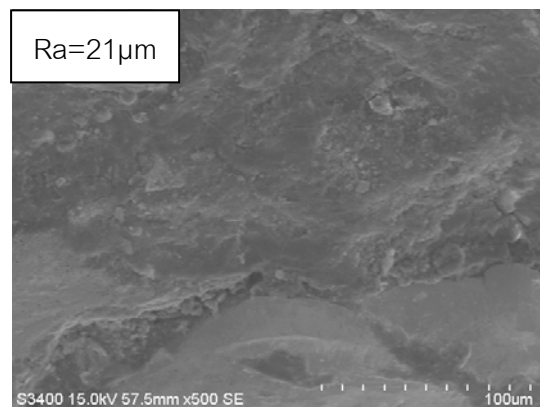
(a) $I_o = 20$ แอมแปร์ ปัจจัยประสิทธิภาพ 20%



(b) $I_o = 20$ แอมแปร์ ปัจจัยประสิทธิภาพ 40%



(c) $I_o = 20$ แอมแปร์ ปัจจัยประสิทธิภาพ 50%

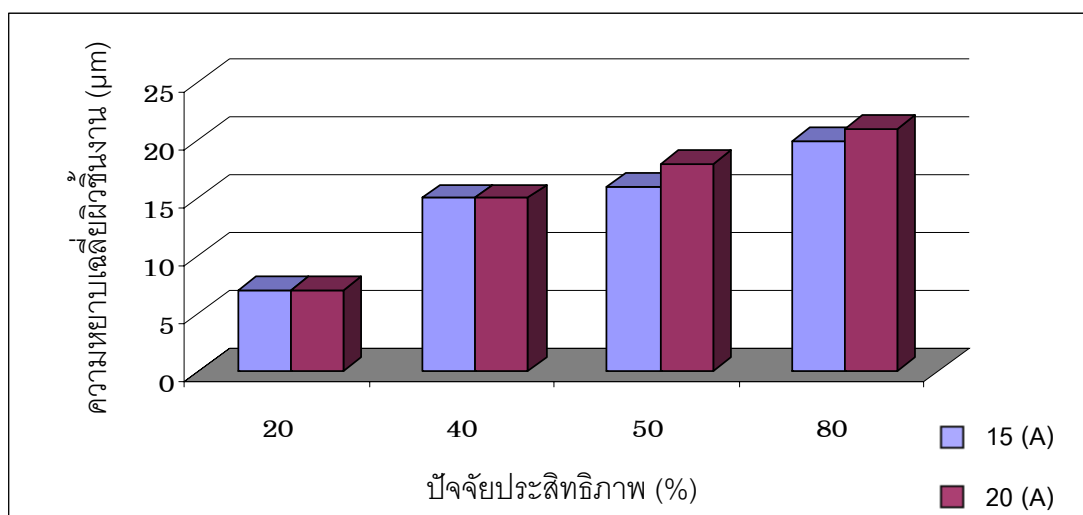


(d) $I_o = 20$ แอมแปร์ ปัจจัยประสิทธิภาพ 80%

ภาพที่ 4.15

พื้นผิวหลังการกัดอาร์คที่กระแส 20 แอมแปร์ เวลาเปิด 510 ไมโครวินาที ปัจจัยประสิทธิภาพ 20, 40, 50 และ 80 เปอร์เซ็นต์

ภาพที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยประสิทธิภาพและกระแสไฟฟ้าที่ส่งผลต่อความหนาของพื้นผิวชิ้นงานหลังจากการกัดอาร์ค โดยความหนาของพื้นผิวชิ้นงานนั้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสไฟฟ้าและปัจจัยประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการจัดพลังงานโดยกระบวนการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าเป็นการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าไปเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งอาจสูงถึง 10,000 องศาเซลเซียสภายในเวลาหนึ่งในล้านวินาทีทำให้ของเหลวตัวกลางระเหยกลายเป็นไอและเนื้องานหลุดออกเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กด้วยอุณหภูมิที่สูงทำให้เกิดการหลอมละลายและแข็งตัวใหม่อย่างรวดเร็ว จึงทำให้เกิดการเรียงตัวของผลึกเป็นแนวยาวโผล่ขึ้นมาตามกระบวนการระบายความร้อน ซึ่งจะมีความหนา 10-30 ไมโครเมตร ขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้าและปัจจัยประสิทธิภาพ (Thomas B. 2002)

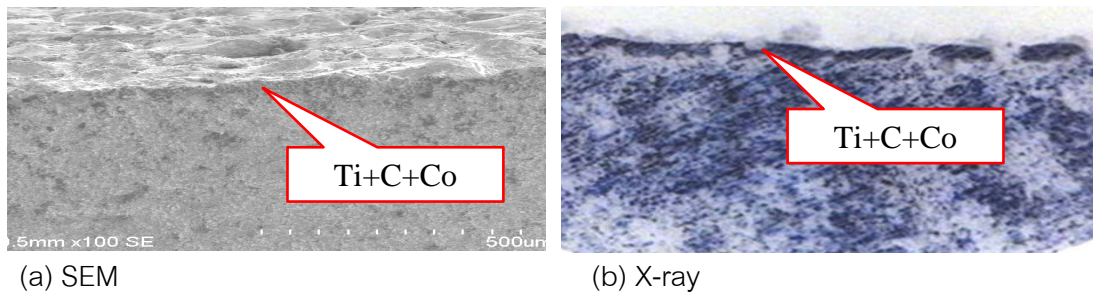


ภาพที่ 4.16

ความหนาของพื้นผิวชิ้นงานที่กระแสไฟฟ้าและปัจจัยประสิทธิภาพต่างกัน

4.2.5 ผลกระทบต่อความแข็งผิวชิ้นงาน

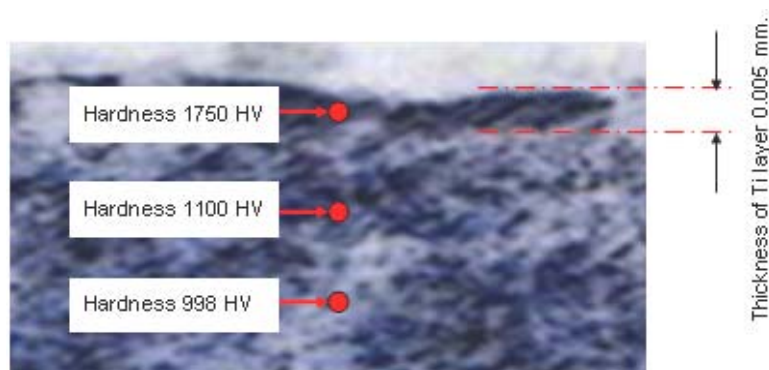
ภาพที่ 4.17 แสดงรูปถ่ายพื้นที่ภาคตัดขวางของชิ้นงานที่กระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์ ปัจจัยประสิทธิภาพ 50 เปอร์เซ็นต์ ได้ความหนาชั้นผิวเคลือบเท่ากับ 5 ไมครอนที่ความแข็ง 1750 HV ส่วนการวัดความหนาของชั้นผิวเคลือบที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 20, 40 และ 80 เปอร์เซ็นต์ ไม่สามารถวัดค่าความหนาของชั้นผิวเคลือบได้เนื่องจากความหนาผิวเคลือบน้อยมาก



ภาพที่ 4.17

ความหนาชั้นเคลือบของชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบต์โดยการกัดอาร์คด้วยกระแส 20 แอมแปร์, เวลาเปิด 510 ไมโครวินาที ปัจจัยประสิทธิภาพ 50 เปอร์เซ็นต์

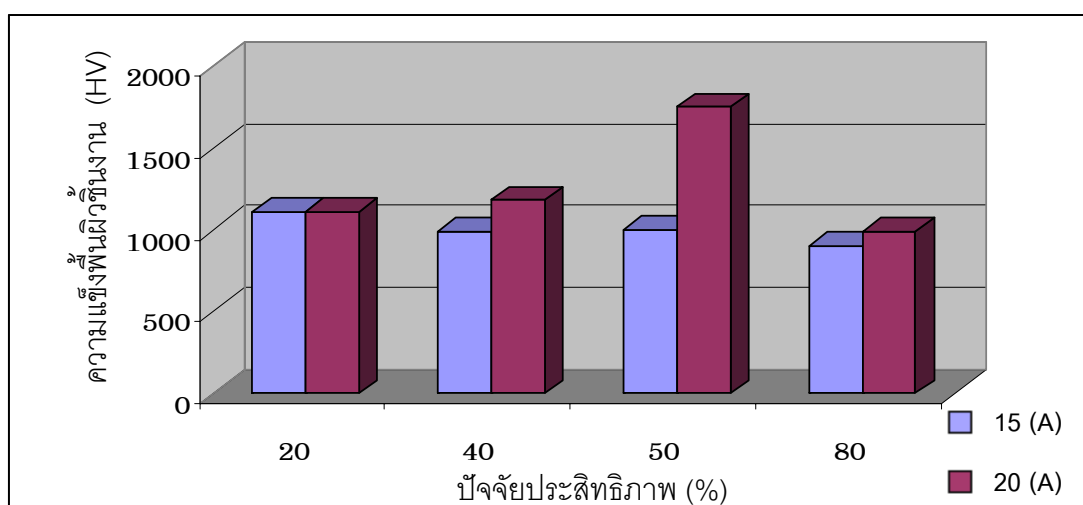
ภาพที่ 4.18 แสดงค่าความแข็งของผิวชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบไททาเนียม และความแข็งในแต่ละชั้นเนื้อวัสดุซึ่งทำการทดสอบโดยเครื่องทดสอบความแข็งโดยใช้แรงในการกด 50 กรัม/ตารางมิลลิเมตร ค่าความแข็งที่ผิวของชิ้นงานทั้งสแตนอยู่ที่ 998 HV ส่วนความแข็งที่ชั้นผิวเคลือบอยู่ที่ 1750 HV ค่าความแข็งที่ชั้นนี้มีค่าใกล้เคียงกับไททาเนียมคาร์ไบต์ ทั้งนี้เนื่องจากไททาเนียมที่ผสมอยู่ในของเหลวตัวกลาง จะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนในของเหลวตัวกลางระหว่างการกัดอาร์คได้เป็นไททาเนียมคาร์ไบต์ ส่วนค่าความแข็งได้ชั้นเคลือบจะมีค่าอยู่ที่ 1100 HV ซึ่งเกิดจากผลของความร้อนที่เกิดจากการสปาร์ค (Heat Affected Zone) (K.Furutani, 2009)



ภาพที่ 4.18

การวัดความแข็งบนภาพตัดขวางที่เกิดขึ้นของชั้นความหนาชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบต์ เมื่อ กัดอาร์คไฟฟ้าในน้ำมันแร่ โดยใช้กระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์, เวลาเปิด 510 ไมโครวินาที ปัจจัยประสิทธิภาพ 50 เปอร์เซ็นต์

ภาพที่ 4.19 แสดงความแข็งของพื้นผิวชิ้นงานเมื่อกระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์ ปัจจัยประสิทธิภาพ 50 เปอร์เซ็นต์ จากรูปพบว่าค่าความแข็งที่ กระแส 20 แอมแปร์ จะให้ค่าความแข็งสูงกว่าที่กระแส 15 แอมแปร์ ค่าความแข็งที่กระแส 20 แอมแปร์ ปัจจัยประสิทธิภาพ 50 เปอร์เซ็นต์ จะให้ความแข็งสูงที่สุดถึง 1750 HV ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับไททาเนียมคาร์ไบด์ ((1600-1900 HV) Katsushi Furutani, 2003)



ภาพที่ 4.19

ความแข็งของพื้นผิวชิ้นงานที่กระแสไฟฟ้าและปัจจัยประสิทธิภาพต่างกัน

4.3 อภิปรายถึงผลกระทบโดยรวมจากตัวแปรการทดลอง

ผลกระทบโดยรวมของปัจจัยประสิทธิภาพหัวข้อที่ 4.2.3 โดยปัจจัยประสิทธิภาพที่ 20 เปอร์เซ็นต์ภาพที่ 4.10 (a) จะให้ความยาวรวมของรอยแตกกว้างมากที่สุดและที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 50 เปอร์เซ็นต์ภาพที่ 4.10 (c) จะให้ความยาวรวมของรอยแตกกว้างบนพื้นผิวชิ้นงานมีค่าน้อยที่สุด แต่ความแข็งจะมากที่สุดที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 50 เปอร์เซ็นต์เท่ากับ 1750 HV ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับความแข็งของไททาเนียมคาร์ไบด์ 1900HV (K.Furutani, 2009) ทดลองเคลือบบนวัสดุ S50C โดยที่ความแข็งของทั้งสแตนคาร์ไบด์ 800-1000 HV และเมื่อเป็นชั้นผิวเคลือบ 1045 HV (Toshio Moro, 2004) ส่วนความหยาบผิวเฉลี่ยได้สรุปไว้ในหัวข้อ 4.2.5 และผลกระทบโดยรวมของกระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์ และปัจจัยประสิทธิภาพที่ต่างกันในการกัดอาร์คเคลือบผิวชิ้นงาน สรุปได้ว่าที่กระแสไฟฟ้าต่ำกว่า 20 แอมแปร์และปัจจัยประสิทธิภาพที่ต่ำกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ ไม่

ก่อให้เกิดชั้นผิวเคลือบบนพื้นผิวทั้งสองสแตนคาร์ไบด์ ซึ่งเมื่อกระแสไฟฟ้าต่ำนั้นจะสร้างความร้อนได้ต่ำประกอบกับเวลาเปิดและปิดที่เร็วหรือมีค่าน้อยเกินไป ที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 80 เปอร์เซ็นต์ดังภาพที่ 4.13 จะมีระดับความรุนแรงของรอยแตกร้าวบนพื้นผิวทั้งสองสแตนคาร์ไบด์จะมากที่สุดที่ความยาวรวมต่อพื้นที่ 12.777 ไมครอน / 0.05 ตารางมิลลิเมตร โดยที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 80 เปอร์เซ็นต์ จะให้ความหนาผิวเฉลี่ยบนผิวทั้งสองสแตนคาร์ไบด์มากที่สุด 21 ไมครอน ปริมาณของไททาเนียมที่เกิดขึ้นสรุปไว้ในหัวข้อที่ 4.2.3 ความแข็ง และ ความหนาชั้นผิวเคลือบสรุปในหัวข้อที่ 4.2.6 และ ตารางที่ 5.1 และ 5.2 ในบทสรุป

ผลที่ได้จากการทดลองจะมีความเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของวัสดุชิ้นงานอันได้แก่ จุดหลอมเหลว ค่าการเหนียวนำความร้อนที่เกิดขึ้นจากกระแสไฟฟ้าและ ปัจจัยประสิทธิภาพเป็นตัวกำหนดถึงผลกระทบต่างๆ ส่งผลต่อ ความหนาของชั้นผิวเคลือบ รอยแตกร้าวขนาดเล็ก ความหนาของผิวชิ้นงานและความแข็งของผิวชิ้นงานโดยที่ปัจจัยประสิทธิภาพไม่เกิน 50 เปอร์เซ็นต์นั้นจะสามารถเคลือบชิ้นงานและเกิดรอยแตกร้าวน้อยที่สุดในหัวข้อที่ 4.2.2 และ 4.2.3 ได้สรุปไว้ แต่ความหนาบนพื้นผิวชิ้นงานมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากกระแสไฟฟ้าและปัจจัยประสิทธิภาพที่เป็นตัวกำหนดดังในหัวข้อที่ 4.2.4 ได้สรุปไว้ ส่วนในเรื่องของความแข็งและความหนาของชั้นเคลือบนั้นต้องเป็นสัดส่วนไม่เกิน 50 เปอร์เซ็นต์ ของการกำหนดกระแสที่ 20 แอมแปร์ เวลาในการเปิดและปิด แต่นั่นต้องขึ้นอยู่กับวัสดุของชิ้นงานด้วยว่ามีคุณสมบัติอย่างไรดังสรุปไว้ในหัวข้อที่ 4.2.5 ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าในการกัดอาร์คเคลือบผิวชิ้นงานทั้งสองสแตนคาร์ไบด์นั้นเวลาที่ใช้เปิดจะมีค่ามากกว่า 510 ไมโครวินาที และเวลาปิดกระแส มากกว่า 510 ไมโครวินาที นั้นหมายถึงการอ้างอิงตัวแปรที่ใช้ในการเคลือบผิวชิ้นงานทั้งสองสแตนคาร์ไบด์ จะเริ่มจากเวลาเปิดและเวลาปิดที่ 510 ไมโครวินาที