

การศึกษาเปรียบเทียบการกัดโลหะด้วยไฟฟ้าโดยการใช้อิเล็กโตรดชนิด ทองแดง ทองเหลือง และกราไฟต์

A Comparative Study of Electrical Discharge Machining with Copper, Brass and Graphite Electrodes

อภิวัฒน์ มุตตามระ

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120

บทคัดย่อ

เครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า(EDM) เป็นเครื่องที่ใช้สำหรับการขจัดเนื้อวัสดุแข็งที่นำไฟฟ้า งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองด้วยอิเล็กโตรดสามชนิด ได้แก่ ทองแดง ทองเหลือง และกราไฟต์ โดยมีค่าตัวแปรที่สนใจคือ ขั้วของอิเล็กโตรด, ค่ากระแสไฟฟ้า, เวลาเปิด และค่าปัจจัยประสิทธิภาพ ปัจจัยเหล่านี้เป็นตัวกำหนดอัตราการขจัดเนื้องาน อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดและคุณภาพของผิวชิ้นงาน ผลการทดลองพบว่าค่าปัจจัยที่ให้อัตราการขจัดชิ้นงานมากที่สุดขึ้นอยู่กับชนิดของอิเล็กโตรด ประสิทธิภาพการกัดจะดีเมื่ออิเล็กโตรดทองแดงเป็นขั้วบวก ส่วนอิเล็กโตรดทองเหลืองและกราไฟต์จะให้ประสิทธิภาพดีกว่าเลือกเป็นขั้วลบ อิเล็กโตรดทองเหลืองให้อัตราการขจัดเนื้องานสูงที่สุดถึง 300 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อนาที ที่ค่าปัจจัยประสิทธิภาพ เท่ากับ 94 เปอร์เซ็นต์ ตามด้วยกราไฟต์ ที่ค่าปัจจัยประสิทธิภาพ เท่ากับ 6 เปอร์เซ็นต์ และทองแดงที่ค่าปัจจัยประสิทธิภาพ เท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ: เครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า อิเล็กโตรด ทองแดง ทองเหลือง กราไฟต์

Abstract

Electrical discharge machining (EDM) is a process for shaping hard conductive materials. The EDM was carried out with copper, brass and graphite electrodes varying the polarities, pulsed current, discharge duration and duty factor. The material removal rate (MRR), electrode wear ratio and surface quality are defined by these parameters. The results show that optimum EDM conditions depend on the electrode. Positive polarity is suitable for copper electrode, while brass and graphite electrode make more efficient employing negative polarity. Brass electrode gives maximum removal rate 300 mm³/ minute at 94% of duty factor follow by graphite electrode at duty factor of 6% and 50% of duty factor for copper electrode.

Keywords: Electrical Discharge Machine, electrode, copper, brass, graphite

1. บทนำ

การเลือกวัสดุมาใช้ในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนโลหะหรืออุตสาหกรรมแม่พิมพ์มักเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสูง ทำให้การขึ้นรูปวัสดุทางกลธรรมดาทำได้ยาก เนื่องจากวัสดุมีความแข็งใกล้เคียงกับมีดตัด [1] ดังนั้นกระบวนการขึ้นรูปแบบพิเศษ (Non-traditional Machining) จึงมีบทบาทสำคัญ ซึ่งโดยทั่วไปนั้นการขึ้นรูปแบบพิเศษต้องใช้เครื่องจักรที่มีราคาแพงและต้นทุนการผลิตค่อนข้างสูง [2] ปัจจุบันเครื่องจักรที่นิยมใช้อย่างมากในการขึ้นรูปวัสดุที่แข็งและนำไฟฟ้า คือ เครื่องกัดชิ้นส่วนด้วยไฟฟ้า (Electrical discharge machine, EDM)

หลักการของการตัดวัสดุของเครื่อง EDM นั้นคือการตัดวัสดุโดยใช้ความร้อน ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นจากการสปาร์กทางไฟฟ้าจะทำให้อนุภาควัสดุที่ถูกแยกออกมาซึ่งอาจจะอยู่ในรูปของแข็ง ของเหลว หรือ แก๊ส การตัดโดยเครื่อง EDM นี้ วัสดุเครื่องมือตัดซึ่งเรียกว่าอิเล็กโตรด จะไม่สัมผัสกับชิ้นงาน [3-4] ปัจจุบันวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้า เช่น เซรามิก ก็สามารถกัดด้วยเครื่อง EDM โดยใช้อิเล็กโตรดช่วยสปาร์ก [5-6] และเมื่อต้องการเจาะรูขนาดเล็กด้วยวิธี EDM บนโลหะหรือเซรามิกส์ อิเล็กโตรดทองแดงทั้งสแตนดีอ็อกไซด์เป็นวัสดุที่ให้อัตราการกัดชิ้นงานมากที่สุด [7] อิเล็กโตรดกราไฟต์สามารถลดความหนาแน่นของรอยแตกร้าวขนาดเล็กบนพื้นผิวของทั้งสแตนคาร์ไบด์ได้ [8] การศึกษาของ Shankar Singh และคณะได้ศึกษาผลเกี่ยวกับวัสดุอิเล็กโตรดต่ออัตราการกัดชิ้นงาน อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด ความหยาบของผิวงานและค่าเผื่อของรูเจาะ (Diametral Overcut) บนเหล็กกล้าเครื่องมือชนิด EN-31 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ากระแสที่เพิ่มขึ้นจะให้ค่าอัตราการกัดชิ้นงาน ค่าเผื่อในการเจาะ และความหยาบผิวที่

สูงขึ้น อิเล็กโตรดที่ให้อัตราการกัดชิ้นงานมากที่สุดคือ ทองแดง เนื่องจากอัตราการกัดชิ้นงานมากที่สุด การสึกหรอของอิเล็กโตรดต่ำ ค่าเผื่อในการเจาะน้อย และให้ค่าความหยาบของผิวงานน้อยที่สุด [9]

ในงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาปัจจัยของตัวแปรที่ให้อัตราการกัดชิ้นงานมากที่สุดของแต่ละอิเล็กโตรดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตโดยเปรียบเทียบอิเล็กโตรด ทองแดง ทองเหลือง และกราไฟต์ ค่าตัวแปรที่คำนึงถึง ได้แก่ กระแสไฟฟ้า เวลาเปิด เวลาปิด ส่วนผลการทดลองพิจารณาจาก อัตราการกัดชิ้นงาน และการสึกหรอของอิเล็กโตรด และค่าความหยาบบนชิ้นงาน

2. วิธีทดลอง

การทดลองถูกกระทำขึ้น โดยใช้เครื่อง EDM รุ่น Charmill Model 2-LC บนชิ้นงานเหล็กกล้าเกรด S45C โดยใช้อิเล็กโตรด 3 ชนิด ได้แก่ ทองแดง ทองเหลือง และกราไฟต์ มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร กัดลึกแต่ละหลุมที่ความลึก 3 มม. การทดลองแต่ละครั้งได้ทำซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง เพื่อแสดงผลการทดลองที่ได้ นำชื่อถือคุณสมบัติของอิเล็กโตรดได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 และ ค่าตัวแปรที่ใช้ในการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 1 คุณสมบัติอิเล็กโตรด

| | ความ เหนียว ความ ร้อน (W/m-K) | จุด หลอม เหลว (°C) | ความ เหนียว นำไฟฟ้า ($\Omega\text{-m}$) ⁻¹ |
|-----------|---|--------------------------|--|
| ทองแดง | 398 | 1,084 | 6.0×10^7 |
| ทองเหลือง | 120 | 600 | 1.6×10^7 |
| กราไฟต์ | 95 | 3,500 | 3×10^4 |

ตารางที่ 2 ค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการสปาร์คโลหะ

| ตัวแปร | ค่าที่ใช้ |
|---|--------------|
| ขั้วอิเล็กโทรด | + , - |
| กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์) | 5 - 80 |
| ความต่างศักย์เปิด (โวลต์) | 250 |
| เวลาเปิด (ไมโครวินาที) | 6, 100, 1600 |
| ปัจจัยประสิทธิภาพ* (Duty Factor, เปอร์เซนต์) | 6, 50, 94 |

หมายเหตุ

$$* \text{ ปัจจัยประสิทธิภาพ (เปอร์เซ็นต์) } = \frac{\text{เวลาเปิด} \times 100}{\text{เวลาเปิด} + \text{เวลาปิด}}$$

การทดลองได้เริ่มจากการหาค่าจากปัจจัยตัวแปรที่ให้อัตราการขจัดชิ้นงานมากที่สุดของแต่ละอิเล็กโทรด โดยพิจารณาร่วมกับอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด ซึ่งอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดจะพิจารณาจากค่าเปอร์เซ็นต์ความยาวของอิเล็กโทรดที่สึกหรอไปเทียบกับความยาวของอิเล็กโทรดก่อนการสปาร์ค ผลการทดลองจะแบ่งออกเป็น 3.1 ปัจจัยที่ให้อัตราการขจัดชิ้นงานมากที่สุดของทองแดง 3.2 ปัจจัยที่ให้อัตราการขจัดชิ้นงานมากที่สุดของทองเหลือง 3.3 ปัจจัยที่ให้อัตราการขจัดชิ้นงานมากที่สุดของกราไฟต์

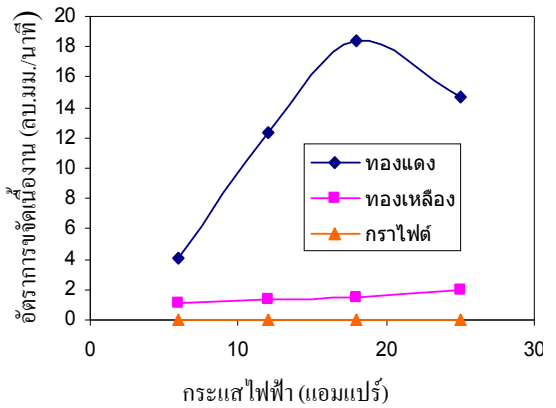
3. ผลการทดลองและวิจารณ์

3.1 ปัจจัยที่ให้อัตราการขจัดชิ้นงานมากที่สุดของทองแดง

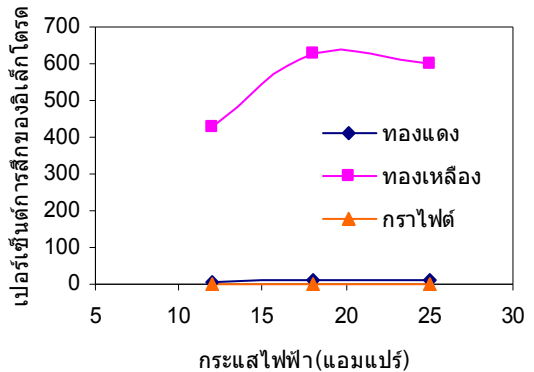
โดยทั่วไปนั้นกำหนดให้อิเล็กโทรดทองแดงเป็นขั้วบวกสำหรับการกัดชิ้นงานโลหะ กำหนด เวลาเปิด = 100 ไมโครวินาที และ ปัจจัยประสิทธิภาพ 50 เปอร์เซนต์ [3]

รูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง

กระแสไฟฟ้าและอัตราการขจัดเนื้องาน และรูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์การสึกหรอของอิเล็กโทรด



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับอัตราการขจัดเนื้องาน



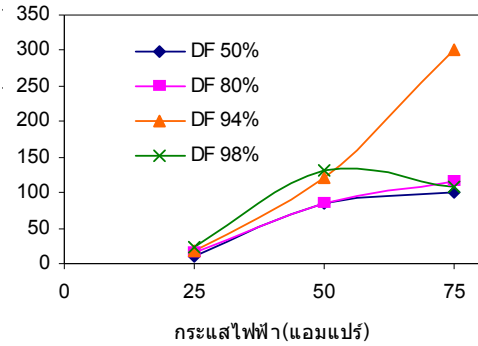
รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์การสึกหรอของอิเล็กโทรด

จากกราฟจะพบว่า อิเล็กโทรดชนิดทองแดงจะให้อัตราการขจัดเนื้องานสูงที่สุด อิเล็กโทรดชนิดทองเหลือง สามารถกัดชิ้นงานได้แต่ให้อัตราการขจัดเนื้องานที่ต่ำ ส่วนอิเล็กโทรดชนิดกราไฟต์ ไม่สามารถกัดชิ้นงานได้

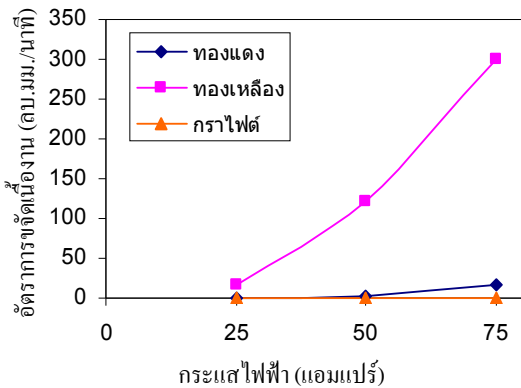
3.2 ปัจจัยที่ให้อัตราการขจัดชิ้นงานมากที่สุดของทองเหลือง

รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย

ประสิทธิภาพกับอัตราการชาร์จเนื่องงานเฉพาะทองเหลือง โดยเลือกอิลเลคโตรดที่ขั้วลบ เวลาเปิด 1600 ไมโครวินาที และ เวลาปิด 100 ไมโครวินาที



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยประสิทธิภาพกับอัตราการชาร์จเนื่องงาน

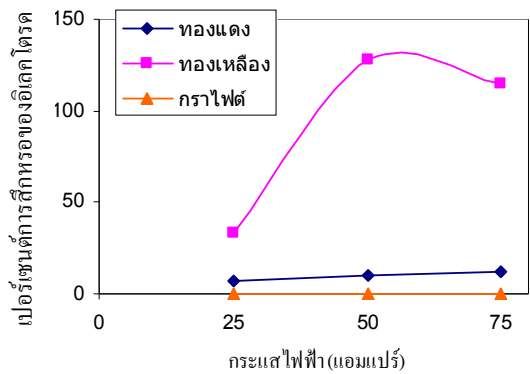


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับอัตราการชาร์จเนื่องงาน

ผลการทดลองพบว่าอัตราการชาร์จเนื่องงานที่มากที่สุดเมื่อใช้ปัจจัยประสิทธิภาพ 94 เปอร์เซ็นต์ที่กระแส 75 แอมแปร์ โดยค่าปัจจัยประสิทธิภาพที่ 98 เปอร์เซ็นต์นั้นเหมาะสำหรับกระแสที่ 50 แอมแปร์ แต่จะลดลงเมื่อกระแสเพิ่มขึ้น เหตุผลอาจเป็นเพราะค่าปัจจัยประสิทธิภาพที่มากจะทำให้ประสิทธิภาพในการกักตุนมากขึ้นไปด้วย แต่ทั้งนี้ในกระบวนการสปาร์คต้องเกิดอย่างสมบูรณ์ (Normal discharge) ไม่เกิดการช็อต (Short) หรือสปาร์คเฉพาะจุด

(Concentrate discharge) [4,10] รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและอัตราการชาร์จเนื่องงานที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 94 เปอร์เซ็นต์ ผลการทดลองพบว่าทองเหลืองให้อัตราการชาร์จเนื่องงานสูงที่สุดตามด้วยทองแดง ส่วนกราไฟต์ไม่สามารถสปาร์คได้ในค่าตัวแปรนี้ อัตราการชาร์จเนื่องงานมีค่ามากขึ้นตามค่ากระแสไฟฟ้า

รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์การสึกหรอของอิลเลคโตรด

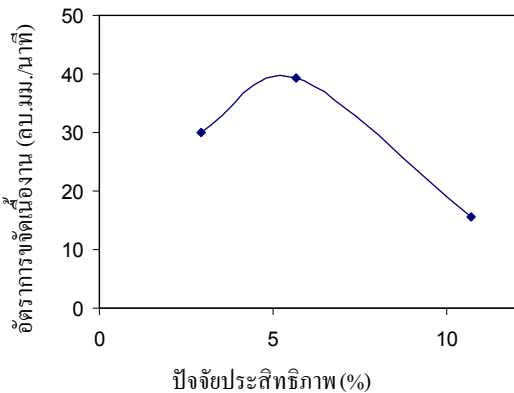


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์การสึกหรอของอิลเลคโตรด

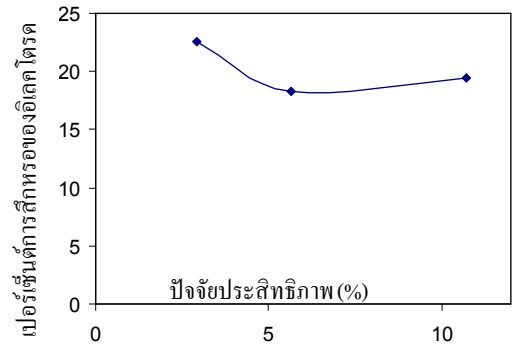
จากกราฟพบว่าการสึกหรอของทองเหลืองจะมีค่ามากกว่าทองแดงและ กราไฟต์หลายเท่า เนื่องจากทองเหลืองมีจุดหลอมเหลวต่ำที่สุด เปอร์เซ็นต์การสึกหรอของทองเหลืองมีค่ามากที่สุดที่กระแสไฟฟ้า 50 แอมแปร์ และมีค่าลดลงที่ 75 แอมแปร์ จากผลในรูปที่ 5 การสึกหรอของอิลเลคโตรดมีค่ามากทำให้ช่องประกายไฟระหว่างการสปาร์คมีค่ามาก [7] กระบวนการสปาร์คจึงเกิดได้อย่างสมบูรณ์ตามผลในรูปที่ 4 แม้ว่าใช้ค่าปัจจัยประสิทธิภาพที่ 94 เปอร์เซ็นต์

3.3 ปัจจัยที่ให้อัตราการขจัดชิ้นงานมากที่สุดของกราฟต์

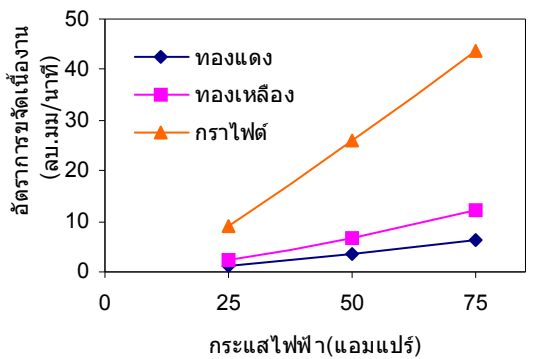
การทดลองเริ่มจากการหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยประสิทธิภาพกับอัตราการขจัดชิ้นงานและการสึกหรอของอิเล็กโตรดโดยเลือกขั้วอิเล็กโตรดเป็นขั้วลบ เวลาเปิด 6 ไมโครวินาที เวลาปิด 100 ไมโครวินาที รูปที่ 6 และรูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยประสิทธิภาพกับอัตราการขจัดชิ้นงานและเปอร์เซ็นต์การสึกหรอของอิเล็กโตรดตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 6 เปอร์เซ็นต์ให้อัตราการขจัดชิ้นงานสูงที่สุดและในขณะที่เดียวกันก็ให้อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดต่ำที่สุด เหตุผลสามารถอธิบายได้ว่ากราฟต์มีจุดหลอมเหลวสูงที่สุดเมื่อเทียบกับอิเล็กโตรดทั้งสามชนิด แต่มีค่าการนำไฟฟ้าและความร้อนต่ำที่สุด จึงไม่เหมาะกับการสปาร์คที่ปัจจัยประสิทธิภาพสูง (เวลาปิดน้อย) เพราะจะทำให้กราฟต์ไม่สามารถคายความร้อนได้ทัน รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและอัตราการขจัดชิ้นงาน



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยประสิทธิภาพและอัตราการขจัดชิ้นงาน



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยประสิทธิภาพและเปอร์เซ็นต์การสึกหรอของอิเล็กโตรด

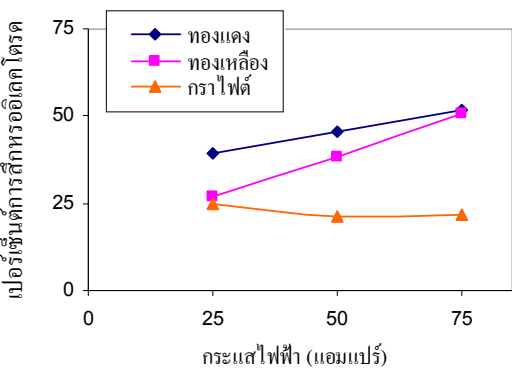


รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับอัตราการขจัดชิ้นงาน

ผลการทดลองแสดงว่าอัตราการขจัดชิ้นงานเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสเพิ่มขึ้น รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์การสึกหรอของอิเล็กโตรด การสึกหรอของกราฟต์จะน้อยที่สุดและมีค่าน้อยลงเมื่อกระแสเพิ่มขึ้น ส่วนทองแดงจะให้ค่าการสึกหรอมากที่สุด เนื่องจากจุดหลอมเหลวของทองเหลืองมีค่าน้อยที่สุด

ส่วนอิเล็กโตรดกราฟต์นั้นเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าอัตราการสึกหรอของกราฟต์กลับมีค่าไม่แตกต่างกันนักและยังมีแนวโน้มที่ลดลง เนื่องจากจุดหลอมของกราฟต์มีค่าสูง แต่การสึกหรอของกราฟต์ประกอบด้วย การหลอมและการหลุดร่วงของผง

กราไฟต์ระหว่างสปาร์ค เมื่อกราไฟต์สปาร์คด้วยกระแส 50 แอมแปร์ การร่วของผงกราไฟต์ระหว่างสปาร์คเกิดขึ้นได้น้อยกว่าการใช้กระแส 25 แอมแปร์ การร่วของผงกราไฟต์มีส่วนสำคัญในการเกิดการช็อต ทำให้เกิดการสปาร์คได้ไม่สมบูรณ์ [11] กราไฟต์ให้อัตราการกัดชิ้นงานสูงกว่าทองแดง และทองเหลืองเมื่อใช้กระแสไฟที่สูง และเปอร์เซ็นต์การสึกหรอของอิเล็กโทรดต่ำ แต่ไม่เหมาะกับการกัดชิ้นงานที่พื้นที่หน้าตัดน้อยและลึก ซึ่งถ้าระบบน้ำได้เศษผงกราไฟต์ออกไม่ดียะจะทำให้เกิดการช็อตและกัดชิ้นงานไม่ลง

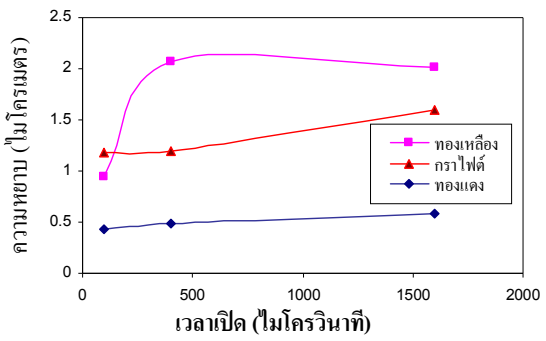


รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์การสึกหรออิเล็กโทรด

3.4 ค่าความหยาบของผิวชิ้นงาน (Surface Roughness)

ค่าความหยาบของผิวงานได้ทำการวัดโดยใช้ กระแสไฟ 6 แอมแปร์ เวลาเปิด 100, 400, 1600 ไมโครวินาที และปัจจัยประสิทธิภาพ 50 เปอร์เซ็นต์ ผลของค่าความหยาบได้แสดงในรูปที่ 10 อิเล็กโทรดทองเหลืองจะให้ค่าความหยาบของผิวชิ้นงานสูงสุดในระดับที่เวลาเปิดตั้งแต่ 400 ไมโครวินาที ตามด้วยอิเล็กโทรดชนิดกราไฟต์และผิวงานที่เรียบที่สุดในค่าปัจจัยนี้คือทองแดง แต่ที่น่าสังเกตว่า ณ เวลาเปิดที่ 100 ไมโครวินาที กราไฟต์จะให้ค่าความหยาบของผิว

งานมากที่สุด แต่อย่างไรก็ตามความหยาบของผิวงานมีลักษณะเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเพิ่มเวลาเปิด



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างความหยาบกับชนิดอิเล็กโทรด

4. สรุป

ผลการทดลองพบว่าค่าปัจจัยที่มีผลกระทบกับอัตราการกัดชิ้นงานและอัตราการสึกหรอให้ขึ้นอยู่กับชนิดของอิเล็กโทรด

1. ทองแดงให้อัตราการกัดมากที่สุดเมื่ออิเล็กโทรดเป็นขั้วบวก ส่วนอิเล็กโทรดทองเหลืองและกราไฟต์จะให้ดีกว่าเมื่อเป็นขั้วลบ
2. อิเล็กโทรดทองเหลืองให้อัตราการกัดเนื้องานสูงที่สุดถึง 300 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อนาที ที่กระแสไฟฟ้า 75 แอมแปร์ เวลาเปิด 1600 ไมโครวินาที และ เวลาเปิด 100 ไมโครวินาที
3. กราไฟต์จะให้อัตราการกัดดีที่สุดที่ค่าปัจจัยประสิทธิภาพ เท่ากับ 6 เปอร์เซ็นต์ กระแสไฟฟ้า 75 แอมแปร์ เวลาเปิด 6 ไมโครวินาที
4. ทองเหลืองให้ผิวงานหยาบมากที่สุดที่เวลาเปิดตั้งแต่ 400 ไมโครวินาที ส่วนทองแดงให้ผิวงานที่เรียบที่สุดทุกค่าปัจจัยตัวแปร

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] สถาบันไทย-เยอรมัน, รายงานฉบับสมบูรณ์ เรื่องโครงการศึกษา การนำเทคโนโลยีที่ทันสมัย มาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตสาขาแม่พิมพ์ (การผลิตแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก), กรุงเทพฯ: สถาบันไทย-เยอรมัน (TGI), 2547.
- [2] Hassan El-Hofy, Advanced Machining Processes, McGraw-Hill, USA., pp.115-139. 2005.
- [3] K.H. Ho, S.T. Newman, State of the Art Electrical Discharge Machine (EDM), International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 43, pp.1287-1300, 2003.
- [4] http://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_discharge_machining
- [5] Y. Fukuzawa, N. Mohri and T. Tani, International Journal of Electrical Machining (IJEM), Vol. 2, pp. 25-30, 1997.
- [6] อภิวัฒน์ มุตตามระ และ คณะ, ผลกระทบของ ค่าความเหนียวที่ต้านทานการแตกหักของแซฟไฟร์ต่อสมบัติ EDM, วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 29 ฉบับที่ 1, หน้า 109-116.
- [7] A. Muttamara, Y. Fukuzawa, N. Mohri and T. Tani, Probability of Precision Micro-machining of Insulating Si₃N₄ Ceramics by EDM, Journal of Materials Processing Technology, Volume 140, Issues 1-3, 2003, pp. 243-247.
- [8] อนุรักษ์ ชื้อตระกูล, อภิวัฒน์ มุตตามระ, ผลกระทบของวัสดุอิเล็กโทรดและปัจจัยค่าตัวแปรต่อทั้งสแตนคาร์ไบด์ด้วยเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า, งานประชุมวิชาการ สวทช.2550, หน้า 88
- [9] S. Singh, S. Maheshwari, P.C.Pandy, Some Investigations into the Electrical Discharge Machining of Hardened Tool Steel using Different Electrode Materials, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 149, pp. 272-277, 2004.
- [10] A. Goto, T. Yuzawa, T. Magara, and K. Kobayashi, Study on Deterioration of Machining Performance by EDMed Sludge and Its Prevention, IJEM, Vol. 3, pp.1-6, 1998.
- [11] K. Furutania, A. Saneto, H. Takezawa, N. Mohri and H. Miyake, Accretion of Titanium Carbide by Electrical Discharge Machining with Powder Suspended in Working Fluid, Precision Engineering, Vol. 25, pp. 138-144, 2001.