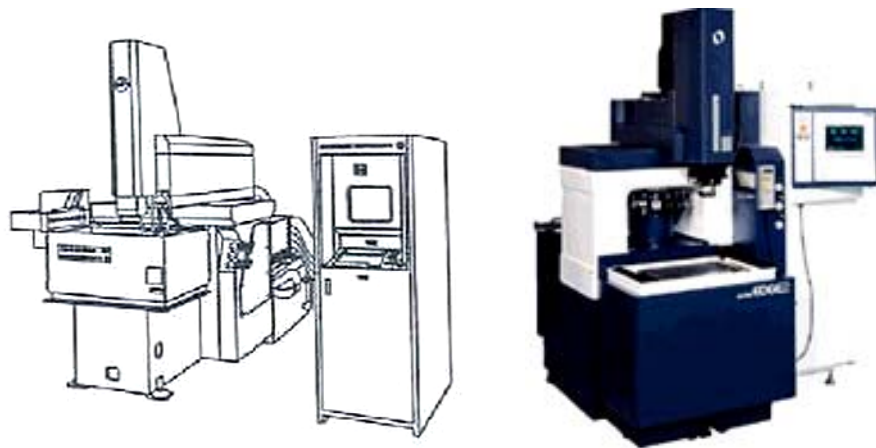


บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และวรรณกรรมปริทัศน์

2.1 เครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า (Electrical discharge machine, EDM)

เครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า (Electrical discharge machine, EDM) เป็นเครื่องจักรที่สำคัญในงานผลิตขั้นสูง (Non-traditional manufacturing) ได้พัฒนาขึ้นในช่วงหลังสงครามโลกครั้งที่ 2 และต่อมาก็ได้รับการยอมรับในเรื่องมาตรฐานการผลิต อีกทั้งยังมีการพัฒนาการในเรื่องของเทคโนโลยีในปัจจุบัน ที่ช่วยให้สมบัติของเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า มีประสิทธิภาพ และการผลิตทำได้สะดวก รวดเร็ว ยิ่งขึ้น [S.Singh;2004, สถาบันไทย-เยอรมัน;2004]



ภาพที่ 2.1 เครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า

(ที่มา : เอกสารอ้างอิง [สถาบันไทย-เยอรมัน;2004])

เครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า ใช้ในงานผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน ที่ทำด้วยวิธีการตัดเฉือนทั่วไปได้ยาก สามารถตัดเฉือนชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งมาแล้ว หรือชิ้นงานที่ยากต่อการแปรรูป รวมไปถึงการผลิตแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก, ผลิตแม่พิมพ์หล่อโลหะ และอื่นๆอีกมาก ที่สำคัญเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า ยังสามารถใช้ขัดผิวชิ้นงาน (Surface finishing) ในขั้นสุดท้ายได้อีกด้วย [Singh, Shankar;2004, El-Hofy, Hassan;2005]

หลักการของการตัดวัสดุของเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า นั้นใช้หลักการตัดวัสดุโดยใช้ความร้อน ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นได้เกิดจากการสปาร์คทางไฟฟ้าจะทำให้อนุภาควัสดุที่ถูกแยกออกมาซึ่งอาจจะอยู่ในรูปของแข็ง ของเหลว หรือ แก๊ส การตัดโดยเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า นี้ วัสดุเครื่องมือตัดซึ่งเรียกว่าอิเล็กโตรด จะไม่สัมผัสกับชิ้นงาน [Ho, K.H.;2003, Mukherjee, Indrajit;2006] ที่สำคัญเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า ยังสามารถใช้ตัดผิวชิ้นงาน ในขั้นสุดท้ายได้อีกด้วย [Qu, Jun;2005] ปัจจุบันวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้า เช่น เซรามิกซ์ สามารถกัดด้วยเครื่อง EDM โดยใช้อิเล็กโตรดช่วยสปาร์ค [Fukuzawa, Yakuzawa;1997, อภิวัฒน์ มุตตามระ;2549] ในการเจาะรูขนาดเล็กด้วยวิธี EDM อิเล็กโตรดทองแดงทั้งสแตนดีอว่าเป็นวัสดุที่เหมาะสมที่สุด [Muttamara, Apiwat;2003]

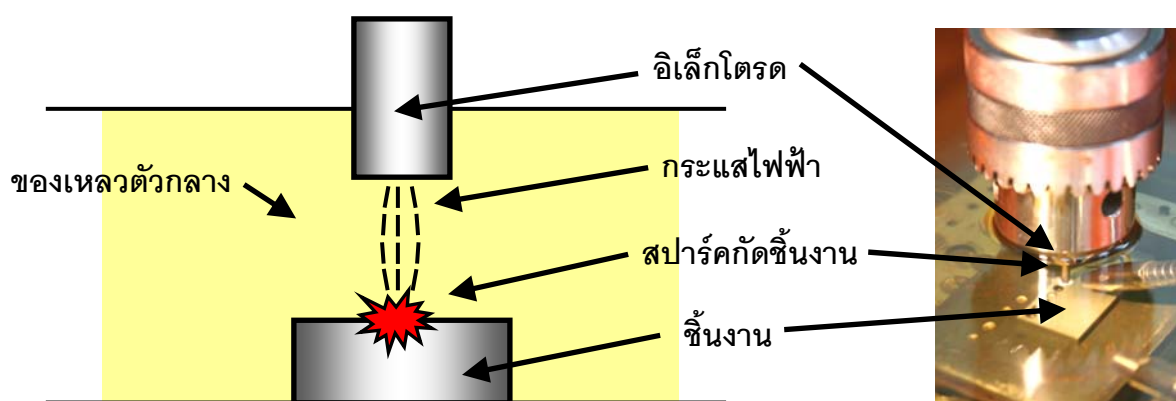
2.1.1 ความจำเป็นของการแปรรูปด้วยเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า

1. สามารถขึ้นรูปวัสดุที่ยากต่อการตัด เช่น โลหะที่ผ่านการชุบแข็ง, โลหะซีเมนต์คาร์ไบด์ หรือโลหะพิเศษ เป็นต้น โลหะเหล่านี้แม้จะมีความแข็งเท่าไร แต่ถ้าเป็นสื่อไฟฟ้าแล้ว จึงสามารถนำมาแปรรูปด้วยเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้าได้
2. สามารถขึ้นรูปทรงที่มีความซับซ้อนได้ โดยการพัฒนา ระบบ CNC (Computer numerical control) ทำให้สามารถขึ้นรูปทรงระบบ 3 มิติได้ โดยเฉพาะ ชิ้นงานที่มีความแข็งและมีรูปร่างซับซ้อนด้วยแล้ว ไม่สามารถใช้เครื่องจักรธรรมดาได้แน่นอน
3. สามารถขึ้นรูปทรงที่ไม่สามารถตัดขึ้นรูป ด้วยวิธีอื่นได้ เช่น การขึ้นรูปมุมเหลี่ยมที่ไม่ต้องการให้เกิดมุมโค้ง ในเครื่องกัดโลหะนั้น ทำไม่ได้ แต่เครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้าสามารถทำได้
4. ลดกระบวนการผลิตได้ ซึ่งการลดกระบวนการผลิตเป็นตัวแปรสำคัญ ที่จะนำไปสู่การลดต้นทุนได้ ระบบ CNC ในเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้หลากหลาย, การควบคุมกระแสไฟฟ้า และการควบคุมแกนพิกัดการขึ้นรูปได้ สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้อย่างถูกต้องแน่นอน ลดกระบวนการผลิตของชิ้นงานที่มีความซับซ้อนลงได้

2.1.2 กระบวนการกัดโลหะด้วยไฟฟ้า เป็นดังนี้

1. อิเล็กโตรดเข้าใกล้ชิ้นงาน ขั้วไฟฟ้าประจุบวกและประจุลบจะเกิดการถ่ายเทพลังงาน
2. เกิดการรวมกันของสนามไฟฟ้าที่บริเวณพื้นที่ว่างระหว่างอิเล็กโตรดและชิ้นงาน

3. เกิดการถ่ายเทประจุ ที่บริเวณพื้นที่ว่างระหว่างอิเล็กโทรดและชิ้นงาน
4. เมื่อความต่างศักย์ระหว่างอิเล็กโทรดและชิ้นงานสูงขึ้น เกิดการปลดปล่อยพลังงาน ทำให้เกิดการสปาร์ค และความร้อน เกิดการแปรรูปชิ้นงาน
5. หยุดการสปาร์ค เพื่อคืนสภาพของการแปรรูปให้เข้าสู่สภาวะปกติ เหมือนกับก่อนเริ่มการสปาร์คชิ้นงาน
6. หลังจากการหยุดสปาร์ค เศษชิ้นงานถูกขจัดออกไปโดยแรงฉีดของน้ำมัน หรือของเหลวตัวกลาง (Dielectric fluid)



ภาพที่ 2.2 หลักการทำงานเบื้องต้นของเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า

2.2 กระแสไฟฟ้า (Discharge current, I_d) และ ความต่างศักย์วงจรเปิด (Open-circuit voltage, V_o)

ความต่างศักย์วงจรเปิดที่ต่างกันระหว่างอิเล็กโทรดและชิ้นงาน ทำให้เกิดการถ่ายเทประจุและการไหลของกระแสไฟฟ้า โดยในขณะสปาร์คบริเวณของส่วนที่เกิดการสปาร์คนี้ มีกระแสไฟฟ้าที่ความหนาแน่นสูงมากไหลในช่วงเวลาสั้นๆ โดยกระแสไฟฟ้าอาจกำหนดได้ ตั้งแต่ 0.1 แอมแปร์ ถึงหลายร้อยแอมแปร์ พลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมาในช่วงนี้ ทำให้บริเวณที่สปาร์คมีอุณหภูมิสูงมาก

2.3 เวลาเปิด (On time, T-on) และ เวลาปิด (Off time, T-off)

เวลาเปิด คือช่วงเวลาที่ เกิดการถ่ายเทประจุ หรือเวลาการปล่อยกระแส โดยเมื่อความต่างศักย์ระหว่างอิเล็กโทรดและชิ้นงานสูงขึ้น เกิดการปลดปล่อยพลังงาน และการสปาร์คที่ผิวของชิ้นงาน

เวลาปิด คือช่วงเวลาที่หยุดการสปาร์ค หรือช่วงเวลาที่ไม่มีกระแสไหลจากอิเล็กโทรดไปที่ชิ้นงาน ของเหลวตัวกลางสามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมก่อนแตกตัวได้

ซึ่งเมื่อค่าของช่วงเวลากการสปาร์คเปลี่ยนไป มีผลทำให้ค่าปัจจัยประสิทธิภาพ (Duty factor, τ) เปลี่ยนไปด้วย ตามสมการที่ (1) ดังนี้

$$\text{ปัจจัยประสิทธิภาพ} = \frac{\text{เวลาเปิด}}{\text{เวลาเปิด} + \text{เวลาปิด}} \times 100 \% \quad \dots\dots\dots (1)$$

2.4 ของเหลวตัวกลาง (Dielectric fluid)

2.4.1 หน้าที่ของของเหลวตัวกลาง

ของเหลวตัวกลาง ที่ใช้กับเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้าทั่วไปๆ ควรมีหน้าที่ ดังนี้

1. เป็นฉนวนไฟฟ้า (Insulator) โดยมีตัวกั้นช่องว่างของการสปาร์คระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงาน
2. เป็นสารหล่อเย็น (Coolant) โดยเป็นตัวทำให้อุณหภูมิของโลหะ (เศษผงที่เกิดจากการขึ้นรูป) เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว
3. เป็นสารไหลเวียน (Flushing) โดยทำหน้าที่พัดพาเอาอนุภาคที่อยู่ในช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงาน เพื่อให้การสปาร์คเกิดในสภาพที่สมบูรณ์

2.4.2 ชนิดของของเหลวตัวกลาง

ของเหลวตัวกลาง ที่จะใช้กับเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้าโดยทั่วไป มีดังนี้

1. น้ำมันแร่ และ น้ำมันซิลิโคน
2. น้ำกลั่น
3. สารละลาย โซเดียมซิลิเกต

4. ดีโรซีน
5. กรีเซอริน

ของเหลวตัวกลางที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ เป็นน้ำมันแร่ของ บริษัท เชลล์แห่งประเทศไทย จำกัด เป็นน้ำมันเกรด Shell EDM Fluid 2A

ในขณะที่ทำการแปรรูปชิ้นงาน สารที่อยู่ในของเหลวตัวกลางบางส่วน จะกลายสภาพเป็น ไฮโดรเจนซึ่งมีประจุเป็นบวก และคาร์บอนซึ่งมีประจุเป็นลบ โดยคาร์บอนนี้จะวิ่งเข้าจับกับขั้วบวก ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับว่าใช้อิเล็กโตรดเป็นขั้วบวก หรือลบ ถ้าอิเล็กโตรดเป็นขั้วบวกแล้ว คาร์บอนที่วิ่งเข้าจับอิเล็กโตรด จะช่วยลดอัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโตรดได้ แต่ถ้าใช้อิเล็กโตรดเป็นขั้วลบ คาร์บอนจะวิ่งเข้าจับที่ผิวชิ้นงานแทน ทำให้ผิวชิ้นงานที่ได้มีสภาพที่มีสีดำคล้ำ

โดยทั่วไปแล้ว ค่าความต้านทานของน้ำมันสูงกว่าน้ำ ดังนั้นเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้าทั่วไปจึงมักใช้น้ำมันเป็นของเหลวตัวกลาง ของเหลวตัวกลางที่เป็นน้ำมัน มีค่าความต้านทานสูง ทำให้การถ่ายเทประจุระหว่างอิเล็กโตรดกับชิ้นงานทำได้ยากขึ้น ดังนั้นจึงต้องจัดวางอิเล็กโตรดให้เข้าใกล้กับชิ้นงานมากขึ้น ทำให้สามารถย่นระยะห่างระหว่างการสปาร์คลงได้ เป็นผลดีสำหรับชิ้นงานขึ้นรูปละเอียด และชิ้นงานที่ต้องการผิวละเอียด แต่ทำให้อัตราการขจัดเนื้องานต่ำลง

ในทางกลับกัน ถ้าของเหลวตัวกลางเป็นน้ำ ซึ่งค่าความต้านทานต่ำกว่าน้ำมัน การถ่ายเทประจุระหว่างอิเล็กโตรดกับชิ้นงานทำได้ง่าย ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดกับชิ้นงานจึงมากขึ้นเมื่อเทียบกับน้ำมัน มีผลดีคือ อัตราการขจัดเนื้องานสูงขึ้น เหมาะกับชิ้นงานที่ไม่ต้องการความประณีต แต่ความเรียบผิวที่ได้จะน้อยกว่า การใช้ของเหลวตัวกลางเป็นน้ำมัน

2.5 ทากูชิ (Taguchi)

ทากูชิ มีต้นกำเนิดมาจากความพยายามในการปรับปรุงคุณภาพแนวใหม่ ที่มาจากการออกแบบระบบที่ดี มากกว่าการสุ่มตรวจทั่วไป ในขณะที่มีเงื่อนไขหรือทรัพยากรที่จำกัด ถูกคิดค้นขึ้นมาในช่วงหลังสงครามโลกครั้งที่ 2 เสนอโดยวิศวกรชาวญี่ปุ่นชื่อ ดร.เกนอิชิ ทากูชิ (Genichi Taguchi) ซึ่งมีบทบาทอย่างมากในวงการอุตสาหกรรมประเทศญี่ปุ่น

ดร.ทากูชิ ได้ให้ความเห็นไว้ว่า ค่าเสียหาย (Loss) เกิดขึ้นได้ในกรณีที่เกิดผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการ มีสมบัติหรือลักษณะผิดแผกไปจากค่าเป้าหมาย ดังนั้นกฎเกณฑ์สำคัญของการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ หรือกระบวนการคือ การทำให้ความเสียหายมีค่าน้อยที่สุด

รากฐานของวิธีทาгуชิ เกิดขึ้นมาจากเหตุผลสำคัญ 2 ประการ คือ

1. สังคมจะเกิดความสูญเสียทุกครั้งที่คุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ไม่ตรงตามเป้าหมาย ดังนั้น ดร. ทาгуชิ จึงให้เหตุผลว่าการเบี่ยงเบนออกไปจากเป้าหมายเป็นผลให้เกิดความสูญเสีย ทาгуชิ จึงได้ให้คำจำกัดความคุณภาพใหม่ ว่าเป็นความสูญเสียที่ผลิตภัณฑ์สร้างขึ้นแก่สังคม
2. ในการออกแบบผลิตภัณฑ์ และกระบวนการผลิต ต้องการระบบที่พัฒนา มีความก้าวหน้า ในทุกขั้นตอน ตั้งแต่การออกแบบระบบ (System design), การกำหนดค่าพารามิเตอร์ (Parametric design) และการออกแบบค่าเผื่อ (Tolerance design) ซึ่งวิธีการทาгуชิ เป็นวิธีการออกแบบการทดลองที่มีประสิทธิภาพ ครอบคลุมในเรื่องต่างๆ ดังที่กล่าวมา

กรณีตัวอย่างของการเกิด ความสูญเสียทางสังคม ได้แก่ การที่ผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการ มีสมบัติไม่ตรงกับความต้องการของผู้บริโภค, การเสื่อมสภาพของตัวผลิตภัณฑ์เอง ในระหว่างการขนส่ง และการทำงานของผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการไม่เป็นไปตามที่มุ่งหวัง

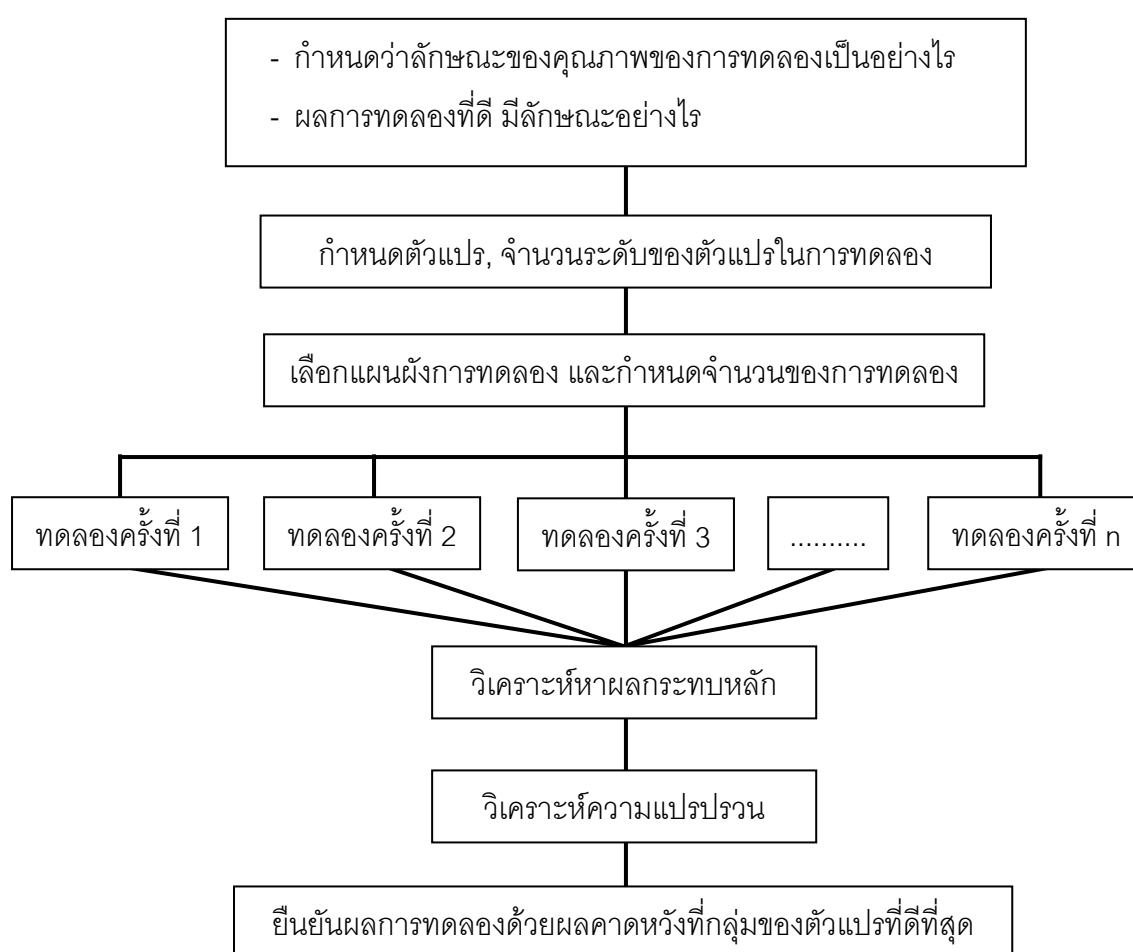
ทาгуชิเป็นเครื่องมือคุณภาพที่ช่วยในการปรับปรุงงานได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยการช่วยเลือกพารามิเตอร์อย่างเหมาะสม เพื่อให้เกิดความคงทน (Robust) ของผลิตภัณฑ์และกระบวนการ เทคนิคดังกล่าวเป็นที่นิยมในหมู่ของวิศวกรที่มีหน้าที่ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์และกระบวนการใหม่ให้มีระดับคุณภาพที่เหนือคู่แข่ง

ทาгуชิมีกระบวนการที่เรียบง่าย, มีประสิทธิภาพ และมีวิธีคิดที่เป็นระบบ โดยช่วยในการหาตัวแปร และระดับของตัวแปร ที่เหมาะสมต่อระบบ, กระบวนการ หรือการทดลอง โดยทาгуชิ ได้ออกแบบ แผนผังการทดลอง (Orthogonal array) ไว้เป็นมาตรฐานสำหรับวิธีการของทาгуชิ โดยเฉพาะ เพื่อลดจำนวนครั้งของการทดสอบลงให้เหมาะสมกับกระบวนการ, จำนวนของตัวแปร และปัจจัยต่างๆ

ขั้นตอนการทดลองของทาгуชิ มีขั้นตอนที่แน่นอน เริ่มจากการกำหนดว่าลักษณะของคุณภาพของการทดลองเป็นอย่างไร หรือผลการทดลองที่ดี มีลักษณะอย่างไร และจะส่งผลถึงการกำหนดตัวแปร, จำนวนระดับของตัวแปรในการทดลอง, งบประมาณ และข้อจำกัดอื่นๆ ด้วย บางที่อาจเรียกขั้นตอนนี้ว่า “ขั้นการระดมความคิด” ต่อจากนั้น จึงกำหนดแผนผังการทดลอง โดยจะทดลองตามแผนผังแบบไหนขึ้นอยู่กับข้อจำกัดจากขั้นตอนที่ผ่านมา ซึ่งระบุไว้ในตารางมาตรฐานของทาгуชิ และในแต่ละแผนผังจะมีจำนวนกลุ่มของตัวแปรแตกต่างกันไป

เมื่อได้ผลการทดลอง จึงหากลุ่มของตัวแปร ที่มีอิทธิพลต่อค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของผลการทดลอง พิจารณาตัวแปรในแต่ละกลุ่ม ที่ให้ค่าของผลการทดลองสูงสุด ซึ่งเรียกว่าผลกระทบหลัก (Main effect) บางครั้งอาจใช้ค่าสถิติที่เรียกว่า อัตราส่วนสัญญาณไปยังสิ่งรบกวน (Signal-to-noise ratio, S/N Ratio) เป็นตัววัดได้ กลุ่มตัวแปรไหนให้ค่าผลการทดลองสูงสุด กลุ่มของตัวแปรนั้นคือกลุ่มที่ดีที่สุด (Optimum condition) ที่หมายถึงตัวแปรต่างๆ ในกลุ่มนี้สามารถเพิ่มค่าผลการทดลอง หรือคุณภาพของผลการทดลองของเราได้

ต่อมาจึงวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อทดสอบว่าตัวแปรแต่ละตัวให้ผลที่แตกต่างกันหรือไม่ จากนั้นจึงคำนวณหาผลคาดหวัง (Estimated result) ที่กลุ่มของตัวแปรที่ดีที่สุด หรือเงื่อนไขความสัมพันธ์ที่ดีที่สุด เพื่อทำการยืนยันผลการทดลอง ในขั้นตอนสุดท้ายต่อไปตามภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 ขั้นตอนการทดลองด้วยวิธีทางสถิติ

2.6 วัสดุอิเล็กโทรด (Electrode material)

การขึ้นรูปประเภทตัด จะใช้เครื่องมือ เช่น Cutting tool, End mill สำหรับตัดขึ้นรูปชิ้นงานส่วนการขึ้นรูปด้วยวิธีการสปาร์คเอง จำเป็นต้องมีเครื่องมือขึ้นรูปด้วยเช่นกัน ซึ่งเรียกเครื่องมือนี้ว่า “อิเล็กโทรด”

ตามทฤษฎีแล้ววัสดุที่นำไฟฟ้าได้ดีทุกชนิด สามารถนำมาเป็นอิเล็กโทรดได้ วัสดุที่ดีในการใช้เป็นอิเล็กโทรด ควรจะมีจุดหลอมเหลวสูง และความต้านทานไฟฟ้าต่ำ การทำงานด้วยเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้านั้น ค่าใช้จ่ายส่วนใหญ่มักจะตกอยู่กับอิเล็กโทรด การเลือกใช้อิเล็กโทรดอย่างเหมาะสม จะเป็นผลดีและคุ้มค่ากับการใช้งานเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้าอีกด้วย

การแปรรูปด้วยเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า อิเล็กโทรดจะมีรูปทรงเหมือนกับผลิตภัณฑ์และชิ้นงานในการขึ้นรูป แต่จะมีรูปทรงตรงกันข้าม กล่าวคือ ส่วนที่ยื่นออกมาของอิเล็กโทรด จะตรงกับส่วนที่เป็นหลุมลงไปของชิ้นงาน การขึ้นรูปเช่นนี้เรียกว่า “การขึ้นรูปประเภทถ่ายแบบ” โดยคุณสมบัติของอิเล็กโทรดที่ดี มีดังต่อไปนี้

1. ง่ายต่อการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีที่ค่าใช้จ่ายไม่แพงนัก
2. ให้ประสิทธิภาพในการกัดโลหะออกจากชิ้นงาน
3. มีอัตราการสึกกร่อนช้า และมีความทนทาน
4. เป็นสื่อนำความร้อนและไฟฟ้าได้ดี

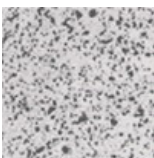
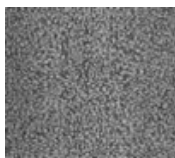
และวัสดุที่สามารถใช้เป็นอิเล็กโทรดได้ มีดังนี้

1. ทองแดง-ทังสเตน
2. ทองแดง-แกรไฟต์
3. แกรไฟต์
4. ทองเหลือง
5. ทองแดง
6. เงิน-ทังสเตน
7. สังกะสีผสม เหล่านี้ เป็นต้น

ทองเหลืองและทองแดง เป็นวัสดุที่เมื่อนำมาเป็นอิเล็กโทรดแล้ว จะมีอัตราการสึกกร่อนสูง ส่วน เงิน-ทังสเตน และสังกะสีผสม เป็นวัสดุที่ไม่นิยมและหาซื้อมาประกอบการผลิต

ยาก ดังนั้นวัสดุที่เหมาะสมจะนำมาเป็นอิเล็กโทรดในการทดลอง สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มี 3 ชนิด คือ แกรไฟต์, ทองแดง-แกรไฟต์ และทองแดง-ทังสเตน เนื่องจากว่าอิเล็กโทรดดังกล่าวมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการทำงานด้วยเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า และได้รับความนิยมอย่างมากในอุตสาหกรรม รวมทั้งหาซื้อได้ง่าย สมบัติของอิเล็กโทรดทั้ง 3 ชนิด แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตารางเปรียบเทียบสมบัติของ แกรไฟต์, ทองแดง-แกรไฟต์ และทองแดง-ทังสเตน

	แกรไฟต์	ทองแดง-แกรไฟต์	ทองแดง-ทังสเตน
รูปภาพโครงสร้างจุลภาค			
จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	3,350	1,100	3,500
ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	1.81	3.25	15.21
สัมประสิทธิ์การขยายตัวด้วย ความร้อน (ต่อองศาเซลเซียส)	4×10^{-6}	15.82×10^{-6}	10.77×10^{-6}
เกรดที่ใช้	EDM-3	EDM-C3	CTR-08375
ที่มาของภาพ	www.poco.com	www.poco.com	www.theodoregray.com

2.7 อิเล็กโทรดแกรไฟต์ (Graphite electrode)

แกรไฟต์ เป็นอีกรูปหนึ่งของธาตุคาร์บอน ชื่อสามัญเรียกว่า พลัมเบโก (Plumbago) หรือแร่ดินสอดำ โดยเป็นตัวนำความร้อนและไฟฟ้าได้ดี มักใช้ทำไส้ดินสอดำ เบ้าหลอมโลหะ น้ำมันหล่อลื่นบางชนิด ไส้ถ่านไฟฉาย ไส้ไฟอาร์ค ใช้เป็นตัวลดความเร็ว และช่วยควบคุมจำนวนอนุภาคนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ได้

อิเล็กโทรดแกรไฟต์ มีอัตราการกัดเนื้องานที่สูงกว่าทองแดง-ทังสเตน และอัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโทรด อยู่ในระดับต่ำเนื่องจากมีจุดหลอมเหลวสูง มีน้ำหนักเบา ทำให้สามารถกัดแม่พิมพ์ที่มีขนาดใหญ่ได้ มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวด้วยความร้อนต่ำ คือ $\frac{1}{2}$ เท่าของ

ทองแดง-ทังสเตน ซึ่งอาจเป็นผลดีในเรื่องของการลดรอยแตกร้าวขนาดเล็กได้ ข้อเสียคือมีราคาแพง [สุชาติ มั่นหมาย;2537] อิเล็กโตรดแกรไฟต์ ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นอิเล็กโตรดขึ้นรูปด้วยอัดโลหะผง จาก บริษัท Poco graphite จำกัด เกรด EDM-3



ภาพที่ 2.4 อิเล็กโตรดแกรไฟต์ (ที่มา : Cammann Inc, “www.cammann.com”)

คุณสมบัติทางกายภาพของแกรไฟต์ เป็นดังนี้

1. จุดหลอมเหลว : 3,350 องศาเซลเซียส
2. ความหนาแน่น : 1.81 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
3. สัมประสิทธิ์การขยายตัวด้วยความร้อน : 4×10^{-6} / องศาเซลเซียส

2.8 อิเล็กโตรดทองแดง-แกรไฟต์ (Copper-graphite electrode)

อิเล็กโตรดทองแดง-แกรไฟต์ เหมาะกับชิ้นงานที่ต้องการความละเอียดของผิวสูง เป็นวัสดุที่เป็นตัวนำความร้อนที่ดี, ความต้านทานไฟฟ้าต่ำ เป็นอิเล็กโตรดที่ไม่มีปัญหาในการใช้งานมากนัก ซึ่งเหมาะสำหรับการฝึกหัดทดลองใช้เครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี

อิเล็กโตรดทองแดง-แกรไฟต์ มักนำไปใช้ขึ้นรูปแม่พิมพ์พลาสติก, ชิ้นส่วนอากาศยาน และชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ได้ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้อิเล็กโตรดทองแดง-แกรไฟต์ เกรด EDM-C3 จาก บริษัท Poco graphite จำกัด เช่นกัน คุณสมบัติทางกายภาพของทองแดง-แกรไฟต์ เป็นดังนี้

1. จุดหลอมเหลว : 1,100 องศาเซลเซียส
2. ความหนาแน่น : 3.25 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
3. สัมประสิทธิ์การขยายตัวด้วยความร้อน : 15.82×10^{-6} / องศาเซลเซียส

2.9 อิเล็กโทรดทองแดง-ทังสเตน (Copper-tungsten electrode)

อิเล็กโทรดทองแดง-ทังสเตน มีคุณสมบัติในการขึ้นรูปที่ดีกว่าทองแดง มีอัตราการขจัดเนื้องาน อยู่ในเกณฑ์ดี, มีอัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโทรดที่ต่ำ เหมาะสมกับการขึ้นรูปงานที่มีความละเอียดสูง และการขึ้นรูปที่มีพื้นที่การสปาร์คมีขนาดเล็ก [สุชาติ มั่นหมาย;1994] มีข้อเสียคือ มีราคาแพง และพื้นผิวของชิ้นงานที่แปรรูปมีความหยาบ แต่ถ้าใช้กระแสไฟฟ้าสูงพื้นผิวจะมีความเรียบขึ้น [Singh, Shankar;2004] เกรดของอิเล็กโทรดทองแดง-ทังสเตน ที่นิยมนำมาเป็นอิเล็กโทรดกันมากที่สุด และนำมาใช้ในการทดลองนี้ คือ เกรด CTR-08375



ภาพที่ 2.5 อิเล็กโทรดทองแดง-ทังสเตน (ที่มา : Rimpex Rubber, “www.rubberimpex.com”)

คุณสมบัติทางกายภาพของทองแดง-ทังสเตน เป็นดังนี้

1. จุดหลอมเหลว : 3,500 องศาเซลเซียส
2. ความหนาแน่น : 15.2 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
3. สัมประสิทธิ์การขยายตัวด้วยความร้อน : 10.77×10^{-6} / องศาเซลเซียส

2.10 วัสดุชิ้นงาน (Workpiece material)

วัสดุที่นำมาแปรรูปด้วยเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า จะต้องเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี ความแข็งแรงของวัสดุไม่เป็นอุปสรรคต่อการแปรรูป โดยเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้าสามารถแปรรูปโลหะพวกเหล็กกล้า (Mild steel), เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High carbon steel) และเหล็กคาร์ไบด์ได้ ซึ่งในการแปรรูปโลหะเหล่านี้ถือเป็นข้อดีของเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า

วัสดุที่สามารถแปรรูปได้ด้วยเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า ได้แก่

1. อะลูมิเนียม

2. แมกนีเซียม
3. ทังสเทน
4. ทองเหลือง
5. โมลิบดีนัม
6. ไททาเนียม
7. แบรียียม
8. คาร์ไบด์ เหล่านี้ เป็นต้น

2.11 ชิ้นงานทดสอบ - ทังสเทนคาร์ไบด์ (Tungsten carbide, WC-Co)

ทังสเทนคาร์ไบด์ เป็น โลหะซีเมนต์คาร์ไบด์ชนิดหนึ่ง ซึ่งซีเมนต์คาร์ไบด์ คือ อนุภาคของคาร์ไบด์ชนิดต่างๆมารวมเข้าด้วยกันโดยวิธีการของโลหะผงวิทยา เช่น ทังสเทนคาร์ไบด์ (WC), ไททาเนียมคาร์ไบด์ (TaC) และนิกเกิลคาร์ไบด์ (NiC) เป็นต้น โดยมีโคบอลต์ (Co) เป็นตัวประสานอนุภาคของคาร์ไบด์ มีขนาดเล็กมาก ประมาณ 1-10 ไมโครเมตร



ภาพที่ 2.6 ทังสเทนคาร์ไบด์ (ที่มา : Sumipol Co.,Ltd, “www.sumipol.com”)

ทังสเทนคาร์ไบด์ สามารถใช้งานที่ความเร็วตัดสูงกว่าเหล็กกล้ารอบสูงได้ และยังมี ความต้านทานการสึกกร่อนสูงกว่า สามารถนำไปเคลือบผิวได้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องมือตัด ซึ่งสารเคลือบและวิธีการเคลือบจะขึ้นอยู่กับเทคนิคของผู้ผลิตแต่ละราย

ทังสเทนคาร์ไบด์ เป็นวัสดุที่ทำการแปรรูปยาก มีเพียงเครื่องจักรในงานผลิตขั้นสูง บางชนิดที่สามารถแปรรูปได้ คุณสมบัติทางกายภาพของทังสเทนคาร์ไบด์ เป็นดังนี้

1. จุดหลอมเหลว : 2,800 องศาเซลเซียส
2. ความหนาแน่น : 15.7 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
3. สัมประสิทธิ์การขยายตัวด้วยความร้อน : 5×10^{-6} / องศาเซลเซียส

ชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ ที่ใช้ในการทดลอง เป็นทั้งสแตนคาร์ไบด์ เกรด 90WC-10Co ซึ่งมีส่วนประกอบของ ทั้งสแตน 90% และโคบอลต์ 10%

2.12 อัตราการขจัดเนื้องาน (Material removal rate, MRR)

อัตราการขจัดเนื้องานของเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้านั้น เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการขึ้นรูปอื่นๆ เช่น การตัด, การเจาะ และการกลึง แล้วนับว่ามีความเร็วต่ำมาก ในการใช้เงื่อนไขที่การขึ้นรูปดำเนินไปอย่างช้าๆ นั้น ทำให้อัตราการขจัดเนื้องานต่ำ แต่ถ้าปรับใช้เงื่อนไขทำให้มีอัตราเร็วสูงขึ้นแล้ว อาจทำให้ผิวของชิ้นงานที่ได้หยาบขึ้น จึงจำเป็นต้องหาความเร็วที่เหมาะสมและสัมพันธ์กับองค์ประกอบ หรือปัจจัยอื่นๆ ด้วย เช่น วัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโทรด, วัสดุที่เป็นชิ้นงาน, ประเภทของของเหลวตัวกลาง, ความหยาบผิว เป็นต้น สมการการหา อัตราการขจัดเนื้องาน เป็นดังสมการที่ 2

$$\text{อัตราการขจัดเนื้องาน} = \frac{\text{ปริมาตรที่ชิ้นงานถูกกัดออกไป}}{\text{เวลาที่ใช้}} \dots\dots\dots (2)$$

อัตราการขจัดเนื้องาน จะมีหน่วยเป็นปริมาณของเนื้อวัสดุชิ้นงานที่ถูกขจัดออกไปต่อหน่วยเวลา โดยในการทดลองจะใช้ปริมาณเนื้อวัสดุชิ้นงานเป็น ลูกบาศก์มิลลิเมตร และหน่วยเวลาเป็นนาที (ลูกบาศก์มิลลิเมตร / นาที)

2.13 อัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโทรด (Electrode wear ratio, EWR)

การแปรรูปด้วยเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้านี้ อิเล็กโทรดที่ใช้จะมีอัตราการสึกกร่อนที่เปลี่ยนแปลงไปตามปัจจัยต่างๆ เช่นเดียวกับอัตราการแปรรูปชิ้นงาน เช่น วัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโทรด, ขั้วของอิเล็กโทรด, สภาพการไหลของสารละลาย หรือเงื่อนไขการแปรรูปอื่นๆ รูปแบบของอัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโทรด มี 3 รูปแบบ [Aas, Kristian L;2004] ได้แก่

1. การสึกกร่อนที่ด้านหน้า หรือที่ปลายของอิเล็กโทรด (End wear)
2. การสึกกร่อนที่มุมของอิเล็กโทรด (Corner wear)
3. การสึกกร่อนที่ด้านข้างของอิเล็กโทรด (Side wear)

อัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดลองนี้จะใช้แบบ การสึกกร่อนที่ปลายของอิเล็กโทรด อัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโทรด มีหน่วยเป็นอัตราส่วน หรือเปอร์เซ็นต์ ถ้าอัตราการสึกกร่อนต่ำกว่า 1 % จะเรียกว่า “ไม่สึกกร่อน” ถ้าอัตราการสึกกร่อน 1-10 % จะเรียกว่า “อัตราสึกกร่อนต่ำ” ถ้าอัตราการสึกกร่อนสูงกว่า 10 % จะเรียกว่า “มีการสึกกร่อน” สมการหาอัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโทรด เป็นดังสมการที่ 3 ดังนี้

$$\text{อัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโทรด} = \frac{\text{ระดับความลึกบนชิ้นงานที่แท้จริง}}{\text{ระยะที่อิเล็กโทรดสึกกร่อนออกไป}} \times 100 \% \dots\dots\dots (3)$$

2.14 รอยแตกร้าวขนาดเล็ก (Micro-cracks)

การแปรรูปด้วยเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้ากับวัสดุบางชนิดมักจะเกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็ก ที่ผิวที่ทำการแปรรูป โดยเฉพาะชิ้นงานที่ผลิตขึ้นมาจากกรรมวิธีโลหะผงวิทยา และมีตัวประสานอยู่ด้วย รอยแตกร้าวนี้มีขนาดเล็กมาก ซึ่งไม่สามารถมองได้ด้วยตาเปล่า ต้องมองด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning electron microscope, SEM) เท่านั้น รอยแตกร้าวนี้จะไปมีผลถึงคุณสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานที่แปรรูปนั้นๆ

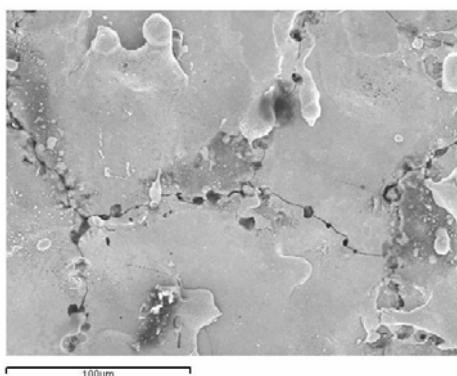
สำหรับทั้งสแตนเลสคาร์ไบด์แล้ว รอยร้าวที่เกิดขึ้นนั้น เกิดจากเวลาที่นำชิ้นงานมาแปรรูป โคบอลต์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสาน ซึ่งมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าทั้งสแตนเลสและคาร์ไบด์ จะหลอมละลายออกไปก่อน เป็นผลให้เกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็ก ที่พื้นผิวชิ้นงาน

หน่วยที่ใช้วัดรอยแตกร้าวขนาดเล็ก เรียกว่า ความหนาแน่นของรอยแตกร้าวขนาดเล็ก [O'Brien, Fergal J.;2003] ซึ่งหน่วยการวัดนี้ สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แบบคือ

1. จำนวนของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่ (Numerical crack density, Cr.Dn) โดยแสดงหน่วยเป็น จำนวนรอยแตกร้าว/ตารางมิลลิเมตร
2. ความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่ (Surface crack density, Cr.S.Dn) โดยจะแสดงหน่วยเป็น ไมโครเมตร/ตารางมิลลิเมตร

3. ความยาวเฉลี่ยของรอยแตกร้าวขนาดเล็ก (Mean crack Length, Cr.Le) ซึ่งหมายถึง ความยาวของรอยแตกร้าวเฉลี่ย ในพื้นที่ที่ทำการตรวจสอบทั้งหมด โดยจะแสดงหน่วยเป็น ไมโครเมตร

โดยทั่วไปพื้นที่ในแบบที่ 1 และ 2 จะมีขนาดเป็น 1 ตารางมิลลิเมตร



ภาพที่ 2.7 ตัวอย่างภาพรอยแตกร้าวขนาดเล็ก บนพื้นผิวบริเวณที่ทำการสปาร์คของถังสเตนคาร์ไบด์ จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงรอยแตกร้าวขนาดเล็ก ใช้อิเล็กโตรดทองแดง-ถังสเตนคาร์ไบด์ ค่าปัจจัยประสิทธิภาพ 11 % กระแสไฟฟ้า 6 แอมแปร์ ความต่างศักย์วงจรเปิด 90 โวลต์ ถ่ายด้วยกำลังขยาย 500 เท่า

2.15 ความหยาบผิวเฉลี่ย (Average surface roughness, Ra)

ความหยาบผิวเฉลี่ย (Average surface roughness, Ra) มีหน่วยเป็น ไมโครเมตร สามารถวัดได้ด้วยเครื่องวัดความหยาบผิว (Profilometer) ซึ่งเป็นเครื่องทดสอบความหยาบละเอียดของผิววัสดุ วัดโดยใช้ปลายเข็มขนาดเล็กลากไปบนผิววัสดุ ลักษณะการสปริงขึ้นลงของปลายเข็มเมื่อลากผ่านผิววัสดุ จะถูกแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าผ่านระบบการวิเคราะห์สัญญาณแสดงผลเป็นแผนภาพและค่าความหยาบผิวเฉลี่ยในหน่วยไมโครเมตร

เมื่อทำการแปรรูปด้วยเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้าแล้ว พื้นผิวที่ทำการสปาร์คจะมีความหยาบของพื้นผิวอยู่ในระดับหนึ่ง ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะต้องทดสอบว่า ค่าตัวแปรต่างๆ มีผลต่อความหยาบผิวเฉลี่ยหรือไม่ อย่างไร

2.16 วรรณกรรมปริวรรต

R.A.Mahdavinejad และ A.Mahdavinejad [Mahdavinejad, R.A.;2005] ทำการศึกษาการแปรรูปด้วยเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้าสำหรับทั้งสแตนคาร์ไบด์ ใช้ทองแดงเป็นอิเล็กโทรด โดยศึกษาผลกระทบจากชิ้นงานทดสอบด้วย ทั้งสแตนคาร์ไบด์ 4 เกรด ซึ่งทำให้มีผลต่ออัตราการขจัดเนื้องาน และอัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโทรด อาศัยเทคนิคทางสถิติเพื่อวิเคราะห์แนวโน้มของผลกระทบหลักจากปัจจัย แล้วนำไปกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแปรรูปของเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า

S.H.Lee และ X.P.Li [Lee, S.H.;2003] ได้เสนอแนวคิดว่าการแปรรูป ทั้งสแตนคาร์ไบด์ ด้วย เครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า ทำให้มีค่าความแข็งมากขึ้น โดยมีสมมติฐานว่าการแปรรูปชิ้นงานโลหะด้วยเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้าแล้ว มีผลให้เกิดกระบวนการพัฒนาและปรับปรุงคุณสมบัติที่พื้นผิวของชิ้นงาน ซึ่งส่งผลต่อความแข็ง อิเล็กโทรดคือ ทองแดง-ทั้งสแตน ผลที่ได้รับคือการแปรรูปด้วยเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า ไม่ทำให้ความแข็งของทั้งสแตนคาร์ไบด์เปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด รวมทั้งยังมีรอยแตกร้าวขนาดเล็ก เกิดขึ้นบริเวณผิวที่ทำการสปาร์คด้วย อย่างไรก็ตาม รอยแตกนี้จะมีย่านน้อยขึ้นอยู่กับสภาพเงื่อนไขต่างๆ ของตัวแปรที่ใช้ในการแปรรูป

K.L.Aas [Aas, Kristian L;2004] ได้ศึกษา การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างอิเล็กโทรดแกรไฟต์ที่ต่างกัน 2 เกรด คือ Poco AF5 และ Poco EDM-3 โดยดูผลจาก อัตราการขจัดเนื้องาน และอัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโทรด พบว่าอิเล็กโทรดทั้ง 2 ชนิดให้ผลและข้อได้เปรียบ, เสียเปรียบที่แตกต่างกัน โดย PocoEDM3 จะมีอัตราการขจัดเนื้องานที่ดีกว่า แต่ในทางกลับกัน PocoAF5 จะมีอัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโทรดที่ต่ำกว่า โดยในการทดลอง การเพิ่มระยะเวลาการปล่อยกระแสไฟฟ้าจะทำให้อัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโทรดลดลง และการเพิ่มกระแสไฟฟ้า ทำให้อัตราการขจัดเนื้องานสูงขึ้น ที่สำคัญกลับมีผลให้อัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโทรดลดลงด้วย

สุชาติ มั่นหมาย และ อนุวัช เครือจันทร์ [สุชาติ มั่นหมาย; 2537] ศึกษาการแปรรูปด้วยเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า โดยใช้อิเล็กโทรดแกรไฟต์เกรด HK-1 ทำการหาเงื่อนไขหรือสภาพารสปาร์คที่ดีที่สุด เพื่อศึกษาหาอัตราการขจัดเนื้องาน และอัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโทรด จากตัวแปรกระแสไฟฟ้า, ระยะเวลาการปล่อยกระแสไฟฟ้า และความลึกในการขึ้นรูป สรุปได้ว่า ระยะเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า จะมีอิทธิพลมากกว่ากระแสไฟฟ้า

P.M.George และคณะ [P.M.George;2004] ได้ศึกษาการแปรรูปชิ้นงาน คาร์บอน ด้วยเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า อิเล็กโตรดที่ใช้ คือ ทองแดง โดยตัวแปรคือ กระแสไฟฟ้า, ความต่างศักย์วงจรเปิด และเวลาเปิด โดยศึกษาผลกระทบจากชิ้นงานทดสอบด้วย การทดลองแบบทางสถิติ ซึ่งไปมีผลต่ออัตราการขจัดเนื้องาน และอัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโตรด ผลที่ได้รับคือ สามารถลดอัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโตรด หากกำหนดค่าตัวแปรในระดับต่ำที่สุด และอัตราการขจัดเนื้องานจะสูง ถ้ากำหนดค่าตัวแปรในระดับสูงที่สุด