บทที่ 2

ทฤษฎีและวรรณกรรมปริทรรศน์

ในบทนี้จะนำเสนอผลงานการวิจัยและงานศึกษาที่เกี่ยวข้องที่มีมาก่อนหน้านี้ ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ

1. ความเป็นมาของการกัดชิ้นงานด้วยไฟฟ้า กระบวนการกัดชิ้นงาน รวมไปถึงองค์ประกอบที่สำคัญในการกัดด้วยกระแสไฟฟ้า

2. ทฤษฎีการกัดอาร์ค เซรามิกส์ ชนิดและคุณสมบัติของเซรามิกส์ในการทดลอง

3. ชนิดและคุณสมบัติของวัสดุอิเล็ กโตรดที่ใช้ในการทดลองซึ่ งในกระบวนการทดลองเลือกใช้อิเล็กโตรดทองแดงแบบกลวง และอิเล็กโตรดทองเหลืองแบบกลวง

2.1 ความเป็นมาของการกัดชิ้นงานด้วยไฟฟ้า

การกัดชิ้นงานด้วยไฟฟ้า (Electrical Discharge Machining; EDM) ได้ถูกค้นพบโดย Joseph นักวิทยาศาตร์ชาวอังกฤษ ในปี คศ.1770 โดยได้ค้นพบถึงผลกระทบซึ่งทำให้โลหะสึกกร่อนด้ วยการปล่อยกระแสไฟฟ้าจากอิเล็กโ ตรดตัวนำไฟฟ้าไปสู่ชิ้นงานที่ต่อกับ แหล่งจ่ายกระแสตรง (DC) และเขายังพบว่า มีการกัดกร่อนเกิดขึ้นระหว่างชิ้นงานและอิเล็กโตรด กรรมวิธีนี้มีความเที่ยงตรงไม่มากที่จะกำหนดขอบเขต พื้นที่ของการสปาร์ค [อภิวัฒน์ มุตตามระ และคณะ , 2549] ต่อมาในปี 1940 ได้มีการพัฒนาและวิจัยทำเครื่อง กัดอาร์คด้วยไฟฟ้า ออกมาพื้นฐานโดย Soviet [Kansal,H.K,Singh, 2005] ในปี 1943 สองนักวิทยาศาสตร์ชาวรัสเซีย ได้พัฒนาขึ้นโดย Dr.B.R. Lazarenko และ Dr. N.I. Lazarenko ได้ออกนำเผยแพร่เกี่ยวกับกรรมวิธีการทางกระแสไฟฟ้าในการกัดเซาะชิ้นงานซึ่งเป็น เป็นกรรมวิธีที่ใช้สำหรับขึ้นรูปโลหะแข็งที่ไม่สามารถขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีธรรมดาได้ ในช่วงระหว่างสงครามโลกครั้งที่ สอง ที่มหาวิทยาลัยมอสโค [Lazarenko,B.R.,1943] และได้มีการพัฒนาวงจรในการควบคุมที่เรียกกันว่าวงจร กระแสสลับ (RC) ในปี 1950 และในปี 1955 เครื่องกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า ที่ชื่อ Charmilles เป็นลักษณะงานที่ได้จากเครื่องแบบใช้ของเหลวตัวกลางท่วมชิ้นงาน (Sink EDM) และได้มีการพัฒนามาจนถึงปัจจุบัน ในการจับคอมพิวเตอร์มาใช้ในการควบคุมแบบอัตโนมัติโดยสั่งงานด้วย การเขียนโปรแกรมระบุเส้นทางในการเดินให้กับเครื่องกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า ทำงานตามคำสั่ง [Abu Zeid,O.A,1997]

ภาพที่ 2.1
เครื่องกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า

เครื่องกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า ใช้ในงานผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน ที่ทำด้วยวิธีการตัดเฉือนทั่วไปได้ยาก สามารถตัดเฉือนชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งมาแล้ว หรือชิ้นงานที่ยากต่อการแปรรูป รวมไปถึงการผลิตแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก, ผลิตแม่พิมพ์หล่อโลหะ และอื่นๆ อีกมากมาย ล้วนแล้วแต่ต้องผ่านขั้นตอนการผลิตที่ใช้กรรมวิธี กัดอาร์คด้วยไฟฟ้า โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก คือ แบบใช้ของเหลวตัวกลางท่วมชิ้นงาน (Sink EDM) ใช้ในงานผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนที่ทำด้วยวิธีการตัดเฉือนทั่วไปได้ยาก สามารถตัดเฉือนชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งมาแล้ว ใช้ผลิตส่วนเบ้าของแม่พิมพ์ การตัดเฉือนโลหะจะใช้การกัดเซาะทางไฟฟ้ามีอิเล็กโตรดเป็นตัวนำไฟฟ้า ข้อเสียคือ ในงานที่ต้องการความละเอียดจะต้องใช้ตัวอิเล็กโตรดหลายอัน และงานที่ซับซ้อนจะมีค่าใช้จ่ายสูง และแบบใช้ลวดตัด (Wire EDM) จัดเป็นเครื่องจักรประเภทเดียวกับเครื่อง กัดอาร์คด้วยไฟฟ้า แต่เปลี่ยนจากการใช้อิเล็กโตรดเป็นตัวตัดเฉือนชิ้นงานมาใช้ลวดทองเหลืองเป็นตัวตัดให้ได้รูปร่างตามต้องการในแนวตั้ง อีกทั้งยังเป็น เครื่องที่ตัดงานด้วยความเที่ยงตรงขนาดสูงมาก สามารถควบคุมขนาดได้เล็กกว่า 5 ไมครอนเนื่องจากมีค่าใช้จ่ายสูงในการทำชิ้นงานจึงเหมาะกับงานที่ต้องการ และที่สำคัญเครื่องกัดอาร์คดวยไฟฟ้า ยังสามารถใช ขัดผิวชิ้นงานในขั้นสุดท้ายได และยังสามารถใช้กัดวัสดุเซรามิกส์ที่ไม่นำไฟฟ้าได้ โดยใช้วัสดุช่วยเหนี่ยวนำ ทำให้เกิดการสปาร์คขึ้นระหว่างอิเล็กโตรดกับชิ้นงานเซรามิกส์ได้ พร้อมทั้งยังถือได้ว่าเป็นเทคโนโลยีการตัดโลหะที่สะอาดอีกด้วย [Singh,Shankar;2004,El-Hofy,Hassan;2005]

2.1.1 ข้อดีของการแปรรูปด้วยเครื่องกัดไฟฟ้า

1. สามารถขึ้นรูปวัสดุที่ยากต่ อการ ตัด เช น โลหะที่ผ่านการชุบแข็ ง, โลหะซีเมนต คาร์ไบด์ หรือโลหะพิเศษ เป็ นต้น โลหะเหล่ านี้แม้จะมีความแข็งเท่ าไร แต ถ้าเป็นสื่อไฟฟ้า แล้วจึงสามารถนำมาแปรรูปด้วยเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้าได้

2. สาม ารถขึ้นรูปทรงที่มีความซับซ อนได้ โดยการพัฒนาระบบ ซีเอ็นซี (Computer Numerical Control, CNC) ทำให้สามารถขึ้นรูปทรงระบบ 3 มิติได้โดยเฉพาะชิ้นงานที่มีความแข็งและมีรูปร่างซับซ้อนด้วยแล้วไมสามารถใช้เครื่องจักรธรรมดาได้แน่นอน

3. สามารถขึ้ นรูปทรงที่ไม่ สามารถตัดขึ้นรูปด้วยวิธีอื่นได้ เช่น การขึ้นรูปมุมเหลี่ยมที่ไม่ ต้องการให้เกิ ดมุมโค ง ในเครื่องกัดโลหะนั้น ทำไม ได้ แต่เครื่องกัดโลหะด วยไฟฟ า สามารถทำได

4. ลดกระบวนการผลิตได้ ซึ่งการ ลดกระบวนการผลิตเป็นตัวแปรสำคัญ ที่จะนำไปสู่ การลดต นทุนได้ ระบบ ซีเอ็นซี ในเครื่องกัด อาร์ค ด้วยไฟฟ้ า สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้หลากหลาย , การควบคุมกระแสไฟฟ้า และ การควบคุมแก่นพิกัดการขึ้นรูปได้ สามารถ ขึ้นรูปชิ้นงานไดอยางถูกต้องแน่นอน ลดกระบวนการผลิตของชิ้นงานที่มีความซับซ้อนลงได้

2.1.2 สูตรในการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพในการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า

ในการทดลองเพื่อหาข้อเปรียบเทียบในแต่ละค่าตัวแปรต่าง ๆว่าค่าตัวแปรใดให้ผลในการกัดชิ้นงานได้ดีนั้น ได้กำหนดตัวแปรที่ใช้ในการวัดค่าประสิทธิภาพการกัดชิ้นงานไว้ ดังนี้

1. อัตราการขจัดเนื้องาน (Material Removal Rate, MRR)

อัตราการขจัดเนื้องานของเครื่อง กัดอาร์คด้วยไฟฟ้า นั้นเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการขึ้นรูปอื่นๆ เช่น การตัด, การเจาะ, การกลึง แล้วนับว่ามีความเร็วต่ำมาก ในการใช้เงื่อนไขที่การขึ้นรูปดำเนิ นไปอย่างช้าๆ นั้นจะทำให้ประสิทธิภาพการผลิตต่ำ แต่ถ้าปรับใช้เงื่อนไขทำให้มีอัตราเร็วสูงขึ้น ผิวของชิ้นงานที่ได้ก็จะหยาบขึ้น จึงจำเป็นต้องหาความเร็วที่เหมาะสมและสัมพันธ์กับองค์ประกอบ หรือปัจจั ยอื่นๆ ด้วย เช่น วัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโตรด , วัสดุที่เป็นชิ้นงาน , ประเภทของของเหลวตัวกลาง ความหยาบผิว เป็นต้น

สมการการหา อัตราการขจัดเนื้องาน เป็นดังนี้

$$MRR = \frac{\pi(\text{รัศมีของอิเล็กโตรด})^2 \times \text{ค่าความลึกจริงของชิ้นงาน}}{\text{เวลาที่ใช้ในการปฏิบัติงาน}} \quad (\text{มม.}^3/\text{นาที})$$

2. อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด (Electrode Wear Ratio, EWR)

การแปรรูปด้วยเครื่องกัดอาร์คด้วยไฟฟ้านี้ อิเล็กโตรดที่ใช้จะมีอัตราการสึกกรอนที่เปลี่ยนแปลงไปตามปัจจัยต่ างๆ เช่ นเดี ยวกับอัตราการแปรรูปชิ้นงาน เช่น วัสดุที่ใช ทำอิเล็กโตรด, ขั้วของอิเล็กโตรด , สภาพการไหลของสารล ะลาย หรือเงื่อนไขกา รแปรรูปอื่นๆ รูปแบบของอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด มี 3 รูปแบบ [Aas,Kristian L;2004] ได้แก่

1. การสึกกร่อนที่ด้านหนา หรือที่ปลายของอิเล็กโตรด (End wear)

2. การสึกกร่อนที่มุมของอิเล็กโตรด (Corner wear)

3. การสึกกร่อนที่ด้านข้างของอิเล็กโตรด (Side wear)

อัตราการสึก หรอ ของอิเล็กโต รดที่ใช้ ในการทดลองนี้จะใช้ แบบ การสึกกรอนที่ปลายของอิเล็กโตรด อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดมีหน่วยเปนอัตราสวน หรือเปอรเซ็นต์ ถาอัตราการสึกกร่อนต่ำกวา 1% จะเรียกวา “ไม่สึกกรอน” ถาอัตราการสึกกร่อน 1-10% จะเรียกวา “อัตราสึกกร่อนต่ำ” ถ้าอัตราการสึกกร อนสูงกว่า 10% จะเรียกว่า “มีการสึกกร อน” สมการหาอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด เปนดังสมการ ดังนี้

อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดหาได้จากสูตร

$$EWR = \frac{\text{ระยะของอิเล็กโตรดที่สึก} \times 100\ (\%)}{\text{ค่าความลึกจริงของชิ้นงานที่กัดได้}}$$

3. เวลาเปด (On time : T-on) และ เวลาปด (Off time : T-off)

เวลาเปิด คือ ช่วงเวลาที่เกิดการถ่ายเทประจุหรือเวลาการปล่อยกระแส โดยเมื่อความต่างศักย์ระหว่างอิเล็กโตรดและชิ้นงานสูงขึ้น นำไปสู่การปลดปล่อยพลังงานจนทำให้เกิดการสปารคที่ผิวของชิ้นงาน

เวลาปด คือ ชวงเวลาที่หยุดการสปารค หรือชวงเวลาที่ไมมีกระแสไหลจากอิเล็กโตรดไปที่ชิ้นงาน ทำให้ของเหลวตัวกลางสามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมก่อนแตกตัวได้ซึ่งเมื่อคาของชวงเวลาการสปารคเปลี่ยนไป จะมีผลทำใหคาปจจัยประสิทธิภาพ (Duty Factor)เปลี่ยนไปดวย

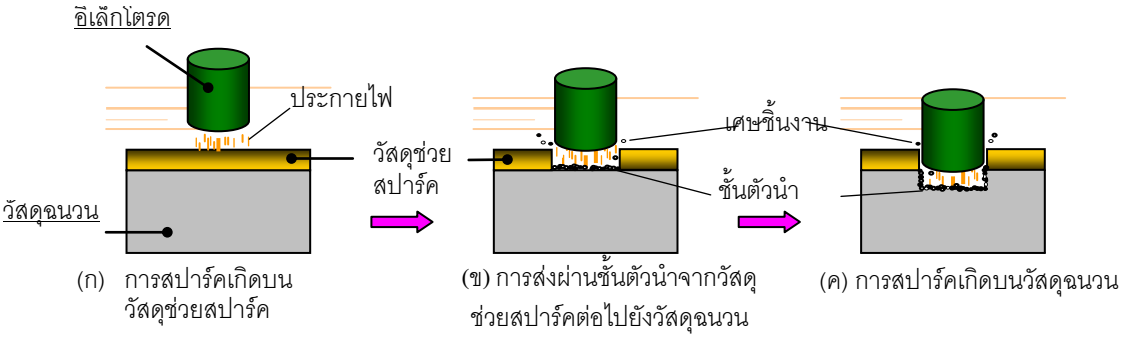
ค่าปัจจัยประสิทธิภาพ (Duty Factor) ซึ่งมีสูตรการคำนวณดังนี้

$$\%DF = \frac{\text{เวลาเปิด} \times 100\%}{\text{เวลาเปิด} + \text{เวลาปิด}}$$

*เวลาปิดเวลาเปิดมีหน่วยเป็น ไมโครวินาที

2.2 ทฤษฎีการกัดอาร์ค เซรามิกส์

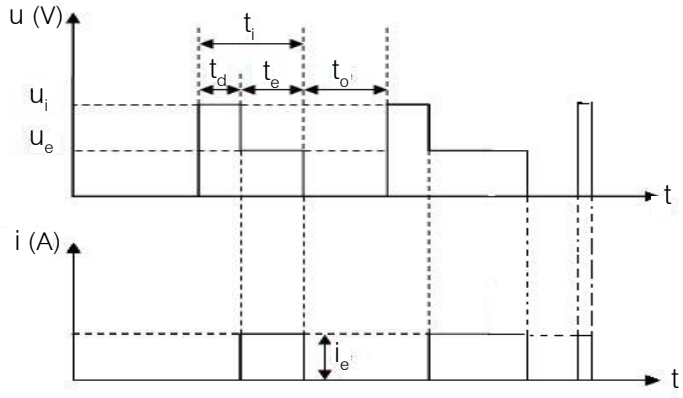
การสปาร์ควัสดุที่ไม่นำไฟฟ้าครั้งแรกได้กระทำบนเซรามิกส์ซิลิคอนไนไตรด์ (Si_3N_4) มีค่าความต้านทานจำเพาะมากกว่า 10^{16} โอห์ม-เซนติเมตร หลักการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า นั้นอาศัยเทคนิคกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าบนวัสดุช่วยสปาร์ค (Assisting Electrode) ตามภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2
การอาร์ควัสดุที่เป็นฉนวนโดยมีวัสดุช่วยสปาร์คเป็นตัวช่วย

วัสดุช่วยสปาร์ค ในยุคแรกๆ ใช้แผ่นโลหะหรือแผ่นตาข่ายทองแดงกดแนบกับวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้า เมื่อเริ่มสปาร์ค อิเล็กโตรดจะสปาร์คบนวัสดุช่วยสปาร์คก่อน จากนั้นจะผ่านมายังวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้าโดยมี ชั้นเหนี่ยวนำถูกสร้างระหว่างกระบวนการสปาร์ค ชั้นเหนี่ยวนำ นี้ส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยสารคาร์บอน ซึ่งมาจากส่วนผสมของน้ำมัน การกัดอาร์ค วัสดุที่ไม่นำไฟฟ้านี้สามารถกระทำได้ ตราบใดที่ชั้นเหนี่ยวนำนี้สามารถถูกสร้างขึ้นระหว่างกระบวนการ กัดอาร์คด้วยไฟฟ้า วัสดุที่เหมาะสมเป็นวัสดุช่วยสปาร์คสำหรับ Si_3N_4 นั้นใช้การเคลือบ ผิวทางกายภาพ (Physical Vapour Deposition Titanium Nitride, PVD-TiN) เคลือบบนวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้า การอาร์คแบบนี้นั้น ทำให้การสปาร์คมีความเสถียร และสามารถลดเวลาในการสร้างชั้นเหนี่ยวนำบนวัสดุไม่นำไฟฟ้า แต่ถึงกระนั้นกระบวนการเคลือบ ผิวทางกายภาพ ต้องใช้เวลาและต้นทุนค่อนข้างสูง รายงานวิจัยล่าสุด วัสดุช่วยสปาร์คได้พัฒนามาถึงการใช้ คอลลอยด์คาร์บอน ทาบนวัสดุไม่นำไฟฟ้า แล้วนำไปอบ วิธีนี้เรียกว่า ชั้นคาร์บอนอบ วิธีนี้ผู้ปฏิบัติการทดลองสามารถทำวัสดุช่วยสปาร์คได้เองโดยง่าย ส่วนตัวเครื่องกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า นั้น มีรายงานว่าถ้าเพิ่มค่าความจุไฟฟ้าเข้าไประหว่างกระบวนการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสปาร์ค

รูปคลื่นที่ได้จากการสปาร์คสำหรับวัสดุเซรามิกส์

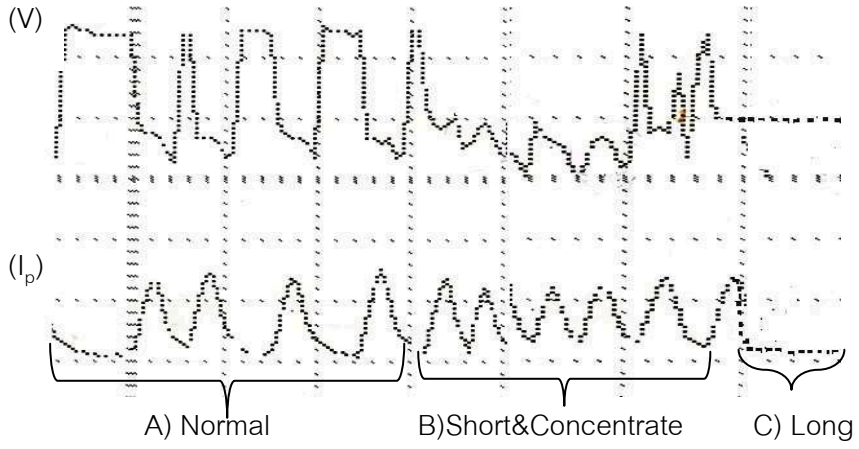


i_e = Discharge Current t_d = Ignition delay time u_i = Open load Voltage

t_e =Discharge Duration t_o = Interval discharge u_e = Servo Voltage

ภาพที่ 2.3

ความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าเทียบกับเวลาในการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า ต่อช่วงเวลา



ภาพที่ 2.4

รูปคลื่นที่วัดได้จากเครื่องออสซิโลสโคป

จากการสปาร์คแบบปกติคือ เมื่อเริ่มการทำงานค่าความต่างศักย์จะเพิ่มขึ้นเป็น ความต่างศักย์วงจรเปิด (Open load Voltage) คือ ช่วงที่อิเล็กโตรดยังไม่ทำการสปาร์คใด ๆ ขณะเริ่มสปาร์คจะเกิดความต้านทานขึ้นระหว่างอิเล็กโตรดกับชิ้ นงานทำให้ความต่างศักย์ ลดลงเป็นความต่างศักย์แนวราบ (Servo Voltage) ขณะเดียวกันก็จะมีค่ากระแสเพิ่มขึ้นจากศูนย์เป็นค่าคงที่ค่า

หนึ่ง แล้วลดลงเมื่อหยุดการสปาร์ค ส่วนการสปาร์คแบบลัดวงจรและแบบเจาะจง (Short& Concentrate) คือ การที่เกิดจากเศษที่ถูกสปาร์คยังคงค้างอยู่ในช่องสปาร์คเมื่อคว ามต่างศักย์วงจรเปิดเกิดขึ้นในกระบวนการ กระแสจะลัดวงจรสู่ชิ้นงาน สุดท้ายคือ การสปาร์คแบบยาว (Long) เกิดจากค่าเวลาเปิดที่ได้สปาร์คนานกว่าค่าที่ตั้งไว้มากกว่า 2 เท่า

2.3 ชนิดและคุณสมบัติของเซรามิกส์ในการทดลอง

ซิลิคอนไนไตรด์ (Si_3N_4)

ซิลิคอนไนไตรด์เกิดจากปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงระหว่างซิลิคอนและไนโตรเจน มีสมบัติเฉพาะคือความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันอย่างดีเยี่ยม สามารถคงค่าความแข็งแรงทางกลและคงค่าความเป็นฉนวนไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูง สามารถทนทานต่อการกัดกร่อนของโลหะหลอมเหลวบางชนิดได้ ในกระบวนการเปลี่ยนซิลิคอนให้เป็นซิลิคอนไนไตรด์โดยการเกิดปฏิกิริยาเคมีในบรรยากาศไนโตรเจนนั้นเรียกว่า "RBSN" ซึ่งมีลักษณะเฉพาะที่ดึงดูดความสนใจเป็นพิเศษคือ มีความสามารถในการนำไปผลิตชิ้นงานที่มีความแข็งมากและมีรูปร่างซับซ้อนได้ง่าย โดยกระบวนการขึ้นรูปที่สามารถทำให้มีขนาด ใกล้เคียงกับขนาดที่ต้องการได้มาก โดยไม่ต้องพึ่งกระบวนการขัดชิ้นงานซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูง

ซิลิคอนไนไตรด์ได้นำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ครั้งแรก ในช่วงปี 1950 โดยใช้ผสมกับซิลิคอนคาร์ไบด์ในการทำอิฐทนไฟ และความต้องการอิฐทนไฟ ในโลกในปัจจุบันก็ยังมีปริมาณถึง 20,000 ตันต่อปี อย่างไรก็ตาม แรงกระตุ้นส่วนใหญ่ ที่ผลักดันให้มีการพัฒนาซิลิคอนไนไตรด์เกิดขึ้นในปี 1960 และปี 1970 เนื่องจากความหลงเข้าใจผิด เกี่ยวกับอนาคตของ กังหันแก๊สที่มีประสิทธิภาพสูงและเครื่องยนต์ ที่สามารถนำไปใช้งานได้ที่ อุณหภูมิสูง และให้ประสิทธิภาพ ทางเทอร์โมไดนามิ ก ที่ดีกว่าเครื่องยนต์โลหะ ซึ่งไม่สามารถใช้ได้ที่อุณหภูมิสูง นอกจากนี้ ความต้องการเครื่องยนต์ ที่มีน้ำหนักเบา และประสิทธิภาพใ นการใช้เชื้อเพลิงสูงทำให้วัสดุ ที่นำมาใช้ในการผลิตเครื่องยนต์ ต้องมีสมบัติเชิงกลที่ดี คือ ต้องมีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง ทนต่อการคืบ ทนต่อการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน มีความต้านทานต่อการ เกิดออกซิเดชัน ซึ่งในบรรดาวัสดุ เซรามิกส์ทั้งหลาย ซิลิคอนคาร์ไบด์ และซิลิคอนไนไตรด์ ได้รับการจำแนกให้เป็นวัสดุแรกๆ ที่ได้รับการพัฒนา แต่เนื่องจาก ซิลิคอนคาร์ไบด์มีปัญหาในการที่จะทำให้มีความหนาแน่นสูง และมีความเหนียวต่ำ ซิลิคอนไนไตรด์ จึงกลายเป็นวัสดุหลัก ในการพัฒนาเป็นเครื่องยนต์เซรามิก ส์ ชิ้นส่วนซิลิคอนไนไตรด์ หลายชนิดได้นำมาพัฒนาใช้ในเชิงพาณิชย์แล้ว และนำไปใช้ประโยชน์ ด้านต่างๆ

อาทิ ใช้เป็นลูกรีด ในกระบวนการรีด ร้อน ในงานเหล็ก ใช้เป็นตลับลูกปื น ในแกนหมุน สำหรับการขับเคลื่อนของฮาร์ดดิสในคอมพิวเตอร์ และแกนหมุนของอุปกรณ์อื่นๆ ซึ่งมีข้อได้เปรียบกว่า ตลับลูกปืนที่ใช้วัสดุอื่นๆ คือ ลดปัญหาเรื่องเสียง และมีอายุใช้งานที่ยาวนานกว่า ใช้เป็นเครื่องมือตัด ในการตัดแท่งเหล็กหล่อเทา หรือวัสดุอื่นๆ ที่มีความแข็งแรง และต้องการความละเอียดสูง และใช้ เป็นแผ่นให้ความร้อนในเตาปรุงอาหาร ซิลิคอนไนไตรด์นำมาใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ ได้มากมายเช่นกัน และยังเป็นวัสดุที่มีศักยภาพสูงในการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ

ข้อดีของซิลิคอนไนไตรด์คือ

- ต้นทุนการผลิตต่ำ เนื่องจาก สารเคมีเริ่มต้นมีราคาถูก อุณหภูมิการเผาค่อ นข้างต่ำ การควบคุมบรรยากาศการเผา ไม่ยุ่งยากมากนัก เพราะต้องการเพียงควบคุม บรรยากาศ ให้เป็นไนโตรเจน โดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มความดัน และสามารถผลิตได้โดยแทบจะไม่ต้องกลึงแต่งหลังเผา

- ชิ้นงานมีขนาดใกล้กับขนาดสุดท้ายชิ้นงาน เพราะกระบวนการผลิตไม่ก่อให้เกิดการหดตัว เหมือนการเผาเซรามิกส์ทั่วไป ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีขนาดใกล้เคียงกับขนาดชิ้นงานหลังขึ้นรูป และสามารถกลึงแต่งรูปร่างได้โดยวิธีทั่วไปที่ใช้สำหรับโลหะ ทำให้สา มารถผลิตชิ้นส่วนที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ โดยมีขนาดตามค่าเผื่อทางวิศวกรรม

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของซิลิคอนไนไตรด์

คุณสมบัติของซิลิคอนไนไตรด์	
สถานะโดยทั่วไป	ของแข็ง
ความหนาแน่น	2.8 กรัม-ลูกบาศก์เซนติเมตร
จุดหลอมเหลว	1750-1900 องศาเซลเซียส
ความต้านทานจำเพาะ	$>10^{16}$ โอห์ม-เซนติเมตร
ความทนแรงอัด	770 เมกกะปาสคาล
ความทนแรงดัด	550 เมกกะปาสคาล
ค่าความเหนียว	3.6 เมกกะปาสคาล(เมตร)$^{1/2}$

ที่มา:smith,1990

2.4 ชนิดและคุณสมบัติของวัสดุอิเล็กโตรดที่ใช้ในการทดลอง

ตามหลักทฤษฎีแล้ว วัสดุที่สามารถนำไฟฟ้าได้ดี นั้นสาม ารถนำมาทำเป็นวัสดุอิเล็กโตรดได้ทั้งสิ้น แต่การจะเลือกวัสดุที่นำมาทำเป็นอิเล็ กโตรดควรจะคำนึงถึงคุณสมบัติอื่นด้วย เนื่องจากรูปร่างของชิ้นงานที่ต้องการก็ขึ้นอยู่กับรูปร่างของอิเล็ กโตรด ดังนั้นวัสดุที่นำมาการขึ้นรูปเป็นอิเล็กโตรดก็ควรจะทำได้ง่าย อีกทั้งเมื่อนำอิเล็กโตรดมาสปาร์คชิ้นงาน ก็จะทำใ ห้อิเล็กโตรดสึกได้เช่นกัน ค่าใช้จ่ายในการกัดชิ้นงานด้วยไฟฟ้านี้จึงขึ้นอยู่กับอิเล็กโตรดเป็นส่วนใหญ่

2.4.1 คุณลักษณะของวัสดุอิเล็กโตรดที่ดี ควรมีคุณสมบัติดังนี้

1. ง่ายต่อการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีที่มีค่าใช้จ่ายไม่แพง
2. มีอัตราการสึกช้า
3. มีความต้านทานต่อการใช้งาน หรือมีความทนทาน
4. สามารถนำความร้อนและไฟฟ้าได้ดี
5. ให้ประสิทธิภาพต่อการขจัดเนื้องานออกจากชิ้นงานได้ดี

วัสดุที่สามารถนำมาทำเป็นอิเล็ กโตรดได้มีมากมายหล ายอย่าง เช่น ทองแดง , ทองเหลือง, กราไฟต์, ทองแดง-กราไฟต์, ทองแดง-ทังสเตน, เงิน-ทังสเตน และสังกะสีผสม แต่ในการทดลองครั้งนี้จะเลือกวัสดุอิเล็กโตรด 2 ชนิด ได้แก่ ทองแดง และทองเหลือง เท่านั้น

2.4.2 อิเล็กโตรดทองแดง (Copper electrode)

ทองแดงเป็นวัสดุที่เป็นตัวนำความร้อนที่ดีและมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนดีอีกด้วย มีความบริสุทธิ์สูงมาก มีลักษณะการจับตัวที่แน่น และมีราคาถูกนิยมใช้ในการดังนั้นทองแดงจึงถูกใช้ทำเป็นส่วนประกอบของหม้อต้มน้ำเครื่องถ่ายเทความร้อน ฯลฯ คุณสมบัติของทองแดงอีกประการหนึ่งก็คือ มีความต้านทานจำเพาะต่ำ ปริมาณทองแดงที่ผลิตได้ประมาณครึ่งหนึ่งใช้ในการอุตสาหกรรมไฟฟ้า เช่น ใช้ทำสายไฟฟ้าขดลวดที่ใช้ในมอเตอร์และตัวกำเนิดไฟฟ้าไฟฟ้า ฯลฯ

อิเล็กโตรดทองแดง มีอัตรา การขจัดเนื้องานที่อยู่ในเกณฑ์ดี และมีอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดที่สูงกว่าอิเล็กโตรดแกรไฟต์เมื่อใช้พลังงาน สูง [ทวีป จีระประดิษฐ,2538] แต่ถ้าใช้ความต่างศักย์สูงและช่วงระยะเวลาของ พัลล์เพิ่มก็จะสามารถช่ วยลด อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดลงได้จึงเลือกทองแดงแบบกลวงเป็นอิเล็กโตรดที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
[อภิวัฒน์ มุตตามระ, 2550]

ข้อดีของอิเล็กโตรดทองแดง

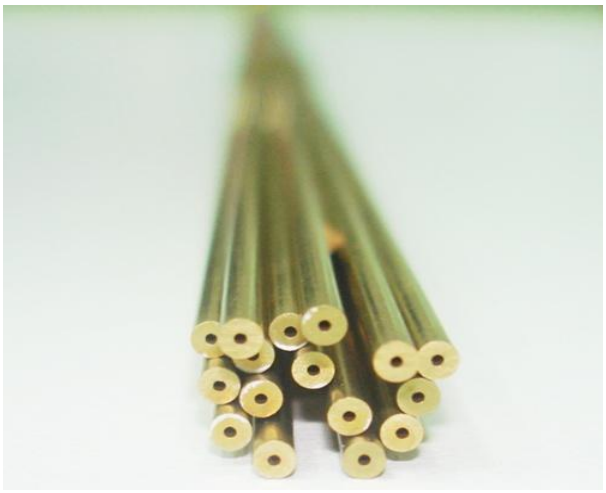
- ทองแดงสามารถใช้งานทั้งงานกัดหยาบและงานกัดละเอียด
- ให้อัตราการกัดเนื้อโลหะสูง แต่การสึกหรอต่ำ

ข้อเสียของอิเล็กโตรดทองแดง

- ความหนาแน่นสูง
- การขยายตัวทางความร้อนสูง
- รูปทรงไม่เสถียรเมื่อมีขนาดบาง

2.4.3 **อิเล็กโตรดทองเหลือง** (Brass electrode)

ทองเหลือง เป็นโลหะผสม ที่มีทองแดง และสังกะสี เป็นส่วนประกอบหลัก ปริมาณของสังกะสีนั้นแปรเปลี่ยนไป ระหว่าง 5 - 45 เปอร์เซ็นต์ สามารถนำไฟฟ้าและนำความร้อนได้ดี ทนทานต่อการสึกกร่อนและทนทานต่ อการกัดกร่อน ทำให้ได้ทองเหลืองที่มีคุณสมบัติเฉพาะตัวที่แตกต่างกันไป ทองเหลืองแตกต่างจาก สำริดตรงที่ สำริดมีส่วนประกอบของทองแดงและดีบุกเป็นหลัก แต่ทองเหลือ งบางชนิดก็ถูกเรียกว่า "สำริด" ก็มี ทองเหลืองนั้นมีสีเหลือง จึงมีลักษณะบางส่วนคล้าย ทองคำ มีความต้านทานต่อการเกิดสนิมได้ดีพอสมควร สังกะสีในทองเหลืองทำให้ทองเหลืองมีสมบัติการต้านแรงดึงและความเหนียวสูงขึ้น ความแข็งจะสูงกว่าทองแดงมาก สมบัตินี้จะดีขึ้นเรื่อย ๆ ตามปริมาณของสังกะสีที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อปริมาณสังกะสีมีมากเกินไป โดยเฉพาะเมื่อมากกว่า 40 เปอร์เซนต์ เราพบว่าความเหนียวของโลหะจะลดลงมาอย่างมากจนไม่เหมาะสำหรับใช้งาน ดังนั้น ทองเหลืองในงานวิศวกรรมจึงมีพิกัดขั้นสูงของปริมาณสังกะสีไม่เกิน 40 เปอร์เซนต์ ทองเหลืองที่มีสังกะสีประมาณ 30 เปอร์เซนต์ โดยน้ำหนักเป็นทองเหลืองที่มีความแข็งแรงและความเหนียวสูงมากที่สุด จึงเป็นส่วนผสมของทองเหลืองที่ได้รับความนิยมใช้งานมากที่สุด



ภาพที่ 2.5

อิเล็กโตรดแบบกลวง

ตารางที่ 2.2

แสดงคุณสมบัติทั่วไปของทองแดงและทองเหลือง

คุณสมบัติ	ทองแดง	ทองเหลือง
สถานะโดยทั่วไป	ของแข็ง	ของแข็ง
ความหนาแน่น	8.96 กรัม-ลูกบาศก์เซนติเมตร	7.1 กรัม-ลูกบาศก์เซนติเมตร
จุดหลอมเหลว	1084.62 องศาเซลเซียส	419 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	2567 องศาเซลเซียส	907 องศาเซลเซียส
ความต้านทานไฟฟ้า	16.78 นาโนโอห์ม-เซนติเมตร	0.063 นาโนโอห์ม-เซนติเมตร
การนำความร้อน	300 เคลวิน	159 เคลวิน

ที่มา: Eisenstadt,1970

2.5 วรรณกรรมปริทรรศน์

งานวิจัยฉบับนี้ได้ใช้อิเล็กโตรด 2 ชนิดคือ ทองแดงและทองเหลืองซึ่งเป็นชนิดรูกลวงบนชิ้นงานเซรามิกส์ เกรด ASN1 และทำการวัดผลโดย อัตราการขจัดเนื้องาน , อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด และความหยาบผิวเฉลี่ย ซึ่งงานวิจัยที่มีความเกี่ยวข้อง และสอดคล้องกับงานวิจัยมีดังนี้

งานวิจัยฉบับนี้เป็นการวิเคราะห์ ปัจจัยของการกัดอาร์คซิลิคอนไนไตรด์ด้วยไฟฟ้า และเนื่องจากเครื่องกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า เป็นเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้าจึงทำให้การอาร์คบนชิ้นงานที่ไม่นำไฟฟ้านั้นเป็นไปได้ยากมาก Fukuzawa Y. และ คณะ ได้ศึกษาการเจาะวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้าด้วยเครื่องกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า เป็นครั้งแรกบนซิลิคอนไนไตรด์ (Si_3N_4) ซึ่งมีความต้านทานจำเพาะมากกว่า 10^{16} โอห์ม-เซนติเมตร ด้วยเทคนิคกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า บนวัสดุช่วยสปาร์ค (Assisting electrode) โดยมีการใช้แผ่นโลหะหรือแผ่นตาข่ายทองแดงกดแนบกับวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้าเมื่อเริ่มสปาร์ค อิเล็กโตรดจะสปาร์คบนวัสดุ ช่วยอิเล็กโตรด สปาร์คก่อน จากนั้นจะผ่านมายังวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้าโดยมีชั้นตัวนำ (Conductive Layer) ซึ่งถูกสร้างระหว่างกระบวนการสปาร์ค ชั้นตัวนำนี้ส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยสารคาร์บอนซึ่งมาจากส่วนผสมของน้ำมัน การกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้านี้สามารถกระทำได้ต ราบใดที่ชั้นตัวนำนี้สามารถถูกสร้างขึ้นระหว่างกระบวนการ กัดอาร์คด้วยไฟฟ้า

ต่อมา Fukuzawa. และคณะ ทำการศึกษาว่าวัสดุที่ใช้ช่วยอิเล็กโตรดสปาร์คเพื่อเป็นการสร้างชั้นเหนี่ยวนำ โดยการนำ คอลลอยด์คาร์บอน ทาบนวัสดุแล้วนำไปอบ วิธีนี้ถูกเรียกว่า ชั้นคาร์บอนอบ (Carbon Baked Layer) วิธีนี้คือการนำ คอลลอยด์คาร์บอน ทาบนชิ้นงานแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ใช้เวลาประมาณ 7 นาที โดยชั้นความหนาของวัสดุช่วยอิเล็กโตรดต้องมีความหนามากกว่า 0.5 มม. วิธีนี้ผู้ปฏิบัติการทดลองสามารถปฏิบัติเองได้ง่าย ความแตกต่างของวัสดุในวัส ดุช่วยอิเล็กโตรดสปาร์ค และความหนาของชั้นวัสดุช่วย อิเล็กโตรดสปาร์คนั้นไม่มีผลกระทบต่อสมบัติของการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า

โดยที่ปัจจัยที่เครื่อง กัดอาร์คด้วยไฟฟ้า สามารถ ปรับค่าได้มีดังนี้คือ ขั้วอิเล็ กโตรด ,ความต่างศักย์ , เวลาเปิด , เวลาปิด , และกระแสไฟฟ้า ซึ่ งอภิวัฒน์ และอนันต์ ได้ทำการ ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของ EDMสำหรับซิลิคอนไนไตรด์ ซึ่งจะมีปัจจัยเพียง 3 ปัจจัย คือ กระแสไฟฟ้า เวลาเปิด และ เวลาปิด ประสิทธิภาพของการกัดอาร์คและอัตราการสึกหรอของแท่งอิเล็กโตรด อิเล็กโตรดที่ใช้คือ แท่งทองแดงขนาดเส้นผ่าศู นย์กลาง 1 มิลลิเมตร ผลที่ได้จากการทดลองพบว่าปัจจัยประสิทธิภาพที่ให้อัตราการขจัดมากที่สุดคือ 20 เปอร์เซ็นต์ กระแสไฟฟ้า 2 และ 3 แอมแปร์ ให้อัตราการขจัดใกล้เคียงกันแต่อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดที่กระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์ จะต่ำกว่า 3 แอมแปร์ การพิจารณาผลการทดลองไ ด้วิเคราะห์ธาตุด้วยเครื่อง วัดการกระจายพลังงานสเปกโทรสโคปี (EDS) พบว่าซิลิคอนจากชิ้นงานได้เคลือบที่ปลายแท่งอิเล็กโตรด สิ่งที่เกิดขึ้นนี้ถือว่าเป็นส่วนหนึ่งในการช่วยลดอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด

Mohri N. และคณะ ได้ทำการศึกษาว่าคาร์บอนในน้ำมันที่เคลือบแท่งอิเล็ก โตรดที่ได้จากการสปาร์คมีส่วนสำคัญอย่างยิ่งเป็นการช่วยลดอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด (Electrode Wear Ratio, EWR) จากการวิเคราะห์ธาตุซิลิคอนนี้จึงสามารถที่จะวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นและพิจารณาได้ว่าซิลิคอนจากชิ้นงานที่มาเคลือบแท่งอิเล็กโตรดนั้น ในระหว่างการส ปาร์คมีส่วนสำคัญในการลดอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดได้เช่นกัน อย่างไรก็ตามชั้นซิลิคอนที่เคลือบอิเล็กโตรดนั้นก็มีส่วนทำให้การนำไฟฟ้าลดลง ซึ่งผลที่เกิดขึ้นในทางกลับกันคือก่อให้เกิดอุปสรรคในการสปาร์คเช่นกัน

โดยจากงานวิจัยเมื่อได้ปัจจัยที่เหมาะสมแล้วจึงต้องนำวิ ธีคิดทางคณิตศาสตร์โดย George และคณะ ได้ศึกษาผลกระทบจากชิ้นงานทดสอบด้วย การทดลองแบบทากูชิ ซึ่งไปมีผลต่อการแปรรูป, อัตราการขจัดเนื้องาน และอัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโทรด ผลที่ได้รับคือสามารถลดอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด หากกำหนดค่าปัจจัยในระดับต่ำที่สุด และอั ตราการขจัดเนื้องานจะสูง ถ้ากำหนดค่าปัจจัยในระดับสูงที่สุด

สำหรับวิธีการวิเคราะห์ผลกระทบหลัก ณัฐดนัย และคณะ ได้ทำการทดลองแบบทากูชิและนำผลที่ได้จากการทดลองมาทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม มินิเทปซึ่งผู้วิจัยได้นำโปรแกรมมินิเทปมาทำการวิเคราะห์ดูแผนภูมิผลกร ะทบหลักของ อัตราการขจัดเนื้องาน , อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด ว่าค่าของกระแสไฟฟ้าและปัจจัยประสิทธิภาพที่เวลาเปิดและเวลาปิดที่แตกต่างกันมีผลต่อการทดลอง

ซึ่งเมื่อผู้วิจัยทราบค่าปัจจัยที่เหมาะสมจึงนำชิ้นงานไปตรวจสอบค่าความหยาบของพื้นผิวจากการศึกษา วีระศักดิ์ บุตรเถื่อน พบว่าเงื่อนไขความสัมพันธ์ที่เหมาะสม จากตัวแปรต่างๆ คือ ขั้วอิเล็กโตรด , เวลาเปิด , เวลาปิด , ระดับความต่างศักย์ ระดับกระแสไฟฟ้า และชนิดของอิเล็กโตรด โดยการทดลอง หาค่าปัจจัยประสิทธิภาพที่เหมาะสม , ความต่างศักย์วงจรเปิด แ ละกระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบกับอิเล็ กโตรด 3 ชนิดโดยสรุปได้ว่า ตามลำดับ นำผลการทดลองมาสรุปได้ว่าอิเล็กโตรดแกรไฟต์ เปนอิเล็กโตรดที่ให ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยสูงที่สุด อิเล็กโตรดทองแดง-แกรไฟต์ เปนอิเล็กโตรดที่ใหความหยาบผิวเฉลี่ยอยู ในระดับปานกลาง และอิเล็กโตรดทองแดง-ทังสเตน เปนอิเล็กโตรดที่ใหความหยาบผิวเฉลี่ยต่ำที่สุด