บทที่ 2

ทฤษฎีและวรรณกรรมปริทรรศน์

2.1 เครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า

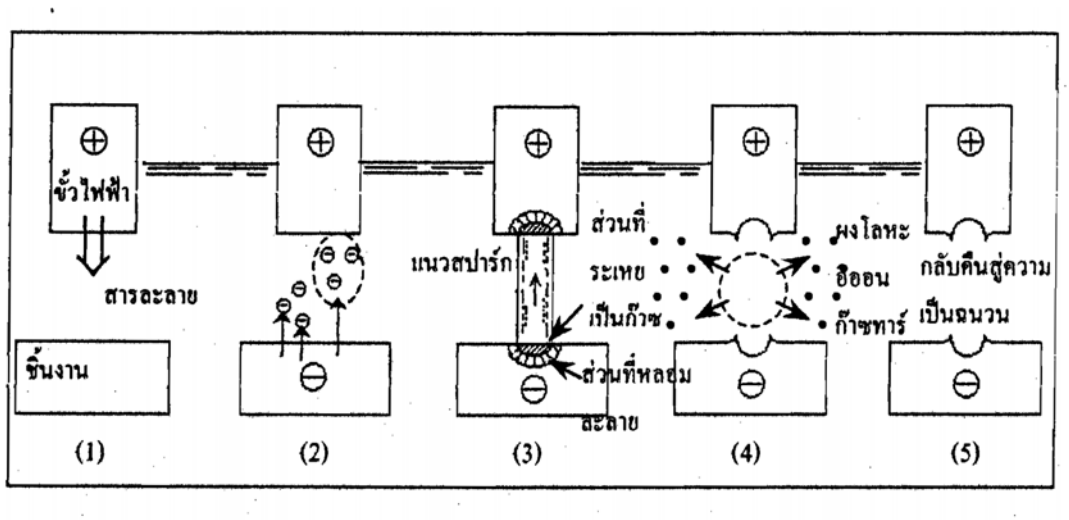
ปัจจุบัน ในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนโลหะหรืออุตสาหกรรมแม่พิมพ์ไม่ว่าจะเป็นแม่พิมพ์สำหรับโลหะหรือแม่พิมพ์สำหรับพลาสติกนั้น ล้วนแล้วแต่ต้องผ่านขั้นตอนการผลิตที่ใช้เครื่อง EDM หรือที่เรียกว่า Electrical Discharged Machine โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก คือ Sink-EDM และ Wire-EDM ซึ่งในปัจจุบันอุตสาหกรรมของไทยมีใช้อยู่เป็นจำนวนมาก โดยที่การกัดเซาะโลหะด้วยตัวนำไฟฟ้า (Electrical Discharged Machining Technology) เป็นกระบวนการที่มีผลต่อคุณภาพของชิ้นงานเป็นอย่างมาก เพราะเป็นกระบวนการที่ต้องเก็บรายละเอียดของชิ้นงาน ซึ่งเกือบจะเป็นขั้นตอนสุดท้าย อีกทั้งเป็นกระบวนการที่ใช้เวลาในการผลิตนานมากและเป็นวิธีที่เหมาะกับการผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนที่ทำด้วยวิธีการตัดเฉือนทั่วไปได้ยาก สามารถตัดเฉือนชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งมาแล้ว ใช้ผลิตส่วนเบ้าของแม่พิมพ์ การตัดเฉือนโลหะจะใช้การกัดเซาะทางไฟฟ้ามีอิเล็กโตรดเป็นตัวนำไฟฟ้า

ภาพที่ 2.1
เครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า (EDM)

2.1.1 หลักการของการกัดโลหะด้วยไฟฟ้า

การกัดโลหะด้วยไฟฟ้า คือ วิธีการขึ้นรูปซึ่งใช้กับโลหะเป็นส่วนใหญ่ แต่ในปัจจุบันสามารถขึ้นรูปกับวัสดุที่ไม่เป็นโลหะได้ เช่น เซรามิกส์ โดยการประยุกต์ใช้การสปาร์คโดยการทาตัวนำไฟฟ้าบนชิ้นงาน

วิธีการขึ้นรูปประเภทนี้ จะอาศัยการใช้พลังงานระดับสูงที่ถูกปล่อยออกมาในช่วงเวลาที่สั้นมาก เพื่อให้เกิดการสปาร์คอย่างมีเสถียรภาพและประสิทธิภาพที่ ควบคุมให้เกิดการสปาร์คหลายแสนครั้งใน 1 วินาที ซึ่งสภาพของการสปาร์ค เป็นดังนี้



ภาพที่ 2.2

การสปาร์คแต่ละครั้ง [Inoue และคณะ, 1997]

2.1.1.1 การใส่แรงดันไฟฟ้า

เริ่มต้นป้อนแรงดันไฟฟ้าที่ระหว่างชิ้นงานกับขั้วไฟฟ้า (อิเล็กโตรด) โดยใช้ของเหลวตัวกลางที่มักจะใช้น้ำมันเป็นตัวรักษาให้ความต้านทานของฉนวนระหว่างขั้วสูงจะสามารถลดระยะระหว่างขั้ว (ช่องสปาร์ค) ให้แคบลงได้

2.1.1.2 การสูญเสียความเป็นฉนวน

ขยับระยะระหว่างขั้วให้ใกล้เรื่อยๆ จนถึงระยะที่ต้องการ (หลายไมโครเมตร จนถึงหลายร้อยไมโครเมตร) สารละลายจะเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวน ไอออนประจุลบจะถูกดึงไปสู่ฝั่งที่เป็นบวก

2.1.1.3 การสปาร์ค,หลอมละลาย

หลังจากเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวน อิเล็กตรอนที่เป็นประจุลบเริ่มไหลเป็นจำนวนมากอย่างรุนแรง ซึ่งนั่นก็คือ การสปาร์ค นั่นเอง บริเวณส่วนที่เกิดการสปาร์คจะมีกระแสไฟฟ้าที่มีความหนาแน่นสูงมากไหลในช่วงเวลาสั้นๆ พลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมาช่วงนี้จะทำให้บริเวณที่เกิดการสปาร์คมีอุณหภูมิสูงมาก (3,000 ºC ขึ้นไป) ชิ้นงานบางส่วนจะถูกหลอมละลาย สารละลายบริเวณที่เกิดการสปาร์คจะกลายเป็นก๊าซ

2.1.1.4 การเย็นตัว

ความดันที่เกิดขึ้นจะทำให้ส่วนที่หลอมละลายของชิ้นงานจะหลุดกระเด็นออกไป ซึ่งเมื่อถูกสารละลายรอบข้างดูดแย่งความร้อนไปจะเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วกลายเป็นเศษผงที่มีขนาดเล็ก

2.1.1.5 การกลับคืนสู่ความเป็นฉนวน

หลังจากที่การสปาร์คหนึ่งครั้งจบลง จะมีการรอจนกว่าสารละลายกลับคืนสู่ความเป็นฉนวน โดยที่ไม่มีการใส่แรงดันไฟฟ้าเข้าไป ซึ่งการรอในช่วงนี้เป็นการป้องกันการเกิดสปาร์คผิดปกติ เช่น การสปาร์คซ้ำหรือการสปาร์คเฉพาะบางจุด อันเนื่องมาจากการสะสมหรือทับถมกันของอิออนที่ตกค้างอยู่ระหว่างขั้วหรือเศษผงที่เกิดจากการสปาร์ค ภายหลังจากการกลับคืนสู่ความเป็นฉนวนก็จะเริ่มทำการสปาร์คเช่นเดิมอีก

2.1.2 ประโยชน์ของการแปรรูปด้วยเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า

1. มีความสามารถในการแปรรูปโลหะแข็งหรือโลหะผสม ซึ่งไม่สามารถทำได้โดยวิธีธรรมดา ดังนั้นกรรมวิธีของเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้าจึงมีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมการทำแม่พิมพ์และเครื่องมือที่ทำจากวัสดุโลหะแข็ง เช่น ทังสเตนคาร์ไบด์

2. มีความสามารถในการผลิตรูปร่างใดๆได้เนื่องจากกัดเนื้อโลหะโดยอาศัยการสปาร์ค จึงไม่ต้องการความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ระหว่างอิเล็กโตรดกับชิ้นงาน อาศัยเพียงอิเล็กโตรดเคลื่อนที่ลงมาในชิ้นงานเท่านั้น ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะแปรรูปชิ้นงานใดๆ ก็ได้โดยเพียงใช้อิเล็กโตรดแบบเดียว

3. การแปรรูปด้วยวิธีอีดีเอ็มจะมีผลกระทบทางความร้อน แต่เป็นผลกระทบที่เกิดขึ้นเฉพาะที่จึงไม่ส่งผลกระทบต่อวัสดุเป็นส่วนใหญ่

2.2 กระแสไฟฟ้า (Discharge current) และความต่างศักย์วงจรเปิด (Open-circuit voltage)

ความต่างศักย์วงจรเปิด (V) ที่ต่างกันระหว่างอิเล็กโทรดและชิ้นงาน ทำให้เกิดการถ่ายเทประจุและการไหลของกระแสไฟฟ้า (I) ในขณะสปาร์คจะมีกระแสไฟฟ้าที่ความหนาแน่นสูงมากไหลในช่วงเวลาสั้นๆ โดยกระแสไฟฟ้าอาจมีขนาดตั้งแต่ 0.1 แอมแปร์ ถึงหลายร้อยแอมแปร์ พลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมาในช่วงนี้ ทำให้บริเวณที่เกิดการสปาร์คมีอุณหภูมิสูงมาก โดยอาจสูงถึง 20,000 °C พลังงานที่ใช้การแปรรูปด้วย เครื่องกัดอาร์คโลหะด้วยไฟฟ้า มีอิทธิพลต่อความเค้นตกค้าง ในลักษณะแปรผันตาม นั่นหมายถึง ถ้าใช้พลังงานน้อยก็จะช่วยให้ความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยตาม รอยแตกร้าวบนพื้นผิวชิ้นงานก็น้อยลงด้วย (H. Gripenberg และคณะ, 2008)

2.3 เวลาเปิด (On Time, T-on) และเวลาปิด (Off Time, T-off)

เวลาเปิด คือ ช่วงเวลาที่ เกิดการถ่ายเทประจุ หรือเวลาการปล่อยกระแส โดยเมื่อความต่างศักย์ระหว่างอิเล็กโตรดและชิ้นงานสูงขึ้น เกิดการปลดปล่อยพลังงาน และการสปาร์คที่ผิวของชิ้นงาน

เวลาปิด คือ ช่วงเวลาที่หยุดการสปาร์ค หรือช่วงเวลาที่ไม่มีกระแสไหลจากอิเล็กโตรดไปที่ชิ้นงาน ของเหลวตัวกลางสามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมก่อนแตกตัวได้ ซึ่งเมื่อค่าของช่วงเวลาการสปาร์คเปลี่ยนไป มีผลทำให้ค่าปัจจัยประสิทธิภาพ (Duty Factor) เปลี่ยนไปด้วย ตามสมการที่ 1 ดังนี้

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

2.4 วัสดุอิเล็กโตรด (Electrode Material)

อิเล็กโตรดในกรรมวิธีอีดีเอ็มจะเป็นตัวกำหนดรูปร่างหรือรูที่ทำการเจาะของชิ้นงาน ดังนั้นการเลือกใช้อิเล็กโตรดจึงต้องเลือกให้เหมาะสมกับชิ้นงานและรูปร่างที่เราต้องการ

2.4.1 **คุณสมบัติของอิเล็กโตรดในกรรมวิธีอีดีเอ็ม**

1. เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี
2. เป็นตัวนำความร้อนที่ดี
3. ต่อต้านการกัดเซาะจากไฟฟ้าหรือมีการสึกหรอที่ต่ำ
4. มีความสามารถในการทำงานดี มีราคาถูก
5. มีจุดหลอมละลายและจุดเดือดสูง
6. มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อโดนความร้อนต่ำ

2.4.2 **วัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโตรด**

วัสดุที่นำไฟฟ้าได้ดีทุกชนิด สามารถนำมาเป็นอิเล็กโตรดได้ แต่วัสดุที่จะทำให้ได้อิเล็กโตรดที่มีคุณสมบัติดีนั้นควรจะมีจุดหลอมเหลวสูง และความต้านทานไฟฟ้าต่ำด้วย เพื่อให้เหมาะสำหรับการทำงานกับเครื่องกัดอาร์คโลหะด้วยไฟฟ้าซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ได้ดังนี้

1. กลุ่มโลหะ เช่น ทองแดง ทองแดง-ทังสเตน ทองเหลือง เงิน-ทังสเตน และเหล็ก
2. กลุ่มอโลหะ เช่น แกรไฟต์เกรดต่างๆ
3. กลุ่มโลหะและอโลหะผสมกัน เช่น ทองแดง-แกรไฟต์

การแปรรูปประเภทตัดจะใช้เครื่องมือ เช่น Cutting Tool, End Mill สำหรับตัดแปรรูปชิ้นงาน ส่วนการแปรรูปด้วยวิธีการกัดด้วยไฟฟ้า จำเป็นต้องมีเครื่องมือขึ้นรูปด้วยเช่นกัน ซึ่งเรียกเครื่องมือนี้ว่า “อิเล็กโตรด (Electrode)” ซึ่งอิเล็กโตรดจะมีรูปทรงเหมือนกับชิ้นงานต้นแบบ แต่จะมีรูปทรงตรงกันข้ามกับชิ้นงานที่ถูกแปรรูปด้วยอิเล็กโทรดนั้นๆ กล่าวคือ ส่วนที่ยื่นออกมาของอิเล็กโตรด จะตรงกับส่วนที่เป็นหลุมลงไปของชิ้นงาน การขึ้นรูปเช่นนี้เรียกว่า “การขึ้นรูปประเภทถ่ายแบบ”คุณสมบัติของอิเล็กโตรดที่ดีมีดังนี้

1) ง่ายต่อการขึ้นรูป
2) ให้ประสิทธิภาพสูงในการตัดโลหะออกจากชิ้นงาน
3) เป็นสื่อนำความร้อนและไฟฟ้า
4) ต้านทานต่อการใช้งาน หรือมีอัตราการสึกหรอช้า

วัสดุที่นำไฟฟ้าได้ดีทุกชนิด สามารถนำมาเป็นอิเล็กโตรดได้ วัสดุที่ดีในการใช้เป็นอิเล็กโตรด ควรจะมีจุดหลอมเหลวสูง และความต้านทานไฟฟ้าต่ำ การทำงานด้วนเครื่อง EDM ค่าใช้จ่ายส่วนใหญ่มักจะตกอยู่กับอิเล็กโตรด ดังนั้น การเลือกใช้อิเล็กโตรดอย่างเหมาะสม จะเป็นผลดีและคุ้มค่ากับการใช้งานเครื่องเครื่องกัดอาร์คโลหะด้วยไฟฟ้าอีกด้วย

2.5 **อัตราป้อน** (Servo)

อัตราป้อน คือ ความเร็วของอิเล็กโตรดที่เคลื่อนที่ในแนวแกน z มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร/นาที

2.6 **อัตราการสึกของกร่อนของอิเล็กโตรด**

การแปรรูปด้วยการกัดขึ้นรูปด้วยไฟฟ้านั้น อิเล็กโตรดที่ใช้จะมีการสึกหรอซึ่งขึ้นกับปัจจัยต่างๆ เช่น วัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโตรด, ขั้วของอิเล็กโตรด เป็นต้น

การลดการสึกหรอของอิเล็กโตรดทำได้โดยการเลือกวัสดุที่คุณสมบัติต้านทานการการสึกหรอจากการสปาร์ค เช่น เงินทังสเตน (AgW) และทองแดงทังสเตน (CuW) ซึ่งมีอัตราการสึกหรอประมาณ 10-50% โดยทั่วไปการสึกหรอของอิเล็กโตรดจะเกิดขึ้นเร็วที่บริเวณขอบและมุม เป็นดังสมการที่ 2

EWR = (ระยะที่อิเล็กโตรดสึกหรอไป / ระดับความลึกของชิ้นงานที่แท้จริง) × 100%.....(2)

2.7 **อิเล็กโทรดทองเหลือง** (Brass Electrode)

ทองเหลือง เป็นโลหะผสมที่มีทองแดงและสังกะสีเป็นส่วนประกอบหลัก ปริมาณของสังกะสีนั้นแปรเปลี่ยนไป ระหว่าง 5 - 45 เปอร์เซนต์ ทำให้ได้ทองเหลืองที่มีคุณสมบัติเฉพาะตัวที่แตกต่างกันไป ทองเหลืองนั้นมีสีเหลือง จึงมีลักษณะบางส่วนคล้ายทองคำ มีความต้านทานต่อการเกิดสนิมได้ดี

ภาพที่ 2.3
อิเล็กโตรดทองเหลืองแบบกลวง

ตารางที่ 2.1

คุณสมบัติของอิเล็กโตรดทองเหลือง

คุณสมบัติทางกายภาพ	
-สถานะโดยทั่วไป	ของแข็ง
-จุดหลอมเหลว	900-940 องศาเซลเซียส
-การนำความร้อน	(159K) 116 $W.m^{-1}.K^{-1}$

2.8 **อิเล็กโตรดทองแดง** (Copper Electrode)

อิเล็กโตรดทองแดงสามารถนำไฟฟ้า และนำความร้อนได้ดี ทนทานต่อการสึกกร่อน และทนทานต่อการกัดกร่อน มีความบริสุทธิ์สูงมาก มีลักษณะการจับตัวที่แน่นหนา และมีราคาถูก

อิเล็กโตรดทองแดง มีอัตราการขจัดเนื้องานที่อยู่ในเกณฑ์ดี และมีอัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโตรดที่สูงกว่าอิเล็กโตรดแกรไฟต์เมื่อใช้พลังงานสูง [Inoue และคณะ, 1997, H. Gripenbergและคณะ, 2008, P.M.George, 2004] แต่ถ้าใช้ความต่างศักย์สูงและช่วงระยะเวลาของพัลล์เพิ่มก็จะสามารถช่วยลดอัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโตรดลงได้จึงเลือกแท่งทองแดงเป็นอิเล็กโตรดที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งอิเล็กโตรดทองแดงที่เลือกใช้เป็นแบบกลวง

ภาพที่ 2.4

อิเล็กโตรดแท่งทองแดง

ตารางที่ 2.2

คุณสมบัติทางกายภาพของทองแดง

คุณสมบัติทางกายภาพ	
สถานะโดยทั่วไป	ของแข็ง
-จุดหลอมเหลว	1084.62 องศาเซลเซียส
-การนำความร้อน	(300K) 401W.m^{-1}.K^{-1}

2.9 **ความหยาบผิวเฉลี่ย** (Average Surface Roughness , R_a)

ความหยาบผิวเฉลี่ย (Average Surface Roughness, R_a) มีหน่วยเป็น ไมโครเมตร สามารถวัดได้ด้วยเครื่องวัดความหยาบผิว (Profilometer) ซึ่งเป็นเครื่องมือทดสอบความหยาบละเอียดของผิววัสดุ วัดโดยใช้ปลายเข็มขนาดเล็กลากไปบนผิววัสดุ ลักษณะการสปริงขึ้นลงของปลายเข็มเมื่อลากผ่านผิววัสดุ จะถูกแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าผ่านระบบการวิเคราะห์สัญญาณแสดงผลเป็นแผนภาพและค่าความหยาบผิวเฉลี่ยในหน่วยไมโครเมตรเมื่อทำการแปรรูปด้วยเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้าแล้ว พื้นผิวที่ทำการสปาร์คจะมีความหยาบของพื้นผิวอยู่ในระดับหนึ่ง ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะต้องการทดสอบว่า ค่าตัวแปรต่างๆ มีผลต่อความหยาบผิวเฉลี่ยหรือไม่

2.10 **อัตราการขจัดเนื้อโลหะ หรือ อัตราการขจัดเนื้องาน** (Material Removal Rate)

อัตราการขจัดชิ้นงาน ของเครื่องกัดอาร์คโลหะด้วยไฟฟ้านั้นเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการขึ้นรูปอื่นๆ เช่น การตัด, การเจาะ, การกลึง แล้วนับว่ามีความเร็วต่ำมาก ในการใช้เงื่อนไขที่การขึ้นรูปดำเนินไปอย่างช้าๆ นั้นจะทำให้ประสิทธิภาพการผลิตต่ำ แต่ถ้าปรับใช้เงื่อนไขทำให้มีอัตราเร็วสูงขึ้น ผิวของชิ้นงานที่ได้ก็จะหยาบขึ้น จึงจำเป็นต้องหาความเร็วที่เหมาะสม และสัมพันธ์กับองค์ประกอบ หรือปัจจัยอื่นๆ ด้วย เช่น วัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโตรด, วัสดุที่เป็นชิ้นงาน, ประเภทของของเหลวตัวกลาง, ความหยาบผิว เป็นต้น สมการการหา อัตราการขจัดเนื้องาน เป็นดังสมการที่ 3

อัตราการขจัดเนื้องาน = ปริมาตรที่ชิ้นงานถูกกัดออกไป / เวลาที่ใช้.....(3)

อัตราการขจัดเนื้องาน จะมีหน่วยเป็นปริมาณของเนื้อวัสดุชิ้นงานที่ถูกขจัดออกไปต่อหน่วยเวลา โดยในการทดลองจะใช้ปริมาณเนื้อวัสดุชิ้นงานเป็น ลูกบาศก์มิลลิเมตร และหน่วยเวลาเป็นนาที

2.11 **วัสดุชิ้นงาน** (Workpiece Material)

วัสดุที่นำมาแปรรูปด้วยเครื่องกัดอาร์คโลหะด้วยไฟฟ้าจะต้องเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี ความแข็งของวัสดุไม่เป็นอุปสรรคต่อการแปรรูป เนื่องจากเครื่องเครื่องกัดอาร์คโลหะด้วยไฟฟ้าสามารถแปรรูปโลหะพวกเหล็กกล้า (Mild Steel), เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High Carbon Steel) และเหล็กคาร์ไบด์ได้ ซึ่งในการแปรรูปโลหะเหล่านี้ถือเป็นข้อดีของเครื่องเครื่องกัดอาร์คโลหะด้วยไฟฟ้า

2.11.1 **ชิ้นงานทดสอบ – เหล็กกล้าไร้สนิม**

สเตนเลส หรือตามศัพท์บัญญัติเรียกว่า เหล็กกล้าไร้สนิม เป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำ (น้อยกว่า 2%) ของน้ำหนัก มีส่วนผสมของโครเมียม อย่างน้อย 10.5% กำเนิดขึ้นในปี พ.ศ. 1903 เมื่อนักวิทยาศาสตร์พบว่า การเติมนิเกิล โมบิดินัม ไททาเนียม ไนโอเนียม หรือโลหะอื่นแตกต่างกันไปตามชนิด ของคุณสมบัติเชิงกล และการใช้ลงในเหล็กกล้าธรรมดา ทำให้เหล็กกล้ามีความต้านทานการเกิดสนิมได้

2.11.2 **ประเภทของสแตนเลสแบ่งได้ 5 ชนิดหลัก**

1. เกรดออสเตนิติก (Austenitic) แม่เหล็กดูดไม่ติด นอกจากส่วนผสมของโครเมียม 18%แล้ว ยังมีนิเกิลที่ช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนอีกด้วย ชนิดออสเตนิติกเป็นที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางมากที่สุด ในบรรดาสเตนเลสด้วยกัน ส่วนออสเตนิติกที่มีโครเมียมผสมอยู่สูง 20% ถึง 25% และนิกเกิล 1% ถึง 20% จะสามารถทนการเกิดออกซิไดซ์ได้ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งใช้ในส่วนประกอบของเตาหลอม ท่อนำความร้อน และแผ่นกันความาร้อนในเครื่องยนต์ จะเรียกว่าเหล็กกล้าไร้สนิม ชนิดทนความร้อน (Heat Resisting Steel)

2. เกรดเฟอร์ริติก (Ferritic) แม่เหล็กดูดติด มีส่วนผสมของคาร์บอนต่ำ และมีโครเมียมเป็นส่วนผสมหลัก คือประมาณ 13% หรือ 17%

3. เกรดมาร์เทนซิติก (Martensitic) แม่เหล็กดูดติด โดยทั่วไปจะมีโครเมียมผสมอยู่ 12%และมีส่วนผสมของคาร์บอนในระดับปานกลาง มักนำไปใช้ทำส้อม มีด เครื่องมือตัด และ

4. เกรดดูเพล็กซ์ (Duplex) แม่เหล็กดูดติด มีโครงสร้างผสมระหว่างเฟอร์ไรต์และออสเตไนต์ มีโครเมียมผสมอยู่ประมาณ 18-28% และนิเกิล 4.5-8% เหล็กชนิดนี้มักถูกนำไปใช้งานที่มีคลอรีนสูงเพื่อป้องกันมิให้เกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting Corrosion) และช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อน ที่เป็นรอยร้าวอันเนื่องมาจากแรงกดดัน (Stress Corrosion Cracking Resistance)

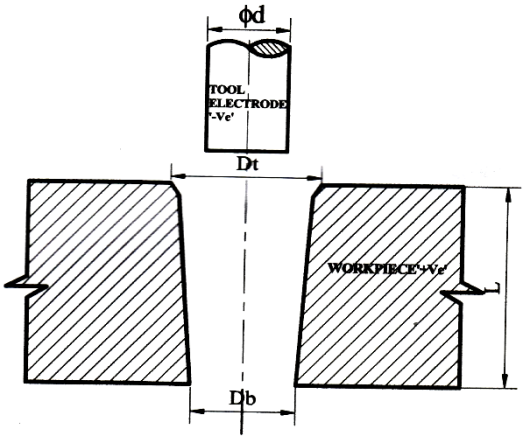
5. เหล็กกล้าชุบแข็งแบบตกผลึก (Precipitation Hardening Steel) มีโครเมียมผสมอยู่ 17 % และมีนิเกิล ทองแดง และไนโอเบียมผสมอยู่ด้วย เนื่องจากเหล็กชนิดนี้สามารถชุบแข็งได้ในคราวเดียว จึงเหมาะสำหรับทำแกน ปั๊ม หัววาล์ว และส่วนประกอบของอากาศยาน สเตนเลส สตีลที่นิยมใช้ทั่วไปคือ ออสเตนิก และเฟอร์ริติก ซึ่งคิดเป็น 95% ของเหล็กกล้าไร้สนิม ที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน

ตารางที่ 2.3

คุณสมบัติกายภาพของชิ้นงาน

วัสดุ	การนำความร้อน Btu/(hr-f -°F)	ความหนาแน่น (lbs/in^3)	ความจุความร้อนจำเพาะ (Btu/lb/°F)	จุดหลอมเหลว (°F)	การเหนี่ยวนำไฟฟ้า (A/in)^2 x10^{-3}	อัตราการขยายตัวจากอุณหภูมิ (in/in/°Fx10^{-6})
Mild Steel	26.0 - 37.5	0.284	0.122	2570	3.70	6.7
Stainless Steel	8.11	0.275	0.110	2650	9.87	6

2.12 ความเรียวในรูเจาะหลังกัดด้วยไฟฟ้า (Taper)



ภาพที่ 2.5
ลักษณะของรูที่เกิดขึ้นหลังการกัดด้วยไฟฟ้า

เนื่องจากระหว่างเกิดการสปาร์คนั้นจะเกิดเศษของวัสดุ ซึ่งจะเคลื่อนที่ด้วยของเหลวตัวกลาง เมื่อเวลาทำการสปาร์คเพื่อเจาะรูผ่านไป การเคลื่อนที่ของเศษวัสดุจะเคลื่อนที่ภายในรูที่เกิดขึ้นจึงทำให้เกิดการสปาร์คได้ไม่สมบูรณ์ รูที่เกิดขึ้นจึงมีลักษณะเป็นทรงกระบอกอย่างไม่สมบูรณ์ ลักษณะของรูที่จึงเป็นดังภาพ ซึ่งรูด้านบนจะมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางกว้างที่สุด (D_t) และรูด้านล่างมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กที่สุด (D_b) โดยที่ความสูงของรู คือ L (Inoueและคณะ, 1997) โดยสามารถแสดงค่าTaper ดังสมการที่ 4

$$\text{Taper} = (D_t - D_b) / 2L \quad \text{.....(4)}$$

2.13 การทดลองแฟคทอเรียล

การทดลองเพื่อทดสอบปัจจัย (Factor) มากกว่าหนึ่งปัจจัยพร้อมๆ กันโดยที่แต่ละปัจจัยอาจจะมีได้หลายระดับ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลร่วม (Interaction) ของปัจจัยต่างๆ (Factors) ถ้าปัจจัยไม่เป็นอิสระต่อกัน การทดลองปัจจัยเดี่ยวจะให้ภาพที่ไม่สมบูรณ์

อิทธิพลหรือทรีทเมนต์ที่เกิดขึ้นในการทดลองแฟคทอเรียลมี 3 ประเภท คือ

- อิทธิพลเดี่ยว หมายถึง การเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองที่ระดับปัจจัยหนึ่งเมื่อระดับปัจจัยอื่นเปลี่ยนแปลง
- อิทธิพลหลัก หมายถึง การเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองเมื่อระดับของปัจจัยนั้นเปลี่ยนแปลง ซึ่งก็คือค่าเฉลี่ยของอิทธิพลเดี่ยวของปัจจัยนั่นเอง
- อิทธิพลร่วม หมายถึง ความแตกต่างระหว่างผลตอบสนองของปัจจัยหนึ่งต่อการเปลี่ยนระดับของปัจจัยอื่น

2.14 การวิเคราะห์แบบพื้นที่ตอบสนอง (Response Surface)

การที่จะนำพื้นที่ตอบสนองมาใช้ ต้องมีแผนการทดลองที่เหมาะสม อย่างน้อยต้องมีตัวแปรอิสระ 2 ตัวขึ้นไป ต้องมีตัวแปรตามอย่างน้อย 1 ตัวขึ้นไป ดังนั้น แผนการทดลองที่จะสามารถสร้างพื้นที่ตอบสนองได้ คือ Factorial Design,Mixture Design, Central Composite Design (CCD), Plackett & Burman Design จากนั้นนำข้อมูลของตัวแปรอิสระแต่ละตัว (Xi) มาสร้างความสัมพันธ์กับข้อมูลตัวแปรตาม (Yi) เพื่อสร้างเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งอาจมีทั้งความสัมพันธ์กันในเชิงเส้นตรง (Linear Model) ความสัมพันธ์ในเชิงส่งผลซึ่งกันและกัน (Interaction Model) ดังนั้นสมการทางคณิตศาสตร์ทั่วไปจึงเขียนได้ดังนี้

$$Y = \beta_0 + \Sigma \beta_i X_i + \Sigma \beta_{ii} X_{i2} + \Sigma\Sigma \beta_{ij} X_i X_j + e$$

โดย Y คือตัวแปรตาม

β_0 คือ ค่าคงที่

β_i คือ สัมประสิทธิ์ของตัวแปรXi

β_{ij} คือ สัมประสิทธิ์ของตัวแปรXij

2.15 การวิเคราะห์ถดถอย

วิธีการทางสถิติที่ใช้ตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระหนึ่งตัวหรือหลายตัวกับตัวแปรตามหนึ่งตัว ใช้วิธีพลอตค่าของตัวแปรตามบนแกนตั้งและตัวแปรอิสระบนแกนนอนของกราฟ เพื่อแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างตัวแปร แล้วหาเส้นความสัมพันธ์ที่เหมาะที่สุดกับข้อมูล เส้นความสัมพันธ์นี้ใช้ในการหาค่าของตัวแปรอิสระที่จะทำนายค่าของตัวแปรตามได้ดีที่สุด

$$Y' = a + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \ldots + b_k x_k$$

เมื่อ Y' แทน คะแนนพยากรณ์ของตัวเกณฑ์ (ตัวแปรตาม)

a แทน ค่าคงที่ของสมการพยากรณ์ในรูปแบบคะแนนดิบ

$b_1, b_2, \ldots b_k$ แทน น้ำหนักคะแนนหรือสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวพยากรณ์ตัวที่ 1 ถึง ตัวที่ k ตามลำดับ

X_1, X_2, X_3 แทน คะแนนของตัวพยากรณ์ (ตัวแปรอิสระ) ตัวที่ 1 ถึง ตัวที่ k ตามละดับ

k แทน จำนวนตัวพยากรณ์ (ตัวแปรอิสระ)

2.16. วรรณกรรมปริทรรศน์

งานวิจัยฉบับนี้ได้ใช้อิเล็กโตรด 2 ชนิด คือ ทองแดง และทองเหลืองซึ่งเป็นชนิดรูกลวง บนชิ้นงาน สแตนเลส สตีล เกรด มาร์เทนซิติก และทำการวัดผลโดย อัตราการขจัดเนื้องาน, อัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโตรด, ความเรียวในรูเจาะ และความหยาบผิวเฉลี่ย ซึ่งงานวิจัยที่มีความเกี่ยวข้อง มีความสัมพันธ์ และสอดคล้องกับงานวิจัยมีดังนี้

งานวิจัยฉบับนี้เป็นการวิเคราะห์ปัจจัยของเครื่องกัดอาร์คโลหะด้วยไฟฟ้า:ซึ่งปัจจัยที่เครื่องสามารถปรับค่าได้มีดังนี้คือ เวลาเปิด, เวลาปิด, กระแสไฟฟ้า, ความดันน้ำ และอัตราป้อน (Servo) โดยชิ้นงานคือ สแตนเลส สตีล ซึ่ง (Gokul Vasudevamurthy และคณะ, 2007) ได้พบว่าถ้าเพิ่มขนาดของพัลส์จะทำให้มีการกระจายตัวของอนุภาคที่ดี และถ้าเพิ่มกระแสไฟฟ้าเข้าไปก็จะทำให้อนุภาคมีความแข็งแรงมากขึ้นและมีอัตราการขจัดชิ้นงานที่มากขึ้นด้วย

สำหรับวิธีการวัดความเที่ยงตรงของรูเจาะ (B. B. Pradhan และคณะ, 2008) ได้เสนอวิธีการคำนวณความเรียวในรูเจาะ คือ ความเรียวในรูเจาะ = $(D_t - D_b) / 2L$ โดยที่ D_t คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของรูด้านบน ,D_bคือ เส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะด้านล่าง และ L คือความสูงของรูเจาะ โดยที่ทำการเจาะรูชิ้นงานไทเทเนียม เพื่อทำการหาปัจจัยที่ดีที่สุดซึ่งตัวแปรมีดังนี้ กระแสไฟฟ้า, ค่าความต่างศักย์, เวลาเปิด และความดันน้ำโดยใช้วิธีทากูชิ และ s/n ratio โดยวัดค่าจาก อัตราการขจัดเนื้องาน และอัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโทรด, ค่าเกินพิกัด (Over Cut :OC) และความเรียวในรูเจาะ ผลที่ได้รับคือ อัตราการขจัดเนื้องาน และอัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโตรดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้า สำหรับค่าเกินพิกัด และความเรียวในรูเจาะ มีผลมาจาก ค่าความต่างศักย์, เวลาเปิดซึ่งถ้าค่าความต่างศักย์, เวลาเปิดเพิ่มขึ้น ค่าเกินพิกัด และความเรียวในรูเจาะ จะเพิ่มขึ้นด้วย และ

สำหรับวิธีการทดลอง (S.Ali และคณะ, 2009) ได้ใช้วิธีการทดลองแบบ แฟคทอเรียลซึ่งทำการทดลองโดยมี 4 ตัวแปร และมี 2 ระดับ แฟคทอเรียลที่ใช้มีลักษณะเป็นแบบ 2^4 แฟคทอเรียลจึงมีการทดลองทั้งหมด 16 การทดลอง การทดลองดังกล่าวแสดงผลการทดลองในรูป สมการที่ใช้ทำนายค่าความเรียวในรูเจาะ, อัตราการขจัดเนื้องาน และอัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโตรด ได้แนวทางการวิจัยนี้มีความน่าสนใจที่จะขยายผลไปยังวัสดุอื่นๆ เพื่อดูแนวโน้มประกอบ ผู้ศึกษาจึงได้นำวิธีการวิจัยนี้มาขยายผลต่อโดยใช้ทองแดง และทองเหลือง

สำหรับวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ณัฐดนัย ซื้อตระกูล, 2551) ได้ทำการทดลองแบบทากูชิและนำผลมาทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมมินิแทป ซึ่งผู้วิจัยได้นำโปรแกรมมินิแทปมา