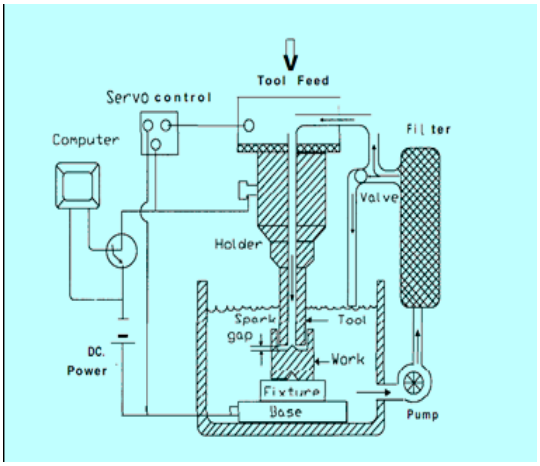
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ประวัติความเป็นมาของกรรมวิธีอีดีเอ็ม

เครื่อง EDM ที่เราเห็นอยู่ในทุกปัจจุบันนี้เป็นการค้นพบโดย Joseph Preistlyในปี ค.ศ. 1770 โดยเขาได้ทำการทดลองปล่อยกระแสไฟฟ้าจาก Electrodes ไปสู่ชิ้นงานทำให้เขาพบว่ามีการกัดกร่อนเกิดขึ้น ต่อมาในปี ค.ศ. 1940 Soviet ได้ทำการพัฒนาและวิจัยทำเครื่อง EDM ออกมาซึ่งเป็นพื้นฐานมาจนถึงปัจจุบัน ในปีค.ศ. 1955 เครื่อง EDM ที่ชื่อ Charmilles ของทวีปยุโรป ได้ถูกนำมาจัดแสดงขึ้นในเมืองมิลานการทำงานโดยการสปาร์ค โดยอาศัยการจ่ายประจุไฟฟ้าระหว่างชิ้นงาน (ขั้วลบ) และตัวกัดอิเล็กโทรด (ขั้วบวก) ซึ่งกระทำภายใต้ของเหลวฉนวนที่เรียกว่าไดอิเล็กตริก(Dielectric) การสปาร์คจะทำให้เกิดความร้อนสูงถึง 8000 ถึง12000 องศาเซลเซียส ทำให้ชิ้นงานเกิดการหลอมละลายและกัดกร่อน โดยขั้วอิเล็กโทรด Electrode (ขั้วบวก) จะเคลื่อนตามรูปแบบที่กำหนดไว้ใน NC โปรแกรม ซึ่งระหว่างการหล่อมละลายไดอิเล็กตริก(Dielectric) จะมีหน้าที่ช่วยลดอุณหภูมิและกำจัดเศษ บุญธรรม ลิมป์ปิยพันธ์ [2]

กรรมวิธีอีดีเอ็ม (EDM) นั้นใช้หลักการตัดวัสดุโดยใช้ความร้อนซึ่งความร้อนที่ได้เกิดจากการ สปาร์คทางไฟฟ้าจะทำให้อนุภาควัสดุที่ถูกแยกออกมาซึ่งอาจจะอยู่ในรูปของเข็งของเหลวหรือแก๊สการตัดโดยเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้านี้ วัสดุเครื่องมือตัดซึ่งเรียกว่าอิเล็กโทรดจะไม่สัมผัสกับชิ้นงานที่สำคัญเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้ายังสามารถใช้ขัดผิวชิ้นงานในขั้นสุดท้ายได้อีกด้วยปัจจุบันวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้าเช่นเซรามิกสามารถกัดด้วยเครื่อง EDM โดยใช้อิเล็กโทรดช่วยสปาร์ค



รูปที่ 2.1 แสดงหลักการทำงานของกรรมวิธีอีดีเอ็ม[4]

ในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนโลหะหรืออุตสาหกรรมแม่พิมพ์ไม่ว่าจะเป็นแม่พิมพ์สำหรับโลหะหรือแม่พิมพ์สำหรับพลาสติกนั้นล้วนแล้วแต่ต้องผ่านขั้นตอนการผลิตที่ใช้เครื่อง EDM หรือที่เรียกว่า Electrical Discharged Machine โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก คือ Sink-EDM และ Wire-EDM

2.1.1 การกัดเซาะโลหะด้วยตัวนำไฟฟ้า (Electrical Discharge Machining) ใช้ในงานผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนที่ทำด้วยวิธีการตัดเฉือนทั่วไปได้ยาก สามารถตัดเฉือนชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งมาแล้ว ใช้ผลิตส่วนเบ้าของแม่พิมพ์ การตัดเฉือนโลหะจะใช้การกัดเซาะทางไฟฟ้ามีอิเล็กโทรดเป็นตัวนำไฟฟ้า ข้อเสียคือ ในงานที่ต้องการความละเอียดจะต้องใช้ตัวอิเล็กโทรดหลายอัน และงานที่ซับซ้อนจะมีค่าใช้จ่ายสูง

รูปที่ 2.2 แสดงเครื่องกัดเจาะโลหะด้วยตัวนำไฟฟ้า
(Electrical Discharge Machining)

2.1.2 เครื่องตัดโลหะด้วยไฟฟ้า (Wire Cutting Machine) จัดเป็นเครื่องจักรประเภทเดียวกับเครื่อง EDM แต่เปลี่ยนจากการใช้ อิเล็กโทรดเป็นตัวตัดเฉือนชิ้นงานมาใช้ลวดทองเหลือง เป็นตัวตัดให้ได้รูปร่างตาม ต้องการในแนวตั้ง เครื่อง Wire cut เป็นเครื่องที่ตัดงานด้วยความเที่ยงตรง ขนาดสูงมาก สามารถควบคุมขนาดได้เล็กกว่า 5 ไมคอนเนื่องจากมีค่าใช้จ่ายสูง ในการทำชิ้นงานจึงเหมาะกับงานที่ต้องการความเที่ยงตรงสูง

รูปที่ 2.3 แสดงเครื่องตัดโลหะด้วยไฟฟ้า (Wire Cutting XMachine)

2.2 กระบวนการกัดโลหะด้วยไฟฟ้า มีดังนี้

1. อิเล็กโทรดเข้าใกล้ชิ้นงานขั้วไฟฟ้าประจุบวกและประจุลบจะเกิดการถ่ายเทพลังงาน

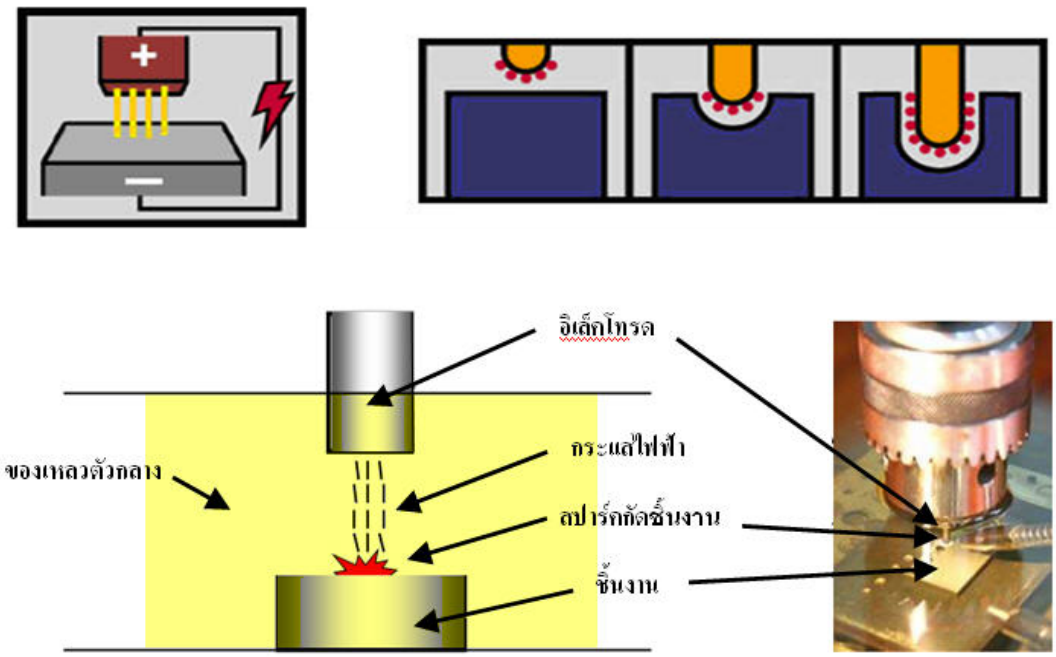
2. เกิดการรวมกันของสนามไฟฟ้าที่บริเวณพื้นที่ระหว่างอิเล็กโทรดและชิ้นงาน

3. เกิดการถ่ายเทประจุที่บริเวณพื้นระหว่างอิเล็กโทรดและชิ้นงาน

4. เมื่อความต่างศักย์ระหว่างอิเล็กโทรดและชิ้นงานสูงขึ้นเกิดการปลดปล่อยพลังงานทำให้เกิดการสปาร์คและความร้อนเกิดการแปรรูปชิ้นงาน

5. หยุดการปาร์คเพื่อคืนสภาพของการแปรรูปให้เข้าสู่สภาวะปกติเหมือนกับก่อนเริ่มการสปาร์คจชิ้นงาน

6. หลังจากการหยุดสปาร์คเศษชิ้นงานถูกขจัดออกไปโดยแรงฉีดของน้ำมันหรือของเหลวตัวกลาง (Delectric fuid)



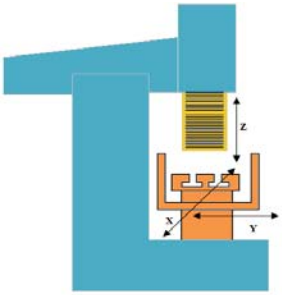
รูปที่ 2.4 แสดงหลักการทำงานเบื้องต้นของเครื่องอีดีเอ็ม[4]

2.3 ประเภทของเครื่องอีดีเอ็ม

เครื่องกัดอีดีเอ็มสามารถแบ่งตามโครงสร้างได้ 3 ประเภทดังนี้

2.3.1 ซี -เฟรมแมชีน (C-Frame Machine)

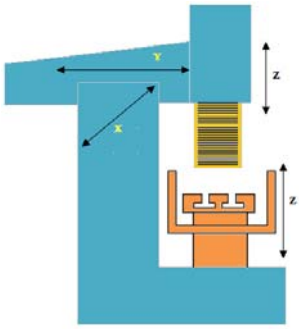
ลักษณะสำคัญของเครื่องประเภทนี้คือโต๊ะงานจะทำหน้าที่เคลื่อนไหวในแนวระนาบแกน X- Y ในขณะที่หัวอิเล็กโทรดจะสามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงเท่านั้นตู้ชิ้นงาน (Working container) ของเครื่องประเภทนี้ส่วนใหญ่จะทำจากวัสดุแข็งและมีประตูเปิดเข้าออกข้อดีของเครื่องประเภทนี้คือมีความมั่นคงแข็งแรงสูงซึ่งทำให้สามารถทำงานกับชิ้นงานหรืออิเล็กโทรดขนาดหนักได้ดีความแม่นยำของเครื่องค่อนข้างสูงเนื่องจากหัวอิเล็กโทรดเคลื่อนที่ได้จำกัดเฉพาะขึ้น-ลง เท่านั้น



รูปที่ 2.5 แสดงเครื่องประเภท C-frame machine [4]

2.3.2 คอนโซลแมชชีน (Console machinc)

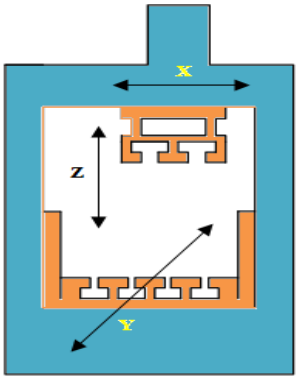
เครื่องในลักษณะ Console ที่จริงแล้วเป็นรูป C-Frame ประเภทหนึ่งนั้นเองแต่การคลื่อนไหวทั้งหมดจะเกิดขึ้นที่หัวอิเล็กโทรดเท่านั้นข้อดีของเครื่องประเภทนี้คือมีฐานเครื่อง (Machinc bed) ที่แข็งแรงและสามารถติดตั้งตู้ใส่ชิ้นงานแบบเคลื่อนที่ขึ้น – ลงได้ เพิ่มความสะดวกแก่ผู้ใช้ในการที่จะทำงานในบริเวณรอบ ๆ ชิ้นงานจากหลักการของคอนโซลแมชีน ทำให้เหมาะที่จะนำไปใช้ในระบบอัตโนมัติอีกด้วยเช่นการเปลี่ยนหัวอิเล็กโทรดและการใช้ระบบถาดในการเคลื่อนย้ายชิ้นงาน(Pallet)



รูปที่ 2.6 แสดงเครื่องประเภท Console machine[4]

2.3.3 โพรแท็ลแมชชีน (Portal machinc)

ใช้สำหรับรองรับงานที่ต้องใช้อิเล็กโทรดขนาดใหญ่มากและสามารถรองรับชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ตามไปด้วยซึ่งข้อดีของเครื่องประเภทนี้คือมีความมั่นคงมาก



รูปที่ 2.7 แสดงเครื่องประเภท Portal machine [4]

2.3.4 การแบ่งตามจุดมุ่งหมายในการสปาร์ค ซึ่งสามารถแบ่งได้ดังนี้

2.3.4.1 การสร้างแม่พิมพ์ (Sinking by EDM)

2.3.4.2 การตัด (Cutting by EDM)

2.3.4.3 การเจียระไน (Grinding by EDM)

2.4 ความต้องการขึ้นรูปปด้วยกรรมวิธีอีดีเอ็ม

2.4.1 เหตุผลของการใช้เครื่องอีดีเอ็ม

2.4.1.1 สามารถขึ้นรูปวัสดุที่ยากต่อการตัดโลหะที่มีความแข็งแรงมากยากต่อการตัดขึ้นรูปเช่นโลหะผ่านการชุบแข็งโลหะ Cemented Carbide โลหะ Sintered Alloy หรือโลหะพิเศษเป็นต้นโลหะเหล่านี้แม้จะมีความแข็งแรงมากเท่าไรถ้าเป็นสื่อไฟฟ้าได้ก็สามารถจะขึ้นรูปด้วยเครื่องอีดีเอ็มได้

2.4.1.2 สามารถขึ้นรูป รูปทรงที่มีความสลับซับซ้อนได้อย่างง่าย การพัฒนาระบบ NC ทำให้สามารถขึ้นรูปทรงระบบ 3 มิติแต่ถ้าเป็นขึ้นงานที่มีความแข็งแรงและมีรูปทรงสลับซับซ้อนเช่นแม่พิมพ์แล้วการใช้เครื่องตัดหรือเครื่องไสนั้นจะดีสู้การขึ้นรูปด้วยเครื่องอีดีเอ็มไม่ได้

2.4.1.3 สามารถขึ้นรูปของรูปทรงที่ไม่สามารถขึ้นรูปด้วยวิธีอื่นได้ตัวอย่างเช่นการขึ้นรูปมุมเหลี่ยมที่ไม่ต้องการให้เกิดมุมโค้ง R แม้ว่าจะดัดแปลงหัว EDM MILL ของเครื่องไสหรือหินขัดของเครื่องขัดอย่างไรก็ตามตามหลักการทางกายภาพแล้วเราไม่สามารถจะขึ้นรูปลักษณะเช่นนั้นได้แต่ว่าเราทำขั้วอีดีเอ็มโดยไม่มีมุมโค้ง R ก็จะสามารถขึ้นรูปของรูปที่ไม่มีมุมโค้งได้อย่างสวยงาม

2.4.1.4 ลดกระบวนการผลิตได้ การลดกระบวนการผลิตนั้นเป็นตัวสำคัญที่จะนำไปสู่การลดต้นทุนการผลิตได้ในช่วงเวลาสั้นและยังผลให้เกิดความเชื่อถือได้จากลูกค้าอีกด้วย ระบบ NC ในเครื่องอีดีเอ็มนั้นนอกจากข้อดีในหัวข้อ 2 แล้วการควบคุมกระแส (Pulse control) และควบคุมแกนพิกัดการขึ้นรูปนั้นทำให้สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้อย่างถูกต้องแน่นอนซึ่งทำให้ได้แม่พิมพ์ที่มีความละเอียดสูงและเป็นการลดกระบวนการผลิต ของแม่พิมพ์ที่มีรูปร่างสลับซับซ้อนลงได้

2.4.2 ประโยชน์ของกรรมวิธีอีดีเอ็ม

2.4.2.1 ความสามารถในการแปรรูปโลหะแข็งหรือโลหะผสม ซึ่งไม่สามารถทำได้โดยวิธีธรรมดากรรมวิธีอีดีเอ็มจึงมีบทบาทสำคัญในการทำแม่พิมพ์ และเครื่องมือที่ทำจากโลหะแข็งทังสเตนคาร์บอนสเตลไลท์

2.4.2.2 ความสามารถในการผลิตรูปร่างใดๆก็ได้เนื่องจากการกัดเนื้อโลหะอาศัยการสปาร์คจึงไม่ต้องการความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงาน นอกจากอิเล็กโทรดเคลื่อนที่ลงมาในชิ้นงานเท่านั้นดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะแปรรูปโลหะรูปร่างใด ๆ โดยใช้เพียงหนึ่งอิเล็กโทร

2.4.2.3 พื้นผิวงานจากกรรมวิธีอีดีเอ็มมีลักษณะเป็นเครเตอร์จำนวนมากจึงช่วยให้สามารถเก็บรักษาน้ำมันหล่อลื่นได้ดีจึงช่วยลดปัญหาเกี่ยวกับการหล่อลื่นได้

2.4.2.4 ในระหว่างทำการแปรรูปชิ้นงานจะไม่มีการเปลี่ยนรูปร่างเนื่องจากไม่มีแรงจากการสัมผัสของอิเล็กโทรดหรือไม่มีแรงทางกดทำให้สามารถแปรรูปชิ้นงานที่บอบบางหรือเปราะได้

2.4.2.5 แม้กรรมวิธีอีดีเอ็มจะมีผลกระทบของความร้อนแต่เป็นผลกระทบเฉพาะที่ไม่ได้มีผลกระทบต่อวัสดุเป็นส่วนใหญ่

2.5 นิยามและความรู้พื้นฐานของกรรมวิธีอีดีเอ็ม

2.5.1 คำนิยามของอีดีเอ็ม

กรรมวิธีอีดีเอ็ม Electrical Discharge Machining เป็นประเภทหนึ่งของกระบวนการเทคโนโลยีการแยกอนุภาควัสดุโดยไม่ใช้วิธีกล (Non - Machinic mcans) กระบวนการแยกอนุภาควัสดุโดยไม่ใช้วิธีกลแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทคือ

1. วิธีความร้อน (Themal)
2. วิธีทางเคมี (Chemical)
3. วิธีเคมีไฟฟ้า (Electro Chemical)

ดังนั้นจึงสามารถอธิบายอย่างง่าย ๆ ได้ว่าอีดีเอ็มคือกระบวนการแยกอนุกาควัสดุโดยวิธีความร้อนซึ่งความร้อนที่ได้เกิดจากการสปาร์คทางไฟฟ้าอนุภาควัสดุที่ถูกแยกออกมาอาจจะอยู่ในรูปของแข็งของเหลวหรือแก๊ส

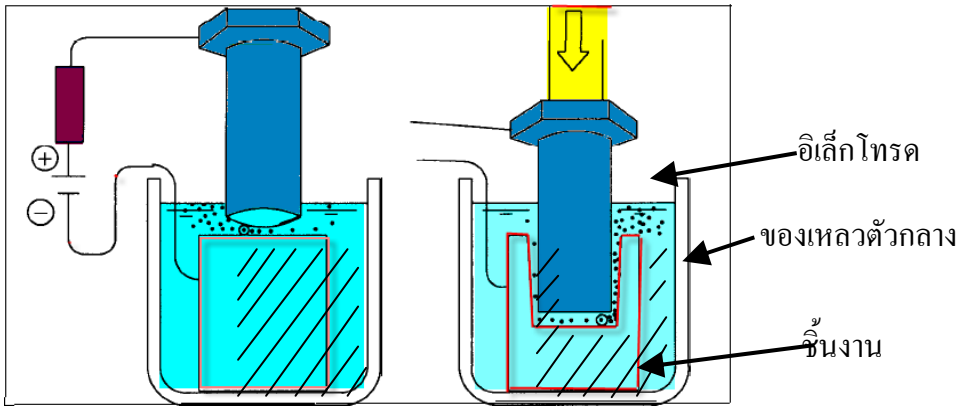
กรรมวิธีการ Machine (แบบกด) โดยใช้ปรากฏการณ์ปลดปล่อยกระแสไฟฟ้า ได้ถูกจัดอยู่ในพวกเทคโนโลยีการผลิตทั่วไปตามมาตรฐาน DIN 8580 ซึ่งเน้นไปทางด้านกรรมวิธีการสกัดเนื้อวัสดุออกจากชิ้นงานโดยใช้ความร้อน สารเคมีและกรรมวิธีทางเคมี (Electro Chemical)

คำว่า Electro นั้นใช้กับสารสกัดเนื้อวัสดุโดยใช้การเคลื่อนที่ของประจุ (Electrical Discharge) ระหว่างสองตัวนำ (Electrode) โดยผ่านของเหลวที่นำไฟฟ้า (Dielectric)

2.5.2 การกัดงานแบบกัดกร่อน (Erosion Machining)

หลักการของการกัดเซาะไฟฟ้าชิ้นงานและอิเล็กโทรดถูกนำมาวางไว้ในตำแหน่งที่พร้อมจะทำงานแต่ไม่สัมผัสกันกลับกระบวนการทั้งหมดจะเกิดในของเหลวที่เป็นฉนวนให้กับชิ้นงานและอิเล็กโทรดถูกต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงกระแสไฟฟ้านี้จะถูกตัดหรือขัดจังหวะด้วยสวิทช์ ปิดเปิดเมื่อสวิทช์ปิดความต่างศักย์ไฟฟ้าถูกสร้างขึ้นระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงาน ซึ่งเป็นการสร้างสนามไฟฟ้าระหว่างแอโนดกับแคโทดเนื่องจากตัวกลางไดอิเล็กตริกเป็นฉนวน จึงไม่มีกระแสไหลในตอนเริ่มต้นจากระบบความก้าวหน้าของเครื่องจักรทำให้อิเล็กโทรด และชิ้นงานเคลื่อนที่เข้าหากันดังนั้นจึงเกิดการ สปาร์คที่มีสนามไฟฟ้าสูงสุดการเกิดสปาร์คนี้ เรียกว่าการปล่อยประจุไฟฟ้ากระบวน การนี้กระแส ไฟฟ้าแปรผันเป็นความร้อนทำให้พื้นผิวรอบ ๆ เส้นทางที่ปลอยประจุไฟฟ้ามีความร้อนเกิดขึ้นซึ่งสูง 800°C ถึง 12,000°C ถ้ากระแสที่ไหลอยู่ถูกขัดจังหวะ ให้หยุดโดยการเปิดสวิทช์

เส้นทางสปาร์คจะยุบพังลงการใช้สวิทช์ให้หยุดจ่ายพลังงานจะเป็นสาเหตุทำให้ความดันที่บริเวณเส้นทางที่ปล่อยประจุไฟฟ้าลดลงอย่างทันทีทันใดมีผลทำให้โลหะหลอมเหลวเกิดการแตกกระจายเป็นไอหลุดออกมาจากโลหะหลอมเหลวและของแข็งด้วยความลึกที่แน่นอนจึงเกิดเป็นเครเตอร์บนพื้นผิวของการกัดเซาะไฟฟ้าของวัสดุ



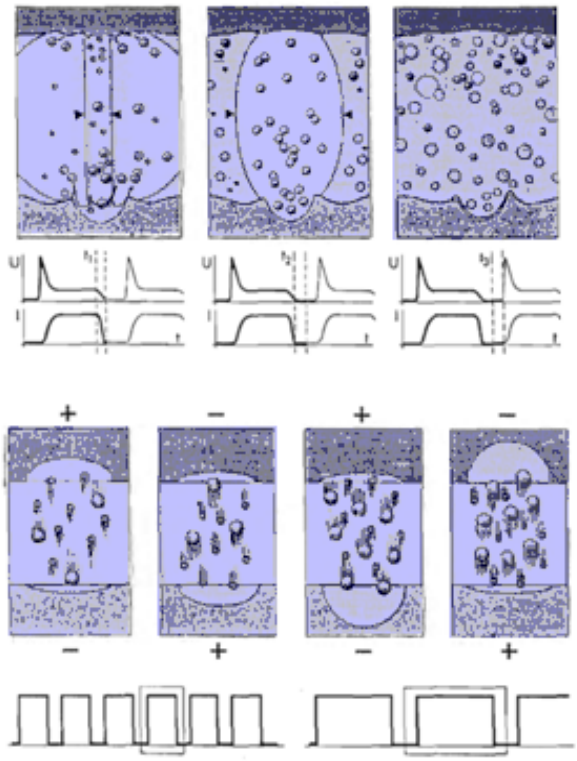
รูปที่ 2.8 แสดงขบวนการดิสชาร์จ [3]

2.5.3 คำนิยามของ EDM

บุญธรรม ลิมป์ปิยพันธ์ [2] การขึ้นรูปด้วยเครื่องอีดีเอ็ม หมายถึง วิธีการขึ้นรูปซึ่งใช้กับโลหะเป็นส่วนใหญ่โดยการประยุกต์ใช้การสปาร์คที่เป็นประกายไฟ (พลังงานไฟฟ้า) ซึ่งขาดเสถียรภาพอย่างมากดังที่ได้กล่าวมาแล้ว และเราสามารถที่จะเปรียบวิธีการขึ้นรูปนี้ได้เสมือน “การใช้ฟ้าผ่าเข้าไปในช่องแคบ ๆ ระหว่างขั้วไฟฟ้ากับวัตถุที่จะขึ้นรูป”

ในการขึ้นรูปด้วยเครื่องอีดีเอ็ม นั้นจะไม่ปล่อยให้กระแสไฟฟ้าไหลอย่างต่อเนื่องกันเหมือนกันกับการเชื่อมแบบอาร์ค แต่ต้องใช้วิธีการเปิด/ปิด กระแสไฟฟ้าเป็นช่วงจังหวะเพื่อป้องกันมิให้ความร้อนจากการสปาร์คหลอมละลายวัสดุมากเกินไปจนเสียรูปทรง

วิธีการขึ้นรูปประเภทนี้ อาศัยการใช้พลังงานระดับสูงซึ่งถูกปลดปล่อยออกมาในช่วงเวลาที่สั้นมาก ดังนั้น ปัญหาที่สำคัญมากสำหรับวิธีการขึ้นรูปนี้ก็คือ ทำอย่างไรจึงจะทำให้เกิดการสปาร์คที่เป็นประกายไฟอย่างมีเสถียรภาพและประสิทธิภาพสูง ในการใช้งานจริงนั้นจะใช้ระบบควบคุมเชิงเลข (Numerical Control System: NC) ควบคุมให้เกิดการสปาร์คถึงหลายแสนครั้งใน 1 วินาที สภาพของพัลส์ (Pulse) แต่ละลูกของการสปาร์คจะเป็นไปดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.9 แสดงสภาพการสปาร์คในแต่ละครั้ง [4]

2.5.3.1 ใส่แรงดันไฟฟ้า

เริ่มต้นด้วยการใส่แรงดันไฟฟ้า (ประมาณ 60Vถึง 280 V) ที่ระหว่างชิ้นงานกับขั้นไฟฟ้า (เรียกว่าระหว่างขั้ว) ในการขึ้นรูปชิ้นงานนั้น โดยปกติจะใช้น้ำมัน เพื่อที่จะรักษาให้ความต้านทานของฉนวนระหว่างขั้วมีค่าสูง เพราะว่าถ้าค่าความต้านทานของฉนวนระหว่างขั้วสูงก็จะสามารถลดระยะระหว่างขั้ว (ช่องว่างการสปาร์ค) ให้แคบลงได้ ซึ่งจะมีผลดีในการขึ้นรูปที่มีความละเอียดสูง

2.5.3.2 ใส่แรงดันไฟฟ้า

เมื่อย่นระยะระหว่างขั้วให้ใกล้เข้าเรื่อย ๆ จนถึงระยะหนึ่ง (หลาย μmถึงหลายร้อย μm) สารละลายจะเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวน อิออนประจุลบจะถูกดึงไปสู่ฝั่งที่เป็นบวก

2.5.3.3 สปาร์ค หรือ หลอมละลาย

เมื่อเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวนขึ้นแล้ว อิเล็กตรอนที่ซึ่งประจุลบจะเริ่มไหลเป็นจำนวนมากอย่างรุนแรง ซึ่งก็คือ การสปาร์คนั่นเอง บริเวณส่วนที่เกิดการสปาร์คนี้จะมีกระแสไฟฟ้าที่ความหนาแน่นสูงมากไหลในช่วงเวลาสั้นๆ ในการขึ้นรูปงานจริงนั้น กระแสไฟฟ้าจะมีขนาดตั้งแต่ 0.1 แอมแปร์จนถึงหลายร้อยแอมแปร์ พลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมาในช่วงนี้จะทำให้บริเวณที่เกิดการสปาร์คมีอุณหภูมิสูงขึ้นมาก (3,000 ^{0}Cขึ้นไป) จบบางส่วนจองชิ้นงานถูกหลอมละลาย นอกจากนั้นแล้ว

สารละลายบริเวณที่เกิดการสปาร์ค ก็จะถูกความร้อนที่เกิดขึ้นทำให้กลายเป็นก๊าซ และเกิดความดันสูงขึ้นมากเป็นบางส่วน

2.5.3.4 เย็นตัว
ความดันที่เกิดขึ้นนี้ จะทำให้ส่วนที่หลอมละลายของชิ้นงานหลุดกระเด็นไป ซึ่งเมื่อถูกสารละลายรอบข้างดูดแย่งความร้อนไปก็จะเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วกลายเป็นเศษผงชิ้นเล็กๆ

2.5.3.5 กลับคืนสู่ความเป็นฉนวน
หลังจากที่การสปาร์คหนึ่งครั้งให้จบลงแล้ว จะรอจนกว่าสารละลายจะกลับคืนสู่ความเป็นฉนวน โดยไม่มีการใส่แรงดันไฟฟ้าเข้าไป การรอในช่วงนี้จะช่วยป้องการเกิดสปาร์คแบบผิดปกติ เช่น สปาร์คซ้ำ หรือ สปาร์ค เฉพาะเป็นบางจุดอันเนื่องจากการสะสมหรือทับถมจับตัวกันของอิออนที่ตกค้างอยู่ระหว่างขั้วหรือเศษผงที่เกิดจากสปาร์ค ภายหลังจากที่กลับคืนสู่ความเป็นฉนวนแล้ว ก็จะทำการสปาร์คเช่นเดิมอีก โดยเริ่มจากข้อ 2.5.3.1 ใหม่

การสปาร์คซ้ำ: คือการสปาร์คที่เกิดขึ้นโดยไม่เกี่ยวข้องกับการควบคุมของระบบ NC ในกรณีที่สภาวะแวดล้อมของการสปาร์คเลวลง อาจจะเกิดการสปาร์คขึ้นได้โดยไม่สัมพันธ์กับช่วงจังหวะของพัลส์ของการสปาร์ค ซึ่งถูกส่งมาจากวงจรการสปาร์ค เนื่องจากว่าการสปาร์คประเภทนี้เป็นปรากฏการณ์ที่นอกเหนือการควบคุม จึงไม่อาจถือว่าเป็นสภาพการสปาร์คที่เหมาะสมได้

2.6 อิเล็กโทรด (Electrode)

อิเล็กโทรดในกรรมวิธีอีดีเอ็มจะใช้กำหนดรูปร่างของชิ้นงานหรือรูที่ต้องการเจาะ ดังนั้นจึงต้องพิจารณาส่วนประกอบของอิเล็กโทรดและชนิดของวัสดุที่ใช้ ปกติแล้ว ค่าใช้จ่ายในการทำอิเล็กโทรดจะประมาณเท่ากับหรือมากกว่า 50% ของค่าใช้จ่ายการแปรรูปทั้งหมด จะเห็นว่าการเลือกจำนวนอิเล็กโทรดที่ใช้งานมีความสำคัญมาก

2.6.1 คุณสมบัติของอิเล็กโทรดในกรรมวิธีอีดีเอ็ม

1. เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี
2. เป็นตัวนำความร้อนที่ดี
3. มีจุดหลอมละลายและจุดเดือดสูง
4. ต่อต้านการกัดเซาะจากไฟฟ้าหรือการสึกหรอต่ำ

5. มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ
6. มีความสามารถทำงานได้ดี ราคาต่ำ และความหนาแน่นต่ำ

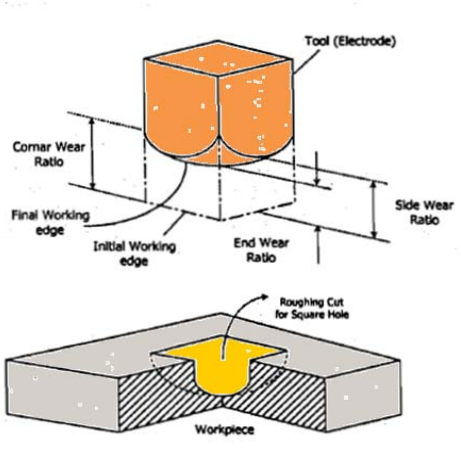
2.6.2 วัสดุทำอิเล็กโทรด

1. โลหะ เช่น ทองแดง ทองแดงผสมทังสเตน อลูมิเนียมผสม ทองเหลืองและเหล็ก เป็นต้น
2. อโลหะ เช่น กราไฟท์เกร็ดต่างๆ
3. โลหะผสมอโลหะ เช่น ทองแดงผสมกราไฟท์

2.6.3 การสึกหรอของอิเล็กโทรด

การลดการสึกหรอของอิเล็กโทรดทำได้โดยการเลือกวัสดุที่มีคุณสมบัติต้านทานการสึกหรอจากดิสชาร์จ เช่น ซิลเวอร์ทังสเตน (AgW) และทองแดงทันสเตน(CuW) จะมีอัตราขอบและมุม การกำหนดการสึกหรอของอิเล็กโทรดสามารถพิจารณาได้ดังนี้

1. อัตราการสึกหรอที่ปลาย (End Wear Ratio) = d/Le
2. อัตราการสึกหรอด้านข้าง (Side Wear Ratio) = d/Ls
3. อัตราการสึกหรอที่มุม (Corner Wear Ratio) = d/Lc
4. การสึกหรอน้ำหนักสัมพันธ์ (Weight relative wear) คืออัตราส่วนของน้ำหนักอิเล็กโทรดที่สึกกร่อนต่อน้ำหนักของชิ้นงานที่ถูกกัดออกมา
5. การสึกหรอปริมาตรสัมพันธ์ (Volume relative wear) คือ อัตราส่วนของปริมาตรอิเล็กโทรดที่สึกกร่อนต่อปริมาตรของชิ้นงานที่ถูกกัดออกมา



รูปที่ 2.10 แสดงการสึกหรอของอิเล็กโทรดที่บริเวณต่าง ๆ [4]

สมจิตร ลาภโนนเขวา (2543)[3] กล่าวถึง ปรากฏการดิสชาร์จว่า เป็นปรากฏการที่เกิดขึ้นเมื่อทำการใส่แรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าที่มีฉนวนไฟฟ้าที่อยู่ในรูปของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ กั้นกลางอยู่ จนทำให้ฉนวนไฟฟ้านั้นเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวน (Dielectric break down) และมีกระแสไฟฟ้าไหลอย่างรุนแรง

2.6.4 โอเวอร์คัตของอิเล็กโทรด (Overcut of Electrode)

ทวีป จีระประดิษฐ์[4] กล่าวว่า เป็นขนาดความกว้างและลึกที่เกิดขึ้นโดยรอบบริเวณที่อิเล็กโทรดทำการกัดเจาะชิ้นงานโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ โอเวอร์คัตด้านหน้า (Frontal Overcut) และโอเวอร์คัตด้านข้าง (Lateral Overcut)แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท

2.6.4.1 โอเวอร์คัตด้านหน้า (Frontal Overcut) ซึ่งจะมีขนาดความกว้างมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบดังนี้

1) โวลต์เทจเริ่มจุด ถ้าหากโวลต์เทจเริ่มจุดสูง ค่าของโอเวอร์คัตก็จะกว้างขึ้น

2) พลังงานดิสชาร์จ ถ้าพลังงานดิสชาร์จสูงขึ้น ค่าของโอเวอร์คัตก็เพิ่มขึ้น

3) ความหยาบของผิว ถ้าผิวงานหยาบ โอเวอร์คัตก็จะเพิ่มขึ้นด้วย

4) ปริมาณของอนุภาคพิเศษโลหะ ถ้าหากมีอนุภาคพิเศษโลหะมากขึ้น โอเวอร์คัตจะกว้างขึ้น

2.6.4.2 โอเวอร์คัตด้านข้าง (Lateral Overcut) แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

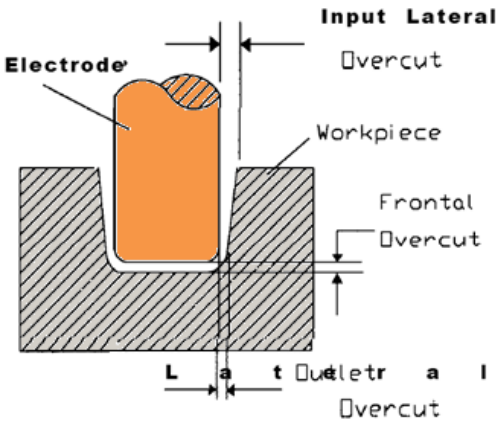
1)โอเวอร์คัตด้านเข้า (Inlet Overcut)

2)โอเวอร์คัตด้านออก (Outlet Overcut) ซึ่งขนาดจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบดังนี้

3) ความลึกในการแปรรูป ถ้าแปรรูปชิ้นงานลึก โอเวอร์คัตนี้จะกว้างขึ้น

4) การไหลของสารไดอิเล็กตริก ถ้าการไหลไม่เพียงพอก็จะส่งผลให้โอเวอร์คัตกว้างขึ้น

5) เสถียรภาพของดิสชาร์จ ถ้าการเกิดดิสชาร์จไม่เสถียร โอเวอร์คัดก็จะกว้างขึ้น แต่ถ้าการเกิดดิสชาร์จเสถียรตลอดเวลาโอเวอร์คัตก็จะลดลงรูปร่างของโอเวอร์คัต



รูปที่ 2.11 แสดงโอเวอร์คัต [2]

2.7 ระบบไดอิเล็กตริก (Dielectric System)

ระบบไดอิเล็กตริกประกอบด้วย สารไดอิเล็กตริก, ท่อส่ง, ปั๊ม, เครื่องกรอง และถังบรรจุสารไดอิเล็กตริก สารไดอิเล็กตริกมีหลายชนิด แต่ที่นิยมใช้กันมากคือ น้ำมันไฮโดรคอร์บอนด์ น้ำมันซิลิกอน และน้ำกำจัดไอออน น้ำกำจัดไอออนจะใช้ไม่มาก แม้ว่าจะมีอัตราการกัดเนื้อโลหะสูงและมีความสามารถหล่อเย็น แต่การสึกหรอของอิเล็กโทรดในการเจาะรู เมื่อทำงานเสร็จต้องตัดปลายลวดออกแล้วจึงเริ่มเจาะรูใหม่ได้ การใช้น้ำกำจัดไอออนใช้มากในกรรมวิธีของ Wire-EDM

ประสพ อนุชาติ(2539)[5] กล่าวถึง สารไดอิเล็กตริกเป็นตัวแปรที่สำคัญ ที่มีผลต่อความเร็วในการตัดและลักษณะอื่นๆของกรรมวิธีอีดีเอ็มโดยปกติสารไดอิเล็กตริกจะทำหน้าที่หลักอยู่ 3 ประการ คือ

- เป็นฉนวนระหว่างลวดอิเล็กโทรดและชิ้นงาน
- ระบายความร้อนเป็นตัวกลาง ในการพัดพาเอาเศษและสิ่งสกปรกที่เกิดขึ้น ระหว่างการทำงานออกไปดังนั้นระบบของสารไดอิเล็กตริกจึงต้องมีการควบคุมอย่างดี โดยเฉพาะอุณหภูมิและค่าความต้านทาน(Strength and Resistivity) ปัจจุบันนิยมใช้น้ำกลั่นมาเป็นสารไดอิเล็กตริก โดยการผ่าน Ion Exchange Resin เพื่อปรับสภาพให้มีความเหมาะสมต่อการใช้งาน

2.7.1 หน้าที่ของสารไดอิเล็กตริก

2.7.1.1 ฉนวน (Insulation) จุดประสงค์หลักของสารไดอิเล็กตริก คือ การทำหน้าที่เป็นฉนวนระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงาน การดิสชาร์จไม่ควรจะเกิดขึ้นจนกว่าระยะช่องว่างจะน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อให้ได้ความละเอียดที่ถูกต้องมากที่สุด

2.7.1.2 ไอออน (Ionization) สารไดอิเล็กตริก ควรที่จะสร้างเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการเกิดดิสชาร์จเร็วที่สุดและเมื่อสวิทตช์ออก (Off) สารไดอิเล็กตริกจำเป็นต้องกำจัดไอออนในเส้นทางดิสชาร์จเพื่อให้เกิดการดิสชาร์จใหม่ในตำแหน่งอื่นต่อไป

2.7.1.3 การหล่อเย็น (Cooling) อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในช่องว่างประมาณ 10,000°Cภายในเวลาเศษส่วนล้านของวินาที ความร้อนที่เกิดขึ้นต้องระบายออก ดังนั้นสารไดอิเล็กตริกจึงทำหน้าที่ระบายความร้อนจากชิ้นงานและอิเล็กโทรด ความร้อนที่สูงเกินไปจะทำให้อิเล็กโทรดสึกหรอมาก ในเวลาเดียวกันไอของโลหะก็จะกลั่นตัวในสารไดอิเล็กตริกด้วย

2.7.1.4 พัดพาอนุภาคโลหะ อนุภาคโลหะจากกระบวนการอีดีเอ็ม ในช่องว่างดิสชาร์จจะถูกสารไดอิเล็กตริกพัดพาออกมา จึงช่วยกระบวนการให้ดำเนินไปได้ตามปกติมีประสิทธิภาพ ถ้าการไหลพัดพาเอาอนุภาคโลหะไม่ดีจะทำให้เกิดการหยุดนิ่งของสารไดอิเล็กตริก ทำให้มีอนุภาคโลหะตกค้างในช่องว่างและอาจจะเกิดการลัดวงจรได้ เนื่องจากสารไดอิเล็กตริกที่ใช้งานแล้วต้องผ่านการทำความสะอาดโดยเครื่องกรอง กรองเอาอนุภาคโลหะออกจากสารไดอิเล็กตริก แล้วจึงนำกลับมาใช้งานใหม่ต่อไป

2.7.2 ประเภทของสารไดอิเล็กตริก แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

2.7.2.1 น้ำกำจัดไอออน

2.7.2.2 ไฮโดรคาร์บอน

สารละลายประเภทน้ำมันและสารละลายประเภทน้ำ สารละลายประเภทน้ำมัน มีค่าความต้านทานสูงจึงสามารถที่จะย่นระยะระหว่างขั้วให้แคบลงมาก ๆ ได้ แต่กระแสไฟฟ้าที่ไหลจะมีขนาดไม่ใหญ่ ดังนั้นโดยทั่วไปแล้วความเร็วในการขึ้นรูปจึงต่ำ แต่ในทางกลับกัน ผิวงานขึ้นรูปจะละเอียดส่วนสารละลายประเภทน้ำหรือน้ำมัน ถ้าในสภาวะปกติแล้ว จะมีปริมาณอิออนผสมอยู่มาก จึงมีค่าความต้านทานต่ำเวลาที่จะขึ้นรูปก็จำเป็นต้องผ่านกระบวนการทำให้ความต้านทานสูงขึ้น ด้วยวิธีการต่างๆ เช่น วิธีการสับเปลี่ยน

อิออน(Ion Exchange) การขึ้นรูปโดยปกติ นั้นโดยส่วนมากจะตั้งกำหนดให้อยู่ระหว่าง 50,000 ถึง 100,000 Ω/cm เนื่องจากว่าน้ำมีค่าความต้านทานต่ำกว่าน้ำมัน จึงสามารถที่จะทำให้กระแสไฟฟ้าการขึ้นรูปโดยเฉลี่ยมีขนาดใหญ่ได้ ความเร็วในการขึ้นรูปจึงสูง แต่ในทางกลับกัน ความละเอียดของการ

ขึ้นรูปขั้นสุดท้าย โดยปกติจะด้อยกว่า คุณสมบัติเหล่านี้ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกัน จะเห็นได้ว่า น้ำ และน้ำมันมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

เครื่องอีดีเอ็ม ประเภท Die sinking โดยส่วนมากจะใช้สารละลายประเภทน้ำมันดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ในทางตรงกันข้ามเครื่องอีดีเอ็มประเภท Wire Cut โดยทั่วไปจะใช้น้ำการเลือกประเภทสารละลายที่ใช้กับเครื่องอีดีเอ็มประเภทต่าง ๆ ดังกล่าวจะเป็นการปฏิบัติตามที่เคยปฏิบัติกันมาเสียมากกว่า แต่อย่างไรก็ตาม บริษัท โซดิกส์ ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการเลือกใช้สารละลายเพื่อทีจะได้สามารถใช้ประโยชน์ของคุณสมบัติพิเศษของสารละลายแต่ละประเภทให้เหมาะสมและได้ผลมากที่สุดโดยไม่ให้ความคิดหรือวิธีการที่เคยปฏิบัติกันมาเป็นข้อจำกัด ซึ่งก็ได้ประสบผลสำเร็จในการพัฒนา

2.7.3 คุณสมบัติของสารไดอิเล็กตริก

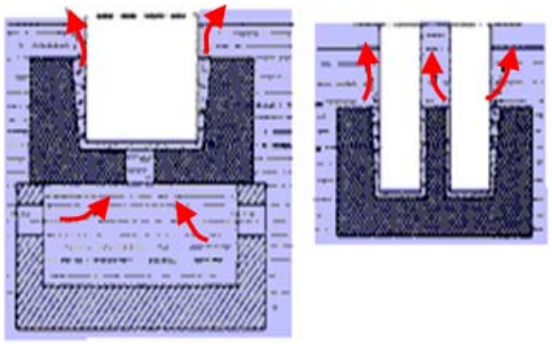
1. มีความหนืดต่ำ
2. มีจุดเดือดสูง และจุดวาบไฟสูง
3. มีคุณสมบัติความเป็นฉนวนสูง
4. ไม่เป็นอันตรายต่อร่างกายและผิวหนัง
5. ต้องไม่เกิดแก๊สที่เป็นอันตรายจากการแตกตัวหรือสลายเนื่องจากความร้อน
6. ไม่กัดกร่อนชิ้นงาน
7. มีความสามารถในการระบายความร้อนได้ดี
8. มีราคาถูกหรือประหยัด

2.7.4 ระบบการไหลของไดอิเล็กตริก(Flushing)

เราจะพิจารณาสิ่งที่เกิดขึ้นในช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรด และชิ้นงานเมื่อไม่มีการไหลของสารไดอิเล็กตริกในตอนเริ่มแรกไดอิเล็กตริกยังสะอาดอยู่ ซึ่งไม่มีอนุภาคของชิ้นงาน ที่หลุดออกมาในช่วงนี้สารไดอิเล็กตริกยังทำหน้าที่เป็นฉนวนอยู่ แต่หลังจากที่สารไดอิเล็กตริกเต็มไปด้วยอนุภาค จะทำให้เปลี่ยนสภาพจากฉนวนเป็นตัวนำไฟฟ้า ดังนั้น การดิสชาร์จสามารถเกิดขึ้นได้โดยง่าย ซึ่งจะทำลายผิวหน้าของชิ้นงาน ระบบการระบายการไหลของสารไดอิเล็กตริก จึงมีส่วนสำคัญ เพราะจะช่วยกำจัดอนุภาคที่ทำให้เกิดการอาร์ค ซึ่งจะแบ่งออกได้เป็นหลายชนิดดังนี้

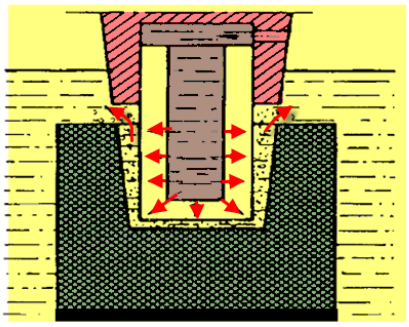
2.7.4.1 การไหลแบบฉีด

การไหลแบบนี้ สารไดอิเล็กตริกจะถูกฉีดเข้าไปในบริเวณช่องว่างของชิ้นงานและอิเล็กโทรด



รูปที่ 2.12 แสดงการไหลของสารไดอิเล็คตริกแบบฉีด [5]

การไหลของไดอิเล็กตริกแบบฉีดจะใช้ชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นเรียว หรือใช้กับอิเล็กโทรดที่ มีลักษณะแนวดิ่งคงที่ สำหรับลักษณะของเรียวที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากการดิสชาร์จทางด้านข้างของอิเล็กโทรด ระบบการไหลที่ดีจะทำให้สามารถเจาะรูลึก ๆ ได้ โดยใช้อิเล็กโทรดกราไฟท์ และตั้งวามดันของไดอิเล็กตริกให้สูงขึ้นและไหลเข้าไปในอิเล็กโทรดกราไฟท์ รูพรุนของกราไฟท์จะทำให้ไดอิเล็กตริกไหลผ่านออกมายังบริเวณช่องว่างได้ ซึ่งวิธีนี้ใช้กันมากกับอิเล็กโทรดที่เป็นกราไฟท์ และกัดชิ้นงานเป็นหลุมลึก ซึ่งคิดค้นมาจากประเทศสหรัฐอเมริกา

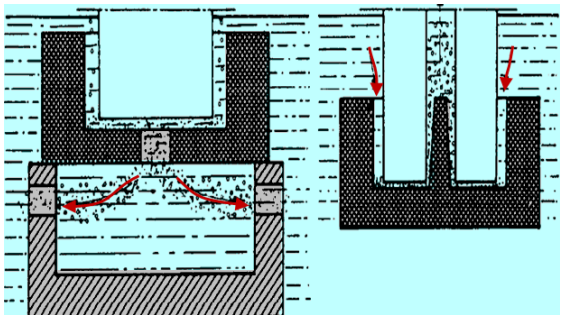


รูปที่ 2.13 แสดงสารไดอิเล็กตริกไหลผ่านรูพรุนกราไฟท์ออกมาที่บริเวณช่องว่าง [5]

2.7.4.2 การไหลแบบดูด

การไหลแบบนี้สารไดอิเล็กตริกจะถูกดูดออกผ่านรูของชิ้นงาน หรือรูของอิเล็กโทรดเพื่อเปรียบเทียบกับการไหลระบบฉีดจะเห็นว่าแบบดูดหลีกเลี่ยงผลกระทบของเสียงจากการเกิดดิสชาร์จทางด้านข้างของอิเล็กโทรด รูที่เจาะจึงเป็นทรงกระบอกกลม ความดันของการดูดสุญญากาศต้องไม่มากกว่า

0.8 ถึง 0.9 kg/cm^{2}การใช้งานของการไหลแบบดูดจะสามารถใช้ลักษณะเดียวกับการไหลแบบฉีดแต่การไหลแบบดูดนิยมให้ไดอิเล็กตริกผ่านอิเล็กโทรดมากกว่าที่จะผ่านชิ้นงาน ซึ่งจะทำให้การกัดชิ้นงานมีความรวดเร็วมากยิ่งขึ้น



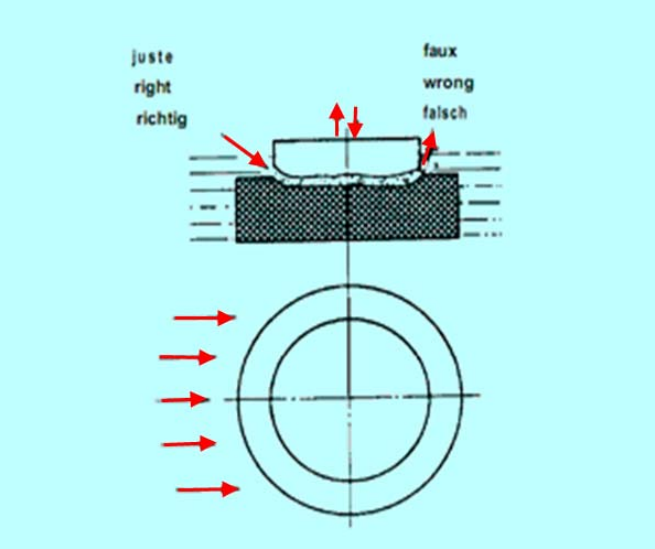
รูปที่ 2.14 แสดงการไหลของสารไดอิเล็กตริกแบบดูด [5]

2.7.4.3 การไหลด้านข้าง

วิธีนี้จะใช้เมื่อไม่สามารถเจาะรูของอิเล็กโทรดหรือชิ้นงานได้ เช่น กรณีของแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ ร่องลึกที่แคบของแบบหล่อพลาสติก จึงต้องให้การไหลของไดอิเล็กตริกกระทำทางด้านข้างโดยการใช้หัวฉีดซึ่งต้องระมัดระวังในการปรับให้พื้นผิวของการทำงานอิเล็กโทรดมีการไหลที่เท่า ๆ กันเทคนิคนี้จะใช้ร่วมกับการกระเพื่อมของอิเล็กโทรด เพื่อช่วยให้การไหลดีขึ้น เมื่อทำการแปรรูปพื้นผิวหน้าเรียบทิศทางการไหลของไดอิเล็กตริกจะต้องสอดคล้องกับมุมฉีดไดอิเล็กตริกเข้า สำหรับแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญเมื่อรูปแบบตามยาวไม่เรียบจะต้องใช้หัวฉีดแบบพิเศษมาใช้ และเมื่อทิศทางการไหลของไดอิเล็กตริกไม่ขนานกับด้านข้างของอิเล็กโทรดจะทำให้การไหลปั่นป่วนขึ้น ดังนั้นจะมีไดอิเล็กตริกจำนวนน้อยเข้าไปภายในช่องว่างเท่านั้น จึงทำให้ระบบการไหลไม่ดี แต่ถ้าการไหลของไดอิเล็กตริกจำนวนน้อยเข้าไปภายในช่องว่างเท่านั้น จึงทำให้ระบบการไหลไม่ดี แต่ถ้าการไหลของไดอิเล็กตริกมีทิศทางเข้าไปในช่องว่างโดยตรงจะทำให้ปริมาณของไดอิเล็กตริกเข้าไปจำนวนมาก ทำให้การไหลมีประสิทธิผลดีขึ้น ระบบการไหลทางด้านข้างจะไม่ใช้พร้อมกันทั้งสองด้านของอิเล็กโทรด เพราะจะทำให้อนุภาคโลหะที่บริเวณส่วนล่างของชิ้นงานไม่สามารถจะถูกขับออกมาจากช่องว่างได้

2.7.4.4 การไหลของไดอิเล็กตริกทางด้านข้าง

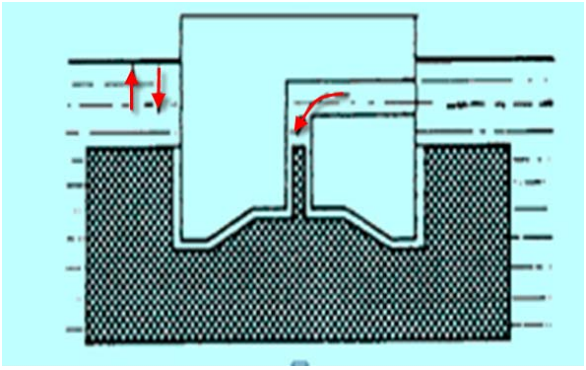
การไหลของไดอิเล็กตริกแบบนี้จะอาศัยการยกขึ้น-ลงของอิเล็กโทรด เมื่ออิเล็กโทรดถูกยกขึ้นจะทำให้ช่องว่างกว้างขึ้น สารไดอิเล็กตริกที่สะอาดจะถูกดูดเข้าไปผสมกับอนุภาคโลหะ และเมื่ออิเล็กโทรดเคลื่อนที่ของอนุภาคโลหะก็จะถูกขับออกไป วิธีการนี้จะใช้กับชิ้นงานที่มีความลึก



รูปที่ 2.15 แสดงการไหลของสารไดอิเล็กตริกทางด้านข้าง[5]

2.7.4.5 การไหลแบบฉีดพร้อมกับการยกอิเล็กโทรดขึ้น

เมื่อทำการแปรรูปโลหะ โดยใช้อิเล็กโทรดชนิดโลหะจะเห็นความผิดปกติของอิเล็กโทรดที่ใช้ในระบบการไหลแบบฉีด มีการสึกหรอมาก และเพิ่มขึ้นตามความดันในบริเวณที่ฉีดการที่จะป้องกันการสึกหรอที่เกิดจากความดันจะใช้วิธีการฉีดไดอิเล็กตริกเข้าไปในช่องว่าง ในขณะเดียวกันอิเล็กโทรดก็เคลื่อนที่ยกขึ้นด้วย

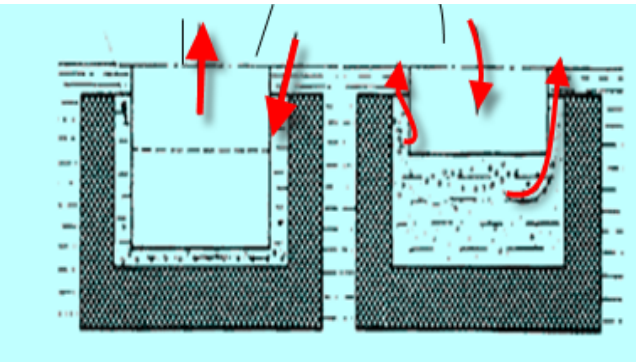


รูปที่ 2.16 แสดงการไหลแบบฉีดพร้อมกับการยกอิเล็กโทรดขึ้น[5]

2.7.4.6 การไหลที่ใช้การขึ้น - ลงของอิเล็กโทรด

การไหลของสารไดอิเล็กตริกแบบนี้อาศัยการยกขึ้น - ลงของอิเล็กโทรด เมื่ออิเล็กยกขึ้นจะทำให้ช่องว่างกว้างขึ้น สารไดอิเล็กที่สะอาดจะถูกดูดเข้าไปผสมกับอนุภาคโลหะและเมื่ออิเล็กโทรด

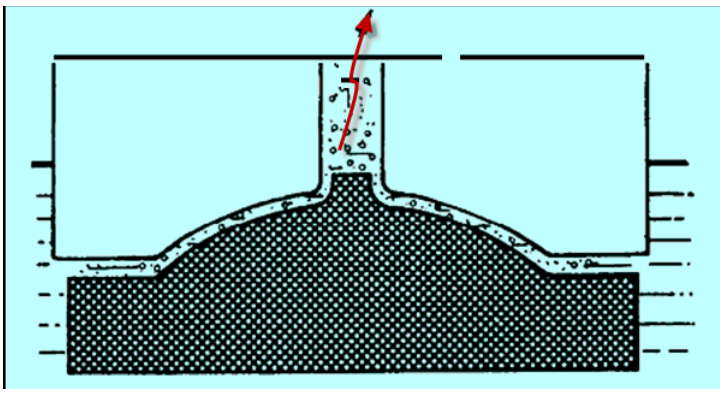
เคลื่อนที่ลงอนุภาคโลหะจะถูกขับออกไป วิธีนี้จะใช้กับชิ้นงานที่มีความลึกและระบบการไหลต้องไม่มีความดัน



รูปที่ 2.17 แสดงการไหลของสารไดอิเล็กตริกโดยอาศัยการขึ้น – ลงของอิเล็กโทรด[5]

2.7.4.7 ปัญหาแก๊ส Gas Problem

ในระบบการไหลแบบฉีดระหว่างการแปรรูปจะมีการสะสมของแก๊สซึ่งเป็นสาเหตุให้แกิดการระเบิด และจะทำให้ชิ้นงานเลื่อนได้จึงต้องระมัดระวังไม่ให้เกิดขึ้นต้องหลีกเลี่ยงแนวโน้มที่จะเป็นสาเหตุของการระเบิดเช่นแก๊สอากาศดังนั้นก่อนจะเริ่มทำการแปรรูปต้องมั่นใจว่า ภายในอุปกรณ์ฉีดมีสารไดอิเล็กตริกเต็มและภายในถังบรรจุมีสารไดอิเล็กตริกก็ตามที



รูปที่ 2.18 แสดงการเจาะรูอิเล็กโทรดเพื่อระบายแก๊สที่เกิดขึ้น[5]

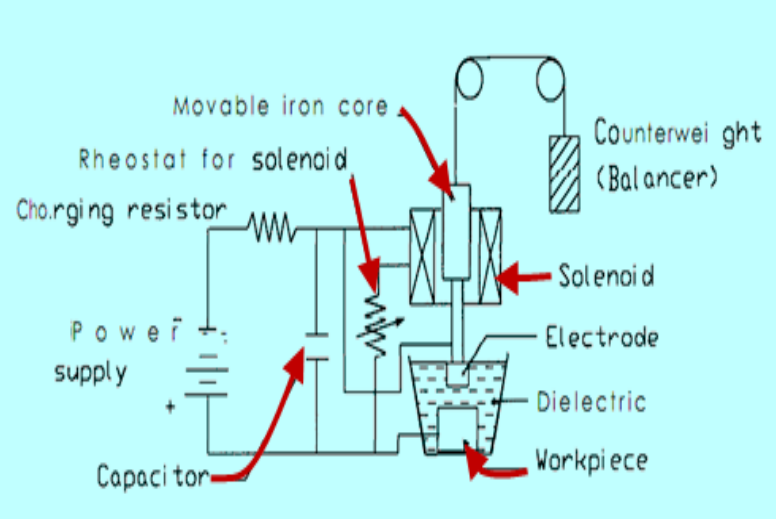
กำหนด เพื่อป้องกันปั๊มไม่ให้ดูดอากาศเข้าไปเข้าไปเพื่อที่จะลดปริมาณของการสะสมของแก๊สในอุปกรณ์ ต้องพยายามให้ทางดูดของอุปกรณ์อยู่สูงที่สุดเท่าที่จะทำได้ เมื่อทำการแปรรูปอิเล็กโทรดแบบเว้าเข้าจะทำให้มีการสะสมของแก๊สภายในส่วนที่เว้านั้น จึงต้องทำการเจาะรูอิเล็กโทรดเพื่อระบายแก๊สออกไป

2.8 ระบบเซอร์โว (Servo System)

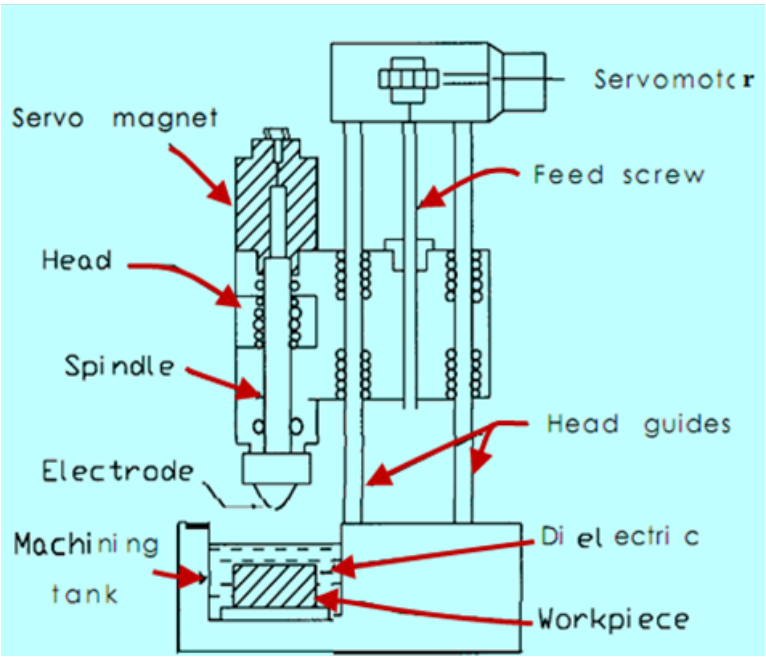
สันติรัฐ นันสะอาง และสมจิตรลาภโนนเขวา [3] ระบบเซอร์โว คือ ระบบควบคุมบังคับกลไกป้อนอิเล็กโทรด โดยอาศัยสัญญาณความแตกต่างของโวลต์เทจจากช่องว่างดิสชาร์จกับโวลต์เทจอ้างอิงเป็นตัวเปรียบเทียบ เพื่อทำการควบคุมกลไกการป้อนอิเล็กโทรดให้เหมาะสมกับอัตราการกัดเนื้อโลหะงานเนื่องจากช่องว่างจะมีเศษอนุภาคโลหะจากการดิสชาร์จ แก๊สและการที่เกิดจากการแตกต่างของไดอิเล็กตริกเนื่องจากความร้อน จะทำให้การเกิดดิสชาร์จครั้งต่อไปขาดเสถียรภาพและอาจทำให้เกิดลัดวงจร การสัมผัสโดยตรงระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงานจะทำให้เกิดการลัดวงจรด้วย ทำให้การดิสชาร์จขาดหายไป ประสิทธิภาพการกัดเซาะจึงลดลง เมื่อช่องว่างมีความพอเหมาะ ปริมาณการกัดเนื้อโลหะจะคงที่แต่เมื่อช่องว่างแคบลงพลังงานดิสชาร์จที่ช่องว่างก็จะลดลง ทำให้ประสิทธิภาพการกัดเนื้อโลหะต่ำลงเพื่อที่จะรักษาการกัดเนื้อโลหะให้เหมาะสม จะต้องทำการควบคุมกลไกการป้อนอิเล็กโทรดให้มีระยะช่องว่างคงที่ ในขณะเดียวกันก็ป้องกันการสัมผัสระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงาน ขณะที่อิเล็กโทรดและชิ้นงานจะสึกไปด้วย เนื่องจากช่องว่างนี้จะแคบมากจึงไม่สามารถรักษาให้คงที่ตามสัดส่วนของการสึก ดังนั้นการป้อนอิเล็กโทรดจะใช้ระบบควบคุมแบบ Adaptive Control

ระบบควบคุมการป้อนอิเล็กโทรดในกรรมวิธีอีดีเอ็ม แบ่งออกเป็น

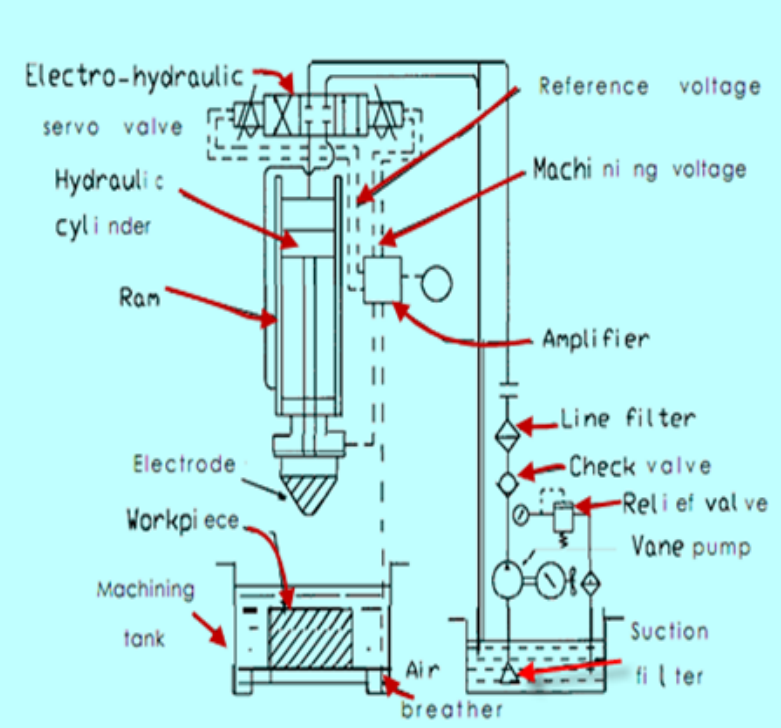
1. ควบคุมการป้อนอิเล็กโทรดโดยใช้โซลินอยด์
2. ควบคุมการป้อนอิเล็กโทรดโดยใช้เซอร์โวไฟฟ้า
3. ควบคุมการป้อนอิเล็กโทรดโดยการใช้เซอร์โวไฮดรอลิก



รูปที่ 2.19 แสดงการควบคุมการป้อนอิเล็กโทรดโดยใช้โซลินอยด์[3]



รูปที่ 2.20 แสดงการควบคุมการป้อนอิเล็กโทรดโดยใช้เซอร์โวไฟฟ้า[3]



รูปที่ 2.21 แสดงการควบคุมการป้อนอิเล็กโทรดโดยการใช้เซอร์โวไฮดรอลิก [3]

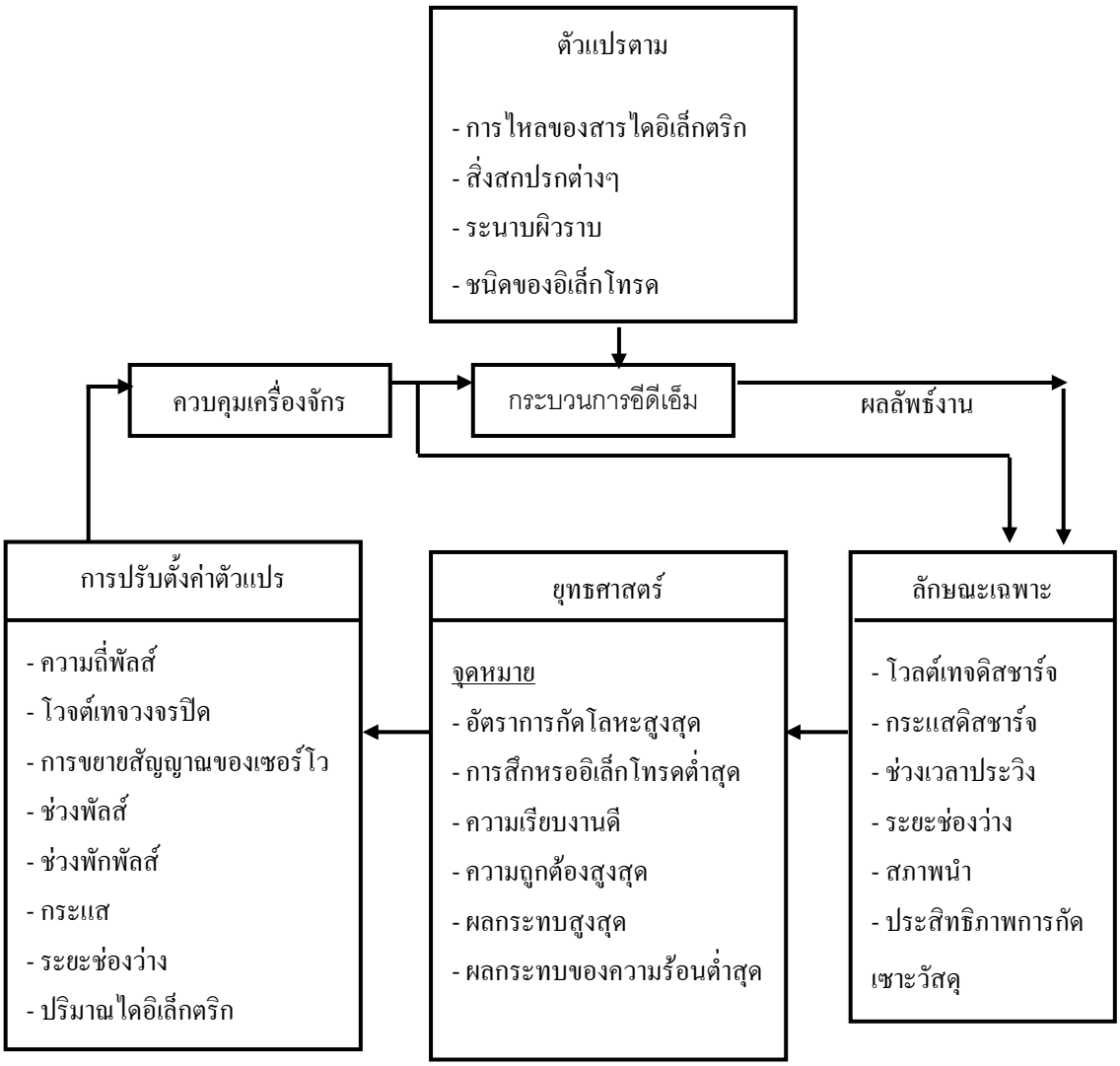
2.9 แหล่งจ่ายพลังงาน (Power Supply)

2.9.1 ในกรรมวิธีอีดีเอ็มจะใช้พลังงานดิสชาร์จ หรือพลังงานของพัลส์จ่ายให้กับอิเล็กโทรดและงาน ซึ่งต่ออยู่กับแหล่งจ่ายพลังงานของเครื่องอีดีเอ็ม แหล่งจ่ายพลังงานจะทำหน้าที่ผลิตอนุกรมของดิสชาร์จ เพื่อใช้งานต่อเนื่องกันไป แหล่งจ่ายพลังงานของเครื่องอีดีเอ็มแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ รีแล็กเซชั่น(Relaxation Generaters)

1. วงจร R-C
2. วงจร RLC
3. วงจร RCLD

2.9.2 เครื่องกำเนิดพัลส์ (Pulse Generator)

1. แบบความถี่คงที่หรือโวลต์เทจพลัส์(Fixed-Frequency or Voltage Pulse Timing)
2. แบบความถี่แปรผันหรือกระแสพัลส์หรือไอโซพลัลส์(Variable Frequency or Current Pulse or Isopulse



รูปที่ 2.22 แสดงไดอะแกรมความสัมพันธ์การปรับตั้งตัวแปรกับกระบวนการอีดี

การเลือกค่าตัวแปรในการทำงานของกระบวนการอีดีเอ็มจะมีความสำคัญที่ทำให้ชิ้นงานมีความถูกต้องและผิวงานมีคุณภาพ การปรับตั้งค่าตัวแปรจากเครื่องจักรก็เพื่อให้เหมาะสมกับการทำงานชนิดต่าง ๆ จากไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ของการตั้งตัวแปรกับกระบวนการอีดีเอ็ม

2.10 เหล็กกล้าเครื่องมือ (Tool Steels)

เป็นเหล็กกล้าที่มีธาตุคาร์บอน (Carbon) และธาตุผสมอื่น ๆ ในปริมาณสูง เพื่อให้มีความสามารถในการชุบแข็งสูง และเพื่อสร้างคาร์ไบด์ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติแข็งแกร่ง และทนทานการสึกหรอ เพื่อให้เหมาะสำหรับทำเครื่องมือขึ้นรูป เช่น แม่พิมพ์ (Moulds) ในกระบวนการอัด-ฉีด แม่พิมพ์

สำหรับตีขึ้นรูป หรือเครื่องมือตัดวัสดุ (Dies) ต่างๆ ซึ่งรวมถึงเหล็ก โลหะนอกกลุ่มเหล็กและพลาสติก เป็นต้น

คุณสมบัติที่สำคัญของเหล็กกล้าเครื่องมือ ความสามารถในการชุบแข็ง (Harden-Ability) โดยใช้โคบอลต์ (Cobalt) เป็นธาตุที่ควบคุมความแข็ง ความเหนียว (Toughness) คือ กลุ่มที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำ-ปานกลาง เหมาะกับงานที่ต้องรับแรงกระแทก ความทนต่อการเสียดสี (Wear Resistance) คือ การใช้คาร์ไบด์ที่ไม่สลายตัวในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงการรักษาความแข็งไว้ได้ที่อุณหภูมิสูง (Red-Hardness) สำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่า 480 °C ความสามารถในการกลึงไส (Machine-ability) คือ สามารถตัดแต่งขึ้นรูปชิ้นงาน และมีผิวที่เรียบ ความต้านทานการสูญเสียคาร์บอน (Decarburization Resistance) จะมีธาตุคาร์บอนในปริมาณสูง การไม่เปลี่ยนรูปร่างหรือขนาด (Non Deformation Properties) โดยทั่วไป การชุบแข็งได้ด้วยลม (Air) จะมีการบิดตัวน้อยที่สุด การชุบแข็งด้วยน้ำมัน (Oil) ทำให้เกิดการบิดตัวปานกลาง การชุบแข็งด้วยน้ำ (Water) ทำให้เกิดการบิดตัวสูงที่สุด

2.10.1 คุณสมบัติที่สำคัญของเหล็กกล้าเครื่องมือรอบสูง

2.10.1.1 ความสามารถในการชุบแข็ง (Hardenability) คือ คุณสมบัติที่เหล็กกล้าที่บ่งถึงความยาก-ง่ายในการชุบแข็งและความลึกของเหล็กที่แข็งขึ้นจากการชุบแข็ง (quenching) คุณสมบัตินี้จะขึ้นกับส่วนผสมทางเคมีและขนาดของเกรนของเหล็กกล้า โดยเหล็กกล้าที่มีความสามารถในการชุบแข็งสูงจะสามารถทำการชุบแข็งได้ง่ายด้วยลม แต่ถ้าเหล็กกล้ามีความสามารถในการชุบแข็งต่ำ การชุบแข็งด้วยลมจะไม่สามารถทำให้ได้เฟสมาร์เทนไซต์ จึงอาจต้องทำการชุบแข็งด้วยน้ำหรือของเหลวอื่น ซึ่งจะมีผลต่อการบิดตัวของชิ้นงานที่ทำการชุบ คุณสมบัตินี้เพิ่มขึ้นตามปริมาณธาตุผสม ดังนั้น การทำให้ได้ชิ้นงานที่มีความแข็งสูงตลอดชิ้น หรือสามารถชุบแข็งได้ลึก จึงควรเลือกใช้เหล็กกล้าที่มีธาตุผสมสูง โดยโคบอลต์เป็นเพียงธาตุเดียวที่ลดคุณสมบัตินี้

2.10.1.2 ความเหนียว(Toughness)คือ ความสามารถในการรับพลังงานของวัสดุก่อนที่จะเกิดการแตกหัก เหล็กกล้าเครื่องมือที่ถือว่ามีคุณสมบัติด้านความเหนียวที่ดี คือกลุ่มที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำหรือปานกลาง คุณสมบัตินี้จำเป็นสำหรับการใช้งานในสภาวะที่ต้องรับแรงกระแทก

2.10.1.3 ความทนต่อการเสียดสี (Wear resistance) คือความสามารถทนต่อการถูกขัดสี ซึ่งรวมถึงการเสียดสีของคมตัดด้วย คุณสมบัตินี้จะเกี่ยวข้องกับความแข็งของเหล็กและปริมาณคาร์ไบด์ที่ไม่ละลาย (คาร์ไบด์ที่ไม่สลายตัว เมื่อมีการใช้งานในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูง) โดยหากเหล็กกล้าเครื่องมือมีความ

แข็งสูงก็จะทนการเสียดสีได้ดี หรือหากมีคาร์ไบด์ที่ไม่ละลาย (แม้อุณหภูมิสูง) ก็จะทำให้ทนการเสียดสีได้ดีขึ้นเช่นกัน เนื่องจากคาร์ไบด์จะมีความแข็งสูง

2.10.1.4 การรักษาความแข็งไว้ได้ที่อุณหภูมิสูง(Red-hardness)เป็นคุณสมบัติที่จำเป็นสำหรับการใช้งานเหล็กกล้าเครื่องมือที่ต้องได้รับความร้อนจนมีอุณหภูมิสูงกว่า 480 °C โดยธาตุผสมที่ทำให้เกิดคาร์ไบด์ที่เสถียรจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัตินี้ ซึ่งจะทำให้เหล็กกล้าเครื่องมือไม่อ่อนลง (ความแข็งลดลง) อันเนื่องมาจากผลของความร้อนในขณะใช้งานที่อุณหภูมิสูง หรือในขณะทำการอบคืนตัว (Tempering)

2.10.1.5 ความสามารถในการกลึงไส (Machine ability) คือ ความสามารถของโลหะที่จะ กลึงไส ตกแต่งได้ง่าย และมีผิวที่เรียบภายหลังการกลึงไส

2.10.1.6 ความต้านทานการสูญเสียคาร์บอน(Resistance to decarburization) การสูญเสียคาร์บอนซึ่งจะเกิดเมื่ออบเหล็กที่อุณหภูมิสูงกว่า 704 °C (1300 °F) เป็นผลให้ความแข็งที่ได้ภายหลังการชุบแข็งต่ำลง เหล็กกล้าเครื่องมือที่มีคุณสมบัตินี้ต่ำจะต้องมีวิธีป้องกัน/ควบคุมบรรยากาศในการอบชุบความร้อนเพื่อไม่ให้ชิ้นงานสูญเสียคาร์บอนโดยเฉพาะที่ผิว สำหรับเหล็กกล้าเครื่องมือที่มีคาร์บอนเป็นส่วนผสมหลักจะสามารถต้านทานการสูญเสียคาร์บอนได้ดี

2.10.1.7 การไม่เปลี่ยนรูปร่างหรือขนาด (Non deformation properties) คุณสมบัตินี้สัมพันธ์กับความสามารถในการชุบแข็ง โดยทั่วไปเหล็กกล้าที่สามารถชุบแข็งได้ด้วยลมจะมีการบิดตัวน้อยที่สุด เหล็กกล้าที่ทำการชุบแข็งด้วยน้ำมันทำให้เกิดการบิดตัวปานกลางและเหล็กกล้าที่ทำการชุบแข็งด้วยน้ำทำให้เกิดการบิดตัวสูงที่สุด ดังนั้นในการออกแบบเลือกเหล็กกล้าเครื่องมือจะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติด้านนี้ด้วย

2.10.2 อิทธิพลของธาตุผสมต่อคุณสมบัติของเหล็กกล้าเครื่องมือ

คาร์บอน (C) เป็นธาตุผสมสำคัญของเหล็กกล้าเครื่องมือ จะมีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลหลายประการ โดยช่วยเพิ่มความแข็ง ความเค้นแรงดึง ความสามารถในการชุบแข็ง แต่จะลดคุณสมบัติความเหนียวและการยืดตัวของเหล็ก นอกจากนี้คาร์บอนจะรวมตัวกับธาตุผสมตัวอื่น เช่น โครเมียม โมลิบดินั่ม ทังสเตนและฟอร์มตัวเป็นคาร์ไบด์ด้วย ซึ่งจะช่วยเพิ่มคุณสมบัติในการใช้งานต่าง ๆ ให้ดียิ่งขึ้น เช่น ความสามารถในการชุบแข็ง ความทนต่อการเสียดสี การรักษาความแข็งไว้ได้ที่อุณหภูมิสูง เป็นต้น

ซิลิกอน (Si) โดยปกติจะพบในเหล็กกล้าเครื่องมือปริมาณ 0.2 ถึง 0.3% เพราะในการหลอมเหล็กกล้าจะใช้ซิลิกอนเพื่อไล่แก๊สออกซิเจน สำหรับซิลิกอนที่เป็นธาตุผสมจะมีบทบาทช่วยให้คาร์บอนรวมตัวเป็นกราไฟต์ ดังนั้นในเหล็กกล้าเครื่องมือบางประเภทที่มีปริมาณคาร์บอนสูงและผสมซิลิกอนประมาณ 1% จะมีโครงสร้างหลังการชุบแข็งที่ประกอบด้วยกราไฟต์กระจัดกระจาย ซึ่งช่วยให้เกิดความลื่นเมื่อใช้ทำแม่พิมพ์ ลดปัญหาการติดของโลหะในขณะทำการขึ้นรูป ธาตุนี้จะไม่ใช้ตามลำพังแต่จะผสมร่วมกับโมลิบดินั่มหรือวานาเดียม โดยให้ผลดีทั้งด้านการลดการเกิดออกซิเดชั่นที่อุณหภูมิสูง ช่วยให้ชุบแข็งง่ายขึ้นและช่วยให้คงความแข็งไว้ได้ดีในขณะอบคืนตัว (Tempering)

แมงกานีส (Mn) เป็นธาตุที่มีอยู่ทั่วไปในเหล็กกล้า เนื่องจากในกระบวนการผลิตเหล็กกล้าจะใส่แมงกานีสเป็นตัวกำจัดแก๊ส และรวมตัวกับกำมะถัน (S) การจัดว่าแมงกานีสเป็นธาตุผสมในเหล็กกล้าก็ต่อเมื่อมีปริมาณสูงกว่า 0.6% ขึ้นไป แมงกานีสมีบทบาทในการเพิ่มความสามารถในการชุบแข็งของเหล็กกล้าเครื่องมือ สำหรับเหล็กที่ผสมแมงกานีสเพียงลำพังจะมีข้อเสียคือจะเปราะหลังจากอบคืนตัวในช่วงอุณหภูมิ 400ถึง600 °C จึงมักผสมแมงกานีสจะผสมร่วมกับโครเมียม (Cr) และโมลิบดินั่ม (Mo) ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการชุบแข็งได้มากขึ้น กว่าการผสมแมงกานีสเพียงธาตุเดียว

โครเมียม (Cr) เป็นธาตุผสมที่ใส่ลงไปเพื่อคุณสมบัติหลายประการ เช่น เพิ่มความสามารถในการชุบแข็ง เพิ่มคุณสมบัติทนต่อการเสียดสี เพิ่มความเหนียว เป็นต้น โครเมียมสามารถรวมตัวกับคาร์บอนให้คาร์ไบด์ได้หลายรูปแบบ ซึ่งหากมีการใช้งานที่อุณหภูมิสูงและคาร์ไบด์เหล่านี้ละลายหมด เกรนจะขยายตัวมาก ดังนั้นการใช้งานเหล็กกล้าเครื่องมือที่ผสมโครเมียมตามลำพัง ต้องเลี่ยงการใช้งานที่อุณหภูมิสูงและทิ้งแช่ไว้ระยะเวลานานหรืออาจแก้ไขได้โดยผสมวานาเดียมเพื่อชะลอการขยายตัวของเกรน

โมลิบดินั่ม(Mo)ส่วนใหญ่เหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน และเหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูงจะผสมโมลิบดินั่มเพื่อผลในการชุบแข็ง นอกจากนี้ยังทำให้สามารถคงความแข็งของมาร์เทนไซต์ได้จนถึงอุณหภูมิ 500 °C แต่ข้อเสียของโมลิบดินั่ม คือ เหล็กจะเป็นออกไซด์มากที่อุณหภูมิ 1000 ถึง 1100 °C และมีแนวโน้มทำให้สูญเสียคาร์บอนที่ผิวได้ง่าย จึงมักเติมซิลิกอนเพื่อปรับปรุงข้อบกพร่องนี้

ทังสเตน (W) ที่ผสมลงไปในเหล็กกล้าเครื่องมือทำให้เกิดคาร์ไบด์ที่มีเสถียรภาพสูง สลายตัวได้ช้าที่อุณหภูมิสูง จึงมีบทบาทต้านทานต่อการสึกหรอสำหรับการใช้งานที่ต้องการคุณสมบัติทนต่อการเสียดสี และทนความร้อน โดยเฉพาะหากผสมทังสเตนสูงถึง 18% จะช่วยคงความแข็งไว้ที่อุณหภูมิสูงและรักษาคมตัดได้ดี

โคบอลท์(Co) เป็นธาตุเดียวที่ลดความสามารถในการชุบแข็ง แต่จะมีบทบาทอย่างมากที่จะช่วยให้เหล็กมีความคม ตัดโลหะได้ดี (High cutting ability) และสามารถรักษาความแข็งได้จนถึงอุณหภูมิสูง จึงพบว่าเหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูง (high speed tool steel) จะผสมโคบอลท์อยู่ด้วย

วานาเดียม(V) มีผลอย่างมากที่ทำให้ได้คาร์ไบด์ที่แข็ง เสถียรขนาดละเอียด และกระจัดกระจาย ซึ่งมีผลทำให้ได้โครงสร้างที่มีเกรนละเอียด สามารถเพิ่มความแข็งแรงและความเหนียวให้กับชิ้นงานได้

2.10.3 เหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูง (High speed tool steels)

เป็นเหล็กกล้าเครื่องมือที่มีจุดมุ่งหมายหลัก เพื่อใช้เป็นวัสดุในการตัดโลหะด้วยความเร็วสูง เช่น ใบเลื่อย (saws), ใบตัด (milling cutters) เป็นต้น คุณสมบัติสำคัญของเหล็กกล้ากลุ่มนี้ คือ ความสามารถในการรักษาความแข็งของคมตัดที่อุณหภูมิสูงกว่าปกติไว้ได้ (ความแข็งของคมตัดยังคงสภาพเดิม แม้จะเกิดความร้อนจนร้อนจัดเป็นสีแดง) ซึ่งเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อนจะรักษาความแข็งไว้ไม่ได้ เหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูงที่มีการใช้งานสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

2.10.3.1 เหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูงที่มีทังสเตนเป็นส่วนผสมหลัก ปริมาณทังสเตนที่สูงมาก (12-20%) จะเพิ่มคุณสมบัติความสามารถรักษาความแข็งไว้ได้ที่อุณหภูมิสูง ปริมาณคาร์บอนกับธาตุผสมที่สูงมีผลทำให้ความสามารถในการชุบแข็งสูง และมีปริมาณคาร์ไบด์ที่มีเสถียรภาพสูง (ไม่สลายตัวที่อุณหภูมิสูง) ซึ่งจะมีผลทำให้ต้านทานการสึกหรอดีเยี่ยม นอกจากนี้ส่วนผสมของวานาเดียมซึ่งฟอร์มตัวเป็นคาร์ไบด์ที่มีเสถียรภาพสูง และกระจายตัว จะช่วยป้องกันการขยายตัวของเกรนได้ในช่วงที่อุณหภูมิสูง และทำให้เกรนมีความละเอียดซึ่งส่งผลถึงความเหนียวของเหล็กด้วย เกรดที่นิยมใช้งาน คือ T1

2.10.3.2 เหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูงที่มีโมลิบดินั่มเป็นส่วนผสมหลัก เป็นกลุ่มที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูงที่มีทังสเตนเป็นส่วนผสมหลัก เนื่องจากโมลิบดินั่มส่งผลให้คุณสมบัติคล้ายคลึงกับการผสมทังสเตน โดยพบว่าคุณสมบัติที่สำคัญ เช่น ความสามารถรักษาความแข็งไว้ได้ที่อุณหภูมิสูง การทนต่อการเสียดสี หรือความเหนียวจะใกล้เคียงกัน โดยโมลิบดินั่ม 1% จะแทนทังสเตนประมาณ 1.6-2.0% สำหรับข้อแตกต่างมีเพียงเล็กน้อย คือ กลุ่มที่ผสมโมลิบดินั่มจะต้องระวังการสูญเสียคาร์บอนในการอบชุบ เนื่องจากทังสเตนมีราคาสูงกว่าโมลิบดินั่มมาก ปัจจุบันการใช้งานส่วนใหญ่จึงนิยมกลุ่มที่ผสมโมลิบดินั่ม เกรดที่นิยมใช้งาน เช่น M2 M4 และ M42

นอกจากนี้ยังได้มีการพัฒนาเติมธาตุโคบอลต์มากกว่า 10% เพื่อให้ได้คุณสมบัติความสามารถรักษาความแข็งไว้ได้ที่อุณหภูมิสูงได้ดีกว่า 2 กลุ่มแรก ทำให้ได้เหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูงประเภทซุปเปอร์ (Superhigh-speed tool steels) แต่สิ่งที่ต้องระวัง คือ การสูญเสียคาร์บอนในระหว่างการอบชุบ และการสั่นและกระแทกแรงๆ เนื่องจากเป็นเกรดที่เปราะมาก

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของเหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูง

เกรด	ต้านทานการเสียคาร์บอน	ความลึกในการชุบแข็ง	การบิดเบี้ยว	ต้านทานต่อการแตก	ความแข็งโดยทั่วไป (HRC)	การกลึงไส*	ความเหนียว*	ความแข็งได้ที่อุณหภูมิสูง*	ความต้านทานต่อการสึกหรอ*
T1	**สูง**	**ลึก**	**อากาศ หรือ อ่างเกลือ : ต่ำ**	สูง	**63-65**	**5**	**3**	**8**	**7**
			น้ำมัน : ปานกลาง						
T4	**ปานกลาง**	**ลึก**	**อากาศ หรือ อ่างเกลือ : ต่ำ**	ปานกลาง	**63-65**	**3**	**2**	**8**	**7**
			น้ำมัน : ปานกลาง						
T5	**ต่ำ**	**ลึก**	**อากาศ หรือ อ่างเกลือ : ต่ำ**	ปานกลาง	**63-65**	**2**	**1**	**9**	**7**
			น้ำมัน : ปานกลาง						
T15	**ปานกลาง**	**ลึก**	**อากาศ หรือ อ่างเกลือ : ต่ำ**	ปานกลาง	**64-68**	**1**	**1**	**9**	**9**
			น้ำมัน : ปานกลาง						
M2	**ปานกลาง**	**ลึก**	**อากาศ หรือ อ่างเกลือ : ต่ำ**	ปานกลาง	**60-65**	**5**	**3**	**8**	**7**
			น้ำมัน : ปานกลาง						
M4	**ปานกลาง**	**ลึก**	**อากาศ หรือ อ่างเกลือ : ต่ำ**	ปานกลาง	**61-66**	**3**	**3**	**8**	**9**
			น้ำมัน : ปานกลาง						

หมายเหตุ * สำหรับระดับความสามารถด้านการกลึงไส ความเหนียว ความแข็งได้ที่อุณหภูมิสูง ความต้านทานต่อการสึกหรอ ตัวเลขยิ่งสูงหมายถึงยิ่งคุณสมบัติดี

ตารางที่ 2.2 แสดงส่วนผสมทางเคมีเหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูง

(AISI M2 high speed die steel) [24]

Chemical composition

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	V	Mo
0.80-0.90	0.20-0.45	0.15-0.40	≤0.030	≤0.030	3.80-4.40	≤0.30	1.75-2.20	4.50-5.50

Heat treatment:

Quenching temperature:730~840°C

Preheat:1210~1230°C

oil cooling

Tempering temperature: 540~560°C twice

2.10.4 สรุปกลุ่มหลักๆ ของเหล็กกล้าเครื่องมือและสัญลักษณ์ตาม AISI [24]

W = เหล็กกล้าเครื่องมือที่ชุบแข็งด้วยน้ำ Water-hardening tool steels

S = เหล็กกล้าเครื่องมือทนแรงกระแทก Shock-resisting tool steels

O = เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นที่ชุบแข็งด้วยน้ำมัน Oil-hardening cold-work tool steels

A = เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นที่ชุบแข็งด้วยลมAir-hardening, medium-alloy cold-work tool steels

D = เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นผสมโครเมี่ยมและคาร์บอนสูง High-carbon, high-chromium cold-work tool steels

P = เหล็กทำแม่พิมพ์ Mold steels

H = เหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน Hot-work tool steels, chromium, tungsten, and molybdenum

T = เหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูงผสม W Tungsten high-speed tool steels

M = เหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูงผสม Mo Molybdenum high-speed tool steels

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Erden และ Kaftanoglu [6] ได้ทำการศึกษาวิจัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทางความร้อนและรูปแบบของการพัลส์ในกรรมวิธีอีดีเอ็ม ที่ให้เงื่อนไขความเหมาะสมที่ดีต่อการแปรรูปโลหะจากการศึกษาพบว่า

- พัลส์สี่เหลี่ยมพื้นผ้าให้ผลต่ออัตราการกัดเนื้อโลหะต่ำกว่าพัลส์สี่เหลี่ยมคางหมู

- รูปร่างคลื่นที่มีความลาดเอียงเป็นบวก (Position Slope) เมื่อเทียบกับเวลาจะให้ผลอัตราการกัดเนื้อโลหะน้อยกว่าแต่อัตราสึกหรอของอิเล็กโทรดต่ำ เคลื่อนที่มีความลาดเอียงเป็นลบ (Negative Slope) จะให้ผลอัตราการกัดเนื้อโลหะ สูงกว่าแต่อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดสูง

Bhattacharyya และคณะ [7] ได้ทำการศึกษาวิจัยหาความสัมพันธ์ของ 2 พารามิเตอร์ระหว่างช่วงพัลส์ (Discharge pulse time) ตั้งค่าอยู่ระหว่าง 20 ถึง 800 µs และกระแสไฟฟ้า (Main power supply current) ที่ใช้ คือ 3.5 และ 70 แอมแปร์ ในการศึกษาทดลองใช้เหล็ก Richard Carr Nichr 552 เป็นชิ้นงาน และใช้ทองแดงและกราไฟท์เป็นอิเล็กโทรดเพื่อหาอิทธิพลต่อลักษณะของการแปรรูป จากผลการทดลองนำมาเขียนเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของปัจจัยและลักษณะของการแปรรูป และยังชี้ให้เห็นถึงชั้นผิวงาน (Surface layer)ที่เกิดจากกรรมวิธีอีดีเอ็ม ซึ่งประกอบด้วย White Etching Zone และ Heat Affected Zone (HAZ)

Wells และ Willey [8] ได้ศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของสารไดอิเล็กตริก(Dielectrics fluid flow rate) ว่าอิทธิพลต่อลักษณะของการแปรรูปหรือไม่อย่างไร พบว่าอัตราการไหลของสารไดอิเล็กตริกมีผลอย่างมากต่อลักษณะของการแปรรูป และพบว่าอัตราการไหลของสารไดอิเล็กตริกที่ 6.3 เมตรต่อวินาที จะเป็นเงื่อนไขที่ให้ผลในการทำงานที่ดีที่สุดต่ออัตราการตัดโลหะและความหยาบของผิวงาน

Jilaniและ Pandey [9] ได้ทำการศึกษาชนิดของสารไดอิเล็กตริก(Diclectries fluid type) ชนิดต่าง ๆ ว่ามีอิทธิพลต่อลักษณะการแปรรูปโลหะหรือไม่ชนิดของสารไดอิเล็กตริกที่ใช้ในการทดลอง คือ น้ำประปา 100% น้ำกลั่น 100% น้ำประปา 75% น้ำผสมกับน้ำกลั่น 25% และน้ำมันก๊าด ผลการทดลองใช้สารไดอิเล็กตริกต่าง ๆ เป็นตัวกลางในการสปาร์ค(Spark) พบว่าน้ำประปาที่ใช้ในกรรมวิธีการแปรรูปโลหะมีความเสถียรดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำกลั่น และน้ำประปาผสมน้ำกลั่น และยังพบว่าน้ำประปาให้ความหยาบของผิวงานดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันก๊าด แต่ถ้าใช้สารไดอิเล็กตริกชนิดน้ำประปาผสมกับน้ำกลั่นจะให้อัตราการกัดเซาะโลหะสูงสุด 150 mg/min ที่ช่วงเวลา 10 µs และกระแสไฟฟ้า 7.5 แอมแปร์

Leeและคณะ[10]ได้ทำการศึกษาวิจัยการเปลี่ยนแปลงของผิวงานและชั้นงานที่ถูกทำลาย (Damager Layer) ภายหลังจากการผ่านกรรมวิธีอีดีเอ็ม ในการทดลองใช้เหล็กเครื่องมือ AISI 01,A2,D2 และ D6 จากการทดลองสรุปได้ว่าความลึกของรอยแตกที่ผิวสัมพันธ์กับความหนาของชั้นผิวที่ถูกทำลาย ชั้นผิวที่ถูกทำลายจะสัมพันธ์กับพลังงานดิสชาร์จ และความหนาของชั้นผิวที่ถูกทำลายจะเพิ่มขึ้นตาม

ความหยาบของผิว ค่ากระแสไฟฟ้าและช่วงพัลส์จะมีอิทธิพลที่สำคัญต่อชิ้นผิวที่ถูกทำลาย แต่สำหรับความหยาบผิวนั้นค่ากระแสจะมีอิทธิพลมากกว่าช่วงพัลส์

Murthy และ Philip[11]ได้ทำการศึกษาวิจัยการนำเอาระบบอุลต้าโซนิกมาช่วยในการขับเศษอนุภาคโลหะออกจากช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงานในกรณีที่ไม่สามารถใช้แรงจากการไหลของสารไดอิเล็กตริกได้ จากการศึกษาพบว่าอัตราการกัดเนื้อโลหะและความหยาบผิวงานดีขึ้น แต่อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การนำเอาระบบอุลตร้าโซนิกมาช่วยขับเศษอนุภาคโลหะในกรรมวิธีอีดีเอ็ม ยังทำให้การดีสชาร์จมีเสถียรภาพมากขึ้น การไหลของสารไดอิเล็กตริกดีขึ้น

Murthy และ Philip [12] ได้ทำการศึกษาวิจัยเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของดิสชาร์จด้วยระบบสั่นสะเทือน อุลต้าโซนิกในกรรมวิธีอีดีเอ็ม โดยการวิเคราะห์อนุกรมพัลส์ตามระยะเวลาเพื่อตรวจสอบช่วงเวลาประวิง วงจรปิด พัลส์อาร์ค การลัดวงจร และพลังงานพัลส์ทำให้ผลดี คือการลัดวงจรและการเกิดพัลส์อาร์คลดลง ทำให้อัตราการกัดเนื้อโลหะเพิ่มขึ้น ไม่มีผลกระทบต่อช่วงเวลาประวิงและพัลส์ ทำให้ประสิทธิภาพการสปาร์คเพิ่มขึ้น

Lasc°C [13] ได้ทำการศึกษาวิจัยการทดลองใช้อิเล็กโทรดชนิดต่าง ๆ และสารไดอิเล็กตริก 4 ชนิด โดยใช้ชิ้นงานเหล็กเครื่องมือและเหล็กแข็ง เพื่อหาผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อลักษณะที่สำคัญของกรรมวิธีอีดีเอ็ม ผลจากการทดลองสรุปได้ดังนี้

- อิเล็กโทรดที่มีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าและเป็นตัวนำความร้อนที่ดีจะทำให้การแปรรูปโลหะมีประสิทธิภาพ
- สารไดอิเล็กตริกต่างชนิดจะให้อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดแตกต่างกัน
- สารไดอิเล็กตริกที่อุณหภูมิสูง (74 °F) จะทำให้อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดสูงกว่าที่อุณหภูมิต่ำ (50°F)

Jeswani [14] ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการเจาะรูขนาดเล็ก 0.75ถึง2.00 mm.บนเหล็กที่มีความแข็ง โดยใช้อิเล็กโทรดทองแดงเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 0.19ถึง0.71 mm.แรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จกำหนดที่ 80,110 และ 160 โวลต์ วงจรมีค่าคาปาซิแตนซ์ 0.1 μFถึง 0.6 μF จากการทดลองพบว่า โอเวอร์คัตจะเพิ่มขึ้น เมื่อค่าคาปาซิแตนซ์และความสึกหรอของรูเพิ่มขึ้นแต่จะลดลงเมื่อเส้นผ่าศูนย์กลางของอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้น และความเรียวของรูเป็นอิสระจากดิสชาร์จโวลต์เทจ และคาปาซิแตนซ์ แต่จะสัมพันธ์กันเส้นผ่านศูนย์กลางของอิเล็กโทรดและความสึกหรอของรูที่เจาะ

Panditและ Rajukar [15] ทำการศึกษาเกี่ยวกับรูปทรงเรขาคณิตและปริมาตรของเครเตอร์จากกรรมวิธีอีดีเอ็ม โดยการใช้ Data Dependent Systems (DDS) ฟังก์ชันก์ตอบสนองของพัลส์จะเป็นตัวกำหนดรูปทรงเรขาคณิตและปริมาตรของเครเตอร์ จากการทดลองใช้ช่องพัลส์ 36-1296 μsใช้เวลาแปรรูป 25-125 วินาที โดยใช้ทองแดงและกราไฟท์เป็นอิเล็กโทรดกระเสไฟฟ้าดิสชาร์ช 7.5 แอมแปรร์ และดิสชาร์ชโวลต์เทจ 40 โวลต์ ผลสรุปจากการทดลองได้ว่าความลึกของเครเตอร์เพิ่มขึ้นเมื่อช่วงพัลส์เพิ่มขึ้น และเมื่อเวลาการแปรรูปมากขึ้นจะทำให้ความลึกของเครเตอร์ลดลงอิเล็กโทรดกราไฟท์ความลึกได้ดีกว่าทองแดง อัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางกับความลึกของเครเตอร์จะเพิ่มขึ้นตามเวลาแปรรูปและช่วงพัลส์

จิรวรรณ์คล้อยภยันต์ อภิวัฒน์ มุตตามระ กานต์ ไม้สุขจิตร และพรชนะ ซื่อสุทธิกุล [16] ทำการศึกษาการแมชชินนิงวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมขึ้นรูป ชนิด 316L ด้วยเครื่องกัดชิ้นงานด้วยไฟฟ้า (Electrical discharge Machining) เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลต่ออัตราการขจัดเนื้องาน และค่าความหยาบเฉลี่ยของผิว โดยได้ออกแบบการทดลองและกำหนดตัวแปรที่มีผลต่อผลลัพธ์ที่ต้องการ คือ ความเข้มของกระแสไฟฟ้า ค่าเวลาเปิด (On-time) และค่าเวลาปิด (Off-time) นอกจากนี้ยังได้ศึกษาถึงลักษณะของรูพรุนของผิวหน้างานทั้งก่อนและหลังการกัดด้วย จากผลการทดลองพบว่าอัตราการแปรรูปชิ้นงานและค่าความหยาบของผิวมีค่าแปรตามค่ากระแสไฟฟ้า และค่าเวลาปิด (Off-time) แต่จะมีค่าผกผันกับค่าเวลาเปิด (On-time) นอกจากนี้ผิวหน้าของชิ้นงานภายหลังการกัดมีค่าความเป็นรูพรุนลดลง

ฉวีวรรณ ลิ้มสุวรรณ์ และ กรรณชัย กัลป์ยาศิริ [17] ทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการตัดที่มีผลกระทบต่ออัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (Material Removal Rate : MRR) และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (Electrode wear rate : EWR) ในเหล็กกล้าเครื่องมือ DC53 ด้วยวิธีการจ่ายประจุไฟฟ้า (Electric Discharge Machining : EDM) โดยตัวแปรที่ใช้ในการพิจารณาประกอบด้วย ช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ค และขนาดพื้นที่หน้าตัดของอิเล็กโทรด โดยอิเล็กโทรดที่ใช้เป็นแท่งทองแดงผสมรูปทรงกระบอก ผลการทดลองสรุปได้ว่า ขนาดพื้นที่หน้าตัดของกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์คมีผลต่อค่า MRR และ EWR อย่างชัดเจน จากนั้นนำผลมาใช้เทคนิคของแบบจำลองการถดถอยแบบพหูคูณ โดยใช้สมการที่ได้จะมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยอยู่ที่ 3.7 % สำหรับค่า MRR และ 11.1 % สำหรับค่า EWR

อภิวัฒน์ มุตตามระ และ อนันต์ เพ็ชร์ผึ้ง [18] ทำการศึกษาการกัดขึ้นรูปโลหะด้วยไฟฟ้าด้วยอิเล็กโทรดหลายชนิด ได้แก่ ทองแดง ทองเหลือง และกราไฟต์ โดยค่าตัวแปรที่สนใจ คือ ขั้วของอิเล็กโทรด ค่ากระแสไฟฟ้า เวลาเปิด และค่าปัจจัยประสิทธิภาพ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้เป็นตัวกำหนด

อัตราขจัดเนื้องาน ผลการทดลองพบว่าค่าปัจจัยที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับชนิดของอิเล็กโทรด ประสิทธิภาพการกัดจะดีเมื่ออิเล็กโทรดทองแดงเป็นขั้วบวกส่วนอิเล็กโทรดทองเหลืองและกราไฟต์จะมีประสิทธิภาพดีกว่าเมื่อเป็นขั้วลบ อิเล็กโทรดทองเหลืองจะให้อัตราการขจัดเนื้องานสูงที่สุดถึง 300 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อนาที มีค่าปัจจัยประสิทธิภาพ เท่ากับ 94% กราไฟต์ มีค่าปัจจัยประสิทธิภาพ เท่ากับ 6% และทองแดง มีค่าปัจจัยประสิทธิภาพ เท่ากับ 50%

สันติรัฐ นันสะอาง และสมจิตร ลาภโนนเขวา [3] ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของการแปรพารามิเตอร์ของกระบวนการกัดเจาะด้วยไฟฟ้าต่อคุณสมบัติงาน โดยการทดลองในครั้งนี้พิจารณาจากพารามิเตอร์ 3 ตัว ได้แก่ ช่วงเวลาการสปาร์ค ที่ระดับ 900 1200 และ 1500 μsช่วงเวลาหยุดการสปาร์ค ที่ระดับ 8 10 และ 12 μs และเซอร์โวโวลต์เทจ ที่ระดับ 40 50 และ 60 V ซึ่งใช้ทองแดงเป็นอิเล็กโทรดและเหล็กกล้าเครื่องมือ D2 เป็นชิ้นงานในการทดสอบ ซึ่งมีอิทธิพลต่อความหยาบผิวของชิ้นงาน โอเวอร์คัต และอัตราการกัดเนื้อโลหะ ผลการทดลองพบว่า เมื่อช่วงเวลาสปาร์คเพิ่มขึ้นจะมีผลกระทบต่อการเพิ่มความหยาบของผิวชิ้นงาน โอเวอร์คัต แต่อัตราการกัดเนื้อโลหะลดลง การเพิ่มของช่วงเวลาหยุดการสปาร์คทำให้ความหยาบของชิ้นงาน โอเวอร์คัต และอัตราการกัดเนื้อโลหะลดลง และการเพิ่มขึ้นของเซอร์โวโวลต์เทจจะทำให้ความหยาบผิวของชิ้นงานและโอเวอร์คัตเพิ่มขึ้นแต่อัตราการกัดเนื้อโลหะลดลง จากผลลัพธ์ที่ได้นำมาสร้างสมการออร์โธโกนัลโพลินอร์เมียล เพื่อใช้ในการพยากรณ์ค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน โอเวอร์คัต และอัตราการกัดเนื้อโลหะ เมื่อแทนค่าในสมการปรากฏว่าผลลัพธ์ที่ได้มีค่าความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อย

กรรณชัย กัลป์ยาศิริ [19] ทำการศึกษาการทำนายลักษณะของการตัดของกระบวนการตัดด้วยวิธีการจ่ายประจุไฟฟ้า โดยการใช้โครงข่ายประสาทเทียม ชนิด Feed forward error back propagation ลักษณะเฉพาะที่ใช้ในการตัดที่พิจารณา ได้แก่ อัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด และความหยาบผิวของชิ้นงาน วัสดุชิ้นงานที่ใช้ คือ เหล็กกล้าเครื่องมือ DC53 และใช้ทองแดงเป็นอิเล็กโทรด โดยมีตัวแปรในการตัด คือช่วงเวลาในการจ่ายไฟฟ้าในการสปาร์ค และกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ค ผลการวิจัยพบว่ามีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในการทำนายอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน อัตราการสึกของอิเล็กโทรดและความหยาบผิวของชิ้นงาน เท่ากับ 1.12% 5.68% และ 15.62%

สันติรัฐ นันสะอาง , กิตติพงศ์ ธีรสมบูรณ์กุล, ไพศาล บำเพิงรัตน์ และสมชัย มิ่งมิตร [21] ทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อคุณสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าแมงกานีสสูง ที่มีผลต่อการให้ความร้อนแก่เหล็กกล้าแมงกานีสสูงที่อุณหภูมิแล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วโดยการชุบน้ำ และปล่อยให้เย็นตัวในเตาเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกลและโครงสร้าง

จุลภาคของเหล็กกล้าแมงกานีสสูง เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูง โดยการอบให้ความร้อนแก่เหล็กกล้าแมงกานีสสูง โดยการควบคุมอุณหภูมิ ตั้งแต่ 1050 °C 1100 °C 1150 °C และ 1200°C เพื่อให้แมงกานีสคาร์ไบด์สลายตัวและควบคุมการเย็นตัวด้วยการทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วโดยการชุบน้ำ ผลการทดลองพบว่า ในการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ แล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วโดยการชุบน้ำ และปล่อยให้เย็นตัวในเตาจะทำให้คุณสมบัติด้านความเข็งของเหล็กกล้าแมงกานีสสูงนั้นเปลี่ยนแปลงได้น้อย แต่จะส่งผลให้ค่าความเค้นสูงสุด (Ultimate Strength) มีค่าลดลง ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวจะมีค่าสูงที่อุณหภูมิ 1050 °C และพบว่าเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 1200 °C จะทำให้คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าแมงกานีสสูงต่ำลง แต่การอบที่อุณหภูมิ 1100 °C แล้วปล่อยให้เย็นตัวภายในเตา สามารถเพิ่มคุณสมบัติด้านความเหนียวของเหล็กกล้าแมงกานีสสูงขึ้นได้อย่างมาก แม้ว่าคุณสมบัติด้านความแข็งยังคงไม่เปลี่ยนแปลง