

การศึกษาผลกระทบของการปรับปรุงสมรรถนะกระบวนการกัดเซาะโลหะ
ด้วยไฟฟ้าโดยใช้อิเล็กโทรดแบบหลายช่องฉีดยุติ

A STUDY ON PERFORMANCE IMPROVEMENT OF ELECTRICAL DISCHARGE
MACHINING USING MULTI-APERTURE INNER FLUSHING



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2564

KMITL-2021-EN-D-218-070

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A STUDY ON PERFORMANCE IMPROVEMENT OF ELECTRICAL DISCHARGE
MACHINING USING MULTI-APERTURE INNER FLUSHING

SUPPAWAT CHUVAREE

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2021

KMITL-2021-EN-D-218-070

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2021

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาผลกระทบของการปรับปรุงสมรรถนะกระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้าโดยใช้อิเล็กโตรดแบบหลายช่องฉีด
นักศึกษา	นายศุภวัฒน์ ชูวารี
รหัสนักศึกษา	58601317
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
พ.ศ.	2564
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาผลกระทบของการปรับปรุงการฉีดสารไดอิเล็กทริกในกระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้าที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการทำงาน ได้แก่ อัตราการขจัดเนื้องาน อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด ช่องว่างการแปรรูป ค่าความเบี่ยงเบนของความขนานกับทิศทางการแปรรูป เวลาในการแปรรูป ตลอดจนคุณภาพผิวงานภายหลังการแปรรูป ในการทดลองนี้ทำการกัดเซาะชิ้นงานโดยมีอัตราส่วนของความลึกในการแปรรูปและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอิเล็กโตรดมีค่ามากกว่า 4 เท่า ตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่ เวลาเปิด เวลาปิด กระแสไฟฟ้า และการหมุนของอิเล็กโตรด นอกจากนี้อิเล็กโตรดทองแดงถูกทำการออกแบบและสร้างขึ้นเพื่อสนับสนุนการไหลเวียนของสารไดอิเล็กทริกในรูปแบบของการฉีดผ่านแกนกลางอิเล็กโตรดแบบหลายจุด โดยการทดลองจะได้รับการเปรียบเทียบกับการใช้อิเล็กโตรดแท่งตันและฉีดสารไดอิเล็กทริกจากด้านข้างแบบปกติ ผลการวิจัยพบว่า เวลาเปิด กระแสไฟฟ้า และการหมุนของอิเล็กโตรด มีผลต่ออัตราการขจัดเนื้องาน อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด และช่องว่างการแปรรูป ตลอดจนค่าความหยาบผิวเฉลี่ย การศึกษาการหมุนของอิเล็กโตรดที่ 175 rpm ร่วมกับการฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโตรดแบบหลายจุด ให้อัตราการขจัดเนื้องานเพิ่มขึ้น 35.28 % เวลาในการแปรรูปลดลง 26.10 % เมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาไดอิเล็กทริกด้านข้างแบบปกติ การศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการแปรรูปลึก พบว่าให้ค่าอัตราการขจัดเนื้องานสูงสุดที่ 21.660 mm³/min การเกิดช่องว่างในการแปรรูปต่ำสุด 0.196 mm ค่าความเบี่ยงเบนของความขนานกับทิศทางการแปรรูป 0.107 mm ที่ระดับความลึก 50 mm โดยการใช้ค่าตัวแปรที่เหมาะสมที่สุด คือ เวลาเปิด 150 μ s เวลาปิด 2 μ s กระแสไฟฟ้า 15 A และการหมุนของอิเล็กโตรด 75 rpm การศึกษาพื้นผิวชิ้นงานภายหลังการแปรรูปตรวจพบการก่อตัวของ Recast Layer บนพื้นผิวชิ้นงานเมื่อใช้การฉีดสารไดอิเล็กทริกด้านข้างแบบปกติ ในทางตรงข้ามกันไม่พบการก่อตัวของ Recast Layer บนพื้นผิวชิ้นงานที่ใช้วิธีการฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโตรดแบบหลายจุด ซึ่งเป็นตัวชี้วัดว่าการฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโตรดแบบหลายจุดสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพในการแปรรูปลึกได้

Thesis Title	A STUDY ON PERFORMANCE IMPROVEMENT OF ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING USING MULTI-APERTURE INNER FLUSHING
Student	Mr. Suppawat Chuvaree
Student ID.	58601317
Degree	Doctor of Engineering
Program	Industrial Engineering
Year	2021
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Kannachai Kanlayasiri

ABSTRACT

This thesis was aimed to investigate the effect of the dielectric flushing system of electrical discharge machining (EDM) on the machining performance such as material removal rate (MRR), electrode wear ratio (EWR), gap clearance (GC), parallelism deviation, machining time (MT), and surface integrity of the machined surface. The experiments were carried out using a depth-to-diameter ratio over four. The machining parameters were pulse on-time, pulse off-time, current, and electrode rotation. Copper electrode was specifically fabricated for flushing via multi-aperture inner flushing. The performance of the deep hole machining process with conventional side flushing and multi-aperture inner flushing were investigated and compared. The results showed that pulse on-time, current, and electrode rotation were positively correlated with the MRR, EWR, GC, and surface roughness. The machining time (50 mm in depth) was reduced by 26.10% when using multi-aperture inner flushing electrode. In addition, the application of multi-aperture inner flushing electrode with electrode rotation at 150 rpm improved the MRR by 35.28 %. The optimal condition to obtain a maximum of MRR (21.660 mm³/min), minimum of GC (0.196 mm), and parallelism deviation (0.107 mm) was 150 μ s pulse on-time, 2 μ s pulse off-time, 15 A current, and 70 rpm electrode rotation. The recast layer could be observed on the workpiece machined with conventional side flushing EDM. However, no recast layer was detected on the workpiece machined with multi-aperture inner flushing.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาจาก รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ ซึ่งเป็นอาจารย์ควบคุมวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาและให้คำปรึกษากับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณอาจารย์ เจ้าหน้าที่ ประจำสาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่เอื้ออำนวย ช่วยเหลือ สำหรับสถานที่ในการปฏิบัติงานและให้คำปรึกษาในด้านต่างๆ

ขอขอบคุณบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ
สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกเรื่องๆ ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี
คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ศุภวัฒน์ ชูวารี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	XII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	4
1.3 สมมติฐานการศึกษา.....	4
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....	5
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา.....	5
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1.1 ผลของค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า.....	7
2.1.2 ผลของค่าตัวแปรที่เหมาะสมด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง.....	9
2.1.3 ผลของการศึกษาอิทธิพลของการออกแบบการฉีตสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโตรดแบบหลายจุด.....	13
2.1.4 ผลของการศึกษาสภาพพื้นผิวชิ้นงานและอิเล็กโตรดภายหลังการแปรรูป.....	15
2.1.5 เทคโนโลยีด้านกระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า.....	17
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	20
2.2.1 กระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า (EDM).....	20
2.2.1.1 เวลาเปิด.....	24

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.1.2 เวลาปิด.....	25
2.2.1.3 กระแสไฟฟ้า.....	26
2.2.1.4 ความถี่.....	26
2.2.1.5 สารไดอิเล็กตริก.....	27
2.2.1.6 กระบวนการฉีดสารไดอิเล็กตริก.....	28
2.2.1.7 วัสดุอิเล็กโตรด.....	29
2.2.1.8 การหมุนของอิเล็กโตรด.....	30
2.2.2 การเจาะรูลึกด้วยกระบวนการอีดีเอ็ม.....	30
2.2.3 การประเมินประสิทธิภาพการแปรรูปของกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า...	31
2.2.3.1 อัตราการขจัดเนื้องาน.....	32
2.2.3.2 อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด.....	32
2.2.3.3 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย.....	33
2.2.3.4 ช่องว่างการแปรรูป.....	33
2.2.3.5 อิทธิพลทางความร้อนที่มีผลต่อพื้นผิวชิ้นงาน.....	34
2.2.4 การออกแบบการทดลอง.....	35
2.2.5 วิธีพื้นผิวผลตอบสนอง.....	37
2.2.6 ฟังก์ชันความพึงพอใจ.....	39
2.2.6.1 กรณีที่ผลตอบที่ใช้ในการพิจารณามีเพียงผลตอบเดียว.....	39
2.2.6.2 กรณีที่ผลตอบที่ใช้ในการพิจารณามีสองผลตอบ.....	40
2.2.7 การตรวจสอบพื้นผิวชิ้นงานภายหลังกระบวนการ EDM.....	41
2.2.7.1 SEM.....	41
2.2.7.2 EDS.....	42
2.3 สมมติฐานด้านการออกแบบอิเล็กโตรดแบบหลายช่องฉีด.....	43
2.3.1 หลักการออกแบบอิเล็กโตรดเพื่อจ่ายสารไดอิเล็กตริกแบบหลายช่องฉีด.....	43
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	46
3.1 การศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในกระบวนการแปรรูปลึก.....	46
3.1.1 วัสดุและวิธีการเตรียมชิ้นงานทดลอง.....	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.2 การปรับตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์.....	48
3.1.3 การกำหนดค่าตัวแปรและการเก็บผลการทดลอง.....	50
3.2 การศึกษาและวิเคราะห์ค่าตัวแปรที่เหมาะสมในกระบวนการแปรรูปลิคด้วย วิธีการฉีดสารไดอิเล็กทริกด้านข้างด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง.....	54
3.2.1 วัสดุและวิธีการทดลอง.....	54
3.2.2 การดำเนินงานและการสรุปผล.....	54
3.2.3 การตรวจสอบและการวิเคราะห์ผล.....	57
3.3 การศึกษาอิทธิพลของการออกแบบการฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลาง อิเล็กโตรดแบบหลายจุดที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในกระบวนการแปรรูปลิค.....	58
3.3.1 หลักการออกแบบการฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโตรดแบบ หลายจุด.....	58
3.3.2 การตรวจสอบและการวิเคราะห์ผล.....	61
3.4 ผลการศึกษาและวิเคราะห์ค่าตัวแปรที่เหมาะสมในกระบวนการแปรรูปลิคด้วย การฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโตรดแบบหลายจุด.....	64
3.4.1 วัสดุและวิธีการทดลอง.....	64
3.4.2 การตรวจสอบและการวิเคราะห์ผล.....	64
3.5 ผลการศึกษาสภาพพื้นผิวชิ้นงานและอิเล็กโตรดภายหลังการแปรรูป.....	65
3.5.1 วัสดุและวิธีการทดลอง.....	65
3.5.2 การตรวจสอบและการวิเคราะห์ผล.....	67
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	68
4.1 ผลการศึกษาค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นที่มีผลต่อประสิทธิภาพในกระบวนการ แปรรูปลิค.....	68
4.1.1 ผลกระทบของการปรับค่าเวลาเปิดที่มีผลต่ออัตราการขจัดเนื้องาน และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด.....	68
4.1.2 ผลกระทบของการปรับค่าเวลาปิดที่มีผลต่ออัตราการขจัดเนื้องาน และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด.....	69

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.3 ผลกระทบของการปรับค่ากระแสไฟฟ้าที่มีผลต่ออัตราการขจัดเนื้องาน และอัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์.....	70
4.2 ผลการศึกษาและวิเคราะห์ค่าตัวแปรที่เหมาะสมในกระบวนการแปรรูปลึกด้วย วิธีการฉีดสารไดอิเล็กตริกด้านข้าง.....	71
4.2.1 ผลการศึกษาค่าอัตราการขจัดเนื้องาน.....	73
4.2.2 ผลการศึกษาค่าอัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์.....	74
4.2.3 ผลการศึกษาค่าช่องว่างในการแปรรูป.....	78
4.2.4 ผลการวิเคราะห์ค่าตัวแปรที่เหมาะสมในกระบวนการแปรรูปลึกแบบหลาย วัตถุประสงค์โดยการใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจ.....	81
4.3 ผลการศึกษาอิทธิพลของการออกแบบการฉีดสารไดอิเล็กตริกผ่านแกนกลาง อิเล็กทรอนิกส์แบบหลายจุดที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการในกระบวนการแปรรูปลึก.....	85
4.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการฉีดสารไดอิเล็กตริกกับความลึกในการ แปรรูปที่มีผลต่อเวลาในการแปรรูป.....	85
4.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการฉีดสารไดอิเล็กตริกร่วมกับการหมุน ของอิเล็กทรอนิกส์ที่มีผลต่ออัตราการขจัดเนื้องาน.....	86
4.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการฉีดสารไดอิเล็กตริกร่วมกับการหมุน ของอิเล็กทรอนิกส์ที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวเฉลี่ย.....	88
4.3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการฉีดสารไดอิเล็กตริกร่วมกับการหมุน ของอิเล็กทรอนิกส์ที่มีผลต่อความเบี่ยงเบนของความขนานกับทิศทางการแปรรูป.....	89
4.3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการฉีดสารไดอิเล็กตริกร่วมกับการหมุน ของอิเล็กทรอนิกส์ที่มีผลต่อค่าช่องว่างในการแปรรูป.....	91
4.4 ผลการศึกษาและวิเคราะห์ค่าตัวแปรที่เหมาะสมในกระบวนการแปรรูปลึกด้วย การฉีดสารไดอิเล็กตริกผ่านแกนกลางอิเล็กทรอนิกส์แบบหลายจุด.....	92
4.4.1 ผลการศึกษาค่าอัตราการขจัดเนื้องาน.....	94
4.4.2 ผลการศึกษาค่าอัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์.....	96
4.4.3 ผลการศึกษาค่าช่องว่างในการแปรรูป.....	99
4.4.4 ผลการวิเคราะห์ค่าตัวแปรที่เหมาะสมแบบหลายวัตถุประสงค์โดยการใช้ ฟังก์ชันความพึงพอใจโดยการประยุกต์ใช้การฉีดสารไดอิเล็กตริกผ่านแกน กลางอิเล็กทรอนิกส์แบบหลายจุด.....	102

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5 ผลการศึกษาสภาพพื้นผิวชิ้นงานและอิเล็กทรอนิกส์ภายหลังการแปรรูป.....	109
4.5.1 คุณภาพพื้นผิวชิ้นงานและอิเล็กทรอนิกส์ภายหลังการแปรรูป.....	109
4.5.2 ผลการตรวจสอบชิ้นหลอมใหม่บนผนังร่องเจาะภายหลังการแปรรูป.....	111
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	116
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	116
5.1.1 ผลของค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นที่มีผลต่อประสิทธิภาพในกระบวนการแปรรูปลึง.....	116
5.1.2 อิทธิพลของค่าตัวแปรที่เหมาะสมในกระบวนการแปรรูปลึงด้วยวิธีการฉีตสารไดอิเล็กตริกด้านข้าง.....	116
5.1.3 ผลของการออกแบบการฉีตสารไดอิเล็กตริกผ่านแกนกลางอิเล็กทรอนิกส์แบบหลายจุดที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการในกระบวนการแปรรูปลึง.....	117
5.1.4 อิทธิพลของค่าตัวแปรที่เหมาะสมในกระบวนการแปรรูปลึงด้วยการฉีตสารไดอิเล็กตริกผ่านแกนกลางอิเล็กทรอนิกส์แบบหลายจุด.....	118
5.1.5 ผลของสภาพพื้นผิวชิ้นงานและอิเล็กทรอนิกส์ภายหลังการแปรรูป.....	119
5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการศึกษาในอนาคต.....	119
เอกสารอ้างอิง.....	120
ภาคผนวก ก ข้อมูลผลการทดลอง.....	128
ภาคผนวก ข บทความทางวิชาการ.....	140
ประวัติผู้เขียน.....	175

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 พารามิเตอร์ควบคุม (กระแสไฟฟ้า, เวลาเปิด, และเวลาปิด) ในการรักษาค่าความหยาบผิวในการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า.....	11
2.2 เปรียบเทียบรูปแบบของการแปรรูปด้วยกระบวนการ EDM.....	19
2.3 คุณสมบัติที่สำคัญของทองแดง.....	30
3.1 ส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าแม่พิมพ์พลาสติก เกรด AISI P20.....	47
3.2 การศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในกระบวนการแปรรูปลึกโดยการปรับค่าเวลาเปิดและคงที่เวลาปิด.....	50
3.3 การศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในกระบวนการแปรรูปลึกโดยการปรับค่าเวลาปิดและคงที่เวลาเปิด.....	51
3.4 ตัวแปรต้น 4 ตัว และระดับตัวแปรในการทดลอง 3 ระดับ.....	55
3.5 แผนการทดลองแบบประสมกลาง (Central Composite Design : CCD).....	55
3.6 รูปแบบการเก็บข้อมูลด้านความเบี่ยงเบนด้านความกลมของรูเจาะ.....	63
4.1 ผลการทดลองจากการออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง (CCD) สำหรับรูปแบบการฉีดสารไดอิเล็กทริกด้านข้างแบบปกติ.....	72
4.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในรูปแบบสมการถดถอยของพารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญต่อการตอบสนองของอัตราการขจัดเนื้องานสำหรับการฉีดสารไดอิเล็กทริกด้านข้างแบบปกติ	73
4.3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในรูปแบบสมการถดถอยของพารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญต่อการตอบสนองของอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดสำหรับการฉีดสารไดอิเล็กทริกด้านข้างแบบปกติ.....	75
4.4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในรูปแบบสมการถดถอยของพารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญต่อการตอบสนองของช่องว่างในการแปรรูปสำหรับการฉีดสารไดอิเล็กทริกด้านข้างแบบปกติ	78
4.5 แสดงตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานและความแม่นยำในการแปรรูป.....	81
4.6 เงื่อนไขสำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการแปรรูปลึกสำหรับการฉีดสารไดอิเล็กทริกด้านข้างแบบปกติ.....	82
4.7 ข้อมูลการวิเคราะห์ผลตอบที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ผลตอบหลายตัวแปรโดยใช้วิธีฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability Function).....	83

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.8 ผลการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการพยากรณ์และการทดลองจริงโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการฉีดสารไดอิเล็กตริกด้านข้างแบบปกติ.....	84
4.9 ช่วงการทำนาย 95% PI (Prediction Interval : PI) ของการพยากรณ์และการทดสอบจริง.....	84
4.10 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการฉีดสารไดอิเล็กตริกกับความลึกในการแปรรูปที่มีผลต่อเวลาในการแปรรูป.....	85
4.11 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการฉีดสารไดอิเล็กตริกกับการหมุนของอิเล็กโตรดที่มีผลต่ออัตราการขจัดเนื้องาน.....	87
4.12 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการฉีดสารไดอิเล็กตริกกับการหมุนของอิเล็กโตรดที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวเฉลี่ย.....	88
4.13 ผลการทดลองจากการออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง (CCD) สำหรับรูปแบบการฉีดสารไดอิเล็กตริกผ่านแกนกลางอิเล็กโตรดแบบหลายจุด.....	92
4.14 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในรูปแบบสมการถดถอยของพารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญต่อการตอบสนองของอัตราการขจัดเนื้องานสำหรับการฉีดสารไดอิเล็กตริกผ่านแกนกลางอิเล็กโตรดแบบหลายจุด.....	94
4.15 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในรูปแบบสมการถดถอยของพารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญต่อการตอบสนองของอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดสำหรับการฉีดสารไดอิเล็กตริกผ่านแกนกลางอิเล็กโตรดแบบหลายจุด.....	97
4.16 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในรูปแบบสมการถดถอยของพารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญต่อการตอบสนองของช่องว่างการแปรรูปสำหรับการฉีดสารไดอิเล็กตริกผ่านแกนกลางอิเล็กโตรดแบบหลายจุด.....	99
4.17 แสดงตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานและความแม่นยำในการแปรรูป.....	102
4.18 เงื่อนไขสำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการแปรรูปลึกสำหรับการฉีดสารไดอิเล็กตริกผ่านแกนกลางอิเล็กโตรดแบบหลายจุด.....	103
4.19 ข้อมูลการวิเคราะห์ผลตอบที่ที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ผลตอบหลายตัวแปรโดยการใช้วิธีฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability Function).....	104

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.20 ผลการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการพยากรณ์และการทดลองจริงโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโตรดแบบหลายจุด.....	105
4.21 ช่วงการทำนาย 95% PI (Prediction Interval: PI) ของการพยากรณ์และการทดสอบจริง.....	105
4.22 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแปรรูปสีกะหว่างการฉีดสารไดอิเล็กทริกด้านข้างแบบปกติและการฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโตรดแบบหลายจุดด้วยเงื่อนไขการทำงานที่ดีที่สุด (Optimal Conditions).....	108
4.23 ผลการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมี (EDS) ของพื้นผิวชิ้นงานภายหลังการแปรรูปที่ระดับความลึก 30 mm สำหรับวิธีการ Side Flushing และวิธีการ Multi-aperture Flushing.....	115

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 การประเมินผลและผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า.....	2
1.2 รูปแบบการผลิตทางด้านพิคโตรูปรองของชิ้นงานที่ผ่านการแปรรูปรูเจาะที่มีอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดต่อความลึกในการกัดเซาะในปริมาณสูง.....	3
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาผิวและอิเล็กโตรดที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงระยะอาร์ค..	11
2.2 กระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้าและผลกระทบที่มีต่อวัสดุชิ้นงาน.....	15
2.3 การจำแนกกลุ่มกระบวนการการผลิตตามมาตรฐาน DIN 8580.....	21
2.4 กระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า (EDM).....	22
2.5 สภาพเริ่มต้นของการสปาร์คด้วยกระแสไฟฟ้า.....	23
2.6 สภาพการสปาร์คในการสปาร์คด้วยกระแสไฟฟ้า.....	23
2.7 สภาพการขจัดเศษและระบายความร้อนจากการสปาร์คด้วยกระแสไฟฟ้า.....	23
2.8 ช่วงระยะเวลาเปิดและปิดเพื่อให้เกิดการถ่ายเทประจุ.....	24
2.9 ความสัมพันธ์ของเวลาเปิดต่อการขจัดเนื้องานและการสึกหรอของอิเล็กโตรด.....	25
2.10 ความสัมพันธ์ของเวลาปิดต่อการขจัดเนื้องานและการสึกหรอของอิเล็กโตรด.....	26
2.11 ลักษณะรูปร่างของอิเล็กโตรดทองแดง.....	29
2.12 การจำแนกประเภทของกระบวนการอีดีเอ็ม.....	31
2.13 การคำนวณค่าความหนาผิวเฉลี่ย.....	33
2.14 ช่องว่าง (Gap Clearance).....	33
2.15 ชั้นผิวชิ้นงานที่ได้รับอิทธิพลทางความร้อนจากกระบวนการ EDM.....	34
2.16 พื้นผิวผลตอบสนองสามมิติ.....	38
2.17 การกำหนดน้ำหนักรูปร่างของผลตอบกลับที่มีผลตอบเดียว.....	40
2.18 การกำหนดน้ำหนักรูปร่างของผลตอบกลับที่มีสองผลตอบ.....	41
2.19 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	42
2.20 ภาพถ่ายจากกล้องเอกซเรย์สเปคโตรสโคปีแบบกระจายพลังงาน (EDS).....	43
3.1 การเตรียมวัสดุชิ้นงานทดลองเหล็กกล้าแม่พิมพ์ AISI P20.....	47
3.2 การเตรียมวัสดุอิเล็กโตรดทองแดง.....	48
3.3 เครื่องกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้ายี่ห้อ Aristech รุ่น EDM CNC 430.....	49
3.4 การตรวจสอบการเคลื่อนตัวตามแนวแกนของอิเล็กโตรดและชิ้นงานก่อนการทดลองด้วยนาฬิกาวัดที่มีค่าความละเอียด ± 1 ไมโครเมตร.....	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5 ขั้วไฟฟ้าอิเล็กโทรดที่มีผลต่อความร้อน.....	53
3.6 หัวจับอิเล็กโทรดที่ถูกออกแบบให้รองรับการหมุนของอิเล็กโทรดรวมกับการจ่ายสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลาง.....	57
3.7 กระบวนการตรวจสอบและวัดผลช่องว่างในการแปรรูป (Gap Clearance).....	58
3.8 รูปแบบอิเล็กโทรดทองแดงที่ทำการออกแบบและสร้างขึ้นในการทดลอง.....	60
3.9 การตรวจสอบความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) แบบสัมผัสด้วยเครื่องมือวัด ยี่ห้อ Mahr รุ่น PS1.	61
3.10 การตรวจสอบค่าความเบี่ยงเบนด้านความกลมของรูเจาะโดยใช้กล้องตรวจสอบความเรียบผิวด้วยเลเซอร์แบบไม่สัมผัส Noncontact Laser Scanning Confocal Microscope ยี่ห้อ Olympus รุ่น LEXT OLS 5000 (Japan).....	62
3.11 แสดงพิกัดตำแหน่งอ้างอิงตามแนวแกน (Datum Axis) สำหรับการฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางแบบหลายจุด.....	60
3.12 แผนภาพการทดลองโดยสรุปและตัวแปรคงที่ที่ใช้ในการทดลอง.....	65
3.13 ชิ้นงานทดลอง AISI P20 ภายหลังจากการแปรรูป.....	66
3.14 ตำแหน่งการตัดชิ้นงานทดสอบเพื่อนำไปตรวจสอบชั้นหลอมใหม่.....	66
4.1 ผลกระทบของการปรับค่าเวลาเปิดที่มีผลต่ออัตราการจัดเนื้องานและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด.....	68
4.2 ผลกระทบของการปรับค่าเวลาปิดที่มีผลต่ออัตราการจัดเนื้องานและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด.....	69
4.3 ผลกระทบของการปรับค่ากระแสไฟฟ้าที่มีผลต่ออัตราการจัดเนื้องานและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด.....	70
4.4 ลักษณะผิวงานที่เกิดจากการปรับค่ากระแส (กำลังขยาย 35 เท่า).....	71
4.5 พื้นผิวแสดงผลกระทบร่วมระหว่างเวลาเปิดและกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่ออัตราการจัดเนื้องาน.....	74
4.6 พื้นผิวแสดงผลกระทบร่วมที่มีผลต่ออัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด.....	77
4.7 ชั้นฟิล์มคาร์บอนบนผิวอิเล็กโทรดทองแดง.....	78
4.8 พื้นผิวแสดงผลกระทบร่วมที่มีผลต่อช่องว่างในการแปรรูป.....	80
4.9 กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมและระดับค่าความพึงพอใจ.....	83

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการฉีดสารไดอิเล็กตริกกับความลึกในการแปรรูป ที่มีผลต่อเวลาในการแปรรูป.....	86
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการฉีดสารไดอิเล็กตริกกับการหมุนของอิเล็กโตรด ที่มีผลต่ออัตราการขจัดเนื้องาน.....	87
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการฉีดสารไดอิเล็กตริกกับการหมุนของอิเล็กโตรด ที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวเฉลี่ย.....	89
4.13 ผลการทดลองตรวจวัดค่าความเป็ยเบนของความขนานกับทิศทางการแปรรูปโดยใช้การ ฉีดสารไดอิเล็กตริกผ่านแกนกลางแบบหลายจุด.....	90
4.14 ผลการทดลองตรวจวัดค่าความเป็ยเบนของความขนานกับทิศทางการแปรรูปโดยใช้ อิเล็กโตรดแบบแท่งตันและฉีดสารไดอิเล็กตริกด้านข้างแบบปกติ.....	91
4.15 ผลการตรวจวัดค่าช่องว่างในการแปรรูป.....	91
4.16 พื้นผิวแสดงผลกระทบร่วมที่มีผลต่ออัตราการขจัดเนื้องาน.....	95
4.17 พื้นผิวแสดงผลกระทบร่วมที่มีผลต่ออัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด.....	98
4.18 พื้นผิวแสดงผลกระทบร่วมที่มีผลต่อช่องว่างในการแปรรูป.....	100
4.19 กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมและระดับค่าความพึงพอใจ.....	104
4.20 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะของช่องว่างในการแปรรูประหว่างการฉีดสารไดอิเล็กตริก จากด้านข้างแบบปกติกับการฉีดสารไดอิเล็กตริกผ่านแกนกลางอิเล็กโตรดแบบหลายจุด...	107
4.21 พื้นผิวอิเล็กโตรดที่ผ่านกระบวนการแปรรูปลึกโดยการฉีดสารไดอิเล็กตริก ด้านข้างแบบปกติ.....	110
4.22 พื้นผิวอิเล็กโตรดที่ผ่านกระบวนการแปรรูปลึกโดยการฉีดสารไดอิเล็กตริกผ่านแกนกลาง อิเล็กโตรดแบบหลายจุด.....	111
4.23 ภาพถ่าย SEM และผลการตรวจสอบ EDS ของพื้นผิวชิ้นงานภายหลังการแปรรูปที่ระดับ ความลึก 30 mm สำหรับวิธีการ Side Flushing และวิธีการ Multi-aperture Flushing	113

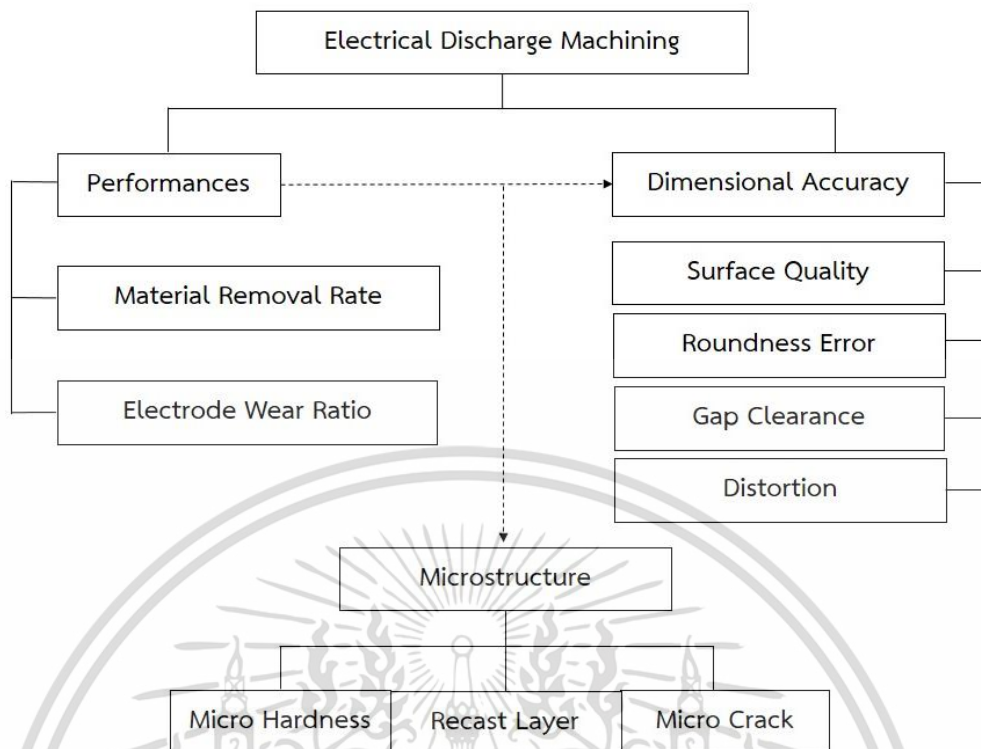
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า (Electrical Discharge Machining : EDM) เป็นกระบวนการที่อาศัยการกัดกร่อนจากการจ่ายประจุกระแสไฟฟ้า (Discharge Current) สลับกับการหยุดจ่ายประจุกระแสไฟฟ้า ผ่านวัสดุตัวนำที่เรียกว่า อิเล็กโทรด (Electrode) ไปยังผิววัสดุชิ้นงาน โดยมีสารไดอิเล็กทริกที่เป็นของเหลวกึ่งตัวนำวางกันเป็นชั้นบางๆ เพื่อไม่ให้วัสดุอิเล็กโทรดสัมผัสกับชิ้นงาน เกิดการสปาร์คที่ความถี่สูงเพียงพอต่อการหลอมละลายและถูกขจัดออกในรูปของ ของแข็งของเหลว และแก๊ส ด้วยสารไดอิเล็กทริกที่คอยทำหน้าที่ขจัดเศษ และรักษาความเสถียรของการสปาร์ค [1] กระบวนการดังกล่าวนี้นิยมใช้สำหรับการแปรรูปวัสดุที่มีความแข็งสูงยากต่อการแปรรูปด้วยกระบวนการทางกล รวมทั้งการแปรรูปวัสดุที่มีรูปร่างซับซ้อน ตลอดจนยังใช้ในการปรับปรุงผิววัสดุชิ้นงาน (Surface Modification) [2]

การแปรรูปด้วยการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้าโดยส่วนใหญ่จะประเมินผลกระทบที่มีต่อประสิทธิภาพการทำงาน (Performance) จากปริมาณเนื้องานที่ถูกขจัดออกต่อหน่วยเวลาที่ใช้ เรียกว่า อัตราการขจัดเนื้องาน (MRR : Materials Removal Rate) และประเมินการสึกกร่อนของวัสดุอิเล็กโทรดจากร้อยละจากการสึกกร่อนของอิเล็กโทรดต่อการสึกกร่อนของวัสดุชิ้นงาน เรียกว่า อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR : Electrode Wear Ratio) [1, 2] จากการสึกกร่อนของทั้งวัสดุอิเล็กโทรดและวัสดุชิ้นงานทำให้มีผลกระทบต่อความแม่นยำในการแปรรูป (Dimensional Accuracy) กล่าวคือรูปแบบของการแปรรูปที่วัสดุคมตัดไม่สัมผัสกับผิวงาน เมื่อรูปร่างของอิเล็กโทรดเปลี่ยนแปลงส่งผลต่อขนาดและรูปร่างของชิ้นงานที่สามารถประเมินผลจากความหยาบผิว (Surface Roughness) ความกลม (Roundness) ความเรียว (Taper) และช่องว่างที่เกิดขึ้นจากการสปาร์ค (Gap Clearance) [3] รูปแบบการประเมินผลและผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้าสามารถเขียนเป็นแผนภาพโดยสรุปดังแสดงในรูปที่ 1.1



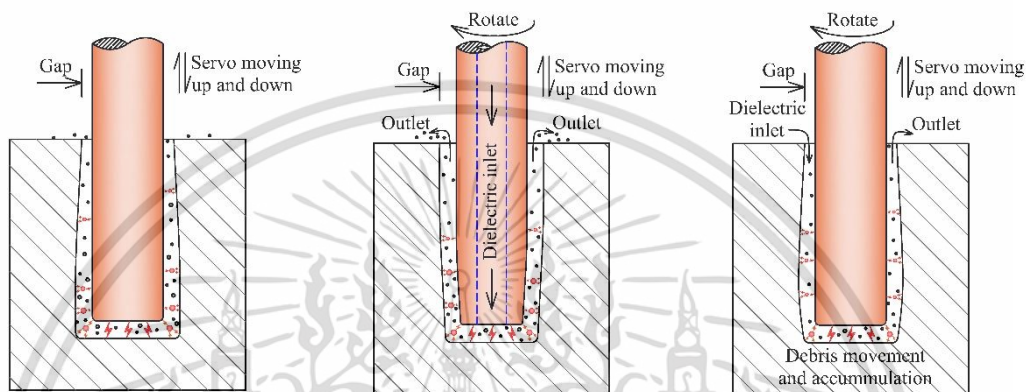
รูปที่ 1.1 การประเมินผลและผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า

การแปรรูปรูเจาะที่มีอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดต่อความลึกในการกัดเซาะในปริมาณสูง (High Aspect Ratio) ที่พบในการแปรรูปวัสดุที่มีความแข็งสูง และเป็นวัสดุที่ยากต่อการแปรรูป เช่น Aerospace Applications, Nozzle และ Injector มีสัดส่วนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะกับระยะความลึกเท่ากับ 3 เท่าหรือมากกว่า ทำให้ความสามารถในการแปรรูปลดลงตามความลึกของรูเจาะ [4] เนื่องจากความสามารถของการขจัดเศษจากการฉีตสารไดอิเล็กทริกเป็นไปได้ยาก ทำให้วัสดุอิเล็กโตรดเกิดการสึกหรองนำไปสู่รูทรงของรูเจาะที่ผิดเพี้ยน และมากไปกว่านั้นการกัดเซาะรูเจาะที่มีความลึกมากมักจะประสบปัญหาการเกิดการโค้งเว้าของพื้นผิวตามแนวความลึกของการสปาร์ค รูปแบบการผิดพลาดทางด้านพิภครูปทรงของชิ้นงานที่ผ่านการแปรรูปรูเจาะที่มีอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดต่อความลึกในการกัดเซาะในปริมาณสูงแสดงในรูปที่ 1.2

จากรูปที่ 1.2 ผลกระทบของการสะสมเศษอนุภาคโลหะที่ไม่สามารถขจัดออกโดยสารไดอิเล็กทริก ทำให้เกิดการสปาร์คระหว่างผิววัสดุอิเล็กโตรดกับผิววัสดุชิ้นงานตามระดับความลึกในการแปรรูปส่งผลต่อการเกิดลักษณะการเรียวตามแนวแกนการแปรรูปดังแสดงในรูปที่ 1.2 (a) ในกรณีที่อิเล็กโตรดหมุนและจ่ายสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางไปพร้อมๆ กัน ทำให้การไหลเวียนของสารไดอิเล็กทริกเป็นไปอย่างต่อเนื่อง ซึ่งไม่ทำให้สารไดอิเล็กทริกเกิดการปนเปื้อนของอนุภาคโลหะในช่องว่างการแปรรูป ส่งผลให้ในกระบวนการสปาร์คมีความเสถียรในทุกๆ วัฏจักร นั้นหมายความว่า

ความเข้มข้นของกระแสไฟฟ้าจะเกิดขึ้นบริเวณส่วนปลายอิเล็กโตรด ส่งผลให้อิเล็กโตรดเกิดการสึก
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หอรอบมากขึ้น ทำให้รูปทรงรูเจาะเกิดการการเร็วแบบรูปทรงวี ดังแสดงในรูปที่ 1.2 (b) ในกรณีอิเล็กโตรดหมุนเมื่อระดับความลึกในการแปรรูปเพิ่มสูงขึ้นมากกว่า 3 เท่าของขนาดอิเล็กโตรด เศษโลหะที่หลุดออกมาจากการแปรรูปบางส่วนจะถูกขจัดออกโดยสารไดอิเล็กทริกด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่เกิดจากการหมุนของอิเล็กโตรดอย่างไรก็ตามเศษโลหะที่ไม่สามารถขจัดออกได้หมดก็จะสะสมภายในช่องว่างการแปรรูป จะเป็นตัวกลางให้เกิดการอาร์คกันระหว่างผนังรูเจาะกับผนังอิเล็กโตรดตลอดความลึกในการแปรรูป ซึ่งเรียกปฏิกิริยาดังกล่าวว่า Secondary Spark ดังแสดงในรูปที่ 1.2 (c)



a) การเร็วตามแนวแกนการแปรรูป b) การเร็วแบบรูปทรงวี c) การโค้งเว้าของผนังรูเจาะ

รูปที่ 1.2 รูปแบบการผิดพลาดทางด้านพิคโตรูทรงของชิ้นงานที่ผ่านการแปรรูปรูเจาะที่มีอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดต่อความลึกในการกัดเจาะในปริมาณสูง [5, 6]

จากการศึกษาการไหลของสารไดอิเล็กทริกพบว่า เศษอนุภาคที่หลุดออกมาจากกระบวนการสปาร์คจะเกิดการไหลวนในบริเวณพื้นที่ผิวระหว่างอิเล็กโตรดกับชิ้นงาน ทำให้เกิด Secondary Spark และส่งผลเป็นอย่างมากต่อความสามารถในการแปรรูปรูเจาะ ทั้งนี้ปัญหาดังกล่าวย่อมส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการแปรรูปและความแม่นยำในกระบวนการกัดเจาะวัสดุชิ้นงาน ดังนั้น การศึกษาผลกระทบของตัวแปรที่สำคัญในการกัดเจาะรูลึกจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง เพื่อช่วยให้ความสามารถในการแปรรูปมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น [7-8]

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการแปรรูปลึก (EDM Deep Hole) ที่มีสัดส่วนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอิเล็กโตรดกับระยะความลึกในการแปรรูปมากกว่า 4 เท่า (อิเล็กโตรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร, ความลึกในการแปรรูป 50 มิลลิเมตร) บนวัสดุเหล็กกล้าแม่พิมพ์งานเย็น AISI P20 ด้วยกระบวนการกัดเจาะโลหะด้วยไฟฟ้า (EDM) โดยการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการแปรรูป ได้แก่ เวลาปล่อยกระแสไฟฟ้า (Pulse on-time), เวลาหยุดปล่อยกระแสไฟฟ้า (Pulse off-time), กระแสไฟฟ้า (Current), และการหมุนของอิเล็กโตรด (Electrode Rotation) โดยงานวิจัยฉบับนี้ทำการออกแบบการไหลของสารไดอิเล็กทริกแบบใหม่ ซึ่งมีหลักการทำงานโดยการไหลเวียนสารไดอิเล็กทริกจากภายในสู่ภายนอกผ่านแกนกลางอิเล็กโตรด ด้วยรูเจาะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดเล็ก (Multi-aperture Flushing) ควบคู่กับการหมุนอิเล็กโทรดแทนการฉีดด้านข้างแบบปกติ (Conventional Side Flushing) เพื่อปรับปรุงความสามารถในการขจัดเศษโลหะ (Debris) ให้ออกจากพื้นที่การกัดเซาะอย่างสมบูรณ์ ป้องกันการเกิดการสปาร์คด้านข้าง (Secondary Spark) ระหว่างผิวอิเล็กโทรดกับผนังรูเจาะ อันจะนำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการแปรรูปลึกด้วยกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า ผลการทดลองประเมินจากประสิทธิภาพการแปรรูปได้แก่ อัตราการขจัดเนื้อ (Material Removal Rate : MRR) อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (Electrode Wear Ratio : EWR) ตลอดจนความแม่นยำทางด้านพิถีพิถันรูปทรง ได้แก่ ช่องว่างที่เกิดขึ้นจากการสปาร์ค (Gap Clearance : GC) ค่าความเบี่ยงเบนด้านความกลมของรูเจาะ (Roundness Error) คุณภาพผิววัสดุชิ้นงานในรูปของความหยาบผิวเฉลี่ย (Surface Roughness) รวมไปถึงการพิจารณาการเกิดขึ้นของชั้นใหม่ (Recast Layer) และเปรียบเทียบผลกับการฉีดสารไดอิเล็กตริกด้านข้างแบบปกติ

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของการแปรรูปลึกด้วยกระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้าบนวัสดุเหล็กกล้าแม่พิมพ์ AISI P20 Tool Steel

1.2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบของตัวแปรในกระบวนการแปรรูปลึกที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการทำงาน ตลอดจนคุณภาพผิวชิ้นงานและความแม่นยำในการแปรรูป

1.3 สมมติฐานการศึกษา

เมื่อระดับความลึกของการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป กล่าวคือมีอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดอิเล็กโทรด (พื้นที่สร้างสนามไฟฟ้า) ต่อความลึกในการกัดเซาะในปริมาณที่แตกต่างกันมาก ซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการแปรรูปในแง่ของความแม่นยำทางด้านรูปทรงเป็นหลัก นอกจากนี้ยังส่งผลต่อเวลาในการแปรรูปที่เพิ่มสูงขึ้น ทำให้อัตราการขจัดเนื้องานต่ำและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดมีค่าเพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นกัน จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาประกอบกับการทดลองเบื้องต้น สาเหตุดังกล่าวอาจมาจากความสามารถในการขจัดเศษอนุภาคที่หลุดออกมาจากการแปรรูปเป็นไปได้ยากเนื่องจากความลึกที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้เศษอนุภาคสะสมอยู่ในช่องว่างในการแปรรูป (Machining Gap) นอกจากนี้ความสามารถในการขจัดเศษด้วยสารไดอิเล็กตริกที่ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของเศษอนุภาควัสดุไหลผ่านด้านข้างทำงานเป็นผลให้เกิด Secondary Spark ระหว่างผิววัสดุอิเล็กโทรดกับผิววัสดุชิ้นงาน ด้วยเหตุนี้การศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการแปรรูปลึกด้วยการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า ประกอบกับศึกษารูปแบบการไหลของสารไดอิเล็กตริกที่ส่งผลให้ความแม่นยำในการแปรรูปจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

1.4.1 วัสดุอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้เป็นทองแดงบริสุทธิ์ 99.60% มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร โดยในการทดลองจะกำหนดระดับกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองคือ 0.25 แอมแปร์ต่อตารางมิลลิเมตร กัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้าสำหรับที่ระดับความลึก 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิเมตร

1.4.2 วัสดุชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองเป็นวัสดุเหล็กกล้าแม่พิมพ์งานเย็น AISI P20 เป็นเหล็กกล้าที่ใช้สร้างแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก

1.4.3 สารไดอิเล็กทริกที่ใช้เป็นสารไฮโดรคาร์บอน (EDM Fluid Oil DIET MS700) ชนิดพิเศษ โลหะและระบายความร้อน

1.4.4 ศึกษาและออกแบบเส้นทางการไหลเวียนของสารไดอิเล็กทริกควบคู่กับการหมุนของอิเล็กโตรดเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการแปรรูป

ก) ออกแบบการไหลเวียนสารไดอิเล็กทริกจากภายในสู่ภายนอกผ่านรูเจาะขนาดเล็ก (Multi-aperture Flushing) ที่มีขนาด 1 มิลลิเมตร จำนวน 12 จุด

ข) หัวจับอิเล็กโตรดถูกออกแบบและติดตั้งบนหัวเครื่องกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า สามารถจ่ายสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางได้ และสามารถทำความเร็วรอบในการหมุนได้ อยู่ในช่วงระหว่าง 0 – 175 รอบต่อนาที

1.4.5 ประสิทธิภาพการทำงานศึกษาและประเมินผลจาก

ก) อัตราการขจัดเนื้องาน (MRR : Materials Removal Rate) ประเมินจากปริมาตรเนื้องานที่ถูกขจัดออกต่อหน่วยเวลาที่ใช้ (ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อนาที)

ข) อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด (EWR : Electrode Wear Ratio) ประเมินจากปริมาตรอิเล็กโตรดที่สึกกร่อนต่อปริมาตรเนื้องานที่ถูกขจัดออก (เปอร์เซ็นต์)

1.4.6 ความแม่นยำในการแปรรูปศึกษาและประเมินจาก

ก) ความหยาบผิว (Roughness) ประเมินจากความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra : μm)

ข) ระยะห่าง (Clearance) ประเมินจากความต่างระหว่างขนาดอิเล็กโตรดกับความโตของขนาดมิติที่เกิดขึ้นจริงจากการกัดเซาะ (mm)

ค) ค่าความเบี่ยงเบนด้านความกลมของรูเจาะ (Roundness Error)

1.4.7 พิจารณาความสมบูรณ์ของพื้นผิวชิ้นงานภายหลังการแปรรูป ผ่านการตรวจสอบชั้นหลอมใหม่บนผิวงาน (Recast Layer)

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

1.5.1 ศึกษาสภาวะการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้าโดยการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.5.2 ทดลองเบื้องต้นเพื่อกำหนดระดับพารามิเตอร์

1.5.3 ทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดในระบบการแปรรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5.4 ศึกษาและออกแบบอุปกรณ์สำหรับปรับปรุงการไหลเวียนของสารไดอิเล็กตริกจากภายในสู่ภายนอก

1.5.5 ทดลองเพื่อเก็บระดับค่าประสิทธิภาพการทำงานและคุณภาพผิวงาน ตลอดจนวิเคราะห์ปัจจัยที่มีความแม่นยำในการแปรรูป

1.5.6 เปรียบเทียบผลที่เปลี่ยนแปลงจากการออกแบบการไหลของสารไดอิเล็กโตรดแบบใหม่กับการไหลของสารไดอิเล็กตริกแบบฉีดด้านข้าง

1.5.7 สรุปผลงานวิจัย

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ทราบถึงระดับความลึกของการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้าที่มีผลต่อความสามารถในการแปรรูปและความแม่นยำในการแปรรูปวัสดุเหล็กกล้าแม่พิมพ์

1.6.2 สามารถนำเอาข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการออกแบบอิเล็กทรอนิกส์เพื่อปรับปรุงกระบวนการแปรรูปลึกให้มีความแม่นยำและมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น

1.6.3 ได้รับองค์ความรู้และยกระดับความรู้ความสามารถด้านกระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า

1.6.4 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประกอบด้วยภาคอุตสาหกรรมการแปรรูปแม่พิมพ์ด้วยการเจาะรูลึกโดยกระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า ตลอดจนเป็นแนวทางในการต่อยอดงานวิจัยสำหรับบุคคลทั่วไปที่สนใจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ผลของค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในกระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า

การแปรรูปโดยอาศัยปฏิกิริยาความร้อนทางไฟฟ้าที่ถูกส่งผ่านวัสดุตัวนำที่เรียกว่า อิเล็กโตรด ซึ่งทำหน้าที่เป็นเครื่องมือควบคุมลักษณะการหลอมเหลวของผิวงานภายใต้ของเหลวกึ่งตัวนำที่เรียกว่า สารไดอิเล็กทริก (Dielectric) ทำหน้าที่ขจัดเนื้องานส่วนที่หลอมเหลวและระบายความร้อน โดยกระบวนการดังกล่าวจะเรียกว่า การกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า “Electrical Discharge Machining” (EDM) ซึ่งเหมาะกับการแปรรูปวัสดุชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนและมีความแข็งสูง ยากต่อการแปรรูปด้วยกระบวนการทางกล [1, 2] โดยจากการศึกษารวบรวมที่เกี่ยวข้อ พบว่า ประสิทธิภาพการทำงานที่เกิดจากกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า อันได้แก่ อัตราการขจัดเนื้องาน อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด และความหนาผิวเฉื่อย เกิดจากการปรับค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักร ซึ่งชิ้นงานที่ได้จะมีลักษณะพื้นผิวเหมือนกับเครื่องมือตัดที่เรียกว่า วัสดุอิเล็กโตรด ซึ่งวัสดุที่นิยมใช้เป็นอิเล็กโตรดสำหรับกัดเซาะชิ้นงานกลุ่มเหล็กกล้า พบว่า ทองแดงมีความเหมาะสมมากที่สุด รองลงมาคือ แกรไฟต์ และทังสเตน ส่วนวัสดุชิ้นงานที่ทำการอาร์คส่วนใหญ่เป็นวัสดุที่มีความแข็งสูงและเป็นวัสดุกลุ่มคาร์ไบด์ โดยประสิทธิภาพการแปรรูปที่ทำการศึกษาได้แก่ อัตราการขจัดเนื้องาน และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด ที่ส่งผลต่อการเกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็กและความหนาผิว [9]

องค์ประกอบทั้งหมดที่มีผลต่ออัตราการขจัดเนื้องาน และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด สามารถจำแนกออกได้เป็น พารามิเตอร์ของเครื่องจักร วัสดุอิเล็กโตรด วัสดุชิ้นงาน และสารไดอิเล็กทริก โดยพารามิเตอร์ของเครื่องจักรที่มีผลต่อการแปรรูปชิ้นงานได้แก่ อัตรากระแส (Current Rate) ที่ใช้ในการสปาร์ค ถ้ากระแสต่ำจะทำให้ได้อัตราการกัดเซาะเนื้อโลหะต่ำแต่การสึกหรอของอิเล็กโตรดสูง [1, 2] ช่วงพัลส์ (On Pulse หรือ Off Time) สั้นจะทำให้อิเล็กโตรดสึกหรอมากขึ้นแต่ได้ผิวงานที่มีคุณภาพและมีความละเอียดผิวสูง ช่วงหยุดพัลส์ (Off Pulse หรือ On Time) สั้นจะทำให้ได้รับอัตราการกัดเซาะเนื้อโลหะเพิ่มขึ้น การสึกหรอของอิเล็กโตรดลดลง ทั้งนี้เพราะว่าพลังงานต่อหน่วยเวลาเพิ่มขึ้น [1, 2] อิเล็กโตรดที่เป็นขั้วลบเหมาะสำหรับช่วงพัลส์ที่สั้นเนื่องจากจำนวนอนุภาคลบจะมากกว่าอนุภาคบวก และอิเล็กโตรดเป็นขั้วบวกเหมาะสำหรับช่วงพัลส์ที่ยาวทำให้อนุภาคบวกเกิดขึ้นจำนวนมาก [1, 2] ทำให้ชิ้นงานมีอัตราการกัดเซาะสูง อิเล็กโตรดสึกหรอน้อย แรงเคลื่อนไฟฟ้า (Gap Voltage) จะต่ำสำหรับการตัดหยาบโดยใช้ปริมาณกระแสไฟและค่าประจุไฟฟ้าสูง ส่วนค่าความถี่จะต่ำ วัสดุอิเล็กโตรดที่มีส่วนผสม

ของคาร์บอนเมื่อทำการสปาร์คบนวัสดุชิ้นงานที่มีคาร์บอนเป็นส่วนผสมเช่นเดียวกัน ภายใต้สารไดอิเล็กตริกที่เปลี่ยนสภาพเป็นคาร์บอนได้จะทำให้เกิดผิวชิ้นงานที่หยาบ ความเค้นตกค้างและรอยแตกร้าวขนาดเล็กมากกว่ากระบวนการที่ปราศจากคาร์บอน [9] ดังนั้นหากชิ้นงานเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนควรหลีกเลี่ยงอิเล็กโทรดที่เป็นแกรไฟต์

ในงานวิจัยของ Jamkamon และคณะ [3] ศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการแปรรูปวัสดุเหล็กกล้าแม่พิมพ์ AISI P20 โดยการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า จากการทดลองพบว่า เวลาเปิดและกระแสไฟฟ้ามีผลต่ออัตราการขจัดเนื้องาน และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด ตลอดจนความหยาบผิวเฉลี่ย โดยเวลาปิดมีผลทำให้อัตราการขจัดเนื้องานมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อเวลาปิดลดลงมีผลต่ออัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดตลอดจนความหยาบผิวเฉลี่ยน้อยมาก ในส่วนของขั้วไฟฟ้าอิเล็กโทรดนั้นพบว่า ขั้วอิเล็กโทรดที่เป็นขั้วมีอัตราการขจัดเนื้องานสูง และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดที่ต่ำกว่าขั้วลบ โดยขั้วไฟฟ้าอิเล็กโทรดเป็นลบให้คุณภาพผิวงานในรูปของความหยาบผิวเฉลี่ยดีกว่าขั้วบวก แต่จะเกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็กบนผิวงาน ซึ่งจากการทดลองความสามารถในการแปรรูป ที่เวลาเปิด 100 μ s เวลาปิด 2 μ s กระแสไฟฟ้า 14 A ขั้วอิเล็กโทรดเป็นบวก ให้อัตราการขจัดเนื้องาน 15.63 mm³/min โดยมีอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด 0.52 % (วัสดุอิเล็กโทรดที่ใช้เป็นทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm)

กรณีการศึกษาอิทธิพลของระดับปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการแปรรูปวัสดุเหล็กกล้าแม่พิมพ์พลาสติก AISI P20 โดยกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า จากการทดลองพบว่าระดับเวลาเปิดที่เพิ่มมากขึ้นมีอิทธิพลทำให้อัตราการขจัดเนื้องาน และความหยาบผิวเฉลี่ยของผิวงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงระดับหนึ่งแล้วจึงลดลง โดยมีลักษณะเป็นรูปแบบเส้นโค้งโพลีโนเมียล ซึ่งผูกพันกับอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด ส่วนประสิทธิภาพการแปรรูปจากการปรับเวลาปิดนั้นพบว่า เมื่อเวลาปิดลดลงจะทำให้อัตราการขจัดเนื้องานเพิ่มมากขึ้นโดยมีลักษณะการเพิ่มขึ้นเป็นแบบเชิงเส้นมีความชันคงที่ และมีผลต่ออัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดตลอดจนคุณภาพผิวงานน้อยมาก [3]

ประสิทธิภาพการแปรรูปวัสดุชิ้นงานสำหรับการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้าขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมและปัจจัยในการทำงานที่แตกต่างกัน เช่น ชนิดของวัสดุอิเล็กโทรด วัสดุชิ้นงานและโดยเฉพาะอย่างยิ่งพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการแปรรูป จากการศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการกัดโลหะด้วยไฟฟ้า พบว่าผลการทดลองมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกัน Barenji และคณะ [10] ศึกษาประสิทธิภาพการแปรรูปเหล็กกล้าเครื่องมือ AISI D6 ด้วยวัสดุอิเล็กโทรดทองแดง พบว่าระยะเวลาการปล่อยกระแสไฟฟ้า (Pulse On-time) ที่ยาวนานส่งผลให้อัตราการขจัดเนื้องาน (Material Removal Rate, MRR) มีค่าสูงขึ้นและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (Electrode Wear Ratio, EWR) ลดต่ำลง ผลการทดลองของ Pavani และคณะ [11] แสดงให้เห็นว่ากระแสไฟฟ้า (Current) ส่งผลต่ออัตราการขจัดเนื้องานและคุณภาพผิวงาน (Surface Quality, Ra) โดยตรง Tanjilul และคณะ [12] พบว่าความสัมพันธ์

ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับระยะเวลาการปล่อยกระแสไฟฟ้า ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของช่องว่างในการแปรรูป (Gap Clearance, GC) และระยะเวลาในการทำงาน (Machining Time, MT) นอกจากนี้งานวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการสะสมของเศษอนุภาคเนื้องาน (Debris Particles) ที่หลุดออกมาระหว่างการกัดเซาะและความสามารถในการรักษาเสถียรภาพในบริเวณพื้นที่การสปาร์คได้รับการศึกษาโดย Kamonpong และคณะ [13] พบว่า การปล่อยสารไดอิเล็กตริกผ่านแกนกลางอิเล็กโตรดเป็นการเร่งกำจัดอนุภาคเศษโลหะออกจากพื้นที่การสปาร์คส่งผลให้เกิดความรุนแรงของการกัดเซาะที่ส่วนปลายอิเล็กโตรดเพิ่มมากขึ้น โดยที่การสปาร์คข้ามบนพื้นผนังรูเจาะลดลงส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานในรูปแบบของความหยাবผิวเฉลี่ยไม่ถูกปรับปรุงโดยการปล่อยสารไดอิเล็กตริกผ่านแกนกลางอิเล็กโตรด อย่างไรก็ตาม การลดลงของการสปาร์คข้ามส่งผลให้การโค้งงอของผนังรูเจาะลดลงและช่องว่างระหว่างผิวอิเล็กโตรดโดยเฉลี่ยลดลง

จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาในมุมมองที่หลากหลายด้านกระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้าโดยวิธีการออกแบบการทดลองพบวาระดับตัวแปรที่เลือกใช้จะอยู่ในช่วง 2 – 5 ระดับ ตามความเหมาะสมในการวิเคราะห์ สำหรับจำนวนตัวแปรจะขึ้นอยู่กับทิศทางการวิเคราะห์และวัตถุประสงค์ในการศึกษาของผู้วิจัย ทั้งนี้จากการศึกษาพบว่าผู้วิจัยมีการทดสอบตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแปรรูปน้อยที่สุดหรือไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญ โดยอาศัยหลักทางสถิติไม่ว่าจะเป็นวิธีวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรแบบเกรย์ (Gray Rotational Analysis) การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล (Analysis of Variance, ANOVA) หรือการพัฒนาโมเดลทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีผลต่อการตอบสนอง เป็นต้น

2.1.2 ผลการศึกษาค่าตัวแปรที่เหมาะสมด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง

ในงานวิจัยของ Sagar และคณะ [14] ได้ศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการเจาะรูด้วยกระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า (EDM Drilling) สำหรับวัสดุ Ti-6Al-4V โดยใช้วิธีการหมุนอิเล็กโตรด ที่มีผลต่อความกว้างของช่องว่างการแปรรูป (Side Gap Width) อัตราเรียวรูเจาะ (Taper Ratio) และอัตราการขจัดเนื้องาน (Material Removal Rate) โดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (RSM) ในการออกแบบการทดลองซึ่งตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา คือ (1) เวลาเปิด (2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า (3) การเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitance) และ (4) การหมุนของอิเล็กโตรด จากการศึกษาตัวแปรพบว่าอิทธิพลของความต่างศักย์ไฟฟ้า การเก็บประจุไฟฟ้า และการหมุนของอิเล็กโตรดส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของอัตราการขจัดเนื้องานอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($\alpha = 0.05$) โดยข้อมูลที่น่ามาวิเคราะห์มีค่าความน่าเชื่อถือที่ R^2 เท่ากับ 92.39 % ในขณะที่ตัวแปรเวลาเปิด การเก็บประจุไฟฟ้า และการหมุนของอิเล็กโตรดมีอิทธิพลต่อการลดลงของความกว้างของช่องว่างการแปรรูปอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความ

เชื่อมั่น 95% ($\alpha = 0.05$) โดยข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์มีค่าความน่าเชื่อถือที่ R^2 เท่ากับ 88.39 % สำหรับตัวแปรเวลาเปิดและการเก็บประจุไฟฟ้ามีผลให้ค่าของอัตราเร็วการเจลาตลงอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($\alpha = 0.05$) โดยข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์มีค่าความน่าเชื่อถือที่ R^2 เท่ากับ 91.46 %

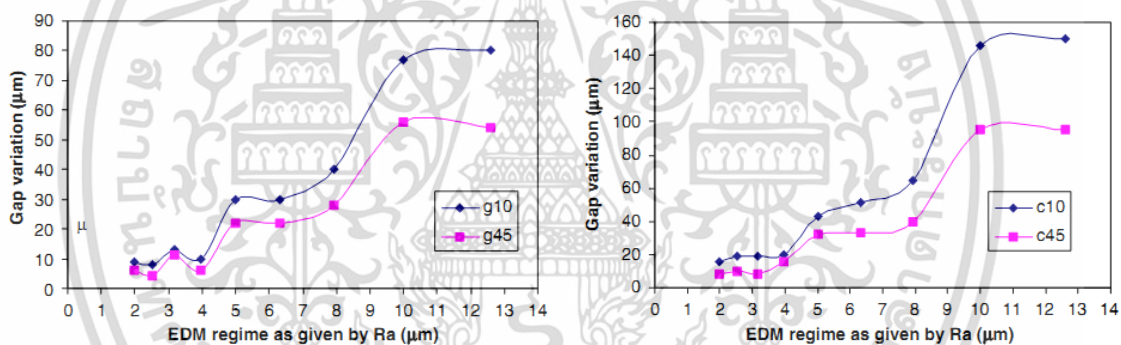
ในงานวิจัยของ Habib [15] ใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนองในการพัฒนาโมเดลทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีผลต่ออัตราการขจัดเนื้องาน การสึกหรอของอิเล็กโทรด ช่องว่างการแปรรูป และค่าความหยาบผิวเฉลี่ย ในกระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า ตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ประกอบไปด้วย เวลาเปิด กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และส่วนผสมของซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ผสมในเนื้อวัสดุ โดยแบ่งตัวแปรออกเป็น 5 ระดับ (+2, +1, 0, -1, -2) พบว่า เมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น (10 – 27.5 A) ส่งผลให้อัตราการขจัดเนื้องานและการสึกหรอของอิเล็กโทรดเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่อัตราการขจัดเนื้องานแปรผกผันกับเวลาเปิด กล่าวคือ อัตราการขจัดเนื้องานมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อการเพิ่มขึ้นของค่าเวลาเปิด (200 μ s) อย่างไรก็ตามอัตราการขจัดเนื้องานมีแนวโน้มลดลงเมื่อระดับของค่าเวลาเปิดเพิ่มสูงสุดที่ (400 μ s)

การเพิ่มขึ้นของระดับค่าเวลาเปิดและค่ากระแสไฟฟ้าทำให้เกิดการสร้างพลังงานความร้อนและความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดการหลอมละลายและการสึกกร่อนของเนื้อวัสดุเกิดขึ้นในบริเวณกว้างและซึ่มลึก อย่างไรก็ตามเมื่อระดับค่าเวลาเปิดเพิ่มสูงขึ้นเกินกว่าค่าที่เหมาะสม แรงดันไฟฟ้าภายในช่องพลาสติกจะมีค่าลดต่ำลง ทำให้การหลอมละลายบนเนื้อวัสดุกระจายวงกว้างแต่ไม่ซึ่มลึกส่งผลให้อัตราการขจัดเนื้องานลดลง [16] นอกจากนี้แรงดันไฟฟ้าในกระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้าถือว่าเป็นอีกตัวแปรที่สำคัญ เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าเป็นตัวสร้างระยะห่างระหว่างผิวงานกับผิวอิเล็กโทรดให้เกิดเป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electron Magnetic) ในบริเวณพื้นผิวที่จะเกิดการอาร์คด้วยแรงดันไฟฟ้าสูงสุดโดยไม่มีกระแสไหลผ่าน และเมื่อระบบขับป้อน (Servo) สามารถรักษาระยะห่างที่เหมาะสมได้จะเกิดการสปาร์คขึ้น ซึ่งจะทำให้แรงดันไฟฟ้าลดลงโดยมีปริมาณกระแสไหลผ่านมากขึ้น การอาร์คจะส่งผลให้เกิดช่องสูญญากาศที่เกิดจากการระเหยของสารไดอิเล็กตริกเมื่อได้รับความร้อน [17] ดังนั้นผลจากการทดลองปรับค่าแรงดันไฟฟ้าพบว่า อัตราการขจัดเนื้องานมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อระดับค่าแรงดันไฟฟ้าลดลง

อย่างไรก็ตามค่าผลตอบของอัตราการขจัดเนื้องานที่สูงย่อมส่งผลกระทบต่อค่าของช่องว่างการแปรรูปที่สูงขึ้นตาม กล่าวคือช่องว่างการแปรรูปเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราการขจัดเนื้องาน เมื่อค่าอัตราการขจัดเนื้องานเพิ่มสูงขึ้น (200 μ s) อนุภาคของเศษโลหะ (Debris) ที่หลุดออกมาจากเนื้อวัสดุก็จะมีมากขึ้นตาม ถึงแม้ว่าเศษโลหะจะถูกขจัดออกไปโดยสารไดอิเล็กตริกอย่างต่อเนื่องในช่วงของเวลาปิด (Pulse Off-time) แต่เศษโลหะบางส่วนที่ถูกขจัดออกไปไม่หมดจะสะสมอยู่ในช่องว่างการแปรรูป (Machining Gap) เมื่อถึงช่วงเวลารปล่อยประจุไฟฟ้า (Pulse On-time) เศษโลหะซึ่งมีคุณสมบัตินำไฟฟ้าก็จะเป็น

ตัวเชื่อมให้เกิดการอาร์คกันระหว่างผนังอิเล็กโตรดกับผนังรูเจาะ (Secondary Spark) ส่งผลให้ค่าของช่องว่างในการแปรรูปเพิ่มสูงขึ้น [18]

ในงานวิจัยของ Sanchez และคณะ [19] ทำการศึกษาระยะอาร์คที่เปลี่ยนแปลงเมื่อใช้อิเล็กโตรดสปาร์คหลายระดับ ในการทดลองนี้วัสดุชิ้นงานเป็นเหล็กกล้างานเย็น AISI D2 วัสดุอิเล็กโตรดเป็นทองแดง (Copper) และ กราไฟต์ (Graphite) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 และ 45 มิลลิเมตร เจาะรู 3 มิลลิเมตรเพื่อระบายความร้อนและขจัดเศษ โดยตั้งระยะห่างของแต่ละชั้นตอนมีรัศมีการเคลื่อนที่ 0.3-2 มิลลิเมตร ซึ่งในการศึกษายอมรับความหยาบผิวด้านข้างที่ยอมรับให้เกิดขึ้นอยู่ในช่วงระหว่าง 2 ถึง 4 ไมโครเมตร จากการทดลองพบว่าการเปลี่ยนแปลงของช่องว่างขึ้นอยู่กับขนาดรัศมีการเคลื่อนที่เดินกัดเซาะ โดยการเปลี่ยนแปลงของช่องว่างจะผกผันตามขนาดอิเล็กโตรด (อิเล็กโตรดเล็กระยะห่างของช่องว่างมาก อิเล็กโตรดโตระยะห่างของช่องว่างน้อย) และแปรผันตามระดับค่ากระแสไฟฟ้า (Discharge Current) กับค่าเวลาเปิด (Impulse Duration) ดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 2.1 ด้วยพารามิเตอร์ควบคุมในการทดลองดังตารางที่ 2.1



a) อิเล็กโตรดแกรไฟต์ขนาด Ø 10 และ 45 มม. b) อิเล็กโตรดทองแดงขนาด Ø 10 และ 45 มม.
รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหยาบผิวและอิเล็กโตรดที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงระยะอาร์ค [19]

ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ควบคุม (กระแสไฟฟ้า, เวลาเปิด, และเวลาปิด) ในการรักษาค่าความหยาบผิวในการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า [19]

ความหยาบผิว (Ra : µm/VDI)	กระแสไฟฟ้า (Current : A)		เวลาเปิด (Pulse time : µs)		เวลาปิด (Off time : µs)	
	ทองแดง Cu	แกรไฟต์ G	ทองแดง Cu	แกรไฟต์ G	ทองแดง Cu	แกรไฟต์ G
12.6/42	32	48	800	150	100	20
10.0/40	32	32	400	200	50	25
7.9/36	24	14	200	200	25	25
6.3/36	14	12	200	100	50	15

5.0/34	12	12	200	50	50	15
4.0/32	8	12	100	25	25	5
3.2/30	6	6	100	50	25	5
2.5/28	6	4	25	50	5	5
2.0/26	4	4	25	15	5	5
1.6/24	4	4	5	5	5	5

Kamonpong และคณะ [13] ทำการศึกษาความสามารถในกระบวนการเจาะรูลึกด้วยกระบวนการกัดเจาะโลหะด้วยไฟฟ้า (Deep Hole Drilling) โดยทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแปรรูประหว่างอิเล็กโตรดแท่งตันทรงกระบอกกับอิเล็กโตรดแท่งตันที่มีการสร้างบ่าฉากบริเวณส่วนปลายอิเล็กโตรดโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการฉีตสารไดอิเล็กตริกและขจัดเศษโลหะ ลดปริมาณการเกิด Secondary Spark ระหว่างผนังอิเล็กโตรดกับผนังรูเจาะ นอกจากนี้อิทธิพลของขนาดอิเล็กโตรดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3, 6, 9, 12 มิลลิเมตร ก็ยังได้รับการศึกษาร่วมกัน พบว่า เวลาในการเจาะรูลึกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามระดับความลึกในการเจาะ อย่างไรก็ตามอิเล็กโตรดแท่งตันที่มีการสร้างบ่าฉากบริเวณส่วนปลายอิเล็กโตรดมีแนวโน้มของเวลาในการเจาะรูลึกที่ลดลง อัตราการขจัดเนื้องานมีค่าเพิ่มสูงขึ้น อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดและช่องว่างการแปรรูปมีค่าลดลง นอกจากนี้ขนาดของอิเล็กโตรดมีอิทธิพลต่อความสามารถในการเจาะรูลึก กล่าวคืออิเล็กโตรดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตรสามารถทำการเจาะรูได้ที่ระดับความลึก 8 มิลลิเมตร (8:3, 2.67 เท่า) เนื่องจากเมื่อระดับความลึกเพิ่มสูงขึ้นความสามารถในการขจัดเศษโลหะจากการฉีตสารไดอิเล็กตริกด้านข้างเป็นไปได้ยากและขาดประสิทธิภาพ ทำให้กระบวนการสร้างช่องว่างการแปรรูป (Gap Spark) ที่เกิดจากการปล่อยแรงดันไฟฟ้า (Voltage) ไม่สามารถกระทำได้หรือเป็นไปอย่างไม่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากขาดสภาวะที่เหมาะสม (Non-stable) สำหรับอิเล็กโตรดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6, 9, และ 12 มิลลิเมตร สามารถเจาะรูลึกได้ที่ระดับความลึก 50 มิลลิเมตร เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอิเล็กโตรดที่เพิ่มขึ้นมีพื้นที่ของเส้นรอบวงอิเล็กโตรดที่เพิ่มขึ้น ทำให้สารไดอิเล็กตริกสามารถฉีตเข้าไปในช่องว่างการแปรรูปและขจัดเศษโลหะออกมาได้อย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอิเล็กโตรดที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลต่อพื้นที่การนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดความเข้มข้นในการกัดเจาะที่ตึกว่าอิเล็กโตรดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็ก โดยขนาดอิเล็กโตรดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ให้อัตราการขจัดเนื้องานสูงสุด อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดและเวลาในการเจาะรูลึกที่ลดลง

2.1.3 ผลการศึกษาอิทธิพลของการออกแบบการฉีตสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโตรดแบบหลายจุดที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการในกระบวนการแปรรูปลึก

ในงานวิจัยของ Lin และคณะ [20] ทำการศึกษาประสิทธิภาพการฉีตสารไดอิเล็กทริกในกระบวนการแปรรูปวัสดุ Ti-6Al-4V ด้วยกระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้าโดยการประยุกต์ใช้อิเล็กโตรดทองเหลืองท่อกกลางที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.5 mm หลายๆ ชิ้นมารวมกันเป็นอิเล็กโตรดที่มีรูปทรงหกเหลี่ยม (Bundled Electrode) ในลักษณะของ Multi-hole Inner Flushing เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระได้แก่ อัตราการไหลของสารไดอิเล็กทริก กระแสไฟฟ้า และเวลาเปิด ที่มีผลต่ออัตราการขจัดเนื้องานและการสึกหรอของอิเล็กโตรด ซึ่งผลที่ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับอิเล็กโตรดทองเหลืองแท่งตัน (Solid Electrode) จากการใช้อิเล็กโตรดแบบ Multi-hole Inner Flushing เมื่อค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นส่งผลต่ออัตราการขจัดเนื้องานที่เพิ่มสูงขึ้นตาม อย่างไรก็ตามอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดเพิ่มสูงขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับอิเล็กโตรดแบบแท่งตัน โดยตัวแปรกระแสไฟฟ้า อัตราการไหลของสารไดอิเล็กทริก และความสัมพันธ์ร่วม (Interactions) ระหว่างกระแสไฟฟ้าและเวลาเปิดมีอิทธิพลต่อการเพิ่มขึ้นของอัตราการขจัดเนื้องานอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้อิทธิพลของกระแสไฟฟ้าและอัตราการไหลของสารไดอิเล็กทริกส่งผลต่ออัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดอย่างมีนัยสำคัญ

จากการจำลองผลการทดลองของการไหลตัวของสารไดอิเล็กทริก วิธีการ Multi-hole Inner Flushing มีการไหลเวียนของสารไดอิเล็กทริกอย่างต่อเนื่อง ซึ่งไม่ทำให้สารไดอิเล็กทริกเกิดการปนเปื้อนจากเขม่าของคาร์บอนหรืออนุภาคโลหะ (Debris) ในช่องว่างการแปรรูป ส่งผลให้ในกระบวนการสปาร์คมีความเสถียรในทุกๆ วัฏจักร แตกต่างจากการใช้อิเล็กโตรดแท่งตันที่การฉีตสารไดอิเล็กทริกทำได้โดยการฉีดผ่านด้านข้างของอิเล็กโตรดและไหลเวียนออกซึ่งมีโอกาสเกิดการสะสมของอนุภาคโลหะซึ่งขัดขวางการวิ่งของอิเล็กตรอนในกระบวนการสปาร์คส่งผลให้ประสิทธิภาพในการสปาร์คลดต่ำลง [21]

ในงานวิจัยของ Kumar และคณะ [22] ทำการออกแบบและสร้างอิเล็กโตรดแบบใหม่สำหรับปรับปรุงกระบวนการเจาะรูด้วยกระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า (EDD) โดยมีแนวคิดในการสร้างช่องทางการไหลตัวของสารไดอิเล็กทริก (Pathway Inclination) ที่มีมุมเอียงแตกต่างกัน (60° , 75°) บนวัสดุอิเล็กโตรด นอกจากนี้ขนาดของช่องทางไหลตัวของสารไดอิเล็กทริกที่ (200, 300, และ 400 μm) ก็ถูกนำมาพิจารณาพร้อมกับการหมุนของอิเล็กโตรดที่ (500, 1000, และ 1500 rpm) ผลกระทบจากการใช้อิเล็กโตรดแบบ Pathway Inclination ในกระบวนการเจาะรูด้วยไฟฟ้า พบว่า อิเล็กโตรดแท่งตันแบบธรรมดาใช้เวลาในการแปรรูป (Machining Time) ใกล้เคียงกับอิเล็กโตรดแบบ Pathway Inclination ที่มีมุมเอียง 60° และ 75° ตามลำดับ ที่ระดับความลึก 2 mm (~25 minutes) อย่างไรก็ตามเมื่อความลึกเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางกับความลึกในการแปรรูปมากกว่า 2.5 เท่า (อิเล็กโตรด 1 mm

ความลึก 2.5 mm) อิเล็กโทรดแท่งต้นแบบปกติกับอิเล็กโทรดแบบ Pathway Inclination ที่มีมุมเอียง 60° ไม่สามารถทำการแปรรูปได้ อย่างไรก็ตาม อิเล็กโทรดแบบ Pathway Inclination ที่มีมุมเอียง 75° สามารถทำการเจาะรูได้ลึกถึง 4.1 mm โดยใช้เวลา 40 minutes นอกจากนี้ขนาดของช่องทางไหลของสารไดอิเล็กตริกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโตขึ้น (400 μm) ส่งผลให้เวลาในการแปรรูปลดลง

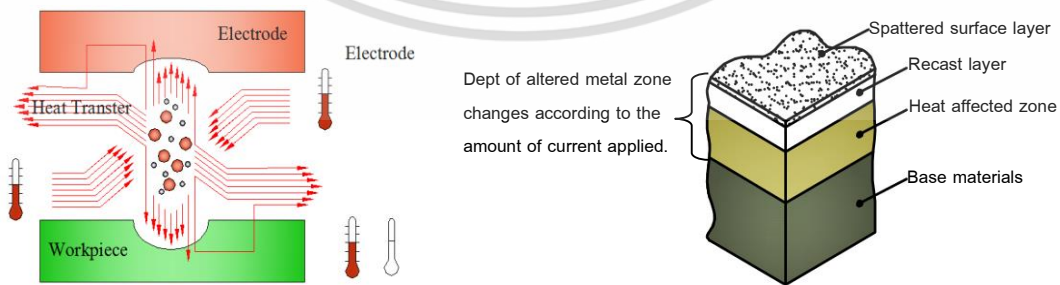
การหมุนของอิเล็กโทรด (Electrode Rotation) ด้วยรอบที่เหมาะสมต้องมีความสัมพันธ์กับอัตราการไหลของสารไดอิเล็กตริก ซึ่งจะส่งผลต่อความเร็วในการแปรรูป [22] อย่างไรก็ตามการหมุนของอิเล็กโทรดสามารถปรับปรุงอัตราเร็วของรูเจาะและคุณภาพของผิวงานได้ เนื่องจากการหมุนของอิเล็กโทรดจะเป็นตัวกระจายพลังงานไฟฟ้าไปรอบๆ รัศมีของวงกลมทำให้กระแสไฟฟ้ามีความสม่ำเสมอ [23] นอกจากนี้อิทธิพลของการหมุนอิเล็กโทรดทำให้สารไดอิเล็กตริกสามารถไหลเข้าสู่ช่องว่างในการแปรรูปได้ดีและอาศัยแรงเหวี่ยงจากการหมุนขจัดเศษอนุภาคให้หลุดออกมาทางช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงานได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งส่งผลต่ออัตราการขจัดเนื้องานที่สูงขึ้นและให้ค่าความหยาบผิวที่ต่ำ ในเวลาเดียวกันยังส่งผลให้กระบวนการสปาร์คในแต่ละครั้งมีเสถียรภาพเพิ่มมากขึ้น ทำให้เวลาในการแปรรูปสามารถลดลงได้ [24]

ในงานวิจัยของ Yilmaz และคณะ [25] ศึกษาผลกระทบของการฉีดยาไดอิเล็กตริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรดแบบช่องเดียว (Single-channel Electrode) และหลายช่องทาง (Multi-channel Electrode) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการเจาะรูอย่างรวดเร็วด้วยกระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้าจากการใช้อิเล็กโทรดวัสดุทองเหลืองที่มีช่องฉีดยาไดอิเล็กตริกแบบเดียวให้อัตราการขจัดเนื้องาน (0.10 gr/min) สูงกว่าอิเล็กโทรดที่มีการฉีดยาไดอิเล็กตริกแบบหลายช่องทาง (0.06 gr/min) นอกจากนี้จากการฉีดยาไดอิเล็กตริกแบบเดียวให้อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (45 %) ต่ำกว่าการฉีดยาไดอิเล็กตริกแบบหลายช่องทาง (50 %) อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาพื้นผิวชิ้นงานภายหลังการแปรรูปพบว่าความเสียหายที่เกิดจากการสปาร์คด้วยการฉีดยาไดอิเล็กตริกแบบหลายช่องทางอยู่ในปริมาณต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการฉีดยาไดอิเล็กตริกแบบเดียว นอกจากนี้ ชั้นหลอมสีขาว (White Layer) บ่อหลอมละลาย การหลอมละลายของเนื้อวัสดุ และรอยแตกร้าวขนาดเล็ก เกิดขึ้นกระจายอยู่ทั่วพื้นผิวของชิ้นงานจากการฉีดยาไดอิเล็กตริกแบบเดียว แต่ปรากฏบนพื้นผิวชิ้นงานจากการฉีดยาไดอิเล็กตริกแบบหลายช่องทางในปริมาณต่ำ เนื่องจากประสิทธิภาพในการฉีดยาไดอิเล็กตริกส่งผลให้การขจัดเนื้อโลหะและขจัดเศษโลหะออกจากช่องว่างในการแปรรูปได้อย่างต่อเนื่อง ทำให้การเกิด Recast Layer บนผิวงานเกิดขึ้นในปริมาณต่ำและผิวงานมีความสม่ำเสมอ

2.1.4 ผลการศึกษาสภาพพื้นผิวชิ้นงานและอิเล็กโตรดภายหลังการแปรรูป

ในงานวิจัยของ Dwivedi และคณะ [26] ทำการตรวจสอบ Recast Layer บนผิวชิ้นงานวัสดุเหล็กกล้าเครื่องมือ AISI D3 ภายหลังการแปรรูปด้วยกระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า และประมาณการความหนาของ Recast Layer โดยใช้การหมุนของอิเล็กโตรดเป็นตัวแปรในการเปรียบเทียบกับอิเล็กโตรดแบบคงที่ ซึ่งสมมติฐานของการหมุนอิเล็กโตรดคาดว่าจะสามารถลดความหนาของการเกิด Recast Layer ได้ดีกว่าอิเล็กโตรดแบบคงที่ ตัวแปรที่นำมาพิจารณาได้แก่ แรงดันไฟฟ้า (75 V) กระแสไฟฟ้า (10 – 30 A) เวลาเปิด (150 μ s) ขั้วไฟฟ้าอิเล็กโตรด (+) อิเล็กโตรดทองแดง (Cu) และการหมุนของอิเล็กโตรด (0 – 1000 rpm) พบว่า Recast Layer มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับกระแสไฟฟ้าและเวลาเปิด กล่าวคือ ชั้นความหนาของ Recast Layer เพิ่มขึ้นเมื่อกระแสไฟฟ้า (30 A) และเวลาเปิดมีค่าเพิ่มสูงขึ้น (150 μ s) และลดลงเมื่อค่ากระแสไฟฟ้า (10 A) และเวลาเปิด (20 μ s) ลดลง อย่างไรก็ตามการหมุนของอิเล็กโตรดที่ 1000 rpm สามารถทำให้ชั้นความหนาของ Recast Layer ลดลงจาก 80.50 μ m เป็น 46.44 μ m ตามลำดับ

พื้นผิววัสดุชิ้นงานที่ได้รับความร้อนจากการถ่ายเทประจุ (Discharge Current) ในขณะสปาร์คจะเกิดการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวของวัสดุชิ้นงานแบ่งตามระดับความรุนแรงของผลกระทบจากอุณหภูมิความร้อน ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้คือ ขณะสปาร์คจะเกิดความร้อนสูงที่เพียงพอต่อการหลอมละลายและขจัดเศษเนื้อวัสดุชิ้นงานชั้นบนสุดออก (Spattered Surface Layer) บริเวณชั้นรองลงมาจะได้รับความร้อนที่เพียงพอต่อการหลอมละลายของวัสดุชิ้นงานแต่ไม่สามารถขจัดออกได้เมื่อสิ้นสุดวัฏจักรการสปาร์ค [27] วัสดุที่เกิดการหลอมละลายจะหลุดออกมาในรูปแบบของอนุภาคเศษโลหะ (Debris) เนื้อวัสดุที่ถูกขจัดออกบางส่วนถูกสารไดอิเล็กทริกพัดพาออกไป บางส่วนหลงเหลืออยู่ในช่องว่างการแปรรูปและปนเปื้อนในสารไดอิเล็กทริกทำให้จับตัวกับคาร์บอนที่เกิดจากการแตกตัวของสารไดอิเล็กทริกที่เป็นไฮโดรคาร์บอนวิ่งไปเกาะผิวอิเล็กโตรดหรือผิวงาน บางส่วนกลับเข้ามารวมตัวกับเนื้อวัสดุกลายเป็นชั้นการแข็งตัวใหม่ (Recast Layer) และในระดับพื้นผิวที่ลึกลงมาจะได้รับอิทธิพลจากความร้อนแต่ไม่เกิดการหลอมละลาย (Heat Affect Zone) [1, 2] ดังแสดงในรูปที่ 2.2



a) ความร้อนจากการอาร์คของกระแสไฟฟ้า [1] b) ผลกระทบจากความร้อนที่มีต่อวัสดุชิ้นงาน [28]

รูปที่ 2.2 กระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้าและผลกระทบที่มีต่อวัสดุชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัยของ Muttamara และคณะ [29] ทำการศึกษาผลกระทบของคาร์บอนในสารไดอิเล็กตริกและวัสดุชิ้นงานที่มีผลต่อการเกิด Recast Layer ในกระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า วัสดุในการทดลองเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ JIS SS 400 (0.15 %C) และเหล็กหล่อสีเทา (3.6 %C) ทำการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าภายใต้สารไดอิเล็กตริกชนิด Kerosene และ Deionized Water ตัวแปรควบคุมที่ใช้ประกอบไปด้วย กระแสไฟฟ้า 25 A ความต่างศักย์วงจรเปิด 250 V ปัจจัยประสิทธิภาพ 50% อิเล็กโตรดทองแดงที่มีขั้วไฟฟ้าเป็นลบ และตัวแปรแปรผัน คือเวลาเปิดที่ 9 และ 300 μ s พื้นผิวของชิ้นงานวัสดุเหล็กหล่อสีเทาภายหลังการแปรรูปถูกปกคลุมด้วย Recast Layer รวมไปถึงมีจุดบกพร่องในรูปของช่องว่าง (Voids) ที่เกิดจากการหลอมละลายของเนื้อวัสดุ เนื่องจากเมื่อการสปาร์คหยุดลงในช่วงของเวลาปิด (Pulse Off-Time) วัสดุจะถูกขจัดออกและรักษาอุณหภูมิโดยสารไดอิเล็กตริกอย่างรวดเร็ว ทำให้พื้นผิวของเหล็กหล่อสีเทาที่หลอมละลายและเย็นตัวลงมีร่องรอยของบ่อหลอมละลาย (Craters) รูพรุน (Porous) รวมไปถึงการก่อดังของเกร็ดแกรไฟต์เป็นแถบบางๆ (Graphite Flakes) บนโครงสร้าง Silicon-iron Matrix กระจายอยู่ทั่วผิวงาน ทำให้ชั้นของ Recast Layer บนพื้นผิวชิ้นงานภายหลังการเย็นตัวลงเกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็กจำนวนมากจากการแยกตัวของเกร็ดแกรไฟต์ อย่างไรก็ตามบนพื้นผิวของวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำไม่พบรอยแตกร้าวขนาดเล็กบนชั้น Recast Layer เนื่องจากเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำไม่มีส่วนประกอบของเกร็ดแกรไฟต์

นอกจากนี้ความแตกต่างระหว่าง Kerosene และ Deionized Water คือ Kerosene มีค่าความต้านทานสูงกว่า Deionized Water ดังนั้นจากค่าความต้านทานที่สูงทำให้การถ่ายเทประจุเกิดขึ้นได้ยาก จึงเกิด Gap ในการสปาร์คที่ต่ำส่งผลให้ผิวชิ้นงานมีค่าความหนาผิวเฉลี่ยที่สูงกว่า แต่อัตราการขจัดเนื้องานจะต่ำกว่า Deionized Water ที่มีความต้านทานน้อยกว่า Kerosene ทำให้การถ่ายเทประจุระหว่างอิเล็กโตรดกับชิ้นงานเกิดขึ้นได้ง่ายเป็นผลให้อัตราการขจัดเนื้องานสูงแต่ความแม่นยำในการแปรรูปต่ำ [1] นอกจากนี้ชั้น Recast Layer ที่ก่อดังขึ้นบนผิวชิ้นงานเมื่อใช้ Deionized Water จะประกอบไปด้วยช่องว่างขนาดเล็ก (Microvoids) และอนุภาคของเศษโลหะ (Debris) กระจายอยู่ทั่วผิวงาน แต่ในกรณีของ Kerosene แทบจะไม่ปรากฏข้อบกพร่องดังกล่าว Recast Layer ถูกตรวจพบบนวัสดุเหล็กหล่อสีเทามีความเด่นชัดและความหลากหลายของโครงสร้างที่มากกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เนื่องจากผลกระทบของปริมาณคาร์บอนในเนื้อวัสดุโดยเฉพาะอย่างยิ่งเกร็ดแกรไฟต์ (Graphite Flakes) ในเหล็กหล่อสีเทา จะเกิดการหลอมละลายในระหว่างกระบวนการสปาร์คและกลับมารวมตัวกับเนื้อโลหะเมื่อได้รับการหล่อเย็นโดยสารไดอิเล็กตริก นอกจากนี้คาร์บอนในสารไดอิเล็กตริกที่เป็นชนิด Kerosene ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เกิดการก่อดังของ Recast Layer ที่มากกว่าการใช้สารไดอิเล็กตริกที่เป็นชนิด Deionized Water

อย่างไรก็ตาม เมื่อเวลาเปิดเพิ่มสูงขึ้น (300 μ s) ปริมาณการก่อดังของ Recast Layer จะเพิ่มความหนาของชั้นขึ้นอย่างเห็นได้ชัดรวมไปถึงจะเกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็กบนชั้น Recast Layer

เช่นเดียวกัน เพราะวาระยะเวลาในการปล่อยประจุไฟฟ้าที่ยาวนานส่งผลให้เกิดการก่อตัวของความร้อน และช่วงเวลาในการหลอมละลายของเนื้อวัสดุมีเวลานาน ทำให้บ่อหลอมละลายมีความกว้างและลึก (Deeper Craters) เมื่อถึงช่วงเวลาของการหล่อเย็น (Cooling) ด้วยสารไดอิเล็กทริกอย่างรวดเร็วทำให้เกิดการเย็นตัวของเนื้อโลหะกลายเป็น Recast Layer นอกจากนี้ความแตกต่างของอุณหภูมิความร้อนระหว่าง Recast Layer และชั้นที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนแต่ไม่เกิดการหลอมละลาย (Substrate) ส่งผลให้เกิดความเค้นแรงดึงระหว่างกันทำให้เกิดรอยแตกกว้างใต้ชั้น Recast Layer [30]

2.1.5 เทคโนโลยีด้านกระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า

กระบวนการแปรรูปแบบพิเศษ Non-traditional Machining ในกลุ่มของกระบวนการแปรรูปด้วยพลังงานความร้อน Thermal Energy นิยมนำมาผลิตชิ้นส่วนแม่พิมพ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า ซึ่งเป็นกระบวนการแปรรูปวัสดุชิ้นงานที่มีความแข็งสูงและมีรูปทรงที่ยากต่อการแปรรูปด้วยกระบวนการทางกล และยังมีการประยุกต์เพื่อปรับปรุงสมบัติของผิวงานในขณะที่เกิดการหลอมละลายและแข็งตัวใหม่ของผิวงานจากการ Discharge Current จนเกิดอุณหภูมิที่สูงในระดับพลาสมา และขจัดออกด้วยสารไดอิเล็กทริก [1, 2, 27] โดยจากการศึกษาทางวิจัยทำให้สามารถสรุปลำดับของการพัฒนาและการศึกษาความสามารถของกระบวนการที่เริ่มต้นจากการใช้วัสดุอิเล็กโตรดแบบธรรมดา กลายเป็นวัสดุผงโลหะวิศวกรรม และการใช้ผงโลหะร่วมกับสารไดอิเล็กทริกเพื่อปรับปรุงคุณภาพผิวงานโดยสามารถอธิบายพอสังเขปได้ดังนี้

2.1.5.1 การใช้ Conventional Electrode สำหรับแปรรูปวัสดุชิ้นงานเป็นยุคเริ่มแรกของการปรับปรุงสมบัติคุณภาพผิวงานหลักกล้าซึ่งพบว่าสารไดอิเล็กทริกทำให้เกิด Carburization บนผิวหลักกล้าเป็นชั้นสีขาวที่มีความแข็งเพิ่มขึ้น [31] หลักกล้าที่มีปริมาณคาร์บอนมากจะทำให้ระดับความลึกของความแข็งเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็งจะเกิดในระดับ Micro Hardness และเกิดชั้นหลอมเหลวใหม่ที่เกิดจากอิทธิพลของ Heat Affect Zone [32] ตัวอย่างการกัดเซาะวัสดุหลักกล้าแม่พิมพ์ AISI D2 โดยใช้วัสดุอิเล็กโตรด 75/25 Tungsten Copper พบชั้นเคลือบผิวสีดำบนวัสดุอิเล็กโตรดเมื่อใช้ความหนาแน่นของกระแสในระดับต่ำ (Low Current Intensity) และเวลาเปิดยาวนาน (Long Pulse Duration) เกิดจากการแตกตัวของสารไฮโดรคาร์บอน และการกัดเซาะของธาตุที่เป็นส่วนผสมของวัสดุชิ้นงานเข้ายึดเกาะ [33] จากสมบัติของขั้วทางไฟฟ้างานดังกล่าวเช่นการใช้วัสดุอิเล็กโตรดและวัสดุชิ้นงานเป็นทองแดงเหมือนกันขั้วลบจะมีการสึกหรอมากกว่า 2-3 เท่า [34]

2.1.5.2 การใช้ Powder Metallurgy Electrode ซึ่งเป็นวัสดุอิเล็กโตรดที่ผ่านกระบวนการ Powder Sintering จะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์มากกว่าอิเล็กโตรดธรรมดาทั่วไป [35] จึงมีผลต่อความสามารถในการแปรรูปและส่งผลต่อการปรับปรุงคุณภาพผิวงานจาก

การหลุ่ร้อนและสึกหรอของธาตุประกอบที่มีในอิเล็กโตรดไปเคลือบพื้นผิววัสดุชิ้นงานขณะหลอมละลายใหม่ทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น นิยมเรียกกระบวนการนี้ว่า Electrical Discharge Coating (EDC) [36] การใช้โลหะผงไทเทเนียมแปรรูปวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนจะทำให้เกิดเป็นชั้นเคลือบผิว Titanium Carbide ส่งผลต่ออายุการใช้งานของแม่พิมพ์เพิ่มขึ้นสามถึงเจ็ดเท่า [37] และจากการทดลองใช้วัสดุอิเล็กโตรดทั้งสแตนคาร์ไบด์แปรรูปวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน H13 ก็พบว่าทำให้ความแข็งผิวงานเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน [38]

2.1.5.3 การใช้ Powder-mixed Dielectric เป็นการปรับปรุงผิวงานโดยการเติมผงโลหะลงในสารไดอิเล็กทริกซึ่งส่งผลต่อการเพิ่มอัตราการขจัดเนื้องานและลดการสึกหรอของอิเล็กโตรด ใช้สำหรับการปรับผิวละเอียดบนวัสดุชิ้นงาน โดยผงอนุภาคโลหะทำหน้าที่ขัดขวางการสปาร์คโดยตรงจากอิเล็กโตรดและผิววัสดุชิ้นงานทำให้ช่องว่างการสปาร์คเพิ่มขึ้นและพลังงานการสปาร์ค ลดลงเนื่องจากเป็น Secondary Spark และเกิดขึ้นแบบสุ่มโดยมีผงอนุภาคเป็นตัวกลาง [39] ทำให้ลดการเกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็กและชั้นการหลอมละลายและแข็งตัวใหม่ ตัวอย่างเช่นการใช้ Tungsten Powder-mixed Dielectric ปรับปรุงสมบัติพื้นผิวของวัสดุชิ้นงาน Die Steel Materials ทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายสารประกอบของ Tungsten และ Carbon ไปรวมตัวกับผิววัสดุที่เป็นเหล็กกล้า ทำให้ความแข็งของผิวงานในระดับไมโครเมตรเพิ่มสูงถึง 100 เปอร์เซ็นต์ [40]

2.1.5.4 เทคนิค Applications of The Technique เป็นการปรับปรุงผิวงานโดยกระบวนการ EDM ได้มีการประยุกต์ใช้ในงานให้สอดคล้องกับการปรับความหยาบผิวและ Texture (Texturing of Rolls) [41] จากการใช้ (Electrical Discharge Texting) โดยใช้อิเล็กโตรด Powder Metrology ที่มีส่วนผสมของ Ti และ W บนวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าพบว่าบริเวณพื้นผิวจะเกิดคาร์ไบด์ที่มีความแข็งสูง เช่น WC, W₃C และ Fe³C ซึ่งทำให้ความแข็งผิวงานเพิ่มขึ้น [42]

2.1.5.5 Dielectric Fluid เป็นชั้นฉนวนที่วางกั้นระหว่างวัสดุเครื่องมือกับชิ้นงานไม่สัมผัสกันซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงและจะต้องทำการชดเชยค่า Machining Gap และ Electrode Wear Gap เพื่อให้เกิดความแม่นยำในการแปรรูป [43] หากพื้นผิวการสปาร์คเกิดการเคลื่อนตัวของอนุภาคโลหะผ่านจะทำให้เกิด Secondary Spark [44] และฟองแก๊สที่ส่งผลต่อความแม่นยำในการแปรรูปและความเสถียรของสารไดอิเล็กทริก นอกจากนี้ยังส่งผลเป็นอย่างมากต่อการขจัดเนื้องานและการสึกหรอของวัสดุอิเล็กโตรด [45]

จากตารางที่ 2.2 พิจารณาได้ถึงการพัฒนากระบวนการ EDM เพื่อปรับปรุงคุณภาพผิวงานในแต่ละวิธีซึ่งในเบื้องต้นวิธีที่ 1 เป็นการดำเนินการโดยวิธีปรับค่าพารามิเตอร์ร่วมกับการใช้อิเล็กโตรดแท่งตันเพื่อให้เกิดผลลัพธ์ MRR สูง EWR ต่ำ และผิวงานประณีต ต่อมาเป็นวิธีการที่ 2 เป็นการปรับปรุงโดยพัฒนาวัสดุอิเล็กโตรดจากการอัดผงโลหะแล้วทำการกัดเซาะวัสดุเนื้องานเพื่อศึกษา MRR สูง EWR ต่ำ

และความประณีตของผิวงานและสมบัติทางกลที่เกิดขึ้นเคลือบจากการสีกหรือของอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับวิธีการที่ 3 เป็นการเติมอนุภาคผงโลหะขนาดเล็กเพื่อเข้าช่วยให้ผิวงานประณีตมากขึ้น จากเกิดกระบวนการสปาร์คแบบ Secondary โดยอาศัยอนุภาคผงเข้าช่วยส่งผลให้ความประณีตผิวงานมากยิ่งขึ้น ทำให้สามารถอนุมาณได้ว่าเป็นแนวทางในการพัฒนาเพื่อให้เกิดผลลัพธ์ที่ดีต่อคุณภาพผิวงานและประสิทธิภาพกระบวนการ EDM

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบรูปแบบของการแปรรูปด้วยกระบวนการ EDM

Details	Process Diagram	Remarks
EDM : Electrical Discharge Machine 1. Conventional Electrode -Solid Electrode Machining with Conventional machine	<p>Electrode Wear = Electrode Wear Ratio : EWR</p> <p>Flushing Dielectric</p> <p>Conventional Electrode</p> <p>Flushing Dielectric</p> <p>Work piece</p> <p>↓ = Discharge Current</p> <p>Workpiece Wear = Materials Removal Rate : MRR</p>	Evaluation <ul style="list-style-type: none"> - MRR : Materials Removal Rate - EWR : Electrode Wear Ratio - Surface Quality (Ra)
EDM : Electrical Discharge Machine (Surface Modification) 2. Powder Metallurgy Electrode	<p>Electrode Wear = Element Separate from Electrode</p> <p>Flushing Dielectric</p> <p>Powder Metallurgy Electrode</p> <p>Flushing Dielectric</p> <p>Work piece</p> <p>↓ = Discharge Current ⊗ = Combine C+Element</p> <p>Workpiece Wear = Materials Removal Rate : MRR</p>	Evaluation <ul style="list-style-type: none"> - MRR, EWR - Surface Quality (Ra, Cracking) - Micro-hardness - High Performance and use for Coating Surface Modification (EDC : Electrical Discharge Coating)
EDM : Electrical Discharge Machine (Surface Modification and Finishing) 3. Powder Mixed-dielectric	<p>Electrode Wear = Electrode Wear Ratio : EWR</p> <p>Flushing Dielectric + P/M</p> <p>Conventional Electrode</p> <p>Flushing Dielectric + P/M</p> <p>Work piece</p> <p>↓ = Discharge Current ⊗ = Combine C+P/M</p> <p>Workpiece Wear = Materials Removal Rate : MRR</p>	Evaluation <ul style="list-style-type: none"> - MRR, EWR - Surface Quality (Ra, Cracking) - Micro-hardness - Low Machining Performance but High Quality for Surface finish and Modification

ในปัจจุบันกระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า (EDM) มีการศึกษาในเชิงลึกมากยิ่งขึ้น ทำให้งานวิจัยมีการมุ่งเน้นด้านคุณภาพของชิ้นงาน เช่น ความแม่นยำในการแปรรูป (Dimensional Accuracy)

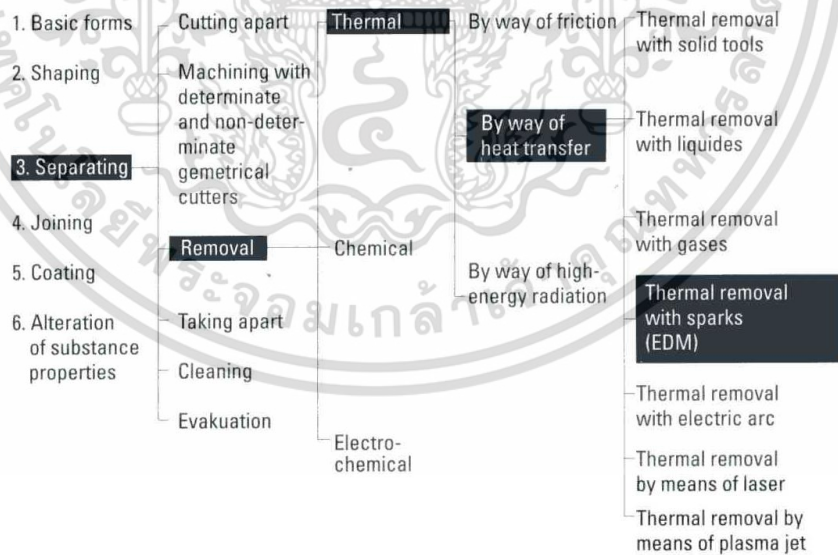
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การลดช่องว่างในการแปรรูป (Side Gap) การลดเวลางานในการแปรรูป (Machining Time) รวมไปถึงคุณภาพผิวงานภายหลังการแปรรูป ทำให้มีการคิดค้นรูปแบบและวิธีการแบบใหม่ๆ เพื่อตอบสนองต่อความต้องการ ดังนั้น การออกแบบและสร้างอิเล็กทรอนิกส์รูปแบบต่างๆ จึงได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก นอกจากนี้การออกแบบระบบการไหลเวียนของสารไดอิเล็กทริกก็ยังได้รับความสนใจจากนักวิจัยในช่วงเวลาที่ผ่านมามาจนถึงปัจจุบัน

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 กระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า (Electrical Discharge Machining: EDM)

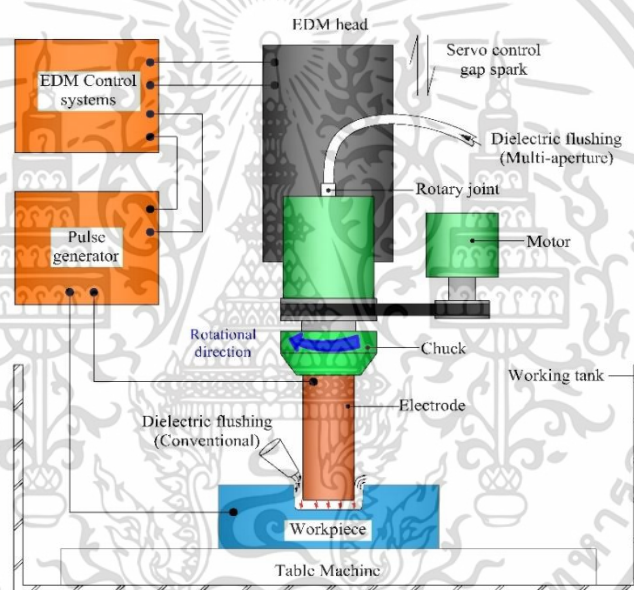
การจำแนกกลุ่มกระบวนการผลิตตามมาตรฐาน (DIN 8580) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 จัดได้ว่ากระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้าเป็นกระบวนการแยก (Separating) อนุภาค (Particles) ของวัสดุ (Materials) เพื่อให้เกิดการขจัดเนื้อวัสดุชิ้นงาน (Removal) โดยการอาศัยความร้อน (Thermal) ที่เกิดจากการการสปาร์คของกระแสไฟฟ้าทำให้การถ่ายเทความร้อนระหว่างวัสดุอิเล็กทรอนิกส์กับวัสดุชิ้นงานเข้าไปทำลายพันธะการจับยึดของอนุภาคออกจากเนื้อวัสดุโดยการกัดเซาะด้วยกระแสไฟฟ้า (Electroerosion) ซึ่งเป็นการจ่ายประจุระหว่างขั้วสองขั้วเพื่อให้เกิดการกัดเซาะในของเหลวที่เป็นสารกึ่งตัวนำไฟฟ้า (Dielectric Fluid) [1]



รูปที่ 2.3 การจำแนกกลุ่มกระบวนการการผลิตตามมาตรฐาน DIN 8580 [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการกัดเซาะด้วยกระแสไฟฟ้าเป็นรูปแบบของการจัดเนื้องานที่อาศัยการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าให้เกิดการสปาร์คที่มีความถี่สูงซึ่งสามารถกระทำได้ทั้งไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับ ลักษณะเด่นของกระบวนการคือเป็นการแปรรูปโดยที่วัสดุเครื่องมือตัด (เครื่องมือตัดในการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าเรียกว่าอิเล็กโทรด (Electrode)) ไม่สัมผัสกับวัสดุชิ้นงาน (Workpiece) แต่จะมีการสปาร์คผ่านของเหลวที่เป็นสารกึ่งตัวนำเรียกว่า สารไดอิเล็กตริก (Dielectric) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ทั้งนี้การสปาร์คดังกล่าวเกิดจากการปล่อยประจุกระแสไฟฟ้า (Pulse Duration) สลับกับการหยุดจ่ายประจุกระแสไฟฟ้า (Pause Duration) มีอุณหภูมิที่สูงถึง 8,000 ถึง 12,000 องศาเซลเซียส ในบริเวณพื้นที่จำกัด ซึ่งทำให้วัสดุชิ้นงานและอิเล็กโทรดเกิดการหลอม และถูกขจัดออกด้วยสารไดอิเล็กตริกที่ปกคลุมอยู่โดยรอบในรูปของอนุภาคของแข็ง ของเหลว และแก๊ส [1, 2]

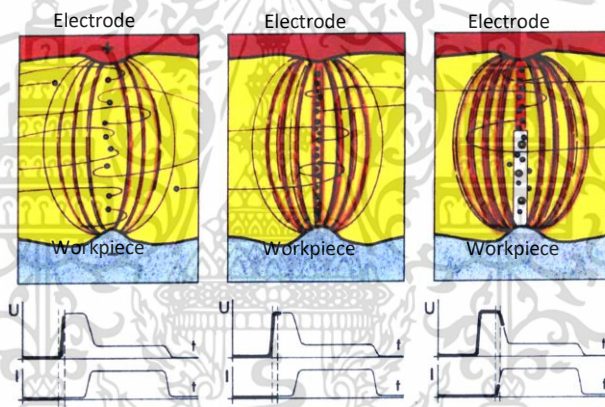


รูปที่ 2.4 กระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า (EDM) [5]

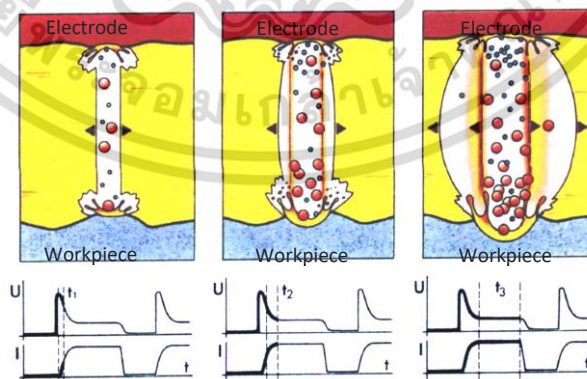
พื้นผิววัสดุชิ้นงานที่ได้รับความร้อนจากการถ่ายเทประจุ (Discharge Current) ในขณะสปาร์คจะเกิดการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวของวัสดุชิ้นงานแบ่งตามระดับความรุนแรงของผลกระทบจากอุณหภูมิความร้อนสามารถอธิบายได้ดังนี้คือ ขณะสปาร์คจะเกิดความร้อนสูงที่เพียงพอต่อการหลอมละลายและขจัดเศษเนื้อวัสดุชิ้นงานบนสุดออก (Spattered Surface Layer) บริเวณชั้นรองลงมาจะได้รับความร้อนที่เพียงพอต่อการหลอมละลายของวัสดุชิ้นงานแต่ไม่สามารถขจัดออกได้ เมื่อสิ้นสุดวัฏจักรการสปาร์ค วัสดุที่หลอมละลาย เศษวัสดุที่ถูกขจัดออกและอนุภาคโลหะที่ปนเปื้อนในสารไดอิเล็กตริกจะจับตัวกับคาร์บอนที่เกิดจากการแตกตัวของสารไดอิเล็กตริกที่เป็นไฮโดรคาร์บอน บางส่วนกลับเข้ามารวมตัวกลายเป็นชั้นการ

แข็งตัวใหม่ (Recast Layer) และในระดับพื้นผิวที่ลึกลงมาจะได้รับอิทธิพลจากความร้อนแต่ไม่เกิดการหลอมละลาย (Heat Affect Zone) โดยในแต่ละระดับชั้นที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนจะเกิดในระดับไมโครเมตรเนื่องจากถูกปกคลุมด้วยสารไดอิเล็กทริก

การจัดเนื้องานจากกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าเป็นวัฏจักรการกัดเซาะภายใต้การปกคลุมด้วยสารไดอิเล็กทริกโดยสถานะเริ่มต้นนี้จะเป็นการสร้างระยะห่างระหว่างผิวงานกับผิวอิเล็กโทรดเกิดเป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electron Magnetic) ในบริเวณพื้นผิวที่จะเกิดการสปาร์คด้วยแรงดันไฟฟ้าสูงสุด โดยไม่มีกระแสไหลผ่านดังรูปที่ 2.5 และเมื่อระบบขับป้อน (Servo) สามารถรักษาระยะห่างได้จะเกิดการสปาร์คซึ่งจะทำให้แรงดันไฟฟ้าลดลงโดยมีปริมาณกระแสไหลผ่านมากขึ้น โดยการสปาร์คจะส่งผลให้เกิดช่องสุญญากาศที่เกิดจากการระเหยของสารไดอิเล็กทริกเมื่อได้รับความร้อนดังแสดงในรูปที่ 2.6 เมื่อสิ้นสุดการสปาร์คช่องว่างสุญญากาศจะหดตัว ทำให้สารไดอิเล็กทริกที่อยู่โดยรอบเข้ามาขจัดเศษโลหะและระบายความร้อน [1] ดังแสดงในรูปที่ 2.7

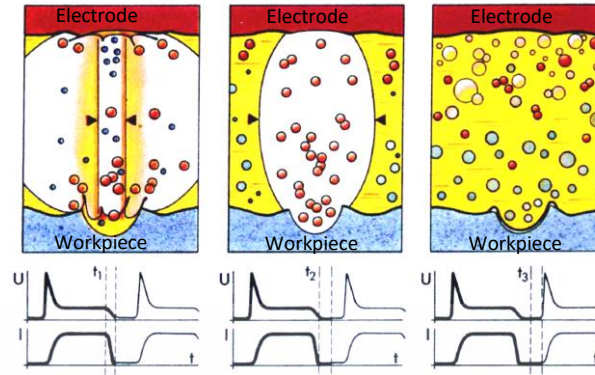


รูปที่ 2.5 สถานะเริ่มต้นของการสปาร์คด้วยกระแสไฟฟ้า [1]



รูปที่ 2.6 สถานะในการสปาร์คด้วยกระแสไฟฟ้า [1]

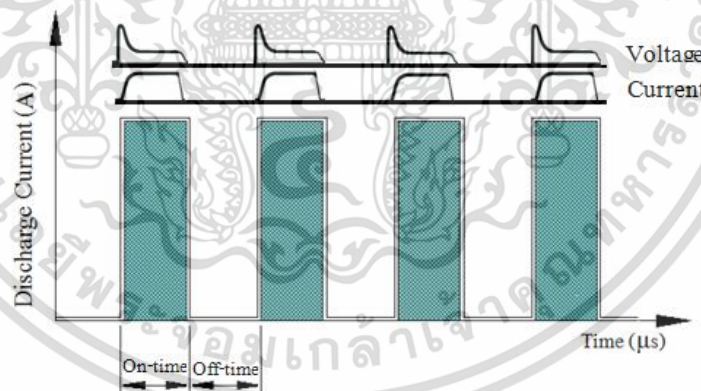
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 สภาวะการจัดเศษและระบายความร้อนจากการสปาร์คด้วยกระแสไฟฟ้า [1]

จากวัฏจักรการสปาร์คทำให้เกิดความสัมพันธ์ระหว่างเวลาปล่อยประจุกระแสไฟฟ้าที่เรียกว่าเวลาเปิด (On-Time) กับเวลาหยุดจ่ายประจุกระแสไฟฟ้าที่เรียกว่าเวลาปิด (Off-Time) ดังรูปที่ 2.8 โดยสามารถวัดประสิทธิภาพของการทำงานในหนึ่งวัฏจักร (Duty Cycle) [2] ของการสปาร์คเท่ากับเวลาเปิดต่อเวลารวมในหนึ่งวัฏจักร (Total Cycle Time = On-Time + Off-time) ดังแสดงในสมการที่ 2.1

$$\text{Duty Cycle} = \left(\frac{\text{On - Time}}{\text{Total Cycle Time}} \right) \times 100(\%) \quad (2.1)$$



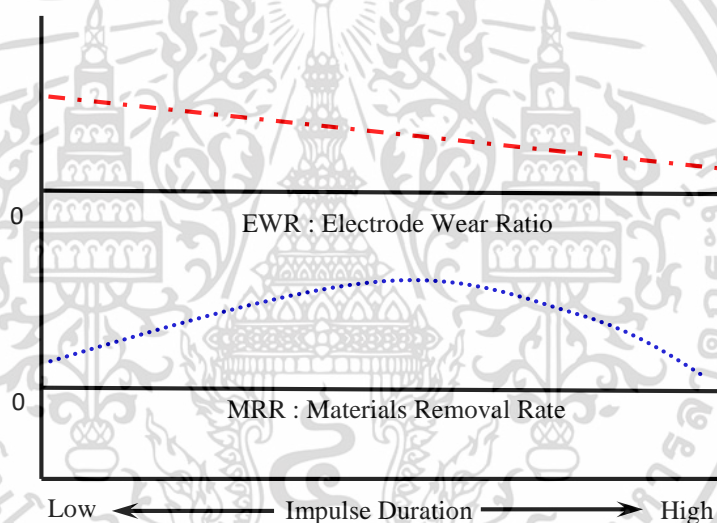
รูปที่ 2.8 ช่วงระยะเวลาเปิด และปิดเพื่อให้เกิดการถ่ายเทประจุ [1]

จากสมการหากลดเวลาปิดเพียงเล็กน้อยจะทำให้ Duty Cycle สูงขึ้นและมีผลต่อการปรับสภาพแวดล้อมในการสปาร์ค วัสดุอิเล็กโทรด วัสดุชิ้นงาน และสภาพแวดล้อมของสารไดอิเล็กตริก ตลอดจนความสามารถในการรักษาสภาพการนำไฟฟ้า และความเสถียรในกระบวนการจัดเนื้องานเป็นอย่างมาก [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1.1 เวลาเปิด

เวลาเปิด [1] คือช่วงเวลาที่เกิดการถ่ายเทประจุของกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดการสปาร์คกลายเป็นความร้อนสะสมที่ใช้ในการขจัดเนื้องานจากการสร้างระยะห่างระหว่างผิววัสดุชิ้นงานกับวัสดุอิเล็กโทรดจากความต้านทานของกระแส และใช้กระแสเป็นตัวกำเนิดพลังงานความร้อนในการทำให้งานสำเร็จลง ระยะเวลาของการถ่ายเทประจุที่ยาวนานทำให้เกิดการหลอมละลายเป็นหลุมลึกที่มีความกว้างที่เกิดการหลุดร้อนจากการอาร์คเป็นแอ่งขนาดใหญ่และมีความลึกมาก จึงส่งผลให้ผิวชิ้นงานมีความหยาบสูงกว่าระยะเวลาการถ่ายเทประจุที่สั้น นอกจากนี้เวลาเปิดที่สูงจะทำให้เกิดการหลอมละลายและแข็งตัวของผิวงานที่เรียกว่า Recast โดยในกรณีที่ใช้อิเล็กโทรดเป็นขั้วบวกจะทำให้การสึกหรอของอิเล็กโทรดลดลงเนื่องจากเกิดการเคลือบที่ผิวอิเล็กโทรด [2] รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ของเวลาเปิดต่อการขจัดเนื้องานและการสึกหรอของอิเล็กโทรด

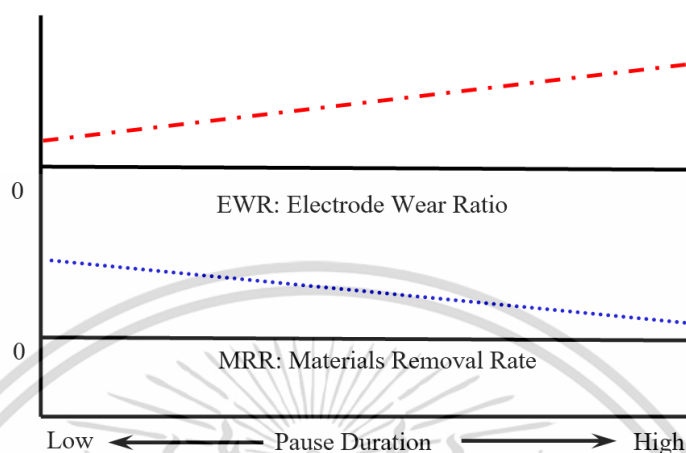


รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ของเวลาเปิดต่อการขจัดเนื้องานและการสึกหรอของอิเล็กโทรด [1]

2.2.1.2 เวลาปิด

เวลาปิด [1] คือช่วงเวลาที่หยุดพักการถ่ายเทประจุของกระแสไฟฟ้า ซึ่งไม่ทำให้เกิดความร้อน และการขจัดเนื้องาน แต่จะทำให้เกิดความเสถียรในกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า โดยเมื่อเวลาปิดมากขึ้นทำให้ความเร็วในการแปรรูปลดลง แต่จะทำให้เกิดการระบายความร้อน และขจัดเศษอนุภาคที่หลุดออกจากชิ้นงานได้มากขึ้นทำให้เกิดความเสถียรในการรักษาค่าความต้านทานของสารไดอิเล็กตริกซึ่งเป็นสิ่งสำคัญอย่างมากในการสร้างช่องว่างระหว่างผิวงานกับอิเล็กโทรด เพื่อให้พร้อมในการสปาร์คในวัฏจักรถัดไป ทั้งนี้เวลาปิดที่ต่ำจะทำให้เกิดการขจัดเนื้องานที่สูงและการสึกหรอของอิเล็กโทรด

ต่ำ เนื่องจากพลังงานต่อหน่วยเวลาขณะถ่ายเทประจุสูง ในขณะที่เวลาระบายความร้อนซึ่งเป็นเวลาปิดต่ำ
รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ของเวลาปิดต่อการขจัดเนื้องานและการสึกหรอของอิเล็กโทรด



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ของเวลาปิดต่อการขจัดเนื้องานและการสึกหรอของอิเล็กโทรด [1]

2.2.1.3 กระแสไฟฟ้า

กระแสไฟฟ้า [2] คือต้นกำเนิดของพลังงานที่ใช้ในการกัดเซาะของกระบวนการ โดยมีหน่วยวัดเป็นแอมแปร์ (A) ทั้งนี้เครื่อง EDM จะคำนวณค่ากระแสสูงสุดที่ใช้ต่อพื้นที่หน้าตัด (SA :Section Area) สำหรับงานขจัดเนื้องานแบบหยาบจะใช้กระแสที่แอมแปร์สูงซึ่งเหมาะกับงานที่ไม่ต้องการรายละเอียดผิวมากนัก ความสามารถในการรักษาความความต้านทานของสารไดอิเล็กตริกก่อนเริ่มต้นการสปาร์ค ค่ากระแสและความถี่ที่สูงเหมาะกับการกัดเซาะผิวที่หยาบ เนื่องจากเกิดการกระจายตัวของความร้อนทำให้เกิดการหลอมเหลวลึกลงและกว้าง ส่งผลให้ไม่สามารถควบคุมกระบวนการทางความร้อนในรูปของคลายความเค้น หรือการอบอ่อนได้ เมื่อใช้กฎกระแสสูงสุดก็จำเป็นที่จะต้องปรับช่องว่างระหว่างวัสดุชิ้นงานกับอิเล็กโทรดให้มีความกว้างมากที่สุด โดยเมื่อกระแสเพิ่มมากขึ้นจะทำให้การขจัดเนื้องานและการสึกหรอของอิเล็กโทรดเพิ่มสูงขึ้น

2.2.1.4 ความถี่

ความถี่ [2] เป็นผลที่เกิดมาจากเวลาเปิด และเวลาปิดโดยความถี่แตกต่างจาก Duty Cycle ตรงที่ความถี่คำนวณจากวัฏจักรที่เกิดขึ้นต่อหน่วยเวลา (Sec) ดังสมการที่ 2.2 [2] ซึ่งความถี่นี้จะส่งผลโดยตรงต่อความหยาบผิวชิ้นงานและการขจัดเนื้อ (Total Cycle Time = On-time + Off-time)

$$\text{Frequency} = \frac{1}{\text{Total Cycle Time}} \quad (2.2)$$

เวลาเปิดสูงเวลาปิดต่ำจะทำให้เกิดค่าความถี่ต่ำจะทำให้ผิวชิ้นงานมีความหยาบมาก และมีการขจัดเนื้องานที่สูง เนื่องจากเวลาปล่อยประจุที่ยาวนานทำให้ความร้อนที่เกิดจากการกักเก็บกระจายตัวเป็นแอ่งกว้างและลึก ตลอดจนส่งผลให้เกิดเป็นชั้นการหลอมเหลวและแข็งตัวใหม่ที่เรียกว่า Recast ที่มีความหนาสูง ซึ่งเป็นเหตุให้เกิดบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ : Heat Affected Zone) ลึกลงไปในเนื้องาน หากเวลาปิดลดต่ำลงจะทำให้เกิดค่าความถี่สูงทำให้เกิดการหลอมละลายของการสปาร์คเป็นแอ่งที่มีความกว้างและความลึกลดลง ซึ่งทำให้ความหยาบผิวงานและความเร็วในการขจัดเนื้องานลดต่ำลง แต่อิเล็กโตรดเกิดการสึกหรอเพิ่มมากขึ้น หากเวลาเปิดลดลงต่ำมากจะทำให้เกิดเป็นความถี่สูงมากจะส่งผลให้ความหยาบผิวชิ้นงานและความเร็วในการขจัดเนื้องานลดลงเป็นอย่างมาก [1, 2]

2.2.1.5 สารไดอิเล็กตริก

สารไดอิเล็กตริกเป็นของเหลวตัวกลางที่กั้นระหว่างชิ้นงานกับอิเล็กโตรด ซึ่งสารไดอิเล็กตริกที่นิยมใช้ได้แก่น้ำกลั่น (De - Ionized Water) และสารไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) โดยสารไดอิเล็กตริกจะทำหน้าที่รักษาสภาพการนำไฟฟ้า และช่วยระบายความร้อนตลอดจนขจัดอนุภาคเศษโลหะออกจากบริเวณผิวงานเพื่อป้องกันการเกิด Overcut เนื่องจากการฝังตัวของเศษโลหะและรักษาความเสถียรในการสปาร์ค โดยสารไฮโดรคาร์บอนเมื่อสปาร์คจะแตกตัวกลายเป็นไฮโดรเจนซึ่งมีประจุเป็นบวกและคาร์บอนซึ่งมีประจุเป็นลบ [1, 2] โดยคาร์บอนจะวิ่งเข้าหาขั้วบวก ถ้าอิเล็กโตรดเป็นขั้วบวกคาร์บอนก็จะวิ่งไปจับอิเล็กโตรด ซึ่งจะช่วยลดการสึกหรอของอิเล็กโตรดได้ แต่ถ้าอิเล็กโตรดที่ใช้เป็นลบคาร์บอนจะวิ่งไปจับผิวงานทำให้ผิวชิ้นงานมีลักษณะเป็นสีดำคล้ำ ความแตกต่างระหว่างสารไฮโดรคาร์บอนและน้ำกลั่นคือ สารไฮโดรคาร์บอนมีค่าความต้านทานสูงกว่าน้ำกลั่น ดังนั้นในกระบวนการกักเก็บโลหะด้วยกระแสไฟฟ้าทั่วไปจึงนิยมใช้สารไฮโดรคาร์บอนเป็นของเหลวตัวกลาง เนื่องจากค่าความต้านทานที่สูงทำให้การถ่ายเทประจุเกิดขึ้นได้ยากจึงเกิด Gap ในการสปาร์คที่ต่ำทำให้ผิวชิ้นงานมีความละเอียดสูง แต่อัตรการขจัดเนื้องานจะต่ำกว่าน้ำกลั่นที่มีความต้านทานน้อยกว่าน้ำมัน ทำให้การถ่ายเทประจุระหว่างอิเล็กโตรดกับชิ้นงานเกิดขึ้นได้ง่ายเป็นผลให้อัตรการขจัดเนื้องานสูงแต่ความปราณีตจะน้อย ระบบไดอิเล็กตริกประกอบด้วยสารไดอิเล็กตริก ท่อส่งปั๊มเครื่องกรอง และถังบรรจุสารไดอิเล็กตริก สารไดอิเล็กตริกมีหลายชนิด แต่ปกติใช้กันมากคือน้ำมันไฮโดรคาร์บอน น้ำมันซิลิกอน และน้ำกำจัดไอออน โดยหน้าที่ของสารไดอิเล็กตริกมีดังนี้

1) ฉนวน (Insulation) เป็นฉนวนระหว่างอิเล็กทรอนิกส์กับชิ้นงาน การ Discharge ไม่ควรเกิดขึ้นจนกว่าระยะช่องว่างจะน้อยที่สุดเท่าที่เป็นไปได้เพื่อให้ได้ความละเอียดถูกต้องมากที่สุด

2) ไอออน (Ionization) สารไดอิเล็กตริกควรที่จะสร้างเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการ Discharge เร็วที่สุดและเมื่อสวิตช์ออฟ (Off-time) สารไดอิเล็กตริกจำเป็นต้องกำจัดไอออนในเส้นทาง Discharge เพื่อให้เกิดการ Discharge ใหม่ในตำแหน่งอื่นต่อไป

3) การหล่อเย็น (Cooling) ไดอิเล็กตริกทำหน้าที่ระบายความร้อนจากชิ้นงาน

4) การพัดพาอนุภาคโลหะ อนุภาคโลหะจากกระบวนการอีทีเอ็มในช่องว่าง Discharge จะถูกสารไดอิเล็กตริกพัดพาออกมา จึงช่วยกระบวนการให้ดำเนินไปได้ปกติมีประสิทธิภาพ ถ้าการไหลเอาอนุภาคโลหะไม่ติดจะทำให้เกิดการหยุดนิ่งของสารไดอิเล็กตริก ทำให้มีอนุภาคโลหะในช่องว่างและอาจจะเกิด Secondary Spark ได้

2.2.1.6 กระบวนการฉีดสารไดอิเล็กตริก [46]

กระบวนการฉีดสารไดอิเล็กตริกมีบทบาทที่สำคัญในการรักษาเสถียรภาพในการแปรรูป และยังส่งผลต่อความแม่นยำในด้านพิกัดรูปทรง นอกจากนี้กระบวนการฉีดสารไดอิเล็กตริกยังมีอิทธิพลต่อคุณภาพผิวงานภายหลังการแปรรูป อย่างไรก็ตามการฉีดสารไดอิเล็กตริกที่ไม่เหมาะสมสามารถส่งผลกระทบต่อกระบวนการสปาร์คทำให้อิเล็กโตรดเกิดการสึกหรอในปริมาณสูงและยังส่งผลให้เวลาในการแปรรูปสูงขึ้นอีกด้วย กระบวนการฉีดสารไดอิเล็กตริกสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 วิธี ดังนี้

1) การฉีดแบบไหลปกติ (Normal Flow) วิธีการนี้เป็นวิธีการที่นิยมมากที่สุดสำหรับกระบวนการอีทีเอ็ม โดยสารไดอิเล็กตริกจะถูกกำหนดให้ไหลด้วยแรงดันปกติผ่านช่องว่างระหว่างอิเล็กทรอนิกส์กับชิ้นงานอย่างน้อยหนึ่งทิศทาง อย่างไรก็ตามวิธีการนี้อาจจะไม่เหมาะสมสำหรับกระบวนการแปรรูปรูกลึงเนื่องจากจะส่งผลให้รูเจาะมีลักษณะเรียวหรือการโค้งงอบริเวณส่วนกลางของผนังรูเจาะ

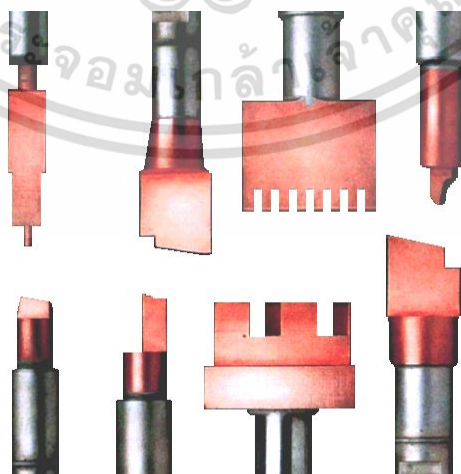
2) การฉีดแบบไหลย้อนกลับ (Reverse Flow) วิธีการนี้จะนิยมใช้กับกระบวนการแปรรูปที่มีสัดส่วนของพื้นที่หน้าตัดอิเล็กทรอนิกส์น้อยกว่าความลึกในปริมาณสูง ซึ่งวิธีการนี้จะแก้ปัญหาเรียวหรือการโค้งงอบริเวณส่วนกลางของผนังรูเจาะได้ โดยชิ้นงานและอิเล็กทรอนิกส์จะอยู่ภายใต้สารไดอิเล็กตริก ในระหว่างการแปรรูปอิเล็กทรอนิกส์จะถูกยกตัวขึ้นสูงกว่าปกติทำให้สารไดอิเล็กตริกถูกดึงเข้าสู่ช่องว่างระหว่างอิเล็กทรอนิกส์กับชิ้นงาน เมื่อถึงช่วงเวลาการสปาร์คอิเล็กทรอนิกส์จะถูกกดตัวลงมาใกล้กับผิวชิ้นงานมากที่สุดทำให้สารไดอิเล็กตริกถูกขับออกมาตามช่องว่างด้านข้างซึ่งทำให้สามารถกำจัดเศษอนุภาคออกมาได้เป็นอย่างดี

3) การฉีดด้วยแรงดันสูง (Jet Flushing) วิธีนี้เป็นการฉีดสารไดอิเล็กทริกด้วยแรงดันสูง หรือการพ่นสารไดอิเล็กทริกให้เป็นฝอย เพื่อให้สามารถเข้าสู่ช่องว่างการสปาร์คได้อย่างรวดเร็วและถูกขับออกได้อย่างรวดเร็วเช่นเดียวกัน

4) การฉีดแบบจุ่มแช่ (Immersion Flushing) วิธีการนี้เหมาะสำหรับกระบวนการแปรรูปพื้นผิวที่มีความลึกไม่มากนัก หรือกระบวนการแปรรูปชิ้นงานที่มีความบางมากๆ โดยมีปริมาณของอัตราการขจัดเนื้องานที่ต่ำ สำหรับวิธีการนี้จะกระทำควบคู่กับการฉีดสารไดอิเล็กทริกลงไปบริเวณผิวหน้าของการสปาร์ค โดยช่วงเวลาจัดเศษจะสัมพันธ์กับช่วงเวลาการหยุดปล่อยกระแสไฟฟ้าและอิเล็กโตรดยกตัวสูงขึ้น สำหรับวิธีการนี้มักจะใช้ในการแปรรูปชิ้นสุดท้าย นอกจากนี้กระบวนการฉีดแบบแช่ยังสามารถยืดอายุการใช้งานของอิเล็กโตรดได้

2.2.1.7 วัสดุอิเล็กโตรด [9]

วัสดุแต่ละชนิดมีสมบัติที่แตกต่างกัน จึงทำให้อิเล็กโตรดสามารถสร้างขึ้นจากวัสดุหลายชนิด ตามความเหมาะสมกับวัสดุชิ้นงานที่ทำการอาร์คและสารไดอิเล็กทริกที่ใช้ โดยวัสดุอิเล็กโตรดที่ดีมีสมบัติดังนี้คือ ง่ายต่อการแปรรูปด้วยกรรมวิธีที่มีค่าใช้จ่ายต่ำ ประสิทธิภาพในการขจัดเนื้องานสูง อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดต่ำ สามารถกระจายความร้อนและนำไฟฟ้าได้ดี ที่สำคัญคือสามารถต้านทานต่อการผิรูปร่าง วัสดุบางชนิดมีอัตราการสึกหรอต่ำ แต่ยากที่จะนำมาแปรรูปเป็นอิเล็กโตรดจึงไม่เป็นที่นิยมสำหรับวัสดุอิเล็กโตรดที่ใช้ในกระบวนการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าที่เหมาะสมกับเหล็กกล้าคือทองแดง [1,2] (Copper) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งเป็นธาตุเคมีที่มีหมายเลขอะตอม 29 และสัญลักษณ์คือ Cu นิยมใช้เป็นวัสดุอิเล็กโตรดเนื่องจากแปรรูปได้ง่ายและให้ประสิทธิภาพการทำงานที่สูง อีกทั้งยังมีผลกระทบต่อ การสปาร์คน้อยมากโดยทองแดงมีสมบัติดังตารางที่ 2.3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.11 ลักษณะรูปทรงของอิเล็กโตรดทองแดง [1]

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติที่สำคัญของทองแดง [9]

สมบัติ	ทองแดง (Cu)
ความหนาแน่น (kg/cm ³)	8.96
จุดหลอมเหลว (°C)	1084.62
ความต้านทาน (20°C) (nΩ.m)	16.78
การนำความร้อน (300 K)(w/cm.k)	401
ความแข็ง HV (MPa)	369
พลังงานไอออนในเซชัน (Kj/m) ระดับ 1 ต่อ	745.5

2.2.1.8 การหมุนของอิเล็กโตรด

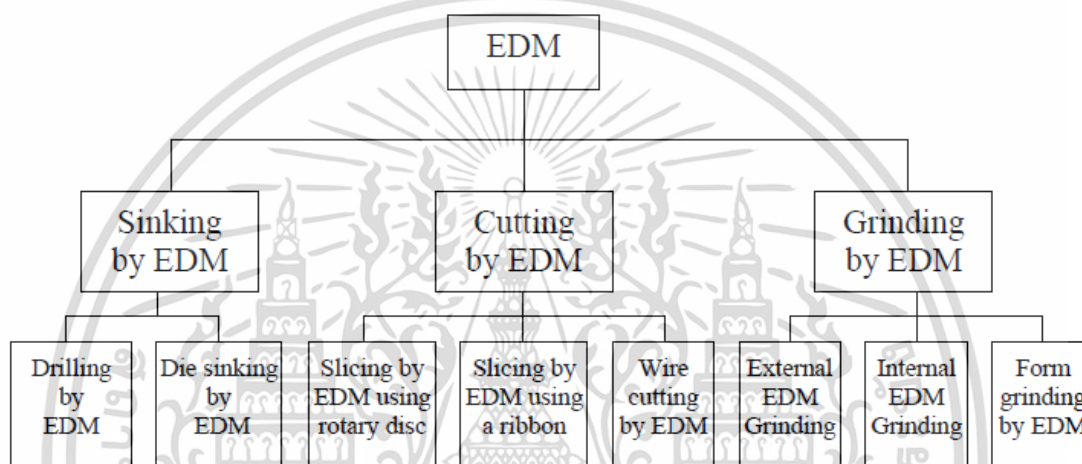
การหมุนของวัสดุอิเล็กโตรดโดยปกติแล้วนิยมใช้กับกระบวนการเจาะรูลึกระดับไมโคร (Micro-EDM) การหมุนของอิเล็กโตรดสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการกัดสารไดอิเล็กตริก ซึ่งส่งผลให้การสึกหรอของอิเล็กโตรดเกิดขึ้นในปริมาณที่สม่ำเสมอ นอกจากนี้อัตราของการหมุนอิเล็กโตรดทำให้สารไดอิเล็กตริกสามารถไหลเข้าสู่ช่องว่างในการแปรรูปได้ดีและอาศัยแรงเหวี่ยงจากการหมุนขจัดเศษอนุภาคให้หลุดออกมาทางช่องว่างระหว่างอิเล็กโตรดกับชิ้นงานได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งส่งผลต่ออัตราการขจัดเนื้องานที่สูงขึ้นและให้ค่าความหยาบผิวที่ต่ำ ในเวลาเดียวกันยังส่งผลให้กระบวนการสปาร์คในแต่ละครั้งมีเสถียรภาพเพิ่มมากขึ้น ทำให้เวลาในการแปรรูปสามารถลดลงได้ มากไปกว่านั้นหากการหมุนของอิเล็กโตรดมีความสัมพันธ์กับกระบวนการหยุดปล่อยกระแสไฟและการยกตัวของอิเล็กโตรด จะทำให้กระบวนการอีดีเอ็มมีประสิทธิภาพสูงสุด [18, 23, 24]

2.2.2 การเจาะรูลึกด้วยกระบวนการอีดีเอ็ม

กระบวนการกัดเจาะโลหะด้วยไฟฟ้าเป็นกระบวนการแปรรูปขั้นสูงที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมันมีคุณลักษณะเฉพาะ คือเป็นกระบวนการแปรรูปวัสดุชิ้นงานที่มีความแข็งสูง และยากต่อการแปรรูปด้วยกระบวนการทางกล โดยอาศัยความร้อนที่เกิดจากการปล่อยกระแสไฟฟ้าผ่านไปยังวัสดุตัวนำที่เรียกว่า อิเล็กโตรด [1] ซึ่งทำหน้าที่กำหนดรูปทรงและลักษณะพื้นผิวของวัสดุชิ้นงานโดยส่วนใหญ่จะผลิตจากวัสดุที่สามารถนำไฟฟ้าได้ดีมีจุดหลอมเหลวสูง และง่ายต่อการแปรรูปด้วยกระบวนการทางกล เช่น วัสดุกราไฟต์ ซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับการแปรรูปวัสดุกลุ่มคาร์ไบด์ และวัสดุทองแดง ซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับการแปรรูปวัสดุกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสม [27] นอกจากนี้คุณลักษณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เด่นของกระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้าคือวัสดุเล็กโตรดจะไม่สัมผัสกับวัสดุชิ้นงานเหมือนการแปรรูปแบบปกติ ซึ่งจะถูกระทำอยู่ภายใต้สายโคอิเล็คทริก ดังนั้นรูปแบบของวัสดุเล็กโตรดจึงสามารถประยุกต์ได้หลากหลายรูปทรงหรือแม้กระทั่งขนาดของอิเล็คโตรดที่สามารถมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางได้เล็กสุดถึง 0.1 มิลลิเมตร [17, 47] ในปัจจุบันอุตสาหกรรมต่างๆได้นำเอากระบวนการอีดีเอ็มเข้าไปแปรรูปชิ้นงานไม่ว่าจะเป็น อุตสาหกรรมแม่พิมพ์ อากาศยาน อุตสาหกรรมชิ้นส่วน เป็นต้น ซึ่งชิ้นงานที่ได้จากการแปรรูปด้วยอีดีเอ็มจะมีความแม่นยำสูง (High Precision) สำหรับกระบวนการอีดีเอ็มสามารถแบ่งออกได้ตามคุณลักษณะของการแปรรูปได้ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การจำแนกประเภทของกระบวนการอีดีเอ็ม [9]

กระบวนการกัดเซาะรูลึกด้วยไฟฟ้า (Electrical Discharge Drilling : EDD) โดยปกติแล้วนิยมใช้ในการแปรรูปแม่พิมพ์เป็นรูปทรง (Die and Mold) นอกจากนี้กระบวนการเจาะด้วยอีดีเอ็มยังถูกนำมาแปรรูปรูลึกที่มีความละเอียดผิวสูงหรือในส่วนที่ยากต่อการแปรรูปด้วยวิธีการอื่นๆ หนึ่งในงานที่ประยุกต์เอาวิธีการอีดีเอ็มเข้ามาใช้งานคือ การแปรรูปหัวฉีดทั้งสแตนคาร์ไบด์สำหรับชิ้นส่วนยานยนต์ หัวฉีดเครื่องยนต์ดีเซล หรือการเจาะรูเพื่อประกอบใบพัดเทอร์โบในเครื่องยนต์เจ็ท เป็นต้น ซึ่งมันถูกค้นพบว่าเป็นวิธีการแปรรูปที่ดีที่สุดและยังให้ค่าความแม่นยำในการแปรรูปที่สูง การประยุกต์ใช้วิธีการเจาะรูด้วยกระบวนการอีดีเอ็มถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในกระบวนการเจาะรูระดับไมโคร เมสโซ (Micro-Meso EDM) ซึ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะไม่เกิน 3 มิลลิเมตร [48, 49]

2.2.3 การประเมินประสิทธิภาพการแปรรูปของกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า

กระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการกัดเซาะซึ่งเกิดการสึกหรอทั้งวัสดุชิ้นงานและวัสดุเล็กโตรด ซึ่งขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของกระบวนการ โดยทั่วไปแล้วจะประเมินความสามารถในการกัดเซาะเนื้องานอยู่ในรูปของอัตราการขจัดเนื้องานและประเมินการสึกหรอของอิเล็คโตรดอยู่ในรูป

ของอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด ตลอดจนวัดประสิทธิภาพการทำงานที่มีผลต่อวัสดุชิ้นงานในรูปของคุณภาพผิวงาน (Surface Quality) และในรูปของความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra)

2.2.3.1 อัตราการขจัดเนื้องาน [1]

การแปรรูปด้วยวิธีกัดเซาะทางไฟฟ้าอัตราการขจัดเนื้องานจะต่ำมากเมื่อเทียบกับวิธีการอื่นๆ เช่น การตัด การกัดและการกลึง เนื่องจากเป็นการใช้เงื่อนไขที่การแปรรูปดำเนินไปอย่างช้าๆ ทำให้อัตราการขจัดเนื้องานต่ำ แต่สามารถใช้ได้กับวัสดุชิ้นงานที่ยากต่อการแปรรูปด้วยกระบวนการทางกล ในการปรับใช้เงื่อนไขที่ทำให้อัตราการขจัดเนื้องานสูงอาจทำให้ค่าความหยาบผิวสูงขึ้น อัตราการขจัดเนื้องานจะมีหน่วยเป็นปริมาตรของเนื้อวัสดุที่ถูกขจัดออกไปต่อหน่วยเวลาดังสมการที่ 2.3 [10, 15]

$$MRR (mm^3/min) = \frac{(W_{w1} - W_{w2})}{\rho_w \times M_t} \times 10^3 \quad (2.3)$$

เมื่อ Material Removal Rate (MRR) คือ อัตราการขจัดเนื้องาน (ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อนาที), W_{w1} และ W_{w2} คือ น้ำหนักของชิ้นงานก่อนและหลังการแปรรูปสึก (กรัม : g), ρ_w และ M_t คือ ความหนาแน่นของวัสดุชิ้นงาน (AISI P20, 7.786 g/cm³) และเวลาในการแปรรูปสึก (นาที : min) ตามลำดับ

2.2.3.2 อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด [1]

การกัดเซาะวัสดุชิ้นงานจะทำให้อิเล็กโทรดเกิดการสึกหรอที่เปลี่ยนแปลงไปตามปัจจัยต่างๆ เช่น เงื่อนไขการกัดเซาะ หรือการเลือกใช้วัสดุของอิเล็กโทรดกับวัสดุชิ้นงาน และสภาพการไหลของสารไดอิเล็กตริก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องคำนวณอัตราการสึกหรอนี้ไว้ล่วงหน้าเพื่อกำหนดปริมาณขั้นสุดทำของความเสี่ยงวัสดุชิ้นงานที่เพื่ออัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดเพื่อให้ได้ขนาดที่แม่นยำ ในทางปฏิบัติถ้าหากอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดที่ต่ำกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ จะถือว่าไม่เกิดการสึกหรอ และถ้าอยู่ในช่วง 1 – 10 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่าอัตราการสึกหรอที่เกิดขึ้นอยู่ในระดับต่ำ หากสูงเกินกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่ามีการสึกหรอสูง ซึ่งโดยปกติแล้วการแปรรูปหยาบจะไม่เกิดสึกหรอของอิเล็กโทรด แต่ถ้าเป็นการแปรรูปละเอียดอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดจะอยู่ในเกณฑ์ต่ำ โดยอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดสามารถคำนวณได้จากสมการ 2.4 [10, 15]

$$EWR (\%) = \frac{(W_{E1} - W_{E2} \times \rho_w)}{(W_{w1} - W_{w2} \times \rho_E)} \times 100 \quad (2.4)$$

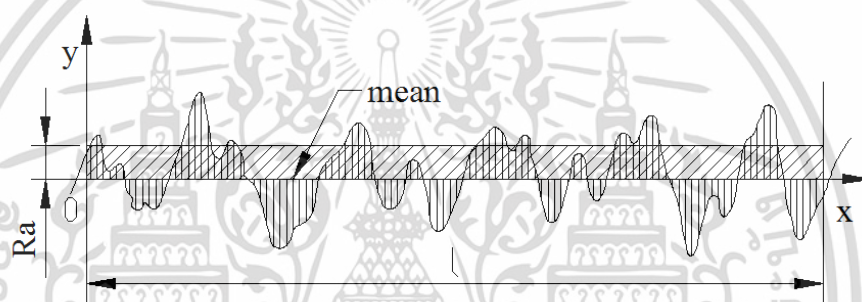
เมื่อ Electrode Wear Ratio (EWR) คือ อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (เปอร์เซ็นต์), W_{E1} และ W_{E2} คือ น้ำหนักของอิเล็กโทรดก่อนและหลังการแปรรูป (กรัม : g), ρ_w คือ ความหนาแน่นของวัสดุชิ้นงาน

(AISI P20, 7.786 g/cm³), W_{w1} และ W_{w2} คือ น้ำหนักของชิ้นงานก่อนและหลังการแปรรูปลึก (กรัม : g), ρ_E คือ ความหนาแน่นของวัสดุอิเล็กโทรดทองแดง (Copper, 8.94 g/cm³) ตามลำดับ

2.2.3.3 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย [1]

ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Arithmetical Mean Roughness : Ra) หมายถึง ค่าเฉลี่ยจากการคำนวณค่ากลางระหว่างจุดยอดและจุดก้นแอ่ง เพื่อกำหนดเส้นกึ่งกลาง (Mean) ของภาพขยายพื้นผิว (Profile) แล้วนำค่าที่ห่างจากเส้นกึ่งกลางด้านบนมาหักล้างกับค่าที่ห่างจากเส้นกึ่งกลางด้านล่างเทียบกับระยะทางดังแสดงในรูปที่ 2.13 ซึ่งสามารถเขียนสมการในการคำนวณได้ดังสมการ 2.5

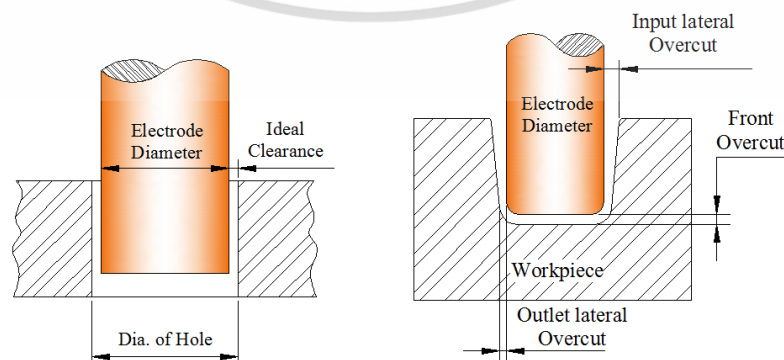
$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |f(x)| dx \quad (2.5)$$



รูปที่ 2.13 การคำนวณค่าความหยาบผิวเฉลี่ย [50]

2.2.3.4 ช่องว่างการแปรรูป

ช่องว่าง คือระยะห่างระหว่างเครื่องมือตัดกับวัสดุอิเล็กโทรดไม่สัมผัสกัน อันเนื่องมาจากการแปรรูปที่อาศัยการกีดเซาะทางไฟฟ้าผ่านวัสดุกึ่งตัวนำที่เรียกว่าสารไดอิเล็กทริก จึงทำให้เกิดช่องว่างระหว่างผิวอิเล็กโทรดกับผิวงานดังแสดงในรูปที่ 2.14 ซึ่งช่องว่างนี้สามารถวัดได้จากความต่างของขนาดอิเล็กโทรดกับความโตของรูเจาะบนวัสดุชิ้นงาน [27, 51]



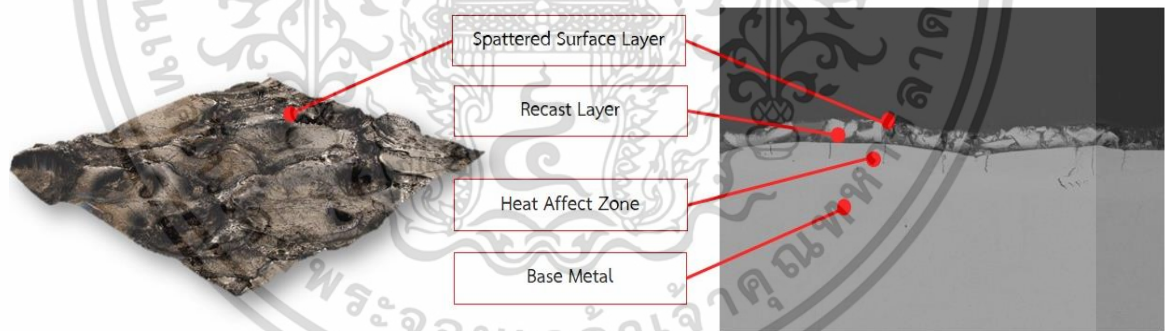
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

a) ช่องว่างในอุดมคติ b) การเกิด Overcut ในการ EDM

รูปที่ 2.14 ช่องว่าง (Gap Clearance)

2.2.3.5 อิทธิพลทางความร้อนที่มีผลต่อพื้นผิวชิ้นงาน

พื้นผิววัสดุชิ้นงานที่ได้รับความร้อนจากการถ่ายเทประจุ (Discharge Current) ในขณะสปาร์คจะเกิดการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวของวัสดุชิ้นงานแบ่งตามระดับความรุนแรงของผลกระทบจากอุณหภูมิความร้อน ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้คือ ขณะสปาร์คจะเกิดความร้อนสูงที่เพียงพอต่อการหลอมละลายและขจัดเศษเนื้อวัสดุชิ้นงานชั้นบนสุดออก (Spattered Surface Layer) บริเวณชั้นรองลงมาจะได้รับความร้อนที่เพียงพอต่อการหลอมละลายของวัสดุชิ้นงานแต่ไม่สามารถขจัดออกได้เมื่อสิ้นสุดวัฏจักรการสปาร์ค วัสดุที่เกิดการหลอมละลายจะหลุดออกมาในรูปแบบของอนุภาคเศษโลหะ (Debris) เนื้อวัสดุที่ถูกขจัดออกบางส่วนถูกสารไดอิเล็กทริกพัดพาออกไป บางส่วนหลงเหลืออยู่ในช่องว่างการแปรรูปและปนเปื้อนในสารไดอิเล็กทริกทำให้จับตัวกับคาร์บอนที่เกิดจากการแตกตัวของสารไดอิเล็กทริกที่เป็นไฮโดรคาร์บอนวิ่งไปเกาะผิวอิเล็กโทรดหรือผิวงาน บางส่วนกลับเข้ามารวมตัวกับเนื้อวัสดุกลายเป็นชั้นการแข็งตัวใหม่ (Recast Layer) และในระดับพื้นผิวที่ลึกลงมาจะได้รับอิทธิพลจากความร้อนแต่ไม่เกิดการหลอมละลาย (Heat Affect Zone) โดยในแต่ละระดับชั้นที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนจะเกิดในระดับไมโครเมตรเนื่องจากถูกปกคลุมด้วยสารไดอิเล็กทริกตลอดเวลา พื้นผิวชิ้นงานที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ชั้นผิวชิ้นงานที่ได้รับอิทธิพลทางความร้อนจากกระบวนการ EDM

นอกจากนี้ การแปรรูปวัสดุชิ้นงานโดยกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าเป็นการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าไปเป็นพลังงานความร้อนจากการสปาร์คที่ความถี่สูง ซึ่งอาจทำให้เกิดความร้อนสูงถึง 10,000 องศาเซลเซียส ภายในเวลาหนึ่งในล้านวินาทีจนทำให้สารไดอิเล็กทริกระเหยกลายเป็นไอ และเนื้องานหลุดร่อนออกเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็ก ด้วยอุณหภูมิที่สูงทำให้เกิดการหลอมละลายและแข็งตัวใหม่อย่างรวดเร็วในบริเวณที่เล็กมากๆ จึงทำให้เกิดเป็นชั้นหลอมสีขาว (White Layer) [29, 30] บริเวณ

ผิวงาน ซึ่งเกิดจากการเรียงตัวของผลึกเป็นแนวยาวโผล่ขึ้นมาเรียงตัวเป็นแนวยาวตามกระบวนการระบายความร้อน (Cooling) ซึ่งจะมีความหนา 10-30 ไมโครเมตร และภายใต้ชั้นหลอมสีขาวจะเกิดเป็นบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (Heat Affect Zone : HAZ) ซึ่งในการหลอมเหลวและเย็นตัวอย่างรวดเร็ว นั้นทำให้เกิดความเครียดจากการหดและขยายตัวของวัสดุจนเกิดเป็นรอยแตกร้าวขนาดเล็กบนพื้นผิวชิ้นงาน ซึ่งบางครั้งไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า ดังนั้นจึงต้องมองด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ทั้งนี้สำหรับวัสดุทั้งสแตนคาร์ไบด์นั้นมักจะเกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็กจากการขาดวัสดุประสาน เนื่องจากวัสดุประสาน คือโคบอลต์จะมีอุณหภูมิในการหลอมเหลวที่ต่ำกว่าวัสดุผสมหลัก (Matrix) ซึ่งเมื่อเกิดการหลอมละลายจะเกิดการหลุดร่อนออกเป็นผลให้เกิดเป็นรอยแตกร้าวบนผิววัสดุชิ้นงานได้ง่าย โดยในการวัดรอยแตกร้าวขนาดเล็กนั้นจะพิจารณาวัดเป็นความหนาแน่นของรอยแตกร้าวขนาดเล็ก

2.2.4. การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลอง (Design and Analysis of Experiment : DOE) [52] เป็นเทคนิคทางสถิติขั้นสูงที่ใช้ในการปรับค่าสภาวะของกระบวนการเพื่อให้ได้ผลตอบสนองเป็นไปตามที่ต้องการ ซึ่งข้อแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดระหว่างวิธีการโดยทั่วไปกับเทคนิคของการออกแบบการทดลองคือวิธีการโดยทั่วไปมักเปิดการทดลองแบบลองผิดลองถูกหรือใช้การทดลองปรับตั้งค่ากระบวนการทีละค่า (One-Factor-at-a-Time, OFAT) ซึ่งจะให้ผลตอบสนองเข้าสู่จุดมุ่งหมายที่ต้องการได้ช้ามากและสิ้นเปลืองทรัพยากรในการวิเคราะห์รวมถึงต้องเก็บข้อมูลจำนวนมาก

การใช้หลักการสถิติในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองเป็นสิ่งที่จำเป็นที่ผู้ทำการทดลองต้องมีความเข้าใจวิธีการเก็บข้อมูลตลอดจนการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้มาซึ่งขั้นตอนของการออกแบบการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

2.2.4.1 การนิยามปัญหา (Statement of the Problem) เป็นการระบุว่าความต้องการในการผลิตคืออะไรและต้องการรู้อะไรบ้างในการผลิต ซึ่งการนิยามปัญหานี้จะเกี่ยวข้องไปถึงวัตถุประสงค์ของการทดลอง

2.2.4.2 การเลือกปัจจัยและระดับของปัจจัย (Choice of Factors, Levels, and Ranges) เป็นการใช้หลักการทางทฤษฎีและประสบการณ์จากงานวิจัยต่างๆเพื่อระบุว่าปัจจัยใดบ้างที่น่าจะมีผลต่อการทดลองและในแต่ละปัจจัยนั้นควรจะมีช่วงในการทดลองอย่างไร (Range) การกำหนดระดับของปัจจัยสามารถแบ่งได้ 3 แบบดังนี้

1) แบบกำหนด (Fixed Effect) หมายถึงระดับของปัจจัยที่สามารถควบคุมหรือกำหนดค่าได้แน่นอนโดยผู้ทดลองกำหนดเอง

2) แบบสุ่ม (Random Effect) หมายถึงระดับของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมหรือกำหนดค่าของปัจจัยได้แน่นอนซึ่งผลการทดลองที่ได้จะเป็นตัวแทนของทั้งปัจจัยที่ได้เป็นตัวแทนของระดับใดระดับหนึ่ง

3) แบบผสม (Mixed Effect) หมายถึงการผสมผสานระดับของปัจจัยที่เป็นทั้งแบบกำหนดและแบบสุ่มรวมกัน

2.2.4.3 การเลือกตัวแปรตอบสนอง (Selection of the Response Variable) ในการเลือกตัวแปรตอบสนองผู้วิจัยจะต้องเลือกตัวแปรที่สามารถให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการศึกษาและการวัดค่านั้นจะต้องมีความแม่นยำและถูกต้องซึ่งหมายถึงเครื่องมือวัดจะต้องมีความแม่นยำและถูกต้องด้วย

2.2.4.4 การเลือกแบบการทดลอง (Choice of Experimental Design) เมื่อกำหนดทรีทเมนต์ (Treatment) และตัวแปรตอบสนอง (Response Variables) แล้วต้องทำการตัดสินใจเกี่ยวกับขนาดของการทดลองซึ่งหมายถึงจำนวนทำซ้ำของการทดลอง (Replicate) ความเหมาะสมของลำดับในการทดลองข้อจำกัดในการสุ่ม (Randomization) และการบล็อก (Blocking) ที่เกี่ยวข้องทั้งนี้ต้องนำมาเกี่ยวข้องกันในด้านความเสี่ยงและต้นทุนที่ใช้ในการทดลอง

2.2.4.5 การดำเนินการทดลอง (Performing the Experiment) ในระหว่างการดำเนินการทดลองผู้วิจัยจะต้องศึกษาดูแลอย่างใกล้ชิด ปฏิบัติตามหลักการที่ได้ออกแบบไว้ ข้อควรระวังในขณะทำการทดลองคือความถูกต้องของเครื่องมือวัดและความสม่ำเสมอในการทดลองเพื่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด

2.2.4.6 การวิเคราะห์ข้อมูล (Statistical Analysis of Data) ในการวิเคราะห์ข้อมูลจะใช้ความรู้ทางด้านสถิติเข้ามาวิเคราะห์และสรุปผลรวมทั้งตัดสินความถูกต้องของข้อมูลที่เกิดขึ้นก่อนที่จะตีความข้อมูลและวิธีการทางสถิติไม่สามารถบอกได้ว่าปัจจัยมีผล (Effect) เท่าใดแน่นอนแต่เป็นเพียงเครื่องมือที่ให้แนวทางในการวิเคราะห์ภายใต้ช่วงของความเชื่อมั่นในการสรุปผล

2.2.4.7 การสรุปผลและข้อเสนอแนะ (Conclusions and Recommendations) เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลแล้วจะต้องสรุปผลการวิเคราะห์ อาจแสดงในรูปกราฟ ตาราง แผนภูมิ เป็นต้น และให้ข้อเสนอแนะเพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตให้ดีขึ้น เมื่อสรุปผลแล้วควรมีการทดสอบเพื่อยืนยันผลจากการทดลองอีกครั้งหนึ่ง

2.2.5 วิธีพื้นผิวผลตอบสนอง

วิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง [53] เป็นวิธีการรวบรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหาโดยที่ผลตอบสนองที่เราสนใจขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยและผู้ทดลองมีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่ดีที่สุดที่เหมาะสมของผลตอบสนองนี้ เช่นผลตอบสนอง y เป็นฟังก์ชันของ X_1 และ X_2 ดังนั้นจะสามารถเขียนในรูปแบบสมการได้ดังนี้

$$y = f(x_1, x_2) + \varepsilon \quad (2.6)$$

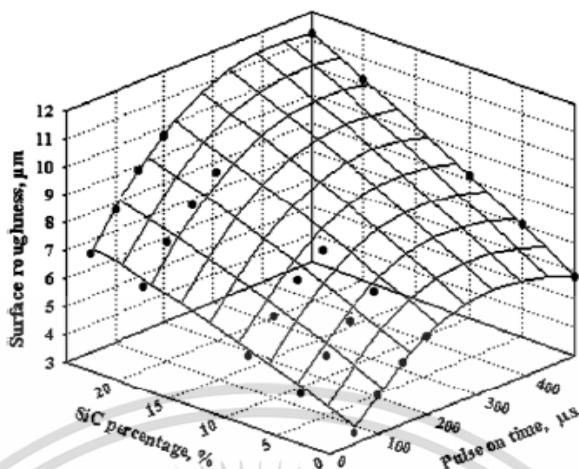
โดยที่ ε เป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการทดลอง ค่าความคาดหวังของผลตอบสนองถูกแสดงด้วย

$$E(y) \equiv \eta = E[f(x_1, x_2)] + E(\varepsilon) \quad (2.7)$$

เนื่องจาก $\varepsilon = NID(0, \sigma^2)$ (2.8)

ผลตอบสนองจะถูกแสดงด้วย $\eta = f(x_1, x_2)$ (2.9)

ซึ่งเรียกว่าพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface) ตัวแปร x_1, x_2 เป็นตัวแปรอิสระ (Independent Variables) และเรียกตัวแปรสัญลักษณ์ (Code Variables) ซึ่งไม่มีหน่วยแต่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์และมีการกระจายแบบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเช่น x_1 มีค่าเป็น 1, 0, -1 เป็นต้น อย่างไรก็ตามตัวแปร x_1 และ x_2 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของตัวแปรจริง (Natural Variable) ซึ่งมีหน่วย เช่น x_1 แสดงเป็นตัวแปรจริง คือ ξ_1 และ x_2 แสดงเป็นตัวแปรจริง คือ ξ_2 โดยมากแล้วจะแสดงพื้นผิวผลตอบในรูปของกราฟฟิก ซึ่ง η จะถูกพล็อตกับระดับของ x_1 และ x_2 เพื่อที่จะช่วยให้มองเห็นรูปร่างของพื้นผิวผลตอบได้ดียิ่งขึ้น โดยส่วนใหญ่แล้วจะทำการพล็อตเป็นเส้นโครงร่าง (Contour Plot) ของพื้นผิวผลตอบสนองในการสร้างเส้นโครงร่างนี้เส้นที่มีค่าของผลตอบสนองคงที่จะถูกวาดอยู่บนระนาบ x_1 และ x_2 เส้นโครงร่างแต่ละเส้นจะมีความสูงของพื้นผิวผลตอบที่เท่ากันค่าหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แสดงพื้นผิวผลตอบสนองสามมิติ [15]

การวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนองมีบ่อยครั้งที่การประมาณค่าเงื่อนไขที่ดีที่สุดเบื้องต้นสำหรับระบบที่ทำการศึกษายู่ห่างไกลจากจุดที่ดีที่สุดตัวจริง วิธีการป้อนขึ้นด้วยทางที่ชันที่สุดเป็นวิธีการที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่อย่างเป็นอันดับบนเส้นทางที่มีความชันมากที่สุด ในทิศทางที่มีการเพิ่มขึ้นของผลตอบสนองสูงสุด ในขณะที่วิธีการป้อนลงด้วยทางที่ชันที่สุดเป็นวิธีการที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่อย่างเป็นอันดับบนเส้นทางที่มีความชันมากที่สุด ในทิศทางที่มีการลดลงของผลตอบสนองต่ำสุด ซึ่งวิธีการผิวผลตอบสนองกำลังหนึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ 2.10

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \sum_{i=1}^k \hat{\beta}_i X_i + \varepsilon \quad (2.10)$$

ในปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวผลตอบสนองส่วนมากมักจะไม่นิยมนำความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบและตัวแปรอิสระตั้งนั้นขั้นแรกคือผู้ทดลองต้องหาตัวประมาณที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวแทนสำหรับแสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่าง y และกลุ่มของตัวแปรอิสระซึ่งตามปกติแล้วจะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังต่ำๆ ที่อยู่ภายใต้อาณาเขตบางส่วนของตัวแปรอิสระถ้าแบบจำลองของผลตอบมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระฟังก์ชันที่จะใช้ในการประมาณความสัมพันธ์นี้คือแบบจำลองพหุนามกำลังหนึ่ง อย่างไรก็ตามหากมีส่วนโค้งเข้ามาเกี่ยวข้องในระบบจำเป็นจะต้องใช้พหุนามที่มีกำลังสูงขึ้น เช่น พหุนามกำลังสอง (Second Order Response Surface)

2.2.6 ฟังก์ชันความพึงพอใจ

ฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability Function) เป็นฟังก์ชันที่ใช้ในการพิจารณาสถานะของผลตอบ ซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนตัวแปรอิสระ โดยค่าความพึงพอใจของผลตอบ (Desirability : d) จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 – 1 ซึ่งเมื่อค่า d เท่ากับ 0 หมายความว่า ผลตอบนั้นอยู่นอกขอบเขตของการยอมรับ แต่หากค่า d มีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความพึงพอใจก็จะเพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน และในกรณีที่ค่า d เท่ากับ 1 หมายความว่า ผลตอบนั้นได้รับความพึงพอใจอย่างสมบูรณ์ ซึ่งค่าความพึงพอใจของผลตอบสามารถหาได้จากเงื่อนไขหรือสมการต่างๆ ดังนี้

2.2.6.1 กรณีที่ผลตอบที่ใช้ในการพิจารณามีเพียงผลตอบเดียว

กรณีที่ผลตอบที่ใช้ในการพิจารณามีเพียงผลตอบเดียว ค่าความพึงพอใจหาได้จากสมการโดย

ถ้าต้องการผลตอบสูงสุด (Maximum) หาได้จากสมการ

$$d_i = \begin{cases} 0 & y_i < L_i \\ \frac{y_i - L_i}{T_i - L_i} & L_i \leq y_i \leq T_i \\ 1 & y_i > T_i \end{cases}^w \quad (2.11)$$

และถ้าต้องการผลตอบต่ำสุด (Minimum) หาได้จากสมการ

$$d_i = \begin{cases} 0 & y_i < T_i \\ \frac{U_i - y_i}{U_i - T_i} & T_i \leq y_i \leq U_i \\ 1 & y_i > U_i \end{cases}^w \quad (2.12)$$

เมื่อ

d_i คือ ความพึงพอใจของผลตอบ

y_i คือ ค่าของผลตอบ

T_i คือ ค่าเป้าหมายของผลตอบ (Target)

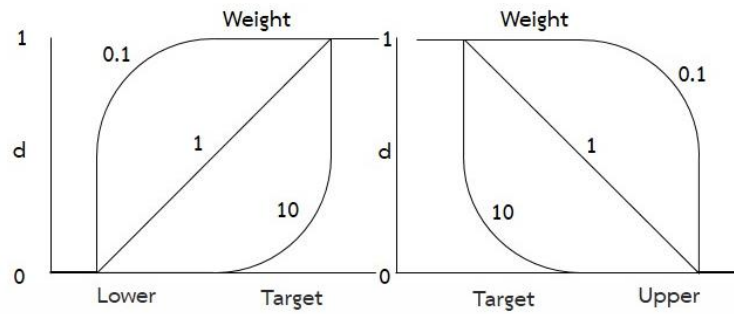
L_i คือ ค่าระดับต่ำของผลตอบ

U_i คือ ค่าระดับสูงของผลตอบ

w คือ ค่าน้ำหนักของผลตอบ (Weight)

ซึ่งการกำหนดค่าน้ำหนักของผลตอบนี้สามารถเลือกกำหนดค่าของน้ำหนักได้ ดังรูปที่

2.17



รูปที่ 2.17 การกำหนดน้ำหนักของผลตอบกรณีมีผลตอบเดียว

2.2.6.2 กรณีผลตอบที่ใช้ในการพิจารณามีสองผลตอบ

กรณีผลตอบที่ใช้ในการพิจารณามีสองผลตอบค่าความพึงพอใจของแต่ละผลตอบหาได้

จากสมการ

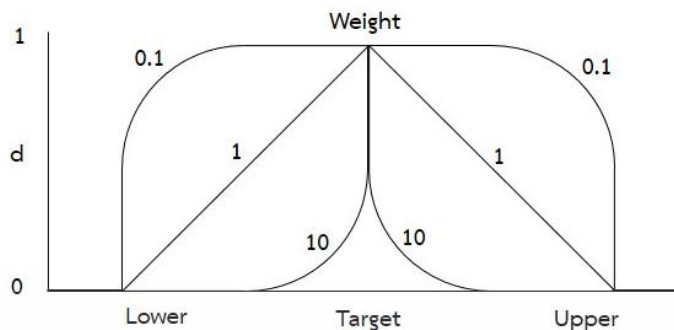
$$d = \begin{cases} 0 & y_i < L_i \\ \left(\frac{y_i - L_i}{T_i - L_i}\right)^{w^1} & L_i \leq y_i \leq T_i \\ \left(\frac{U_i - y_i}{U_i - T_i}\right)^{w^2} & T_i \leq y_i \leq U_i \\ 1 & y_i > U_i \end{cases} \quad (2.13)$$

เมื่อ

- d_i คือ ความพึงพอใจของผลตอบ
- y_i คือ ค่าของผลตอบ
- T_i คือ ค่าเป้าหมายของผลตอบ (Target)
- L_i คือ ค่าระดับต่ำของผลตอบ
- U_i คือ ค่าระดับสูงของผลตอบ
- w^1 คือ ค่าน้ำหนักของผลตอบตัวที่ 1 (Weight)
- w^2 คือ ค่าน้ำหนักของผลตอบตัวที่ 2 (Weight)

ซึ่งการกำหนดค่าน้ำหนักของผลตอบทั้งสองนี้สามารถเลือกกำหนดค่าของน้ำหนักได้ ดัง

รูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 การกำหนดน้ำหนักของผลตอบกรณีมีสองผลตอบ

เมื่อค่าความพึงพอใจของผลตอบมีหลายค่า จะต้องทำการหาค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบ (Composite Desirability : D) จากสมการดังนี้

$$D = (d_1 \times d_2 \times d_3 \times \dots \times d_m)^{1/m} \quad (2.14)$$

เมื่อ

D คือ ความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบ (Composite Desirability)

d คือ ความพึงพอใจของแต่ละผลตอบ (Desirability)

m คือ จำนวนของผลตอบ

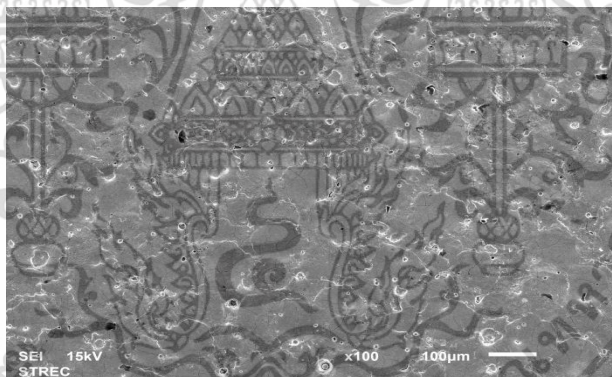
และเมื่อความพึงพอใจของผลตอบมีเพียงค่าเดียว ค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบจะมีค่าเท่ากับค่าความพึงพอใจของผลตอบนั้น

2.2.7 การตรวจสอบพื้นผิวชิ้นงานภายหลังกระบวนการ EDM

2.2.7.1 การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้อิเล็กตรอนเป็นแหล่งกำเนิดแสง เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาลักษณะพื้นฐานของวัสดุในระดับจุลภาค ซึ่งเป็นรายละเอียดที่เล็กมาก และเนื่องจากข้อจำกัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่มีความยาวคลื่นแสงขนาดใหญ่ กว่าลักษณะพื้นฐานบางชนิดที่ต้องการศึกษา และกำลังความสามารถในการแยกชัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงธรรมดาที่มีค่าต่ำ ใช้วัตถุเล็กสุดประมาณ 0.2 ไมโครเมตร และให้กำลังขยายสูงสุดไม่เกิน 3000 เท่า ซึ่งไม่สามารถตรวจสอบรายละเอียดของวัตถุที่มีขนาดเล็กมากๆได้ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลัง ขยายสูง มีความสามารถในการแยกชัดดี เนื่องจากมีความยาวคลื่นสั้น เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของวัสดุ โดยกล้องจุลทรรศน์

อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีกำลังขยายมากกว่า 3000 เท่า จนถึงระดับมากกว่า 100000 เท่า และสามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพ ซึ่งขึ้นกับลักษณะตัวอย่างได้ตั้งแต่ 3 ถึง 100 นาโนเมตร อีกทั้งยังสามารถใช้งานร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์อื่น เช่น Energy Dispersive Spectrometry (EDS) และ Wavelength Dispersive Spectrometry (WDS) ที่เป็นข้อมูลทางเคมี จึงทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน

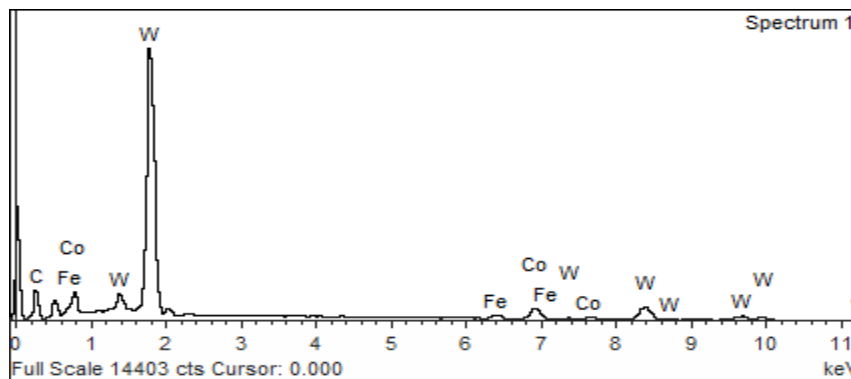
หลักการการทำงานของเครื่อง SEM จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้ กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser Lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective Lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron) ขึ้นซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึกและแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และ ถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไปและสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ได้เลย



รูปที่ 2.19 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

2.2.7.2 การตรวจสอบส่วนผสมของธาตุที่ตกค้างบนพื้นผิวชิ้นงานภายหลังการอีทีเอ็มด้วยกล้องเอกซเรย์สเปกโตรสโคปีแบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-ray Spectrometer : EDS) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์องค์ประกอบและการมีอยู่ของธาตุบนพื้นผิวงาน โดยการใช้งานมักจะใช้ร่วมกับกระบวนการ SEM ซึ่งจะทำให้การวิเคราะห์และการตรวจสอบสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 ภาพถ่ายจากกล้องเอกซเรย์สเปคโตรสโคปีแบบกระจายพลังงาน (EDS)

2.3 สมมติฐานด้านการออกแบบอิเล็กโตรดแบบหลายช่องฉีดยุติ

2.3.1 หลักการออกแบบอิเล็กโตรดเพื่อจ่ายสารไดอิเล็กทริกแบบหลายช่องฉีดยุติ

ในการแปรรูปชิ้นงานที่มีอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดอิเล็กโตรดต่อความลึกในการกัดเซาะในปริมาณสูง (EDM Drilling) ซึ่งสัดส่วนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะกับระยะความลึกอาจเท่ากับ 3 เท่าหรือมากกว่า ส่งผลต่อความสามารถในการแปรรูปที่ลดลงตามความลึกของรูเจาะ เนื่องจากความสามารถของการขจัดเศษจากการฉีดยุติสารไดอิเล็กทริกด้านข้างแบบปกติ (Conventional Side Flushing) เป็นไปได้ยาก นอกจากนี้การกัดเซาะที่มีความลึกมาก มักจะประสบปัญหาการเกิดการโค้งงอของพื้นผิวตามแนวความลึกของการสปาร์ค

จากการศึกษาการไหลของสารไดอิเล็กทริกในกระบวนการแปรรูปพบว่า เศษอนุภาคที่หลุดออกมาจากกระบวนการสปาร์คจะเกิดการไหลวนในบริเวณพื้นที่ผิวระหว่างอิเล็กโตรดกับชิ้นงาน ทำให้เกิด Secondary Spark และส่งผลเป็นอย่างมากต่อความสามารถในการแปรรูป ระยะเวลาในการแปรรูปที่ยาวนาน การสึกหรอของอิเล็กโตรด ตลอดจนคุณภาพผิวงานที่ต่ำลง จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมา มีการคิดค้นวิธีการสำหรับปรับปรุงกระบวนการแปรรูปที่หลากหลายวิธี เช่น การฉีดยุติสารไดอิเล็กทริกด้านข้างที่มีแรงดันสูง (Side Jet Flushing) การใช้เทคนิคการระบายสารไดอิเล็กทริกทางกล (Electrode Jump Height) [46] หรือแม้กระทั่งการออกแบบรูปร่างอิเล็กโตรดแบบต่างๆ เพื่อเอื้ออำนวยต่อการฉีดยุติสารไดอิเล็กทริกและขจัดเศษอนุภาคโลหะ อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวยังมีข้อจำกัดในหลายๆด้านในการแปรรูป เช่น คุณภาพผิวงาน ความแม่นยำของรูปร่าง และเวลาในการแปรรูป เป็นต้น

Kluev และคณะ [54] ทำการศึกษาพลศาสตร์การไหลของสารไดอิเล็กทริกในกระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้าโดยใช้อิเล็กโตรดที่มีช่องฉีดยุติสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโตรดในรูปแบบต่างๆ ได้แก่ ช่องเดี่ยว (Single Channel) หลายช่อง (Multi-Channel) รวมไปถึงขนาดรูฉีดยุติและรูปแบบของช่องฉีดยุติแบบ I Type และ Y Type เพื่อศึกษาผลกระทบของการฉีดยุติสารไดอิเล็กทริกที่มีผลต่อประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการแปรรูป จากการเมื่อวิเคราะห์การไหลของสารไดอิเล็กตริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรดในท่อกลมด้วยวิธี Reynolds Number Calculation โดยวิเคราะห์การไหลจากการเปลี่ยนแปลงการไหลแบบลามินาร์ (Laminar Flow) ไปสู่การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) พบว่า ขนาดของช่องฉีดที่มีขนาด 1 มิลลิเมตร และหลายช่องฉีดให้ค่าการไหลตัวที่สูงกว่าการฉีดแบบช่องเดียว นอกจากนี้ความสัมพันธ์ของขนาดอิเล็กโทรด (Outer Electrode Surface) กับช่องฉีด (Inside of Electrode Channel) ที่ 6.4 เท่า กล่าวคือ ขนาดอิเล็กโทรดเท่ากับ 6.4 มิลลิเมตร รูเจาะภายในเท่ากับ 1 มิลลิเมตร ให้อัตราการไหลของสารไดอิเล็กตริกที่สม่ำเสมอมากที่สุด

ในช่วงเวลาที่ผ่านมาการศึกษาจำนวนช่องฉีดสารไดอิเล็กตริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรดรวมไปถึงรูปทรงของช่องฉีดได้รับความสนใจในการศึกษาเป็นจำนวนมากเนื่องจากจำนวนช่องฉีดและรูปทรงของช่องฉีดสารไดอิเล็กตริกส่งผลต่อความสมบูรณ์และความเรียบของกันหลุมรูเจาะ เนื่องจากอิทธิพลด้านพลศาสตร์การไหลของสารไดอิเล็กตริกที่มีผลต่อการจัดเศษโลหะออกจากช่องว่างในการแปรรูป รวมถึงไปถึงการหมุนของอิเล็กโทรดที่ส่งอาจส่งผลทำให้เศษโลหะตกตะกอนอยู่บริเวณส่วนปลายอิเล็กโทรดหรือพื้นที่การสปาร์ค และโดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณศูนย์กลางของอิเล็กโทรดที่อาจได้รับอิทธิพลของแรงเหวี่ยงจากการหมุนอิเล็กโทรด ซึ่งบริเวณดังกล่าวอาจจะไม่เกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางและจัดเศษโลหะออกมาได้

Sebastian และคณะ [55] ศึกษาความสามารถในการฉีดสารไดอิเล็กตริกในรูปแบบที่แตกต่างกัน รวมถึงไปถึงจำนวนช่องฉีดที่เหมาะสมกับการแปรรูปลึกที่มีอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดอิเล็กโทรดต่อความลึกในการกัดเจาะในปริมาณสูง (High Aspect Ratio) พบว่า การฉีดสารไดอิเล็กตริกแบบช่องเดี่ยวร่วมกับแรงดันฉีดที่สูงส่งผลต่อความไม่สมบูรณ์ของกันหลุมรูเจาะในรูปแบบของการเกิดตึงบริเวณปลายอิเล็กโทรด (Under Cut) นอกจากนี้ปริมาณการสึกหรอของอิเล็กโทรดบริเวณส่วนปลายสามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามอิเล็กโทรดแบบหลายช่องฉีด (Multiple Cavities) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง 4 ช่องฉีดทำมุม 90 องศา ให้ความสมบูรณ์ของกันหลุมและไม่เกิดการก่อตัวของตึงบริเวณปลายอิเล็กโทรด นอกจากนี้ยังส่งผลต่อประสิทธิภาพการแปรรูปในแง่ของอัตราการขจัดเนื้องานที่สูง อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดและช่องว่างการแปรรูป (Side Gap) ในปริมาณต่ำ

ในวิทยานิพนธ์นี้ ระบบการไหลเวียนของสารไดอิเล็กตริกถูกออกแบบและสร้างขึ้นทั้งระบบ ซึ่งประกอบไปด้วย ระบบไหลเวียนสารไดอิเล็กตริก อ่างน้ำมันไดอิเล็กตริก อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน รวมถึงไปถึงหัวจับอิเล็กโทรดที่สามารถจ่ายสารไดอิเล็กตริกผ่านแกนกลาง พร้อมกับสามารถรองรับการหมุนของอิเล็กโทรดไปพร้อมๆกันได้ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้สารไดอิเล็กตริกเกิดการไหลเวียนอย่างสมบูรณ์แบบและไม่ให้เกิดการตกตะกอนของเศษอนุภาคโลหะที่ออกมาจากการกัดเจาะ โดยมีวิธีการดังนี้

1. การทดลองขั้นต้นเพื่อศึกษาการไหลของสารไดอิเล็กตริกที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของกระบวนการกัดเจาะด้วยไฟฟ้าโดยศึกษาและทดลองจากรูปแบบของการฉีดด้านข้าง (Side

Flushing) การฉีดผ่านรูเจาะในแท่งอิเล็กโทรด (Injection into Electrode) และการดูดผ่านรูเจาะในแท่งอิเล็กโทรด (Suction into Electrode) โดยจะประเมินประสิทธิภาพจากอัตราการขจัดเนื้องาน และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด ตลอดจนคุณภาพผิวงานจากค่าความหยาบผิวเพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบอิเล็กโทรดโดยมีการเจาะรูเพื่อให้สารไดอิเล็กทริกไหลผ่าน โดยคำนึงถึงหลักการไหลของเหลวที่เคลื่อนที่ผ่านช่องว่างขนาดเล็กคล้ายกับการไหลของน้ำผ่านฝักบัวอาบน้ำ หากแต่ของเหลวที่ใช้เป็นน้ำมัน โดยในตอนนี้จะทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องของเพื่อทำการอ้างอิงและออกแบบลักษณะอิเล็กโทรดเป็นสำคัญ

2. การทดลองเพื่อศึกษาการไหลของสารไดอิเล็กทริกโดยสร้างพื้นผิวการกัดเซาะเสมือนจริง จากนั้นทำการศึกษาอัตราการไหล และแรงดัน ตลอดจนระยะห่างของช่องว่างที่ทำให้เกิดการไหล ตัวอย่างสม่าเสมอของสารไดอิเล็กทริก ในบริเวณพื้นผิวที่อาจเกิดการกัดเซาะ

3. การทดลองกัดเซาะวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าสำหรับทำชิ้นส่วนแม่พิมพ์พลาสติกโดยในขั้นตอนนี้จำเป็นต้องออกแบบถังสำหรับการกัดเซาะและสร้างระบบไหลวนของสารไดอิเล็กทริกขึ้นมาเพื่อให้เกิดการไหลวนโดยไม่เกิดการตกตะกอนของผงโลหะในสารไดอิเล็กทริก ในส่วนนี้เป็นการทดลองเพื่อปรับพารามิเตอร์ของเครื่องจักร โดยประเมินประสิทธิภาพการแปรรูปจาก อัตราการขจัดเนื้องานที่สูง อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดที่ต่ำ ตลอดจนทำการศึกษาและออกแบบการไหลของสารไดอิเล็กทริกแบบใหม่ ซึ่งมีหลักการทำงานโดยการไหลเวียนสารไดอิเล็กทริกจากภายในสู่ภายนอกแทนการฉีดด้านข้าง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานให้สูงขึ้น ลดเวลาในการแปรรูป ตลอดจนคุณภาพผิววัสดุชิ้นงานซึ่งประเมินในรูปของความหยาบผิวเฉลี่ย (Roughness)

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

บทนำ

การทดลองนี้เป็นการศึกษากระบวนการปรับปรุงประสิทธิภาพการแปรรูปลึก (EDM Deep Hole) ที่มีสัดส่วนของระยะความลึกในการแปรรูปกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะมากกว่า 4 เท่า (อิเล็กโตรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร, ความลึกในการแปรรูป 50 มิลลิเมตร) บนวัสดุเหล็กกล้าแม่พิมพ์งานเย็น AISI P20 ด้วยกระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า (EDM) โดยการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการแปรรูป ได้แก่ เวลาปล่อยกระแสไฟฟ้า (Pulse On-time : μs), เวลาหยุดปล่อยกระแสไฟฟ้า (Pulse Off-time : μs), กระแสไฟฟ้า (Current : A), และการหมุนของอิเล็กโตรด (Electrode Rotation : RPM) โดยวิทยานิพนธ์นี้ทำการออกแบบการไหลของสารไดอิเล็กทริกแบบใหม่ซึ่งมีหลักการทำงานโดยการไหลเวียนสารไดอิเล็กทริกจากภายในสู่ภายนอกผ่านแกนกลางอิเล็กโตรดด้วยรูเจาะขนาดเล็ก (Multi-aperture Flushing) ควบคู่กับการหมุนอิเล็กโตรดแทนการฉีดด้านข้างแบบปกติ (Conventional Side Flushing) เพื่อปรับปรุงความสามารถในการขจัดเศษโลหะ (Debris) ให้ออกจากพื้นที่การกัดเซาะอย่างสมบูรณ์ ป้องกันการเกิดการสปาร์คด้านข้าง (Secondary Spark) ระหว่างผิวอิเล็กโตรดกับผนังรูเจาะ อันจะนำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการแปรรูปลึกด้วยกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า ผลการทดลองประเมินจากประสิทธิภาพการแปรรูป ได้แก่ อัตราการขจัดเนื้อ (Material Removal Rate : MRR) อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด (Electrode Wear Ratio : EWR) ตลอดจนความแม่นยำทางด้านพิคโตรูปร่าง ได้แก่ ช่องว่างที่เกิดขึ้นจากการสปาร์ค (Gap Clearance : GC) ค่าความเบี่ยงเบนด้านความกลมของรูเจาะ (Roundness Error) คุณภาพผิววัสดุชิ้นงานในรูปของความหยาบผิวเฉลี่ย (Surface Roughness) รวมไปถึงการพิจารณาการเกิดชั้นหลอมใหม่ (Recast Layer) ก็ยังได้รับการพิจารณาและเปรียบเทียบกับผลการฉีดสารไดอิเล็กทริกด้านข้างแบบปกติ ซึ่งมีรายละเอียดและขั้นตอนในการดำเนินงานดังต่อไปนี้

3.1 การศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในกระบวนการแปรรูปลึก

3.1.1 วัสดุและวิธีการเตรียมชิ้นงานทดลอง

ในการทดลองเพื่อศึกษาค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นที่มีผลต่อประสิทธิภาพในกระบวนการแปรรูปลึกด้วยกระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า (EDM Deep Hole) วัสดุเหล็กกล้าแม่พิมพ์พลาสติกเกรด AISI P20 (Plastic Mold Steel) ที่มีความแข็งโดยเฉลี่ยประมาณ 30-33 HRC ตามมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของ DAIDO STEEL (THAILAND) CO.,LTD. ถูกนำมาใช้ในการทดลอง เนื่องจากเหล็กกล้าแม่พิมพ์เกรดดังกล่าวมีคุณสมบัติด้านความเหนียว ด้านทานความร้อนและการกัดกร่อนทางเคมีที่ดี รวมไปถึงคุณสมบัติด้านการต้านทานการเกิดความล้าตัวขณะใช้งาน นอกจากนี้เหล็กกล้าแม่พิมพ์เกรด AISI P20 ยังสามารถแปรรูปได้ง่ายด้วยกรรมวิธีทางความร้อน ให้ค่าความหยาบผิวต่ำ ง่ายต่อการขัดผิวละเอียด โดยเฉพาะอย่างยิ่งกระบวนการแปรรูปด้วยการกัดเซาะทางไฟฟ้าที่ให้ค่าความหยาบผิวภายหลังการแปรรูปที่ต่ำและให้ขนาดที่แม่นยำสูง ทำให้นิยมถูกนำมาแปรรูปเป็นแม่พิมพ์พลาสติกตารางที่ 1 แสดงส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าแม่พิมพ์พลาสติก เกรด AISI P20

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าแม่พิมพ์พลาสติก เกรด AISI P20 [56]

ส่วนประกอบทางเคมี	C	Mn	Cr	Mo	Si	Cu	S	Fe
เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (Wt) %	0.4	1	1.2	0.35	0.4	0.25	<0.03	Bal.

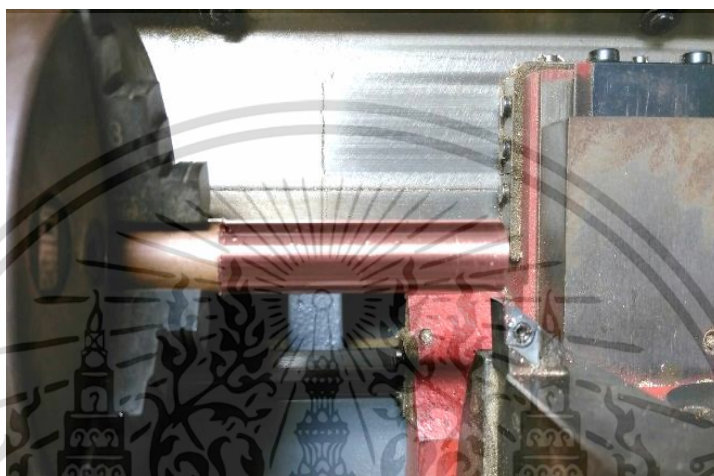
ในการทดลองนี้ทำการตัดเตรียมวัสดุชิ้นงานด้วยเครื่องกัดเซาะโลหะด้วยลวดไฟฟ้า (Wire Electrical Discharge Machine : WEDM) ยี่ห้อ Aristech รุ่น CW30 (Taiwan) ให้วัสดุชิ้นงานมีขนาดความกว้าง 57 มิลลิเมตร ความยาว 55 มิลลิเมตร หนา 12 มิลลิเมตร หลังจากนั้นทำการปรับผิวชิ้นงานด้วยเครื่องเจียรระโนราบ เพื่อให้ชิ้นงานมีขนาดเท่ากันทุกชิ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ทั้งนี้ในการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้าวัสดุชิ้นงานจะถูกกัดเซาะในระดับความลึก 50 มิลลิเมตร ดังนั้นเพื่อให้สามารถง่ายในการตรวจสอบและเก็บข้อมูล ชิ้นงานจะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน (ซ้าย-ขวา) หลังจากนั้นจะนำชิ้นงานมาประกบกันให้แนบสนิทโดยการจับยึดด้วยปากกาจับงาน ชิ้นงานจะมีระนาบเดียวกันเนื่องจากการจับคู่เจียรระโนปรับผิวพร้อมกันในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน



รูปที่ 3.1 การเตรียมวัสดุชิ้นงานทดลอง เหล็กกล้าแม่พิมพ์ AISI P20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุอิเล็กทรอนิกส์ในการทดลองเป็นทองแดงบริสุทธิ์ (99.60%) โดยทำการกลึงปรับขนาดด้วยเครื่องกลึงแบบอัตโนมัติขนาดเล็ก (PC TURN 50) ยี่ห้อ EMCO ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ทั้งนี้วัสดุอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการทดลองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.00 ± 0.03 มิลลิเมตร โดยวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ทุกชิ้นจะทำการแปรรูปภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน ในการทดลองนี้สารไดอิเล็กตริกประเภทน้ำมัน ยี่ห้อ TOTAL รุ่น DIEL MS 700 (France) ถูกนำมาใช้เป็นของเหลวตัวกลางตลอดการทดลอง



รูปที่ 3.2 การเตรียมวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ทองแดง

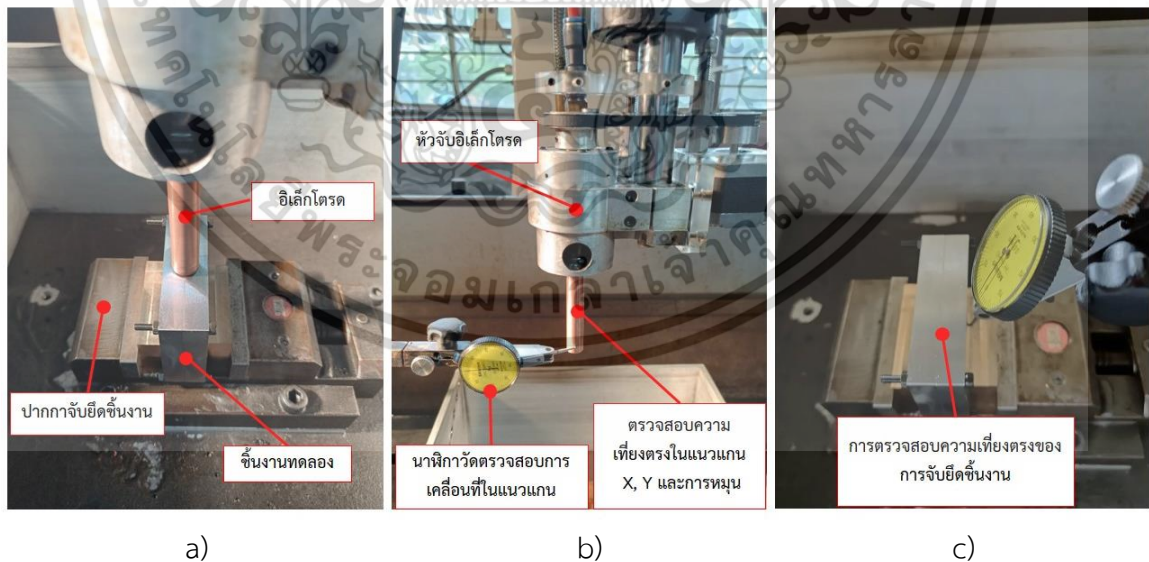
3.1.2 การปรับตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องจักรที่ใช้ในการทดลองเป็นเครื่องกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า ยี่ห้อ Aristech รุ่น EDM CNC 430 (Taiwan) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งในการทดลองใช้โต๊ะปากก้าในการจับยึดวัสดุชิ้นงาน และใช้หัวจับวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำการออกแบบโดยสามารถหมุนได้ด้วยการขับของมอเตอร์ไฟฟ้า DC 24 โวลต์ และสามารถปรับความเร็วรอบในการหมุนได้ตั้งแต่ 0-175 รอบต่อนาที ซึ่งถูกควบคุมด้วยวงจรถอนิกส์แบบปรับแรงดันไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 0-24 โวลต์ ติดตั้งเข้ากับชุดหัวเครื่องกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า สำหรับรายละเอียดของหัวจับอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำการออกแบบจะขออธิบายในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 3.3 เครื่องกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้ายี่ห้อ Aristech รุ่น EDM CNC 430

เมื่อจับยึดวัสดุอิเล็กทรอนิกส์แล้วทำการตรวจสอบความเที่ยงตรงของการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของอิเล็กทรอนิกส์ทั้งแกน x และแกน y ด้วยนาฬิกาวัดแบบหน้าสัมผัสราบ (Dial Indicator) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 (การตรวจสอบจะทำการเคลื่อนที่อิเล็กทรอนิกส์ขึ้นลงในแนวตั้งแล้วอ่านค่าความคลาดเคลื่อนที่หน้าปัดนาฬิกาวัดจากนั้นทำการขันปรับหัวจับให้อยู่ในแนวตั้ง)



รูปที่ 3.4 การตรวจสอบความการเคลื่อนตามแนวแกนของอิเล็กทรอนิกส์และชิ้นงานก่อนการทดลอง ด้วยนาฬิกาวัดที่มีค่าความละเอียด ± 1 ไมโครเมตร a) การติดตั้งชิ้นงานและอิเล็กทรอนิกส์ b) การตรวจสอบการเคลื่อนที่ในแนวแกนของอิเล็กทรอนิกส์ c) การตรวจสอบระนาบในการจับยึดชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 การกำหนดค่าตัวแปรและการเก็บผลการทดลอง

จากการศึกษาและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้าด้วยวัสดุอิเล็กโทรดทองแดง บนวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าแม่พิมพ์ AISI P20 [3, 5, 10, 24, 51] พบว่า โดยทั่วไปแล้วประสิทธิภาพการทำงานจะถูกประเมินอยู่ในรูปของ อัตราการขจัดเนื้องาน (Material Removal Rate : MRR) อัตราการสึกหรอของวัสดุอิเล็กโทรด (Electrode Wear Ratio : EWR) รวมไปถึงความหยาบผิวเฉลี่ยเลขคณิต (Roughness Average: Ra) โดยมีตัวแปรหลักอันประกอบด้วย เวลาเปิด (Pulse On-time : μs) ระดับกระแสไฟฟ้า (Current : A) และเวลาปิด (Pulse Off-time : μs)

เวลาเปิด (Pulse On-time) คือ ช่วงเวลาที่เกิดการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า (Pulse Duration) ซึ่งในการทดลองนี้ เครื่องกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า (Electrical Discharge Machine : EDM) ยี่ห้อ Aristech รุ่น CNC-EDM 430 สามารถทำการปรับตั้งค่าเวลาเปิดได้แบบขั้นเวลา ดังนี้ 2, 4, 8, 10, 16, 20, 32, 50, 80, 100, 150, 200, 400 และ 510 ไมโครวินาที [57] อย่างไรก็ตาม ในการทดลองเพื่อศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในกระบวนการแปรรูปลึงจะใช้วิธีการเลือกช่วงค่าเวลาเปิด คือ 2, 10, 20, 32, 50, 100, 150, 200 และ 510 ไมโครวินาที โดยคงที่เวลาปิดที่ 32 ไมโครวินาที ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 การศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในกระบวนการแปรรูปลึงโดยการปรับค่าเวลาเปิดและคงที่เวลาปิด

เวลาเปิด (Pulse On-time : μs)	เวลาปิด (Pulse Off-time : μs)
2	32
10	32
20	32
32	32
50	32
100	32
150	32
200	32
510	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลาปิด (Pulse Off-time) คือ ช่วงเวลาหยุดการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า (Pause Duration) ซึ่งในการทดลองนี้ เครื่องกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า (Electrical Discharge Machine : EDM) ยี่ห้อ Aristech รุ่น CNC-EDM 430 สามารถทำการปรับตั้งค่าเวลาปิดได้แบบขั้นเวลา ดังนี้ 2, 4, 8, 10, 16, 20, 32, 50, 80, 100, 150, 200, 400 และ 510 ไมโครวินาที อย่างไรก็ตาม ในการทดลองเพื่อศึกษา ค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในกระบวนการแปรรูปลึงจะใช้วิธีการเลือกช่วงค่าเวลาปิด คือ 2, 10, 20, 32, 50, 100, 150, 200 และ 510 ไมโครวินาที โดยคงที่เวลาเปิดที่ 32 ไมโครวินาที ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 การศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในกระบวนการแปรรูปลึงโดยการปรับค่าเวลาปิดและคงที่เวลาเปิด

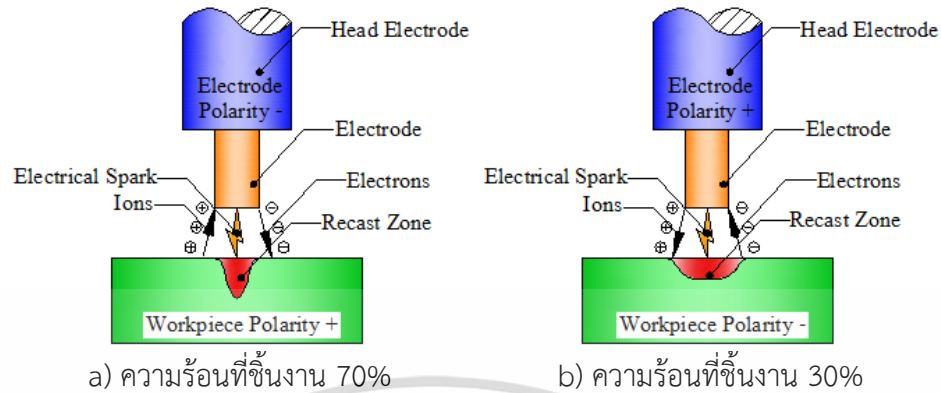
เวลาเปิด (Pulse On-time : μs)	เวลาปิด (Pulse Off-time : μs)
32	2
32	10
32	20
32	32
32	50
32	100
32	150
32	200
32	510

กระแสไฟฟ้า (Current : A) คือ อัตราการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าต่อหน่วยเวลา ซึ่งในกระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้าการเลือกใช้ค่ากระแสไฟฟ้าจะพิจารณาจากความสัมพันธ์ของขนาดอิเล็กโทรดต่อพื้นที่หน้าตัด หรือในรูปของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (Current Density) ต่อพื้นที่หน้าตัดของอิเล็กโทรด (Sectional Area of Electrode) [2, 27] ซึ่งหากค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่หน้าตัดสูงจะส่งผลให้ค่าอัตราการขจัดเนื้องานที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามจะส่งผลให้ค่าอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดเพิ่มสูงขึ้นเช่นเดียวกัน ในกรณีที่ใช้วัสดุอิเล็กโทรดเป็นทองแดงและวัสดุชิ้นงานเป็นเหล็กกล้าคาร์บอน [3, 27] ซึ่งโดยปกติแล้วในกระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้าจะเลือกใช้ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดตามกฎ 65 แอมแปร์ต่อพื้นที่ 1 ตารางนิ้ว (ประมาณ 0.1 แอมแปร์ต่อตารางมิลลิเมตร) [2] เพื่อให้ได้ค่าอัตราการขจัดเนื้องานและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดที่สอดคล้องกัน

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยทำการเลือกใช้ขนาดอิเล็กโทรดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร (พื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 113.097 ตารางมิลลิเมตร) ซึ่งจากค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดตามกฎ 65 แอมแปร์ต่อพื้นที่ 1 ตารางนิ้ว จะได้ค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมเท่ากับ 11.375 A ~ 12 A อย่างไรก็ตาม เพื่อให้ผลการทดลองเป็นไปอย่างถูกต้อง ผู้วิจัยจึงทำการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแปรรูปโดยกำหนดให้เวลาเปิดคงที่ 32 ไมโครวินาที และเวลาปิดคงที่ 2 ไมโครวินาที ปรับเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าในช่วง 3, 6, 9, 12, 15 และ 18 แอมแปร์ ตามลำดับ โดยจะพิจารณาเลือกค่ากระแสไฟฟ้าที่ให้ค่าอัตราการขจัดเนื้องานที่สูงสัมพันธ์กับค่าอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดในปริมาณต่ำ

นอกจากนี้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีการตรวจสอบผลกระทบของการเกิดช่องว่างในการแปรรูป (Gap Clearance) ที่ระดับความลึก 50 มิลลิเมตร ดังนั้นการพิจารณาเลือกขนาดของอิเล็กโทรดที่ 12 มิลลิเมตร ยังสัมพันธ์กับความสามารถในการแปรรูปลึกที่มีอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดอิเล็กโทรดต่อความลึกในการกัดเจาะในปริมาณสูง (ความลึก 50 มิลลิเมตร) ซึ่งสัดส่วนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะกับระยะความลึกอาจเท่ากับ 3 เท่าหรือมากกว่า ส่งผลต่อความสามารถในการแปรรูปที่ลดลงตามความลึกของรูเจาะ [7, 13, 18] โดยทำให้ในการตรวจสอบสามารถเห็นถึงการเปลี่ยนแปลงไปของช่องว่างในการแปรรูปในระดับความลึกต่างๆ ได้อย่างชัดเจน [5, 13, 24]

ขั้วไฟฟ้า (Polarity) ขั้วไฟฟ้าสำหรับการกัดเจาะโลหะด้วยไฟฟ้าเป็นลักษณะเดียวกับการเชื่อมทิกส์ (TIG) โดยวัตถุประสงค์ของการเชื่อมคือหลอมละลายวัสดุชิ้นงานให้เนื้อโลหะรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน แต่การกัดเจาะด้วยไฟฟ้ามีวัตถุประสงค์เพื่อแยกเนื้อวัสดุจึงต้องกระทำภายใต้การปกคลุมของสารไดอิเล็กตริก จึงสามารถอธิบายผลของขั้วไฟฟ้าของวัสดุอิเล็กโทรดที่เป็นบวกมีผลทำให้ความสามารถในการแปรรูปวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าสูงและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดต่ำกว่าขั้วลบ เนื่องจากขั้วไฟฟ้าอิเล็กโทรดที่เป็นบวก (DCEP) จะเกิดความร้อนจากการสปาร์คบนพื้นผิววัสดุชิ้นงาน 30 เปอร์เซ็นต์ ส่วนขั้วไฟฟ้าอิเล็กโทรดที่เป็นลบ (DCEN) นั้นจะเกิดความร้อนที่ผิววัสดุชิ้นงาน 70 เปอร์เซ็นต์ [58] แต่มีอัตราการขจัดเนื้องานต่ำกว่า เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นนั้นเกิดการซึมลึกลงไปเนื้อวัสดุชิ้นงาน [16] ดังแสดงในรูปที่ 3.5 เมื่อขจัดเศษออกด้วยสารไดอิเล็กตริกนั้นจะเกิดการขจัดออกเฉพาะพื้นผิวจึงทำให้บริเวณของการซึมลึกเกิดการเย็นตัวใหม่ (Recast) ด้วยเหตุนี้ในงานทดลองจะเลือกใช้ขั้วไฟฟ้าของอิเล็กโทรดเป็นขั้วบวก และชิ้นงานเป็นขั้วลบ



a) ความร้อนที่ขึ้นงาน 70%

b) ความร้อนที่ขึ้นงาน 30%

รูปที่ 3.5 ชนิดของขั้วไฟฟ้าอิเล็กโตรดที่มีผลต่อความร้อน [58]

การคำนวณอัตราการขจัดเนื้องานและอัตราการสึกหรอของวัสดุอิเล็กโตรด จากการกัดเซาะวัสดุขึ้นงานเหล็กกล้า AISI P20 ด้วยวัสดุอิเล็กโตรดทองแดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตรภายใต้การปกคลุมและขจัดเศษด้วยสารไดอิเล็กทริกแบบฉีดด้านข้างด้วยแรงดัน 0.098 MPa สำหรับอัตราการขจัดเนื้องาน (Material Removal Rate : MRR) ในงานทดลองนี้ คำนวณจากปริมาตรเนื้องานที่ถูกขจัดออกต่อหน่วยเวลาที่ใช้ในการแปรรูปดังสมการที่ 3.1 [15, 49] โดยการชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งดิจิทัล ยี่ห้อ Jadever รุ่น SKY-150 (Taiwan) ซึ่งมีค่าความละเอียด 0.001 กรัม

$$MRR (mm^3/min) = \frac{(W_{w1} - W_{w2})}{\rho_w \times M_t} \times 10^3 \quad (3.1)$$

เมื่อ Material Removal Rate (MRR) คือ อัตราการขจัดเนื้องาน (ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อนาที), W_{w1} และ W_{w2} คือ น้ำหนักของขึ้นงานก่อนและหลังการแปรรูป (กรัม : g), ρ_w และ M_t คือ ความหนาแน่นของวัสดุขึ้นงาน (AISI P20, 7.786 g/cm³) และเวลาในการแปรรูป (นาที : min) ตามลำดับ

อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดในการทดลองนี้คำนวณจากระยะความยาวของอิเล็กโตรดที่สึกหรอต่อความระยะความลึกของรูเจาะแสดงดังสมการที่ 3.2 [15, 49]

$$EWR (\%) = \frac{(W_{E1} - W_{E2} \times \rho_w)}{(W_{w1} - W_{w2} \times \rho_E)} \times 100 \quad (3.2)$$

เมื่อ Electrode Wear Ratio (EWR) คือ อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด (เปอร์เซ็นต์), W_{E1} และ W_{E2} คือ น้ำหนักของอิเล็กโตรดก่อนและหลังการแปรรูป (กรัม : g), ρ_w คือ ความหนาแน่นของวัสดุขึ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(AISI P20, 7.786 g/cm^3), W_{w1} และ W_{w2} คือ น้ำหนักของชิ้นงานก่อนและหลังการแปรรูป (กรัม : g), ρ_E คือ ความหนาแน่นของวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ (Copper, 8.94 g/cm^3) ตามลำดับ

3.2 การศึกษาและวิเคราะห์ค่าตัวแปรที่เหมาะสมในกระบวนการแปรรูปด้วยวิธีการฉีดยาไดอิเล็กตริกด้านข้าง

3.2.1 วัสดุและวิธีการทดลอง

ในส่วนนี้การเตรียมชิ้นงานทดลอง การปรับตั้งเครื่องจักรและวิธีการเก็บผลการทดลองจะดำเนินการในรูปแบบเดียวกันกับหัวข้อ 3.1 แต่ในส่วนนี้จะเป็นการนำค่าตัวแปรที่ได้จากการทดลองเบื้องต้น มาหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง (Design of Experiments : DOE) ซึ่งวิธีพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Methodology : RSM) แบบการทดลองประสมกลาง (Central Composite Design : CCD) ระดับตัวแปรในการทดลอง 3 ระดับ (3 Levels) ภายใต้ซอฟต์แวร์ Minitab 19 (License of Faculty of Engineering, RMUTK) ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์และสรุปผล

3.2.2 การดำเนินงานและการสรุปผล

ในขั้นตอนนี้ทำการออกแบบการทดลองเพื่อให้เกิดสภาวะการทำงานที่ให้อัตราการขจัดเนื้องานที่สูง อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดที่ต่ำ รวมไปถึงการพิจารณาช่องว่างในการแปรรูปที่เหมาะสม (Gap Clearance : GC) ตลอดจนพารามิเตอร์ระดับตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับการกัดเซาะวัสดุเหล็กกล้าแม่พิมพ์ โดยอาศัยวิธีการทดลองทางสถิติที่เรียกว่าวิธีพื้นผิวผลตอบสนอง (RSM) และอาศัยการออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง (CCD) เป็นการออกแบบการทดลองโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่เมื่อตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งเพิ่มหรือลดค่า ตัวแปรอื่นอาจเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะที่ไม่เป็นเส้นตรง ทำให้ต้องมีการศึกษาความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้ง (Quadratic Relationship) โดยการทดลองนี้จะกำหนดตัวแปรต้น 4 ตัวแปร แต่ละตัวแปรมี 3 ระดับการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 3.4 (ระดับที่ 1 คือค่าตัวแปรที่ทำให้เกิดอัตราการขจัดเนื้องานก่อนถึงจุดสูงสุด ระดับที่ 2 คือค่าตัวแปรที่ทำให้เกิดอัตราการขจัดเนื้องานสูงสุด และระดับที่ 3 คือค่าตัวแปรที่ทำให้เกิดอัตราการขจัดเนื้องานลดลง) และทำการทดลองตามตารางการทดลองที่ได้ออกแบบด้วยการออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง (CCD) ซึ่งมีการทดลองทั้งสิ้น 31 การทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 3.5 โดยทำการพิจารณาเลือกตัวแปรและระดับของตัวแปรจากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาในมุมมองที่หลากหลายด้านกระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า [3, 5, 10, 24, 51] ร่วมกับการเก็บข้อมูลพารามิเตอร์พื้นฐานที่มีผลต่อประสิทธิภาพการแปรรูปในส่วนของ 3.1 นอกจากนี้แล้วในวิทยานิพนธ์ยังทำการออกแบบการฉีดยา

ได้อิเล็กตริกแบบหลายช่องฉีดยิ่งเพื่อมาทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับอิเล็กโตรดแบบแท่งตัน ทำให้การเลือกตัวแปรและระดับของตัวแปรต้องคำนึงถึงความเหมาะสมของอิเล็กโตรดทั้งสองรูปแบบ

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรต้น 4 ตัว และระดับตัวแปรในการทดลอง 3 ระดับ

Factor \ Level	Factor Symbol	Low (-1)	Center (0)	High (+1)
On-time (μ s)	A	50	100	150
Off-time (μ s)	B	2	10	20
Current (A)	C	9	12	15
Electrode Rotation (rpm)	D	0	35	70

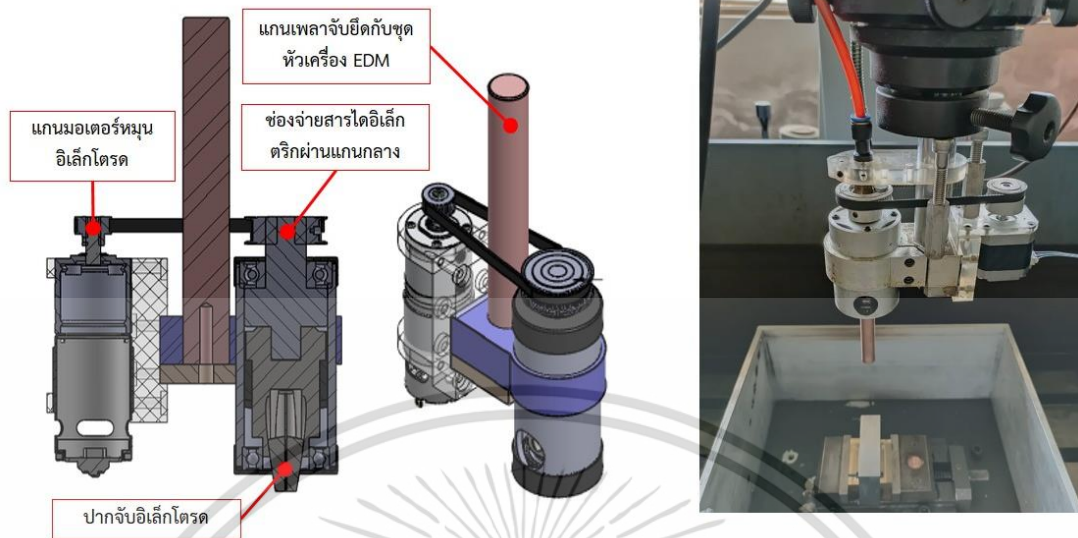
ตารางที่ 3.5 แผนการทดลองแบบประสมกลาง (Central Composite Design : CCD)

RUN No.	On-time (μ s)	Off-time (μ s)	Current (A)	Electrode Rotation (rpm)	MRR (mm^3/min)	EWR (%)	Gap Clearance (mm)
1	50	2	9	0			
2	150	2	9	0			
3	50	20	9	0			
4	150	20	9	0			
5	50	2	15	0			
6	150	2	15	0			
7	50	20	15	0			
8	150	20	15	0			
9	50	2	9	70			
10	150	2	9	70			
11	50	20	9	70			
12	150	20	9	70			
13	50	2	15	70			
14	150	2	15	70			
15	50	20	15	70			
16	150	20	15	70			
17	50	10	12	35			
18	150	10	12	35			
19	100	2	12	35			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

20	100	20	12	35			
21	100	10	9	35			
22	100	10	15	35			
23	100	10	12	0			
24	100	10	12	70			
25	100	10	12	35			
26	100	10	12	35			
27	100	10	12	35			
28	100	10	12	35			
29	100	10	12	35			
30	100	10	12	35			
31	100	10	12	35			

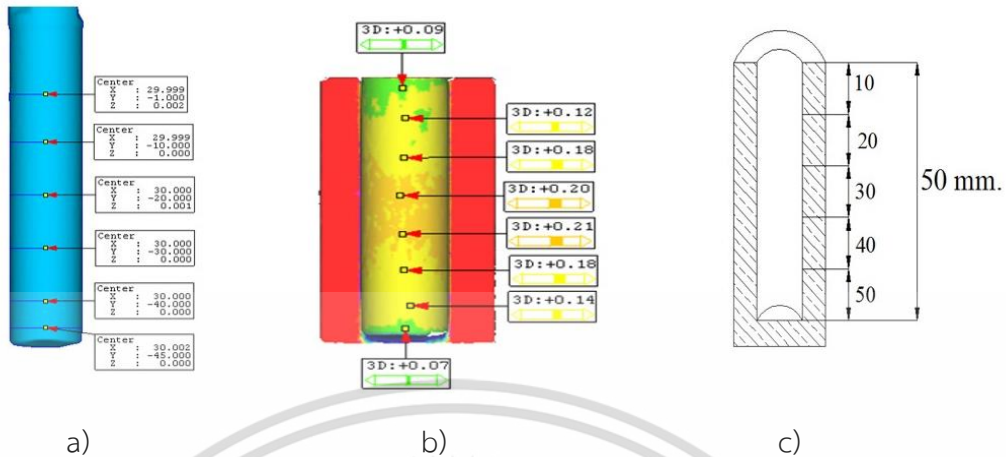
การหมุนของอิเล็กโทรด (Electrode Rotation) โดยปกติแล้วนิยมใช้กับกระบวนการเจาะรูลึก ระดับไมโคร (Micro-EDM) การหมุนของอิเล็กโทรดสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการกัดสาร ไดอิเล็กตริกซึ่งส่งผลให้การสึกหรอของอิเล็กโทรดเกิดขึ้นในปริมาณที่สม่ำเสมอ นอกเหนือจากนี้อิทธิพลของการหมุนอิเล็กโทรดทำให้สารไดอิเล็กตริกสามารถไหลเข้าสู่ช่องว่างในการแปรรูปได้ดีและอาศัยแรงเหวี่ยงจากการหมุนจัดเศษอนุภาคให้หลุดออกมาทางช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงานได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งส่งผลต่ออัตราการขจัดเนื้องานที่สูงขึ้นและให้ค่าความหยาบผิวที่ต่ำ ในเวลาเดียวกันยังส่งผลให้กระบวนการสปาร์คในแต่ละครั้งมีเสถียรภาพเพิ่มมากขึ้น ทำให้เวลาในการแปรรูปสามารถลดลงได้ ดังนั้นขั้นตอนของการออกแบบกลไกการหมุนของอิเล็กโทรดเพื่อรองรับการกัดสารไดอิเล็กตริกในคราวเดียวกัน เข้าสู่ศูนย์กลางของอิเล็กโทรดและไหลเวียนออกสู่ภายนอกอย่างต่อเนื่องจึงเป็นขั้นตอนที่สำคัญ อุปกรณ์จับยึดอิเล็กโทรดที่ทำการออกแบบสามารถหมุนได้ด้วยการขับของมอเตอร์ไฟฟ้า DC 24 โวลต์ และสามารถปรับความเร็วรอบในการหมุนได้ตั้งแต่ 0-175 รอบต่อนาทีซึ่งถูกควบคุมด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบปรับแรงดันไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 0-24 โวลต์ ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 หัวจับอิเล็กโทรดที่ถูกออกแบบให้รองรับการหมุนของอิเล็กโทรด

3.2.3 การตรวจสอบและการวิเคราะห์ผล

ภายหลังการแปรรูปชิ้นงานทดลองจะถูกทำการเก็บค่าอัตราการขจัดเนื้องาน (MRR) และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR) ดังหัวข้อที่ 3.1.3 ในสมการที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ ในส่วนของช่องว่างการแปรรูป (GC) จะทำการวัดค่าและเก็บผลการทดลองด้วยกล้องเลเซอร์สแกนแบบ 3 มิติ 3D Handy Scanner ยี่ห้อ Creaform รุ่น REVscan 700 (Canada) ค่าความละเอียด ± 20 ไมโครเมตร โดยการตรวจสอบความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะภายหลังการแปรรูปกับเส้นผ่านศูนย์กลางอิเล็กโทรดก่อนการแปรรูป ซึ่งในที่นี้จะทำการตรวจสอบตามแนวแกนการแปรรูปทั้งหมด 6 จุด (1, 10, 20, 30, 40, และ 50 mm) โดนจะเลือกค่าช่องว่างการแปรรูปสูงสุดในจำนวน 6 จุดมาพิจารณา (Maximum Gap Clearance) ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ทั้งนี้ชิ้นงานทดลองทุกชิ้นก่อนทำการตรวจสอบจะถูกล้างทำความสะอาดด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ (Ethanol 99.9%) เพื่อล้างคราบน้ำมันและขจัดเศษโลหะในการแปรรูป (Debris) ป้องกันการเกิดค่าที่ผิดพลาดในการวัด



รูปที่ 3.7 กระบวนการตรวจสอบและวัดผลช่องว่างในการแปรรูป (Gap Clearance) a) การตรวจสอบขนาดดielekโตรดก่อนการแปรรูป b) การตรวจสอบบรูเจาะภายหลังการแปรรูป c) ทิศทางการตรวจสอบที่ระดับความลึก 50 มิลลิเมตร

โดยการสรุปผลการทดลองในส่วนนี้จะประกอบไปด้วย ค่าตัวแปรที่เหมาะสมในการแปรรูปเล็กด้วยวิธีการนิตสารไดอิเล็กทริกด้านข้าง ที่ส่งผลต่ออัตราการขจัดเนื้องานที่สูง (Maximum MRR) อัตราการสึกหรอของดielekโตรดที่ต่ำ (Minimum EWR) และค่าช่องว่างในการแปรรูปที่ต่ำ (Minimum GC) ค่าความสัมพันธ์ของตัวแปรที่เหมาะสมแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Optimization)

3.3 การศึกษาอิทธิพลของการออกแบบการนิตสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางดielekโตรดแบบหลายจุดที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในกระบวนการแปรรูปเล็ก

3.3.1 หลักการออกแบบการนิตสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางดielekโตรดแบบหลายจุด

ในวิทยานิพนธ์นี้ระบบการไหลเวียนของสารไดอิเล็กทริกถูกออกแบบและสร้างขึ้นทั้งระบบ ซึ่งประกอบด้วย ระบบไหลเวียนสารไดอิเล็กทริก อ่างน้ำมันไดอิเล็กทริก อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน รวมไปถึงหัวจับดielekโตรดที่สามารถจ่ายสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลาง พร้อมกับสามารถรองรับการหมุนของดielekโตรดไปพร้อมกันได้ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้สารไดอิเล็กทริกเกิดการไหลเวียนอย่างสมบูรณ์แบบและไม่ให้เกิดการตกตะกอนของเศษอนุภาคโลหะที่ออกมาจากการกัดเซาะ โดยมีหลักการออกแบบดังนี้

จากรูปที่ 3.8 (a) วัสดุดielekโตรดทองแดงที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ความยาว 100 มิลลิเมตร ถูกทำการออกแบบและสร้างขึ้นโดยอาศัยหลักการจ่ายสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางดielekโตรด วัสดุดielekโตรดทองแดงถูกเจาะด้วยสว่านที่มีขนาด 8.4 มิลลิเมตร บนเครื่องกลึงระบบอัตโนมัติ CNC ที่มีความร่วมศูนย์สูง ยี่ห้อ Mazak รุ่น Quick Turn NEXUS 100 (Japan) ที่ความลึก 95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

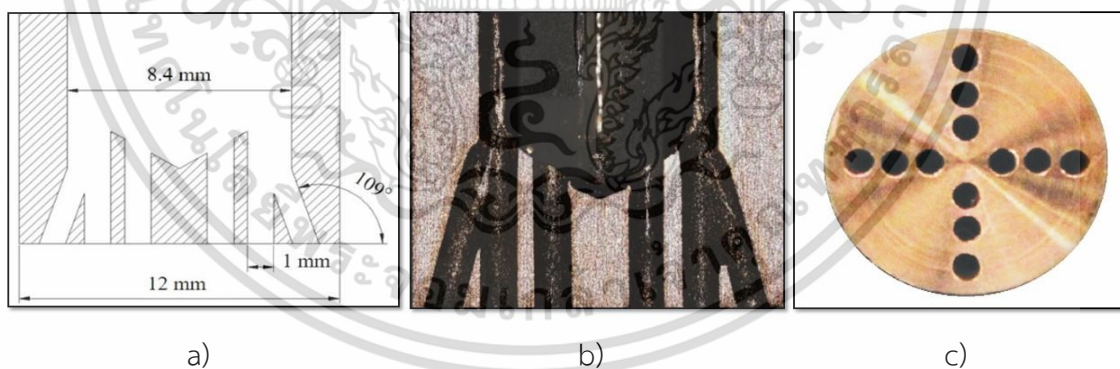
มิลลิเมตร ในขั้นตอนนี้ใช้หลักการพื้นฐานเกี่ยวกับกระบวนการเจาะโลหะด้วยไฟฟ้า (Super-drill) โดยอิเล็กโทรดจะมีลักษณะเป็นท่อกลวงยาวตลอดแนวแกน มีช่องการฉีตสารไดอิเล็กตริกแบบช่องเดี่ยว ซึ่งสามารถฉีตสารไดอิเล็กตริกไปยังพื้นที่ในการกัดเซาะโดยตรงอย่างรวดเร็ว เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการฉีตสารไดอิเล็กตริกเข้าไปขจัดเศษโลหะออกจากช่องว่างในการแปรรูป รวมไปถึงรักษาความต่อเนื่องในการฉีตสารไดอิเล็กตริก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kuppan และคณะ [4] และ Kliuev และคณะ [8] อย่างไรก็ตามในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้อิเล็กโทรดที่มีขนาด 12 มิลลิเมตร ทำให้ไม่สามารถสร้างช่องฉีตตลอดแนวแกนได้ จึงทำให้ส่วนปลายอิเล็กโทรดจำเป็นที่จะต้องออกแบบใหม่เพื่อหลีกเลี่ยงการคงเหลือของเนื้องานจากข้อจำกัดในการกัดเซาะ (Under-cut)

หลังจากนั้นอิเล็กโทรดจะถูกนำมาเจาะรูขนาดเล็กตรงส่วนปลายของอิเล็กโทรดด้วยเครื่องเจาะโลหะด้วยไฟฟ้า Super Drill ยี่ห้อ JOEMARS รุ่น JM325D (Taiwan) จำนวน 12 รู แต่ละรูมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ซึ่งในกระบวนการเจาะรูอิเล็กโทรดทองแดงถูกจับยึดด้วยจานแบ่งทำให้สามารถหมุนอิเล็กโทรดได้ครบรอบ 360 องศา อย่างแม่นยำ ในขั้นตอนนี้เป็นการออกแบบส่วนปลายของอิเล็กโทรด โดยทำการประยุกต์แนวคิดของ Lin และคณะ [20] และ Li และคณะ [21] ที่ใช้อิเล็กโทรดท่อกว้างขนาด 1 มิลลิเมตร จับยึดรวมกันจนมีขนาดอิเล็กโทรด 25 มิลลิเมตร เรียกว่า Bundled Electrode ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการแปรรูปด้านการเพิ่มขึ้นของอัตราการขจัดเนื้องาน ลดเวลาในการแปรรูป และการสึกหรอของอิเล็กโทรดได้ ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงทำการเจาะรูขนาด 1 มิลลิเมตรเป็นแนวเส้นตรงจำนวน 8 รู รอบแกนกลางอิเล็กโทรดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการฉีตสารไดอิเล็กตริกเข้าสู่พื้นที่กัดเซาะอย่างต่อเนื่องและกระจายรอบอิเล็กโทรด อย่างไรก็ตามเพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงการคงเหลือของเนื้องานจากข้อจำกัดในการกัดเซาะ (Under-cut) รวมไปถึงการสึกหรอของอิเล็กโทรดที่อาจเกิดขึ้นบริเวณส่วนปลายอิเล็กโทรด จึงไม่มีการเจาะรูในตำแหน่งแกนกลางอิเล็กโทรดแต่ใช้การหมุนของอิเล็กโทรดเพื่อลดการสะสมของเศษโลหะบริเวณส่วนปลายอิเล็กโทรดแทน สอดคล้องกับงานวิจัยของ Risto และคณะ [23] เกี่ยวกับประสิทธิภาพการหมุนของอิเล็กโทรดที่ส่งผลต่อการสึกหรอและสะสมของเศษโลหะบริเวณส่วนปลายอิเล็กโทรด นอกจากนี้จากข้อมูลการวิเคราะห์การไหลของสารไดอิเล็กตริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรดในท่อกลมด้วยวิธี Reynolds Number Calculation โดย Kliuev และคณะ [54] เกี่ยวกับการไหลตัวของสารไดอิเล็กตริกจากการเปลี่ยนแปลงการไหลแบบลามินาร์ (ช่องเดี่ยว) ไปสู่การไหลแบบปั่นป่วน (หลายช่องฉีต) พบว่า ขนาดของช่องฉีตที่มีขนาด 1 มิลลิเมตรและหลายช่องฉีตให้ค่าการไหลตัวที่สูงกว่าการฉีตแบบช่องเดี่ยว

ในส่วนวงรอบนอกสุดของส่วนปลายอิเล็กโทรดทำการเจาะรูขนาด 1 มิลลิเมตร ทำมุมเอียง 109 องศา จำนวน 4 รูเจาะ รอบแนวแกนอิเล็กโทรดดังแสดงในรูปที่ 3.8 (b-c) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการฉีตสารไดอิเล็กตริกเข้าสู่พื้นที่การกัดเซาะโดยตรงและขจัดเศษโลหะให้ออกจากช่องว่าง

การแปรรูปอย่างรวดเร็ว ลดการเกิด Secondary Spark ระหว่างผนังรูเจาะกับผนังอิเล็กโตรด โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณมุมของอิเล็กโตรด (Conner) เนื่องจากการสึกหรอของอิเล็กโตรดมักจะเกิดขึ้นในบริเวณมุมของอิเล็กโตรดในปริมาณสูงซึ่งเกิดจากการสะสมของเศษโลหะในสารไดอิเล็กตริก [12, 44] นอกจากนี้จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องพบว่า การสร้างช่องการไหลตัวของสารไดอิเล็กตริก (Pathway Inclination) ที่มีมุมเอียงควบคู่กับการหมุนอิเล็กโตรด [22] สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการเจาะรูลึกได้มากกว่าอิเล็กโตรดแบบแท่งตัน นอกจากนี้ช่องฉีดที่ทำมุมเอียงที่ 75 องศาสามารถลดเวลาในการแปรรูปและการสึกหรอของอิเล็กโตรดได้ ด้วยแนวคิดและเหตุผลประกอบดังกล่าวทำให้เกิดการสร้างอิเล็กโตรดที่มีการฉีดสารไดอิเล็กตริกผ่านแกนกลางแบบหลายจุด (Multi-aperture Inner Flushing) ขึ้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เพื่อเปรียบเทียบผลของประสิทธิภาพในการแปรรูปลึกกับอิเล็กโตรดแบบแท่งตันที่มีการฉีดสารไดอิเล็กตริกด้านข้างแบบปกติ (Conventional Side Flushing) สำหรับการเตรียมชิ้นงานทดลอง AISI P20 จะดำเนินการเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.1

ในการทดลองสำหรับหัวข้อ 3.3 อุปกรณ์จับยึดอิเล็กโตรดแบบหมุนได้พร้อมจ่ายสารไดอิเล็กตริกผ่านแกนกลางที่สร้างขึ้นจะถูกนำมาใช้ในการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของการฉีดสารไดอิเล็กตริก ในส่วนของสารไดอิเล็กตริกสามารถไหลผ่านแกนกลางของอิเล็กโตรดโดยใช้ข้อต่อแบบหมุน (Rotary Joint) และมีอุปกรณ์วัดอัตราการไหล (Flow Meter) เพื่อใช้ควบคุมปริมาณการไหลของสารไดอิเล็กตริกให้คงที่สำหรับทุกรูปแบบการทดลอง ซึ่งหลักการทำงานของหัวจับอิเล็กโตรดจะเป็นไปในลักษณะเดียวกับหัวข้อ 3.2 รูปที่ 3.6



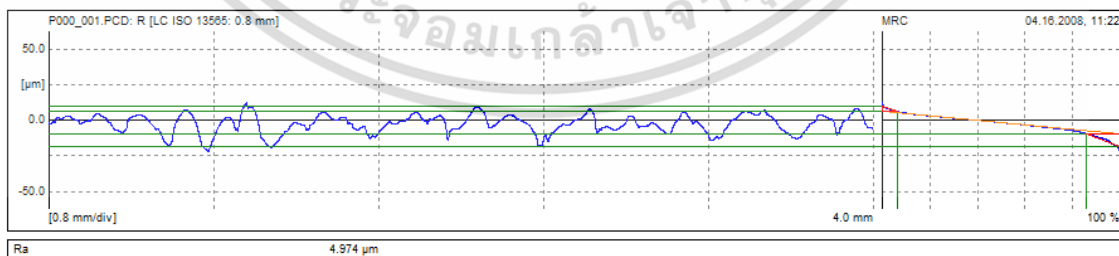
รูปที่ 3.8 รูปแบบอิเล็กโตรดทองแดงที่ทำการออกแบบและสร้างขึ้นในการทดลอง a) รูปแบบภายในของอิเล็กโตรดที่ทำการออกแบบ b) ภายตัดขวาง (Section View) ของอิเล็กโตรดส่วนปลายที่ถูกสร้างขึ้น c) รูปส่วนปลายด้านล่าง (Bottom View) ของอิเล็กโตรดที่ถูกสร้างขึ้น

3.3.2 การตรวจสอบและการวิเคราะห์ผล

ความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการฉีดยาไดอิเล็กทริกกับความลึกในการแปรรูปที่มีผลต่อเวลาในการแปรรูป จะถูกประเมินและเปรียบเทียบผลระหว่างเวลาในการแปรรูป (Machining Time) กับความลึกในการแปรรูปที่ระดับความลึก 1, 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิเมตร โดยเวลาในการแปรรูปจะทำการเก็บค่าจริงจากหน้าเครื่องกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า

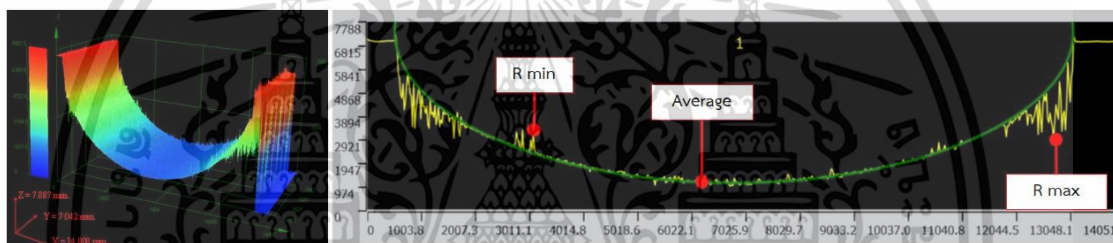
ความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการฉีดยาไดอิเล็กทริกร่วมกับการหมุนของอิเล็กโตรดที่มีผลต่ออัตราการขจัดเนื้องานจะถูกประเมินและเปรียบเทียบผลระหว่างการหมุนของอิเล็กโตรด (Rotation Speed) ที่ระดับความเร็ว 0, 35, 70, 105, 140 และ 175 รอบต่อนาที ที่มีผลต่ออัตราการขจัดเนื้องาน (MRR) ที่ระดับความลึก 50 มิลลิเมตร สำหรับการคำนวณค่าอัตราการขจัดเนื้องานจะดำเนินการภายใต้สมการที่ 3.1

ภายหลังการแปรรูปชิ้นงานทดลอง AISI P20 จะถูกนำมาตรวจสอบและวิเคราะห์ผลในอีก 2 ส่วน ได้แก่ ความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการฉีดยาไดอิเล็กทริกร่วมกับการหมุนของอิเล็กโตรดที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวเฉลี่ย และความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการฉีดยาไดอิเล็กทริกร่วมกับการหมุนของอิเล็กโตรดที่มีผลต่อค่าความเบี่ยงเบนของความขนาบกับทิศทางการแปรรูป การตรวจสอบและวิเคราะห์ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของผนังรูจะทำการตรวจสอบด้วยเครื่องวัดความหยาบผิว ยี่ห้อ Mahr รุ่น MarSurf PS1 (Germany) ในการตรวจสอบใช้ระยะในการกรองค่าความถี่ (Cut-off Length) และช่วงการสแกน (Scan Length) เท่ากับ 0.80 และ 5.60 mm ตามลำดับ โดยมีขั้นตอนในการเตรียมพื้นผิววัสดุชิ้นงานด้วยการล้างคราบสารไดอิเล็กทริกด้วยเมทิลแอลกอฮอล์ และทำการเป่าลมร้อนเพื่อไล่ความชื้นแล้วจึงวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ย โดยทำการวัดจำนวน 3 ครั้งแล้วบันทึกเป็นค่าเฉลี่ยและนำค่าที่ได้ไปศึกษาความสัมพันธ์กับการหมุนของอิเล็กโตรดที่ระดับความเร็ว 0, 35, 70, 105, 140 และ 175 รอบต่อนาที รูปที่ 3.9 แสดงรูปแบบลักษณะพื้นผิวที่ทำการวัดแสดงเป็นกราฟ (Profile)



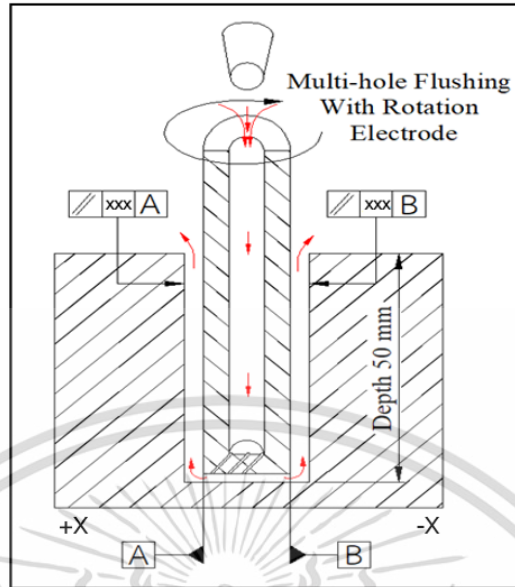
รูปที่ 3.9 การตรวจสอบความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) แบบสัมผัสด้วยเครื่องมือวัด ยี่ห้อ Mahr รุ่น PS1

การวิเคราะห์และประเมินค่าความเบี่ยงเบนของความขนานกับทิศทางการแปรรูป (Parallelism Deviation) โดยการใช้กล้องตรวจสอบความเรียบผิวด้วยเลเซอร์แบบไม่สัมผัส Noncontact Laser Scanning Confocal Microscope ยี่ห้อ Olympus รุ่น LEXT OLS 5000 (Japan) ซึ่งเครื่องมือที่ใช้จะสามารถสแกนเก็บโปรไฟล์ของรูเจาะได้ด้วย Scan Mode ทำให้สามารถได้ค่าที่มีความกลมโตสุดและเล็กสุดออกมาที่มีความแม่นยำสูง ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ดังนั้นในการทดลองนี้จะประยุกต์ใช้หลักการของการกำหนดสัญลักษณ์ GD&T ตามมาตรฐาน ASME Y14.5-2009 ว่าด้วยความขนาน (Parallelism) คือสถานะที่พื้นผิวแต่ละแนวบนพื้นผิวระนาบกลาง แกนกลาง หรือระนาบสัมผัส มีระยะห่างในทิศทางตั้งฉากเมื่อเทียบกับดาตัมอ้างอิงเป็นระยะเท่าๆกัน โดยดาตัมอ้างอิงสามารถเป็นได้ทั้งระนาบดาตัม (Datum Plane) หรือแกนดาตัม (Datum Axis) การควบคุมความขนานจัดอยู่ในกลุ่มของการควบคุมทิศทาง ดังนั้นการควบคุมความขนานจึงจำเป็นต้องกำหนดดาตัมอ้างอิงเสมอ



รูปที่ 3.10 การตรวจสอบค่าความเบี่ยงเบนด้านความกลมของรูเจาะโดยการใช้กล้องตรวจสอบความเรียบผิวด้วยเลเซอร์แบบไม่สัมผัส Noncontact Laser Scanning Confocal Microscope ยี่ห้อ Olympus รุ่น LEXT OLS 5000 (Japan)

สำหรับการแปรรูปลึกด้วยกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าในงานวิทยานิพนธ์นี้ เป็นการปรับปรุงกระบวนการฉีตสารไดอิเล็กทริกเพื่อควบคุมพิกัดรูปทรงด้านความขนานของผนังรูเจาะในแนวทิศทางการแปรรูป (แนวแกน Z) ดังนั้นการกำหนดดาตัม (Datum Control of Feature) จะใช้ดาตัมอ้างอิงตามแนวแกน (Datum Axis) รายละเอียดการกำหนดดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แสดงพิกัดตำแหน่งอ้างอิงตามแนวแกน (Datum Axis) โดยใช้การฉีตสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางแบบหลายจุด

ตารางที่ 3.6 รูปแบบการเก็บข้อมูลความเบี่ยงเบนด้านความกลมของรูเจาะ

ระดับความลึก mm	ขนาดรูเจาะ mm	ค่าความเบี่ยงเบน	ค่าความเบี่ยงเบน
		Datum A (+x) mm	Datum B (-x) mm
1			
10			
20			
30			
40			
50			

สำหรับการทดลองในส่วนนี้การออกแบบอิเล็กโตรดโดยการฉีตสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโตรดแบบหลายจุด (Multi-aperture Inner Flushing) จะถูกนำมาเปรียบเทียบผลรวมกับการฉีตสารไดอิเล็กทริกด้านข้างแบบปกติ (Conventional Side Flushing) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของรูปแบบการฉีตสารไดอิเล็กทริกที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในกระบวนการแปรรูปลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 ผลการศึกษาและวิเคราะห์ค่าตัวแปรที่เหมาะสมในกระบวนการแปรรูปลึกด้วยการฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโตรดแบบหลายจุด

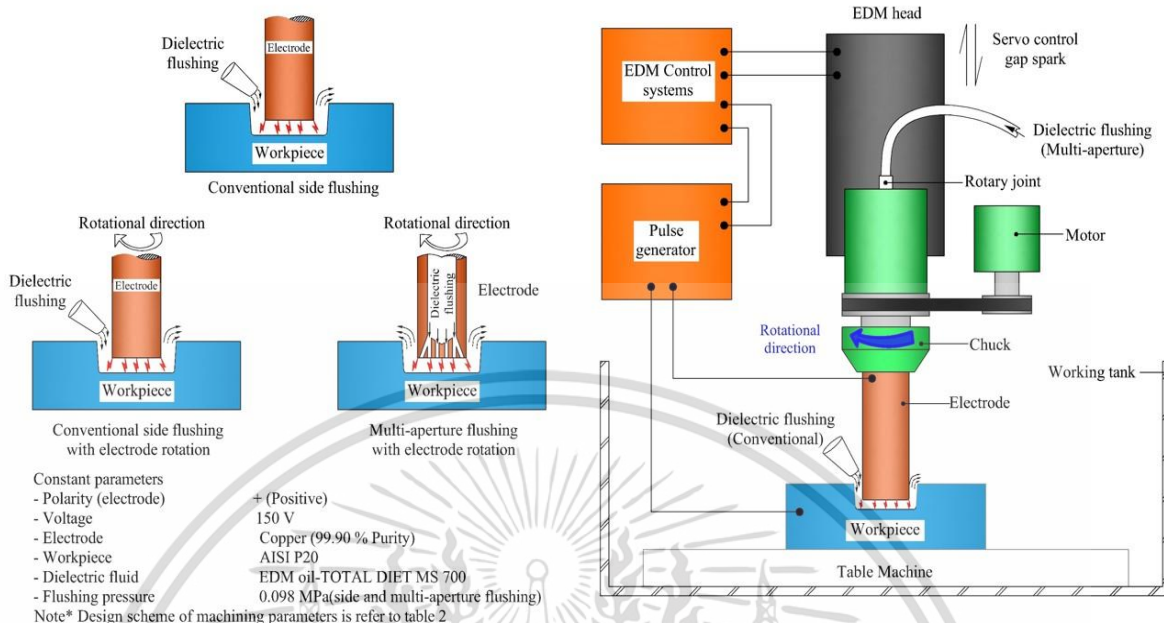
3.4.1 วัสดุและวิธีการทดลอง

ในส่วนการทดลองนี้ การเตรียมวัสดุชิ้นงานทดลอง AISI P20 จะดำเนินการในลักษณะเดียวกับการทดลองในหัวข้อ 3.1, 3.2 และ 3.3 สำหรับวัสดุอิเล็กโตรดทองแดงที่ใช้จะดำเนินการในลักษณะเดียวกับการทดลองในหัวข้อ 3.3 แต่ในส่วนนี้จะเน้นถึงการศึกษาและวิเคราะห์ค่าตัวแปรที่เหมาะสมในกระบวนการแปรรูปลึกด้วยการฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโตรดแบบหลายจุด (Multi-aperture Inner Flushing) ด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง โดยการใช้ตัวแปรและระดับของตัวแปรเช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อที่ 3.2

3.4.2 การตรวจสอบและการวิเคราะห์ผล

การตรวจสอบและการวิเคราะห์ผลในส่วนนี้ จะดำเนินการเหมือนกับการทดลองในหัวข้อที่ 3.2 ทั้งในส่วนของการออกแบบการทดลอง ตัวแปร ระดับตัวแปร วิธีการเก็บข้อมูล การวิเคราะห์ผล รวมไปถึงเครื่องมือและอุปกรณ์ แตกต่างกันในส่วนของเลือกใช้อิเล็กโตรดแบบ การฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโตรดแบบหลายจุด (Multi-aperture Inner Flushing)

โดยการสรุปผลการทดลองในส่วนนี้จะประกอบไปด้วย ค่าตัวแปรที่เหมาะสมในการแปรรูปลึกด้วยวิธีการฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโตรดแบบหลายจุด (Multi-aperture Inner Flushing) ที่ส่งผลต่ออัตราการขจัดเนื้องานที่สูง (Maximum MRR) อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดที่ต่ำ (Minimum EWR) และค่าช่องว่างในการแปรรูปที่ต่ำ (Minimum GC) ค่าความสัมพันธ์ของตัวแปรที่เหมาะสมแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Optimization) นอกจากนี้ การฉีดสารไดอิเล็กทริกด้านข้างแบบปกติ (Conventional Side Flushing) จะถูกนำมาเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลร่วมกันในส่วนนี้ ซึ่งแผนภาพการทดลองโดยสรุปรวมไปถึงตัวแปรคงที่ที่ใช้ในการทดลอง แสดงในรูปที่ 3.12

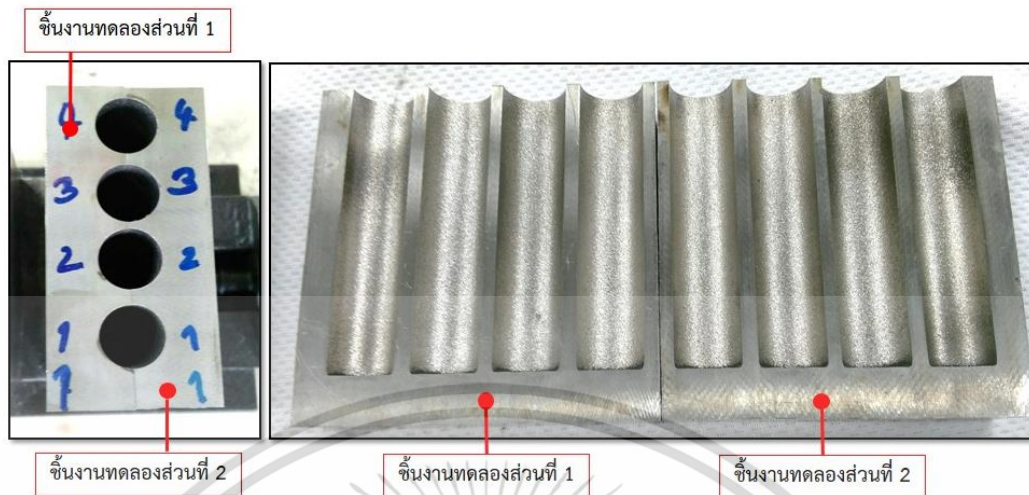


รูปที่ 3.12 แผนภาพการทดลองโดยสกรูและตัวแปรงที่ใช้ในการทดลอง

3.5 ผลการศึกษาสภาพพื้นผิวชิ้นงานและอิเล็กทรอนิกส์ภายหลังการแปรรูป

3.5.1 วัสดุและวิธีการทดลอง

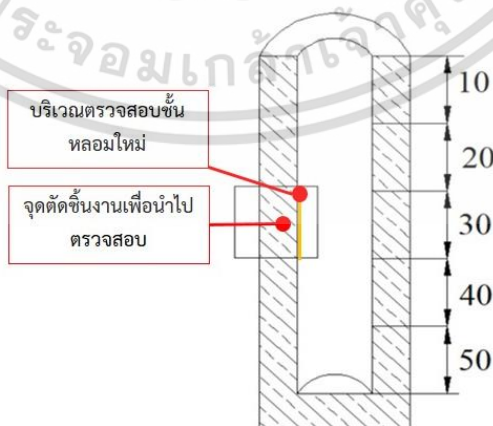
การทดลองในส่วนนี้เป็นขั้นตอนสุดท้ายภายหลังการแปรรูปสึกเสิร์ฟล้นลง เพื่อให้ง่ายต่อการตรวจสอบ ชิ้นงานทดลอง AISI P20 ที่ผ่านกระบวนการแปรรูปสึกเสิร์ฟล้นจากการฉีดยาไดอิเล็กทริกด้านข้างแบบปกติ และการฉีดยาไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโตรดแบบหลายจุด จะถูกนำมาแบ่งเป็น 2 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 3.13 เพื่อตรวจสอบคุณภาพผิวงานตลอดความลึกในการแปรรูป 50 มิลลิเมตร โดยชิ้นงานทดลองทุกชิ้นก่อนทำการตรวจสอบจะถูกล้างทำความสะอาดด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ (Ethanol 99.9%) เพื่อล้างคราบน้ำมันและปล่อยให้แห้งในอากาศ



รูปที่ 3.13 ชั้นงานทดลอง AISI P20 ภายหลังจากแปรรูป

อิเล็กโตรดทองแดงทั้ง 2 รูปแบบ ภายหลังจากแปรรูปจะถูกนำมาตรวจสอบสภาพพื้นผิวและความรุนแรงของการเกิด Secondary Spark ตลอดความลึก 50 มิลลิเมตร ซึ่งในชั้นตอนนี้อิเล็กโตรดจะถูกทำความสะอาดด้วยแอลกอฮอล์แบบเจือจางเพื่อล้างเขม่าคาร์บอนที่ตกค้างบนผิวของอิเล็กโตรด

การตรวจสอบชั้นหลอมใหม่ (Recast Layer) บนผิวชั้นงานจะดำเนินการโดยการตัดชิ้นส่วนของผนังรูเจาะด้วยเครื่องตัดโลหะด้วยไฟฟ้าที่ระดับความลึก 30 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ชั้นงานทดลองภายหลังจากตัดจะถูกนำไปหล่อเรซินเพื่อง่ายต่อการเตรียมผิวงาน โดยขั้นตอนของการเตรียมผิวงานจะทำการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600, 800, 1,000 และ 1,200 ตามลำดับ ตามด้วยผงอะลูมินา (Al₂O₃) ขนาด 0.3 บนผ้าสักหลาดโดยใช้เครื่องขัดชั้นงานทดสอบยี่ห้อ Struers รุ่น DAP-V หลังจากนั้นชั้นงานจะถูกล้างทำความสะอาดด้วยเครื่องล้างความถี่สูงก่อนนำไปตรวจสอบชั้นหลอม



รูปที่ 3.14 ตำแหน่งการตัดชิ้นงานทดสอบเพื่อนำไปตรวจสอบชั้นหลอม

3.5.2 การตรวจสอบและการวิเคราะห์ผล

สำหรับการตรวจสอบความสมบูรณ์ของพื้นผิวชิ้นงานและอิเล็กทรอนิกส์ภายหลังการแปรรูป กล้องตรวจสอบความเรียบผิวด้วยเลเซอร์แบบไม่สัมผัส Noncontact Laser Scanning Confocal Microscope ยี่ห้อ Olympus รุ่น LEXT OLS 5000 (Japan) ถูกนำมาตรวจสอบคุณภาพผิวของอิเล็กทรอนิกส์ นอกจากนี้กล้องจุลทรรศน์ Measuring Microscope ยี่ห้อ Olympus รุ่น STM6 (Japan) ที่ช่วงกำลังขยาย 3X – 20X ทศนิยม 4 ตำแหน่ง ถูกนำมาตรวจสอบช่องว่างในการแปรรูป (Gap Clearance) เพื่อยืนยันผลการทดลอง กล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัล Digital Microscope ยี่ห้อ Olympus รุ่น DSX1000 (Japan) ถูกนำมาตรวจสอบความสมบูรณ์ของผนังรูเจาะและภายในของอิเล็กทรอนิกส์แบบจ่ายสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลาง

ในกระบวนการตรวจสอบชั้นหลอมใหม่ ชิ้นงานทดสอบภายหลังการเตรียมผิวงานจะถูกกัดผิวด้วยลำไอออน (Ion Milling) ยี่ห้อ Hitachi รุ่น SU8230 (Japan) และตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคกำลังขยายสูงด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-5800LV (USA) การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีใช้ Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) ยี่ห้อ OXFORD INSTRUMENTS รุ่น X-Max (USA) สำหรับการตรวจสอบจะเป็นการพิสูจน์ข้อสมมติฐานเบื้องต้นว่ากระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้าโดยการประยุกต์ใช้วิธีการฉีตสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กทรอนิกส์แบบหลายจุดร่วมกับการหมุนอิเล็กทรอนิกส์ จะเกิดการก่อตัวของชั้นหลอมใหม่หรือไม่เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการฉีตสารไดอิเล็กทริกด้านข้างแบบปกติ

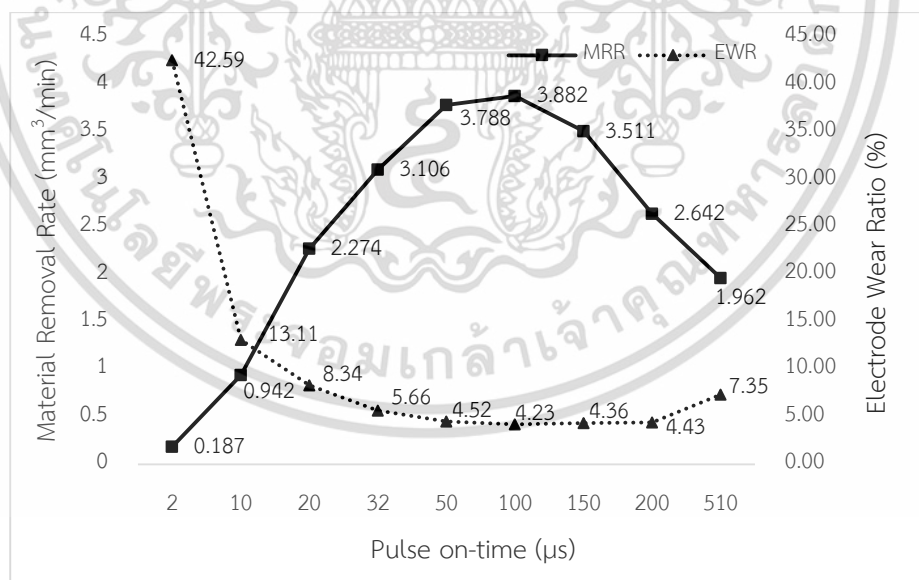
บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลการศึกษาค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นที่มีผลต่อประสิทธิภาพในกระบวนการแปรรูปลึก

4.1.1 ผลกระทบของการปรับค่าเวลาเปิดที่มีผลต่ออัตราการขจัดเนื้องานและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด

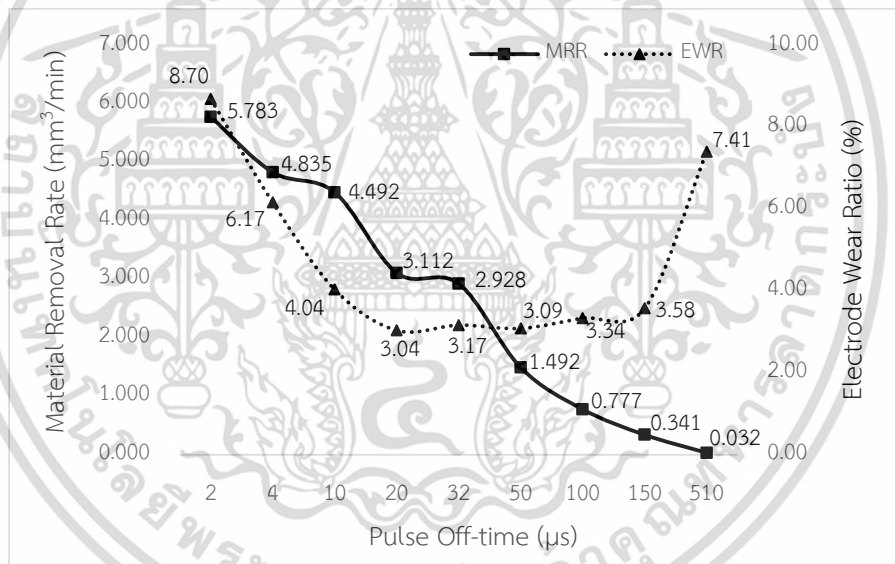
เวลาเปิด (On-time) คือ ช่วงเวลาที่เกิดการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า (Pulse Duration) ซึ่งจากผลการทดลองโดยใช้วัสดุอิเล็กโทรดทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร กัดเซาะวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้า AISI P20 ด้วยวิธีการปรับเปลี่ยนระดับค่าเวลาเปิด 2, 10, 20, 32, 50, 100, 150, 200 และ 510 μs โดยคงที่เวลาปิด 32 μs และระดับค่ากระแสไฟฟ้า 9 A ผลปรากฏว่า อัตราการขจัดเนื้องานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับค่าเวลาเปิด โดยมีอัตราการขจัดเนื้องานสูงสุด 3.882 mm^3/min ที่เวลาเปิด 100 μs อย่างไรก็ตามเมื่อเวลาเปิดเพิ่มขึ้นที่ 200 μs อัตราการขจัดเนื้องานมีแนวโน้มลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ในส่วนของอัตราการสึกหรอของวัสดุอิเล็กโทรดนั้นมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาเปิดเพิ่มมากขึ้นในลักษณะที่ผกผันกับอัตราการขจัดเนื้องาน



รูปที่ 4.1 ผลกระทบของการปรับค่าเวลาเปิดที่มีผลต่ออัตราการขจัดเนื้องาน และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด

4.1.2 ผลกระทบของการปรับค่าเวลาปิดที่มีผลต่ออัตราการขจัดเนื้องานและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด

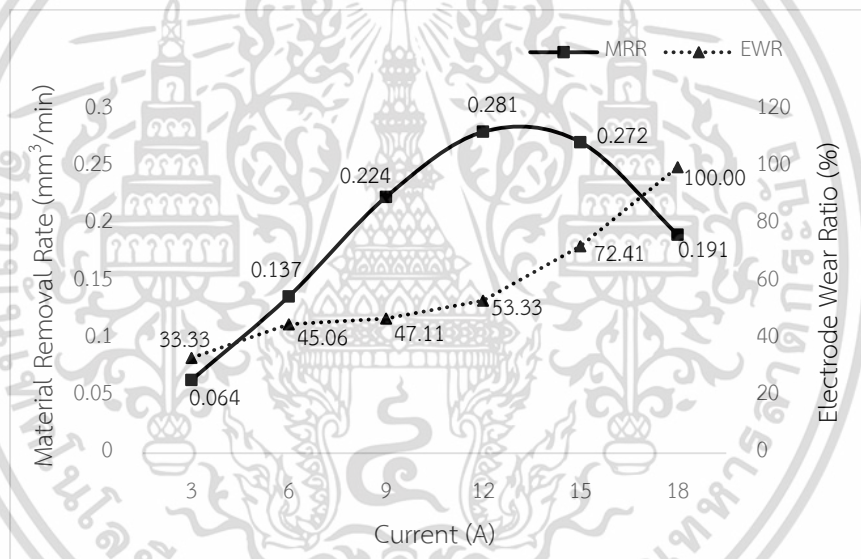
เวลาปิด (Off-time) คือ ช่วงเวลาหยุดการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า (Pause Duration) ซึ่งจากผลการทดลองโดยใช้วัสดุอิเล็กโทรดทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร กัดเซาะวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้า AISI P20 ด้วยวิธีการปรับเปลี่ยนระดับค่าเวลาปิด 2, 4, 10, 20, 32, 50, 100 และ 510 μs โดยคงที่เวลาเปิด 32 μs และระดับกระแสไฟฟ้า 9 A ผลปรากฏว่า อัตราการขจัดเนื้องานมีแนวโน้มลดลงเมื่อระดับค่าเวลาเปิดเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากเวลาปิดเป็นเวลาที่หยุดการจ่ายกระแสไฟฟ้าจึงไม่ทำให้เกิดการขจัดเนื้องาน หากแต่เป็นช่วงเวลาในการขจัดเศษและระบายความร้อนตลอดจนรักษาความเสถียรในการกัดเซาะ โดยมีอัตราการขจัดเนื้องานสูงสุด 5.783 mm^3/min ที่เวลาปิด 2 μs ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ในส่วนของอัตราการสึกหรอของวัสดุอิเล็กโทรดนั้นมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาปิดเพิ่มมากขึ้นจนถึงระดับหนึ่งซึ่งเมื่อเวลาปิดมีค่ามากกว่า 100 μs อัตราการสึกหรอของวัสดุอิเล็กโทรดมีแนวโน้มมากขึ้น



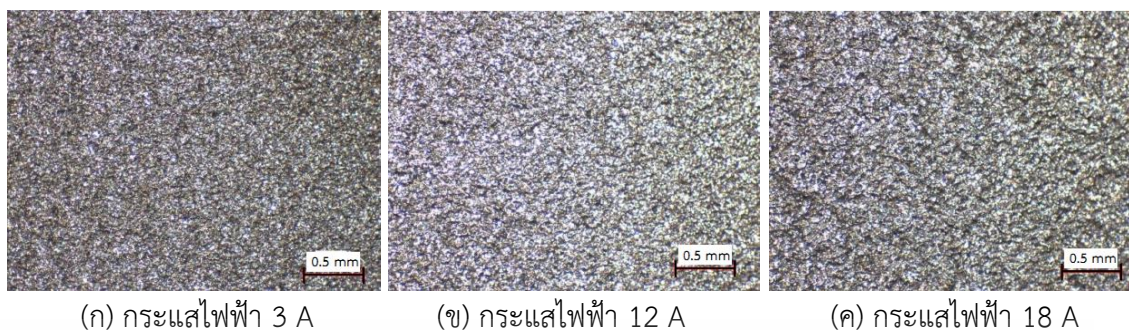
รูปที่ 4.2 ผลกระทบของการปรับค่าเวลาปิดที่มีผลต่ออัตราการขจัดเนื้องานและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด

4.1.3 ผลกระทบของการปรับค่ากระแสไฟฟ้าที่มีผลต่ออัตราการขจัดเนื้องานและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด

กระแสไฟฟ้า (Current) คือ อัตราการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าต่อหน่วยเวลา โดยในการทดสอบกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อความสามารถในการแปรรูปด้วยการกำหนดค่าเวลาเปิดคองที่ 32 μs และเวลาปิดคองที่ 2 μs หลังจากนั้นทำการปรับเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าที่ 3, 6, 9, 12, 15 และ 18 A พบว่าเมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น อัตราการขจัดเนื้องานจะสูงขึ้นตามโดยเมื่อกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นเกินกว่า 15 A พบว่าอัตราการขจัดเนื้องานจะเริ่มลดลงดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งการลดลงของอัตราการขจัดเนื้องานเกิดจากปริมาณกระแสต่อพื้นที่หน้าตัดที่สูงทำให้วัสดุอิเล็กโทรดได้รับความร้อนในปริมาณที่มากจึงทำให้เกิดการสึกหรอที่พื้นผิววัสดุอิเล็กโทรดสูง [27] ทั้งนี้ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่สูงทำให้เกิดความรุนแรงของการกัดเซาะที่เป็นหลุมลึกบนพื้นผิววัสดุชิ้นงาน [58] ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.3 ผลกระทบของการปรับค่ากระแสไฟฟ้าที่มีผลต่ออัตราการขจัดเนื้องานและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด



รูปที่ 4.4 ลักษณะผิวงานที่เกิดจากการปรับค่ากระแสไฟฟ้า (กำลังขยาย 35 เท่า)

4.2 ผลการศึกษาและวิเคราะห์ค่าตัวแปรที่เหมาะสมในกระบวนการแปรรูปลึกด้วยวิธีการฉีดสารไดอิเล็กทริกด้านข้าง

ผลการศึกษาผลกระทบของตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการแปรรูปลึกซึ่งในขั้นตอนนี้เป็น การออกแบบการทดลองก่อนที่จะทำการเก็บข้อมูลโดยใช้วิธีการทางสถิติที่เรียกว่าวิธีพื้นผิวผลตอบสนอง (RSM) และอาศัยการออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง (CCD) เป็นการออกแบบการทดลองโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรอันประกอบไปด้วย เวลาเปิด เวลาปิด กระแสไฟฟ้า และการหมุนของอิเล็กโทรด โดยค่าตัวแปรที่เลือกใช้จะมาจากการทดลองหาค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นในหัวข้อที่ 4.1 ในส่วนของการเลือกใช้การหมุนอิเล็กโทรดอ้างอิงจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องสำหรับกระบวนการแปรรูปลึก ซึ่งแต่ละตัวแปรถูกกำหนดให้มีค่าความแตกต่าง 3 ระดับ ดังนั้นจะมีจำนวนของการทดลองทั้งหมด 31 การทดลอง โดยจะทำการประเมินผลลัพธ์ของการตอบสนองของตัวแปร 3 ตัว ได้แก่ อัตราการขจัดเนื้องาน (Material Removal Rate : MRR, mm^3/min) อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (Electrode Wear Ratio : EWR, %) และช่องว่างในการแปรรูป (Gap Clearance : GC, mm) โดยการเลือกใช้รูปแบบการฉีดสารไดอิเล็กทริกด้านข้างแบบปกติ (Conventional Side Flushing) ผลการทดลองถูกแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองจากการออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง (CCD) สำหรับรูปแบบการฉีดสารไดอิเล็กทริกด้านข้างแบบปกติ

RUN No.	A: On-time (μ s)	B: Off-time (μ s)	C: Current (A)	D: Electrode Rotation (rpm)	MRR mm^3/min	EWR (%)	GC mm.
1	50	2	9	0	7.094	1.339	0.156
2	150	2	9	0	8.104	0.276	0.199
3	50	20	9	0	6.158	1.454	0.154
4	150	20	9	0	7.166	0.272	0.196
5	50	2	15	0	11.568	3.056	0.187
6	150	2	15	0	17.168	0.595	0.21
7	50	20	15	0	9.820	1.732	0.191
8	150	20	15	0	15.488	0.583	0.238
9	50	2	9	70	4.636	1.034	0.166
10	150	2	9	70	7.930	0.132	0.204
11	50	20	9	70	4.799	1.329	0.164
12	150	20	9	70	6.192	0.084	0.198
13	50	2	15	70	10.672	1.988	0.175
14	150	2	15	70	18.965	0.389	0.236
15	50	20	15	70	9.224	1.895	0.171
16	150	20	15	70	15.805	0.371	0.208
17	50	10	12	35	8.361	1.493	0.173
18	150	10	12	35	7.223	0.230	0.206
19	100	2	12	35	8.575	0.662	0.182
20	100	20	12	35	9.258	0.575	0.184
21	100	10	9	35	3.725	0.546	0.171
22	100	10	15	35	18.784	0.887	0.194
23	100	10	12	0	8.667	0.678	0.180
24	100	10	12	70	10.912	0.619	0.191

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

25	100	10	12	35	8.922	0.561	0.190
26	100	10	12	35	8.679	0.644	0.185
27	100	10	12	35	8.999	0.660	0.190
28	100	10	12	35	9.092	0.715	0.190
29	100	10	12	35	8.853	0.638	0.186
30	100	10	12	35	10.005	0.658	0.183
31	100	10	12	35	8.049	0.526	0.192

4.2.1 ผลการศึกษาค่าอัตราการจัดเนื้องาน

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของแบบสมการการถดถอยของพารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญต่อการตอบสนองของอัตราการจัดเนื้องานแสดงในตารางที่ 4.2 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอัตราการจัดเนื้องานมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับเวลาเปิด (A) กระแสไฟฟ้า (C) กระแสไฟฟ้ากำลังสอง (C^2) และค่าปฏิสัมพันธ์ร่วม (Interaction) ระหว่างเวลาเปิดกับกระแสไฟฟ้า (AC) ซึ่งมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับผลของค่า P-value ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($\alpha = 0.05$) โดยข้อมูลที่น่าสนใจวิเคราะห์ที่มีค่าความน่าเชื่อถือที่ R^2 เท่ากับ 85.33 %

สำหรับการประมาณค่าอัตราการจัดเนื้องานโดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยโดยเป็นการนำค่าของเวลาเปิด (A) กระแสไฟฟ้า (C) กระแสไฟฟ้ากำลังสอง (C^2) และค่าปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างเวลาเปิดกับกระแสไฟฟ้า (AC) สามารถสร้างสมการทำนายได้ผลดังสมการที่ 4.1

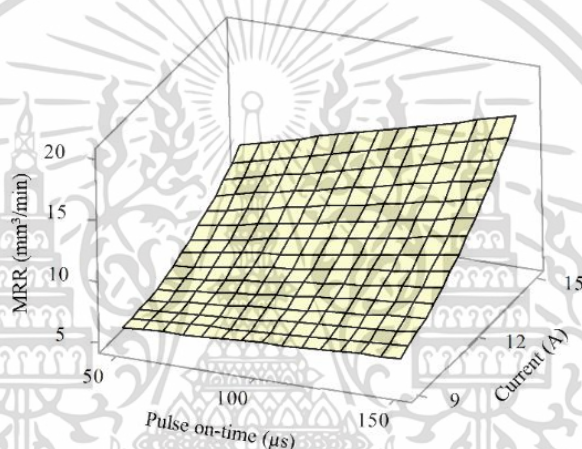
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในรูปแบบสมการถดถอยของพารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญต่อการตอบสนองของอัตราการจัดเนื้องานสำหรับการฉีดสารไดอิเล็กตริกด้านข้างแบบปกติ

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F-value	P-value
Model	364.13	4	91.033	37.80	<0.001**
A	55.86	1	55.859	23.19	<0.001**
C	269.82	1	269.816	112.02	<0.001**
C^2	14.85	1	14.846	6.16	0.020**
AC	23.61	1	23.612	9.80	0.004**
Error	62.62	26	2.409		
Total	426.76	30			
	$R^2 = 85.33\%$	R^2 (adj)= 83.07%			

$$MRR = 22.0391 - 0.0619 A - 3.2590 C + 0.1558 C^2 + 0.0081 AC \quad (4.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลกระทบร่วมระหว่างเวลาเปิด (Pulse On-time) และกระแสไฟฟ้า (Current) ที่มีผลต่ออัตราการกัดเนื้องาน (Material Removal Rate) แสดงในรูปที่ 4.5 พบว่าอัตราการกัดเนื้องานมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับการปรับค่าเวลาเปิดและกระแสไฟฟ้า กล่าวคือเมื่อค่าของเวลาเปิดและกระแสไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น จะเกิดการสร้างพลังงานความร้อนและการปล่อยประจุไฟฟ้าที่มีความเข้มข้นสูงซึ่งเพียงพอต่อการหลอมละลายของเนื้อวัสดุ สภาวะแวดล้อมดังกล่าวเอื้อให้เกิดการกัดเนื้อวัสดุออกได้อย่างสมบูรณ์ภายใต้สารไดอิเล็กทริก จากการศึกษาพื้นผิวแสดงผลกระทบร่วมระหว่างเวลาเปิดและกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่ออัตราการกัดเนื้องานแสดงให้เห็นว่าค่าอัตราการกัดเนื้องานสูงสุดสามารถได้จากการปรับค่าเวลาเปิดที่ 150 μs และค่ากระแสไฟฟ้าที่ 15 A



รูปที่ 4.5 พื้นผิวแสดงผลกระทบร่วมระหว่างเวลาเปิดและกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่ออัตราการกัดเนื้องาน

4.2.2 ผลการศึกษาค่าอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) แบบสมการการถดถอยของพารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญต่อการตอบสนองของอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดแสดงในตารางที่ 4.3 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับเวลาเปิด (A) กระแสไฟฟ้า (C) การหมุนของอิเล็กโตรด (D) เวลาเปิดกำลังสอง (A^2) และค่าปฏิสัมพันธ์ร่วม (Interaction) ระหว่างเวลาเปิดกับกระแสไฟฟ้า (AC) และเวลาปิดกับกระแสไฟฟ้า (BC) ซึ่งมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับผลของค่า P-value ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($\alpha = 0.05$) โดยข้อมูลที่น่ามาวิเคราะห์มีค่าความน่าเชื่อถือที่ R^2 เท่ากับ 93.24 %

สำหรับการประมาณค่าอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดโดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยโดยเป็นการนำค่าของเวลาเปิด (A) กระแสไฟฟ้า (C) การหมุนของอิเล็กโตรด (D) เวลาเปิดกำลังสอง (A^2) และ

ค่าปฏิสัมพันธ์ร่วม (Interaction) ระหว่างเวลาเปิดกับกระแสไฟฟ้า (AC) และเวลาปิดกับกระแสไฟฟ้า (BC) สามารถสร้างสมการทำนายได้ผลดังสมการที่ 4.2

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในรูปแบบสมการถดถอยของพารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญต่อการตอบสนองของอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดสำหรับการฉีดสารไดอิเล็กตริกด้านข้างแบบปกติ

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F-value	P-value
Model	11.8348	7	1.69069	45.31	<0.001**
A	8.5257	1	8.52570	228.48	<0.001**
B	0.0730	1	0.07301	1.96	0.175
C	1.3916	1	1.39160	37.29	<0.001**
D	0.2554	1	0.25537	6.84	0.015**
A ²	1.0609	1	1.06094	28.43	<0.001**
AC	0.3425	1	0.34252	9.18	0.006**
BC	0.1979	1	0.19793	5.30	0.031**
Error	0.8582	23	0.03731		
Total	12.6930	30			
	R ² = 93.24%	R ² (adj)= 91.18%			

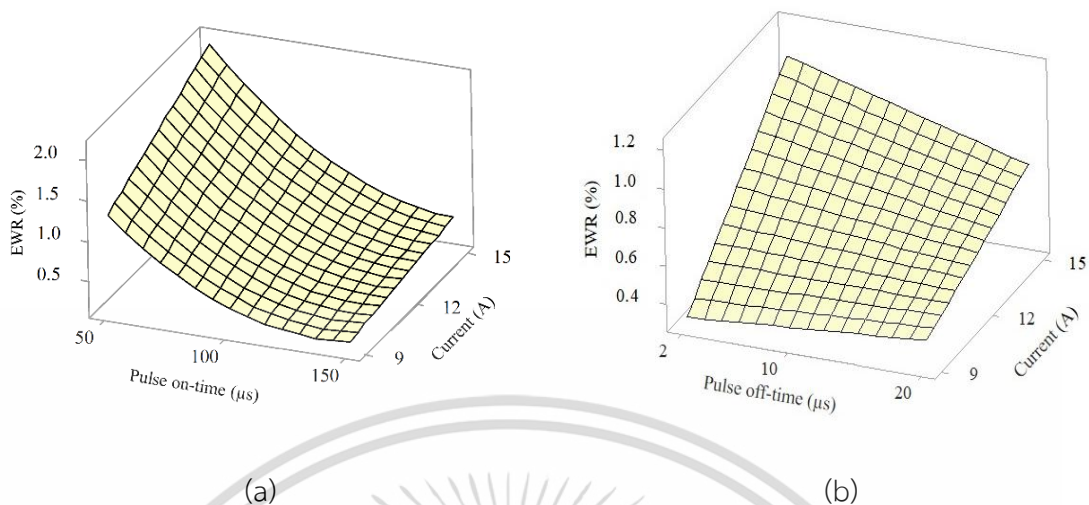
$$\text{EWRsf} = 0.887 - 0.0320 A + 0.0423 B + 0.2355 C - 0.0034 D + 0.00015 A^2 - 0.000975 AC - 0.00412 BC \quad (4.2)$$

ผลกระทบร่วมระหว่างเวลาเปิด (Pulse On-time) กับกระแสไฟฟ้า (Current) และเวลาปิด (Pulse Off-time) กับกระแสไฟฟ้า (Current) ที่มีผลต่ออัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (Electrode Wear Ratio) แสดงในรูปที่ 4.6 (a) และ (b) ตามลำดับ พบว่าอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดมีความสัมพันธ์เชิงผกผันไปตามการปรับค่าเวลาเปิด จากรูปที่ 4.6 (a) จะเห็นได้ว่าเมื่อเวลาเปิดเพิ่มสูงขึ้นจาก 50 μs ไปเป็น 150 μs อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัด ในกรณีนี้สามารถอธิบายได้จาก 2 ตัวแปรร่วมกัน กล่าวคือในกระบวนการกัดโลหะด้วยไฟฟ้าโดยการกำหนดให้อิเล็กโทรดเป็นขั้วบวก (Positive Polarity) เมื่อช่วงเวลาที่เคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้ามีค่าต่ำ (50 μs) กลไกการขจัดเนื้องานที่เกิดขึ้นมีอิทธิพลมาจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากอิเล็กตรอนขั้วลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

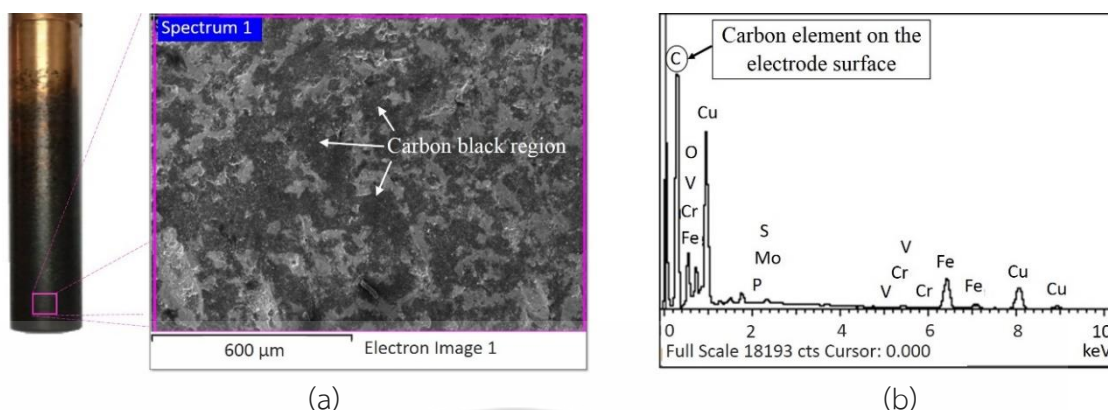
(ชิ้นงาน) ไปยังขั้วไฟฟ้าบวก (วัสดุอิเล็กโทรด) ส่งผลให้อิเล็กโทรดเกิดการสะสมของพลังงานความร้อนมากกว่าชิ้นงาน นำไปสู่การเพิ่มขึ้นของอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด [10] อย่างไรก็ตาม เมื่อค่าเวลาเปิดเพิ่มสูงขึ้น ($150 \mu\text{s}$) หรือเกิดการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าที่ยาวนานส่งผลให้รัศมีของช่องพลังงานในระดับพลาสมาเกิดการขยายตัวเป็นวงกว้าง ทำให้การเคลื่อนที่ของไอออนบวกจากอิเล็กโทรด (Positive Polarity) ไปยังชิ้นงาน (Cathode) เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งกลไกของการขจัดเนื้องานเกิดจากการเคลื่อนที่และชนกันของไอออนบวก ที่เคลื่อนที่จากอิเล็กโทรดไปยังชิ้นงาน ส่งผลให้เกิดการสะสมของพลังงานความร้อนบนชิ้นงานสูง นำไปสู่การลดลงของอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด [15]

สำหรับกระแสไฟฟ้าเป็นต้นกำเนิดของพลังงานความร้อน เมื่อการเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้า (15 A) อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิหลอมละลายของวัสดุอิเล็กโทรดทองแดง ($1084 \text{ }^{\circ}\text{C}$) มีค่าน้อยกว่าอุณหภูมิหลอมละลายของวัสดุชิ้นงาน AISI P20 เมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้เกิดการสะสมของพลังงานความร้อนบนวัสดุอิเล็กโทรดเพิ่มสูงขึ้นตาม ส่งผลให้เกิดการสึกหรอของอิเล็กโทรด จากรูปที่ 4.6 (b) แสดงความสัมพันธ์ร่วมระหว่างเวลาปิดกับกระแสไฟฟ้า พบว่าที่ระดับค่าเวลาปิดต่ำ ($2 \mu\text{s}$) อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดมีการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น ในทางตรงกันข้ามกัน เมื่อระดับค่าเวลาปิดเพิ่มสูงขึ้น ($20 \mu\text{s}$) อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเวลาปิดเป็นเวลาที่หยุดการจ่ายกระแสไฟฟ้าจึงไม่ทำให้เกิดการขจัดเนื้องาน หากแต่เป็นช่วงเวลาในการขจัดเศษและระบายความร้อนตลอดจนรักษาความเสถียรในการกัดเซาะ นั้นหมายความว่าหากเวลาปิดมีค่าที่เหมาะสมจะส่งผลให้การสปาร์คในครั้งต่อไปเป็นไปอย่างสมบูรณ์ จากการศึกษาพื้นผิวแสดงผลกระทบร่วมที่มีผลต่ออัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด แสดงให้เห็นว่าค่าอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดต่ำสุดสามารถได้จากการปรับค่าเวลาเปิดที่ $150 \mu\text{s}$ เวลาปิด $20 \mu\text{s}$ และค่ากระแสไฟฟ้าที่ 9 A



รูปที่ 4.6 พื้นผิวแสดงผลกระทบร่วมที่มีผลต่ออัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (a) ความสัมพันธ์ร่วมระหว่างเวลาเปิดกับกระแสไฟฟ้า (b) ความสัมพันธ์ร่วมระหว่างเวลาปิดกับกระแสไฟฟ้า

จากการศึกษาการสึกหรอของอิเล็กโทรดโดยการพิจารณาผิวอิเล็กโทรดภายหลังการแปรรูปลึกโดยการฉีดสารไดอิเล็กทริกด้านข้างแบบปกติ พบว่า ที่ระดับค่าเวลาเปิด 150 μs และค่ากระแสไฟฟ้า 15 A มีการก่อตัวของชั้นฟิล์มคาร์บอนบนผิวของอิเล็กโทรดทองแดงตลอดความลึกในการแปรรูป (50 mm) ซึ่งเกิดจากคาร์บอนในเนื้อวัสดุชิ้นงานที่มีประจุทางไฟฟ้าเป็นลบวิ่งเข้าหาอิเล็กโทรดที่มีประจุเป็นบวก ทำให้เกิดการเคลือบตัวของชั้นฟิล์มคาร์บอนบนผิวอิเล็กโทรดทองแดงในระหว่างกระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 4.7 (a) ซึ่งชั้นฟิล์มคาร์บอนบนผิวอิเล็กโทรดสามารถป้องกันการสึกหรอของอิเล็กโทรดได้อีกกรณีหนึ่ง [59] นอกจากนี้การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมี (EDS) ของธาตุคาร์บอนบนวัสดุอิเล็กโทรดที่ระดับความลึก 40 mm พบว่ามีส่วนประกอบของธาตุคาร์บอน 51.89%, ธาตุประกอบออกไซด์ 9.85%, ธาตุประกอบทองแดง 25.51%, ธาตุประกอบโลหะ 11.85% และธาตุประกอบอื่นๆ ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.7 (b)



รูปที่ 4.7 ชั้นฟิล์มคาร์บอนบนขั้วอิเล็กโทรดทองแดง (a) ลักษณะการเคลือบตัวของชั้นฟิล์มคาร์บอนที่มีความลึก 40 mm (b) การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (EDS)

4.2.3 ผลการศึกษาค่าช่องว่างในการแปรรูป

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของแบบสมการการถดถอยของพารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญต่อการตอบสนองของช่องว่างการแปรรูปแสดงในตารางที่ 4.4 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าช่องว่างการแปรรูปมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับเวลาเปิด (A) กระแสไฟฟ้า (C) และค่าปฏิสัมพันธ์ร่วม (Interaction) ระหว่างเวลาเปิดกับการหมุนของอิเล็กโทรด (BD) และกระแสไฟฟ้ากับการหมุนของอิเล็กโทรด (CD) ซึ่งมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับผลของค่า P-value ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($\alpha = 0.05$) โดยข้อมูลที่น่าวิเคราะห์มีค่าความน่าเชื่อถือที่ R^2 เท่ากับ 90.26 %

สำหรับการประมาณค่าช่องว่างการแปรรูปโดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยซึ่งเป็นการนำค่าของเวลาเปิด (A) กระแสไฟฟ้า (C) และค่าปฏิสัมพันธ์ร่วม (Interaction) ระหว่างเวลาเปิดกับการหมุนของอิเล็กโทรด (BD) และกระแสไฟฟ้ากับการหมุนของอิเล็กโทรด (CD) สามารถสร้างสมการทำนายได้ผลดังสมการที่ 4.3

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในรูปแบบสมการถดถอยของพารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญต่อการตอบสนองของช่องว่างในการแปรรูปสำหรับการฉีดสารไดอิเล็กทริกด้านข้างแบบปกติ

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F-value	P-value
Model	0.039611	6	0.006602	37.05	<0.001**
A	0.028481	1	0.028481	159.84	<0.001**
B	0.000019	1	0.000019	0.10	0.750
C	0.008889	1	0.008889	49.89	<0.001**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

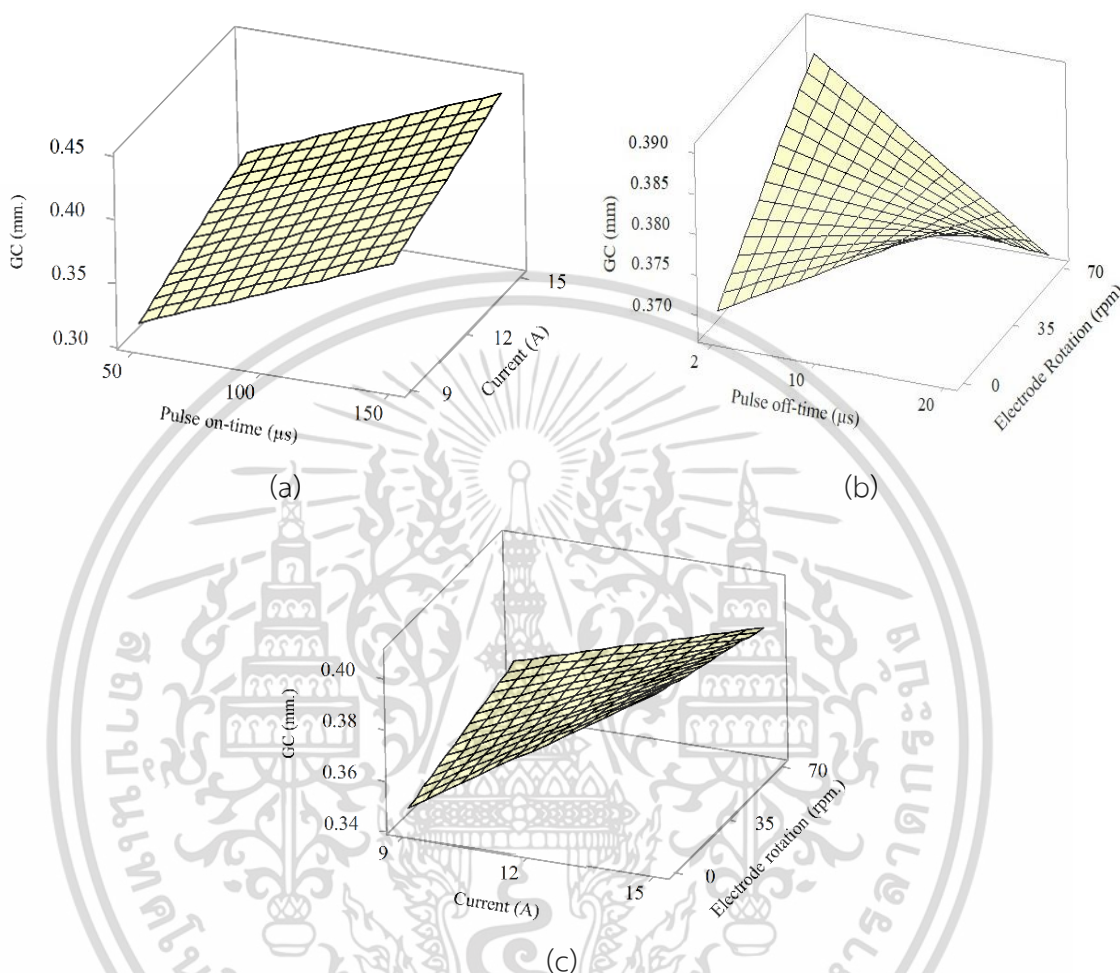
D	0.000001	1	0.000001	0.001	0.999
BD	0.001246	1	0.001246	6.99	0.014**
CD	0.00097	1	0.000977	5.48	0.028**
Error	0.004276	24	0.000178		
Total	0.043888	30			
	$R^2 = 90.26\%$	$R^2(\text{adj}) = 87.82\%$			

$$GCsf = 0.0843 + 0.000398 A + 0.000434 B + 0.005006 C + 0.0006 D - 0.000014 BD - 0.000037 CD \quad (4.3)$$

ผลกระทบร่วมระหว่างเวลาเปิด (Pulse On-time) กับกระแสไฟฟ้า (Current), เวลาปิด (Pulse Off-time) กับการหมุนของอิเล็กโทรด (Electrode Rotation), และกระแสไฟฟ้า (Current) กับการหมุนของอิเล็กโทรด (Electrode Rotation) แสดงในรูปที่ 4.8 จากรูปที่ 4.8 (a) ช่องว่างในการแปรรูปมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับการปรับค่าเวลาเปิดและระดับค่ากระแสไฟฟ้า กล่าวคือ การเพิ่มขึ้นของระดับค่าเวลาเปิด (150 μ s) และค่ากระแสไฟฟ้า (15 A) ทำให้เกิดการสร้างพลังงานความร้อนและความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดการหลอมละลายและการกัดเซาะของเนื้อวัสดุเกิดขึ้นในบริเวณกว้าง เป็นเหตุให้ช่องว่างในการแปรรูปเพิ่มสูงขึ้นตามค่าเวลาเปิดและกระแสไฟฟ้า

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจากค่าของตัวแปรที่มีผลต่อช่องว่างในการแปรรูป พบว่าเป็นค่าตัวแปรที่มีระดับเดียวกันกับการให้ค่าสูงสุดของอัตราการขจัดเนื้องาน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Habib. 2009 [15] ที่ให้ข้อสรุปว่าค่าของช่องว่างการแปรรูปเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราการขจัดเนื้องาน กล่าวคือ เมื่อค่าอัตราการขจัดเนื้องานเพิ่มสูงขึ้น อนุภาคของเศษโลหะ (Debris) ที่หลุดออกมาจากเนื้อวัสดุก็จะมีมากขึ้นตาม ถึงแม้ว่าเศษโลหะจะถูกขจัดออกไปโดยสารไดอิเล็กทริกอย่างต่อเนื่องในช่วงของเวลาปิด (Pulse Off-time) แต่เศษโลหะบางส่วนที่ถูกขจัดออกไปไม่หมดจะสะสมอยู่ในช่องว่างการแปรรูป (Machining Gap) เมื่อถึงช่วงเวลาปล่อยประจุไฟฟ้า (Pulse On-time) เศษโลหะซึ่งที่มีคุณสมบัตินำไฟฟ้าก็จะเป็นตัวเชื่อมให้เกิดการอาร์คกันระหว่างผนังอิเล็กโทรดกับผนังรูเจาะ (Secondary Spark) ส่งผลให้ค่าของช่องว่างในการแปรรูปเพิ่มสูงขึ้น [60] จากรูปที่ 4.8 (b-c) แสดงให้เห็นว่าการหมุนของอิเล็กโทรดมีอิทธิพลต่อการลดลงของช่องว่างในการแปรรูปเนื่องจากเมื่ออิเล็กโทรดหมุนจะเกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางทำให้สารไดอิเล็กทริกสามารถพัดพาเอาอนุภาคของเศษโลหะออกจากช่องว่างในการแปรรูปได้ดียิ่งขึ้น [18] ซึ่งลดการเกิดการอาร์คกันระหว่างผนังอิเล็กโทรดกับผนังรูเจาะ เป็นสาเหตุให้ค่าช่องว่างในการแปรรูปลดลงจากการศึกษาพื้นผิวแสดงผลกระทบร่วมที่มีผลต่อช่องว่างในการแปรรูป แสดงให้เห็นว่าค่าช่องว่างในการ

แปรรูปต่ำสุดสามารถได้จากการปรับค่าเวลาเปิดที่ 50 μs เวลาปิด 2 μs ค่ากระแสไฟฟ้าที่ 9 A และการหมุนของอิเล็กโทรดที่ 70 rpm



รูปที่ 4.8 พื้นผิวแสดงผลกระทบร่วมที่มีผลต่อช่องว่างในการแปรรูป (a) ผลกระทบร่วมระหว่างเวลาเปิดกับกระแสไฟฟ้า (b) ผลกระทบร่วมระหว่างเวลาปิดกับการหมุนของอิเล็กโทรด (c) ผลกระทบร่วมระหว่างกระแสไฟฟ้ากับการหมุนของอิเล็กโทรด

ผลการศึกษาผลกระทบของตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการแปรรูปสีกโดยใช้วิธีการทางสถิติที่เรียกว่าวิธีพื้นผิวผลตอบสนอง (RSM) และอาศัยการออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง (Central Composite Design : CCD) เป็นการออกแบบการทดลองโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรอันประกอบไปด้วย เวลาเปิด เวลาปิด กระแสไฟฟ้าและการหมุนของอิเล็กโทรด ซึ่งแต่ละตัวแปรถูกกำหนดให้มีค่าความแตกต่าง 3 ระดับ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการแปรรูปอย่างมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นัยสำคัญที่ ีระดับความเชื่อมั่น 95% ($\alpha = 0.05$) ได้แก่ อัตราการขจัดเนื้องาน (MRR) อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR) และช่องว่างในการแปรรูป โดยใช้วิธีการฉีดสารไดอิเล็กทริกด้านข้างแบบปกติ (Conventional Side Flushing : sf) สามารถสรุปผลได้ตามตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานและความแม่นยำในการแปรรูป

Factors, Symbol	MRR	EWR	GC
	Significance	Significance	Significance
Pulse On-time, A	✓	✓	✓
Pulse Off-time, B			
Current, C	✓	✓	✓
Electrode Rotation, D		✓	
A x A		✓	
C x C	✓		
A x C	✓	✓	
B x C		✓	
B x D			✓
C x D			✓

4.2.4 ผลการวิเคราะห์ค่าตัวแปรที่เหมาะสมในกระบวนการแปรรูปลึกลับแบบหลายวัตถุประสงค์ โดยการใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจ

วิธีการฟังก์ชันความพึงพอใจเป็นวิธีหนึ่งที่ยอมรับมากที่สุดในการหาค่าที่เหมาะสมของผลตอบที่มากกว่าหนึ่งผลตอบ (Multi-Response Optimization) เนื่องจากค่าผลตอบในการทดลองนี้มี 3 ผลตอบ ได้แก่ อัตราการขจัดเนื้องาน (MRR) อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR) และช่องว่างในการแปรรูป (GC) จึงนำหลักการของฟังก์ชันความพึงพอใจมาหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการแปรรูปลึกลับ โดยการใช้คำสั่งของ Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab 19 ดังแสดงในตารางที่ 4.6 ซึ่งสามารถกำหนดค่าเป้าหมาย (Goal) ขอบเขตบน (Upper) ขอบเขตล่าง (Lower) ของค่าผลตอบทั้ง 3 ตัวตามค่าตัวแปรที่เลือกใช้ นอกจากนี้ในการทดลองยังทำการกำหนดค่าการถ่วงน้ำหนัก (Weight) เพื่อเป็นการคัดกรองค่าเป้าหมายสำหรับผลตอบที่เน้นความสำคัญ ซึ่งในการทดลองนี้ค่าการถ่วงน้ำหนักของช่องว่างในการแปรรูป (GC) จะเท่ากับ 1.2 เพื่อให้มีความสำคัญกับเป้าหมายมากขึ้น การเพิ่มน้ำหนักต้องการการตอบสนองเพื่อขยับเข้าใกล้เป้าหมายตามที่ต้องการให้มากที่สุด สำหรับค่าอัตราการขจัดเนื้อ

งานและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดเท่ากับ 1 ตามลำดับ ซึ่งเป็นการให้ความสำคัญกับเป้าหมายและขอบเขตที่เท่ากันหรือเป็นการตั้งค่าที่เป็นกลาง [53]

สำหรับกรณีของค่าเป้าหมาย (Goal) ที่คาดหวังของผลตอบสำหรับช่องว่างการแปรรูปถูกกำหนดให้เป็นค่าน้อยสุด-ดีที่สุด (Minimum) เช่นเดียวกับค่าอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด ส่วนอัตราการขจัดเนื้องานกำหนดให้เป็นมากที่สุด-ดีที่สุด (Maximum) ดังแสดงในสมการที่ 4.4 – 4.6 ตามลำดับ

Objective functions:

$$\text{Maximize } MRR = f(t_{on}, t_{off}, I, N) \quad (4.4)$$

$$\text{and } \text{Minimize } EWR \text{ and } GC = f(t_{on}, t_{off}, I, N) \quad (4.5)$$

Subject to,

$$\begin{aligned} 50 &\leq t_{on} \leq 150 \\ 2 &\leq t_{off} \leq 20 \\ 9 &\leq I \leq 15 \\ 0 &\leq N \leq 70 \end{aligned} \quad (4.6)$$

ตารางที่ 4.6 เงื่อนไขสำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการแปรรูปลึกสำหรับการฉีดสารไดอิเล็กทริกด้านข้างแบบปกติ

Output Response	Goal	Lower (L_i)	Upper (U_i)	Weight (w)	Importance
Pulse On-time (μ s)	In range	50	150	-	-
Pulse Off-time (μ s)	In range	2	20	-	-
Current (A)	In range	9	15	-	-
Electrode Rotation (rpm)	In range	0	70	-	-
GC (mm)	Minimum	0.1545	0.238	1.2	1
EWR (%)	Minimum	0.0840	3.056	1.0	1
MRR (mm^3/min)	Maximum	4.636	18.9650	1.0	1

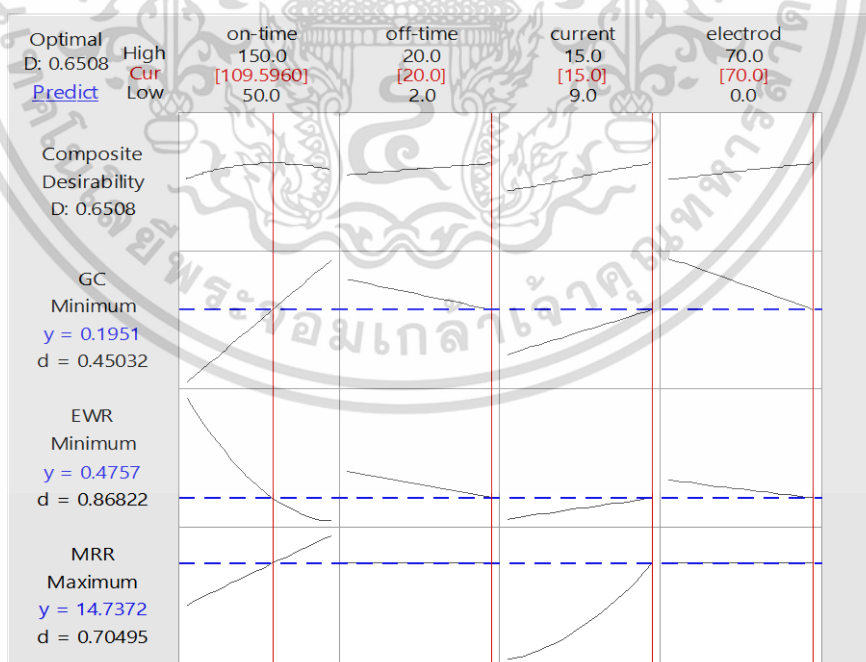
ผลการศึกษาเพื่อหาค่าตัวแปรที่เหมาะสม (Optimization) ในกระบวนการแปรรูปลึกแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Response Optimization) โดยการใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability Function) แสดงในตารางที่ 4.7 เปิดเผยให้เห็นว่าจากการวิเคราะห์หาค่าตัวแปรที่เหมาะสมด้วยวิธีการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Response Optimizer ให้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการแปรรูปสำหรับการกัดสารไดอิเล็กทริกด้านข้างแบบปกติ ดังนี้ ตัวแปรเวลาเปิด (Pulse On-time) เท่ากับ 100 μs ตัวแปรเวลาปิด (Pulse Off-time) เท่ากับ 20 μs กระแสไฟฟ้า (Current) เท่ากับ 15 A และ การหมุนของอิเล็กโทรด (Electrode Rotation) เท่ากับ 70 rpm ซึ่งจากตัวแปรที่เหมาะสมที่ได้ให้ค่าความพึงพอใจแบบเดี่ยว (Individual Desirability) เท่ากับ 0.7049, 0.8682, และ 0.4503 สำหรับอัตราการขจัดเนื้องาน อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด และช่องว่างการแปรรูป ตามลำดับ โดยค่าความพึงพอใจแบบเดี่ยวสามารถหาค่าความพึงพอใจรวม (Combined Desirability) เท่ากับ 0.6508 ดังแสดงสรุปในรูปที่ 4.9

ตารางที่ 4.7 ข้อมูลการวิเคราะห์ผลตอบที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ผลตอบหลายตัวแปรโดยการใช้วิธีฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability Function)

Response	Optimal Machining Condition				Value	Desirability	
	pulse on-time (μs)	pulse off-time (μs)	Current (A)	Electrode Rotation (rpm)		Individual Desirability	Combined Desirability
MRR (mm^3/min)	100	20	15	70	14.166	0.7049	0.6508
EWR (%)	100	20	15	70	0.622	0.8682	
GC (mm.)	100	20	15	70	0.191	0.4503	



รูปที่ 4.9 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมและระดับค่าความพึงพอใจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการยืนยันและเปรียบเทียบผลระหว่างค่าที่ได้จากการพยากรณ์ (Prediction) และการทดสอบจริง (Experiment) จำนวน 5 ครั้ง โดยการใช้คาร์ระดับตัวแปรที่ได้จากการหาค่าที่เหมาะสมในกระบวนการแปรรูปลึงแบบหลายวัตถุประสงค์โดยการใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจแสดงในตารางที่ 4.8 ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของอัตราการขจัดเนื้องานมีค่าเท่ากับ 7.286 % อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.856 % และช่องว่างการแปรรูปมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 5.338 % ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยทั้ง 3 ผลตอบมีค่าต่ำ นั้นแสดงว่าการออกแบบการทดลองโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความเหมาะสมและเชื่อถือได้ นอกจากนี้จากการตรวจสอบข้อมูลของช่วงความเชื่อมั่นสำหรับผลการทดสอบจริง (Experiment) และค่าคาดการณ์ (Prediction) แสดงให้เห็นว่าอยู่ในช่วงของการทำนาย 95% PI (Prediction Interval : PI) ดังแสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.8 ผลการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการพยากรณ์และการทดลองจริงโดยการใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการฉีดสารไดอิเล็กทริกด้านข้างแบบปกติ

Exp. No.	Parameters				Material Removal Rate (mm ³ /min)			Electrode Wear Ratio (%)			Gap Clearance (mm)		
	Pulse On-time (μs)	Pulse Off-time (μs)	Current (A)	Electrode Rotation (rpm)	EXP.	Prediction	Error (%)	EXP.	prediction	Error (%)	EXP.	Prediction	Error (%)
1	100	20	15	70	15.100	14.166	6.59	0.620	0.622	-0.32	0.200	0.191	4.71
2	100	20	15	70	15.352	14.166	8.37	0.675	0.622	8.52	0.204	0.191	6.80
3	100	20	15	70	14.851	14.166	4.83	0.639	0.622	2.73	0.194	0.191	1.57
4	100	20	15	70	14.961	14.166	5.61	0.660	0.622	6.10	0.197	0.191	3.14
5	100	20	15	70	15.729	14.166	11.03	0.581	0.622	-6.59	0.211	0.191	10.47
Average							7.286			4.856			5.338

ตารางที่ 4.9 ช่วงการทำนาย 95% PI (Prediction Interval : PI) ของการพยากรณ์และการทดสอบจริง

Response	95 % PI	Prediction	Experiment
MRR	10.803, 17.528	14.166	15.100
EWR	0.163, 1.080	0.622	0.620
GC	0.175, 0.207	0.191	0.200

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการศึกษาอิทธิพลของการออกแบบการฉีตสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโตรดแบบหลายจุดที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในกระบวนการแปรรูปลึกลับ

ผลการศึกษาอิทธิพลของการไหลเวียนของสารไดอิเล็กทริกที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการแปรรูปลึกลับ โดยการประเมินค่าจากเวลาในการแปรรูป (Working Time : WT) อัตราการขจัดเนื้องาน (MRR) และค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) จากการทดลองกัดเซาะวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าแม่พิมพ์ AISI P20 ซึ่งทำการกัดเซาะด้วยอิเล็กโตรดทองแดงลึกลับ 50 mm โดยควบคุมสภาวะแวดล้อมตามรูปที่ 3.11 สามารถแสดงผลได้ดังตารางที่ 4.10 ถึง 4.12 ตามลำดับ ซึ่งแสดงผลดังต่อไปนี้

4.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการฉีตสารไดอิเล็กทริกกับความลึกในการแปรรูปที่มีผลต่อเวลาในการแปรรูป

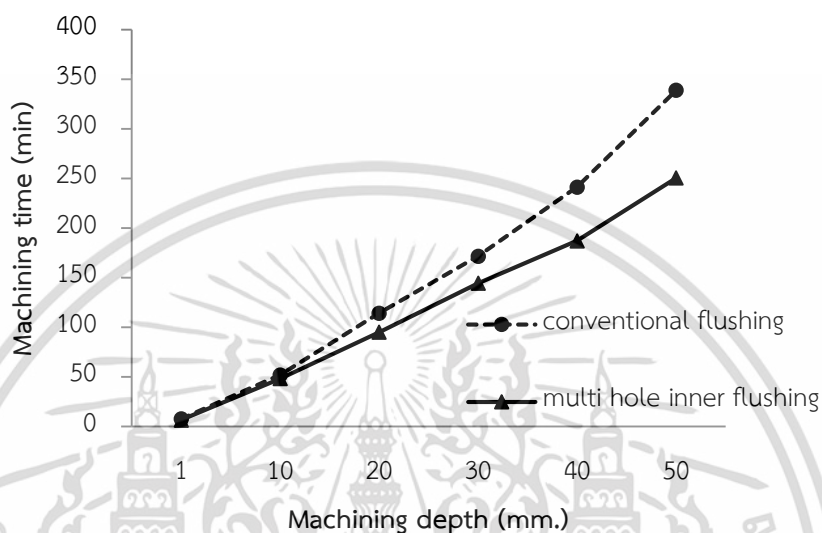
ในการทดลองนี้เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการฉีตสารไดอิเล็กทริกกับความลึกในการแปรรูปที่มีผลต่อเวลาในการแปรรูป ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบกันระหว่างอิเล็กโตรดที่ฉีตสารไดอิเล็กทริกจากด้านข้างกับการฉีตสารไดอิเล็กทริกผ่านศูนย์กลางอิเล็กโตรด จากผลการทดลองในตารางที่ 4.10 สามารถสรุปรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการฉีตสารไดอิเล็กทริกกับความลึกในการแปรรูปที่มีผลต่อเวลาในการแปรรูปในรูปที่ 4.10 จากรูปแสดงให้เห็นว่าเมื่อระดับความลึกของการแปรรูปเพิ่มขึ้นการฉีตสารไดอิเล็กทริกเข้าสู่ช่องว่างการแปรรูปเพื่อขจัดเศษโลหะที่หลุดออกจากการกัดเซาะเป็นสิ่งจำเป็นมากที่สุด เนื่องจากเมื่อสารไดอิเล็กทริกสามารถขจัดเศษที่หลุดออกมาจากการแปรรูปไม่ให้เข้ามาขัดขวางการปล่อยกระแสไฟฟ้าบริเวณช่องว่างการสปาร์คได้อย่างมีประสิทธิภาพและสมบูรณ์แบบ ส่งผลให้กระบวนการสปาร์คมีความรุนแรงและสม่ำเสมออย่างต่อเนื่อง [61] โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความลึก 50 mm อิเล็กโตรดที่ฉีตสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางสามารถลดเวลาในการแปรรูปจาก 339.01 min เป็น 250.53 min คิดเป็น 26.10 %

ตารางที่ 4.10 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการฉีตสารไดอิเล็กทริกกับความลึกในการแปรรูปที่มีผลต่อเวลาในการแปรรูป

ความลึกในการแปรรูป (mm)	เวลาการแปรรูปจากการฉีตสารไดอิเล็กทริกด้านข้าง (min)	เวลาการแปรรูปจากการฉีตสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลาง (min)
1	7.63	6.53
10	52.13	48.3
20	114.23	95.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

30	171.73	144.5
40	241.35	187.23
50	339.01	250.53



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการฉีดสารไดอิเล็กทริกกับความลึกในการแปรรูปที่มีผลต่อเวลาในการแปรรูป

4.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการฉีดสารไดอิเล็กทริกกับการหมุนของอิเล็กโตรดที่มีผลต่ออัตราการขจัดเนื้องาน

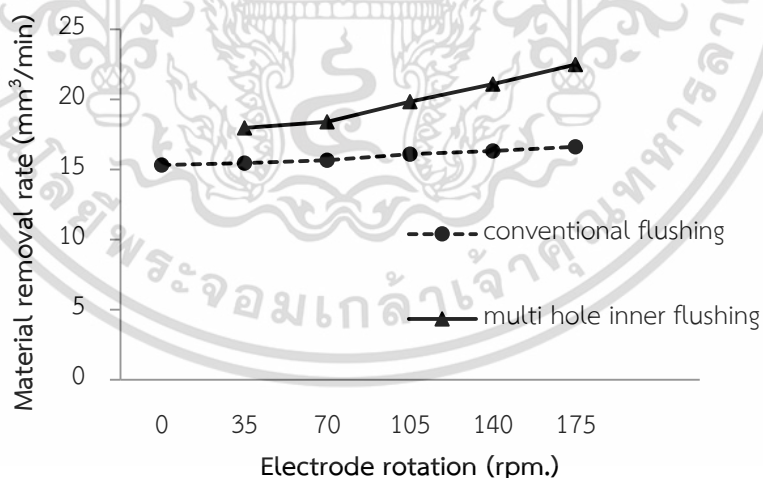
ในการทดลองนี้เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการฉีดสารไดอิเล็กทริกกับการหมุนของอิเล็กโตรดที่มีผลต่ออัตราการขจัดเนื้องาน ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบกันระหว่างอิเล็กโตรดที่ฉีดสารไดอิเล็กทริกจากด้านข้างกับการฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านศูนย์กลางอิเล็กโตรด จากผลการทดลองในตารางที่ 4.11 สามารถสรุปรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการฉีดสารไดอิเล็กทริกกับการหมุนของอิเล็กโตรดที่มีผลต่ออัตราการขจัดเนื้องานดังแสดงในรูปที่ 4.11 ภายใต้การฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านศูนย์กลางของอิเล็กโตรดควบคู่กับการหมุนของอิเล็กโตรดที่ 175 rpm อัตราการขจัดเนื้องานมีค่าสูงสุดที่ 22.485 mm³/min จาก 16.621 mm³/min คิดเป็น 35.28 % ซึ่งสามารถตั้งข้อสันนิษฐานได้ว่า ผลจากการหมุนของอิเล็กโตรดควบคู่กับการฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านศูนย์กลางอิเล็กโตรด อิทธิพลของการหมุนอิเล็กโตรดทำให้สารไดอิเล็กทริกสามารถไหลเข้าสู่ช่องว่างในการแปรรูปได้ดีและอาศัยแรงเหวี่ยงจากการหมุนขจัดเศษอนุภาคให้หลุดออกมาทางช่องว่างระหว่างอิเล็กโตรดกับชิ้นงานได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งส่งผลต่อ

อัตราการขจัดเนื้องานที่สูงขึ้นและในเวลาเดียวกันยังส่งผลให้กระบวนการสปาร์คในแต่ละครั้งมีเสถียรภาพเพิ่มมากขึ้นไปพร้อมๆกัน [25, 62]

ตารางที่ 4.11 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการฉีตสารไดอิเล็กทริกกับการหมุนของอิเล็กโทรดที่มีผลต่ออัตราการขจัดเนื้องาน

การหมุนของอิเล็กโทรด (rpm)	อัตราการขจัดเนื้องานจากการฉีตสารไดอิเล็กทริกด้านข้าง (mm ³ /min)	อัตราการขจัดเนื้องานจากการฉีตสารไดอิเล็กทริกผ่านศูนย์กลาง (mm ³ /min)
0	15.314	*
35	15.461	17.965
70	15.668	18.415
105	16.106	19.842
140	16.336	21.105
175	16.621	22.485

* หมายถึง ไม่สามารถทำการทดลองได้เนื่องจากสภาวะการทำงานไม่เหมาะสม



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการฉีตสารไดอิเล็กทริกกับการหมุนของอิเล็กโทรดที่มีผลต่ออัตราการขจัดเนื้องาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการฉีดสารไดอิเล็กทริกร่วมกับการหมุนของอิเล็กโตรดที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวเฉลี่ย

ในการทดลองนี้เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการฉีดสารไดอิเล็กทริกกับการหมุนของอิเล็กโตรดที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวเฉลี่ย ซึ่งในการทดลองก่อนหน้านี้นี้แสดงให้เห็นว่าการฉีดสารไดอิเล็กทริกที่เหมาะสมสามารถส่งผลต่ออัตราการขจัดเนื้องานที่เพิ่มสูงขึ้นและลดเวลาในการแปรรูปลงได้นอกจากนี้ยังส่งผลให้กระบวนการสปาร์คในแต่ละครั้งมีเสถียรภาพเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการหมุนของอิเล็กโตรดทำให้สารไดอิเล็กทริกสามารถวิ่งเข้าสู่ช่องว่างระหว่างอิเล็กโตรดกับผนังชิ้นงานได้ง่ายขึ้นและมีความรวดเร็วกว่าปกติ นอกจากนี้การหมุนของอิเล็กโตรดยังทำให้เกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางทำให้เศษโลหะที่หลุดออกมาจากการกัดเซาะถูกสารไดอิเล็กทริกพัดพาออกไปอย่างรวดเร็ว

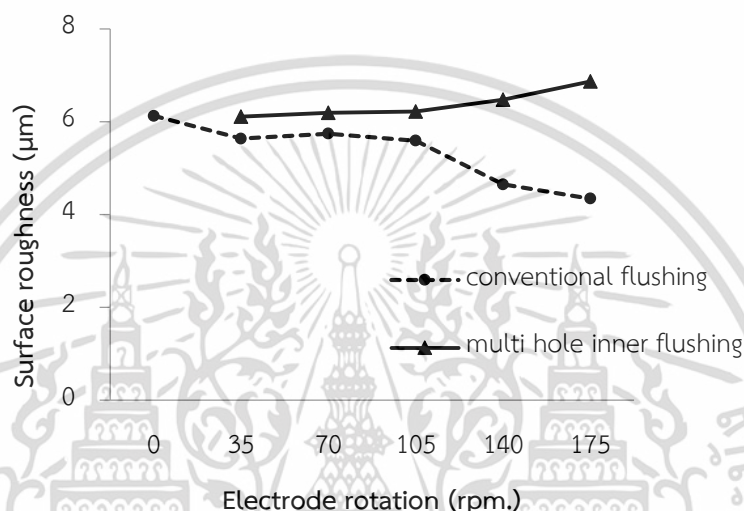
จากผลการทดลองในตารางที่ 4.12 สามารถสรุปรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการฉีดสารไดอิเล็กทริกร่วมกับการหมุนของอิเล็กโตรดที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวเฉลี่ย ดังแสดงในรูปที่ 4.12 จากรูปเห็นได้ชัดเจนว่าการหมุนของอิเล็กโตรดมีอิทธิพลต่อค่าความหยาบผิวที่ลดลง กล่าวคือเมื่อมีการฉีดสารไดอิเล็กทริกจากด้านข้างไปพร้อมกับการหมุนของอิเล็กโตรดส่งผลให้ค่าความหยาบผิวลดลงจาก $6.125 \mu\text{m}$ เป็น $4.345 \mu\text{m}$ ซึ่งเป็นผลมาจากการหมุนของอิเล็กโตรดทำให้กระแสไฟฟ้ากระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจากอิเล็กโตรดที่ฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านศูนย์กลางพบว่า ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยจากปกติแต่ให้ค่าความหยาบผิวที่ใกล้เคียงกันเมื่อพิจารณาจากการหมุนของอิเล็กโตรด ซึ่งสาเหตุดังกล่าวเป็นเพราะว่าการฉีดสารไดอิเล็กทริกที่มีความบริสุทธิ์เข้าสู่ศูนย์กลางของช่องว่างการสปาร์คอย่างต่อเนื่อง ควบคู่กับการหมุนของอิเล็กโตรด ส่งผลให้ช่องว่างการแปรรูปไม่มีสิ่งแปลกปลอมเข้ามาเจือปน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเศษโลหะที่หลุดออกมาจากการกัดเซาะซึ่งมีผลต่อความชื้นขึ้นของการสปาร์คที่ลดลง [21, 25, 61] ด้วยสาเหตุนี้จึงทำให้ในการสปาร์คของแต่ละครั้งมีเสถียรภาพสูงสุด ทำให้เกิดความรุนแรงในช่วงว่างของการสปาร์คอย่างต่อเนื่อง ทำให้ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 4.12 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการฉีดสารไดอิเล็กทริกกับการหมุนของอิเล็กโตรดที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวเฉลี่ย

การหมุนของอิเล็กโตรด (rpm)	ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยจากการฉีดสารไดอิเล็กทริกด้านข้าง (μm)	ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยจากการฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านศูนย์กลาง (μm)
0	6.125	*
35	5.637	6.11

70	5.742	6.193
105	5.593	6.219
140	4.652	6.479
175	4.345	6.867

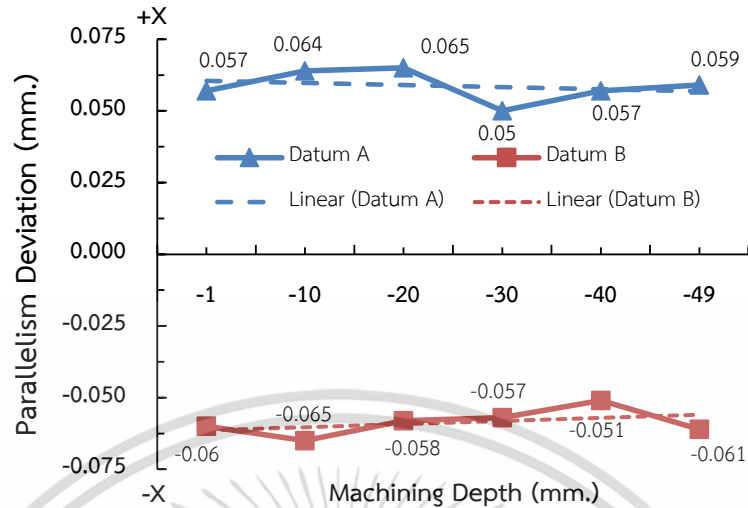
*หมายเหตุ ไม่สามารถทำการทดลองได้เนื่องจากสภาวะการทำงานไม่เหมาะสม



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการฉีดสารไดอิเล็กทริกกับการหมุนของอิเล็กโทรด ที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวเฉลี่ย

4.3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการฉีดสารไดอิเล็กทริกร่วมกับการหมุนของอิเล็กโทรดที่มีผลต่อค่าความเบี่ยงเบนของความขนานกับทิศทางการแปรรูป

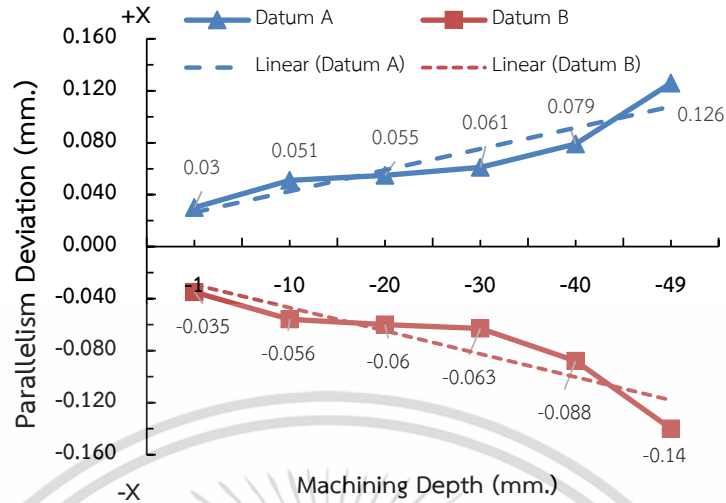
ผลการทดลองตรวจวัดค่าความเบี่ยงเบนของความขนานกับทิศทางการแปรรูป โดยการปรับปรุงระบบการไหลเวียนของสารไดอิเล็กทริกด้วยวิธีการฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรดแบบหลายจุด (Multi-aperture Flushing) จากผลการทดลองดังกล่าว ค่าความเบี่ยงเบนความขนาน (Parallelism Deviation) กับทิศทางการแปรรูป (Z Axis – Center Line) มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อพิจารณาความแตกต่างของค่าความเบี่ยงเบนความขนานที่ระดับความลึก 1 mm ถึง 50 mm จะเห็นได้ชัดเจนว่าความเบี่ยงเบนความขนานให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน นั้นหมายความว่า แนวโน้มของความเบี่ยงเบนความขนานที่เกิดขึ้นมีความเป็นเส้นตรง หรือแทบจะไม่เกิดความเบี่ยงเบนของความขนานเมื่อมีการปรับปรุงระบบการฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรดแบบหลายจุดดังแสดงในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 ผลการทดลองตรวจวัดค่าความเบี่ยงเบนของความขนานกับทิศทางการแปรรูป โดยใช้การฉีตสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางแบบหลายจุด

ในกรณีของการใช้ไอเล็กโตรดแบบแท่งตันและฉีตสารไดอิเล็กทริกด้านข้างแบบปกติ แสดงให้เห็นถึงการเกิดค่าความเบี่ยงเบนความขนานที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามทิศทางการแปรรูป (Z-Axis) และระดับความลึกเมื่อพิจารณาจากระดับความลึกที่ 1 mm ถึง 50 mm ดังแสดงในรูปที่ 4.14 จากผลการทดลองที่ได้รับสามารถอธิบายได้ตามหลักการของการกัดเซาะทางไฟฟ้า คือ เมื่อใช้ไอเล็กโตรดแบบแท่งตันและฉีตสารไดอิเล็กทริกด้านข้างแบบปกติในกระบวนการแปรรูปลึก เศษโลหะที่หลุดออกมาจากการแปรรูปจะถูกขจัดออกด้วยการฉีตสารไดอิเล็กทริกจากด้านข้างหรือในลักษณะการฉีตสารไดอิเล็กทริกจากด้านนอกไหลเวียนภายในช่องว่างการแปรรูปและไหลวนออกอย่างช้าๆ ซึ่งช่วงเวลาดังกล่าวเศษโลหะที่มีคุณสมบัติการนำไฟฟ้า อาจหลงเหลืออยู่ภายในช่องว่างการแปรรูป เพราะการฉีตสารไดอิเล็กทริกที่ไม่สัมพันธ์กับระดับความลึกในการแปรรูป ทำให้เกิดปรากฏการณ์ของการสปาร์คชำระระหว่างเศษโลหะกับวัสดุไอเล็กโตรดและวัสดุชิ้นงาน เรียกว่า “Secondary Spark” ก่อให้เกิดการเพิ่มขึ้นของค่าความเบี่ยงเบนของความขนานกับทิศทางการแปรรูป [63, 64]

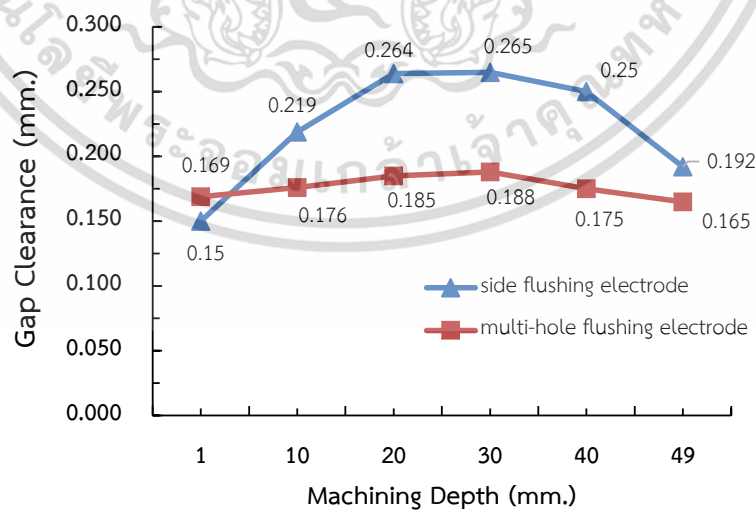
อย่างไรก็ตาม เมื่อการปรับปรุงระบบการไหลเวียนของสารไดอิเล็กทริกแบบใหม่โดยใช้การฉีตสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางแบบหลายจุด สามารถควบคุมการไหลของสารไดอิเล็กทริกและขจัดเศษโลหะจากการแปรรูปออกไปอย่างรวดเร็ว ในลักษณะของการฉีตสารจากภายในไอเล็กโตรดและขจัดเศษออกไปโดยไม่เกิดการไหลวนในช่องว่างการแปรรูป ส่งผลให้แนวโน้มของความเบี่ยงเบนความขนานที่เกิดขึ้นมีความเป็นเส้นตรงหรือแทบจะไม่เกิดความเบี่ยงเบนของความขนาน



รูปที่ 4.14 ผลการทดลองตรวจวัดค่าความเบี่ยงเบนของความขนานกับทิศทางการแปรรูปโดยการใช้อิเล็กโตรดแบบแท่งตันและฉีตสารไดอิเล็กทริกด้านข้างแบบปกติ

4.3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการฉีตสารไดอิเล็กทริกกับการหมุนของอิเล็กโตรดที่มีผลต่อค่าช่องว่างในการแปรรูป

การทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบด้านพิกัดรูปทรงสำหรับการแปรรูปลึก โดยประเมินผลจากช่องว่างการแปรรูป (Gap Clearance : GC) ระหว่างวัสดุอิเล็กโตรดกับวัสดุชิ้นงาน ภายหลังจากกัดเซาะสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของการกัดเซาะ (Depth) กับช่องว่างการแปรรูป (GC) โดยทำการตรวจสอบที่ระดับความลึก 1, 10, 20, 30, 40 และ 49 mm ตามลำดับ แสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ผลการตรวจวัดค่าช่องว่างในการแปรรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการเปรียบเทียบการปรับปรุงระบบการไหลเวียนของสารไดอิเล็กทริกแบบใหม่โดยใช้การฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางแบบหลายจุด และการใช้อิเล็กโตรดแบบแท่งตันโดยการฉีดสารไดอิเล็กทริกด้านข้างแบบปกติที่มีผลต่อช่องว่างการแปรรูป แสดงให้เห็นว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับค่าความเบี่ยงเบนของความขนานกับทิศทางการแปรรูป ซึ่งการปรับปรุงระบบการฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางแบบหลายจุด สามารถควบคุมการเกิดช่องว่างการแปรรูปขณะการสปาร์คได้มีประสิทธิภาพกว่าการใช้อิเล็กโตรดแบบแท่งตันและฉีดสารไดอิเล็กทริกด้านข้างแบบปกติ

4.4 ผลการศึกษาและวิเคราะห์ค่าตัวแปรที่เหมาะสมในกระบวนการแปรรูปลึกด้วยการฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโตรดแบบหลายจุด

ภายหลังจากศึกษาอิทธิพลของการออกแบบการฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโตรดแบบหลายจุด (Multi-aperture Inner Flushing) ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในกระบวนการแปรรูปลึก นอกจากนี้การศึกษาค่าตัวแปรที่เหมาะสมในกระบวนการแปรรูปลึกด้วยการฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโตรดแบบหลายจุด (Multi-aperture Inner Flushing) ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองเช่นเดียวกับหัวข้อ 4.2 ก็เป็นอีกหนึ่งการทดลองที่ผู้วิจัยให้ความสนใจเพื่อนำผลมาเปรียบเทียบให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการทำงานของอิเล็กโตรดที่ทำการออกแบบและสร้างขึ้น ดังนั้นในขั้นตอนนี้จะมีจำนวนของการทดลองทั้งหมด 31 การทดลอง ทำการประเมินผลลัพธ์ของการตอบสนองของตัวแปร 3 ตัว ได้แก่ อัตราการขจัดเนื้องาน (Material Removal Rate : MRR, mm³/min) อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด (Electrode wear Ratio : EWR, %) และช่องว่างในการแปรรูป (Gap Clearance : GC, mm) โดยการใช้รูปแบบการฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโตรดแบบหลายจุด (Multi-aperture Inner Flushing) ซึ่งผลการทดลองถูกแสดงในตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 ผลการทดลองจากการออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง (CCD) สำหรับรูปแบบการฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโตรดแบบหลายจุด

RUN No.	A : On-time (μ s)	B : Off-time (μ s)	C : Current (A)	D : Electrode Rotation (rpm)	MRR mm ³ /min	EWR (%)	GC mm.
1	50	2	9	0	8.52	8.691	0.176
2	150	2	9	0	10.092	0.65	0.149
3	50	20	9	0	8.112	8.704	0.121

4	150	20	9	0	8.819	0.623	0.162
5	50	2	15	0	11.998	8.133	0.149
6	150	2	15	0	17.173	2.874	0.189
7	50	20	15	0	9.83	6.766	0.134
8	150	20	15	0	16.203	1.294	0.211
9	50	2	9	70	10.319	2.857	0.112
10	150	2	9	70	10.34	0.668	0.151
11	50	20	9	70	7.366	8.742	0.115
12	150	20	9	70	9.237	0.644	0.164
13	50	2	15	70	12.89	8.368	0.139
14	150	2	15	70	21.66	1.588	0.159
15	50	20	15	70	10.054	8.664	0.119
16	150	20	15	70	18.415	1.471	0.183
17	50	10	12	35	9.694	6.5	0.136
18	150	10	12	35	14.704	0.369	0.139
19	100	2	12	35	13.687	2.176	0.151
20	100	20	12	35	12.344	1.514	0.142
21	100	10	9	35	9.833	2.481	0.146
22	100	10	15	35	17.528	2.742	0.161
23	100	10	12	0	12.712	1.302	0.165
24	100	10	12	70	13.943	1.44	0.149
25	100	10	12	35	11.47	3.024	0.159
26	100	10	12	35	11.332	2.754	0.155
27	100	10	12	35	12.026	2.911	0.160
28	100	10	12	35	11.605	3.002	0.153
29	100	10	12	35	11.739	2.776	0.157
30	100	10	12	35	11.871	2.594	0.16
31	100	10	12	35	12.103	2.613	0.154

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.1 ผลการศึกษาค่าอัตราการขจัดเนื้องาน

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของแบบสมการถดถอยของพารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญต่อการตอบสนองของอัตราการขจัดเนื้องานแสดงในตารางที่ 4.14 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า อัตราการขจัดเนื้องานมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับเวลาเปิด (A) เวลาปิด (B) กระแสไฟฟ้า (C) การหมุนของอิเล็กทรอนิกส์ (D) และค่าปฏิสัมพันธ์ร่วม (Interaction) ระหว่างเวลาเปิดกับกระแสไฟฟ้า (AC) ซึ่งมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับผลของค่า P-value ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($\alpha = 0.05$) โดยข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์มีค่าความน่าเชื่อถือที่ R^2 เท่ากับ 92.64 %

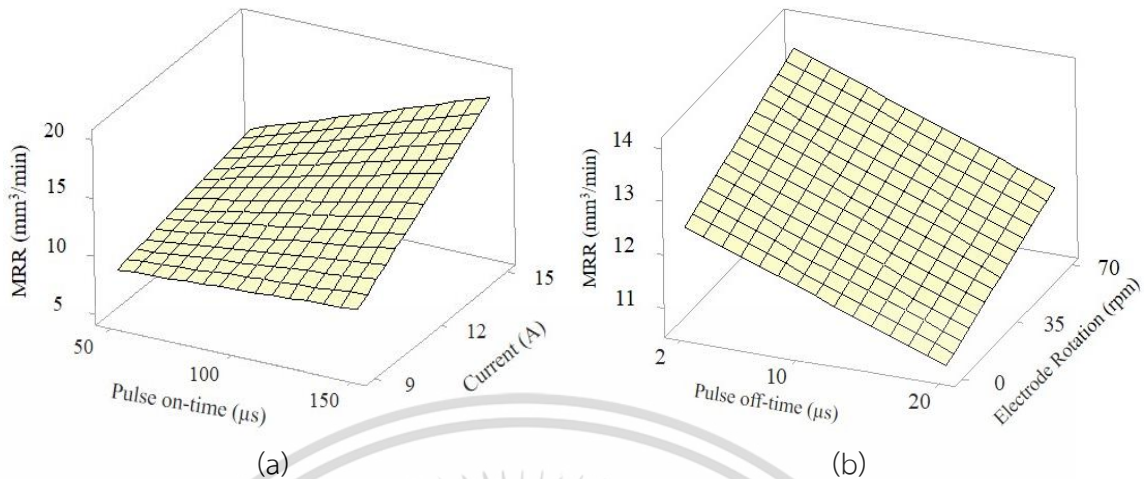
สำหรับการประมาณค่าอัตราการขจัดเนื้องานโดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยโดยเป็นการนำค่าของเวลาเปิด (A) เวลาปิด (B) กระแสไฟฟ้า (C) การหมุนของอิเล็กทรอนิกส์ (D) และค่าปฏิสัมพันธ์ร่วม (Interaction) ระหว่างเวลาเปิดกับกระแสไฟฟ้า (AC) สามารถสร้างสมการทำนายได้ผลดังสมการที่ 4.7

ตารางที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในรูปแบบสมการถดถอยของพารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญต่อการตอบสนองของอัตราการขจัดเนื้องานสำหรับการฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กทรอนิกส์แบบหลายจุด

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F-value	P-value
Model	295.459	5	59.092	62.89	<0.001
A	79.632	1	79.632	84.76	<0.001
B	15.127	1	15.127	16.10	<0.001
C	156.722	1	156.722	166.81	<0.001
D	6.438	1	6.438	6.85	0.015
AC	37.540	1	37.540	39.96	<0.001
Error	23.488	25	0.940		
Total	318.948	30			
	$R^2 = 92.64\%$	$R^2(\text{adj}) = 91.16\%$			

$$MRR_{mf} = 8.90 - 0.0805 A - 0.1016 B - 0.038 C + 0.01709 D + 0.01021 AC \quad (4.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 พื้นผิวแสดงผลกระทบร่วมที่มีผลต่ออัตราการขจัดเนื้องาน

(a) ความสัมพันธ์ร่วมระหว่างเวลาเปิดกับกระแสไฟฟ้า

(b) ความสัมพันธ์ร่วมระหว่างเวลาปิดกับการหมุนของอิเล็กโทรดที่มีผลต่ออัตราการขจัดเนื้องาน

ผลกระทบร่วมระหว่างเวลาเปิด (Pulse On-time) กับกระแสไฟฟ้า (Current) และเวลาปิด (Pulse Off-time) กับการหมุนของอิเล็กโทรด (Electrode Rotation) ที่มีผลต่ออัตราการขจัดเนื้องาน (Material Removal Rate) แสดงในรูปที่ 4.16 (a) และ (b) ตามลำดับ พบว่า อัตราการขจัดเนื้องานมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับการปรับค่าเวลาเปิดและกระแสไฟฟ้า เมื่อค่าเวลาเปิดและค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น (150 μs Pulse On-time, 15 A Current) ส่งผลให้อัตราการขจัดเนื้องานเพิ่มสูงขึ้นตาม รูปที่ 4.16 (b) แสดงให้เห็นว่าระดับของค่าเวลาปิดที่ต่ำ (2 μs) มีความสัมพันธ์ร่วมกับการหมุนของอิเล็กโทรดที่ระดับสูง (70 rpm) ส่งผลต่อค่าอัตราการขจัดเนื้องานมีค่าเพิ่มสูงขึ้น กรณีดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีของความถี่ในการสปาร์ค (Frequency) ดังแสดงในสมการที่ 2.2 กล่าวคือเวลาเปิดสูง เวลาปิดต่ำ จะทำให้เกิดความถี่ในการสปาร์คต่ำ ซึ่งส่งผลต่อค่าความหนาผิวและอัตราการขจัดเนื้องานที่สูง เนื่องจากเวลาปล่อยประจุที่ยาวนานโดยมีค่าเวลาปิดต่ำ (150 μs Pulse On-time, 2 μs Pulse Off-time) ทำให้ความร้อนที่เกิดจากการอาร์คกระจายตัวเป็นแอ่งกว้างและลึก ตลอดจนส่งผลให้เกิดเป็นชั้นการหลอมเหลวและแข็งตัวใหม่ที่เรียกว่า Recast ซึ่งเป็นเหตุให้บริเวณดังกล่าวได้รับผลกระทบที่เกิดจากความร้อน (HAZ : Heat Affected Zone) ลึกลงไปในเนื้องาน ในทางกลับกันเมื่อปรับค่าเวลาเปิดต่ำ เวลาปิดสูง (50 μs Pulse On-time, 20 μs Pulse Off-time) จะทำให้เกิดความถี่ในการสปาร์คที่สูง ส่งผลให้การหลอมละลายบนเนื้อวัสดุเมื่อเกิดการสปาร์คเป็นแอ่งที่มีความกว้างและความลึกที่ลดลง ส่งผลให้ความหนาผิวและอัตราการขจัดเนื้องานลดต่ำลง [1] นอกจากนี้อิทธิพลของการหมุนอิเล็กโทรดทำให้สารไดอิเล็กตริกสามารถไหลเข้าสู่ช่องว่างในการแปรรูปได้ดีและอาศัยแรงเหวี่ยงจากการหมุนขจัดเศษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนุภาคให้หลุดออกมาทางช่องว่างระหว่างอิเล็คโตรดกับชิ้นงานได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลต่ออัตราการขจัดเนื้องานที่สูงขึ้น ในเวลาเดียวกันยังส่งผลให้กระบวนการสปาร์คในแต่ละครั้งมีเสถียรภาพเพิ่มมากขึ้น

จากการศึกษาพื้นผิวแสดงผลกระทบร่วมระหว่างเวลาเปิดกับกระแสไฟฟ้าและเวลาปิดกับการหมุนของอิเล็คโตรดที่มีผลต่ออัตราการขจัดเนื้องานแสดงให้เห็นว่าค่าอัตราการขจัดเนื้องานสูงสุดสามารถได้จากการปรับค่าเวลาเปิดที่ 150 μs ค่าเวลาปิดที่ 2 μs ค่ากระแสไฟฟ้าที่ 15 A และการหมุนของอิเล็คโตรดที่ 70 rpm ซึ่งผลที่ได้เป็นไปในลักษณะเดียวกันกับการฉีดสารไดอิเล็กทริกด้านข้างแบบปกติ อย่างไรก็ตามการฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็คโตรดแบบหลายจุดให้ค่าอัตราการขจัดเนื้องานสูงสุด 21.660 mm^3/min เนื่องจากตัวแปรของเวลาปิดและการหมุนของอิเล็คโตรดเข้ามามีอิทธิพลร่วมกัน ในขณะที่การฉีดสารไดอิเล็กทริกด้านข้างแบบปกติให้ค่าอัตราการขจัดเนื้องานสูงสุด 18.965 mm^3/min ที่ระดับความลึก 50 mm

4.4.2 ผลการศึกษาค่าอัตราการสึกหรอของอิเล็คโตรด

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของแบบสมการถดถอยของพารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญต่อการตอบสนองของอัตราการสึกหรอของอิเล็คโตรดแสดงในตารางที่ 4.15 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอัตราการสึกหรอของอิเล็คโตรดมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับเวลาเปิด (A) เวลาเปิดกำลังสอง (A^2) และค่าปฏิสัมพันธ์ร่วม (Interaction) ระหว่างเวลาปิดกับกระแสไฟฟ้า (BC) และเวลาปิดกับการหมุนของอิเล็คโตรด (BD) ซึ่งมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับผลของค่า P-value ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($\alpha = 0.05$) โดยข้อมูลที่น่าวิเคราะห์มีค่าความน่าเชื่อถือที่ R^2 เท่ากับ 91.31 %

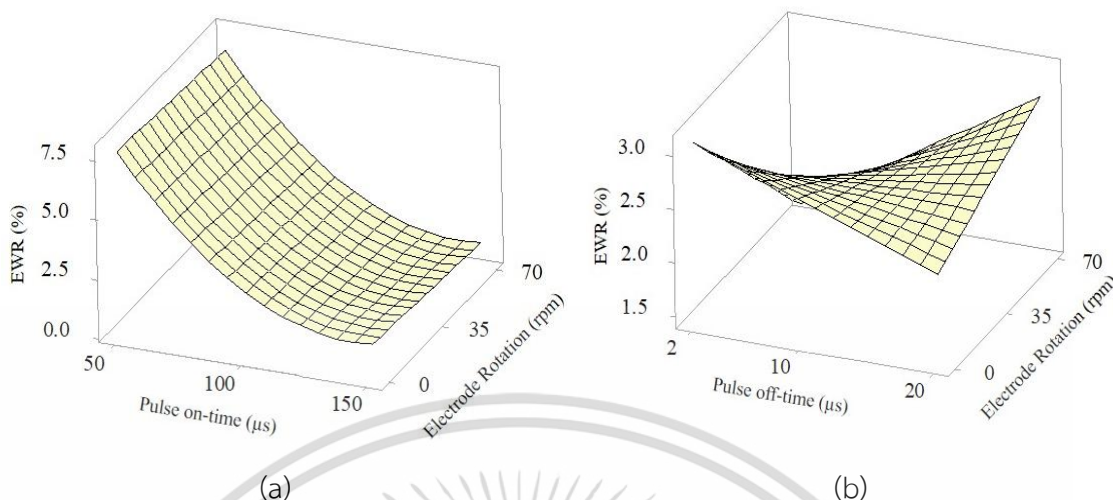
สำหรับการประมาณค่าอัตราการสึกหรอของอิเล็คโตรดโดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยโดยเป็นการนำค่าของเวลาเปิด (A) เวลาปิด (B) กระแสไฟฟ้า (C) การหมุนของอิเล็คโตรด (D) เวลาเปิดกำลังสอง (A^2) และค่าปฏิสัมพันธ์ร่วม (Interaction) ระหว่างเวลาเปิดกับการหมุนของอิเล็คโตรด (AD) เวลาปิดกับกระแสไฟฟ้า (BC) เวลาปิดกับการหมุนของอิเล็คโตรด (BD) และกระแสไฟฟ้ากับการหมุนของอิเล็คโตรด (CD) สามารถสร้างสมการทำนายได้ผลดังสมการที่ 4.8

ตารางที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในรูปแบบสมการถดถอยของพารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญต่อการตอบสนองของอัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์สำหรับการฉีดสารไดอิเล็กตริกผ่านแกนกลางอิเล็กทรอนิกส์แบบหลายจุด

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F-value	P-value
Model	227.120	9	25.234	32.82	<0.001
A	182.049	1	182.049	176.89	<0.001
B	0.343	1	0.343	0.330	0.570
C	3.312	1	3.312	3.220	0.087
D	1.110	1	1.110	1.08	0.311
A ²	26.896	1	26.896	26.13	<0.001
AD	0.420	1	0.420	0.410	0.530
BC	4.560	1	4.560	4.83	0.048
BD	4.976	1	4.976	3.78	0.039
CD	2.874	1	2.874	2.79	0.110
Error	32.881	21	1.029		
Total	248.715	30			
	R ² = 91.31%	R ² (adj) = 87.59%			

$$\text{EWR}_{\text{mf}} = 14.80 - 0.2181 A + 0.190 B + 0.219 C - 0.0843 D + 0.000756 A^2 + 0.000093 AD - 0.01976 BC + 0.001769 BD + 0.00404 CD \quad (4.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 พื้นผิวแสดงผลกระทบร่วมที่มีผลต่ออัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด

- (a) ความสัมพันธ์ร่วมระหว่างเวลาเปิดกับการหมุนของอิเล็กโทรด
 (b) ความสัมพันธ์ร่วมระหว่างเวลาปิดกับการหมุนของอิเล็กโทรด

ผลกระทบร่วมระหว่างเวลาเปิด (Pulse On-time) กับการหมุนของอิเล็กโทรด (Electrode Rotation) และเวลาปิด (Pulse Off-time) กับการหมุนของอิเล็กโทรด (Electrode Rotation) ที่มีผลต่ออัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (Electrode Wear Ratio) แสดงในรูปที่ 4.17 (a) และ (b) ตามลำดับ จากรูปที่ 4.17 (a) พบว่า อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดมีความสัมพันธ์เชิงผกผันกับการปรับค่าเวลาเปิด ที่การปรับค่าเวลาเปิด 150 μs อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนการหมุนของอิเล็กโทรดส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อการหมุนของอิเล็กโทรด จากรูปที่ 4.17 (b) ที่ระดับค่าเวลาปิด 2 μs อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดมีความสัมพันธ์เชิงผกผันกับการหมุนของอิเล็กโทรด (70 rpm) ซึ่งการลดลงของอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดมีผลมาจากการฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรด ทำให้ความสามารถในการขจัดเศษโลหะที่หลุดออกมาจากการแปรรูปเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากเมื่ออิเล็กโทรดหมุนจะเกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางทำให้สารไดอิเล็กทริกสามารถพัดพาเอาอนุภาคของเศษโลหะออกจากช่องว่างในการแปรรูปได้ดียิ่งขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่รอบการหมุนของอิเล็กโทรดเพิ่มสูงขึ้น (70 rpm) อย่างไรก็ตามเมื่อเวลาปิดและการหมุนของอิเล็กโทรดเพิ่มสูงขึ้น (20 μs Pulse Off-time, 70 rpm Electrode Rotation) ส่งผลให้อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จากการศึกษาพื้นผิวผลกระทบร่วมระหว่างเวลาเปิดกับการหมุนของอิเล็กโทรดและเวลาปิดกับการหมุนของอิเล็กโทรดที่มีผลต่ออัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดต่ำสุด โดยการฉีดสารไดอิเล็กทริก

ผ่านแกนกลางอิเล็กทรอนิกส์แบบหลายจุด สามารถได้จากการปรับค่าเวลาเปิดที่ 150 μ s ค่าเวลาปิดที่ 2 μ s และการหมุนของอิเล็กทรอนิกส์ที่ 70 rpm

4.4.3 ผลการศึกษาค่าช่องว่างในการแปรรูป

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของแบบสมการถดถอยของพารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญต่อการตอบสนองของช่องว่างในการแปรรูป แสดงในตารางที่ 4.16 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ช่องว่างในการแปรรูปมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับเวลาเปิด (A) กระแสไฟฟ้า (C) การหมุนของอิเล็กทรอนิกส์ (D) และค่าปฏิสัมพันธ์ร่วม (Interaction) ระหว่างเวลาเปิดกับเวลาปิด (AB) และเวลาเปิดกระแสไฟฟ้า (AC) ซึ่งมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับผลของค่า P-value ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($\alpha = 0.05$) โดยข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์หามีค่าความน่าเชื่อถือที่ R^2 เท่ากับ 78.34 %

สำหรับการประมาณค่าช่องว่างในการแปรรูปโดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยโดยเป็นการนำค่าของเวลาเปิด (A) กระแสไฟฟ้า (C) การหมุนของอิเล็กทรอนิกส์ (D) และค่าปฏิสัมพันธ์ร่วม (Interaction) ระหว่างเวลาเปิดกับเวลาปิด (AB) และเวลาเปิดกระแสไฟฟ้า (AC) สามารถสร้างสมการทำนายได้ผลดังสมการที่ 4.9

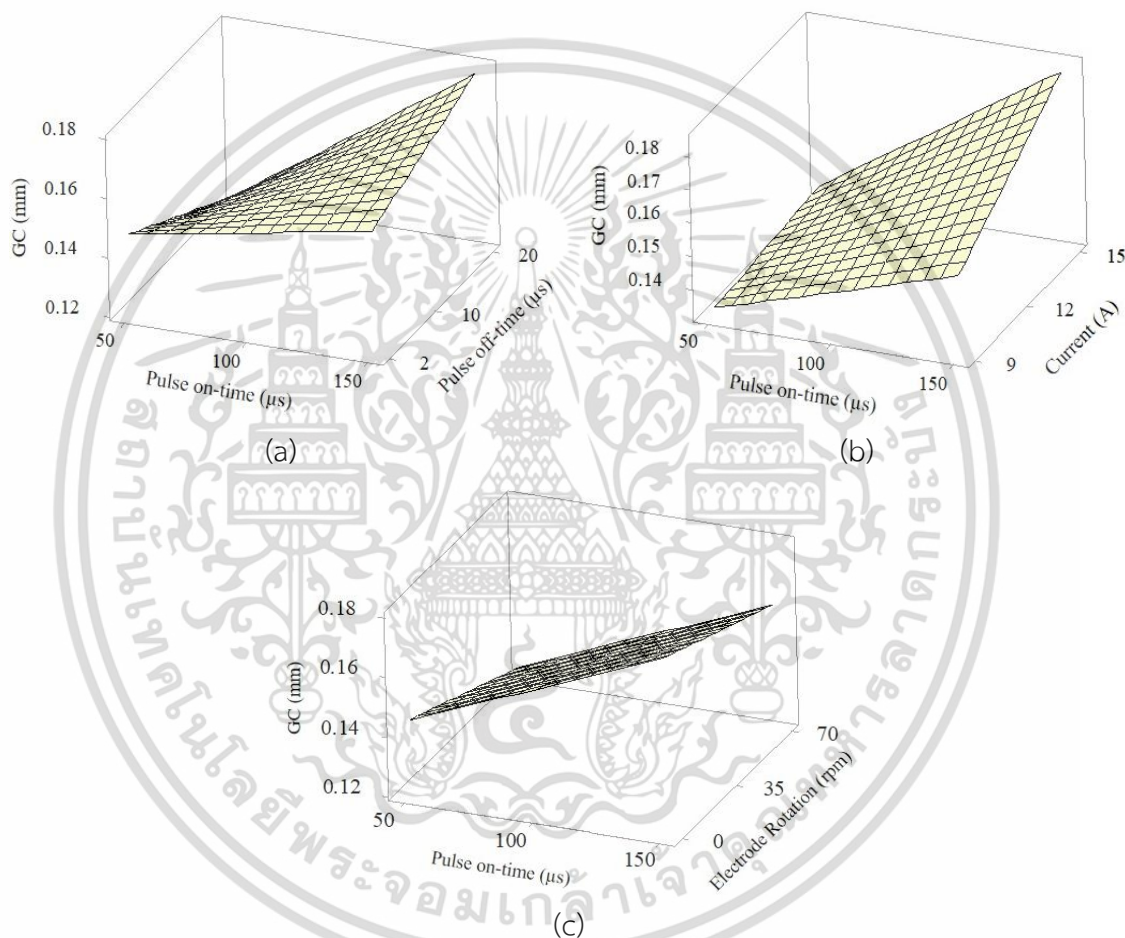
ตารางที่ 4.16 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในรูปแบบสมการถดถอยของพารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญต่อการตอบสนองของช่องว่างการแปรรูปสำหรับการฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กทรอนิกส์แบบหลายจุด

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F-value	P-value
Model	0.010194	8	0.001699	13.84	<0.001
A	0.005277	1	0.005277	43.00	<0.001
B	0.000038	1	0.000038	0.31	0.585
C	0.001217	1	0.001217	9.92	0.004
D	0.001503	1	0.001503	12.25	0.002
D ²	0.000006	1	0.000006	0.22	0.829
AB	0.001616	1	0.001616	13.16	0.001
AC	0.000619	1	0.000619	5.04	0.034
AD	0.000093	1	0.000093	0.85	0.407
Error	0.002945	22	0.000123	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Total	0.013139	30	-	-	-
	$R^2 = 78.34\%$	$R^2(\text{adj}) = 70.46\%$			

$$GC_{mf} = 0.1758 - 0.000449 A - 0.002395 B - 0.00141 C - 0.00045 D + 0.000001 D^2 + 0.000022 AB + 0.000041 AC + 0.000001 AD \quad (4.9)$$



รูปที่ 4.18 พื้นผิวแสดงผลกระทบร่วมที่มีผลต่อช่องว่างในการแปรรูป

- (a) ผลกระทบร่วมระหว่างเวลาเปิดกับเวลาปิด (b) ผลกระทบร่วมระหว่างเวลาเปิดกับกระแสไฟฟ้า
(c) ผลกระทบร่วมระหว่างเวลาเปิดกับการหมุนของอิเล็กโทรด

ผลกระทบร่วมระหว่างเวลาเปิด (Pulse On-time) กับเวลาปิด (Pulse Off-time) เวลาเปิด (Pulse On-time) กับกระแสไฟฟ้า (Current) และเวลาเปิด (Pulse On-time) กับ การหมุนของอิเล็กโทรด (Electrode Rotation) โดยการฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรดแบบหลายจุด ดัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงในรูปที่ 4.18 พบว่า ช่องว่างการแปรรูป (Gap Clearance) มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับเวลาเปิดและเวลาปิด กล่าวคือ เมื่อเวลาเปิดเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการขจัดเนื้องานเพิ่มสูงขึ้นตาม ถึงแม้ว่าค่าของเวลาปิดจะเพิ่มสูงขึ้น (150 μ s Pulse On-time, 20 μ s Pulse Off-time) แต่ความถี่ในการแปรรูปยังอยู่ในระดับต่ำ (ดังสมการที่ 2.2) นั้นหมายความว่าค่าตัวแปรดังกล่าวเป็นช่วงที่ให้ประสิทธิภาพการขจัดเนื้องานสูงซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มขึ้นของค่าช่องว่างการแปรรูป ดังแสดงในรูปที่ 4.18 (a) นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของระดับค่าเวลาเปิด (150 μ s) และค่ากระแสไฟฟ้า (15 A) ทำให้เกิดการสร้างพลังงานความร้อนและความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดการหลอมละลายและการกัดเซาะของเนื้อวัสดุเกิดขึ้นในบริเวณกว้าง เป็นเหตุให้ช่องว่างในการแปรรูปเพิ่มสูงขึ้นตามค่าเวลาเปิดและกระแสไฟฟ้า [65] ดังแสดงในรูปที่ 4.18 (b)

จากการศึกษาความสัมพันธ์ร่วมของระดับค่าเวลาเปิดและการหมุนของอิเล็กโทรด ดังแสดงในรูปที่ 4.18 (c) พบว่า การหมุนของอิเล็กโทรดที่เพิ่มสูงขึ้น (70 rpm) สามารถทำให้ค่าช่องว่างการแปรรูปลดลงเล็กน้อย ทั้งระดับค่าเวลาเปิดต่ำ (50 μ s) และระดับค่าเวลาเปิดสูง (150 μ s) เนื่องจากการหมุนของอิเล็กโทรดร่วมกับการฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรดแบบหลายจุด เป็นตัวแปรสนับสนุนการขจัดเศษโลหะออกจากช่องว่างในการแปรรูปให้มีประสิทธิภาพเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดการอาร์คกันระหว่างผนังอิเล็กโทรดกับผนังรูเจาะ (Secondary Spark) ลดน้อยลง เป็นสาเหตุให้ค่าช่องว่างในการแปรรูปลดลงตาม โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อระดับค่าความลึกเพิ่มขึ้น (50 mm) จากการศึกษาพื้นผิวแสดงผลกระทบที่มีผลต่อช่องว่างในการแปรรูป แสดงให้เห็นว่าค่าช่องว่างในการแปรรูปต่ำสุดสามารถได้จากการปรับค่าเวลาเปิดที่ 50 μ s เวลาปิด 2 μ s ค่ากระแสไฟฟ้าที่ 9 A และการหมุนของอิเล็กโทรดที่ 70 rpm ซึ่งผลของค่าตัวแปรที่ได้เป็นไปในทิศทางเดียวกันระหว่างการฉีดสารไดอิเล็กทริกด้านข้างแบบปกติกับการฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรดแบบหลายจุด อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษาผลกระทบของตัวแปรที่มีผลต่อค่าช่องว่างการแปรรูปโดยใช้วิธีการทางสถิติในการออกแบบการทดลองร่วมกับการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ให้ค่าช่องว่างการแปรรูปต่ำสุดที่ได้จากการฉีดสารไดอิเล็กทริกด้านข้างแบบปกติเท่ากับ 0.154 และ 0.112 mm สำหรับ การฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรดแบบหลายจุด ตามลำดับ ผลการศึกษาผลกระทบของตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการแปรรูปลึกโดยใช้วิธีการทางสถิติที่เรียกว่าวิธีพื้นผิวผลตอบสอง (RSM) และอาศัยการออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง (Central Composite Design : CCD) เป็นการออกแบบการทดลองโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรอันประกอบไปด้วย เวลาเปิด เวลาปิด กระแสไฟฟ้าและการหมุนของอิเล็กโทรด ซึ่งแต่ละตัวแปรถูกกำหนดให้มีค่าความแตกต่าง 3 ระดับ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการแปรรูปอย่างมีนัยสำคัญที่ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ($\alpha = 0.05$) ได้แก่ อัตราการขจัดเนื้องาน (MRR) อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR) และช่องว่างในการแปรรูป โดยการประยุกต์ใช้การฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่าน

แกนกลางอิเล็กโตรดแบบหลายจุด (Multi-aperture Flushing : mf) สามารถสรุปผลได้ตามตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17 แสดงตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานและความแม่นยำในการแปรรูป

Factors, Symbol	MRR	EWR	GC
	Significance	Significance	Significance
Pulse On-time, A	✓	✓	✓
Pulse Off-time, B	✓		
Current, C	✓		✓
Electrode Rotation, D	✓		✓
A x A		✓	
A x B			✓
A x C	✓		✓
B x C		✓	
B x D		✓	

4.4.4 ผลการวิเคราะห์ค่าตัวแปรที่เหมาะสมแบบหลายวัตถุประสงค์ โดยการใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจ โดยการประยุกต์ใช้การฉีดยาไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโตรดแบบหลายจุด

สำหรับการประยุกต์ใช้การฉีดยาไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโตรดแบบหลายจุด สามารถกำหนดค่าเป้าหมายของผลตอบช่องว่างการแปรรูป (GC) เป็นค่าต่ำสุด-ดีสุด (Minimum) ที่ช่วงพิกัดขอบเขต 0.1125 – 0.211 mm ผลตอบอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด (EWR) เป็นค่าต่ำสุด-ดีสุด (Minimum) ที่ช่วงพิกัดขอบเขต 0.369 – 8.742 % และผลตอบของอัตราการขจัดเนื้องาน (MRR) เป็นค่ามากที่สุด-ดีที่สุด (Maximum) ที่ช่วงพิกัดขอบเขต 7.366 – 21.660 (mm³/min) แสดงในตารางที่ 4.18

ตารางที่ 4.18 เงื่อนไขสำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการแปรรูปลิคสำหรับการฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโตรดแบบหลายจุด

Output Response	Goal	Lower (L_i)	Upper (U_i)	Weight (w)	Importance
Pulse On-time (μ s)	In range	50	150	-	-
Pulse Off-time (μ s)	In range	2	20	-	-
Current (A)	In range	9	15	-	-
Electrode Rotation (rpm)	In range	0	70	-	-
GC (mm)	Minimum	0.1125	0.211	1.2	1
EWR (%)	Minimum	0.3690	8.742	1.0	1
MRR (mm^3/min)	Maximum	7.366	21.660	1.0	1

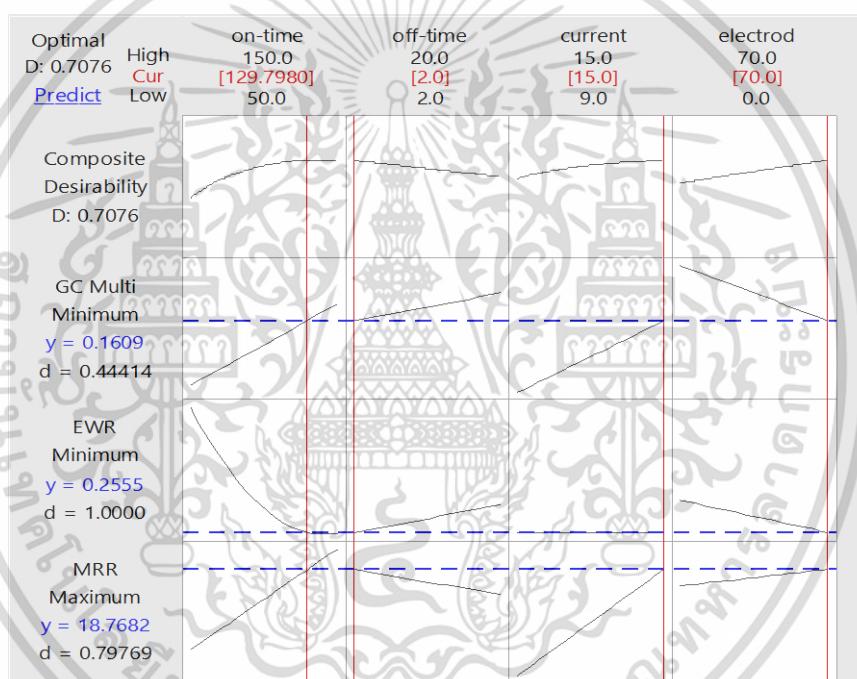
ผลการศึกษาเพื่อหาค่าตัวแปรที่เหมาะสม (Optimization) ในกระบวนการแปรรูปลิคแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Response Optimization) โดยการใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability Function) แสดงในตารางที่ 4.19 เปิดเผยให้เห็นว่าจากการวิเคราะห์หาค่าตัวแปรที่เหมาะสมด้วยวิธีการ Response Optimizer ให้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการแปรรูปลิคสำหรับการฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโตรดแบบหลายจุด ดังนี้ ตัวแปรเวลาเปิด (Pulse On-time) เท่ากับ $\sim 130 \mu$ s ตัวแปรเวลาปิด (Pulse Off-time) เท่ากับ 2μ s ตัวแปรกระแสไฟฟ้า (Current) เท่ากับ 15 A และตัวแปรการหมุนของอิเล็กโตรด (Electrode Rotation) เท่ากับ 70 rpm

อย่างไรก็ตามเครื่องกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า (EDM) ที่ใช้ในการทดลองมีข้อจำกัดของการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ โดยค่าพารามิเตอร์เวลาเปิดและเวลาปิดจะถูกปรับตั้งเป็นแบบช่วงเวลา (Step-type Controlled) ได้ดังนี้ $2, 4, 8, 10, 16, 20, 50, 80, 100, 150, 200, 400$ และ 510μ s ตามลำดับ ด้วยเหตุนี้ในการทดลองผู้วิจัยจึงเลือกใช้ค่าเวลาเปิดที่ 150μ s เนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่ใกล้เคียงกับค่าเวลาเปิดที่คาดการณ์ออกมามากที่สุด

ซึ่งจากตัวแปรที่เหมาะสมที่ได้ให้ค่าความพึงพอใจแบบเดี่ยว (Individual Desirability) เท่ากับ $0.7976, 1.000,$ และ 0.4441 สำหรับอัตราการขจัดเนื้องาน อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด และช่องว่างการแปรรูป ตามลำดับ โดยค่าความพึงพอใจแบบเดี่ยวสามารถหาค่าความพึงพอใจรวม (Combined Desirability) เท่ากับ 0.7076 ดังแสดงสรุปในรูปที่ 4.19

ตารางที่ 4.19 ข้อมูลการวิเคราะห์ผลตอบที่ที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ผลตอบหลายตัวแปรโดยใช้วิธีฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability Function)

Response	Optimal Machining Condition				Value	Desirability	
	Pulse On-time (μ s)	Pulse Off-time (μ s)	Current (A)	Electrode Rotation (rpm)		Individual Desirability	Combined Desirability
MRR (mm^3/min)	150	2	15	70	21.660	0.7976	0.7076
EWR (%)	150	2	15	70	1.588	1.000	
GC (mm.)	150	2	15	70	0.196	0.4441	



รูปที่ 4.19 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมและระดับค่าความพึงพอใจ

ผลการยืนยันและเปรียบเทียบผลระหว่างค่าที่ได้จากการพยากรณ์ (Prediction) และการทดสอบจริง (Experiment) จำนวน 5 ครั้ง โดยการใช้ค่าระดับตัวแปรที่ได้จากการหาค่าที่เหมาะสมในกระบวนการแปรรูปลิเทียมหลายวัตถุประสงค์โดยใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจแสดงในตารางที่ 4.20 ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของอัตราการขจัดเนื้องานมีค่าเท่ากับ 4.792 % อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6.505 % และช่องว่างการแปรรูปมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 19.094 % ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนของช่องว่างการแปรรูปมีค่าเฉลี่ยที่สูง ซึ่งอาจเกิดจาก 2 สาเหตุหลัก ดังนี้ ประการที่หนึ่งเมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในรูปแบบสมการถดถอยของพารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญต่อการตอบสนองของช่องว่างการแปรรูปสำหรับการฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรดแบบหลายจุด พบว่าค่า R^2 มีค่าอยู่ในเกณฑ์ต่ำ ($R^2 = 78.34\%$) เมื่อเทียบกับการฉีดสารไดอิเล็กทริกจากด้านข้างแบบปกติ ($R^2 = 90.26\%$) ส่งผลให้อาจมีความคลาดเคลื่อนของค่าที่ได้จากการพยากรณ์ (Prediction) ประการที่สองจากที่กล่าวมาข้างต้นเกี่ยวกับข้อจำกัดในการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า (EDM) ที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งจากค่าเวลาเปิดที่ได้จากการพยากรณ์เท่ากับ $\sim 130 \mu s$ แต่เครื่องสามารถปรับตั้งค่าได้อยู่ในช่วงของ 100 และ 150 μs ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้ค่าเวลาเปิดที่ 150 μs ในการทดลอง ซึ่งอาจมีผลทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้มีค่าที่สูงขึ้น ส่วนค่าพารามิเตอร์เวลาปิด กระแสไฟฟ้าและการหมุนของอิเล็กโทรดสามารถใช้ค่าเดียวกันกับค่าที่ได้จากการพยากรณ์ อย่างไรก็ตามจากการตรวจสอบข้อมูลของช่วงความเชื่อมั่นสำหรับผลการทดสอบจริง (Experiment) และค่าคาดการณ์ (Prediction) แสดงให้เห็นว่าอยู่ในช่วงของการทำนาย 95% PI (Prediction Interval : PI) ดังแสดงในตารางที่ 4.21

ตารางที่ 4.20 ผลการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการพยากรณ์และการทดลองจริงโดยการใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรดแบบหลายจุด

Exp. No.	Parameters				Material removal rate (mm ³ /min)			Electrode wear ratio (%)			Gap clearance (mm)		
	Pulse on-time (μs)	Pulse off-time (μs)	Current (A)	Electrode rotation (rpm)	EXP.	prediction	Error (%)	EXP.	prediction	Error (%)	EXP.	prediction	Error (%)
1	150	2	15	70	21.660	20.236	7.036	1.588	1.737	-8.578	0.196	0.169	15.90
2	150	2	15	70	21.421	20.236	5.855	1.637	1.737	-5.757	0.201	0.169	18.86
3	150	2	15	70	20.806	20.236	2.816	1.772	1.737	-2.014	0.206	0.169	21.80
4	150	2	15	70	21.159	20.236	4.561	1.591	1.737	-8.405	0.205	0.169	21.23
5	150	2	15	70	20.983	20.236	3.691	1.602	1.737	-7.772	0.199	0.169	17.68
Average							4.792			6.505			19.094

ตารางที่ 4.21 ช่วงการทำนาย 95% PI (Prediction Interval: PI) ของการพยากรณ์และการทดสอบจริง

Response	95 % PI	Prediction	Experiment
MRR	17.950, 22.523	20.236	21.660
EWR	-0.865, 4.341	1.737	1.588
GC	0.140, 0.197	0.169	0.196

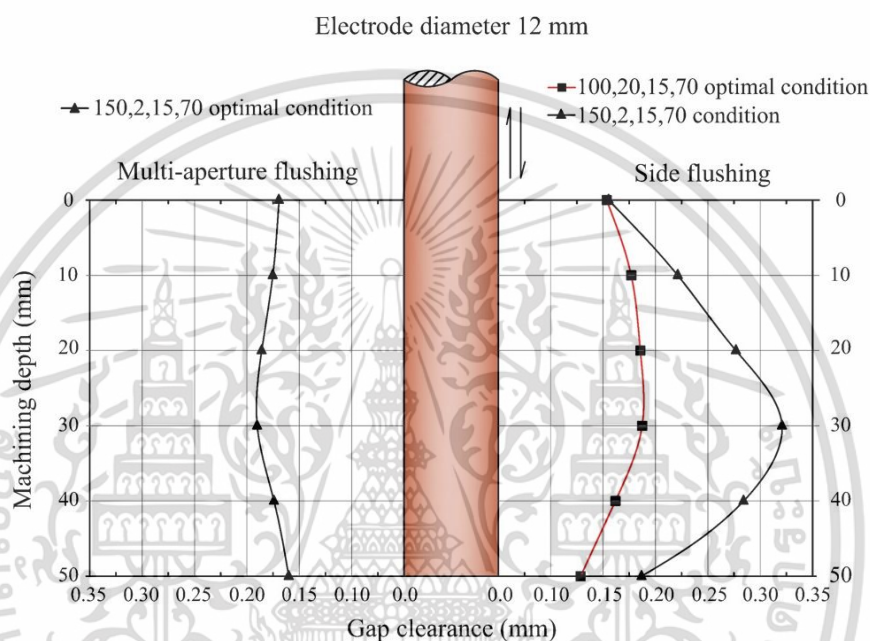
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตรวจสอบและพิจารณาผลของช่องว่างในการแปรรูป (Gap Clearance : GC) โดยการใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการพยากรณ์มาทำการทดสอบจริง (Experiment) โดยการเปรียบเทียบระหว่างการฉีดสารไดอิเล็กทริกจากด้านข้างแบบปกติ (Side Flushing, sf) กับการฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรดแบบหลายจุด (Multi-aperture Flushing, mf) แสดงในรูปที่ 4.20 จากรูปแสดงให้เห็นว่า ที่การใช้ค่าพารามิเตอร์เดียวกันคือ ค่าเวลาเปิด 150 μ s ค่าเวลาปิด 2 μ s ค่ากระแสไฟฟ้า 15 A และการหมุนของอิเล็กโทรด 70 rpm การประยุกต์ใช้การฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรดแบบหลายจุด ช่องว่างในการแปรรูป (GC) มีความเบี่ยงเบนของความเป็นทรงกระบอก (Cylindricity Deviation) ของผนังรูเจาะที่ระดับความลึกในการแปรรูป 50 mm ต่ำกว่าการฉีดสารไดอิเล็กทริกด้านข้างแบบปกติอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสาเหตุดังกล่าวสามารถอธิบายได้จากความแตกต่างของประสิทธิภาพการฉีดสารไดอิเล็กทริก โดยการฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรดแบบหลายจุด อิทธิพลของการไหลเวียนสารไดอิเล็กทริกจากภายในสู่ภายนอกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรดด้วยรูเจาะขนาดเล็ก (Multi-aperture) ควบคู่กับการหมุนอิเล็กโทรดสามารถปรับปรุงความสามารถในการขจัดเศษโลหะ (Debris) ให้ออกจากพื้นที่การกัดเซาะ (Machining Gap) อย่างสมบูรณ์ ส่งผลให้สามารถลดการเกิดการสปาร์คด้านข้าง (Secondary Spark) ระหว่างผิวอิเล็กโทรดกับผนังรูเจาะ นำไปสู่การลดลงของช่องว่างในการแปรรูป ตลอดจนสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการแปรรูปลึกด้วยกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าได้ [66, 67]

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาความเบี่ยงเบนของความเป็นทรงกระบอกของผนังรูเจาะโดยการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม (Optimization) สำหรับการฉีดสารไดอิเล็กทริกด้านข้างแบบปกติ (ค่าเวลาเปิด 100 μ s ค่าเวลาปิด 20 μ s ค่ากระแสไฟฟ้า 15 A และการหมุนของอิเล็กโทรด 70 rpm พบว่า ช่องว่างในการแปรรูปมีความเบี่ยงเบนของความเป็นทรงกระบอกของผนังรูเจาะมีลักษณะใกล้เคียงกับการฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรดแบบหลายจุด แต่ในทางกลับกันก็ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแปรรูปด้านอื่นๆ ที่ต่ำกว่า ดังแสดงผลการเปรียบเทียบในตารางที่ 4.22

นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์ผลกระทบของระดับความลึกที่มีต่อระยะเวลาการสปาร์คพบว่า ระยะเวลาสปาร์คในแต่ละระดับความลึกมีค่าช่องว่างการแปรรูปที่แตกต่างกัน โดยในตำแหน่งที่อยู่บริเวณส่วนกลาง (25-35 mm) จะมีระยะของช่องว่างการแปรรูปที่ค่อนข้างกว้างกว่าบริเวณผนังด้านบน (1-25 mm) และผนังด้านล่างบริเวณตำแหน่งปลายสุดของการสปาร์ค (35-50 mm) จากการตรวจสอบค่าของช่องว่างในการแปรรูปที่ระดับความลึก 30 mm ของการใช้ค่าพารามิเตอร์เวลาเปิด 150 μ s ค่าเวลาปิด 2 μ s ค่ากระแสไฟฟ้า 15 A และการหมุนของอิเล็กโทรด 70 rpm โดยการฉีดสารไดอิเล็กทริกด้านข้างแบบปกติ พบว่าให้ค่าสูงสุดที่ 0.319 mm ซึ่งสาเหตุของการเกิดระยะช่องว่างการแปรรูปที่แตกต่างกันในแต่ละระดับความลึกของการกัดเซาะ เป็นเหตุมาจากการเคลื่อนตัวของเศษอนุภาคโลหะที่ถูกขจัดออกโดยสาร

ไดอิเล็กทริกจะเคลื่อนที่ผ่านผนังด้านข้างของวัสดุอิเล็กโตรด ทำให้เกิดการสปาร์คระหว่างผิววัสดุอิเล็กโตรดกับผิววัสดุชิ้นงานผ่านตัวกลางที่เป็นเศษอนุภาคของโลหะ ซึ่งมีสมบัติในการนำไฟฟ้า เช่นเดียวกับวัสดุชิ้นงานและอิเล็กโตรด การสปาร์คดังกล่าวเป็นการสปาร์คซ้ำเรียกว่า Secondary Spark จึงทำให้เกิดการกัดเซาะของผนังชิ้นงานในลักษณะของการขีดผิววัสดุ ส่งผลให้ระยะของช่องว่างการแปรรูปเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.20 การเปรียบเทียบลักษณะของช่องว่างในการแปรรูประหว่างการฉีดสารไดอิเล็กทริกจากด้านข้างแบบปกติกับการฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโตรดแบบหลายจุด

ตารางที่ 4.22 แสดงผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในกระบวนการแปรรูปสีกได้แก่ อัตราการขจัดเนื้องาน (MRR) อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด (EWR) ช่องว่างในการแปรรูป (GC) และเวลาในการแปรรูป (MT) โดยการใช้ระดับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม (Optimization) สำหรับกระบวนการฉีดสารไดอิเล็กทริกในแต่ละรูปแบบ ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า กระบวนการฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโตรดแบบหลายจุดให้ค่าอัตราการขจัดเนื้องานที่ $21.660 \text{ mm}^3/\text{min}$ สูงกว่าการฉีดสารไดอิเล็กทริกด้านข้างแบบปกติที่ให้ค่าอัตราการขจัดเนื้องาน $15.729 \text{ mm}^3/\text{min}$ เช่นเดียวกับเวลาในการแปรรูปที่ระดับความลึก 50 mm กระบวนการฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโตรดแบบหลายจุดใช้เวลารวมทั้ง 250.53 min ต่ำกว่าการฉีดสารไดอิเล็กทริกด้านข้างแบบปกติที่ 339.01 min สำหรับช่องว่างการแปรรูปให้ผลไม่แตกต่างกัน จากข้อมูลดังกล่าวชี้ชัดว่า การออกแบบและประยุกต์ใช้

กระบวนการฉีตสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโตรดแบบหลายจุดสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการแปรรูปลึกได้ทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพ

อย่างไรก็ตาม การฉีตสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโตรดแบบหลายจุดให้ค่าอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดคิดเป็น 1.588 % สูงกว่าการฉีตสารไดอิเล็กทริกด้านข้างแบบปกติซึ่งให้ค่าอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดคิดเป็น 0.581 % เนื่องจากความเข้มข้นของกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่หน้าตัดที่แตกต่างกัน โดยในกรณีของการฉีตสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโตรดแบบหลายจุด อิเล็กโตรดทองแดงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 mm ถูกทำการเจาะรูขนาด 1 mm จำนวน 12 รู ทำให้พื้นที่ต่อกระแสไฟฟ้ามีค่าสูงกว่าอิเล็กโตรดที่ทำการฉีตด้านข้างแบบปกติ เมื่อทำการกัดเซาะที่ค่ากระแสไฟฟ้า 15 A เท่ากัน ส่วนปลายของอิเล็กโตรดแบบการฉีตสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางแบบหลายจุด จะมีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสูง ส่งผลให้เกิดอุณหภูมิความร้อนที่สูงตาม นำไปสู่การเพิ่มขึ้นของอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด [21, 23, 68]

ตารางที่ 4.22 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแปรรูปลึกระหว่างการฉีตสารไดอิเล็กทริกด้านข้างแบบปกติและการฉีตสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโตรดแบบหลายจุดด้วยเงื่อนไขการทำงานที่ดีที่สุด (Optimal Conditions)

Flushing Scheme	Optimal Machining Parameters				MRR (mm ³ /min)	EWR (%)	GC (mm)	Machining Time (min)
	Pulse On-time (μ s)	Pulse Off-time (μ s)	Current (A)	Electrode Rotation (rpm)				
Side Flushing, sf	100	20	15	70	15.729	0.581	0.194	339.01
Multi-aperture Flushing, mf	150	2	15	70	21.660	1.588	0.196	250.53

ในกระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า (EDM) กระบวนการฉีตสารไดอิเล็กทริกถือว่าเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของการแปรรูปลึกที่มีอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางอิเล็กโตรดกับความลึกในการแปรรูป (Depth-to-diameter) มากกว่า 3 เท่า ความสามารถในการขจัดเศษโลหะออกจากช่องว่างในการแปรรูปเป็นไปได้ยาก ในกรณีที่กระบวนการฉีตสารไดอิเล็กทริกไม่เหมาะสม เมื่อระดับความลึกในการแปรรูปเพิ่มสูงขึ้นเศษโลหะที่หลุดออกมาจากการแปรรูปและไม่สามารถขจัดออกได้หมดก็จะสะสมภายในช่องว่างการแปรรูป จะเป็นตัวกลางให้เกิดการอาร์คกันระหว่างผนังรูเจาะกับผนังอิเล็กโตรด ซึ่งเรียกปฏิกิริยาดังกล่าวว่า Secondary Spark [69-71]

นอกจากนี้การเกิดปฏิกิริยา Secondary Spark ยังส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการจัดเนื้องานของวัสดุที่ลดลง เนื่องจากพลังไฟฟ้าที่จะแปรเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อนจะลดลงจากการที่มีบริเวณในการสปาร์คเพิ่มขึ้น ลักษณะเช่นนี้จะคล้ายกับการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าทำให้ความเข้มข้นของการสปาร์คในแต่ละวัฏจักรขาดเสถียรภาพหรือลดประสิทธิภาพลง [72]

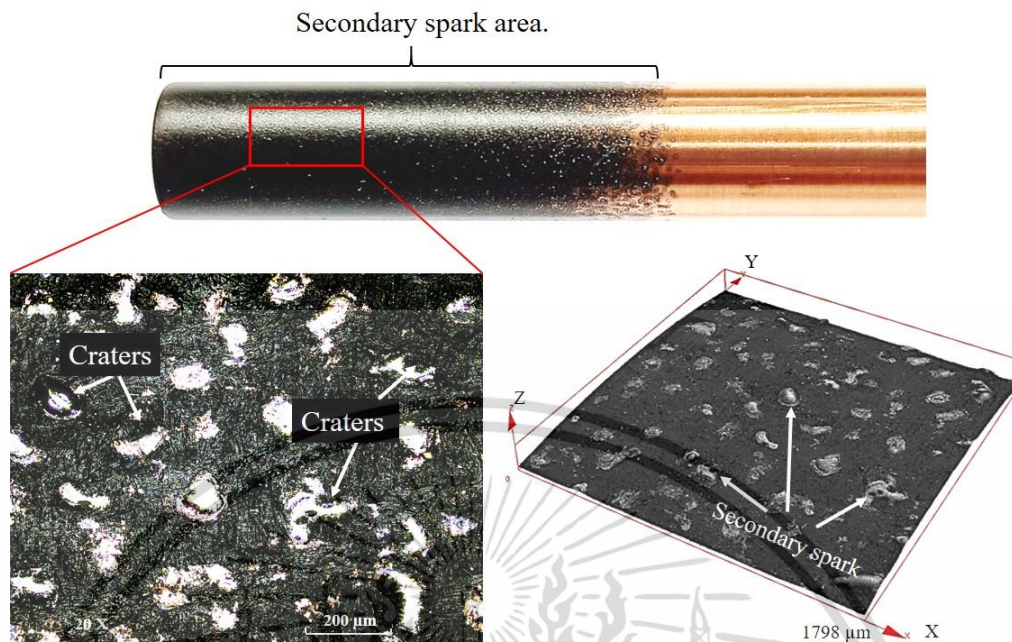
นอกจากนี้ อนุภาคของเศษโลหะที่ถูกจัดออกมาจะปนเปื้อนอยู่ในสารไดอิเล็กตริก และจะจับตัวกับคาร์บอนที่เกิดจากการแตกตัวของสารไดอิเล็กตริกที่เป็นไฮโดรคาร์บอน หากไม่สามารถขจัดออกไปได้หมด อนุภาคของเศษโลหะบางส่วนจะกลับเข้ามารวมตัวกลายเป็นชั้นการหลอมตัวใหม่ที่เรียกว่า Recast Layer และบางส่วนจะไปเกาะบนผิวของวัสดุอิเล็กโตรดและวัสดุชิ้นงาน [73] ซึ่งขอกกล่าวในหัวข้อถัดไป

4.5 ผลการศึกษาสภาพพื้นผิวชิ้นงานและอิเล็กโตรดภายหลังการแปรรูป

4.5.1 คุณภาพพื้นผิวชิ้นงานและอิเล็กโตรดภายหลังการแปรรูป

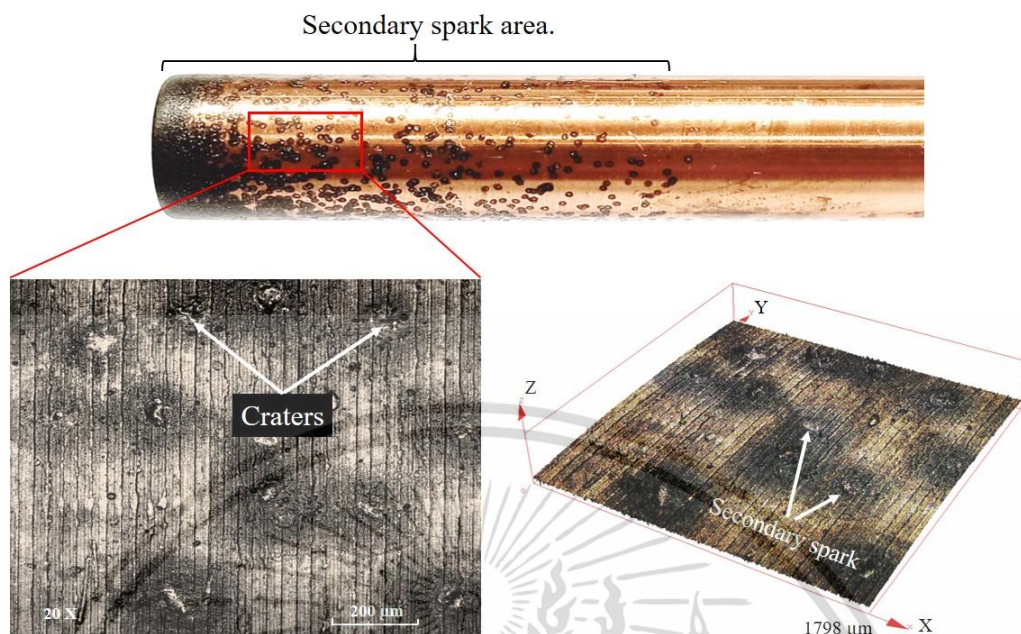
จากการตรวจสอบพื้นผิวของอิเล็กโตรดทองแดงภายหลังกระบวนการแปรรูปสึกที่กระบวนการฉีดสารไดอิเล็กตริกแตกต่างกันทั้ง 2 รูปแบบ โดยการใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของแต่ละรูปแบบแสดงในรูปที่ 4.21 - 4.22 พบการเกิดขึ้นเคลือบของฟิล์มคาร์บอนบนผิวอิเล็กโตรดทองแดง ซึ่งเกิดจากคาร์บอนในเนื้อวัสดุชิ้นงานที่มีประจุทางไฟฟ้าเป็นลบวิ่งเข้าหาอิเล็กโตรดที่มีประจุเป็นบวก ทำให้เกิดการเคลือบตัวของชั้นฟิล์มคาร์บอนบนผิวอิเล็กโตรดทองแดง นอกจากนี้สารไดอิเล็กตริกที่ใช้ในกระบวนการทดลองเป็นแบบไฮโดรคาร์บอน ซึ่งเมื่อเกิดการสปาร์คจะแตกตัวกลายเป็นไฮโดรเจนซึ่งมีประจุเป็นบวกและคาร์บอนซึ่งมีประจุเป็นลบ [1, 2] โดยคาร์บอนจะวิ่งเข้าหาขั้วบวก ถ้าอิเล็กโตรดเป็นขั้วบวกคาร์บอนก็จะวิ่งไปจับอิเล็กโตรดเกิดเป็นชั้นฟิล์มคาร์บอนดังแสดงในรูปที่ 4.21 และการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมี (EDS) ของธาตุคาร์บอนบนวัสดุอิเล็กโตรด ถูกแสดงในรูปที่ 4.7 ซึ่งพบว่ามีส่วนประกอบของธาตุคาร์บอนสูงถึง 51.89 % อย่างไรก็ตามหากอิเล็กโตรดที่ใช้เป็นลบคาร์บอนจะวิ่งไปจับผิวงานทำให้ผิวชิ้นงานมีลักษณะเป็นสีดำคล้ำของคาร์บอน

นอกเหนือจากชั้นฟิล์มคาร์บอนบนผิวอิเล็กโตรดแล้ว ผลกระทบของการเกิดปฏิกิริยา Secondary Spark บนผนังของผิวอิเล็กโตรดยังถูกตรวจพบตลอดความลึกในการแปรรูป (50 mm) โดยเฉพาะอย่างยิ่งการฉีดสารไดอิเล็กตริกด้านข้างแบบปกติ จากการตรวจสอบบนพื้นที่ $1798 \times 1798 \mu\text{m}$ ของผิวอิเล็กโตรดพบร่องรอยของบ่อหลอมละลายจากความร้อนในขณะทำการสปาร์ค (Crater) การหลอมละลายของเนื้อวัสดุ (Melted Drop) และการเกาะตัวของอนุภาคเศษโลหะที่หลุดออกมาจากการจัดเนื้องานที่มีความหนาแน่นสูง



รูปที่ 4.21 พื้นผิวอิเล็กโทรดที่ผ่านกระบวนการแปรรูปลึกโดยการฉีตสารไดอิเล็กตริกด้านข้างแบบปกติ (เวลาเปิด 100 μs , เวลาปิด 20 μs , กระแสไฟฟ้า 15 A, การหมุนของอิเล็กโทรด 70 rpm)

จากการตรวจสอบพื้นผิวอิเล็กโทรดที่ผ่านกระบวนการแปรรูปลึกโดยการฉีตสารไดอิเล็กตริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรดแบบหลายจุด ดังแสดงในรูปที่ 4.22 พบว่ามีความแตกต่างกับกระบวนการฉีตสารไดอิเล็กตริกด้านข้างแบบปกติ โดยชั้นฟิล์มคาร์บอนเกิดขึ้นบริเวณส่วนปลายของอิเล็กโทรดเท่านั้น สำหรับบริเวณอื่นๆ พบความหนาแน่นของการเกิดปฏิกิริยา Secondary Spark ในปริมาณต่ำ เนื่องจากในระหว่างกระบวนการแปรรูปลึก สารไดอิเล็กตริกที่มีความสะอาดปราศจากการปนเปื้อนถูกฉีดผ่านแกนกลางอิเล็กโทรดไหลเข้าสู่พื้นที่การสปาร์คโดยตรงร่วมกับการหมุนของอิเล็กโทรด พัดพาเอาอนุภาคของเศษโลหะไหลออกผ่านช่องว่างการแปรรูปอย่างต่อเนื่องตลอดการแปรรูปที่มีความลึก 50 mm ส่งผลให้ปฏิกิริยา Secondary Spark ระหว่างผนังอิเล็กโทรดกับผนังชิ้นงานเกิดขึ้นในปริมาณต่ำ



รูปที่ 4.22 พื้นผิวอิเล็กโทรดที่ผ่านกระบวนการแปรรูปลึกโดยการขีดสสารไดอิเล็กตริก ผ่านแกนกลางอิเล็กโทรดแบบหลายจุด (เวลาเปิด 100 μ s, เวลาปิด 20 μ s, กระแสไฟฟ้า 15 A, การหมุนของอิเล็กโทรด 70 rpm)

4.5.2 ผลการตรวจสอบชั้นหลอมใหม่บนผนังรูเจาะภายหลังการแปรรูป

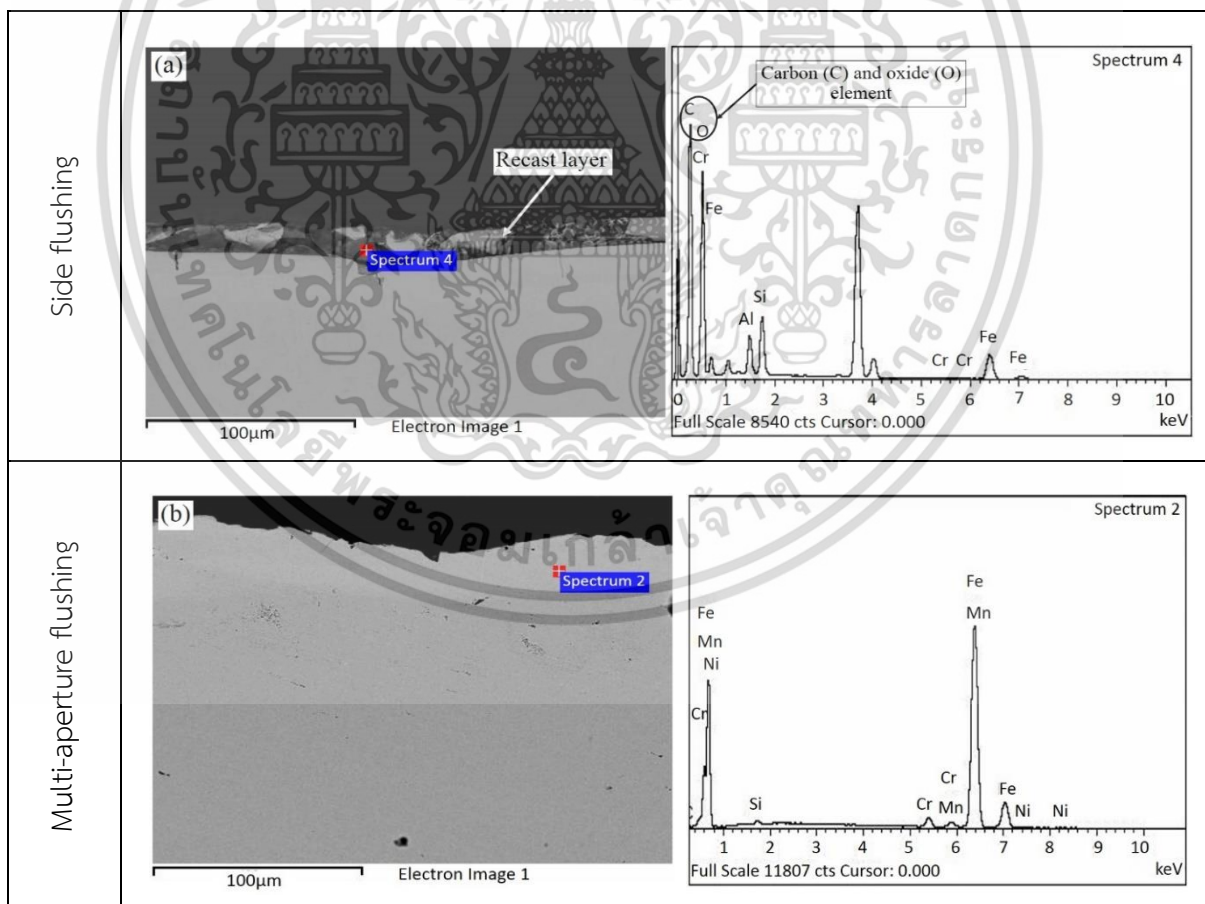
พื้นผิววัสดุชิ้นงานที่ได้รับความร้อนจากการถ่ายเทประจุ (Discharge Current) ในขณะสปาร์คจะเกิดการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวของวัสดุชิ้นงานแบ่งตามระดับความรุนแรงของผลกระทบจากอุณหภูมิความร้อน ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้คือ ขณะสปาร์คจะเกิดความร้อนสูงที่เพียงพอต่อการหลอมละลายและขจัดเศษเนื้อวัสดุชิ้นงานชั้นบนสุดออก (Spattered Surface Layer) บริเวณชั้นรองลงมาจะได้รับความร้อนที่เพียงพอต่อการหลอมละลายของวัสดุชิ้นงานแต่ไม่สามารถขจัดออกได้เมื่อสิ้นสุดวัฏจักรการสปาร์ค วัสดุที่เกิดการหลอมละลายจะหลุดออกมาในรูปแบบของอนุภาคเศษโลหะ (Debris) เนื้อวัสดุที่ถูกขจัดออกบางส่วนถูกสารไดอิเล็กตริกพัดพาออกไป บางส่วนหลงเหลืออยู่ในช่องว่างการแปรรูปและปนเปื้อนในสารไดอิเล็กตริกทำให้จับตัวกับคาร์บอนที่เกิดจากการแตกตัวของสารไดอิเล็กตริกที่เป็นไฮโดรคาร์บอนวิ่งไปเกาะผิวอิเล็กโทรดหรือผิวงาน บางส่วนกลับเข้ามารวมตัวกับเนื้อวัสดุกลายเป็นชั้นการแข็งตัวใหม่ (Recast Layer) และในระดับพื้นผิวที่ลึกลงมาจะได้รับอิทธิพลจากความร้อนแต่ไม่เกิดการหลอมละลาย (Heat Affect Zone) [1, 2] โดยในแต่ละระดับชั้นที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนจะเกิดในระดับไมโครเมตร เนื่องจากถูกปกคลุมด้วยสารไดอิเล็กตริกตลอดเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

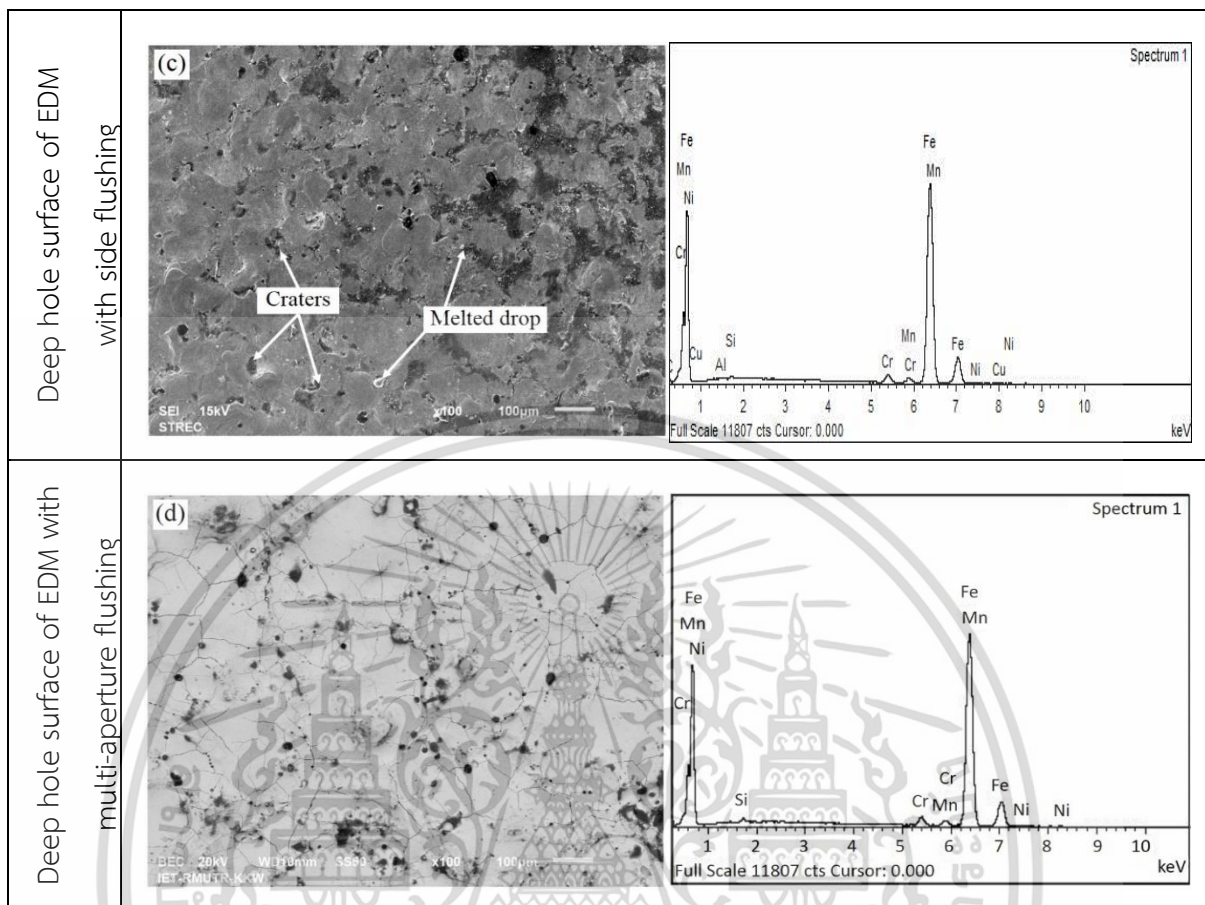
ผลการตรวจสอบพื้นผิววัสดุชิ้นงานภายหลังการแปรรูปโดยการตรวจสอบชั้นหลอมใหม่ (Recast Layer) สำหรับกระบวนการฉีดสารไดอิเล็กตริกแตกต่างกันทั้ง 2 รูปแบบ โดยการใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของแต่ละรูปแบบ จากรูปที่ 4.23 (a)-(b) ภาพตัดขวาง (Cross-Section) แสดง Recast Layer และสเปกตรัม EDS สำหรับวิธีการ Side Flushing และวิธีการ Multi-aperture Flushing พบว่า Recast Layer ถูกตรวจพบบนผิวชิ้นงานภายหลังการแปรรูปเมื่อใช้วิธีการฉีดสารไดอิเล็กตริกด้านข้างแบบปกติ (Side Flushing) ซึ่ง Recast Layer เกิดขึ้นจากกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดกับชิ้นงาน ส่งผลทำให้อนุภาคของวัสดุทั้งสองถูกแยกออกมาด้วยความร้อนสูงมากและได้รับอย่างรวดเร็ว ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส แล้วเกิดการหลอมละลายรวมตัวกันระหว่างอนุภาคของวัสดุทั้งสอง จากนั้นจะถูกทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยของเหลวตัวกลาง (Dielectric Liquid) จนกลายเป็นชั้นของแข็งปกคลุมอยู่บนผิวหน้าของชิ้นงาน ซึ่งมีลักษณะเนื้อเป็นสีขาวเมื่อส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ ทำให้ถูกเรียกว่า “ชั้นหลอมสีขาว (White Layer)” [29] ชั้นหลอมสีขาวเป็นชั้นโลหะที่ประกอบขึ้นจากโครงสร้างมาร์เทนไซต์เป็นหลัก และออสเทนไนต์ แล้วถูกละลายจนกลายเป็นคาร์ไบด์ ซึ่งมีเนื้อเป็นสีดำ (Black Layer) ทำให้ในชั้นหลอมสีขาวนี้เต็มไปด้วยคาร์บอนในปริมาณมาก ดังแสดงตารางที่ 4.23 ซึ่งพบปริมาณคาร์บอน (C) 46.31 % w/w และ ออกไซด์ (O) 44.66 % w/w นอกจากนี้ยังตรวจพบรอยแตกร้าวขนาดเล็ก (Micro Cracks) ใต้ชั้นหลอมใหม่ซึ่งเกิดจากการหดตัวของเนื้อวัสดุที่ได้รับความร้อนที่แตกต่างกันระหว่างชั้นหลอมใหม่ (Recast Layer) ที่อุณหภูมิสูงและชิ้นงาน (Base Metal) ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า [30]

อย่างไรก็ตาม ผลการตรวจสอบภาพตัดขวางของชิ้นงานภายหลังการแปรรูปโดยวิธีการฉีดสารไดอิเล็กตริกผ่านแกนกลางอิเล็กโตรดแบบหลายจุด (Multi-aperture Flushing) ไม่พบการก่อตัวของ Recast Layer บนผิวชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 4.23 (b) นอกจากนี้เมื่อทำการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมี (EDS) บนพื้นผิวชิ้นงานพบปริมาณคาร์บอน (C) 18.73 % w/w แต่ไม่ปรากฏสารประกอบของออกไซด์ (O) ดังแสดงในตารางที่ 4.23 จึงสามารถยืนยันได้ว่าวิธีการฉีดสารไดอิเล็กตริกผ่านแกนกลางอิเล็กโตรดแบบหลายจุดสามารถลดการเกิดการก่อตัวของชั้นหลอมใหม่ได้ เนื่องจากวิธี Multi-aperture Flushing สามารถระบายความร้อน รักษาเสถียรภาพของสารไดอิเล็กตริกและขจัดอนุภาคของเศษโลหะออกจากช่องว่างการแปรรูปได้อย่างมีประสิทธิภาพและต่อเนื่องตลอดระยะเวลาของการแปรรูป อีกทั้งนอกจากนี้รูปที่ 4.23 (c)-(d) ยังสามารถเป็นหลักฐานในการยืนยันผลของประสิทธิภาพในการฉีดสารไดอิเล็กตริกด้วยวิธี Side Flushing และ Multi-aperture Flushing จากภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวชิ้นงานพบชั้นหลอมใหม่ การหลอมละลายของเนื้อวัสดุ บ่อหลอมละลายบนผิวชิ้นงาน และมีคุณภาพผิวงานที่ดี เนื่องจากการเกิด Recast Layer สามารถปรับปรุงค่าความเรียบผิวชิ้นงานได้ (Surface Modification) เมื่อใช้วิธีการ Side Flushing ซึ่งสอดคล้องกับภาพตัดขวางของชิ้นงานที่ตรวจพบ Recast Layer บน

ผิวชิ้นงาน ในทางตรงกันข้ามกับพื้นผิวชิ้นงานที่ผ่านการฉีตสารไดอิเล็กทริกด้วยวิธี Multi-aperture Flushing ไม่พบร่องรอยของการเกิดชั้นหลอมใหม่ แต่พบความหนาแน่นของรอยแตกร้าวขนาดเล็กกระจายทั่วผิวงาน เนื่องจากในกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าได้รับสารไดอิเล็กทริกที่มีความสะอาดและได้รับการฟื้นฟูตลอดวัฏจักรการทำงาน ทำให้สารไดอิเล็กทริกมีค่าความเป็นฉนวนสูง ดังนั้นทุกๆวัฏจักรในการสปาร์คจะมีประสิทธิภาพและความเข้มข้นของพลังงานไฟฟ้าสูง ส่งผลให้เกิดความร้อนที่เอื้อต่อการหลอมละลายของเนื้อวัสดุและถูกขจัดออกโดยสารไดอิเล็กทริกที่มีคุณภาพสูงวิ่งเข้าสู่ช่องว่างการแปรรูปโดยตรงอย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว ด้วยเหตุนี้ทำให้กลไกการเกิด Recast Layer บนผิวชิ้นงานลดน้อยลงหรือหากเกิดขึ้นก็จะถูกขจัดออกในวัฏจักรต่อไปเมื่อมีการสปาร์ค จากการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมี (EDS) บนพื้นผิวชิ้นงานพบปริมาณคาร์บอน (C) 16.81 % w/w และไม่ปรากฏสารประกอบของออกไซด์ (O) ซึ่งสอดคล้องกับการตรวจสอบภาพตัดขวาง อย่างไรก็ตามการฉีตสารไดอิเล็กทริกด้วยวิธี Multi-aperture Flushing ส่งผลต่อความเสียหายของพื้นผิวชิ้นงานในรูปแบบของค่าความหยาบผิวที่สูงขึ้นและการเกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็กกระจายทั่วผิวงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 ภาพถ่าย SEM และผลการตรวจสอบ EDS ของพื้นผิวชิ้นงานภายหลังการแปรรูปที่ระดับความลึก 30 mm สำหรับวิธีการ Side Flushing และวิธีการ Multi-aperture Flushing

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.23 ผลการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมี (EDS) ของพื้นผิวชิ้นงานภายหลังการแปรรูปที่ระดับความลึก 30 mm สำหรับวิธีการ Side Flushing และวิธีการ Multi-aperture Flushing

Element	Cross-sectional View of Side Flushing		Cross-sectional View of Multi-aperture Flushing		Top View of EDM with Side Flushing		Top View of EDM with multi-aperture Flushing	
	Weight %	Atomic %	Weight %	Atomic %	Weight %	Atomic %	Weight %	Atomic %
C	46.31	56.03	18.73	51.57	16.44	47.61	16.81	48.33
O	44.66	40.56	-	-	-	-	-	-
Al	1.54	0.83	-	-	0.18	0.23	-	-
Si	2.44	1.26	0.42	0.49	0.31	0.39	0.30	0.37
Cr	0.12	0.03	1.85	1.17	1.66	1.11	1.88	1.25
Fe	4.94	1.28	76.58	45.35	78.86	49.11	78.62	48.46
Ni	-	-	0.89	0.50	1.07	0.63	0.83	0.49
Mn	-	-	1.40	0.84	1.29	0.82	1.34	0.83
Cu	-	-	0.13	0.07	0.20	0.11	0.22	0.12
Total	100.00		100.00		100.00		100.00	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 ผลของค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นที่มีผลต่อประสิทธิภาพในกระบวนการแปรรูปลึก

จากการศึกษาค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแปรรูปลึกด้วยกระบวนการกัดเจาะโลหะด้วยไฟฟ้า แสดงให้เห็นว่า เวลาเปิด (Pulse On-time) และกระแสไฟฟ้า (Current) มีผลต่ออัตราการขจัดเนื้องาน (Material Removal Rate) และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (Electrode Wear Ratio) ตลอดจนค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Surface Roughness) อย่างมีนัยสำคัญ จากการทดสอบค่าเวลาเปิดพบว่า อัตราการขจัดเนื้องานมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามการปรับค่าเวลาเปิดในช่วง 2 – 100 μs อย่างไรก็ตามเมื่อระดับของค่าเวลาเปิดเพิ่มสูงขึ้นในช่วง 150 – 510 μs ส่งผลให้อัตราการขจัดเนื้องานลดลงอย่างต่อเนื่อง เช่นเดียวกับการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้าพบว่า อัตราการขจัดเนื้องานมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามการปรับค่ากระแสไฟฟ้า จาก 3 – 15 A และมีแนวโน้มลดลงเมื่อการปรับค่ากระแสไฟฟ้าที่ 18 A อย่างไรก็ตามค่ากระแสไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลกระทบต่อตรงต่อการเพิ่มขึ้นของอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดและค่าความหยาบผิวเฉลี่ย การทดสอบค่าเวลาปิด (Pulse Off-time) พบว่าระดับของค่าเวลาปิดที่เหมาะสม (20 - 50 μs) มีผลต่ออัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดและความหยาบผิวเฉลี่ยที่น้อยลง อย่างไรก็ตามค่าเวลาปิดที่ระดับต่ำ (2 μs) ส่งผลให้ค่าอัตราการขจัดเนื้องานที่เพิ่มสูงขึ้น

5.1.2 อิทธิพลของค่าตัวแปรที่เหมาะสมในกระบวนการแปรรูปลึกด้วยวิธีการฉีดสารไดอิเล็กตริกด้านข้าง

จากการศึกษาอิทธิพลของค่าตัวแปรที่เหมาะสมในกระบวนการแปรรูปลึกด้วยวิธีการฉีดสารไดอิเล็กตริกด้านข้าง (Conventional Side Flushing) โดยใช้วิธีการทางสถิติที่เรียกว่าวิธีพื้นผิวผลตอบสนอง (RSM) และอาศัยการออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง (CCD) พบว่า ตัวแปรกระแสไฟฟ้าและเวลาเปิด ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของอัตราการขจัดเนื้องานอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อค่าอัตราการขจัดเนื้องานเพิ่มสูงขึ้นทำให้เกิดการสะสมของอนุภาคโลหะ (Debris) ที่ถูกขจัดออกมาอยู่ภายในช่องว่างการแปรรูป (Machining Gap) และปนเปื้อนในสารไดอิเล็กตริก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออัตราความลึกในการแปรรูปกับเส้นผ่านศูนย์กลางอิเล็กโทรดมากกว่า 3 เท่า (35 : 12 mm) ทำให้เกิดปฏิกิริยา Secondary Spark ระหว่างผนังอิเล็กโทรดและผนังรูเจาะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของช่องว่างการแปรรูป (Gap Clearance) และค่าความเบี่ยงเบนของความขนานกับทิศทางการแปรรูป (Parallelism Deviation) นอกจากนี้ค่าของ

ช่องว่างการแปรรูปมีความสัมพันธ์เชิงผกผันกับค่าเวลาปิดและการหมุนของอิเล็กโทรด เนื่องจากเมื่ออิเล็กโทรดหมุนจะเกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางทำให้สารไดอิเล็กทริกสามารถพัฒนาเอาอนุภาคของเศษโลหะออกจากช่องว่างในการแปรรูปได้ดียิ่งขึ้นเป็นสาเหตุให้ค่าช่องว่างในการแปรรูปลดลง อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดมีความสัมพันธ์เชิงผกผันกับตัวแปรเวลาเปิดและการหมุนของอิเล็กโทรดแต่มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับตัวแปรกระแสไฟฟ้า ซึ่งค่าอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดลดลงเมื่อค่าเวลาเปิดและการหมุนของอิเล็กโทรดเพิ่มสูงขึ้น ผลการศึกษาค่าตัวแปรที่เหมาะสม (Optimization) แบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Response Optimization) โดยการใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability Function) ในกระบวนการแปรรูปสำหรับการฉีดสารไดอิเล็กทริกด้านข้างแบบปกติ ได้แก่ ตัวแปรเวลาเปิด (Pulse On-time) เท่ากับ 100 μ s ตัวแปรเวลาปิด (Pulse Off-time) เท่ากับ 20 μ s กระแสไฟฟ้า (Current) เท่ากับ 15 A และ การหมุนของอิเล็กโทรด (Electrode Rotation) เท่ากับ 70 rpm โดยค่าความพึงพอใจรวม (Combined Desirability) เท่ากับ 0.6508

5.1.3 ผลของการออกแบบการฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรดแบบหลายจุดที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในกระบวนการแปรรูป

จากการศึกษาผลของการออกแบบการฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรดแบบหลายจุด (Multi-aperture Inner Flushing) ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการในกระบวนการแปรรูป แสดงให้เห็นว่าเมื่อระดับความลึกของการแปรรูปเพิ่มขึ้นการฉีดสารไดอิเล็กทริกเข้าสู่ช่องว่างการแปรรูปเพื่อขจัดเศษโลหะที่หลุดออกจากการกัดเซาะเป็นสิ่งที่มีค่ามากที่สุด เนื่องจากเมื่อสารไดอิเล็กทริกสามารถขจัดเศษที่หลุดออกมาจากการแปรรูปไม่ให้เข้ามาขัดขวางการปล่อยกระแสไฟฟ้าบริเวณช่องว่างการสปาร์คได้อย่างมีประสิทธิภาพและสมบูรณ์แบบ ส่งผลให้กระบวนการสปาร์คมีความรุนแรงและสม่ำเสมออย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความลึก 50 mm อิเล็กโทรดที่ฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านศูนย์กลางสามารถลดเวลาในการแปรรูปจาก 339.01 min เป็น 250.53 min นอกจากนี้ภายใต้การฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านศูนย์กลางของอิเล็กโทรดควบคู่กับการหมุนของอิเล็กโทรดที่ 175 rpm อัตราการขจัดเนื้องานมีค่าสูงสุดที่ 22.485 (mm^3/min) เนื่องจากการหมุนของอิเล็กโทรดควบคู่กับการฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรดแบบหลายจุดทำให้สารไดอิเล็กทริกสามารถไหลเข้าสู่ช่องว่างในการแปรรูปได้ดีและอาศัยแรงเหวี่ยงจากการหมุนขจัดเศษอนุภาคให้หลุดออกมาทางช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงานได้อย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตาม การฉีดสารไดอิเล็กทริกจากด้านข้างไปพร้อมกับการหมุนของอิเล็กโทรดส่งผลให้ค่าความหยาบผิวลดลงจาก 6.125 μm เป็น 4.345 μm แต่เมื่อพิจารณาการฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรดแบบหลายจุดพบว่า ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย จาก 6.110 μm เป็น 6.867 μm ตามลำดับ ในส่วนของค่าความเบี่ยงเบนความขนาน (Parallelism Deviation) กับทิศทางการแปร

รูป (Z Axis – Center Line) สำหรับการฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโตรดแบบหลายจุดมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อพิจารณาความแตกต่างของค่าความเบี่ยงเบนความขนานที่ระดับความลึก 1 mm ถึง 50 mm นั้นหมายความว่า แนวโน้มของความเบี่ยงเบนความขนานที่เกิดขึ้นมีความเป็นเส้นตรง หรือแทบจะไม่เกิดความเบี่ยงเบนของความขนานเมื่อเปรียบเทียบกับ การฉีดสารไดอิเล็กทริกจากด้านข้างไปพร้อมกับการหมุนของอิเล็กโตรด

5.1.4 อิทธิพลของค่าตัวแปรที่เหมาะสมในกระบวนการแปรรูปด้วยการฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโตรดแบบหลายจุด

จากการศึกษาอิทธิพลของค่าตัวแปรที่เหมาะสมในกระบวนการแปรรูปด้วยการฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโตรดแบบหลายจุด (Multi-aperture Inner Flushing) โดยใช้วิธีการทางสถิติที่เรียกว่าวิธีพื้นผิวผลตอบสนอง (RSM) และอาศัยการออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง (CCD) พบว่า ตัวแปรเวลาเปิด กระแสไฟฟ้า และการหมุนของอิเล็กโตรดมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับอัตราการขจัดเนื้องาน อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของอัตราการขจัดเนื้องานส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มขึ้นของช่องว่างการแปรรูป ซึ่งอัตราการขจัดเนื้องานสูงสุดที่เก็บได้จากการทดลองมีค่าเท่ากับ 21.660 mm³/min โดยการใช้ค่าพารามิเตอร์เวลาเปิด 150 μ s เวลาปิด 2 μ s กระแสไฟฟ้า 15 A และการหมุนของอิเล็กโตรด 70 rpm อิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่ออัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดพบว่า อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดมีความสัมพันธ์เชิงผกผันกับเวลาเปิดและการหมุนของอิเล็กโตรด แต่มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับค่ากระแสไฟฟ้า ซึ่งอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดต่ำสุดที่เก็บได้จากการทดลองมีค่าเท่ากับ 0.369 % โดยการใช้ค่าพารามิเตอร์เวลาเปิด 150 μ s เวลาปิด 2 μ s คงที่กระแสไฟฟ้า 12 A และการหมุนของอิเล็กโตรด 70 rpm อิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อช่องว่างการแปรรูปพบว่า ช่องว่างการแปรรูปมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับเวลาเปิด แต่มีความสัมพันธ์เชิงผกผันกับเวลาปิด กระแสไฟฟ้า และการหมุนของอิเล็กโตรด ซึ่งช่องว่างการแปรรูปต่ำสุดที่เก็บได้จากการทดลองมีค่าเท่ากับ 0.112 mm โดยการใช้ค่าพารามิเตอร์เวลาเปิดที่ 50 μ s เวลาปิด 2 μ s ค่ากระแสไฟฟ้าที่ 9 A และการหมุนของอิเล็กโตรดที่ 70 rpm ผลการศึกษาค่าตัวแปรที่เหมาะสม (Optimization) แบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Response Optimization) โดยการใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability Function) ในกระบวนการแปรรูปสำหรับการฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโตรดแบบหลายจุด ได้แก่ ตัวแปรเวลาเปิด (Pulse On-time) เท่ากับ 150 μ s ตัวแปรเวลาปิด (Pulse Off-time) เท่ากับ 2 μ s กระแสไฟฟ้า (Current) เท่ากับ 15 A และ การหมุนของอิเล็กโตรด (Electrode Rotation) เท่ากับ 70 rpm โดยค่าความพึงพอใจรวม (Combined Desirability) เท่ากับ 0.7076

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.5 ผลของสภาพพื้นผิวชิ้นงานและอิเล็กโตรดภายหลังการแปรรูป

จากการตรวจสอบสภาพพื้นผิวชิ้นงานและอิเล็กโตรดภายหลังการแปรรูป พบการเคลือบตัวของชั้นฟิล์มคาร์บอนบนผิวอิเล็กโตรดทองแดงเมื่อใช้วิธีการฉีดสารไดอิเล็กตริกด้านข้างแบบปกติ จากการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมี (EDS) ของธาตุคาร์บอนบนวัสดุอิเล็กโตรดพบว่า มีส่วนประกอบของธาตุคาร์บอนสูงถึง 51.89 % นอกจากนี้ ผลกระทบของการเกิดปฏิกิริยา Secondary Spark บนผนังของผิวอิเล็กโตรดยังถูกตรวจพบตลอดความลึกในการแปรรูป (50 mm) อย่างไรก็ตามจากการตรวจสอบพื้นผิวอิเล็กโตรดที่ผ่านกระบวนการแปรรูปลึกโดยการฉีดสารไดอิเล็กตริกผ่านแกนกลางอิเล็กโตรดแบบหลายจุด พบชั้นฟิล์มคาร์บอนเกิดขึ้นบริเวณส่วนปลายของอิเล็กโตรดเท่านั้น สำหรับบริเวณอื่นๆ พบความหนาแน่นของการเกิด Secondary Spark ในปริมาณต่ำ ผลการตรวจสอบพื้นผิววัสดุชิ้นงานภายหลังการแปรรูปพบว่า เกิดการก่อตัวของ Recast Layer บนพื้นผิวชิ้นงานเมื่อใช้วิธีการฉีดสารไดอิเล็กตริกด้านข้างแบบปกติ เมื่อตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมี (EDS) พบปริมาณคาร์บอน (C) 46.31 % w/w และ ออกไซด์ (O) 44.66 % w/w ตามลำดับ ซึ่งสามารถยืนยันการเกิด Recast Layer บนผิวชิ้นงานได้ นอกจากนี้ยังตรวจพบรอยแตกร้าวขนาดเล็ก (Micro Cracks) ใต้ชั้น Recast Layer ซึ่งเกิดจากการหดตัวของเนื้อวัสดุที่ได้รับความร้อนที่แตกต่างกันระหว่างชั้นหลอมใหม่ที่อุณหภูมิสูงและเนื้องาน (Base Metal) ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ในทางตรงข้ามกันผลการตรวจสอบผิวชิ้นงานภายหลังการแปรรูปโดยวิธีการฉีดสารไดอิเล็กตริกผ่านแกนกลางอิเล็กโตรดแบบหลายจุด (Multi-aperture Flushing) ไม่พบการก่อตัวของ Recast Layer บนผิวชิ้นงาน จากนั้นการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมี (EDS) บนพื้นผิวชิ้นงานพบปริมาณคาร์บอน (C) 18.73 % w/w แต่ไม่ปรากฏสารประกอบของออกไซด์ (O) จึงสามารถยืนยันได้ว่าวิธีการฉีดสารไดอิเล็กตริกผ่านแกนกลางอิเล็กโตรดแบบหลายจุดสามารถลดการเกิดการก่อตัวของชั้นหลอมใหม่ได้

5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการศึกษาในอนาคต

ควรมีการศึกษาในเชิงลึกเพิ่มเติมเกี่ยวกับประสิทธิภาพการออกแบบการฉีดสารไดอิเล็กตริกผ่านแกนกลางอิเล็กโตรดแบบหลายจุด (Multi-aperture Inner Flushing) โดยการควบคุมตัวแปรที่สำคัญ เช่น ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของสารไดอิเล็กตริกที่เหมาะสมในกระบวนการแปรรูปลึก และความสัมพันธ์ของจำนวนช่อง (Multi-channel) การฉีดสารไดอิเล็กตริกที่มีผลต่อการประสิทธิภาพการแปรรูป ซึ่งในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ยังไม่ได้ศึกษาให้ครอบคลุมถึงหัวข้อดังกล่าว เนื่องจากในวิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาและเปรียบเทียบถึงผลกระทบของการการฉีดสารไดอิเล็กตริกด้านข้างแบบปกติ (Conventional Side Flushing) และการฉีดสารไดอิเล็กตริกผ่านแกนกลางอิเล็กโตรดแบบหลายจุด (Multi-aperture Inner Flushing) เท่านั้น ซึ่งหากมีการศึกษาเพิ่มเติมอาจสร้างงานวิจัยที่สามารถพัฒนาสู่ภาคอุตสาหกรรมได้ในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- [1] Thoms B. **The Technology of Electrical Discharge Machining**, [eBook]. Maho Hansen GmbH, Otto-Hahn Str 2-4 Umstadt, 1991, pp. 10-53.
- [2] Guitrau E. Bud. **The EDM Handbook**. Handser Gardner publications Cincinnati, 1997, pp, 19-54.
- [3] Jamkamon K., and Janmanee P. Deep hole of AISI P20 mold steel material by electrical discharge machining. **Applied Mechanics and Materials**, Vol. 590, 2014. pp. 244-248.
- [4] Kuppan P., Rajadurai A., and Narayanan S. "Influence of EDM process parameters in deep hole drilling of Inconel 718." **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Vol. 38 (1-2), 2007. pp. 74-84.
- [5] Suppawat C., and Kannachai K. "Effects of side flushing and multi-aperture inner flushing on characteristics of electrical discharge machining macro deep holes." **Metal**, Vol. 11, 2021. pp. 148.
- [6] Homri L., Goka E., Levasseur G., and Dantan J. Y. "Tolerance analysis-Form defects modeling and simulation by model decomposition and optimization." **Computer-Aided Design**, Vol. 91, 2017. pp. 46-59.
- [7] Cetin S., Okada A., and Uno Y. "Effect of debris distribution on wall concavity in deep-hole EDM." **JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing**, Vol. 47 (2), 2004. pp. 553-559.
- [8] Kliuev M., Baumgart C., Büttner H., and Wegener K. "Flushing velocity observations and analysis during EDM drilling." **Procedia CIRP**, Vol. 77, 2018. pp. 590-593.
- [9] Jahan M. P. Editors. **Electrical Discharge Machining (EDM), Types, Technology and Application**, [eBook]. New York: Nova Sciences Publishers, Inc. 2015.
- [10] Barenji R. V., Pourasl H. H., and Khojastehnezhad V. M. "Electrical discharge machining of the AISI D6 tool steel: Prediction and modeling of the material removal rate and tool wear ratio." **Precision Engineering**, Vol. 45, 2016. pp. 435-444.

- [11] Pavani, P. N. L., Rao, R. P. and Santa Rao, K. "Performance Assessment and Mathematical Modeling of Process Parameters in Electrical Discharge Machining of EN-31 Tool Steel Material Using Taguchi DOE." **Engineering Journal**, Vol, 21 (2), 2017. pp. 227-236.
- [12] Tanjilul M., Ahmed A., Kumar A. S., and Rahman M. "A study on EDM debris particle size and flushing mechanism for efficient debris removal in EDM-drilling of Inconel 718." *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 255, 2018. pp. 263-274.
- [13] Kamonpong, J. and Pichai, J. "Improving Machining Performance for Deep Hole Drilling in the Electrical Discharge Machining Process Using a Step Cylindrical Electrode." **Applied Sciences**, Vol, 11, 2021. 2084.
- [14] Sagar U. S., and Pravin S. J. "Optimization of micro drilling process parameters for titanium alloy by rotating electrode." **Procedia Manufacturing**, Vol 20, 2018. pp. 119-126.
- [15] Habib S. S. "Study of the parameters in electrical discharge machining through response surface methodology approach." **Applied Mathematical Modelling**, Vol. 33 (12), 2009. pp. 4397-4407.
- [16] Thanapong P., Kontorn C., and Keerati S. "Effect of welding parameter on pitch angle for electronic circuit process." **KKU Engineering Journal**, Vol. 39 (1), 2012. pp. 59-67.
- [17] Minh D. N., Mustafizar R., and Yoke S. W. "Modeling of radial gap formed by material dissolution in simultaneous micro-EDM and micro-ECM drilling using deionized water." **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Vol. 66, 2013. pp. 95-101.
- [18] Nastasi R., and Koshy P. "Analysis and performance of slotted tools in electrical discharge drilling," **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, vol. 63, 2014. pp. 205-208.
- [19] Sanchez J. A., Lopez L. N., Lamikiz A., and Bravo U. "Study on gap variation in multi-stage planetary EDM" **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Vol. 46, 2006. pp. 1598-1603.

- [20] Lin G., Lei L., Wansheng Z., and Rajurkar K. P. “Electrical discharge machining of Ti6Al4V with a bundled electrode.” **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Vol. 53, 2012. pp. 100-106.
- [21] Li L., Gu L., Xi X., and Zhao W. “Influence of flushing on performance of EDM with bunched electrode.” **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Vol. 58 (1), 2012. pp. 187-194.
- [22] Kumar R., and Singh I. “A modified electrode design for improving process performance of electric discharge drilling.” **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 264. 2019. pp. 211-219.
- [23] Risto M., Haas R., and Munz, M. “Optimization of the EDM Drilling Process to Increase the Productivity and Geometrical Accuracy.” **Procedia CIRP**, Vol. 42, 2016. pp. 537-542.
- [24] Chuvaree S., and Kantayasiri K. “Improving the performance of EDM deep hole using multi-hole interior flushing electrode.” **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, Vol. 361, 2018. pp. 012013.
- [25] Yilmaz O., and Okka M. A. “Effect of single and multi-channel electrodes application on EDM fast hole drilling performance.” **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Vol. 51 (1). 2010. pp. 185-194.
- [26] Dwivedi A. P., and Choudhury S. K. “Estimation of recast layer thickness in rotary tool EDM process for machining AISI D3 tool steel.” **Materials Today: Proceedings**, Vol. (10). 2017. pp. 10816-10822.
- [27] Hassan E. H. **Advanced Machining Processes Nontraditional and Hybrid Machining Processes**, [eBook]. McGraw-Hill Companies, Inc. 2005. pp. 115-139
- [28] Pichai J., and Apiwat M. “Surface modification of tungsten carbide by electrical discharge coating (EDC) using a titanium powder suspension.” **Applied Surface Science**, Vol. 258 (19). 2012. pp. 7255-7265.
- [29] Muttamara A., Kanchanomai C. “Effect of carbon in the dielectric fluid and workpieces on the characteristics of recast layers machined by electrical discharge machining.” **Metallurgical and Materials Transactions A**, Vol. 47 (6). 2016. pp. 3248-3255.

- [30] Ekmekci B. “White layer composition, heat treatment, and crack formation in electric discharge machining process.” **Metallurgical and Materials Transactions B**, Vol. 40, 2009. pp. 70-81.
- [31] Barash M. M., and Kahlon C. S. “Experiments with electric spark toughening.” **International Journal of Machine Tool Design & Research**, Vol. 4, 1968. pp. 1-8.
- [32] Soni J. S., and Chakraverty G. “Effect of electrode material properties on surface roughness & dimensional accuracy in electric discharge machining of high carbon high chromium die steel.” **Journal of Institution of Engineers**, 1995 pp. 76.
- [33] Marafona J. and Wykes C. “A new method of optimizing material removal rate using EDM with copper tungsten electrodes.” **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, Vol. 40, 2000. pp. 153-164.
- [34] Patel M. R., Barrufet M.A., and Eubank P.T. “Theoretical model of the electrical discharge machining process the anode erosion model.” **Journal of Applied Physics**, Vol. 66, 1989. pp. 4104-4111.
- [35] Li L., Wong Y. S., Fuh J. Y. H., and Lu L. “EDM performance of TiC/Copper based sintered electrodes.” **Materials and Design**, Vol. 22, 2001. pp. 669-678.
- [36] Wang Z. L., Fang Y., Wu P. N., Zhao W. S., and Chegn K. “Surface modification process by electrical discharge machining with Ti powder green compact electrode.” **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 129, 2002. Pp. 139-142.
- [37] Moro T., Goto A., Mohri N., Saito N., Matsukawa K., and Miyake H. “Surface modification process by electrical discharge machining with TiC semi-sintered electrode.” **Journal of Japanese Society of Precision Engineering**, Vol. 67, 2001. pp. 114-119.
- [38] Simao J., Lee H. G., Aspinwall D. K., Dewes R. C., and Aspinwall E. M. “Workpiece surface modification using electrical discharge machining.” **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, Vol. 43, 2003. pp. 121-128.
- [39] Singh S., Kansal H. K. and Kumar P. “Parametric optimization of powder mixed electrical discharge machining by response surface methodology.” **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 169, 2005. pp. 427-436.

- [40] Sanjeev K., and Uma B. “Surface modification of die steel materials by EDM method using tungsten powder-mixed dielectric.” **Journal of Manufacturing Process**, Vol. 14, 2012. pp. 35-40.
- [41] Simao J., Aspinwall D., El-Menshawly F., and Meadows K. “Surface alloying using PM composite electrode materials when electrical discharge texturing hardened AISI D2.” **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 127, 2002. pp. 211–216.
- [42] Aspinwall D. K., Dewes R. C., Lee H. G., and Simao J. “Electrical discharge surface alloying of Ti and Fe workpiece materials using refractory powder compact electrodes and Cu wire.” **CIRP Annals**, Vol. 52, 2003. pp. 151–160.
- [43] Minh D. N., Yoke S. W., and Mustafizur R. “Profile error compensation in high precision 3D micro-EDM milling.” **Precision Engineering**, Vol. 37, 2013. pp. 399–407.
- [44] Liao Y.S., Wu P.S., and Liang F.Y. “Study of debris exclusion effect in linear motor equipped die-sinking EDM process.” **Procedia CIRP**, Vol. 6, 2013. pp. 123-128.
- [45] Cheol S. L., Eun Y. He., Jong M. K., In H. C., and Dong W. K., “Electrode wear estimation model for EDM drilling.” **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, Vol. 36, 2015. pp. 70-75.
- [46] Makenzi M. M., and Ikua B. W. “A review of flushing techniques used in electrical discharge machining” **Proceeding of the 2012 Mechanical Engineering Conference on Sustainable Research and Innovation**, Vol. 4, 3rd-4th May 2012, Kenya. pp. 162-165.
- [47] Masuzawa T. “State of the art of micromachining.” **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, Vol. 49 (2), 2000. pp. 473-488.
- [48] Maradia U., Boccadoro M., Stirnimann J., Beltrami I., Kuster F., and Wegener K. “Die-sink EDM in meso-micro machining.” **Procedia CIRP**, Vol. 1, 2012. pp. 166-171.
- [49] Kuppan P., Narayanan S., Oyyaravelu R., and Balan A. S. S. “Performance evaluation of electrode materials in electric discharge deep hole drilling of Inconel 718 superalloy.” **Procedia Engineering**, Vol. 174, 2017. pp. 53-59.
- [50] Technical Data Surface Roughness, Excerpt from JIS B 0601 and JIS B 0031 (1994). [Online]. Available : https://de.misumi-ec.com/pdf/tech/mold/09_mo1517.pdf. (16 Jan 2021).

- [51] Chuvaree S., Kanlayasiri K., “An investigation on dimensional accuracy of EDM deep hole using multi-hole interior flushing electrode.” **MATEC Web of Conferences**, Vol. 192, 2018. pp. 01029.
- [52] ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา, พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. **การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง. พิมพ์ครั้งที่ 2.** กรุงเทพมหานคร : Top Publishing. 2552.
- [53] พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. **การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการเชิงวิศวกรรมด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบสนองประยุกต์.** พิมพ์ครั้งที่ 1. ปรุมนธานี : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. 2557.
- [54] Kliuev., M. Baumgart., C. and Wegener., K. “Fluid Dynamics in Electrode Flushing Channel and Electrode-Workpiece Gap During EDM Drilling.” **Procedia CIRP**, Vol, 68, 2018. pp. 254-259.
- [55] Sebastian., S. Magdalena., M. and Wojciech., B. “The Capabilities of Electro-discharge Micro-drilling of High Aspect Ratio Holes in Ceramic Materials.” **Management and Production Engineering Review**, Vol, 6 (3), 2015. pp. 61-69.
- [56] Dewangan, S., Biswas C. K., and Gangopadhyay S. “Influence of different tool electrode materials on EDMed surface integrity of AISI P20 tool steel.” **Materials and Manufacturing Processes**, Vol. 29, 2014. pp. 1387-1394.
- [57] Aristech Precision 3-D CNC-EDM 430 Series. **Operation Manual & Technical Data.** Lien Sheng Mechanical & Electrical Co., LTD. 2552.
- [58] กมลพงศ์ และ พิชัย จันทรมณี. 2556. “การศึกษาพารามิเตอร์ในการกัดเจาะวัสดุด้วยไฟฟ้าสำหรับเหล็กกล้าแมกนีเซียม AISI P20.” **KKU Engineering Journal**. ฉบับที่ 40 (1) หน้า 95-103.
- [59] Mohri N., Suzuki M., Furuya M., Saito N., and Kobayashi A. “Electrode wear process in electrical discharge machinings.” **CIRP Annals**, Vol. 44 (1), 1995. pp. 165-168.
- [60] Murray J., Zdebski D., and Clare A. T. “Workpiece debris deposition on tool electrodes and secondary discharge phenomena in micro-EDM.” **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 212 (7), 2012. pp. 1537-1547.
- [61] Munz M., Risto M., and Haas R. “Specifics of flushing in electrical discharge drilling.” **Procedia CIRP**, Vol. 6. 2013. pp. 83-88

- [62] Aliakbari E., and Baseri H. "Optimization of machining parameters in rotary EDM process by using the taguchi method" **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Vol. 62, 2012. pp. 1041-1053.
- [63] Diver C., Atkinson J., Helml H. J., and Li L. "Micro-EDM drilling of tapered holes for industrial applications." **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 149, 2004. pp. 296-303.
- [64] Tanjilul M., Ahmed A., Kumar A. S., and Rahman M. "A study on EDM debris particle size and flushing mechanism for efficient debris removal in EDM-drilling of Inconel 718." **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 255, 2018. pp. 263-274.
- [65] Ho K. H., and Newman S. T. "State of the art electrical discharge machining (EDM)." **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Vol. 43 (13), 2003. pp. 1287-1300.
- [66] Goigogana M., and Elkaseer A. "Self-Flushing in EDM Drilling of Ti6Al4V Using Rotating Shaped Electrodes." **Materials (Basel)**, Vol. 12 (6), 2019. pp. 989.
- [67] Zhang S., Zhang W., Liu Y., Ma F., Su C., and Sha Z. "Study on the Gap Flow Simulation in EDM Small Hole Machining with Ti Alloy." **Advances in Materials Science and Engineering**, Vol. 2017, 2017. pp. 1-23.
- [68] Naveen B., Pungotra H., and Kumar A. "To Study the Effect of Polarity and Current during Electric Discharge Machining of Inconel 718 with CuW Powder Metallurgy Electrode." **Proceedings of the National Conference on Trends and Advances in Mechanical Engineering**, 2012. pp. 476-481.
- [69] Sultan T., Kumar A., and Gupta R. D. "Material Removal Rate, Electrode Wear Rate, and Surface Roughness Evaluation in Die Sinking EDM with Hollow Tool through Response Surface Methodology." **International Journal of Manufacturing Engineering**, Vol. 2014, 2014, pp. 1-16.
- [70] Amit K., Amitava M., Amit R. D., and Deepak K. M. "Quantitative of bubble size and electrodes gap at different dielectric conditions in powder mixed EDM process." **The international Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Vol. 107, 2020. pp. 3065-3075.

- [71] Yu L., Hao C., Wenchao Z., Fujian M., Zhihua S., and Shengfang Z. “A Simulation study of debris removal process in ultrasonic vibration assisted electrical discharge machining (EDM) of deep holes.” **Micromachines**, Vol. 9, 2018. pp. 378.
- [72] Ekmekci B., and Sayar A. “Debris and consequences in micro electric discharge machining of micro-holes.” **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Vol. 65, 2013. pp. 58-67.
- [73] Yanzhen Z., Yonghong L., Yang S., Renjie J., Zhen L., and Chao Z. “Investigation on the influence of the dielectrics on the material removal characteristics of EDM.” **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 214, 2014. pp. 1052-1061.





ภาคผนวก ก

ข้อมูลผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การศึกษาค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นที่มีผลต่อประสิทธิภาพในกระบวนการแปรรูปลึง

ตารางที่ 1 ผลกระทบของการปรับค่าเวลาเปิดที่มีผลต่ออัตราการขจัดเนื้องานและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด

Experiments No.	On-time (μ s)	Off-time (μ s)	Current (A)	MRR (mm^3/min)	EWR (%)
1	2	32	9	0.187	42.59
2	10	32	9	0.942	13.11
3	20	32	9	2.274	8.34
4	32	32	9	3.106	5.66
5	50	32	9	3.788	4.52
6	80	32	9	3.882	4.23
7	100	32	9	3.511	4.36
8	150	32	9	2.642	4.43
9	510	32	9	1.962	7.35

ตารางที่ 2 ผลกระทบของการปรับค่าเวลาปิดที่มีผลต่ออัตราการขจัดเนื้องานและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด

Experiments No.	On-time (μ s)	Off-time (μ s)	Current (A)	MRR (mm^3/min)	EWR (%)
1	32	2	9	5.783	8.70
2	32	10	9	4.835	6.17
3	32	20	9	4.492	4.04
4	32	32	9	3.112	3.04
5	32	50	9	2.928	3.17
6	32	80	9	1.492	3.09
7	32	100	9	0.777	3.34
8	32	150	9	0.341	3.58
9	32	510	9	0.032	7.41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3 ผลกระทบของการปรับค่ากระแสไฟฟ้าที่มีผลต่ออัตราการขจัดเนื้องานและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด

Experiments No.	On-time (μ s)	Off-time (μ s)	Current (A)	MRR (mm^3/min)	EWR (%)
1	32	2	3	0.064	33.33
2	32	2	6	0.137	45.06
3	32	2	9	0.224	47.11
4	32	2	12	0.281	53.33
5	32	2	15	0.272	72.41
6	32	2	18	0.191	100



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การศึกษาและวิเคราะห์ค่าตัวแปรที่เหมาะสมในกระบวนการแปรรูปเหล็กด้วยวิธีการฉีดสารไดอิเล็กทริกด้านข้าง

ตารางที่ 4 การทดลองจากการออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง (CCD) สำหรับรูปแบบการฉีด สารไดอิเล็กทริกด้านข้างแบบปกติ (Side Flushing) สำหรับผลตอบอัตราการขจัดเนื้องาน

การทดลองที่	ขนาดชิ้นงาน (mm)	จำนวนรูที่สปาร์ค	น้ำหนักชิ้นงาน (g)	W _w (before)	W _w (after)	W _w (befor)-W _w (after)	MRR (mm ³ /min)	Machining Time (min)
1	24x53X90	1	891.341	891.341	845.322	46.019	7.094	833.170
2		2		845.322	799.851	45.471	8.104	720.650
3		3		799.851	757.120	42.731	6.158	891.220
4		4		757.120	713.004	44.116	7.166	790.683
5		5		713.004	668.868	44.137	11.568	490.033
6	24x53X90	1	891.343	891.343	843.496	47.847	17.168	357.950
7		2		843.496	802.355	41.141	9.820	538.083
8		3		802.355	757.960	44.395	15.488	368.150
9		4		757.960	720.956	37.004	4.636	1025.150
10		5		720.956	676.790	44.166	7.930	715.317
11	24x53X90	1	891.34	891.340	847.236	44.104	4.799	1180.367
12		2		847.236	803.072	44.164	6.192	916.050
13		3		803.072	758.853	44.219	10.672	532.167
14		4		758.853	715.313	43.540	18.965	294.867
15		5		715.313	671.380	43.932	9.224	611.717
16	24x53X90	1	891.343	891.343	847.329	44.014	15.805	357.667
17		2		847.329	803.197	44.133	8.361	677.933

18		3		803.197	760.722	42.475	7.223	755.267
19		4		760.722	716.584	44.138	8.575	661.100
20		5		716.584	672.426	44.158	9.258	612.600
21	24x53X90	1	891.341	891.341	823.525	67.816	5.725	1521.400
22		2		823.525	771.866	51.659	18.784	353.217
23		3		771.866	726.546	45.320	8.667	671.600
24		4		726.546	682.518	44.028	10.912	518.217
25		5		682.518	638.316	44.202	8.922	636.300
26	24x53X90	1	891.34	891.34	847.166	44.174	8.679	653.700
27		2		847.166	803.045	44.122	8.999	629.717
28		3		803.045	761.360	41.685	9.092	588.850
29		4		761.360	716.037	45.322	8.853	657.517
30		5		716.037	671.813	44.225	10.005	567.717
31	24x53X90	1	891.342	891.342	847.212	44.130	8.049	704.167

ตารางที่ 5 การทดลองจากการออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง (CCD) สำหรับรูปแบบการฉีด สารไดอิเล็กทริกด้านข้างแบบปกติ สำหรับผลตอบอัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์

ชิ้นงาน ที่	รูที่	ขนาด อิเล็กทรอนิกส์ (mm)	ความยาว (mm)	density W_E (g/cm ³)	density W_W (g/cm ³)	W_E (before)	W_E (after)	W_W (before)	W_W (after)	EWR (%)
1	1	12.042	100.005	8.94	7.786	101.864	101.327	891.341	845.322	1.339
	2	12.041	100.02	8.94	7.786	101.862	101.753	845.322	799.851	0.276
	3	12.006	100.004	8.94	7.786	101.255	100.714	799.851	757.12	1.454
	4	12.01	100.001	8.94	7.786	101.319	101.214	757.12	713.004	0.274
	5	12.014	100.013	8.94	7.786	101.399	100.225	713.004	668.868	3.056
2	6	12.013	100.007	8.94	7.786	101.376	101.128	891.343	843.496	0.595
	7	12.002	100.012	8.94	7.786	101.196	100.575	843.496	802.355	1.732
	8	12.05	100.004	8.94	7.786	101.998	101.773	802.355	757.96	0.583
	9	12.007	100.011	8.94	7.786	101.279	100.946	757.96	720.956	1.034
	10	12.017	100.002	8.94	7.786	101.439	101.388	720.956	676.79	0.132
3	11	12.009	100.001	8.94	7.786	101.303	100.792	891.34	847.236	1.329
	12	12.019	100.002	8.94	7.786	101.472	101.440	847.236	803.072	0.084
	13	12.025	100.01	8.94	7.786	101.582	100.816	803.072	758.853	1.988
	14	12.032	100.002	8.94	7.786	101.692	101.545	758.853	715.313	0.389
	15	11.986	100.006	8.94	7.786	100.920	100.195	715.313	671.38	1.895
4	16	11.996	100.003	8.94	7.786	101.085	100.943	891.343	847.329	0.371
	17	12.013	100.014	8.94	7.786	101.383	100.810	847.329	803.197	1.493

	18	12.04	100.002	8.94	7.786	101.827	101.745	803.197	760.722	0.223
	19	12.016	100.001	8.94	7.786	101.421	101.166	760.722	716.584	0.662
	20	12.016	100.004	8.94	7.786	101.424	101.203	716.584	672.426	0.575
5	21	12.014	100.003	8.94	7.786	101.389	101.067	891.341	823.525	0.546
	22	12.048	100.006	8.94	7.786	101.967	101.568	823.525	771.866	0.887
	23	11.994	100.013	8.94	7.786	101.062	100.794	771.866	726.546	0.678
	24	11.998	100.001	8.94	7.786	101.117	100.880	726.546	682.518	0.619
	25	12.022	100.002	8.94	7.786	101.523	101.307	682.518	638.316	0.561
6	26	12.018	100.004	8.94	7.786	101.457	101.210	891.34	847.166	0.644
	27	12.011	100.003	8.94	7.786	101.338	101.085	847.166	803.045	0.660
	28	12.003	100.01	8.94	7.786	101.210	100.951	803.045	761.36	0.715
	29	12.01	100.001	8.94	7.786	101.319	101.068	761.36	716.037	0.638
	30	12.025	100.002	8.94	7.786	101.574	101.320	716.037	671.813	0.658
7	31	12.012	100.005	8.94	7.786	101.357	101.155	891.342	847.212	0.526

3. การศึกษาและวิเคราะห์ค่าตัวแปรที่เหมาะสมในกระบวนการแปรรูปด้วยการฉีดยาไอดีเล็กตริกผ่านแกนกลางอิลีกโตรด

แบบหลายจุด

ตารางที่ 6 การทดลองจากการออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง (CCD) สำหรับรูปแบบการฉีดยาไอดีเล็กตริกแบบ Multi-aperture Flushing ของผลตอบอัตราการขจัดเนื้องาน

การทดลองที่	ขนาดชิ้นงาน (mm)	จำนวนรูที่สปาร์ค	น้ำหนักชิ้นงาน (g)	W_w (before)	W_w (after)	W_w (before)- W_w (after)	MRR (mm^3/min)	Machining Time (min)
1	24x53X90	1	891.341	891.341	844.032	47.309	8.520	713.167
2		2		844.032	800.265	43.767	10.092	557.000
3		3		800.265	754.143	46.123	8.112	730.250
4		4		754.143	710.370	43.773	8.819	637.483
5		5		710.370	660.675	49.694	11.998	531.967
6	24x53X90	1	891.340	891.340	847.203	44.137	17.173	330.100
7		2		847.203	805.955	41.248	9.830	538.933
8		3		805.955	761.798	44.157	16.203	350.017
9		4		761.798	718.605	43.193	10.319	537.600
10		5		718.605	674.563	44.041	10.340	547.050
11	24x53X90	1	891.340	891.340	844.852	46.488	7.366	810.583
12		2		844.852	801.016	43.836	9.237	609.517
13		3		801.016	760.291	40.725	12.890	405.783
14		4		760.291	716.252	44.039	21.660	261.133
15		5		716.252	675.684	40.568	10.054	518.233
16	24x53X90	1	891.342	891.342	847.972	43.370	18.415	302.483

17		2		847.972	806.580	41.392	9.694	548.400
18		3		806.580	762.587	43.993	14.704	384.267
19		4		762.587	719.005	43.582	13.687	408.967
20		5		719.005	675.502	43.503	12.344	452.633
21	24x53X90	1	891.343	891.343	849.985	41.358	9.833	540.200
22		2		849.985	798.351	51.635	17.528	378.350
23		3		798.351	755.054	43.297	12.712	437.450
24		4		755.054	711.416	43.638	13.943	401.967
25		5		711.416	668.593	42.823	11.470	479.517
26	24x53X90	1	891.341	891.341	847.176	44.165	11.332	500.567
27		2		847.176	796.876	50.299	12.062	535.583
28		3		796.876	750.671	46.205	11.605	511.367
29		4		750.671	703.128	47.543	11.739	520.167
30		5		703.128	654.542	48.586	11.871	525.667
31	24x53X90	1	891.343	891.343	840.595	50.748	12.103	538.533

ตารางที่ 7 การทดลองจากการออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง (CCD) สำหรับรูปแบบการฉีดสารไดอิเล็กทริกแบบ Multi-aperture Flushing

ของผลตอบอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด

ชิ้นงาน ที่	รูที่	ขนาด อิเล็กโตรด (mm)	ความยาว (mm)	density W_E (g/cm ³)	density W_W (g/cm ³)	W_E (before)	W_E (after)	W_W (before)	W_W (after)	EWR (%)
1	1	12.002	101.654	8.94	7.786	58.665	54.876	891.341	844.032	9.196
	2	12.002	101.482	8.94	7.786	58.530	58.175	844.032	800.265	0.931
	3	12.001	101.55	8.94	7.786	58.219	54.654	800.265	754.143	8.875
	4	11.995	101.341	8.94	7.786	58.530	58.200	754.143	710.37	0.866
	5	12.008	101.707	8.94	7.786	58.985	55.400	710.37	660.675	8.283
2	6	12.012	101.75	8.94	7.786	58.015	57.535	891.34	847.203	1.249
	7	11.994	101.636	8.94	7.786	58.200	55.800	847.203	805.955	6.681
	8	12.01	101.403	8.94	7.786	59.120	58.235	805.955	761.798	2.301
	9	12.007	101.837	8.94	7.786	59.260	57.400	761.798	718.605	4.945
	10	11.992	101.752	8.94	7.786	58.250	58.035	718.605	674.563	0.561
3	11	12.008	101.744	8.94	7.786	58.355	54.700	891.34	844.852	9.028
	12	12.01	101.805	8.94	7.786	57.900	57.120	844.852	801.016	2.043
	13	12.019	101.301	8.94	7.786	58.935	55.800	801.016	760.291	8.839
	14	11.993	101.808	8.94	7.786	58.030	57.055	760.291	716.252	2.542
	15	12.01	101.645	8.94	7.786	58.100	54.800	716.252	675.684	9.340
4	16	12.006	101.688	8.94	7.786	58.215	57.600	891.342	847.972	1.628
	17	12	101.631	8.94	7.786	58.260	55.500	847.972	806.58	7.656

	18	12.01	101.659	8.94	7.786	57.880	57.600	806.58	762.587	0.731
	19	12.02	101.775	8.94	7.786	57.995	57.053	762.587	719.005	2.482
	20	12.014	101.754	8.94	7.786	57.630	56.915	719.005	675.502	1.887
5	21	12.01	101.711	8.94	7.786	58.382	57.304	891.343	849.985	2.993
	22	12.003	101.623	8.94	7.786	58.614	57.200	849.985	798.351	3.144
	23	11.971	101.573	8.94	7.786	58.400	57.695	798.351	755.054	1.870
	24	12.03	101.735	8.94	7.786	57.810	56.815	755.054	711.416	2.618
	25	12.005	101.846	8.94	7.786	58.095	56.295	711.416	668.593	4.826
6	26	12.008	101.809	8.94	7.786	58.450	57.100	891.341	847.176	3.510
	27	12.01	101.758	8.94	7.786	57.988	56.600	847.176	796.876	3.168
	28	12.007	101.766	8.94	7.786	58.553	57.000	796.876	750.671	3.859
	29	12.003	101.693	8.94	7.786	58.307	57.000	750.671	703.128	3.157
	30	12.011	101.59	8.94	7.786	58.140	56.940	703.128	654.542	2.836
7	31	11.997	101.622	8.94	7.786	58.850	57.500	891.343	840.595	3.054

4. การฉีดสารไดอิเล็กทริกร่วมกับการหมุนของอิเล็กโตรดที่มีผลต่อค่าความเบี่ยงเบนของความขนานกับทิศทางการแปรรูป

ตารางที่ 8 การทดลองตรวจวัดค่าความเบี่ยงเบนของความขนานกับทิศทางการแปรรูป โดยใช้การฉีดสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางแบบหลายจุด

ระดับความลึก (mm)	ขนาดรูเจาะ (mm)	ค่าความเบี่ยงเบน (mm)	
		Datum A	Datum B
-1	12.117	0.057	-0.06
-10	12.129	0.064	-0.065
-20	12.123	0.065	-0.058
-30	12.107	0.05	-0.057
-40	12.108	0.057	-0.051
-49	12.12	0.059	-0.061

ตารางที่ 9 การทดลองตรวจวัดค่าความเบี่ยงเบนของความขนานกับทิศทางการแปรรูปโดยการใช้อิเล็กโตรดแบบแท่งตันและฉีดสารไดอิเล็กทริกด้านข้างแบบปกติ

ระดับความลึก (mm)	ขนาดรูเจาะ (mm)	ค่าความเบี่ยงเบน (mm)	
		Datum A	Datum B
-1	12.065	0.030	-0.035
-10	12.107	0.051	-0.056
-20	12.115	0.055	-0.060
-30	12.124	0.061	-0.063
-40	12.167	0.079	-0.088
-49	12.266	0.126	-0.140



ภาคผนวก ข

บทความทางวิชาการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Article

Effects of Side Flushing and Multi-Aperture Inner Flushing on Characteristics of Electrical Discharge Machining Macro Deep Holes

Suppawat Chuvaree and Kannachai Kanlayasiri *

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand; 58601317@kmitl.ac.th

* Correspondence: kkkannac@kmitl.ac.th; Tel.: +66-2-329-8339

Abstract: This research investigates the effect of machining parameters on material removal rate, electrode wear ratio, and gap clearance of macro deep holes with a depth-to-diameter ratio over four. The experiments were carried out using electrical discharge machining with side flushing and multi-aperture flushing to improve the machining performance and surface integrity. The machining parameters were pulse on-time, pulse off-time, current, and electrode rotation. Response surface methodology and the desirability function were used to optimize the electrical discharge machining parameters. The results showed that pulse on-time, current, and electrode rotation were positively correlated with the material removal rate. The electrode wear ratio was inversely correlated with pulse on-time and electrode rotation but positively correlated with current. Gap clearance was positively correlated with pulse on-time but inversely correlated with pulse off-time, current, and electrode rotation. The optimal machining condition of electrical discharge machining with side flushing was 100 μ s pulse on-time, 20 μ s pulse off-time, 15 A current, and 70 rpm electrode rotation; and that of electrical discharge machining with multi-aperture flushing was 130 μ s, 2 μ s, 15 A, and 70 rpm. The novelty of this research lies in the use of multi-aperture flushing to improve the machining performance, enable a more uniform GC profile, and minimize the incidence of recast layer.

Keywords: electrical discharge machining; gap clearance; macro deep hole; multi-aperture flushing; side flushing



Citation: Chuvaree, S.; Kanlayasiri, K. Effects of Side Flushing and Multi-Aperture Inner Flushing on Characteristics of Electrical Discharge Machining Macro Deep Holes. *Metals* **2021**, *11*, 148. <https://doi.org/10.3390/met11010148>

Received: 4 November 2020

Accepted: 28 December 2020

Published: 13 January 2021

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Electrical discharge machining (EDM) is a non-traditional machining method that relies on the electro-thermal effect of the discharge current between the electrode and workpiece to remove material in dielectric fluid. EDM is used to fabricate machining holes in tool materials [1–3]. There are three groups of EDM holes, depending on the cross-sectional area of the electrode: micro (cross-sectional area of electrode $<1 \text{ mm}^2$), meso ($<10 \text{ mm}^2$), and macro ($>10 \text{ mm}^2$).

The characteristics of the EDM deep hole are subject to several machining parameters, such as the flushing method and machining depth [4,5]. Non-ideal EDM conditions result in gap clearance (GC) distortion. Figure 1a–c show three types of gap clearance distortion: (a) reverse taper, (b) V-shaped taper, and (c) barrel taper [6–9]. The gap clearance distortion worsens as the ratio of hole depth to electrode diameter (depth-to-diameter ratio) increases.

The non-flushing EDM technology is unsuitable for deep holes with large depth-to-diameter ratios due to poor debris removal [10]. In [11], Tanjilul et al. investigated the effect of debris particle size and flushing mechanism on debris removal efficiency. The disproportionate depth-to-diameter ratio (i.e., the depth of the copper electrode is excessively greater than its diameter) induced distortion in the cavity wall. Specifically, in this research, the copper electrode depth and diameter are 50 mm and 12 mm, resulting

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

in a disproportionate depth-to-diameter ratio. Meanwhile, pulse on-time and electrical current influenced the deep hole profile [12].

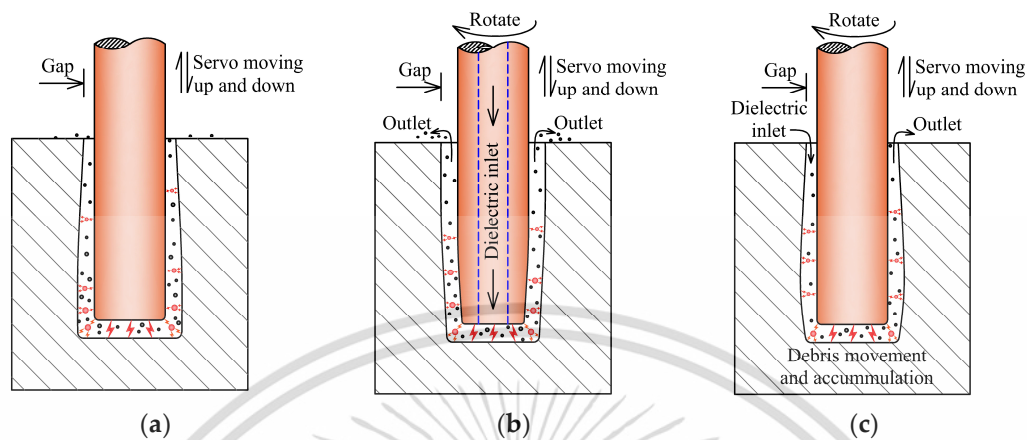


Figure 1. Gap clearance distortion: (a) Reverse taper, (b) V-shaped taper, (c) barrel taper.

Flushing plays a crucial role in the EDM process, since flushing removes debris from the machining gap and affects the EDM performance and deep hole characteristics [13]. Side flushing is conventionally used in EDM due to its simplicity and relatively efficient debris removal. The accumulated debris in the machining gap increases the electrical conductivity of dielectric fluid, giving rise to secondary spark and poor EDM performance.

In deep-hole EDM with side flushing, the increased viscosity of the dielectric fluid in the narrow machining gap hinders the removal of debris and air bubbles. The inefficient removal of debris and bubbles induces a secondary spark, resulting in low EDM performance. As a result, alternative flushing methods have been proposed, including linear motor equipped [14], mono hole inner flushing [15], side suction flushing [16], and modified electrodes [17]. In [14–17], single-channel, multi-channel, and channel-less cylindrical electrodes were comparatively investigated. The results showed that compared to the multi-channel electrode, the single-channel electrode is less ideal for blind-hole drilling due to spike at the center of the hole base. The channel-less cylindrical electrode is commonly used in die sinking.

Specially designed electrodes were also proposed for specific machining tasks. In [18], an inclined multi-hole electrode was proposed to reduce the accumulation of debris in the machining gap. In [19], a novel flushing technique using multiple hollow electrodes bundled together was investigated in comparison with side flushing using a single solid electrode in machining titanium alloy.

The material removal rate and electrode wear ratio are commonly used to assess the EDM performance. Gap clearance determines the dimensional accuracy and quality of machined holes. The EDM performance metrics (material removal rate, electrode wear ratio, and gap clearance) deteriorate as the hole depth increases. Nevertheless, the deterioration could be mitigated by optimizing the machining parameters, such as the pulse on-time, pulse off-time, current, electrode rotation, flushing method, machining depth, and electrode different designs. Open-gap voltage also affects the size of the spark gap. Specifically, in high-conductivity workpieces and electrodes.

The trade-off nature of the material removal rate, electrode wear ratio, and gap clearance presents challenges to EDM machine operators [20–22]. In [23], a mathematical model, based on response surface methodology and desirability function, was proposed to analyze the effect of EDM parameters on metal matrix composite (MMC) material. In [24], a response surface methodology based on a mathematical model was proposed to establish the relationship between EDM parameters (pulse on-time, gap voltage, and current) and material removal rate, gap size, roughness average, and electrode wear ratio. In [25], a response surface methodology based on the desirability function was utilized to investigate

the EDM of tool steels, and it was found that a longer pulse on-time increased the material removal rate while reducing the electrode wear ratio.

The effects of machining parameters on the EDM performance and characteristics of EDM micro deep holes have been extensively researched [26–28]. However, research on the effect of machining parameters on the EDM macro deep holes is very limited. In practice, in macro deep hole machining, EDM with side flushing is prone to gap clearance distortion, and the distortion worsens as the depth-to-diameter ratio increases [29].

As a result, this research proposes EDM with multi-aperture inner flushing for machining macro deep holes with a depth-to-diameter ratio greater than four. In addition, the effects of machining parameters on the material removal rate, electrode wear ratio, and gap clearance of EDM with conventional side flushing and proposed multi-aperture flushing were investigated and compared. The machining parameters included pulse on-time, pulse off-time, current, and electrode rotation. Given the trade-off nature of the material removal rate, electrode wear ratio, and gap clearance, response surface methodology and desirability function were used to optimize the machining conditions of EDM with side flushing and multi-aperture flushing. This study also examined the effect of side flushing and multi-aperture flushing on the gap clearance profile and surface characteristics. This research lies in the use of multi-aperture flushing to improve the flushing ability and removal of debris from the machining gap during the EDM of the deep hole process, leading to the EDM deep holes performance and integrity of the machined surface.

2. Materials and Methods

2.1. Experimental Materials and Setup

In this research, an ARISTECH CNC-EDM 430 electrical discharge machine (Aristech, Taiwan) with a positive-polarity copper electrode was used to machine AISI P20 plastic mold steel. The mold steel was 57 mm × 55 mm × 12 mm (W × L × T) in dimension, and the electrode was of copper (99.90% purity) and 12 mm × 100 mm (Ø × L) in dimension.

Prior to machining, the mold steel (i.e., workpiece) was polished by a surface grinder and rotated by 90°. The rotated workpiece was 57 mm × 12 mm × 55 mm (W × L × T) in dimension, and the machining hole was 50 mm deep. The macro deep holes were fabricated by EDM with conventional side flushing and proposed multi-aperture flushing. The dielectric fluid was EDM oil of commercial grade (TOTAL DIEL MS 700, Total Lubrifiants, Nanterre Cedex, France). The flushing pressure of the side flushing and proposed multi-aperture flushing were carried out under the same conditions (0.098 MPa). Table 1 tabulates the chemical composition of the experimental plastic mold steel.

Table 1. Chemical composition of AISI P20 plastic mold steel.

Element	C	Mn	Cr	Mo	Si	S	Fe
wt %	0.28	0.6	2.0	0.5	0.2	<0.03	Bal.

Figure 2a shows the schematics of EDM macro deep hole experimental setup. A specially designed rotary chuck was used in the EDM deep hole process and outfitted to the EDM machine. The rotary chuck was employed to rotate the electrode, resulting in improved flushing and debris removal from the machining gap. Figure 2b shows a prototype of the multi-aperture inner flushing copper electrode. The inner and outer diameters of the copper electrode are 8.4 mm and 12 mm, respectively. The electrode has 12 inner apertures at the base (1 mm in diameter). The flushing pressure was 0.098 MPa.

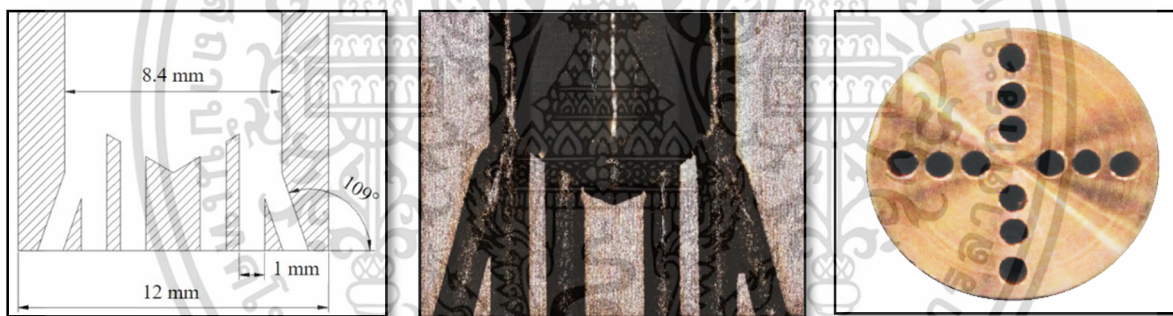
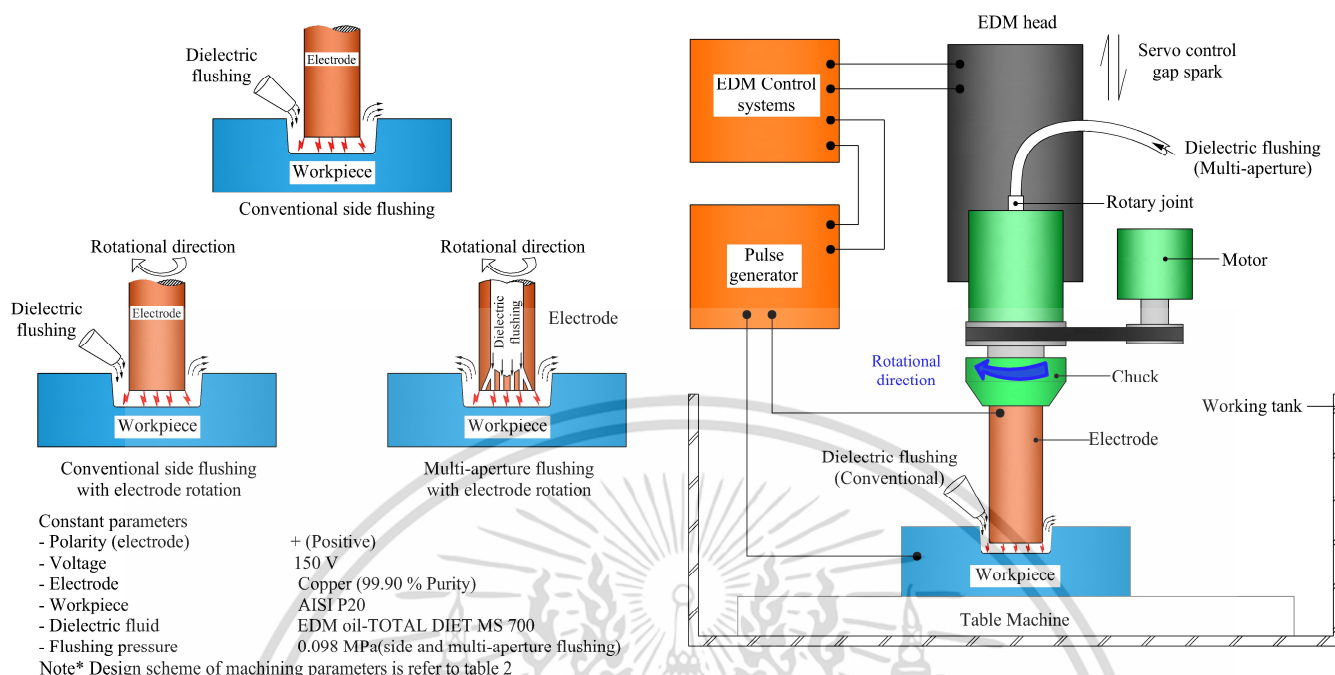


Figure 2. (a) Schematics of electrical discharge machining (EDM) macro deep hole experimental setup (conventional side flushing and multi-aperture flushing), (b) multi-aperture inner flushing copper electrode (electrode prototype).

Given the depth-to-diameter ratio greater than four (machining depth of 50 mm and copper electrode diameter of 12 mm), the gap clearance (GC) between the electrode and workpiece is susceptible to distortion. In this research, the GC profiles of deep holes machined with side flushing and multi-aperture inner flushing were characterized by using a 3D handy scanner (Creaform REVscan, Creaform Inc., Levis, QC, Canada) and noncontact laser scanning confocal microscope (LEXT OLS 5000, Olympus, Tokyo, Japan). The copper electrode diameter was determined by the 3D handy scanner, and the EDM deep hole diameter was determined by the noncontact laser scanning confocal microscope. To determine distortion, the GC was measured at six locations (1, 10, 20, 30, 40, and 50 mm) in the machining direction, as shown in Figure 3. The maximum distortion of the six locations was used as the GC of a given EDM specimen because the maximum distortion reflects the effect of the disproportionate depth-to-diameter ratio (i.e., >4). The microstructure of the copper electrode and machined workpiece was analyzed by scanning electron microscopy (SEM) (JSM-5800LV, JEOL, Peabody, MA, USA), and the elemental composition was analyzed by energy-dispersive spectrometry (EDS) (X-Max, OXFORD Instruments, Concord, MA, USA). The effect of a secondary spark on the copper electrode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และสงวนสิทธิ์ในเนื้อหาโดยผู้จัดทำเอกสาร
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

of EDM with side flushing and multi-aperture flushing were characterized by using digital microscope (DSX 1000, Olympus, Japan).

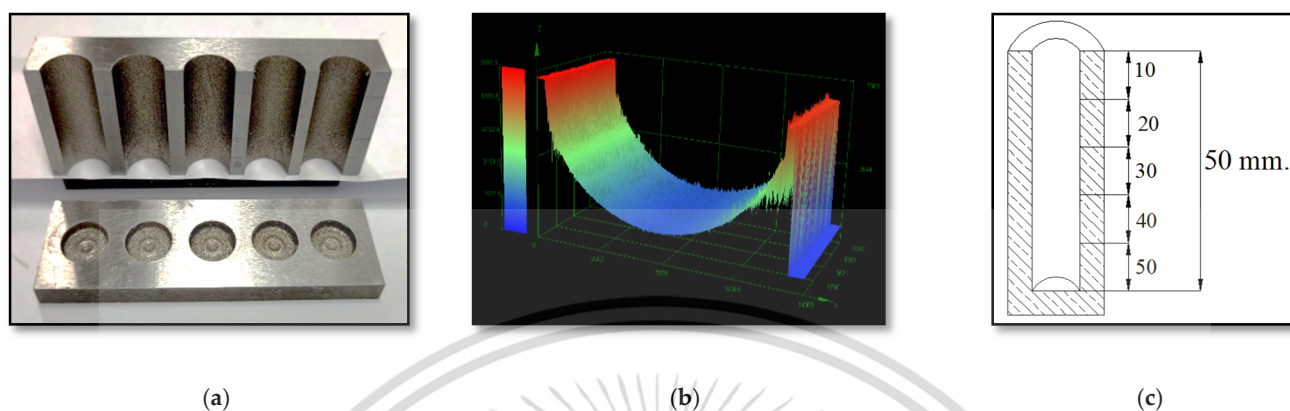


Figure 3. The gap clearance profiles: (a) dismembered AISI P20 tool steel workpieces, (b) maximum gap clearance (GC) distortion measurement, (c) locations of GC distortion measurement.

2.2. Experimental Design

RSM-based central composite design (CCD) was used to individually optimize the machining parameters of EDM deep hole that maximized material removal rate (MRR) while minimizing electrode wear ratio (EWR) and gap clearance (GC). There were four machining parameters: pulse on-time, pulse off-time, current, and electrode rotation. Table 2 tabulates the design scheme of the machining parameters and their levels: low, center, and high. The CCD generated 31 machining conditions, consisting of 16 factorial points, 7 center points, and 8 axial points. The EDM parameters and corresponding parametric values were based on previous studies on EDM using modified copper electrodes [4,30,31].

Table 2. Design scheme of machining parameters and their levels.

Factor Symbol/Notation	Parameters	Unit	Levels		
			Low (−1)	Center (0)	High (+1)
A (t_{on})	Pulse on-time	μs	50	100	150
B (t_{off})	Pulse off-time	μs	2	10	20
C (I)	Current	A	9	12	15
D (N)	Electrode rotation	rpm	0	35	70

In this research, the workpiece and electrode were weighed before and after the deep hole machining with 0.001-g precision scale. The MRR and EWR was calculated by Equation (1) and (2), respectively.

$$MRR \text{ (mm}^3/\text{min)} = \frac{(W_{w1} - W_{w2})}{\rho_w \times Mt} \times 10^3 \quad (1)$$

$$EWR \text{ (%) } = \frac{(W_{E1} - W_{E2} \times \rho_w)}{(W_{w1} - W_{w2} \times \rho_E)} \times 100 \quad (2)$$

In Equation (1), W_{w1} and W_{w2} represent the weight of the workpiece before and after deep hole machining; and ρ_w and Mt stand for the density of the workpiece (AISI P20, 7.786 g/cm³) and EDM machining time (min), respectively. In Equation (2), W_{E1} and W_{E2} represent the electrode weight before and after machining; and ρ_E is the density of copper electrodes (8.94 g/cm³) [20,24].

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3. Multi-Response Optimization

Due to the trade-off nature of the responses (MRR, EWR, and GC), this research utilized the desirability function to collectively optimize the machining parameters. A desirability function assesses the effectiveness of a collection of machining parameters in satisfying the response goals. Specifically, the composite desirability function (D) is the summation of individual desirabilities (d_i).

The individual desirability scores (d_i) range from 0 to 1, where 0 indicates a response outside the parameter boundaries and 1 indicates an ideal response. Higher individual desirabilities (d_i) contribute to a higher composite desirability (D) [32]. The individual desirability functions for maximum and minimum responses are expressed in Equations (3) and (4), respectively. In this research, the response goals are the maximum MRR and minimum EWR and GC.

$$d_i = \begin{cases} 0 & y_i < L_i \\ \frac{y_i - L_i}{T_i - L_i} & L_i \leq y_i \leq T_i \\ 1 & y_i > T_i \end{cases}^w \quad (3)$$

$$d_i = \begin{cases} 0 & y_i < T_i \\ \frac{U_i - y_i}{U_i - T_i} & T_i \leq y_i \leq U_i \\ 1 & y_i > U_i \end{cases}^w \quad (4)$$

where d_i is the individual desirability function, L_i is the lower limit, U_i is the upper limit, y_i is the response, T_i is the target response, and w is the individual desirability weight. The desirability weight was varied between 0.1 and 10, depending on the emphasis given to a particular response.

Likewise, the composite desirability function (D) scores range from 0 to 1, where 0 indicates a response outside the parameter boundaries and 1 indicates an ideal response. The desirability weight (w) was varied between 0.1 and 10, depending on the emphasis given to a particular response [33]. The composite desirability function (D) to optimize a collection of machining parameters is expressed in Equation (5).

$$D = \left(d_1^{w_1} \times d_2^{w_2} \times \dots \times d_n^{w_n} \right)^{1/n} = \left[\prod (d_i^{w_i}) \right]^{1/w} \quad (5)$$

3. Results and Discussion

3.1. Effect of the Machining Parameters on MRR of EDM With Side and Multi-Aperture Flushing

Table 3 tabulates the analysis of variance (ANOVA) results of the reduced regression model for MRR of EDM with side flushing (MRR_{sf}). MRR_{sf} was significantly correlated to pulse on-time (A), current (C), current squared (C^2), and interaction between A and C ($p < 0.05$), with R^2 and adjusted R^2 of 85.33% and 83.07%. The reduced multiple regression model for MRR_{sf} is expressed in Equation (6).

Table 3. The ANOVA of the reduced regression model for material removal rate (MRR) of EDM with side flushing.

Source	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F-Value	p-Value	Coefficient
Model	364.13	4	91.033	37.80	<0.001	22.0391
A	55.86	1	55.859	23.19	<0.001	−0.0619
C	269.82	1	269.816	112.02	<0.001	−3.2590
C^2	14.85	1	14.846	6.16	0.020	0.1558
AC	23.61	1	23.612	9.80	0.004	0.0081
Error	62.62	26	2.409			
Total	426.76	30				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ $R^2 = 85.33\%$ ที่ออก $R^2(\text{adj}) = 83.07\%$ อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$MRR_{sf} = 22.0391 - 0.0619A - 3.2590C + 0.1558C^2 + 0.0081AC \quad (6)$$

Figure 4 illustrates the MRR of EDM with side flushing as a function of pulse on-time and current. MRR_{sf} is positively correlated with pulse on-time and current. A longer pulse on-time and higher current generated high machining temperatures and high-intensity electrical discharge, resulting in efficient material removal. In Figure 4, the maximum MRR_{sf} was achieved under 150 μ s pulse on-time and 15 A current.

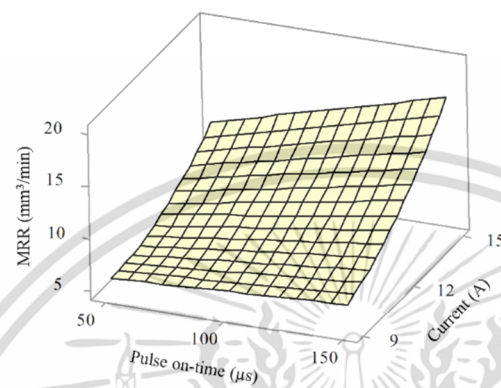


Figure 4. MRR_{sf} as a function of pulse on-time and current, given pulse off-time = 10 μ s and electrode rotation = 35 rpm.

Table 4 presents the ANOVA results of the reduced regression model for MRR of EDM with multi-aperture flushing (MRR_{mf}). MRR_{mf} was significantly correlated to pulse on-time (A), pulse off-time (B), current (C), electrode rotation (D), and AC interaction ($p < 0.05$), with R^2 and adjusted R^2 of 92.64% and 91.16%. Equation (7) is the reduced multiple regression model for MRR_{mf} .

$$MRR_{mf} = 8.90 - 0.0805A - 0.1016B - 0.038C + 0.01709D + 0.01021AC \quad (7)$$

Table 4. The ANOVA of the reduced regression model for the material removal rate (MRR) of EDM with multi-aperture flushing.

Source	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F-Value	p-Value	Coefficient
Model	295.459	5	59.092	62.89	<0.001	8.90
A	79.632	1	79.632	84.76	<0.001	−0.0805
B	15.127	1	15.127	16.10	<0.001	−0.1016
C	156.722	1	156.722	166.81	<0.001	−0.038
D	6.438	1	6.438	6.85	0.015	0.01709
AC	37.540	1	37.540	39.96	<0.001	0.01021
Error	23.488	25	0.940			
Total	318.948	30				
	$R^2 = 92.64\%$	R^2 (adj) = 91.16%				

In Figure 5a, MRR_{mf} was positively correlated with pulse on-time and current. A longer pulse on-time and higher electrical current generated higher temperatures in the machining gap, resulting in higher material removal efficiency. A shorter pulse off-time and faster electrode rotation improved the material removal in the machining gap (Figure 5b). Based on Figure 5a,b, the maximum MRR_{mf} was achieved under 150 μ s pulse on-time, 2 μ s pulse off-time, 15 A current, and 70 rpm electrode rotation.

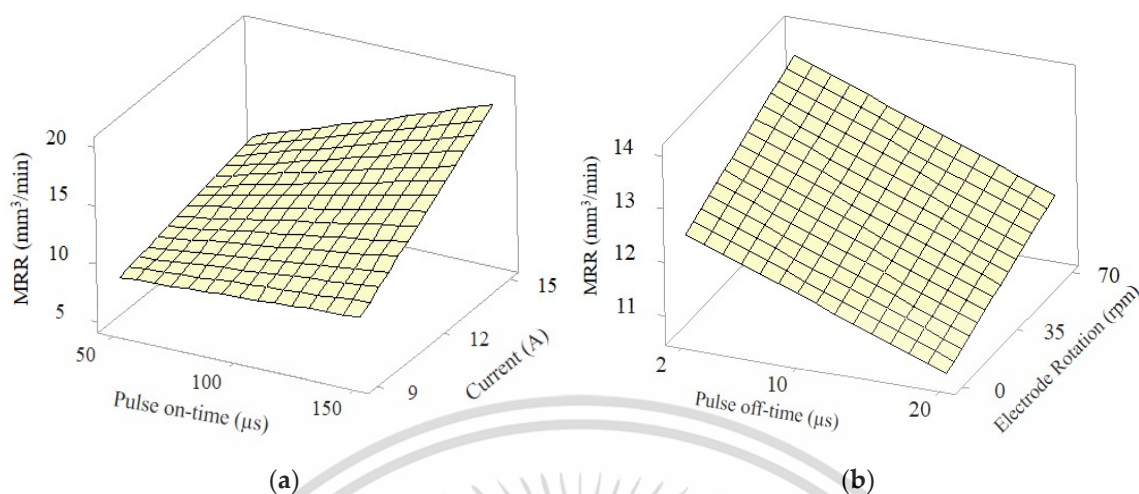


Figure 5. MRR_{mf} as a function of (a) pulse on-time and current, given pulse off-time = 10 μs and electrode rotation = 35 rpm, (b) pulse off-time and electrode rotation, given pulse on-time = 100 μs and current = 12 A.

3.2. Effect of the Machining Parameters on EWR of EDM with Side and Multi-Aperture Flushing

Table 5 presents the ANOVA results of the reduced regression model for EWR of EDM with side flushing (EWR_{sf}). EWR_{sf} was significantly correlated to pulse on-time (A), current (C), electrode rotation (D), square of the pulse on-time (A^2), and AC and BC interactions ($p < 0.05$), with R^2 and adjusted R^2 of 93.24% and 91.18%. The reduced multiple regression model for EWR_{sf} is expressed in Equation (8).

$$EWR_{sf} = 0.887 - 0.0320A + 0.0423B + 0.2355C - 0.0034D + 0.00015A^2 - 0.000975AC - 0.00412BC \quad (8)$$

Table 5. The ANOVA of the reduced regression model for electrode wear ratio (EWR) of EDM with side flushing.

Source	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F-Value	p-Value	Coefficient
Model	11.8348	7	1.69069	45.31	<0.001	0.887
A	8.5257	1	8.52570	228.48	<0.001	-0.0320
B	0.0730	1	0.07301	1.96	0.175	0.0423
C	1.3916	1	1.39160	37.29	<0.001	0.2355
D	0.2554	1	0.25537	6.84	0.015	-0.0034
A^2	1.0609	1	1.06094	28.43	<0.001	0.00015
AC	0.3425	1	0.34252	9.18	0.006	-0.000975
BC	0.1979	1	0.19793	5.30	0.031	-0.00412
Error	0.8582	23	0.03731			
Total	12.6930	30				
	$R^2 = 93.24\%$	$R^2 (adj) = 91.18\%$				

Figure 6a,b illustrates the EWR of EDM with side flushing (EWR_{sf}) as a function of pulse on-time and current, and pulse off-time and current. In Figure 6a, the pulse on-time was inversely correlated with EWR. Under 50 μs pulse on-time condition, the high EWR_{sf} was attributable to the movement of electrons from the workpiece (cathode) to the positive-polarity electrode. On the other hand, a longer pulse on-time (150 μs) expanded the plasma channel radius, leading to the movement of positive ions from the positive-polarity electrode to the workpiece and the collision of positive ions. As a result, the EWR decreased with increase in pulse on-time [34].

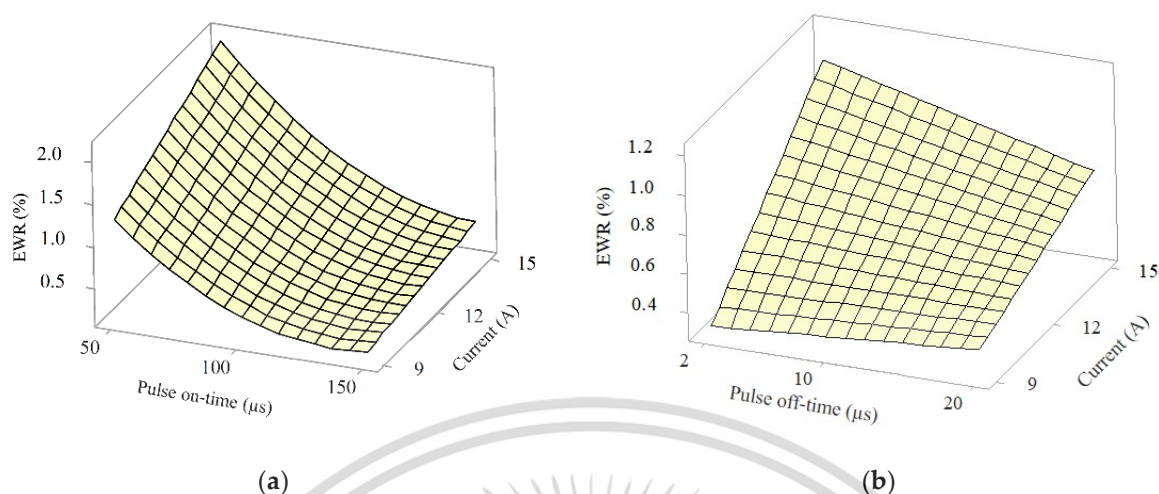


Figure 6. EWR_{sf} as a function of: (a) pulse on-time and current, given pulse off-time = 10 μs and electrode rotation = 35 rpm, (b) pulse off-time and current, given pulse on-time = 100 μs and current = 12 A.

In Figure 6b, at 2 μs pulse off-time, EWR_{sf} significantly increased with higher current. On the other hand, at longer pulse off-time (20 μs), EWR_{sf} was lower as the current increased. Based on Figure 6a,b, the minimum EWR_{sf} was achieved with 150 μs pulse on-time, 20 μs pulse off-time, and 9 A current.

More specifically, in Figure 6a, given 50 μs pulse on-time, EWR significantly increased with the increase in the current. Meanwhile, under the longer pulse on-time (150 μs), a higher current had a minimal effect on EWR. The longer pulse on-time and higher electrical current induced the formation of film-like carbon black on the copper electrode as carbon in the workpiece migrated to the electrode [35]. The film-like carbon black protected against the electrode wear, resulting in lower EWR [2].

Figure 7a shows the film-like carbon black on the electrode and the SEM micrograph at 40 mm depth, given 150 μs pulse on-time and 15 A current. Figure 7b illustrates the corresponding EDS compositional analysis, with 51.89% carbon element, 9.85% oxide element, 25.51% copper element, 11.85% Fe element, and other elements.

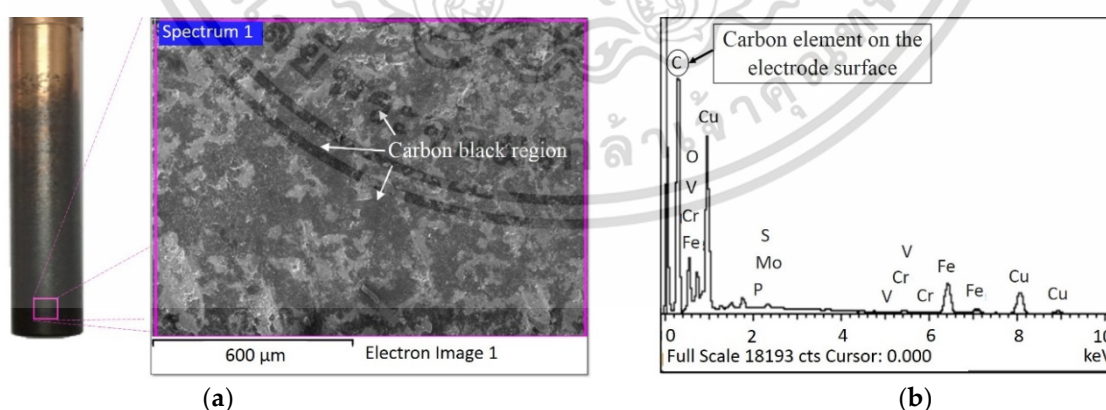


Figure 7. Film-like carbon black on copper electrode: (a) SEM micrograph at 40 mm depth, (b) energy-dispersive spectrometry (EDS) compositional analysis.

The ANOVA results of the reduced regression model for EWR of EDM with multi-aperture flushing (EWR_{mf}) are tabulated in Table 6. EWR_{mf} was significantly correlated to pulse on-time (A), square of pulse on-time (A²), and pulse off-time (B), current (C) and pulse off-time (B), electrode rotation (D) interaction ($p < 0.05$), with R² and adjusted R² of

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากวารสาร

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

91.31% and 87.59%. The reduced multiple regression model for EWR_{mf} is expressed in Equation (9).

$$EWR_{mf} = 14.80 - 0.2181A + 0.190B + 0.219C - 0.0843D + 0.000756A^2 + 0.000093AD - 0.01976BC + 0.001769BD + 0.00404CD \quad (9)$$

Table 6. The ANOVA of the reduced regression model for electrode wear ratio (EWR) of EDM with multi-aperture flushing.

Source	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F-Value	p-Value	Coefficient
model	227.120	9	25.234	32.82	<0.001	14.80
A	182.049	1	182.049	176.89	<0.001	-0.2181
B	0.343	1	0.343	0.330	0.570	0.190
C	3.312	1	3.312	3.220	0.087	0.219
D	1.110	1	1.110	1.08	0.311	-0.0843
A ²	26.896	1	26.896	26.13	<0.001	0.000756
AD	0.420	1	0.420	0.410	0.530	0.000093
BC	4.560	1	4.560	4.83	0.048	-0.01976
BD	4.976	1	4.976	3.78	0.039	0.001769
CD	2.874	1	2.874	2.79	0.110	0.00404
Error	32.881	21	1.029			
Total	248.715	30				
	$R^2 = 91.31\%$	$R^2 (adj) = 87.59\%$				

In Figure 8a, EWR_{mf} and pulse on-time were inversely correlated, and the electrode rotation had a negligible effect on EWR_{mf} . In Figure 8b, at 2 μs pulse off-time, EWR_{mf} was inversely correlated to the electrode rotation. The lower EWR_{mf} was attributable to greater flushing capability of the multi-aperture inner scheme, which resulted in higher debris removal efficiency as the electrode rotation increased. At 20 μs pulse off-time, EWR_{mf} increased with increase in the electrode rotation. Based on Figure 8a,b, the minimum EWR_{mf} was achieved with 150 μs pulse on-time, 2 μs pulse off-time, and 70 rpm electrode rotation.

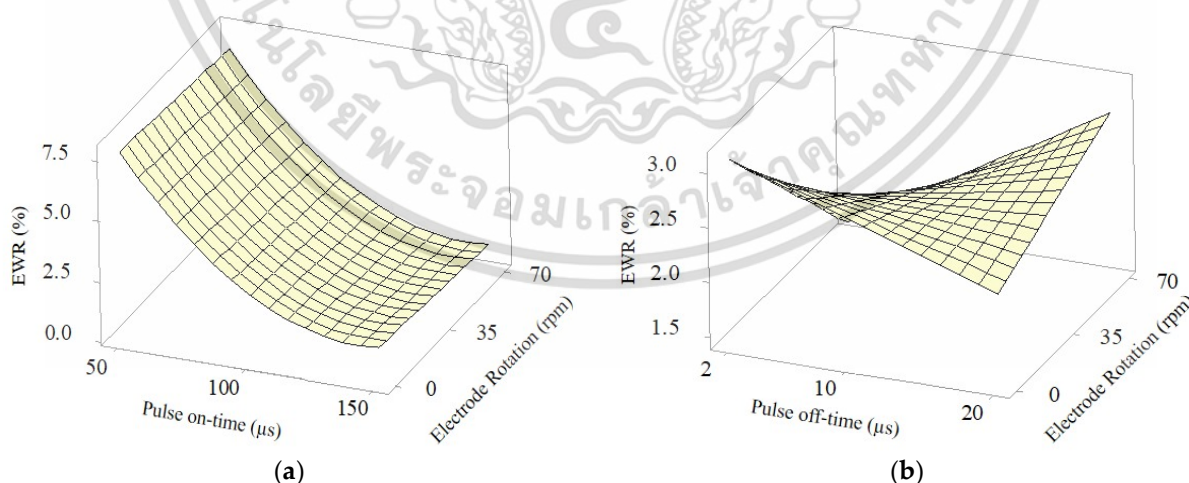


Figure 8. EWR_{mf} as a function of (a) pulse on-time and electrode rotation, given pulse off-time = 10 μs and current 12 A, (b) pulse off-time and electrode rotation, given pulse on-time = 100 μs and current = 12 A.

3.3. Effect of the Machining Parameters on GC of EDM with Side and Multi-Aperture Flushing

Table 7 presents the ANOVA results of the reduced regression model for the GC of EDM with side flushing (GC_{sf}). GC_{sf} was significantly correlated to pulse on-time (A),

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอาจนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

current (C), and BD and CD interactions ($p < 0.05$), with R^2 and adjusted R^2 of 90.26% and 87.82%. The reduced multiple regression model for GC_{sf} is expressed in Equation (10).

$$GC_{sf} = 0.0843 + 0.000398A + 0.000434B + 0.005006C + 0.0006D - 0.000014BD - 0.000037CD \quad (10)$$

Table 7. The ANOVA of the reduced regression model for gap clearance (GC) of EDM with side flushing.

Source	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F-Value	p-Value	Coefficient
Model	0.039611	6	0.006602	37.05	<0.001	0.0843
A	0.028481	1	0.028481	159.84	<0.001	0.000398
B	0.000019	1	0.000019	0.10	0.750	0.000434
C	0.008889	1	0.008889	49.89	<0.001	0.005006
D	<0.00001	1	<0.00001	<0.001	0.999	0.0006
BD	0.001246	1	0.001246	6.99	0.014	−0.000014
CD	0.00097	1	0.000977	5.48	0.028	−0.000037
Error	0.004276	24	0.000178			
Total	0.043888	30				
	$R^2 = 90.26\%$	$R^2 (adj) = 87.82\%$				

Figure 9a–c illustrates the GC of EDM with side flushing (GC_{sf}) as a function of pulse on-time and current; pulse off-time and electrode rotation; and current and electrode rotation, respectively. In Figure 9a, GC_{sf} was positively correlated to pulse on-time and electrical current. With side flushing, a longer pulse on-time and higher current generated higher temperatures and higher intensity discharge, enhancing machining efficiency. Nevertheless, the enhanced machining resulted in the rapid accumulation of debris and eventually wider GC_{sf} , given the limited debris removal efficiency of side flushing [25]. GC_{sf} became disproportionately wider as the depth-to-diameter ratio increased.

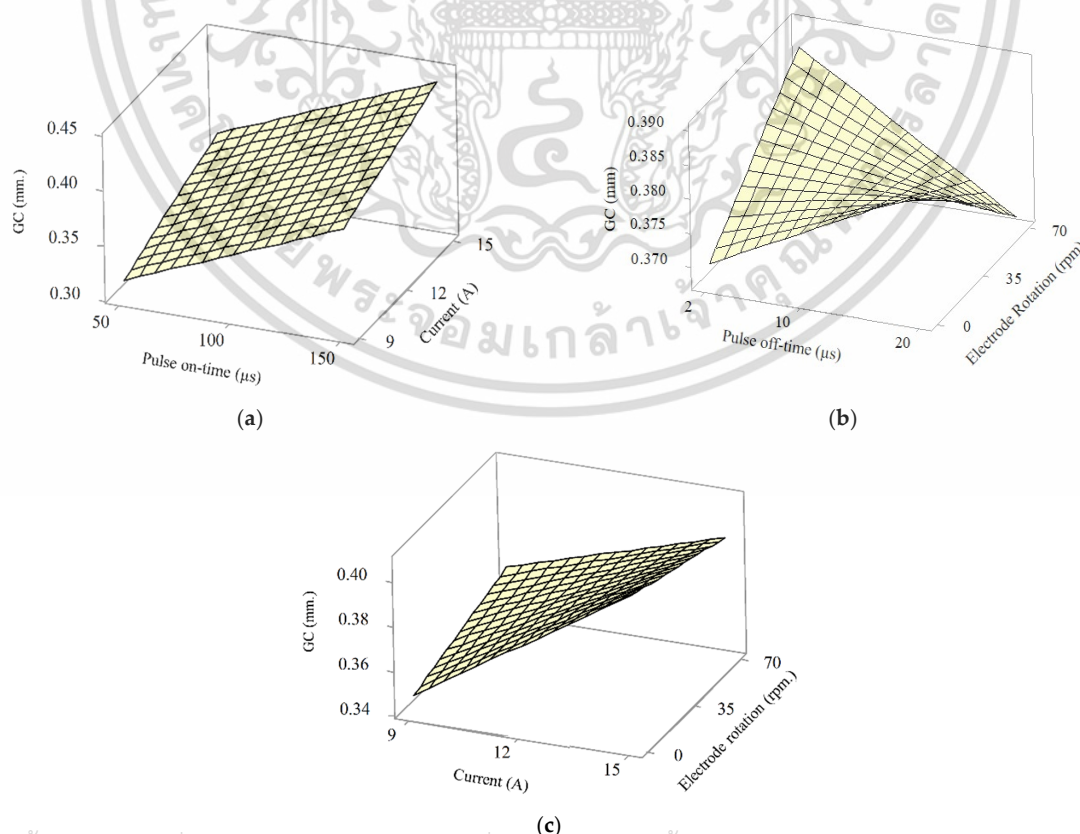


Figure 9. GC_{sf} as a function of (a) pulse on-time and current, given pulse off-time = 10 μ s and electrode rotation = 35 rpm, (b) pulse off-time and electrode rotation, given pulse on-time = 100 μ s and current = 12 A, (c) current and electrode rotation, given pulse on-time = 100 μ s, and pulse off-time = 10 μ s.

In Figure 9b, a longer pulse off-time and faster rotational speed resulted in narrower GC_{sf} as sufficient time was provided for the removal of debris. In Figure 9c, GC_{sf} became wider as the current increased. Nevertheless, the CG distortion was partially offset with increased electrode rotation speed. The minimum GC_{sf} was achieved with 50 μs pulse on-time, 2 μs pulse off-time, 9 A current, and 70 rpm electrode rotation.

Table 8 presents the ANOVA results of the reduced regression model for GC of EDM with multi-aperture flushing (GC_{mf}). GC_{mf} was significantly correlated to pulse on-time (A), current (C), electrode rotation (D), and AB and AC interactions ($p < 0.05$), with R^2 and adjusted R^2 of 78.34% and 70.46%. The reduced multiple regression model for GC_{mf} is in Equation (11).

$$GC_{mf} = 0.1758 - 0.000449A - 0.002395B - 0.00141C - 0.00045D + 0.000001D^2 + 0.000022AB + 0.000041AC + 0.000001AD \quad (11)$$

Table 8. The ANOVA of the reduced regression model for gap clearance (GC) of EDM with multi-aperture flushing.

Source	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F-Value	p-Value	Coefficient
model	0.010194	8	0.001699	13.84	<0.001	0.1758
A	0.005277	1	0.005277	43.00	<0.001	-0.000449
B	0.000038	1	0.000038	0.31	0.585	-0.002395
C	0.001217	1	0.001217	9.92	0.004	-0.00141
D	0.001503	1	0.001503	12.25	0.002	-0.00045
D ²	0.000006	1	0.000006	0.22	0.829	0.000001
AB	0.001616	1	0.001616	13.16	0.001	0.000022
AC	0.000619	1	0.000619	5.04	0.034	0.000041
AD	0.000093	1	0.000093	0.85	0.407	0.000001
Error	0.002945	22	0.000123	-	-	-
Total	0.013139	30	-	-	-	-
	$R^2 = 78.34\%$	R^2 (adj) = 70.46%				

In Figure 10a, GC_{mf} was positively correlated to pulse on-time and pulse off-time. A longer pulse on-time and longer pulse off-time increased the material removal efficiency and accumulation of debris. By comparison, GC_{mf} was narrower than GC_{sf} due to the greater debris removal efficiency of multi-aperture flushing. In Figure 10b, a longer pulse on-time increased the width of GC_{mf} , and the distortion worsened with increase in the electrical current. In Figure 10c, the GC_{mf} width increased with increase in the pulse on-time, while increased electrode rotation speeds minimally affected the GC_{mf} .

3.4. Multi-Response Optimization Using Desirability Function.

The machining parameters (pulse on-time, pulse off-time, current, and electrode rotation) were collectively optimized by using the desirability function to achieve maximum MRR and minimum EWR and GC. The objective functions were mathematically expressed in Equations (12)–(14), subject to the parameter boundaries.

Table 9 tabulates the criteria for multi-response optimization of EDM with side flushing. The output responses were assigned equal importance, while the weights (w) were 1.2, 1.0, and 1.0 for GC, EWR, and MRR. The depth-to-diameter ratio greater than four (machining depth of 50 mm and copper electrode diameter of 12 mm) rendered GC highly susceptible to distortion, resulting in the greater weight for GC (1.2). The optimal machining condition of EDM with side flushing was 100 μs pulse on-time, 20 μs off-time, 15 A current, and 70 rpm electrode rotation.

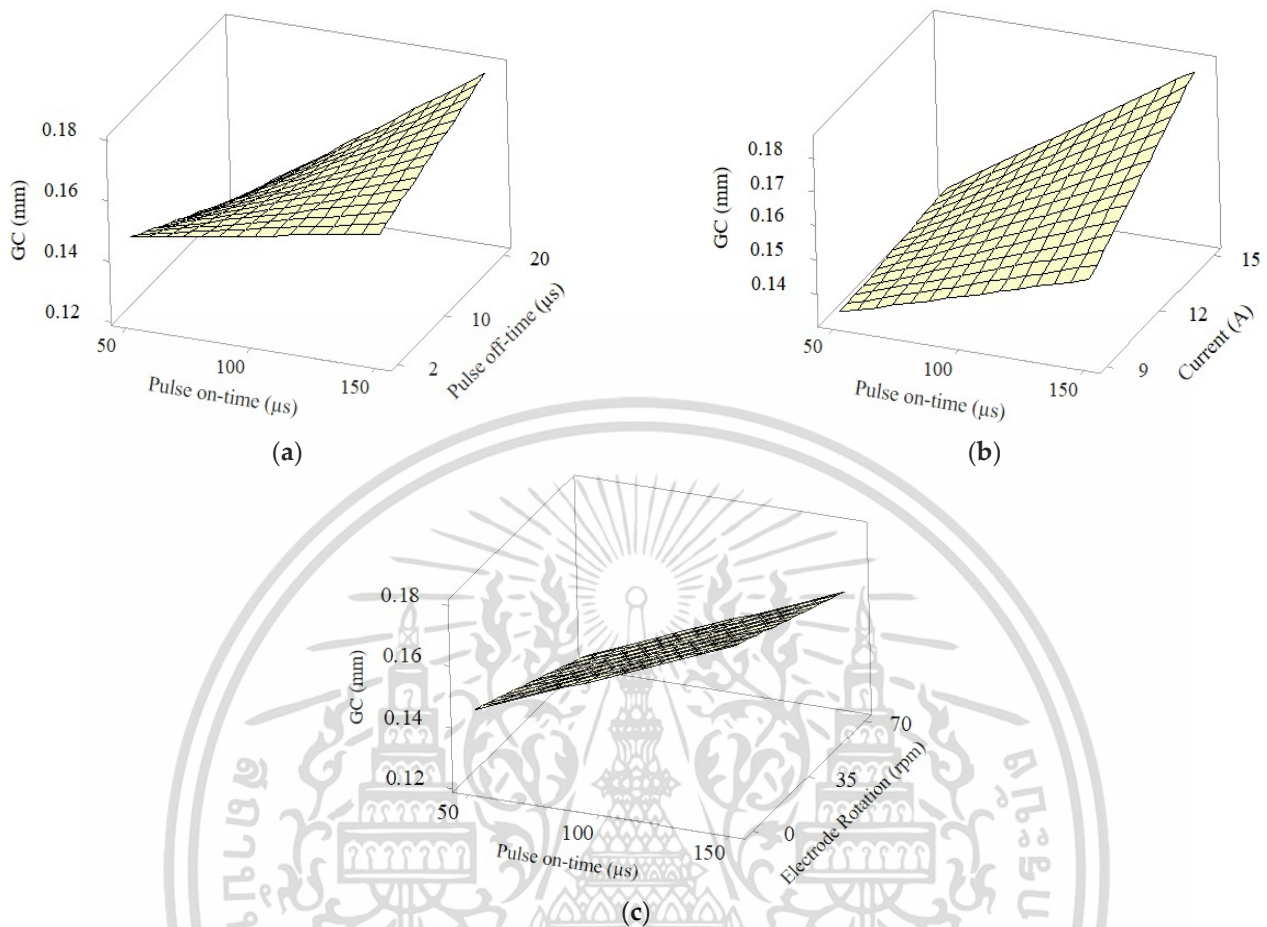


Figure 10. GC_{mf} as a function of (a) pulse on-time and pulse off-time, given current = 12 A and electrode rotation = 35 rpm, (b) pulse on-time and current, given pulse off-time = 10 μs and electrode rotation = 35 rpm, (c) pulse on-time and electrode rotation, given pulse off-time = 10 μs and current = 12 A.

Table 9. Criteria for multi-response optimization of EDM with side flushing.

Output Response	Goal	Lower (L_i)	Upper (U_i)	Weight (w)	Importance
Pulse on-time (μs)	In range	50	150	1	-
Pulse off-time (μs)	In range	2	20	1	-
Current (A)	In range	9	15	1	-
Electrode rotation (rpm)	In range	0	70	1	-
GC (mm)	Minimum	0.1545	0.238	1.2	1
EWR (%)	Minimum	0.0840	3.056	1.0	1
MRR (mm^3/min)	Maximum	4.636	18.9650	1.0	1

Objective functions:

$$\text{Maximize } MRR = f(t_{on}, t_{off}, I, N) \tag{12}$$

and

$$\text{Minimize } EWR \text{ and } GC = f(t_{on}, t_{off}, I, N) \tag{13}$$

Subject to,

$$\begin{aligned} 50 &\leq t_{on} \leq 150 \\ 2 &\leq t_{off} \leq 20 \\ 9 &\leq I \leq 15 \end{aligned} \tag{14}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 10 tabulates the criteria for multi-response optimization of EDM with multi-aperture flushing. Similarly, the output responses were assigned equal importance, while the weights (w) were 1.2, 1.0, and 1.0 for GC, EWR, and MRR. The optimal machining condition of EDM with multi-aperture flushing was 130 μ s pulse on-time, 2 μ s off-time, 15 A current, and 70 rpm electrode rotation. However, the machining parameter of our EDM machine was step-type controlled, the pulse on-time could only be set at 80, 100, 150, or 200 μ s. Therefore, in the following confirmation test, the pulse on-time was set at 150 μ s, which was the closest value of the optimal pulse on-time.

Table 10. Criteria for multi-response optimization of EDM with multi-aperture flushing.

Output Response	Goal	Lower (L_i)	Upper (U_i)	Weight (w)	Importance
Pulse on-time (μ s)	In range	50	150	1	-
Pulse off-time (μ s)	In range	2	20	1	-
Current (A)	In range	9	15	1	-
Electrode rotation (rpm)	In range	0	70	1	-
GC (mm)	Minimum	0.1125	0.211	1.2	1
EWR (%)	Minimum	0.3690	8.742	1.0	1
MRR (mm^3/min)	Maximum	7.366	21.660	1.0	1

To verify, experiments were carried out with five specimens of AISI P20 mold steel under the optimal conditions of EDM with side flushing and multi-aperture flushing. Tables 11 and 12 compare the predicted and experimental results of EDM with side flushing and multi-aperture flushing, respectively. In the Table 11, the experimental and RSM-predicted results were comparable, as evidenced by the average of error percentages below 5.4%. Specifically, in Table 12, the percentage errors of GC of EDM with multi-aperture flushing were noticeably higher than those of EDM with side flushing. The larger percentage errors of GC could be attributed to two key reasons: first, the substantially lower R^2 of the prediction model of EDM with multi-aperture flushing (78.34%; Table 8), in comparison with that of EDM with side flushing (90.26%; Table 7); and second, the machining parameter of our EDM machine was step-type controlled. The pulse on-time of the experimental multi-aperture flushing EDM machine ranges from 2 to 510 μ s (i.e., 2, 4, 8, 10, 16, 20, 50, 80, 100, 150, 200, 400, and 510 μ s). However, the optimal pulse on-time of EDM with multi-aperture flushing was 130 μ s. Given the machine limitation, the pulse on-time of 150 μ s was used in the experiment while the pulse off-time, current, and electrode rotation were optimal values (2 μ s, 15 A, and 70 rpm), thereby resulting in larger percentage errors of GC.

Table 11. The response surface methodology predicted and experimental results under the optimal machining condition of EDM with side flushing.

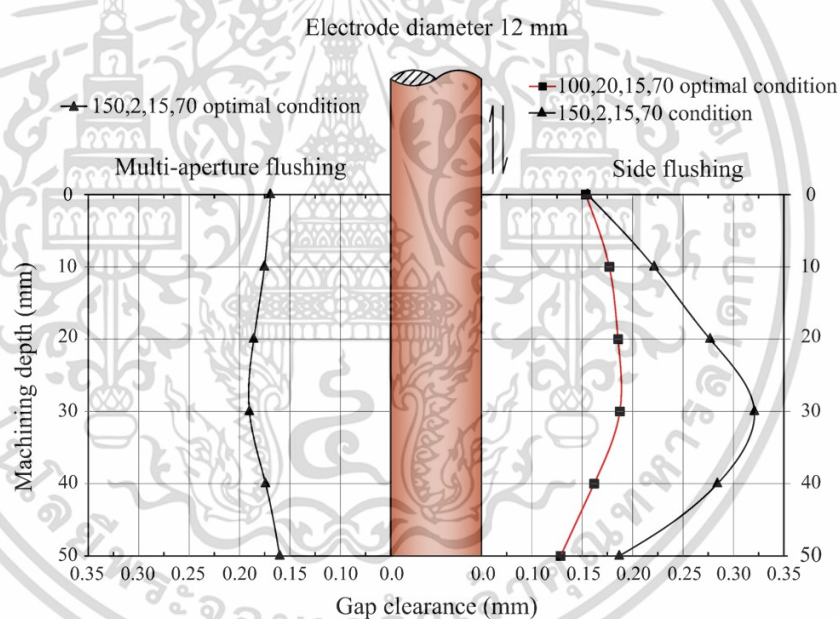
Exp. No.	Parameters				Material Removal Rate (mm^3/min)			Electrode Wear Ratio (%)			Gap Clearance (mm)		
	Pulse on-Time (μ s)	Pulse off-Time (μ s)	Current (A)	Electrode Rotation (rpm)	EXP.	Prediction	Error (%)	EXP.	Prediction	Error (%)	EXP.	Prediction	Error (%)
1	100	20	15	70	15.100	14.166	6.59	0.620	0.622	-0.32	0.200	0.191	4.71
2	100	20	15	70	15.352	14.166	8.37	0.675	0.622	8.52	0.204	0.191	6.80
3	100	20	15	70	14.851	14.166	4.83	0.639	0.622	2.73	0.194	0.191	1.57
4	100	20	15	70	14.961	14.166	5.61	0.660	0.622	6.10	0.197	0.191	3.14
5	100	20	15	70	15.729	14.166	11.03	0.581	0.622	-6.59	0.211	0.191	10.47
	Average				15.200		7.286	0.635		4.856	0.201		5.338

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 12. The response surface methodology predicted and experimental results under the optimal machining condition of EDM with multi-aperture flushing.

Exp. No.	Parameters				Material Removal Rate (mm ³ /min)			Electrode Wear Ratio (%)			Gap Clearance (mm)		
	Pulse on-Time (μs)	Pulse off-Time (μs)	Current (A)	Electrode Rotation (rpm)	EXP.	Prediction	Error (%)	EXP.	Prediction	Error (%)	EXP.	Prediction	Error (%)
1	150	2	15	70	21.660	20.236	7.036	1.588	1.737	−8.578	0.196	0.169	15.90
2	150	2	15	70	21.421	20.236	5.855	1.637	1.737	−5.757	0.201	0.169	18.86
3	150	2	15	70	20.806	20.236	2.816	1.772	1.737	−2.014	0.206	0.169	21.80
4	150	2	15	70	21.159	20.236	4.561	1.591	1.737	−8.405	0.205	0.169	21.23
5	150	2	15	70	20.983	20.236	3.691	1.602	1.737	−7.772	0.199	0.169	17.68
	Average				21.206		4.792	1.638		6.5052	0.201		19.094

On the other hand, the experiments with the EDM with side flushing were carried out as per the optimal machining condition, resulting in substantially lower percentage errors. Despite the considerably larger GC percentage errors of the multi-aperture flushing EDM, its GC profile was more uniform than that of side flushing EDM, as shown in Figure 11.

**Figure 11.** GC profiles of EDM with side flushing and multi-aperture flushing.

3.5. Comparison between the Performance of EDM with Side Flushing and Multi-Aperture Flushing

In practice, EDM flushing plays an important role in machining macro deep holes. In addition to the removal of debris from the machining gap, the chosen flushing method influences MRR, EWR, and GC. Side flushing is typically adopted in EDM due to ease of use and relatively efficient debris removal. However, for a deep hole with a depth-to-diameter ratio greater than three, the conventional side flushing suffers from limited debris removal. The inefficient flushing induces an accumulation of debris in the machining gap, which causes a secondary spark and GC distortion [30].

Table 13 compares the machining performance of EDM with conventional side flushing and the proposed multi-aperture inner flushing under the optimal machining conditions. The experiments were carried out with AISI P20 mold steel, and the machining performance metrics were MRR, EWR, GC, and machining time (MT).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 13. Optimal conditions and machining performance of EDM with side and multi-aperture flushing.

Flushing Scheme	Optimal Machining Parameters				MRR (mm ³ /min)	EWR (%)	GC (mm)	Machining Time (min)
	Pulse on-Time (μs)	Pulse off-Time (μs)	Current(A)	Electrode Rotation (rpm)				
Side flushing	100	20	15	70	15.729	0.581	0.194	339.01
Multi-aperture flushing	150	2	15	70	21.660	1.588	0.196	250.53

The MRR of multi-aperture flushing (21.660 mm³/min) was higher than that of side flushing (15.729 mm³/min), indicating the higher material removal efficiency of EDM with multi-aperture flushing. The EWR of multi-aperture flushing (1.588%) was noticeably greater than that of conventional side flushing (0.581%). The larger EWR was attributable to the higher intensity discharge on the electrode and smaller surface area of the multi-aperture flushing electrode in comparison with the side flushing electrode. Specifically, the multi-aperture flushing significantly improved the recovery of dielectric strength in the machining gap, which in turn increased the spark intensity. The higher spark intensity subsequently increased the MRR and EWR [5,19,31].

The GC of multi-aperture flushing (0.196 mm) was minimally wider than that of side flushing (0.194 mm), while the MT of multi-aperture flushing (250.53 min) was substantially shorter than that of side flushing (339.01 min). The substantial shorter MT was attributable to the more efficient flow of dielectric fluid of multi-aperture flushing and enhanced removal of debris [36].

3.6. Characteristics of GC of EDM with Side and Multi-Aperture Flushing

The GC profiles of EDM with side flushing and multi-aperture flushing were characterized at six machining depths: 1, 10, 20, 30, 40, and 50 mm, using a 3D handy scanner and noncontact laser scanning confocal microscope. Figure 11 compares the GC profiles of EDM with side and multi-aperture flushing under their respective optimal machining conditions, given 50 mm machining depth and 12 mm electrode diameter.

The optimal machining condition of EDM with side flushing was 100 μs pulse on-time, 20 μs pulse off-time, 10 A current, and 70 rpm electrode rotation, while that of multi-aperture flushing was 150 μs pulse on-time, 2 μs pulse off-time, 10 A current, and 70 rpm electrode rotation. The GC profiles of both flushing schemes under the optimal machining conditions were almost identical (0.194 and 0.196 mm for EDM with side flushing and multi-aperture flushing). However, the MRR of EDM with multi-aperture flushing was higher with a substantially shorter machining time (Table 13).

Furthermore, given the identical machining condition for side flushing and multi-aperture flushing (150 μs pulse on-time, 2 μs pulse off-time, 10 A current, and 70 rpm electrode rotation), the GC profile of EDM with side flushing exhibited large distortion at 30 mm machining depth (Figure 11). The large bulge (0.319 mm) was attributable to the rapid accumulation of debris as a result of enhanced MRR. The rapid accumulation of debris induced the incidence of a secondary spark, resulting in the GC distortion [37].

Figure 12a,b shows the effect of a secondary spark on the copper electrode of EDM with side flushing and multi-aperture flushing, respectively. In Figure 12a, large film-like carbon black was formed on the electrode surface, in addition to ubiquitous secondary spark craters. In Figure 12b, substantially smaller film-like carbon black was formed on the tip of the multi-aperture flushing electrode. There were a lower number of secondary spark craters but of larger sizes. The infrequent incidence of a secondary spark was attributable to the efficient removal of debris (and low debris accumulation) as a result of multi-aperture flushing and a faster electrode rotation speed.

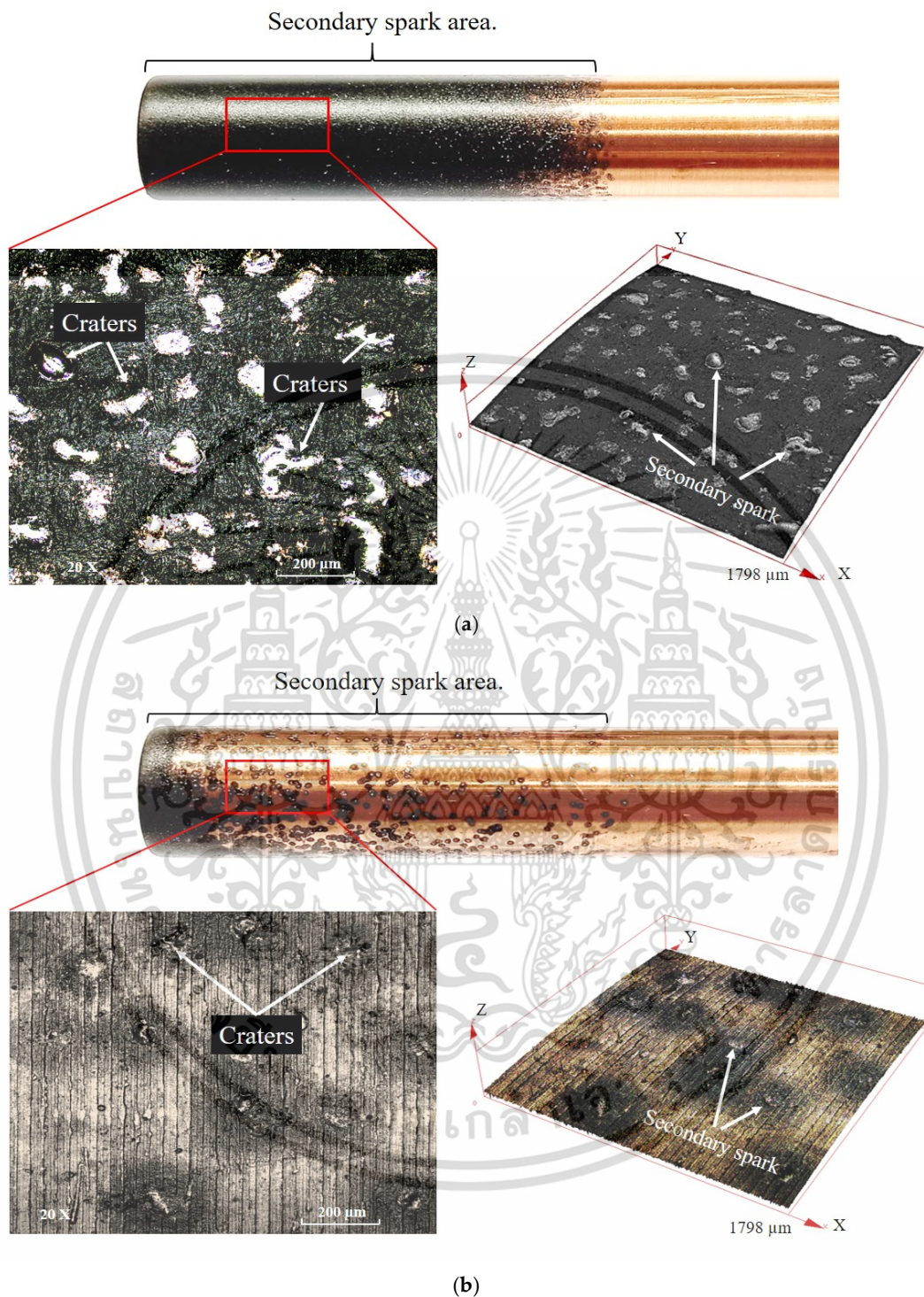


Figure 12. Craters and secondary sparks on the electrode: (a) EDM with side flushing, (b) EDM with multi-aperture flushing.

3.7. Surface Characteristics of EDM Deep Holes

Figure 13a,b shows the cross-sectional SEM images of macro deep holes at 30 mm machining depth using EDM with side flushing and multi-aperture flushing. Figure 13c,d illustrates the deep hole surface of EDM with side flushing and multi-aperture flushing.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

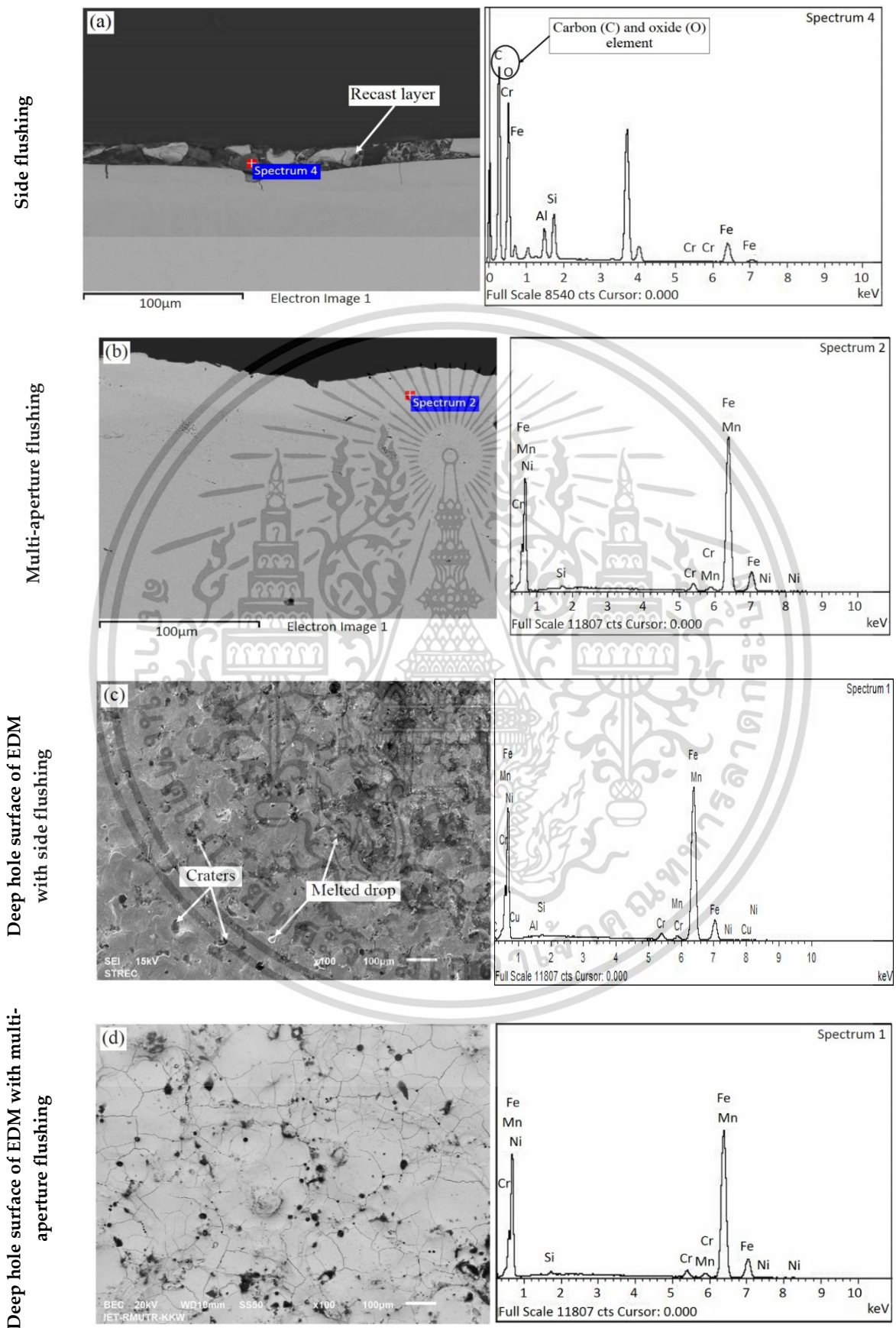


Figure 13. SEM images and EDS compositional analysis at 30 mm machining depth: (a) cross-sectional view of side flushing, (b) cross-sectional view of multi-aperture flushing, (c) deep hole surface of side flushing, (d) deep hole surface of multi-aperture flushing.

In Figure 13a, a recast layer was formed on the workpiece machined with side flushing. The recast layer was the deposition and re-settlement of melted material from the workpiece and electrode and carbon from the dielectric fluid [38]. The EDS compositional analysis showed the presence of carbon (46.31% *w/w*) and oxide elements (44.66% *w/w*) in great quantity, as shown in Table 14. The carbon and oxide elements induced the formation of a recast layer on the workpiece. Micro cracks were observed in the workpiece underneath the recast layer. The cracks were primarily attributable to the differential thermal contraction between the higher-temperature recast layer and lower-temperature workpiece [39].

Table 14. EDS analysis of cross-sectional view and top view of deep hole surface of EDM with side and multi-aperture flushing at 30 mm machining depth.

Element	Cross-Sectional View of Side Flushing		Cross-Sectional View of Multi-Aperture Flushing		Top View of EDM with Side Flushing		Top View of EDM with Multi-Aperture Flushing	
	Weight %	Atomic %	Weight %	Atomic %	Weight %	Atomic %	Weight %	Atomic %
C	46.31	56.03	18.73	51.57	16.44	47.61	16.81	48.33
O	44.66	40.56	-	-	-	-	-	-
Al	1.54	0.83	-	-	0.18	0.23	-	-
Si	2.44	1.26	0.42	0.49	0.31	0.39	0.30	0.37
Cr	0.12	0.03	1.85	1.17	1.66	1.11	1.88	1.25
Fe	4.94	1.28	76.58	45.35	78.86	49.11	78.62	48.46
Ni	-	-	0.89	0.50	1.07	0.63	0.83	0.49
Mn	-	-	1.40	0.84	1.29	0.82	1.34	0.83
Cu	-	-	0.13	0.07	0.20	0.11	0.22	0.12
Total	100.00		100.00		100.00		100.00	

In Figure 13b, no recast layer was detected on the workpiece machined with EDM with multi-aperture flushing. The carbon and ferrous elements were 18.73 and 76.58% *w/w* without the oxide element, indicating the absence of a recast layer (Table 14). The melted material and debris were efficiently removed with multi-aperture flushing, thereby minimizing re-solidification. The incidence of recast layer formation on the workpiece was substantially reduced with multi-aperture flushing. Nevertheless, micro cracks with shallow penetration depths were observed on the workpiece surface (Figure 13d).

In Figure 13c, the recast layer, melted drops, and spark craters were formed on the workpiece surface. The workpiece surface appeared smooth, as the recast layer mostly concealed the spark craters. In Figure 13d, the micro cracks with shallow penetration depths were observed on the workpiece surface. The shallow micro cracks were attributable to the rapid recovery of dielectric strength in the machining process. The dielectric strength induced strong spark and such high temperatures that the heat could not be drawn quickly enough from the workpiece [40]. In essence, the recast layer formation was substantially reduced by using the multi-aperture flushing. In addition, the cracks on the workpiece surface were shallower than those on the side flushing.

Finally, the results of this research were compared to those of previous research as presented in Table 15. In this research, the proposed multi-aperture flushing improved the MRR and reduced the machining time. The EDM efficiency was also enhanced as the electrode rotation improved the flushing of the dielectric liquid out of the machining gap, resulting in a more uniform GC profile and lower incidence of recast layer. These findings are consistent with those of Kliuev et al. [13]. They reported that insufficient flushing has a tendency to increase the recast layer thickness, and the effect is significant for high aspect ratios of hole diameter and hole depth. Furthermore, better flushing not only enhances the abilities of deep hole drilling, but it also reduces the recast layer. Previous research of

Dwivedi et al. [38], which used the same pulse on-time (150 μ s), copper electrode, current (15 A), and electrode rotation, found that the average recast layer thickness obtained from the rotary tool EDM process is 40.26 μ m, whereas it is 69.03 μ m for the stationary tool EDM. The results show that the rotation of the tool reduces the recast layer thickness significantly. In case of the same workpiece material, Dewangan et al. [41] showed that both brass and copper tools show significant influence on affecting the thickness of the react layer formation when using conventional side flushing.

Table 15. Comparison of the machining characteristics on the recast layer.

Ref.	Electrode/Materials /Process	Parameters	Key Findings
This research	-Cu-electrode -AISI P20 -Side and multi-aperture inner flushing (\varnothing 12 mm)	Current (9, 12, 15 A) Pulse on-time (50, 100, and 150 μ s) Pulse off-time (2,10, and 20 μ s) Electrode rotation (0–70 rpm) Polarity (electrode +) Hole type (Blind)	The recast layer could be observed on the workpiece machined with side flushing EDM. However, no recast layer was detected on the workpiece machined with multi-aperture flushing.
[13]	-Cu-electrode -Inconel 718 -Single and multi-channels-electrode -CFD simulations	Pulse on-time (32 μ s) Pulse off-time (15 μ s) Polarity (electrode) Voltage (120 V) Hole type (Blind)	Insufficient flushing has a tendency to increase the recast layer thickness. The effect is significant for high aspect ratios between hole diameter and hole depth.
[38]	-Solid Cu-electrode -AISI D3-Stationary tool and rotary tool (\varnothing 10 mm)	Current (10, 15, 20, and 25 A) Pulse on-time (150 μ s) Pulse off-time (58.33 μ s) Polarity (+) Tool rotary (0–1000 rpm) Hole type (Blind)	The average recast layer thickness obtained from the rotary tool EDM process is 40.26 μ m whereas it is 69.03 μ m for the stationary tool EDM. The results show that the rotation of the tool reduces the recast layer thickness significantly.
[41]	-Solid Copper-electrode, brass-electrode -AISI P20 -side flushing (\varnothing 12 mm)	Current (2,4,6, and 8 A) Pulse on-time (50,80, and 100 μ s) Duty cycle (75,85, and 95%) Polarity (Workpiece +, -) Hole type (Blind)	Both brass and copper tool show significant influence on thickness of the react layer formation.
[42]	-Metal tube -Nickel-based- super alloy -Tube-electrode high speed electrochemical discharge drilling (ECDD)	Pulse on-time (20 μ s) Pulse off-time (12 μ s) Polarity (electrode -) Voltage (80 V)	The lateral wall of EDM hole is covered with a recast layer which is 20–30- μ m thick, but the lateral wall of the hole in ECDD is almost free of the recast layer.

With different workpiece and electrode materials, it was possible to produce different machining characteristics, i.e., MRR, EWR, GC, and surface quality. Zheng et al. [42] used tube-electrode high-speed electrochemical discharge drilling (ECDD) for the machining of nickel-based superalloy. Their findings indicated that the lateral wall of the EDM hole is covered with a recast layer, which is 20–30 μ m thickness, but the lateral wall of the hole in ECDD is almost free of a recast layer.

A recast layer produced by EDM is named a white layer because of its color after the etching process. Recast layers exhibit high hardness, good adherence to the bulk material, and good resistance to corrosion. However, the structure of the recast layer is different from that of the base material. Although it is favorable in terms of improved wear resistance, defects such as voids, cracks, and residual stresses result in an overall deterioration of the component mechanical properties [39].

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. Conclusions

This research investigated the effect of machining parameters on MRR, EWR, and GC of macro deep holes of EDM with side flushing and multi-aperture inner flushing. The depth-to-diameter ratio was greater than four (the hole depth of 50 mm and the electrode diameter of 12 mm). The machining parameters included the pulse on-time, pulse off-time, current, and electrode rotation. The following conclusions could be drawn from the experiments:

1. The pulse on-time, current, and electrode rotation were positively correlated with the MRR of side-flushing and multi-aperture-flushing EDM. However, a higher MRR induced the rapid accumulation of debris and incidence of secondary spark on the cavity wall, resulting in GC distortion.
2. The EWRs of side flushing and multi-aperture flushing were inversely correlated with the pulse on-time and electrode rotation but positively correlated with current.
3. Under both flushing schemes, GC was positively correlated with pulse on-time but inversely correlated with pulse off-time, current, and electrode rotation. The electrode rotation played a crucial role in the GC characteristics. Specifically, faster rotational speeds induced centrifugal forces and radial fluid outflow, which enhanced debris removal efficiency. The higher debris removal efficiency resulted in narrower GC and lower EWR.
4. Given the trade-off nature of MRR, EWR, and GC, the multi-response desirability function was used to optimize the machining conditions that maximized MRR and minimized EWR and GC, given the desirability weights (w) of 1.0 for MRR, 1.0 for EWR, and 1.2 for GC. The optimal machining condition of EDM with side flushing was 100 μ s pulse on-time, 20 μ s pulse off-time, 15 A current, and 70 rpm electrode rotation; and that of multi-aperture flushing was 130 μ s pulse on-time, 2 μ s pulse off-time, 15 A current, and 70 rpm electrode rotation.
5. The EDM with multi-aperture flushing, given 50 mm machining depth, achieved a higher MRR and shorter machining time despite greater EWR. Meanwhile, the GC of side flushing and multi-aperture flushing were almost identical.
6. The recast layer could be observed on the workpiece machined with side-flushing EDM. However, no recast layer was detected on the workpiece machined with multi-aperture flushing.
7. Inefficient flushing of dielectric liquid causes debris to accumulate in the machining gap. The accumulation increases the electrical conductivity of the dielectric liquid, resulting in secondary spark and unsatisfactory machining performance. The proposed multi-aperture flushing improved the MRR and reduced the machining time. The EDM efficiency was also enhanced as the electrode rotation improved the flushing of the dielectric liquid out of the machining gap, resulting in a more uniform GC profile and lower incidence of recast layer. In essence, the multi-aperture flushing EDM effectively removes the debris and improves the performance of macro deep hole machining.

Author Contributions: Conceptualization, S.C., K.K.; Formal analysis, S.C.; Funding acquisition, K.K.; Investigation, S.C., K.K.; Methodology, S.C., K.K.; Project administration, K.K.; Validation, S.C.; Writing—original draft, S.C.; Writing—review and editing, K.K. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was financed in part by the Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang under grant ID 58601317.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Data sharing not applicable.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Acknowledgments: The authors would like to extend sincere appreciation to the Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, for financial sponsorship; and Rajamangala University of Technology Krungthep for technical support.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

- Kuppan, P.; Rajadurai, A.; Narayanan, S. Influence of EDM process parameters in deep hole drilling of Inconel 718. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2007**, *38*, 74–84. [\[CrossRef\]](#)
- Maradia, U.; Boccadoro, M.; Stirnimann, J.; Beltrami, I.; Kuster, F.; Wegener, K. Die-sink EDM in Meso-Micro Machining. *Procedia CIRP* **2012**, *1*, 166–171. [\[CrossRef\]](#)
- Ho, K.H.; Newman, S.T. State of the art electrical discharge machining (EDM). *Int. J. Mach. Tools Manuf.* **2003**, *43*, 1287–1300. [\[CrossRef\]](#)
- Jankamon, K.; Janmanee, P. Deep Hole of AISI P20 Mold Steel Material by Electrical Discharge Machining. *Appl. Mech. Mater.* **2014**, *590*, 244–248.
- Risto, M.; Haas, R.; Munz, M. Optimization of the EDM Drilling Process to Increase the Productivity and Geometrical Accuracy. *Procedia CIRP* **2016**, *42*, 537–542. [\[CrossRef\]](#)
- Ashkenasi, D.; Kaszemeikat, T.; Mueller, N.; Dietrich, R.; Eichler, H.J.; Illing, G. Laser Trepanning for Industrial Applications. *Phys. Proced.* **2011**, *12*, 323–331. [\[CrossRef\]](#)
- Diver, C.; Atkinson, J.; Helml, H.J.; Li, L. Micro-EDM drilling of tapered holes for industrial applications. *J. Mater. Process. Technol.* **2004**, *149*, 296–303. [\[CrossRef\]](#)
- Homri, L.; Goka, E.; Levasseur, G.; Dantan, J.Y. Tolerance analysis-Form defects modeling and simulation by model decomposition and optimization. *Comput. Aided Des.* **2017**, *91*, 46–59. [\[CrossRef\]](#)
- Uthayakumar, M.; Khan, M.A.; Kumaran, S.T.; Slota, A.; Zajac, J. Machinability of Nickel-Based Superalloy by Abrasive Water Jet Machining. *Mater. Manuf. Process.* **2016**, *31*, 1733–1739. [\[CrossRef\]](#)
- Murray, J.; Zdebski, D.; Clare, A.T. Workpiece debris deposition on tool electrodes and secondary discharge phenomena in micro-EDM. *J. Mater. Process. Technol.* **2012**, *212*, 1537–1547. [\[CrossRef\]](#)
- Tanjilul, M.; Ahmed, A.; Kumar, A.S.; Rahman, M. A study on EDM debris particle size and flushing mechanism for efficient debris removal in EDM-drilling of Inconel 718. *J. Mater. Process. Technol.* **2018**, *255*, 263–274. [\[CrossRef\]](#)
- Cetin, S.; Okada, A.; Uno, Y. Effect of Debris Distribution on Wall Concavity in Deep-Hole EDM. *JSME Int. J. Ser. C Mech. Syst. Mach. Elem. Manuf.* **2004**, *47*, 553–559. [\[CrossRef\]](#)
- Kliuev, M.; Baumgart, C.; Büttner, H.; Wegener, K. Flushing Velocity Observations and Analysis during EDM Drilling. *Procedia CIRP* **2018**, *77*, 590–593. [\[CrossRef\]](#)
- Liao, Y.S.; Liang, F.Y.; Tsai, Y.Y. A Study of the Debris Exclusion for Various Cross-section Electrodes in Linear Motor Equipped Deep Cavity EDM Process. *Procedia CIRP* **2018**, *68*, 660–665. [\[CrossRef\]](#)
- Gadeschi, G.B.; Schneider, S.; Mohammadnejad, M.; Meinke, M.; Klink, A.; Schröder, W.; Klocke, F. Numerical Analysis of Flushing-Induced Thermal Cooling Including Debris Transport in Electrical Discharge Machining (EDM). *Procedia CIRP* **2017**, *58*, 116–121. [\[CrossRef\]](#)
- Mathai, V.; Dave, H.; Desai, K. Effect of Flushing Strategies on Responses during Planetary EDM of Ti-6Al-4V. In Proceedings of the International Conference on Precision, Meso, Micro and Nano Engineering (COPEN 9), Indian Institute of Technology, Bombay, India, 10–12 December, 2015.
- Goigana, M.; Elkaseer, A. Self-Flushing in EDM Drilling of Ti6Al4V Using Rotating Shaped Electrodes. *Materials* **2019**, *12*, 989. [\[CrossRef\]](#)
- Kumar, R.; Singh, I. A modified electrode design for improving process performance of electric discharge drilling. *J. Mater. Process. Technol.* **2019**, *264*, 211–219. [\[CrossRef\]](#)
- Li, L.; Gu, L.; Xi, X.; Zhao, W. Influence of flushing on performance of EDM with bunched electrode. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2012**, *58*, 187–194. [\[CrossRef\]](#)
- Barenji, R.V.; Pourasl, H.H.; Khojastehnezhad, V.M. Electrical discharge machining of the AISI D6 tool steel: Prediction and modeling of the material removal rate and tool wear ratio. *Precis. Eng.* **2016**, *45*, 435–444. [\[CrossRef\]](#)
- Lin, Y.C.; Tsao, C.C.; Hsu, C.Y.; Hung, S.K.; Wen, D.C. Evaluation of the characteristics of the microelectrical discharge machining process using response surface methodology based on the central composite design. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2011**, *62*, 1013–1023. [\[CrossRef\]](#)
- Sultan, T.; Kumar, A.; Gupta, R.D. Material Removal Rate, Electrode Wear Rate, and Surface Roughness Evaluation in Die Sinking EDM with Hollow Tool through Response Surface Methodology. *Int. J. Manuf. Eng.* **2014**, *2014*, 1–16. [\[CrossRef\]](#)
- Gopalakannan, D.S. Optimization of machining parameters for EDM operations based on central composite design and desirability approach. *J. Mech. Sci. Technol.* **2014**, *28*, 1045–1053. [\[CrossRef\]](#)
- Habib, S.S. Study of the parameters in electrical discharge machining through response surface methodology approach. *Appl. Math. Model.* **2009**, *33*, 4397–4407. [\[CrossRef\]](#)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

25. Hourmand, M.; Farahany, S.; Sarhan, A.A.D.; Noordin, M.Y. Investigating the electrical discharge machining (EDM) parameter effects on Al-Mg₂Si metal matrix composite (MMC) for high material removal rate (MRR) and less EWR-RSM approach. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2014**, *77*, 831–838. [[CrossRef](#)]
26. Liu, Q.; Zhang, Q.; Zhang, M.; Zhang, J. Review of size effects in micro electrical discharge machining. *Precis. Eng.* **2016**, *44*, 29–40. [[CrossRef](#)]
27. Plaza, S.; Sanchez, J.A.; Perez, E.; Gil, R.; Izquierdo, B.; Ortega, N.; Pombo, I. Experimental study on micro EDM-drilling of Ti6Al4V using helical electrode. *Precis. Eng.* **2014**, *38*, 821–827. [[CrossRef](#)]
28. Nakagawa, T.; Yuzawa, T.; Sampei, M.; Hirata, A. Improvement in machining speed with working gap control in EDM milling. *Precis. Eng.* **2017**, *47*, 303–310. [[CrossRef](#)]
29. Zhang, S.; Zhang, W.; Liu, Y.; Ma, F.; Su, C.; Sha, Z. Study on the Gap Flow Simulation in EDM Small Hole Machining with Ti Alloy. *Adv. Mater. Sci. Eng.* **2017**, *2017*, 1–23.
30. Chuvaree, S.; Kanlayasiri, K. An investigation on dimensional accuracy of EDM deep hole using multi-hole interior flushing electrode. *MATEC Web Conf.* **2018**, *192*, 01029. [[CrossRef](#)]
31. Chuvaree, S.; Kanlayasiri, K. Improving the performance of EDM deep hole using multi-hole interior flushing electrode. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **2018**, *361*, 012013. [[CrossRef](#)]
32. Park, S.H.; Park, J.O. Simultaneous Optimization of Multiple Responses Using a Weighted Desirability Function. In *Quality Improvement through Statistical Methods*; Abraham, B., Ed.; Birkhäuser Boston: Boston, MA, USA, 1998; pp. 299–311.
33. Wang, J.; He, Z.; Oh, J.; Park, S. Multi-Response Robust Optimization Using Desirability Function. In Proceedings of the 2008 IEEE Symposium on Advanced Management of Information for Globalized Enterprises (AMIGE), Tianjin, China, 28–29 September 2008; pp. 1–3.
34. Naveen Beri, H.P.; Kumar, A. To Study the Effect of Polarity and Current during Electric Discharge Machining of Inconel 718 with CuW Powder Metallurgy Electrode. In Proceedings of the National Conference on Trends and Advances in Mechanical Engineering, Faridabad, Haryana, India, 19–20 October 2012; pp. 476–481.
35. Mohri, N.; Suzuki, M.; Furuya, M.; Saito, N.; Kobayashi, A. Electrode Wear Process in Electrical Discharge Machinings. *Cirp Ann.* **1995**, *44*, 165–168. [[CrossRef](#)]
36. Madiha, R.; Nadeem, A.M.; Naveed, A.; Abdulrahman, M.A.; Amjad, H. EDM of D2 Steel: Performance Comparison of EDM die Sinking Electrode Designs. *Appl. Sci.* **2020**, *10*, 7411.
37. Ekmekci, B.; Sayar, A. Debris and consequences in micro electric discharge machining of micro-holes. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* **2013**, *65*, 58–67. [[CrossRef](#)]
38. Dwivedi, A.P.; Choudhury, S.K. Estimation of Recast Layer Thickness in Rotary Tool EDM Process for Machining AISI D3 Tool Steel. *Mater. Today Proc.* **2017**, *4*, 10816–10822. [[CrossRef](#)]
39. Ekmekci, B. White Layer Composition, Heat Treatment, and Crack Formation in Electric Discharge Machining Process. *Metall. Mater. Trans. B* **2009**, *40*, 70–81. [[CrossRef](#)]
40. Yilmaz, O.; Okka, M.A. Effect of single and multi-channel electrodes application on EDM fast hole drilling performance. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2010**, *51*, 185–194. [[CrossRef](#)]
41. Dewangan, S.; Biswas, C.K.; Gangopadhyay, S. Influence of Different Tool Electrode Materials on EDMed Surface Integrity of AISI P20 Tool Steel. *Mater. Manuf. Process.* **2014**, *29*, 1387–1394. [[CrossRef](#)]
42. Zheng, Y.X.; Zhang, Y.; Ding, F. An electrochemical discharge drilling method of small deep holes. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2018**, *95*, 3037–3044.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

An investigation on dimensional accuracy of EDM deep hole using multi-hole interior flushing electrode

Supawat Chuvaree and Kannachai Kanlayasiri*

Industrial Engineering Department, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

Abstract. Improper flushing of dielectric fluid adversely affects the dimensional accuracy produced in EDM deep hole process. This paper investigates the dimensional accuracy (e.g. roundness error and gap clearance) in EDM deep hole process of AISI P20 tool steel. The inner flushing electrode is newly proposed in this study, using the multi-hole interior flushing technique coupled with electrode rotation. The results showed that the multi-hole interior flushing with electrode rotation improves the deviation of roundness error due to improved flushing. In addition, using multi-hole interior flushing with electrode rotation provides the cylindrical shape in gap clearance. Finally, a more powerful flushing technique is achieved with newly purposed multi-hole interior flushing technique on roundness error and gap clearance, respectively.

1 Introduction

Electrical discharge machining (EDM) is finding a lot of applications for machining certain materials which traditionally have been more difficult to machine. Such developments further enable the growing demand of higher precision parts, for advancements in automotive and other industries [1]. The dimensions and accuracies resultant on machined a hole by EDM process plays a crucial role when close tolerance components are required for critical applications like plastic mould and die part, automotive part etc. During EDM of a deep hole, machining conditions can be optimized leading to high process accuracy and greater machining productivity. However, the flushing stage has been identified as the most important factor in the determining the dimensional accuracy [2-3]. In an Electrical discharge machining operation, the flushing function is employed to remove the debris in the machining gap and to sustain the dielectric temperature well below its flash point. In addition, the influence of electrode rotation coupled with the flushing technique can increase the material removal rate (MRR), assisting the removal of the debris and assuring that the hole is round [4].

During the EDM process both the workpiece and tool electrode are eroded simultaneously. When the machining depth is increased, the viscous resistance within the machining gap impedes in removal of debris and bubbles from the eroding area resulting in reduced extensive performance and dimensional accuracy. This debris activation and secondary spark appearance on the wall, result in a machined hole that is not ideally cylindrical but concaved and tapered, which is undesirable in the precision machining processes.

The study of the surface and accuracies produced during EDM with rotating electrode have been reported in [5]. It found that the electrode rotation improves the surface finish and roundness. Diver et al. [6] developed a new flushing technique to produce reverse tapered micro-holes. Excellent hole formation with hole diameter variations within 3 μm were reported.

Recently the authors [7] developed a new technique of flushing for deep hole by using a multi-hole interior flushing electrode. We found that flushing through the tool electrode and multi-hole interior flushing are more preferred than side flushing. In addition, the effects of improved flushing increases material removal rate and reduces machining time. Therefore, in this paper, an attempt has been made to investigate dimensional accuracy characteristics of deep holes produced by EDM using multi-hole interior flushing technique like roundness error and gap clearance, respectively.

2 Experiment

In this research, the electrode was designed with regard to improved flushing ability to reduce the error of hole dimensions caused by EDM condition and improper flushing. As shown in Figure 1, the copper electrode of diameter 12 mm, and 8.4 mm. in flushing hole. In addition, the electrode rotation helps in flushing away debris, preventing secondary spark phenomena and enhancing the performance of EDM process.

Figures 2a shows the machined workpieces after deep holes machining. To investigate the influence of flushing condition on roundness error and gap clearance, we considered an electrode rotation at 105 rpm and a fixed machining depth of 50 mm

*Corresponding author: kkkannac@kmitl.ac.th

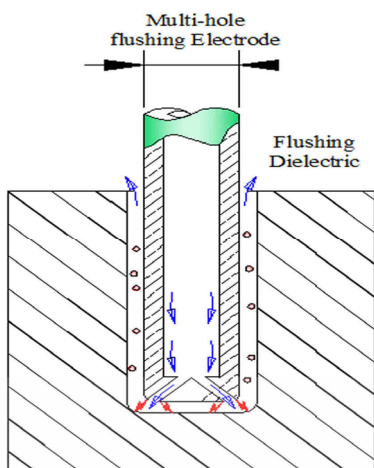


Fig. 1. Tool electrode and flushing system.

The dimensional accuracy was tested at six locations (1, 10, 20, 30, 40, and 50 mm) through the machining direction as shown in figure 2b. The precision measurements of roundness error of the hole were analyzed from 3D surface roughness, Olympus model LEXT OLS5000 laser scanning confocal microscope noncontact. The measurement of roundness error of the hole profile was defined by maximum inscribed circle (LSC) method according to GD&T methodology. Whereby, least square circle, it is a circle which separates the roundness profile of an object by separating the sum of total areas of the inside and outside it in equal amounts. The roundness error then can be estimated difference between the maximum and minimum distance from this reference circle. So, the roundness error is defined as equation (1).

$$\text{Roundness} = R_{\max} - R_{\min} \quad (1)$$

The gap clearance profiles were examined using a laser scanning model Creaform REV scan 3D handy scanner. The technical specifications are given in Table 1.

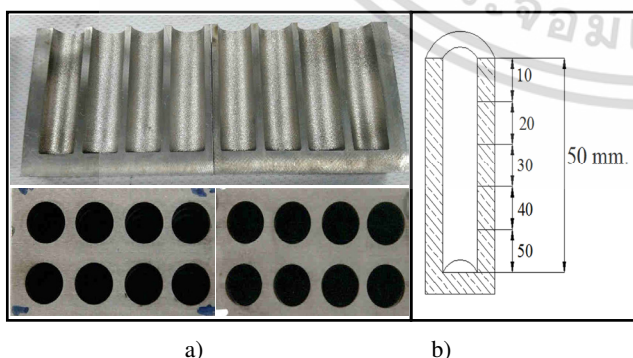


Fig. 2 a) AISI P20 tool steel workpieces after deep hole machining.
b) Dimensional accuracy measurement on the test workpiece.

Table 1. Experimental conditions.

Process parameters	Values
Pulse on-time	150 μ s.
Pulse off-time	20 μ s.
Peak current	15 A.
Electrode diameter	12 mm.
Electrode polarity	+
Machining depth	50 mm.
Dielectric	EDM oil-TOTAL DIET MS 700
Flushing pressure	1kg/cm ²
Workpiece Material	AISI P20

3 Results and Discussion

3.1. Roundness

In this experiment, the electrode rotation and flushing mode using a multi-hole interior flushing technique are used to investigate the effect of dimensional accuracy in terms of roundness error of the hole. In the roundness measurement operation, the results of the deviation of roundness error when using conventional flushing and multi-hole interior flushing electrode are shown in Table 2 and 3 respectively.

Table 2. The deviation of roundness error when using conventional flushing with electrode rotation.

- Z position	Diameter of hoe (mm.)	Max. Deviation (mm.)	Min. Deviation (mm.)	Range (mm.)
-1	12.327	0.026	-0.035	0.061
-10	12.543	0.040	-0.057	0.097
-20	12.545	0.048	-0.061	0.109
-30	12.530	0.061	-0.059	0.120
-40	12.440	0.076	-0.098	0.174
-50	12.263	0.096	-0.151	0.247

Table 3. The deviation of roundness error when using multi-hole interior flushing electrode with electrode rotation.

- Z position	Diameter of hoe (mm.)	Max. Deviation (mm.)	Min. Deviation (mm.)	Range (mm.)
-1	12.220	0.057	-0.066	0.123
-10	12.350	0.063	-0.070	0.133
-20	12.416	0.074	-0.047	0.121
-30	12.490	0.048	-0.061	0.109
-40	12.409	0.059	-0.048	0.107
-50	12.152	0.061	-0.061	0.122

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

In Figure 3, a comparison of the deviation of roundness error produced under the different flushing conditions across the six depths were plotted.

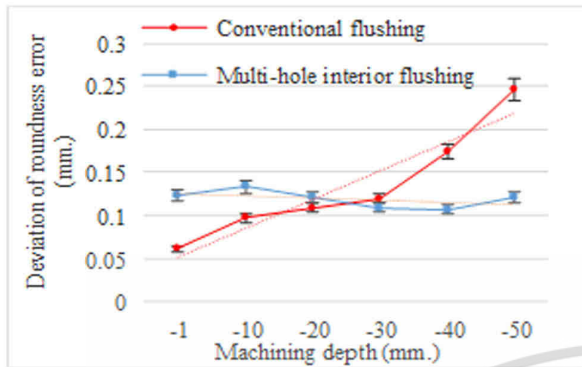


Fig. 3. The comparison of the deviation of roundness error produced under the different flushing conditions against machining depth.

It is observed that with conventional flushing the deviation of the roundness error increases continuously with the machining depth up to 50 mm. In conventional flushing coupled with electrode rotation, the debris particles of material are moving out slowly from the machining gap and formation of secondary spark phenomena between the debris particles and side wall of the hole. As machining depth is increased, long-term effects of the secondary spark phenomena result in roundness error of the hole in higher depth [1]. In addition, it might be due to improper flushing at higher depths, as the debris particles are irregularly distributed on the side of wall of the hole leading to roundness error along the depth of hole. However, when using the multi-hole interior flushing electrode, a more stable roundness error is observed. It is clear that the deviation of roundness error is slightly decreased, a cylindricity deviation only occurred due to the flushing as the multi-hole interior electrode is flowed out of small gap between electrode and side of wall of the hole to remove debris particles continuously. In addition, the electrode rotation during EDM deep hole process promotes cleaning of the debris in the machining gap. Therefore, the deviation of roundness error is uniformly changed. The 3D view measurement of roundness from 3D laser scanning surface roughness is shown in Figure 4.

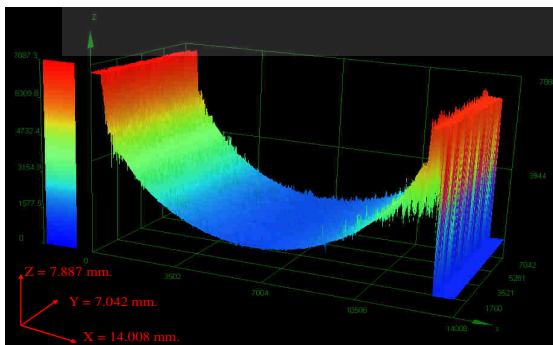


Fig. 4. 3D view measurement of roundness from 3D laser scanning surface roughness.

3.2. Gap clearance

For investigation of dimensional accuracy, the gap clearance is another important quality. Figure 5 shows the values of gap clearance with different flushing conditions. The electrode rotation effect at 105 rpm was investigated. It is clear that for each condition the gap clearance increases towards the half-way depth and then narrows towards the finish. As such, the characteristic shape of the machined hole was concave. The figure also demonstrates that when using conventional electrode by side flushing the gap clearance is increased and that the gap clearance increase becomes pronounced with the depth of hole. However, the electrode rotation effect coupled with side flushing causes a decrease in gap clearance. Moreover, using the multi-hole interior flushing with rotational electrode causes a cylindrical shape in gap clearance. It is explained through a reduction in debris build up within the machining gap, and by a more uniform distribution of debris from the multi-hole flushing with rotational electrode during the EDM deep hole process [7]. This means that a more powerful flushing technique is achieved with the newly purposed multi-hole interior flushing technique on dimensional accuracy like roundness error and gap clearance, respectively. The measurement of gap clearance from 3D handy laser scanning is shown in Figure 6.

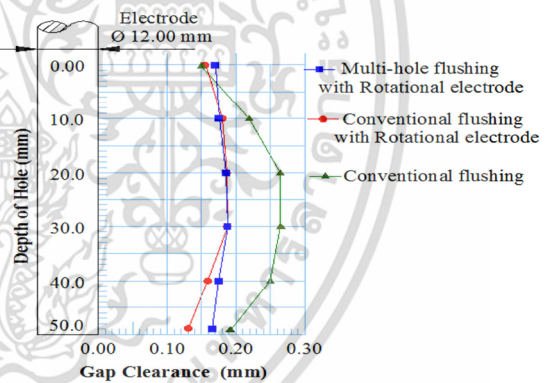


Fig. 5 Effect of flushing condition on gap clearance characteristic.

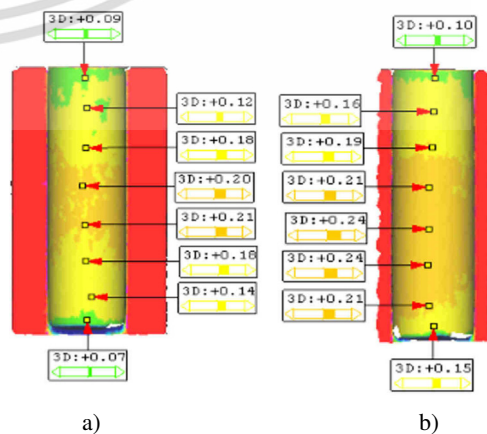


Fig. 6. Measurement of gap clearance profiles was examined using 3D handy laser scanning. a) Multi-hole flushing with rotational electrode b) Conventional flushing.

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4 Conclusion

This paper investigates the dimensional accuracy characteristics of EDM deep holes produced by a newly purposed multi-hole interior flushing technique on AISI P20 tool steel like roundness error and gap clearance, respectively. This study shows that:

1. The multi-hole interior flushing with electrode rotation improved the deviation of roundness error due to improved flushing.
2. When using multi-hole interior flushing with rotational electrode causes the cylindrical shape in gap clearance.
3. A more powerful flushing technique is achieved with a newly purposed multi-hole interior flushing technique on dimensional accuracy like roundness error and gap clearance, respectively.

Acknowledgment

The authors acknowledge the financial support provided by Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang and Rajamangala University of Krungthep were thanked for providing facilities for testing.

References

1. V. K. Meena, M. S. Azed, S. Mitra, *Int. J. Machining and Machinability of Material*. V **12**, 4 (2012)
2. M. Risto, R. Haas, M. Munz, *Proceeding CIRP of ISEM XVIII*. V **42**, (2016), 127-134
3. M. N. Islam, N. H. Rafai, S. S. Subramanian, *Proceeding of the WCE*. V **III**, (2010)
4. M. M. Makenzi, B. W. Ikua, *Proceeding of the MECSRI 2012*. V **4**, (2012)
5. J. S. Soni, G. Chakraverti, *Ind. J. Eng. Mat. Sci.* V **1**, pp. 127-134 (1994)
6. C. Diver, J. Atkinson, H. J. Helml, L. Li, J. Mater. Process. Technol. V **169** (2005) 427-436
7. S. Chuvaree, K. Kanlayasiri, *Proceeding of International conference on ICMM 2018*.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PAPER • OPEN ACCESS

Improving the performance of EDM deep hole using multi-hole interior flushing electrode

To cite this article: S. Chuvaree and K. Kanlayasiri 2018 *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **361** 012013

View the [article online](#) for updates and enhancements.

Related content

- [Study on Gap Flow Field Simulation in Small Hole Machining of Ultrasonic Assisted EDM](#)
Yu Liu, Hao Chang, Wenchao Zhang et al.
- [Magnetic field assisted micro electro-discharge machining](#)
S H Yeo, M Murali and H T Cheah
- [Fabrication of multiple electrodes by reverse EDM and their application in micro ECM](#)
Bo Hyun Kim, Byung Jin Park and Chong Nam Chu



ECS The Electrochemical Society
Advancing solid state & electrochemical science & technology

239th ECS Meeting with IMCS18

DIGITAL MEETING • May 30-June 3, 2021

Live events daily • Free to register

[Register now!](#)

Improving the performance of EDM deep hole using multi-hole interior flushing electrode

S. Chuvaree, K. Kanlayasiri

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

E-mail : c.suppawat@gmail.com

Abstract. In conventional flushing, when increasing the machining depth, the flushing ability becomes insufficient for ejection of the debris from machining gap. Debris concentration in the gap spark causes a process instability, low performance and high machining time etc. This paper proposes an innovative method of flushing technique for electrical discharge machining (EDM) of deep hole process. Tool electrode was specifically fabricated for flushing on the efficiency and stability of machining to promote the ejection of debris from machining gap. The performance of the deep hole process by electrical discharge machining under different flushing condition are presented. The results showed that the flushing through the tool electrode and multi-hole interior flushing are more preferred than side flushing. The result include 26.10% reduction in machining time (50 mm. in depth) when using multi-hole interior flushing electrode. In addition, the application of electrode multi-hole interior flushing electrode with electrode rotation improves the material removal rate (MRR) by 35.28% with 58.04% higher surface roughness (Ra).

1. Introduction

One of the important factors in a successful deep-hole EDM operation is the removal of debris from the machining gap. The flushing of these debris out of the machining gap is very important in preventing secondary spark and enhancing performance of machining. In the EDM process, the workpiece and tool electrode are submerged in dielectric fluid. The material removal process takes place as effect of electrical sparks occurring between tool electrode and workpiece that are separated by dielectric fluid [1]. The dielectric fluid is fed into small gap to remove debris particles that are generated by EDM and maintain the stability of machining condition. If the debris accumulates in the machining gap, the electrical conductivity of the dielectric liquid will be increased, leading to secondary spark phenomena as well as process instability and poor machining conditions. The influence of flushing of dielectric plays a crucial role during the whole process. Improper flushing can result in sparking that high electrode wear, increased machining time and surface finish [1–2].

To enhance the flushing of debris, the desired machining can be achieved by using a side jet flushing of fluid directed into the machining gap. However, the effectiveness of side flushing is limited when the machined depth is increased due to the ejection of debris from machining gap is extremely difficult and it produces a tapered opening in the workpiece [3–7]. L Li *et al.* [8], studied flushing technique using bundled electrode compared with a solid electrode in machining Ti6Al4V. It has been proved that bundled electrodes can endure a much higher peak current than solid electrode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า



Content from this work may be used under the terms of the [Creative Commons Attribution 3.0 licence](https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/). Any further distribution of this work must maintain attribution to the author(s) and the title of the work, journal citation and DOI.

which results in a substantially higher material removal rate (MRR) and a comparably lower tool wear ratio (TWR). R Nastasi *et al.* [9], proposed the application of deep slotted tools in EDM drilling process compared with cylindrical and helical electrode. The results showed that at a machining depth of 5 cm, the higher MRR could be obtained using deep slotted tool.

In the EDM deep hole process, the viscous resistance in the narrow discharge gap causes difficulty in removal of debris and bubbles from the sparking area and abnormal discharge are occurred and resulting in extensive performance of deep hole process. Since, several methods such as electrode jump high, side flushing, mono hole inner flushing and reverse flow flushing have been established [3–6], but the application of the flushing technique for deep hole drilling has been very less reported.

This research proposes an EDM machining technique for deep hole by using multi-hole interior flushing electrode. The material removal rate (MRR), working time (Wt.) and surface roughness (Ra) have been carried out on the AISI P20 tool steel. The performance of the deep hole process by electrical discharge machining under different flushing condition are presented.

2. Experimental Setup

The experiments were carried out on 50 mm. depth of cylindrical hole in AISI P20 tool steel with ARISTECH CNC-EDM model 430. The EDM was carried out macro-scale machining with copper electrode as outside diameter of 12 mm, inner hole diameter 8.4 mm and the bottom of electrode was specifically designed that the dielectric running directly through internal diameter of tool electrode using multi channels inferior flushing (12 holes with a diameter of 1 mm.) as shown in Figure 1.

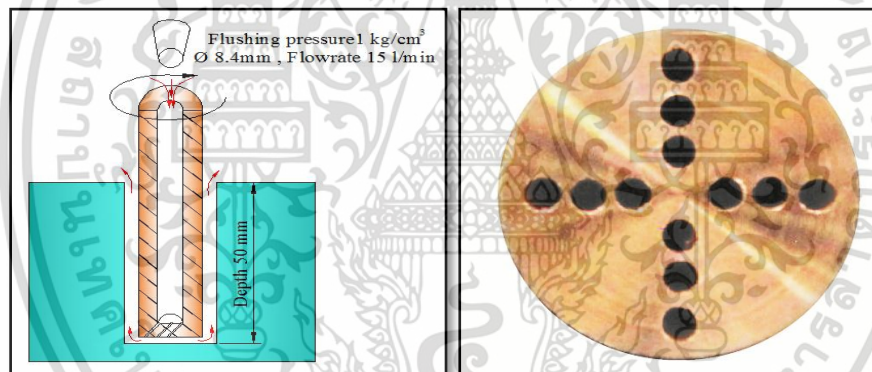


Figure 1. Tool electrode using multi holes inferior flushing

The special rotary chuck has been fabricated for EDM deep hole process and mounted to the EDM machine. The tool rotation helps in improving the flushing ability and removal of debris from the machining gap during EDM of deep hole process [10]. During the EDM deep hole process the flow rate of dielectric flushing was set on a constant value. The experimental conditions were shown in Table 1. The material removal rate (MRR) is defined as equation (1)

$$\text{MRR (g/mm}^3\text{)} = (\text{initial weight} - \text{final weight}) / \text{machining time} \quad (1)$$

Table 1. Experimental conditions

S.N.	In put parameters	Values
1	Pulse on-time	150 μs .
2	Pulse off-time	20 μs .
3	current	15 A.
4	Voltage	150 V.
5	Electrode rotational speed	0, 35, 70, 105, 140 and 175 rpm.
6	Polarity (Electrode)	+

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7	Flushing Pressure	1kg/cm ²
8	Machining depth	50 mm.
9	Dielectric fluid	EDM oil-TOTAL DIET MS 700

3. Result and Discussion

3.1 Machining Time

When increasing the machining depth, the flushing of debris out of the machining gap is very important problem. In this section, a comparison between solid electrode using side flushing and solid electrode using multi-hole interior flushing is observed. As the results shown in Figure 2, it is evident that the reduction of machining time resulted from the influence of flushing condition under multi hole inner flushing. When the machining depth is increased, the multi-hole interior flushing disposes the debris out of the machining gap. Consequently, the spark intensity becomes better than side flushing and thus the machining time is reduced. At a depth of 50 mm, machining time is reduced from 339.01 minutes to 250.53 minutes when using multi-hole interior flushing electrode.

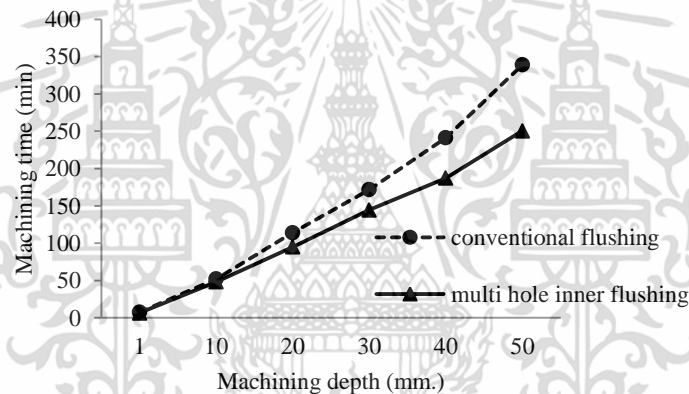


Figure 2. Machining time VS machining depth with different flushing condition

3.2 Material removal rate

In this experiments, the obtained MRR under conventional side flushing and multi holes inner flushing with different electrode rotational speed are illustrated in Figure 3. Under a multi hole inner flushing electrode with electrode rotation, the highest MRR of 22.485 mm³/min. is achieved. It is assumed that the effect of electrode rotation couple with multi holes inner flushing causes the increase in MRR. The fresh dielectric is fed through multi-hole interior electrode and flowed out of small gap between electrode and workpiece to remove debris particles continuously. Moreover, the electrode rotation during EDM deep hole process promotes cleaning of debris in machining gap. As a result, complete spark occurs and is better than side flushing electrode.

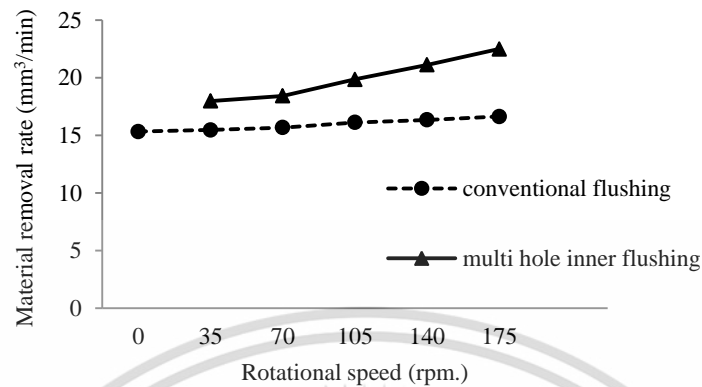


Figure 3. MRR under conventional side flushing and multi hole inner flushing with different electrode rotational speed at a depth of 50 mm.

3.3 Surface Roughness

In this experiments, the effects of improved flushing increases MRR and reduces machining time. At the same time, process stability is increased because tool rotation induces fresh dielectric into the discharge gap as the used dielectric is forced out due to the centrifugal force. According to Figure 4, it is observed that when using conventional electrode via side flushing the surface roughness is improved with increasing electrode rotation speed. The surface roughness with the fixed electrode is $6.125 \mu\text{m}$, whereas it is approximately $4.345 \mu\text{m}$ for the electrode rotation at 175 rpm. It is assumed that the debris is uniformly distributed and re-solidified on the surface leading to smoother surface. However, the flushing effect is limited when using multi-hole interior flushing electrode. Too much cleaning of the spark gap always increases surface roughness because of the rapid recovery of dielectric strength in spark gap. As a result, the spark intensity is very violent and thus higher MRR is obtained with a higher surface roughness [3, 5, 7]. Figure 5, shows the surface topography analysis by optical profilometer of the machined surface under different electrode flushing and electrode rotation.

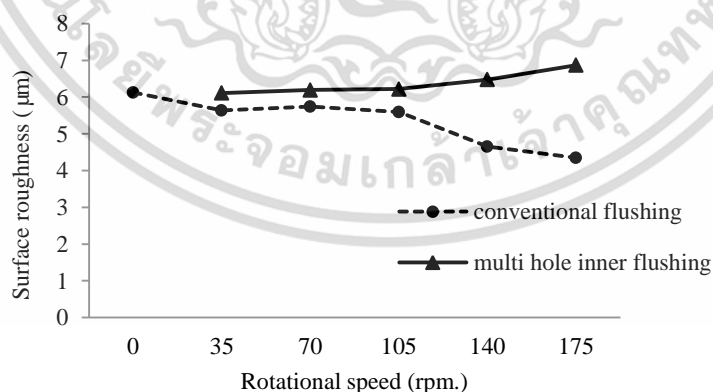
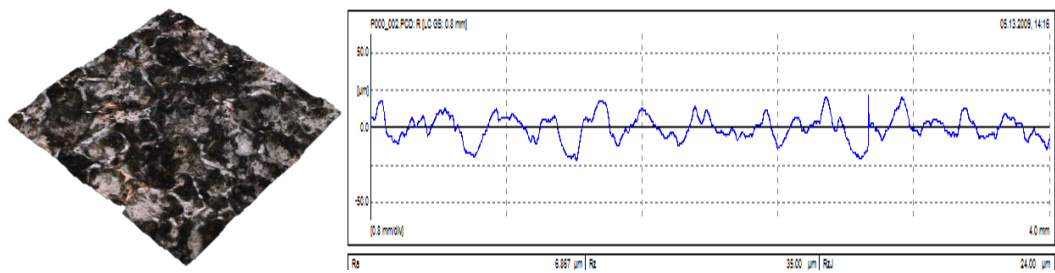
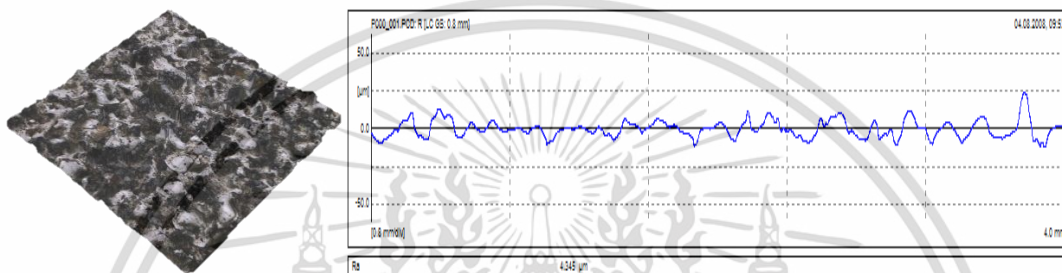


Figure 4. Influence of electrode rotation on surface roughness under conventional side flushing and multi hole inner



a) Multi-hole flushing electrode at 175 rpm of electrode rotation (R_a : 6.867 μm)



b) Side flushing electrode at 175 rpm of electrode rotation (R_a : 4.345 μm)

Figure 5. Surface topography under different electrode flushing and electrode rotation

4. Conclusion

In this present work, a new flushing method is proposed and the performance of EDM deep hole process using newly proposed multi-hole inferior flushing is compared with side flushing on the AISI P20 tool steel. The following conclusions can be drawn from the experiment.

- The improved flushing increases MRR and reduces machining time. At the same time, process stability increases because tool rotation induces fresh dielectric into discharge gap as the used dielectric is forced out due to the centrifugal force.
- 26.10% reduction in machining time (50 mm. in depth) when using multi-hole interior flushing electrode is achieved.
- The multi-hole interior flushing electrode with electrode rotation improves the material removal rate (MRR) by 35.28% with 58.04% higher surface roughness (R_a).

References

- [1] El-hofy H A 2005 *Advanced Machining Processes : Nontraditional and Hybrid Machining Processes*, McGraw-Hill Mechanical Engineering Series.
- [2] Jahan M P 2015 *Electrical discharge machining (EDM) : Types, Technologies and Applications*, Nova Science Publishers, Ins, New York.
- [3] Munz M, Risto M and Haas R 2013. Specifics of Flushing in Electrical Discharge Drilling. *Procedia CIRP*. **6** pp 83–88
- [4] Pichai J and Apiwat M 2011. A study of hole drilling on stainless steel AISI 431 by EDM using brass tube electrode. *International Transaction Journal of Engineering Management & Applied Sciences & Technologies*. Vol **2(4)** pp 471–481
- [5] Yilmaz O and Okka M A 2010. Effect of single and multi-channel electrodes application on EDM fast hole drilling performance. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. **51(1)** pp 185–194

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [6] Skoczypiec S, Machno M and Bizon W 2015. The Capabilities of Electrodischarge Microdrilling of High Aspect Ratio Holes in Ceramic Materials. *Management and Production Engineering Review*. Vol **6(3)** pp 61–69
- [7] Cetin S, Okada A and Uno Y 2004. Effect of Debris Distribution on Wall Concavity in Deep-Hole EDM. *JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing*. **47(2)** pp 553–559
- [8] Li L, Gu L, Xi X and Zhao W 2012. Influence of flushing on performance of EDM with bunched electrode. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. **58(1)** pp 187–194
- [9] Nastasi R and Koshy P 2014. Analysis and performance of slotted tools in electrical discharge drilling. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. **63(1)** pp 205–208
- [10] Dwivedi A P and Choudhury S K 2016. Increasing the Performance of EDM Process Using Tool Rotation Methodology for Machining AISI D3 Steel. *Procedia CIRP*. **46** pp 131–134

Acknowledgment

The authors would like to thank Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang for financial support of this research and Rajamangala University of Krungthep and Olympus (Thailand) Co., LTD for providing facilities for the experiment.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล	นายศุภวัฒน์ ชูวารี
วัน เดือน ปีเกิด	22 กรกฎาคม 2529 ที่สุราษฎร์ธานี
ที่อยู่	18/123 ถนนประชาอุทิศ ซอยประชาอุทิศ 60 แขวงทุ่งครุ เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร 10140
ประวัติการศึกษา	2552 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ 2555 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ประสบการณ์ทำงาน	2561 - ปัจจุบัน ตำแหน่ง อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ 2563 - ปัจจุบัน ผู้ช่วยคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ 2554 - 2560 อาจารย์พิเศษ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผลงานทางวิชาการ	S. Chuvaree, K. Kanlayasiri, Improving the performance of EDM deep hole using multi-hole interior flushing electrode, in: The 9th International Conference on Mechatronics and Manufacturing, Jan 27-29, Phuket, Thailand, 2018. S. Chuvaree, K. Kanlayasiri, An investigation on dimensional accuracy of EDM deep hole using multi-hole interior flushing electrode, in: The 4th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology, July 4-7, Phuket, Thailand, 2018. S. Chuvaree, K. Kanlayasiri, 2021, Effects of Side Flushing and Multi-Aperture Inner Flushing on Characteristics of Electrical Discharge Machining Macro Deep Holes, Metal, 11, 148

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้