



รายงานการวิจัย

โครงการวิจัยเรื่อง

การปรับปรุงคุณภาพผิวงานแม่พิมพ์พลาสติก AISI P20 โดยการกัดอาร์กด้วยไฟฟ้า

Surface modification in EDM process of AISI P20 mould material

คณะผู้วิจัย

อาจารย์กมลพงศ์ แจ่มกมล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิชัย จันทร์มณี

โครงการวิจัยทุนสนับสนุนงานวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

งบประมาณแผ่นดิน ปี พ.ศ. 2555

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

บทคัดย่อ

งานวิจัยเรื่องการปรับปรุงคุณภาพผิวงานแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก AISI P20 โดยกระบวนการกัดอาร์กด้วยไฟฟ้า มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ที่มีต่อประสิทธิภาพการแปรรูปและคุณภาพผิวงานเหล็กกล้าสำหรับทำแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก AISI P20 โดยใช้วัสดุอิเล็กโตรดเป็นทองแดงขั้วอิเล็กโตรด (+, -) ปรับพารามิเตอร์ เวลาเปิด (On-time), ความถี่ในการสปาร์ค (Frequency) และระดับค่ากระแส และประเมินประสิทธิภาพการแปรรูปจากอัตราการขจัดเนื้องาน และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด ตลอดจนคุณภาพผิวงานในรูปของความหยาบผิวเฉลี่ย ซึ่งจากการทดลองพบว่าขั้วอิเล็กโตรดที่เป็นบวกให้ประสิทธิภาพการแปรรูปชิ้นงานที่สูงกว่าขั้วลบ โดยมีอัตราการขจัดเนื้องานที่สูง และมีอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดที่ต่ำ แต่ขั้วอิเล็กโตรดที่เป็นขั้วลบให้คุณภาพผิวงานที่ดีกว่าขั้วบวก ซึ่งมีค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a) ที่เวลาเปิด 2 ไมโครวินาที เวลาปิด 32 ไมโครวินาที ที่ระดับกระแส 9 แอมแปร์ อยู่ที่ 1.58 ไมโครเมตร ซึ่งมีความสามารถในการขจัดเนื้องานสูงสุด 6.57 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อนาที ที่เวลาเปิด 100 ไมโครวินาที โดยมีอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดไม่ถึง 1 เปอร์เซ็นต์ และมีความหยาบผิวเฉลี่ยอยู่ที่ 5.67 ไมโครเมตร โดยอัตราการขจัดเนื้องานและความหยาบผิวเฉลี่ยนั้นมีลักษณะการเพิ่มขึ้นและลดลงตามระดับกระแสไฟฟ้า และค่าเวลาเปิด

คำสำคัญ : กัดอาร์กด้วยไฟฟ้า / แม่พิมพ์พลาสติก / ความหยาบผิว / EDM / AISI P20

Abstract

This research paper aims to study the effect of parameters in Electrical Discharge Machining (EDM) process of mould steel AISI P20 when adjusted the parameter's on-time, off-time, polarity electrode, frequency and discharge current. The effects on the processing will be measured by investigating the Material Removal Rate (MRR), the Electrode Wear Ratio (EWR) and the surface quality from arithmetical mean roughness (Ra). The material used in the experiment is copper electrode on EDM of AISI P20 steel products. From the experiment it is found that, the positive polarity electrode has higher MRR and lower EWR than the negative polarity electrode, while the negative polarity electrode has better effect on surface quality than the positive when measured by Ra. The lower arithmetical mean roughness $1.58\text{ }\mu\text{m}$ at on-time $2\text{ }\mu\text{s}$, off-time $32\text{ }\mu\text{s}$ and current 9 ampere, when use on-time $100\text{ }\mu\text{s}$ have highest MRR $6.57\text{ mm}^3/\text{min}$, lower EWR less than 1 percentage and Ra among $5.67\text{ }\mu\text{s}$. However MRR and Ra are variable from current and on-time parameters.

Key words : EDM / Mold / Ra / AISI P20



กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำงานวิจัยเรื่อง การปรับปรุงคุณภาพผิวงานแม่พิมพ์พลาสติก AISI P20 โดยการกัดอาร์กด้วยไฟฟ้า สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากการสนับสนุนทางด้านเงินทุนจากงบประมาณแผ่นดินประจำปี พ.ศ. 2555 จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ตลอดจนการสนับสนุนด้านเครื่องมือและอุปกรณ์จากสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ทางคณะผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ และหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้อาจเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจบ้างไม่มากนักน้อย

กมลพงศ์ แจ่มกมล
(หัวหน้าโครงการ)
20 กันยายน 2555



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
ภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์	2
1.3 สมมุติฐานการศึกษา	2
1.4 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.5 ขั้นตอนการศึกษา	3
1.6 ข้อจำกัดการศึกษา	3
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 แนวความคิด	4
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.3 วรรณกรรมและงานวิจัยที่ผ่านมา	15
2.4 สรุป	16
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	17
3.1 วิธีการดำเนินการวิจัย	17
3.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	17
3.3 สรุป	25
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล	26
4.1 ผลการทดลอง	26
4.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง	28
4.3 สรุป	41

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	42
5.1 สรุปผลการทดลอง	42
5.2 ข้อเสนอแนะ	43
เอกสารอ้างอิง	44



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติที่สำคัญของทองแดง	12
2.2 สมบัติทางกลเหล็กกล้า AISI P20	12
2.3 ส่วนผสมของธาตุในเหล็กกล้า AISI P20 คิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	12
3.1 ค่าปัจจัยประสิทธิภาพโดยปรับเวลาเปิด (On-time)	19
3.2 ค่าตัวแปรคงที่ในการทดลองปรับเวลาเปิด	19
3.3 ค่าความถี่ในการสปาร์ก (Frequency)	20
3.4 ค่าตัวแปรในการทดลองกระแส (Current)	25
4.1 ผลการทดลองเวลาเปิด (On-Time) ขั้วอิเล็กโตรดเป็นบวก	26
4.2 ผลการทดลองเวลาเปิด (On-Time) ขั้วอิเล็กโตรดเป็นลบ	27
4.3 ผลการทดลองปรับค่าความถี่ของการสปาร์ก (Frequency) ขั้วอิเล็กโตรดเป็นบวก	27
4.4 ผลการทดลองปรับค่าความถี่ของการสปาร์ก (Frequency) ขั้วอิเล็กโตรดเป็นลบ	28
4.5 ปรับค่ากระแส (Current)	28
4.6 แสดงองค์ประกอบของธาตุบนพื้นผิวอิเล็กโตรดในรูปของร้อยละ	31
4.7 ผลการทดลองความลึกของการกัดเซาะที่มีผลต่อประสิทธิภาพการแปรรูป	41

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 สภาวะเริ่มต้นของการสปาร์คในการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า	5
2.2 สภาวะการสปาร์คในการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า	5
2.3 สภาวะการขจัดเศษและระบายความร้อนในการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า	6
2.4 ช่วงระยะเวลาเปิด และปิดเพื่อให้เกิดการถ่ายเทประจุ	6
2.5 ความสัมพันธ์ของเวลาเปิดต่อการเกิดขจัดเนื้องานและการสึกหรอของอิเล็กโตรด	7
2.6 ความสัมพันธ์ของเวลาเปิดต่อการเกิดขจัดเนื้องานและการสึกหรอของอิเล็กโตรด	7
2.7 ความสัมพันธ์ของกระแสต่อการเกิดขจัดเนื้องานและการสึกหรอของอิเล็กโตรด	8
2.8 คุณภาพผิวงานที่เกิดจากความถี่ต่ำ	9
2.9 คุณภาพผิวงานที่เกิดจากความถี่ปานกลาง	9
2.10 คุณภาพผิวงานที่เกิดจากความถี่สูง	9
2.11 ลักษณะการทำงานของสารไดอิเล็กตริกเพื่อขับเศษโลหะ	10
2.12 อนุภาคของเศษโลหะที่หลุดออกมากับสารไดอิเล็กตริก	10
2.13 ภาพขยายขนาดอนุภาคของเศษโลหะที่หลุดออกมากับสารไดอิเล็กตริก	10
2.14 ลักษณะรูปทรงของอิเล็กโตรดทองแดง	11
2.15 การเกิดหลุมและแอ่งที่เกิดจากพลังงานความร้อนจากการสปาร์ค	14
2.16 พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อคุณภาพผิวงาน	14
2.17 การคำนวณค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a)	15
3.1 แผนการทดลอง	17
3.2 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ	18
3.3 กระบวนการเตรียมอิเล็กโตรดทองแดง	18
3.4 เครื่องกัดเซาะโลหะด้วยกระแสไฟฟ้าที่ห่อ Aristech รุ่น 3D-CNC EDM	20
3.5 หน้าจอแสดงเวลารวมในการทำงาน (Machining Time)	21
3.6 การจับยึดชิ้นงานและติดตั้งอุปกรณ์วัดระยะสึกหรอของอิเล็กโตรด	22
3.7 จุดอ้างอิงผิวงานในการสปาร์ค	22
3.8 พิกัดจุดศูนย์ของอิเล็กโตรดก่อนการสปาร์ค	23
3.9 การสปาร์คชิ้นงานเหล็กกล้า AISI P20	23
3.10 ค่าการสึกหรอของอิเล็กโตรดที่อ่านจากนาฬิกาวัดที่พิกัดจุดศูนย์หลังการสปาร์ค	24
3.11 เครื่องวัดความหยาบผิว Marh PS 1	24

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 อัตราการจัดเนื้องานจากการปรับเวลาเปิดโดยใช้อิเล็กโตรดขั้วบวก	29
4.2 อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดจากการปรับเวลาเปิดโดยใช้อิเล็กโตรดขั้วบวก	29
4.3 ความขยายผิวเฉลี่ยจากการปรับเวลาเปิดโดยใช้อิเล็กโตรดขั้วบวก	30
4.4 อิเล็กโตรดที่ใช้ในการสปาร์กแล้วเกิดการสึกหรอ	30
4.5 อิเล็กโตรดที่ใช้ในการสปาร์กแล้วไม่เกิดการสึกหรอ	30
4.6 ลักษณะพื้นผิวงานที่	31
4.7 ลักษณะ Profile	32
4.8 อัตราการจัดเนื้องานจากการปรับเวลาเปิดโดยใช้อิเล็กโตรดขั้วลบ	33
4.9 อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดจากการปรับเวลาเปิดโดยใช้อิเล็กโตรดขั้วลบ	33
4.10 ความขยายผิวเฉลี่ยจากการปรับเวลาเปิดโดยใช้อิเล็กโตรดขั้วลบ	33
4.11 อัตราการจัดเนื้องานจากการปรับความถี่ในการสปาร์กโดยใช้อิเล็กโตรดขั้วบวก	34
4.12 อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดจากการปรับความถี่ในการสปาร์ก โดยใช้อิเล็กโตรดขั้วบวก	34
4.13 ความขยายผิวเฉลี่ยจากการปรับความถี่ในการสปาร์กโดยใช้อิเล็กโตรดขั้วบวก	35
4.14 อัตราการจัดเนื้องานจากการปรับความถี่ในการสปาร์กโดยใช้อิเล็กโตรดขั้วลบ	35
4.15 อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดจากการปรับความถี่ในการสปาร์ก โดยใช้อิเล็กโตรดขั้วลบ	36
4.16 ความขยายผิวเฉลี่ยจากการปรับความถี่ในการสปาร์กโดยใช้อิเล็กโตรดขั้วลบ	36
4.17 เปรียบเทียบอัตราการจัดเนื้องาน โดยใช้อิเล็กโตรดขั้วบวกกับขั้วลบ	37
4.18 เปรียบเทียบอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดขั้วบวกกับขั้วลบ	37
4.19 เปรียบเทียบความขยายผิวเฉลี่ยโดยใช้อิเล็กโตรดขั้วบวกกับขั้วลบ	38
4.20 ชนิดของขั้วที่มีผลต่อความร้อนในบริเวณสปาร์ก	38
4.21 อัตราการจัดเนื้องานจากการปรับกระแส	39
4.22 อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดจากการปรับกระแส	40
4.23 ความขยายผิวเฉลี่ยจากการปรับกระแส	40
4.24 ลักษณะผิวงานที่เกิดจากการปรับกระแส (กำลังขยาย 35 เท่า)	40
4.25 ความลึกของการกัดเซาะที่มีผลต่อประสิทธิภาพการแปรรูป	41

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันได้มีการคิดค้นและพัฒนาขีดความสามารถของเครื่องจักร เพื่อตอบสนองความต้องการของตลาด ทำให้เกิดเทคโนโลยีและเครื่องจักรสมัยใหม่ขึ้นมากมาย ซึ่งหนึ่งในนั้นคือเครื่องกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า [1] (EDM : Electrical Discharge Machine) ซึ่งเป็นที่นิยมในอุตสาหกรรมการผลิตแม่พิมพ์พลาสติก เพื่อใช้ในกระบวนการแปรรูปวัสดุชิ้นงานที่มีความแข็งสูง ตลอดจนรูปทรงที่ยากและไม่สามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการทางกล [2] หลักการทำงานของเครื่องกัดอาร์คจะอาศัยความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาทางไฟฟ้าที่ส่งผ่านวัสดุตัวนำที่เรียกว่า “Tool Electrode” ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นเพียงพอที่จะทำให้เกิดการหลอมละลายของเนื้อโลหะออกเป็นอนุภาคนาโนขนาดเล็กภายใต้ของเหลวที่เรียกว่าสาร “Dielectric” โดยลักษณะการหลอมเหลวของเนื้อโลหะจะเกิดในบริเวณที่เล็กมากๆ จึงทำให้ผิวชิ้นงานที่ถูกขจัดออกมีลักษณะเหมือนกับผิวอิเล็กทรอนิกส์ [3] ทั้งนี้สิ่งที่หลงเหลือจากการกัดด้วยไฟฟ้าจะปรากฏเป็นลักษณะของพื้นผิวชิ้นงาน ซึ่งสามารถประเมินค่าได้จากความหยาบผิว โดยที่ความหยาบผิวชิ้นงานจะขึ้นอยู่กับความรุนแรงของการอาร์ค แต่ในกระบวนการผลิตแม่พิมพ์พลาสติกนั้นในขั้นสุดท้ายของกระบวนการผลิตจะต้องมีการปรับผิวแม่พิมพ์ที่เรียกว่าการขัดผิวแม่พิมพ์ ซึ่งต้องทำการขัดด้วยมือเพื่อให้เกิดความสม่ำเสมอของผิว หากสามารถลดความรุนแรงของการสปาร์คจะทำให้ลักษณะของผิวงานมีความสม่ำเสมอ และความเรียบมากขึ้นซึ่งจะเป็นการดีในการลดขั้นตอนหรือระยะเวลาในการขัดแม่พิมพ์ด้วยมือ การลดความรุนแรงของการสปาร์คจะมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของกระบวนการกัดด้วยไฟฟ้า ที่มักประเมินอยู่ในรูปของอัตราการขจัดเนื้องาน และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด โดยอัตราการขจัดเนื้องานและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดเป็นผลมาจากการปรับพารามิเตอร์เพื่อให้เกิดความร้อนที่ส่งผลต่อความรุนแรงในการกัดอาร์ค พารามิเตอร์ที่มีผลต่อการเกิดความร้อนประกอบด้วย พารามิเตอร์กระแสไฟฟ้า เวลาเปิดและความถี่ในการสปาร์ค [1,2]

การลดความหยาบผิวเพื่อให้เกิดความสม่ำเสมอของผิวงานจำเป็นต้องปรับพารามิเตอร์เพื่อควบคุมความรุนแรงของการอาร์ค โดยใช้วัสดุอิเล็กโทรดของแข็งกลางเป็นตัวกลางในการส่งถ่ายความร้อน สำหรับการอาร์กวัสดุกลุ่มเหล็กกล้า นั้นนิยมใช้ทองแดงเป็นวัสดุอิเล็กโทรด [4-6] และปัจจัยหลักที่ก่อให้เกิดความร้อนได้แก่ กระแส ความถี่ในการอาร์ก และมีเวลาเปิดเป็นพารามิเตอร์เสริมเพื่อให้เกิดความร้อน จึงจำเป็นต้องศึกษาระดับช่วงของพารามิเตอร์ดังกล่าวเพื่อศึกษาถึงผลกระทบที่มีต่อคุณภาพผิวงานในรูปของความหยาบผิวงาน และประสิทธิภาพการทำงานในรูปของอัตราการขจัดเนื้องาน และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาขีดความสามารถในการปรับปรุงผิวงานโดยการปรับค่ากระแส (Current), เวลาเปิด (On-Time) และความถี่ (Frequency) ในกระบวนการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า บนผิววัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าแม่พิมพ์พลาสติกเกรด AISIP20 ซึ่งวัดคุณภาพผิวงานจากค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a) ตลอดจนวัดประสิทธิภาพการทำงานในรูปของ อัตราการขจัดเนื้องาน และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด

1.3 สมมุติฐานการศึกษา

งานวิจัยนี้กระทำภายใต้สมมุติฐานคุณภาพผิวงานและประสิทธิภาพการทำงานเป็นผลมาจากความรุนแรงของการอาร์คที่เกิดจากการปรับค่าพารามิเตอร์กระแส เวลาเปิด และความถี่ในการอาร์ค

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

1.4.1 วัสดุและขั้วอิเล็กโทรดที่ใช้ประกอบด้วยได้แก่

- ก. วัสดุอิเล็กโทรดเป็นทองแดงจ่ายประจุเป็นขั้วบวก
- ข. วัสดุอิเล็กโทรดเป็นทองแดงจ่ายประจุเป็นขั้วลบ

1.4.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาขีดความสามารถในการปรับปรุงผิวงานประกอบด้วย

- ก. กระแส (Current) คืออัตราการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าต่อหน่วยเวลา
- ข. เวลาเปิด (On-time) คือช่วงเวลาที่เกิดการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า
- ค. ความถี่ (Frequency) คือจำนวนครั้งของการอาร์คในหนึ่งวินาที

1.4.3 คุณภาพผิวงานจากการปรับปรุงคุณภาพผิวงานวัดได้จาก

- ก. ความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a : Arithmetical mean roughness)

1.4.4 ประสิทธิภาพการทำงานวัดได้จากค่าดังต่อไปนี้

- ก. อัตราการขจัดเนื้องาน (MRR : Material Removal Rate)
- ข. อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR : Electrode Wear Ratio)

1.4.5 จัดเศษโดยฉีดสารไดอิเล็กตริกด้านข้างด้วยแรงดัน 1 kg/cm^2 อัตราการไหล 12 l/min

1.4.6 ทำการกัดอาร์คบนชิ้นงานเหล็กกล้า AISI P 20 ผ่านการชุบแข็งเป็นหลุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ลึก 5 มิลลิเมตร ในสารไดอิเล็กตริกที่เป็นสารไฮโดรคาร์บอน (Spark Erosion 102(HF))

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

- 1.5.1 ศึกษาความเป็นไปได้เพื่อทำการกำหนดชนิดอิเล็กโทรด
- 1.5.2 ทำการทดลองเบื้องต้นเพื่อกำหนดพารามิเตอร์
- 1.5.3 ทำการทดลองเพื่อเก็บค่าคุณภาพผิวงานและประสิทธิภาพการทำงานในรูปของ
 - ก. ความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a : Arithmetical mean roughness)
 - ข. อัตราการขจัดเนื้องาน (MRR : Material Removal Rate)
 - ค. อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR : Electrode Wear Ratio)
- 1.5.4 ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีผลต่อคุณภาพผิวงานและประสิทธิภาพการทำงาน
- 1.5.6 สรุปผลงานวิจัย

1.6 ข้อจำกัดของการศึกษา

การกัดอาร์คด้วยไฟฟ้านั้นวัสดุอิเล็กโทรด และวัสดุชิ้นงานมีผลโดยตรงต่อคุณภาพผิวงานและประสิทธิภาพการทำงาน โดยที่วัสดุชิ้นงานต่างชนิดจะทำให้เกิดรูปกราฟที่คล้ายกัน แต่มีระดับคุณภาพผิวงาน และประสิทธิภาพการทำงานในระดับที่ต่างกัน

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.7.1 ทราบถึงคุณภาพผิวงานและประสิทธิภาพการทำงานที่เกิดจากการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า
- 1.7.2 ทราบถึงเงื่อนไขความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรที่เหมาะสม ต่อการปรับปรุงผิวชิ้นงานวัสดุแม่พิมพ์เหล็กกล้า AISI P 20 ซึ่งสามารถใช้ในการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับลักษณะผิวงานในอุตสาหกรรมการผลิตแม่พิมพ์ได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กรอบแนวความคิด

กรอบแนวความคิดของการปรับปรุงคุณภาพผิวงานแม่พิมพ์พลาสติก AISI P20 โดยการกัดอาร์กด้วยไฟฟ้าเป็นการศึกษาขีดความสามารถของเครื่องกัดอาร์กด้วยไฟฟ้า บนวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าสำหรับผลิตแม่พิมพ์พลาสติกเกรด AISI P20 โดยมีตัวแปรต้นเป็นกระแสไฟฟ้า (Current) เวลาเปิด (On-Time) และความถี่ในการสปาร์ค (Frequency) เพื่อทำการศึกษาถึงอิทธิพลที่มีผลต่อตัวแปรตามในการปรับปรุงผิวงาน ในที่นี้ตัวแปรตามหมายถึง ความหยาบผิวงาน (Surface Roughness) ซึ่งวัดค่าอยู่ในรูปของ ความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a : Arithmetical Mean Roughness) โดยหากความหยาบผิวงานต่ำลงแสดงว่าคุณภาพผิวงานดีขึ้น ตัวแปรตามในที่นี้ยังหมายรวมไปถึงประสิทธิภาพการทำงานของอิเล็กโทรด (Performance of Cu-electrode) ประเมินจาก อัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโทรด (MRR : Materials Removal Rate) และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR : Electrode Wear Ratio) โดยประสิทธิภาพการแปรรูปที่ดีหมายถึงอัตราการขจัดเนื้องานสูงในขณะที่เกิดอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดต่ำ

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

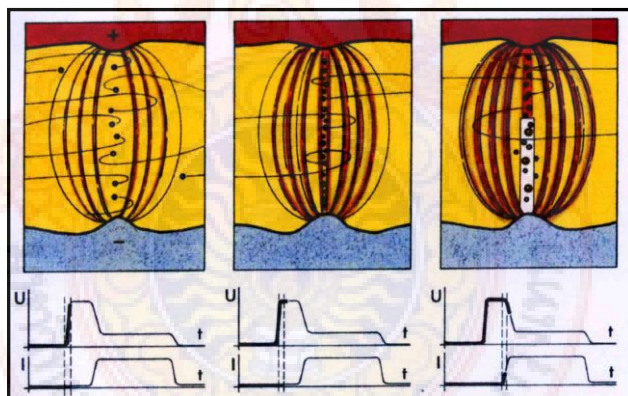
2.2.1. การกัดอาร์กด้วยไฟฟ้า (EDM : Electrical Discharge Machining)

จากนิยามตามมาตรฐาน DIN 8580 จัดได้ว่ากระบวนการกัดกร่อนของเครื่องกัดอาร์กด้วยไฟฟ้าเป็นกระบวนการแยก (Separating) อนุภาค (Particles) ของวัสดุ (Materials) โดยอาศัยความร้อนจากการอาร์กของไฟฟ้าให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (Electrochemical) เข้าไปทำลายพันธะการจับยึดของอนุภาคออกจากเนื้อวัสดุในรูปของของแข็ง ของเหลวหรือแก๊ส การกัดกร่อนด้วยไฟฟ้า (Electroerosion) ตามมาตรฐานดังกล่าวยังรวมไปถึงจ่ายประจุระหว่างขั้วสองขั้วเพื่อให้เกิดการสึกกร่อนในของเหลว (Dielectric Fluid) อีกด้วย [1]

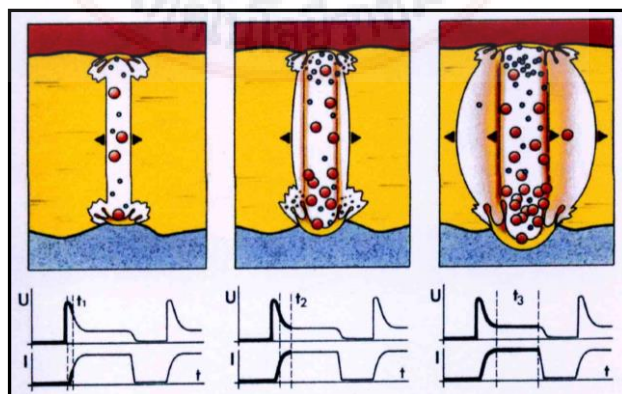
หากกล่าวถึงการกัดอาร์กด้วยไฟฟ้าจะทราบกันดีว่าเป็นรูปแบบของการแปรรูปที่อาศัยการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่ความถี่สูง ทำให้เกิดการขจัดเนื้องานสามารถประยุกต์ใช้ได้ทั้งไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับ โดยเป็นการแปรรูปวัสดุที่วัสดุชิ้นงาน (Workpiece) ไม่สัมผัสกับเครื่องมือตัด (Tool Electrode) และเนื้องานที่หลุดออกไปจะมีอนุภาคขนาดเล็กอยู่ในรูปของของแข็ง ของเหลว และแก๊ส ถึงแม้ว่าอิเล็กโทรดจะอยู่ใกล้ชิ้นงานเพียงใดก็ยังไม่สัมผัสกับผิววัสดุชิ้นงาน แต่จะมีการปล่อยประจุของกระแสไฟฟ้าผ่านของเหลว (Dielectric Fluid) ที่กั้นอยู่ระหว่างอิเล็กโทรดและผิวชิ้นงาน ระยะห่างดังกล่าวจะเรียกว่า ช่องว่าง (Gap) การปล่อยประจุ

ของกระแสไฟฟ้าผ่านช่องว่างดังกล่าวทำให้เกิดการอาร์ก (Discharge Current) ที่มีอุณหภูมิที่สูงถึง 8,000 ถึง 12,000 องศาเซลเซียส ทำให้ผิวชิ้นงานเกิดการหลอมละลายและระเหยกกลายเป็นไอ กระบวนการดังกล่าวนิยมใช้กับวัสดุชิ้นงานที่มีความแข็งสูง และรูปทรงที่ไม่สามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการทางกล [2] โดยยุคสงครามโลกครั้งที่สองได้มีการประดิษฐ์เครื่องกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า โดยการติดตั้งระบบป้อนด้วยเซอร์โวมอเตอร์เป็นครั้งแรก และต่อมาได้มีการเปลี่ยนแปลงปรับปรุงจากการใช้วงจรความต้านทานร่วมกับตัวเก็บประจุ มาเป็นวงจรกำลัง และในปัจจุบันได้มีการพัฒนาติดตั้งระบบการทำงานเป็นแบบอัตโนมัติ จนเกิดเป็นเครื่องจักรนื่องใหม่อย่างเครื่องตัดด้วยลวดโดยการกัดอาร์กด้วยไฟฟ้า (WEDM : Wire Cut Electrical Discharge Machining)

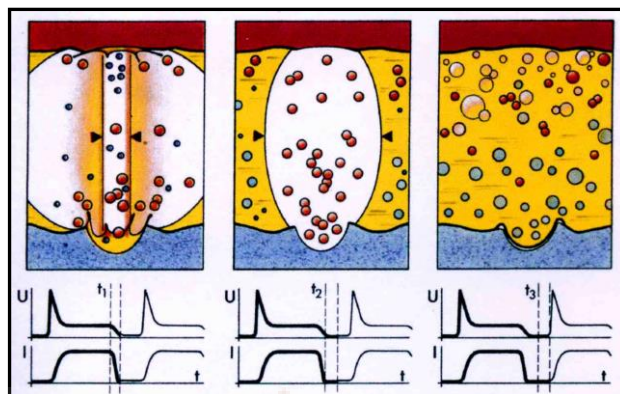
การจัดเนื้องานจากกระบวนการกัดอาร์กด้วยไฟฟ้า เป็นวัฏจักรการอาร์ก ในสารไดอิเล็กตริก โดยสถานะเริ่มต้นนี้จะเป็นการสร้างระยะห่างระหว่างผิวงานกับผิวอิเล็กโตรดเกิดเป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic) ในบริเวณพื้นผิวที่จะเกิดการอาร์กด้วยแรงดันไฟฟ้าสูงสุด โดยไม่มีกระแสไหลผ่านดังรูปที่ 2.1 และเมื่อระบบขับป้อน (Servo) สามารถรักษาระยะห่างได้จะเกิดการอาร์กซึ่งจะทำให้แรงดันไฟฟ้าลดลงโดยมีปริมาณกระแสไหลผ่านมากขึ้น โดยการอาร์กจะส่งผลให้เกิดช่องสูญญากาศที่เกิดจากการระเหยกของสาร ไดอิเล็กตริกเมื่อได้รับความร้อนดังแสดงในรูปที่ 2.2 เมื่อสิ้นสุดการอาร์กช่องว่างสูญญากาศหดตัวดึงสารไดอิเล็กตริกที่อยู่โดยรอบเข้ามาจับเศษโลหะและระบายความร้อนดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.1 สถานะเริ่มต้นของการสปาร์คในการกัดอาร์กด้วยไฟฟ้า [1]



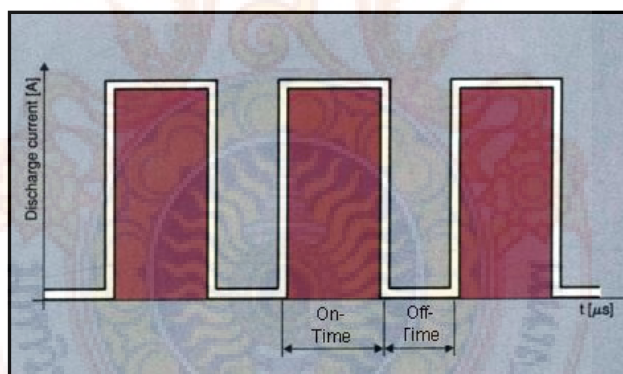
รูปที่ 2.2 สถานะการสปาร์คในการกัดอาร์กด้วยไฟฟ้า [1]



รูปที่ 2.3 สถานะการจัดเศษและระบายความร้อนในการกัดอาร์กด้วยไฟฟ้า [1]

จากวัฏจักรการอาร์กทำให้เกิดความสัมพันธ์ระหว่างเวลาปล่อยประจุกระแสไฟฟ้าที่เรียกว่าเวลาเปิด (On-Time) กับเวลาหยุดจ่ายประจุกระแสไฟฟ้าที่เรียกว่าเวลาปิด (Off-Time) ดังรูปที่ 2.4 โดยสามารถวัดประสิทธิภาพของการทำงานในหนึ่งวัฏจักร (Duty Cycle) [2] ของการสปาร์ก เท่ากับเวลาเปิดต่อเวลารวมในหนึ่งวัฏจักร (Total Cycle Time = On-Time + Off-time) ดังแสดงในสมการที่ 1

$$\text{Duty Cycle} = \left(\frac{\text{On - Time}}{\text{Total Cycle Time}} \right) \times 100(\%) \quad (1)$$



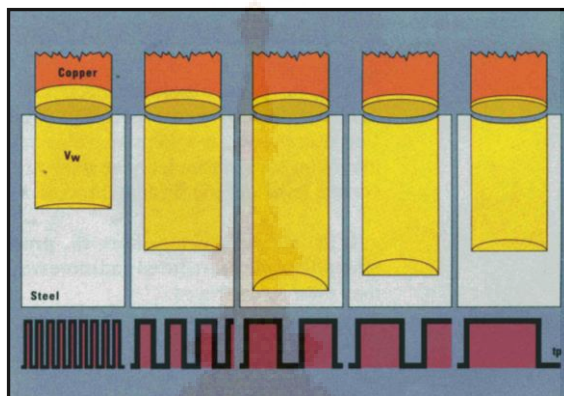
รูปที่ 2.4 ช่วงระยะเวลาเปิด และปิดเพื่อให้เกิดการถ่ายเทประจุ [1]

จากสมการหากลดเวลาปิดเพียงเล็กน้อยจะทำให้ Duty Cycle สูงขึ้นและมีผลต่อการปรับสภาพแวดล้อมในการสปาร์ก วัสดุอิเล็กโตรด วัสดุชิ้นงาน และสภาพแวดล้อมของสารไดอิเล็กตริก ตลอดจนความสามารถในการรักษาสภาพความนำไฟฟ้า และความเสถียรในกระบวนการขจัดเนื้องานเป็นอย่างมาก [2]

ก. เวลาเปิด (On-Time)

เวลาเปิดคือช่วงเวลาที่เกิดการถ่ายเทประจุของกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดการอาร์ก กลายเป็นความร้อนสะสมที่ใช้ในการขจัดเนื้องานจากการสร้างระยะห่างระหว่างผิววัสดุชิ้นงานกับวัสดุอิเล็กโตรดจากความต้านทานของกระแส และใช้กระแสเป็นตัวกำเนิดพลังงานความร้อนในการ

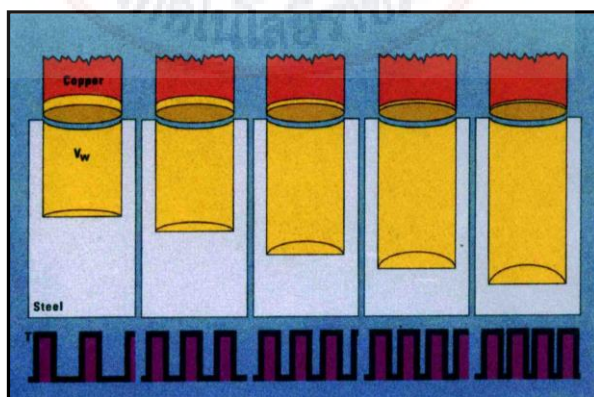
ทำให้งานสำเร็จลง ระยะเวลาของการถ่ายเทประจุที่ยาวนานทำให้เกิดการหลอมละลายเป็นหลุมลึกที่มีความกว้างที่เกิดการหลุดร่อนจากการอาร์กเป็นแอ่งขนาดใหญ่และมีความลึกมาก จึงส่งผลให้ผิวชิ้นงานมีความหยาบสูงกว่าระยะเวลาการถ่ายเทประจุที่สั้น นอกจากนี้เวลาเปิดที่สูงจะทำให้เกิดการหลอมละลายและแข็งตัวของผิวงานที่เรียกว่า Recasting โดยในกรณีที่ใช้อิเล็กโตรดเป็นขั้วบวก จะทำให้การสึกหรอของอิเล็กโตรดลดลงเนื่องจากเกิดการเคลือบที่ผิวอิเล็กโตรด [1,2] ดังแสดงระยะเวลาเปิดกับการขจัดเนื้องานและการสึกหรอของอิเล็กโตรดในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ของเวลาเปิดต่อการเกิดขจัดเนื้องานและการสึกหรอของอิเล็กโตรด [1]

ข. เวลาปิด (Off-Time)

เวลาปิดคือช่วงเวลาที่หยุดพักการถ่ายเทประจุของกระแสไฟฟ้า ซึ่งไม่ทำให้เกิดความร้อน และการขจัดเนื้องาน แต่จะทำให้เกิดความเสถียรในกระบวนการกัดอาร์กด้วยไฟฟ้า โดยเมื่อเวลาปิดมากขึ้นทำให้ความเร็วในการแปรรูปลดลง แต่จะทำให้เกิดการระบายความร้อน และขจัดเศษอนุภาคที่หลุดออกจากชิ้นงานได้มากขึ้นทำให้เกิดความเสถียรในการรักษาค่าความต้านทานของสารไดอิเล็กตริกซึ่งเป็นสิ่งสำคัญอย่างมากในการสร้างช่องว่างระหว่างผิวงานกับอิเล็กโตรด เพื่อให้พร้อมในการสปาร์คในวัฏจักรถัดไป [2] ทั้งนี้เวลาปิดที่ต่ำจะทำให้เกิดการขจัดเนื้องานที่สูง และการสึกหรอของอิเล็กโตรดต่ำ เนื่องจากพลังงานต่อหน่วยเวลาขณะถ่ายเทประจุสูงในขณะที่เวลาระบายความร้อนซึ่งเป็นเวลาปิดต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.6



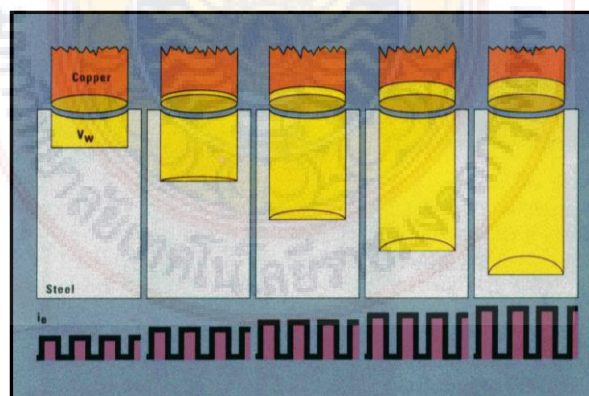
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ของเวลาปิดต่อการเกิดขจัดเนื้องานและการสึกหรอของอิเล็กโตรด [1]

ก. กระแส (Current)

กระแสไฟฟ้าคือต้นกำเนิดของพลังงานที่ใช้ในการกัดกร่อนของกระบวนการ โดยมีหน่วยวัดเป็นแอมแปร์ (A) ทั้งเครื่อง EDM จะคำนวณค่ากระแสสูงสุดที่ใช้ต่อพื้นที่หน้าตัด (SA :Section Area) สำหรับงานขจัดเนื้องานแบบหยาบจะใช้กระแสที่แอมแปร์สูงซึ่งเหมาะกับงานที่ไม่ต้องการรายละเอียดผิวมากนัก แต่โดยทั่วไปแล้วเครื่อง EDM จะเลือกใช้กระแสสูงสุดตามกฎ 65 แอมแปร์ต่อพื้นที่ 1 ตารางนิ้ว (ประมาณ 0.1 แอมป์ต่อตารางมิลลิเมตร) ดังสมการที่ 2 [2]

$$\text{Maximum Amperage} = \text{SA} \times 65 \quad (2)$$

ตัวอย่างเช่น ถ้าอิเล็กโตรดมีพื้นที่หน้าตัด 0.5 ตารางนิ้ว จะต้องใช้กระแสสูงสุดเท่ากับ $0.5 \times 65 = 32.5$ แอมแปร์ อย่างไรก็ตามกฎกระแส 65 แอมแปร์ต่อตารางนิ้วไม่สามารถใช้ได้กับอิเล็กโตรดที่มีหน้าตัดมาก เนื่องจากความต้านทานของกระแส และการกระจายความร้อน ตลอดจนความลึกของการเกิด Recasting บนเนื้อวัสดุซึ่งขึ้นอยู่กับความสามารถในการรักษาความความต้านทานของสารไดอิเล็กทริกก่อนเริ่มต้นการสปาร์ค ค่ากระแสและความถี่ที่สูงเหมาะกับการกัดเจาะผิวที่หยาบ เนื่องจากเกิดการกระจายตัวของความร้อนทำให้เกิดการหลอมเหลวเป็นที่ลึกและกว้าง ส่งผลให้ไม่สามารถควบคุมกระบวนการทางความร้อนในรูปของคลายความเค้น หรือการอบอ่อนได้ เมื่อใช้กฎกระแสสูงสุดก็จำเป็นที่จะต้องปรับช่องว่างระหว่างวัสดุชิ้นงานกับอิเล็กโตรดให้มีความกว้างมากที่สุด โดยเมื่อกระแสเพิ่มมากขึ้นจะทำให้การขจัดเนื้องานและการสึกหรอของอิเล็กโตรดเพิ่มสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.7



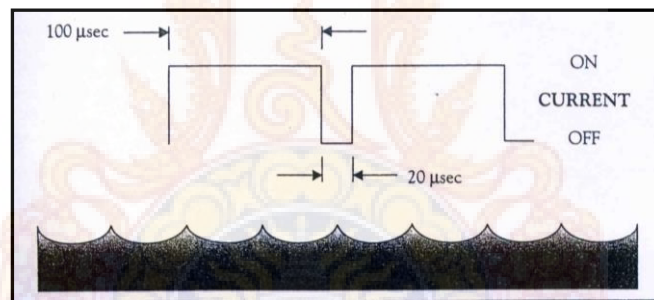
รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ของกระแสต่อการเกิดขจัดเนื้องานและการสึกหรอของอิเล็กโตรด [1]

ง. ความถี่ (Frequency)

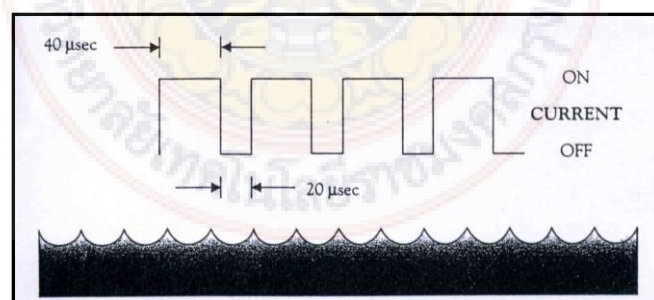
ความถี่เป็นผลที่เกิดมาจากเวลาเปิด และเวลาปิด โดยความถี่แตกต่างจาก Duty Cycle ตรงที่ความถี่คำนวณจากวัฏจักรที่เกิดขึ้นต่อหน่วยเวลา (Sec) ดังสมการที่ 3 [2] ซึ่งความถี่นี้จะส่งผลโดยตรงต่อความหนาผิวชิ้นงานและการขจัดเนื้อ (Total Cycle Time = On-time + Off-time)

$$\text{Frequency} = \frac{1}{\text{Total Cycle Time}} \quad (3)$$

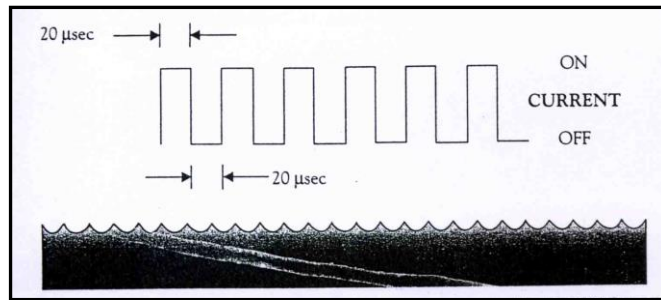
เวลาเปิดสูงเวลาปิดต่ำจะทำให้เกิดค่าความถี่ต่ำ ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งจะทำให้ผิวชิ้นงานมีความหนาผิวมาก และมีการขจัดเนื้องานที่สูง เนื่องจากเวลาปล่อยประจุที่ยาวนานทำให้ความร้อนที่เกิดจากการอาร์กกระจายตัวเป็นแอ่งกว้างและลึก ตลอดจนส่งผลให้เกิดเป็นชั้นการหลอมเหลวและแข็งตัวใหม่ที่เรียกว่า Recasting ที่มีความหนาสูง ซึ่งเป็นเหตุให้บริเวณกระทบที่เกิดจากความร้อน (HAZ : Heat Affected Zone) ลึกลงไปในเนื้องาน หากเวลาปิดลดลงจะทำให้เกิดค่าความถี่ที่สูงขึ้นดังรูปที่ 2.9 ทำให้เกิดการหลอมละลายของการสปาร์คเป็นแอ่งที่มีความกว้างและความลึกลดลง ซึ่งทำให้ความหนาผิวงานและความเร็วในการขจัดเนื้องานลดลง แต่อิเล็กโตรดเกิดการสึกหรอเพิ่มมากขึ้น หากเวลาเปิดลดลงต่ำมากจะทำให้เกิดเป็นความถี่สูงมาก ดังรูปที่ 2.10 ซึ่งจะส่งผลให้ความหนาผิวชิ้นงานและความเร็วในการขจัดเนื้องานลดลงเป็นอย่างมาก



รูปที่ 2.8 คุณภาพผิวงานที่เกิดจากความถี่ต่ำ [2]



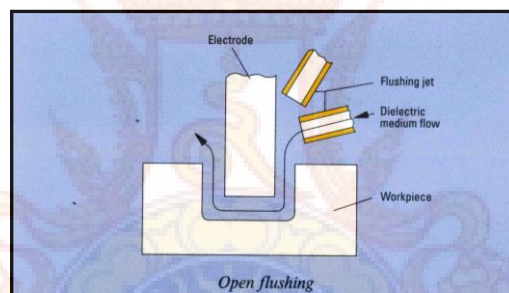
รูปที่ 2.9 คุณภาพผิวงานที่เกิดจากความถี่ปานกลาง [2]



รูปที่ 1.10 คุณภาพผิวงานที่เกิดจากความถี่สูง [2]

จ. สารไดอิเล็กตริก (Dielectric)

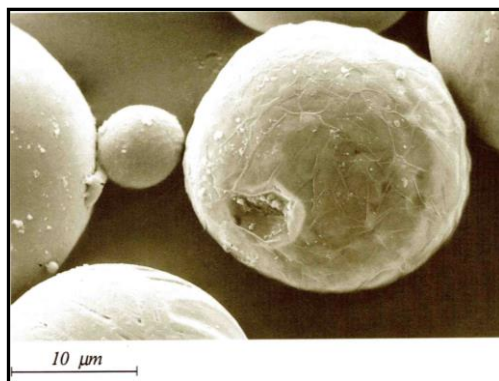
สารไดอิเล็กตริกเป็นของเหลวตัวกลางที่กั้นระหว่างชิ้นงานกับอิเล็กโทรด ซึ่งสารไดอิเล็กตริกที่นิยมใช้ ได้แก่ น้ำกลั่น (De - Ionized Water) และสารไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) โดยสารไดอิเล็กตริกจะทำหน้าที่รักษาสภาพการนำไฟฟ้า และช่วยระบายความร้อนตลอดจนขจัดอนุภาคเศษโลหะออกจากบริเวณผิวงานเพื่อป้องกันการเกิด Undercut เนื่องจากการฝังตัวของเศษโลหะ และรักษาความเสถียรในการอาร์ก ดังรูปที่ 2.11 โดยเศษโลหะที่เกิดจากการขัดเจียรงานจะถูกชะล้างออกโดยสารไดอิเล็กตริกมีอนุภาคที่เล็กมากดังแสดงในรูปที่ 2.12 และ รูปที่ 2.13



รูปที่ 2.11 ลักษณะการทำงานของสารไดอิเล็กตริกเพื่อขับเศษโลหะ [1]



รูปที่ 2.12 อนุภาคของเศษโลหะที่หลุดออกมาด้วยสารไดอิเล็กตริก [1]

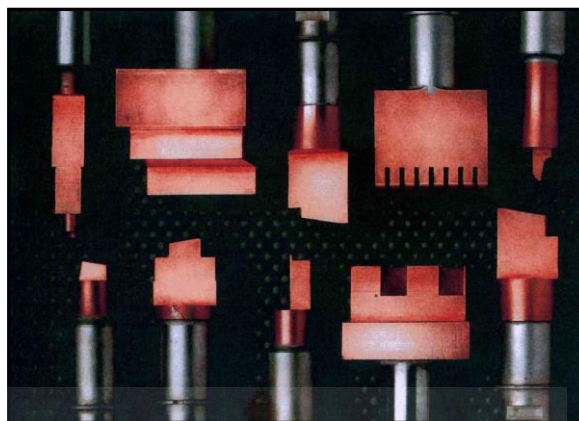


รูปที่ 2.13 ภาพขยายขนาดอนุภาคของเศษโลหะที่หลุดออกมากับสาร ไดอิเล็กทริก [1]

สารไฮโดรคาร์บอนเมื่อสปาร์คจะแตกตัวกลายเป็นไฮโดรเจนซึ่งมีประจุเป็นบวก และคาร์บอนซึ่งมีประจุเป็นลบ [1,2] โดยคาร์บอนจะวิ่งเข้าหาขั้วบวก ถ้าอิเล็กโตรดเป็นขั้วบวกคาร์บอนก็จะวิ่งไปจับอิเล็กโตรด ซึ่งจะช่วยให้ลดการสึกกร่อนของอิเล็กโตรดได้ แต่ถ้าอิเล็กโตรดที่ใช้เป็นลบ คาร์บอนจะวิ่งไปจับผิวงานทำให้ผิวชิ้นงานมีลักษณะเป็นสีดำคล้ำ ความแตกต่างระหว่างสารไฮโดรคาร์บอนและน้ำคือ สารไฮโดรคาร์บอนมีค่าความต้านทานสูงกว่าน้ำกลั่น ดังนั้นในกระบวนการกัดโลหะด้วยกระแสไฟฟ้าทั่วไปจึงนิยมใช้สารไฮโดรคาร์บอนเป็นของเหลวตัวกลาง เนื่องจากค่าความต้านทานที่สูงทำให้การถ่ายเทประจุเกิดขึ้นได้ยากจึงเกิด Gap ในการสปาร์คที่ดำทำให้ผิวชิ้นงานมีความละเอียดสูง แต่อัตราการขจัดเนื้องานจะต่ำกว่าน้ำกลั่นที่มีความต้านทานน้อยกว่าน้ำมัน ทำให้การถ่ายเทประจุระหว่างอิเล็กโตรดกับชิ้นงานเกิดขึ้นได้ง่ายเป็นผลให้อัตราการขจัดเนื้องานสูงแต่ความปราณีตจะน้อย (ความหยาบผิวสูง)

จ. วัสดุอิเล็กโตรด (Electrode Materials)

วัสดุแต่ละชนิดมีสมบัติที่แตกต่างกัน จึงทำให้อิเล็กโตรดสามารถสร้างขึ้นจากวัสดุหลายชนิด ตามความเหมาะสมกับวัสดุชิ้นงานที่ทำการอาร์กและสารไดอิเล็กทริกที่ใช้ โดยวัสดุอิเล็กโตรดที่ดีมีสมบัติดังนี้คือ ง่ายต่อการแปรรูปด้วยกรรมวิธีที่มีค่าใช้จ่ายต่ำ ประสิทธิภาพในการขจัดเนื้องานสูง อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดต่ำ สามารถกระจายความร้อนและนำไฟฟ้าได้ดี ที่สำคัญคือสามารถต้านทานต่อการผิรุ่ย วัสดุบางชนิดมีอัตราการสึกหรอต่ำ แต่ยากที่จะนำมาแปรรูปเป็นอิเล็กโตรดจึงไม่เป็นที่นิยม สำหรับวัสดุอิเล็กโตรดที่ใช้ในกระบวนการกัดอาร์กด้วยไฟฟ้าที่เหมาะสมกับเหล็กกล้าคือทองแดง [1,2] (Copper) ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ซึ่งเป็นธาตุเคมีที่มีหมายเลขอะตอม 29 และสัญลักษณ์คือ Cu นิยมใช้เป็นวัสดุอิเล็กโตรดเนื่องจากแปรรูปได้ง่ายและให้ประสิทธิภาพการทำงานที่สูง อีกทั้งยังมีผลกระทบต่อการสปาร์คน้อยมากโดยทองแดงมีสมบัติดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.14 ลักษณะรูปทรงของอิลีกโตรดทองแดง [1]

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติที่สำคัญของทองแดง

สมบัติ	ทองแดง (Cu)
ความหนาแน่น (kg/cm^3)	8.96
จุดหลอมเหลว ($^{\circ}\text{C}$)	1084.62
ความต้านทาน (20°C) ($\text{m}\Omega\cdot\text{m}$)	16.78
การนำความร้อน (300 K) ($\text{W/cm}\cdot\text{K}$)	401
ความแข็ง HV (mpv)	369
พลังงานไอออนในเซชัน (KJ/m) ระดับ 1 ต่อ	745.5

ข. วัสดุชิ้นงาน (Work piece Materials)

วัสดุเหล็กกล้า AISI P20 หรือ DIN 1.2330 หรือ ASTM A681 เป็นเหล็กกล้าสำหรับทำแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก ซึ่งใช้สำหรับงานที่ต้องการปริมาณกำลังผลิตสูงโดยมีสมบัติทางกลตามตารางที่ 2.2 และมีส่วนผสมของธาตุต่างๆ คิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกลเหล็กกล้า AISI P20

สมบัติทางกล (หน่วย)	รายละเอียด
ความหนาแน่น (Density) (10^3 kg/m^3)	7.85 ที่อุณหภูมิ 25°C
อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio)	0.27 – 0.30 ที่อุณหภูมิ 25°C
Elastic Modulus (GPa)	190 – 210 ที่อุณหภูมิ 25°C
Thermal expansion ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	12.8 ที่อุณหภูมิ $20 - 425^{\circ}\text{C}$ หรือมากกว่า

ตารางที่ 2.3 ส่วนผสมของธาตุในเหล็กกล้า AISI P20 คิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ธาตุ(สัญลักษณ์)	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
คาร์บอน (C)	0.28 – 0.40
แมงกานีส (Mn)	0.60 – 1.00
ซิลิกา (Si)	0.20 – 0.80
โครเมียม (Cr)	1.40 – 2.00
โมลิบดีนัม (Mo)	0.30 – 0.55
ทองแดงไม่เกิน (Cu)	0.25
ฟอสฟอรัสไม่เกิน (P)	0.03
ซัลเฟอร์ไม่เกิน (S)	0.03

2.2.2. การประเมินประสิทธิภาพการแปรรูปของกระบวนการกัดอาร์กด้วยไฟฟ้า

(Measuring of Performance in EDM)

กระบวนการกัดอาร์กด้วยไฟฟ้าเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการกัดกร่อน ซึ่งเกิดการสึกหรอทั้งวัสดุชิ้นงานและวัสดุอิเล็กโทรด ซึ่งขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของกระบวนการ โดยทั่วไปแล้วจะประเมินความสามารถในการกัดเซาะเนื้องานอยู่ในรูปของอัตราการขจัดเนื้องาน และประเมินการสึกกร่อนของอิเล็กโทรดอยู่ในรูปของอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด ตลอดจนวัดประสิทธิภาพการทำงานที่มีผลต่อวัสดุชิ้นงานอยู่ในรูปของคุณภาพผิวงาน (Surface Quality) อยู่ในรูปของความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra)

ก. อัตราการขจัดเนื้องาน (MRR : Materials Removal Rate)

การแปรรูปด้วยวิธีกัดกร่อนทางไฟฟ้า อัตราการขจัดเนื้องานจะต่ำมากเมื่อเทียบกับวิธีการอื่นๆ เช่น การตัด การกัดและการกลึง เนื่องจากการใช้เงื่อนไขที่การแปรรูปดำเนินไปอย่างช้าๆ ทำให้อัตราการขจัดเนื้องานต่ำ แต่สามารถใช้ได้กับวัสดุชิ้นงานที่ยากต่อการแปรรูปด้วยกระบวนการทางกล ในการปรับใช้เงื่อนไขที่ทำให้อัตราการขจัดเนื้องานสูงอาจทำให้ค่าความหยาบผิวสูงขึ้น อัตราการขจัดเนื้องานจะมีหน่วยเป็นปริมาตรของเนื้อวัสดุที่ถูกขจัดออกไปต่อหน่วยเวลา ดังสมการที่ 4

$$\text{อัตราการขจัดเนื้องาน (MRR)} = \frac{\text{ปริมาตรเนื้องานที่สึกหรอไป (g หรือ mm}^3\text{)}}{\text{เวลาที่ใช้ (min)}} \quad (4)$$

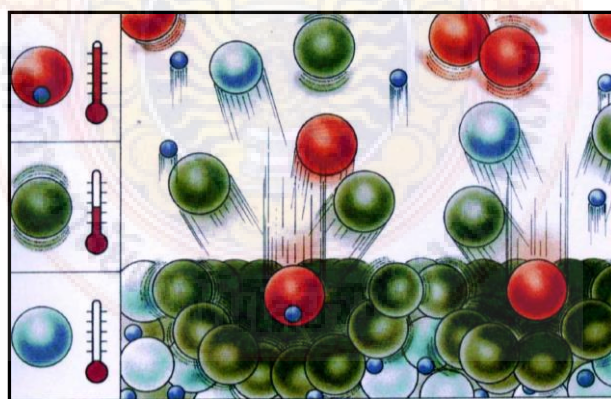
ข. อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR : Electrode Wear Ratio)

การกักความร้อนวัสดุชิ้นงานจะทำให้อิเล็กทรอนิกส์เกิดการสึกหรอที่เปลี่ยนแปลงไปตามปัจจัยต่างๆ เช่น เงื่อนไขการกัดเซาะ หรือการเลือกใช้วัสดุของอิเล็กทรอนิกส์กับวัสดุชิ้นงาน และสภาพการไหลของสารไดอิเล็กตริก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องคำนวณอัตราการสึกหรอนี้ไว้ล่วงหน้าเพื่อกำหนดปริมาณขั้นสุดท้ายของความสึกหรอวัสดุชิ้นงานที่เพื่ออัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์เพื่อให้ได้ขนาดที่แม่นยำ ในทางปฏิบัติถ้าหากอัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์ที่ต่ำกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ จะถือว่าไม่เกิดการสึกหรอ และถ้าอยู่ในช่วง 1 – 10 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่าอัตราการสึกหรอที่เกิดขึ้นอยู่ในระดับต่ำ หากสูงเกินกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่ามีการสึกหรอ ซึ่งโดยปกติแล้วการแปรรูปหยาบจะไม่เกิดสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์ แต่ถ้าเป็นการแปรรูปละเอียดอัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์จะอยู่ในเกณฑ์ต่ำ โดยอัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์สามารถคำนวณได้จากสมการ 5

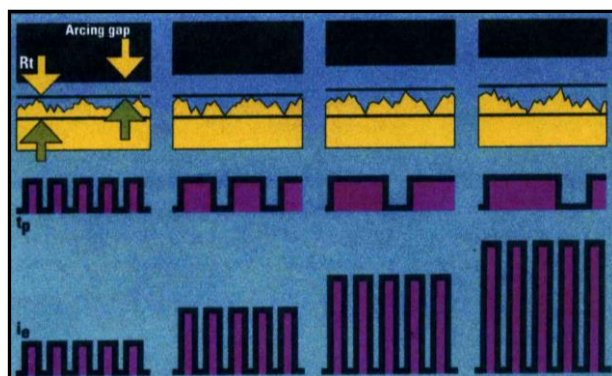
$$\text{อัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์ (EWR)} = \frac{\text{ปริมาตรชิ้นไฟฟ้าที่สึกหรอไป (g หรือ mm}^3\text{)} \times 100}{\text{ปริมาตรเนื้องานที่ถูกขจัดออก (g หรือ mm}^3\text{)}} \quad (5)$$

ก. คุณภาพผิวงานในรูปของความหยาบผิว

ความหยาบผิวงานในกระบวนการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าเกิดจากกระแสไฟฟ้าที่เป็นต้นกำเนิดพลังงานความร้อน และระยะเวลาเปิดที่ทำให้เกิดการถ่ายเทประจุส่งผลให้เกิดความร้อนสะสมจนเกิดการหลอมละลายและหลุดร่อนออกเป็นอนุภาคนาโนเล็กจากผิวงานดังรูปที่ 2.15 เมื่ออนุภาคหลุดออกจากชิ้นงานจะเกิดเป็นแอ่งขึ้นบนผิวงาน ความลึกและความกว้างของแอ่งที่เกิดขึ้นมากน้อยเพียงใดก็ขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการอาร์คดังรูปที่ 2.16 โดยเมื่อเสร็จสิ้นแล้วความกว้างและความลึกของแอ่งที่หลงเหลือจะกลายเป็นลักษณะของผิวงาน



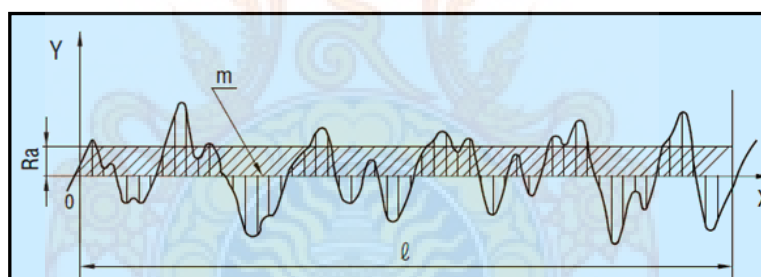
รูปที่ 2.15 การเกิดหลุมและแอ่งที่เกิดจากพลังงานความร้อนจากการสปาร์ค [1]



รูปที่ 2.16 พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อคุณภาพผิวงาน [1]

ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra : Arithmetical Mean Roughness) หมายถึง ค่าเฉลี่ยจากการคำนวณค่ากลางระหว่างจุดยอดและจุดก้นแอ่ง เพื่อกำหนดเส้นกึ่งกลาง (Mean) ของภาคขยายพื้นผิว (Profile) แล้วนำค่าที่ห่างจากเส้นกึ่งกลางด้านบนมาหักล้างกับค่าที่ห่างจากเส้นกึ่งกลางด้านล่างเทียบกับระยะทาง ดังแสดงในรูปที่ 2.19 ซึ่งสามารถเขียนสมการในการคำนวณได้ดังสมการที่ 6

$$Ra = \frac{1}{\ell} \int_0^{\ell} |f(x)| dx \quad (6)$$



รูปที่ 2.19 การคำนวณค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) [3]

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การแปรรูปโดยอาศัยปฏิกิริยาความร้อนทางไฟฟ้าที่ถูกส่งผ่านวัสดุตัวนำที่เรียกว่า อิเล็กโทรด ซึ่งทำหน้าที่เป็นเครื่องมือควบคุมลักษณะการหลอมเหลวของผิวงานภายใต้ของเหลวถึงตัวนำที่เรียกว่า สารไดอิเล็กตริก (Dielectric) ซึ่งทำหน้าที่ขจัดเนื้องานส่วนที่หลอมเหลวและระบายความร้อน โดยกระบวนการดังกล่าวจะเรียกว่า การกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า “Electrical Discharge Machining” (EDM) ซึ่งเหมาะกับการแปรรูปวัสดุชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนและมีความแข็งแรงสูงทำให้ยากต่อการแปรรูปด้วยกระบวนการทางกล [1,2] โดยจากการศึกษาวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง พบว่าประสิทธิภาพการทำงานที่เกิดจากกระบวนการกัดเซาะอาร์คอันได้แก่ อัตราการขจัดเนื้องาน อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด และความหยาบผิวเฉลี่ย [12,13] เกิดจากการปรับพารามิเตอร์ของเครื่องจักร ซึ่งชิ้นงานที่ได้จะมี

ลักษณะพื้นผิวเหมือนกับเครื่องมือตัดที่เรียกว่า วัสดุอิเล็กโตรด [4] ซึ่งวัสดุที่นิยมใช้เป็นอิเล็กโตรดสำหรับกัดเซาะชิ้นงานกลุ่มเหล็กกล้าพบว่าเป็นทองแดงมีความเหมาะสมมากที่สุด รองลงมาคือ แกรไฟต์ และสังกะสี ส่วนวัสดุชิ้นงานที่ทำการอาร์กส่วนใหญ่เป็นวัสดุที่มีความแข็งสูงและเป็นวัสดุกลุ่มคาร์ไบด์ โดยประสิทธิภาพการแปรรูปที่ทำการศึกษาได้แก่ อัตราการจัดเนื้องาน และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด ที่ส่งผลต่อการเกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็กและความหยาบผิว [5] องค์ประกอบทั้งหมดที่มีผลต่ออัตราการกัดเนื้อโลหะแต่การสึกหรอของอิเล็กโตรดสามารถจำแนกออกได้เป็น พารามิเตอร์ของเครื่องจักร วัสดุอิเล็กโตรด วัสดุชิ้นงาน และสารไดอิเล็กตริก โดยพารามิเตอร์ของเครื่องจักรที่มีผลต่อการแปรรูปชิ้นงานได้แก่ อัตรากระแส (Current Rate) ที่ใช้ในการสปาร์ค ถ้ากระแสต่ำจะทำให้ได้อัตราการกัดเนื้อโลหะต่ำแต่การสึกหรอของอิเล็กโตรดสูง [6,7] ช่วงพัลส์ (On Pulse หรือ Off Time) สั้นจะทำให้อิเล็กโตรดสึกหรอมากขึ้นแต่ได้ผิวงานที่มีคุณภาพและมีความละเอียดผิวสูง ช่วงพักพัลส์ (Off Pulse หรือ On Time) สั้นจะทำให้ได้รับอัตราการกัดเนื้อโลหะเพิ่ม การสึกหรอของอิเล็กโตรดลดลงทั้งนี้เพราะว่าพลังงานต่อหน่วยเวลาเพิ่มขึ้น [14,15] อิเล็กโตรดที่เป็นขั้วลบเหมาะสำหรับช่วงพัลส์ที่สั้นเนื่องจากจำนวนอนุภาคลบจะมากกว่าอนุภาคบวก และอิเล็กโตรดเป็นขั้วบวกเหมาะสำหรับช่วงพัลส์ที่ยาวอนุภาคบวกมากเกิดขึ้นจำนวนมาก [1,2] ทำให้ชิ้นงานมีอัตราการกัดสูง อิเล็กโตรดสึกหรอน้อย แรงเคลื่อนไฟฟ้า (Gap Voltage) จะต่ำสำหรับการตัดหยาบโดยใช้ปริมาณกระแสไฟและค่าประจุไฟฟ้าสูง ส่วนค่าความถี่จะต่ำ วัสดุอิเล็กโตรดที่มีส่วนผสมของคาร์บอนเมื่อทำการสปาร์คบนชิ้นงานมีคาร์บอนเป็นส่วนผสม ในสารไดอิเล็กตริกที่เปลี่ยนสภาพเป็นคาร์บอนได้จะทำให้เกิดผิวชิ้นงานที่หยาบ ความเค้นตกค้างและรอยแตกร้าวขนาดเล็กมากกว่ากระบวนการที่ปราศจากคาร์บอน [4,5] หากชิ้นงานเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนควรหลีกเลี่ยงอิเล็กโตรดที่เป็นแกรไฟต์

2.4 สรุป

การกัดอาร์กด้วยไฟฟ้าเป็นการควบคุมการอาร์กของกระแสไฟฟ้าเพื่อให้เกิดความร้อนเข้าไปสลายพันธะการจับยึดของอะตอม ทำให้เกิดการสึกกร่อนของวัสดุอิเล็กโตรดและวัสดุชิ้นงาน โดยใช้สารไดอิเล็กตริกทำหน้าที่ระบายความร้อน และจัดเศษในรูปของของแข็ง ของเหลว และแก๊ส [1,2] ทั้งนี้การอาร์กดังกล่าวเกิดจากการปล่อยให้กระแสไฟฟ้าไหลที่แรงดันไฟฟ้าสูง ซึ่งจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากขั้วลบไปหาบวก แล้วจึงหยุดการจ่ายกระแสไฟฟ้าสลับกันเป็นวัฏจักรที่มีความถี่สูง (การปล่อยกระแสเรียกว่าเวลาเปิด และการหยุดปล่อยกระแสเรียกว่าเวลาปิดมีหน่วยเป็นไมโครวินาที [8]) เกิดเป็นพลังงานความร้อนเข้าหลอมละลายผิวงาน โดยหลังจากสารไดอิเล็กตริกเข้าไปจัดเศษนั้นร่องรอยของการกัดกร่อนที่หลงเหลือจะกลายเป็นลักษณะของผิวชิ้นงาน กระบวนการดังกล่าวนี้จะวัดประสิทธิภาพการทำงานจากการสึกกร่อนของชิ้นงานอยู่ในรูปของอัตราการกัดเนื้องาน และประเมินการสึกกร่อนของอิเล็กโตรดอยู่ในรูปของอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด ตลอดจน

ประเมินลักษณะคุณภาพผิวงานที่เกิดการสปาร์กในรูปของความหนาผิวเฉลี่ย [3-5] โดยปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดความร้อนในการกัดอาร์กด้วยความร้อนจากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าตัวแปรต้นที่มีผลประกอบด้วย สภาพชั่วไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์ [2] กระแส (Current) เวลาเปิด (On-Time) และความถี่ในการสปาร์ก (Frequency) [4,5]

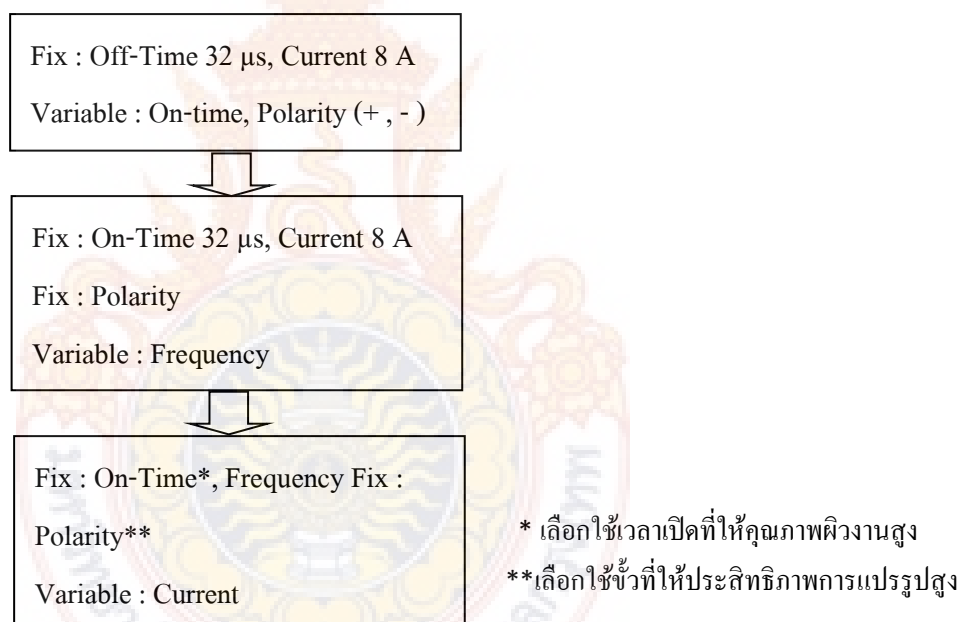


บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการแปรรูปวัสดุชิ้นงานโดยใช้วัสดุอิเล็กโทรดทองแดงโดยการปรับพารามิเตอร์ (On-time, Polarity, Frequency, Current) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการแปรรูป และคุณภาพผิวงานซึ่งจากการศึกษาทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง พบว่าประสิทธิภาพการแปรรูปของกระบวนการกัดอาร์กด้วยไฟฟ้าจะประเมินจาก อัตราการขจัดเนื้องาน (Material Removal Rate : MRR) และประเมินการสึกหรอของอิเล็กโทรดอยู่ในรูปของอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (Electrode Wear Ratio : EWR) ตลอดจนวัดคุณภาพผิวงาน (Surface Quality : SQ) ในรูปของความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) โดยมีแผนการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนการทดลอง

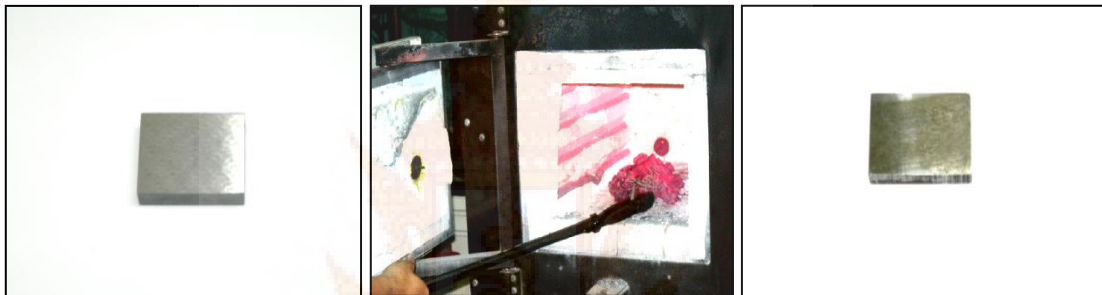
3.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

จากการศึกษางานวิจัยที่มีความเกี่ยวข้องและทำการทดลองเบื้องต้นแล้วพบว่า กระบวนการกัดอาร์กด้วยไฟฟ้าเป็นกระบวนการที่เกิดจากการควบคุมให้เกิดปฏิกิริยาความร้อนซึ่งมีค่าพารามิเตอร์จำนวนมาก แต่พารามิเตอร์หลักที่มีผลต่อประสิทธิภาพการขึ้นรูป [7] ได้แก่ พารามิเตอร์ของ ขั้วไฟฟ้า (Polarity) เวลาเปิด (On-time) ความถี่ในการสปาร์ค (Frequency) และกระแสไฟฟ้า (Current) เนื่องจากพารามิเตอร์ดังกล่าวเป็นตัวแปรพื้นฐานที่ส่งผลกระทบต่อสถานะการทำงานใน

กระบวนการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า โดยจะทำการศึกษาประสิทธิภาพการแปรรูปจากอัตราจัดเนื้องาน และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด ตลอดจนศึกษาคุณภาพผิวงานในรูปของค่าความหยาบผิว โดยใช้วัสดุชิ้นงานทดสอบเป็นเหล็กกล้าสำหรับผลิตแม่พิมพ์พลาสติก AISI P20 ผ่านกระบวนการชุบแข็ง และวัสดุอิเล็กโตรดเป็นทองแดง

3.2.1 เตรียมชิ้นงานทดสอบ

เตรียมชิ้นงานทดสอบเหล็กกล้า AISI P20 โดยการตัดแบ่งวัสดุชิ้นงานให้มีขนาดความกว้าง 30 มิลลิเมตร ยาว 35 มิลลิเมตร หนา 10 มิลลิเมตร ซึ่งผ่านกระบวนการเจียรระไนราบ แล้วทำการชุบแข็งโดยทำการชุบด้วยน้ำมันอุณหภูมิที่ใช้ 850 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 3.2 โดยค่าความแข็งหลังจากชุบแข็งอยู่ที่ 656 HV เมื่อวัสดุที่ใช้ในการทดลองผ่านกระบวนการชุบแข็งจะทำความสะอาดและปรับแต่งผิวโดยการขัดด้วยกระดาษทรายให้มีพื้นผิวที่มันเงา



(ก) ชิ้นงานผ่านการเจียรระไนปรับผิว (ข) ชุบแข็งชิ้นงาน (ค) ชิ้นงานหลังขัดกระดาษทราย

รูปที่ 3.2 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

3.2.2 เตรียมวัสดุอิเล็กโตรดทองแดง

เตรียมวัสดุอิเล็กโตรดทองแดงโดยทำการกลึงปอกและปาดหน้าให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ยาว 60 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องกลึง CNC Turning เพื่อให้อิเล็กโตรดมีความหยาบผิวเฉลี่ยใกล้เคียงกัน (พารามิเตอร์ในการกลึงเป็นค่าเดียวกันทุกชิ้นอิเล็กโตรด) ดังแสดงในรูปที่ 3.3



(ก) ทองแดงแท่งต้น (ข) กลึงปอกและปาดหน้า (ค) อิเล็กโตรดทองแดง

รูปที่ 3.3 กระบวนการเตรียมอิเล็กโตรดทองแดงชนิด

3.2.3 กำหนดค่าปัจจัยประสิทธิภาพโดยปรับเวลาเปิด (On-time)

กำหนดค่าปัจจัยประสิทธิภาพโดยปรับเวลาเปิด จากสมการที่ 1 ซึ่งค่าปัจจัยประสิทธิภาพในที่นี้หมายถึงประสิทธิภาพการทำงานในหนึ่งวัฏจักรของการสปาร์ก

$$\text{Duty Cycle} = \left(\frac{\text{On - Time}}{\text{Total Cycle Time}} \right) \times 100(\%) \quad (1)$$

โดยกำหนดเวลาปิดคงที่ 32 ไมโครวินาที และปรับเวลาเปิดเพื่อกำหนดระดับประสิทธิภาพการทำงานดังแสดงในตารางที่ 3.1 และกำหนดตัวแปรคงที่ดังตารางที่ 3.2 และทดลองปรับขั้วอิเล็กโตรด

ตารางที่ 3.1 ค่าปัจจัยประสิทธิภาพโดยปรับเวลาเปิด (On-time)

ลำดับ	เวลาเปิด (μs)	เวลาปิด (μs)	ปัจจัยประสิทธิภาพ(%)	ความถี่ (Cycle/sec)
1	2	32	6	29412
2	10	32	24	23810
3	20	32	38	19230
4	32	32	50	15625
5	50	32	61	12195
6	100	32	76	7575
7	200	32	86	4310
8	510	32	94	1845

ตารางที่ 3.2 ค่าตัวแปรคงที่ในการทดลองปรับเวลาเปิด

ลำดับ	พารามิเตอร์	รายละเอียด
1	ขั้วอิเล็กโตรด (Polarity Electrode)	+, -
2	ความต่างศักย์ (V)	150
3	กระแส (A)	8
4	ระยะห่างของการสปาร์ก (Gap)	10
5	เวลาหน่วงในการสปาร์ก (s)	0.5
6	เวลาชกอิเล็กโตรด (s)	0.67
7	ของเหลว (Dielectric)	Spark Erosion 102(HF)

3.2.3 กำหนดค่าความถี่ในการสปาร์ก (Frequency)

กำหนดค่าความถี่ในการสปาร์กโดยคงที่เวลาเปิดที่ 32 ไมโครวินาที และปรับเปลี่ยนเวลาเปิดเพื่อให้เกิดเป็นระดับความถี่ที่ต่างกันดังแสดงในตารางที่ 3.3 และคงที่ตัวแปรการทดลองดังตาราง

ที่ 3.2 ทั้งนี้ในการทดลองค่าความถี่ในการสปาร์คนั้นจะกำหนดชั่ววูเล็ทโตรดเป็นทั้งชั่วบวก และชั่วลบ โดยใช้สมการคำนวณความถี่จากสมการที่ 3

$$\text{Frequency} = \frac{1}{\text{Total Cycle Time}} \quad (3)$$

ตารางที่ 3.3 ค่าความถี่ในการสปาร์ก (Frequency)

ลำดับ	เวลาเปิด (μs)	เวลาปิด (μs)	ปัจจัยประสิทธิภาพ(%)	ความถี่(Cycle/sec)
1	32	510	6	1845
2	32	100	24	7575
3	32	50	39	12195
4	32	32	50	15625
5	32	20	62	19230
6	32	10	76	23810
7	32	4	89	27777
8	32	2	94	29412

3.2.4 ทำการทดลอง

ใช้เครื่องกัดอาร์กด้วยไฟฟ้ายี่ห้อ Aristech รุ่น 3D-CNC EDM ดังรูปที่ 3.4 ทำการทดลองกัดอาร์กวัสดุชิ้นงานเป็นหลุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ลึก 0.5 มิลลิเมตร โดยปรับเวลาเปิดตามที่กำหนดไว้ดังตารางที่ 3.1 และ 3.2 แล้วจึงทำการทดลองความถี่ในการสปาร์กตามตารางที่ 3.2 และ 3.3 หลังจากทำการทดลองเสร็จแล้วจะต้องบันทึกข้อมูลดังต่อไปนี้



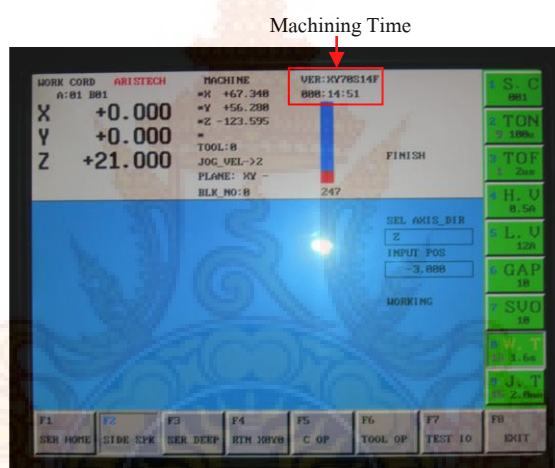
รูปที่ 3.4 เครื่องกัดเซาะโลหะด้วยกระแสไฟฟ้ายี่ห้อ Aristech รุ่น 3D-CNC EDM

ก. การบันทึกอัตราการขจัดเนื้องาน(MRR)

การบันทึกอัตราการขจัดเนื้องาน จากสมการที่ 4 ซึ่งเกิดจากการปริมาตรของวัสดุชิ้นงานที่ถูกขจัดออกต่อหน่วยเวลาที่ใช้

$$MRR = \frac{\text{ปริมาตรเนื้องานที่สึกหรอไป (g หรือ mm}^3\text{)}}{\text{เวลาที่ใช้ (min)}} \quad (4)$$

ในการทดลองนี้ทำการเก็บค่าข้อมูลความโตของอิเล็กโตรด (Diameter Electrode) และความลึกที่เกิดขึ้นบนผิววัสดุชิ้นงานด้วยไมโครมิเตอร์ค่าความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร (ความลึกที่เกิดขึ้นบนผิวงานเท่ากับความหนาชิ้นงานก่อนสปาร์คลบด้วยความหนาชิ้นงานหลังสปาร์ค) พร้อมทั้งบันทึกเวลารวมในการสปาร์ค (Machining Time) จากหน้าจอแสดงผลดังรูปที่ 3.5 แล้วจึงนำค่ามาคำนวณตามสมการ 2.4 จะได้เป็นค่าอัตราการขจัดเนื้องาน



รูปที่ 3.5 หน้าจอแสดงเวลารวมในการทำงาน (Machining Time)

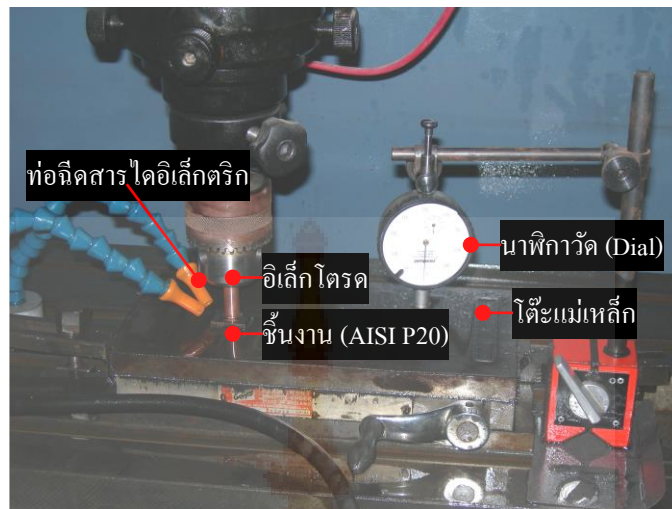
ข. การบันทึกอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด (EWR)

การบันทึกอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด จากสมการที่ 2.5 เป็นการวัดการสึกของขั้วอิเล็กโตรดต่อความลึกที่เกิดขึ้นบนวัสดุชิ้นงานที่ถูกขจัดออก

$$\text{อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด (EWR)} = \frac{\text{ปริมาตรขั้วไฟฟ้าที่สึกหรอไป (g หรือ mm}^3\text{)} \times 100}{\text{ความลึกของเนื้องานที่ถูกขจัดออก (mm)}} \quad (5)$$

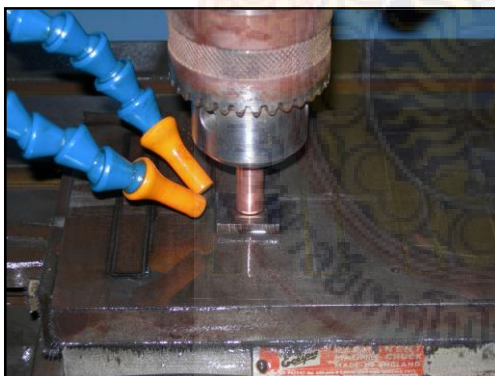
ในที่นี้การวัดระยะการสึกหรอของวัสดุอิเล็กโตรดโดยใช้นาฬิกาวัด (Dial) ค่าความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร ระยะวัด 10 มิลลิเมตร และมีขั้นตอนการวัดระยะสึกของอิเล็กโตรดกระทำตามขั้นตอนดังนี้

1. ติดตั้งชิ้นงานและอิเล็กโตรดพร้อมทั้งนาฬิกาวัด (Dial) ลงบนโต๊ะงาน ซึ่งในที่นี้จะใช้การจัดยึดชิ้นงานด้วยโต๊ะแม่เหล็ก และจับยึดนาฬิกาวัดด้วยแม่เหล็กดังแสดงการติดตั้งในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การจับยึดชิ้นงานและติดตั้งอุปกรณ์วัดระยะลึกหรือของอิเล็กโตรด

2. ทำการสร้างจุดอ้างอิงระหว่างผิววัสดุชิ้นงานกับผิววัสดุอิเล็กโตรด โดยกำหนดให้ผิวสัมผัสระหว่างอิเล็กโตรดและชิ้นงานมีค่าเป็นจุดศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 3.7 โดยเมื่อสร้างจุดศูนย์แล้วจะยกอิเล็กโตรดจากผิวสัมผัสขึ้นมา 1 มิลลิเมตรเพื่อสร้างเป็นจุดอ้างอิงในการสปาร์ก (หากอิเล็กโตรดสัมผัสกับผิววัสดุชิ้นงานจะทำให้ไม่สามารถสปาร์กเนื่องจากกระแสไหลครบวงจรจึงไม่สามารถสร้างช่องว่างระหว่างผิวชิ้นงานกับผิววัสดุชิ้นงานในการสปาร์ก)



(ก) จุดอ้างอิงในการสปาร์ก



(ข) หน้าจอแสดงจุดอ้างอิงในการสปาร์ก

รูปที่ 3.7 จุดอ้างอิงผิวงานในการสปาร์ก

3. ทำการสร้างจุดอ้างอิงผิวอิเล็กโตรดกับนาฬิกาวัด โดยกำหนดให้ผิวสัมผัสระหว่างอิเล็กโตรดกับค่าแสดงผลบนหน้าปัดนาฬิกาวัดที่ค่า 5.00 มิลลิเมตร มีระยะลึกของอิเล็กโตรดก่อนการสปาร์กเท่ากับศูนย์ ซึ่งจะได้พิกัดแสดงค่าศูนย์ของอิเล็กโตรดจากหน้าจอ ดังแสดงในรูปที่ 3.8



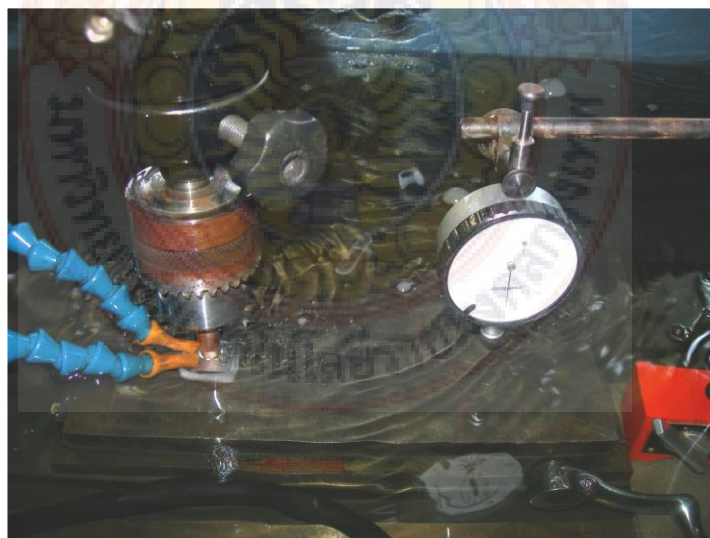
(ก) หน้าปัดนาฬิกาวัดที่ค่า 5.00 มิลลิเมตร



(ข) พิกัดแสดงค่าศูนย์กลางของอิเล็กโตรดจากหน้าจอ

รูปที่ 3.8 พิกัดจุดศูนย์กลางของอิเล็กโตรดก่อนการสปาร์ค

4. ย้ายตำแหน่งอิเล็กโตรดมายังจุดอ้างอิงระหว่างผิวชิ้นงานกับผิวอิเล็กโตรด ที่หาไว้ในขั้นตอนที่ 2 แล้วทำการอาร์กขึ้นงานดังรูปที่ 3.9 จนเสร็จสิ้นกระบวนการ จึงย้ายตำแหน่งของอิเล็กโตรดไปยังจุดพิกัดศูนย์กลางของอิเล็กโตรดก่อนการสปาร์ค โดยอ่านค่าจากหน้าจอที่หาไว้ในขั้นตอนที่ 3 ซึ่งอิเล็กโตรดจะกดทับลงบนนาฬิกา วัด ตำแหน่งเดิมก่อนการสปาร์ค เพราะฉะนั้นค่าที่อ่านได้จากหน้าปัดนาฬิกาจะเท่ากับระยะลึกของอิเล็กโตรดดังแสดงในรูปที่ 3.10 โดยหากเพิ่มนาฬิกาวัดเปลี่ยนแปลงไปจากตำแหน่งเดิมในทิศทางตามเข็มนาฬิกาแสดงว่าอิเล็กโตรดมีความยาวเพิ่มขึ้น แต่ถ้าหากเข็มนาฬิกาวัดหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาแสดงว่าอิเล็กโตรดสั้นลง ในกระบวนการวัดระยะลึกของอิเล็กโตรดห้ามเคลื่อนย้ายนาฬิกาวัดโดยเด็ดขาด



รูปที่ 3.9 การสปาร์คขึ้นงานเหล็กกล้า AISI P20



(ก) พิกัดแสดงค่าศูนย์ของอิเล็กทรอนิกส์ (ข) ค่าที่อ่านได้จากหน้าปัดนาฬิกาวัดเท่ากับ 0.01 มม.

รูปที่ 3.10 ค่าการสีกหระของอิเล็กทรอนิกส์ที่อ่านจากนาฬิกาวัดที่พิกัดจุดศูนย์หลังการสปาร์ค

ก. การบันทึกความหยาบผิวเฉลี่ย(Ra)

การบันทึกความหยาบผิวเฉลี่ยจากสภาพพื้นผิวที่เกิดจากการอาร์กจะเป็นแอ่งเล็กๆ จำนวนมาก ซึ่งหลังจากทำการอาร์กเสร็จสิ้นแล้ว จะนำชิ้นงานมาวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของผิวงาน ด้วยเครื่องวัดความหยาบผิวยี่ห้อ Mahr รุ่น PS1 ดังแสดงในรูปที่ 3.11 โดยทำการวัดความหยาบผิว ฟังชั่น Ra ซึ่งใช้จำนวนช่วงการวัด 5 ช่วง แต่ละการวัดยาว 0.8 มิลลิเมตร โดยมีขั้นตอนในการเตรียม พื้นผิววัสดุชิ้นงานด้วยการล้างคราบสารไดออกไซด์ทริกด้วยแอลกอฮอล์ และทำการเป่าลมร้อยเพื่อไล่ ความชื้นแล้วจึงวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ย โดยทำการวัดจำนวน 5 ครั้งแล้วจึงนำมาคิดค่าเฉลี่ย



รูปที่ 3.11 เครื่องวัดความหยาบผิว Marh PS 1

3.2.5 กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองกระแส (Current)

การกำหนดค่ากระแสที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวเฉลี่ยโดยเลือกจากการทดลองของการ ปรับค่าปัจจัยประสิทธิภาพพบว่า ที่ปัจจัยประสิทธิภาพโดยปรับเวลาเปิดที่ 6 เปอร์เซนต์ (เวลาเปิด 2 ไมโครวินาที เวลาปิด 32 ไมโครวินาที) ให้ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยต่ำสุด จึงใช้เป็นค่าคงที่ในการ ทดสอบกระแสที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความหยาบผิว โดยเปลี่ยนแปลงกระแส (Current) ที่ 3,6,9,12,15 และ 18 แอมแปร์ และมีตัวแปรดังตารางที่ 3.5 แล้วทำการทดลองและเก็บผลการ

ตารางที่ 3.4 ค่าตัวแปรในการทดลองกระแส (Current)

ลำดับ	พารามิเตอร์	รายละเอียด
1	เวลาเปิด On – time (μs)	2
2	เวลาปิด Off – time (μs)	32
3	ขั้วอิเล็กโตรด (Polarity Electrode)	+
4	กระแส (A)	3, 6, 9, 12, 15, 18
5	ความต่างศักย์ (V)	150
6	เวลาหน่วงในการสปาร์ก (s)	0.5
7	เวลาขกอิเล็กโตรด (s)	0.67
8	ของเหลว (Dielectric)	Spark Erosion 102(HF)

3.3 สรุป

การทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกัดด้วยไฟฟ้าที่มีผลต่อประสิทธิภาพการแปรรูปตลอดจนคุณภาพผิวงานบนวัสดุเหล็กกล้าแม่พิมพ์พลาสติก AISI P20 ที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งและอบคลายความเค้น ด้วยอิเล็กโตรดทองแดง โดยทำการทดลองแบ่งตามลำดับคือ

1. ทำการปรับเวลาเปิด (On-Time*) โดยคงที่กระแสที่ 8 แอมแปร์ตามกฎกระแสสูงสุด 65 แอมแปร์ต่อตารางนิ้ว “Rule-of-thumb” [2] เวลาปิดที่ 32 ไมโครวินาที เพื่อให้เกิดค่าระดับปัจจัยประสิทธิภาพการทำงาน (Duty Factor) ที่ต่างกัน ซึ่งในขั้นตอนนี้จะใช้ขั้ววัสดุอิเล็กโตรดทั้งบวกและลบ เพื่อเลือกใช้ขั้วที่ดีไปทำการทดสอบระดับกระแส ในที่นี้ขั้วที่ดีหมายถึงให้อัตราการขจัดเนื้องานสูง (High MRR) และมีอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดต่ำ (Low EWR) ตลอดจนมีคุณภาพผิวงานที่เรียกว่าความหยาบผิวเฉลี่ยต่ำ (Low Ra)

2. ทำการปรับความถี่ (Frequency*) โดยคงที่กระแสที่ 8 แอมแปร์ เวลาเปิด 32 ไมโครวินาที แล้วทำการปรับเวลาปิด (Off-time*) เพื่อให้เกิดระดับความถี่ที่แตกต่างกันซึ่งในขั้นตอนนี้จะใช้ขั้ววัสดุอิเล็กโตรดทั้งบวกและลบ เพื่อเลือกใช้ขั้วที่ดีไปทำการทดสอบระดับกระแส

3. ทำการปรับระดับกระแส (Current) เพื่อศึกษาถึงผลกระทบที่มีต่อประสิทธิภาพการทำงานและคุณภาพผิวงาน โดยในขั้นตอนนี้จะเลือกใช้เวลาเปิดคงที่ 2 ไมโครวินาที และเวลาปิด 32 วินาที ขั้วอิเล็กโตรดเป็นบวก แล้วจึงปรับค่ากระแสให้มีระดับค่าต่างกัน

*เวลาเปิด (On-time) และเวลาปิด (Off-time) มีความสัมพันธ์ที่ทำให้เกิดปัจจัยประสิทธิภาพการทำงาน (Duty Factor) ที่แสดงอยู่ในรูปของร้อยละของเวลาเปิดต่อเวลารวมในหนึ่งวัฏจักรการทำงาน (หนึ่งวัฏจักรการทำงาน Cycle = On-time + Off-time) และเมื่อนับจำนวนของวัฏจักรการทำงานในหนึ่งวินาที (sec) จะกลายเป็นความถี่ (Frequency) ในการสปาร์ก

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

ผลการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการแปรรูปของวัสดุอิเล็กโทรดทองแดง เพื่อศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการแปรรูปจากการประเมินค่าอัตราการขจัดเนื้องาน (Material Removal Rate : MRR) และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (Electrode Wear Ratio : EWR) ตลอดจนคุณภาพของผิงาน (Surface Quality : SQ) อยู่ในรูปของความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra)

4.1 ผลการทดลอง

4.1.1 ผลการทดลองปรับเวลาเปิด (On-time)

การทดลองปรับค่าปัจจัยประสิทธิภาพจากเวลาเปิดเป็นการทดสอบช่วงเวลาที่ปล่อยให้เกิดการถ่ายเทประจุระหว่างขั้วอิเล็กโทรดและขั้วชิ้นงาน เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแปรรูป และผลกระทบของกระบวนการอาร์กด้วยไฟฟ้าที่มีต่อคุณภาพผิงานจากวัสดุอิเล็กโทรดทองแดงแท่งตัน โดยควบคุมพารามิเตอร์คงที่ตามตารางที่ 3.2 และปรับพารามิเตอร์ตามตารางที่ 3.1 โดยสามารถคำนวณผลการทดลองที่มีต่อประสิทธิภาพการแปรรูปจากค่า อัตราขจัดเนื้องาน(MRR) อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR) และผลกระทบที่มีต่อคุณภาพผิงานอยู่ในรูปของความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ผลการทดลองปรับเวลาเปิดโดยมีขั้วอิเล็กโทรดเป็นบวก และตารางที่ 4.2 ผลการทดลองปรับเวลาเปิดโดยมีขั้วอิเล็กโทรดเป็นลบ

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองเวลาเปิด (On-Time) ขั้วอิเล็กโทรดเป็นบวก

ลำดับ ที่	เวลาเปิด (μ s)	เวลาปิด (μ s)	ปัจจัย ประสิทธิภาพ(%)	ความถี่ (Cycle/sec)	MRR (mm^3/min)	EWR (%)	Ra (μm)
1	2	32	6	29412	0.21	35.14	2.04
2	10	32	24	23810	1.26	14.16	3.04
3	20	32	38	19230	3.57	0.10	3.99
4	32	32	50	15625	5.11	0.20	4.95
5	50	32	61	12195	6.05	0.40	5.38
6	100	32	76	7575	6.57	0.81	5.91
7	200	32	86	4310	4.84	1.42	5.18
8	510	32	94	1845	2.26	4.82	4.32

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองเวลาเปิด (On-Time) ขั้วอิเล็กโตรดเป็นลบ

ลำดับ ที่	เวลาเปิด (μ s)	เวลาปิด (μ s)	ปัจจัย ประสิทธิภาพ(%)	ความถี่ (Cycle/sec)	MRR (mm^3/min)	EWR (%)	Ra (μm)
1	2	32	6	29412	0.08	27.88	1.58
2	10	32	24	23810	0.16	30.89	1.62
3	20	32	38	19230	0.12	16.28	3.18
4	32	32	50	15625	0.1	11.11	3.17
5	50	32	61	12195	0.12	8.7	3.67
6	100	32	76	7575	0.18	10.13	3.13
7	200	32	86	4310	0.77	11.11	3.51
8	510	32	94	1845	0.98	9.17	4.66

4.1.2 ผลการทดลองปรับค่าความถี่ของการอาร์ก (Frequency)

การทดลองปรับพารามิเตอร์ความถี่การอาร์กเป็นการทดสอบจำนวนวัฏจักรการอาร์กซึ่งทำให้เกิดการอาร์กต่อหน่วยเวลาหนึ่งวินาที โดยในการทดลองนี้จะคงที่เวลาเปิด 32 ไมโครวินาที และควบคุมพารามิเตอร์คงที่ตามตารางที่ 3.2 และปรับพารามิเตอร์ตามตารางที่ 3.3 ซึ่งสามารถสรุปผลของประสิทธิภาพการแปรรูปจากค่า อัตราการจัดเนื้องาน(MRR) อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด (EWR) และผลกระทบที่มีต่อคุณภาพผิวงานในรูปของความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ดังแสดงผลในตารางที่ 4.3 สำหรับอิเล็กโตรดขั้วบวก และตารางที่ 4.4 สำหรับอิเล็กโตรดขั้วลบ

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองปรับค่าความถี่ของการอาร์ก (Frequency) อิเล็กโตรดเป็นบวก

ลำดับ ที่	เวลาเปิด (μ s)	เวลาปิด (μ s)	ปัจจัย ประสิทธิภาพ(%)	ความถี่ (Cycle/sec)	MRR (mm^3/min)	EWR (%)	Ra (μm)
1	32	510	6	1845	0.03	6.41	4.87
2	32	100	24	7575	0.87	5.04	4.64
3	32	50	39	12195	1.75	4.17	4.63
4	32	32	50	15625	2.82	4.17	4.78
5	32	20	62	19230	3.31	4.04	4.86
6	32	10	76	23810	4.49	4.04	4.91
7	32	4	89	27777	4.94	4.17	4.77
8	32	2	94	29412	5.63	4.88	4.88

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองปรับค่าความถี่ของการอาร์ก (Frequency) อิเล็กโตรดเป็นลบ

ลำดับ ที่	เวลาเปิด (μ s)	เวลาปิด (μ s)	ปัจจัย ประสิทธิภาพ(%)	ความถี่ (Cycle/sec)	MRR (mm^3/min)	EWR (%)	Ra (μm)
1	32	510	6	1845	0.06	14.00	3.29
2	32	100	24	7575	0.14	12.44	3.64
3	32	50	39	12195	0.53	13.17	3.36
4	32	32	50	15625	0.92	12.66	3.37
5	32	20	62	19230	1.15	14.04	3.68
6	32	10	76	23810	1.28	14.50	3.31
7	32	4	89	27777	1.42	14.17	3.57
8	32	2	94	29412	1.57	15.00	3.69

4.1.3 ผลการทดลองปรับค่ากระแส (Current)

การทดลองปรับค่ากระแสเป็นการทดสอบพารามิเตอร์ที่มีผลโดยตรงต่อต้นทุนกำเนิดพลังงานความร้อนของกระบวนการอาร์กด้วยไฟฟ้าโดยคงที่เวลาเปิดที่ 2 ไมโครวินาที และเวลาปิด 32 ไมโครวินาที โดยมีขั้วอิเล็กโตรดเป็นบวก เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานตลอดจนผลกระทบของกระบวนการอาร์กด้วยไฟฟ้าที่มีผลต่อคุณภาพผิวงานจากวัสดุอิเล็กโตรดทองแดง โดยควบคุมพารามิเตอร์คงที่ตามตารางที่ 3.4 และปรับพารามิเตอร์กระแส 6 ระดับคือ 3, 6, 9, 12, 15, และ 18 แอมแปร์ ซึ่งสามารถสรุปผลของประสิทธิภาพการแปรรูปจากค่า อัตราการจัดเนื้องาน (MRR) อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด (EWR) และผลกระทบที่มีต่อคุณภาพผิวงานอยู่ในรูปของความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ดัง ตารางที่ 4.5

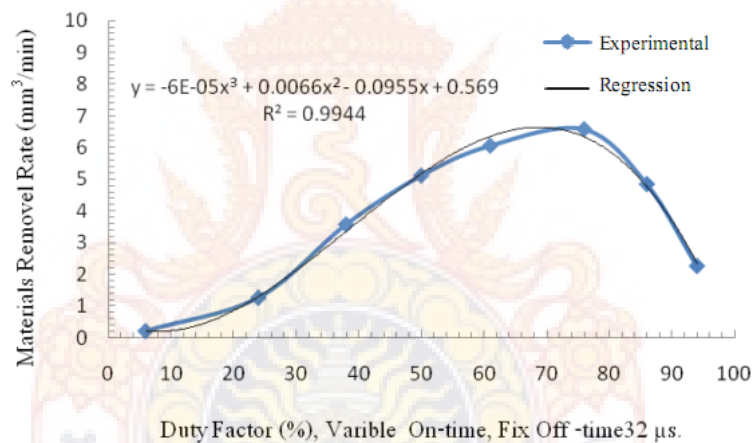
ตารางที่ 4.5 ปรับค่ากระแส (Current)

ลำดับที่	กระแส (A)	MRR (mm^3/min)	EWR (%)	Ra (μm)
1	3	0.06	33.33	1.31
2	6	0.14	47.06	1.88
3	9	0.22	50.11	2.04
4	12	0.26	53.33	2.17
5	15	0.27	72.41	2.36
6	18	0.19	100.00	2.49

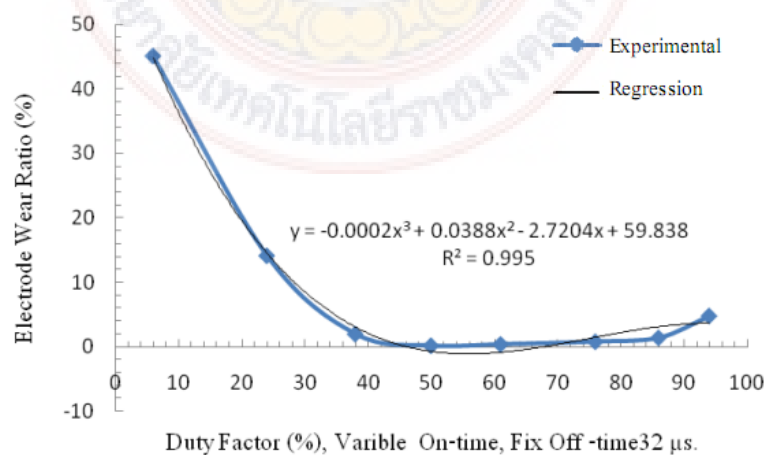
4.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง

4.2.1 วิเคราะห์ผลการทดลองปรับเวลาเปิด (On-time) อิเล็กโตรดขั้วบวก

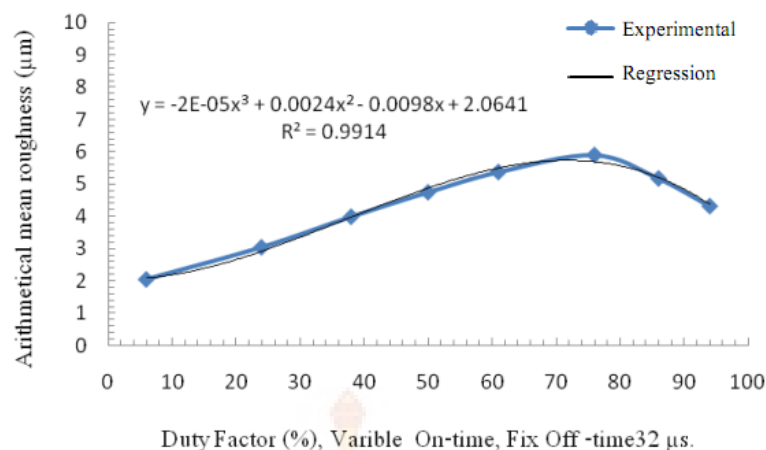
ผลการทดลองปรับระดับประสิทธิภาพการทำงานจากการปรับเวลาเปิดเพื่อศึกษาอิทธิพลที่มีต่อประสิทธิภาพการแปรรูปชิ้นงานพบว่า เวลาเปิดที่มากขึ้นมีผลทำให้อัตราการจัดเนื้องานเพิ่มขึ้นถึงระดับหนึ่งแล้วลดลงซึ่งมีลักษณะเป็นแบบโพลีโนเมียล ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งสาเหตุที่ทำให้ให้อัตราการจัดเนื้องานลดลงเกิดจากเวลาเปิดที่ยาวนานทำให้เกิดพลังงานความร้อนสะสมบนผิวงานจนกลายเป็นการหลอมละลายและแข็งตัวใหม่ (Recasting) [2,3,9] ทำให้เนื้อโลหะบางส่วนที่ถูกขจัดออกกลับเข้ามาพร้อมกับผิวงานใหม่ขณะแข็งตัว ทั้งนี้พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นยังทำให้เกิดการแตกตัวของสารไฮโดรคาร์บอน เป็นไฮโดรเจนที่มีประจุบวก และคาร์บอนที่มีประจุลบวิ่งเข้ายึดเกาะผิววัสดุอิเล็กโตรดทองแดงที่มีสภาพเป็นขั้วบวก ทำให้อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดลดลงเมื่อเวลาเปิดเพิ่มมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.2 ในส่วนของคุณภาพผิวงานในรูปของความหยาบผิวเฉลี่ยนั้นจะเพิ่มขึ้นและลดลงแบบโพลีโนเมียลที่แปรผันตามอัตราการจัดเนื้องานดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.1 อัตราการจัดเนื้องานจากการปรับเวลาเปิดโดยใช้อิเล็กโตรดขั้วบวก

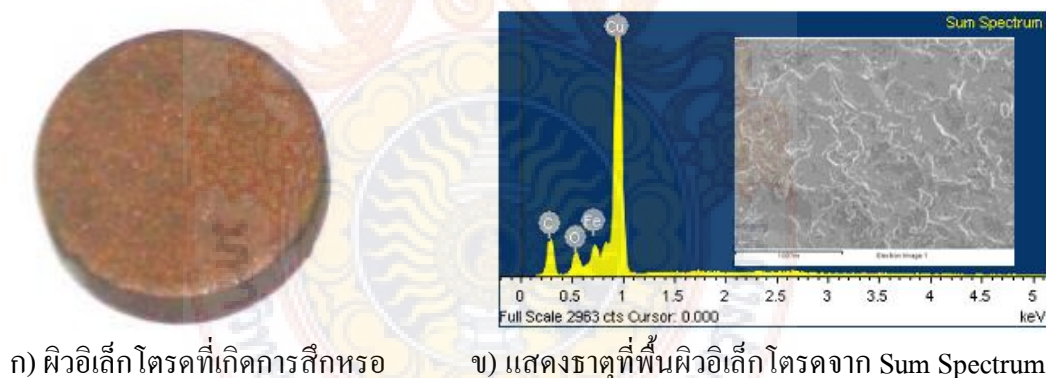


รูปที่ 4.2 อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดจากการปรับเวลาเปิดโดยใช้อิเล็กโตรดขั้วบวก



รูปที่ 4.3 ความหยาบผิวเฉลี่ยจากการปรับเวลาเปิดโดยใช้ไอเล็กโตรดขั้วบวก

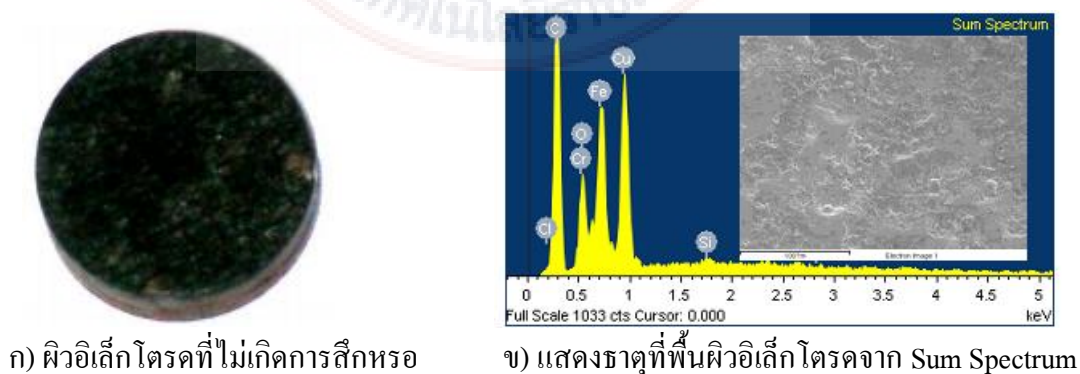
จากประสิทธิภาพการแปรรูปจะเห็นได้ชัดว่าอัตราการสึกหรอของไอเล็กโตรดนั้นจะลดลงในรูปแบบที่เรียกว่าสมการกำลัง โดยที่เวลาเปิดต่ำนั้นจะเกิดอัตราการสึกหรอที่สูง เมื่อเวลาเปิดสูงจะเกิดการสึกหรอต่ำ เป็นผลพวงมาจากการเกิดความร้อนในการอาร์กทำให้เกิดการแตกตัวของสารไดอิเล็กทริกที่เป็นไฮโดรคาร์บอน ออกเป็นไฮโดรเจนที่มีประจุบวก และคาร์บอนที่มีประจุลบวิ่งเข้ายึดเกาะผิววัสดุที่มีสภาพขั้วเป็นบวก ในที่นี้คือไอเล็กโตรด ดังแสดงให้เห็นลักษณะผิวไอเล็กโตรดและส่วนผสมของธาตุจากการยิงสเปกตรัมด้วยเครื่อง SEM ในรูปที่ 4.4 และ 4.5 และตารางที่ 4.6



ก) ผิวไอเล็กโตรดที่เกิดการสึกหรอ

ข) แสดงธาตุที่พื้นผิวไอเล็กโตรดจาก Sum Spectrum

รูปที่ 4.4 ไอเล็กโตรดที่ใช้ในการอาร์กแล้วเกิดการสึกหรอ



ก) ผิวไอเล็กโตรดที่ไม่เกิดการสึกหรอ

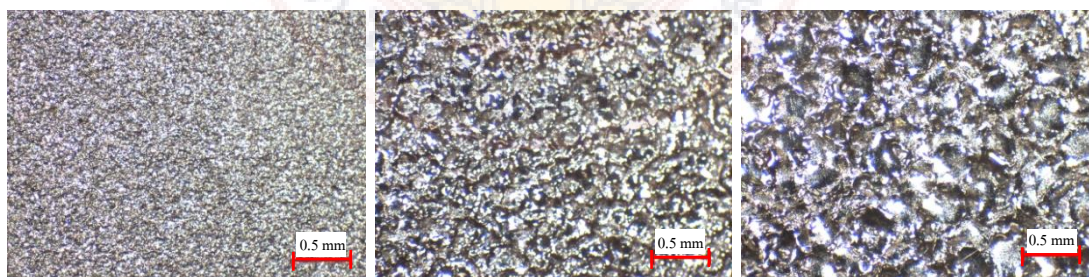
ข) แสดงธาตุที่พื้นผิวไอเล็กโตรดจาก Sum Spectrum

รูปที่ 4.5 ไอเล็กโตรดที่ใช้ในการอาร์กแล้วไม่เกิดการสึกหรอ

ตารางที่ 4.6 แสดงองค์ประกอบของธาตุบนพื้นผิวอิเล็กโตรดในรูปของร้อยละ

อิเล็กโตรดทองแดงก่อนสปาร์ก			อิเล็กโตรดทองแดงไม่เกิดชั้นเคลือบ			อิเล็กโตรดทองแดงเกิดชั้นเคลือบ		
Element	Weight%	Atomic%	Element	Weight%	Atomic%	Element	Weight%	Atomic%
C	4.32	18.42	C	20.55	52.78	C	39.63	69.26
O	1.84	5.91	O	5.55	10.70	O	9.61	12.60
Co	-0.11	-0.09	Fe	9.59	5.29	Si	0.27	0.20
Cu	93.95	75.77	Cu	64.32	31.22	Cl	0.27	0.16
						Cr	0.72	0.29
						Fe	24.91	9.36
						Cu	24.58	8.12

ในส่วนของคุณค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของชิ้นงานจะแปรผันตามอัตราการขจัดเนื้องาน โดยหากเวลาเปิดต่ำจะทำให้เกิดพลังงานความร้อนเพื่อช่วยในการแยกอนุภาคของวัสดุมีค่าต่ำ ส่งผลให้การอาร์กพิวงานเกิดในบริเวณที่เล็กและแคบ ทั้งนี้เมื่อเวลาเปิดสูงขึ้นจะทำให้พลังงานความร้อนที่เกิดจากการอาร์กในการแยกอนุภาคที่มีค่ามากขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการอาร์กในบริเวณที่กว้างและรุนแรง ซึ่งเป็นเหตุให้อัตราการขจัดเนื้องานมากขึ้น โดยมีลักษณะผิวงานที่เรียกว่าความหยาบผิวเฉลี่ยเป็นตัวบ่งบอกถึงความรุนแรงในการอาร์ก ทั้งนี้จากการทดลองจะเห็นได้ว่าอัตราการขจัดเนื้องานจะเพิ่มขึ้นถึงระดับหนึ่งแล้วจึงลดลงอันเนื่องมาจากระยะเวลาเปิดยาวนานทำให้เกิดพลังงานความร้อนจากการอาร์กมากเกินไปที่วัสดุชิ้นงานจะรับได้ จึงเกิดเป็นการหลอมละลายผิวงานในบริเวณกว้างแทนการอาร์ก ซึ่งเมื่อสิ้นสุดวัฏจักรการทำงานพื้นผิวที่หลอมละลายจะแข็งตัวใหม่ ซึ่งเราเรียกปฏิกิริยานี้ว่าวัฏจักรการ Recast ส่งผลให้เศษวัสดุบางส่วนที่ถูกขจัดออกกลับเข้ามารวมตัวกับพื้นผิวงาน ทำให้อัตราการขจัดเนื้องานและความหยาบผิวเฉลี่ยจึงลดต่ำลงดังแสดงลักษณะพื้นผิวในรูปที่ 4.6 และภาคขยายของพื้นผิวในรูปที่ 4.7

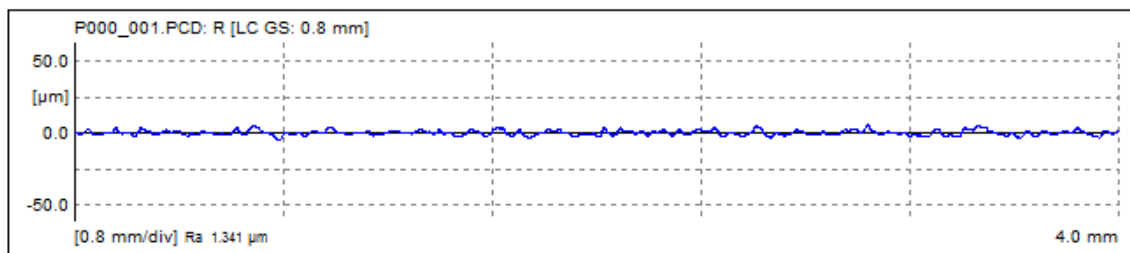


ก) เวลาเปิด 2 μ s, DF = 6%

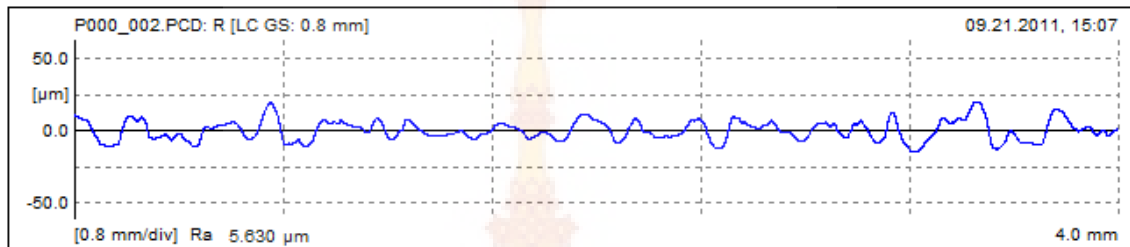
ข) เวลาเปิด 100 μ s, DF = 76%

ค) เวลาเปิด 510 μ s, DF = 94%

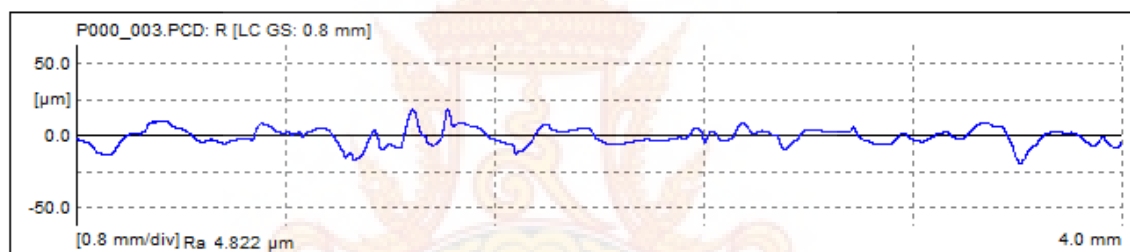
รูปที่ 4.6 ลักษณะพื้นผิวงานที่



ก) เวลาเปิด 2 μs , DF = 6%



ข) เวลาเปิด 100 μs , DF = 76%

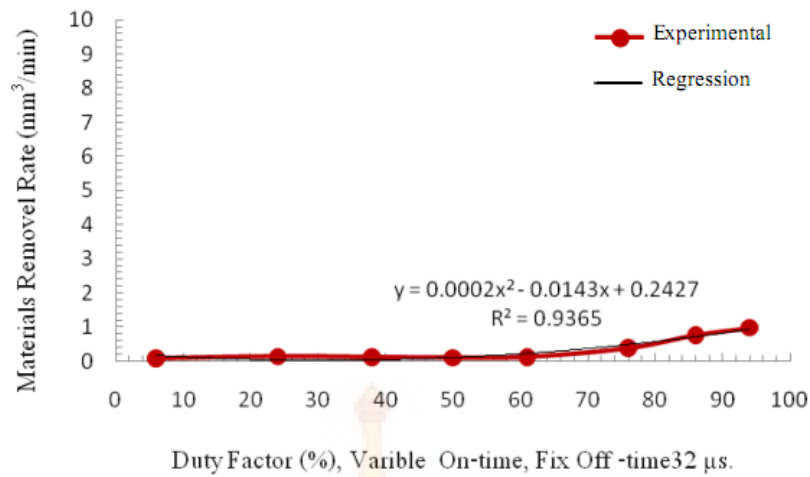


ค) เวลาเปิด 510 μs , DF = 94%

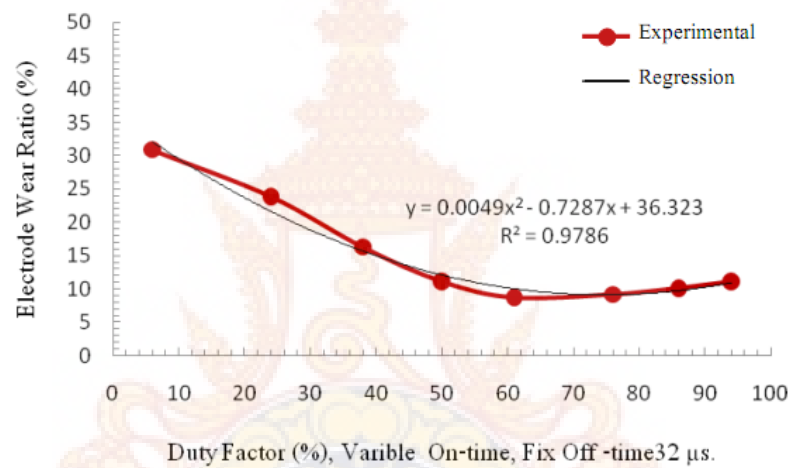
รูปที่ 4.7 ลักษณะ Profile

4.2.2 วิเคราะห์ผลการทดลองปรับเวลาเปิด (On-time) อิเล็กโตรดขั้วลบ

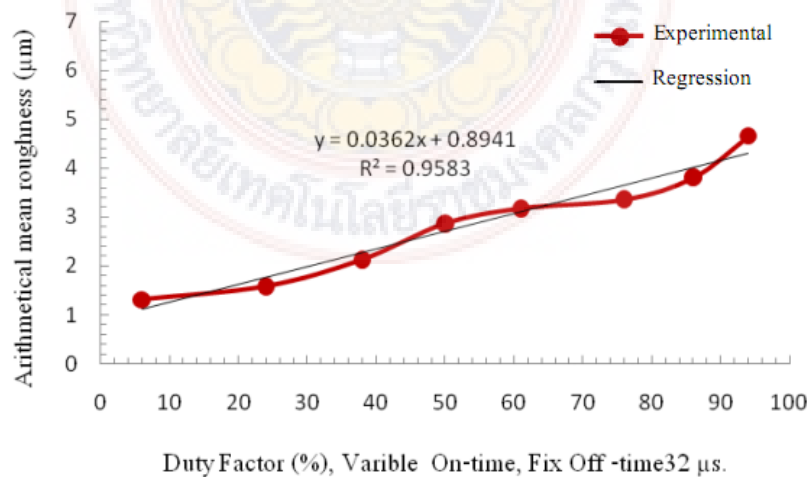
ผลการทดลองปรับระดับประสิทธิภาพการทำงานจากการปรับเวลาเปิดเพื่อศึกษาอิทธิพลที่มีต่อประสิทธิภาพการแปรรูปชิ้นงานพบว่า เวลาเปิดที่มากขึ้นมีผลทำให้อัตราการขจัดเนื้องานเพิ่มขึ้นซึ่งมีลักษณะเป็นแบบโพลีโนเมียล ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่งสาเหตุจากเวลาเปิดที่ยาวนานทำให้เกิดพลังงานความร้อนสะสมบนผิวงานจนกลายเป็นการหลอมละลายทำให้เนื้อโลหะถูกขจัดออก แต่ทั้งนี้อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดจะลดลงเมื่อเวลาเปิดเพิ่มมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.9 โดยจะส่งผลให้ความหนาผิวเฉลี่ยผิวงานเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นมีความชันคงที่ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ทั้งนี้ความหนาผิวเฉลี่ยผิวงานจะแปรผันตามอัตราการขจัดเนื้องาน



รูปที่ 4.8 อัตราการจัดเนื้องานจากการปรับเวลาเปิดโดยใช้อิเล็กโตรดขั้วลบ



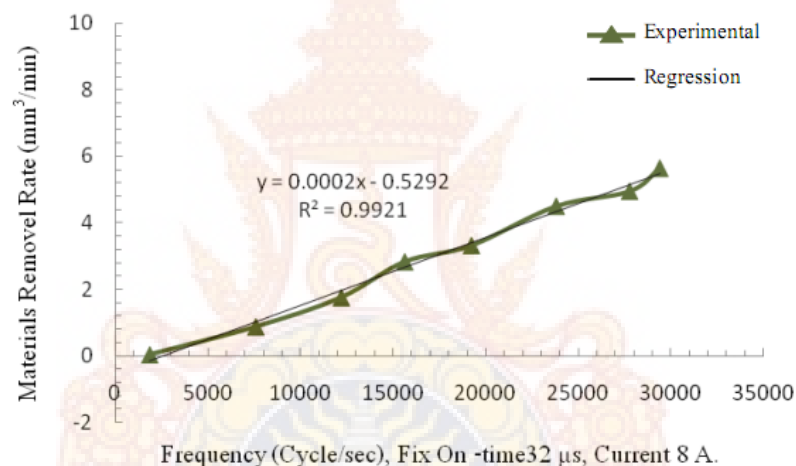
รูปที่ 4.9 อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดจากการปรับเวลาเปิดโดยใช้อิเล็กโตรดขั้วลบ



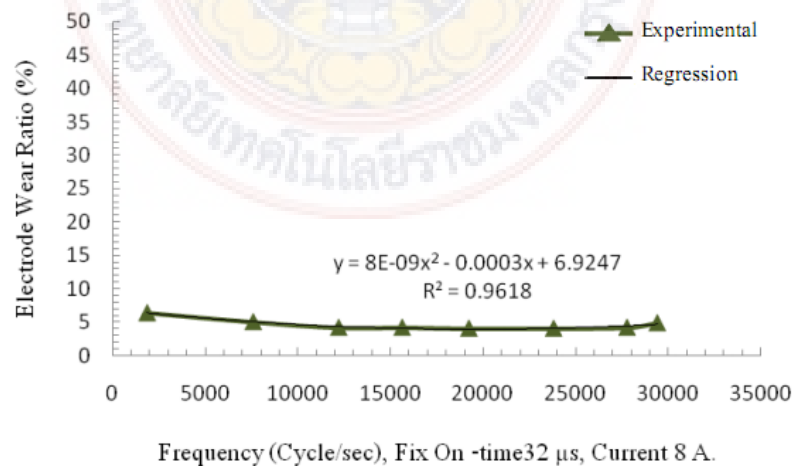
รูปที่ 4.10 ความหยาบผิวเฉลี่ยจากการปรับเวลาเปิดโดยใช้อิเล็กโตรดขั้วลบ

4.2.3 วิเคราะห์ผลการทดลองความถี่ (Frequency) ขั้วอิเล็กโทรดเป็นบวก

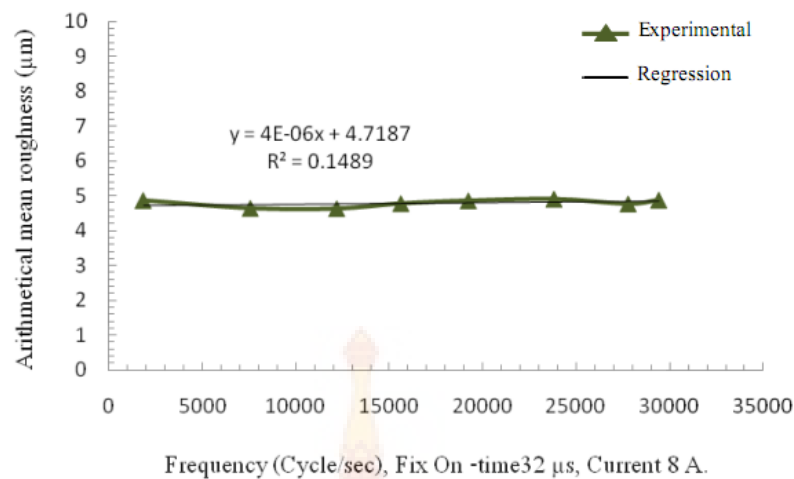
ผลการทดลองปรับความถี่ในการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าโดยคงที่เวลาเปิด 32 ไมโครวินาที แล้วทำการปรับเวลาปิดเพื่อให้เกิดเป็นความถี่ในการอาร์กขึ้นงาน โดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดเป็นบวกพบว่า ที่ความถี่สูงทำให้อัตราการขจัดเนื้องานเพิ่มมากขึ้นเป็นลักษณะแบบเชิงเส้นมีความชันคงที่ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ทั้งนี้ความถี่สูงจะมีผลทำให้อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดมีแนวโน้มลดลงเป็นแบบ โพลีโนเมียล ดังแสดงผลในรูปที่ 4.12 ส่วนคุณภาพผิวงานในรูปของความหยาบผิวเฉลี่ยนั้นมี แนวโน้มเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นมีความชันต่ำมากดังแสดงผลในรูปที่ 4.13 ทั้งนี้สาเหตุที่ทำให้การปรับ ความถี่มีผลต่ออัตราการขจัดเนื้องานมีความชันมาก เกิดจากการปรับความถี่นี้เวลาเปิดซึ่งเป็น ช่วงเวลาที่ทำให้เกิดการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้ายังคงเท่าเดิมที่ 32 ไมโครวินาที แต่เวลาปิดเป็นการ หยุดการปล่อยกระแสในการอาร์กลดต่ำลงทำให้ประสิทธิภาพการทำงานในหนึ่งวัฏจักร(Duty Cycle) เพิ่มขึ้น แต่จะมีผลต่ออัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดและความหยาบผิวเฉลี่ยต่ำมาก



รูปที่ 4.11 อัตราการขจัดเนื้องานจากการปรับความถี่ในการอาร์กโดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดขั้วบวก



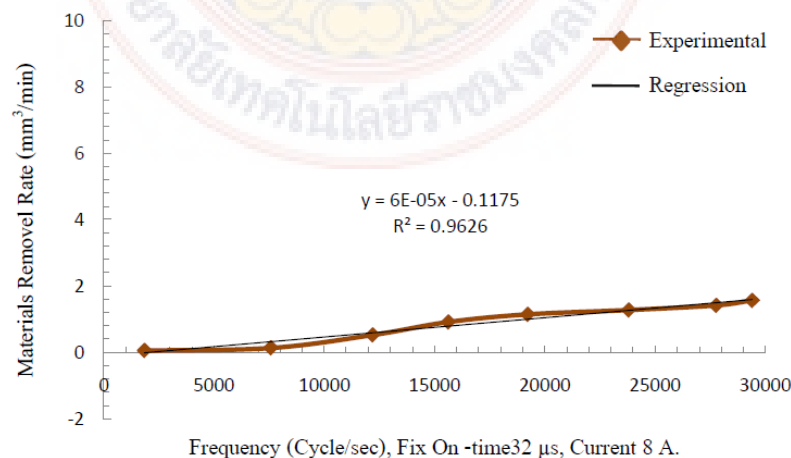
รูปที่ 4.12 อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดจากการปรับความถี่ในการอาร์กใช้ขั้วอิเล็กโทรดขั้วบวก



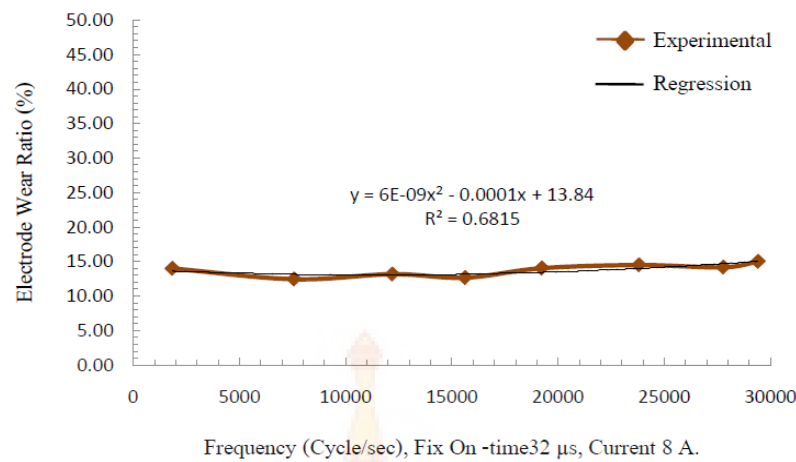
รูปที่ 4.13 ความหยาบผิวเฉลี่ยจากการปรับความถี่ในการอาร์กโดยใช้อิเล็กโตรดขั้วบวก

4.2.4 วิเคราะห์ผลการทดลองความถี่ (Frequency) ขั้วอิเล็กโตรดเป็นลบ

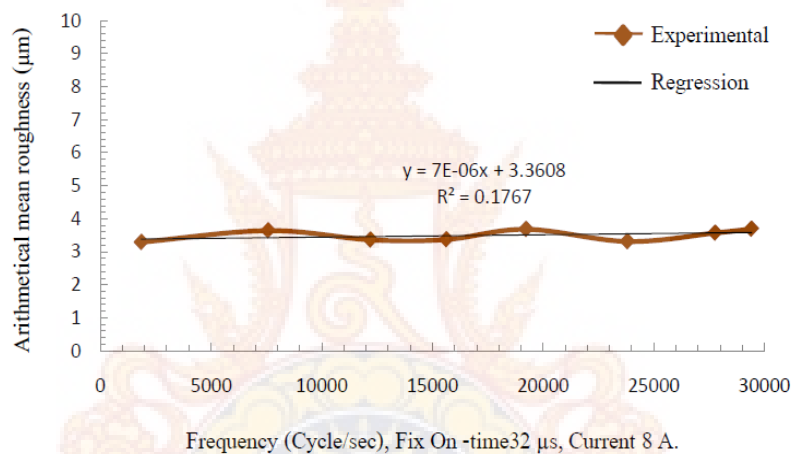
ผลการทดลองปรับความถี่ในการกัดอาร์กด้วยไฟฟ้าโดยคงที่เวลาเปิด 32 ไมโครวินาที แล้วทำการปรับเวลาปิดเพื่อให้เกิดเป็นความถี่ในการอาร์กขึ้นงานโดยใช้ขั้วอิเล็กโตรดเป็นลบ พบว่า ที่ความถี่สูงทำให้อัตราการขจัดเนื้องานเพิ่มมากขึ้นเป็นลักษณะแบบเชิงเส้นมีความชันคงที่ดังแสดง ในรูปที่ 4.14 ทั้งนี้ความถี่สูงจะมีผลทำให้อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดมีแนวโน้มลดลงเป็นแบบ โพลิโนเมียลดังแสดงผลในรูปที่ 4.15 ส่วนคุณภาพผิวงานในรูปของความหยาบผิวเฉลี่ยนั้นมีแนวโน้ม เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นมีความชันต่ำมากดังแสดงผลในรูปที่ 4.16 ทั้งนี้สาเหตุที่ทำให้การปรับความถี่มีผล ต่ออัตราการขจัดเนื้องานมีความชันมาก เกิดจากในการปรับความถี่นี้เวลาเปิดซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ทำให้เกิดการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้ายังคงเท่าเดิมที่ 32 ไมโครวินาที แต่เวลาปิดเป็นการหยุดการปล่อย กระแสในการอาร์กลดต่ำลงทำให้ประสิทธิภาพการทำงานในหนึ่งวัฏจักร (Duty Cycle) เพิ่มมากขึ้น แต่จะมีผลต่ออัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดและความหยาบผิวเฉลี่ยต่ำมาก



รูปที่ 4.14 อัตราการขจัดเนื้องานจากการปรับความถี่ในการอาร์กโดยใช้อิเล็กโตรดขั้วลบ



รูปที่ 4.15 อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดจากการปรับความถี่ในการอาร์กใช้อิเล็กโทรดขั้วลบ

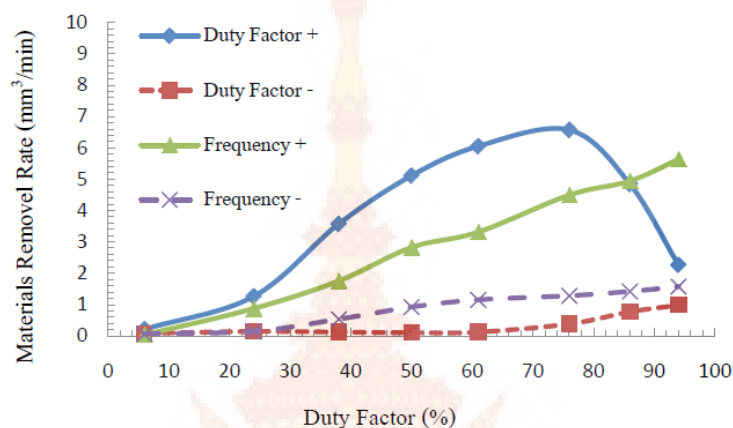


รูปที่ 4.16 ความหยาบผิวเฉลี่ยจากการปรับความถี่ในการอาร์กโดยใช้อิเล็กโทรดขั้วลบ

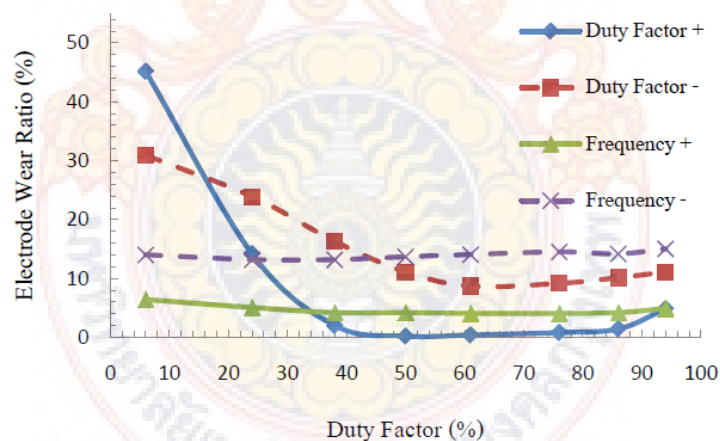
4.2.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงาน

เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแปรรูปและคุณภาพผิวงานแล้วจะพบว่า ในการกัดอาร์กด้วยไฟฟ้าบนวัสดุเหล็กกล้าแม่พิมพ์พลาสติก AISI P20 นั้นวัสดุอิเล็กโทรดที่เป็นขั้วบวกให้อัตราการขจัดเนื้องานที่สูงกว่าขั้วลบดังแสดงในรูปที่ 4.17 และวัสดุอิเล็กโทรดขั้วบวกยังให้อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดต่ำกว่าลบดังแสดงในรูปที่ 4.18 แต่อิเล็กโทรดขั้วลบให้คุณภาพผิวงานที่ต่ำกว่าขั้วบวกดังแสดงในรูปที่ 4.19 ทั้งนี้ความแตกต่างระหว่างอิเล็กโทรดขั้วบวกและขั้วลบในการอาร์กวัสดุที่เป็นเหล็กกล้าเกิดจากอิเล็กโทรดที่เป็นขั้วบวกจะทำให้เกิดพลังงานความร้อน 30 เปอร์เซ็นต์ที่ชิ้นงานทำให้เกิดการซึมลึกของพลังงานความร้อนน้อยแต่กว้าง [10] จึงทำให้เกิดบริเวณการหลอมละลายของผิวงานเป็นบริเวณกว้าง เมื่อสารไดอิเล็กตริกเข้าจับเศษจึงเกิดการสึกกร่อนของผิวงานมาก แต่หากขั้วอิเล็กโทรดเป็นลบจะทำให้เกิดพลังงานความร้อน 70 เปอร์เซ็นต์ที่ชิ้นงาน ทำให้เกิดการซึม

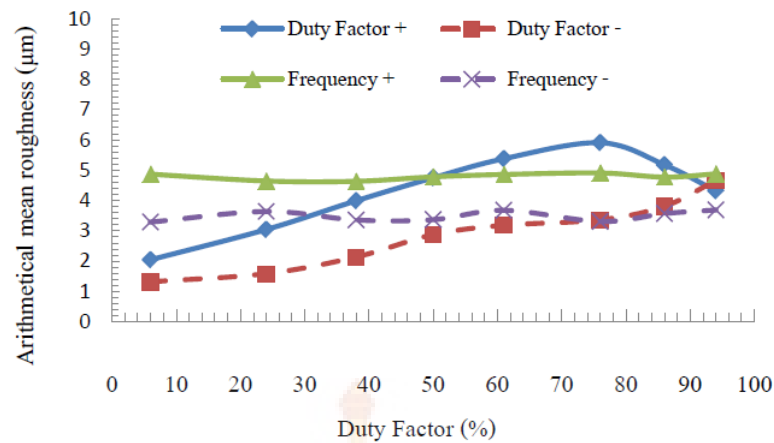
ลิกของพลังงานความร้อนมากแต่แคบ [10] ดังแสดงในรูปที่ 4.20 ส่งผลให้เกิดการหลอมละลายของผิวงานน้อยแต่ถึงลงในผิวงาน เมื่อสารไดอิเล็กทริกเข้าขจัดเศษจึงเกิดการสึกกร่อนของผิวงานต่ำ ทั้งนี้สาเหตุที่พลังงานความร้อนเกิดที่ขั้วอิเล็กโตรดขั้วบวกมากกว่าขั้วลบแต่อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดต่ำกว่า เกิดจากการแตกตัวของสารไดอิเล็กทริกที่เป็นไฮโดรคาร์บอน ออกเป็นไฮโดรเจนที่มีประจุบวก และคาร์บอนที่มีประจุลบวิ่งเข้ายึดเกาะผิววัสดุที่มีสภาพขั้วเป็นบวก ในที่นี้คืออิเล็กโตรด ทำให้เกิดเป็นชั้นเคลือบผิวดังแสดงในรูปที่ 4.5



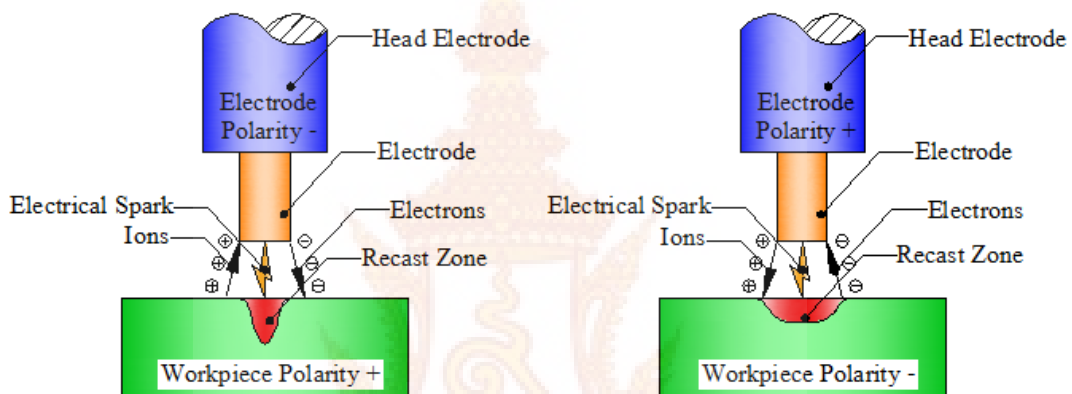
รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบอัตราการขจัดเนื้องานโดยใช้อิเล็กโตรดขั้วบวกกับขั้วลบ



รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดโดยใช้อิเล็กโตรดขั้วบวกกับขั้วลบ



รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบความหยาบผิวเฉลี่ยโดยใช้อิเล็กโตรดขั้วบวกกับขั้วลบ



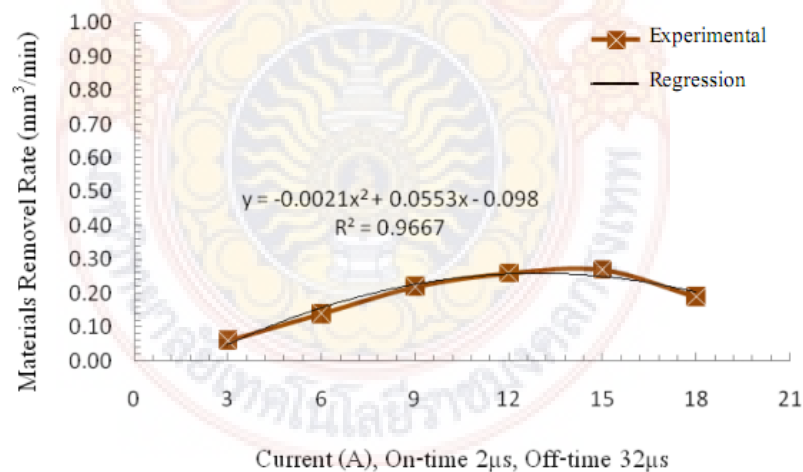
ก) อิเล็กโตรดขั้วลบความร้อน 70% เกิดที่ชิ้นงาน ข) อิเล็กโตรดขั้วบวกความร้อน 30% เกิดที่ชิ้นงาน

รูปที่ 4.20 ชนิดของขั้วที่มีผลต่อความร้อนในบริเวณสปาร์ค [10]

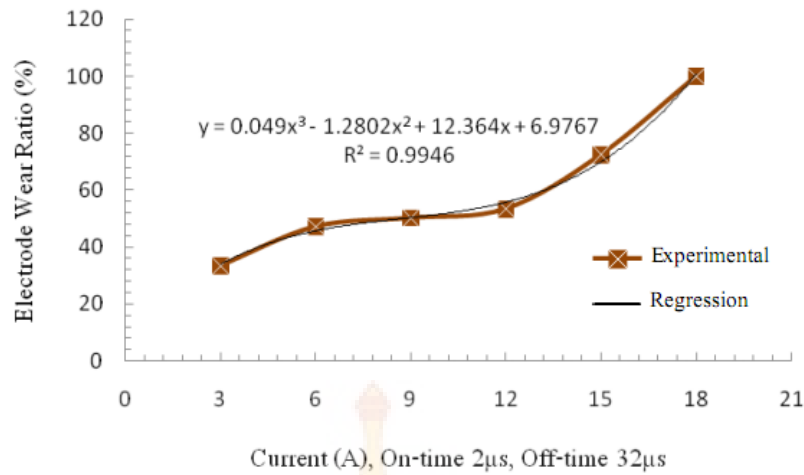
การปรับระยะเวลาปิดลดลงมีผลทำให้อัตราการขจัดเนื้องานเพิ่มมากขึ้นซึ่งแปรผันกับความถี่ เนื่องจากการปรับเวลาปิดเป็นการปรับระยะเวลาการหยุดไหลของกระแสไฟฟ้าไม่ทำให้เกิดความร้อนและการกัดกร่อนผิววัสดุชิ้นงานหากเป็นเพียงช่วงระยะเวลาเพื่อให้ขจัดเศษและระบายความร้อน จึงมีผลต่ออัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดและความหยาบผิวนาน้อยมาก ทั้งนี้จากการทดลองยังพบความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยประสิทธิภาพ กับความถี่ของการอาร์ก จากการคงที่ระยะเวลาปิดแล้วปรับเวลาเปิดเพิ่มขึ้น ปัจจัยประสิทธิภาพก็จะสูงขึ้นในขณะที่ความถี่จะลดลง (เวลาหยุดเท่าเดิม แต่เวลาทำงานมีมากขึ้นในขณะที่จำนวนครั้งของการทำงานน้อยลง) ในทางตรงกันข้ามหากคงที่เปิดของกระแสไฟฟ้าแล้วปรับระยะเวลาปิดลดลง ปัจจัยประสิทธิภาพและความถี่จะเพิ่มขึ้น (เวลาหยุดน้อยลง แต่เวลาทำงานเท่าเดิม ในขณะที่จำนวนครั้งของการทำงานมากขึ้น) ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.3

4.2.6 วิเคราะห์ผลการทดลองกระแส (Current)

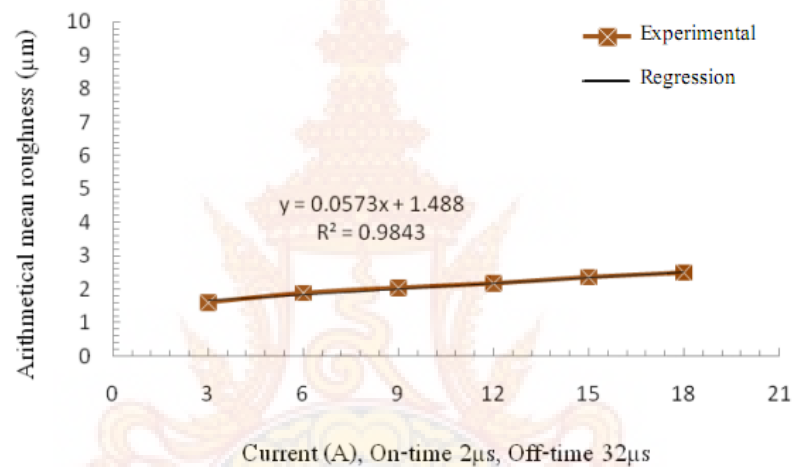
การวิเคราะห์ผลกระทบของกระแสที่ใช้ในกระบวนการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า ซึ่งเป็นต้นกำเนิดพลังงานความร้อน ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการแปรรูปและคุณภาพผิวงาน ซึ่งถูกวัดอยู่ในรูปของอัตราการขจัดเนื้องาน อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด ตลอดจนค่าความหยาบผิวเฉลี่ย โดยผลจากการทดลองปรับกระแส พบว่าเมื่อกระแสเพิ่มมากขึ้นอัตราการขจัดเนื้องานจะสูงขึ้นตามเนื่องจากปริมาณกระแสต่อพื้นที่หน้าตัดเพิ่มสูงขึ้นทำให้ความร้อนที่เกิดเพิ่มสูงขึ้น เป็นเหตุให้การขจัดเนื้องานเกิดเป็นหลุมลึกที่มีความกว้างเพิ่มมากขึ้น [1] โดยการเพิ่มขึ้นของกระแสต่ออัตราการขจัดเนื้องานมีแนวโน้มเพิ่มตาม และเมื่อกระแสสูงเกินกว่ากฎ 65A [2] จะทำให้อัตราการขจัดเนื้องานลดลงเนื่องจากปริมาณกระแสต่อหน่วยพื้นที่มากเกินไป โดยสามารถแสดงผลการทดลองได้ดังรูปที่ 4.21 ทั้งที่อิเล็กโทรดมีแนวโน้มให้อัตราการขจัดเนื้อเพิ่มขึ้นตามค่ากระแส จนถึงระดับกระแส 15 แอมแปร์ อัตราการขจัดเนื้องานก็จะลดลง ส่วนผลกระทบที่มีต่ออัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดนั้น จะเพิ่มขึ้นตามค่ากระแส ซึ่งมีสาเหตุมาจากอัตรากระแสต่อพื้นที่หน้าตัดที่มากทำให้เกิดเป็นพลังงานความร้อนซึ่งกัดกร่อนทั้งชิ้นงานและวัสดุอิเล็กโทรดเป็นเหตุให้อิเล็กโทรดเกิดการสึกหรอ ดังแสดงในรูปที่ 4.22 ทั้งนี้ระดับกระแสที่เพิ่มสูงขึ้นนั้นย่อมหมายถึงระดับความรุนแรงของการอาร์คที่มากขึ้น (กระแสเป็นต้นกำเนิดพลังงานความร้อนในการอาร์ค [1,2]) ซึ่งส่งผลให้ผิวงานที่ถูกขจัดออกจะลึกกลงไปในผิวงานเมื่อสิ้นสุดวัฏจักรการอาร์คจึงกลายเป็นผิวงานที่มีความหยาบผิวดังแสดงในรูปที่ 4.23 และแสดงผิวงานดังรูปที่ 4.24



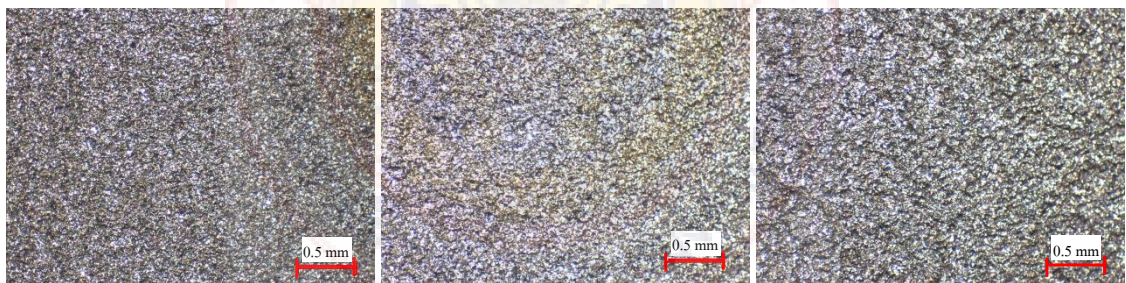
รูปที่ 4.21 อัตราการขจัดเนื้องานจากการปรับกระแส



รูปที่ 4.22 อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดจากการปรับกระแส



รูปที่ 4.23 ความขรุขระผิวเฉลี่ยจากการปรับกระแส



(ก) กระแส 3 แอมแปร์

(ข) กระแส 12 แอมแปร์

(ค) กระแส 18 แอมแปร์

รูปที่ 4.24 ลักษณะผิวงานที่เกิดจากการปรับกระแส (กำลังขยาย 35 เท่า)

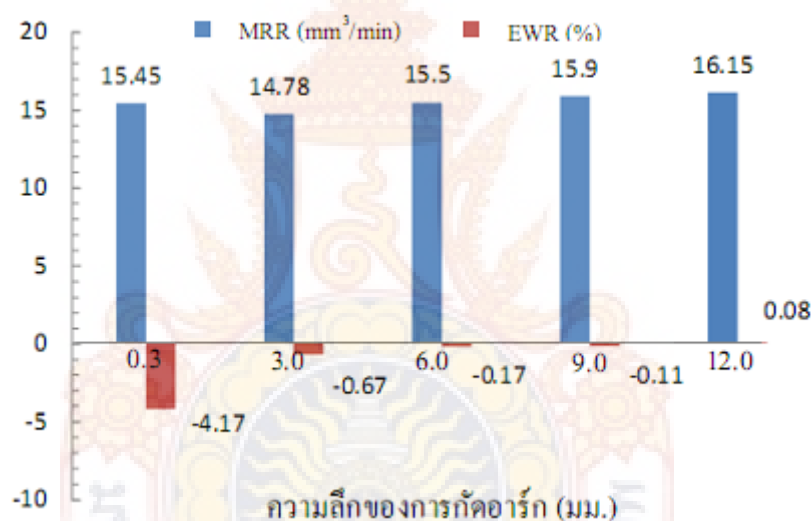
4.2.7 การทดลองความลึกของการอาร์กที่มีผลต่อประสิทธิภาพการแปรรูป

การทดลองปรับค่าความลึกในการอาร์กเป็นการหาประสิทธิภาพการแปรรูปสูงสุดโดยการเลือกค่าที่ดีที่สุดของแต่ละตัวแปรโดยเป็นการทดลองเพื่อเปรียบเทียบอัตราการขจัดเนื้องาน และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดที่ระดับค่าความลึกของการอาร์กต่างกัน โดยในที่นี้จะใช้ระดับความ

ลึกที่ 0.5, 3.0, 6.0, 9.0 และ 12.0 มิลลิเมตรตามลำดับ โดยเลือกใช้ปัจจัยประสิทธิภาพการทำงานที่สูงที่สุดคือเล็กโตรด โดยมีเวลาเปิด 100 ไมโครวินาที, เวลาปิด 2 ไมโครวินาที, กระแสที่ 12 แอมแปร์ โดยใช้เวลานั่งในการอาร์กอยู่ที่ 1.6 วินาที ซึ่งแสดงผลการทดลองดังตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.25

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองความลึกของการอาร์กที่มีผลต่อประสิทธิภาพการแปรรูป

ลำดับที่	ค่าความลึก (mm)	MRR (mm^3/min)	EWR (%)
1	0.5	15.45	-4.17
2	3.0	14.78	-0.67
3	6.0	15.50	-0.17
4	9.0	15.90	-0.11
5	12.0	16.15	0.08



รูปที่ 4.25 ความลึกของการอาร์กที่มีผลต่อประสิทธิภาพการแปรรูป

4.3 สรุป

ผลจากการทดลองสามารถวัดประสิทธิภาพการแปรรูปโดยการคำนวณค่าอัตราการขจัดเนื้องาน (MRR) และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดได้ดังแสดงไว้ในตาราง 4.1, 4.2, 4.3, และ 4.4 โดยแต่ละตัวแปรการทดลองมีผลต่อประสิทธิภาพการแปรรูป และคุณภาพผิวงานที่แสดงความสัมพันธ์ดังแสดงในกราฟต่างๆ ดังจะสังเกตได้ว่าแต่ละตัวแปรต้นจะมีผลให้เกิดตัวแปรตามที่มีลักษณะเป็นเชิงเส้น และโดยตัวแปรตามยังแปรผันและผกผันซึ่งกันและกัน โดยในการทดลองนี้สังเกตความเพียงพอหรือความน่าเชื่อถือของข้อมูลจากสมการถดถอย (Regression) แล้วจึงทดลองปรับพารามิเตอร์เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพการในการกัดอาร์กด้วยไฟฟ้าสูงสุด

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาการปรับปรุงคุณภาพผิวงานแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก AISI P20 โดยกระบวนการกัดอาร์กด้วยไฟฟ้า โดยใช้วัสดุอิเล็กโทรดทองแดงแล้วทำการปรับค่าพารามิเตอร์ในการสปาร์คจากค่าขั้วอิเล็กโทรด (+, -), เวลาเปิด (On-time), ความถี่ในการสปาร์ค (Frequency) และระดับค่ากระแสเพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพการแปรรูป โดยประเมินผลจากอัตราการขจัดเนื้องาน และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด ตลอดจนคุณภาพผิวงานในรูปของความหยาบผิวเฉลี่ย ทำให้สามารถสรุปตามวัตถุประสงค์ของการวิจัยได้ดังนี้คือ

1. ขั้วอิเล็กโทรดที่เป็นบวกให้ประสิทธิภาพการแปรรูปชิ้นงานที่สูงกว่าขั้วลบ ซึ่งจากการทดลองพบว่า ขั้วอิเล็กโทรดที่เป็นบวกมีอัตราการขจัดเนื้องานที่สูงกว่าขั้วลบ และมีอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดที่ต่ำกว่า แต่ขั้วลบให้คุณภาพผิวงานที่ดีกว่าขั้วบวก โดยมีค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a) ที่เวลาเปิด 2 ไมโครวินาที เวลาปิด 32 ไมโครวินาที ที่ระดับกระแส 9 แอมแปร์ อยู่ที่ 1.58 ไมโครเมตร

2. เวลาเปิดมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการแปรรูปชิ้นงาน ซึ่งจากการทดลองพบว่าเวลาเปิดที่มากขึ้นมีผลทำให้อัตราการขจัดเนื้องานเพิ่มขึ้นถึงระดับหนึ่งแล้วลดลงซึ่งมีลักษณะเป็นแบบโพลีโนเมียล โดยมีความสามารถในการขจัดเนื้องานสูงสุด 6.57 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อนาที ที่เวลาเปิด 100 ไมโครวินาที โดยมีอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดไม่ถึง 1 เปอร์เซ็นต์ และมีคุณภาพผิวงานในรูปของความหยาบผิวเฉลี่ยอยู่ที่ 5.67 ไมโครเมตร ทั้งนี้จากการทดลองยังพบว่า อัตราการขจัดเนื้องาน และคุณภาพผิวงานในรูปของความหยาบผิวเฉลี่ยนั้น มีลักษณะการเพิ่มขึ้นและลดลงตามระดับค่าเวลาเปิดที่คล้ายกัน

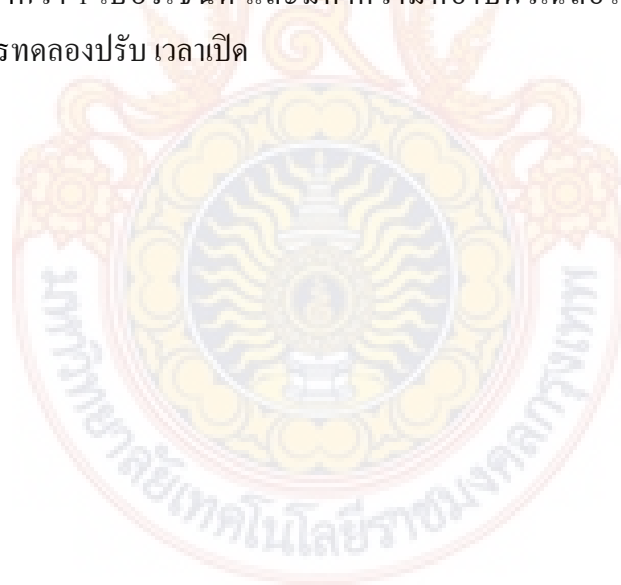
3. ความถี่ในการสปาร์คเป็นรูปแบบความสัมพันธ์ของเวลาเปิด (On-time) และเวลาปิด (Off-time) ที่ทำให้เกิดปัจจัยประสิทธิภาพการทำงาน (Duty Factor) ที่แสดงอยู่ในรูปของร้อยละของเวลาเปิดต่อเวลารวมในหนึ่งวัฏจักรการทำงาน (หนึ่งวัฏจักรการทำงาน Cycle = On-time + Off-time) และเมื่อนับจำนวนของวัฏจักรการทำงานในหนึ่งวินาที (sec) จะกลายเป็นความถี่ (Frequency) ในการสปาร์ค โดยจากการทดลองพบว่า ที่ความถี่สูงทำให้ประสิทธิภาพการแปรรูปชิ้นงาน ในรูปของอัตราการขจัดเนื้องานนั้นจะเพิ่มมากขึ้นเป็นลักษณะแบบเชิงเส้นมีความชันคงที่ และมีผลทำให้อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดมีแนวโน้มลดลง แต่จะมีผลต่อคุณภาพผิวงานในรูปของความหยาบผิวเฉลี่ยนั้นต่ำมาก

4. กระแสซึ่งในกระบวนการกัดอาร์กด้วยไฟฟ้าจัดว่าเป็นต้นกำเนิดความร้อนในการสปาร์ค [1] ซึ่งจากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพการแปรรูปชิ้นงานในรูปของอัตราการขจัดเนื้องานนั้นจะ

เพิ่มขึ้นตามค่ากระแสจนถึงระดับหนึ่งแล้วจึงลดลง โดยที่อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดนั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น โดยมีคุณภาพผิวงานในรูปของความหยาบผิวเฉลี่ยอยู่ที่ 1.31 ไมโครเมตร ที่ระดับกระแส 3 แอมแปร์ และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงมีความชันคงที่ตามระดับกระแสที่เพิ่มขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าลักษณะของการเพิ่มขึ้นของอัตราการขจัดเนื้องาน และการลดลงของอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดนั้นขึ้นอยู่กับระดับค่าเวลาเปิด กระแสไฟฟ้าในการสปาร์กเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งเมื่อทำให้ทราบลักษณะของตัวแปรต้นที่มีผลต่อตัวแปรตามแล้วจึงทำให้สามารถกำหนดค่าของพารามิเตอร์ในการสปาร์กเพื่อให้ได้ผลหรือตัวแปรตามที่ตรงตามเป้าหมาย ซึ่งตัวอย่างเช่นทางคณะผู้วิจัยต้องการให้เกิดประสิทธิภาพการทำงานในรูปของอัตราการขจัดเนื้องานที่สูง อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดที่ต่ำ ก็ต้องเลือกใช้ขั้วของอิเล็กโทรดเป็นบวก เวลาเปิดที่ 100 ไมโครวินาที เวลาปิดที่ 2 ไมโครวินาที ระดับค่ากระแส 12 แอมแปร์ ซึ่งจะทำให้มีค่าปัจจัยประสิทธิภาพการทำงานที่ 98 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ในการสปาร์กอยู่ที่ 9,800 ครั้งต่อวินาที โดยจากการทดลองพบว่าอัตราการขจัดเนื้องานที่สูงถึง 16.15 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อนาที โดยมีอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดต่ำกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าความหยาบผิวเฉลี่ยใกล้เคียงกับเวลาเปิด 100 ไมโครวินาทีในการทดลองปรับ เวลาเปิด



เอกสารอ้างอิง

- [1] Thomas, B., **Technology of Electrical Discharge Machining**. Druckerei Helene, 6102 Pfunstste PP 11-53
- [2] E.Bud Guitrau., **The EDM Handbook**. Handser Gardener publication Cincinnati, 1997, PP 19-54.
- [3] JIS B 0031 and JIS B 0061
- [4] Bulent Ekmekci, “Residual stresses and white layer in electric discharge machining (EDM),” **ScienceDirect(Electronic)**, 2007, Available : ScienceDirect (7 June 2007)
- [5] John,K. “et al”, “EDM electrode manufacture using rapid tooling: a review”,**Springer Science Business Media (Electronic)**, 2008, Vol.43, pp2522-2535), Available : Springer (5 June 2008)
- [6] Salonites, K. “et al”, “Thermal modeling of the material removal rate and surface roughness for die sinking EDM”, **Springer – Verlag London Limited (Electronic)**, 2007, Available : Springer (3 August 2008)
- [7] ศักดา ฉายพุดชา และคณะ, การศึกษาการสึกหรอของทองแดงที่ได้จากการทำ **Electroforming** ในการกัดแม่พิมพ์โดยวิธี **Electrical Discharge Machining (EDM)**, ปรินญาวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี, 2548.
- [8] Lien Sheng Mechanical & Electrical Co., LTD, **Instruction Manual Aristech 3D-CNC EDM**. 2. Ta-Li City, 2004.
- [9] จีวรรณ คล้อยยันต์ และคณะ, “การศึกษาตัวแปรในการกัดวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม ชนิด 316L” ด้วยเครื่องกัดชิ้นงานด้วยไฟฟ้า, “การประชุมวิชาการช่วยงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม, 24-26 ตุลาคม 2007
- [10] สมบูรณ์ เต็งหงษ์, **วิศวกรรมการเชื่อม**. กรุงเทพฯ : ศูนย์ส่งเสริมวิชาการ, 2549, น. 66.
- [11] บรรเลง ศรีนิล และประเสริฐ ก้วยสมบูรณ์, **ตารางงานโลหะ**. กรุงเทพฯ : ศูนย์ผลิตตำราเรียน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2524, น. 132
- [12] Yusaf, K. “et al”, “An experimental study for determination of the effects of machining parameters on surfaces roughness in electrical discharge machining (EDM),” **Springer – Verlag London Limited (Electronic)**, 2005, Vol.28, pp1118 – 1121 : Available : Springer (27 June 2007)
- [13] Dimla, E. “et al”, “Investigation of complex rapid EDM electrodes for rapid tooling applications,” **Springer-Verlag London Limited (Electronic)**, 2004, Vol.23, pp 249-255 , Available : Springer (3 August 2008)

- [14] Monzon, M. "Validation of electrical discharge machining electrodes made with rapid tooling technologies," **Journal of materials processing technology (Electronic)**, 2008, Vol. 196, pp 109-144, Available : Springer (3 August 2008)
- [15] Hsu, Y. "et al," "Edm electrode manufacturing using Rp combining electroless plating with electroforming," **Springer – Verlage London Limited (Electronic)**, 2007, ,Available : Springer (3August 2008)
- [16] ณัฐคนัย ชื้อตระกูล, ผลกระทบของอิเล็กโตรดต่อรอยแตกร้าวขนาดเล็กในทั้งสแตนคาร์ไบด์ด้วยเครื่องกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2551.

