

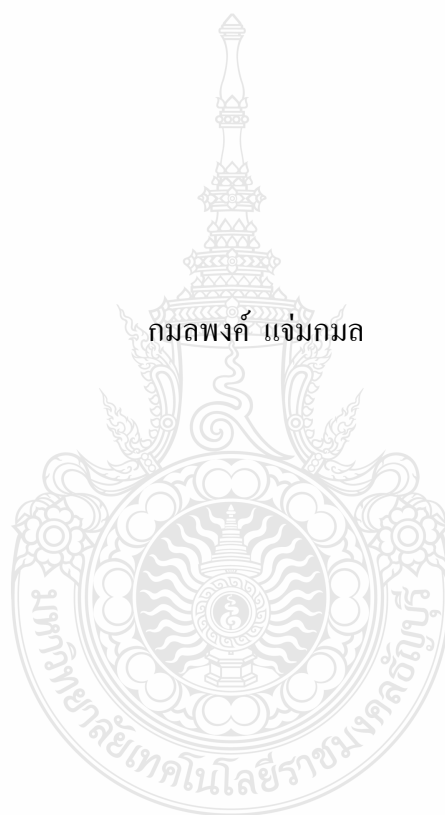
การเปรียบเทียบประสิทธิภาพอิเล็กโทรดทองแดงแท่งตันและ
อิเล็กโทรดชุบเคลือบผิวสำหรับกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า

**COMPARISION THE PERFORMANCE OF COPPER SOLID ELECTRODE AND
ELECTROPLATING ELECTRODE FOR ELECTRICAL DISCHARGE MACHINE**



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
พ.ศ. 2553

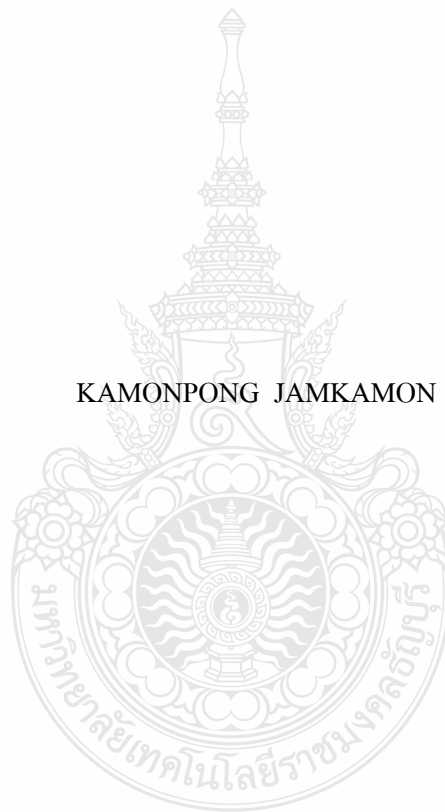
การเปรียบเทียบประสิทธิภาพอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์และ
อิเล็กทรอนิกส์เคลือบผิวสำหรับกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
พ.ศ. 2553

**COMPARISON THE PERFORMANCE OF COPPER SOLID ELECTRODE
AND ELECTROPLATING ELECTRODE FOR ELECTRICAL DISCHARGE
MACHINE**

KAMONPONG JAMKAMON



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT OF REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING
IN INDUSTRIAL ENGINEERING DEPARTMENT OF INDUSTRIAL ENGINEERING
RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI

2010

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยที่เกิดจากการค้นคว้าและวิจัยขณะที่ข้าพเจ้าศึกษาอยู่ในคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดังนั้นงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถือเป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และข้อความต่างๆ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ข้าพเจ้าขอรับรองว่าไม่มีการคัดลอกหรือนำงานวิจัยของผู้อื่นมานำเสนอในชื่อของข้าพเจ้า

นายกมลพงศ์ แจ่มกมล





ใบรับรองวิทยานิพนธ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพอิเล็กโทรดทองแดงแท่งตันและ
อิเล็กโทรดชุบเคลือบผิวสำหรับกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า
COMPARISON THE PERFORMANCE OF COPPER SOLID ELECTRODE
AND ELECTROPLATING ELECTRODE FOR ELECTRICAL DISCHARGE
MACHINE

ชื่อนักศึกษา

นายกมลพงศ์ แจ่มกมล

รหัสประจำตัว

115070404010-6

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมอุตสาหกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ดร. ศิริชัย ต่อสกุล

วัน เดือน ปี ที่สอบ

6 มีนาคม 2553

สถานที่สอบ

ห้องเฟื่องทอง ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิวัฒน์ มุตตามระ)

..... กรรมการ

(ดร.สมศักดิ์ อธิธิโสภณกุล)

..... กรรมการ

(ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์)

..... กรรมการ

(ดร.ศิริชัย ต่อสกุล)

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชัย หิรัญวโรดม)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์



หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพอิเล็กโตรดทองแดงแท่งตันและอิเล็กโตรดชุบเคลือบผิวสำหรับกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า
นักศึกษา	นายกมลพงศ์ แจ่มกมล
รหัสประจำตัว	115070404010-6
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
ปีการศึกษา	2552
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ดร. ศิริชัย ต่อสกุล

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพอิเล็กโตรดทองแดงแท่งตันและอิเล็กโตรดชุบเคลือบผิวสำหรับกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า

การดำเนินการทดลองใช้อิเล็กโตรดทองแดงแท่งตัน อิเล็กโตรดทองแดงชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง และเหล็กกล้า St 37 ชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง ทำการสปาร์คชิ้นงานเหล็กกล้า AISI P20 เป็นหลุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. ลึก 0.5 มม. ภายใต้สารไดอิเล็กตริกไฮโดรคาร์บอน (Spark Erosion 102 HF) โดยให้อิเล็กโตรดเป็นขั้วบวก ด้วยพารามิเตอร์การทดลอง 4 ปัจจัยหลักคือ เวลาเปิด, เวลาปิด, กระแสและเวลางาน โดยวัดประสิทธิภาพการทำงานของอิเล็กโตรดอยู่ในรูปของอัตราการขจัดเนื้องาน และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด วัดผลกระทบของอิเล็กโตรดที่มีต่อคุณภาพผิวงาน ในรูปของความหยาบผิวเฉลี่ยและการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งผิวงาน

ผลจากการทดลองพบว่า อิเล็กโตรดทองแดงแท่งตันให้อัตราการขจัดเนื้องานสูงสุดอยู่ที่ 16.15 มม.³/นาที่ ตามด้วยอิเล็กโตรดทองแดงชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง 13.58 มม.³/นาที่ และอิเล็กโตรดเหล็กกล้า St 37 ชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง 9.67 มม.³/นาที่ การที่อิเล็กโตรดทองแดงแท่งตันให้อัตราการขจัดเนื้องานสูงกว่าอิเล็กโตรดชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง เกิดจากค่าการนำไฟฟ้าที่สูง และค่าความต้านทานที่ต่ำ ทำให้กระแสที่เป็นต้นกำเนิดพลังงานความร้อนไหลผ่านได้มาก แต่อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดจะไม่แตกต่างกันเมื่อเวลาเปิดหรือปัจจัยประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น โดยที่วัสดุอิเล็กโตรดทั้งสองกลุ่มให้ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย และการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งผิวงานแตกต่างกันน้อยมาก

คำสำคัญ : อิเล็กโตรดทองแดง / อิเล็กโตรดชุบเคลือบผิว / การกัดเซาะด้วยไฟฟ้า

Thesis Title : COMPARISION THE PERFORMANCE OF COPPER SOLID ELECTRODE AND ELECTROPLATING ELECTRODE FOR ELECTRICAL DISCHARGE MACHINE

Student Name : Mr.Kamonpong Jamkamon

Student ID : 115070404010-6

Degree Award : Master of Engineering

Study Program : Industrials Engineering

Academic Year : 2009

Thesis Advisor/s : Dr. Sirichai Torsakul

Abstract

The aim of this research is to show the performance of copper solid electrode and electroplating electrode for electrical discharge machine process.

Experiments set up of Cu-solid electrode, Cu-electroplating and St 37-electroplating for EDM process respectively. The experiment were carried out on material mould steel AISI P20. The condition of EDM spark on surface workpiece was 0.5 mm of depth and 10 mm of diameter electrode. Which it EDM process under positive polarity electrode and Spark Erosion 102 (HF) of fluid dielectric hydrocarbon. Moreover it concluded that all factors have significant effect on materials removal rate (MRR), Tool wear ratio (TWR) and surface roughness (SR) of the machined surface.

The result show that the Cu-solid electrode gives highest materials removal rate is 16.15 mm³/min, Cu-electroplating is 13.58 mm³/min and St 37-electroplating is 9.67 mm³/min respectively. For the MRR result show of Cu-solid electrode give higher than Cu-electroplating and St 37-electroplating, Because of the properties electrical better than such as electrode conductivity and resistively. In addition, to the properties electrical influenced to generating current good flow of electrode perform very well on EDM process. However, the result of tool wear ratio not different when were use intensity of on-time or duty cycle. Moreover, the both of electrode material gives the least different between surface roughness and surface hardness.

Key word : Cu-Electrode / Electrode Electroplating / EDM

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์เรื่อง การเปรียบเทียบประสิทธิภาพอิเล็กทรอนิกส์ของแดงแตงต้นและอิเล็กทรอนิกส์เคลือบผิวสำหรับกระบวนการกักเชื้อด้วยไฟฟ้าสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากคณาจารย์ทั้งหลายที่คอยประสิทธิ์ประสาทวิชา และชี้แนะแนวทาง โดยอย่างยิ่ง ดร.ศิริชัย ต่อสกุล อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์หลัก ตลอดจน ดร.สมศักดิ์ อิทธิโสภณกุล และ ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ กรรมการอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

กระผมขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิวัฒน์ มุตะตามระ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ปทุมธานี ประธานกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ นอกจากนี้กระผมขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์พิชัย จันทน์มณี อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่ให้การสนับสนุนด้านงานวิจัย

ท้ายนี้กระผมใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ซึ่งสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้กระผมมาจนสำเร็จการศึกษา

กมลพงศ์ แจ่มกมล

6 มีนาคม 2553



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	24
2.4 สรุปบท	27
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	29
3.1 วิธีการดำเนินการวิจัย	29
3.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	29
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล	42
4.1 ผลการทดลอง	42
4.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง	52
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	69
5.1 สรุปผลการทดลอง	69
5.2 ข้อเสนอแนะ	71
เอกสารอ้างอิง	72

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก	74
ก. ข้อมูลการทดลอง	75
ข. ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์	102
ประวัติผู้เขียน	113



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติที่สำคัญของทองแดง	14
2.2 สมบัติทางกลเหล็กกล้า AISI P20	14
2.3 ส่วนผสมของธาตุในเหล็กกล้า AISI P20 คิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	15
3.1 สมบัติพื้นฐานของอิเล็กทรอนิกส์	32
3.2 ค่าปัจจัยประสิทธิภาพโดยปรับเวลาเปิด (On-time)	33
3.3 ค่าตัวแปรคงที่ในการทดลองปรับเวลาเปิดและปรับเวลาปิด	33
3.4 ค่าปัจจัยประสิทธิภาพโดยปรับเวลาปิด (Off-time)	34
3.5 ค่าตัวแปรในการทดลองกระแส (Current)	40
3.6 ค่าตัวแปรในการทดสอบเวลาหน่วงในการสปาร์ค (Working Time)	41
4.1 ผลการทดลองอิเล็กทรอนิกส์ทองแดงแท่งตัน โดยการปรับค่าปัจจัยประสิทธิภาพจากเวลาเปิด (On-Time)	43
4.2 ผลการทดลองอิเล็กทรอนิกส์ทองแดงชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง โดยการปรับค่าปัจจัยประสิทธิภาพจากเวลาเปิด (On-Time)	43
4.3 ผลการทดลองอิเล็กทรอนิกส์เหล็กกล้า St 37 ชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง โดยการปรับค่าปัจจัยประสิทธิภาพจากเวลาเปิด (On-Time)	44
4.4 ผลการทดลองอิเล็กทรอนิกส์ทองแดงแท่งตัน โดยการปรับค่าปัจจัยประสิทธิภาพจากเวลาปิด (Off-Time)	45
4.5 ผลการทดลองอิเล็กทรอนิกส์ทองแดงชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง โดยการปรับค่าปัจจัยประสิทธิภาพจากเวลาปิด (Off-Time)	45
4.6 ผลการทดลองอิเล็กทรอนิกส์เหล็กกล้า St 37 ชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง โดยการปรับค่าปัจจัยประสิทธิภาพจากเวลาปิด (Off-Time)	46
4.7 ผลการทดลองอิเล็กทรอนิกส์ทองแดงแท่งตัน โดยปรับค่ากระแส (Current)	47
4.8 ผลการทดลองอิเล็กทรอนิกส์ทองแดงชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง โดยการปรับค่ากระแส (Current)	47
4.9 ผลการทดลองอิเล็กทรอนิกส์เหล็กกล้า St 37 ชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง โดยการปรับค่ากระแส (Current)	48
4.10 ผลการทดลองอิเล็กทรอนิกส์ทองแดงแท่งตัน โดยปรับค่าเวลาหน่วงในการสปาร์ค (Working Time)	49

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.11 ผลการทดลองอิเล็กทรอนิกส์โทรดทองแดงชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง โดยการปรับค่าเวลา หน้าต่างในการสปาร์ค (Working Time)	49
4.12 ผลการทดลองอิเล็กทรอนิกส์โทรดเหล็กกล้า St 37 ชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง โดยการ ปรับค่าเวลาหน้าต่างในการสปาร์ค (Working Time)	50
4.13 ผลการทดลองความลึกของการกัดเซาะที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของ อิเล็กทรอนิกส์โทรดทองแดงแท่งตัน	51
4.14 ผลการทดลองความลึกของการกัดเซาะที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของ อิเล็กทรอนิกส์โทรดทองแดงชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง	51
4.15 ผลการทดลองความลึกของการกัดเซาะที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของ อิเล็กทรอนิกส์โทรดเหล็กกล้า St 37 ชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง	51



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การจำแนกนิยามของกระบวนการผลิตตามมาตรฐาน DIN 8580	5
2.2 สถานะการสร้าง Gap ในการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า	6
2.3 สถานะการสปาร์คในการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า	7
2.4 สถานะการ Cooling ในการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า	7
2.5 ช่วงระยะเวลาเปิด และปิดเพื่อให้เกิดการถ่ายเทประจุ	8
2.6 ความสัมพันธ์ของเวลาเปิดต่อการเกิดขจัดเนื้องานและการสึกหรอของอิเล็กโตรด	9
2.7 ความสัมพันธ์ของเวลาปิดต่อการเกิดขจัดเนื้องานและการสึกหรอของอิเล็กโตรด	9
2.8 ความสัมพันธ์ของกระแสต่อการเกิดขจัดเนื้องานและการสึกหรอของอิเล็กโตรด	10
2.9 คุณภาพผิวงานที่เกิดจากความถี่ต่ำ	11
2.10 คุณภาพผิวงานที่เกิดจากความถี่ปานกลาง	11
2.11 คุณภาพผิวงานที่เกิดจากความถี่สูง	12
2.12 ลักษณะการทำงานของสารไดอิเล็กตริกเพื่อขยับเศษโลหะ	12
2.13 อนุภาคของเศษโลหะที่หลุดออกมากับสารไดอิเล็กตริก	12
2.14 ภาพขยายขนาดอนุภาคของเศษ โลหะที่หลุดออกมากับสารไดอิเล็กตริก	13
2.15 ลักษณะรูปทรงของอิเล็กโตรดทองแดง	14
2.16 การเกิดหลุมและแอ่งที่เกิดจากพลังงานความร้อนจากการสปาร์ค	16
2.17 พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อคุณภาพผิวงาน	17
2.18 การคำนวณค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra)	17
2.19 การคำนวณค่าความหยาบผิวสูงสุด (Ry)	18
2.20 การคำนวณค่าความหยาบผิวเฉลี่ยสิบจุด (Rz)	18
2.21 ชั้นสีชาวจะเกิดเป็นบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ)	19
2.22 รอยกัดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์	20
2.23 หลักการชุบเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า (Electroplating)	21
2.24 การต่อขั้วในการชุบผิวชิ้นงาน	24
2.25 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของอิเล็กโตรด	25
3.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ	30
3.2 กระบวนการเตรียมอิเล็กโตรดทองแดงชนิดของแข็ง	30
3.3 กระบวนการเตรียมอิเล็กโตรดทองแดงชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง	31
3.4 กระบวนการเตรียมอิเล็กโตรดเหล็กกล้าคาร์บอน Ss37 ชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง	32

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5 เครื่องกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้ายี่ห้อ Aristech รุ่น 3D-CNC EDM	34
3.6 หน้าจอแสดงเวลารวมในการทำงาน (Machining Time)	35
3.7 การจับยึดชิ้นงานและติดตั้งอุปกรณ์วัดระยะลึกหรือของอิเล็กทรอนิกส์	36
3.8 จุดอ้างอิงผิวงานในการสปาร์ค	36
3.9 พิกัดจุดศูนย์ของอิเล็กทรอนิกส์ก่อนการสปาร์ค	37
3.10 การสปาร์คชิ้นงานเหล็กกล้า AISI P20	37
3.11 ค่าการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์ที่อ่านจากนาฬิกาวัดที่พิกัดจุดศูนย์หลังการสปาร์ค	38
3.12 เครื่องวัดความหยาบผิวเฉลี่ยยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น SurfTest 301	38
3.13 เครื่องทดสอบความแข็งไมโครวิกเกอร์ Matsuzawa รุ่น MMT-X7	39
3.14 การแสดงหน้าจอของเครื่องทดสอบความแข็ง Matsuzawa รุ่น MMT-X7	39
3.15 รอยกวัดความแข็ง	40
4.1 อัตราการขจัดเนื้องานภายใต้ปัจจัยประสิทธิภาพโดยการปรับเวลาเปิด	53
4.2 อัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์ภายใต้ปัจจัยประสิทธิภาพโดยการปรับเวลาเปิด	54
4.3 อิเล็กทรอนิกส์ของแข็งเมื่อผ่านการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า	54
4.4 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยภายใต้ปัจจัยประสิทธิภาพโดยการปรับเวลาเปิด	55
4.5 ลักษณะผิวงานที่เกิดจากค่าปัจจัยประสิทธิภาพ โดยเวลาเปิด (กำลังขยาย 35 เท่า)	55
4.6 การเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งภายใต้ปัจจัยประสิทธิภาพโดยการปรับเวลาเปิด	56
4.7 อัตราการขจัดเนื้องานภายใต้ปัจจัยประสิทธิภาพโดยการปรับเวลาเปิด	57
4.8 อัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์ภายใต้ปัจจัยประสิทธิภาพโดยการปรับเวลาเปิด	58
4.9 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยภายใต้ปัจจัยประสิทธิภาพโดยการปรับเวลาเปิด	58
4.10 ลักษณะผิวงานที่เกิดจากปัจจัยประสิทธิภาพโดยการปรับปิด (กำลังขยาย 35 เท่า)	59
4.11 การเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งภายใต้ปัจจัยประสิทธิภาพโดยการปรับเวลาเปิด	59
4.12 อัตราการขจัดเนื้องานภายใต้การปรับกระแส	60
4.13 อัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์ภายใต้การปรับกระแส	61
4.14 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยภายใต้การปรับกระแส	61
4.15 ลักษณะผิวงานที่เกิดจากการปรับกระแส (กำลังขยาย 35 เท่า)	62
4.16 การเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งภายใต้การปรับกระแส	62
4.17 อัตราการขจัดเนื้องานภายใต้การปรับเวลาหน่วงในการสปาร์ค	63
4.18 อัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์ภายใต้การปรับเวลาหน่วงในการสปาร์ค	64

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยภายใต้การปรับเวลาหน่วงในการสปาร์ค	64
4.20 การเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งภายใต้การปรับเวลาหน่วงในการสปาร์ค	65
4.21 อัตราการจัดเนื้องานของอิเล็กโตรดทองแดงแท่งตันที่ระดับความลึกต่างกัน	66
4.22 อัตราการจัดเนื้องานของอิเล็กโตรดทองแดงแท่งตันที่ระดับความลึกต่างกัน	66
4.23 อัตราการจัดเนื้องานของอิเล็กโตรดชุบเคลือบผิวที่ระดับความลึกต่างกัน	67
4.24 อัตราการจัดเนื้องานของอิเล็กโตรดชุบเคลือบผิวที่ระดับความลึกต่างกัน	67



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ได้มีการพัฒนากระบวนการผลิตแม่พิมพ์พลาสติกโดยมีการนำเทคโนโลยีที่เรียกว่าการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า [1] (EDM : Electrical Discharge Machine) เข้ามาใช้ในกระบวนการกัดเซาะวัสดุชิ้นงานที่มีความแข็งสูง และรูปทรงที่ยากต่อการขึ้นรูปด้วยกระบวนการทางกล [2] หลักการทำงานของเครื่องจะอาศัยความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาทางไฟฟ้าที่ส่งผ่านวัสดุตัวนำที่เรียกว่า “Tool Electrode” ทำให้เกิดการหลอมละลายของเนื้อโลหะออกเป็นอนุภาคขนาดเล็กภายใต้ของเหลวที่เรียกว่าสาร “Dielectric” ลักษณะการหลอมละลายของเนื้อโลหะจะเกิดในบริเวณที่เล็กมากๆ ทำให้สามารถควบคุมผิวชิ้นงานที่ถูกขจัดออกมีลักษณะเหมือนกับอิเล็กโตรด [3] การวัดประสิทธิภาพของกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าจะวัดอยู่ในรูปของอัตราการขจัดเนื้องาน และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดเป็นหลัก อัตราการขจัดเนื้องานและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดเป็นผลมาจากการปรับพารามิเตอร์เพื่อให้เกิดความร้อนซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพผิวงาน และการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งผิวงาน ซึ่งในงานแม่พิมพ์นั้นหากวัสดุแม่พิมพ์มีการชุบแข็งแล้วขึ้นรูปซ้ำด้วยกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็งผิวงานได้ในสองลักษณะคือการเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งขึ้น หรือการลดลงของค่าความแข็ง ซึ่งส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานของแม่พิมพ์

กระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าวัสดุอิเล็กโตรด และวัสดุชิ้นงานมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานและคุณภาพผิวงาน จึงทำให้มีการคิดค้นวัสดุอิเล็กโตรดที่หลากหลายมากขึ้นเพื่อให้เหมาะสมกับวัสดุชิ้นงานและรวดเร็วต่อการผลิต [4] หนึ่งในกระบวนการเหล่านั้นคือการขึ้นรูปด้วยกระแสไฟฟ้า (Electroplating) วัสดุแม่พิมพ์พลาสติก AISI P20 เป็นวัสดุกลุ่มเหล็กกล้าซึ่งเหมาะสมที่จะใช้วัสดุอิเล็กโตรดเป็นทองแดง [1,2] จึงจำเป็นต้องศึกษาผลกระทบของทองแดงแท่งตัน และทองแดงชุบเคลือบผิวโดยใช้พารามิเตอร์พื้นฐานของกระบวนการ [4,5,6] อันได้แก่ เวลาเปิด (On-Time) เวลาปิด (Off-Time) กระแส (Current) และเวลาดำเนินงาน (Working Time) เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับชนิดอิเล็กโตรด เพื่อให้เกิดปัจจัยประสิทธิภาพสูงสุดและลดผลกระทบของกระบวนการที่มีต่อวัสดุแม่พิมพ์พลาสติก

เนื่องจากกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าเป็นกระบวนการที่อาศัยความร้อน ปัจจัยหลักที่ก่อให้เกิดความร้อนได้แก่กระแส และมีการควบคุมความร้อนโดยเวลาเปิด เวลาปิด และเวลาดำเนินงาน จึงจำเป็นต้องศึกษาระดับช่วงของพารามิเตอร์ดังกล่าวเพื่อศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อประสิทธิภาพการทำงานจากอิเล็กโตรดทองแดงแท่งตัน และอิเล็กโตรดชนิดชุบเคลือบผิวอันได้แก่

อิเล็กโทรดทองแดงชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง และอิเล็กโทรดเหล็กกล้า DIN St37 โดยวัดค่าประสิทธิภาพการทำงานในรูปของอัตราการกัดเนื้องาน และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด และวัดผลกระทบที่มีต่อผิวงานในรูปของค่าความหยาบผิวเฉลี่ย และการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งผิวงาน สำหรับใช้ในการเปรียบเทียบชนิดอิเล็กโทรด และเป็นแนวทางในการเลือกใช้พารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับชนิดของอิเล็กโทรด

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานและคุณภาพผิวงานในกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า

1.2.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานและคุณภาพผิวงานในกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าที่เกิดจากอิเล็กโทรดทองแดงแท่งตัน และอิเล็กโทรดชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง

1.3 สมมุติฐานการศึกษา

จากการทบทวนงานวิจัย และค้นคว้าข้อมูลงานด้านกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าทำให้ทราบว่าชนิดของวัสดุอิเล็กโทรด และวัสดุชิ้นงานมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของกระบวนการ โดยวัสดุอิเล็กโทรดทองแดงเหมาะสมสำหรับการกัดเซาะวัสดุงานที่เป็นเหล็กกล้า แต่ยังไม่สามารถบ่งชี้ได้แน่ชัดว่าทองแดงแท่งตันที่เกิดจากการเย็นตัวของน้ำโลหะ และทองแดงของแข็งที่เกิดจากการจับตัวของอนุภาคทองแดงในสารละลายที่เรียกว่าการชุบเคลือบผิว (Electroplating) ให้ประสิทธิภาพการทำงานแตกต่างกันมากนักน้อยเพียงใดเพื่อใช้เป็นแนวทางในการลดต้นทุนวัสดุอิเล็กโทรดและซ่อมแซมอิเล็กโทรดที่เกิดการสึกหรอเนื่องจากการใช้งาน

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

1.4.1 อิเล็กโทรดแท่งตันเป็นทองแดงรีดขึ้นรูป

1.4.2 อิเล็กโทรดชุบเคลือบผิวที่ใช้เป็นสารละลายทองแดงด่าง (Alkaline Cyanide Copper) ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเพลตติ้ง (Electroplating) บนวัสดุดังต่อไปนี้

ก. ทองแดงแท่งตัน

ข. เหล็กกล้า St37

1.4.3 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าได้แก่

ก. เวลาเปิด (On-time) คือช่วงเวลาที่เกิดการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า

ข. เวลาปิด (Off-time) คือช่วงเวลาที่หยุดการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า

ค. กระแส (Current) คืออัตราการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าต่อหน่วยเวลา

ง. เวลาหน่วยในการสปาร์ค (Working time) คือช่วงระยะเวลาที่เกิดการสปาร์ค (ไม่ใช่ Machining Time)

1.4.4 ประสิทธิภาพการทำงาน โดยการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าที่ใช้ในการเปรียบเทียบได้แก่

ก. อัตราการขจัดเนื้องาน (MRR : Material Removal Rate)

ข. อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (TWR : Tool Wear Ratio)

ค. คุณภาพผิวงานในรูปของความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra : Roughness average)

ง. คุณภาพผิวงานในรูปของการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งผิวงาน (Hardness)

1.4.5 ทำการกัดเซาะชิ้นงานเป็นหลุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ลึก 0.5 มิลลิเมตร ในสารไดอิเล็กตริกที่เป็นสารไฮโดรคาร์บอน (Spark Erosion 102(HF))

1.4.6 ขจัดเศษโดยการฉีดสารไดอิเล็กตริกด้านข้างด้วยแรงดัน 1 kg/cm^2 อัตราการไหล 12 l/min

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1.5.1 ศึกษาความเป็นไปได้เพื่อทำการกำหนดชนิดอิเล็กโทรด

1.5.2 ทำการทดลองเบื้องต้นเพื่อกำหนดพารามิเตอร์

1.5.3 ทำการทดลองเพื่อเก็บค่าประสิทธิภาพการทำงานและคุณภาพผิวงานในรูปของ

ก. อัตราการขจัดเนื้องาน (MRR : Material Removal Rate)

ข. อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (TWR : Tool Wear Ratio)

ค. คุณภาพผิวงานในรูปของความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra : Roughness average)

ง. คุณภาพผิวงานในรูปของการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งผิวงาน (Hardness)

1.5.4 ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงาน

1.5.5 ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงาน และคุณภาพผิวงานของอิเล็กโทรดทองแดง แท่งตันและอิเล็กโทรดชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง

1.5.6 สรุปผลงานวิทยานิพนธ์

1.6 ข้อจำกัดของการศึกษา

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานไม่สามารถทำได้โดยตรงจึงจำเป็นต้องเปรียบเทียบภายใต้เงื่อนไขที่ดีที่สุดของแต่ละชนิดวัสดุอิเล็กโทรด

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 ทราบถึงค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า

1.7.2 เลือกใช้พารามิเตอร์ในการกัดเซาะได้เหมาะสมกับชนิดของอิเล็กโทรด

1.7.3 เป็นแนวทางในการเลือกใช้อิเล็กโทรดชุบเคลือบผิว

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

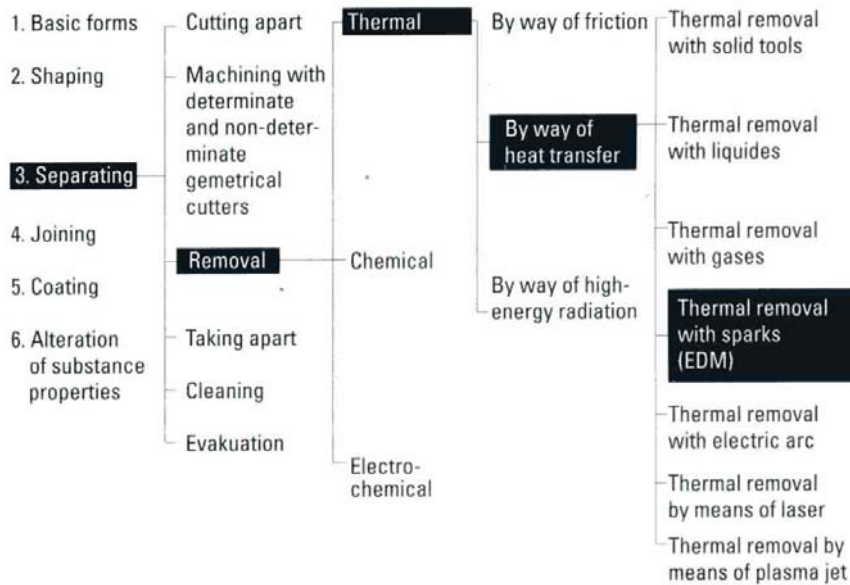
2.1 แนวความคิด

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า กระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าเป็นกระบวนการที่วัสดุขั้วที่เรียกว่าอิเล็กโทรดมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการกัดเซาะของกระบวนการ ตลอดจนคุณภาพผิวงาน โดยในปัจจุบันนี้ได้มีการคิดค้นกระบวนการผลิตอิเล็กโทรดมากมายเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการทำงานที่สูง และผิวงานที่มีคุณภาพ หนึ่งในกระบวนการที่ถูกนำมาใช้คือกระบวนการชุบเคลือบผิวด้วยกระแสไฟฟ้าดังจะเห็นได้จากวรรณกรรมต่างๆ ที่มีการเผยแพร่ แต่ยังไม่มียานวิจัยที่บ่งชี้ได้แน่ชัดว่าทองแดงแท่งต้นที่เกิดจากการเย็นตัวของน้ำโลหะ และทองแดงของแข็งที่เกิดจากการจับตัวของอนุภาคทองแดงในสารละลายที่เรียกว่าการชุบเคลือบผิว (Electroplating) ให้ประสิทธิภาพการทำงานแตกต่างกันมากนักน้อยเพียง ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงมีแนวความคิดที่จะสร้างอิเล็กโทรดที่เป็นทองแดงชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง และอิเล็กโทรดเหล็กกล้าชุบเคลือบผิวด้วยทองแดงเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับอิเล็กโทรดทองแดงที่รีดขึ้นรูป โดยใช้กระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าสำหรับศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงาน ซึ่งค่าที่วัดได้แก่อัตราการขจัดเนื้องาน อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด และผลกระทบที่มีต่อคุณภาพผิวงานในส่วนของความหยาบผิวเฉลี่ย และการเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็งผิวงานจากความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาทางไฟฟ้าในกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 การกัดเซาะด้วยไฟฟ้า (EDM : Electrical Discharge Machining)

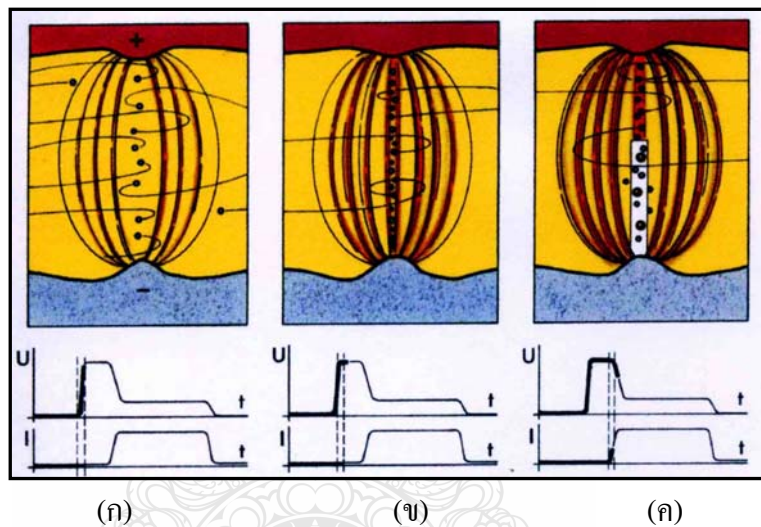
จากนิยามตามมาตรฐาน DIN 8580 ดังรูปที่ 2.1 สามารถจัดได้ว่ากระบวนการกัดกร่อนของเครื่องกัดเซาะด้วยไฟฟ้าเป็นกระบวนการแยก (Separating) อนุภาค (Particles) ของวัสดุ (Materials) โดยอาศัยความร้อนจากการสปาร์คของไฟฟ้าให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (Electrochemical) เข้าไปทำลายพันธะการจับยึดของอนุภาคออกจากเนื้อวัสดุในรูปของของแข็ง ของเหลวหรือแก๊ส การกัดกร่อนด้วยไฟฟ้า (Electroerosion) ตามมาตรฐานดังกล่าวยังรวมไปถึงจ่ายประจุระหว่างขั้วสองขั้วเพื่อให้เกิดการสึกกร่อนในของเหลว (Dielectric Fluid) อีกด้วย [1]



รูปที่ 2.1 การจำแนกนิยามของกระบวนการผลิตตามมาตรฐาน DIN 8580 [1]

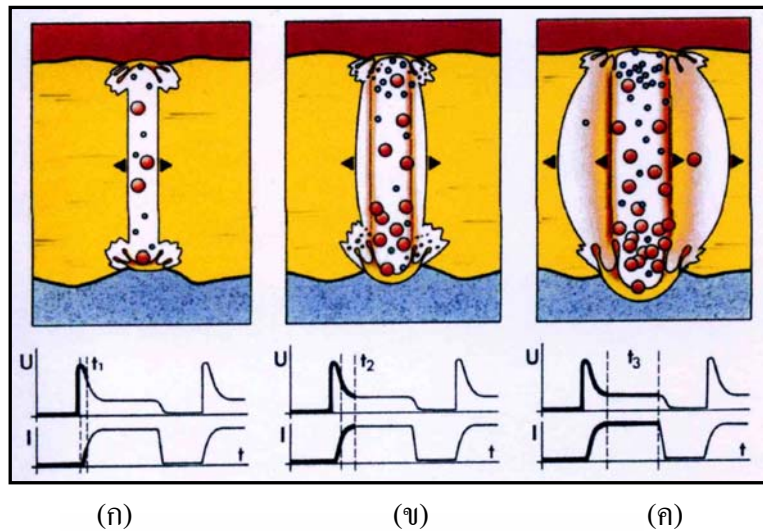
หากกล่าวถึงการกัดเซาะด้วยกระแสไฟฟ้าจะทราบกันดีว่าเป็นรูปแบบของการขจัดเนื้อที่อาศัยการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่ความถี่สูง ทำให้เกิดการขจัดเนื้องานโดยสามารถประยุกต์ใช้ได้ทั้งไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับโดยชิ้นงาน (Workpiece) จะไม่สัมผัสกับเครื่องมือตัด (Electrode) เนื้องานที่หลุดออกไปจะมีอนุภาคขนาดเล็กอยู่ในรูปของอนุภาคของแข็ง ของเหลว และแก๊ส ถึงแม้ว่าอิเล็กโตรดจะอยู่ใกล้ชิ้นงานเพียงใดก็จะไม่สัมผัสกับผิวชิ้นงาน แต่จะมีการปล่อยประจุของกระแสไฟฟ้าผ่านของเหลว (Dielectric Fluid) ที่กั้นอยู่ระหว่างอิเล็กโตรดและชิ้นงาน ระยะห่างดังกล่าวจะเรียกว่าแก๊ป (Gap) การปล่อยประจุของกระแสไฟฟ้าผ่านแก๊ปดังกล่าวทำให้เกิดการสปาร์คที่มีอุณหภูมิที่สูงถึง 8,000 ถึง 12,000 องศาเซลเซียส ทำให้ผิวชิ้นงานเกิดการหลอมละลายและระเหยกลายเป็นไอ กระบวนการดังกล่าวนิยมใช้กับวัสดุชิ้นงานที่มีความแข็งสูงและรูปทรงที่ไม่สามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการทางกล [2] โดยในยุคก่อนสงครามโลกครั้งที่สองประมาณ 40 ปีการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าเป็นกระบวนการที่ใช้สำหรับเจาะรูชิ้นส่วนที่มีราคาแพงโดยจะใช้มือเป็นตัวป้อนอิเล็กโตรด และเมื่อมาถึงยุคสงครามโลกครั้งที่สองบริษัท Russian Scientists, B.R. และบริษัท N.I. Lazarenko ได้ปฏิบัติเครื่องกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้าโดยการติดตั้งระบบป้อนด้วยเซอร์โวมอเตอร์เป็นครั้งแรก และต่อมาได้มีการเปลี่ยนแปลงปรับปรุงจากการใช้วงจรความต้านทานร่วมกับตัวเก็บประจุ (RC : Resistor Capacitance) มาเป็น Power Supplies และในปัจจุบันได้มีการพัฒนาติดตั้งระบบการทำงานเป็นแบบอัตโนมัติควบคุมการเคลื่อนที่แบบหกแกน (CNC 6 Axis) และได้มีการพัฒนาการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าให้มีความก้าวหน้ามากขึ้นเกิดเป็นเครื่องจักรน้องใหม่อย่างเครื่องตัดด้วยลวดโดยการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า (WEDM : Wire Cut Electrical Discharge Machining)

การจัดเรียงงานจากกระบวนการกัดเซาะด้วยกระแสไฟฟ้ากระทำซ้ำเป็นวัฏจักร โดยเริ่มจากการกำเนิดแรงดันไฟฟ้าสูงสุดโดยไม่เกิดการไหลผ่านของกระแสระหว่างอิเล็กโทรดและผิวชิ้นงานในสารไดอิเล็กทริกดังรูปที่ 2.2 (ก) โดยสถานะเริ่มต้นนี้จะเป็นการสร้างเก็บ สถานะที่สองเป็นสถานะของการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic) เพื่อปกคลุมพื้นผิวบริเวณที่จะกัดกร่อนด้วยแรงดันไฟฟ้าสูงสุดคงที่โดยที่ไม่มีกระแสไหลผ่านระหว่างอิเล็กโทรดและผิวงานดังรูปที่ 2.2 (ข) สถานะที่สามเป็นสถานะที่เกิดการลดลงของแรงดันไฟฟ้าพร้อมกับเริ่มปล่อยให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวงานซึ่งทำให้เกิดเป็นสถานะเริ่มต้นของการสปาร์ก และเมื่อเกิดการสปาร์กจะส่งผลให้เกิดสถานะการเริ่มต้นของการเกิดสูญญากาศตามมาดังรูปที่ 2.2 (ค)



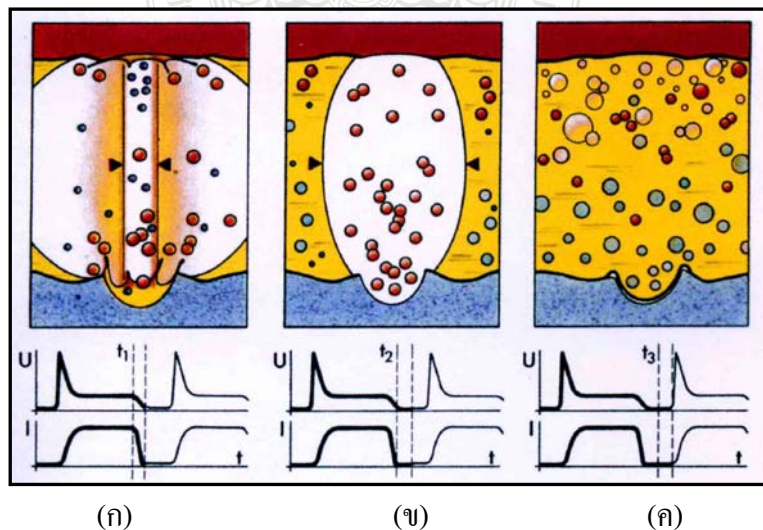
รูปที่ 2.2 สถานะการสร้าง Gap ในการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า [1]

สถานะที่สี่เป็นสถานะที่แรงดันไฟฟ้าสูงสุดลดต่ำลงโดยที่กระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดการสปาร์กที่รุนแรง ช่องว่างสูญญากาศเพิ่มมากขึ้นดังรูปที่ 2.3 (ก) สถานะที่ห้าเป็นสถานะของการลดแรงดันไฟฟ้าสูงสุดลดต่ำสุด และกระแสเพิ่มขึ้นสูงสุดทำให้ความรุนแรงของการสปาร์กเพิ่มมากขึ้น เป็นเหตุให้เกิดอุณหภูมิที่สูงขึ้นซึ่งส่งผลให้ช่องว่างสูญญากาศขยายตัวมากขึ้นดังรูปที่ 2.3 (ข) สถานะที่หกเป็นสถานะคงที่ของกระแสและแรงดันเพื่อให้การจัดเรียงงาน หากสถานะนี้ยาวนานเกินไปจะทำให้เกิดการหลอมละลายเป็นหลุมขนาดใหญ่และลึก ขณะเดียวกันการเกิดช่องว่างของสูญญากาศก็ขยายตัวสูงสุดที่สถานะนี้ด้วยเช่นกันซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่ 2.3 (ค)



รูปที่ 2.3 สถานะการสปาร์คในการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า [1]

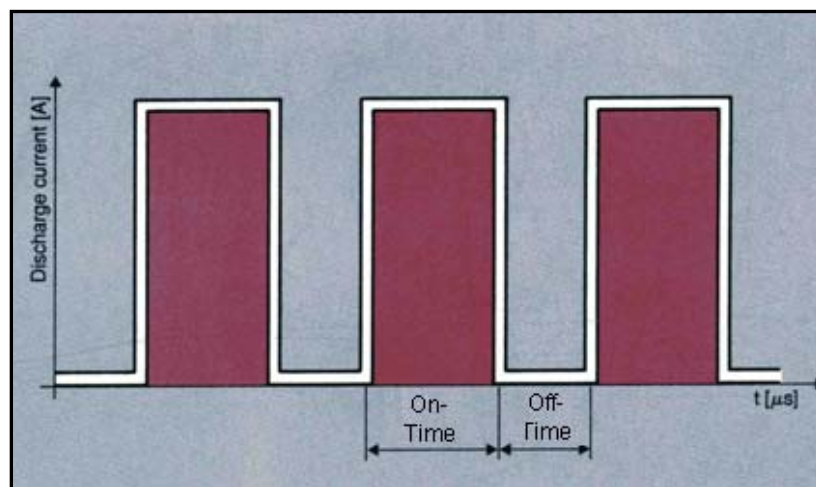
สถานะที่เจ็ดเป็นสถานะของการลดกระแสและแรงดัน สถานะนี้จะทำให้เข้าสู่สถานะสุดท้ายของการสปาร์คช่องว่างสุญญากาศจะเริ่มดึงสารไดอิเล็กตริกที่อยู่โดยรอบเข้ามาขจัดเศษเนื้องานที่หลอมเหลวออกและเป็นจุดเริ่มต้นของการหล่อเย็นดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ก) สถานะที่แปดเป็นสถานะที่ไม่มีทั้งกระแสและแรงดันไฟฟ้าทำให้สิ้นสุดของการสปาร์ค ช่องว่างสุญญากาศจะเกิดการหดตัวอย่างรวดเร็วทำสารไดอิเล็กตริกเข้ามาขจัดเศษเนื้องานและหล่อเย็นชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ข) สถานะที่เก้าเป็นสถานะสุดท้ายและเป็นสถานะคือกระบวนการปกคลุมพื้นผิวด้วยสารไดอิเล็กตริกก่อนเริ่มต้นวัฏจักรต่อไปดังรูปที่ 2.4 (ค)



รูปที่ 2.4 สถานะการ Cooling ในการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า [1]

จากวัฏจักรการทำงานดังรูปที่ 2.5 ทำให้เกิดความสัมพันธ์ระหว่างเวลาปล่อยประจุกระแสไฟฟ้าที่เรียกว่าเวลาเปิด (On-Time) กับเวลาหยุดจ่ายประจุกระแสไฟฟ้าที่เรียกว่าเวลาปิด (Off-Time) โดยสามารถวัดประสิทธิภาพของการทำงานในหนึ่งวัฏจักร (Duty Cycle) [2] ของการสปาร์กเท่ากับเวลาเปิดต่อเวลารวมในหนึ่งวัฏจักร (Total Cycle Time = On-Time + Off-time) ดังแสดงในสมการที่ 2.1

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

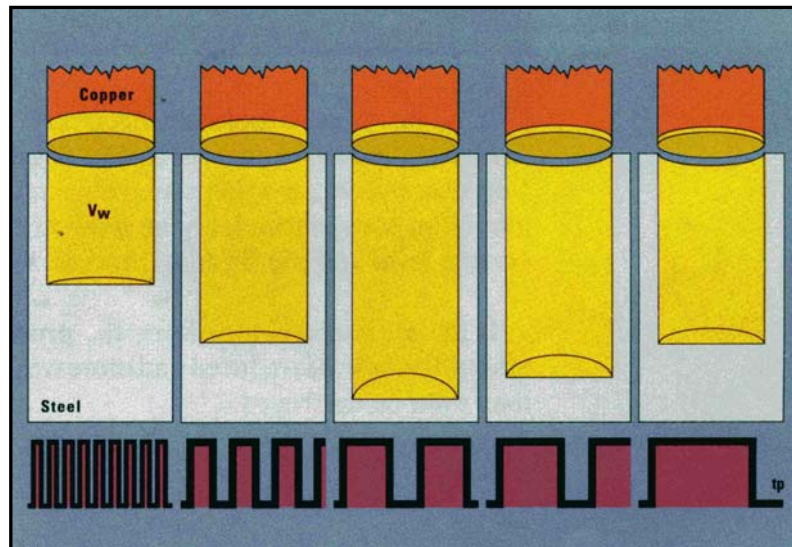


รูปที่ 2.5 ช่วงระยะเวลาเปิด และปิดเพื่อให้เกิดการถ่ายเทประจุ [1]

จากสมการหากลดเวลาปิดเพียงเล็กน้อยจะทำให้ Duty Cycle สูงขึ้นแต่จะมีผลต่อการปรับสภาพแวดล้อมในการสปาร์ก วัสดุอิเล็กโทรด วัสดุชิ้นงาน และสภาพแวดล้อมของสารไดอิเล็กตริกตลอดจนความสามารถในการรักษาสภาพความนำไฟฟ้า และความเสถียรในกระบวนการขจัดเนื้องานเป็นอย่างมาก [2]

ก. เวลาเปิด (On-Time)

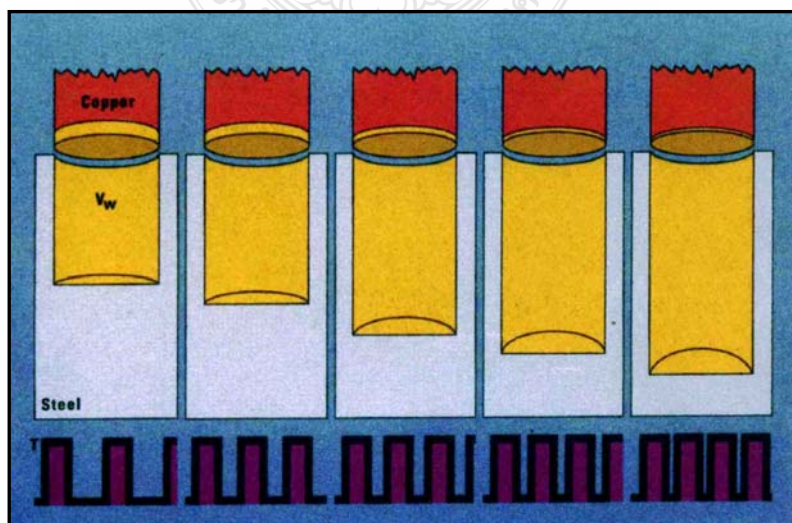
เวลาเปิดคือช่วงเวลาที่เกิดการถ่ายเทประจุของกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดการสปาร์กเป็นเนื้องาน โดยการสร้างแก๊ปจากความต้านทานของกระแส และใช้กระแสเป็นตัวกำเนิดพลังงานในการทำให้งานสำเร็จลง ระยะเวลาของการถ่ายเทประจุที่ยาวนานทำให้เกิดการหลอมละลายเป็นหลุมลึกที่มีความกว้างเกิดการหลุ่ร้อนของอนุภาคเป็นแอ่งขนาดใหญ่ที่มีความลึกมาก จึงส่งผลให้ผิวชิ้นงานมีความหยาบสูงกว่าระยะเวลาการถ่ายเทประจุที่สั้น นอกจากนี้เวลาเปิดที่สูงจะทำให้เกิดการหลอมละลายและแข็งตัวของผิวงานที่เรียกว่า Recasting แต่ในกรณีที่ใช้อิเล็กโทรดเป็นขั้วบวกจะทำให้การสึกหรอของอิเล็กโทรดลดลงเนื่องจากเกิดการเคลือบที่ผิวอิเล็กโทรด [1,2] ดังแสดงระยะเวลาเปิดกับการขจัดเนื้องานและการสึกหรอของอิเล็กโทรดในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ของเวลาเปิดต่อการเกิดขจัดเนื้องานและการสึกหรอของอิเล็กโทรด [1]

ข. เวลาปิด (Off-Time)

เวลาปิดคือช่วงเวลาที่หยุดพักการถ่ายเทพลังงานของกระแสไฟฟ้า ซึ่งไม่ทำให้เกิดการขจัดเนื้องาน แต่จะทำให้เกิดความเสถียรในกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า เมื่อเวลาปิดมากขึ้นทำให้ความเร็วในการทำงานลดลง แต่จะทำให้เกิดการระบายความร้อน และขจัดเศษอนุภาคที่หลุดออกจากชิ้นงานได้มากขึ้นทำให้เกิดความเสถียรในการรักษาความต้านทานของสารไดอิเล็กตริกซึ่งเป็นสิ่งสำคัญอย่างมากในการสร้าง Gap เพื่อให้พร้อมในการสปาร์คในวัฏจักรถัดไป [2] แต่เวลาปิดที่ต่ำจะทำให้เกิดการขจัดเนื้องานที่สูง การสึกหรอของอิเล็กโทรดต่ำ เนื่องจากพลังงานต่อหน่วยเวลาขณะถ่ายเทพลังงานในขณะที่เวลาระบายความร้อนซึ่งเป็นเวลาปิดต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.7



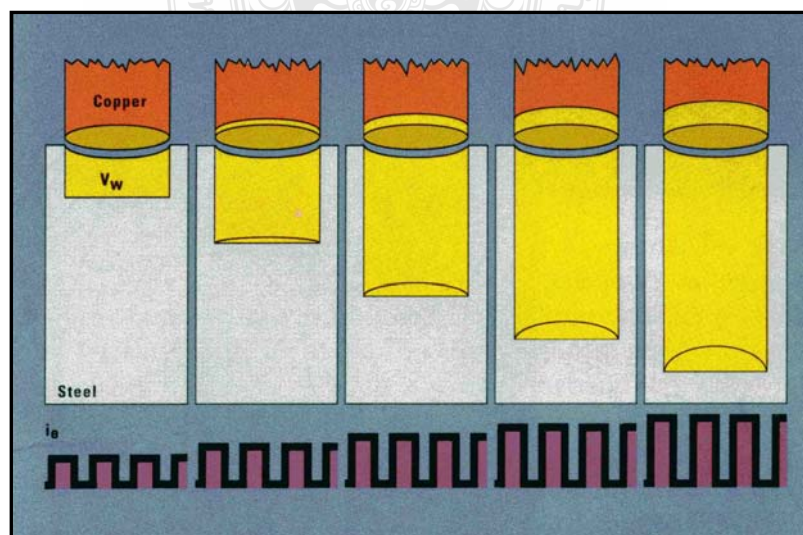
รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ของเวลาปิดต่อการเกิดขจัดเนื้องานและการสึกหรอของอิเล็กโทรด [1]

ก. กระแส (Current)

กระแสไฟฟ้าคือต้นกำเนิดของพลังงานที่ใช้ในการกัดเซาะของเครื่องจักร มีหน่วยวัดเป็นแอมแปร์ (A) ทั้งเครื่อง EDM และเครื่อง WEDM จะคำนวณค่ากระแสสูงสุดที่ใช้ต่อพื้นที่หน้าตัด (SA :Section Area) สำหรับงานขจัดเนื้องานแบบหยาบจะใช้กระแสที่แอมแปร์สูงซึ่งเหมาะกับงานที่ไม่ต้องการรายละเอียดผิวมากนัก แต่โดยทั่วไปแล้วเครื่อง EDM จะเลือกใช้กระแสสูงสุดตามกฎ 65 แอมแปร์ต่อพื้นที่ 1 ตารางนิ้วดังสมการที่ 2.2 [2]

$$\text{Maximum Amperage} = \text{SA} \times 65 \quad (2.2)$$

ตัวอย่างเช่น ถ้าอิเล็กโตรดพื้นที่หน้าตัด 0.5 ตารางนิ้ว จะต้องใช้กระแสสูงสุดเท่ากับ $0.5 \times 65 = 32.5$ แอมแปร์ อย่างไรก็ตามกฎกระแส 65 แอมแปร์ต่อตารางนิ้ว ก็ไม่สามารถใช้ได้กับอิเล็กโตรดที่มีหน้าตัดมากได้ เนื่องจากความต้านทานของกระแส การกระจายความร้อน และความถี่ของการเกิด Recasting บนเนื้อวัสดุ ซึ่งขึ้นอยู่กับความสามารถในการรักษาความความต้านทานของสารไดอิเล็กตริกก่อนเริ่มต้นการสปาร์ค ค่ากระแสที่สูงความถี่เหมาะกับการกัดเซาะผิวที่หยาบ เนื่องจากเกิดการกระจายตัวของความร้อนทำให้เกิดการหลอมเหลวเป็นแอ่งขนาดกว้างที่มีความลึกสูง ซึ่งส่งผลให้ไม่สามารถควบคุมกระบวนการทางความร้อนในรูปของคลายความเค้น หรือการอบอ่อนได้ เมื่อใช้กฎกระแสสูงสุดก็จำเป็นต้องปรับ Gap ให้มีความกว้างมากที่สุดตาม สิ่งสำคัญคือเมื่อกระแสเพิ่มมากขึ้นจะทำให้การขจัดเนื้องานและการสึกหรอของอิเล็กโตรดเพิ่มสูงขึ้นเป็นเงาตามตัวดังแสดงในรูปที่ 2.8



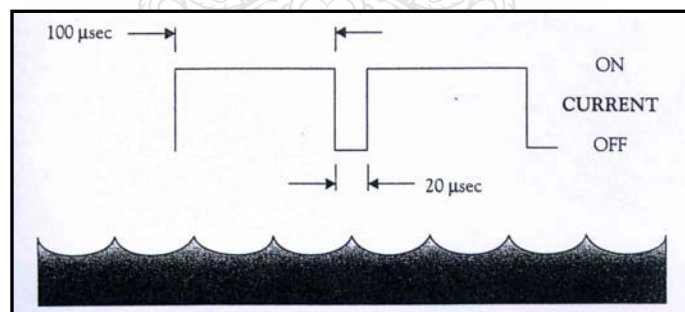
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ของกระแสต่อการเกิดขจัดเนื้องานและการสึกหรอของอิเล็กโตรด [1]

ง. ความถี่ (Frequency)

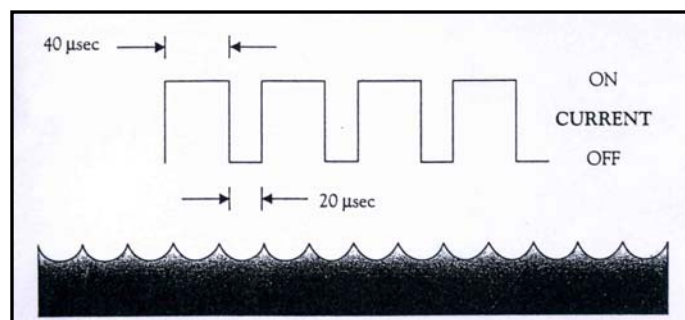
ความถี่เป็นผลที่เกิดมาจากเวลาเปิด และเวลาปิด โดยความถี่แตกต่างจาก Duty Cycle ตรงที่ความถี่คำนวณจากวัฏจักรที่เกิดขึ้นต่อหน่วยเวลา (Sec) ดังสมการที่ 2.3 [2] ซึ่งความถี่นี้จะส่งผลโดยตรงต่อความหนาพิวขึ้นงานและการขจัดเนื้อ

$$\text{Frequency} = \frac{1}{\text{Total Cycle Time}} \quad (2.3)$$

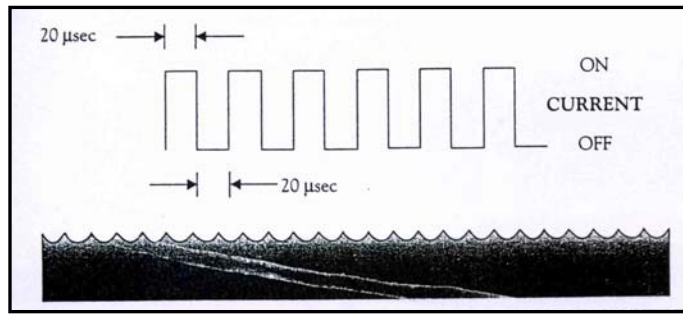
เวลาเปิดสูงเวลาปิดต่ำจะทำให้เกิดค่าความถี่ต่ำ ดังรูปที่ 2.9 ซึ่งจะทำให้ผิวขึ้นงานมีความหนาพิวมาก และมีกรขจัดเนื้องานที่สูง เนื่องจากเวลาปล่อยประจุที่ยาวนานทำให้ความร้อนที่เกิดจากการสปาร์ตกระจายตัวเป็นแอ่งกว้างและลึก ตลอดจนส่งผลให้เกิดเป็นชั้นการหลอมเหลวและแข็งตัวใหม่ที่เรียกว่า Recasting ที่มีความหนาสูง ซึ่งเป็นเหตุให้บริเวณกระทบที่เกิดจากความร้อน (HAZ : Heat Affected Zone) ลึกลงไปในเนื้องาน หากเวลาปิดลดต่ำลงจะทำให้เกิดความถี่ที่สูงขึ้นดังรูปที่ 2.10 ทำให้เกิดการหลอมละลายของการสปาร์ตเป็นแอ่งที่มีความกว้างและความลึกลดลง ซึ่งทำให้ความหนาพิวงานและความเร็วในการขจัดเนื้องานลดต่ำลง แต่อิเล็กทรอนิกส์เกิดการสึกหรอเพิ่มมากขึ้น หากเวลาเปิดลดลงต่ำมากจะทำให้เกิดเป็นความถี่สูงมาก ดังรูปที่ 2.11 ซึ่งจะส่งผลให้ความหนาพิวขึ้นงานและความเร็วในการขจัดเนื้องานลดลงเป็นอย่างมาก จึงทำให้ความถี่ที่สูงจะเหมาะกับการเก็บผิวละเอียดและวัสดุงานกลุ่มคาร์ไบด์ต่างๆ



รูปที่ 2.9 คุณภาพผิวงานที่เกิดจากความถี่ต่ำ [2]



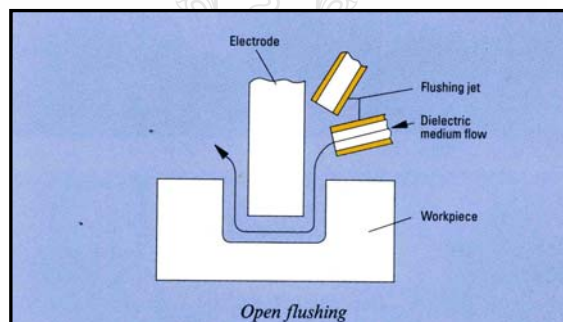
รูปที่ 2.10 คุณภาพผิวงานที่เกิดจากความถี่ปานกลาง [2]



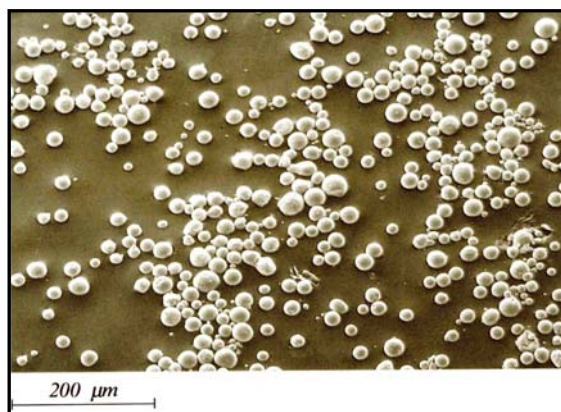
รูปที่ 2.11 คุณภาพผิวงานที่เกิดจากความถี่สูง [2]

จ. สารไดอิเล็กตริก (Dielectric)

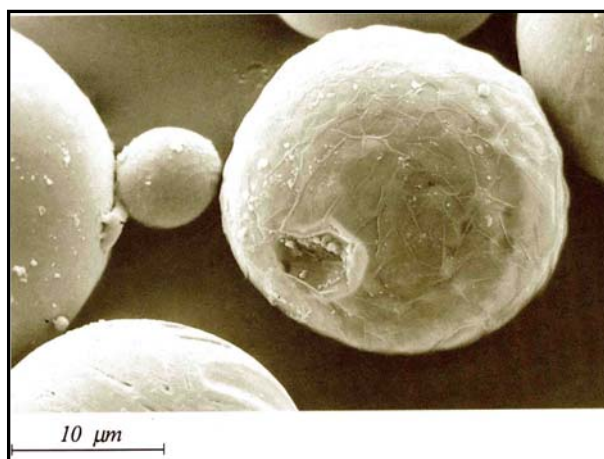
สารไดอิเล็กตริกเป็นของเหลวที่กั้นระหว่างชิ้นงานกับอิเล็กโทรด สารไดอิเล็กตริกที่นิยมใช้ ได้แก่ น้ำกำจัดไอออนหรือที่เรียกว่าน้ำกลั่น (De - Ionized Water) และสารไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) โดยสารไดอิเล็กตริกทำหน้าที่รักษาสภาพการนำไฟฟ้าและช่วยระบายความร้อนตลอดจนขจัดอนุภาคเศษโลหะออกจากบริเวณผิวงานเพื่อป้องกันการเกิด Undercut เนื่องจากการฝังตัวของเศษโลหะดังรูปที่ 2.12 เศษที่เกิดจากการขจัดเนื้อและถูกชะล้างออกโดยสารไดอิเล็กตริกมีอนุภาคที่เล็กมากดังแสดงในรูปที่ 2.13 และ รูปที่ 2.14



รูปที่ 2.12 ลักษณะการทำงานของสารไดอิเล็กตริกเพื่อขจัดเศษโลหะ [1]



รูปที่ 2.13 อนุภาคของเศษโลหะที่หลุดออกมาด้วยสารไดอิเล็กตริก [1]

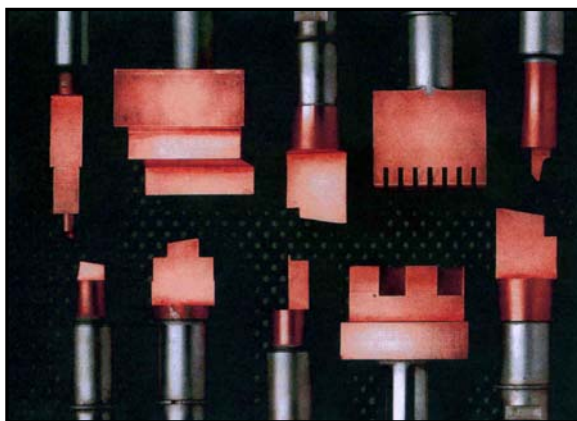


รูปที่ 2.14 ภาพขยายขนาดอนุภาคของเศษโลหะที่หลุดออกมาจากสารไดอิเล็กตริก [1]

สารไฮโดรคาร์บอนเมื่อสปาร์คจะแตกตัวกลายเป็นไฮโดรเจนซึ่งมีประจุเป็นบวก และคาร์บอนซึ่งมีประจุเป็นลบ [1,2] โดยคาร์บอนจะวิ่งเข้าหาขั้วบวก ถ้าอิเล็กโตรดเป็นขั้วบวกคาร์บอนก็จะวิ่งไปจับอิเล็กโตรด ซึ่งจะช่วยลดการสึกกร่อนของอิเล็กโตรดได้ แต่ถ้าอิเล็กโตรดที่ใช้เป็นลบ คาร์บอนจะวิ่งไปจับผิวงานทำให้ผิวชิ้นงานมีลักษณะเป็นสีดำคล้ำ ความแตกต่างระหว่างสารไฮโดรคาร์บอนและน้ำคือ สารไฮโดรคาร์บอนมีค่าความต้านทานสูงกว่าน้ำกลั่น ดังนั้นในกระบวนการกัดโลหะด้วยกระแสไฟฟ้าทั่วไปจึงนิยมใช้สารไฮโดรคาร์บอนเป็นของเหลวตัวกลาง เนื่องจากค่าความต้านทานที่สูงทำให้การถ่ายเทประจุเกิดขึ้นได้ยากจึงเกิด Gap ในการสปาร์คที่ต่ำทำให้ผิวชิ้นงานมีความปราณีตและละเอียดสูง แต่การขจัดเนื้องานจะลดลง เมื่อเทียบกับน้ำกลั่นซึ่งมีความต้านทานน้อยกว่าน้ำมันทำให้การถ่ายเทประจุระหว่างอิเล็กโตรดกับชิ้นงานเกิดขึ้นได้ง่าย Gap ที่เกิดขึ้นในการ สปาร์คจึงมีมากกว่าสารไฮโดรคาร์บอน เป็นผลให้อัตราการขจัดเนื้องานสูงแต่ความปราณีตจะน้อยความหยาบผิวจะสูง

จ. วัสดุอิเล็กโตรด (Electrode Materials)

วัสดุแต่ละชนิดมีสมบัติที่แตกต่างกัน จึงทำให้อิเล็กโตรดสามารถสร้างขึ้นจากวัสดุหลายชนิด ตามความเหมาะสมกับวัสดุชิ้นงานที่ทำการสปาร์คและสารไดอิเล็กตริกที่ใช้ โดยสมบัติวัสดุอิเล็กโตรดที่ดีควรมีสมบัติดังนี้คือ ง่ายต่อการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีที่มีค่าใช้จ่ายต่ำ ประสิทธิภาพในการขจัดเนื้อสูง อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดต่ำ สามารถกระจายความร้อนและนำไฟฟ้าได้ดี ที่สำคัญคือต้านทานต่อการผิครูป วัสดุบางชนิดที่มีอัตราการสึกหรอต่ำ แต่ก็ยากที่จะนำมาขึ้นรูปเป็นอิเล็กโตรด วัสดุที่ใช้ในกระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้าที่เหมาะสมกับเหล็กกล้าคือทองแดง[1,2] (Copper) ซึ่งเป็นธาตุเคมีที่มีหมายเลขอะตอม 29 และสัญลักษณ์คือ Cu เป็นวัสดุที่นิยมใช้เป็นวัสดุอิเล็กโตรดมากที่สุดเนื่องจากขึ้นรูปได้ง่ายและให้ผลกระทบต่อการใช้สปาร์คน้อยมากโดยทองแดงมีสมบัติดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.15 ลักษณะรูปทรงของอิเล็กทรอนิกส์ทองแดง [1]

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติที่สำคัญของทองแดง

สมบัติ	ทองแดง (Cu)
ความหนาแน่น (kg/cm ³)	8.96
จุดหลอมเหลว (°C)	1084.62
ความต้านทาน (20°C) (mΩ.m)	16.78
การนำความร้อน (300 K)(w/cm.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 สำหรับงานที่ต้องการปริมาณกำลังผลิตสูงโดยมีสมบัติทางกลตามตารางที่ 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 /°C)	12.8 ที่อุณหภูมิ 20 – 425 °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 การวัดประสิทธิภาพของกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า (Measuring of Performance in EDM)

กระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการกัดกร่อน ซึ่งเป็นเหตุให้เกิดการสึกหรอของอิเล็กโทรด ซึ่งขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของกระบวนการ โดยทั่วไปแล้วจะวัดความสามารถในการกัดเซาะเนื้องานอยู่ในรูปของอัตราการขจัดเนื้องาน และวัดการสึกกร่อนของอิเล็กโทรดอยู่ในรูปของอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด ตลอดจนวัดประสิทธิภาพการทำงานที่มีผลต่อวัสดุชิ้นงานอยู่ในรูปของคุณภาพผิวงาน (Surface Quality) โดยส่วนใหญ่จะวัดอยู่ในรูปของความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) นอกจากนี้แล้วความร้อนที่เกิดขึ้นยังส่งผลต่อผิวชิ้นงาน ซึ่งวัดได้จากการเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็งผิวงาน (Hardness)

ก. อัตราการขจัดเนื้องาน (MRR : Materials Removal Rate)

การขึ้นรูปด้วยวิธีกัดกร่อนด้วยไฟฟ้า อัตราการขจัดเนื้องานจะต่ำมากเมื่อเทียบกับวิธีการอื่นๆ เช่น การตัด การกัดและการกลึง ในการใช้เงื่อนไขที่การขึ้นรูปดำเนินไปอย่างช้าๆ นั้นทำให้อัตราการขจัดเนื้องานต่ำ แต่ถ้าปรับใช้เงื่อนไขที่ทำให้อัตราการขจัดเนื้องานสูงอาจทำให้ค่าความหยาบผิวสูงขึ้น อัตราขจัดเนื้องานจะมีหน่วยเป็นปริมาตรของเนื้อวัสดุที่ถูกขจัดออกไปต่อหน่วยเวลาดังสมการที่ 2.4

$$\text{อัตราการขจัดเนื้องาน (MRR)} = \frac{\text{ปริมาตรเนื้องานที่สึกหรอไป (g หรือ mm}^3\text{)}}{\text{เวลาที่ใช้ (min)}} \quad (2.4)$$

ข. อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (TWR : Tool Wear Ratio)

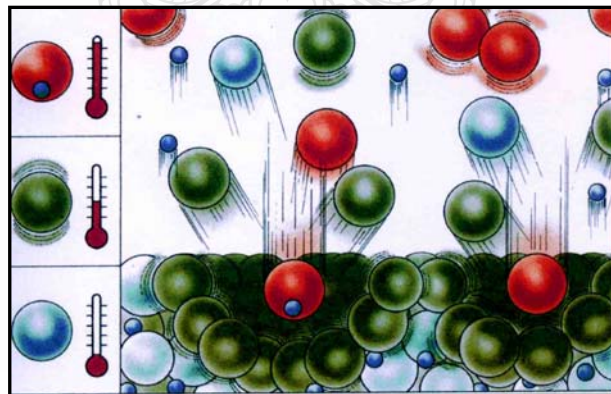
การกัดกร่อนวัสดุงานจะทำให้อิเล็กโทรดเกิดการสึกหรอซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามปัจจัย

ต่างๆ เช่น เงื่อนไขการกัดเซาะ หรือการเลือกใช้วัสดุของอิเล็กโทรด กับวัสดุที่เป็นชิ้นงาน สภาพการไหลของสารละลายนั้น ดังนั้น เราจำเป็นต้องคำนวณการสึกหรอนี้ไว้ล่วงหน้า เพื่อกำหนดปริมาณขั้นสุดท้ายของขั้วไฟฟ้าสำหรับอัตราการสึกหรอดังกล่าวนี้ ถ้าต่ำกว่า 1% ก็จะเรียกว่าไม่เกิดการสึกหรอ และถ้าอยู่ในช่วง 1 – 10% แสดงว่าอัตราการสึกหรอที่เกิดขึ้นอยู่ในระดับการสึกหรอต่ำ หากสูงเกินกว่า 10% แสดงว่ามีการสึกหรอ โดยปกติแล้วการขึ้นรูปหยาบจะไม่เกิดสึกหรอของอิเล็กโทรด แต่ถ้าเป็นการขึ้นรูปละเอียดอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดจะอยู่ในเกณฑ์ต่ำ โดยอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดสามารถคำนวณได้จากสมการ 2.5

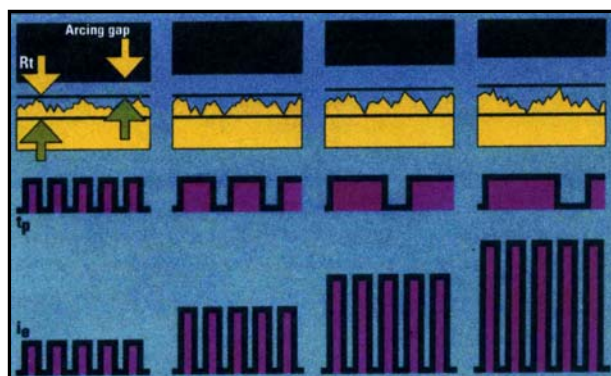
$$\text{อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (TWR)} = \frac{\text{ปริมาตรขั้วไฟฟ้าที่สึกหรอไป (g หรือ mm}^3\text{)} \times 100}{\text{ปริมาตรเนื้องานที่ถูกขจัดออก (g หรือ mm}^3\text{)}} \quad (2.5)$$

ค. คุณภาพผิวงานในรูปของความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra : Roughness average)

ความหยาบผิวงานในกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าเกิดจากกระแส และระยะเวลาเปิดที่ทำให้เกิดการถ่ายเทประจุส่งผลให้เกิดความร้อนจนเกิดการหลุดร่อนเป็นอนุภาคขนาดเล็กออกจากผิวงานดังรูปที่ 2.16 เมื่ออนุภาคหลุดออกจากชิ้นงานจะเกิดเป็นแอ่งขึ้นบนผิวงาน ความลึกและความกว้างของแอ่งที่เกิดขึ้นมากน้อยเพียงใดก็ขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการสปาร์คดังรูปที่ 2.17 เมื่อเสร็จสิ้นแล้วความกว้างและความลึกของแอ่งที่หลงเหลือจะกลายเป็นลักษณะของผิวงาน



รูปที่ 2.16 การเกิดหลุมและแอ่งที่เกิดจากพลังงานความร้อนจากการสปาร์ค [1]



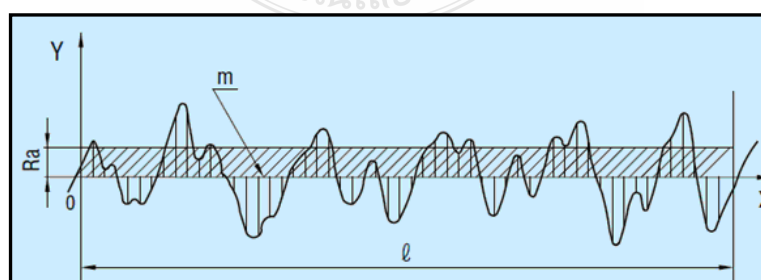
รูปที่ 2.17 พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อคุณภาพผิวงาน [1]

ความหยาบผิวสามารถวัดหรืออ่านค่าได้จากหลายรูปแบบไม่ว่าจะเป็น การอ่านค่าเฉลี่ยของความหยาบผิว (Ra) การอ่านค่าของจุดสูงสุดถึงจุดต่ำสุดของความหยาบผิว (Ry) ตลอดจนการอ่านค่าเฉลี่ยของจุดสูงสุดถึงจุดต่ำสุด (Rq) ค่าความหยาบในแต่ละลักษณะขึ้นอยู่กับข้อกำหนดในการใช้งาน โดยส่วนใหญ่มักนิยมกำหนดเป็นค่าความหยาบผิวเฉลี่ย การอ่านค่าความหยาบผิวมีที่มาจากวิธีการคำนวณที่ต่างๆ กันคือ[3]

1. ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra : Arithmetical mean roughness)

ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยหมายถึง ค่าเฉลี่ยจากการคำนวณค่ากลางระหว่างจุดยอดและจุดก้นแอ่ง เพื่อกำหนดเส้นกึ่งกลาง (Mean) แล้วนำค่าที่ห่างจากเส้นกึ่งกลางด้านบนมาหักล้างกับค่าที่ห่างจากเส้นกึ่งกลางด้านล่างเทียบกับระยะทาง ดังแสดงในรูปที่ 2.18 ซึ่งสามารถเขียนสมการในการคำนวณได้ดังสมการที่ 2.6

$$Ra = \frac{1}{\ell} \int_0^{\ell} |f(x)| dx \quad (2.6)$$



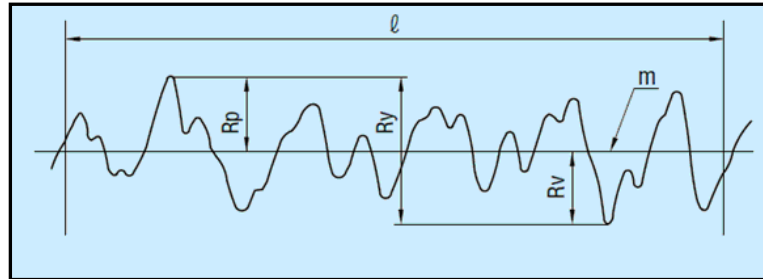
รูปที่ 2.18 การคำนวณค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) [3]

2. ค่าความหยาบผิวสูงสุด (Ry : Maximum Peak)

ค่าความหยาบผิวสูงสุดหมายถึงความต่างสูงสุดระหว่างจุดต่ำสุดถึงจุดสูงสุดตั้ง

รูปที่ 2.19 โดยคำนวณค่า Ry จากค่าสูงสุดจากเส้นกึ่งกลาง รวมกับค่าต่ำสุดของจุดก้นแอ่งที่ลึกที่สุด ดังสมการที่ 2.7

$$R_y = R_p + R_v \quad (2.7)$$

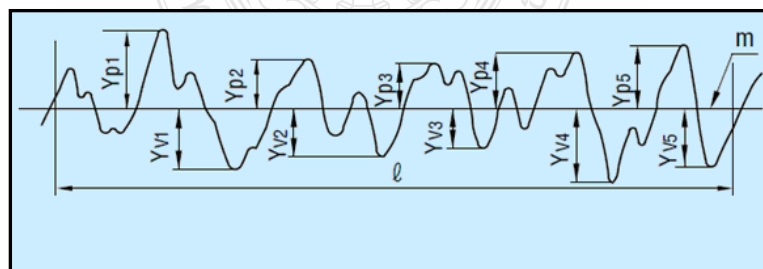


รูปที่ 2.19 การคำนวณค่าความหยาบผิวสูงสุด (Ry) [3]

3. ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยสิบจุด (Rz : Ten-point mean roughness)

ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยสิบจุด หมายถึงค่าส่วนต่างสูงสุดจากเส้นกึ่งกลางทางด้านบน 5 ตำแหน่ง และส่วนต่างจากจุดต่ำสุดถึงเส้นกึ่งกลาง 5 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 2.20 [3] โดยคำนวณค่า Rz จากค่าสูงสุดจากเส้นกึ่งกลางจำนวน 5 ตำแหน่งรวมกับค่าต่ำสุดของจุดก้นแอ่งที่ลึกที่สุดอีก 5 ตำแหน่ง ดังสมการที่ 2.8

$$R_z = \frac{(Y_{p1} + Y_{p2} + Y_{p3} + Y_{p4} + Y_{p5}) + (Y_{v1} + Y_{v2} + Y_{v3} + Y_{v4} + Y_{v5})}{5} \quad (2.8)$$

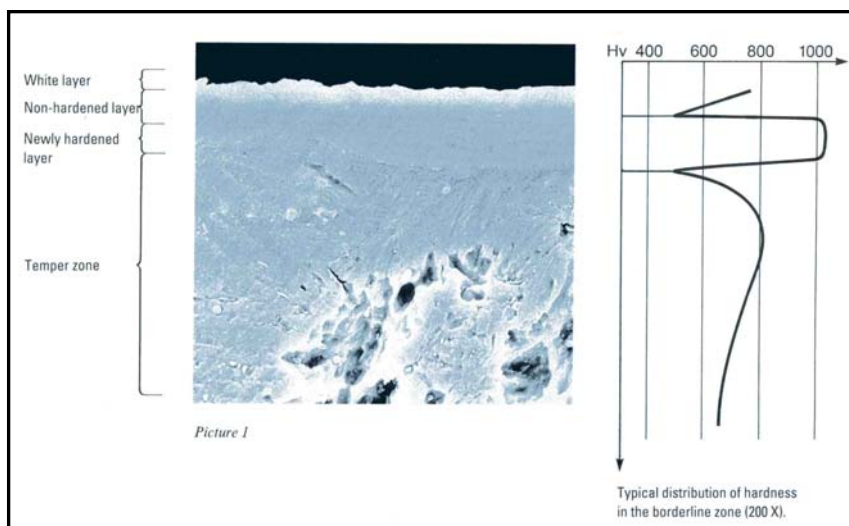


รูปที่ 2.20 การคำนวณค่าความหยาบผิวเฉลี่ยสิบจุด (Rz) [3]

ง. คุณภาพผิวงานการเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็งผิวงาน (Hardness)

การจัดเนื้อวัสดุโดยกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าเป็นการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าไปเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งอาจสูงถึง 10,000 องศาเซลเซียสภายในเวลาหนึ่งในล้านวินาที ทำให้สารไดอิเล็กทริกกระเหยกกลายเป็นไอ และเนื้องานหลุตร้อนออกเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็ก

ด้วยอุณหภูมิที่สูงทำให้เกิดการหลอมละลายและแข็งตัวใหม่อย่างรวดเร็วทำให้เกิดเป็นชั้นสีขาว (White Layer) [1,2] ซึ่งเกิดจากการเรียงตัวของผลึกเป็นแนวยาว โผล่ขึ้นมาเรียงตัวเป็นแนวยาวตามกระบวนการระบายความร้อน (Cooling) ซึ่งจะมีความหนา 10-30 ไมโครเมตร และภายใต้ชั้นสีขาวจะเกิดเป็นบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ดังแสดงในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 ชั้นสีขาวจะเกิดเป็นบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) [1]

การทดสอบความแข็งอาศัยหลักการกระทำของแรงต่อพื้นที่ โดยการใช้ของแข็งทรงกรมทรงกรวยหรือทรงพีระมิด กดลงบนผิวชิ้นงานให้เกิดเป็นรอยแล้วนำขนาดของรอยกดเพื่อคำนวณเป็นความแข็ง ในกรณีการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าจะทำให้เกิดชั้นความแข็งและบริเวณกระทบร้อนน้อยมาก จึงต้องใช้กระบวนการทดสอบความแข็งที่ทำให้เกิดรอยกดบนผิวงานน้อย และความละเอียดสูงอย่างการทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์ ซึ่งเป็นการวัดความแข็งในระดับจุลภาค รอยกดและการวัดค่าความแข็งจะมองผ่านกล้องจุลทรรศน์ เหมาะสำหรับการวัดความแข็งที่มีบริเวณพื้นที่กดความแข็งต่ำ เช่น เกรนของเหล็กเป็นต้น และจะต้องมีการเตรียมผิวหน้าของชิ้นงานให้เรียบ หน่วยที่ใช้วัด คือ VICKERS (HV) หรือ Diamond Pyramid Hardness เนื่องจากหัวกดเป็นเพชรรูปพีระมิดมุม 136° ใช้ Load ตั้งแต่ 2-1000 N โดยใช้เวลาในการกด 10-15 วินาที และรอยกดจะมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส [4] ดังรูปที่ 2.22 ซึ่งค่าความแข็งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.9 ซึ่งต้องกระทำภายใต้เงื่อนไขคือความหนาชิ้นงานต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 1.5 เท่าของขนาดเส้นทแยงมุมรอยกด (d) อุณหภูมิที่ทดสอบอยู่ระหว่าง 10-35 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างรอยกดของวัสดุเหล็กกล้า ทองเหลือง และทองแดง ต้องมากกว่า 3 เท่าของค่าความยาวเฉลี่ยเส้นทแยงมุมรอยกด

$$HV = \frac{0.102 F}{A} \quad (2.9)$$

$$A = \frac{d^2}{2 \sin(136/2)} \quad (2.10)$$

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (2.11)$$

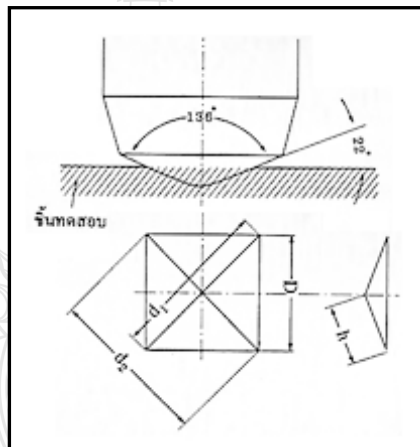
เมื่อ 0.102 คือค่าคงที่เข้าเพื่อการเปลี่ยนหน่วยจาก kp/mm^2 เป็น N/mm^2

F คือแรงกดที่ใช้ (N)

A คือพื้นที่รอยกด (mm^2)

จะได้ว่า

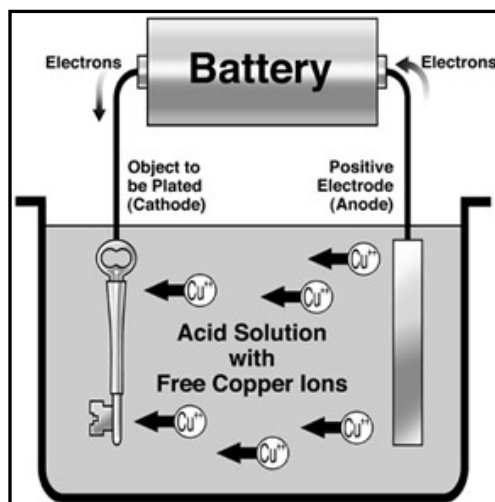
$$\text{HV} = \frac{0.1891 F}{d^2} (\text{N/mm}^2) \quad (2.12)$$



รูปที่ 2.22 รอยกดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ [4]

2.2.3 การชุบเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า (Electroplating)

การชุบเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าเป็นวิธีการเคลือบหรือปกคลุมผิววัตถุด้วยการจับตัวเป็นชั้นโลหะ ซึ่งหมายถึงการทำอิเล็กโทรดีพอสิชัน (Electro Deposition) ปกคลุมที่ผิวของวัตถุอย่างถาวร สิ่งสำคัญในกรรมวิธีการชุบเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า คือการใช้กระแสไฟฟ้ากระตุ้นประจุบวกของอนุภาคโลหะผ่านสารละลาย เพื่อให้เกิดการเกาะติดบนผิวของวัตถุที่ไปประจุลบ โดยวัตถุจะถูกผูกติดกับขั้วลบของแหล่งจ่ายกระแสตรง และโลหะที่ใช้เป็นตัวชุบให้ต่อเข้ากับขั้วบวกของแหล่งจ่ายกระแสตรงซึ่งจะทำให้ไอออนของโลหะไหลไปทางวัตถุที่ต้องการเคลือบ และเกิดการเกาะติดบนผิวหน้าของวัตถุ ดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 หลักการชุบเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า (Electroplating)

ชนิดของสารละลายทองแดงใช้ชุบโลหะส่วนใหญ่จะเป็นทองแดงกรด (Acid Copper Bath) และทองแดงด่าง (Alkaline Cyanide Copper) โดยทองแดงกรดมีข้อดีคือ ง่ายและสะดวกในการควบคุมความหนา แต่มีข้อเสียคือไม่สามารถชุบบนผิว เหล็ก เหล็กกล้า หรือสังกะสี ซึ่งตรงกันข้ามกับทองแดงด่างที่มีการยึดเกาะกับผิวชิ้นงานได้ดีมาก อีกทั้งยังเป็นที่ยอมรับในการชุบเพื่อรองพื้น โดยกระบวนการชุบเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าจำเป็นต้องจัดเตรียมเครื่องมือและสารเคมีดังนี้คือ

ก. การเตรียมเครื่องมือ

1. จะต้องเตรียมแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC) เช่น แบตเตอรี่รถยนต์ หรือ หม้อแปลงลดแรงดันที่มีการแปลงไฟฟ้า AC เป็น DC โดยการต่อจากไฟในบ้าน และลวดตัวนำเพื่อนำกระแสขั้วบวกแหล่งจ่าย และลวดตัวนำอีกตัวสำหรับต่อเข้ากับขั้วลบ ของแหล่งจ่าย การใช้แหล่งจ่ายจากไฟบ้านซึ่งมีแรงดันไฟฟ้ามากกว่าที่ต้องการ ดังนั้นจะต้องใช้หม้อแปลงลดแรงดันให้ลดน้อยลงในช่วง 0 ถึง 10 โวลต์ และกระแส 10 – 20 แอมแปร์ การลดจะต้องแปลงกระแส AC เป็น DC
2. ถังใส่น้ำยาเคมีที่ใช้ในการชุบสามารถทนกรด และด่างรวมทั้งความร้อน ซึ่งอาจทำมาจากแก้ว ถังไม้ขนาดใหญ่ หรือถังสแตนเลส
3. แหล่งให้ความร้อน เช่น แก๊ส ไฟฟ้าและเทอร์โมมิเตอร์ เพื่อจะวัดควบคุมอุณหภูมิ น้ำยาเคมีในถัง
4. อุปกรณ์ในการกวน เช่น อุปกรณ์แม่เหล็ก มอเตอร์ดีคิโบริพัดหมุน ช่วยการกระจายน้ำยาเคมี และตัวกรอง เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนออกจากน้ำยาเคมี
5. สายทองแดงเพื่อนำกระแสไฟฟ้า

ข. การเตรียมน้ำยาเคมีชุบทองแดงด่าง

การเตรียมน้ำยาเคมีทองแดงด่างซึ่งมักนิยมใช้ในการชุบภายใต้สองเงื่อนไข คือเมื่อวัตถุที่จะชุบทำด้วยเหล็กกล้าซึ่งจะไม่ยอมให้ทองแดงกรดเกาะติด และการชุบงานรูปร่างที่ซับซ้อน

เนื่องจากการให้พลังงานสูงมากจะทำให้เกิดการปกคลุมมากกว่าทองแดงกรด โดยใช้สูตรการผสมสารเคมีในน้ำกลั่นตามสัดส่วนดังนี้

1. Copper Cyanide 22 กรัม/ลิตร
2. Sodium Cyanide 35 กรัม/ลิตร
3. Sodium Carbonate 15 กรัม / ลิตร

ในการผสมสารเคมีสำหรับชุบทองแดงต่างควรละลายในน้ำครึ่งหนึ่งของทั้งหมด และเติม Sodium Cyanide ละลายน้ำ 1 ใน 4 ของน้ำทั้งหมด พร้อมกับกวนและเติม Sodium Carbonate เล็กน้อยลงในสารละลาย Copper Cyanide และ Sodium Carbonate ละลายในน้ำส่วนที่เหลือ โดยสภาวะการชุบสำหรับสารละลาย Copper Cyanide Bath อยู่ที่สภาวะแวดล้อมดังนี้คือ

1. อุณหภูมิสำหรับการชุบ 20 – 40 องศาเซลเซียส
2. ความหนาแน่นกระแส 0.5 – 1.5 แอมป์/ตารางเดซิเมตร
3. เวลาต่อชิ้นความหนา 15 ไมโครเมตร ต่อเวลา 1 ชั่วโมง

ค. การเตรียมวัสดุสำหรับการชุบ

1. การล้างคราบไขมันด้วยตัวทำละลาย เนื่องจากชิ้นงานที่นำมาทำการชุบมักมีสิ่งสกปรกจากขั้นตอนต่างๆ ในการทำงานติดอยู่ เช่น คราบน้ำมัน ผงละออง ผงขัด เศษผ้าขัด ซึ่งส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ จึงต้องใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ในการชะล้างสิ่งสกปรกเหล่านั้น

2. การล้างไขมันด้วยด่างร้อนเนื่องจากสารเคมีที่มีฤทธิ์เป็นด่าง สามารถละลายคราบน้ำมัน หรือไขมันต่างๆ ได้ดี ซึ่งในอุตสาหกรรมนิยมใช้โซดาไฟ และสารประกอบโซเดียม เช่น โซเดียมคาร์บอเนต โซเดียมเมตาซิลิเกต ผิวของชิ้นงานอาจถูกกัดด้วยด่างได้ จึงต้องควบคุมความเป็นกรดด่างของน้ำยาดมล้างไขมันให้เหมาะสม โดยชิ้นงานเป็นหลัก pH 13 หรือมากกว่า ทองแดงและโลหะผสมของทองแดงใช้ pH 10-12 และอะลูมิเนียม ดิบุก สังกะสี pH 9-1 โดยผสมสารเคมีในน้ำกลั่นในสัดส่วนดังนี้

- 2.1 โซดาไฟ NaOH 5 กรัมต่อลิตร
- 2.2 โซเดียมฟอสเฟต Na_2PO_4 100 กรัมต่อลิตร
- 2.3 โซเดียมคาร์บอเนต Na_2CO_3 100 กรัมต่อลิตร
- 2.4 ทำงานที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

3. การล้างชิ้นงานโดยใช้ไฟฟ้าเป็นกระบวนการที่ทำหลังจากการต้มล้างด้วยด่างร้อน เพื่อให้ชิ้นงานสะอาดยิ่งขึ้น ซึ่งจะคล้ายกับการชุบเคลือบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า แต่สารละลายจะเป็นชนิดเดียวกับที่ใช้ต้มล้างไขมันด้วยด่างร้อน โดยการแขวนชิ้นงานที่ขั้วบวก หรือขั้วลบตามความเหมาะสม และปล่อยให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านทำให้เกิดก๊าซไปช่วยขับไล่สิ่งสกปรก หากแขวนชิ้นงานที่ขั้วลบ จะเกิดก๊าซไฮโดรเจนที่ผิว ที่จะผลักเอาสิ่งสกปรกออกไปเกิดปฏิกิริยารีดักชัน มีประจุบวกวิ่งมารับอิเล็กตรอน แต่มีข้อเสียคือ ถ้าสารละลายเกิดสกปรกจากการละลายของโลหะต่างๆ เช่นทองแดง

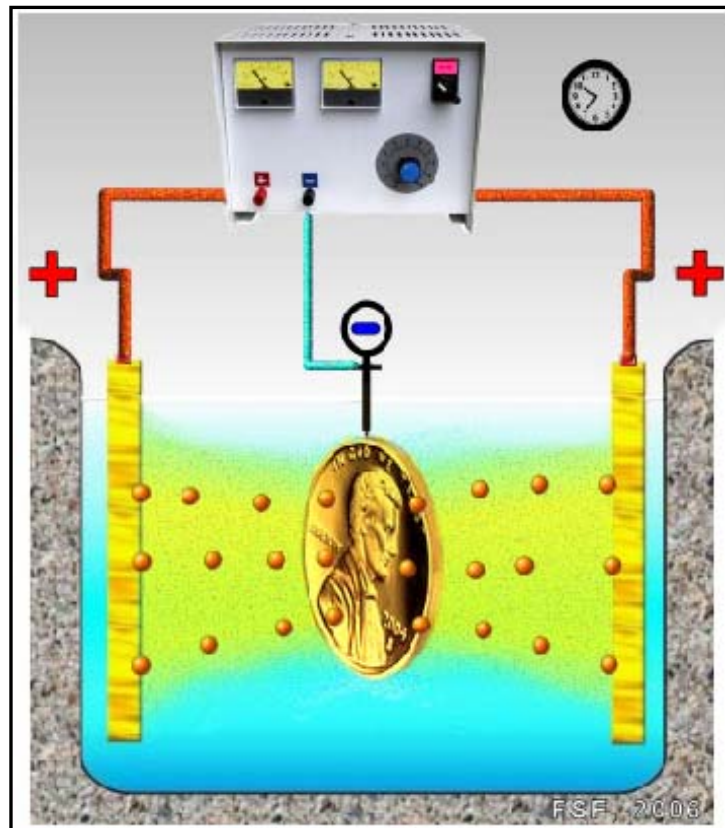
สังกะสี ดีบุก ตะกั่ว โลหะเหล่านี้จะไปจับที่ผิวของวัสดุที่กำลังทำการล้าง จะทำให้คุณภาพการชุบไม่ดี โลหะจะเกาะที่ผิวไม่แน่น และป้องกันสนิมได้ไม่ดี (ค่ากระแส 5-10 A/dm²) หากแวนซ์งานที่ขั้วบวกจะเกิดก๊าซออกซิเจน ซึ่งจะไปช่วยออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่เกาะที่ผิวชิ้นงาน และหลุดออกไปได้ง่าย แต่อาจเกิดชั้นของออกไซด์ขึ้นที่ชิ้นงานต้องระวังส่วนผสมของสารละลายและค่า pH ที่เหมาะสม (ค่ากระแส 2-3 A/dm²)

4. การล้างด้วยกรดในบางครั้งชิ้นงานที่นำมาชุบเคลือบผิว ซึ่งผ่านขั้นตอนต่างๆ ของการตีขึ้นรูป หรือชุบแข็ง จะมีสิ่งสกปรกที่กำจัดออกได้ยาก จึงต้องล้างด้วยกรดชิ้นงานเป็นเหล็กกล้าธรรมดา จะใช้กรดเกลือ หรือกรดกำมะถัน 10% โดยปริมาตร กรดเกลืออาจไปละลายโลหะด้วย ทำให้เกิดรอยด่างได้ง่าย แต่ปัญหานี้จะไม่เกิดในกรณีของกรดกำมะถัน แต่ต้องใช้อุณหภูมิ 40-60C ในการล้างชิ้นงานเป็นทองแดง หรือโลหะผสมของทองแดง จะใช้กรดกำมะถัน หรือ กรดไนตริก

5. การล้างด้วยน้ำเป็นขั้นตอนที่สำคัญมาก เพราะเป็นการล้างเอาสารเคมีที่ติดมาในขั้นตอนต่างๆ ออก ก่อนที่จะนำไปชุบในขั้นตอนต่อไป และยังเป็นการป้องกันการเกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งจะทำให้ผิวชิ้นงานเกิดรอยย่น หรือบวมได้

ง. ขั้นตอนการชุบ

สำหรับการชุบจะต้องทำความสะอาด ซึ่งมีความสำคัญต่อการนำไฟฟ้าที่จะผูกเข้ากับแท่งโลหะที่เป็นขั้วลบ ชิ้นงานที่แวนซ์อยู่ในสารละลายตัวมันเองจะต้องอยู่ในบริเวณผิวที่สัมผัสกับสารละลายและทำให้กระแสไฟฟ้าไหลครบวงจรดังรูปที่ 2.24 โดยการต่อวงจรนั้นก็มียหลายรูปแบบ สำหรับรูปแบบโลหะจะใช้ลวดทองแดงเปลือยที่สะอาด เพราะลวดทองแดงนำไฟฟ้าได้ดี อาจจะร้อยผ่านรู ก็ได้ อย่างไรก็ตามการแวนซ์วัตถุบนลวดก็มีข้อกำหนดเหมือนกันที่จุดต่อระหว่างวัตถุและกระแสไฟฟ้าในกรณีของวัตถุที่เป็นโลหะต้องพิจารณาเป็นพิเศษ ซึ่งก็หมายถึง จะต้องให้เกิดความแน่นน้อยที่สุดบนจุดที่พัน และจะทำให้คือต้องใช้ลวดที่ใหญ่เพราะจะมีหน้าสัมผัสใหญ่รองรับได้ดี และที่จุดเดียวกันจะต้องไม่มีการพันซ้ำ เพราะจะเกิดตำหนิในการชุบอย่างเห็นได้ชัดในรูปร่างสุดท้าย ถ้าไม่มีการควบคุม ในจุดที่พันนี้ควรจะเปลี่ยนตำแหน่งในระหว่างการชุบ เพื่อให้จุดนั้นได้ถูกปกคลุมด้วยในส่วนของลวดที่แวนซ์จะต้องหมุนเป็นครั้งคราวในระหว่างการชุบ เพื่อให้ผิวที่ชุบมีความสม่ำเสมอ แล้วทำการปล่อยกระแสตามค่าที่คำนวณไว้



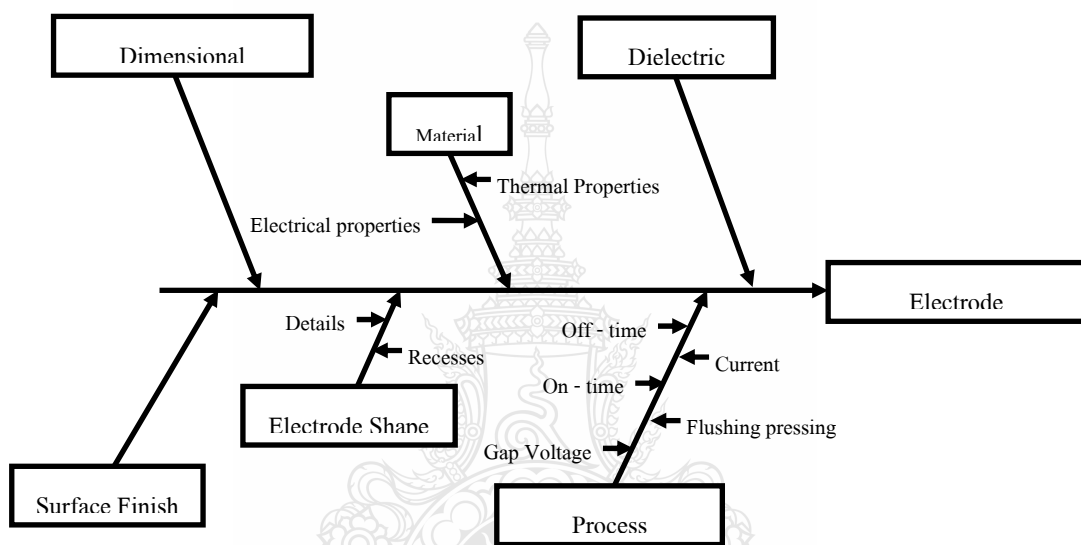
รูปที่ 2.24 การต่อขั้วในการชุบผิวชิ้นงาน

2.3 วรรณกรรมและงานวิจัยที่ผ่านมา

อุตสาหกรรมการผลิตแม่พิมพ์พลาสติกในปัจจุบันนี้ได้มีการนำเอาเทคโนโลยีสมัยใหม่เข้ามาใช้อย่างกว้างขวาง หนึ่งในเทคโนโลยีเหล่านั้นคือการแปรรูปโดยอาศัยปฏิกิริยาความร้อนทางไฟฟ้าที่ถูกส่งผ่านวัสดุตัวนำที่เรียกว่าอิเล็กโตรดซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมลักษณะการหลอมเหลวของผิวงาน ในของเหลว (Dielectric) ซึ่งทำหน้าที่ขจัดเนื้องานส่วนที่หลอมเหลวและระบายความร้อน กระบวนการดังกล่าวคือกระบวนการกัดเซาะด้วยกระแสไฟฟ้า “Electrical Discharge Machining” (EDM) ซึ่งเหมาะกับการกัดเซาะชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนและมีความแข็งสูง โดยจากการศึกษา วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง พบว่าผลที่เกิดขึ้นจากกระบวนการกัดเซาะที่อื่นได้แก่ อัตราการจัดเนื้องาน อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด และความหยาบผิวเฉลี่ยซึ่งเกิดจากพารามิเตอร์ของเครื่องจักร ซึ่งชิ้นงานที่ได้จะมีลักษณะตรงกันข้ามกับเครื่องมือตัด โดยการกัดเซาะโลหะด้วยอิเล็กโตรดเป็นกระบวนการทางไฟฟ้าภายใต้ตัวแปรต่างๆ มากมาย จึงทำให้มีการศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อชิ้นงาน

2.3.1 John และคณะ [5] ทบทวนวรรณกรรมกระบวนการผลิตอิเล็กโตรดโดยวิธีการสร้างเครื่องมืออย่างรวดเร็ว การขึ้นรูปด้วยกระบวนการสปาร์คทางไฟฟ้าเป็นกระบวนการผลิตชิ้นส่วนที่มีความซับซ้อน หรือวัสดุที่มีความแข็งซึ่งยากมากต่อการขึ้นรูปด้วยเครื่องจักรทั่วไป โดยอิเล็กโตรดจะมีรูปร่าง ตรงกันข้ามกับชิ้นงาน การสร้างเครื่องมือต่างๆอย่างรวดเร็ว (Rapid Tooling :RT) เป็น

เทคโนโลยีใหม่ที่จะเป็นการผลิตโดยการสร้างต้นแบบ (Rapid Prototyping :RP) เพื่อลดเวลาและต้นทุนรวมทั้งเครื่องมือในกระบวนการผลิตวิธีการสร้างอิเล็กทรอนิกส์อย่างรวดเร็วที่หลากหลาย โดยมองที่ความยากของการขึ้นรูป และการรวมกับกระบวนการผลิตทำให้สามารถแบ่งกลุ่มในการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้าซึ่งเป็นการตัดปาดวัสดุโดยใช้พลังงานความร้อนจากไฟฟ้า วัสดุที่มีแข็งสูงในอุตสาหกรรมใช้กระบวนการกัดเซาะทางไฟฟ้า กับงานที่ต้องการความเที่ยงตรงสูง โดยส่วนมากจะวัดค่าต่างๆ ได้แก่ อัตราการขจัดเนื้องาน อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด และคุณภาพงานเป็นการวัดค่าเฉลี่ยของการกัดกร่อนหน่วยวัดเป็น ปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกใช้กระบวนการสร้างเครื่องมือต่างๆ อย่างรวดเร็วและปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของอิเล็กโทรดดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของอิเล็กโทรด

2.3.2 Bulent Ekmekci. [6] ศึกษาความเค้นตกค้างและชั้นสีขาวที่เกิดขึ้นในกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าโดยศึกษาสารไดอิเล็กทริก (De-Ionized Dielectric Liquid) สารของเหลวกึ่งตัวนำที่ใช้ในการสปาร์ค ชิ้นงานที่มีคาร์บอนผสม โดยใช้อิเล็กโทรดเป็นทองแดงพบว่าของเหลวกึ่งตัวนำที่เป็นน้ำกำจัดไอออน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่ผิวหน้า และให้ความหนาผิวต่ำกว่ากระบวนการ สปาร์คที่มีองค์ประกอบของเหลวกึ่งตัวนำที่เป็นสารไฮโดรคาร์บอน และอิเล็กโทรดที่มีส่วนผสมของคาร์บอน

2.3.3 จีรวรรณ คล้อยกยันต์ และคณะ [7] ศึกษาตัวแปรในการกัดเซาะวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316L โดยการนำเอาผงเหล็กกล้าไร้สนิมขึ้นรูปโลหะผงด้วยวิธีการฉีดเป็นชิ้นงานทดสอบ และขึ้นรูปด้วยเครื่องกัดด้วยไฟฟ้าโดยศึกษาตัวแปรนี้มีผลต่ออัตราการขจัดเนื้องาน ใช้อิเล็กโทรดเป็นทองแดง เพื่อศึกษาค่าความเข้มของกระแสไฟฟ้า ค่าเวลาเปิด และค่าเวลาปิด พบว่าค่าความหนาผิวมีค่าแปรตามกระแสไฟฟ้า และค่าเวลาปิดจะมีค่าผกผันกับค่าเวลาเปิด

2.3.4 Salonites และคณะ [8] ศึกษารูปแบบอุณหภูมิต่ออัตราการขจัดเนื้องาน และความหยาบผิวสำหรับแม่แบบผนังเอียง (Die-Sinking) ทำการทดลองโดยใช้เหล็กกล้า St-37 เป็นชิ้นงาน และใช้อิเล็กโตรดเป็นทองแดงขนาด 10 x 20 มม. สปาร์กในสารไดออกไซด์ที่ใช้น้ำมัน (Kerosene) พบว่าหากกระแส, แรงดันหรือช่วงเวลาการสปาร์กสูงขึ้น อัตราการขจัดเนื้องานและความหยาบของผิวชิ้นงานจะเพิ่มขึ้นตาม

2.3.5 Yusuf และคณะ [9] ศึกษาทดลองกรณีศึกษาสำหรับการตัดสินใจเลือกพารามิเตอร์ที่มีผลต่อความหยาบผิวในกระบวนการสปาร์กด้วยไฟฟ้า ทำการทดลองโดยการสปาร์กเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยอิเล็กโตรดทองแดง เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อความเรียบผิว พบว่ากำลังไฟฟ้า (Power), ช่วงเวลา (Pulse Time), และเวลาการสปาร์ก (Spark Time) มีผลต่อความเรียบผิว โดยความเรียบผิวมีแนวโน้มในการเพิ่มขึ้นตามช่วงระยะเวลาในการคิซซาร์จ

2.3.6 ประพัฒน์ เชื้อไทย และคณะ [10] ศึกษาการพัฒนากระบวนการผลิตวัสดุอิเล็กโตรดด้วยกระบวนการสร้างเครื่องมือกัดเซาะอย่างรวดเร็ว เทคนิคการขึ้นรูปโลหะแบบอิเล็กโตรฟอร์มมิ่ง ทำการศึกษาการหุบเคลือบผิวโลหะบนชิ้นงานที่ไม่นำไฟฟ้า โดยศึกษาอิทธิพลของกระแสไฟฟ้า เวลาขนาดชิ้นงาน และสภาวะที่เหมาะสมในการเคลือบผิว โดยใช้กระแสไฟฟ้าช่วง 0.1 – 0.4 A และเวลาในการชุบ 60 – 80 นาที พบว่าสภาวะที่เหมาะสมของกระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 0.2 A จะได้ชิ้นงานที่มีลักษณะเงางามผิวเรียบและมีการเกาะติดระหว่างชิ้นงานอย่างดี เพื่อเพิ่มเวลาความหนา ความเงางาม และความสม่ำเสมอของผิวเคลือบจะเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น ความหนาของขอบชิ้นงานจะมากกว่าส่วนกลางของชิ้นงานและหากกระแสไฟฟ้าสูงกว่า 0.4 A ผิวเคลือบด้านข้างจะไหม้และไม่สม่ำเสมอ

2.3.7 Dimla และคณะ [11] ศึกษาความซับซ้อนของอิเล็กโตรดสำหรับการกัดเซาะอย่างรวดเร็วด้วยกระแสไฟฟ้า เป็นการประยุกต์สร้างเครื่องมืออย่างรวดเร็วโดยการสร้างโมเดลแล้วเคลือบผิว หลังจากนั้นจึงทำการเจาะเพื่อวัดความหนาของชิ้นงานในจุดต่างๆ พบว่าชั้นการสะสมของทองแดงที่ด้านหน้าและผนังด้านข้างไม่เสถียร และแสดงความคิดเห็นไว้ว่าไม่เหมาะสมต่อการทำอิเล็กโตรด

2.3.8 Hsu และคณะ [13] การสร้างอิเล็กโตรดโดยกระบวนการสร้างเครื่องมือต้นแบบอย่างรวดเร็ว โดยการชุบเคลือบผิวด้วยปฏิกิริยาทางไฟฟ้า (Electrode Plating with Electroforming) เป็นการชุบเคลือบผิวเรซิน โดยใช้นิกเกิล และชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง เป็นการแสดงการพัฒนาอิเล็กโตรดสำหรับแม่แบบผนังเอียง (Die - Sinking) เป็นกระบวนการผลิตที่สั้นลดต้นทุนระหว่างการผลิตอิเล็กโตรด โดยทำการเขียนแบบจากโปรแกรมกราฟฟิก และแปลงไฟล์เครื่องขึ้นรูปต้นแบบโดยการยิงผงยิปซัม โดยใช้เรซินเป็นตัวเพิ่มความต้านทานและความแข็ง การนำไฟฟ้าโดยการเคลือบผิวยิปซัมโดยกระบวนการทางอิเล็กโตรฟอร์มมิ่ง ทำให้มีความหนาโดยรอบประมาณ 1 มิลลิเมตร โดยจากการสปาร์ก พบรอยแตกร้าวเกิดขึ้นบนอิเล็กโตรดอิเล็กที่ทำการเคลือบนิกเกิลหนา 25 ไมโครเมตร เนื่องจากการเกิดเป็นชั้นฟิล์มที่บางทำให้ไม่สามารถทนต่อแรงดันไฟฟ้าและความร้อนที่เกิดขึ้นได้

การเคลือบทองแดงหนา 1 มิลลิเมตร ทำการสปาร์คชิ้นงานเหล็ก SKD 11 ที่ความหนา 2.5 มิลลิเมตร โดยใช้กระแส 3, 8, 15, 20 และ 25 แอมแปร์ พบว่าที่กระแสต่ำ เวลาขึ้นรูป 225 นาที่ อิเล็กโตรดสึกหรอ 3.8% อัตราการตัดปาด 0.06 กรัม/นาที่ ความหยาบผิวงานเฉลี่ย 4.49 ไมโครเมตร ที่กระแส 1.5 แอมแปร์ เวลาทำงาน 32 นาที่ อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด 16 เปอร์เซ็นต์ และอัตราการตัดปาด 0.322 กรัมต่อนาที ความเรียบผิวเฉลี่ย 10.5 ไมโครเมตร และที่กระแสตรง 25 แอมแปร์ และทำงาน 49.1 นาที่ อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด 34.41 เปอร์เซ็นต์ อัตราการจัดเนื้องาน 0.177 กรัมต่อนาที และชิ้นงานมีความหยาบผิวเฉลี่ย 7.85 ไมโครเมตร

2.3.9 Monzon และคณะ [12] ศึกษาการสร้างอิเล็กโตรดด้วยเทคนิคการสร้างเครื่องมืออย่างรวดเร็ว สำหรับการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า ด้วยวิธีการขึ้นรูปทองแดงจากแม่พิมพ์พลาสติกผนังบางโดยใช้ปฏิกิริยาทางไฟฟ้า (Electroform) ทำให้ได้ขนาดที่มีความเที่ยงตรงสูง โดยมีข้อเสียคือกระบวนการนี้ไม่สามารถขึ้นอยู่กับกราไฟต์ได้ และอิเล็กโตรดจะมีความหนา 1 – 2 มม. เท่านั้น

2.3.10 สักดา ฉายพุดชา และคณะ [14] ศึกษาการสึกหรอของอิเล็กโตรดทองแดงที่ได้จากการชุบเคลือบผิวในการกัดแม่พิมพ์โดยวิธีการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า เพื่อศึกษาอัตราการสึกหรอเปรียบเทียบกับอิเล็กโตรดทองแดงที่ได้จากการรีดขึ้นรูปภายใต้เงื่อนไขการสปาร์คผิวหยาบและผิวละเอียด พบว่าภายใต้เงื่อนไขการสปาร์คแบบหยาบอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดทองแดงที่ได้จากการชุบเคลือบผิวสูงกว่าอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดทองแดงที่ได้จากการรีดขึ้นรูป ส่วนภายใต้เงื่อนไขการสปาร์คแบบละเอียดพบว่าอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดทองแดงที่ได้จากการชุบเคลือบผิวมีความแตกต่างกันน้อยมากเมื่อเทียบกับอัตราการสึกหรอของขั้วทองแดงที่ได้จากการรีดขึ้นรูป

2.4 สรุปบท

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่ากระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าเป็นกระบวนการที่วัสดุอิเล็กโตรด และวัสดุชิ้นงานมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงาน [6] ซึ่งวัสดุที่นิยมใช้เป็นอิเล็กโตรดสำหรับกัดเซาะชิ้นงานกลุ่มเหล็กกล้าพบว่า เป็นทองแดงมีความเหมาะสมมากที่สุด รองลงมาคือแกรไฟท์ และทังสเตน ส่วนวัสดุชิ้นงานที่ทำการสปาร์คส่วนใหญ่เป็นวัสดุที่มีความแข็งสูงและเป็นวัสดุกลุ่มคาร์ไบด์ โดยผลลัพธ์ที่ทำการศึกษาได้แก่ อัตราการจัดเนื้องาน และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด ซึ่งส่งผลต่อการเกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็กและความเรียบผิว [5] องค์ประกอบทั้งหมดที่มีผลต่ออัตราการกัดเซาะและอัตราการสึกหรอของเครื่องมือสามารถจำแนกออกได้เป็น พารามิเตอร์ของเครื่องจักร วัสดุอิเล็กโตรด วัสดุชิ้นงาน สารไดอิเล็กทริก พารามิเตอร์ของเครื่องจักรที่มีผลต่อการขึ้นรูปชิ้นงานได้แก่ อัตรากระแส (Current Rate) ที่ใช้ในการสปาร์ค ถ้ากระแสต่ำจะทำให้ได้อัตราการกัดเนื้อโลหะต่ำแต่การสึกหรอของอิเล็กโตรดสูง [8,14] ช่วงพัลส์ (On Pause) สั้นจะทำให้อิเล็กโตรดสึกหรอมากขึ้นแต่ได้ผิวงานที่มีคุณภาพ ช่วงพักพัลส์ (Off Pause) สั้นจะทำให้ได้รับอัตราการกัดเนื้อโลหะเพิ่มการสึกหรอของอิเล็กโตรดลดลง ทั้งนี้เพราะว่าพลังงานต่อหน่วยเวลาเพิ่มขึ้น

เวลาเปิด (Off Time) น้อยความละเอียดผิวมากและอัตราการกัดเซาะต่ำ [8] เวลาเปิด (On Time) น้อยความละเอียดผิวน้อยอัตราการกัดเซาะสูง อิเล็กโทรดเป็นขั้วลบเหมาะสำหรับช่วงพัลส์ที่สั้นเนื่องจากจำนวนอนุภาคลบจะมากกว่าอนุภาคบวก และอิเล็กโทรดเป็นขั้วบวกเหมาะสำหรับช่วงพัลส์ที่ยาวอนุภาคบวกมากเกิดขึ้นจำนวนมาก ทำให้ชิ้นงานมีอัตราการกัดสูง อิเล็กโทรดสึกหรอน้อยแรงเคลื่อนไฟฟ้า (Gap Voltage) จะต่ำสำหรับการตัดหยาบโดยใช้ปริมาณกระแสไฟและค่าประจุไฟฟ้าสูง ส่วนค่าความถี่จะต่ำ วัสดุอิเล็กโทรดที่มีส่วนผสมของคาร์บอนเมื่อทำการสปาร์คบนชิ้นงานมีคาร์บอนเป็นส่วนผสม ในสารไดอิเล็กทริกที่เปลี่ยนสภาพเป็นคาร์บอนได้จะทำให้เกิดผิวชิ้นงานที่หยาบ ความเค้นตกค้างและรอยแตกร้าวขนาดเล็กมากกว่ากระบวนการที่ปราศจากคาร์บอน [5] หากชิ้นงานเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนควรหลีกเลี่ยงอิเล็กโทรดที่เป็นแกรไฟต์ จึงทำให้สามารถสรุปได้ดังนี้

2.4.1 วัสดุชิ้นงาน

จากหนังสือของ Thomas [1] และงานวิจัยของ E.Bud Guitrau [2] Bulent Ekmekci. [6] ทำให้ทราบว่าชิ้นงานเหล็กกล้าเหมาะสำหรับอิเล็กโทรดที่เป็นทองแดง และมีค่าขั้วของอิเล็กโทรดเป็นบวกเมื่อทำการสปาร์คในของเหลวที่เป็นสารไฮโดรคาร์บอน

2.4.2 พารามิเตอร์

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองแทบทุกงานวิจัยจะมีพารามิเตอร์ที่จัดว่าเป็นพารามิเตอร์พื้นฐานของงานกัดเซาะด้วยไฟฟ้าอันได้แก่[8]

- ก. กระแส (Current)
- ข. เวลาเปิด (On Time)
- ค. เวลาปิด (Off Time)

2.4.3 ประสิทธิภาพการทำงานของกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า

จากงานวิจัยของ John [5] จีวรธรรม คล้อยกยันต์ [7] Salonites และคณะ [8] นั้นวัดประสิทธิภาพการทำงานในรูปของอัตราการขจัดเนื้องานและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด และงานวิจัยของ Yusuf [9] ยังทำให้ทราบว่าคุณภาพผิวงานวัดได้จากความหยาบผิวเฉลี่ย

2.4.4 การชุบเคลือบผิวอิเล็กโทรด

จากงานวิจัยของประพัฒน์ เชื้อไทย และคณะ [10] และ Dimla และคณะ [11] ทำให้ทราบถึงแนวทางในการชุบเคลือบผิววัสดุด้วยทองแดง และข้อบกพร่องของกระบวนการชุบเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าแบบ Electroplating ที่เกิดความไม่สม่ำเสมอของชั้นผิวเคลือบ และแนวทางการแก้ปัญหาเบื้องต้นในการชุบเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า โดย Monzon และคณะ [12] พบว่าไม่สามารถทำการชุบเคลือบผิวด้วยแกรไฟต์ได้ จากผลงานวิจัยของ Hsu และคณะ [13] ซึ่งมีผลการทดลองที่สอดคล้องกับศักดา ฉายพุดชา และคณะ [14] ว่าอิเล็กโทรดชุบเคลือบผิวสามารถใช้เป็นวัสดุอิเล็กโทรดสปาร์คชิ้นงานที่เป็นเหล็กกล้าได้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วิธีการดำเนินการวิจัย

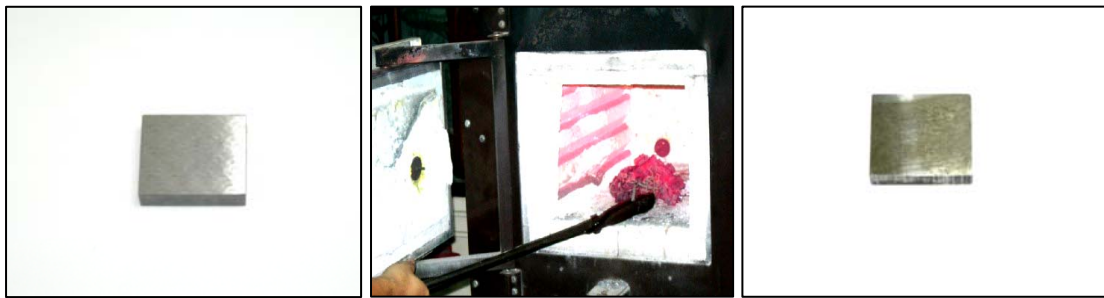
งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของอิเล็กโตรด ทองแดงแท่งตันและอิเล็กโตรดที่ชุบเคลือบผิวด้วยทองแดงโดยกระบวนการชุบเคลือบทางไฟฟ้า (Electroplating) สำหรับกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า (Electrical Discharge Machining : EDM) เพื่อศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงาน และคุณภาพผิวงาน โดยจากการศึกษาทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง พบว่าประสิทธิภาพการทำงานของกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าจะวัดอยู่ในรูปของ อัตราการขจัดเนื้องาน (Material Removal Rate : MRR) และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดอยู่ในรูปของอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด (Tool Wear Ratio : TWR) และวัดคุณภาพของผิวงาน (Surface Quality : SQ) อยู่ในรูปของความหยาบผิวเฉลี่ย และการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งผิวงาน

3.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

จากการศึกษางานวิจัยที่มีความเกี่ยวข้องและทำการทดลองเบื้องต้นแล้วพบว่า กระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าเป็นกระบวนการที่เกิดจากการควบคุมให้เกิดปฏิกิริยาความร้อนซึ่งมีค่าพารามิเตอร์จำนวนมาก แต่พารามิเตอร์หลักที่มีผลต่อประสิทธิภาพการขึ้นรูป [7] ได้แก่พารามิเตอร์ของ เวลาเปิด (On-time), เวลาปิด (Off-time), กระแสไฟฟ้า (Current) และเวลาหน่วงในการสปาร์ค (Working time) เนื่องจากพารามิเตอร์ดังกล่าวเป็นตัวแปรพื้นฐานที่ส่งผลกระทบต่อสภาวะการทำงานในกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า โดยจะทำการศึกษาประสิทธิภาพการทำงานในรูปของอัตราขจัดเนื้องาน และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด และศึกษาคุณภาพผิวงานในรูปของค่าความหยาบผิวเฉลี่ย และการเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็งผิวงาน โดยใช้ชิ้นงานทดสอบเป็นเหล็กกล้าสำหรับผลิตแม่พิมพ์พลาสติก AISI P20 ผ่านกระบวนการชุบแข็ง วัสดุอิเล็กโตรดเป็นทองแดงแท่งตัน และอิเล็กโตรดชุบเคลือบผิวด้วยกระบวนการอิเล็กโตรเพลตติ้ง (Electroplating) ประกอบด้วยอิเล็กโตรดทองแดงชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง และอิเล็กโตรดเหล็กกล้าคาร์บอน S137 ชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง

3.2.1 เตรียมชิ้นงานทดสอบ

เตรียมชิ้นงานทดสอบเหล็กกล้า AISI P20 ให้มีขนาดความกว้าง 25 มิลลิเมตร ยาว 25 มิลลิเมตร หนา 6 มิลลิเมตร โดยกระบวนการเจียรระในราบ แล้วทำการชุบแข็งโดยทำการชุบด้วยน้ำมันอุณหภูมิที่ใช้ 850 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 3.1 โดยค่าความแข็งหลังจากชุบเฉลี่ยอยู่ที่ 656 HV โดยชิ้นงานทดลองหลังผ่านกระบวนการชุบแข็งจะทำความสะอาดโดยการขัดกระดาษทราย



(ก)

(ข)

(ค)

(ก) ชิ้นงานที่ผ่านการปรับผิวด้วยเครื่องเจียรระไนราบ

(ข) ชิ้นงานถูกอบเพื่อทำการชุบแข็ง

(ค) ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทำความสะอาดหลังการชุบแข็ง

รูปที่ 3.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

3.2.2 เตรียมวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ทองแดงแท่งตัน

เตรียมวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ทองแดงแท่งตันโดยทำการกลึงปอกและปาดหน้าให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ยาว 60 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องกลึง CNC Turning เพื่อให้อิเล็กทรอนิกส์มีความหนาผิวเฉลี่ยใกล้เคียงกัน (พารามิเตอร์ในการกลึงเป็นค่าเดียวกันทุกชนิดอิเล็กทรอนิกส์) ดังแสดงในรูปที่ 3.2



(ก)

(ข)

(ค)

(ก) แท่งทองแดงของแข็งสำหรับทำอิเล็กทรอนิกส์

(ข) กลึงปอกและปาดหน้าด้วยเครื่องกลึง CNC Turning

(ค) แท่งอิเล็กทรอนิกส์ของแข็งทองแดงที่ผ่านกระบวนการกลึง

รูปที่ 3.2 กระบวนการเตรียมอิเล็กทรอนิกส์ทองแดงชนิดของแข็ง

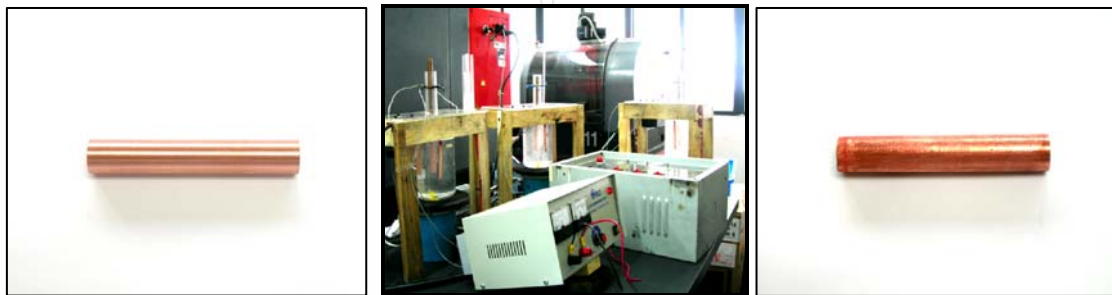
3.2.3 เตรียมวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ชุบเคลือบผิวด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเพลทติ้ง

กระบวนการชุบเคลือบผิวอิเล็กทรอนิกส์ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเพลทติ้งเป็นการชุบเคลือบผิววัสดุโดยการทำให้เกิดการจับตัวของสารละลายทองแดงต่าง (Alkaline Copper Cyanide

Copper) หนา 0.25 มิลลิเมตร บนผิววัสดุที่เป็นทองแดง และเหล็กกล้า St 37 โดยในกระบวนการชุบ จะให้ขั้วชิ้นงานเป็นแคโทด (Cathode) เป็นขั้วบวก และตัวล่อเป็นแอโนด (Anode) ขั้วลบ โดยมี ขั้นตอนการชุบดังหัวข้อที่ 2.2.3 และมีขั้นตอนในการเตรียมอิเล็กโทรดที่ใช้ในการสปาร์คดังนี้คือ

ก. การเตรียมอิเล็กโทรดทองแดงชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง

เตรียมวัสดุอิเล็กโทรดโดยใช้ทองแดงชุบทองแดงต่างหนา 0.25 มิลลิเมตร โดย กลึงทองแดงแท่งต้นให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 9.50 มิลลิเมตร ก่อนทำการชุบเคลือบด้วย กระบวนการ Electroplating ที่กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ เป็นเวลา 18 ชั่วโมง จะให้ความหนาผิวชุบ ประมาณ 0.30 มิลลิเมตรดังแสดงในรูปที่ 3.3 แล้วนำอิเล็กโทรดไปกลึงปรับสภาพผิวให้มีความโต 10 มิลลิเมตร และมีความหยาบผิวใกล้เคียงกับอิเล็กโทรดทองแดงแท่งต้น



(ก)

(ข)

(ค)

(ก) ทองแดงแท่งต้นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 9.50 มิลลิเมตร

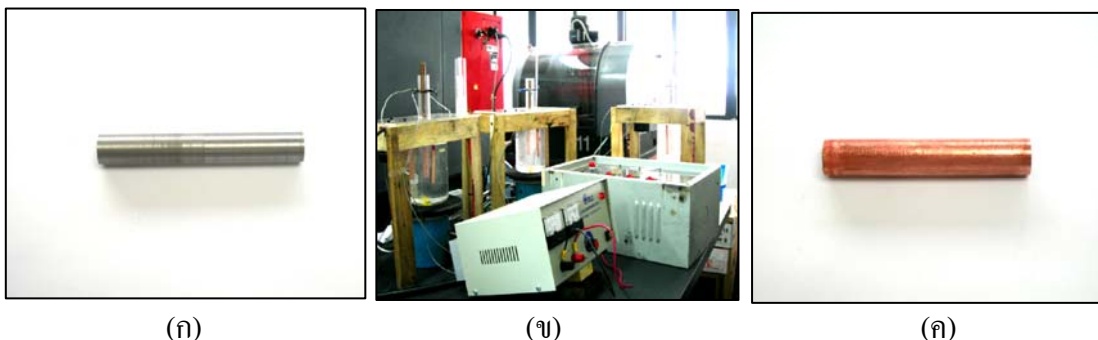
(ข) กระบวนการชุบเคลือบผิวด้วยทองแดงต่างหนา 0.25 มิลลิเมตร

(ค) แท่งอิเล็กโทรดทองแดงชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง

รูปที่ 3.3 กระบวนการเตรียมอิเล็กโทรดทองแดงชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง

ข. อิเล็กโทรดเหล็กกล้าคาร์บอน S37 ชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง

เตรียมวัสดุอิเล็กโทรดโดยใช้เหล็กกล้าคาร์บอน St 37 ชุบทองแดงต่างหนา 0.25 มิลลิเมตร โดยกลึงเหล็กกล้าคาร์บอนให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 9.50 มิลลิเมตร ก่อนทำการชุบเคลือบด้วยกระบวนการ Electroplating ที่กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ เป็นเวลา 18 ชั่วโมง จะให้ความหนาผิวชุบประมาณ 0.30 มิลลิเมตรดังแสดงในรูปที่ 3.4 แล้วนำอิเล็กโทรดไปกลึงปรับสภาพผิวให้ ความโต 10 มิลลิเมตร และมีความหยาบผิวใกล้เคียงกับอิเล็กโทรดทองแดงแท่งต้น



(ก) เหล็กกล้าคาร์บอน S37 มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 9.50 มิลลิเมตร

(ข) กระบวนการชุบเคลือบผิวด้วยทองแดงค่างหนา 0.25 มิลลิเมตร

(ค) แท่งอิเล็กโทรดเหล็กกล้าคาร์บอน S37 ชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง

รูปที่ 3.4 กระบวนการเตรียมอิเล็กโทรดเหล็กกล้าคาร์บอน S37 ชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง

3.2.4 ทดสอบสมบัติพื้นฐานของอิเล็กโทรด

ทดสอบสมบัติพื้นฐานของอิเล็กโทรดทองแดงแท่งตัน และอิเล็กโทรดชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง โดยทำการคำนวณค่าความหนาแน่น และทำการวัดค่าการนำไฟฟ้า และความต้านทานด้วยเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า ซึ่งแสดงผลการทดสอบดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมบัติพื้นฐานของอิเล็กโทรด

ลำดับ	สมบัติ	ทองแดงแท่งตัน	ทองแดงชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง	เหล็ก St 37 ชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง
1.	ความหนาแน่น (g/mm ³)	8.830	8.635	8.635
2.	การนำไฟฟ้า (semen)	143.84	136.35	129.55
3.	ความต้านทาน (mΩ)	0.62	0.91	1.15

3.2.5 กำหนดค่าปัจจัยประสิทธิภาพโดยปรับเวลาเปิด (On-time)

กำหนดค่าปัจจัยประสิทธิภาพโดยปรับเวลาเปิด จากสมการที่ 2.1 ซึ่งค่าปัจจัยประสิทธิภาพในที่นี้หมายถึงประสิทธิภาพการทำงานในหนึ่งวัฏจักรของการสปาร์ก

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

โดยกำหนดเวลาเปิดคงที่ 32 ไมโครวินาที เนื่องจากเป็นค่าที่ทำให้ปัจจัยประสิทธิภาพ (Duty Cycle) จากการปรับเวลาเปิดเท่ากับเวลาปิดดังแสดงในตารางที่ 3.2 และกำหนดตัวแปรคงที่ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.2 ค่าปัจจัยประสิทธิภาพโดยปรับเวลาเปิด (On-time)

ลำดับ	เวลาเปิด (μs)	เวลาปิด (μs)	ปัจจัยประสิทธิภาพ(%)
1	2	32	6
2	10	32	24
3	20	32	38
4	32	32	50
5	50	32	61
6	100	32	76
7	200	32	86
8	510	32	94

ตารางที่ 3.3 ค่าตัวแปรคงที่ในการทดลองปรับเวลาเปิดและปรับเวลาปิด

ลำดับ	พารามิเตอร์	รายละเอียด
1	ขั้วอิเล็กโทรด (Polarity Electrode)	+
2	ความต่างศักย์ (V)	150
3	กระแส (A)	9
4	ระยะห่างของการสปาร์ค (Gap)	10
5	เวลาหน่วงในการสปาร์ค (s)	0.5
6	เวลายกอิเล็กโทรด (s)	0.67
7	ของเหลว (Dielectric)	Spark Erosion 102(HF)

3.2.6 กำหนดค่าปัจจัยประสิทธิภาพโดยปรับเวลาปิด (Off-time)

กำหนดค่าปัจจัยประสิทธิภาพโดยปรับเวลาเปิด จากสมการที่ 2.1 ซึ่งค่าปัจจัยประสิทธิภาพในที่นี้หมายถึงประสิทธิภาพการทำงานในหนึ่งวัฏจักรของการสปาร์ค

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

โดยกำหนดเวลาเปิดคงที่ 32 ไมโครวินาที เนื่องจากเป็นค่าที่ทำให้ปัจจัยประสิทธิภาพ (Duty Cycle) จากการปรับเวลาเปิดเท่ากับเวลาปิดดังแสดงในตารางที่ 3.4 และกำหนดตัวแปรคงที่ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.4 ค่าปัจจัยประสิทธิภาพโดยปรับเวลาปิด (Off-time)

ลำดับ	เวลาเปิด (μs)	เวลาปิด (μs)	ปัจจัยประสิทธิภาพ(%)
1	32	510	6
2	32	100	24
3	32	50	39
4	32	32	50
5	32	20	61
6	32	10	76
7	32	4	89
8	32	2	94

3.2.7 ทำการทดลอง

ใช้เครื่องกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้ายี่ห้อ Aristech รุ่น 3D-CNC EDM ดังรูปที่ 3.5 ทำการทดลองกัดเซาะชิ้นงานเป็นหลุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ลึก 0.5 มิลลิเมตร โดยปรับเวลาเปิดตามที่กำหนดไว้ดังตารางที่ 3.2 และ 3.3 แล้วจึงทำการทดลองโดยการปรับเวลาปิดตามตารางที่ 3.4 และ 3.3 หลังจากทำการทดลองเสร็จแล้วจะต้องบันทึกข้อมูลดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.5 เครื่องกัดเซาะโลหะด้วยกระแสไฟฟ้ายี่ห้อ Aristech รุ่น 3D-CNC EDM

ก. บันทึกค่าอัตราการขจัดเนื้องาน(MRR)

บันทึกอัตราการขจัดเนื้องาน จากสมการที่ 2.4 ซึ่งเกิดจากการปริมาตรที่สึกหรือต่อหน่วยเวลาที่ใช้

$$MRR = \frac{\text{ปริมาตรเนื้องานที่สึกหรือไป (g หรือ mm}^3\text{)}}{\text{เวลาที่ใช้ (min)}} \quad (2.4)$$

ในการทดลองนี้จึงต้องทำการเก็บค่าข้อมูลความโตของอิเล็กโทรด (Diameter Electrode) และความลึกที่เกิดขึ้นบนผิวงานด้วยไมโครมิเตอร์ด้วยค่าความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร (ความลึกที่เกิดขึ้นบนผิวงานเท่ากับความหนาชิ้นงานก่อนสปาร์คด้วยความหนาชิ้นงานหลังสปาร์ค) พร้อมทั้งบันทึกเวลารวมในการสปาร์ค (Machining Time) จากหน้าจอแสดงผลดังรูปที่ 3.6 แล้วจึงนำค่ามาคำนวณตามสมการ 2.4 จะได้เป็นค่าอัตราการขจัดเนื้องาน (ข้อมูลการทดลองถูกบันทึกไว้ในภาคผนวก ก)



รูปที่ 3.6 หน้าจอแสดงเวลารวมในการทำงาน (Machining Time)

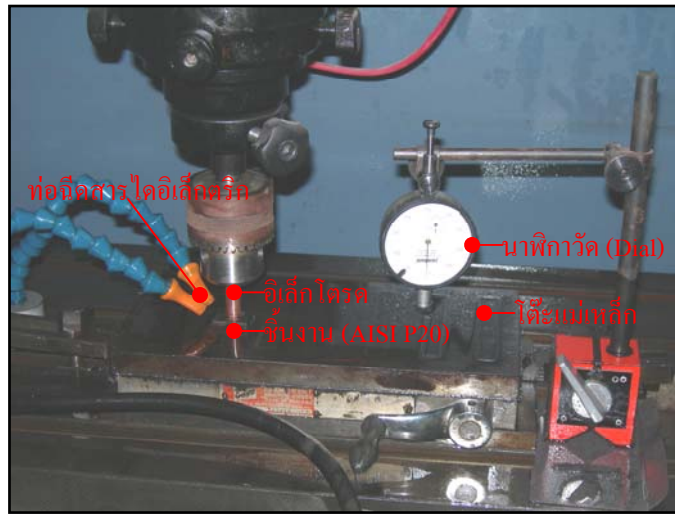
ข. บันทึกค่าอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (TWR)

บันทึกค่าอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด จากสมการที่ 2.5 เป็นการวัดการสึกของหัวอิเล็กโทรดต่อการความลึกของเนื้องานที่ถูกขจัดออก

$$\text{อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (TWR)} = \frac{\text{ปริมาตรขี้ไฟฟ้ที่สึกหรือไป (g หรือ mm}^3\text{)} \times 100}{\text{ความลึกของเนื้องานที่ถูกขจัดออก (mm)}} \quad (2.5)$$

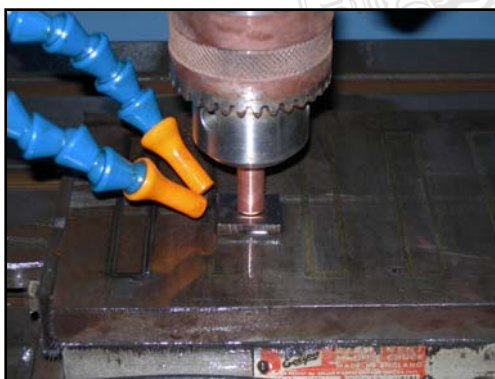
ในที่นี้จะวัดเป็นระยะสึกหรอโดยใช้นาฬิกาวัด (Dial) ค่าความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร ระยะวัด 10 มิลลิเมตร และมีขั้นตอนการวัดระยะสึกของอิเล็กโทรดกระทำตามขั้นตอนดังนี้

1. ติดตั้งชิ้นงานและอิเล็กโตรดพร้อมทั้งนาฬิกาวัด (Dial) ลงบนโต๊ะงาน ซึ่งในที่นี้จะใช้การจับยึดชิ้นงานด้วยโต๊ะแม่เหล็ก ดังแสดงการติดตั้งในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 การจับยึดชิ้นงานและติดตั้งอุปกรณ์วัดระยะสี่กระของอิเล็กโตรด

2. ทำการสร้างจุดอ้างอิงระหว่างผิวชิ้นงานกับผิวอิเล็กโตรด โดยกำหนดให้ผิวสัมผัสระหว่างอิเล็กโตรดและชิ้นงานมีค่าเป็นจุดศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 3.8 เมื่อสร้างจุดศูนย์แล้วจะยกอิเล็กโตรดจากผิวสัมผัสขึ้นมา 1 มิลลิเมตรเพื่อสร้างเป็นจุดอ้างอิงในการสปาร์ค (หากอิเล็กโตรดสัมผัสกับผิวงานจะทำให้ไม่สามารถสปาร์คเนื่องจากกระแสไหลครบวงจรจึงไม่สามารถสร้าง Gap ในการสปาร์คได้)



(ก) จุดอ้างอิงในการสปาร์ค



(ข) หน้าจอแสดงจุดอ้างอิงในการสปาร์ค

รูปที่ 3.8 จุดอ้างอิงผิวงานในการสปาร์ค

3. ทำการสร้างจุดอ้างอิงผิวอิเล็กโตรดกับนาฬิกาวัด โดยกำหนดให้ผิวสัมผัสระหว่างอิเล็กโตรดกับค่าแสดงผลบนหน้าปัดนาฬิกาวัดที่ค่า 5.00 มิลลิเมตร มีระยะสี่กระของอิเล็กโตรด

ก่อนการสปาร์กเท่ากับศูนย์ ซึ่งจะได้อีกแสดงค่าศูนย์ของอิเล็กโตรดจากหน้าจอ ดังแสดงในรูปที่ 3.9



(ก) หน้าปัดนาฬิกาวัดที่ค่า 5.00 มิลลิเมตร



(ข) อีกรแสดงค่าศูนย์ของอิเล็กโตรดจากหน้าจอ

รูปที่ 3.9 อีกรจุดศูนย์ของอิเล็กโตรดก่อนการสปาร์ก

4. ย้ายตำแหน่งอิเล็กโตรดมายังจุดอ้างอิงระหว่างผิวชิ้นงานกับผิวอิเล็กโตรด ที่หาไว้ในขั้นตอนที่ 2 แล้วทำการสปาร์กชิ้นงานดังรูปที่ 3.10 จนเสร็จสิ้นกระบวนการ จึงย้ายตำแหน่งของอิเล็กโตรดไปยังจุดอีกรจุดศูนย์ของอิเล็กโตรดก่อนการสปาร์ก โดยอ่านค่าจากหน้าจอที่หาไว้ในขั้นตอนที่ 3 ซึ่งอิเล็กโตรดจะกดทับลงบนนาฬิกาวัด ณ ตำแหน่งเดิมก่อนการสปาร์ก เพราะฉะนั้นค่าที่อ่านได้จากหน้าปัดนาฬิกาวัดจะเท่ากับระยะลึกของอิเล็กโตรดดังแสดงในรูปที่ 3.11 โดยหากเข็มนาฬิกาวัดเปลี่ยนแปลงไปจากตำแหน่งเดิมในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาแสดงว่าอิเล็กโตรดมีความยาวเพิ่มขึ้น แต่ถ้าหากเข็มนาฬิกาวัดหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาแสดงว่าอิเล็กโตรดสั้นลง (บันทึกค่าไว้ในภาคผนวก ก) ในกระบวนการวัดระยะลึกของอิเล็กโตรดห้ามเคลื่อนย้ายนาฬิกาวัดโดยเด็ดขาด



รูปที่ 3.10 การสปาร์กชิ้นงานเหล็กกล้า AISI P20



(ก) พิกัดแสดงค่าศูนย์ของอเล็กโตรด (ข) ค่าที่อ่านได้จากหน้าปัดนาฬิกาวัดเท่ากับ 0.01 มม.

รูปที่ 3.11 ค่าการสึกหรอของอเล็กโตรดที่อ่านจากนาฬิกาวัดที่พิกัดจุดศูนย์หลังการสปาร์ค

ค. บันทึกค่าความหยาบผิวเฉลี่ย(Ra)

สภาพพื้นผิวที่เกิดจากการสปาร์คจะเป็นแอ่งเล็กๆ จำนวนมาก ซึ่งหลังจากทำการสปาร์คแล้ว จะนำชิ้นงานมาวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของผิวงานด้วยเครื่องวัดความหยาบผิวยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น SurfTest 301 ดังแสดงในรูปที่ 3.12 ด้วยฟังก์ชัน Ra โดยใช้ระยะ Cut off 5 x 0.8 มิลลิเมตร โดยมีขั้นตอนในการวัดผิวชิ้นงานดังนี้คือ ทำความสะอาดผิวชิ้นงานโดยการล้างคราบสารไดอิเล็กตริกด้วยแอลกอฮอล์ แล้วจึงวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ย โดยทำการวัดจำนวน 5 ครั้งแล้วจึงนำมาคิดค่าเฉลี่ย



รูปที่ 3.12 เครื่องวัดความหยาบผิวเฉลี่ยยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น SurfTest 301

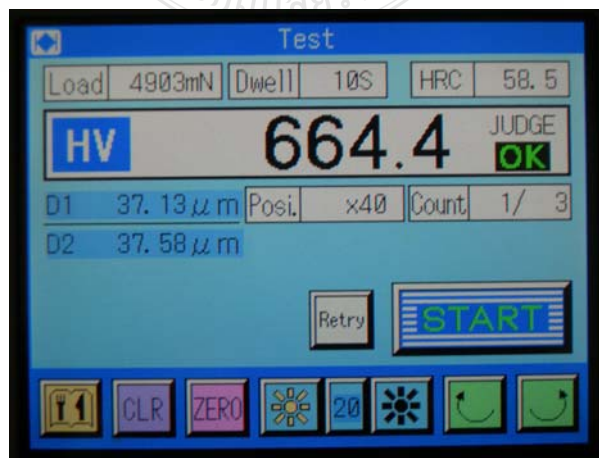
ง. วัดค่าการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งผิวงาน

การวัดค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็งผิวงานเป็นการเปรียบเทียบค่าความแข็งของผิวงานบริเวณพื้นผิวที่ไม่ได้สปาร์ค กับบริเวณพื้นผิวสปาร์ค โดยวัดค่าความแข็งด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบ ไมโครวิกเกอร์ ยี่ห้อ Matsuzawa รุ่น MMT-X7 ดังแสดงผลในรูปที่ 3.13 โดยมีขั้นตอนการทดสอบความแข็งดังนี้คือ



รูปที่ 3.13 เครื่องทดสอบความแข็งไมโครวิกเกอร์ Matsuzawa รุ่น MMT-X7

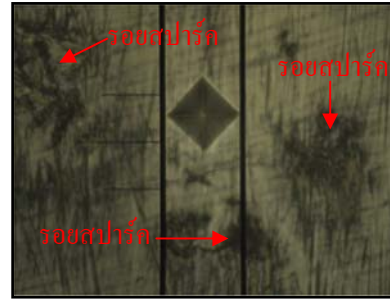
1. เตรียมชิ้นงานสำหรับการวัดความแข็งโดยทำการปรับสภาพผิวชิ้นงานด้วยการเครื่องเจียรในราบให้ใกล้เคียงกับผิวสปาร์ค แล้วทำการขัดผิวงานให้มีความเรียบด้วยเครื่องขัดกระดาษแบบจานกลม โดยใช้กระดาษทรายเบอร์ 150, 300, 500, 800, 1000, และ 1200 ตามลำดับ
2. ทำการทดสอบความแข็งด้วยเครื่องทดสอบความแข็งไมโครวิกเกอร์ Matsuzawa รุ่น MMT-X7 โดยใช้หัดกดเป็นปริมาตรฐานสี่เหลี่ยมจตุรัส มุม 136 องศา และใช้แรงกดในการทดสอบ 500 กรัม (4903mN) เวลาหน่วงในการกด 10 วินาที ซึ่งใช้กล้องส่องวัดรอยกดขนาดกำลังขยาย 40 เท่า โดยข้อมูลการทดสอบจะแสดงบนหน้าจอของเครื่องทดสอบความแข็งดังในรูปที่ 3.14 โดยสุ่มกดวัดความแข็งผิวชิ้นงานที่ไม่ได้สปาร์คจำนวน 3 ค่า (การกดวัดค่าความแข็ง 3 ครั้งคิดเป็น 1 ค่า) และวัดความแข็งผิวชิ้นงานที่ทำการสปาร์คจำนวน 3 ค่าโดยเลือกกดความแข็งในบริเวณที่มีร่องรอยของการสปาร์คหลงเหลืออยู่ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.14 การแสดงหน้าจอของเครื่องทดสอบความแข็ง Matsuzawa รุ่น MMT-X7



(ก) รอยกัดความแข็งผิวชิ้นงานที่ไม่ได้สปาร์ก



(ข) รอยกัดความแข็งผิวชิ้นงานที่ได้สปาร์ก

รูปที่ 3.15 รอยกัดวัดความแข็ง

3.2.8 กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบกระแส (Current)

กำหนดค่ากระแสที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวเฉลี่ยโดยเลือกจากการทดลองของการปรับค่าปัจจัยประสิทธิภาพ พบว่าที่ปัจจัยประสิทธิภาพโดยปรับเวลาเปิดที่ 6 เพอร์เซ็นต์ (เวลาเปิด 2 ไมโครวินาที เวลาปิด 32 ไมโครวินาที) ให้ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยต่ำสุด จึงใช้เป็นค่าคงที่ในการทดสอบกระแสที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความหยาบผิว โดยเปลี่ยนแปลงกระแส (Current) ที่ 3,6,9,12,15 และ 18 แอมแปร์ และมีตัวแปรดังตารางที่ 3.5 แล้วทำการทดลองและเก็บผลการ

ตารางที่ 3.5 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	ระยะห่างของการสปาร์ก (Gap)	10
7	เวลาหน่วงในการสปาร์ก (s)	0.5
8	เวลายกอิเล็กโตรด (s)	0.67
9	ของเหลว (Dielectric)	Spark Erosion 102(HF)

3.2.9 กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบเวลาหน่วงในการสปาร์ก (Working Time)

กำหนดค่าเวลาหน่วงในการสปาร์ก ที่มีผลต่ออัตราการขจัดเนื้องานโดยเลือกจากการทดลองปรับค่าปัจจัยประสิทธิภาพพบว่า ปัจจัยประสิทธิภาพโดยปรับเวลาเปิดที่ 94 เพอร์เซ็นต์ (เวลา

เปิด 32 ไมโครวินาที เวลาปิด 2 ไมโครวินาที) ให้อัตราการขจัดเนื้องานสูงสุดจึงใช้เป็นค่าคงที่ในการทดสอบเวลาหน่วงในการสปาร์คที่มีผลต่ออัตราขจัดเนื้องาน โดยเปลี่ยนแปลงเวลาหน่วงที่ 0.1, 0.5, 1.0, 1.6, 2.0, 2.6 และ 4 วินาที และมีตัวแปรดังตารางที่ 3.6 แล้วทำการทดลองและเก็บผลการทดลอง

ตารางที่ 3.6 ค่าตัวแปรในการทดสอบเวลาหน่วงในการสปาร์ค (Working Time)

ลำดับ	พารามิเตอร์	รายละเอียด
1	เวลาเปิด On – time (μs)	32
2	เวลาปิด Off – time (μs)	2
3	ขั้วอิเล็กโทรด (Polarity Electrode)	+
4	กระแส (A)	9
5	ความต่างศักย์ (V)	150
6	ระยะห่างของการสปาร์ค (Gap)	10
7	เวลาหน่วงในการสปาร์ค (s)	0.1, 0.5, 1.0, 1.6, 2.0, 2.6, 4.0
8	เวลายกอิเล็กโทรด (s)	0.67
9	ของเหลว (Dielectric)	Spark Erosion 102(HF)

3.2.10 ทดลองความลึกของการกัดเซาะที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของอิเล็กโทรด

การทดลองค่าความลึกของการกัดเซาะที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของอิเล็กโทรดเป็นการทดลองเพื่อเปรียบเทียบอัตราการขจัดเนื้องาน และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดที่ระดับค่าความลึกของการกัดเซาะต่างกัน โดยในที่นี้จะใช้ระดับความลึกที่ 0.5, 3.0, 6.0, 9.0 และ 12.0 มิลลิเมตรตามลำดับ โดยเลือกใช้ปัจจัยประสิทธิภาพการทำงานที่สูงที่สุดของแต่ละชนิดวัสดุอิเล็กโทรด

จากการทำการทดลองทำให้สามารถรวบรวมข้อมูลของอิเล็กโทรดก่อนและหลังการทดสอบ ดังแสดงไว้ในภาคผนวก ก. ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง และจากข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะถูกนำไปวิเคราะห์ผลและทำการเปรียบเทียบความแตกต่างต่อไป

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

ผลการทดลองเพื่อศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพอิเล็กโทรดทองแดงแท่งตัน และอิเล็กโทรดชุบเคลือบผิว ซึ่งประกอบด้วยอิเล็กโทรดทองแดงชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง และอิเล็กโทรดเหล็กกล้า St 37 ชุบเคลือบผิวด้วยทองแดงสำหรับใช้เป็นวัสดุอิเล็กโทรดในกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าบนวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้า AISI P20 โดยการปรับค่าปัจจัยประสิทธิภาพจากเวลาเปิด ปรับค่าปัจจัยประสิทธิภาพเวลาปิด ปรับค่ากระแส และปรับค่าเวลาหน่วงในการสปาร์ค เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานในรูปของอัตราการกัดเนื้องาน อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด รวมทั้งคุณภาพผิวงานในรูปของค่าความหยาบผิวเฉลี่ย และการเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็งผิวงาน โดยผลการทดลองที่แสดงในบทนี้จะเป็นผลการทดลองที่ได้ทำการคำนวณค่าจากข้อมูลดิบในภาคผนวก ก เพื่อใช้ในการวิเคราะห์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของอิเล็กโทรดทองแดงแท่งตันและอิเล็กโทรดชุบเคลือบผิว ซึ่งแบ่งผลการทดลองตามตัวแปรและชนิดของอิเล็กโทรด

4.1 ผลการทดลอง

4.1.1 ผลการทดลองปรับค่าปัจจัยประสิทธิภาพจากเวลาเปิด (On-time)

การทดลองปรับค่าปัจจัยประสิทธิภาพจากเวลาเปิดเป็นการทดสอบช่วงเวลาที่ปล่อยให้เกิดการถ่ายเทประจุระหว่างขั้วอิเล็กโทรดและขั้วชิ้นงาน เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงาน และผลกระทบของกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าที่มีผลต่อคุณภาพผิวงานจากวัสดุอิเล็กโทรดทองแดงแท่งตัน และอิเล็กโทรดชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง โดยควบคุมพารามิเตอร์คงที่ตามตารางที่ 3.2 และปรับพารามิเตอร์ตามตารางที่ 3.1 โดยสามารถคำนวณผลการทดลองที่มีต่อประสิทธิภาพการทำงานอยู่ในรูปของ อัตราขจัดเนื้องาน (MRR) อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (TWR) และผลกระทบที่มีต่อคุณภาพผิวงานอยู่ในรูปของค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) และการเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็งผิวงานตามชนิดของวัสดุอิเล็กโทรดดังตารางที่ 4.1 ผลการทดลองโดยใช้อิเล็กโทรดทองแดงแท่งตัน ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองโดยใช้อิเล็กโทรดทองแดงชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง และตารางที่ 4.3 ผลการทดลองโดยใช้อิเล็กโทรดเหล็กกล้า St 37 ชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองอิเล็กโตรดทองแดงแท่งตัน โดยการปรับค่าปัจจัยประสิทธิภาพจากเวลาเปิด (On-Time)

ลำดับ ที่	เวลาเปิด (μs)	เวลาปิด (μs)	ปัจจัย ประสิทธิภาพ (%)	MRR (mm^3/min)	TWR (%)	Ra (μm)	ค่าความแข็งที่ เปลี่ยนแปลง (HV)
1	2	32	6	0.19	42.86	1.98	19.00
2	10	32	24	0.94	11.11	3.01	7.27
3	20	32	38	2.28	2.04	4.10	-65.53
4	32	32	50	3.09	0.00	4.68	-53.00
5	50	32	61	3.88	-5.66	5.64	-129.20
6	100	32	76	4.04	-3.85	6.97	-149.97
7	200	32	86	2.91	-9.09	6.74	26.63
8	510	32	94	2.06	-3.85	3.60	132.17

ที่มา : จากการนำข้อมูลในตารางที่ ก.1 (ภาคผนวก ก) มาคำนวณ

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองอิเล็กโตรดทองแดงชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง โดยการปรับค่าปัจจัย
ประสิทธิภาพจากเวลาเปิด (On-Time)

ลำดับ ที่	เวลาเปิด (μs)	เวลาปิด (μs)	ปัจจัย ประสิทธิภาพ (%)	MRR (mm^3/min)	TWR (%)	Ra (μm)	ค่าความแข็งที่ เปลี่ยนแปลง (HV)
1	2	32	6	0.13	66.67	2.00	64.93
2	10	32	24	0.63	28.21	2.90	-10.27
3	20	32	38	1.78	4.17	4.58	-34.03
4	32	32	50	2.42	6.38	5.01	-49.60
5	50	32	61	3.48	2.04	5.40	-114.77
6	100	32	76	4.04	-1.96	6.44	-40.30
7	200	32	86	4.20	-1.96	7.29	-9.07
8	510	32	94	2.29	-1.96	3.75	262.43

ที่มา : จากการนำข้อมูลในตารางที่ ก.13 (ภาคผนวก ก) มาคำนวณ

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองอิเล็กโตรดเหล็กกล้า St 37 ชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง โดยการปรับค่าปัจจัย ประสิทธิภาพจากเวลาเปิด (On-Time)

ลำดับ ที่	เวลาเปิด (μ s)	เวลาปิด (μ s)	ปัจจัย ประสิทธิภาพ (%)	MRR (mm^3/min)	TWR (%)	Ra (μ m)	ค่าความแข็งที่ เปลี่ยนแปลง (HV)
1	2	32	6	0.09	38.89	2.09	12.00
2	10	32	24	0.62	6.38	2.97	-10.87
3	20	32	38	1.57	8.70	3.91	-42.87
4	32	32	50	1.62	0.00	4.24	-41.77
5	50	32	61	1.87	0.00	4.82	-117.77
6	100	32	76	2.41	0.00	6.73	-41.73
7	200	32	86	2.80	-3.85	6.75	-12.30
8	510	32	94	2.05	-5.66	4.70	249.43

ที่มา : จากการนำข้อมูลในตารางที่ ก.35 (ภาคผนวก ก) มาคำนวณ

4.1.2 ผลการทดลองปรับค่าปัจจัยประสิทธิภาพจากเวลาปิด (Off-time)

การทดลองปรับพารามิเตอร์เวลาปิดเป็นการทดสอบช่วงเวลาที่หยุดการปล่อยประจุซึ่งไม่ทำให้เกิดการถ่ายเทประจุระหว่างขั้วอิเล็กโตรดและขั้วชิ้นงาน เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงาน และผลกระทบของกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าที่มีผลต่อคุณภาพผิวงาน จากวัสดุอิเล็กโตรดทองแดงแท่งตัน และอิเล็กโตรดชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง โดยควบคุมพารามิเตอร์คงที่ตามตารางที่ 3.2 และปรับพารามิเตอร์ตามตารางที่ 3.3 ซึ่งสามารถสรุปผลของประสิทธิภาพการทำงานอยู่ในรูปของ อัตราขจัดเนื้องาน(MRR) อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด (TWR) และผลกระทบที่มีต่อคุณภาพผิวงานอยู่ในรูปของความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) และการเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็งผิวงานตามชนิดของวัสดุอิเล็กโตรดดัง ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองโดยใช้อิเล็กโตรดทองแดงแท่งตัน ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองโดยใช้อิเล็กโตรดทองแดงชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง และตารางที่ 4.6 ผลการทดลองโดยใช้อิเล็กโตรดเหล็กกล้า St 37 ชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง

ตารางที่ 4.4 การทดลองอิเล็กโตรดทองแดงแท่งตันโดยการปรับค่าปัจจัยประสิทธิภาพจากเวลาปิด (Off-Time)

ลำดับ ที่	เวลาเปิด (μ s)	เวลาปิด (μ s)	ปัจจัย ประสิทธิภาพ (%)	MRR (mm^3/min)	TWR (%)	Ra (μ m)	ค่าความแข็งที่ เปลี่ยนแปลง (HV)
1	32	510	6	0.03	7.41	4.87	-23.03
2	32	100	24	0.77	2.04	4.64	-23.27
3	32	50	39	1.50	4.17	4.53	-29.97
4	32	32	50	2.92	4.17	4.78	-42.70
5	32	20	61	3.11	2.04	4.86	-54.10
6	32	10	76	4.49	2.04	4.91	-88.47
7	32	4	89	4.84	4.17	4.77	-98.60
8	32	2	94	5.83	8.70	4.88	-100.63

ที่มา : จากการนำข้อมูลในตารางที่ ก.4 (ภาคผนวก ก) มาคำนวณ

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองอิเล็กโตรดทองแดงชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง โดยการปรับค่าปัจจัย ประสิทธิภาพจากเวลาปิด (Off-Time)

ลำดับ ที่	เวลาเปิด (μ s)	เวลาปิด (μ s)	ปัจจัย ประสิทธิภาพ (%)	MRR (mm^3/min)	TWR (%)	Ra (μ m)	ค่าความแข็งที่ เปลี่ยนแปลง (HV)
1	32	510	6	0.02	16.13	4.62	-22.00
2	32	100	24	0.70	6.38	5.13	-9.37
3	32	50	39	1.45	6.38	4.91	-50.40
4	32	32	50	2.17	6.38	4.82	-52.10
5	32	20	61	2.84	2.04	4.89	-57.87
6	32	10	76	3.94	2.04	5.06	-74.50
7	32	4	89	4.73	2.04	4.8	-79.07
8	32	2	94	5.28	4.17	5.32	-80.00

ที่มา : จากการนำข้อมูลในตารางที่ ก.16 (ภาคผนวก ก) มาคำนวณ

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองอิเล็กโตรดเหล็กกล้า St 37 ชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง โดยการปรับค่าปัจจัย ประสิทธิภาพจากเวลาปิด (Off-Time)

ลำดับ ที่	เวลาเปิด (μ s)	เวลาปิด (μ s)	ปัจจัย ประสิทธิภาพ (%)	MRR (mm^3/min)	TWR (%)	Ra (μm)	ค่าความแข็งที่ เปลี่ยนแปลง (HV)
1	32	510	6	0.03	25.00	5.44	-10.60
2	32	100	24	0.50	11.11	4.76	-8.87
3	32	50	39	0.97	6.38	4.4	-27.70
4	32	32	50	1.48	4.17	4.49	-24.43
5	32	20	61	1.83	4.17	4.36	-29.83
6	32	10	76	2.64	4.17	4.55	-30.23
7	32	4	89	3.21	4.17	4.46	-43.00
8	32	2	94	3.96	6.38	4.46	-44.47

ที่มา : จากการนำข้อมูลในตารางที่ ก.28 (ภาคผนวก ก) มาคำนวณ

4.1.3 ผลการทดลองปรับค่ากระแส (Current)

การทดลองปรับค่ากระแสเป็นการทดสอบพารามิเตอร์ที่มีผลโดยตรงต่อต้นกำเนิดพลังงานความร้อนของกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงาน และผลกระทบของกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าที่มีผลต่อคุณภาพผิวงานจากวัสดุอิเล็กโตรดทองแดงแท่งตัน และอิเล็กโตรดชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง โดยควบคุมพารามิเตอร์คงที่ตามตารางที่ 3.4 และปรับพารามิเตอร์กระแส 6 ระดับคือ 3, 6, 9, 12, 15, และ 18 แอมแปร์ ซึ่งสามารถสรุปผลของประสิทธิภาพการทำงานอยู่ในรูปของ อัตราขจัดเนื้องาน (MRR) อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด (TWR) และผลกระทบที่มีต่อคุณภาพผิวงานอยู่ในรูปของความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) และการเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็งผิวงานตามชนิดของวัสดุอิเล็กโตรดดัง ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองโดยใช้อิเล็กโตรดทองแดงแท่งตัน ตารางที่ 4.8 ผลการทดลองโดยใช้อิเล็กโตรดทองแดงชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง และตารางที่ 4.9 ผลการทดลองโดยใช้อิเล็กโตรดเหล็กกล้า St 37 ชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองอิเล็กโตรดทองแดงแท่งตัน โดยปรับค่ากระแส (Current)

ลำดับ ที่	กระแส (A)	MRR (mm ³ /min)	TWR (%)	Ra (μm)	ค่าความแข็งที่ เปลี่ยนแปลง(HV)
1	3	0.06	33.33	1.60	-17.40
2	6	0.14	47.06	2.02	-4.37
3	9	0.22	11.11	2.04	-13.27
4	12	0.25	53.33	2.17	-16.33
5	15	0.27	72.41	2.36	-17.77
6	18	0.19	100.00	2.49	26.97

ที่มา : จากการนำข้อมูลในตารางที่ ก.8 (ภาคผนวก ก) มาคำนวณ

ตารางที่ 4.8 ผลการทดลองอิเล็กโตรดทองแดงชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง โดยการปรับค่ากระแส
(Current)

ลำดับ ที่	กระแส (A)	MRR (mm ³ /min)	TWR (%)	Ra (μm)	ค่าความแข็งที่ เปลี่ยนแปลง(HV)
1	3	0.05	44.44	1.66	-5.37
2	6	0.11	61.29	2.00	-9.90
3	9	0.16	61.29	2.05	-17.43
4	12	0.20	56.25	2.38	-28.73
5	15	0.24	78.57	2.51	-23.13
6	18	0.22	92.31	2.56	-66.37

ที่มา : จากการนำข้อมูลในตารางที่ ก.19 (ภาคผนวก ก) มาคำนวณ

ตารางที่ 4.9 ผลการทดลองอิเล็กโตรดเหล็กกล้า St 37 ชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง โดยการปรับค่ากระแส (Current)

ลำดับที่	กระแส (A)	MRR (mm ³ /min)	TWR (%)	Ra (μm)	ค่าความแข็งที่เปลี่ยนแปลง(HV)
1	3	0.04	71.43	2.01	0.67
2	6	0.11	56.25	2.08	-24.00
3	9	0.14	56.25	2.09	-63.73
4	12	0.19	66.67	2.34	-65.33
5	15	0.19	78.57	2.55	-91.28
6	18	0.15	56.25	2.42	-105.20

ที่มา : จากการนำข้อมูลในตารางที่ ก.31 (ภาคผนวก ก) มาคำนวณ

4.1.4 ผลการทดลองปรับค่าเวลาหน่วงในการสปาร์ก (Working Time)

การทดลองปรับค่าเวลาหน่วงในการสปาร์กเป็นการทดสอบระยะเวลาในการหน่วงเวลาของการสปาร์ก เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงาน และผลกระทบของกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าที่มีผลต่อคุณภาพผิวงานจากวัสดุอิเล็กโตรดทองแดงแท่งตัน และอิเล็กโตรดชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง โดยควบคุมพารามิเตอร์คงที่ตามตารางที่ 3.4 และปรับพารามิเตอร์เวลาหน่วงในการสปาร์ก 7 ระดับ ที่เวลา 0.1, 0.5, 1.0, 1.6, 2.0, 2.6 และ 4 วินาที ซึ่งสามารถสรุปผลของประสิทธิภาพการทำงานอยู่ในรูปของ อัตราการกัดเนื้องาน(MRR) อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด (TWR) และผลกระทบที่มีต่อคุณภาพผิวงานอยู่ในรูปของความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) และการเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็งผิวงานตามชนิดของวัสดุอิเล็กโตรดดัง ตารางที่ 4.10 ผลการทดลองโดยใช้อิเล็กโตรดทองแดงแท่งตัน ตารางที่ 4.11 ผลการทดลองโดยใช้อิเล็กโตรดทองแดงชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง และตารางที่ 4.12 ผลการทดลองโดยใช้อิเล็กโตรดเหล็กกล้า St 37 ชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง

ตารางที่ 4.10 ผลการทดลองอิเล็กโตรดทองแดงแท่งตันโดยปรับค่าเวลาหน่วยในการสปาร์ค
(Working Time)

ลำดับ ที่	เวลาหน่วย (s)	MRR (mm ³ /min)	TWR (%)	Ra (μm)	ค่าความแข็งที่ เปลี่ยนแปลง(HV)
1	0.10	0.21	66.67	4.57	-39.53
2	0.50	5.83	8.70	4.88	-100.33
3	1.00	9.76	0.00	4.73	-116.17
4	1.60	10.51	0.00	4.34	-99.87
5	2.00	10.86	0.00	4.78	-74.63
6	2.60	11.35	0.00	5.28	-81.20
7	4.00	12.33	-1.96	5.03	-60.20

ที่มา : จากการนำข้อมูลในตารางที่ ก.10 (ภาคผนวก ก) มาคำนวณ

ตารางที่ 4.11 ผลการทดลองอิเล็กโตรดทองแดงชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง โดยการปรับค่าเวลาหน่วย
ในการสปาร์ค (Working Time)

ลำดับ ที่	เวลาหน่วย (s)	MRR (mm ³ /min)	TWR (%)	Ra (μm)	ค่าความแข็งที่ เปลี่ยนแปลง(HV)
1	0.10	0.53	6.38	4.26	-70.93
2	0.50	5.40	2.04	4.76	-83.42
3	1.00	8.20	4.17	4.60	-85.22
4	1.60	9.67	2.04	5.07	-87.90
5	2.00	10.18	2.04	4.72	-87.63
6	2.60	10.50	2.04	4.77	-35.63
7	4.00	12.10	-1.96	5.30	-22.60

ที่มา : จากการนำข้อมูลในตารางที่ ก.22 (ภาคผนวก ก) มาคำนวณ

ตารางที่ 4.12 ผลการทดลองอิเล็กโตรดเหล็กกล้า St 37 ชุบเคลือบผิวด้วยทองแดงโดยการปรับค่าเวลา
 หนึ่งในการสปาร์ค (Working Time)

ลำดับ ที่	เวลาหนึ่ง (s)	MRR (mm ³ /min)	TWR (%)	Ra (μ m)	ค่าความแข็งที่ เปลี่ยนแปลง(HV)
1	0.10	0.24	6.38	4.49	-84.70
2	0.50	4.45	2.04	4.49	-82.83
3	1.00	7.54	0.00	4.62	-99.10
4	1.60	8.93	0.00	4.68	-107.50
5	2.00	8.31	0.00	4.97	-118.40
6	2.60	9.98	0.00	5.04	-94.97
7	4.00	9.31	4.17	4.90	-52.17

ที่มา : จากการนำข้อมูลในตารางที่ ก.34 (ภาคผนวก ก) มาคำนวณ

4.1.4 ผลการทดลองความลึกของการกัดเซาะที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของอิเล็กโตรด

การทดลองค่าความลึกของการกัดเซาะที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของอิเล็กโตรดเป็นการทดลองเพื่อเปรียบเทียบอัตราการขจัดเนื้องาน และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดที่ระดับค่าความลึกของการกัดเซาะต่างกัน โดยในที่นี้จะใช้ระดับความลึกที่ 0.5, 3.0, 6.0, 9.0 และ 12.0 มิลลิเมตรตามลำดับ โดยเลือกใช้ปัจจัยประสิทธิภาพการทำงานที่สูงที่สุดของแต่ละชนิดวัสดุอิเล็กโตรด ซึ่งจากการทดลองก่อนหน้านี้พบว่าอิเล็กโตรดทองแดงแห้งแห้งต้นให้ประสิทธิภาพการทำงานสูงสุดอยู่ที่ เวลาเปิด 100 μ s, เวลาปิด 2 μ s, กระแสที่ 12 แอมแปร์ และเวลาหนึ่งในการสปาร์คอยู่ที่ 1.6 วินาที จึงใช้ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวในการทดสอบและได้ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.13 ในส่วนของอิเล็กโตรดชุบเคลือบผิวพบว่าประสิทธิภาพการทำงานสูงสุดอยู่ที่ เวลาเปิด 200 μ s, เวลาปิด 2 μ s, กระแสที่ 12 แอมแปร์ และเวลาหนึ่งในการสปาร์คอยู่ที่ 1.6 วินาที จึงใช้ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวในการทดสอบและได้ผลการทดสอบของอิเล็กโตรดทองแดงชุบเคลือบผิวด้วยทองแดงดังแสดงในตารางที่ 4.14 และผลการทดลองของอิเล็กโตรดเหล็กกล้า St 37 ชุบเคลือบผิวด้วยทองแดงดังแสดงในตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.13 ผลการทดลองความลึกของการกัดเซาะที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของอิเล็กโตรด
ทองแดงแท่งตัน

ลำดับที่	ค่าความลึก (mm)	MRR (mm ³ /min)	TWR (%)
1	0.5	15.42	-4.17
2	3.0	14.74	-0.67
3	6.0	15.03	-0.17
4	9.0	15.90	-0.11
5	12.0	16.15	0.08

ที่มา : จากการนำข้อมูลในตารางที่ ก.37 (ภาคผนวก ก) มาคำนวณ

ตารางที่ 4.14 ผลการทดลองความลึกของการกัดเซาะที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของอิเล็กโตรด
ทองแดงชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง

ลำดับที่	ค่าความลึก (mm)	MRR (mm ³ /min)	TWR (%)
1	0.5	13.58	-2.04
2	3.0	13.13	-0.67
3	6.0	12.99	-0.33
4	9.0	13.18	-0.33
5	12.0	13.20	0.00

ที่มา : จากการนำข้อมูลในตารางที่ ก.38 (ภาคผนวก ก) มาคำนวณ

ตารางที่ 4.15 ผลการทดลองความลึกของการกัดเซาะที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของอิเล็กโตรด
เหล็กกล้า St 37 ชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง

ลำดับที่	ค่าความลึก (mm)	MRR (mm ³ /min)	TWR (%)
1	0.5	8.90	-2.04
2	3.0	9.67	-0.33
3	6.0	9.34	-0.17
4	9.0	9.28	-0.11
5	12.0	9.17	0.00

ที่มา : จากการนำข้อมูลในตารางที่ ก.39 (ภาคผนวก ก) มาคำนวณ

4.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพอิเล็กทรอนิกส์โครงข่ายและอิเล็กทรอนิกส์ขับเคลื่อนด้วยทองแดงสำหรับกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า โดยในขั้นต้นจะทำการเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลของอิเล็กทรอนิกส์ที่มีต่อประสิทธิภาพการทำงานในรูปของอัตราการขจัดเนื้องานและอัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์โครงข่าย ตลอดจนผลที่มีต่อคุณภาพผิวงานในรูปของค่าความหยาบผิวเฉลี่ยและการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งผิวงาน โดยจำแนกตามพารามิเตอร์ที่ได้จากการศึกษา แล้วจึงเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของของอิเล็กทรอนิกส์โครงข่ายและอิเล็กทรอนิกส์ขับเคลื่อนด้วยทองแดง ซึ่งประกอบด้วยอิเล็กทรอนิกส์โครงข่ายขับเคลื่อนด้วยทองแดงและอิเล็กทรอนิกส์โครงข่ายเหล็กกล้า St 37 ขับเคลื่อนด้วยทองแดง ภายใต้เงื่อนไขประสิทธิภาพการทำงานที่ดีที่สุดของแต่ละชนิดวัสดุอิเล็กทรอนิกส์โครงข่าย

4.2.1 วิเคราะห์ปัจจัยประสิทธิภาพโดยการปรับเวลาเปิด

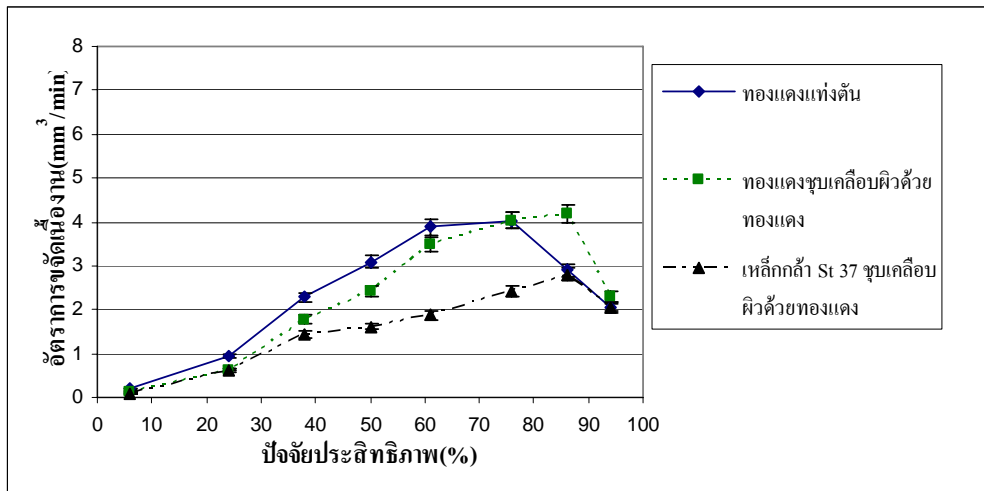
ปัจจัยประสิทธิภาพหมายถึงประสิทธิภาพการทำงานของหนึ่งวัฏจักรการสปาร์ก ซึ่งสามารถคำนวณได้จากค่าเวลาเปิดต่อเวลารวมในหนึ่งวัฏจักรการทำงานดังสมการที่ 2.1 [2]

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

การทดลองนี้คงที่เวลาเปิดที่ 32 μs ซึ่งหมายความว่าปัจจัยประสิทธิภาพที่สูงนั้นย่อมมาจากเวลาเปิดที่มาก โดยสามารถสรุปผลการทดลองตามประสิทธิภาพการทำงานซึ่งถูกวัดอยู่ในรูปของอัตราการขจัดเนื้องาน อัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์โครงข่าย ตลอดจนค่าความหยาบผิวเฉลี่ยและค่าการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งผิวงานได้ดังนี้

ก. อัตราการขจัดเนื้องาน(MRR)

ผลการทดลองพบว่าอัตราการขจัดเนื้องานเพิ่มสูงขึ้นตามค่าปัจจัยประสิทธิภาพจนถึงค่าปัจจัยประสิทธิภาพค่าหนึ่งก็จะทำให้อัตราการขจัดเนื้องานลดลงขณะที่ปัจจัยประสิทธิภาพสูงขึ้นดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 4.1 สาเหตุของการลดลงของอัตราการขจัดเนื้องานเกิดจากปัจจัยประสิทธิภาพสูงที่เกิดจากค่าเวลาเปิดมากจะทำให้เกิดการหลอมเหลวของผิวงานเป็นบริเวณกว้าง [1,2] ทำให้ไม่สามารถขจัดเนื้องานที่หลอมเหลวออกได้หมดและมีเศษที่ถูกขจัดออกบางส่วนกลับเข้ามารวมตัวกับผิวงานขณะเย็นตัว เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานพบว่า อิเล็กทรอนิกส์โครงข่ายและอิเล็กทรอนิกส์ขับเคลื่อนให้อัตราการขจัดเนื้องานสูงสุดที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 76 เปอร์เซ็นต์ ส่วนอิเล็กทรอนิกส์ขับเคลื่อนด้วยทองแดงให้อัตราการขจัดเนื้องานสูงสุดที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 86 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อปัจจัยประสิทธิภาพมากกว่าค่าดังกล่าวอัตราการขจัดเนื้องานของอิเล็กทรอนิกส์โครงข่ายจะลดลง จึงทำให้สามารถสรุปได้ว่าที่ปัจจัยประสิทธิภาพเท่ากันอิเล็กทรอนิกส์โครงข่ายและอิเล็กทรอนิกส์ขับเคลื่อนจะทำให้เกิดอัตราการขจัดเนื้องานสูงกว่าอิเล็กทรอนิกส์โครงข่ายขับเคลื่อนด้วยทองแดง



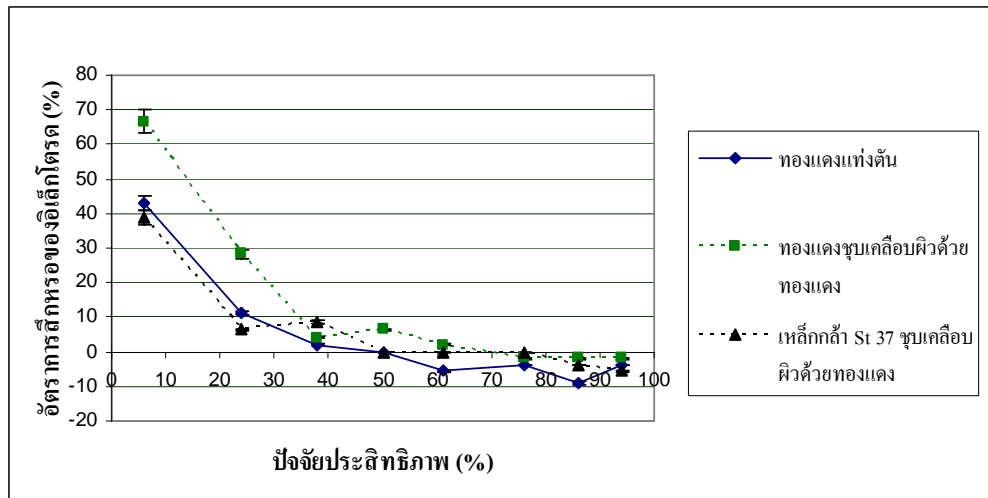
รูปที่ 4.1 อัตราการขจัดเนื้องานภายใต้ปัจจัยประสิทธิภาพโดยการปรับเวลาเปิด

ข. อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (TWR)

อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดเกิดจากการคำนวณหาอัตราส่วนของวัสดุอิเล็กโทรดที่หายไปต่อเนื้องานที่ถูกขจัดออก ดังสมการที่ 2.5

$$TWR = \frac{\text{ปริมาตรขี้ไฟที่สึกหรอไป (g หรือ mm}^3\text{)} \times 100}{\text{ปริมาตรเนื้องานที่ถูกขจัดออก (g หรือ mm}^3\text{)}} \quad (2.5)$$

จากสมการดังกล่าวหากขี้ไฟอิเล็กโทรดเกิดการสึกหรอ ค่าอัตราการสึกหรอจะมีค่าเป็นบวก ดังนั้นหากวัสดุอิเล็กโทรดมีความยาวเพิ่มขึ้นหลังจากทำให้ค่าอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดติดลบ ดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 4.2 ซึ่งพบว่า เมื่อปัจจัยประสิทธิภาพจากการปรับเวลาเปิดสูงขึ้น อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดจะลดต่ำลง โดยที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 50 เปอร์เซ็นต์อิเล็กโทรดทองแดงแท่งตันจะไม่เกิดการสึกหรอ และที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 76 เปอร์เซ็นต์อิเล็กโทรดชุบเคลือบผิวจะไม่เกิดการสึกหรอ โดยเมื่อปัจจัยประสิทธิภาพสูงกว่าค่าดังกล่าวจะทำให้อิเล็กโทรดมีความยาวเพิ่มขึ้นเนื่องจากเศษโลหะและคาร์บอนที่เกิดจากการแตกตัวของสารไฮโดรคาร์บอนเข้าเคลือบผิวของวัสดุอิเล็กโทรดที่เป็นขี้ไฟ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 [2,15] จึงทำให้สามารถสรุปได้ว่าที่ปัจจัยประสิทธิภาพสูงอิเล็กโทรดแต่ละชนิดจะให้อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดแตกต่างกันน้อยมาก



รูปที่ 4.2 อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดภายใต้ปัจจัยประสิทธิภาพโดยการปรับเวลาเปิด



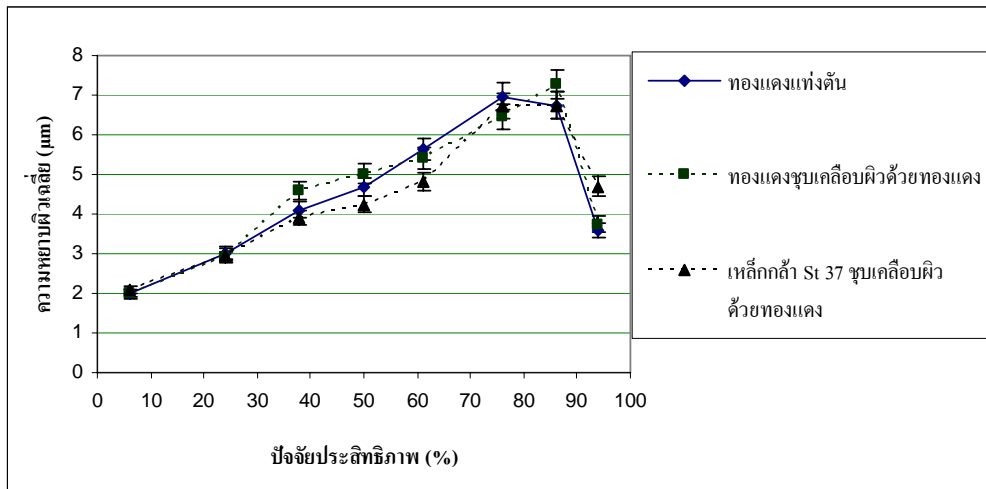
(ก) เกิดการสึกหรอของอิเล็กโตรด

(ข) ไม่เกิดการสึกหรอของอิเล็กโตรด

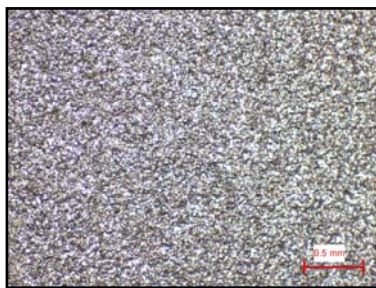
รูปที่ 4.3 อิเล็กโตรดทองแดงของแข็งเมื่อผ่านการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า

ก. ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra)

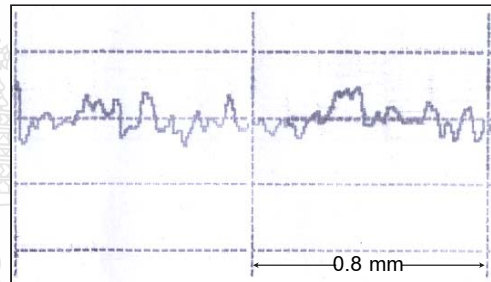
จากการทดลองปัจจัยประสิทธิภาพโดยการปรับเวลาเปิดพบว่าค่าความหยาบผิวเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นตามค่าปัจจัยประสิทธิภาพ โดยค่าความหยาบผิวเฉลี่ยเพิ่มสูงสุดที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 76 เปอร์เซ็นต์สำหรับอิเล็กโตรดทองแดงแท่งตัน และ 86 เปอร์เซ็นต์สำหรับทองแดงชุบเคลือบผิว ดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 4.4 และเมื่อปัจจัยประสิทธิภาพสูงกว่าค่าดังกล่าวค่าความหยาบผิวเฉลี่ยก็จะลดลง เนื่องจากเกิดความร้อนที่สูงทำให้เกิดการหลอมละลายของผิวงาน ซึ่งจะส่งผลทำให้ยอดผิวด้านบนของชิ้นงานเกิดการหลอมละลายทำให้เกิดการยุบตัวต่ำลง (ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยเป็นการคำนวณค่ากลางระหว่างจุดยอดและจุดก้นแอ่ง เพื่อกำหนดเส้นกึ่งกลาง (Mean) แล้วนำค่าที่ห่างจากเส้นกึ่งกลางด้านบนมาหักล้างกับค่าที่ห่างจากเส้นกึ่งกลางด้านล่างเทียบกับระยะทาง) เป็นเหตุให้ความหยาบผิวเฉลี่ยลดลงดังรูปที่ 4.5 โดยลักษณะการเพิ่มขึ้นลดลงของความหยาบผิวเฉลี่ยจะสัมพันธ์กับการเกิดอัตราการกัดเนื้องาน และเมื่อเปรียบเทียบปัจจัยประสิทธิภาพโดยปรับเวลาเปิดพบว่าอิเล็กโตรดทั้งสามชนิดให้ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยแตกต่างกันน้อยมาก



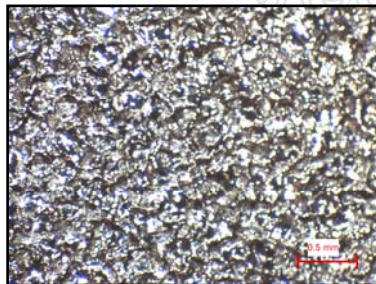
รูปที่ 4.4 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยภายใต้ปัจจัยประสิทธิภาพโดยการปรับเวลาเปิด



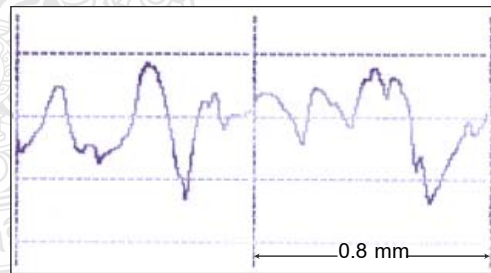
(ก) ผิวงานปัจจัยประสิทธิภาพ 6 %



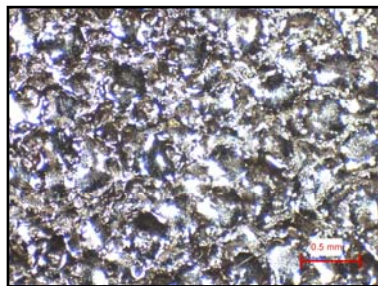
(ข) กราฟพื้นผิวงานปัจจัยประสิทธิภาพ 6 %



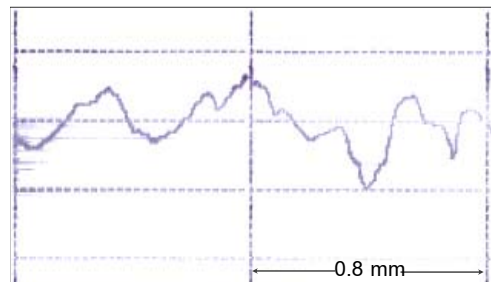
(ค) ผิวงานปัจจัยประสิทธิภาพ 76 %



(ง) กราฟพื้นผิวงานปัจจัยประสิทธิภาพ 76 %



(จ) ผิวงานปัจจัยประสิทธิภาพ 94 %

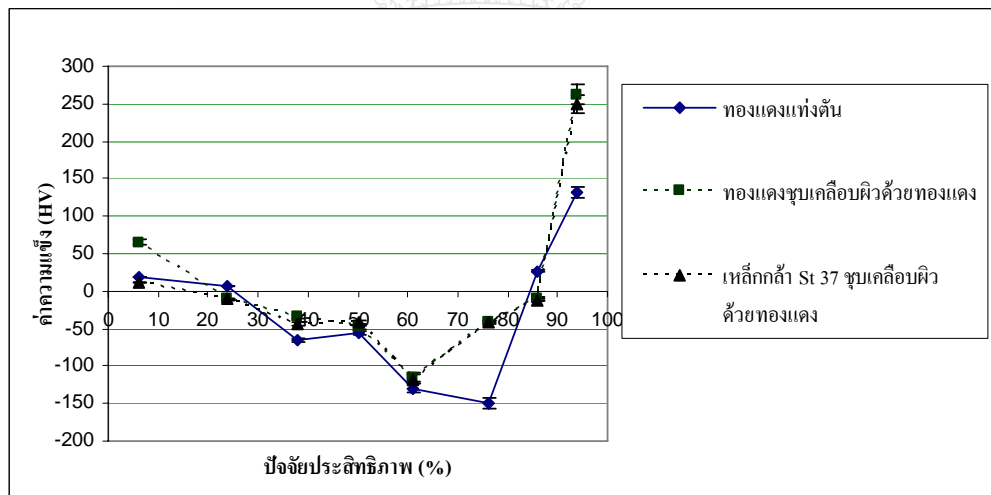


(ฉ) กราฟพื้นผิวงานปัจจัยประสิทธิภาพ 94 %

รูปที่ 4.5 ลักษณะผิวงานที่เกิดจากค่าปัจจัยประสิทธิภาพโดยเวลาเปิด (กำลังขยาย 35 เท่า)

ง. การเปลี่ยนแปลงค่าความแข็ง (Hardness)

จากการทดลองปัจจัยประสิทธิภาพ โดยการปรับเวลาเปิดพบว่าเมื่อเวลาเปิดเพิ่มขึ้นค่าความแข็งของชิ้นงานจะลดลง เนื่องจากเวลาเปิดที่มากจะทำให้อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในกระบวนการเพียงพอที่จะทำให้โครงสร้างที่ผิดปกติจากกระบวนการชุบแข็งเกิดการคลายตัวให้กลับสู่สภาพเดิมก่อนการชุบแข็งคล้ายกับกระบวนการอบอ่อน (Annealing) และเมื่อปัจจัยประสิทธิภาพจากการปรับเวลาเปิดสูงขึ้น ความร้อนก็จะมากพอที่ทำให้โครงสร้างบริเวณผิวชิ้นงานเกิดการผิดปกติเมื่อมีการระบายความร้อนด้วยสารไดอิเล็กทริกทำให้ผิวงานเย็นตัวอย่างรวดเร็ว เป็นเหตุให้ความแข็งผิวชิ้นงานเพิ่มขึ้นคล้ายกับกระบวนการชุบแข็ง (Quenching) ซึ่งเป็นผลมาจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากการสปาร์คที่ผิวงานเกิดเป็นบริเวณกระทบจากความร้อน (HAZ : Heat Affect Zone)[1,2] ดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 4.6 โดยอิเล็กโตรดทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็งคือ เมื่อปัจจัยประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นค่าความแข็งผิวงานจะลดต่ำลง สำหรับอิเล็กโตรดทองแดงแท่งต้นลดต่ำสุดที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 76 เปอร์เซ็นต์ ส่วนอิเล็กโตรดชุบเคลือบผิวค่าความแข็งลดต่ำสุดที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 61 เปอร์เซ็นต์ และที่ปัจจัยประสิทธิภาพมากกว่านี้ค่าความแข็งผิวงานจะเพิ่มขึ้น (การลดลงและเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งผิวงานเป็นการวัดเปรียบเทียบค่าความแข็งผิวสปาร์คกับผิวงานเดิม)



รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งภายใต้ปัจจัยประสิทธิภาพ โดยการปรับเวลาเปิด

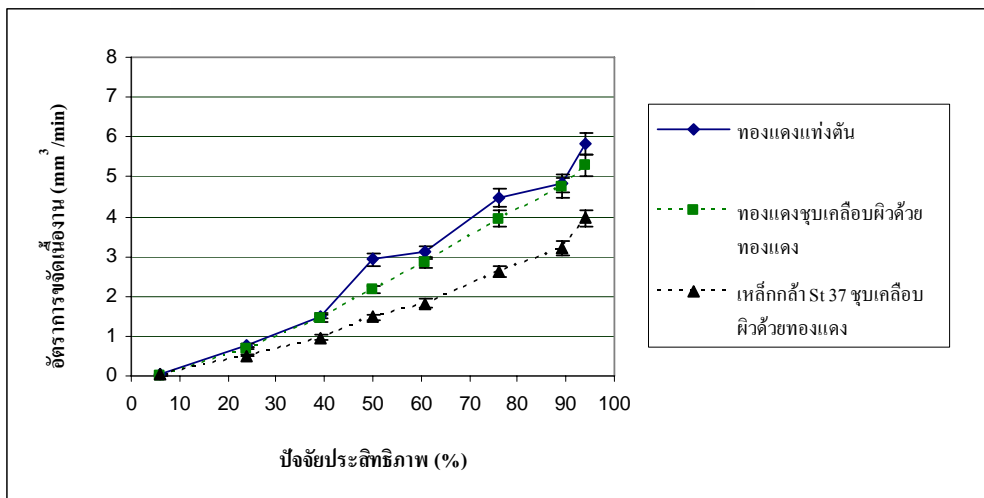
4.2.2 วิเคราะห์ปัจจัยประสิทธิภาพโดยการปรับเวลาเปิด

ปัจจัยประสิทธิภาพหมายถึงประสิทธิภาพการทำงานของหนึ่งวัฏจักรการสปาร์ค ซึ่งสามารถคำนวณได้จากค่าเวลาเปิดต่อเวลารวมในหนึ่งวัฏจักรการทำงานดังสมการที่ 2.1 [2] การทดลองนี้คงที่เวลาเปิดที่ 32 μ s ซึ่งหมายความว่าปัจจัยประสิทธิภาพที่สูงนั้นย่อมมาจากเวลาเปิดที่ต่ำลง โดยสามารถสรุปผลการทดลองตามประสิทธิภาพการทำงานซึ่งถูกวัดอยู่ในรูปของอัตราการขจัดเนื้องาน อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด ตลอดจนค่าความหยาบผิวเฉลี่ยและค่าการเปลี่ยนแปลงค่าความ

แข็งผิวงาน ได้ดังนี้

ก. อัตราการขจัดเนื้องาน (MRR)

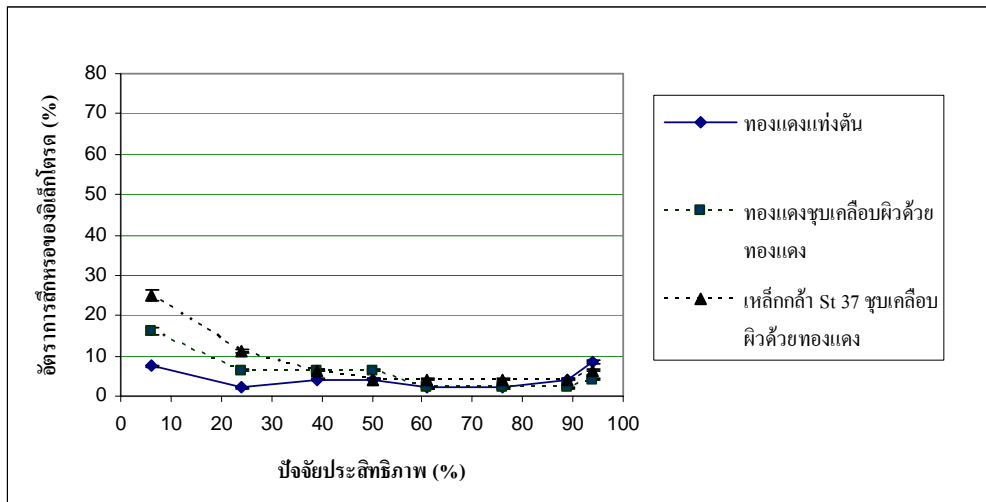
จากผลการทดลองพบว่าอัตราการขจัดเนื้องานสูงขึ้นตามค่าปัจจัยประสิทธิภาพโดยการปรับเวลาปิด ดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 4.7 ซึ่งพบว่าอิเล็กโทรดทองแดงแท่งตันให้อัตราการขจัดเนื้องานสูงสุด รองลงมาเป็นอิเล็กโทรดทองแดงชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง และอิเล็กโทรดเหล็กกล้า St 37 ชุบเคลือบผิวด้วยทองเป็นลำดับสุดท้าย สาเหตุที่ทำให้อัตราการขจัดเนื้องานสูงขึ้นทั้งที่เวลาปิดไม่ก่อให้เกิดการขจัดเนื้องาน[2] ซึ่งเกิดจากปัจจัยประสิทธิภาพที่สูงขึ้นเกิดจากเวลาปิดที่ต่ำลง จึงทำให้ความถี่ของวัฏจักรต่อหน่วยเวลามากขึ้น (ความถี่สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.3)



รูปที่ 4.7 อัตราการขจัดเนื้องานภายใต้ปัจจัยประสิทธิภาพโดยการปรับเวลาปิด

ข. อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (TWR)

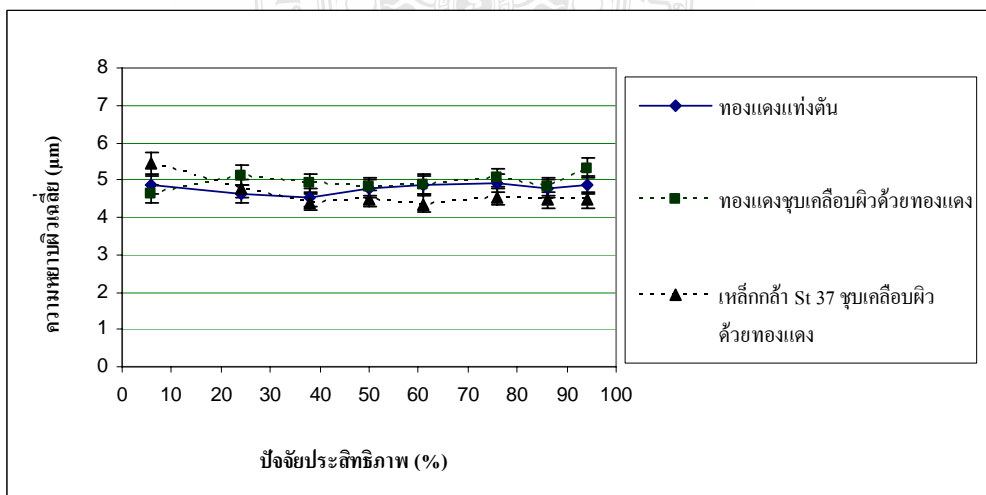
ผลการทดลองพบว่าอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดมีแนวโน้มลดลงเมื่อปัจจัยประสิทธิภาพโดยการปรับเวลาปิดเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 4.8 โดยที่ปัจจัยประสิทธิภาพต่ำอิเล็กโทรดชุบเคลือบผิวจะให้อัตราการสึกหรอสูงกว่าอิเล็กโทรดทองแดงแท่งตัน แต่เมื่อปัจจัยประสิทธิภาพสูงขึ้นอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดจะแตกต่างกันน้อยมาก



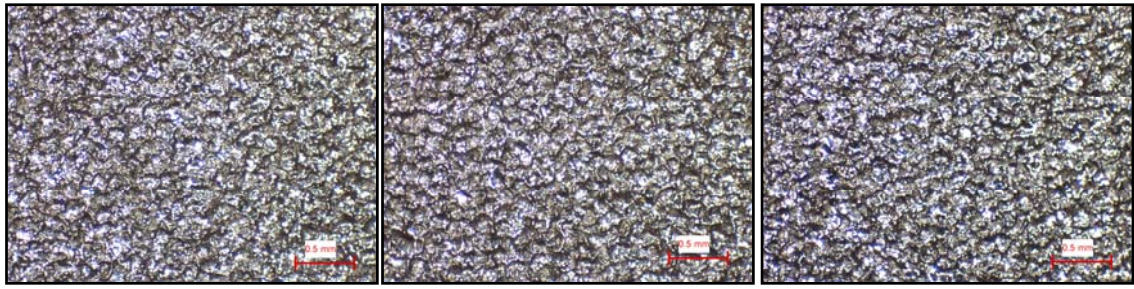
รูปที่ 4.8 อัตราการดูดซับของอิมัลชันกรดภายใต้ปัจจัยประสิทธิภาพโดยการปรับเวลาปิด

ค. ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra)

ผลจากการทดลองปัจจัยประสิทธิภาพจากการปรับเวลาปิดพบว่าปัจจัยประสิทธิภาพไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของผิวงานดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 4.9 เนื่องจากเวลาปิดไม่ก่อให้เกิดการจัดเนื้องาน[1,2] กล่าวคือปัจจัยประสิทธิภาพที่สูงขึ้นจากการปรับเวลาปิด ซึ่งคงที่เวลาเปิดไว้ที่ 32 μ s นั้นหมายความว่าเวลาในการสปาร์คในหนึ่งวัฏจักรการทำงานเท่ากับ 32 μ s ทำให้ความลึกของการหลอมละลายเท่ากันถึงแม้ว่าปัจจัยประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นก็ตาม ดังแสดงในรูปที่ 4.10 โดยอิมัลชันกรดให้ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยแตกต่างกันน้อยมาก



รูปที่ 4.9 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยภายใต้ปัจจัยประสิทธิภาพโดยการปรับเวลาปิด

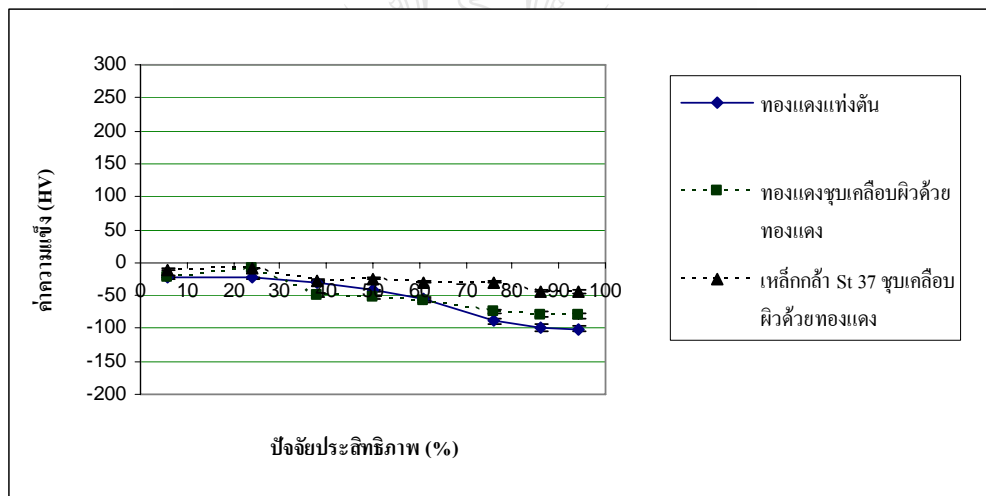


(ก) ปังจัยประสิทธิภาพ 6 % (ข) ปังจัยประสิทธิภาพ 76 % (ค) ปังจัยประสิทธิภาพ 94 %

รูปที่ 4.10 ลักษณะผิวงานที่เกิดจากปังจัยประสิทธิภาพโดยการปรับปิด (กำลังขยาย 35 เท่า)

ง. การเปลี่ยนแปลงค่าความแข็ง (Hardness)

ผลจากการทดลองปังจัยประสิทธิภาพจากการปรับเวลาปิดพบว่า เมื่อปังจัยประสิทธิภาพสูงขึ้นจะทำให้ความแข็งลดลงเนื่องจากความร้อนสะสมในเนื้องานมากขึ้นแต่ที่เวลาเปิด 32 μ s ทำให้ความร้อนที่เกิดในกระบวนการสูงขึ้นแต่ไม่เพียงพอที่จะทำให้โครงสร้างผิดปกติ ทำให้เกิดการคลายตัวของโครงสร้างเป็นเหตุผลการทดลองในรูปที่ 4.11 โดยอิเล็กโตรดทองแดงแท่งต้นทำให้เกิดการลดลงของค่าความแข็งผิวงานมากกว่าอิเล็กโตรดทองแดงชุบเคลือบผิว



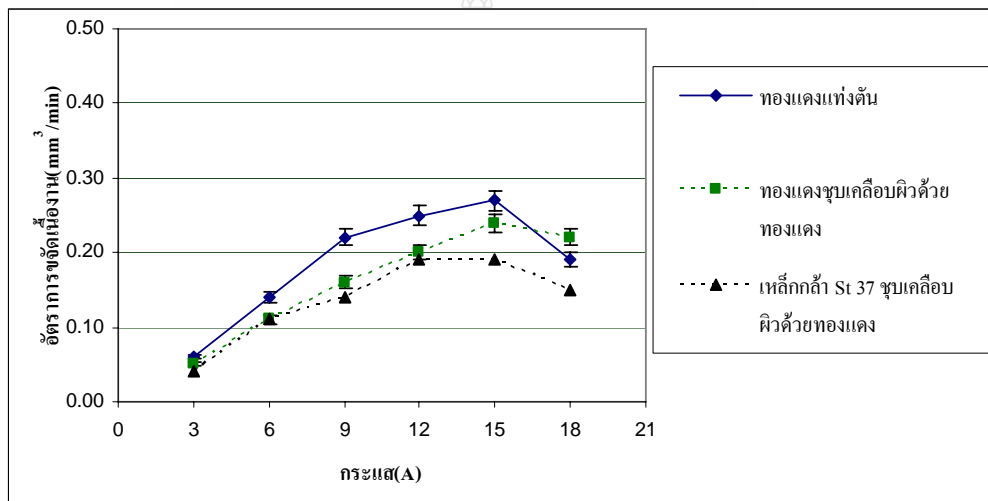
รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งภายใต้ปังจัยประสิทธิภาพ โดยการปรับเวลาปิด

4.2.3 วิเคราะห์ผลการทดลองปรับกระแส (Current)

การวิเคราะห์ผลกระทบของกระแสที่ใช้ในกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า ซึ่งเป็นต้นกำเนิดพลังงานความร้อน ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานและคุณภาพผิวงาน ซึ่งถูกวัดอยู่ในรูปของอัตราการขจัดเนื้องาน อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด ตลอดจนค่าความหยาบผิวเฉลี่ยและค่าการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งผิวงานได้ดังนี้

ก. อัตราการขจัดเนื้องาน (MRR)

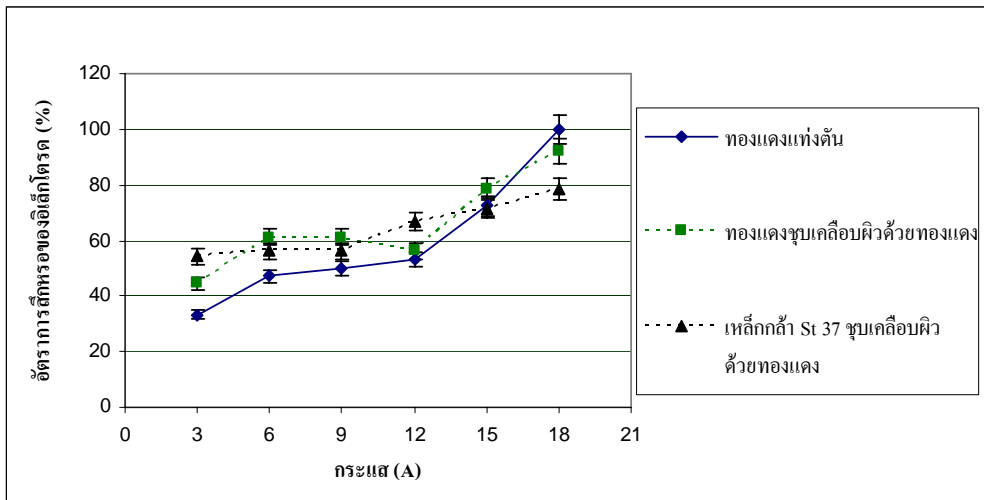
ผลจากการทดลองปรับกระแส พบว่าเมื่อกระแสเพิ่มมากขึ้นอัตราการขจัดเนื้องานจะสูงขึ้นตาม เนื่องจากปริมาณกระแสต่อพื้นที่หน้าตัดเพิ่มสูงขึ้นทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นเพิ่มสูงขึ้น เป็นเหตุให้การขจัดเนื้องานเกิดเป็นหลุมลึกที่มีความกว้างเพิ่มมากขึ้น [1] โดยการเพิ่มขึ้นของกระแสต่ออัตราการขจัดเนื้องานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และเมื่อกระแสสูงเกินกว่ากฎ 65A [2] จะทำให้อัตราการขจัดเนื้องานลดลงเนื่องจากปริมาณกระแสต่อหน่วยพื้นที่มากเกินไป โดยสามารถแสดงผลการทดลองได้ดังรูปที่ 4.12 โดยอิเล็กโทรดมีแนวโน้มให้อัตราการขจัดเนื้อเพิ่มสูงขึ้นตามค่ากระแส จนถึงระดับกระแส 15 แอมแปร์ อัตราการขจัดเนื้องานก็จะลดลง โดยอิเล็กโทรดทองแดงชนิดแท่งตันจะทำให้อัตราการขจัดเนื้องานสูงสุด รองลงมาคืออิเล็กโทรดทองแดงชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง และสุดท้ายคืออิเล็กโทรดเหล็กกล้า St 37ชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง



รูปที่ 4.12 อัตราการขจัดเนื้องานภายใต้การปรับกระแส

ข. อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (TWR)

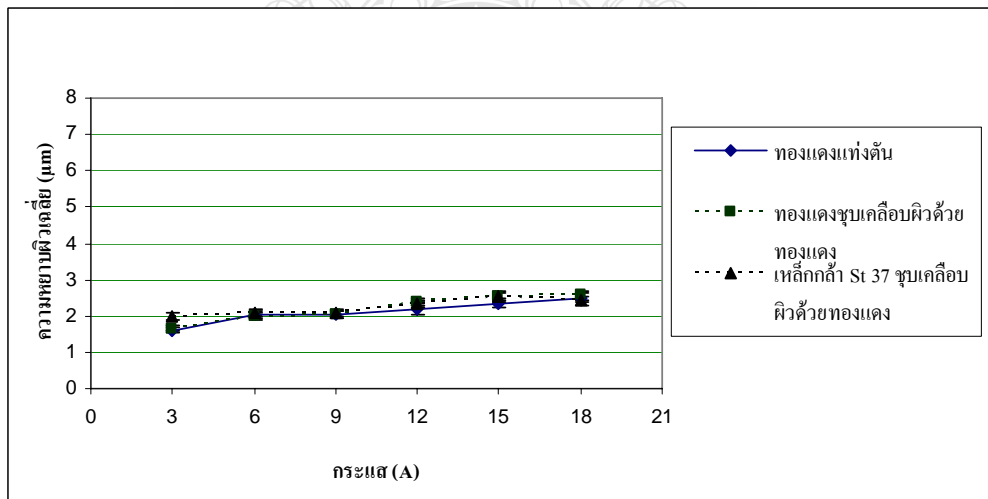
ผลการทดลองปรับกระแสพบว่า อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดจะเพิ่มขึ้นตามค่ากระแส ซึ่งมีสาเหตุมาจากอัตรากระแสต่อพื้นที่หน้าตัดที่มากทำให้เกิดเป็นพลังงานความร้อนซึ่งกัดกร่อนทั้งชิ้นงานและวัสดุอิเล็กโทรด เป็นเหตุให้อิเล็กโทรดเกิดการสึกหรอ โดยเมื่อกระแสสูงเกินกว่า 15 แอมแปร์ จะทำให้อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดทองแดงแท่งตันสูงกว่าอิเล็กโทรดชุบเคลือบผิวดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 4.13 และเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองที่กระแสต่ำพบว่าอิเล็กโทรดทองแดงของแข็งให้อัตราการสึกหรอต่ำกว่าอิเล็กโทรดชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง



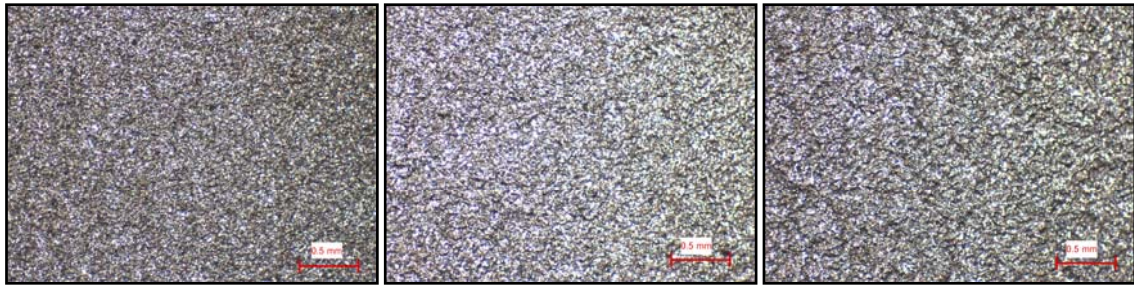
รูปที่ 4.13 อัตราการสักรของอิเล็กโตรดภายใต้การปรับกระแส

ค. ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra)

ผลการทดลองโดยปรับกระแสพบว่า ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นตามค่ากระแส เนื่องจากปริมาณกระแสที่เพิ่มขึ้นนั้นหมายถึงพลังงานที่เป็นต้นกำเนิดของความร้อนมีมากขึ้น ทำให้การขจัดเนื้องานเกิดเป็นโพรงที่มีความลึกมากขึ้นดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 4.14 และแสดงผิวงานดังรูปที่ 4.15 โดยอิเล็กโตรดให้ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยแตกต่างกันน้อยมาก



รูปที่ 4.14 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยภายใต้การปรับกระแส



(ก) กระแส 3 แอมแปร์

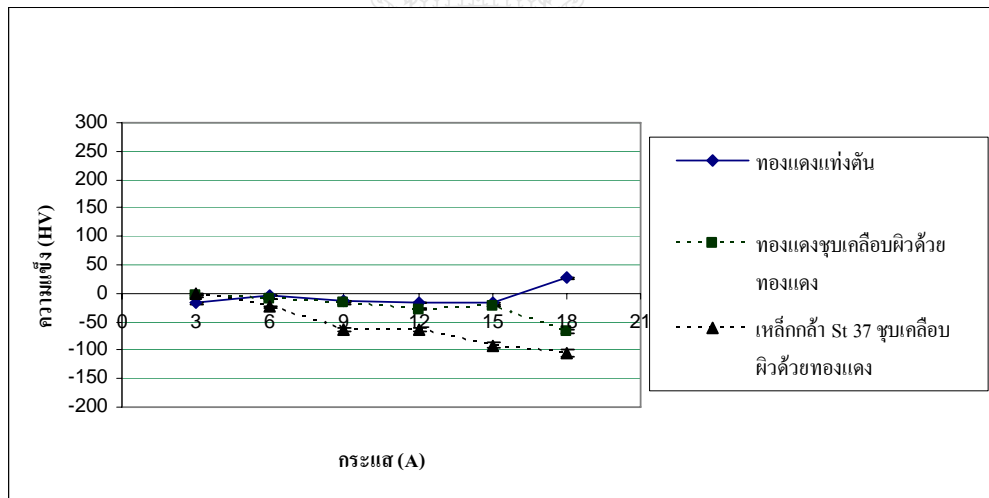
(ข) กระแส 12 แอมแปร์

(ค) กระแส 18 แอมแปร์

รูปที่ 4.15 ลักษณะผิวงานที่เกิดจากการปรับกระแส (กำลังขยาย 35 เท่า)

ง. การเปลี่ยนแปลงค่าความแข็ง (Hardness)

ผลการทดลองโดยปรับกระแสพบว่า เมื่อกระแสเพิ่มขึ้นทำให้เกิดความร้อนในการสปาร์คสูงขึ้น ซึ่งระดับกระแสที่ 18 แอมแปร์ กระแสสูงพอที่จะเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานความร้อนที่ทำให้อุณหภูมิที่เกิดขึ้นทำให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นสำหรับอิเล็กโตรดทองแดงแท่งตัน โดยที่อิเล็กโตรดชุบเคลือบผิวมีแนวโน้มลดลงเมื่อกระแสเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.16 การเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งภายใต้การปรับกระแส

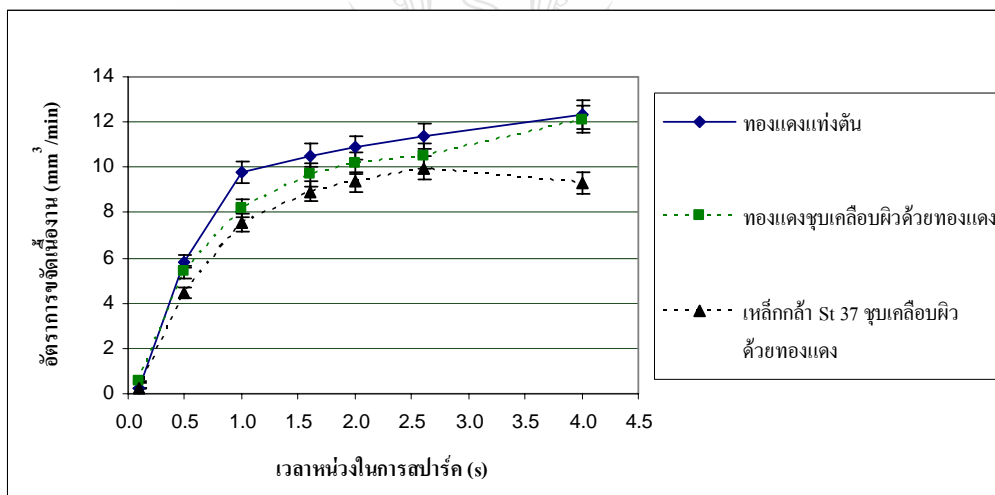
4.2.4 วิเคราะห์ผลการทดลองปรับเวลาหน่วงในการสปาร์ค (Working Time)

เวลาหน่วงในการสปาร์คหมายถึงระยะเวลาแชนซ์เพื่อให้เกิดการสปาร์คไม่ใช่เวลาในการทำงาน (Machining Time) โดยระยะเวลาในการหน่วงจะทำให้เกิดการจ่ายกระแสสลับกับการหยุดจ่าย เมื่อครบตามค่าเวลาหน่วงอิเล็กโตรดจะถูกยกขึ้นซึ่งช่วงเวลาที่ยกอิเล็กโตรดขึ้นจะไม่เกิดการสปาร์คเรียกว่าเวลาขงหรือระยะยก (Up Time หรือ Jump) แล้วทำการหน่วงเวลาเพื่อให้เกิดการสปาร์คซ้ำๆ เป็นวัฏจักรการทำงานจนได้ระยะความลึกที่ต้องการ ซึ่งเวลาที่ทำให้เกิดเป็นความลึกที่ต้องการจะ

เรียกว่าเวลาทำงาน (Machining Time) [16] โดยการหน่วงเวลาในการสปาร์คจะทำให้เกิดความร้อนสะสมในพื้นที่ผิวสปาร์คซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานและคุณภาพผิวงาน ซึ่งถูกวัดอยู่ในรูปของอัตราการขจัดเนื้องาน อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด ตลอดจนค่าความหยาบผิวเฉลี่ยและค่าการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งผิวงานได้ดังนี้

ก. อัตราการขจัดเนื้องาน (MRR)

ผลการทดลองโดยปรับเวลาหน่วงในการสปาร์คพบว่า อัตราการขจัดเนื้อเพิ่มขึ้นตามค่าเวลางาน โดยในช่วงเวลางานจาก 0.1 – 1.6 วินาทีนั้นอัตราการขจัดเนื้องานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก เมื่อเวลางานมากกว่านี้แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของอัตราการขจัดเนื้องานจะลดลงดังผลการทดลองที่ 4.17 โดยอิเล็กโทรดทองแดงแท่งคั่นให้อัตราการขจัดเนื้องานสูงสุด รองลงมาเป็นอิเล็กโทรดทองแดงชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง และสุดท้ายคืออิเล็กโทรดเหล็กกล้า St 37 ชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง สาเหตุที่ทำให้อัตราการขจัดเนื้องานมากขึ้นเมื่อเวลางานเพิ่มขึ้น คือเวลางานที่มากขึ้นทำให้เวลาในการขจัดเนื้อต่อหน่วยเวลามากขึ้น และเมื่อระยะเวลางานที่ยาวนานเกิน 1.6 วินาทีมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอัตราการขจัดเนื้องานต่ำเนื่องจากสภาวะแวดล้อมของการสปาร์คขาดความเสถียร อันเนื่องมาจากไม่สามารถขจัดเศษของอนุภาคโลหะที่หลวกร้อนออกนอกบริเวณสปาร์คได้หมด จึงเกิดพื้นที่การสปาร์คเป็นบริเวณกว้าง

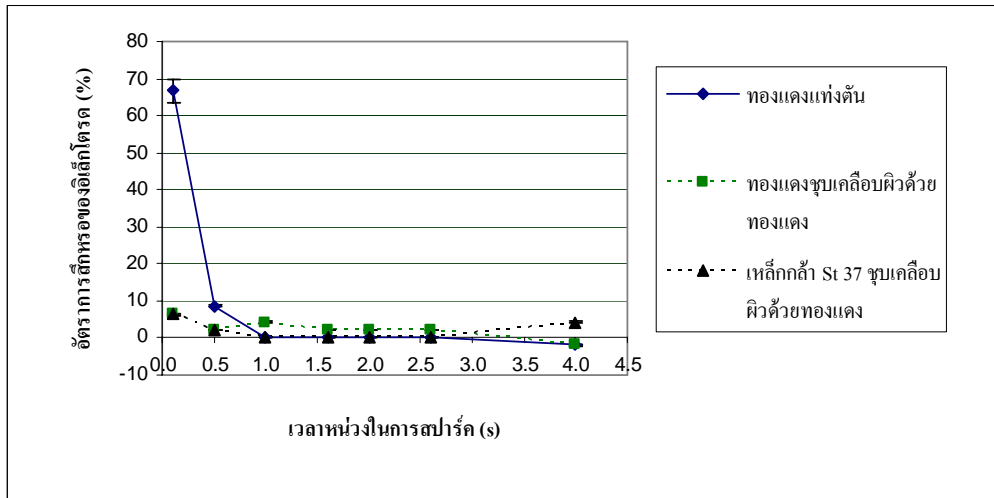


รูปที่ 4.17 อัตราการขจัดเนื้องานภายใต้การปรับเวลาหน่วงในการสปาร์ค

ข. อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (TWR)

ผลการทดลองโดยปรับเวลาหน่วงในการสปาร์คพบว่า เมื่อเวลาหน่วงมากขึ้นอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดจะลดลง และเมื่อเวลางานมากกว่า 1 วินาทีจะไม่เกิดการสึกหรอของอิเล็กโทรดดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 4.18 สาเหตุที่ไม่เกิดการสึกหรอเนื่องจากความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นเพียงพอที่จะทำให้คาร์บอนแตกตัววิ่งเข้ายึดเกาะผิวอิเล็กโทรด และที่ค่าการสึกหรอของ

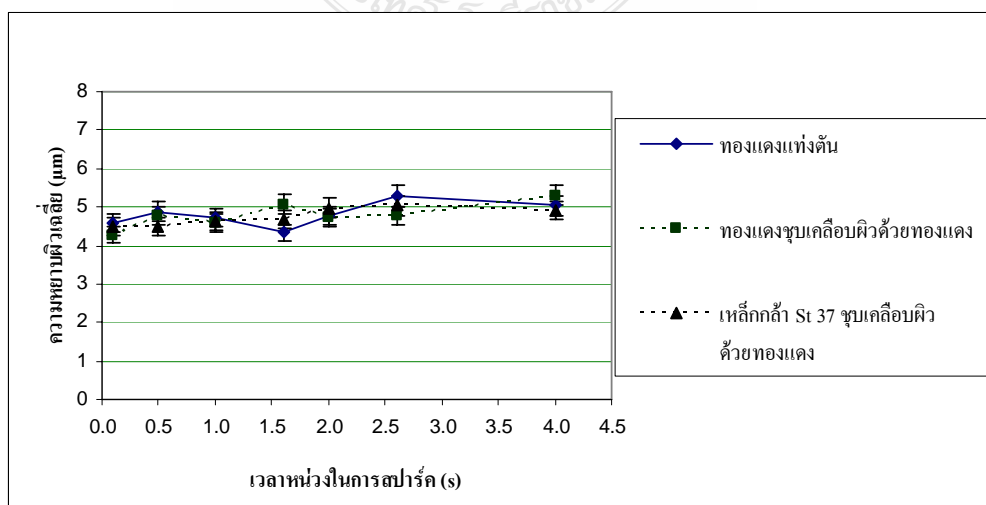
อิเล็กโตรดติดลบเนื่องจากความยาวของอิเล็กโตรดเพิ่มขึ้น [1,2] โดยอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดทองแดงแท่งต้นมีอัตราการสึกหรอสูงที่เวลายานต่ำ และเมื่อเวลาหน่วงมากกว่า 1 วินาทีอิเล็กโตรดทั้งสามชนิดให้อัตราการกัดเนื้องานที่แตกต่างกันน้อยมาก



รูปที่ 4.18 อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดภายใต้การปรับเวลาหน่วงในการสปาร์ค

ก. ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra)

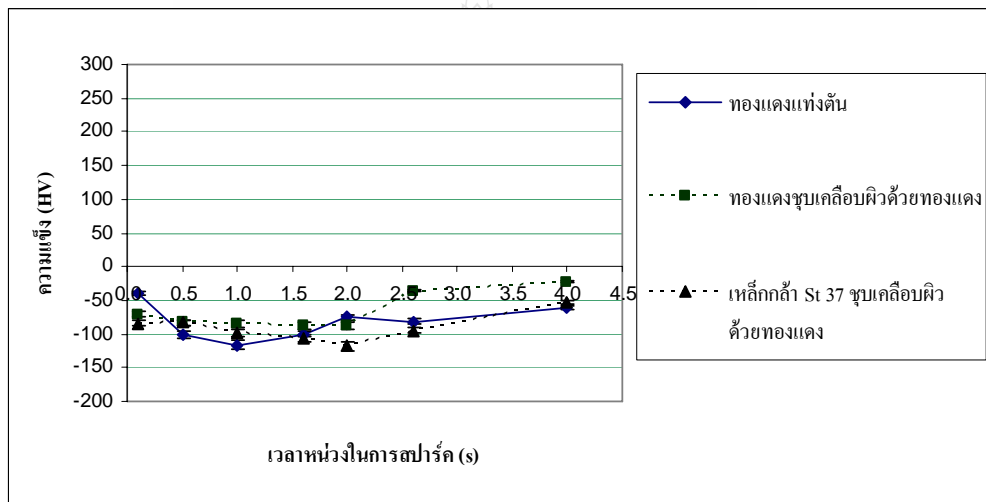
ผลการทดลองโดยปรับเวลาหน่วงในการสปาร์คพบว่า ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าเวลาหน่วงน้อยมาก ดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 4.19 ซึ่งเกิดจากระยะเวลาในการสปาร์คที่ยาวนานทำให้ไม่สามารถขจัดเศษออกได้หมดจึงทำให้ความเสถียรของผิวหน้าสปาร์คและเศษโลหะที่หลุดออกทำให้เกิดการกระจายตัวของการสปาร์ค ซึ่งจากการเปรียบเทียบพบว่าอิเล็กโตรดทั้งสามชนิดให้ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยแตกต่างกันน้อยมาก



รูปที่ 4.19 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยภายใต้การปรับเวลาหน่วงในการสปาร์ค

ง. การเปลี่ยนแปลงค่าความแข็ง (Hardness)

ผลการทดลองโดยปรับเวลาหน่วงในการสปาร์คพบว่า ค่าความแข็งของผิวงานจะค่อยๆ ลดลงจนถึงระดับต่ำสุดที่เวลาหน่วง 1, 1.6 และ 2.0 วินาที สำหรับอิเล็กโตรดทองแดงแท่งตัน, ทองแดงชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง และเหล็กกล้า St 37 ชุบเคลือบผิวด้วยทองแดงตามลำดับ ดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 4.20 ซึ่งสาเหตุของการลดลงเกิดจากเวลางานที่มากทำให้เกิดการสะสมของความร้อนเป็นเหตุให้โครงสร้างที่ผิดปกติเนื่องจากความแข็งเกิดการคลายตัว เช่นเดียวกับการอบคลายความเค้น หรือการอบอ่อน ส่วนสาเหตุที่เวลาหน่วงเกินกว่าค่าดังกล่าวแล้วทำให้ค่าความแข็งผิวงานลดในปริมาณที่น้อยลง เกิดจากเวลาหน่วงในการสปาร์คที่มากทำให้ไม่สามารถขจัดเศษที่หลุดออกจากเนื้อโลหะซึ่งกระจายตัวอยู่ในบริเวณโดยรอบ จึงทำให้เกิดการกระจายตัวของการสปาร์คในบริเวณกว้าง ความร้อนที่เกิดขึ้นจึงมีพื้นที่ในการกระจายตัวมากขึ้นเป็นเหตุให้ความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ลดลง



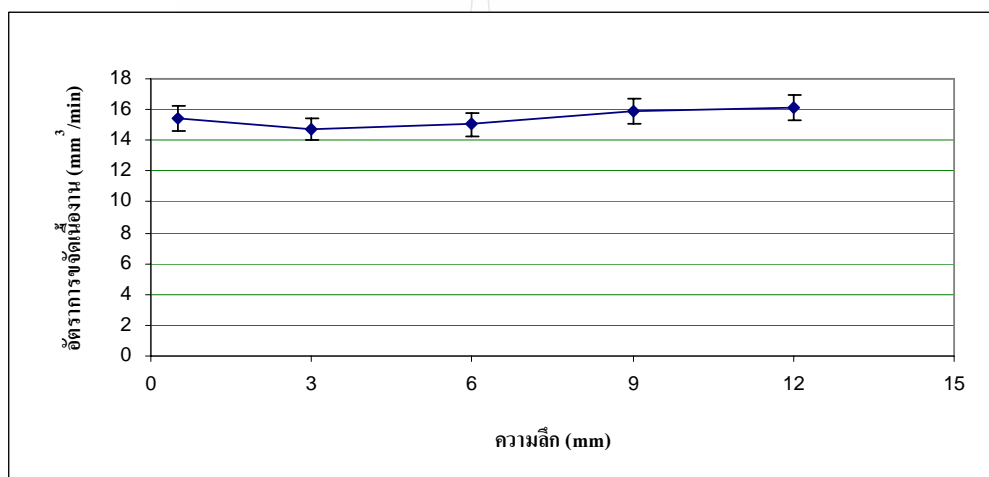
รูปที่ 4.20 การเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งภายใต้การปรับเวลาหน่วงในการสปาร์ค

4.2.5 วิเคราะห์ความลึกของการกัดเซาะที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงาน

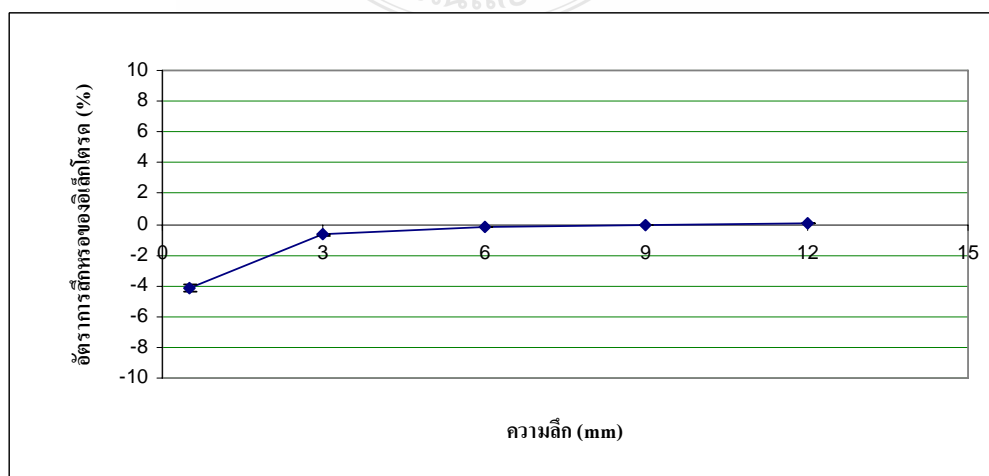
การวิเคราะห์ความลึกที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของวัสดุอิเล็กโตรดเป็นการวิเคราะห์ค่าความลึกของการสปาร์คต่อการเกิดอัตราการขจัดเนื้องานและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด โดยใช้เงื่อนไขการทำงานที่ดีที่สุดของแต่ละชนิดของวัสดุอิเล็กโตรด (อัตราการขจัดเนื้องานสูงสุดและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดต่ำสุด) โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์จากการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ผ่านมา ซึ่งประกอบด้วย พารามิเตอร์ เวลาเปิด เวลาปิด กระแส และเวลาหน่วงในการสปาร์ค พบว่าค่าพารามิเตอร์การสปาร์คโดยใช้อิเล็กโตรดทองแดงแท่งตัน และอิเล็กโตรดชุบเคลือบผิวมีเงื่อนไขที่ต่างกัน จึงจำเป็นต้องแยกวิเคราะห์ตามชนิดของกลุ่มวัสดุอิเล็กโตรดดังนี้

ก. อิเล็กโตรดทองแดงแท่งตัน

อิเล็กโตรดทองแดงแท่งตันให้อัตราการขจัดเนื้องานสูงสุดและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดต่ำสุดที่เวลาเปิด 100 μs (จากผลการทดลองรูปที่ 4.1 และ 4.2) เวลาปิดที่ 2 μs (จากผลการทดลองรูปที่ 4.7 และ 4.8) กระแสที่ 12 แอมแปร์ (จากผลการทดลองรูปที่ 12 และ 13) และเวลางานที่ 1.6 วินาที (จากผลการทดลองรูปที่ 4.17 และ 4.18) จึงทำการทดลองเพื่อวิเคราะห์ค่าความลึกที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานด้วยพารามิเตอร์ดังกล่าว โดยกำหนดระดับความลึกของการสปาร์คดังนี้ 0.5, 3, 6, 9, และ 12 มิลลิเมตร ซึ่งจากการทดลองพบว่าอัตราการขจัดเนื้องานสูงกว่าการทดลองทั้งหมดก่อนหน้านี้ โดยอัตราการขจัดเนื้องานสูงสุดอยู่ที่ 16.15 mm^3/min ที่ความลึก 12 มิลลิเมตร โดยไม่เกิดการสึกหรอของอิเล็กโตรดดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 4.21 และ 4.22 และมีค่าอัตราการขจัดเนื้องานต่ำสุด 14.74 mm^3/min ที่ความลึก 3 มิลลิเมตร จึงทำให้สามารถสรุปได้ว่าความลึกมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของอิเล็กโตรดทองแดงแท่งตันน้อยมาก



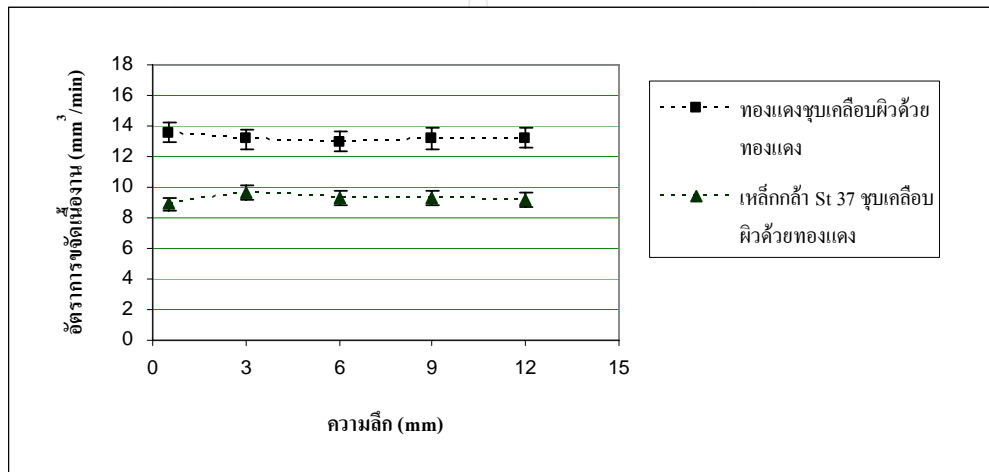
รูปที่ 4.21 อัตราการขจัดเนื้องานของอิเล็กโตรดทองแดงแท่งตันที่ระดับความลึกต่างกัน



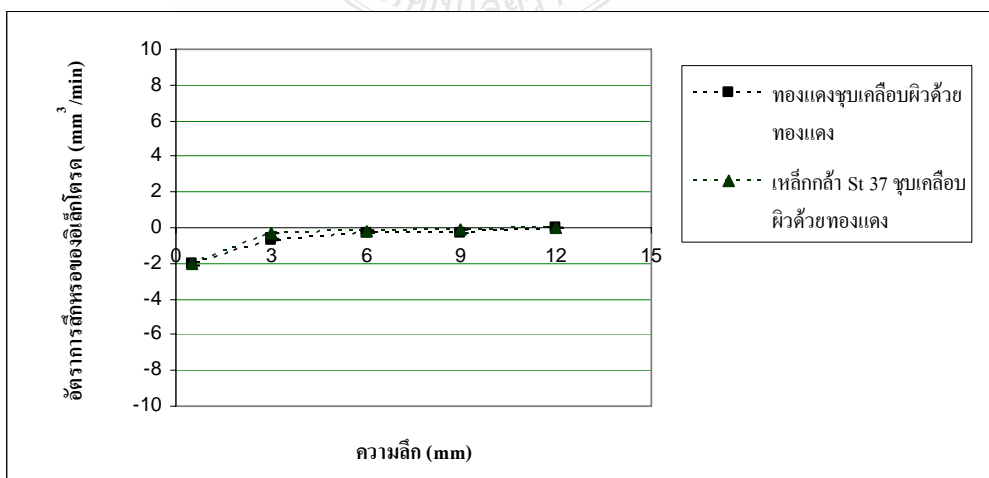
รูปที่ 4.22 อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดทองแดงแท่งตันที่ระดับความลึกต่างกัน

ข. อิเล็กโตรดชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง

อิเล็กโตรดชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง (อิเล็กโตรดทองแดงชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง และอิเล็กโตรดเหล็กกล้า St 37 ชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง) ให้อัตราการขจัดเนื้องานสูงสุดและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดต่ำสุดที่เวลาเปิด 200 μs (จากผลการทดลองรูปที่ 4.1 และ 4.2) เวลาปิดที่ 2 μs (จากผลการทดลองรูปที่ 4.7 และ 4.8) กระแสที่ 12 แอมแปร์ (จากผลการทดลองรูปที่ 12 และ 13) และเวลางานที่ 1.6 วินาที (จากผลการทดลองรูปที่ 4.17 และ 4.18) จึงทำการทดลองเพื่อวิเคราะห์ค่าความลึกที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานด้วยพารามิเตอร์ดังกล่าว โดยกำหนดระดับความลึกของการสปาร์คดังนี้ 0.5, 3, 6, 9, และ 12 มิลลิเมตร ซึ่งจากการทดลองพบว่าอิเล็กโตรดทองแดงชุบเคลือบผิวด้วยทองแดงให้อัตราการขจัดเนื้องานสูงกว่าอิเล็กโตรดเหล็กกล้า St 37 ชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง โดยความลึกของการกัดเซาะไม่มีผลต่อการเกิดอัตราการขจัดเนื้อและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด ดังผลการทดลองอัตราการขจัดเนื้อในรูปที่ 4.23 และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดในรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.23 อัตราการขจัดเนื้องานของอิเล็กโตรดชุบเคลือบผิวที่ระดับความลึกต่างกัน



รูปที่ 4.24 อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดชุบเคลือบผิวที่ระดับความลึกต่างกัน

ที่ประสิทธิภาพการทำงานสูงสุดของแต่ละชนิดวัสดุอิเล็กทรอนิกส์โทรดพบว่าความลึกไม่มีผลต่ออัตราการขจัดเนื้องาน เมื่อเปรียบเทียบอัตราการขจัดเนื้องานพบว่าอิเล็กโทรดทองแดงแท่งตันให้อัตราการขจัดเนื้องานสูงสุดที่ $16.15 \text{ mm}^3/\text{min}$ รองลงมาเป็นอิเล็กโทรดทองแดงชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง $13.58 \text{ mm}^3/\text{min}$ และสุดท้ายเป็นอิเล็กโทรดเหล็กกล้า St 37 ชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง $9.67 \text{ mm}^3/\text{min}$ โดยที่อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดทองแดงแท่งตันและทองแดงชุบเคลือบผิวไม่แตกต่างกัน



บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของอิเล็กทรอนิกส์โครงข่ายและอิเล็กทรอนิกส์ชุดเคลื่อนที่ด้วยทองแดง ประกอบด้วยทองแดงชุดเคลื่อนที่ด้วยทองแดง และเหล็กกล้า St 37 ชุดเคลื่อนที่ด้วยทองแดง ซึ่งทำทดลองจากพารามิเตอร์ เวลาเปิด, เวลาปิด, กระแสและเวลาหน่วงในการสปาร์ค ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานในรูปของอัตราการขจัดเนื้องานและอัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์ รวมทั้งผลกระทบของพารามิเตอร์ที่มีผลต่อคุณภาพผิวงานในรูปของความหยาบผิวเฉลี่ยและการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งผิวงาน ทำให้สามารถสรุปตามวัตถุประสงค์ของการวิจัยได้ดังนี้คือ

5.1.1 พารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานและคุณภาพผิวงาน

ก. พารามิเตอร์เวลาเปิด

การทดลองปัจจัยประสิทธิภาพโดยการปรับเวลาเปิดพบว่า ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่เกิดขึ้นบนผิวงานจะสัมพันธ์กับอัตราการขจัดเนื้องาน กล่าวคืออัตราการขจัดเนื้องานสูงค่าความหยาบผิวเฉลี่ยก็จะมากตาม โดยเวลาเปิดที่ให้อัตราการขจัดเนื้องานสูงสุดอยู่ที่ 100 ไมโครวินาที สำหรับอิเล็กทรอนิกส์โครงข่ายและ 200 ไมโครวินาทีสำหรับอิเล็กทรอนิกส์ชุดเคลื่อนที่ โดยที่ระดับค่าเวลาเปิดดังกล่าวยังส่งผลให้ค่าความแข็งผิวงานลดลงต่ำสุดอีกด้วย และในส่วนของอัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์พบว่า เมื่อเวลาเปิดมากขึ้นอัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์จะลดลง

ข. พารามิเตอร์เวลาปิด

การทดลองปัจจัยประสิทธิภาพโดยการปรับเวลาปิดพบว่า เนื่องจากเวลาปิดไม่ก่อให้เกิดการขจัดเนื้องาน [2] อัตราการขจัดเนื้องานจึงสูงขึ้นเมื่อเวลาปิดต่ำลง โดยที่อัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์และการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งผิวงานจะต่ำเมื่อค่าเวลาปิดลดลง แต่เวลาปิดจะไม่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวเฉลี่ย เนื่องจากการปรับปัจจัยประสิทธิภาพโดยการปรับเวลาปิด จะคงที่เวลาเปิดไว้ที่ 32 ไมโครวินาที นั้นหมายความว่าไม่ว่าปัจจัยประสิทธิภาพจะเพิ่มหรือลดความลึกและความกว้างของการกัดเซาะก็จะยังคงเท่าเดิม

ค. พารามิเตอร์กระแส

การทดลองปรับพารามิเตอร์กระแสซึ่งเป็นต้นกำเนิดความร้อนในการสปาร์ค [1] พบว่า ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยและอัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์จะเพิ่มสูงขึ้นตามค่ากระแสแต่ค่าความแข็งผิวงานจะลดลงเมื่อกระแสเพิ่มขึ้น ส่วนอัตราการขจัดเนื้องานของอิเล็กทรอนิกส์จะเพิ่มขึ้นจนถึงระดับกระแสที่ 15 แอมแปร์ เมื่อระดับค่ากระแสเกินกว่าค่าดังกล่าวอัตราการขจัดเนื้องานจะลดต่ำลง

ง. พารามิเตอร์เวลาหน่วงในการสปาร์ค

การทดลองพารามิเตอร์เวลาหน่วงในการสปาร์คพบว่า ในช่วงระยะเวลา 0.1- 1.6 วินาที อัตราการขจัดเนื้องานจะเพิ่มสูงขึ้นเป็นอย่างมากและความแข็งผิวงานก็จะลดลงเป็นอย่างมากด้วยเช่นกัน และเมื่อเวลาหน่วงเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ผิวงานมีหยาบผิวเฉลี่ยมากขึ้นแต่จะไม่มีผลต่อการเกิดอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด

จ. ความลึกของการกัดเซาะที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของอิเล็กโตรด

การทดลองความลึกที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของอิเล็กโตรดโดยเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ให้อัตราการขจัดเนื้องานสูงสุดและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดต่ำสุดพบว่า ค่าความลึกของการกัดเซาะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานในรูปของอัตราการขจัดเนื้องานและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด

พารามิเตอร์ที่ได้ทำการทดลองไว้สามารถนำไปปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกัดเซาะด้วยไฟฟ้าเพื่อให้ได้คุณภาพผิวงานตามที่กำหนดไว้

5.1.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานและคุณภาพผิวงานในกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าที่เกิดจากอิเล็กโตรดทองแดงแท่งตัน และอิเล็กโตรดชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง

ก. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงาน

อิเล็กโตรดทองแดงแท่งตันและอิเล็กโตรดทองแดงชุบเคลือบผิวด้วยทองแดงภายใต้เงื่อนไขการทำงานที่ดีที่สุดของแต่ละชนิดวัสดุอิเล็กโตรดพบว่า อิเล็กโตรดทองแดงแท่งตันให้อัตราการขจัดเนื้องานสูงสุดอยู่ที่ 16.15 มม³/นาที ตามด้วยอิเล็กโตรดทองแดงชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง 13.58 มม³/นาที และอิเล็กโตรดเหล็กกล้า St 37 ชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง 9.67 มม³/นาที ตามลำดับการที่อิเล็กโตรดทองแดงแท่งตันให้อัตราการขจัดเนื้องานสูงกว่าอิเล็กโตรดชุบเคลือบผิวด้วยทองแดงเกิดจากค่าการนำไฟฟ้าที่สูง และค่าความต้านทานที่ต่ำ ทำให้กระแสที่เป็นต้นกำเนิดพลังงานความร้อนไหลผ่านได้มากกว่า แต่อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดจะแตกต่างกันน้อยมากเมื่อเวลาเปิดหรือปัจจัยประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น

ข. เปรียบเทียบคุณภาพผิวงาน

อิเล็กโตรดทองแดงแท่งตันและอิเล็กโตรดทองแดงชุบเคลือบผิวด้วยทองแดงให้ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย และการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งผิวงานแตกต่างกันน้อยมาก

ถึงแม้ว่าอิเล็กโตรดชุบเคลือบผิวด้วยทองแดงมีอัตราการขจัดเนื้องานที่ต่ำกว่าอิเล็กโตรดทองแดงแท่งตัน แต่อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดและคุณภาพผิวงานจะไม่แตกต่างกันจึงเป็นการดีที่จะนำกระบวนการชุบเคลือบผิวมาใช้สำหรับการซ่อมแซมอิเล็กโตรดที่สึกหรอ และการผลิตอิเล็กโตรดต้นทุนต่ำ

5.2 ข้อเสนอแนะ

ประสิทธิภาพการทำงานของอิเล็กทรอนิกส์ขึ้นอยู่กับค่าการนำไฟฟ้า และค่าความต้านทาน หากทำการหุบเคลือบผิววัสดุด้วยสารหุบที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูงอาจช่วยเพิ่มอัตราการขจัดเนื้องานของวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ได้ และการที่วัสดุอิเล็กทรอนิกส์และวัสดุชิ้นงานมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการทำงาน [1,2] จึงควรเปลี่ยนวัสดุชิ้นงานเพื่อศึกษาวัสดุงานที่เหมาะสมกับอิเล็กทรอนิกส์หุบเคลือบผิว



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] บรรณเลข ศรนิล และประเสริฐ ก๊วยสมบูรณ์, **ตารางงานโลหะ**. กรุงเทพฯ : ศูนย์ผลิตตำราเรียน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2524, น. 132
- [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] Bulent Ekmekci, "Residual stresses and white layer in electric discharge machining (EDM)," **ScienceDirect(Electronic)**, 2007, Available : ScienceDirect (7 June 2007)
- [7] จีรวรรณ คล้อยภยันต์ และคณะ, "การศึกษาตัวแปรในการกัดวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม ชนิด 316L" ด้วยเครื่องกัดชิ้นงานด้วยไฟฟ้า, "การประชุมวิชาการช่วยงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม, 24-26 ตุลาคม 2007
- [8] 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)
- [9] 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)
- [10] ประพัฒน์ เชื้อไทย และคณะ, (บทคัดย่อ เทคนิคการขึ้นรูปโลหะแบบอิเล็กทรอนิกส์ โดรฟอรั่มมิ่ง)
- [11] 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)
- [12] 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)
- [13] Hsu, Y. "et al", "Edm electrode manufacturing using Rp combining electroless plating with electroforming," **Springer – Verlage London Limited (Electronic)**, 2007, ,Available :

Springer (3August 2008)

- [14] ศักดา ฉายพุดซา และคณะ, การศึกษาการสึกหรอของทองแดงที่ได้จากการทำ **Electroforming** ในการกัดแม่พิมพ์โดยวิธี **Electrical Discharge Machining (EDM)**, ปรินญาวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี, 2548.
- [15] ณัฐคนัย ชี้อตระกูล, ผลกระทบของอิเล็กโตรดต่อรอยแตกร้าวขนาดเล็กในทั้งสแตนเลสที่ปัดด้วย เครื่องกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า, ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2551.
- [16] Lien Sheng Mechanical & Electrical Co., LTD, **Instruction Manual Aristech 3D-CNC EDM**.
2. Ta-Li City,2004.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก
ข้อมูลการทดลอง



ตารางที่ ก.1 ข้อมูลการทดลองอิเล็กโตรดแท่งตัน โดยปรับปัจจัยประสิทธิภาพจากค่าเวลาเปิด (On-time)

ลำดับ ที่	เวลา เปิด(μs)	เวลา ปิด (μs)	ปัจจัย ประสิทธิภาพ (%)	ความโต อิเล็กโตรด Ø (mm)	ความยาว อิเล็กโตรด ก่อน (mm)	ความยาว อิเล็กโตรด หลัง (mm)	ความลึก ที่ป้อน (mm)	เวลาที่ใช้ ทดลอง (min)	ความแข็งผิว เนื้อเหล็ก (HV)	ความแข็งผิว ที่สปาร์ค (HV)	ความหยาบ ผิวเฉลี่ย (μm)
1	2	32	6	10.00	60.77	60.62	0.5	147.40	658.37	677.37	1.98
2	10	32	24	9.98	60.75	60.70	0.5	37.55	657.70	664.97	3.01
3	20	32	38	10.02	60.82	60.81	0.5	16.93	677.43	611.90	4.36
4	32	32	50	9.98	60.22	60.22	0.5	12.65	642.23	615.90	4.68
5	50	32	61	10.00	60.01	60.04	0.5	10.73	733.90	583.93	5.64
6	100	32	76	10.00	60.78	60.80	0.5	10.12	691.70	562.50	6.97
7	200	32	86	10.01	60.71	60.76	0.5	14.87	708.37	735.00	6.74
8	510	32	94	10.05	60.27	60.29	0.5	20.02	682.17	814.33	3.60

หมายเหตุ*

*ทดลองตามพารามิเตอร์ตารางที่ 3.2 และตารางที่ 3.3

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลการวัดความแข็งผิวงานจากการทดลองด้วยอิเล็กทรอนิกส์โทรดทองแดงแท่งต้น โดยปรับปัจจัยประสิทธิภาพจากค่าเวลาเปิด (On-time)

ลำดับ ที่	เวลาเปิด (μ s)	เวลาปิด (μ s)	ความแข็งผิวเนื้อเหล็ก HV			ความแข็งผิวสปาร์ค HV		
			1	2	3	1	2	3
1	2	32	678.5	674.3	622.3	691.2	668.4	672.5
2	10	32	637.3	644.8	691.0	670.3	666.2	658.4
3	20	32	733.0	650.6	648.7	611.9	604.9	618.9
4	32	32	635.3	644.8	646.6	585.1	582.9	599.7
5	50	32	721.6	723.8	629.7	562.2	552.2	573.1
6	100	32	733.2	733	735.5	583.7	583.7	584.4
7	200	32	703.8	695.3	726.0	764.0	726.0	715.0
8	510	32	721.6	697.4	627.5	854.2	858.1	730.7

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลการวัดความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ของผิวงานจากการทดลองด้วยอิเล็กทรอนิกส์โทรดทองแดงแท่งต้น โดยปรับปัจจัยประสิทธิภาพจากค่าเวลาเปิด (On-time)

ลำดับ ที่	เวลาเปิด (μ s)	เวลาปิด (μ s)	ความเรียบผิวเฉลี่ย (Ra : μ m)				
			1	2	3	4	5
1	2	32	1.86	1.97	2.06	1.84	2.15
2	10	32	3.04	2.88	3.05	3.16	2.91
3	20	32	4.51	4.20	4.20	4.52	4.36
4	32	32	4.30	4.81	5.22	4.33	4.74
5	50	32	5.82	5.42	5.96	5.26	5.74
6	100	32	7.75	6.91	7.08	6.84	6.27
7	200	32	6.28	6.85	7.00	6.96	6.60
8	510	32	2.63	3.46	4.21	4.69	3.03

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลการทดลองอิเล็กโตรดทองแดงแท่งตันโดยปรับปัจจัยประสิทธิภาพจากค่าเวลาปิด (Off-time)

ลำดับ ที่	เวลา เปิด(μs)	เวลา ปิด (μs)	ปัจจัย ประสิทธิภาพ (%)	ความโต อิเล็กโตรด Ø (mm)	ความยาว อิเล็กโตรด ก่อน (mm)	ความยาว อิเล็กโตรด หลัง (mm)	ความลึก ที่ป้อน (mm)	เวลาที่ใช้ ทดลอง (min)	ความแข็งผิว เนื้อเหล็ก (HV)	ความแข็งผิว ที่สปาร์ค (HV)	ความหยาบ ผิวเฉลี่ย (μm)
1	32	510	6	9.99	60.71	60.70	0.145	332.23	653.10	630.07	4.87
2	32	100	24	9.97	60.91	60.90	0.5	49.55	646.13	622.87	4.64
3	32	50	39	10.01	60.50	60.48	0.5	25.27	661.80	631.83	4.53
4	32	32	50	9.99	60.57	60.55	0.5	12.88	681.20	638.50	4.78
5	32	20	61	10.00	60.58	60.57	0.5	12.37	658.33	604.23	4.86
6	32	10	76	9.99	60.71	60.70	0.5	8.57	669.80	581.33	4.91
7	32	4	89	10.01	60.59	60.57	0.5	7.80	709.87	611.27	4.77
8	32	2	94	10.04	60.67	60.63	0.5	6.25	701.17	600.53	4.88

หมายเหตุ*

*ทดลองตามพารามิเตอร์ตารางที่ 3.3 และตารางที่ 3.4

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลการวัดความแข็งผิวงานจากการทดลองด้วยอิเล็กทรอนิกส์โทรดทองแดงแท่งต้นโดยปรับ
ปัจจัยประสิทธิภาพจากค่าเวลาปิด (Off-time)

ลำดับ ที่	เวลาเปิด (μ s)	เวลาปิด (μ s)	ความแข็งผิวเนื้อเหล็ก HV			ความแข็งผิวสปาร์ก HV		
			1	2	3	1	2	3
1	32	510	644.2	644.8	670.3	626.1	615.4	648.7
2	32	100	648.7	654.6	635.1	584.4	627.9	656.3
3	32	50	674.3	658.4	652.7	648.7	618.9	627.9
4	32	32	715.0	644.8	683.8	672.5	620.6	622.4
5	32	20	708.3	644.4	622.3	613.5	596.2	603
6	32	10	674.3	622.3	712.8	573.1	597.8	573.1
7	32	4	712.8	717.2	699.6	597.8	611.7	624.3
8	32	2	712.8	703.8	686.9	591.1	584.4	626.1

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลการวัดความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ของผิวงานจากการทดลองด้วยอิเล็กทรอนิกส์โทรดทองแดงแท่งต้นโดยปรับปัจจัยประสิทธิภาพจากค่าเวลาปิด (Off-time)

ลำดับ ที่	เวลาเปิด (μ s)	เวลาปิด (μ s)	ความเรียบผิวเฉลี่ย (Ra : μ m)				
			1	2	3	4	5
1	32	510	4.87	4.95	4.97	5.08	4.46
2	32	100	4.87	4.34	4.75	5.15	4.08
3	32	50	4.17	4.37	4.35	4.59	5.18
4	32	32	4.94	5.04	4.14	4.87	4.93
5	32	20	4.83	4.37	5.23	5.10	4.79
6	32	10	4.73	4.79	5.17	4.80	5.05
7	32	4	4.42	5.12	4.93	4.98	4.39
8	32	2	5.59	4.46	4.46	4.51	5.37

ตารางที่ ก.7 ข้อมูลการทดลองอิเล็กโตรดทองแดงแท่งตันโดยการปรับค่ากระแส (Current)

ลำดับ ที่	เวลาเปิด (μ s)	เวลาปิด (μ s)	กระแส (A)	ความโต อิเล็กโตรด \varnothing (mm)	ความยาว อิเล็กโตรด ก่อน (mm)	ความยาว อิเล็กโตรด หลัง (mm)	ความลึก ที่ป้อน (mm)	เวลาที่ใช้ ทดลอง (min)	ความแข็งผิว เนื้อเหล็ก (HV)	ความแข็งผิว ที่สปาร์ค (HV)	ความหยาบ ผิวเฉลี่ย (μ m)
1	2	32	3	10.00	60.15	60.10	0.2	184.17	656.87	639.47	1.60
2	2	32	6	9.99	60.11	59.95	0.5	194.98	638.70	634.33	2.02
3	2	32	9	10.00	60.75	60.70	0.5	157.55	674.20	660.93	2.04
4	2	32	12	10.00	60.63	60.47	0.46	95.00	667.23	650.90	2.17
5	2	32	15	10.01	60.25	60.04	0.5	83.82	667.53	649.77	2.36
6	2	32	18	10.00	60.28	60.03	0.5	102.82	671.33	698.30	2.49

หมายเหตุ*

*ทดลองตามพารามิเตอร์ตารางที่ 3.5



ตารางที่ ก.8 ข้อมูลการวัดความแข็งผิวงานจากการทดลองด้วยอิเล็กโตรดทองแดงแท่งต้นโดยการปรับ
ค่ากระแส (Current)

ลำดับ ที่	เวลาเปิด (μ s)	เวลาปิด (μ s)	กระแส (A)	ความแข็งผิวเนื้อเหล็ก HC			ความแข็งผิวสปาร์ต HV		
				1	2	3	1	2	3
1	2	32	3	637.2	650.6	682.8	646.8	652.7	618.9
2	2	32	6	646.8	648.7	620.6	637.2	617.1	648.7
3	2	32	9	672.5	714.8	635.3	656.3	662.3	664.2
4	2	32	12	680.5	648.7	672.5	635.3	640.9	676.5
5	2	32	15	654.6	652.7	695.3	618.9	664.2	666.2
6	2	32	18	693.3	664.2	656.5	680.5	714.8	699.6

ตารางที่ ก.9 ข้อมูลการวัดความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ของผิวงานจากการทดลองด้วยอิเล็กโตรด
ทองแดงแท่งต้นโดยการปรับค่ากระแส (Current)

ลำดับ ที่	เวลาเปิด (μ s)	เวลาปิด (μ s)	กระแส (A)	ความเรียบผิวเฉลี่ย (Ra : μ m)				
				1	2	3	4	5
1	2	32	3	1.70	1.52	1.70	1.61	1.49
2	2	32	6	2.17	2.09	1.94	1.97	1.92
3	2	32	9	1.96	1.97	2.11	1.99	2.15
4	2	32	12	2.00	2.29	2.24	2.07	2.26
5	2	32	15	2.49	2.36	2.10	2.29	2.55
6	2	32	18	2.68	2.38	2.44	2.49	2.46

ตารางที่ ก.10 ข้อมูลการทดลองอิเล็กโตรดทองแดงแท่งตันโดยการปรับค่าเวลาหน่วงในการสปาร์ค (Working Time)

ลำดับ ที่	เวลาเปิด (μ s)	เวลาปิด (μ s)	เวลางาน (WT)	ความโต อิเล็กโตรด \varnothing (mm)	ความยาว อิเล็กโตรด ก่อน (mm)	ความยาว อิเล็กโตรด หลัง (mm)	ความลึก ที่ป้อน (mm)	เวลาที่ใช้ ทดลอง (min)	ความแข็งผิว เนื้อเหล็ก (HV)	ความแข็งผิว ที่สปาร์ค (HV)	ความหยาบ ผิวเฉลี่ย (μ m)
1	32	2	0.1	10.04	60.60	60.40	0.5	112.07	634.43	594.90	4.57
2	32	2	0.5	10.04	60.67	60.63	0.5	6.25	682.83	582.50	4.88
3	32	2	1.0	10.01	60.25	60.25	0.5	4.03	666.90	550.73	4.73
4	32	2	1.6	10.04	60.80	60.80	0.5	3.77	723.73	623.87	4.34
5	32	2	2.0	10.00	60.28	60.28	0.5	3.62	662.17	587.53	4.78
6	32	2	2.6	9.96	60.86	60.86	0.5	3.43	749.50	668.30	5.28
7	32	2	4.0	10.00	60.16	60.17	0.5	3.25	667.97	607.77	5.03

หมายเหตุ*

*ทดลองตามพารามิเตอร์ตารางที่ 3.6



ตารางที่ ก.11 ข้อมูลการวัดความแข็งผิวงานจากการทดลองด้วยอิเล็กทรอนิกส์โทรดทองแดงแท่งต้น โดยการปรับ
ค่าเวลาหน่วงในการสปาร์ค (Working Time)

ลำดับ ที่	เวลาเปิด (μ s)	เวลาปิด (μ s)	เวลาดำเนิน (s)	ความแข็งผิวเนื้อเหล็ก HV			ความแข็งผิวสปาร์ค HV		
				1	2	3	1	2	3
1	32	2	0.1	652.7	631.7	618.9	582.9	582.9	618.9
2	32	2	0.5	674.3	662.5	711.7	558.6	597.8	591.1
3	32	2	1.0	670.3	648.7	681.7	538.4	582.9	530.9
4	32	2	1.6	751.9	726	693.3	608.2	631.7	631.7
5	32	2	2.0	633.4	670.3	682.8	606.6	578	578
6	32	2	2.6	749.5	749.5	749.5	672.5	666.2	666.2
7	32	2	4.0	652.7	682.8	668.4	576.4	622.6	624.3

ตารางที่ ก.12 ข้อมูลการวัดความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a) ของผิวงานจากการทดลองด้วยอิเล็กทรอนิกส์โทรด
ทองแดงแท่งต้น โดยการปรับค่าเวลาหน่วงในการสปาร์ค (Working Time)

ลำดับ ที่	เวลาเปิด (μ s)	เวลาปิด (μ s)	เวลาดำเนิน (s)	ความเรียบผิวเฉลี่ย ($R_a : \mu$ m)				
				1	2	3	4	5
1	32	2	0.1	5.01	4.55	3.76	4.44	5.07
2	32	2	0.5	5.59	4.46	4.46	4.51	5.37
3	32	2	1.0	5.12	4.84	4.55	4.56	4.60
4	32	2	1.6	5.43	4.97	5.39	5.10	4.79
5	32	2	2.0	4.72	5.15	4.76	4.54	4.74
6	32	2	2.6	5.25	4.67	5.70	5.50	5.30
7	32	2	4.0	5.08	5.35	4.82	4.71	5.21

ตารางที่ ก.13 ข้อมูลการทดลองอิเล็กโตรดทองแดงชุบเคลือบผิวด้วยทองแดงโดยปรับปัจจัยประสิทธิภาพจากค่าเวลาเปิด (On-time)

ลำดับ ที่	เวลา เปิด(μ s)	เวลา ปิด (μ s)	ปัจจัย ประสิทธิภาพ (%)	ความโต อิเล็กโตรด \varnothing (mm)	ความยาว อิเล็กโตรด ก่อน (mm)	ความยาว อิเล็กโตรด หลัง (mm)	ความลึก ที่ป้อน (mm)	เวลาที่ใช้ ทดลอง (min)	ความแข็งผิว เนื้อเหล็ก (HV)	ความแข็งผิว ที่สปาร์ค (HV)	ความหยาบ ผิวเฉลี่ย (μ m)
1	2	32	6	10.00	60.28	60.08	0.5	180.25	655.33	720.27	2.00
2	10	32	24	10.00	60.41	60.30	0.5	45.02	688.37	678.10	2.90
3	20	32	38	9.99	60.96	60.94	0.5	21.12	650.63	616.60	4.58
4	32	32	50	10.00	60.45	60.42	0.5	15.23	631.77	602.17	5.01
5	50	32	61	10.00	58.44	58.43	0.5	11.07	687.57	572.80	5.40
6	100	32	76	10.00	60.42	60.43	0.5	9.92	660.00	619.70	6.44
7	200	32	86	10.00	60.29	60.30	0.5	9.55	649.37	640.30	7.29
8	510	32	94	9.97	60.33	60.34	0.5	17.42	650.00	912.43	3.75

หมายเหตุ*

*ทดลองตามพารามิเตอร์ตารางที่ 3.2 และตารางที่ 3.3

ตารางที่ ก.14 ข้อมูลการวัดความแข็งผิวงานจากการทดลองด้วยอิเล็กทรอนิกส์โทรดทองแดงชุบเคลือบผิวด้วยทองแดงโดยปรับปัจจัยประสิทธิภาพจากค่าเวลาเปิด (On-time)

ลำดับ ที่	เวลาเปิด (μ s)	เวลาปิด (μ s)	ความแข็งผิวเนื้อเหล็ก HV			ความแข็งผิวสปาร์ค HV		
			1	2	3	1	2	3
1	2	32	668.4	637.3	660.3	712.6	733.2	715.0
2	10	32	678.5	703.8	682.8	688.9	650.6	694.8
3	20	32	650.6	656.5	644.8	620.6	606.6	622.6
4	32	32	641.0	620.8	633.5	603.3	615.4	587.8
5	50	32	691.0	691.2	680.5	560.7	589.4	568.3
6	100	32	662.3	639.2	678.5	622.6	587.8	648.7
7	200	32	650.6	656.5	641.0	613.5	666.4	641.0
8	510	32	658.4	650.6	641.0	926.4	897.5	913.4

ตารางที่ ก.15 ข้อมูลการวัดความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ของผิวงานจากการทดลองด้วยอิเล็กทรอนิกส์โทรดทองแดงชุบเคลือบผิวด้วยทองแดงโดยปรับปัจจัยประสิทธิภาพจากค่าเวลาเปิด (On-time)

ลำดับ ที่	เวลาเปิด (μ s)	เวลาปิด (μ s)	ความเรียบผิวเฉลี่ย (Ra : μ m)				
			1	2	3	4	5
1	2	32	2.07	1.85	1.98	2.09	2.00
2	10	32	3.13	3.02	2.99	2.63	2.74
3	20	32	4.42	4.68	4.59	4.32	4.91
4	32	32	5.38	5.13	4.40	4.85	5.28
5	50	32	5.53	5.83	5.51	5.10	5.02
6	100	32	6.26	6.25	6.70	6.14	6.84
7	200	32	7.06	7.47	7.18	7.99	6.76
8	510	32	3.94	4.08	3.40	3.40	3.94

ตารางที่ ก.16 ข้อมูลการทดลองอิเล็กโตรดทองแดงชุบเคลือบผิวด้วยทองแดงโดยปรับปัจจัยประสิทธิภาพจากค่าเวลาปิด (Off-time)

ลำดับ	เวลาเปิด(μ s)	เวลาปิด(μ s)	ปัจจัยประสิทธิภาพ (%)	ความโตอิเล็กโตรด \varnothing (mm)	ความยาวอิเล็กโตรดก่อน (mm)	ความยาวอิเล็กโตรดหลัง (mm)	ความลึกที่ป้อน (mm)	เวลาที่ใช้ทดลอง (min)	ความแข็งผิวเนื้อเหล็ก (HV)	ความแข็งผิวที่สปาร์ค (HV)	ความหยาบผิวเฉลี่ย (μ m)
1	32	510	6	9.98	60.58	60.57	0.072	228.10	683.67	661.67	4.62
2	32	100	24	10.00	60.61	60.58	0.5	52.65	642.97	633.60	5.13
3	32	50	39	10.00	60.73	60.70	0.5	25.52	682.13	631.73	4.91
4	32	32	50	10.00	60.36	60.33	0.5	17.00	677.83	625.73	4.82
5	32	20	61	9.99	60.88	60.87	0.5	13.53	687.33	629.47	4.89
6	32	10	76	9.99	60.13	60.12	0.5	9.75	691.07	616.57	5.06
7	32	4	89	10.00	60.33	60.32	0.5	8.13	704.10	625.03	4.80
8	32	2	94	9.97	60.31	60.29	0.5	7.10	677.90	597.90	5.32

หมายเหตุ*

*ทดลองตามพารามิเตอร์ตารางที่ 3.3 และตารางที่ 3.4

ตารางที่ ก.17 ข้อมูลการวัดความแข็งผิวงานจากการทดลองด้วยอิเล็กทรอนิกส์โทรดทองแดงชุบเคลือบผิว
ด้วยโดยปรับปัจจัยประสิทธิภาพจากค่าเวลาปิด (Off-time)

ลำดับ ที่	เวลาเปิด (μ s)	เวลาปิด (μ s)	ความแข็งผิวเนื้อเหล็ก HV			ความแข็งผิวสปาร์ค HV		
			1	2	3	1	2	3
1	32	510	691.2	715.0	644.8	666.4	662.3	656.3
2	32	100	650.6	633.5	644.8	635.3	618.9	646.6
3	32	50	691.2	710.4	644.8	642.9	629.7	622.6
4	32	32	680.5	676.5	676.5	626.1	628.7	622.4
5	32	20	686.6	680.5	694.9	615.4	648.7	624.3
6	32	10	693.1	680.5	699.6	613.5	627.9	608.3
7	32	4	686.9	721.6	703.8	629.7	633.5	611.9
8	32	2	676.5	686.9	670.3	599.7	597.8	596.2

ตารางที่ ก.18 ข้อมูลการวัดความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ของผิวงานจากการทดลองด้วยอิเล็กทรอนิกส์โทรด
ทองแดงชุบเคลือบผิวด้วยทองแดงโดยปรับปัจจัยประสิทธิภาพจากค่าเวลาปิด
(Off-time)

ลำดับ ที่	เวลาเปิด (μ s)	เวลาปิด (μ s)	ความเรียบผิวเฉลี่ย (Ra : μ m)				
			1	2	3	4	5
1	32	510	4.88	4.45	4.43	4.62	4.71
2	32	100	5.30	5.31	4.38	4.94	5.73
3	32	50	4.69	4.52	5.53	4.55	5.28
4	32	32	4.64	5.20	4.72	4.74	4.82
5	32	20	4.46	5.34	4.46	5.54	4.64
6	32	10	4.83	5.48	4.60	4.25	6.12
7	32	4	4.93	4.60	4.69	4.83	4.95
8	32	2	5.23	5.51	5.79	4.66	5.43

ตารางที่ ก.19 ข้อมูลการทดลองอิเล็กโตรดทองแดงชุบเคลือบผิวด้วยทองแดงโดยการปรับค่ากระแส (Current)

ลำดับ ที่	เวลาเปิด (μ s)	เวลาปิด (μ s)	กระแส (A)	ความโต อิเล็กโตรด \varnothing (mm)	ความยาว อิเล็กโตรด ก่อน (mm)	ความยาว อิเล็กโตรด หลัง (mm)	ความลึก ที่ป้อน (mm)	เวลาที่ใช้ ทดลอง (min)	ความแข็งผิว เนื้อเหล็ก (HV)	ความแข็งผิว ที่สปาร์ค (HV)	ความหยาบ ผิวเฉลี่ย (μ m)
1	2	32	3	10.00	60.36	60.30	0.195	194.72	691.50	686.13	1.66
2	2	32	6	10.00	60.31	60.12	0.5	231.68	654.77	644.87	2.00
3	2	32	9	10.00	60.59	60.40	0.5	155.22	676.13	658.70	2.05
4	2	32	12	10.00	60.93	60.75	0.5	124.80	721.67	692.93	2.38
5	2	32	15	10.00	61.04	60.82	0.5	91.48	710.47	687.33	2.51
6	2	32	18	10.00	58.39	58.15	0.5	90.97	723.27	656.90	2.56

หมายเหตุ*

*ทดลองตามพารามิเตอร์ตารางที่ 3.5

ตารางที่ ก.20 ข้อมูลการวัดความแข็งผิวงานจากการทดลองด้วยอิเล็กทรอนิกส์โทรดทองแดงชุบเคลือบผิว
ด้วยทองแดง โดยการปรับค่ากระแส (Current)

ลำดับ ที่	เวลาเปิด (μ s)	เวลาปิด (μ s)	กระแส (A)	ความแข็งผิวเนื้อเหล็ก HV			ความแข็งผิวสปาร์ต HV		
				1	2	3	1	2	3
1	2	32	3	688	695.3	691.2	697.4	680.5	680.5
2	2	32	6	650.6	676.5	637.2	650.6	633.4	650.6
3	2	32	9	680.5	667.4	680.5	682.6	637.2	656.3
4	2	32	12	724	726	715	693	690.5	695.3
5	2	32	15	717	706.1	708.3	680.8	695.2	686
6	2	32	18	712.6	724	733.2	650.6	682.8	637.3

ตารางที่ ก.21 ข้อมูลการวัดความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ของผิวงานจากการทดลองด้วยอิเล็กทรอนิกส์โทรด
ทองแดงชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง โดยการปรับพารามิเตอร์กระแส (Current)

ลำดับ ที่	เวลาเปิด (μ s)	เวลาปิด (μ s)	กระแส (A)	ความเรียบผิวเฉลี่ย (Ra : μ m)				
				1	2	3	4	5
1	2	32	3	1.78	1.54	1.60	1.72	1.66
2	2	32	6	1.91	2.04	2.00	2.09	1.98
3	2	32	9	2.09	2.06	2.09	2.01	2.02
4	2	32	12	2.55	2.68	2.26	2.36	2.07
5	2	32	15	2.42	2.45	2.64	2.68	2.36
6	2	32	18	2.43	2.44	2.49	2.84	2.61

ตารางที่ ก.22 ข้อมูลการทดลองอิเล็กโตรดทองแดงชุบเคลือบผิวด้วยทองแดงโดยปรับเวลาหน่วงในการสปาร์ค (Working Time)

ลำดับ ที่	เวลาเปิด (μ s)	เวลาปิด (μ s)	เวลา หน่วง (s)	ความโต อิเล็กโตรด \varnothing (mm)	ความยาว อิเล็กโตรด ก่อน (mm)	ความยาว อิเล็กโตรด หลัง (mm)	ความลึก ที่ป้อน (mm)	เวลาที่ใช้ ทดลอง (min)	ความแข็งผิว เนื้อเหล็ก (HV)	ความแข็งผิว ที่สปาร์ค (HV)	ความหยาบ ผิวเฉลี่ย (μ m)
1	32	2	0.1	9.99	60.22	60.19	0.5	69.40	684.17	613.23	4.26
2	32	2	0.5	9.98	60.62	60.61	0.5	7.10	673.00	589.58	4.76
3	32	2	1.0	10.00	60.38	60.36	0.5	4.60	698.53	613.32	4.60
4	32	2	1.6	10.00	61.71	61.70	0.5	3.89	703.53	615.63	5.07
5	32	2	2.0	10.00	60.67	60.66	0.5	3.37	710.33	622.70	4.72
6	32	2	2.6	10.00	60.78	60.77	0.5	3.67	629.27	593.63	4.77
7	32	2	4.0	10.00	60.37	60.38	0.5	3.31	648.17	625.57	5.30

หมายเหตุ*

*ทดลองตามพารามิเตอร์ตารางที่ 3.6

ตารางที่ ก.23 ข้อมูลการทดลองอิเล็กโตรดทองแดงชุบเคลือบผิวด้วยทองแดงโดยปรับเวลาหน้าวงในการสปาร์ค (Working Time)

ลำดับ ที่	เวลาเปิด (μ s)	เวลาปิด (μ s)	เวลา หน้าวง(s)	ความแข็งผิวเนื้อเหล็ก HV			ความแข็งผิวสปาร์ค HV		
				1	2	3	1	2	3
1	32	2	0.1	726	633.2	693.3	635.3	604.7	599.7
2	32	2	0.5	695.3	682.8	640.9	589.45	579.6	599.7
3	32	2	1.0	695.3	674.3	726	628.1	622.4	589.45
4	32	2	1.6	703.8	728.3	678.5	652.5	587.8	606.6
5	32	2	2.0	676.5	728.5	726	608.3	640.9	618.9
6	32	2	2.6	622.6	622.3	642.9	578	589.4	613.5
7	32	2	4.0	648.7	682.2	613.6	635.3	629.7	611.7

ตารางที่ ก.24 ข้อมูลการวัดความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ของผิวงานจากการทดลองด้วยอิเล็กโตรดทองแดงชุบเคลือบผิวด้วยทองแดงโดยปรับเวลาหน้าวงในการสปาร์ค (Working Time)

ลำดับ ที่	เวลาเปิด (μ s)	เวลาปิด (μ s)	เวลา หน้าวง(s)	ความเรียบผิวเฉลี่ย (Ra : μ m)				
				1	2	3	4	5
1	32	2	0.1	4.60	4.35	4.60	3.74	4.03
2	32	2	0.5	4.44	5.30	4.56	4.52	4.96
3	32	2	1.0	4.62	4.49	4.53	4.39	4.95
4	32	2	1.6	5.06	4.75	4.86	5.70	4.99
5	32	2	2.0	4.58	5.24	4.78	4.54	4.45
6	32	2	2.6	4.38	5.18	4.67	4.67	4.97
7	32	2	4.0	5.26	5.46	5.17	5.12	5.50

ตารางที่ ก.25 ข้อมูลการทดลองอิเล็กโตรดเหล็กกล้า St 37 ชุบเคลือบผิวด้วยทองแดงโดยปรับปัจจัยประสิทธิภาพจากค่าเวลาเปิด (On-time)

ลำดับ ที่	เวลาเปิด (μ s)	เวลาปิด (μ s)	ปัจจัย ประสิทธิภาพ(%)	ความโต อิเล็กโตรด \varnothing (mm)	ความยาว อิเล็กโตรด ก่อน (mm)	ความยาว อิเล็กโตรด หลัง (mm)	ความลึก ที่ป้อน (mm)	เวลาที่ใช้ ทดลอง (min)	ความแข็งผิว เนื้อเหล็ก (HV)	ความแข็งผิว ที่สปาร์ค (HV)	ความหยาบ ผิวเฉลี่ย (μ m)
1	2	32	6	9.99	60.40	60.26	0.50	310.82	645.40	657.40	2.09
2	10	32	24	9.91	61.71	61.68	0.50	58.23	658.27	647.40	2.97
3	20	32	38	10.00	58.68	58.64	0.50	22.98	679.03	636.17	3.91
4	32	32	50	10.00	59.18	59.18	0.50	24.28	642.90	621.13	4.24
5	50	32	61	9.99	59.88	59.88	0.50	20.97	736.97	619.20	4.82
6	100	32	76	9.99	59.91	59.91	0.50	16.25	691.70	649.97	6.73
7	200	32	86	10.02	58.85	58.87	0.50	14.63	709.27	696.97	6.75
8	510	32	94	9.96	61.25	61.28	0.50	20.18	697.10	946.53	4.70

หมายเหตุ*

*ทดลองตามพารามิเตอร์ตารางที่ 3.2 และตารางที่ 3.3

ตารางที่ ก.26 ข้อมูลการวัดความแข็งผิวงานจากการทดลองด้วยอิเล็กทรอนิกส์โทรดเหล็กกล้า St 37 ชุบเคลือบผิวด้วย
ทองแดงโดยปรับปรุงปัจจัยประสิทธิภาพจากค่าเวลาเปิด (On-time)

ลำดับ ที่	เวลาเปิด (μ s)	เวลาปิด (μ s)	ความแข็งผิวเนื้อเหล็ก HV			ความแข็งผิวสปาร์ก HV		
			1	2	3	1	2	3
1	2	32	646.6	644.8	644.8	658.4	678.5	635.3
2	10	32	637.2	646.6	691.0	644.9	642.9	654.4
3	20	32	737.8	650.6	648.7	644.8	646.6	617.1
4	32	32	635.3	646.8	646.6	631.7	594.5	637.2
5	50	32	735.3	737.8	737.8	596.2	626.1	635.3
6	100	32	721.6	723.8	629.7	623.5	679.6	646.8
7	200	32	705.9	695.3	726.6	704.0	676.5	710.4
8	510	32	721.6	697.4	672.3	967.3	1014.2	858.1

ตารางที่ ก.27 ข้อมูลการวัดความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ของผิวงานจากการทดลองด้วยอิเล็กทรอนิกส์โทรดเหล็กกล้า
St 37 ชุบเคลือบผิวด้วยทองแดงโดยปรับปรุงปัจจัยประสิทธิภาพจากค่าเวลาเปิด (On-time)

ลำดับ ที่	เวลาเปิด (μ s)	เวลาปิด (μ s)	ความเรียบผิวเฉลี่ย (Ra : μ m)				
			1	2	3	4	5
1	2	32	2.03	2.16	2.11	1.95	2.18
2	10	32	3.22	2.60	3.15	3.01	2.87
3	20	32	3.87	3.89	4.00	3.97	3.80
4	32	32	4.58	4.38	4.12	3.90	4.21
5	50	32	4.89	5.18	4.70	4.63	4.72
6	100	32	7.31	6.66	6.28	6.37	7.02
7	200	32	7.00	6.83	6.29	7.49	6.16
8	510	32	5.41	5.10	4.19	4.74	4.04

ตารางที่ ก.28 ข้อมูลการทดลองอิเล็กโตรดเหล็กกล้า St 37 ชุบเคลือบผิวด้วยทองแดงโดยปรับปัจจัยประสิทธิภาพจากค่าเวลาปิด (Off-time)

ลำดับ ที่	เวลาเปิด (μ s)	เวลาปิด (μ s)	ปัจจัย ประสิทธิภาพ (%)	ความโต อิเล็กโตรด \varnothing (mm)	ความยาว อิเล็กโตรด ก่อน (mm)	ความยาว อิเล็กโตรด หลัง (mm)	ความลึก ที่ป้อน (mm)	เวลาที่ใช้ ทดลอง (min)	ความแข็งผิว เนื้อเหล็ก (HV)	ความแข็งผิว ที่สปาร์ค (HV)	ความหยาบ ผิวเฉลี่ย (μ m)
1	32	510	6	9.99	58.55	58.52	0.15	295.63	658.63	648.03	5.44
2	32	100	24	9.50	61.58	61.53	0.50	63.25	651.73	642.87	4.76
3	32	50	39	10.00	60.03	60.00	0.50	38.25	659.33	631.63	4.4
4	32	32	50	9.91	60.27	60.25	0.50	24.98	648.83	624.40	4.49
5	32	20	61	10.00	60.35	60.33	0.50	20.62	655.10	625.27	4.36
6	32	10	76	9.93	60.20	60.18	0.50	14.08	675.10	644.87	4.55
7	32	4	89	10.01	60.91	60.89	0.50	11.78	692.97	649.97	4.46
8	32	2	94	10.00	60.48	60.45	0.50	9.33	685.63	641.17	4.46

หมายเหตุ*

*ทดลองตามพารามิเตอร์ตารางที่ 3.3 และตารางที่ 3.4

ตารางที่ ก.29 ข้อมูลการวัดความแข็งผิวงานจากการทดลองด้วยอิเล็กโตรดเหล็กกล้า St 37 ชุบเคลือบผิวด้วย
ทองแดงโดยปรับปัจจัยประสิทธิภาพจากค่าเวลาปิด (Off-time)

ลำดับ ที่	เวลาเปิด (μ s)	เวลาปิด (μ s)	ความแข็งผิวเนื้อเหล็ก HV			ความแข็งผิวสปาร์ค HV		
			1	2	3	1	2	3
1	32	510	666.4	639.2	670.3	650.6	650.6	642.9
2	32	100	644.2	646.8	664.2	652.7	631.5	644.4
3	32	50	670.3	664.3	643.4	633.5	633.5	627.9
4	32	32	648.5	615.4	682.6	622.6	618.9	631.7
5	32	20	654.4	658.4	652.5	611.7	648.7	615.4
6	32	10	684.8	666.2	674.3	648.5	658.2	627.9
7	32	4	666.2	723.8	688.9	639.2	652.5	658.2
8	32	2	650.6	719.4	686.9	660.3	627.9	635.3

ตารางที่ ก.30 ข้อมูลการวัดความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ของผิวงานจากการทดลองด้วยอิเล็กโตรดเหล็กกล้า
St 37 ชุบเคลือบผิวด้วยทองแดงโดยปรับปัจจัยประสิทธิภาพจากค่าเวลาปิด (Off-time)

ลำดับ ที่	เวลาเปิด (μ sec)	เวลาปิด (μ sec)	ความเรียบผิวเฉลี่ย (Ra : μ m)				
			1	2	3	4	5
1	32	510	5.14	4.86	6.05	5.00	6.17
2	32	100	5.47	4.99	4.16	4.47	4.71
3	32	50	4.25	4.66	4.40	4.37	4.30
4	32	32	4.20	4.60	4.54	4.44	4.65
5	32	20	4.34	4.50	4.51	4.22	4.22
6	32	10	4.51	4.57	4.79	4.60	4.27
7	32	4	4.58	4.47	4.25	4.31	4.68
8	32	2	4.39	4.36	4.41	4.68	4.44

ตารางที่ ก.31 ข้อมูลการทดลองอิเล็กโตรดเหล็กกล้า St 37 ชุบเคลือบผิวด้วยทองแดงโดยการปรับค่ากระแส (Current)

ลำดับ ที่	เวลาเปิด (μ s)	เวลาปิด (μ s)	กระแส (A)	ความโต อิเล็กโตรด \varnothing (mm)	ความยาว อิเล็กโตรด ก่อน (mm)	ความยาว อิเล็กโตรด หลัง (mm)	ความลึก ที่ป้อน (mm)	เวลาที่ใช้ ทดลอง (min)	ความแข็งผิว เนื้อเหล็ก (HV)	ความแข็งผิว ที่สปาร์ค (HV)	ความหยาบ ผิวเฉลี่ย (μ m)
1	2	32	3	9.91	60.40	60.31	0.216	219.87	669.20	669.87	2.012
2	2	32	6	10.00	60.83	60.65	0.5	230.10	697.83	673.83	2.082
3	2	32	9	9.98	60.17	59.99	0.5	173.23	727.77	664.03	2.094
4	2	32	12	9.93	60.17	59.97	0.5	123.57	702.97	637.63	2.344
5	2	32	15	10.00	60.24	60.02	0.5	114.78	738.63	647.35	2.548
6	2	32	18	10.00	60.24	60.06	0.5	163.33	738.63	633.43	2.418

หมายเหตุ*

*ทดลองตามพารามิเตอร์ตารางที่ 3.5



ตารางที่ ก.32 ข้อมูลการวัดความแข็งผิวงานจากการทดลองด้วยอิเล็กโตรดเหล็กกล้า St 37 ชุบเคลือบผิวด้วย
ทองแดงโดยการปรับค่ากระแส (Current)

ลำดับ ที่	เวลาเปิด (μ s)	เวลาปิด (μ s)	กระแส (A)	ความแข็งผิวเนื้อเหล็ก HV			ความแข็งผิวสปาร์ค HV		
				1	2	3	1	2	3
1	2	32	3	678.5	670.3	658.8	678.5	686.9	644.2
2	2	32	6	689.1	721.8	682.6	674.5	684.7	662.3
3	2	32	9	730.7	719.4	733.2	699.6	626.1	666.4
4	2	32	12	709.4	691.2	708.3	650.6	611.7	650.6
5	2	32	15	749.5	733.2	733.2	644.2	686.9	610.95
6	2	32	18	733.2	733.2	749.5	635.3	629.7	635.3

ตารางที่ ก.33 ข้อมูลการวัดความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ของผิวงานจากการทดลองด้วยอิเล็กโตรดเหล็กกล้า
St 37 ชุบเคลือบผิวด้วยทองแดงโดยการปรับค่ากระแส (Current)

ลำดับ ที่	เวลาเปิด (μ s)	เวลาปิด (μ s)	กระแส (A)	ความเรียบผิวเฉลี่ย (Ra : μ m)				
				1	2	3	4	5
1	2	32	3	1.86	1.94	2.09	2.10	2.07
2	2	32	6	2.03	2.12	2.20	1.95	2.11
3	2	32	9	2.06	1.95	2.15	2.24	2.07
4	2	32	12	2.43	2.31	2.18	2.44	2.36
5	2	32	15	2.48	2.67	2.58	2.60	2.41
6	2	32	18	2.50	2.43	2.36	2.40	2.40

ตารางที่ ก.34 ข้อมูลการทดลองอิเล็กโตรดเหล็กกล้า St 37 ชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง โดยการปรับค่าเวลาหน่วยในการสปาร์ค (Working Time)

ลำดับ ที่	เวลาเปิด (μ s)	เวลาปิด (μ s)	เวลา หน่วย (s)	ความโต อิเล็กโตรด \varnothing (mm)	ความยาว อิเล็กโตรด ก่อน (mm)	ความยาว อิเล็กโตรด หลัง (mm)	ความลึก ที่ป้อน (mm)	เวลาที่ใช้ ทดลอง (min)	ความแข็งผิว เนื้อเหล็ก (HV)	ความแข็งผิว ที่สปาร์ค (HV)	ความหยาบ ผิวเฉลี่ย (μ m)
1	32	2	0.1	10.00	60.32	60.29	0.50	150.98	716.33	631.63	4.49
2	32	2	0.5	9.91	60.28	60.27	0.50	8.50	682.00	599.17	4.49
3	32	2	1.0	9.91	61.60	61.60	0.50	5.12	728.90	629.80	4.62
4	32	2	1.6	10.00	60.61	61.60	0.50	4.31	710.53	603.03	4.68
5	32	2	2.0	10.00	58.58	58.58	0.50	4.20	722.63	604.23	4.97
6	32	2	2.6	9.93	59.93	59.93	0.50	3.88	719.90	624.93	5.04
7	32	2	4.0	9.95	60.22	60.20	0.5	4.05	655.50	603.33	4.90

หมายเหตุ*

*ทดลองตามพารามิเตอร์ตารางที่ 3.6



ตารางที่ ก.35 ข้อมูลการทดลองอิเล็กโตรดเหล็กกล้า St 37 ชุบเคลือบผิวด้วยทองแดงโดยการปรับค่าเวลา
 หนึ่งในการสปาร์ก (Working Time)

ลำดับ ที่	เวลาเปิด (μ s)	เวลาปิด (μ s)	เวลา หนึ่ง(s)	ความแข็งผิวเนื้อเหล็ก HV			ความแข็งผิวสปาร์ก HV		
				1	2	3	1	2	3
1	32	2	0.1	726.2	682.8	740.0	631.7	629.7	633.5
2	32	2	0.5	688.9	688.9	668.2	601.3	586.2	610.0
3	32	2	1.0	704.0	744.9	737.8	631.7	635.3	622.4
4	32	2	1.6	721.6	710.4	699.6	599.7	603.0	606.4
5	32	2	2.0	735.3	735.2	697.4	611.7	603.0	598.0
6	32	2	2.6	742.6	723.8	693.3	620.6	628.1	626.1
7	32	2	4.0	660.3	629.7	676.5	615.4	611.7	582.9

ตารางที่ ก.36 ข้อมูลการวัดความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ของผิวงานจากการทดลองด้วยอิเล็กโตรดเหล็กกล้า
 St 37 ชุบเคลือบผิวด้วยทองแดงโดยการปรับค่าเวลาหนึ่งในการสปาร์ก (Working Time)

ลำดับ ที่	เวลาเปิด (μ s)	เวลาปิด (μ s)	เวลา หนึ่ง(s)	ความเรียบผิวเฉลี่ย (Ra : μ m)				
				1	2	3	4	5
1	32	2	0.1	4.44	4.38	4.26	4.79	4.58
2	32	2	0.5	4.82	4.56	4.21	4.26	4.62
3	32	2	1.0	4.60	5.38	4.28	4.56	4.27
4	32	2	1.6	4.49	4.95	4.22	4.71	5.04
5	32	2	2.0	4.83	4.33	5.32	5.38	4.99
6	32	2	2.6	5.04	4.93	4.86	4.96	5.40
7	32	2	4.0	4.90	4.75	5.56	5.03	5.25

ตารางที่ ก.37 ข้อมูลการทดลองความลึกของการกัดเซาะที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของอิเล็กโทรด
ทองแดงแท่งตัน

ลำดับ ที่	ความลึก (mm)	ความโต อิเล็กโทรด Ø (mm)	ความยาว อิเล็กโทรดก่อน (mm)	ความยาว อิเล็กโทรดหลัง (mm)	เวลาที่ใช้ (min)
1	0.5	10.00	60.00	60.02	2.65
2	3.0	10.00	60.00	60.02	16.10
3	6.0	10.00	60.00	60.01	31.42
4	9.0	10.00	60.00	60.01	44.52
5	12.0	10.00	60.00	59.99	58.33

ตารางที่ ก.38 ข้อมูลการทดลองความลึกของการกัดเซาะที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของอิเล็กโทรด
ทองแดงชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง

ลำดับ ที่	ความลึก (mm)	ความโต อิเล็กโทรด Ø (mm)	ความยาว อิเล็กโทรดก่อน (mm)	ความยาว อิเล็กโทรดหลัง (mm)	เวลาที่ใช้ (min)
1	0.5	10.00	60.00	60.01	2.95
2	3.0	10.00	60.02	60.04	18.07
3	6.0	10.00	60.02	60.05	36.40
4	9.0	10.00	60.01	60.05	53.85
5	12.0	10.00	60.00	60.00	71.43

ตารางที่ ก.39 ข้อมูลการทดลองความลึกของการกัดเซาะที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของอิเล็กโทรด
เหล็กกล้า St 37 ชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง

ลำดับ ที่	ความลึก (mm)	ความโต อิเล็กโทรด Ø (mm)	ความยาว อิเล็กโทรดก่อน (mm)	ความยาว อิเล็กโทรดหลัง (mm)	เวลาที่ใช้ (min)
1	0.5	10.00	60.00	60.01	4.50
2	3.0	10.00	60.01	60.02	24.45
3	6.0	10.00	60.02	60.03	50.53
4	9.0	10.00	60.01	60.02	76.32
5	12.0	10.00	60.00	60.00	102.78



ภาคผนวก ข
ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์



การปรับปรุงคุณสมบัติผิวงานเหล็กกล้า AISI P20 โดยการปรับค่าปัจจัย ประสิทธิภาพในการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า

กมลพงศ์ แจ่มกมล¹ ศิริชัย ต่อสกุล² พิชัย จันทร์มณี¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

จ.กรุงเทพมหานคร 10120

² ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

จ.ปทุมธานี 12110

E-mail: kamonpong26@gmail.com¹

บทคัดย่อ

กระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า (EDM) เป็นกระบวนการที่ใช้สำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความซับซ้อนสูงตลอดจนวัสดุที่ยากต่อการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการทางกล ซึ่งนิยมใช้ในงานขึ้นรูปแม่พิมพ์ กระบวนการนี้อาศัยหลักการปฏิกิริยาทางไฟฟ้า โดยการถ่ายเทประจุสลับกับการหยุดถ่ายเทประจุผ่านตัวนำที่เรียกว่า "Tool Electrode" ปัจจัยประสิทธิภาพ (Duty Factor) คือช่วงเวลาการจ่ายประจุ (เวลาเปิด) ต่อช่วงเวลาหยุดถ่ายเทประจรรวมกับช่วงเวลาการถ่ายเทประจุ (เวลาปิด+เวลาเปิด) [1] ซึ่งทำให้เกิดอัตราจัดเนื้องานที่ส่งผลต่อความหยาบผิวชิ้นงาน ในการทดลองนี้กำหนดขึ้นทดสอบเป็นเหล็กกล้า AISI P20 มีค่าความหยาบผิวเฉลี่ย $1.75 \mu\text{m}$ ผ่านกระบวนการชุบแข็ง วัสดุอิเล็กโทรดทองแดงเป็นขั้วบวก ทำการสปาร์คด้วยสารไดอิเล็กทริกที่เป็นสารไฮโดรคาร์บอน (Shell EDM Fluid 2A) ตั้งค่าเวลาเปิด 50 μs ปรับเวลาเปิด 4, 12, 25, 50, 100, 200, 800 μs และตั้งค่าเวลาเปิด 50 μs ปรับเวลาปิด 4, 12, 25, 50, 100, 200, 800 μs เพื่อให้เกิดค่าปัจจัยประสิทธิภาพที่ต่างกัน ผลการศึกษาพบว่าเวลาปิดมีผลต่ออัตราจัดเนื้องานมากกว่าเวลาเปิด แต่เวลาเปิดมีผลต่อความหยาบผิวมากกว่าเวลาปิด เมื่อปัจจัยประสิทธิภาพ และเวลาเปิดสูงขึ้นความหยาบผิวเฉลี่ยจะสูงขึ้นตาม อัตราจัดเนื้องานสูงสุด $9.19 \text{ mm}^3/\text{min}$ เกิดที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 94

เปอร์เซ็นต์ (เวลาเปิด 50 μs เวลาปิด 4 μs) ส่วนความหยาบผิวเฉลี่ยสูงสุด $7.86 \mu\text{m}$ เกิดที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 80 เปอร์เซ็นต์ (เวลาเปิด 200 μs เวลาปิด 50 μs) ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยต่ำสุดที่ $2.83 \mu\text{m}$ เกิดที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 80 เปอร์เซ็นต์ (เวลาเปิด 4 μs เวลาปิด 50 μs)

คำสำคัญ Roughness/ Duty factor/ EDM

1. บทนำ

อุตสาหกรรมผลิตแม่พิมพ์พลาสติก ในปัจจุบันนี้ได้มีการแปรรูปวัสดุแม่พิมพ์ที่ขึ้นรูปได้ยากด้วยกระบวนการทางกลและชิ้นงานที่มีความซับซ้อนสูง [2] โดยใช้กระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า (Electrical discharge machine, EDM) ซึ่งเป็นกระบวนการที่อาศัยหลักการทางความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าที่ถูกส่งผ่านตัวนำที่เรียกว่า "Tool Electrode" ไปยังชิ้นงาน โดยมีสารละลายกึ่งตัวนำ (Dielectric) [3] ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันการลัดวงจรและระบายความร้อน โดยผลลัพท์ที่ได้จะวัดอยู่ในรูปของอัตราจัดเนื้องานและความเรียบผิว [4] ทำให้ผู้วิจัยมีความสนใจเกี่ยวกับปัจจัยประสิทธิภาพที่เกิดจากเวลาเปิดและเวลาปิดที่ต่างกัน ส่งผลอย่างไรต่ออัตราจัดเนื้องานและค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้าเกรด AISI P20 ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ในงานแม่พิมพ์พลาสติก

2. วิธีการทดลอง

การทดลองนี้ได้ทดลองโดยใช้เครื่อง EDM รุ่น Charmill Model 2-LC ซึ่งงานทดสอบเป็นเหล็กกล้า AISI P20 มีค่าความหยาบผิวเฉลี่ย 1.75 μm ผ่านกระบวนการชุบแข็ง วัสดุอิเล็กโทรดเป็นทองแดงดังแสดงไว้ในตารางที่ 1 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร กัดหลุมลึก 0.5 มิลลิเมตร ในสารไดอิเล็กตริกไฮโดรคาร์บอน Shell EDM Fluid 2A โดยกำหนดตัวแปรคงที่ตามตารางที่ 2 และปรับค่าเวลาเปิด และเวลาปิดเพื่อให้ได้ค่าปัจจัยประสิทธิผลที่ต่างกันแสดงไว้ในตารางที่ 3 และตารางที่ 4 วัดความเรียบผิวเฉลี่ยโดยเครื่อง Mitutoyo Surf test 301

ตารางที่ 1. สมบัติของอิเล็กโทรด

Electrode	Thermal conductivity (W/m-K)	Melting point ($^{\circ}\text{C}$)	Electrical conductivity ($\Omega\text{-m}$) ⁻¹
ทองแดง	398	1,084	6.0×10^7

ตารางที่ 2. ค่าตัวแปรคงที่

ขั้วอิเล็กโทรด	บวก
กระแส (แอมป์)	9
ความต่างศักย์ (โวลต์)	250
เวลาแช่ Wt. (sec)	0.5
ระยะยก 2 มม. Jp (sec)	0.67

ตารางที่ 3. ปัจจัยประสิทธิผลปรับตั้งเวลาเปิด

No.	Time-on (μs)	Time-off (μs)	Duty factor (%)
1	4	50	7
2	12	50	19
3	25	50	33
4	50	50	50
5	100	50	67
6	200	50	80
7	800	50	94

ตารางที่ 4. ปัจจัยประสิทธิผลปรับตั้งเวลาปิด

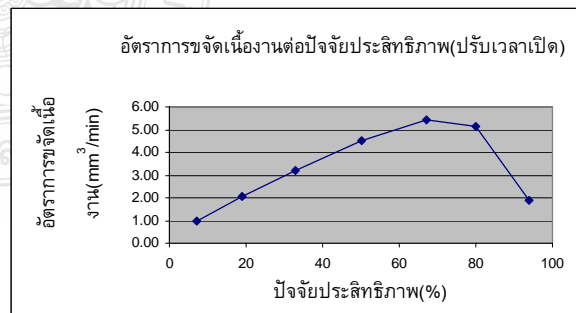
No.	Time-on (μs)	Time-off (μs)	Duty factor (%)
1	50	800	6
2	50	200	20
3	50	100	33
4	50	50	50
5	50	25	67
6	50	12	81
7	50	4	92

หมายเหตุ **

$$**\text{Dutv factor} = \frac{\text{Time-on} \times 100}{\text{Time-on} + \text{Time-off}} (\%)$$

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

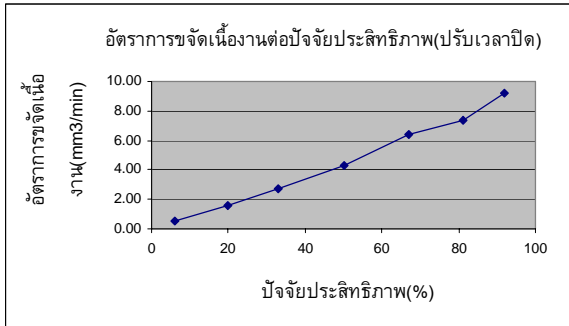
3.1 ปัจจัยประสิทธิผลต่ออัตราจัดเนื้องานโดยการปรับตั้งเวลาเปิด และให้เวลาปิดคงที่ 50 μs ผลการทดลองดังรูปที่ 1 สามารถสรุปได้ว่าเมื่อเวลาเปิดเพิ่มขึ้น อัตราจัดเนื้องานจะเพิ่มขึ้นตามจนถึงระดับที่ปัจจัยประสิทธิผล 80 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีเวลาเปิดมากกว่าเวลาปิด 2-3 เท่า จะทำให้อัตราการจัดเนื้องานเริ่มลดต่ำลง เนื่องจากเวลาเปิดที่มากเกินไปทำให้ระยะเวลาถ่ายเทประจุมากเป็นผลให้เกิดความร้อนสูงชิ้นงานไม่กลับสู่สภาวะเดิมก่อนเริ่มการสปาร์คใหม่ได้



รูปที่ 1. ปัจจัยประสิทธิผลต่ออัตราจัดเนื้องาน โดยปรับตั้งเวลาเปิด

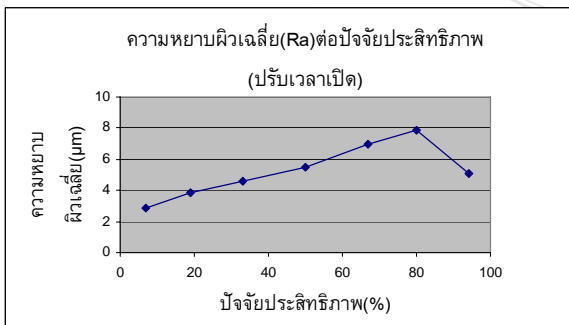
3.2 ปัจจัยประสิทธิผลต่ออัตราจัดเนื้องานโดยการปรับตั้งเวลาปิดและให้เวลาเปิดคงที่ 50 μs ผลการทดลองดังรูปที่ 2 สามารถสรุปได้ว่าปัจจัย ประสิทธิภาพที่เกิดจากเวลาเปิดต่ำ (50 μs) ทำให้เวลาปิดมีผลต่ออัตราจัดเนื้องานมาก กล่าวคือเวลาปิดต่ำ ทำให้อัตราการ

ขจัดเนื้องานมากกว่าเวลาปิดที่สูง เนื่องจากเวลาปิดที่ต่ำทำให้เวลาที่ใช้ในการถ่ายเทประจุต่อรอบมากขึ้น

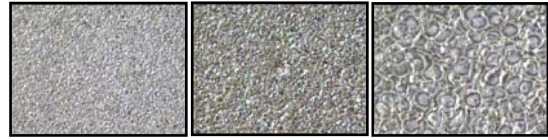


รูปที่ 2. ปัจจัยประสิทธิภาพต่ออัตราขจัดเนื้องานโดยปรับตั้งเวลาปิด

3.3 ปัจจัยประสิทธิภาพต่อความหยาบผิวเฉลี่ยโดยการปรับตั้งเวลาเปิด และให้เวลาปิดคงที่ 50 μ s ผลการทดลองดังรูปที่ 3 สามารถสรุปได้ว่าปัจจัยประสิทธิภาพที่ 7 เปอร์เซนต์ (เวลาเปิด 4 μ s) ให้ค่าความหยาบผิวชิ้นงานเฉลี่ย 2.83 μ m และเมื่อปัจจัยประสิทธิภาพมากขึ้นจะทำให้ค่าความหยาบผิวเพิ่มขึ้นตามจนถึงระดับ 80 เปอร์เซนต์(เวลาเปิด 200 μ s) ทำให้ความหยาบผิวเฉลี่ยเป็น 7.86 μ m และที่ปัจจัยประสิทธิภาพเกินกว่านี้จะทำให้ความหยาบผิวลดลงจากการทดลองยังพบว่าปัจจัยประสิทธิภาพทำให้เกิดอัตราขจัดเนื้องานและความหยาบผิวที่สัมพันธ์กัน (เปรียบเทียบรูปที่ 1 กับรูปที่ 3) โดยเวลาเปิดที่ต่างกันทำให้เกิดพื้นผิวการกัดเซาะที่มีความหยาบผิวแตกต่างกันดังรูปที่ 4



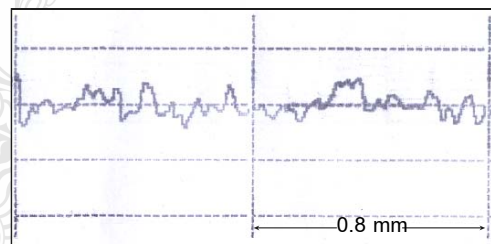
รูปที่ 3. ปัจจัยประสิทธิภาพต่อความหยาบผิวโดยปรับตั้งเวลาเปิด



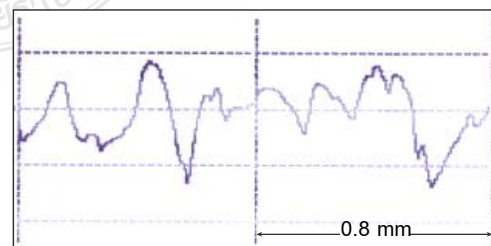
- a. เวลาเปิด 4 μ s เวลาปิด 50 μ s
- b. เวลาเปิด 200 μ s เวลาปิด 50 μ s
- c. เวลาเปิด 800 μ s เวลาปิด 50 μ s

รูปที่ 4. ผิวที่เกิดจากปัจจัยประสิทธิภาพที่ต่างกัน (ขนาดกำลังขยาย 3X)

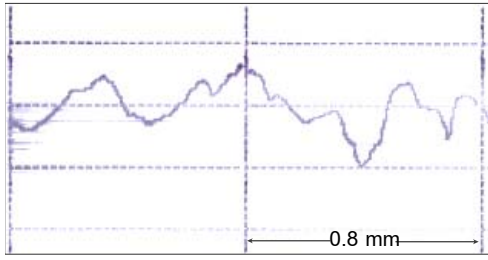
สาเหตุที่ความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) เปลี่ยนแปลงเกิดจากปัจจัยประสิทธิภาพที่ต่ำเวลาเปิด 4 μ s ทำให้อัตราการขจัดเนื้อต่ำ แสดงว่าความลึกของผิวงานที่เกิดการกัดเซาะน้อยดังรูปที่ 5 เมื่อเวลาเปิดเพิ่มขึ้นเป็น 200 μ s ความลึกของผิวงานที่เกิดการกัดเซาะมากขึ้นดังรูปที่ 6 แต่เมื่อเวลาเปิดเป็น 800 μ s จะทำให้อัตราการขจัดเนื้องานและความหยาบผิวต่ำลงเพราะเกิดการหลอมละลายของชิ้นงาน เป็นเหตุให้ความลึกต่ำลงแต่ความกว้างของผิวที่แข็งตัวใหม่มากขึ้น(Recast) [5] ดังรูปที่ 7.



รูปที่ 5. ลักษณะความหยาบผิวที่ เวลาเปิด 4 μ s เวลาปิด 50 μ s

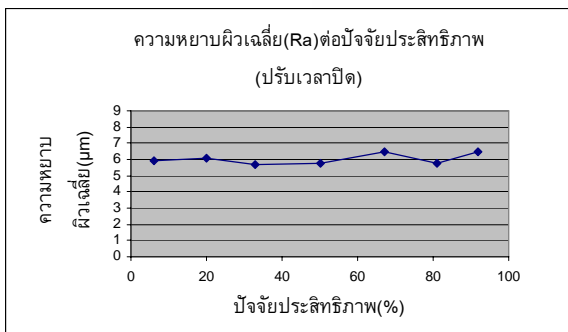


รูปที่ 6. ลักษณะความหยาบผิวที่ เวลาเปิด 200 μ s เวลาปิด 50 μ s



รูปที่ 7. ลักษณะความหยาบผิวที่ เวลาเปิด 800 μs
เวลาปิด 50 μs

3.4 ปัจจัยประสิทธิภาพต่อความหยาบผิวเฉลี่ยโดยการปรับตั้งเวลาปิด และให้เวลาเปิดคงที่ 50 μs ผลการทดลองดังรูปที่ 8 สามารถสรุปได้ว่าที่เวลาเปิด 50 μs เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเวลาปิดจะส่งผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงของความหยาบผิวเฉลี่ยน้อยมาก โดยลักษณะพื้นผิวที่เกิดจากการกัดเซาะแสดงดังรูปที่ 9



รูปที่ 8. ปัจจัยประสิทธิภาพต่อความหยาบผิวโดยปรับตั้งเวลาปิด

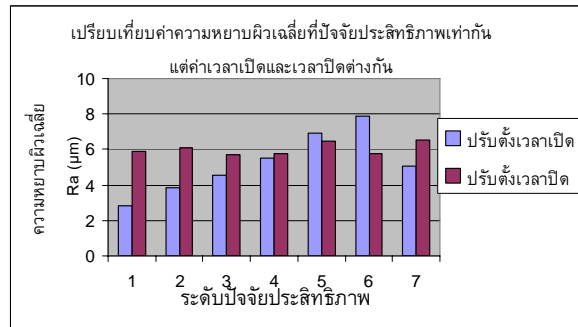


- a. เวลาปิด 4 μs เวลาเปิด 50 μs
- b. เวลาปิด 200 μs เวลาเปิด 50 μs
- c. เวลาปิด 800 μs เวลาเปิด 50 μs

รูปที่ 9. ผิวที่เกิดจากปัจจัยประสิทธิภาพที่ต่างกัน (ขนาดกำลังขยาย 3X)

จากการเปรียบเทียบความหยาบผิวเฉลี่ยที่ปัจจัยประสิทธิภาพต่างกันดังรูปที่ 10 พบว่าปัจจัยประสิทธิภาพที่เกิดจากเวลาเปิดที่สูงมีผลต่อความเรียบ

ผิวมากกว่าปัจจัยประสิทธิภาพที่มีเวลาเปิดต่ำ(เวลาเปิดมีผลต่อความหยาบผิวมากกว่าเวลาปิด)



รูปที่ 10. เปรียบเทียบค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ปัจจัยประสิทธิภาพเท่ากันแต่ค่าเวลาเปิดและเวลาปิดต่างกัน

4. สรุป

จากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าเวลาปิดมีผลต่ออัตราการเจียรเนื้อมากกว่าเวลาเปิด แต่เวลาเปิดมีผลต่อความหยาบผิวมากกว่าเวลาปิด เมื่อปัจจัยประสิทธิภาพและเวลาเปิดสูงขึ้นความหยาบผิวเฉลี่ยจะสูงขึ้นตามระยะเวลาเปิดที่มากขึ้นทำให้อัตราการขจัดเนื้องานและความหยาบผิวเพิ่มจนถึงระดับที่การถ่ายเทประจุก่อให้เกิดความร้อนจนชิ้นงานเกิดการหลอมละลายและเย็นตัวใหม่ (Recast) จะทำให้อัตราการขจัดเนื้อและความหยาบผิวลดลง

1. อัตราการขจัดเนื้องานสูงสุด 9.19 mm^3/min เกิดที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 94 เปอร์เซ็นต์ที่เวลาเปิด 50 μs เวลาปิด 4 μs
2. ความหยาบผิวเฉลี่ยสูงสุด 7.86 μm เกิดที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 80 เปอร์เซ็นต์ที่เวลาเปิด 200 μs เวลาปิด 50 μs
3. ความหยาบผิวเฉลี่ยต่ำสุด 2.83 μm เกิดที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 80 เปอร์เซ็นต์ที่เวลาเปิด 4 μs เวลาปิด 50 μs

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพที่ให้การสนับสนุนด้านเครื่องมือ เครื่องจักรและอุปกรณ์ไว้ ณ ที่นี้ด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] อภิวัฒน์ มุตตามระ อนันต์ เพ็ชรผึ้ง. 2550. การศึกษา การกัดขึ้นรูปโลหะด้วยไฟฟ้าด้วยอิเล็กโตรดหลาย ชนิด. การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรม อุตสาหกรรม, 24-26 ตุลาคม 2550 : 798-801.
- [2] Yusuf, K., Selcuk, H. and Mevlut, K. 2006. An experimental study for determination of the effects of machining parameters on surface roughness in electrical discharge machining (EDM), Springer-Verlag London Limited, 28: 1118–1121
- [3] Salinitis, K., Stournaras A., Stavropoulos, P. And Chryssolouris, G. 2007. Thermal modeling of the material removal rate and surface roughness for die-sinking EDM, Springer-Verlag London Limited. DOI 10.1007/s00170-007-1327-y
- [4] John, K., Vassilis, I., Manolis K. and Stergios, M. 2008. EDM electrode manufacture using rapid tooling: a review, Springer Science+Business Media, 43:2522–2535
- [5] จีรวรรณ คล้อยภยันต์, อภิวัฒน์ มุตตามระ, กานต์ ไม้สุขจิตร์ และพรชนะ ซื่อสุทธิกุล. 2550. การศึกษา ตัวแปรในการกัดวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม ชนิด 316L ด้วยเครื่อง กัดขึ้นงานด้วยไฟฟ้า. การประชุมวิชาการ ช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม, 24-26 ตุลาคม 2550 :802-806.

ปัจจัยประสิทธิภาพที่มีผลต่อความแข็งชิ้นงาน AISI P20 สำหรับกระบวนการกัด เซาะด้วยไฟฟ้า (EDM)

กมลพงศ์ แจ่มกมล* ศิริชัย ต่อสกุล

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

E-mail: kamonpong26@gmail.com*

บทคัดย่อ

การแปรรูปวัสดุด้วยไฟฟ้าเป็นวิธีการหนึ่งในการผลิตแม่พิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความซับซ้อนสูง และวัสดุที่ยากในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการทางกล โดยผลของการขึ้นรูปขึ้นอยู่กับปัจจัยประสิทธิภาพ ที่ทำให้เกิดการขจัดเนื้องาน ปัจจัยประสิทธิภาพ (Duty factor) คือ ช่วงเวลาการถ่ายเทประจุ (เวลาเปิด) ต่อช่วงเวลาหยุดถ่ายเทประจุรวมกับช่วงเวลาการถ่ายเทประจุ (เวลาปิด + เวลาเปิด) [1] ซึ่งมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็งของชิ้นงานสำหรับกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า (EDM) ในการทดลองนี้กำหนดขึ้นทดสอบเป็นเหล็กกล้า AISI P20 ผ่านกระบวนการชุบแข็งมีค่าความแข็ง 59-62 HRC ใช้วัสดุอิเล็กโทรดทองแดงเป็นขั้วบวก ทำการสปาร์คด้วยสารไดอิเล็กทริกไฮโดรคาร์บอน (Shell EDM Fluid 2A) โดยตั้งค่าเวลาปิด 50 μ s ปรับเวลาเปิด 4, 12, 25, 50, 100, 200, 800 μ s และตั้งค่าเวลาเปิด 50 μ s ปรับเวลาปิด 4, 12, 25, 50, 100, 200, 800 μ s เพื่อให้เกิดค่าปัจจัยประสิทธิภาพที่ต่างกัน ผลการศึกษาพบว่าเวลาเปิดมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งมากกว่าเวลาปิด ปัจจัยประสิทธิภาพที่เกิดจากเวลาเปิดมากจะทำให้ค่าความแข็งของชิ้นงานเพิ่มขึ้น (ที่เวลาเปิด 800 μ s ปัจจัยประสิทธิภาพ 94 เปอร์เซ็นต์) 4.76 HRC ส่วนที่ปัจจัยประสิทธิภาพที่ต่ำลงทำให้ค่าความแข็งลดลง แต่ปัจจัยประสิทธิภาพที่สูงซึ่งเกิดจากเวลาปิดน้อยจะทำให้ค่าความแข็งของชิ้นงานลดลง(ที่เวลาปิด 4 μ s ปัจจัยประสิทธิภาพ 92 เปอร์เซ็นต์) -6.17 HRC โดยที่ค่าความ

แข็งจะแปรผันกับอัตราการขจัดเนื้องานหากค่าความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอัตราการขจัดเนื้องานจะมีแนวโน้มลดลง

คำสำคัญ Duty factor/ Hardness/ EDM

1. บทนำ

อุตสาหกรรมผลิตแม่พิมพ์พลาสติก ในปัจจุบันนี้ ได้มีการแปรรูปวัสดุแม่พิมพ์ที่ขึ้นรูปได้ยากด้วยกระบวนการทางกลและชิ้นงานที่มีความซับซ้อนสูง [2] โดยใช้กระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า (Electrical discharge machine, EDM) ซึ่งเป็นกระบวนการที่อาศัยหลักการทางความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าที่ถูกส่งผ่านตัวนำที่เรียกว่า "Tool Electrode" ไปยังชิ้นงาน โดยมีสารละลายกึ่งตัวนำ (Dielectric) [3] ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันการลัดวงจรและระบายความร้อน จึงทำให้ผู้วิจัยมีความสนใจเกี่ยวกับความร้อนที่เกิดจากปัจจัยประสิทธิภาพจะส่งผลต่ออัตราการขจัดเนื้องาน [4] และค่าความแข็งของชิ้นงานเหล็กกล้าเกรด AISI P20

2. วิธีการทดลอง

การทดลองนี้ได้กระทำขึ้นโดยใช้เครื่อง EDM รุ่น Charmill Model 2-LC บนชิ้นงานเหล็กกล้า AISI P20 ผ่านกระบวนการชุบแข็งมีค่าความแข็ง 59-62 HRC วัสดุอิเล็กโทรดตั้งแสดงไว้ในตารางที่ 1 เป็นทองแดงขนาด

เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร กัดหลุมลึก 0.5 มิลลิเมตร ด้วยสารไดอิเล็กทริกไฮโดรคาร์บอน Shell EDM 2A โดยกำหนดตัวแปรคงที่ตามตารางที่ 2 และปรับค่าเวลาเปิด และเวลาปิดเพื่อให้ได้ค่าปัจจัยประสิทธิภาพที่ต่างกันแสดงไว้ในตารางที่ 3 และตารางที่ 4 วัดค่าความแข็งที่ผิวสพาร์คด้วยเครื่องวัดแบบไมโครวิกเกอร์ Matsuzawa รุ่น MMT-X3

ตารางที่ 1. สมบัติของอิเล็กโทรด

Electrode	Thermal conductivity (W/m-K)	Melting point (°C)	Electrical conductivity ($\Omega\text{-m}$) ⁻¹
ทองแดง	398	1,084	6.0×10^7

ตารางที่ 2. ค่าตัวแปรคงที่

ขั้วอิเล็กโทรด	บวก
กระแส (แอมแปร์)	9
ความต่างศักย์ (โวลต์)	250
เวลาแช่ Wt. (sec)	0.5
ระยะยก 2 มม. Jp (sec)	0.67

ตารางที่ 3. ปัจจัยประสิทธิภาพปรับตั้งเวลาเปิด

No.	Time-on (μs)	Time-off (μs)	Duty factor (%)
1	4	50	7
2	12	50	19
3	25	50	33
4	50	50	50
5	100	50	67
6	200	50	80
7	800	50	94

ตารางที่ 4. ปัจจัยประสิทธิภาพปรับตั้งเวลาปิด

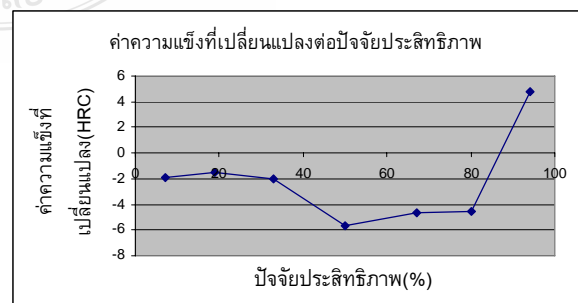
No.	Time-on (μs)	Time-off (μs)	Duty factor (%)
1	50	800	6
2	50	200	20
3	50	100	33
4	50	50	50
5	50	25	67
6	50	12	81
7	50	4	92

หมายเหตุ **

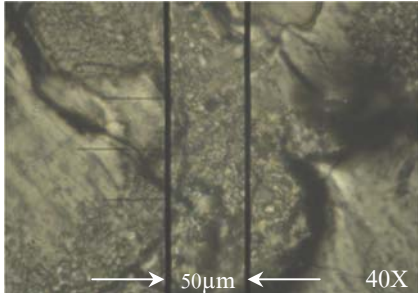
$$**\text{Dutv factor} = \frac{\text{Time-on} \times 100}{\text{Time-on} + \text{Time-off}} (\%)$$

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

3.1 ปัจจัยประสิทธิภาพต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของชิ้นงานโดยการปรับตั้งเวลาเปิด และให้เวลาปิดคงที่ 50 μs ผลการทดลองดังรูปที่ 1 สามารถสรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งหากปัจจัยประสิทธิภาพที่สูง(94%)เกิดจากเวลาเปิดที่มาก (800 μs) จะทำให้ความแข็งของชิ้นงานสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากระยะเวลาในการถ่ายเทประจุเพียงพอที่ทำให้เกิดความร้อนเพียงพอที่จะทำให้โครงสร้างเกิดการเปลี่ยนแปลงและเมื่อหยุดการถ่ายประจุทำให้ชิ้นงานเย็นตัวอย่างรวดเร็วเป็นเหตุให้ชิ้นงานเกิดการผิอุดรูปทำให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น และเมื่อเกิดการผิอุดรูปซ้ำๆ กันทำให้เกิดเป็นรอยแตกร้าวขนาดเล็ก [5] บนผิวชิ้นงานดังรูปที่ 2 .

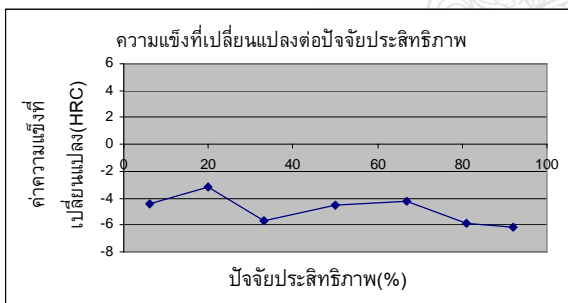


รูปที่ 1. ปัจจัยประสิทธิภาพต่อค่าความแข็งที่เปลี่ยนแปลงโดยปรับตั้งเวลาเปิด

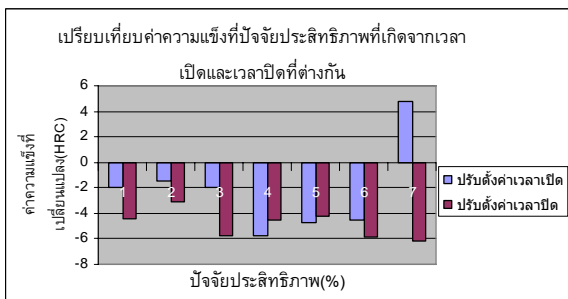


รูปที่ 2. รอยแตกร้าวขนาดเล็กที่เกิดจากเวลาเปิด (ช่วงเวลาการถ่ายภาพประจุ) 800 μs

3.2 ปัจจัยประสิทธิภาพต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของชิ้นงานโดยการปรับตั้งเวลาเปิด และให้เวลาเปิดคงที่ 50 μs ผลการทดลองดังรูปที่ 3 สามารถสรุปได้ว่าปัจจัยประสิทธิภาพที่เกิดจากเวลาเปิดที่ต่ำทำให้เกิดอุณหภูมิที่เกิดจากการถ่ายเทประจุไม่เพียงที่จะทำให้โครงสร้างเกิดการเปลี่ยนแปลงที่ทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้น แต่เพียงพอที่จะทำให้โครงสร้างที่ผิดรูปเนื่องจากการชุบแข็งกลับคืนสู่สภาวะเดิมเป็นเหตุให้ค่าความแข็งลดลง ดังแสดงการเปรียบเทียบไว้ในรูปที่ 4



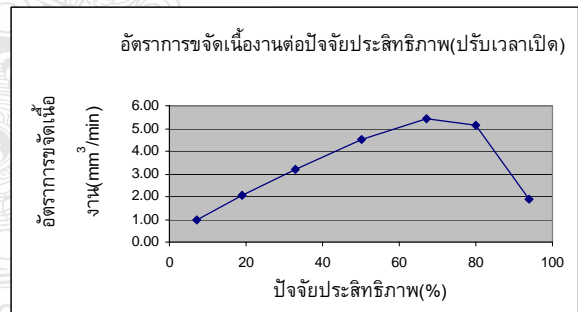
รูปที่ 3. ปัจจัยประสิทธิภาพต่อค่าความแข็งที่เปลี่ยนแปลงโดยปรับตั้งเวลาเปิด



รูปที่ 4. เปรียบเทียบค่าความแข็งที่ปัจจัยประสิทธิภาพเท่ากันแต่ค่าเวลาเปิดและเวลาปิดต่างกัน

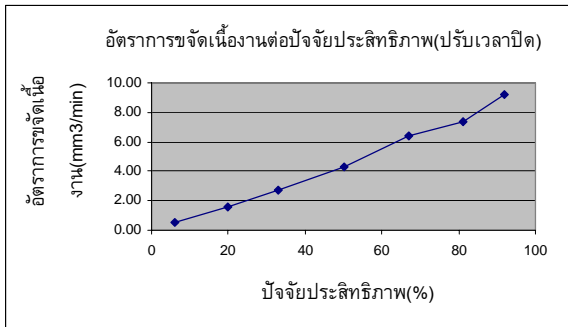
จากรูปที่ 4 การเปรียบเทียบค่าความแข็งที่ปัจจัยประสิทธิภาพเท่ากันแต่ค่าเวลาเปิดและเวลาปิดต่างกันพบว่าเมื่อจ่ายประจุให้เกิดการถ่ายเทจะทำให้เกิดความร้อนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งสองลักษณะคือ หากเวลาเปิดยาวนานเพียงจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างในลักษณะของการชุบแข็ง Hardening และหากเวลาเปิดต่ำจะทำให้โครงสร้างที่ผิดรูปจากกระบวนการชุบแข็งกลับสู่สภาพเดิมที่เรียกว่า Annealing [6,7]

3.3 ปัจจัยประสิทธิภาพต่ออัตราการขจัดเนื้องานโดยการปรับตั้งเวลาเปิดและให้เวลาปิดคงที่ 50 μs ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5 สามารถสรุปได้ว่า อัตราการขจัดเนื้องานสูงขึ้นตามปัจจัยประสิทธิภาพเมื่อถึงระดับ 80 เปอร์เซ็นต์ที่เวลาเปิด 200μs อัตราการขจัดเนื้องานเริ่มลดลงซึ่งเกิดจากการระยะเวลาในการถ่ายเทประจุยาวนานเพียงพอที่ทำให้เกิดความร้อนเพียงพอที่จะทำให้โครงสร้างเกิดการเปลี่ยนแปลงและเกิดการหลอมละลายของชิ้นงานทำให้ความสามารถในการขจัดเนื้องานต่ำลง

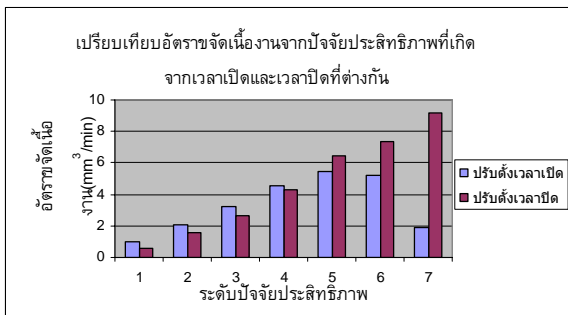


รูปที่ 5. ปัจจัยประสิทธิภาพต่ออัตราการขจัดเนื้องานที่เปลี่ยนแปลงโดยปรับตั้งเวลาเปิด

3.4 ปัจจัยประสิทธิภาพต่ออัตราการขจัดเนื้องานโดยการปรับตั้งเวลาเปิดและให้เวลาเปิดคงที่ 50 μs ผลการทดลองดังรูปที่ 6 สามารถสรุปได้ว่าเวลาเปิดที่ 50 μs เมื่อปัจจัยประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นนั้นหมายถึงเวลาปิดน้อยลงเป็นผลให้ระยะเวลาในการสปาร์คยาวนานขึ้นเป็นผลให้อัตราการขจัดเนื้องานสูงขึ้น เมื่อทำการเปรียบเทียบปัจจัยประสิทธิภาพโดยการปรับเวลาเปิดและเวลาปิดดังรูปที่ 7 พบว่าเมื่อเวลาเปิดต่ำอัตราการขจัดเนื้องานจะสูงขึ้น



รูปที่ 6. ปัจจัยประสิทธิภาพต่ออัตราการขจัดเนื้องานที่เปลี่ยนแปลงโดยปรับตั้งเวลาปิด



รูปที่ 7. เปรียบเทียบอัตราการขจัดเนื้องานจากปัจจัยประสิทธิภาพที่เกิดจากเวลาเปิดและเวลาปิดที่ต่างกัน

4. สรุป

ปัจจัยประสิทธิภาพที่เท่ากันแต่เกิดจากค่าเวลาเปิดเวลาปิดต่างกันส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็งที่ต่างกัน ซึ่งค่าความแข็งจะส่งผลต่ออัตราการกัดเซาะจึงสามารถสรุปได้ดังนี้

1. เวลาเปิดมีผลต่อค่าความแข็งมากกว่าเวลาปิด
2. ที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 94 เปอร์เซ็นต์ เวลาเปิด 800 μ s ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น 4.76
3. ที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 92 เปอร์เซ็นต์ เวลาปิด 4 μ s ค่าความแข็งลดลง 6.17 HRC
4. ค่าความแข็งจะแปรผกผันกับอัตราการขจัดเนื้องานหากค่าความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอัตราการขจัดเนื้องานจะมีแนวโน้มลดลง

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพที่ให้การสนับสนุนด้านเครื่องมือ เครื่องจักรและอุปกรณ์ไว้ ณ ที่นี้ด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Janmanee1, P. and Muttamara, A. 2009. Performance of difference electrode Material in EDM of tungstencarbide. International Conference on Science, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being (STISWB),23-24 July 2009, MahasarakhamUniversity, Thailand
- [2] John, K., Vassilis, I., Manolis K. and Stergios, M. 2008. EDM electrode manufacture using rapid tooling: a review, Springer Science+Business Media, 43:2522–2535
- [3] Bulent, E. Residual stresses and white layer in electric discharge machining (EDM),2007.Elsevier B.V. All rights reserved. doi:10.1016/j.apsusc.2007.05.078
- [4] Salonitis, K., Stournaras A., Stavropoulos, P. And Chryssoulouris, G. 2007. Thermal modeling of the material removal rate and surface roughness for die-sinking EDM, Springer-Verlag London Limited. DOI 10.1007/s00170-007-1327-y
- [5] Janmanee1, P. and Muttamara, A. 2009. Residual stress and micro-crack in electrical discharge machining (EDM) tungsten carbide material, 4th International conference on recent advances in materials, minerals & environment and 2nd asian symposium on materials & processing, 1-3 June 2009, Penang, Malaysia
- [6] George, M.Enos and William E.Fontaine. 1953. Element of Heat Treatment. New York: John wiley & sons
- [7] บัณฑิต ใจชื่น และสุวิทย์ แจ่มทวีกุล. 2527. คู่มือโลหะวิทยาและการชุบโลหะ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ประกอบเมโทร

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – สกุล	นายกลมพงค์ แจ่มกมล
วัน เดือน ปีเกิด	16 มิถุนายน 2526
ที่อยู่	25 หมู่ 2 ต.ท่าโรงช้าง อ.พุนพิน จ.สุราษฎร์ธานี 84130
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม อุตสาหกรรม จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ เมื่อ พ.ศ. 2550
ประวัติการทำงาน	
พ.ศ. 2550 – ปัจจุบัน	ตำแหน่งเจ้าหน้าที่บริหารงานทั่วไป สังกัดคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์

กลมพงค์ แจ่มกมล และคณะ, “การปรับปรุงคุณสมบัติผิวงานเหล็กกล้า AISI P20 โดยการปรับค่าปัจจัยประสิทธิภาพในการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า,” การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม 2009, 21-22 ตุลาคม 2552, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2552. หน้า 888-892.

กลมพงค์ แจ่มกมล และคณะ, “ปัจจัยประสิทธิภาพที่มีผลต่อความแข็งชิ้นงาน AISI P20 สำหรับกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า (EDM),” การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม 2009, 21-22 ตุลาคม 2552, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2552. หน้า 893-896.