

การศึกษาประสิทธิภาพวัสดุอิเล็กโทรดต่างชนิดในการอีดีเอ็มวัสดุทังสเตนคาร์ไบด์

**EFFICIENCY STUDY OF DIFFERENT EDM ELECTRODE MATERIALS
ON TUNGSTEN CARBIDE**

รัตติกอร์ณ เสาร์แดน

RATTIKORN SAODAN



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

พ.ศ. 2554

การศึกษาประสิทธิภาพวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ต่างชนิดในการอีดีเอ็มวัสดุทังสเตนคาร์ไบด์



รัตติกรณ์ เสาร์แดน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

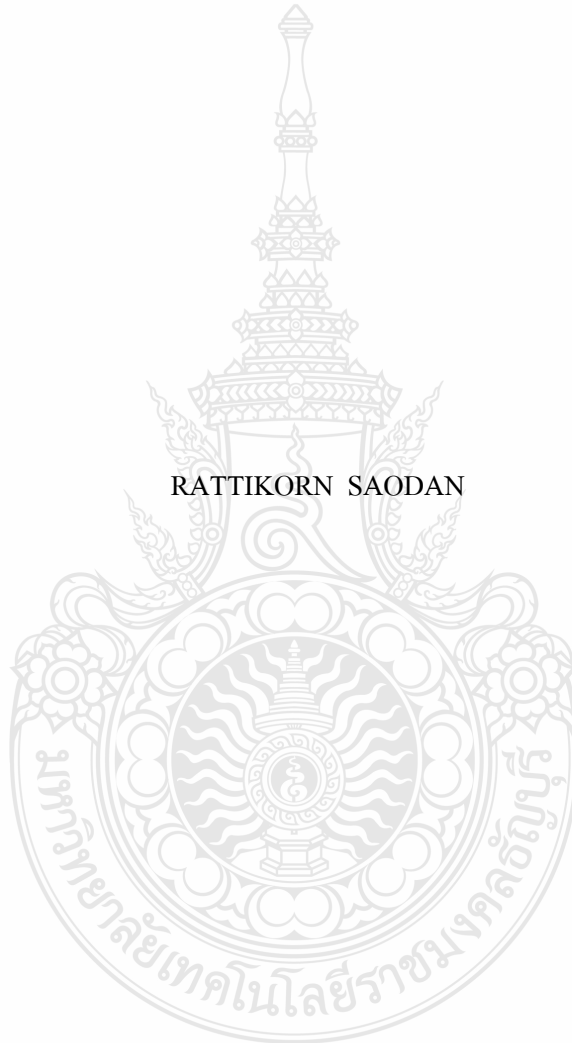
คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

พ.ศ. 2554

**EFFICIENCY STUDY OF DIFFERENT EDM ELECTRODE MATERIALS
ON TUNGSTEN CARBIDE**

RATTIKORN SAODAN



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

2011

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยที่เกิดจากการค้นคว้าและวิจัยขณะที่ข้าพเจ้าศึกษาอยู่ในคณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดังนั้นงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถือ
เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และข้อความต่าง ๆ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
ข้าพเจ้าขอรับรองว่าไม่มีการคัดลอกหรือนำงานวิจัยของผู้อื่นมานำเสนอในชื่อของข้าพเจ้า

นางสาวรัตติกรณ์ เสาร์แดน





ใบรับรองวิทยานิพนธ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาประสิทธิภาพวัสดุอิเล็กโทรดต่างชนิดในการอีดีเอ็มวัสดุทังสเตนคาร์ไบด์ EFFICIENCY STUDY OF DIFFERENT EDM ELECTRODE MATERIALS DURING TUNGSTEN CARBIDE
ชื่อนักศึกษา	นางสาวรัตติกรณ์ เสาร์แดน
รหัสประจำตัว	115270440119-7
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ดร. ศิริชัย ต่อสกุล
วัน เดือน ปี ที่สอบ	6 มีนาคม 2554
สถานที่สอบ	ห้องประชุมเฟื่องทอง ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ดร. สมศักดิ์ อธิธิโสภณกุล)

.....กรรมการ

(ดร. กิตติพงษ์ กิมะพงศ์)

.....กรรมการ

(รศ. บริบูรณ์ เสนาะล้ำ)

.....กรรมการ

(ดร. ศิริชัย ต่อสกุล)

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมหมาย ผิวสอาด)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาประสิทธิภาพวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ในการอัดฉีดวัสดุทั้งสแตนคาร์ไบด์
นักศึกษา	นางสาวรัตติกรณ์ เสาร์แดน
รหัสประจำตัว	115270440119-7
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
ปีการศึกษา	2553
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ดร. ศิริชัย ต่อสกุล

บทคัดย่อ

วัสดุทั้งสแตนคาร์ไบด์จัดเป็นวัสดุหลักสำคัญในการผลิตแม่พิมพ์เนื่องจากมีความแข็งแรงสูง ด้านทานการสึกหรอได้ดี ทั้งนี้จากคุณสมบัติดังกล่าวทำให้วัสดุทั้งสแตนคาร์ไบด์ไม่สามารถแปรรูปได้ง่าย ด้วยกรรมวิธีปกติได้ ดังนั้นวิธีการอัดฉีดจึงเป็นวิธีการหนึ่งที่เหมาะสมสามารถแปรรูปวัสดุทั้งสแตนคาร์ไบด์ได้ดี ซึ่งในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ในการอัดฉีดทั้งสแตนคาร์ไบด์เกรด 90WC-10Co

ในการดำเนินการทดลองใช้วัสดุอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ทองเหลือง ทองแดง กราไฟต์ และเหล็กกล้าไร้สนิม ทำการสปาร์ควัสดุชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์เกรด 90WC-10Co เป็นหลุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มม. ลึก 1 มม. ภายใต้สารไดอิเล็กตริกไฮโดรคาร์บอน (Spark Erosion 102 HF) ด้วยพารามิเตอร์การทดลอง 4 ปัจจัยหลักคือ เวลาเปิด, เวลาปิด, กระแส และขั้วประจุอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ โดยวัดประสิทธิภาพการทำงานของอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์อยู่ในรูปของอัตราการขจัดเนื้องาน และอัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ และวัดผลกระทบของอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ที่มีต่อคุณภาพผิวงานในรูปของความหยาบผิวเฉลี่ย

ผลจากการทดลองพบว่า วัสดุอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ทองแดงให้ผลอัตราการขจัดเนื้องานสูงสุดอยู่ที่ 1.20 มม.³/นาที การที่อิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ทองแดงให้อัตราการขจัดเนื้องานสูงกว่าอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ชนิดอื่น เกิดจากคุณสมบัติค่าการนำไฟฟ้าที่สูง และค่าความต้านทานที่ต่ำ ทำให้กระแสไฟฟ้าที่เป็นต้นกำเนิดพลังงานความร้อนไหลผ่านได้มาก โดยวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 จะให้ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ต่ำสุดอยู่ที่ 1.545 μm สำหรับผลวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ขั้วลบให้ผลการแปรรูปชิ้นงานดีกว่าขั้วบวก นอกจากนี้พารามิเตอร์ที่เหมาะสมสามารถให้ผลค่าความหยาบผิวที่ดีตามไปด้วย

คำสำคัญ : ประสิทธิภาพ/ อิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ / อัดฉีด / ทั้งสแตนคาร์ไบด์

Thesis Title : EFFICIENCY STUDY OF DIFFERENT EDM ELECTRODE MATERIALS ON TUNGSTEN CARBIDE

Student Name : Ms. Rattikorn Saodan

Student ID : 115270440119-7

Degree Award : Master of Engineering

Study Program : Manufacturing Engineering

Academic Year : 2010

Thesis Advisor/s : Dr. Sirichai Torsakul

ABSTRACT

Tungsten carbide is an important tool and die material mainly because of its high hardness, and wear resistant. Due to its properties, it cannot be process easily by conventional machining technique. Hence, electrical discharge machining (EDM) process will open up an opportunity for the machining of tungsten carbide. Which, the objective of this research is to study the efficiency of different EDM electrode materials on tungsten carbide composite material grade 90WC-10Co.

Experiments set up of Cu-Zn40 electrode, Cu electrode, Graphite electrode, and Stainless steel AISI 304, respectively. The experiments were carried out on material composite tungsten carbide grade 90WC-10Co. The conditions of EDM spark on surface workpiece was 1.0 mm of depth and 5.0 mm of diameter electrode. The EDM process sparking under spark erosion 102 (HF) of fluid dielectric hydrocarbon. The experiments conditions was used to conduct with four factor, such as on-time, off-time, discharge current, and electrode polarity. Moreover, it concluded that all factors have significant effect on materials removal rate (MRR), electrode wear ratio (EWR) and surface roughness average (Ra) of the EDM machined surface.

The result show that the graphite electrode give higher than other electrode materials and gives highest materials removal rate is $1.20 \text{ mm}^3/\text{min}$, 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. The negative polarity electrode perform better than positive polarity electrode. Moreover, the result of surface roughness, the stainless steel AISI 304 give better than other electrode materials and gives lowest surface roughness is $1.54 \text{ }\mu\text{m}$. The optimum conditions obtained from the analysis show the combination of parameters that improves surface quality.

Key word : Efficiency / Electrode / EDM/Tungsten carbide

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์เรื่อง การศึกษาประสิทธิภาพวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ชนิดในการอิมเม็มสำเร็จลู่่วงไปได้ด้วยดีจากคณาจารย์ทั้งหลายที่คอยประสิทธิ์ประสาทวิชา และชี้แนะแนวทาง โดยอย่างยิ่ง ดร.ศิริชัย ต่อสกุล อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์หลัก ตลอดจน ดร.สมศักดิ์ อธิธิโสภณกุล และ ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ กรรมการ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ รองศาสตราจารย์ บริบูรณ์ เสนาะล้ำ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ประธานกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ นอกจากนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์พิชัย จันทน์มณี อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่ให้การสนับสนุนด้านงานวิจัย

ท้ายนี้ข้าพเจ้าใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ซึ่งสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้ามาจนสำเร็จการศึกษา

รัตติกรณ์ เสาร์แดน

6 มีนาคม 2554



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 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษา	3
1.5 ข้อยกเว้นการศึกษา	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 แนวความคิด	4
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.3 วรรณกรรมและงานวิจัยที่ผ่านมา	23
2.4 สรุปบท	25
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	26
3.1 วิธีการดำเนินการวิจัย	26
3.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	26
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล	37
4.1 ผลการทดลอง	37
4.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง	46
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	62
5.1 สรุปผลการทดลอง	62
5.2 ข้อเสนอแนะ	64
เอกสารอ้างอิง	65

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก	
ก ข้อมูลการทดลอง	67
ข ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่	76
ประวัติผู้เขียน	89



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติของทองเหลือง	16
2.2 คุณสมบัติของทองแดง	17
2.3 คุณสมบัติของแกรไฟต์	18
2.4 คุณสมบัติของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304	19
2.5 คุณสมบัติของทังสเตนคาร์ไบด์	20
3.1 ตารางการทดลองโดยปรับค่าเวลาเปิด (On-Time) ใช้อิเล็กโตรดทั้ง 4 ชนิด ขั้วบวกและลบ	30
3.2 ค่าตัวแปรคงที่ในการทดลองปรับเวลาเปิดและปรับเวลาปิด	31
3.3 ตารางการทดลองปรับค่าเวลาปิด (Off-Time) ใช้อิเล็กโตรดทั้ง 4 ชนิด ขั้วบวกและลบ	31
4.1 การทดลองโดยปรับค่าเวลาเปิด (On-Time) ใช้อิเล็กโตรดทั้ง 4 ชนิด ขั้วบวกและลบ	37
4.2 ผลการทดลองการปรับค่าเวลาเปิด(On-Time)ของอิเล็กโตรดเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304) ขั้วบวก	38
4.3 ผลการทดลองการปรับค่าเวลาเปิด (On-Time) ของอิเล็กโตรดเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304) ขั้วลบ	38
4.4 ผลการทดลองการปรับค่าเวลาเปิด (On-Time) ของอิเล็กโตรดทองแดงขั้วบวก	39
4.5 ผลการทดลองการปรับค่าเวลาเปิด (On-Time) ของอิเล็กโตรดทองแดงขั้วลบ	39
4.6 ผลการทดลองการปรับค่าเวลาเปิด (On-Time) ของอิเล็กโตรดทองเหลืองขั้วบวก	39
4.7 ผลการทดลองการปรับค่าเวลาเปิด (On-Time) ของอิเล็กโตรดทองเหลืองขั้วลบ	40
4.8 ผลการทดลองการปรับค่าเวลาเปิด (On-Time) ของอิเล็กโตรดกราไฟต์ขั้วบวก	40
4.9 ผลการทดลองการปรับค่าเวลาเปิด (On-Time) ของอิเล็กโตรดกราไฟต์ขั้วลบ	40
4.10 การทดลองโดยปรับค่าเวลาปิด ใช้อิเล็กโตรดทั้ง 4 ชนิด ขั้วบวกและลบ	41
4.11 ผลการทดลองการปรับค่าเวลาปิด(Off-Time)ของอิเล็กโตรดเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304) ขั้วบวก	41
4.12 ผลการทดลองการปรับค่าเวลาปิด (Off-Time) ของอิเล็กโตรดเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304) ขั้วลบ	42
4.13 ผลการทดลองการปรับค่าเวลาปิด (Off-Time) ของอิเล็กโตรดทองแดงขั้วบวก	42
4.14 ผลการทดลองการปรับค่าเวลาปิด (Off-Time) ของอิเล็กโตรดทองแดงขั้วลบ	43
4.15 ผลการทดลองการปรับค่าเวลาปิด (Off-Time) ของอิเล็กโตรดทองเหลืองขั้วบวก	43
4.16 ผลการทดลองการปรับค่าเวลาปิด (Off-Time) ของอิเล็กโตรดทองเหลืองขั้วลบ	43

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.17 ผลการทดลองการปรับค่าเวลาปิด (Off-Time) ของอิเล็กโทรดแกรไฟต์ขั้วบวก	44
4.18 ผลการทดลองการปรับค่าเวลาปิด (Off-Time) ของอิเล็กโทรดแกรไฟต์ขั้วลบ	44
4.19 ผลการวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของอิเล็กโทรดเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304) ขั้วบวกและขั้วลบ	45
4.20 ผลการวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของอิเล็กโทรดทองแดงขั้วบวกและขั้วลบ	45
4.21 ผลการวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของอิเล็กโทรดทองเหลือง ขั้วบวกและขั้วลบ	45
4.22 ผลการวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของอิเล็กโทรดแกรไฟต์ ขั้วบวกและขั้วลบ	46



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การจำแนกนิยามของกระบวนการผลิตตามมาตรฐาน DIN 8580	5
2.2 เครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า	6
2.3 หลักการทำงานเบื้องต้นของเครื่อง EDM	6
2.4 สถานะการสร้าง Gap ในการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า	7
2.5 สถานะการสปาร์คในการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า	8
2.6 สถานะการ Cooling ในการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า	9
2.7 ช่วงระยะเวลาเปิด และปิดเพื่อให้เกิดการถ่ายเทพลัง	9
2.8 ความสัมพันธ์ของเวลาเปิดต่อการเกิดขจัดเนื้องานและการสึกหรอของอิเล็กโตรด	10
2.9 ความสัมพันธ์ของเวลาปิดต่อการเกิดขจัดเนื้องานและการสึกหรอของอิเล็กโตรด	11
2.10 ความสัมพันธ์ของกระแสต่อการเกิดขจัดเนื้องานและการสึกหรอของอิเล็กโตรด	12
2.11 คุณภาพผิวงานที่เกิดจากความถี่ต่ำ	13
2.12 คุณภาพผิวงานที่เกิดจากความถี่ปานกลาง	13
2.13 คุณภาพผิวงานที่เกิดจากความถี่สูง	13
2.14 ลักษณะการทำงานของสารไดอิเล็กตริกเพื่อขยับเศษโลหะ	14
2.15 อนุภาคของเศษโลหะที่หลุดออกมาจากสารไดอิเล็กตริก	14
2.16 ภาพขยายขนาดอนุภาคของเศษโลหะที่หลุดออกมาจากสารไดอิเล็กตริก	14
2.17 วัสดุทั้งสแตนคาร์ไบด์กับการประยุกต์ใช้งาน	15
2.18 การเกิดหลุมและแอ่งที่เกิดจากพลังงานความร้อนจากการสปาร์ค	21
2.19 พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อคุณภาพผิวงาน	22
2.20 การคำนวณค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra)	22
2.21 การคำนวณค่าความหยาบผิวสูงสุด (Ry)	23
2.22 การคำนวณค่าความหยาบผิวเฉลี่ยสิบจุด (Rz)	23
3.1 วิธีการดำเนินโครงการ	27
3.2 การเตรียมชิ้นงานทดสอบทั้งสแตนคาร์ไบด์	28
3.3 กระบวนการเตรียมวัสดุอิเล็กโตรดในการทดลอง	28
3.4 วัสดุอิเล็กโตรดต่างชนิดที่ใช้ในการทดลอง	29
3.5 เครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง รุ่น ARISTECH EDM CNC 430	29
3.6 เครื่องวัดความหยาบผิวหือ Mahr รุ่น SurfTest PS1	30
3.7 เครื่องกัดเซาะโลหะด้วยกระแสไฟฟ้าหือ Aristech รุ่น 3D-CNC EDM	32

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.8	หน้าจอแสดงเวลารวมในการทำงาน (Machining Time)	33
3.9	การจับยึดชิ้นงานและติดตั้งอุปกรณ์วัดระยะตึกหรือของอิเล็กทรอนิกส์	33
3.10	จุดอ้างอิงผิวงานในการสปาร์ค	34
3.11	พิกัดจุดศูนย์ของอิเล็กทรอนิกส์ก่อนการสปาร์ค	34
3.12	การสปาร์คชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์	35
3.13	ค่าการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์ที่อ่านจากนาฬิกาวัดที่พิกัดจุดศูนย์หลังการสปาร์ค	35
3.14	เครื่องวัดความหยาบผิวเฉลี่ยหือ Mahr รุ่น SurfTest PS1	36
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยประสิทธิภาพต่ออัตราการแปรรูปชิ้นงานและ ข้ออิเล็กทรอนิกส์ของการทดลองปรับค่าเวลาเปิด วัสดุอิเล็กทรอนิกส์เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304	47
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยประสิทธิภาพต่ออัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์ ข้ออิเล็กทรอนิกส์ การทดลองปรับค่าเวลาเปิด วัสดุอิเล็กทรอนิกส์เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304	47
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยประสิทธิภาพต่ออัตราการแปรรูปชิ้นงานและ ข้ออิเล็กทรอนิกส์ของการทดลองปรับค่าเวลาเปิด วัสดุอิเล็กทรอนิกส์ทองแดง	48
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยประสิทธิภาพต่ออัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์ และข้ออิเล็กทรอนิกส์ การทดลองปรับค่าเวลาเปิด วัสดุอิเล็กทรอนิกส์ทองแดง	48
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยประสิทธิภาพต่ออัตราการแปรรูปชิ้นงานและ ข้ออิเล็กทรอนิกส์ของการทดลองปรับค่าเวลาเปิด วัสดุอิเล็กทรอนิกส์ทองเหลือง	49
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยประสิทธิภาพต่ออัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์ และข้ออิเล็กทรอนิกส์ การทดลองปรับค่าเวลาเปิด วัสดุอิเล็กทรอนิกส์ทองเหลือง	49
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยประสิทธิภาพต่ออัตราการแปรรูปชิ้นงานและ ข้ออิเล็กทรอนิกส์ของการทดลองปรับค่าเวลาเปิด วัสดุอิเล็กทรอนิกส์กราไฟต์	50
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยประสิทธิภาพต่ออัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์ และข้ออิเล็กทรอนิกส์ การทดลองปรับค่าเวลาเปิด วัสดุอิเล็กทรอนิกส์แกรไฟต์	50
4.9	แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยประสิทธิภาพต่ออัตราการแปรรูป ชิ้นงานและข้ออิเล็กทรอนิกส์ การทดลองปรับค่าเวลาเปิด วัสดุอิเล็กทรอนิกส์ 4 ชนิด	51
4.10	แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยประสิทธิภาพต่ออัตราการสึกหรอ ของอิเล็กทรอนิกส์ ข้ออิเล็กทรอนิกส์ การทดลองปรับค่าเวลาเปิด วัสดุอิเล็กทรอนิกส์ 4 ชนิด	52
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยประสิทธิภาพต่ออัตราการแปรรูปชิ้นงานและ ข้ออิเล็กทรอนิกส์ ของการทดลองปรับค่าเวลาเปิด วัสดุอิเล็กทรอนิกส์เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304	53

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยประสิทธิภาพต่ออัตราการสึกหรอของอเล็ก โตรค และขั้วอเล็ก โตรค การทดลองปรับค่าเวลาปิดวัสดุอเล็ก โตรคเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304	53
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยประสิทธิภาพต่ออัตราการแปรรูปชิ้นงานและขั้วอเล็ก โตรคของการทดลองปรับค่าเวลาปิดวัสดุอเล็ก โตรคทองแดง	54
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยประสิทธิภาพต่ออัตราการสึกหรอของอเล็ก โตรคและขั้วอเล็ก โตรค การทดลองปรับค่าเวลาเปิด วัสดุอเล็ก โตรคทองแดง	54
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยประสิทธิภาพต่ออัตราการแปรรูปชิ้นงานและขั้วอเล็ก โตรคของการทดลองปรับค่าเวลาปิดวัสดุอเล็ก โตรคทองเหลือง	55
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยประสิทธิภาพต่ออัตราการสึกหรอของอเล็ก โตรคและขั้วอเล็ก โตรคการทดลองปรับค่าเวลาปิดวัสดุอเล็ก โตรคทองเหลือง	55
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยประสิทธิภาพต่ออัตราการแปรรูปชิ้นงานและขั้วอเล็ก โตรคของการทดลองปรับค่าเวลาปิด วัสดุอเล็ก โตรคแกรไฟต์	56
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยประสิทธิภาพต่ออัตราการสึกหรอของอเล็ก โตรค และขั้วอเล็ก โตรค การทดลองปรับค่าเวลาเปิด วัสดุอเล็ก โตรคแกรไฟต์	56
4.19 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยประสิทธิภาพ และอัตราการแปรรูปชิ้นงาน (การทดลองปรับค่าเวลาปิด และให้เวลาเปิดคงที่)	57
4.20 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยประสิทธิภาพ และอัตราการสึกหรอของอเล็ก โตรค (การทดลองปรับค่าเวลาปิด และให้เวลาเปิดคงที่)	57
4.21 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยภายใต้ปัจจัยประสิทธิภาพ โดยการปรับค่าเวลาเปิด	58
4.22 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยภายใต้ปัจจัยประสิทธิภาพ โดยการปรับค่าเวลาปิด	59
4.23 ลักษณะผิวงานที่เกิดขึ้นหลังการสปาร์คทั้งสแตนคาร์ไบด์ด้วยอเล็ก โตรคทองเหลือง กำลังขยาย 30 เท่า	59
4.24 ลักษณะผิวงานที่เกิดขึ้นหลังการสปาร์คทั้งสแตนคาร์ไบด์ด้วยอเล็ก โตรคทองแดง กำลังขยาย 30 เท่า	60
4.25 ลักษณะผิวงานที่เกิดขึ้นหลังการสปาร์คทั้งสแตนคาร์ไบด์ด้วยอเล็ก โตรคเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 กำลังขยาย 30 เท่า	60
4.26 ลักษณะผิวงานที่เกิดขึ้นหลังการสปาร์คทั้งสแตนคาร์ไบด์ด้วยอเล็ก โตรคแกรไฟต์ บริสุทธิ์ กำลังขยาย 30 เท่า	61

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การผลิตทางวิศวกรรมในปัจจุบันจะมุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตโดยมีปัจจัยสำคัญที่ว่ามีรูปแบบระบบการผลิตในจำนวนมากๆ หรือที่เรียกว่าการผลิตแบบ “Mass Production” โดยมีหลักเกณฑ์สำคัญอยู่ที่เครื่องมือแม่พิมพ์ต้นแบบ (Mold/Die) ซึ่งผลิตจากวัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษ เช่น ทังสเตนคาร์ไบด์ (WC-Co) ไทเทเนียมคาร์ไบด์ (Ti-C) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) กล่าวคือ จะต้องมีความแข็งสูง (High Hardness) ความแข็งแรงสูง (High Strength) ความต้านทานการสึกหรอสูง (High Wear Resistance) ความต้านทานความร้อนสูง (High Heat Resistance) ทั้งนี้ไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ด้านยานยนต์ แม่พิมพ์ด้านอิเล็กทรอนิกส์ และแม่พิมพ์ทางการแพทย์ เป็นต้น ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยวัสดุเครื่องมือที่มีคุณสมบัติดังที่กล่าวมาทั้งสิ้น สำหรับวัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษมักประสบปัญหาการแปรรูปเนื่องจากกรรมวิธีการแปรรูปทางกล เช่น การกลึง การเจาะ การกัด กระทบทำได้ยาก ดังนั้นจึงต้องใช้กรรมวิธีการแปรรูปที่พิเศษคือ กรรมวิธีการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า หรือกรรมวิธีการอีดีเอ็ม (EDM: Electrical Discharge Machining) [1-2] ในปัจจุบันทังสเตนคาร์ไบด์ (Tungsten Carbide, WC-Co) เป็นวัสดุที่กำลังเป็นที่นิยมสำหรับผู้ประกอบการในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมแม่พิมพ์, อุตสาหกรรมยานยนต์, อุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ และอุตสาหกรรมพลาสติก เป็นต้น การแปรรูปทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า (EDM : Electrical Discharge Machine) เป็นวิธีที่ใช้มากที่สุด เนื่องจากทังสเตนคาร์ไบด์มีความแข็งเกินกว่าที่จะใช้การแปรรูปด้วยวิธีธรรมดาทั่วไปได้ และได้มีการพัฒนาและปรับปรุงเทคนิคต่างๆ ขึ้นมาเพื่อตอบสนองต่อความต้องการที่เกิดขึ้น การตัดสินใจของผู้ประกอบการว่าจะเลือกใช้เทคนิคหรือวิธีการใดมาใช้มาพัฒนาการผลิตของตัวเอง จึงไม่ใช่เรื่องง่าย ซึ่งต้องมีการศึกษาค้นคว้าอย่างถี่ถ้วนก่อนที่จะเลือกใช้ นอกจากนี้วัสดุทังสเตนคาร์ไบด์ เป็นวัสดุที่ทำการแปรรูปด้วยการอีดีเอ็ม (EDM) แล้วมักจะเกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็ก (Micro-cracks) บริเวณพื้นผิวที่ทำการสปาร์ค เนื่องมาจากวัสดุทังสเตนคาร์ไบด์นั้นผลิตขึ้นมาจากกรรมวิธีโลหะผงวิทยา (Powder Metallurgy) โดยใช้ โคบอลต์ (Co) เป็นตัวประสาน (Binder) เวลาที่นำชิ้นงานมาแปรรูป โคบอลต์ ซึ่งมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่า จะหลอมละลายออกไปก่อนเป็นผลให้เกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็กที่พื้นผิวชิ้นงาน หากนำไปใช้เป็นแม่พิมพ์หรือนำไปประยุกต์ใช้กับงานอื่นๆ แล้ว อาจจะทำให้อายุการใช้งานแม่พิมพ์สั้นลง [3] ปัญหาการเกิดรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นนี้อาจมีส่วนเกี่ยวข้องกับวัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโทรด หรือ เงื่อนไขความสัมพันธ์ของค่าตัวแปร โดยทั่วไปแล้วการแปรรูปทังสเตนคาร์ไบด์ ด้วยการอีดีเอ็ม (EDM) มักนิยมใช้อิเล็กโทรดทองแดง-ทังสเตน (Copper Tungsten : Cu-W) เงิน-ทังสเตน (Silver –Tungsten) ทองแดง-แกรไฟต์ (Copper Graphite) แกรไฟต์

(Graphite) รองลงมาเป็นทองแดง (Copper), ทองเหลือง (Brass) และวัสดุอื่นๆ เป็นต้น[10] โดยวัสดุอิเล็กโทรด 3 ชนิดแรก เป็นอิเล็กโทรดที่ใช้กันในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นวัสดุอิเล็กโทรดที่กักพลังงานได้เร็ว ขึ้นรูปได้ง่าย แต่มีราคาสูงมาก ส่วนอิเล็กโทรดทองเหลือง ทองแดง กราไฟต์ และเหล็กกล้าไร้สนิม เป็นวัสดุที่เมื่อนำมาเป็นอิเล็กโทรดแล้ว จะมีอัตราการสึกหรอสูง ซึ่งมีราคาถูกมาก เมื่อเทียบกับวัสดุชนิดอื่นที่กล่าวมา ดังนั้นการพิจารณาถึงประเด็นนี้ทำให้วัสดุอิเล็กโทรดดังกล่าวนี้เป็นที่น่าสนใจมากขึ้น ที่จะนำมาพิจารณาศึกษาเพิ่มเติมในด้านการประยุกต์สำหรับแปรรูปวัสดุทั้งสเตนคาร์ไบด์ ซึ่งสมมุติฐานคาดว่าน่าจะนำไปสู่แก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการแปรรูปได้ และจะเป็นประโยชน์กับภาคอุตสาหกรรมอย่างยิ่งต่อการนำไปประยุกต์กับวัสดุใกล้เคียงอื่นต่อไปได้

ดังนั้นผู้จัดทำจึงได้มีแนวคิดที่จะศึกษาประสิทธิภาพวัสดุอิเล็กโทรดต่างชนิดในการอีดีเอ็มวัสดุทั้งสเตนคาร์ไบด์ โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ อัตราการแปรรูปชิ้นงาน อัตราการสึกหรอ และคุณภาพผิวงาน เพื่อตอบสนองความต้องการของอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ และสามารถที่จะลดต้นทุนด้านราคาในการเลือกใช้วัสดุได้อย่างเหมาะสม ตลอดจนเป็นการส่งเสริมศักยภาพในการพัฒนางานอุตสาหกรรม และสามารถต่อยอดไปสู่ระดับการพัฒนาความเจริญเติบโตในด้านอื่นๆต่อไป

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบผลของวัสดุอิเล็กโทรดต่างชนิด ต่อประสิทธิภาพการแปรรูปวัสดุทั้งสเตนคาร์ไบด์ด้วยเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้าอีดีเอ็ม

1.2.2 เพื่อศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการแปรรูปวัสดุทั้งสเตนคาร์ไบด์โดยกระบวนการอีดีเอ็มด้วยวัสดุอิเล็กโทรดต่างชนิด

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 วัสดุอิเล็กโทรดที่ใช้คือ ทองเหลือง เกรด CuZn40, วัสดุทองแดง 95.95 %, วัสดุแกรไฟต์บริสุทธิ์, และวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด AISI 304 ขนาดความโตเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ความยาว 70 มิลลิเมตร

1.3.2 วัสดุชิ้นงานเป็นทั้งสเตนคาร์ไบด์ เกรด WC 90% , Co 10% ขนาดความโต 25 มิลลิเมตรหนา 5 มิลลิเมตร แปรรูปลึก 1 มิลลิเมตร

1.3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าได้แก่

ก. เวลาเปิด (On-time) คือช่วงเวลาที่เกิดการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า

ข. เวลาปิด (Off-time) คือช่วงเวลาที่หยุดการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า

ค. กระแส (Discharge Current) คืออัตราการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าต่อหน่วยเวลา

ง. ขั้วอิเล็กโทรด (Polarity) คือประจุไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงาน

1.3.4 ประสิทธิภาพการทำงาน โดยการกัดเซาะด้วยวิธีอีดีเอ็มที่ใช้ในการเปรียบเทียบได้แก่

ก. อัตราการขจัดเนื้องาน (MRR : Material Removal Rate)

ข. อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR : Electrode Wear Ratio)

ค. คุณภาพผิวงานในรูปของความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra : Roughness average)

1.3.5 ทำการกัดเซาะอีดีเอ็มชิ้นงานเป็นหลุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ลึก 1 มิลลิเมตร ภายใต้อุปกรณ์ไดอิเล็กตริกที่เป็นสารไฮดรคาร์บอน (Dielectric Shell Fluid 2 A)

1.3.6 การขจัดเศษอนุภาคจากการกระบวนอีดีเอ็มกระทำโดยการฉีดเป่า (Flushing) สารไดอิเล็กตริกจากด้านข้างด้วยแรงดันขนาด 1 kg/cm^2 และอัตราการไหล 12 l/min

1.4 ขั้นตอนการศึกษา

1.4.1 ศึกษาความเหมาะสมในการพิจารณาเลือกชนิดวัสดุอิเล็กโทรดสำหรับการอีดีเอ็ม

1.4.2 ดำเนินการทดลองเบื้องต้นเพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ในการทดลอง

1.4.3 ดำเนินการทดลองเพื่อเก็บค่าประสิทธิภาพการทำงานและคุณภาพผิวงานอยู่ในรูปของ

ก. อัตราการขจัดเนื้องาน (MRR : Material Removal Rate)

ข. อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR : Electrode Wear Ratio)

ค. คุณภาพผิวงานในรูปของความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra : Roughness average)

1.4.4 ดำเนินการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงาน

1.4.5 ดำเนินการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงาน และคุณภาพผิวงานของอิเล็กโทรดต่างชนิดประกอบด้วย วัสดุอิเล็กโทรด 4 ชนิด คือ ทองเหลือง ทองแดง กราไฟต์และเหล็กกล้าไร้สนิม

1.4.6 สรุปผลงานวิทยานิพนธ์

1.5 ข้อยกเว้นของการศึกษา

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานไม่สามารถทำได้โดยตรงจึงจำเป็นต้องเปรียบเทียบภายใต้เงื่อนไขที่ดีที่สุดของแต่ละชนิดวัสดุอิเล็กโทรด

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ทราบถึงผลจากวัสดุอิเล็กโทรดที่มีต่ออัตราการแปรรูปชิ้นงาน, อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด, ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยในการแปรรูปวัสดุทั้งสแตนคาร์ไบด์ด้วยเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า

1.6.2 ทราบถึงเงื่อนไขความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรที่เหมาะสมต่อการแปรรูปวัสดุทั้งสแตนคาร์ไบด์ ด้วยเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า

1.6.3 เป็นแนวทางในการเลือกใช้อิเล็กโทรดได้เหมาะสมกับงาน ตลอดจนได้องค์ความรู้พื้นฐานในการแปรรูปวัสดุทั้งสแตนคาร์ไบด์ ด้วยเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

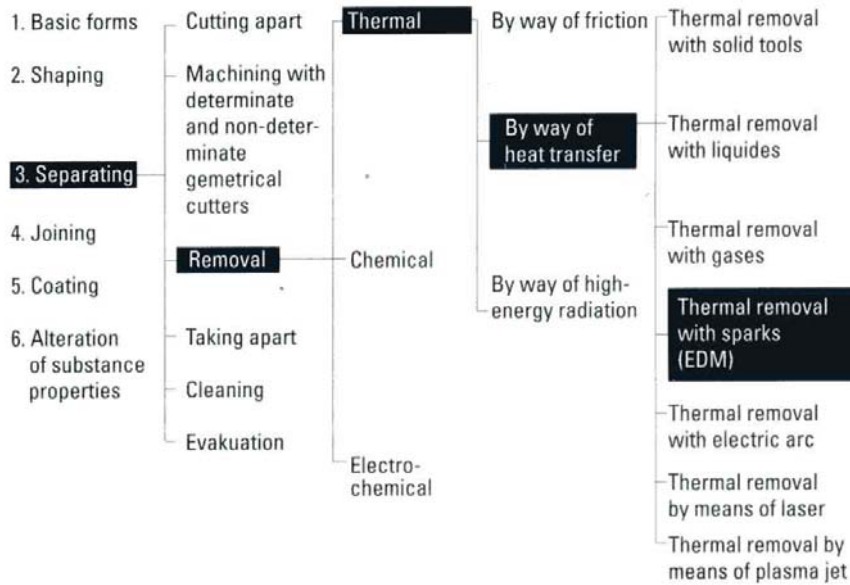
2.1 แนวความคิด

เครื่องอีดีเอ็ม (EDM : Electrical Discharge Machining) ใช้ในงานผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน ที่ทำด้วยวิธีการตัดเฉือนทั่วไปได้ยาก สามารถตัดเฉือนชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งมาแล้ว หรือชิ้นงานที่ยากต่อการแปรรูป รวมไปถึงการผลิตแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก, ผลิตแม่พิมพ์หล่อโลหะ และอื่นๆอีกมาก ที่สำคัญเครื่อง EDM ยังสามารถใช้ขัดผิวชิ้นงาน (Surface Finishing) ในขั้นสุดท้ายได้อีกด้วย ปัจจุบันในงานอุตสาหกรรมนิยมนำวัสดุทั้งสแตนเลสคาร์ไบด์มาแปรรูปเป็นแม่พิมพ์ในงานที่มีกำลังการผลิตสูงและทำงานอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากทั้งสแตนเลสคาร์ไบด์เป็นวัสดุที่มีความแข็งสูง ด้านทานการสึกหรอได้ดี และทนความร้อนได้ในอุณหภูมิสูง จึงทำให้แม่พิมพ์ที่ผลิตจากทั้งสแตนเลสคาร์ไบด์มีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าวัสดุอื่นๆ [11] แต่ข้อเสียของวัสดุทั้งสแตนเลสคาร์ไบด์ คือ มีข้อจำกัดในการแปรรูป กล่าวคือไม่สามารถแปรรูปได้ด้วยกรรมวิธีทางกล ดังนั้นวิธีที่สามารถแปรรูปได้ดี จะต้องผ่านกระบวนการแปรรูปด้วยวิธีพิเศษเรียกว่า “EDM” ผลที่ตามมาความยากง่ายในการพิจารณาเลือกใช้วัสดุอิเล็กโตรดเพราะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติที่เหมาะสมที่สามารถแปรรูปได้ เพราะการแปรรูปทั้งสแตนเลสคาร์ไบด์ส่งผลให้วัสดุอิเล็กโตรดสึกหรอเร็ว หากจะให้ได้ดีต้นทุนอิเล็กโตรดก็มีราคาแพงมาก และนอกจากนี้การเกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็กขึ้นภายในเนื้อวัสดุงานก็เป็นสาเหตุของอายุการใช้งานของแม่พิมพ์สั้นลง เหตุผลดังกล่าวจึงเป็นประเด็นปัญหาดังกล่าวเป็นการสมควรที่จะศึกษาถึงความเหมาะสมของการประยุกต์ใช้วัสดุอิเล็กโตรดในการอีดีเอ็มวัสดุทั้งสแตนเลสคาร์ไบด์ เพื่อการแก้ไขปัญหาในกระบวนการและเพื่อการพัฒนาความก้าวหน้าของอุตสาหกรรมแม่พิมพ์และอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องต่อไป

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

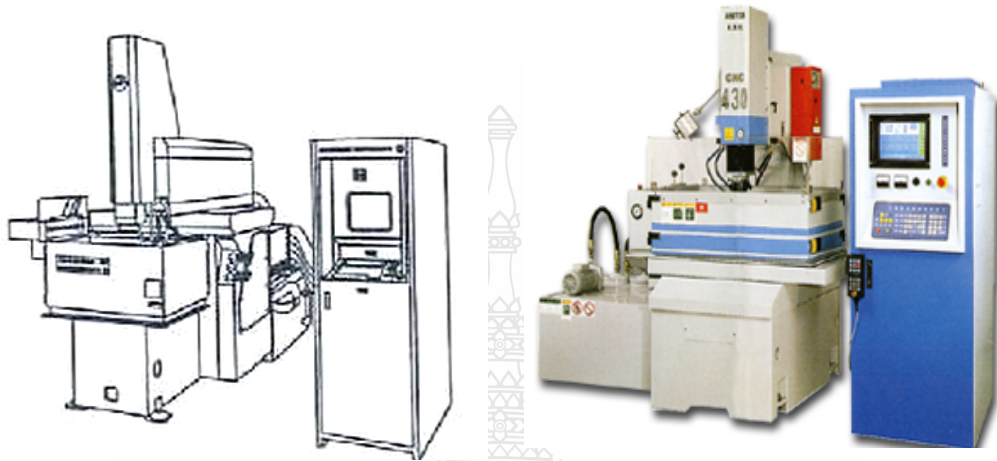
2.2.1 การกัดเซาะด้วยไฟฟ้า (EDM : Electrical Discharge Machining)

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

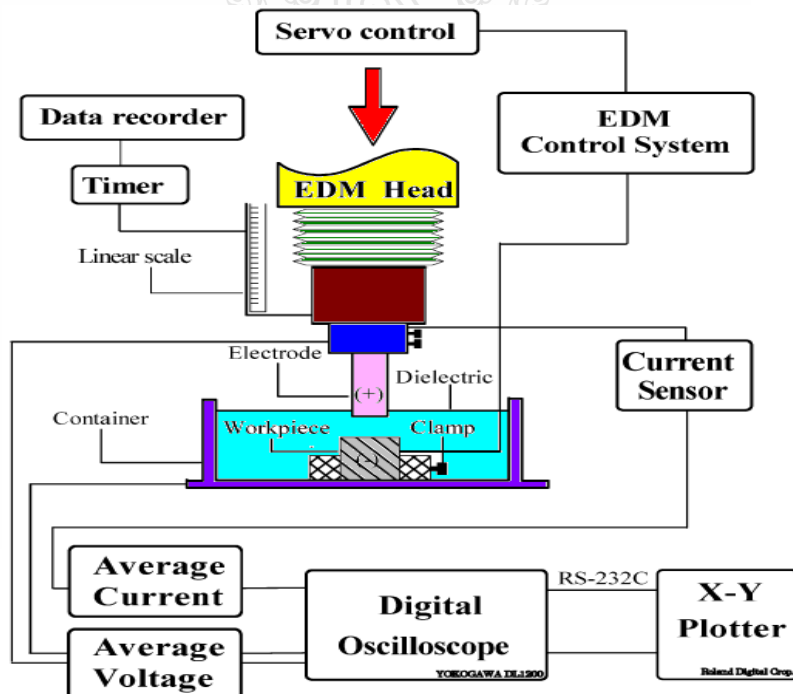


รูปที่ 2.1 การจำแนกนิยามของกระบวนการผลิตตามมาตรฐาน DIN 8580 [1]

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) และได้มีการพัฒนาการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าให้มีความก้าวหน้ามากขึ้นเกิดเป็นเครื่องมือกล [4] นื่องใหม่อย่างเครื่องตัดด้วยลวดโดยการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า (WEDM : Wire Cut Electrical Discharge Machining)



รูปที่ 2.2 เครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า [5]



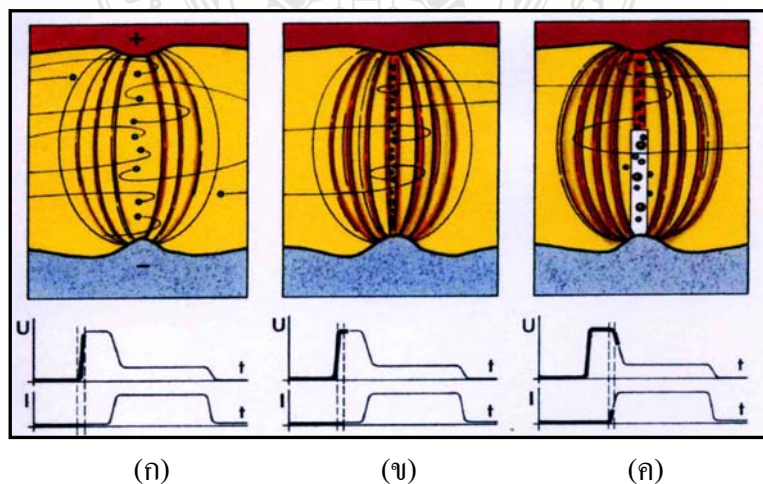
รูปที่ 2.3 หลักการทำงานเบื้องต้นของเครื่อง EDM [6]

2.2.2 หลักการกักเซาะวัสดุด้วยไฟฟ้าหรืออีดีเอ็ม

สำหรับหลักการของกระบวนการกัดโลหะวัสดุด้วยไฟฟ้าหรืออีดีเอ็ม โดยมีหลักการเบื้องต้นดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งสามารถสรุปได้เป็นขั้นตอนย่อยเป็นดังนี้

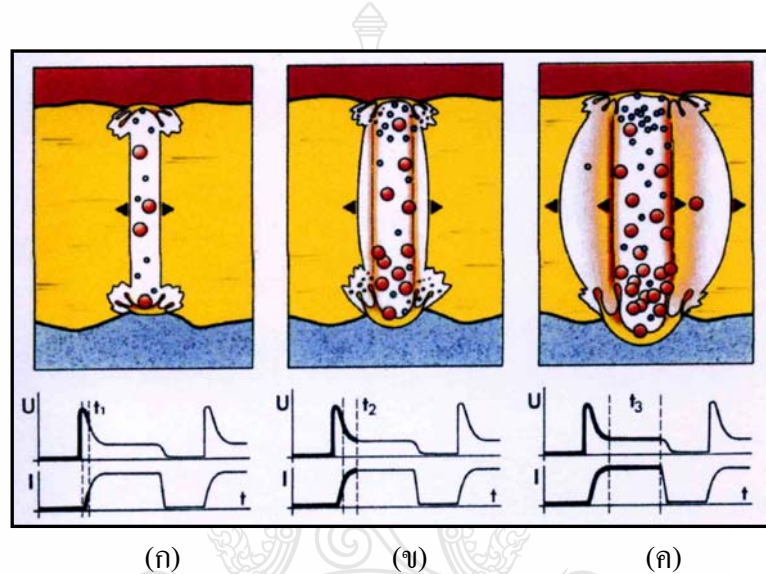
- ก. อิเล็กโตรดเข้าใกล้ชิ้นงาน โดยขั้วไฟฟ้าประจุบวกและประจุลบจะเกิดการถ่ายเทพลังงาน
- ข. เกิดการรวมกันของสนามไฟฟ้าที่บริเวณพื้นที่ว่างระหว่างอิเล็กโตรดและชิ้นงาน
- ค. เกิดการถ่ายเทประจุที่บริเวณพื้นที่ว่างระหว่างอิเล็กโตรดและชิ้นงานเมื่อความต่างศักย์ระหว่างอิเล็กโตรดและชิ้นงานสูงขึ้น จะเกิดการปลดปล่อยพลังงานทำให้เกิดการสปาร์กที่ผิวของชิ้นงาน
- ง. หยุดการสปาร์กทันที ทำให้เกิดแรงระเบิด ซึ่งมีค่ามากเมื่อเทียบกับพื้นที่ในการสปาร์ก
- จ. หลังจากการระเบิดเศษชิ้นงานจะถูกขจัดออกไปโดยแรงเฉื่อยของน้ำมัน หรือของเหลวตัวกลาง (Dielectric Fluid)

การจัดเนื้องานจากกระบวนการกัดเซาะด้วยกระแสไฟฟ้าจะกระทำซ้ำเป็นวัฏจักร โดยเริ่มจากการกำเนิดแรงดันไฟฟ้าสูงสุด โดยไม่เกิดการไหลผ่านของกระแสระหว่างอิเล็กโตรดและผิวชิ้นงานในสารไดอิเล็กตริกดังรูปที่ 2.4 (ก) โดยสถานะเริ่มต้นนี้จะเป็นการสร้างเก็บ สถานะที่สองเป็นสถานะของการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic) เพื่อปกคลุมพื้นผิวบริเวณที่จะกัดกร่อนด้วยแรงดันไฟฟ้าสูงสุดคงที่ โดยที่ไม่มีกระแสไหลผ่านระหว่างอิเล็กโตรดและผิวงานดังรูปที่ 4.2 (ข) สถานะที่สามเป็นสถานะที่เกิดการลดลงของแรงดันไฟฟ้าพร้อมกับเริ่มปล่อยให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านระหว่างอิเล็กโตรดกับผิวงานซึ่งทำให้เกิดเป็นสถานะเริ่มต้นของการสปาร์ก และเมื่อเกิดการสปาร์กจะส่งผลให้เกิดสถานะการเริ่มต้นของการเกิดสูญญากาศตามมาดังรูปที่ 4.2 (ค)



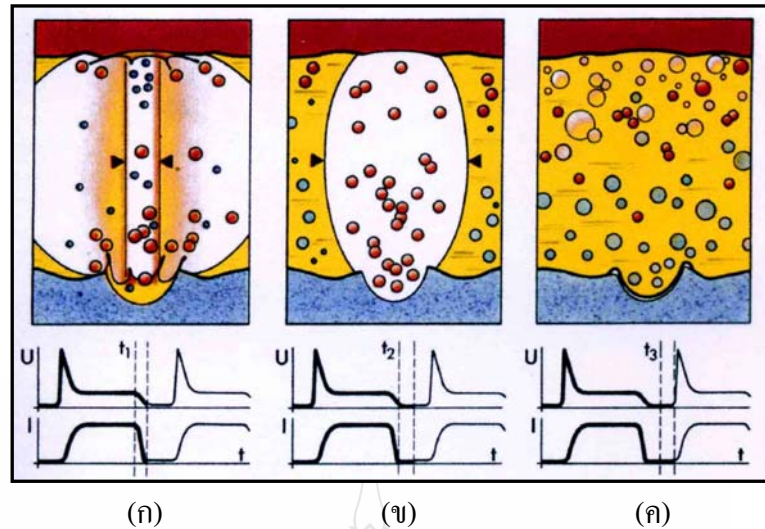
รูปที่ 2.4 สถานะการสร้าง Gap ในการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า [1]

สถานะที่สี่เป็นสถานะที่แรงดันไฟฟ้าสูงสุดลดลงโดยที่กระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดการสปาร์คที่รุนแรง ช่องว่างสุญญากาศเพิ่มมากขึ้นดังรูปที่ 2.5 (ก) สถานะที่ห้าเป็นสถานะของการลดแรงดันไฟฟ้าสูงสุดลดลงต่ำสุด และกระแสเพิ่มขึ้นสูงสุดทำให้ความรุนแรงของการสปาร์คเพิ่มมากขึ้น เป็นเหตุให้เกิดอุณหภูมิที่สูงขึ้นซึ่งส่งผลให้ช่องว่างสุญญากาศขยายตัวมากขึ้นดังรูปที่ 2.5 (ข) สถานะที่หกเป็นสถานะคงที่ของกระแสและแรงดันเพื่อให้อุปกรณ์ทำงาน หากสถานะนี้ยาวนานเกินไปจะทำให้เกิดการหลอมละลายเป็นหลุมขนาดใหญ่และลึก ขณะเดียวกันการเกิดช่องว่างของสุญญากาศก็ขยายตัวสูงสุดที่สถานะนี้ด้วยเช่นกันซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่ 2.5 (ค)



รูปที่ 2.5 สถานะการสปาร์คในการกักเซาะด้วยไฟฟ้า [1]

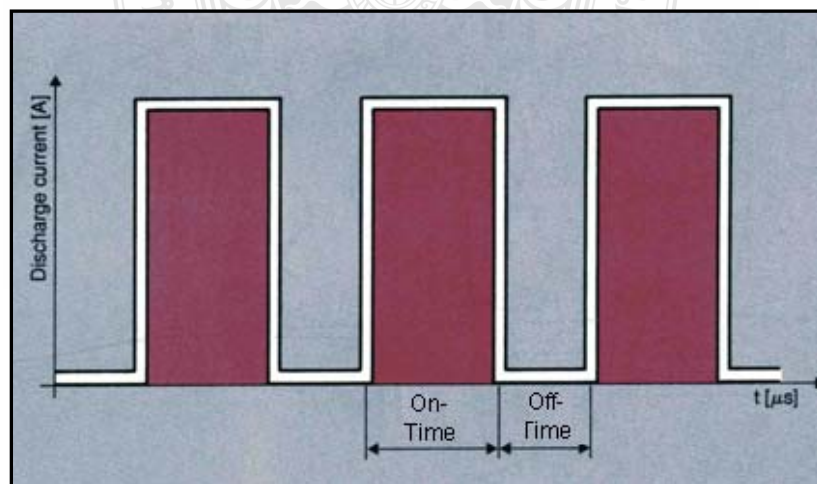
สถานะที่เจ็ดเป็นสถานะของการลดกระแสและแรงดัน สถานะนี้จะทำให้เข้าสู่สถานะสุดท้ายของการสปาร์คช่องว่างสุญญากาศจะเริ่มดึงสารไดอิเล็กทริกที่อยู่โดยรอบเข้ามาจัดเศษเนื้องานที่หลอมเหลวออกและเป็นจุดเริ่มต้นของการหล่อเย็นดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ก) สถานะที่แปดเป็นสถานะที่ไม่มีทั้งกระแสและแรงดันไฟฟ้าทำให้สิ้นสุดของการสปาร์ค ช่องว่างสุญญากาศจะเกิดการหดตัวอย่างรวดเร็วทำสารไดอิเล็กทริกเข้ามาจัดเศษเนื้องานและหล่อเย็นชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ข) สถานะที่เก้าเป็นสถานะสุดท้ายและเป็นสถานะคือกระบวนการปกคลุมพื้นผิวด้วยสารไดอิเล็กทริกก่อนเริ่มต้นวัฏจักรต่อไปดังรูปที่ 2.6 (ค)



รูปที่ 2.6 สถานะการ Cooling ในการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า [1]

จากวัฏจักรการทำงานดังรูปที่ 2.7 ทำให้เกิดความสัมพันธ์ระหว่างเวลาปล่อยประจุกระแสไฟฟ้าที่เรียกว่าเวลาเปิด (On-Time) กับเวลาหยุดจ่ายประจุกระแสไฟฟ้าที่เรียกว่าเวลาปิด (Off-Time) โดยสามารถวัดประสิทธิภาพของการทำงานในหนึ่งวัฏจักร (Duty Cycle) [2] ของการสปาร์กเท่ากับเวลาเปิดต่อเวลารวมในหนึ่งวัฏจักร (Total Cycle Time = On-Time + Off-Time) ดังแสดงในสมการที่ 2.1

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

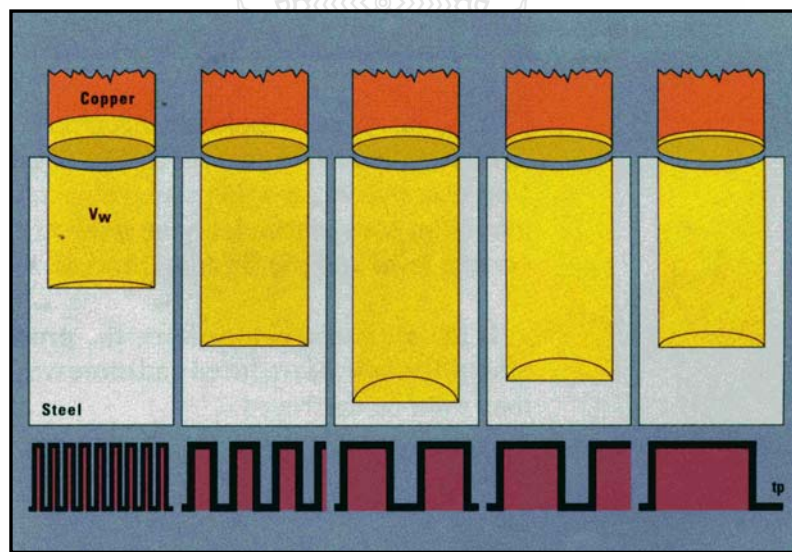


รูปที่ 2.7 ช่วงระยะเวลาเปิด และปิดเพื่อให้เกิดการถ่ายเทประจุ [1]

จากสมการหากลดเวลาปิดเพียงเล็กน้อยจะทำให้ Duty Cycle สูงขึ้นแต่จะมีผลต่อการปรับสภาพแวดล้อมในการสปาร์ก วัสดุอิเล็กโทรด วัสดุชิ้นงาน และสภาพแวดล้อมของสารไดอิเล็กตริกตลอดจนความสามารถในการรักษาสภาพความนำไฟฟ้า และความเสถียรในกระบวนการจัดเนื้องานเป็นอย่างมาก [2]

ก. เวลาเปิด (On-Time)

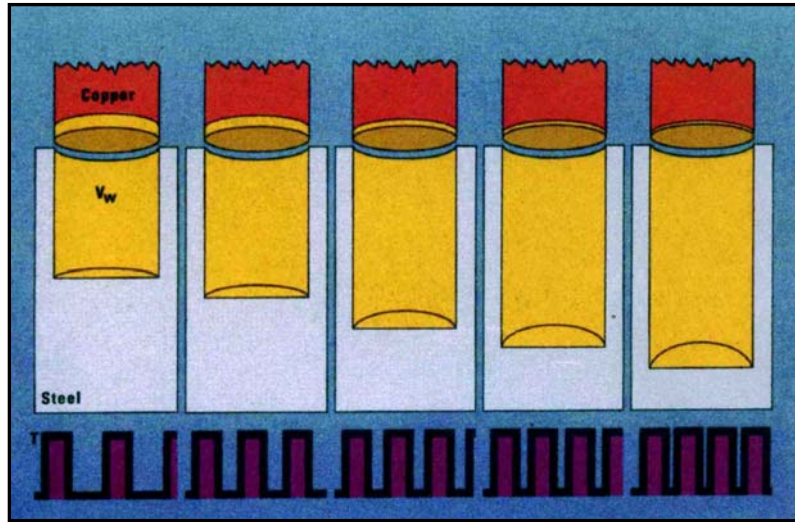
เวลาเปิดคือช่วงเวลาที่เกิดการถ่ายเทประจุของกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดการสปาร์กเป็นเนื่องงาน โดยการสร้างเก็บจากความต้านทานของกระแส และใช้กระแสเป็นตัวกำเนิดพลังงานในการทำให้งานสำเร็จลง ระยะเวลาของการถ่ายเทประจุที่ยาวนานทำให้เกิดการหลอมละลายเป็นหลุมลึกที่มีความกว้างเกิดการหลุดร้อนของอนุภาคเป็นแอ่งขนาดใหญ่ที่มีความลึกมาก จึงส่งผลให้ผิวชิ้นงานมีความหยาบสูงกว่าระยะเวลาการถ่ายเทประจุที่สั้น นอกจากนี้เวลาเปิดที่สูงจะทำให้เกิดการหลอมละลายและแข็งตัวของผิวงานที่เรียกว่า Recasting แต่ในกรณีที่ใช้อิเล็กโทรดเป็นขั้วบวกจะทำให้การสึกหรอของอิเล็กโทรดลดลงเนื่องจากเกิดการเคลือบที่ผิวอิเล็กโทรด [1-2] ดังแสดงระยะเวลาเปิดกับการจัดเนื้องานและการสึกหรอของอิเล็กโทรดในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ของเวลาเปิดต่อการเกิดจัดเนื้องานและการสึกหรอของอิเล็กโทรด [1]

ข. เวลาปิด (Off-Time)

เวลาปิดคือช่วงเวลาที่หยุดพักการถ่ายเทประจุของกระแสไฟฟ้า ซึ่งไม่ทำให้เกิดการจัดเนื้องาน แต่จะทำให้เกิดความเสถียรในกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า เมื่อเวลาปิดมากขึ้นทำให้ความเร็วในการทำงานลดลง แต่จะทำให้เกิดการระบายความร้อน และขจัดเศษอนุภาคที่หลุดออกจากชิ้นงานได้มากขึ้นทำให้เกิดความเสถียรในการรักษาค่าความต้านทานของสารไดอิเล็กตริกซึ่งเป็นสิ่ง



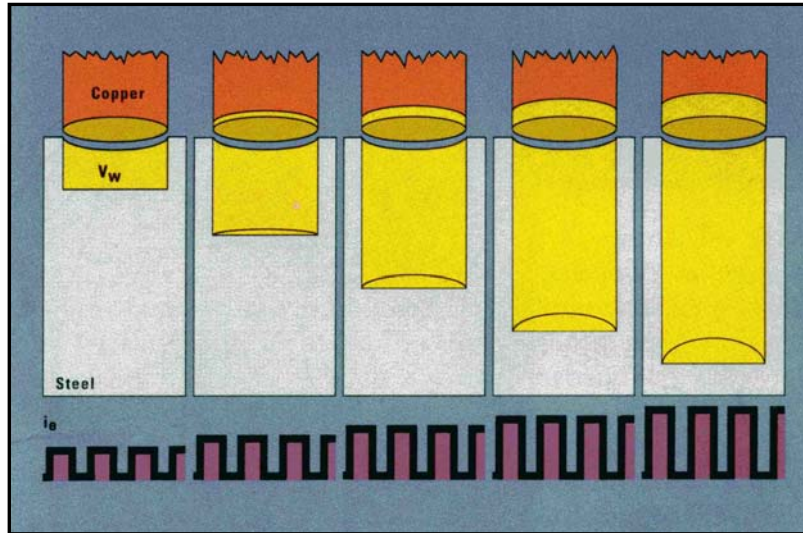
รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ของเวลาปิดต่อการเกิดขจัดเนื้องานและการสึกหรอของอิเล็กโทรด [1]

ก. กระแส (Current)

กระแสไฟฟ้าคือต้นกำเนิดของพลังงานที่ใช้ในการกัดเซาะของเครื่องมือกล 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 ถ้าอิเล็กโทรดพื้นที่หน้าตัด 0.5 ตารางนิ้ว จะต้องใช้กระแสสูงสุดเท่ากับ $0.5 \times 65 = 32.5$ แอมแปร์ อย่างไรก็ตามกฎกระแส 65 แอมแปร์ต่อตารางนิ้ว ก็ไม่สามารถใช้ได้กับอิเล็กโทรดที่มีหน้าตัดมากได้ เนื่องจากความต้านทานของกระแส การกระจายความร้อน และความลึกของการเกิด Recasting บนเนื้อวัสดุ ซึ่งขึ้นอยู่กับความสามารถในการรักษาความความต้านทานของสารไดอิเล็กตริกก่อนเริ่มต้นการสปาร์ค ค่ากระแสที่สูงความถี่เหมาะกับการกัดเซาะผิวที่หยาบเนื่องจากเกิดการกระจายตัวของความร้อนทำให้เกิดการหลอมเหลวเป็นแอ่งขนาดกว้างที่มีความลึกสูงซึ่งส่งผลให้ไม่สามารถควบคุมกระบวนการทางความร้อนในรูปของคลายความเค้น หรือการอบอ่อน



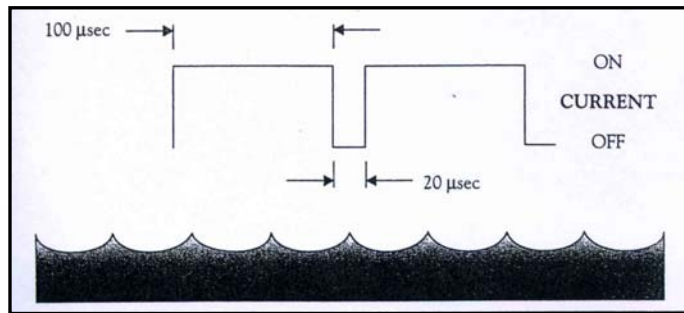
รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ของกระแสต่อการเกิดขจัดเนื้องานและการสึกหรอของอิเล็กโทรด [1]

ง. ความถี่ (Frequency)

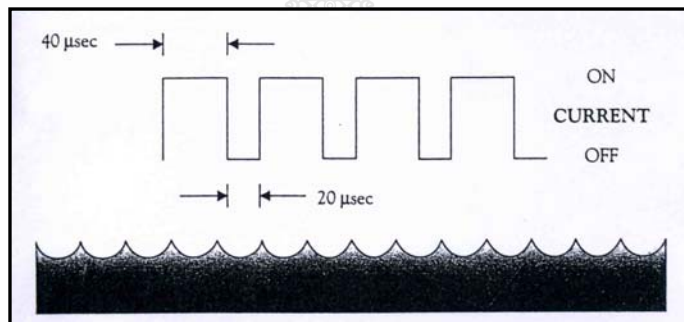
ความถี่เป็นผลที่เกิดมาจากเวลาเปิด และเวลาปิดโดยความถี่แตกต่างจาก Duty Cycle ตรงที่ความถี่คำนวณจากวัฏจักรที่เกิดขึ้นต่อหน่วยเวลา (Second) ดังสมการที่ 2.3 [2] ซึ่งความถี่นี้จะส่งผลโดยตรงต่อความหนาผิวชิ้นงานและการขจัดเนื้อ

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

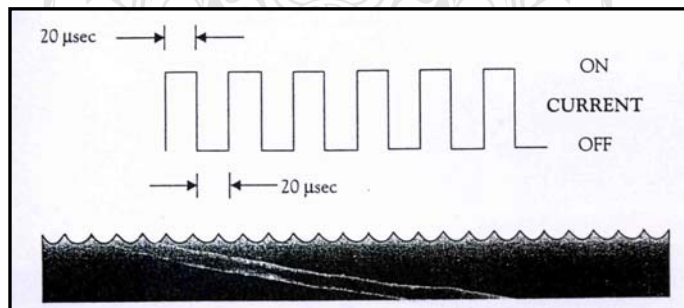
เวลาเปิดสูงเวลาปิดต่ำจะทำให้เกิดค่าความถี่ต่ำ ดังรูปที่ 2.11 ซึ่งจะทำให้ผิวชิ้นงานมีความหนาผิวมาก และมีการขจัดเนื้องานที่สูง เนื่องจากเวลาปล่อยประจุที่ยาวนานทำให้ความร้อนที่เกิดจากการสปาร์กกระจายตัวเป็นแอ่งกว้างและลึก ตลอดจนส่งผลให้เกิดเป็นชั้นการหลอมเหลวและแข็งตัวใหม่ที่เรียกว่า Recasting ที่มีความหนาสูง ซึ่งเป็นเหตุให้บริเวณกระทบที่เกิดจากความร้อน (HAZ : Heat Affected Zone) ลึกลงไปในเนื้องาน หากเวลาปิดลดต่ำลงจะทำให้เกิดความถี่ที่สูงขึ้นดังรูปที่ 2.12 ทำให้เกิดการหลอมละลายของการสปาร์กเป็นแอ่งที่มีความกว้างและความลึกลดลง ซึ่งทำให้ความหนาผิวงานและความเร็วในการขจัดเนื้องานลดต่ำลง แต่อิเล็กโทรดเกิดการสึกหรอเพิ่มขึ้น หากเวลาเปิดลดลงต่ำมากจะทำให้เกิดเป็นความถี่สูงมาก ดังรูปที่ 2.13 ซึ่งจะส่งผลให้ความหนา



รูปที่ 2.11 คุณภาพผิวงานที่เกิดจากความถี่ต่ำ [2]



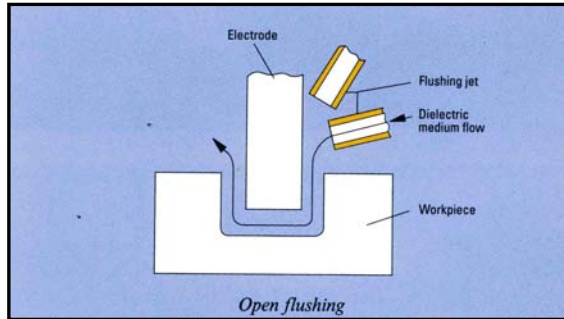
รูปที่ 2.12 คุณภาพผิวงานที่เกิดจากความถี่ปานกลาง [2]



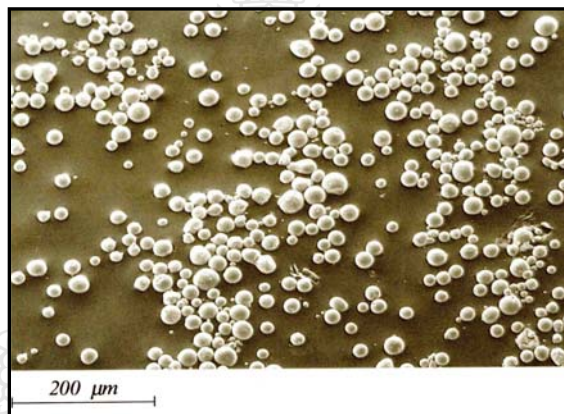
รูปที่ 2.13 คุณภาพผิวงานที่เกิดจากความถี่สูง [2]

จ. สารไดอิเล็กตริก (Dielectric)

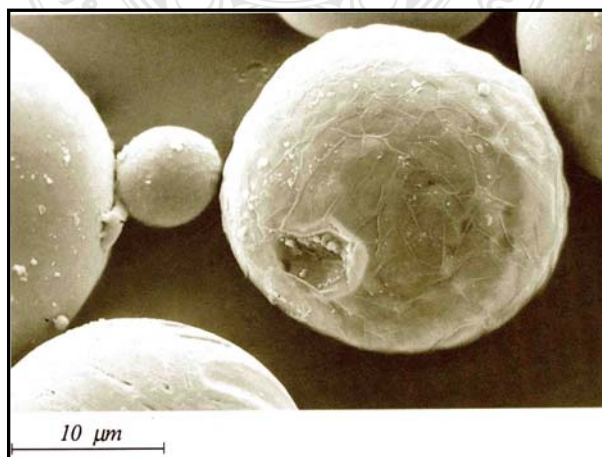
สารไดอิเล็กตริกเป็นของเหลวที่กั้นระหว่างชิ้นงานกับขั้วอิเล็กโทรด สารไดอิเล็กตริกที่นิยมใช้ ได้แก่ น้ำกำจัดไอออนหรือที่เรียกว่าน้ำกลั่น (De - Ionized Water) และสารไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) โดยสารไดอิเล็กตริกทำหน้าที่รักษาสภาพการนำไฟฟ้าและช่วยระบายความร้อน



รูปที่ 2.14 ลักษณะการทำงานของสารไดอิเล็กตริกเพื่อขั้วเศษโลหะ [1]



รูปที่ 2.15 อนุภาคของเศษโลหะที่หลุดออกมาจากสารไดอิเล็กตริก [1]



รูปที่ 2.16 ภาพขยายขนาดอนุภาคของเศษโลหะที่หลุดออกมาจากสารไดอิเล็กตริก [1]

สารไฮโดรคาร์บอนเมื่อสปาร์คจะแตกตัวกลายเป็นไฮโดรเจนซึ่งมีประจุเป็นบวก และคาร์บอนซึ่งมีประจุเป็นลบ [1-2] โดยคาร์บอนจะวิ่งเข้าหาขั้วบวก ถ้าอิเล็กโตรดเป็นขั้วบวก คาร์บอนก็จะวิ่งไปจับอิเล็กโตรด ซึ่งจะช่วยลดการสึกกร่อนของอิเล็กโตรดได้ แต่ถ้าอิเล็กโตรดที่ใช้เป็นลบคาร์บอนจะวิ่งไปจับผิวงานทำให้ผิวชิ้นงานมีลักษณะเป็นสีดำคล้ำ ความแตกต่างระหว่างสารไฮโดรคาร์บอนและน้ำคือ สารไฮโดรคาร์บอนมีค่าความต้านทานสูงกว่าน้ำกลั่น ดังนั้นในกระบวนการกัดโลหะด้วยกระแสไฟฟ้าทั่วไปจึงนิยมใช้สารไฮโดรคาร์บอนเป็นของเหลวตัวกลาง เนื่องจากค่าความต้านทานที่สูงทำให้การถ่ายเทประจุเกิดขึ้นได้ยากจึงเกิด Gap ในการสปาร์คที่ต่ำทำให้ผิวชิ้นงานมีความปราณีตและละเอียดสูง แต่การขจัดเนื้องานจะลดลง เมื่อเทียบกับน้ำกลั่นซึ่งมีความต้านทานน้อยกว่าน้ำมันทำให้การถ่ายเทประจุระหว่างอิเล็กโตรดกับชิ้นงานเกิดขึ้นได้ง่าย Gap ที่เกิดขึ้นในการ สปาร์คจึงมีมากกว่าสารไฮโดรคาร์บอน เป็นผลให้อัตราการขจัดเนื้องานสูงแต่ความปราณีตจะน้อยความหยาบผิวจะสูง

ฉ. วัสดุอิเล็กโตรด (Electrode Materials)

การขึ้นรูปประเภทตัด จะใช้เครื่องมือ เช่น Cutting Tool, End Mill สำหรับตัดขึ้นรูปชิ้นงานส่วนการขึ้นรูปด้วยวิธีการสปาร์คเอง จำเป็นต้องมีเครื่องมือขึ้นรูปด้วยเช่นกัน ซึ่งเรียกเครื่องมือนี้ว่า “อิเล็กโตรด” ตามทฤษฎีแล้ววัสดุที่นำไฟฟ้าได้ดีทุกชนิด สามารถนำมาเป็นอิเล็กโตรดได้ วัสดุที่ดีในการใช้เป็นอิเล็กโตรด ควรจะมีจุดหลอมเหลวสูง และความต้านทานไฟฟ้าต่ำ การทำงานด้วยเครื่อง EDM ค่าใช้จ่ายส่วนใหญ่มักจะตกอยู่กับอิเล็กโตรด ดังนั้นการเลือกใช้อิเล็กโตรดอย่างเหมาะสม จะเป็นผลดีและคุ้มค่ากับการใช้งานเครื่อง EDM อีกด้วย การแปรรูปด้วยเครื่อง EDM อิเล็กโตรดจะมีรูปทรงเหมือนกับผลิตภัณฑ์ และชิ้นงานในการขึ้นรูป แต่จะมีรูปทรงตรงกันข้าม กล่าวคือ ส่วนที่ยื่นออกมาของอิเล็กโตรด จะตรงกับส่วนที่เป็นหลุมลงไปของชิ้นงาน การขึ้นรูปเช่นนี้เรียกว่า “การขึ้นรูปประเภทถ่ายแบบ” วัสดุอิเล็กโตรดที่นิยมใช้ในการขึ้นรูปทั้งสเตนคาร์ไบด์ ได้แก่ ทองแดง-ทั้งสเตน, ทองแดง-แกรไฟต์, แกรไฟต์, ทองเหลือง, ทองแดง, เงิน-ทั้งสเตน, สังกะสีผสม วัสดุแต่ละชนิดมีสมบัติที่แตกต่างกัน จึงทำให้อิเล็กโตรดสามารถสร้างขึ้นจากวัสดุหลายชนิด ตามความเหมาะสมกับวัสดุชิ้นงานที่ทำการสปาร์คและสารไดอิเล็กทริกที่ใช้ โดยสมบัติวัสดุอิเล็กโตรดที่ดีควรมีสมบัติดังนี้คือ ง่ายต่อการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีที่มีค่าใช้จ่ายต่ำ ประสิทธิภาพในการขจัดเนื้อสูง อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดต่ำ สามารถกระจายความร้อนและนำไฟฟ้าได้ดี ที่สำคัญคือต้านทานต่อการผิครูป วัสดุบางชนิดที่มีอัตราการสึกหรอต่ำ แต่ก็ยากที่จะนำมาขึ้นรูปเป็นอิเล็กโตรด[7]

ทองเหลืองและทองแดง เป็นวัสดุที่เมื่อนำมาเป็นอิเล็กโตรดแล้ว จะมีอัตราการสึกกร่อนสูง ส่วนทองแดงและเงินทั้งสเตนเป็นอิเล็กโตรดที่นิยมนำมาแปรรูปโลหะซึ่งถ้ามีการศึกษาเพิ่มเติมในด้านการอิเล็กโตรดดังกล่าวมาแปรรูปทั้งสเตนคาร์ไบด์อาจจะแก้ปัญหที่เกิดขึ้นได้และเป็นประโยชน์กับการศึกษาและภาคอุตสาหกรรมอย่างยิ่ง [8] วัสดุที่นำมาเป็นอิเล็กโตรดในการทดลองสำหรับโครงการฉบับนี้มี คือ ทองเหลือง ทองแดง แกรไฟต์และเหล็กกล้าไร้สนิม ดังตารางที่ 2.1-2.4

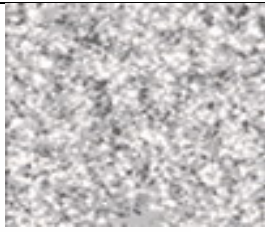
อิเล็กโทรดเหลือง (CuZn40) เป็นโลหะผสมที่มีทองแดงและสังกะสีเป็นส่วนประกอบหลัก ปริมาณของสังกะสีนั้นแปรเปลี่ยนไป ระหว่าง 5 - 45 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ได้ทองเหลืองที่มีคุณสมบัติเฉพาะตัวที่แตกต่างกันไป ทองเหลืองโลหะผสมระหว่างทองแดงกับสังกะสี โดยสังกะสีสามารถละลายในทองแดงให้สารละลายของแข็ง (Solid Solution) ปริมาณของสังกะสีที่ละลายได้สูงถึง 39% และถ้าผสมสังกะสีมาก กว่านี้จะได้สารประกอบเชิงโลหะระหว่างทองแดงกับสังกะสีอีกหลายชนิด ซึ่งมีผลทำให้ความ แข็งแรง ความแข็ง ความเหนียวและคุณสมบัติทนการกัดกร่อนตลอดจนสีของทองเหลือง เปลี่ยนแปลงไป ตามปริมาณของสังกะสีที่ผสม คุณสมบัติเชิงกลของทองเหลืองสังกะสีมีบทบาทสำคัญในการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลของทองเหลือง โดยเพิ่มทั้งความ แข็ง ความเหนียว และความแข็งให้กับทองแดง ในช่วงที่สังกะสีสามารถละลายให้สารละลายของแข็งในทองแดง แต่เมื่อเลยพิกัดการเป็นสารละลายของแข็งไปแล้ว สังกะสีจะให้สารประกอบเชิงโลหะกับทองแดง ซึ่งจะมีความแข็งและเปราะ ในช่วงนี้ความแข็งแรงกับความเหนียว จะค่อยๆลดลงลงจะเพิ่มแต่ความแข็งเท่านั้น คุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของทองเหลือง CuZn40 [8]

คุณสมบัติทางกายภาพ	ทองเหลือง
รูปภาพโครงสร้างจุลภาค	
จุดหลอมเหลว	910 °C
ความแข็ง	93 HRB
ความนำไฟฟ้า	78~85 (I.A.C.S% at 20 °C)
ความหนาแน่น	10.98 g / cm ³
ความต้านทานไฟฟ้า	$8.0 \times 10^{-7} (\Omega - m)^{-1}$

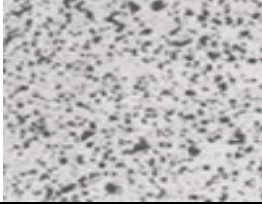
อิเล็กโทรดทองแดงเป็นโลหะชนิดแรกที่ถูกสกัดได้จากสินแร่ ซึ่งแร่ทองแดงจากเกาะไซปรัสในทะเลเมดิเตอร์เรเนียนเป็นแหล่งทำเหมืองทองแดงในสมัยเริ่มแรก ส่วนแร่ทองแดงที่มีอยู่ในประเทศไทยพบที่จังหวัดเลย หนองคาย ขอนแก่น นครราชสีมา ดาก อุดรดิตต์ แพร่ น่าน ลำปาง ลำพูน เพชรบูรณ์ ลพบุรี ฉะเชิงเทรา และกาญจนบุรี แต่ยังไม่มีการผลิตและการพบแร่ทองแดงโดยตรงส่วนใหญ่ก็น้อยมากที่พบก็มีทองแดงที่เป็นส่วนประกอบในปริมาณไม่มาก ซึ่งส่วนใหญ่จะพบอยู่กับสินแร่ทองแดงที่สำคัญคือ แร่คาลโคไพไรต์ (CuFeS₂) หรือในชื่อทองคนโง่ แต่ก็ยังมีชนิดอื่นด้วยเช่นด้วยคิวไพไรต์ (Cu₂O), มาลาไคต์,คาลโคไซต์ (CuFeS₂) และสินแร่อาซูไรต์ ซึ่งอาจพบใน

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของทองแดง 95.95% [7]

คุณสมบัติทางกายภาพ	ทองแดง (Cu)
รูปภาพโครงสร้างจุลภาค	
ความหนาแน่น	8.96 (kg / cm ³)
จุดหลอมเหลว	1084.62 °C
ความต้านทานไฟฟ้า	16.78 (20 °C) (nΩ.m)
การนำไฟฟ้า	1.7241 μΩ - cm (I.A.C.S% at 20 °C)
ความแข็ง HV	369 HV (mpv)

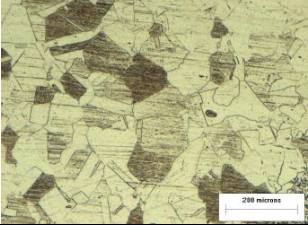
อิเล็คโตรดแกรไฟต์เป็นอีกรูปหนึ่งของธาตุคาร์บอน ชื่อสามัญเรียกว่า พลัมเบโก (Plumbago) หรือแร่ดินสอดำ โดยเป็นตัวนำความร้อนและไฟฟ้าได้ดี มักใช้ทำไส้ดินสอดำ เบ้าหลอมโลหะ น้ำมันหล่อลื่นบางชนิด ใส่ถ่านไฟฉาย ใส่ไฟอาร์ค ใช้เป็นตัวลดความเร็ว ช่วยควบคุมจำนวนอนุภาคนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ได้ อิเล็คโตรดแกรไฟต์ มีอัตราการแปรรูปขึ้นงาน ที่สูงกว่าทองแดง-ทั้งสแตน และอัตราการสึกกร่อนของอิเล็คโตรด อยู่ในระดับต่ำ เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวสูง มีน้ำหนักเบา ทำให้สามารถกัดแม่พิมพ์ที่มีขนาดใหญ่ได้ มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวด้วยความร้อนต่ำ คือ 1/2 ของทองแดง-ทั้งสแตน ซึ่งอาจเป็นผลดีในเรื่องของการลดรอยแตกร้าวขนาดเล็กได้ ข้อเสียคือมีราคาแพง แร่แกรไฟต์ประกอบแร่เรียงตัวเป็นชั้นๆ คาร์บอนมีการจัดเรียงตัวแบบเฮลฟา หรือเป็นรูปผลึก 6 หน้า (Hexagonal) และจัดเรียงตัวแบบเบตาหรือรูปผลึกขนมเปียกปูน (Rhombohedral) โดยมีลักษณะทางกายภาพเหมือนกัน แผ่นแร่รูปผลึก 6 หน้า มีลักษณะบางและไม่แข็ง ผลึกแบบเฮลฟาสามารถเปลี่ยนกลับไปเป็นเบตาได้เมื่อแรงกดดัน และผลึกแบบเบตาสามารถเปลี่ยนกลับเป็นผลึกแบบเฮลฟาเมื่อได้รับความร้อน มากกว่า 1300 องศาเซลเซียส แผ่นแร่แต่ละแผ่นมีความหนาแน่นน้อย แร่แกรไฟต์มีการนำไฟฟ้าเพราะการจัดเรียงตัวของอิเล็คตรอนแต่ละระนาบ โดยอิเล็คตรอนวงนอกสุดสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ จึงสามารถนำไฟฟ้าได้ แต่อย่างไรก็ตามแร่แกรไฟต์นำไฟฟ้าได้ระนาบเดียวเท่านั้น คุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ตารางคุณสมบัติของแกรไฟต์ (Graphite 7.837E-06) [9]

คุณสมบัติทางกายภาพ	แกรไฟต์
รูปภาพโครงสร้างจุลภาค	
จุดหลอมเหลว	3350 °C
ความหนาแน่น	1.81 g/cm ³
ความแข็ง	0.5 (Mohs Scale)
การนำไฟฟ้า	25x10 ⁻⁶ (W.m)
ความต้านทานไฟฟ้า	7.837 μΩm

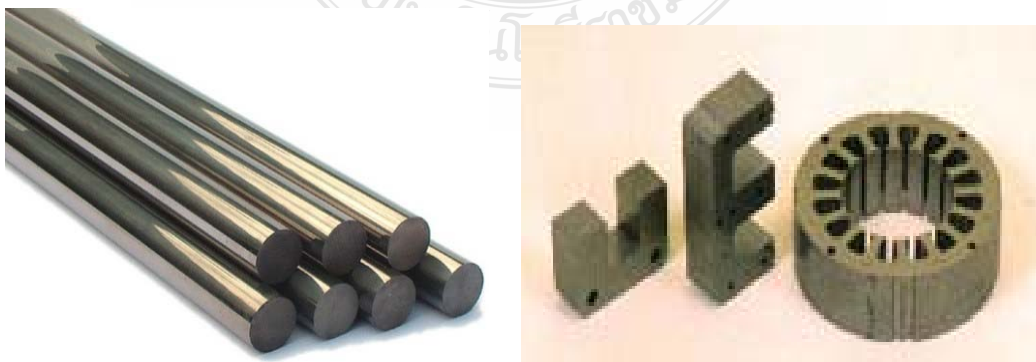
อิเล็กโตรดสแตนเลสหรือ ตามศัพท์บัญญัติเรียกว่า เหล็กกล้าไร้สนิม เป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำ(น้อยกว่า 2%)ของน้ำหนัก มีส่วนผสมของโครเมียม อย่างน้อย 10.5% กำเนิดขึ้นในปี พ.ศ.1903 เมื่อนักวิทยาศาสตร์พบว่า การเติมนิเกิล โมบดินัม ไททาเนียม ไนโอเนียม หรือโลหะอื่นแตกต่างกันไปตามชนิด ของคุณสมบัติเชิงกล และการใช้ลงในเหล็กกล้าธรรมดา ทำให้เหล็กกล้ามีความต้านทานการเกิดสนิมได้ คุณสมบัติทางกายภาพเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุประเภทอื่น ค่าความหนาแน่นสูงของเหล็กกล้าไร้สนิมแตกต่างจากวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างอื่นๆ อย่างเห็นได้ชัด ในส่วนของคุณสมบัติเกี่ยวกับความร้อนความสามารถ ทนความร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิม โดยทั่วไปจะมีส่วนผสมของเหล็ก ประมาณ 70-80% จึงทำให้มีคุณสมบัติของเหล็กที่สำคัญ 2 ประการคือ ความแข็งและความแกร่ง ในตารางที่ 2.4 นี้ เป็นการเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลกับวัสดุชนิดอื่น จะเห็นได้ว่าพลาสติกซึ่งเป็นวัสดุที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางมีความแข็งแรง และโมดูลัส ความยืดหยุ่นต่ำ ส่วนเซรามิกมีความแข็งแรงและความเหนียวสูงแต่มีความแกร่งหรือความสามารถรับ แรงกระแทกโดยไม่แตกหักต่ำ เหล็กกล้าไร้สนิมให้ค่า ที่เป็นกลางของทั้งความแข็ง ความแกร่ง และความเหนียว เนื่องจากมีส่วนผสมของธาตุเหล็กอยู่มาก และจะมีเพิ่มขึ้นอีกในชนิดออสเทนิติก และตารางที่ 3 จะแสดงให้เห็นค่าความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) เหล็กกล้าไร้สนิม ไม่ว่าจะชนิดที่อ่อนตัวง่าย ซึ่งสามารถทำให้ขึ้นรูปเย็นได้ดี เช่น การขึ้นรูปลึก (Deep Drawing) จนถึงชนิดความแข็งแรงสูงสุด ซึ่งได้จากการขึ้นรูปเย็นหรือการทำให้เย็นตัวโดยเร็ว (Quenching) หรือชนิดชุบแข็งแบบตกผลึก (Precipitation Hardening) ซึ่งเหมาะใช้ทำสปริงคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ตารางคุณสมบัติของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 [10]

คุณสมบัติทางกายภาพ	AISI 304
รูปภาพโครงสร้างจุลภาค	
จุดหลอมเหลว	1400 - 1450 °C
ความหนาแน่น	8.00 g/cm ³
ความแข็ง Rockwell B	92
การนำไฟฟ้า	9.8×10^{-5} (W.m)
ความต้านทานไฟฟ้า	0.072×10^{-6} Ω.m

ข. วัสดุชิ้นงาน (Workpiece Materials)

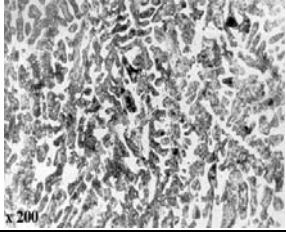
วัสดุที่นำมาแปรรูปด้วยเครื่อง EDM จะต้องเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี ความแข็งของวัสดุไม่ใช่อุปสรรคต่อการแปรรูป โดยเครื่อง EDM สามารถแปรรูปโลหะพวกเหล็กกล้า (Mild steel), เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High Carbon Steel) และเหล็กคาร์ไบด์ได้ ซึ่งในการแปรรูปโลหะเหล่านี้ถือเป็นข้อดีของเครื่อง EDM โดยโครงการฉบับนี้จะใช้ทั้งสแตนคาร์ไบด์เป็นชิ้นงานทดลอง ทั้งสแตน-คาร์ไบด์ เป็น โลหะซีเมนต์คาร์ไบด์ชนิดหนึ่ง ซึ่งซีเมนต์คาร์ไบด์ คือ อนุภาคของคาร์ไบด์ชนิดต่างๆมารวมเข้าด้วยกันโดยวิธีการของโลหะผงวิทยา เช่น ทั้งสแตนคาร์ไบด์ (Wc), ไททาเนียมคาร์ไบด์ (TaC), นีโอเบียมคาร์ไบด์ (NbC) โดยมีโคบอลต์ (Co) เป็นตัวประสาน (Binder) อนุภาคของคาร์ไบด์ มีขนาดเล็กมาก ประมาณ 1-10 μm โดยวัสดุชนิดนี้นิยมใช้ทำแม่พิมพ์และเครื่องตัดทางอุตสาหกรรมดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 วัสดุทั้งสแตนคาร์ไบด์กับการประยุกต์ใช้งาน [3]

ทั้งสแตนคาร์ไบด์ สามารถใช้งานที่ความเร็วตัดสูงกว่าเหล็กกล้ารอบสูงได้ และยังมีความต้านทานการสึกหรอสูงกว่า ทั้งสแตนคาร์ไบด์สามารถนำไปเคลือบผิวได้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องมือตัด ซึ่งสารเคลือบและวิธีการเคลือบจะขึ้นอยู่กับเทคนิคของผู้ผลิตแต่ละราย ทั้งสแตนคาร์ไบด์ เป็นวัสดุที่ทำการแปรรูปยาก มีเพียงเครื่องมือกลในงานผลิตขั้นสูงบางชนิดที่สามารถแปรรูปวัสดุทั้งสแตนคาร์ไบด์ได้ คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุทั้งสแตนคาร์ไบด์ ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ตารางคุณสมบัติของทั้งสแตนคาร์ไบด์ [3]

คุณสมบัติทางกายภาพ	ทั้งสแตนคาร์ไบด์
รูปโครงสร้างจุลภาค	
จุดหลอมเหลว	2800 °C
ความหนาแน่น	15.7 g / cm ³
สัมประสิทธิ์การขยายตัวด้วยความร้อน	5 x 10 ⁻⁶ °C
ความแข็ง	80 HRC
เกรดที่ใช้	WC90% , Co10%

2.2.2 การวัดประสิทธิภาพของกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า (Measuring of Performance in EDM Process)

กระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการกัดกร่อน ซึ่งเป็นเหตุให้เกิดการสึกหรอของอิเล็กโทรด ซึ่งขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของกระบวนการ โดยทั่วไปแล้วจะวัดความสามารถในการกัดเซาะเนื่องอยู่ในรูปของอัตราการขจัดเนื้องาน และวัดการสึกกร่อนของอิเล็กโทรดอยู่ในรูปของอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด ตลอดจนวัดประสิทธิภาพการทำงานที่มีผลต่อวัสดุชิ้นงานอยู่ในรูปของคุณภาพผิวงาน (Surface Quality) โดยส่วนใหญ่จะวัดอยู่ในรูปของความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) นอกจากนี้แล้วความร้อนที่เกิดขึ้นยังส่งผลกระทบต่อผิวชิ้นงาน ซึ่งวัดได้จากการเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็งผิวงาน (Hardness)

ก. อัตราการขจัดเนื้องาน (MRR : Materials Removal Rate)

การขึ้นรูปด้วยวิธีกัดกร่อนด้วยไฟฟ้า อัตราการขจัดเนื้องานจะต่ำมากเมื่อเทียบกับวิธีการอื่นๆ เช่น การตัด การกัดและการกลึง ในการใช้เงื่อนไขที่การขึ้นรูปดำเนินไปอย่างช้าๆ นั้นทำให้อัตราการขจัดเนื้องานต่ำ แต่ถ้าปรับใช้เงื่อนไขที่ทำให้อัตราการขจัดเนื้องานสูงอาจทำให้ค่าความหยาบผิวสูงขึ้น อัตราการขจัดเนื้องานจะมีหน่วยเป็นปริมาตรของเนื้อวัสดุที่ถูกขจัดออกไปต่อหน่วยเวลาดังสมการที่ 2.4

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

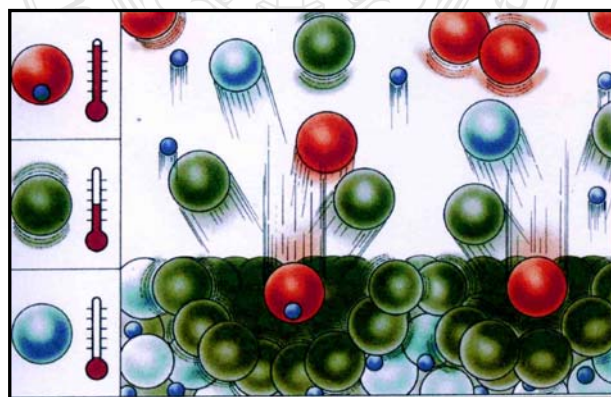
ข. อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR : Electrode Wear Ratio)

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

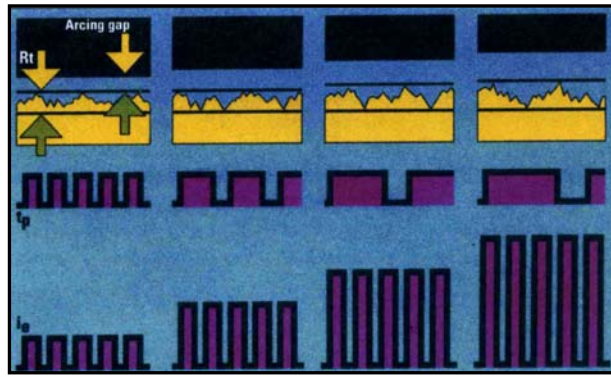
$$\text{อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR)} = \frac{\text{ปริมาณความลึกที่บนชิ้นงานที่แท้จริง (mm)} \times 100}{\text{ระยะที่อิเล็กโทรดสึกกร่อนออกไป (mm)}} \quad (2.5)$$

ค. คุณภาพผิวงานในรูปของความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra : Roughness average)

ความหยาบผิวงานในกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าเกิดจากกระแส และระยะเวลาเปิดที่ทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานทำให้เกิดความร้อนจนเกิดการหลอมหรือเป็นอนุภาคขนาดเล็กออกจากผิวงานดังรูปที่ 2.18 เมื่ออนุภาคหลุดออกจากชิ้นงานจะเกิดเป็นแอ่งขึ้นบนผิวงาน ความลึกและความกว้างของแอ่งที่เกิดขึ้นมากน้อยเพียงใดก็ขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการสปาร์คดังรูปที่ 2.19 เมื่อเสร็จสิ้นแล้วความกว้างและความลึกของแอ่งที่หลงเหลือจะกลายเป็นลักษณะของผิวงาน



รูปที่ 2.18 การเกิดหลุมและแอ่งที่เกิดจากพลังงานความร้อนจากการสปาร์ค [1]



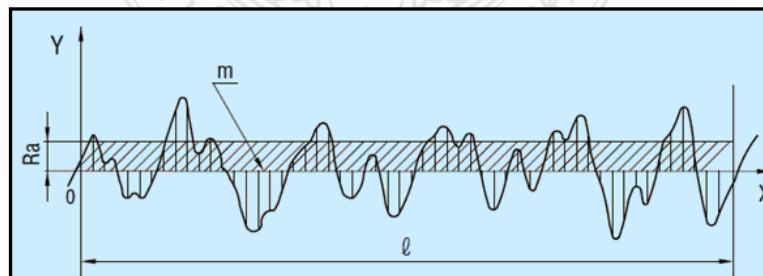
รูปที่ 2.19 พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อคุณภาพผิวงาน [1]

ความหยาบผิวสามารถวัดหรืออ่านค่าได้จากหลายรูปแบบไม่ว่าจะเป็น การอ่านค่าเฉลี่ยของความหยาบผิว (R_a) การอ่านค่าของจุดสูงสุดถึงจุดต่ำสุดของความหยาบผิว (R_y) ตลอดจนการอ่านค่าเฉลี่ยของจุดสูงสุดถึงจุดต่ำสุด (R_q) ค่าความหยาบในแต่ละลักษณะขึ้นอยู่กับข้อกำหนดในการใช้งาน โดยส่วนใหญ่มักนิยามกำหนดเป็นค่าความหยาบผิวเฉลี่ย การอ่านค่าความหยาบผิวมีที่มาจากการคำนวณที่ต่างๆ กันคือ[11]

1. ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a : Arithmetical Mean Roughness)

ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยหมายถึง ค่าเฉลี่ยจากการคำนวณค่ากลางระหว่างจุดยอดและจุดก้นแอ่ง เพื่อกำหนดเส้นกึ่งกลาง (Mean) แล้วนำค่าที่ห่างจากเส้นกึ่งกลางด้านบนมาหักล้างกับค่าที่ห่างจากเส้นกึ่งกลางด้านล่างเทียบกับระยะทาง ดังแสดงในรูปที่ 2.20 ซึ่งสามารถเขียนสมการในการคำนวณได้ดังสมการที่ 2.6

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

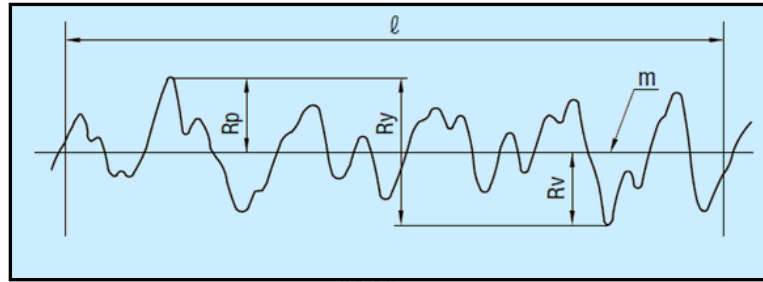


รูปที่ 2.20 การคำนวณค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a) [11]

2. ค่าความหยาบผิวสูงสุด (Ry : Maximum Peak)

ค่าความหยาบผิวสูงสุดหมายถึงความต่างสูงสุดระหว่างจุดต่ำสุดถึงจุดสูงสุดดังรูปที่ 2.21 โดยคำนวณค่า Ry จากค่าสูงสุดจากเส้นกึ่งกลาง รวมกับค่าต่ำสุดของจุดกันเองที่ลึกที่สุดดังสมการที่ 2.7

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

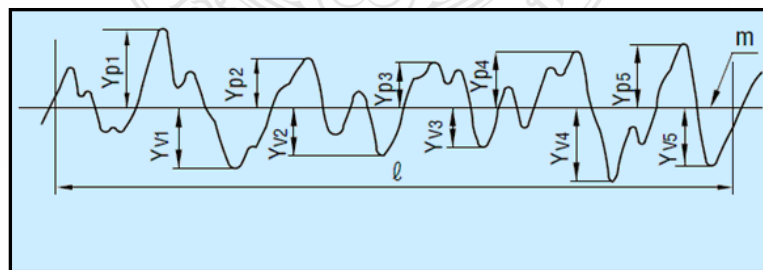


รูปที่ 2.21 การคำนวณค่าความหยาบผิวสูงสุด (Ry) [11]

3. ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยสิบจุด (Rz : Ten-point Mean Roughness)

ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยสิบจุด หมายถึงค่าส่วนต่างสูงสุดจากเส้นกึ่งกลางทางด้านบน 5 ตำแหน่ง และส่วนต่างจากจุดต่ำสุดถึงเส้นกึ่งกลาง 5 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 2.22 [11] โดยคำนวณค่า Rz จากค่าสูงสุดจากเส้นกึ่งกลางจำนวน 5 ตำแหน่งรวมกับค่าต่ำสุดของจุดกันเองที่ลึกที่สุดอีก 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 2.22 การคำนวณค่าความหยาบผิวเฉลี่ยสิบจุด (Rz) [11]

2.3 วรรณกรรมและงานวิจัยที่ผ่านมา

R.A.Mahdavinejad และ A.Mahdavinejad [12] ทำศึกษาการแปรรูปวัสดุด้วย EDM สำหรับ ทั้งสแตนคาร์ไบด์ ใช้ทองแดงเป็นวัสดุอิเล็กโทรด โดยศึกษาผลกระทบจากชิ้นงานทดสอบด้วย ทั้งสแตนคาร์ไบด์ 4 เกรด ที่มีผลต่อการแปรรูป, อัตราการแปรรูปชิ้นงาน และอัตราการสึกกร่อนของ อิเล็กโทรด อาศัยเทคนิคทางสถิติเพื่อวิเคราะห์แนวโน้มของผลกระทบจากปัจจัยหลัก แล้วนำไป กำหนดค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแปรรูป ของเครื่อง EDM ผลการ ทดลองพบว่าอัตราการแปรรูปค่ามากเป็นผลมาจากส่วนผสมทั้งสแตนและปริมาณ โคนบอลด์ค่ามาก เพราะปัจจัยสำคัญอัตราการกัดเนื้อเป็นจากการหลอมละลายของสารจับยึดคือโคบอลต์

S.H.Lee และ X.P.Li [6] ได้เสนอแนวคิดว่า การแปรรูป ทั้งสแตนคาร์ไบด์ ด้วย EDM จะทำให้ มีค่าความแข็งมากขึ้น โดยมีสมมติฐานว่า การแปรรูปชิ้นงาน โลหะด้วยเครื่อง EDM จะเกิด กระบวนการพัฒนาและปรับปรุงคุณสมบัติที่พื้นผิวของชิ้นงาน ซึ่งจะส่งผลต่อความแข็ง อิเล็กโทรด คือ ทองแดง-ทั้งสแตน ผลที่ได้รับคือ การแปรรูปด้วยเครื่อง EDM ไม่ทำให้ความแข็งของทั้งสแตนคาร์ ไบด์เปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด รวมทั้งยังมีรอยแตกร้าวขนาดเล็ก เกิดขึ้นบริเวณผิวที่ทำการสปาร์กด้วย อย่างไรก็ตามรอยแตกนี้จะมีมากน้อยขึ้นอยู่กับสภาพเงื่อนไขต่างๆ ของ EDM

สุชาติ มั่นหมาย และ อนวัช เครือจันทร์ [9] ทำศึกษาการแปรรูปด้วย EDM โดยใช้อิเล็กโทรด แกรไฟต์เกรด HK-1 ทำการหาเงื่อนไขหรือสภาพการสปาร์กที่ดีที่สุด เพื่อศึกษาหาอัตราการแปรรูป ชิ้นงาน และอัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโทรด จากตัวแปรกระแสไฟฟ้า ระยะเวลาการปล่อย กระแสไฟฟ้า และความลึกในการขึ้นรูป สรุปได้ว่า ระยะเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า จะมีอิทธิพล มากกว่ากระแสไฟฟ้า

Kuang-Yuan-Kung และคณะ [13] ได้ทำการศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ ระหว่าง อิเล็กโทรดแกรไฟต์ ที่ต่างกัน 2 เกรด คือ PocoAF5 และ PocoEDM3 โดยดูผลจาก อัตราการแปรรูป ชิ้นงาน (MRR) และอัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโทรด (Electrode Wear) พบว่าอิเล็กโทรดทั้ง 2 ชนิด ให้ผลและข้อได้เปรียบ, เสียเปรียบที่แตกต่างกัน โดย PocoAF5 จะมีอัตราการแปรรูปชิ้นงาน (MRR) ที่ดีกว่า แต่ในทางกลับกัน PocoEDM3 จะมีอัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโทรด (Electrode Wear) ที่ต่ำ กว่า โดยในการทดลอง การเพิ่มกระแสไฟฟ้าจะทำให้อัตราการแปรรูปชิ้นงาน (MRR) เพิ่มขึ้น และ การเพิ่มระยะเวลาการปล่อยกระแสไฟฟ้าจะทำให้อัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโทรด (Electrode Wear) ลดลง

อภิวัฒน์ มุตตามระ และ อนันต์ เพ็ชรผึ้ง [8] ทำการศึกษาการกัดขึ้นรูปโลหะด้วยไฟฟ้าด้วย อิเล็กโทรดหลายชนิด ได้แก่ ทองแดง ทองเหลือง และกราไฟต์ โดยมีค่าตัวแปรที่สนใจคือ ขั้วของ อิเล็กโทรด ค่ากระแสไฟฟ้า เวลาเปิด และ ค่าปัจจัยประสิทธิภาพ ปัจจัยเหล่านี้เป็นตัวกำหนดอัตราการ ขจัดเนื้องาน ค่าอัตราการสึกของอิเล็กโทรดและคุณภาพของผิวชิ้นงาน ผลการทดลองพบว่าค่าปัจจัยที่

เหมาะสมขึ้นอยู่กับชนิดของอิเล็กโทรด ประสิทธิภาพการกัดจะดีเมื่ออิเล็กโทรดทองแดงเป็นขั้วบวก ส่วนอิเล็กโทรดทองเหลืองและกราไฟท์จะให้ประสิทธิภาพดีกว่าเมื่อเป็นขั้วลบ อิเล็กโทรดทองเหลืองให้อัตราการขจัดเนื้องานสูงที่สุด

อภิวัฒน์ มุตตามระ และ ณัฐคนัย ชื่อดตระกูล [3] ผลกระทบของอิเล็กโทรด ต่อรอยแตกร้าวขนาดเล็กในทั้งสแตนคาร์ไบด์ด้วยเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า โดยใช้อิเล็กโทรด 3 ชนิด ได้แก่ แกรไฟท์ เกรด POCO EDM-3 ทองแดง-แกรไฟท์ เกรด POCO EDM-C3 และทองแดง-ทั้งสแตนเกรด CTR 08375 โดยให้ข้อสรุปว่า อิเล็กโทรดแกรไฟท์เป็นอิเล็กโทรดที่ให้อัตราการแปรรูปงานชิ้นงานสูงที่สุด และมีความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่ต่ำที่สุด กระแสไฟฟ้าที่ลดลงสามารถลดขนาดของรอยแตกร้าวขนาดเล็กได้

2.4 สรุปบท

จากการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องแล้วสามารถที่จะสรุปได้ว่า กระบวนการแปรรูปทั้งสแตนคาร์ไบด์ด้วยเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้านั้นเป็นวิธีที่นิยมและรวดเร็วมากที่สุดที่จะทำการแปรรูปทั้งสแตนคาร์ไบด์เมื่อเทียบกับกรรมวิธีอื่น ทั้งนี้ทั้งนั้นการพิจารณาเลือกวัสดุให้เหมาะสมก็เป็นสิ่งสำคัญต่อประสิทธิภาพ ราคาต้นทุน ตลอดจนจะทำให้ทั้งสแตนคาร์ไบด์เกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็กขึ้นในตัวชิ้นงานซึ่งเป็นสาเหตุทำให้อายุการใช้งานของแม่พิมพ์ในการผลิตผลิตภัณฑ์ลดต่ำลงไปด้วย โดยปัจจัยต่างๆที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพในการแปรรูปวัสดุทั้งสแตนคาร์ไบด์นั้น มีด้วยกันหลายปัจจัย เช่น ปัจจัยประสิทธิภาพ (Duty Factor) เวลาเปิด (On -Time) และ เวลาปิด (Off-Time) กระแสไฟฟ้า (Discharge Current) ความต่างศักย์วงจรเปิด (Open-Circuit Voltage) ขั้วประจุทางไฟฟ้า (Polarity) ชนิดวัสดุอิเล็กโทรด (Electrode Materials) ซึ่งปัจจัยต่างๆเหล่านี้สามารถที่จะทดลองและนำไปวิเคราะห์ปรับปรุงและแก้ไขได้ [14] โดยจะกล่าวในบทต่อไป

บทที่ 3

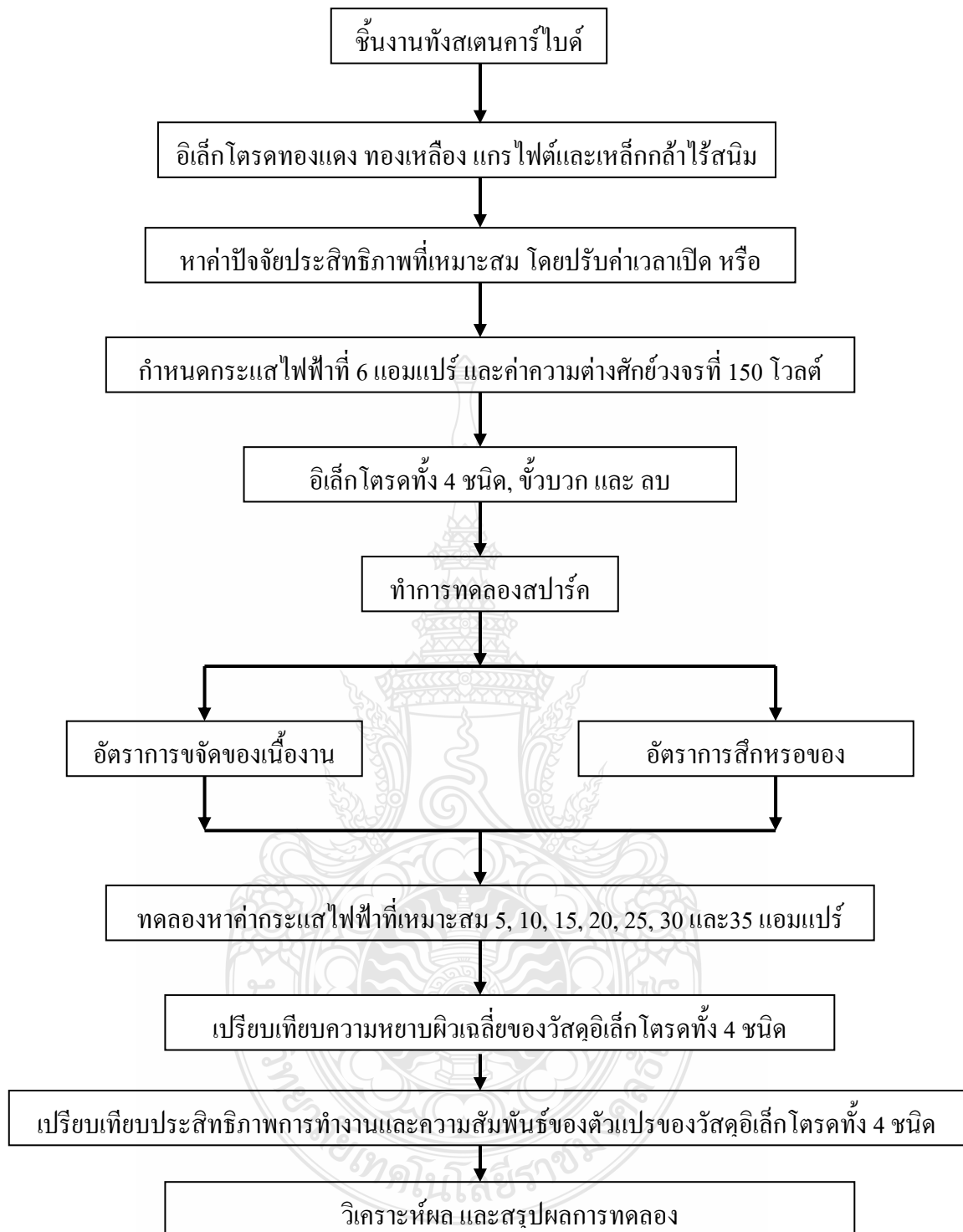
วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วิธีการดำเนินการวิจัย

จากทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสามารถทราบได้ว่ากระบวนการแปรรูปทั้งสแตนคาร์ไบด์ด้วยเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้านั้นทำให้เกิดประสิทธิภาพที่แตกต่างกันไม่ว่าจะเป็น อัตราการจัดเนื้องาน อัตราการสึกหรออิเล็กโทรด และคุณภาพผิวงาน ตลอดจนรอยแตกร้าวขนาดเล็กที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน ซึ่งจะส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานของแม่พิมพ์และประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ลดต่ำลง ทั้งนี้ประสิทธิภาพดังกล่าวสามารถที่จะควบคุมและปรับปรุงได้ด้วยการกำหนดค่าปัจจัยต่างๆที่เหมาะสม เช่น วัสดุอิเล็กโทรด เวลาเปิด เวลาปิดกระแสไฟ ความต่างศักย์วงจรเปิด กระแสไฟฟ้า และขั้วประจุอิเล็กโทรด

3.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

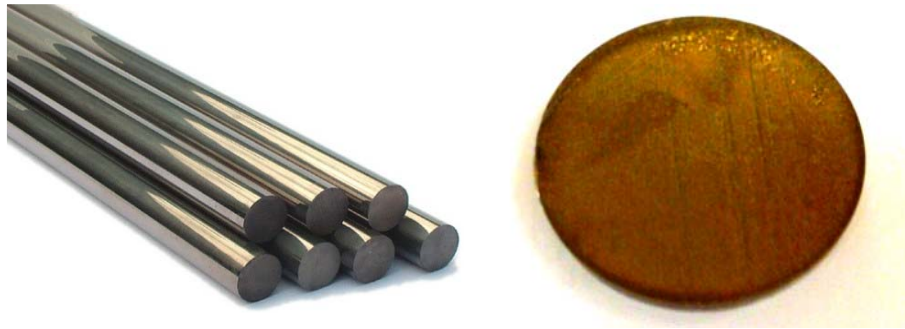
จากการศึกษางานวิจัยที่มีความเกี่ยวข้องและทำการทดลองเบื้องต้นแล้วพบว่า กระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าเป็นกระบวนการที่เกิดจากการควบคุมให้เกิดปฏิกิริยาความร้อนซึ่งมีค่าพารามิเตอร์จำนวนมาก แต่พารามิเตอร์หลักที่มีผลต่อประสิทธิภาพการขึ้นรูป [7] ได้แก่พารามิเตอร์ของ เวลาเปิด (On-time), เวลาปิด (Off-time), กระแสไฟฟ้า (Current) ชนิดวัสดุอิเล็กโทรด (Electrode Materials) และขั้วประจุไฟฟ้า (Polarity) เนื่องจากพารามิเตอร์ดังกล่าวเป็นตัวแปรพื้นฐานที่ส่งผลกระทบต่อสถานะการทำงานในกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า โดยจะทำการศึกษาประสิทธิภาพการทำงานในรูปของอัตราการจัดเนื้องาน และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด และศึกษาคุณภาพผิวงานในรูปของค่าความหยาบผิวเฉลี่ย โดยใช้ชิ้นงานทดสอบเป็นวัสดุผสมทั้งสแตนคาร์ไบด์ซึ่งนิยมใช้สำหรับผลิตแม่พิมพ์และเครื่องมือตัด วัสดุอิเล็กโทรดที่ใช้เป็นวัสดุทองเหลือง ทองแดง กราไฟต์และเหล็กกล้าไร้สนิม การวางแผนและกำหนดขั้นตอนการดำเนินการจะเป็นไปตามความยากง่ายในแต่ละขั้นตอน โดยในการดำเนินการทดลองได้กำหนดลำดับขั้นตอนการทดลองเพื่อความชัดเจนและสมบูรณ์ของการเก็บผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ลำดับขั้นตอนวิธีการดำเนินการทดลอง

3.2.1 เตรียมชิ้นงานทดสอบ

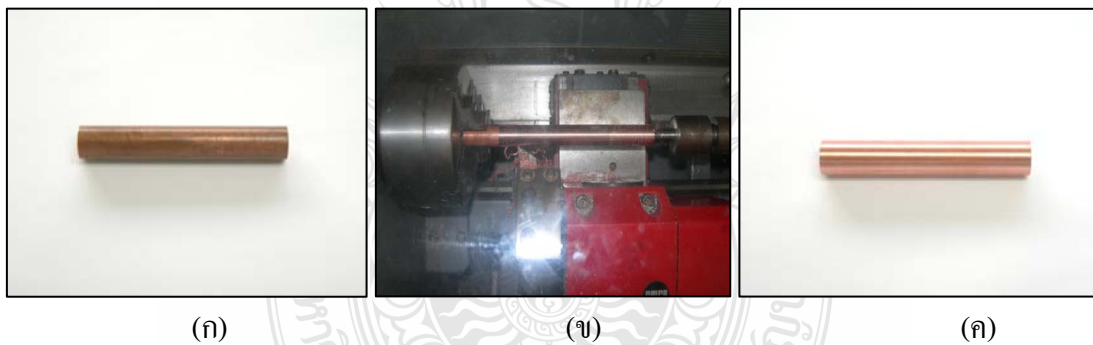
เตรียมวัสดุชิ้นงานทดสอบทั้งสแตนคาร์ไบด์ WC90-Co10 ให้ได้ขนาดความโตเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร หนา 5 มิลลิเมตร โดยกระบวนการตัดด้วยลวดไฟฟ้า (WEDM: Wire Electrical Discharge Machining) ภายใต้สารไดอิเล็กตริกให้ได้อินขนาดตามต้องการดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การเตรียมชิ้นงานทดสอบทั้งสแตนคาร์ไบด์

3.2.2 เตรียมวัสดุเล็กโตรด

การเตรียมวัสดุเล็กโตรด ทองเหลือง เกรด CuZn40, ทองแดง 95.95%, แกรไฟต์บริสุทธิ์ และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 โดยทำการกลึงปอกและปาดหน้าให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ยาว 70 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องกลึง CNC Turning เพื่อให้อิเล็กโตรดมีค่าความหยาบผิวเฉลี่ยใกล้เคียงกัน (พารามิเตอร์ในการกลึงเป็นค่าเดียวกันทุกชนิดอิเล็กโตรด) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ยกเว้นวัสดุเล็กโตรดกราไฟต์ซึ่งไม่สามารถกระทำได้นี้เนื่องจากเป็นวัสดุที่ผ่านกระบวนการอัดผงขึ้นรูป



(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 3.3 กระบวนการเตรียมวัสดุเล็กโตรดในการทดลอง

(ก) แท่งวัสดุเล็กโตรดก่อนการเตรียมขึ้นรูป

(ข) ขึ้นรูปกลึงปอกและปาดหน้าด้วยเครื่องกลึง CNC Turning

(ค) แท่งอิเล็กโตรดที่เตรียมสำเร็จจากการแปรรูปจนได้ขนาด

ลักษณะของวัสดุเล็กโตรดในแต่ละชนิดซึ่งมีคุณสมบัติเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้การกัดเซาะด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าวัสดุทั้งสแตนคาร์ไบด์โดยสามารถแสดงสมบัติได้ดังตารางที่ 3.1 และลักษณะชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 3.4



(ก) วัสดุอิเล็กโทรดทองเหลือง



(ข) วัสดุอิเล็กโทรดทองแดง



(ค) วัสดุอิเล็กโทรดแกรไฟต์



(ง) วัสดุอิเล็กโทรดเหล็กกล้าไร้สนิม

รูปที่ 3.4 วัสดุอิเล็กโทรดต่างชนิดที่ใช้ในการทดลอง

3.2.3 เครื่องมือกลและเครื่องมือในการทดลอง

เครื่องมือกลหรือเครื่องกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า ที่ใช้ในการทดลอง เป็นเครื่องมือกลแบบควบคุมด้วยตัวเลข (Computer Numerical Control) รุ่น ARISTECH EDM CNC 430 สามารถปรับค่ากระแสไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 0.5 ถึง 63 แอมแปร์, ปรับค่าความต่างศักย์วงจรเปิดได้ 150 โวลต์ และปรับค่าเวลาเปิด และเวลาปิด ได้ตั้งแต่ 2 ถึง 510 μ s ซึ่งเป็นเทคโนโลยีจากประเทศไต้หวัน ดังแสดงรายละเอียดลักษณะเครื่องในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง รุ่น ARISTECH EDM CNC 430

เครื่องมือในการทดลองประกอบด้วยเครื่องวัดความเร็วซึ่งหลังจากทำการ สปราร์ค แล้ว จะนำชิ้นงานมาวัดค่าความหนาผิวเฉลี่ยของผิวงานด้วยเครื่องวัดความหนาผิวยี่ห้อ Mahr รุ่น SurfTest PS1 เป็นเทคโนโลยีจากประเทศเยอรมันดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เครื่องวัดความหนาผิวยี่ห้อ Mahr รุ่น SurfTest PS1

3.2.4 กำหนดค่าปัจจัยประสิทธิภาพโดยปรับเวลาเปิด (On-time)

กำหนดค่าปัจจัยประสิทธิภาพโดยปรับเวลาเปิด จากสมการที่ 2.1 ซึ่งค่าปัจจัยประสิทธิภาพในที่นี้หมายถึงประสิทธิภาพการทำงานในหนึ่งวัฏจักรของการสปาร์ค

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

โดยกำหนดเวลาปิดคงที่ 32 ไมโครวินาที เนื่องจากเป็นค่าที่ทำให้ปัจจัยประสิทธิภาพ (Duty Cycle) จากการปรับเวลาเปิดเท่ากับเวลาปิดดังแสดงในตารางที่ 3.1 และกำหนดตัวแปรคงที่ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 ตารางการทดลองปรับค่าเวลาเปิด (On-Time) ใช้อิเล็กโตรดทั้ง 4 ชนิด ขั้วบวกและลบ

ปัจจัยประสิทธิภาพ(%)	เวลาเปิด (μs)	เวลาปิด (μs)	กระแส(A)	ความต่างศักย์(V)
6	2	32	6	150
24	10	32	6	150
50	32	32	6	150
76	100	32	6	150
94	510	32	6	150

ตารางที่ 3.2 ค่าตัวแปรคงที่ในการทดลองปรับเวลาเปิดและปรับเวลาปิด

ลำดับ	พารามิเตอร์	รายละเอียด
1	ขั้วอิเล็กโทรด (Polarity Electrode)	+,-
2	ความต่างศักย์ (V)	150
3	กระแส (A)	6
4	ระยะห่างของการสปาร์ค (Gap)	10
5	เวลาหน่วงในการสปาร์ค (s)	0.5
6	เวลายกอิเล็กโทรด (s)	0.67
7	ของเหลวตัวกลาง (Dielectric)	Oil (Shell Fluid 2 A)

3.2.5 กำหนดค่าปัจจัยประสิทธิภาพโดยปรับเวลาปิด (Off-time)

กำหนดค่าปัจจัยประสิทธิภาพโดยปรับเวลาเปิด จากสมการที่ 2.1 ซึ่งค่าปัจจัยประสิทธิภาพในที่นี้หมายถึงประสิทธิภาพการทำงานในหนึ่งวัฏจักรของการสปาร์ค

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

โดยกำหนดเวลาเปิดคงที่ 32 ไมโครวินาที เนื่องจากเป็นค่าที่ทำให้ปัจจัยประสิทธิภาพ (Duty Cycle) โดยทำการการปรับเวลาเปิดเท่ากับเวลาปิดให้มีความสอดคล้องกันตลอดการทดลอง

ตารางที่ 3.3 ตารางการทดลองปรับค่าเวลาปิด (Off-Time) ใช้อิเล็กโทรดทั้ง 4 ชนิด ขั้วบวกและลบ

ปัจจัยประสิทธิภาพ(%)	เวลาเปิด (μs)	เวลาปิด (μs)	กระแส(A)	ความต่างศักย์(V)
94	32	510	6	150
76	32	100	6	150
50	32	50	6	150
24	32	32	6	150
6	32	2	6	150

3.2.6 ดำเนินการทดลอง

การดำเนินการทดลองใช้เครื่องกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้ายี่ห้อ Aristech รุ่น 3D-CNC EDM ดังรูปที่ 3.7 ทำการทดลองกัดเซาะชิ้นงานเป็นหลุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ลึก 0.5 มิลลิเมตร โดยปรับเวลาเปิดตามที่กำหนดไว้ดังตารางที่ 3.1 และ 3.2 แล้วจึงทำการทดลองโดยการปรับเวลาปิด หลังจากทำการทดลองเสร็จแล้วจะต้องบันทึกข้อมูลดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.7 เครื่องกัดเซาะโลหะด้วยกระแสไฟฟ้ายี่ห้อ Aristech รุ่น 3D-CNC EDM

ก. บันทึกค่าอัตราการขจัดเนื้องาน(MRR)

บันทึกอัตราการขจัดเนื้องาน จากสมการที่ 2.4 ซึ่งเกิดจากการปริมาตรที่สึกหรอต่อหน่วยเวลาที่ใช้

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

ในการทดลองนี้จึงต้องทำการเก็บค่าข้อมูลความโตของอิเล็กโทรด (Diameter Electrode) และความลึกที่เกิดขึ้นบนผิวงานด้วยไมโครมิเตอร์ด้วยค่าความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร (ความลึกที่เกิดขึ้นบนผิวงานเท่ากับความหนาชิ้นงานก่อนสปาร์คลบด้วยความหนาชิ้นงานหลังสปาร์ค) พร้อมทั้งบันทึกเวลารวมในการสปาร์ค (Machining Time) จากหน้าจอแสดงผลดังรูปที่ 3.8 แล้วจึงนำค่ามาคำนวณตามสมการ 2.4 จะได้เป็นค่าอัตราการขจัดเนื้องาน (ข้อมูลการทดลองถูกบันทึกไว้ในภาคผนวก ก)



รูปที่ 3.8 หน้าจอแสดงเวลารวมในการทำงาน (Machining Time)

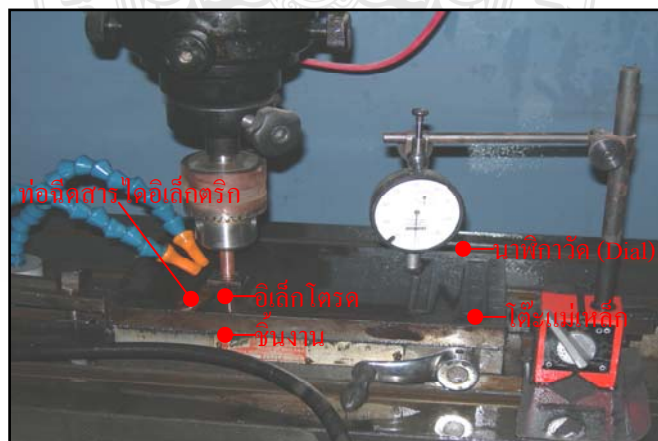
ข. บันทึกค่าอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR)

บันทึกค่าอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด จากสมการที่ 2.5 เป็นการวัดการสึกของหัวอิเล็กโทรดต่อการความลึกของเนื้องานที่ถูกขจัดออก

$$\text{อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR)} = \frac{\text{ปริมาณความลึกบนชิ้นงานที่แท้จริง (mm)} \times 100}{\text{ระยะที่อิเล็กโทรดสึกกร่อนออกไป (mm)}} \quad (2.5)$$

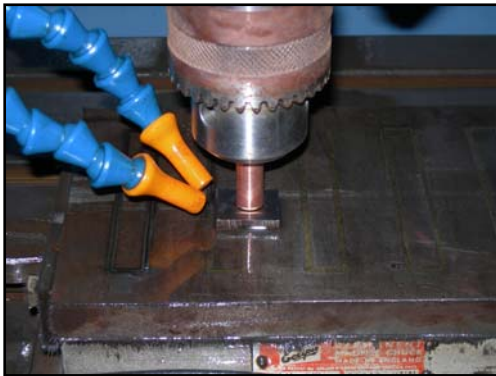
ในที่นี้จะวัดเป็นระยะสึกหรอโดยใช้นาฬิกาวัด (Dial) ค่าความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร ระยะวัด 10 มิลลิเมตร และมีขั้นตอนการวัดระยะสึกของอิเล็กโทรดกระทำตามขั้นตอนดังนี้

1. ติดตั้งชิ้นงานและอิเล็กโทรดพร้อมทั้งนาฬิกาวัด (Dial) ลงบนโต๊ะงาน ซึ่งในที่นี้จะใช้การจับยึดชิ้นงานด้วยโต๊ะแม่เหล็ก ดังแสดงการติดตั้งในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 การจับยึดชิ้นงานและติดตั้งอุปกรณ์วัดระยะสึกของอิเล็กโทรด

2. ทำการสร้างจุดอ้างอิงระหว่างผิวชิ้นงานกับผิวอเล็กโตรด โดยกำหนดให้ผิวสัมผัสระหว่างอเล็กโตรดและชิ้นงานมีค่าเป็นจุดศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 3.10 เมื่อสร้างจุดศูนย์แล้วจะยกอเล็กโตรดจากผิวสัมผัสขึ้นมา 1 มิลลิเมตรเพื่อสร้างเป็นจุดอ้างอิงในการสปาร์ก (หากอเล็กโตรดสัมผัสกับผิวงานจะทำให้ไม่สามารถสปาร์กเนื่องจากกระแสไหลครบวงจรจึงไม่สามารถสร้าง Gap ในการสปาร์กได้)



(ก) จุดอ้างอิงในการสปาร์ก



(ข) หน้าจอแสดงจุดอ้างอิงในการสปาร์ก

รูปที่ 3.10 จุดอ้างอิงผิวงานในการสปาร์ก

3. ทำการสร้างจุดอ้างอิงผิวอเล็กโตรดกับนาฬิกาวัด โดยกำหนดให้ผิวสัมผัสระหว่างอเล็กโตรดกับค่าแสดงผลบนหน้าปัดนาฬิกาวัดที่ค่า 5.00 มิลลิเมตร มีระยะลึกลงของอเล็กโตรดก่อนการสปาร์กเท่ากับศูนย์ ซึ่งจะได้พิกัดแสดงค่าศูนย์ของอเล็กโตรดจากหน้าจอ ดังแสดงในรูปที่ 3.11



(ก) หน้าปัดนาฬิกาวัดที่ค่า 5.00 มิลลิเมตร



(ข) พิกัดแสดงค่าศูนย์ของอเล็กโตรดจากหน้าจอ

รูปที่ 3.11 พิกัดจุดศูนย์ของอเล็กโตรดก่อนการสปาร์ก

4. ย้ายตำแหน่งอิเล็กโตรดมายังจุดอ้างอิงระหว่างผิวชิ้นงานกับผิวอิเล็กโตรด ที่หาไว้ในขั้นตอนที่ 2 แล้วทำการสปาร์คชิ้นงานดังรูปที่ 3.12 จนเสร็จสิ้นกระบวนการ จึงย้ายตำแหน่งของอิเล็กโตรดไปยังจุดพิกัดศูนย์ของอิเล็กโตรดก่อนการสปาร์ค โดยอ่านค่าจากหน้าจอที่หาไว้ในขั้นตอนที่ 3 ซึ่งอิเล็กโตรดจะกดทับลงบนนาฬิกาวัด ณ ตำแหน่งเดิมก่อนการสปาร์ค เพราะฉะนั้นค่าที่อ่านได้จากหน้าปัดนาฬิกาจะเท่ากับระยะลึกของอิเล็กโตรดดังแสดงในรูปที่ 3.13 โดยหากเข็มนาฬิกาเปลี่ยนแปลงไปจากตำแหน่งเดิมในทิศทางตามเข็มนาฬิกาแสดงว่าอิเล็กโตรดมีความยาวเพิ่มขึ้น แต่ถ้าหากเข็มนาฬิกาวัดหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาแสดงว่าอิเล็กโตรดสั้นลง (บันทึกค่าไว้ในภาคผนวก ก) ในกระบวนการวัดระยะลึกของอิเล็กโตรดห้ามเคลื่อนย้ายนาฬิกาวัดโดยเด็ดขาด



รูปที่ 3.12 การสปาร์คชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์



(ก) พิกัดแสดงค่าศูนย์ของอิเล็กโตรด (ข) ค่าที่อ่านได้จากหน้าปัดนาฬิกาเท่ากับ 0.01 มม.

รูปที่ 3.13 ค่าการสึกหรอของอิเล็กโตรดที่อ่านจากนาฬิกาที่พิกัดจุดศูนย์หลังการสปาร์ค

ค. บันทึกค่าความหยาบผิวเฉลี่ย(Ra)

สภาพพื้นผิวที่เกิดจากการสปาร์คจะเป็นแอ่งเล็กๆ จำนวนมาก ซึ่งหลังจากทำการสปาร์คแล้ว จะนำชิ้นงานมาวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของผิวงานด้วยเครื่องวัดความหยาบผิวยี่ห้อ Mahr รุ่น SurfTest PS1 ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ด้วยฟังก์ชัน Ra โดยใช้ระยะ Cut off 5 x 0.8 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.14 เครื่องวัดความหยาบผิวเฉลี่ยหือ Mahr รุ่น Surftest PS1



บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

ผลการทดลองเพื่อศึกษาและเปรียบเทียบวัสดุอิเล็กทรอนิกส์โทรดต่างชนิดสำหรับกระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้าบนวัสดุทั้งสแตนคาร์ไบด์ โดยการปรับค่าปัจจัยประสิทธิภาพจากเวลาเปิดการปล่อยกระแสไฟฟ้า (On-Time) ปรับค่าปัจจัยประสิทธิภาพเวลาปิดการปล่อยกระแสไฟฟ้า (Off-Time) ปรับค่ากระแสไฟฟ้า ปรับค่าความต่างศักย์ เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบผลจากการทำงานในรูปของอัตราการขจัดเนื้องาน (MRR) อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR) และขี้ของอิเล็กโทรดที่เหมาะสมในกระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้าบนวัสดุชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์

4.1 ผลการทดลอง

4.1.1 ผลการทดลองที่เกิดจากค่าปัจจัยประสิทธิภาพ ด้วยการปรับค่าเวลาเปิด (On-Time)

การทดลองเป็นการหาค่าปัจจัยประสิทธิภาพ ที่ส่งผลกระทบต่อผลการทดลองสปราร์ควัสดุทั้งสแตนคาร์ไบด์ ด้วยการให้เวลาปิดคงที่ และปรับค่าเวลาเปิด โดยเวลาเปิดมีผลต่อช่วงเวลาในการสปราร์ค เพื่อให้เกิดการกัดอาร์คหรือการแปรรูปชิ้นงานขึ้น เพราะฉะนั้นต้องกำหนดค่าปัจจัยประสิทธิภาพด้วยการปรับค่าเวลาเปิดให้เหมาะสม โดยกำหนดให้กระแสไฟฟ้า 6 แอมแปร์, ความต่างศักย์วงจรเปิด 150 โวลต์ เส้นผ่านศูนย์กลางของอิเล็กโทรด 5 มิลลิเมตร อิเล็กโทรดเป็นขั้วบวกและลบ การทดลองปรับค่าปัจจัยประสิทธิภาพเวลาเปิดเป็นการทดสอบช่วงเวลาที่ปล่อยให้เกิดการถ่ายเทประจุไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรดและชิ้นงาน เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการทำงาน

ตารางที่ 4.1 การทดลองโดยปรับค่าเวลาเปิด (On-Time) ใช้อิเล็กโทรดทั้ง 4 ชนิด ขั้วบวกและลบ

ปัจจัยประสิทธิภาพ(%)	เวลาเปิด (μ s)	เวลาปิด (μ s)	กระแส(A)	ความต่างศักย์(V)
6	2	32	6	150
24	10	32	6	150
50	32	32	6	150
76	100	32	6	150
94	510	32	6	150

ก. วัสดุอิเล็กโตรดเหล็กกล้าไร้สนิม ที่มีผลต่อปัจจัยประสิทธิภาพ อัตราการขจัดเนื้องาน อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดและขั้วอิเล็กโตรด

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองการปรับค่าเวลาเปิด(On-Time)ของอิเล็กโตรดเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304) ขั้วบวก

ค่าปัจจัยประสิทธิภาพ (%)	อัตราการแปรรูปของชิ้นงาน (mm ³ /min)	อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด (%)
6	0.011	194
24	0.027	159
50	0.057	122
76	0.043	151
94	0.015	245

ที่มา : จากการนำข้อมูลในตารางที่ ก.1 (ภาคผนวก ก) มาคำนวณ

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองการปรับค่าเวลาเปิด (On-Time)ของอิเล็กโตรดเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304)ขั้วลบ

ค่าปัจจัยประสิทธิภาพ (%)	อัตราการแปรรูปของชิ้นงาน (mm ³ /min)	อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด (%)
6	0.037	124
24	0.103	300
50	0.183	471
76	0.121	1150
94	0.005	2122

ที่มา : จากการนำข้อมูลในตารางที่ ก.2 (ภาคผนวก ก) มาคำนวณ

ข. วัสดุอิเล็กโตรดทองแดง ที่มีผลต่อปัจจัยประสิทธิภาพ อัตราการขจัดเนื้องาน อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดและขั้วอิเล็กโตรด

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองการปรับค่าเวลาเปิด (On-Time) ของอิเล็กโตรดทองแดงขั้วบวก

ค่าปัจจัย ประสิทธิภาพ (%)	อัตราการแปรรูปของ ชิ้นงาน (mm ³ /min)	อัตราการสึกหรอของ อิเล็กโตรด (%)
6	0.034	89
24	0.115	47
50	0.207	28
76	0.129	28
94	0.043	11

ที่มา : จากการนำข้อมูลในตารางที่ ก.9 (ภาคผนวก ก) มาคำนวณ

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองการปรับค่าเวลาเปิด (On-Time) ของอิเล็กโตรดทองแดงขั้วลบ

ค่าปัจจัย ประสิทธิภาพ (%)	อัตราการแปรรูปของ ชิ้นงาน (mm ³ /min)	อัตราการสึกหรอของ อิเล็กโตรด (%)
6	0.146	22
24	0.399	16
50	0.490	14
76	0.461	11
94	0.133	18

ที่มา : จากการนำข้อมูลในตารางที่ ก.10 (ภาคผนวก ก) มาคำนวณ

ค. วัสดุอิเล็กโตรดทองเหลือง ที่มีผลต่อปัจจัยประสิทธิภาพ อัตราการขจัดเนื้องาน อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดและขั้วอิเล็กโตรด

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองการปรับค่าเวลาเปิด (On-Time) ของอิเล็กโตรดทองเหลืองขั้วบวก

ค่าปัจจัย ประสิทธิภาพ (%)	อัตราการแปรรูปของ ชิ้นงาน (mm ³ /min)	อัตราการสึกหรอของ อิเล็กโตรด (%)
6	0.035	1150
24	0.155	1011
50	0.438	900
76	0.190	1150
94	0.122	1900

ที่มา : จากการนำข้อมูลในตารางที่ ก.5 (ภาคผนวก ก) มาคำนวณ

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองการปรับค่าเวลาเปิด (On-Time) ของอิเล็กโตรดทองเหลืองขั้วลบ

ค่าปัจจัย ประสิทธิภาพ (%)	อัตราการแปรรูปของ ชิ้นงาน (mm ³ /min)	อัตราการสึกหรอของ อิเล็กโตรด (%)
6	0.114	122
24	0.334	203
50	0.573	270
76	0.399	567
94	0.024	1700

ที่มา : จากการนำข้อมูลในตารางที่ ก.6 (ภาคผนวก ก) มาคำนวณ

ง. วัสดุอิเล็กโตรดกราไฟท์ ที่มีผลต่อปัจจัยประสิทธิภาพ อัตราการกัดเนื้องาน อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดและขั้วอิเล็กโตรด

ตารางที่ 4.8 ผลการทดลองการปรับค่าเวลาเปิด (On-Time) ของอิเล็กโตรดกราไฟท์ขั้วบวก

ค่าปัจจัย ประสิทธิภาพ (%)	อัตราการแปรรูปของ ชิ้นงาน (mm ³ /min)	อัตราการสึกหรอของ อิเล็กโตรด (%)
6	0.054	706
24	0.109	492
50	0.146	449
76	0.102	826
94	0.066	1166

ที่มา : จากการนำข้อมูลในตารางที่ ก.13 (ภาคผนวก ก) มาคำนวณ

ตารางที่ 4.9 ตารางผลการทดลองการปรับค่าเวลาเปิด (On-Time) ของอิเล็กโตรดกราไฟท์ขั้วลบ

ค่าปัจจัย ประสิทธิภาพ (%)	อัตราการแปรรูปของ ชิ้นงาน (mm ³ /min)	อัตราการสึกหรอของ อิเล็กโตรด (%)
6	0.512	257
24	1.201	165
50	1.070	277
76	0.661	576
94	0.330	1329

ที่มา : จากการนำข้อมูลในตารางที่ ก.14 (ภาคผนวก ก) มาคำนวณ

4.1.2 ผลการทดลองที่เกิดจากค่าปัจจัยประสิทธิภาพ ด้วยการปรับค่าเวลาปิด

การทดลองปรับค่าเวลาปิดเป็นการทดลองปรับค่าพารามิเตอร์เวลาปิดช่วงเวลาการปล่อยประจุไฟฟ้า ซึ่งจะไม่ทำให้เกิดการถ่ายเทประจุจากอิเล็กโตรดไปยังชิ้นงาน เวลาปิดจะไม่ทำให้เกิดการขจัดเนื้องานแต่จะเป็นการถ่ายเทความร้อนและขจัดเศษชิ้นงานที่หลุดออกจากกระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานและผลกระทบที่เกิดขึ้นในกระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า โดยวัดประสิทธิภาพในการทำงานด้วยอัตราการขจัดเนื้องาน อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด และผลจากขั้วอิเล็กโตรด การทดลองหาค่าปัจจัยประสิทธิภาพ ด้วยการปรับค่าเวลาปิด และให้เวลาเปิดคงที่ ใช้กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 6 แอมแปร์, ความต่างศักย์วงจรเปิดที่ 150 โวลต์ และอิเล็กโตรดเป็นขั้วบวกและลบ วัสดุอิเล็กโตรดทั้ง 4 ชนิด เหล็กกล้าไร้สนิม ทองแดง ทองเหลือง และกราไฟต์

ตารางที่ 4.10 การทดลองโดยปรับค่าเวลาปิด ใช้อิเล็กโตรดทั้ง 4 ชนิด ขั้วบวกและลบ

ปัจจัยประสิทธิภาพ(%)	เวลาเปิด (μ S)	เวลาปิด (μ S)	กระแส(A)	ความต่างศักย์(V)
94	32	2	6	150
76	32	10	6	150
50	32	32	6	150
24	32	100	6	150
6	32	510	6	150

ก. วัสดุอิเล็กโตรดเหล็กกล้าไร้สนิม ที่มีผลต่อปัจจัยประสิทธิภาพ อัตราการขจัดเนื้องาน อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดและขั้วอิเล็กโตรด

ตารางที่ 4.11 ผลการทดลองการปรับค่าเวลาปิด(Off-Time) ของอิเล็กโตรดเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304) ขั้วบวก

ค่าปัจจัยประสิทธิภาพ (%)	อัตราการแปรรูปของชิ้นงาน (mm^3/min)	อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด (%)
94	0.105	124
76	0.090	123
50	0.082	174
24	0.030	140
6	0.019	172

ที่มา : จากการนำข้อมูลในตารางที่ ก.3 (ภาคผนวก ก) มาคำนวณ

ตารางที่ 4.12 ผลการทดลองการปรับค่าเวลาปิด(Off-Time) ของอิเล็กโตรดเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304) ขั้วลบ

ค่าปัจจัย ประสิทธิภาพ (%)	อัตราการแปรรูปของ ชิ้นงาน (mm ³ /min)	อัตราการสึกหรอของ อิเล็กโตรด (%)
94	0.215	770
76	0.135	942
50	0.051	1900
24	0.011	2464
6	0.002	5782

ที่มา : จากการนำข้อมูลในตารางที่ ก.4 (ภาคผนวก ก) มาคำนวณ

ข. วัสดุอิเล็กโตรดทองแดง ที่มีผลต่อปัจจัยประสิทธิภาพ อัตราการขจัดเนื้องาน อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดและขั้วอิเล็กโตรด

ตารางที่ 4.13 ผลการทดลองการปรับค่าเวลาปิด (Off-Time) ของอิเล็กโตรดทองแดงขั้วบวก

ค่าปัจจัย ประสิทธิภาพ (%)	อัตราการแปรรูปของ ชิ้นงาน (mm ³ /min)	อัตราการสึกหรอของ อิเล็กโตรด (%)
94	0.282	113
76	0.239	45
50	0.178	37
24	0.118	25
6	0.101	10

ที่มา : จากการนำข้อมูลในตารางที่ ก.11 (ภาคผนวก ก) มาคำนวณ

ตารางที่ 4.14 ผลการทดลองการปรับค่าเวลาปิด(Off-Time)ของอิเล็กโตรดทองแดงขั้วลบ

ค่าปัจจัย ประสิทธิภาพ (%)	อัตราการแปรรูปของ ชิ้นงาน (mm ³ /min)	อัตราการสึกหรอของ อิเล็กโตรด (%)
94	0.667	30
76	0.693	19
50	0.611	20
24	0.241	25
6	0.114	39

ที่มา : จากการนำข้อมูลในตารางที่ ก.12 (ภาคผนวก ก) มาคำนวณ

ก. วัสดุอิเล็กโตรดทองเหลือง ที่มีผลต่อปัจจัยประสิทธิภาพ อัตราการขจัดเนื้องาน อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดและขั้วอิเล็กโตรด

ตารางที่ 4.15 ผลการทดลองการปรับค่าเวลาปิด(Off-Time)ของอิเล็กโตรดทองเหลืองขั้วบวก

ค่าปัจจัย ประสิทธิภาพ (%)	อัตราการแปรรูปของ ชิ้นงาน (mm ³ /min)	อัตราการสึกหรอของ อิเล็กโตรด (%)
94	0.281	2400
76	0.523	1011
50	0.524	733
24	0.115	1011
6	0.008	900

ที่มา : จากการนำข้อมูลในตารางที่ ก.7 (ภาคผนวก ก) มาคำนวณ

ตารางที่ 4.16 ผลการทดลองการปรับค่าเวลาปิด(Off-Time)ของอิเล็กโตรดทองเหลืองขั้วลบ

ค่าปัจจัย ประสิทธิภาพ (%)	อัตราการแปรรูปของ ชิ้นงาน (mm ³ /min)	อัตราการสึกหรอของ อิเล็กโตรด (%)
94	0.606	335
76	0.526	300
50	0.403	300
24	0.150	270
6	0.050	30

ที่มา : จากการนำข้อมูลในตารางที่ ก.8 (ภาคผนวก ก) มาคำนวณ

ง. วัสดุอิเล็กทรอนิกส์เกรดไฟต์ ที่มีผลต่อปัจจัยประสิทธิภาพ อัตราการขจัดเนื้องาน อัตราการสึกหรอของอิเล็กทรอนิกส์และหัวอิเล็กทรอนิกส์

ตารางที่ 4.17 ผลการทดลองการปรับค่าเวลาปิด (Off-Time) ของอิเล็กทรอนิกส์เกรดไฟต์ขั้วบวก

ค่าปัจจัย ประสิทธิภาพ (%)	อัตราการแปรรูปของ ชิ้นงาน (mm ³ /min)	อัตราการสึกหรอของ อิเล็กทรอนิกส์ (%)
94	0.098	372
76	0.254	279
50	0.234	276
24	0.100	549
6	0.029	964

ที่มา : จากการนำข้อมูลในตารางที่ ก.15 (ภาคผนวก ก) มาคำนวณ

ตารางที่ 4.18 ผลการทดลองการปรับค่าเวลาปิด (Off-Time) ของอิเล็กทรอนิกส์เกรดไฟต์ขั้วลบ

ค่าปัจจัย ประสิทธิภาพ (%)	อัตราการแปรรูปของ ชิ้นงาน (mm ³ /min)	อัตราการสึกหรอของ อิเล็กทรอนิกส์ (%)
94	0.654	446
76	0.853	376
50	0.827	400
24	0.800	449
6	0.160	456

ที่มา : จากการนำข้อมูลในตารางที่ ก.16 (ภาคผนวก ก) มาคำนวณ

4.1.3 ผลการทดลองปัจจัยประสิทธิภาพที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวเฉลี่ยชิ้นงาน (Ra)

ปัจจัยประสิทธิภาพการปรับค่าเวลาเปิด (On-Time) และปรับค่าเวลาปิด (Off-Time) ที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของชิ้นงาน

ตารางที่ 4.19 ผลการวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของอิเล็กทรอนิกส์โทรคเหล็กกล้าไร้สนิม(AISI 304) ขั้วบวกและขั้วลบ

Duty	Stainless (μm)			
	On-Time (+)	On-Time (-)	Off-Time (+)	Off-Time (-)
6	1.545	1.555	3.882	3.661
24	1.920	1.615	3.334	3.656
50	2.600	2.160	2.932	3.180
76	5.050	2.424	2.101	2.220
94	5.542	4.263	1.882	1.726

ตารางที่ 4.20 ผลการวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของอิเล็กทรอนิกส์โทรคทองแดงขั้วบวกและขั้วลบ

Duty	Copper (μm)			
	On-Time (+)	On-Time (-)	Off-Time (+)	Off-Time (-)
6	2.010	1.826	4.245	4.110
24	2.694	2.337	3.702	3.884
50	3.236	2.997	3.370	2.963
76	3.840	3.550	4.167	3.573
94	4.948	4.576	4.321	3.812

ตารางที่ 4.21 ผลการวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของอิเล็กทรอนิกส์โทรคทองเหลือง ขั้วบวกและขั้วลบ

Duty	Brass (μm)			
	On-Time (+)	On-Time (-)	Off-Time (+)	Off-Time (-)
6	2.234	2.158	4.796	4.418
24	2.821	2.774	3.924	3.993
50	3.278	3.646	3.447	3.367
76	5.110	4.882	2.649	2.567
94	6.450	6.190	2.463	2.188

ตารางที่ 4.22 ผลการวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของอิเล็กโทรดแกรไฟต์ ขั้วบวกและขั้วลบ

Duty	Graphite (μm)			
	On-Time (+)	On-Time (-)	Off-Time (+)	Off-Time (-)
6	2.042	1.787	4.231	3.998
24	2.462	2.198	3.548	3.554
50	3.330	2.952	3.010	2.980
76	4.847	3.784	2.340	2.085
94	5.689	5.331	1.998	1.910

4.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง

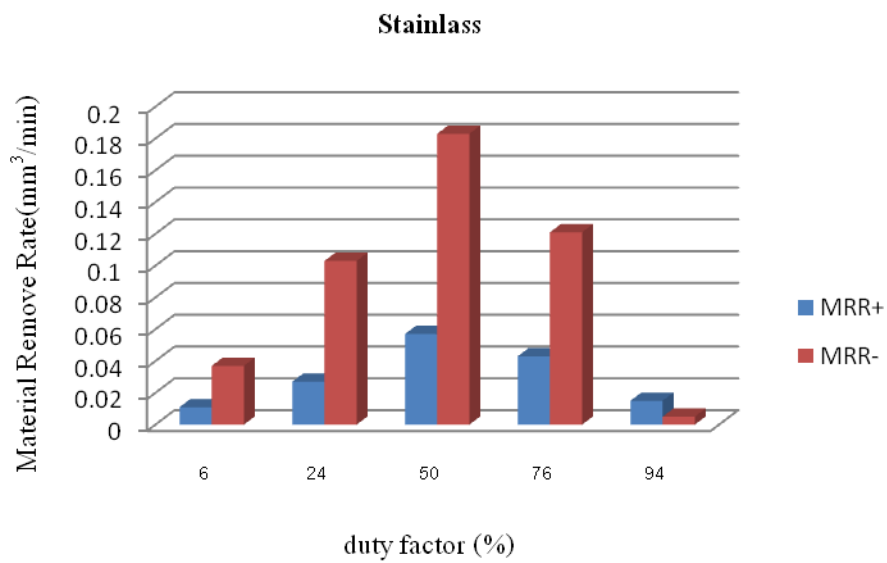
งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพอิเล็กโทรดเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304, อิเล็กโทรดทองแดง 95.99%, อิเล็กโทรดทองเหลือง CuZn40 และอิเล็กโทรดกราไฟต์บริสุทธิ์สำหรับกระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า โดยจะทำการเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลของอิเล็กโทรดที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานในรูปแบบของอัตราการขจัดเนื้องานและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด ตลอดจนผลที่มีต่อคุณภาพผิวงานในรูปแบบของค่าความหยาบผิวเฉลี่ย โดยการจำแนกตามพารามิเตอร์ที่ได้ศึกษาแล้วจึงทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของอิเล็กโทรดแต่ละชนิดภายใต้เงื่อนไขประสิทธิภาพการทำงานที่ดีที่สุดของวัสดุอิเล็กโทรดทั้ง 4 ชนิด

4.2.1 วิเคราะห์ปัจจัยประสิทธิภาพโดยการปรับค่าเวลาเปิด (On-Time)

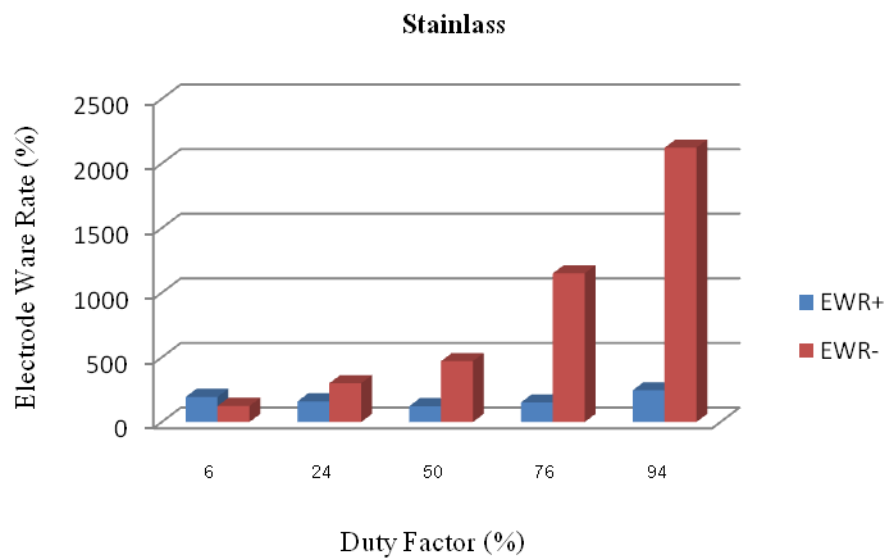
ปัจจัยประสิทธิภาพหมายถึงประสิทธิภาพการทำงานของหนึ่งวัฏจักรการสปาร์ค ซึ่งสามารถคำนวณได้จากค่าเวลาเปิดต่อเวลารวมในหนึ่งวัฏจักรดังสมการที่ 2.1 การทดลองนี้จะคงที่เวลาปิดที่ $32 \mu\text{s}$ ซึ่งหมายความว่าปัจจัยประสิทธิภาพที่สูงนั้นย่อมมาจากเวลาเปิดที่มาก โดยสามารถสรุปผลการทดลองตามประสิทธิภาพการทำงานซึ่งถูกวัดอยู่ในรูปของอัตราการขจัดเนื้องาน อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด ตลอดจนค่าความหยาบผิวเฉลี่ย ได้ดังนี้

ก. อัตราการขจัดเนื้องานและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม

AISI 304

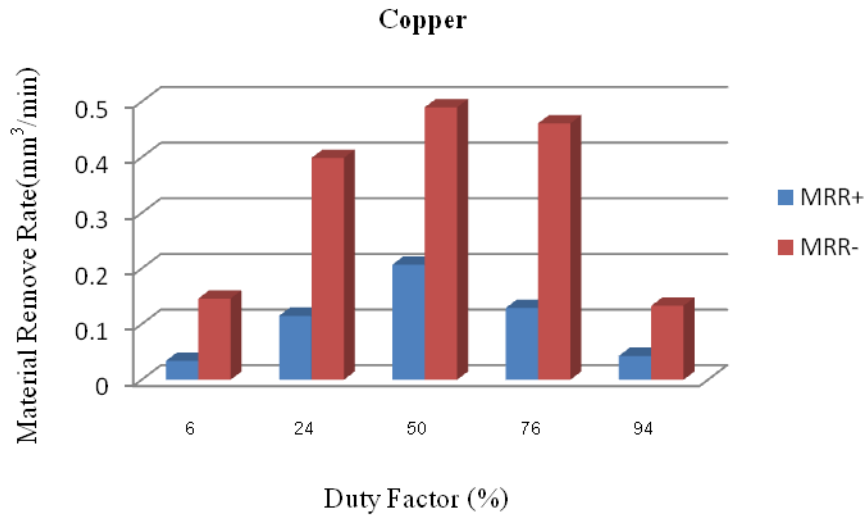


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยประสิทธิภาพต่ออัตราการแปรรูปชิ้นงานและขั้วอิเล็กโทรดของการทดลองปรับค่าเวลาเปิด วัสดุอิเล็กโทรดเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304

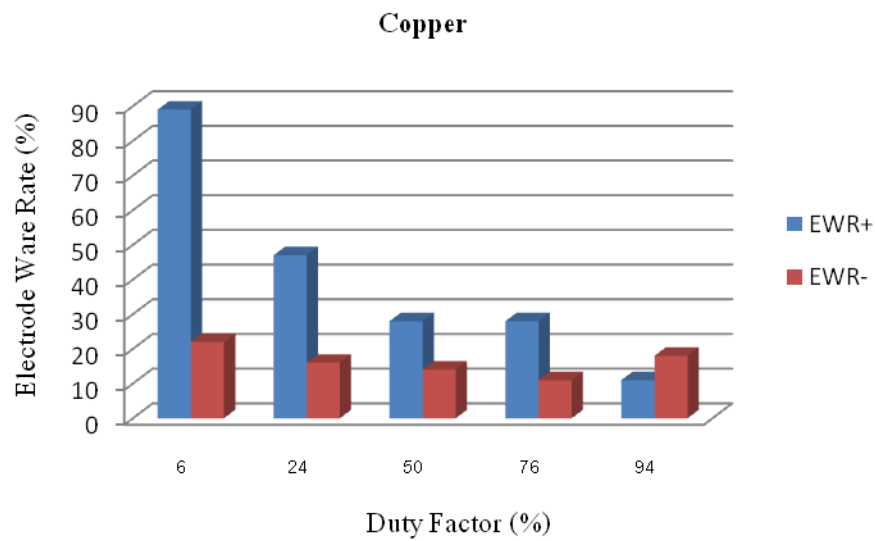


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยประสิทธิภาพต่ออัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดและขั้วอิเล็กโทรดของการทดลองปรับค่าเวลาเปิด วัสดุอิเล็กโทรดเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304

ข. อัตราการขจัดเนื้องานและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดวัสดุทองแดง 95.99%

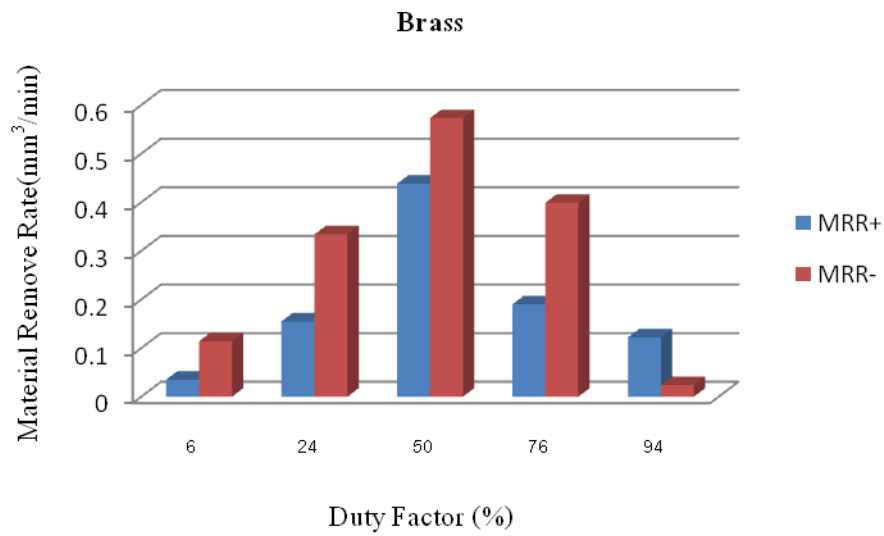


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยประสิทธิภาพต่ออัตราการแปรรูปชิ้นงานและขั้วอิเล็กโทรดของการทดลองปรับค่าเวลาเปิด วัสดุอิเล็กโทรดทองแดง

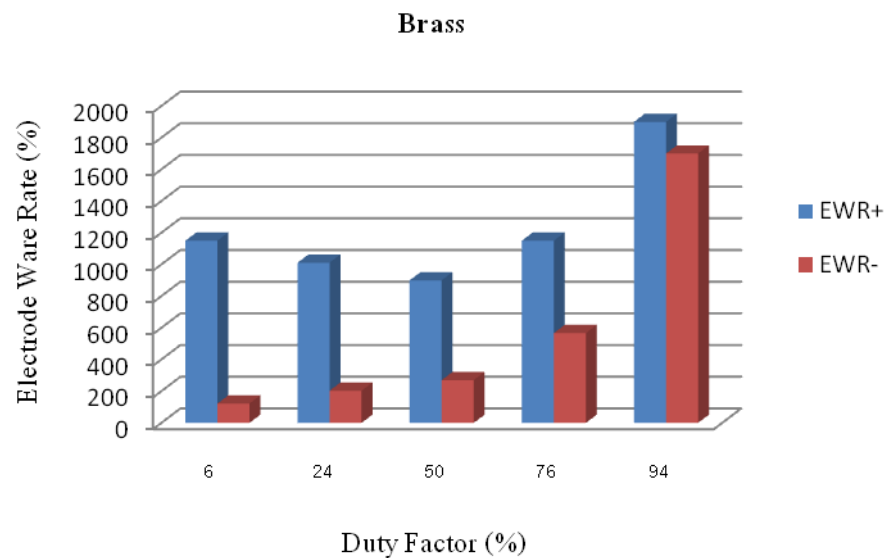


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยประสิทธิภาพต่ออัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดและขั้วอิเล็กโทรด การทดลองปรับค่าเวลาเปิด วัสดุอิเล็กโทรดทองแดง

ค. อัตราการขจัดเนื้องานและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดวัสดุทองเหลือง CuZn40

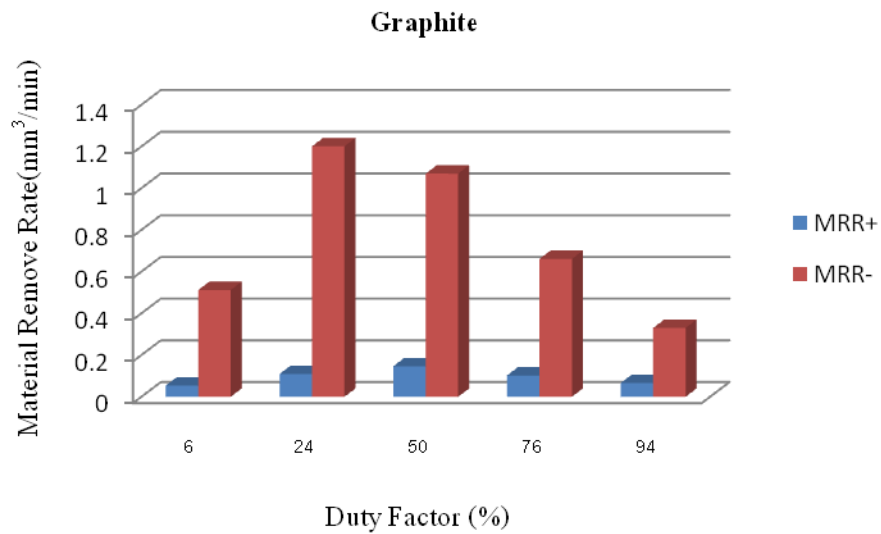


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยประสิทธิภาพต่ออัตราการแปรรูปชิ้นงานและขั้วอิเล็กโทรดของการทดลองปรับค่าเวลาเปิด วัสดุอิเล็กโทรดทองเหลือง

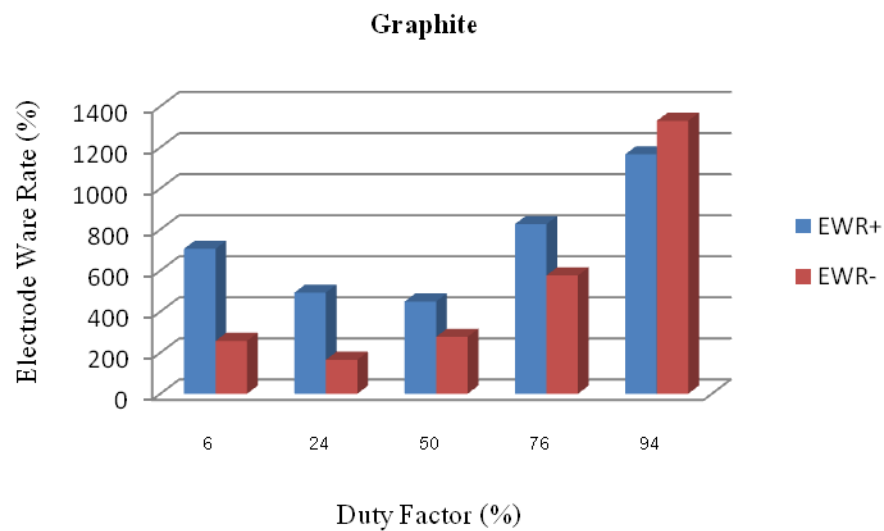


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยประสิทธิภาพต่ออัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดและขั้วอิเล็กโทรด การทดลองปรับค่าเวลาเปิด วัสดุอิเล็กโทรดทองเหลือง

ง. อัตราการขจัดเนื้องานและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดวัสดุแกรไฟต์



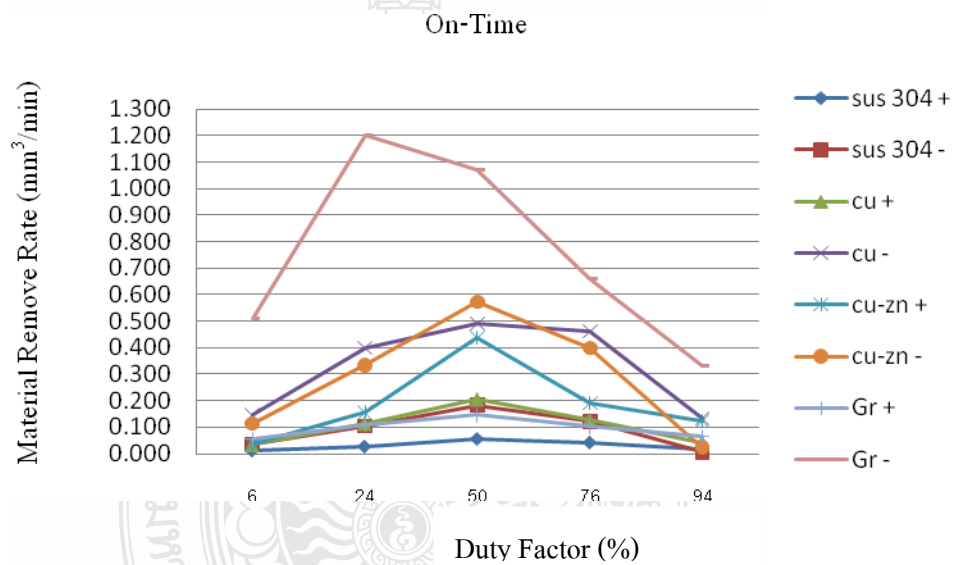
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยประสิทธิภาพต่ออัตราการแปรรูปชิ้นงานและ ขั้วอิเล็กโทรดของการทดลองปรับค่าเวลาเปิด วัสดุอิเล็กโทรดกราไฟต์



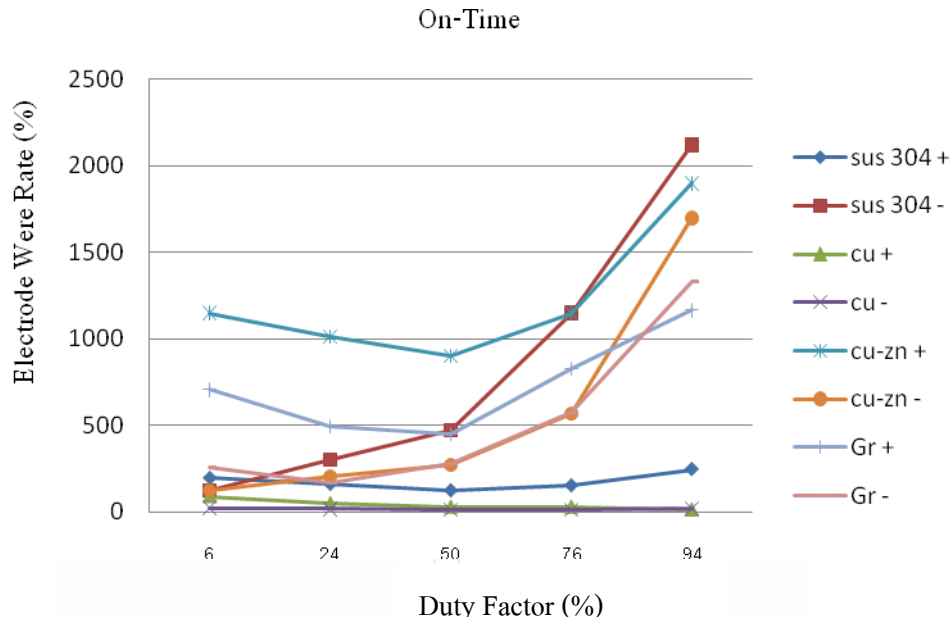
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยประสิทธิภาพต่ออัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดและขั้วอิเล็กโทรด การทดลองปรับค่าเวลาเปิด วัสดุอิเล็กโทรดแกรไฟต์

จากผลการทดลองในตารางข้างต้นพบว่า เมื่อทำการปรับค่าปัจจัยประสิทธิภาพที่ระดับสูงขึ้น จะให้ค่าอัตราการขจัดของเนื้องานที่สูงตามค่าปัจจัยประสิทธิภาพ จนถึงระดับหนึ่งก็จะทำให้อัตราการขจัดเนื้องานที่ลดลง ดังรูปที่ 4.9 โดยอิเล็กโทรดแกรไฟต์จะให้ค่าอัตราการขจัดเนื้องานสูงสุด และปรับอิเล็กโทรดเป็นขั้วลบซึ่งจะให้อัตราการขจัดเนื้องานสูงกว่าขั้วบวก สาเหตุของการลดลงของอัตราการขจัดเนื้องานเกิดจากค่าปัจจัยประสิทธิภาพที่สูงด้วยการปรับค่าเวลาเปิดนั้น จะทำ

ค่าปัจจัยประสิทธิภาพที่ 24% จะใช้เวลาเปิดที่ 10 μ s เวลาปิดที่ 32 μ s ซึ่งเวลาเปิดและเวลาปิดที่สัมพันธ์กันจะส่งผลต่อสภาพแวดล้อมของสารไดอิเล็กตริก และความเสถียรในการสปาร์ครังต่อไปทำให้การสปาร์คด้วยอิเล็กโตรคราไฟต์เกิดความสมบูรณ์ที่สุด



รูปที่ 4.9 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยประสิทธิภาพต่ออัตราการแปรรูปชิ้นงานและขั้วอิเล็กโตรด ทดลองปรับค่าเวลาเปิด วัสดุอิเล็กโตรด 4 ชนิด



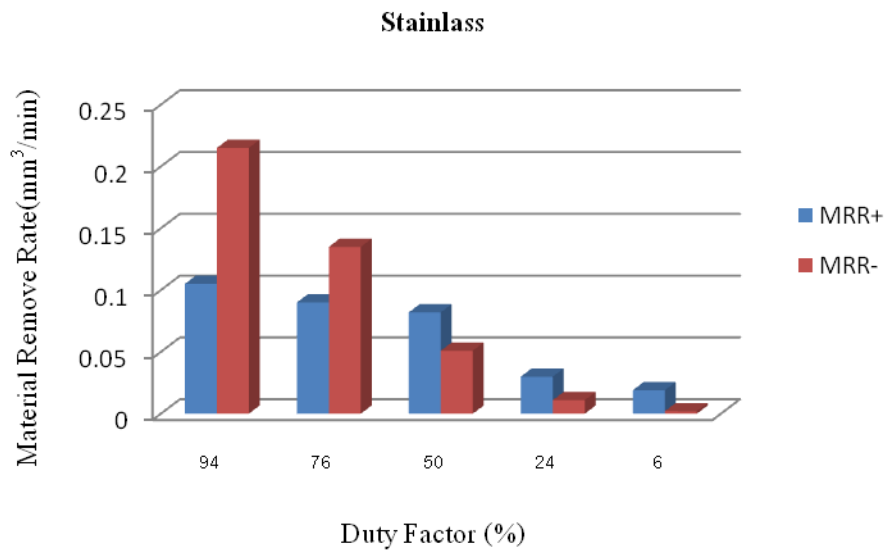
รูปที่ 4.10 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยประสิทธิภาพต่ออัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด ขั้วอิเล็กโทรด ทดลองปรับค่าเวลาเปิด วัสดุอิเล็กโทรด 4 ชนิด

นอกจากนี้ค่าปัจจัยประสิทธิภาพที่สูงขึ้นยังส่งผลต่ออัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด โดยช่วงปัจจัยประสิทธิภาพที่ 50 % จะส่งผลให้อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดต่ำ ส่วนปัจจัยประสิทธิภาพที่สูงจะทำให้ค่าอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดสูงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งเกิดจากความไม่สัมพันธ์กันของค่าเวลาปิดและเวลาเปิด เมื่อมองในภาพรวมแล้วทั้ง 4 อิเล็กโทรดผลการทดลองจะเป็นไปในทิศทางเดียวกัน และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของแต่ละอิเล็กโทรดแล้วพบว่าอิเล็กโทรดเหล็กกล้าไร้สนิมมีอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดสูงที่สุดที่ 94 % รองลงมาเป็นอิเล็กโทรดทองเหลือง แกรไฟต์โดยอิเล็กโทรดทองแดงจะมีอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดต่ำที่สุด จึงสามารถสรุปได้ว่าที่ปัจจัยประสิทธิภาพที่สูงขึ้นอิเล็กโทรดจะเกิดการสึกหรอของอิเล็กโทรดที่สูงขึ้นตาม เนื่องจากการปล่อยประจุไฟฟ้าที่ยาวนานส่งผลต่ออุณหภูมิที่สะสมทำให้เกิดการหลอมละลายของอิเล็กโทรดที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม ทองเหลือง ดังรูปที่ 4.10

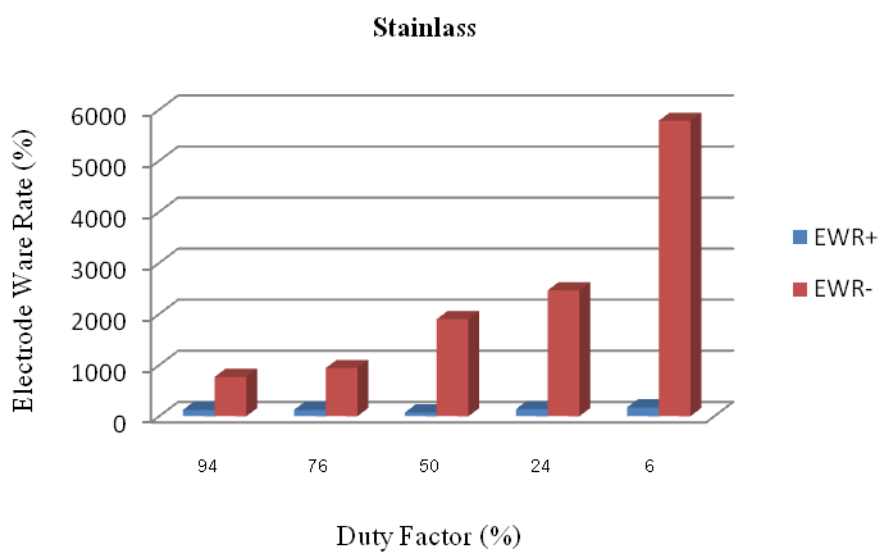
4.2.2 วิเคราะห์ปัจจัยประสิทธิภาพโดยการปรับค่าเวลาปิด (Off-Time)

ปัจจัยประสิทธิภาพหมายถึงประสิทธิภาพการทำงานของหนึ่งวัฏจักรการสปาร์ก ซึ่งสามารถคำนวณได้จากค่าเวลาเปิดต่อเวลารวมในหนึ่งวัฏจักรการทำงานดังสมการที่ 2.1 [2] การทดลองนี้ครั้งที่เวลาเปิดที่ 32 μs ซึ่งหมายความว่าปัจจัยประสิทธิภาพที่สูงนั้นย่อมมาจากเวลาปิดที่ต่ำลง โดยสามารถสรุปผลการทดลองตามประสิทธิภาพการทำงานซึ่งถูกวัดอยู่ในรูปของอัตราการขจัดเนื้องาน อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด ตลอดจนค่าความหนาพิวเฉลี่ย ได้ดังนี้

ก. อัตราการขจัดเนื้องานและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304

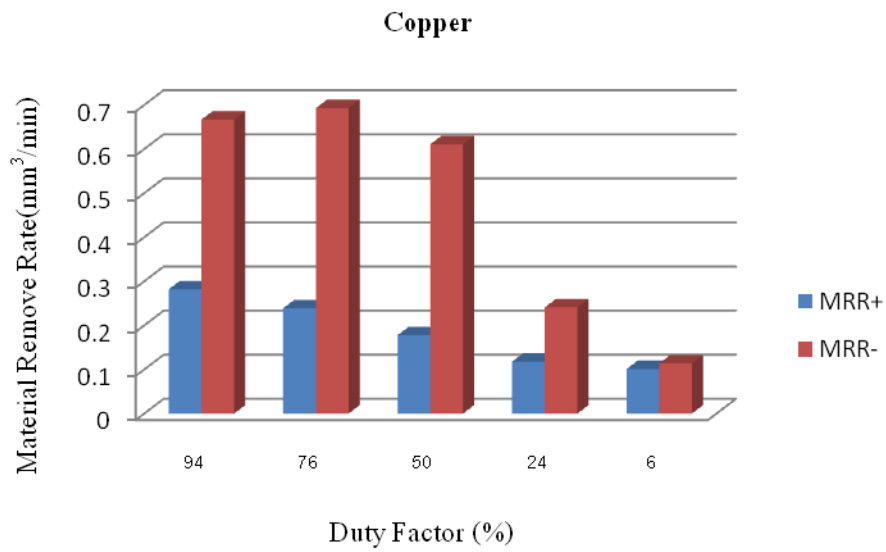


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยประสิทธิภาพต่ออัตราการแปรรูปชิ้นงานและ ขั้วอิเล็กโทรดของการทดลองปรับค่าเวลาปิด วัสดุอิเล็กโทรดเหล็กกล้าไร้สนิม

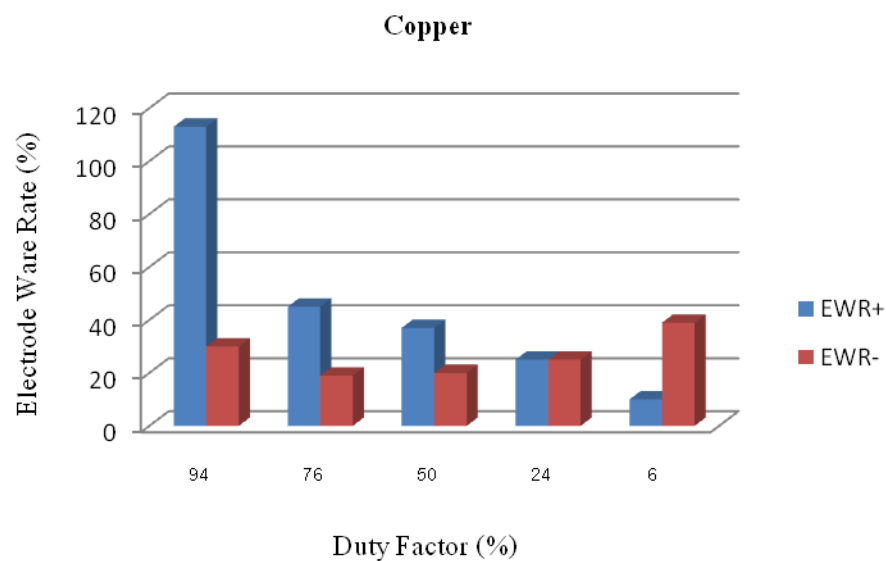


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยประสิทธิภาพต่ออัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดและขั้วอิเล็กโทรดของการทดลองปรับค่าเวลาปิด วัสดุอิเล็กโทรดเหล็กกล้าไร้สนิม

ข. อัตราการขจัดเนื้องานและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดวัสดุทองแดง 95.99%

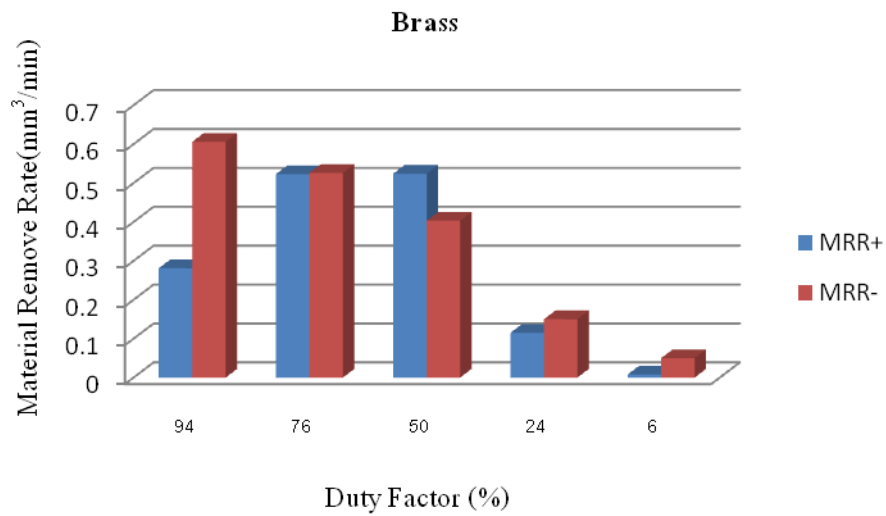


รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยประสิทธิภาพต่ออัตราการแปรรูปชิ้นงานและ ขั้วอิเล็กโทรดของการทดลองปรับค่าเวลาปิด วัสดุอิเล็กโทรดทองแดง

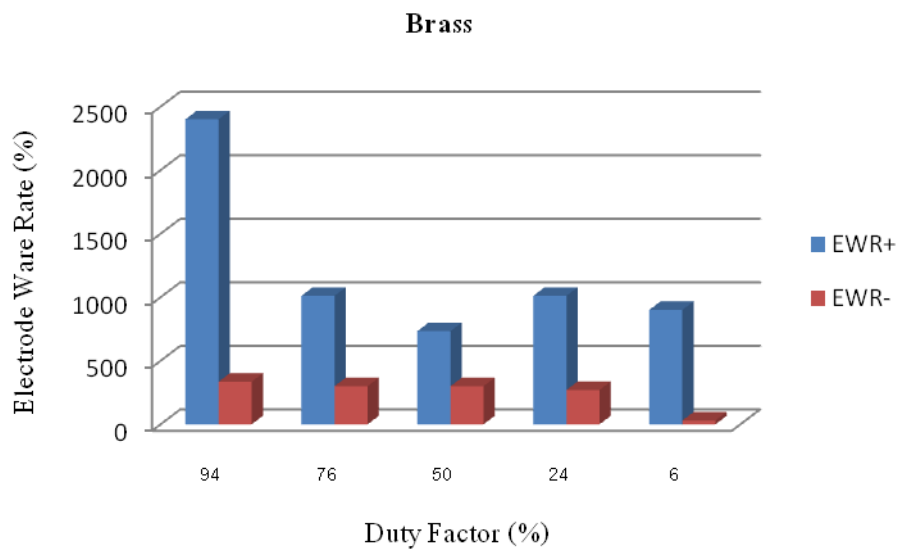


รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยประสิทธิภาพต่ออัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดและ ขั้วอิเล็กโทรดการทดลองปรับค่าเวลาเปิด วัสดุอิเล็กโทรดทองแดง

ก. อัตราการขจัดเนื้องานและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดวัสดุทองเหลือง CuZn40

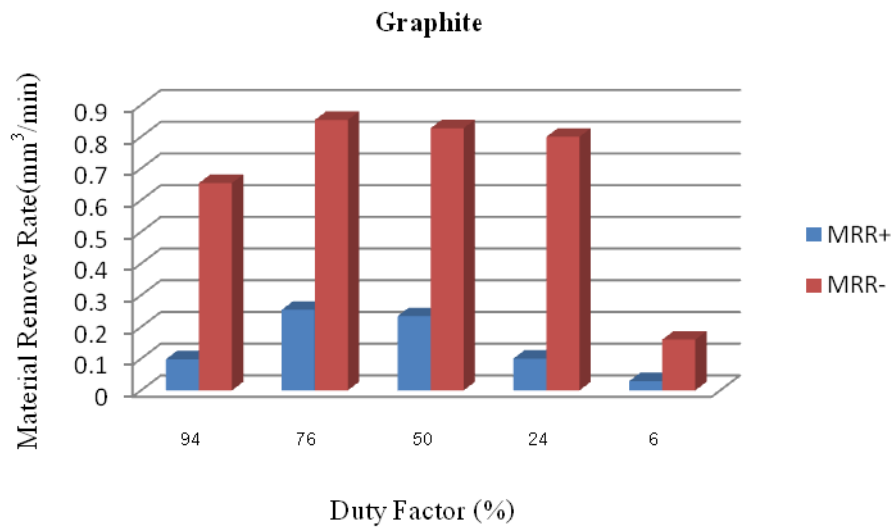


รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยประสิทธิภาพต่ออัตราการแปรรูปชิ้นงานและ
ขั้วอิเล็กโทรดของการทดลองปรับค่าเวลาปิด วัสดุอิเล็กโทรดทองเหลือง

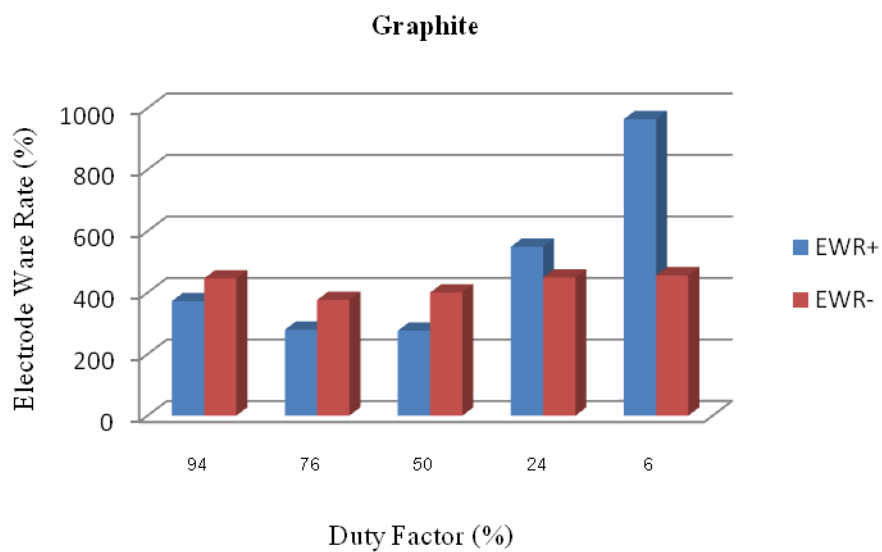


รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยประสิทธิภาพต่ออัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดและ
ขั้วอิเล็กโทรด การทดลองปรับค่าเวลาปิด วัสดุอิเล็กโทรดทองเหลือง

ง. อัตราการขจัดเนื้องานและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดวัสดุแกรไฟต์

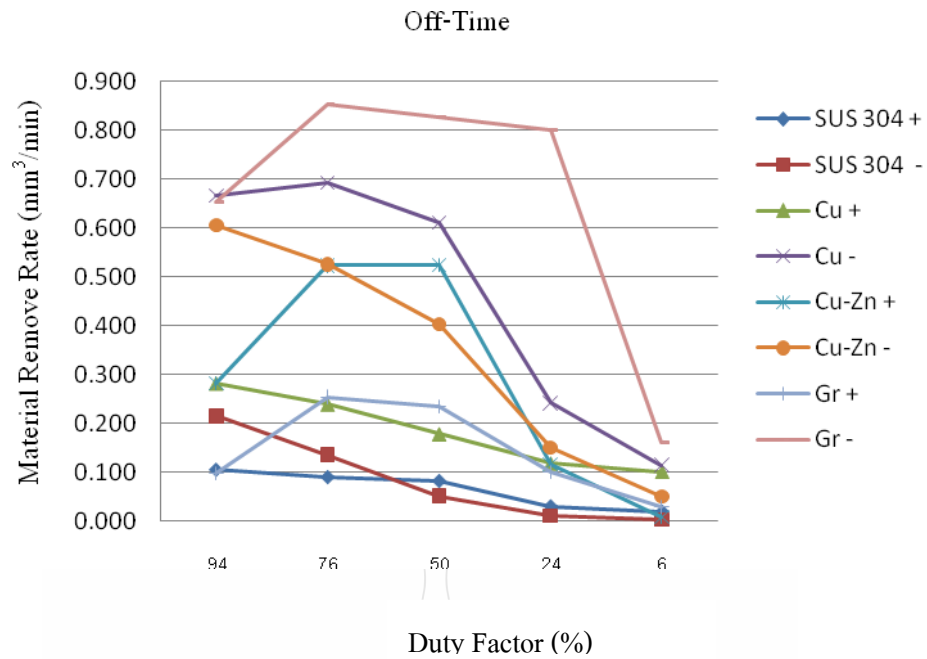


รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยประสิทธิภาพต่ออัตราการแปรรูปชิ้นงานและ
ข้อสึกของกราดลองปรับค่าเวลาเปิด วัสดุอิเล็กโทรดกราไฟต์

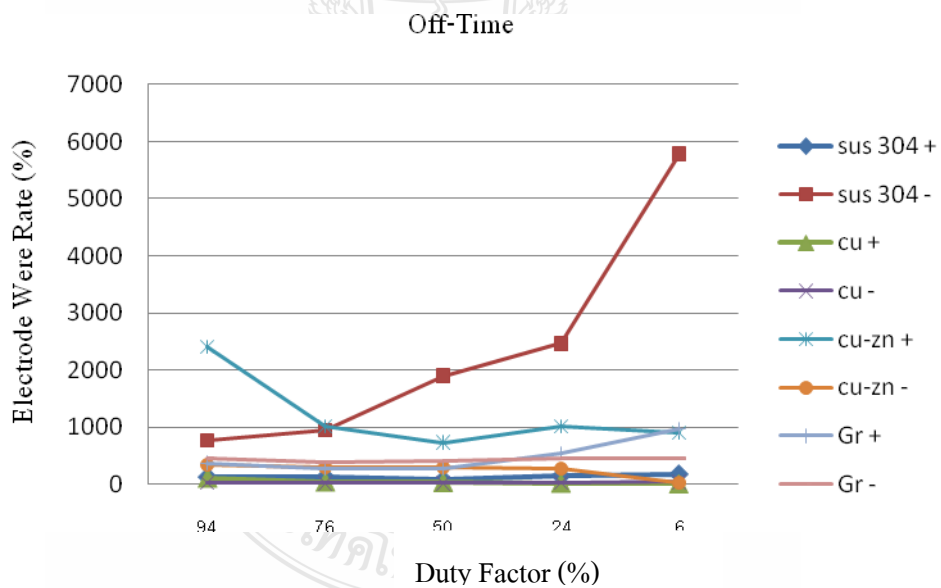


รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยประสิทธิภาพต่ออัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดและ
ข้อสึกของกราดลองปรับค่าเวลาเปิด วัสดุอิเล็กโทรดกราไฟต์

จากผลการทดลอง เมื่อทำการปรับค่าปัจจัยประสิทธิภาพเวลาเปิดที่สูง จะทำให้อัตราการ
ขจัดเนื้องานที่สูงขึ้นตามค่าปัจจัยประสิทธิภาพ ส่วนข้อลบนจะทำให้ค่าอัตราการขจัดเนื้องานที่สูงกว่า
ข้อลบน



รูปที่ 4.19 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยประสิทธิภาพ และอัตราการผลิตงาน (การทดลองปรับค่าเวลาปิด และให้เวลาเปิดคงที่)



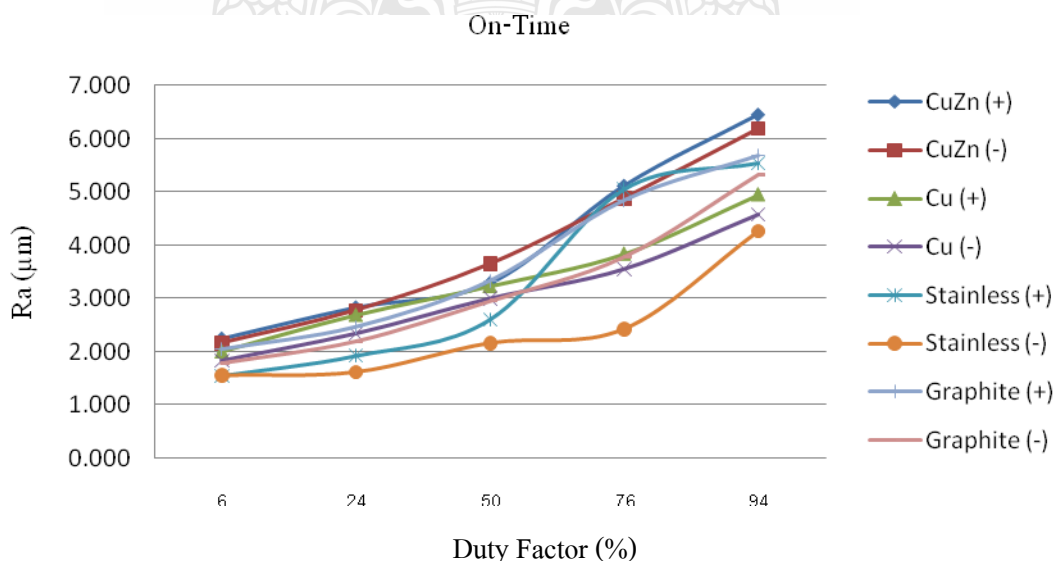
รูปที่ 4.20 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยประสิทธิภาพ และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (การทดลองปรับค่าเวลาปิด และให้เวลาเปิดคงที่)

จากตารางผลการทดลอง ค่าปัจจัยประสิทธิภาพที่สูง จะมีอัตราการผลิตงานที่สูงกว่า ค่าปัจจัยประสิทธิภาพที่ต่ำ ส่วนข้อสังเกตจะเห็นว่าอัตราการผลิตงานที่สูงกว่าขึ้นอยู่กับ การปรับค่าเวลาเปิด ซึ่งหากมองในภาพรวมแล้วค่าปัจจัยประสิทธิภาพที่สูงเช่น 94% , 76 % ให้อัตรา

เมื่อทำการเปรียบเทียบกันระหว่างการทดลองปรับค่าเวลาเปิด และเวลาปิดแล้วสามารถสรุปประสิทธิภาพการทำงานได้ว่า ปัจจัยประสิทธิภาพที่ 76 % ปรับค่าเวลาปิด อิเล็กโตรดเป็นขั้วลบ ที่กระแสไฟฟ้า 6 แอมแปร์ ความต่างศักย์ 150 โวลต์ อิเล็กโตรดแกรไฟต์ ให้อัตราการกัดเนื้องานที่สูงสุด รองลงมาเป็นอิเล็กโตรดทองแดง ทองเหลืองและเหล็กกล้าไร้สนิม ตามลำดับ ส่วนอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด อิเล็กโตรดเหล็กกล้าไร้สนิมจะให้อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดที่สูงสุด รองลงมาเป็นอิเล็กโตรดทองเหลือง แกรไฟต์ ส่วนอิเล็กโตรดทองแดงจะให้ค่าอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดต่ำสุด นอกจากนี้ขั้วอิเล็กโตรดยังมีผลต่อสภาพผิวของพื้นผิวด้วย โดยพบว่าขั้วลบจะมีสภาพที่คล้ำมีสีดำมากกว่าขั้วบวก เนื่องจากขณะทำการสปาร์คอยู่นั้น สารที่อยู่ในของเหลวตัวกลางบางส่วน จะกลายเป็นไฮโดรเจนซึ่งมีประจุเป็นบวก และคาร์บอนซึ่งมีประจุเป็นลบ ดังนั้นเมื่อใช้อิเล็กโตรดเป็นขั้วลบแล้ว คาร์บอนจะวิ่งเข้าจับผิวชิ้นงานซึ่งเป็นขั้วบวก จึงเกิดเป็นรอยสีดำขึ้น

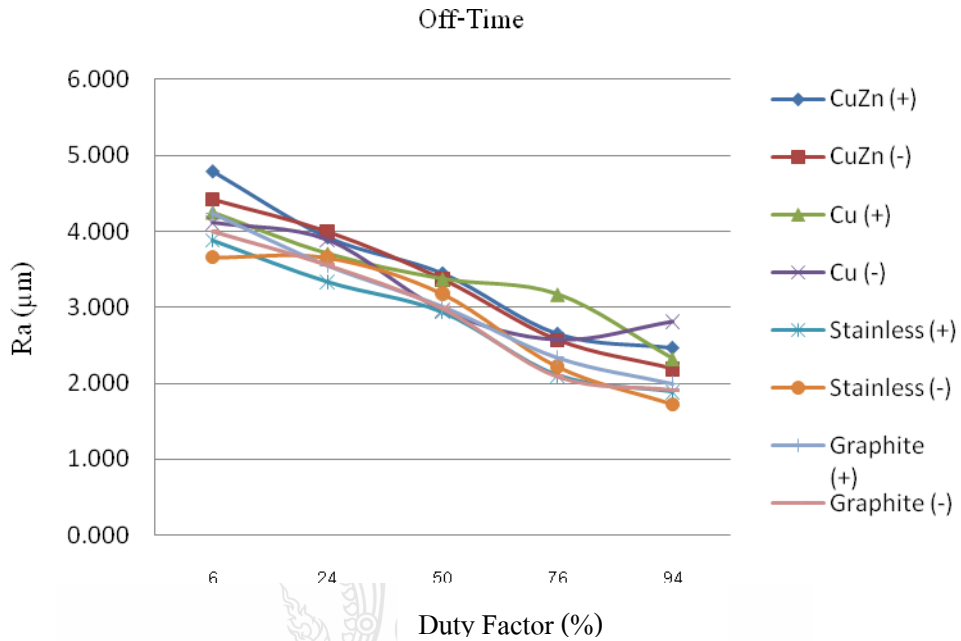
4.2.3 วิเคราะห์ปัจจัยประสิทธิภาพที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวเฉลี่ยชิ้นงาน (Ra)

จากการทดลองปัจจัยประสิทธิภาพโดยการปรับเวลาเปิดพบว่าค่าความหยาบผิวเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นตามค่าปัจจัยประสิทธิภาพ โดยค่าความหยาบผิวเฉลี่ยเพิ่มสูงสุดที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 94 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันทั้ง 4 ชนิด โดยที่อิเล็กโตรดแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันน้อยมาก

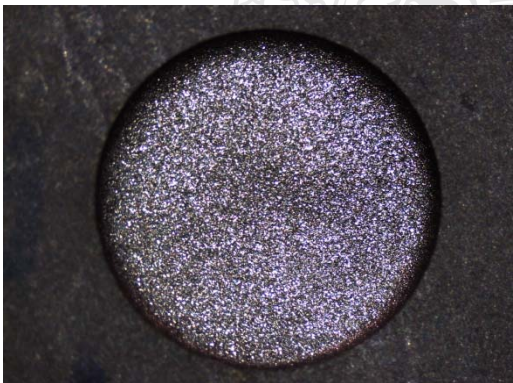


ที่ 4.21 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยภายใต้ปัจจัยประสิทธิภาพโดยการปรับค่าเวลาเปิด

ผลจากการทดลองปัจจัยประสิทธิภาพจากการปรับเวลาปิดพบว่าปัจจัยประสิทธิภาพมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของผิวงานน้อยมาก โดยอิเล็กโตรดแต่ละชนิดจะให้ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งค่าความหยาบผิวจะลดลงเมื่อปัจจัยประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยค่าความหยาบผิวเฉลี่ยเพิ่มสูงสุดที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 6 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันทั้ง 4 ชนิด โดยที่อิเล็กโตรดแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันน้อยมาก

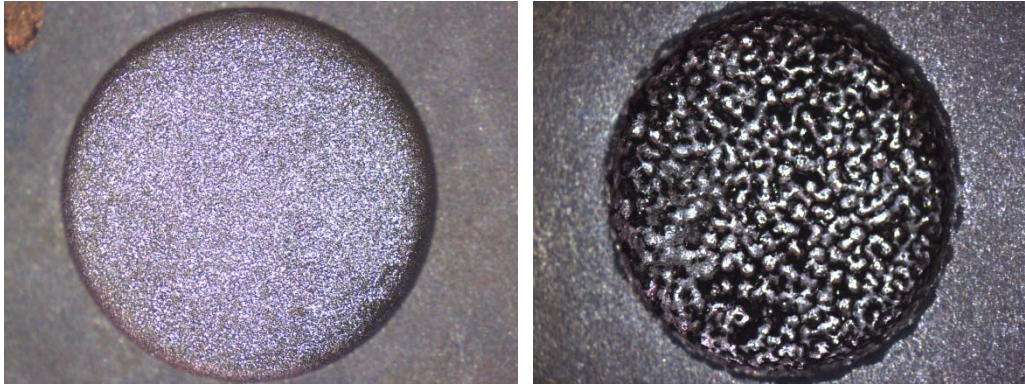


รูปที่ 4.22 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยภายใต้ปัจจัยประสิทธิภาพโดยการปรับค่าเวลาปิด



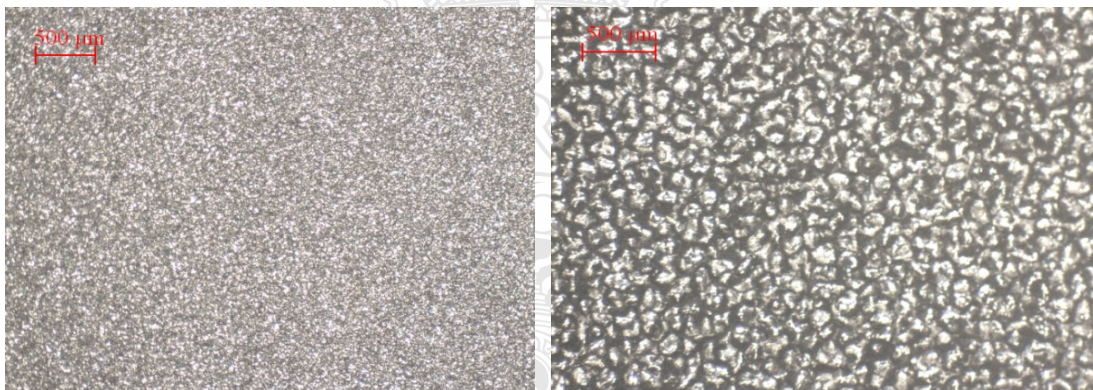
(ก) 2.158 µm (เวลาเปิด, ปัจจัยประสิทธิภาพ 6%) (ข) 6.450 µm (เวลาเปิด, ปัจจัยประสิทธิภาพ 94%)

รูปที่ 4.23 ลักษณะผิวงานที่เกิดขึ้นหลังการสปาร์คทั้งสแตนคาร์ไบด์ด้วยอิเล็กโตรดทองเหลืองกำลังขยาย 30 เท่า รูป ก การทดลองปรับค่าเวลาเปิดที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 6% ขั้วอิเล็กโตรดเคลือบ ให้ค่าความหยาบผิวต่ำสุดที่ 2.158 µm รูป ข การทดลองปรับค่าเวลาเปิดที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 94% ขั้วอิเล็กโตรดบวม ให้ค่าความหยาบผิวสูงสุดที่ 6.450 µm



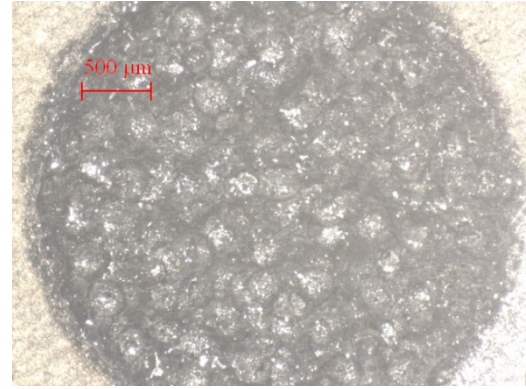
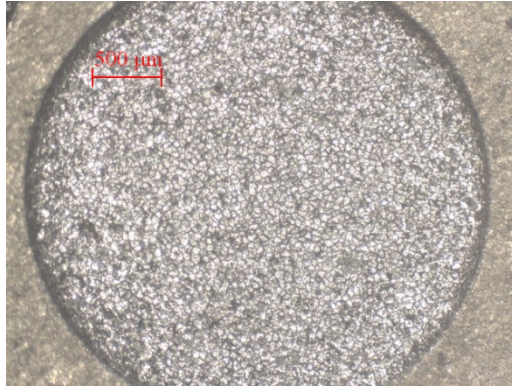
(ก) 1.826 μm (เวลาเปิด, ปล่อยประสิทธิภาพ 6%) (ข) 4.445 μm (เวลาปิด, ปล่อยประสิทธิภาพ 94%)

รูปที่ 4.24 ลักษณะผิวงานที่เกิดขึ้นหลังการสปาร์กทั้งสแตนคาร์ไบด์ด้วยอิเล็กโตรดทองแดง กำลังขยาย 30 เท่า รูป ก การทดลองปรับค่าเวลาเปิดที่ปล่อยประสิทธิภาพ 6% ขั้วอิเล็กโตรดลบ ให้ค่าความหยาบผิวต่ำสุดที่ 1.826 μm รูป ข การทดลองปรับค่าเวลาเปิดที่ปล่อยประสิทธิภาพ 6% ขั้วอิเล็กโตรดบวก ให้ค่าความหยาบผิวสูงสุดที่ 4.445 μm



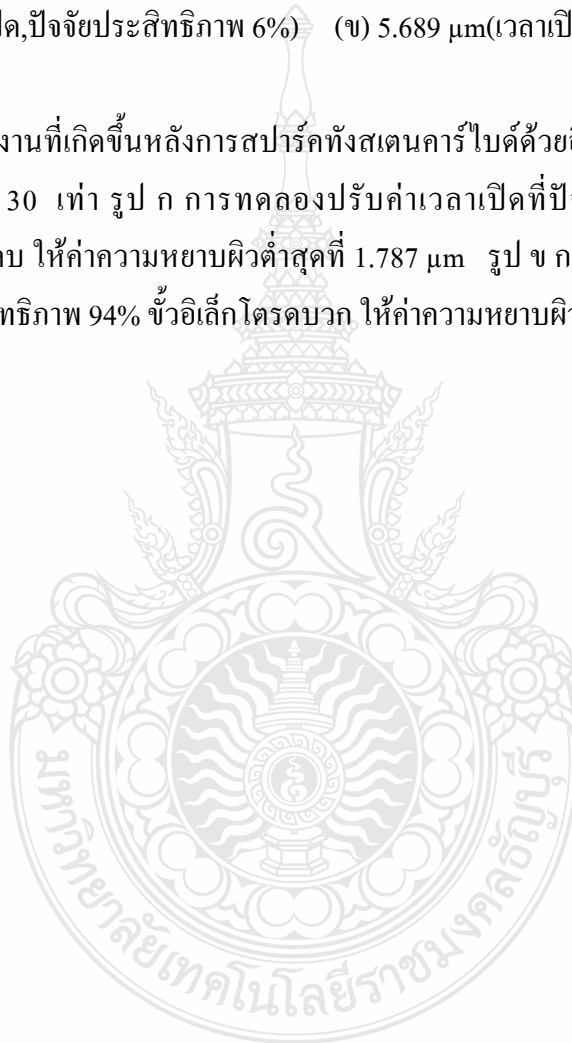
(ก) 1.545 μm (เวลาเปิด, ปล่อยประสิทธิภาพ 6%) (ข) 5.542 μm (เวลาปิด, ปล่อยประสิทธิภาพ 94%)

รูปที่ 4.25 ลักษณะผิวงานที่เกิดขึ้นหลังการสปาร์กทั้งสแตนคาร์ไบด์ด้วยอิเล็กโตรดเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 กำลังขยาย 30 เท่า รูป ก การทดลองปรับค่าเวลาเปิดที่ปล่อยประสิทธิภาพ 6% ขั้วอิเล็กโตรดบวก ให้ค่าความหยาบผิวต่ำสุดที่ 1.545 μm รูป ข การทดลองปรับค่าเวลาเปิดที่ปล่อยประสิทธิภาพ 94% ขั้วอิเล็กโตรดบวก ให้ค่าความหยาบผิวสูงสุดที่ 5.542 μm



(ก) 1.787 μm (เวลาเปิด, ปล่อยประสิทธิภาพ 6%) (ข) 5.689 μm (เวลาเปิด, ปล่อยประสิทธิภาพ 94%)

รูปที่ 4.26 ลักษณะผิวงานที่เกิดขึ้นหลังการสปาร์กทั้งสแตนคาร์ไบด์ด้วยอิเล็กโตรดแกรไฟต์บริสุทธิ์ กำลังขยาย 30 เท่า รูป ก การทดลองปรับค่าเวลาเปิดที่ปล่อยประสิทธิภาพ 6% ขั้วอิเล็กโตรดลบ ให้ค่าความหยาบผิวต่ำสุดที่ 1.787 μm รูป ข การทดลองปรับค่าเวลาเปิดที่ปล่อยประสิทธิภาพ 94% ขั้วอิเล็กโตรดบวก ให้ค่าความหยาบผิวสูงสุดที่ 5.689 μm



บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของอิเล็กโทรดทั้ง 4 ชนิด ได้แก่อิเล็กโทรดทองเหลือง ทองแดง แกรไฟต์และเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งทำการทดลองจากพารามิเตอร์เวลาปิด เวลาเปิด กระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์ ขั้วไฟฟ้า ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานในรูปแบบของอัตราการขจัดเนื้องาน อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด รวมทั้งขั้วอิเล็กโทรดที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงาน ทำให้สามารถสรุปผลการทดลองตามวัตถุประสงค์งานวิจัยได้ดังนี้

5.1.1 พารามิเตอร์ที่มีผลต่ออัตราการแปรรูปชิ้นงาน

ก) พารามิเตอร์เวลาเปิด (On-Time)

การทดลองปัจจัยประสิทธิภาพโดยการปรับค่าเวลาเปิดพบว่า อัตราการขจัดเนื้องานสูงสุดเมื่อทำการปรับค่าเวลาเปิดที่ 32 ไมโครวินาที โดยผลการทดลองเป็นไปในแนวทางเดียวกันทั้ง 4 อิเล็กโทรดแต่เมื่อทำการเปรียบเทียบอัตราการขจัดเนื้องานแล้วพบว่า อิเล็กโทรดแกรไฟต์ให้อัตราการขจัดเนื้องานที่สูงสุดที่ 1.201 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อนาที รองลงมาเป็นอิเล็กโทรดทองเหลือง ทองแดงและเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ตามลำดับ โดยค่าปัจจัยประสิทธิภาพที่ดีที่สุดคือ 50% คือเวลาเปิดที่ 32 ไมโครวินาที เวลาปิด 32 ไมโครวินาที

ข) พารามิเตอร์เวลาปิด (Off-Time)

การทดลองปัจจัยประสิทธิภาพโดยการปรับค่าเวลาปิดพบว่า เนื่องจากเวลาปิดไม่ทำให้เกิดการขจัดเนื้องานขึ้น อัตราการขจัดเนื้องานจะสูงขึ้นเมื่อเวลาปิดต่ำลง เมื่อมองในภาพรวมแล้วเวลาปิดที่ 10 ไมโครวินาทีให้อัตราการขจัดเนื้องานที่สูงสุด ซึ่งอิเล็กโทรดแกรไฟต์ให้อัตราการขจัดเนื้องานสูงสุดที่ 0.853 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อนาที รองลงมาเป็นอิเล็กโทรดทองแดง ทองเหลืองและเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ตามลำดับ โดยค่าปัจจัยประสิทธิภาพที่ดีที่สุดคือ 76% คือเวลาเปิดที่ 32 ไมโครวินาที เวลาปิด 10 ไมโครวินาที

ค) ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra)

จากการทดลองปัจจัยประสิทธิภาพโดยการปรับเวลาเปิดพบว่าค่าความหยาบผิวเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นตามค่าปัจจัยประสิทธิภาพ โดยค่าความหยาบผิวเฉลี่ยเพิ่มสูงสุดที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 94 เปอร์เซ็นต์ และต่ำสุดที่ 6 เปอร์เซ็นต์

5.1.2 พารามิเตอร์ที่มีผลต่ออัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด

ก) พารามิเตอร์เวลาเปิด (On-Time)

การทดลองปัจจัยประสิทธิภาพโดยการปรับค่าเวลาเปิดพบว่า อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดต่ำลงเมื่อเวลาเปิดต่ำ เนื่องจากเวลาเปิดเป็นช่วงเวลาในการปล่อยประจุไฟฟ้าผ่านอิเล็กโทรดไปยังชิ้นงาน ทำให้เกิดอุณหภูมิสูงอิเล็กโทรดและชิ้นงานจึงเกิดการหลอมละลายหลุดออกไป โดยผลการทดลองพบว่า อิเล็กโทรดทองแดงเมื่อเวลาเปิดเพิ่มขึ้นอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดต่ำลง โดยอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดต่ำสุดที่ 11% ส่วนอิเล็กโทรดทองเหลือง แกรไฟต์และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 เมื่อเวลาเปิดต่ำอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดก็จะลดลงตาม

ข) พารามิเตอร์เวลาปิด (Off-Time)

การทดลองปัจจัยประสิทธิภาพโดยการปรับค่าเวลาปิดพบว่า เวลาปิดต่ำจะทำให้ อัตราการสึกหรอต่ำ เนื่องจากพลังงานสะสมต่อหน่วยเวลาขณะถ่ายเทประจุน้อย และยังช่วยในการกำจัดเศษอนุภาคในกระบวนการสปาร์คให้หลุดออกไป ซึ่งผลจากการทดลองยังพบว่าอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดจะสัมพันธ์กันระหว่างเวลาเปิด และเวลาปิด คือช่วงเวลาในการปล่อยกระแสและหยุดการปล่อยกระแสจะต้องสัมพันธ์กัน โดยเวลาปิดที่ 32 และ 100 ไมโครวินาทีจะให้อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดต่ำสุด

ค) ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra)

ผลจากการทดลองปัจจัยประสิทธิภาพจากการปรับเวลาปิดพบว่าปัจจัยประสิทธิภาพมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของผิวงานน้อยมาก โดยอิเล็กโทรดแต่ละชนิดจะให้ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งค่าความหยาบผิวจะลดลงเมื่อปัจจัยประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยค่าความหยาบผิวเฉลี่ยสูงสุดที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 6 เปอร์เซ็นต์ ต่ำสุดที่ 94 เปอร์เซ็นต์

5.1.3 ขั้วอิเล็กโทรดที่เหมาะสม

การทดลองปัจจัยประสิทธิภาพโดยการเปรียบเทียบขั้วอิเล็กโทรดจากการทดลองแล้วจะพบว่าอิเล็กโทรดขั้วลบจะให้อัตราการกัดเนื้องานที่สูงกว่าขั้วบวก ส่วนอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดพบว่าอิเล็กโทรดทองเหลืองและทองแดง ขั้วลบจะมีอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดที่ต่ำกว่าขั้วบวก ส่วนอิเล็กโทรดเหล็กกล้าไร้สนิมและแกรไฟต์ขั้วบวกจะให้อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดต่ำกว่าขั้วลบ นอกจากนี้ขั้วอิเล็กโทรดยังมีผลต่อสภาพผิวของพื้นผิวด้วย โดยพบว่าขั้วลบจะมีสภาพที่กล้ามีสีดำมากกว่าขั้วบวก เนื่องมาจากขณะทำการสปาร์คอยู่นั้น สารที่อยู่ในของเหลวตัวกลางบางส่วน จะกลายเป็นไอโครเจนซึ่งมีประจุเป็นบวก และคาร์บอนซึ่งมีประจุเป็นลบ ดังนั้นเมื่อใช้อิเล็กโทรดเป็นขั้วลบแล้ว คาร์บอนจะวิ่งเข้าจับผิวชิ้นงานซึ่งเป็นขั้วบวก จึงเกิดเป็นรอยสีดำขึ้น

5.1.4 เปรียบเทียบค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของอิเล็กโตรดแต่ละชนิด

ผลจากการทดลองปัจจัยประสิทธิภาพจากการปรับเวลาเปิด และเวลาปิดของอิเล็กโตรด ทั้ง 4 ชนิดพบว่า ปัจจัยประสิทธิภาพมีผลต่อค่าความหยาบผิวเฉลี่ย โดยเวลาเปิดจะให้ค่าความหยาบผิวที่ค่อนข้างแตกต่างกัน ส่วนเวลาปิดให้ค่าความหยาบผิวที่ใกล้เคียงกัน โดยอิเล็กโตรดเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 จะให้ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ต่ำสุดอยู่ที่ 1.545 μm รองลงมาเป็นอิเล็กโตรดทองแดง อิเล็กโตรดแกรไฟต์ส่วนอิเล็กโตรดทองเหลืองให้ค่าความหยาบผิวที่สูงสุดที่ 6.450 μm

5.2 ข้อเสนอแนะ

วัสดุที่นำมาเป็นอิเล็กโตรดควรมีคุณสมบัติด้านการนำไฟฟ้าที่ดี เหมาะแก่การนำมาใช้งานด้านไฟฟ้า และมีจุดหลอมเหลวที่สูง จึงจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานในกระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้าและยังสามารถลดเวลาในการผลิตได้ นอกจากนี้ควรศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกันระหว่างอิเล็กโตรดและชิ้นงานก่อนการปฏิบัติงานทุกครั้ง

จากการศึกษาประสิทธิภาพของอิเล็กโตรดแต่ละชนิดแล้วผู้วิจัยจึงมีความเห็นว่าควรจะใช้อิเล็กโตรดทองแดงในการสปาร์คชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ เนื่องจากมีอัตราการกำจัดเนื้องานที่สูงอยู่ในระดับหนึ่ง แต่มีอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดที่ต่ำมากเมื่อเทียบกับอิเล็กโตรดชนิดอื่นๆ ทั้ง 4 ชนิด ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการใช้งานมากที่สุด

สำหรับอิเล็กโตรดแกรไฟต์เป็นอิเล็กโตรดที่มีอัตราการกำจัดเนื้องานสูงเนื่องจาก อิเล็กโตรดแกรไฟต์เป็นตัวนำความร้อนและไฟฟ้าได้ดีมาก อีกทั้งยังมีจุดหลอมเหลวที่สูงกว่าวัสดุชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ ทำให้เมื่อผ่านกระบวนการอีดีเอ็มจึงมีอัตราการกำจัดเนื้องานที่สูงกว่าวัสดุอิเล็กโตรดชนิดอื่นๆ แต่แกรไฟต์มีข้อเสียคืออิเล็กโตรดที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นอิเล็กโตรดที่ขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีโลหะจึงมีราคาแพง

เอกสารอ้างอิง

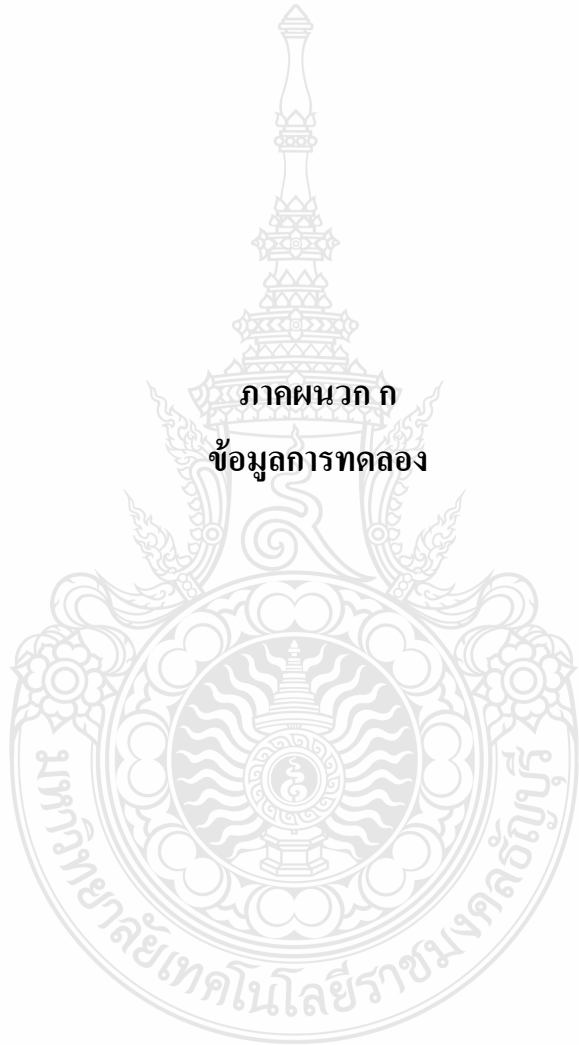
- [1] Thomas, B., **Technology of Electrical Discharge Machining**. Druckerei Helene, 6102 Pfunstste PP 11-53
- [2] E.Bud Guitrau., **The EDM Handbook**. Handser Gardener publication Cincinnati, 1997, PP 19-54.
- [3] อภิวัฒน์ มุตตามระ, ธีรคุณย์ ชื่อตระกูล. 2550. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ “ผลกระทบของอิเล็กโทรด ต่อรอยแตกร้าวขนาดเล็กในทั้งสแตนคาร์ไบด์ด้วยเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า” การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม.
- [4] พจนานุกรมฉบับราชบัณฑิตยสถาน พ.ศ. ๒๕๔๒. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : นานมีบุ๊คส์พับลิเคชั่นส์ จำกัด.2546
- [5] Lien Sheng Mechanical & Electrical Co., LTD, **Instruction Manual Aristech 3D-CNC EDM**. 2. Ta-Li City,2004.
- [6] Soo Hiong Lee and Xiaoping Li. 2003 “**Study of the surface integrity of the machined workpiece in the EDM of tungsten carbide**” Journal of Materials Processing Technology
- [7] ศักดา ฉายพุดชา และคณะ, การศึกษาการสึกหรอของทองแดงที่ได้จากการทำ **Electroforming** ในการกัดแม่พิมพ์โดยวิธี **Electrical Discharge Machining (EDM)**, ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี, 2548.
- [8] อภิวัฒน์ มุตตามระ, อนันต์ เพ็ชรผึ้ง. 2550. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ “การศึกษาการกัดขึ้นรูปโลหะด้วยไฟฟ้าด้วยอิเล็กโทรดหลายชนิด” การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม.
- [9] สุชาติ มั่นหมาย, อนุวัช เครือจันทร์. 2537. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. การศึกษาการสึกหรอของอิเล็กโทรดชนิดแกรไฟต์ ของเครื่อง EDM. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [10]A. A. Khan. 2008. “**Electrode wear and material removal rate during EDM of aluminum and mild steel using copper and brass electrodes**”
- [11]กมลพงศ์ แจ่มกมล .2553. ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี “การเปรียบเทียบประสิทธิภาพอิเล็กโทรดทองแดงแท่งตันและอิเล็กโทรดชุบเคลือบผิวสำหรับกระบวนการกัดเจาะโลหะด้วยไฟฟ้า”
- [12]R.A.Mahdavinejad and A.Mahdavinejad. 2005 “**EDM machining of WC-Co**” Journal of Materials Processing Technology

[13]Kuang-Yuan Kung, Jenn-Tsong Horng and Ko-Ta Chiang. 2009 “**Material removal rate and electrode wear ratio studyon the powder mixed electrical discharge machining of cobalt-bonded tungsten carbide**”

[14]K. Bonny , al. 2009. “**EDM machinability and frictional behavior of ZrO₂-WC composites**”



ภาคผนวก ก
ข้อมูลการทดลอง



ตารางที่ ก.1 ข้อมูลการทดลองอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ปรับค่าเวลาเปิด ขั้วบวก (+)

ลำดับที่	T.ON (μ S)	T.OFF (μ S)	L.Befor (mm)	Duty (%)	Deep (mm)	Time (sec)	EWR+	MRR+
1	2	32	0.660	6	1.00	10.05.00	194	0.011
2	10	32	0.614	24	1.00	4.44.31	159	0.027
3	32	32	0.550	50	1.00	2.34.52	122	0.057
4	100	32	0.602	76	1.00	3.2.44	151	0.043
5	510	32	0.710	94	1.00	6.29.30	245	0.015

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลการทดลองอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ปรับค่าเวลาเปิด ขั้วบวก ขั้วลบ (-)

ลำดับที่	T.ON (μ S)	T.OFF (μ S)	L.Befor (mm)	Duty (%)	Deep (mm)	Time (sec)	EWR-	MRR-
6	2	32	0.554	6	1.00	3.54.11	124	0.037
7	10	32	0.750	24	1.00	47.38	300	0.103
8	32	32	0.825	50	1.00	18.47	471	0.183
9	100	32	0.920	76	1.00	13.02	1150	0.121
10	510	32	0.955	94	1.00	3.10.41	2122	0.005

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลการทดลองอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ปรับค่าเวลาเปิด ขั้วบวก (+)

ลำดับที่	T.ON (μ S)	T.OFF (μ S)	L.Befor (mm)	Duty (%)	Deep (mm)	Time (sec)	EWR+	MRR+
1	32	2	0.553	94	1.00	1.23.20	124	0.105
2	32	10	0.552	76	1.00	1.37.31	123	0.090
3	32	32	0.426	50	1.00	2.17.56	74	0.082
4	32	100	0.584	24	1.00	4.35.22	140	0.030
5	32	510	0.633	6	1.00	6.11.48	172	0.019

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลการทดลองอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ปรับค่าเวลาเปิด ขั้วลบ (-)

ลำดับที่	T.ON (μ S)	T.OFF (μ S)	L. Befor (mm)	Duty (%)	Deep (mm)	Time (sec)	EWR-	MRR-
6	32	2	0.885	94	1.00	10.30	770	0.215
7	32	10	0.904	76	1.00	14.01	942	0.135
8	32	32	0.950	50	1.00	19.19	1900	0.051
9	32	100	0.961	24	1.00	1.07.29	2464	0.011
10	32	510	0.983	6	1.00	3.15.27	5782	0.002

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลการทดลองอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ปรับค่าเวลาเปิด ขั้วบวก (+)

ลำดับที่	T.ON (μ S)	T.OFF (μ S)	L. Befor (mm)	Duty (%)	Deep (mm)	Time (sec)	EWR+	MRR+
1	2	32	0.920	6	1.00	44.35	1150	0.035
2	10	32	0.910	24	1.00	11.24	1011	0.155
3	32	32	0.900	50	1.00	4.29	900	0.438
4	100	32	0.950	76	1.00	5.10	1150	0.190
5	510	32	0.920	94	1.00	12.56	1900	0.122

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลการทดลองอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ปรับค่าเวลาเปิด ขั้วลบ (-)

ลำดับที่	T.ON (μ S)	T.OFF (μ S)	L. Befor (mm)	Duty (%)	Deep (mm)	Time (sec)	EWR-	MRR-
6	2	32	0.550	6	1.00	77.29	122	0.114
7	10	32	0.670	24	1.00	19.24	203	0.334
8	32	32	0.730	50	1.00	9.15	270	0.573
9	100	32	0.850	76	1.00	7.23	567	0.399
10	510	32	0.980	94	1.00	8.09	1700	0.024

ตารางที่ ก.7 ข้อมูลการทดลองอิเล็กทรอนิกส์โทรคทองเหลืองปรับค่าเวลาปิด ขั้วบวก (+)

ลำดับที่	T.ON (μ S)	T.OFF (μ S)	L.Befor (mm)	Duty (%)	Deep (mm)	Time (sec)	EWR+	MRR+
1	32	2	0.960	94	1.00	2.48	2400	0.281
2	32	10	0.910	76	1.00	3.23	1011	0.523
3	32	32	0.880	50	1.00	4.30	733	0.524
4	32	100	0.910	24	1.00	15.20	1011	0.115
5	32	510	0.900	6	1.00	4:06:03	900	0.008

ตารางที่ ก.8 ข้อมูลการทดลองอิเล็กทรอนิกส์โทรคทองเหลืองปรับค่าเวลาปิด ขั้วลบ (-)

ลำดับที่	T.ON (μ S)	T.OFF (μ S)	L.Befor (mm)	Duty (%)	Deep (mm)	Time (sec)	EWR-	MRR-
6	32	2	0.770	94	1.00	7.27	335	0.606
7	32	10	0.750	76	1.00	9.20	300	0.526
8	32	32	0.750	50	1.00	12.11	300	0.403
9	32	100	0.730	24	1.00	35.26	270	0.150
10	32	510	0.680	6	1.00	2:06:01	30	0.050

ตารางที่ ก.9 ข้อมูลการทดลองอิเล็กทรอนิกส์โทรคทองแดงปรับค่าเวลาเปิด ขั้วบวก (+)

ลำดับที่	T.ON (μ S)	T.OFF (μ S)	L.Befor (mm)	Duty (%)	Deep (mm)	Time (sec)	EWR+	MRR+
1	2	32	0.470	6	1.00	5.10.21	89	0.034
2	10	32	0.320	24	1.00	1.56.07	47	0.115
3	32	32	0.220	50	1.00	1.13.57	28	0.207
4	100	32	0.220	76	1.00	1.58.31	28	0.129
5	510	32	0.250	94	1.00	5.40.36	11	0.043

ตารางที่ ก.10 ข้อมูลการทดลองอิเล็กทรอนิกส์โครงคทองแดงปรับค่าเวลาเปิด ขั้วลบ (-)

ลำดับที่	T.ON (μ S)	T.OFF (μ S)	L. Befor (mm)	Duty (%)	Deep (mm)	Time (sec)	EWR-	MRR-
6	2	32	0.18	6	1.00	1.50.27	22	0.146
7	10	32	0.14	24	1.00	42.23	16	0.399
8	32	32	0.12	50	1.00	35.15	14	0.490
9	100	32	0.10	76	1.00	38.23	11	0.461
10	510	32	0.15	94	1.00	2.05.11	18	0.133

ตารางที่ ก.11 ข้อมูลการทดลองอิเล็กทรอนิกส์โครงคทองแดงปรับค่าเวลาเปิด ขั้วบวก (+)

ลำดับที่	T.ON (μ S)	T.OFF (μ S)	L. Befor (mm)	Duty (%)	Deep (mm)	Time (sec)	EWR+	MRR+
1	32	2	0.290	94	1.00	49.27	113	0.282
2	32	10	0.250	76	1.00	1.01.46	45	0.239
3	32	32	0.250	50	1.00	1.22.48	37	0.178
4	32	100	0.230	24	1.00	2.08.28	25	0.118
5	32	510	0.020	6	1.00	3.11.21	10	0.101

ตารางที่ ก.12 ข้อมูลการทดลองอิเล็กทรอนิกส์โครงคทองแดงปรับค่าเวลาเปิด ขั้วลบ (-)

ลำดับที่	T.ON (μ S)	T.OFF (μ S)	L. Befor (mm)	Duty (%)	Deep (mm)	Time (sec)	EWR-	MRR-
6	32	2	0.200	94	1.00	23.33	30	0.667
7	32	10	0.170	76	1.00	23.31	19	0.693
8	32	32	0.160	50	1.00	26.59	20	0.611
9	32	100	0.160	24	1.00	1.08.31	25	0.241
10	32	510	0.100	6	1.00	2.35.27	39	0.114

ตารางที่ ก.13 ข้อมูลการทดลองอิเล็กทรอนิกส์โทรดแกรไฟต์ปรับค่าเวลาเปิด ขั้วบวก (+)

ลำดับที่	T.ON (μ S)	T.OFF (μ S)	L. Befor (mm)	Duty (%)	Deep (mm)	Time (sec)	EWR+	MRR+
1	2	32	0.876	6	1.00	45.08	706	0.054
2	10	32	0.831	24	1.00	30.33	492	0.109
3	32	32	0.818	50	1.00	24.34	449	0.146
4	100	32	0.892	76	1.00	20.44	826	0.102
5	510	32	0.921	94	1.00	23.30	1166	0.066

ตารางที่ ก.14 ข้อมูลการทดลองอิเล็กทรอนิกส์โทรดแกรไฟต์ปรับค่าเวลาเปิด ขั้วลบ (-)

ลำดับที่	T.ON (μ S)	T.OFF (μ S)	L. Befor (mm)	Duty (%)	Deep (mm)	Time (sec)	EWR-	MRR-
6	2	32	0.720	6	1.00	10.44	257	0.512
7	10	32	0.623	24	1.00	6.10	165	1.201
8	32	32	0.735	50	1.00	4.52	277	1.070
9	100	32	0.852	76	1.00	4.24	576	0.661
10	510	32	0.930	94	1.00	4.10	1329	0.330

ตารางที่ ก.15 ข้อมูลการทดลองอิเล็กทรอนิกส์โทรดแกรไฟต์ปรับค่าเวลาเปิด ขั้วบวก (+)

ลำดับที่	T.ON (μ S)	T.OFF (μ S)	L. Befor (mm)	Duty (%)	Deep (mm)	Time (sec)	EWR+	MRR+
1	32	2	0.788	94	1.00	42.40	372	0.098
2	32	10	0.736	76	1.00	20.25	279	0.254
3	32	32	0.734	50	1.00	22.18	276	0.234
4	32	100	0.846	24	1.00	30.20	549	0.100
5	32	510	0.906	6	1.00	1.04.32	964	0.029

ตารางที่ ก.16 ข้อมูลการทดลองอิเล็กโตรดแกรไฟต์ปรับค่าเวลาปิด ขั้วลบ (-)

ลำดับที่	T.ON (μ S)	T.OFF (μ S)	L. Befor (mm)	Duty (%)	Deep (mm)	Time (sec)	EWR-	MRR-
6	32	2	0.817	94	1.00	5.30	446	0.654
7	32	10	0.790	76	1.00	4.50	376	0.853
8	32	32	0.800	50	1.00	4.45	400	0.827
9	32	100	0.818	24	1.00	4.28	449	0.800
10	32	510	0.820	6	1.00	22.05	456	0.160

ตารางที่ ก.17 ข้อมูลการวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ของผิวงานหลังการทดลองด้วยอิเล็กโตรดทั้ง 4 ชนิด โดย ปรับปัจจัยประสิทธิภาพจากค่าเวลาเปิด (On-time)

Duty	ทองเหลือง On-time		ทองแดง On-time		เหล็กกล้าไร้สนิม On-time		แกรไฟต์ On-time	
	Cu-Zn (+)	Cu-Zn (-)	Cu (+)	Cu (-)	Stainless(+)	Stainless (-)	Graphite (+)	Graphite (-)
6	2.234	2.158	2.010	1.826	1.545	1.555	2.042	1.787
24	2.821	2.774	2.694	2.337	1.920	1.615	2.462	2.198
50	3.278	3.646	3.236	2.997	2.600	2.160	3.330	2.952
76	5.110	4.882	3.840	3.550	5.050	2.424	4.847	3.784
94	6.450	6.190	4.948	4.576	5.542	4.263	5.689	5.331

หน่วยการวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (ไมโครเมตร : μ m)

ตารางที่ ก.18 ข้อมูลการวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ของผิวงานหลังการทดลองด้วยอิเล็กโตรดทั้ง 4 ชนิด โดย ปรับปัจจัยประสิทธิภาพจากค่าเวลาเปิด (On-time)

Duty	ทองเหลือง Off-time		ทองแดง Off-time		เหล็กกล้าไร้สนิม Off-time		แกรไฟต์ Off-time	
	off-time (+)	off-time (-)	off-time (+)	off-time (-)	off-time (+)	off-time (-)	off-time (+)	off-time (-)
6	4.796	4.418	4.245	4.110	3.882	3.661	4.231	3.998
24	3.924	3.993	3.702	3.884	3.334	3.656	3.548	3.554
50	3.447	3.367	3.370	2.963	2.932	3.180	3.010	2.980
76	2.649	2.567	3.167	2.573	2.101	2.220	2.340	2.085
94	2.463	2.188	2.321	2.812	1.882	1.726	1.998	1.910

ตารางที่ ก.19 ข้อมูลการทดลองอัตราการขจัดเนื้องาน (MRR) ของอิเล็กโทรดทั้ง 4 ชนิด โดยปรับ

ปัจจัยประสิทธิภาพ จากค่าเวลาเปิด (On-time)

Duty	sus 304 +	sus 304 -	cu +	cu -	cu-zn +	cu-zn -	Gr +	Gr -
6	0.011	0.037	0.034	0.146	0.035	0.114	0.054	0.512
24	0.027	0.103	0.115	0.399	0.155	0.334	0.109	1.201
50	0.057	0.183	0.207	0.490	0.438	0.573	0.146	1.070
76	0.043	0.121	0.129	0.461	0.190	0.399	0.102	0.661
94	0.015	0.005	0.043	0.133	0.122	0.024	0.066	0.330

ตารางที่ ก.20 ข้อมูลการทดลองอัตราการขจัดเนื้องาน (MRR) ของอิเล็กโทรดทั้ง 4 ชนิด โดยปรับ

ปัจจัยประสิทธิภาพ จากค่าเวลาปิด (Off-time)

Duty	SUS 304 +	SUS 304 -	Cu +	Cu -	Cu-Zn +	Cu-Zn -	Gr +	Gr -
94	0.105	0.215	0.282	0.667	0.281	0.606	0.098	0.654
76	0.090	0.135	0.239	0.693	0.523	0.526	0.254	0.853
50	0.082	0.051	0.178	0.611	0.524	0.403	0.234	0.827
24	0.030	0.011	0.118	0.241	0.115	0.150	0.100	0.800
6	0.019	0.002	0.101	0.114	0.008	0.050	0.029	0.160

ตารางที่ ก.21 ข้อมูลการทดลองอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR) ของอิเล็กโทรดทั้ง 4 ชนิด

โดยปรับปัจจัย ประสิทธิภาพ จากค่าเวลาเปิด (On-time)

Duty	sus 304 +	sus 304 -	cu +	cu -	cu-zn +	cu-zn -	Gr +	Gr -
6	194	124	89	22	1150	122	706	257
24	159	300	47	16	1011	203	492	165
50	122	471	28	14	900	270	449	277
76	151	1150	28	11	1150	567	826	576
94	245	2122	11	18	1900	1700	1166	1329

ตารางที่ ก.22 ข้อมูลการทดลองอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR) ของอิเล็กโทรดทั้ง 4 ชนิด โดยปรับปัจจัย ประสิทธิภาพจากค่าเวลาปิด (Off-time)

Duty	sus 304 +	sus 304 -	cu +	cu -	cu-zn +	cu-zn -	Gr +	Gr -
94	124	770	113	30	2400	335	372	446
76	123	942	45	19	1011	300	279	376
50	74	1900	37	20	733	300	276	400
24	140	2464	25	25	1011	270	549	449
6	172	5782	10	39	900	30	964	456





ภาคผนวก ข
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

Proceedings

IE NETWORK CONFERENCE 2010

การประชุมวิชาการสายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม 2553

13-15 ตุลาคม 2553

โรงแรมสุนีย์แกรนด์ แอนด์ คอนเวนชันเซ็นเตอร์
จังหวัดอุบลราชธานี



ผู้ทรงคุณวุฒิในการพิจารณาบทความ



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศ.ดร.ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ
ผศ.ดร.เหรียญ บุญดีสกุลโชค
รศ.ดำรงค์ ทวีแสงสกุลไทย
รศ.ดร.ปารเมศ ชูติมา
รศ.จิรพัฒน์ เงามประเสริฐวงศ์
ผศ.ประเสริฐ อัครประถมพงศ์
ผศ.ดร.ดาริชา สุธีวงศ์
ผศ.ดร.นภัสสวงศ์ โอสถศิลป์
ผศ.ดร.ประมวล สุธีจาร์วัฒน์

ผศ.ดร.วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ
ผศ.ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิดเจริญ
ผศ.ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร
ผศ.ดร.สิริง ปรีชานนท์
ดร.ณัฐชา ทวีแสงสกุลไทย
อ.ภูมิ เหลืองจามีกร
อ.สุรพงษ์ ศิริกุลวัฒนา
ผศ.ดร.มานพ เรี่ยวเดชะ

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ดร.ชัชพันธ์ ชำญาคติ
ผศ.ดร.รุ่งรัตน์ ภิสิทธิ์เพ็ญ
ดร.จันทร์ศิริ สิงห์เถื่อน
ดร.วรวิมล หวังวัชรกุล

ดร.สุวิษกรณ์ วิชกุล
ดร.จักรพันธ์ อร่ามพงษ์พันธ์
ดร.นันทชัย กานตานันทะ

มหาวิทยาลัยเกษตรมบัณฑิต

ดร.ศักดิ์ชาย รักการ

ผศ.ชานนท์ มูลวรรณ

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ดร.กรกฎ ไบบัวเทศ
ดร.วรพจน์ เสรีรัฐ
ผศ.ดร.วิสนัย วรธนัจฉริยา
ผศ.ดร.วิชัย ฉัตรทินวัฒน์
ผศ.ดร.วิมลสิน เหล่าศิริถาวร

ผศ.ดร.ศักดิ์เกษม ระมิงค์วงศ์
ผศ.ดร.อภิชาติ โสภาแดง
ผศ.ดร.อรรถพล สมุทรคุปต์
ผศ.สันติชัย ชิวสุทธิศิลป์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ดร.ปภากร สุนานนท์
ดร.พงษ์ชัย จิตตะมัย

ผศ.ดร.พรศิริ จงกล
ผศ.ดร.ยงยุทธ เสริมสุธีอนุวัฒน์

ญ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ดร.กฤษดา อัครรุ่งแสงกุล
ดร.กฤษดา พิมพันธ์ศรี
ดร.ธีรเดช วุฒิพรพันธ์
ดร.วิชัย รุ่งเรืองอนันต์

ผศ.สมชาย พรชัยวิวัฒน์
รศ.ดร.อรรณกร เก่งพล
รศ.สมเกียรติ จงประสิทธิ์พร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ผศ.ดร.ณฐา คุปต์ชัยเยียร
ดร.ระพี กาญจนะ
ผศ.ดร.ศิวกร อ่างทอง

ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์
ดร.ศิริชัย ต่อสกุล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

ผศ.พิเชษฐ์ เวศนารัตน์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ดร.สุพรรณ สุตสนธิ์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ดร.จิรวรรณ คล้อยภยันต์
ดร.วุฒิชัย วงษ์ทักษิณีย์กร
ผศ.ดร.วรารัตน์ กังสัมฤทธิ์
ผศ.ดร.สวัสดิ์ ภาชนะราช
ผศ.ดร.เสมอจิตร์ หอมรสสุคนธ์

ผศ.ดร.อภิวัฒน์ มุตตามระ
ผศ.นริศ เจริญพร
รศ.ดร.ตรีทศ เหล่าศิริหงษ์ทอง
รศ.ดร.มณฑล ศาสนนันท์
รศ.ดร.ศุภชัย สุรพันธ์

มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์

ดร.ณัฐพัชร์ อารีรัชกุลกานต์
ผศ.ดร.ชัยพล มงคลิก

ผศ.ดร.ปัญญา พิทักษ์กุล
ผศ.ดร.ศุภรัชชัย วรรัตน์

มหาวิทยาลัยบูรพา

ดร.จักรวาล คุณะติลก
ดร.ฤกษ์วัลย์ จันทร์สา

ผศ.ดร.บรรหาญ ลีลา
รศ.เกษม พิพัฒน์ปัญญาอนุกุล

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ดร.เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป
ดร.บพิธ บุปผโชติ

ดร.สุดสาคร อินธิเดช
ดร.อรอุมา ลาสุนนท์

มหาวิทยาลัยรามคำแหง

ผศ.ดร.กฤษดา พิศลยบุตร

มหาวิทยาลัยรังสิต

ดร.พิษณุ มนัสปิติ
ผศ.ดร.ธนวรรณ อัครไพบูลย์
ผศ.ดร.เพียงจันทร์ จริงจิตร

ผศ.สินี สุขกรมใส
อ.ศิลาชัย วัฒนเสย

มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี

อ.กัม พรประเสริฐ
อ.นัทธพงศ์ นันทสำเริง

อ.เดชโสภณ ถนอมสุข
ดร.คณอเคลีย วจนะวิชาการ

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ดร.พงษ์เพ็ญ จันทนะ
ดร.วราธร ปัญญาภาม
ดร.สิริเดช ซาตินิยม

ผศ.ดร.ทศพล เกียรติเจริญผล
ผศ.ดร.นิลวรรณ ชุ่มฤทธิ์
อ.อนุวัฒน์ จุติลาภาวาร

มหาวิทยาลัยศรีปทุม

ดร.ชรีณี มณีศรี
อ.จักรพันธ์ กัณหา
อ.ชวลิต มณีศรี
อ.ธนิน ศรีวะระมย์

อ.พัฒน์พงศ์ อริยสิทธิ์
อ.พิสุทธิ์ รัตนแสนวงษ์
อ.วราพจน์ พันธุ์คง
อ.สุพัฒตรา เกษราพงศ์

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ดร.ณัฐพล ศิริสว่าง
ผศ.ดร.ประจวบ กล่อมจิตร
ผศ.วันชัย สีสากวิวงศ์

ผศ.จันทร์เพ็ญ อนุรัตนานนท์
ผศ.ปฏิพัทธ์ หงษ์สุวรรณ

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ผศ.ดร.กลางเดือน โพนนา
ผศ.ดร.ชเนศ รัตนวิไล
ผศ.ดร.รัฐชนา สินธวาลัย
ผศ.ดร.สุภาพรรณ ไชยประพัทธ์
อ.เสกสรร สุธรรมานนท์

ผศ.ดร.อรุณ สังขพงศ์
รศ.ดร.นิกร ศิริวงศ์ไพศาล
รศ.วนิดา รัตนมณี
รศ.สมชาย ชูโณม

มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย

อ.จิตลดา ชัมเจริญ
อ.ทองศักดิ์ ทวีศรี
อ.นิศากร สมสุข

อ.อรอุมา กอสนาน
อ.อัญชลี สุพิทักษ์

สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

ผศ. ประยูร สุรินทร์

ผศ.ชัยพฤกษ์ อากาศเวท

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ดร.วิภู ศรีสืบสาย
ดร.อนิรุท ไชยจรรวนิช
ดร.อุดม จันทรจรัสสุข
ผศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ
ผศ.ดร.สกันธ์ คล่องบุญจิต

ผศ.ดร.สรรพสิทธิ์ ลิ้มบรรดินัน
ผศ.ดร.สิทธิพร พิมพ์สกุล
รศ.ดร.ฤดี มาสุจันทร์
รศ.พรศักดิ์ อรรถวานิช

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ผศ.ดร.สมบัติ สินธุเชาวน์
ผศ.ดร.ระพีพันธ์ ปิตาคะโส
ผศ.ดร.คณิศร ภูนิคม
ผศ.เจริญ ชุมมวล
ผศ.ดร.นลิน เพียรทอง
ผศ.ดร.นุชสรา เกรียงกรกฎ
ผศ.ดร.ปรีชา เกรียงกรกฎ
ผศ.สุรียา โชคสวัสดิ์
ผศ.อิศว ปัทมธรรมกุล

ผศ.ดร.สุขอังคณา ลี
อ.ไท แสงเทียน
ดร.จริยาภรณ์ อุ่นวงศ์
อ.ตะวันฉาย โพธิ์หอม
ดร.สันต์ โอพาพิริยกุล
ดร.ธารชูดา พันธุ์นิกุล
อ.ลลอง ฝโลดม
อ.สุรเชษฐ์ ก้อนจันทร์

		หน้า
MEG 16	การปรับปรุงประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักร ในกระบวนการผลิตอิฐทนไฟ รัฐกร อุดมสุข และ สมชาย พัวจินดาเนตร*	124
MEG 17	อิทธิพลของสภาวะการตัดเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 304 ด้วย เลเซอร์ที่มีผลต่อความเรียบผิว นรา บุรีพันธ์* และ ศิวกร อย่างทอง	125
MEG 18	การปรับปรุงกระบวนการแปรรูปซาจีนโดยใช้พลังงานน้ำ ขับเคลื่อน สมหมาย สารมาท* และ พุทสายัน นราพินิจ	126
MEG 19	การศึกษาประสิทธิภาพของแหล่งอิเล็กทรอนิกส์ในการฮีตเอ็ม ทั้งสแตนด์บาย รัตติกรณ์ เสาร์แดน* และ ศิริชัย ต่อสกุล	127
MEG 20	การพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องจักรอุตสาหกรรม โดยใช้เครื่องกัดชิ้นงานโลหะเป็นกรณีศึกษา เลิศเลขา ธนะชัยพันธ์* และ บุญส่ง คำอ่อน และ วิศรุต ศรีรัตน์	128
MEG 21	วิธีการอย่างง่ายเพื่อประยุกต์ใช้งานหุ่นยนต์แขนกลขั้นสูง กรณีศึกษาของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม เกรียงไกร ไวยกาญจน์*	129
MEG 22	การศึกษาและวิเคราะห์ความแข็งแรงการยึดเกาะของตัวห่นวง ชนิดอ่อนในกระบวนการติด จิระพล ศรีเสวีรุผล* และ วรงค์ พึ่งพิพัฒน์	130
MEG 23	พัฒนาระบบวัดการพ้องเสียงสำหรับแขนจับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ด้วย LabVIEW® จิระพล ศรีเสวีรุผล* และ เฉลิม บุญโชติ	131

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล	นางสาวรัตติกรณ์ เสาร์แดน
วัน เดือน ปีเกิด	27 กันยายน 2524
ที่อยู่	170/2 ม.5 ต.น้ำรัด อ.หนองม่วงไข่ จ.แพร่ 54170
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม อุตสาหกรรม จากมหาวิทยาลัยธนบุรี เมื่อ พ.ศ. 2550

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

รัตติกรณ์ เสาร์แดน และคณะ, “การศึกษาประสิทธิภาพของแหล่งอิเล็กทรอนิกส์ในการอัดเต็มถังสแตนคาร์ไบด์,” การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม 2010, 13-15 ตุลาคม 2553, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2553. หน้า 127.

