

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการชุบทองแดงลงบนกราฟต์อิเล็กโทรดสำหรับกระบวนการ
กัดเซาะโลหะด้วยตัวนำไฟฟ้า

ณัฐวุฒิ จินดาลัทธ

TNI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

บัณฑิตวิทยาลัย สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรม

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

ปีการศึกษา 2562

OPTIMIZATION OF COPPER ELECTROPLATING PROCESS ONTO GRAPHITE ELECTRODE
APPLIED FOR ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING PROCESS

Nattawut Chindaladdha

TNI

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
For the Degree of Master of Engineering Program in Engineering Technology

Graduate School

Thai-Nichi Institute of Technology

Academic Year 2019

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการชุบทองแดงลงบน
กราไฟต์อิเล็กโทรดสำหรับกระบวนการกัดโลหะด้วยตัวนำ
ไฟฟ้า

โดย

ณัฐวุฒิ จินดาลัทธ

สาขาวิชา

เทคโนโลยีวิศวกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ดร. ดอน แก้วดก

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. พิชิต สุขเจริญพงษ์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต สุขสวัสดิ์)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิโรช ทศนะ)

..... กรรมการ

(ดร. ไพศาล สุทวีชัย)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ดร. ดอน แก้วดก)

ณัฐวุฒิ จินดาลัทธ: การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการชุบทองแดงลงบนกราไฟต์
อิเล็กโทรดสำหรับกระบวนการกัดโลหะด้วยตัวนำไฟฟ้า. อาจารย์ที่ปรึกษา : ดร.ดอน
แก้วดก, 68 หน้า.

กระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยตัวนำไฟฟ้า(EDM) เป็นกระบวนการขึ้นรูปที่เหมาะสมกับงานที่ไม่สามารถขึ้นรูปได้ด้วยวิธีการทั่วไป โดยมีตัวนำไฟฟ้าหรืออิเล็กโทรดเป็นตัวกำหนดรูปร่างชิ้นงาน วัสดุที่นิยมนำมาทำคือ กราไฟต์ และ ทองแดง กราไฟต์เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติทนทานต่อการเสีรูปที่เกิดจากอุณหภูมิสูงได้ดี แต่มีค่าการนำไฟฟ้าต่ำกว่าทองแดง จึงเกิดแนวความคิดในการใช้วัสดุที่ผสมระหว่างทองแดงและกราไฟต์ขึ้น ทว่าต้นทุนของวัสดุผสมนั้นค่อนข้างสูง และเข้าถึงได้ยาก จึงเกิดการพัฒนาแนวทางการเคลือบฟิล์มทองแดงบนผิวของอิเล็กโทรดกราไฟต์ขึ้น เพื่อลดต้นทุนและเข้าถึงได้ง่าย ในการวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวแปรในการชุบไฟฟ้าเคมีที่ส่งผลต่อความเรียบของทองแดงบนผิวกราไฟต์ รวมทั้งค่าอัตราการสึกของอิเล็กโทรดและความเรียบผิวของชิ้นงานในกระบวนการ EDM โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ Taguchi grey relational analysis และเลือกใช้ Taguchi orthogonal array L8 เข้ามาช่วยในการออกแบบ โดยทำการชุบผิวทองแดงด้วยเวลาในการชุบ 3 และ 5 ชั่วโมง ความเข้มข้นของสารละลาย 0.5 และ 1 Mol ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการชุบ 3.7 และ 5.4 A/dm² โดยค่าตัวแปรในการชุบที่เหมาะสมที่สุดคือ เวลาในการชุบ 5 ชั่วโมง ความเข้มข้นสารละลาย 0.5 Mol และ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5.4 A/dm² และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์กับอิเล็กโทรดจากทองแดงและกราไฟต์แล้ว ความเรียบผิวชิ้นงานที่ออกมาอยู่ในระดับเดียวกับทองแดง ทว่าอัตราการสึกของอิเล็กโทรดยังคงมากกว่าอิเล็กโทรดทองแดง ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงเสนอแนะแนวทางการปรับปรุงการชุบโดยการเปลี่ยนสารละลายที่ใช้ และเสนอแนวทางการตรวจสอบคุณภาพของอิเล็กโทรดที่ผ่านการชุบโดยไม่ต้องทดลองกัดชิ้นงานจริง

NATTAWUT CHINDALADDHA : OPTIMIZATION OF COPPER ELECTROPLATING
PROCESS ONTO GRAPHITE ELECTRODE APPLIED FOR ELECTRICAL DISCHARGE
MACHINING PROCESS. ADVISOR : DR. DON KAEWDOOK, 68 PP.

Electrical discharge machining (EDM) is the machining process for works that cannot be machined by conventional methods. The shape of workpiece will be determined by tool electrode shape. Copper and graphite were mostly used for creating electrode. Copper is well know for its electric conductivity which required for god electrode. However due to its thermal expansion is also high. It cannot handle heavy duties. For graphite, it had low thermal expansion, making it capable for heavy duties. However it's still lack the electric conductivity to produce best surfaces. And the composite of copper-graphite is also expensive. The idea of copper electroplating onto graphite is used to create cheaper and affordable copper-graphite composite electrode. In this research aims for optimization of electroplating parameters which have effect on plating surface roughness, workpiece's surface roughness and tool wear rate. Taguchi grey relational analysis was selected for designing the experiment and Taguchi orthogonal array L8 was used for experiment conditions. The electroplating parameters were electroplating time of 3 and 5 hours, electrolyte concentration of 0.5 and 1.0 Mol, current density of 3.7 and 5.4 A/dm². Which the optimal conditions is 5 hours plating time, 0.5 Mol of concentration and current density of 5.4 A/dm². When comparing the optimal condition with copper and graphite electrode. The workpiece's SR is on the same level as copper, however the TWR is still inferior to copper. Researcher suggest the alternative electrolyte in electroplating and alternative electrode quality checking process.

Graduate School

Student's Signature

Field of Engineering of Technology

Advisor's Signature

Academic Year 2019

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีนั้น ด้วยการให้คำปรึกษาจากท่านอาจารย์ ดร. ดอน แก้วดก ท่านอาจารย์ได้สั่งสอน ให้ความรู้ และสนับสนุนในงานวิจัยครั้งนี้ ขอขอบคุณท่านอาจารย์ทุกท่าน ที่ได้ให้แนวความคิด ความคิดเห็นต่างๆ ตรวจสอบข้อบกพร่อง จึงใคร่ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูงเอาไว้ ณ ที่นี้

นอกจากนี้ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ พนักงานบริษัท มิซูบิชิ และ บริษัท วายเคเค ทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุนในการดำเนินการและช่วยเหลือด้านต่างๆในการทำงานวิจัยครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณบิดา มารดา เพื่อน ที่ให้กำลังใจและสนับสนุนให้ข้าพเจ้ามาศึกษาจนสำเร็จการศึกษาในครั้งนี้

ณัฐวุฒิ จินดาลัทธ

TNI

THAI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฌ
สารบัญรูป	ฉ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.5 แผนงานและระยะเวลาในการดำเนินงาน	3
2 หลักการพื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 หลักการพื้นฐาน	4
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17
3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	19
3.1 กระบวนการวิจัย	19
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	21
3.3 ขั้นตอนการทดลอง	25
4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล	32
4.1 ผลการทดลองการชุบ	32
4.2 ผลการทดลองการกัดขึ้นงาน	37
4.3 การหาค่าที่ดีที่สุดและการยืนยันผล	47

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	52
5.1 สรุปผลการวิจัย	52
5.2 ข้อเสนอแนะ	52
บรรณานุกรม	54
ภาคผนวก	58
ภาคผนวก ก. บันทึกการวัดผลการชุบ ความเรียบผิวจากการชุบ	
ความหนาชั้นทองแดง	59
ภาคผนวก ข. บันทึกการวัดการกัดชิ้นงานอัตราการสึก.....	62
ภาคผนวก ค. การป้อนค่า M-PACK ในเครื่อง E.....	65
ประวัติย่อผู้วิจัย	68

TNI

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 สรุปแผนงานและระยะเวลาในการดำเนินงาน	3
2.1 การตั้งค่าเครื่อง EDM	6
2.2 ค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุดิบที่นิยมนำมาทำอิเล็กทรอนิกส์	8
2.3 ค่าจุดหลอมเหลวของวัสดุดิบที่นิยมนำมาทำอิเล็กทรอนิกส์	8
2.4 ตารางTaguchi orthogonal array L8 (2^3)	12
3.1 เงื่อนไขตัวแปรการชุบผิวทองแดงลงบนกราไฟต์	26
3.2 การตั้งค่า EDM ใน E-condition	28
3.3 M-Pack Parameters	30
4.1 ความเรียบผิวของอิเล็กทรอนิกส์หลังจากชุบ	32
4.2 Taguchi signal-noise ratio ของความเรียบผิวงานชุบ	34
4.3 ค่าเฉลี่ยของ S/N Ratio ของตัวแปรการชุบที่ส่งผลแต่ละตัวในทุกระดับ	34
4.4 เปรียบเทียบผลการทดลองกับค่าทำนาย Taguchi	36
4.5 ผลการทดลองยืนยันผลการทำนายความเรียบผิวจากการชุบ	36
4.6 ผลการทดสอบหาค่า t ของการทดลองยืนยันผล	37
4.7 ความเรียบผิวของชิ้นงาน	39
4.8 อัตราการสึกของอิเล็กทรอนิกส์	41
4.9 Taguchi signal-noise ratio ของการกัดชิ้นงาน	42
4.10 ค่าบรรทัดฐานของ S/N Ratio	43
4.11 ค่าเบี่ยงเบนลำดับของ S/N Ratio	43
4.12 ค่า GRC และค่า GRG ของผลการทดลอง	44
4.13 ค่าเฉลี่ย GRG และลำดับผลกระทบของตัวแปร	45
4.14 เปรียบเทียบผลการทดลองกับค่าที่ดีที่สุด	47
4.15 ค่ากลางการทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบ	47
4.16 ผลการทดลองค่ากลางของชุดตัวแปร	48
4.17 ผลการทดลองค่าที่เหมาะสมทั้ง3กระบวนการ	48
4.18 ผลการทดลองค่า utility และ S/N Ratio.....	49
4.19 เปรียบเทียบผลการทดลองกับอิเล็กทรอนิกส์ทองแดงและกราไฟต์.....	50
ก.1 ผลการวัดความเรียบผิวจากการชุบผิวทองแดงในขั้นตอนการชุบ	60

สารบัญตารางต่อ

ตาราง	หน้า
ก.2 ผลการวัดความหนาชั้นผิวในขั้นตอนการชุบ	61
ข.1 ผลการคำนวณอัตราการสึกของอิเล็กโทรด	63
ค.1 Input ของการทดสอบอิเล็กโทรดชุบผิวทองแดง	65
ค.2 Input ของการทดสอบอิเล็กโทรดกราไฟต์	66
ค.3 Input ของการทดสอบอิเล็กโทรดทองแดง	67



สารบัญรูป

รูป	หน้า
2.1 เครื่อง Surface roughness tester	9
2.2 ภาพตัวอย่างกราฟการวัดความหยาบเฉลี่ยของพื้นผิวตามอนุกรมเลขคณิต	10
2.3 การชุบทองแดง	11
3.1 กระบวนการทำการทดลอง	20
3.2 เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง	21
3.3 เครื่องกวนสารอัตโนมัติ	21
3.4 การไหลเวียนของสารโดยใช้เครื่อง Magnetic Mixer	22
3.5 เครื่องตรวจวัด Surface roughness ที่ใช้ในการทดลอง	22
3.6 ไมโครมิเตอร์และการใช้ไมโครมิเตอร์ตรวจวัด(a,b)	23
3.7 เครื่อง EDM ที่ใช้ในการทดลอง	23
3.8 เครื่องมือวัด Dial gauge ที่ใช้ในการทดลอง	24
3.9 การใช้ไดอัลเกจตรวจสอบความขนานของผิวอิเล็กทรอนิกส์กับผิวชิ้นงาน	25
3.10 การชุบหัวอิเล็กทรอนิกส์ด้วยทองแดง	26
3.11 หน้าต่างโปรแกรม ESPER ของเครื่องจักร EDM	28
3.12 หน้าต่าง M-Pack ในโปรแกรม ESPER	30
3.13 การวัดความเรียบผิว	31
4.1 ผิวอิเล็กทรอนิกส์หลังจากการชุบทั้ง 8 เงื่อนไข(a,b,c,d,e,f,g,h)	33
4.2 กราฟความสัมพันธ์ของค่า S/N Ratio ค่าความเรียบผิว กับตัวแปรแต่ละตัว (a,b) ..	35
4.3 พื้นผิวชิ้นงานจากการกัดด้วยอิเล็กทรอนิกส์ทั้ง 8 เงื่อนไข(a,b,c,d,e,f,g,h)	38
4.4 สภาพการสึกของอิเล็กทรอนิกส์หลังจากใช้งานทั้ง 8 เงื่อนไข(a,b,c,d,e,f,g,h)	40
4.5 ค่า Grey relational grade ในทุกระดับของตัวแปรแต่ละตัว(a,b,c)	46
4.6 เปรียบเทียบผิวชิ้นงานจากการกัดด้วยอิเล็กทรอนิกส์จากเงื่อนไขที่ดีที่สุด(a,b,c)	50
4.7 สภาพผิวอิเล็กทรอนิกส์จากเงื่อนไขที่ดีที่สุดหลังจากใช้งาน	51
5.1 ผิวทองแดงลอกตัวขณะใช้งาน	53

บทที่ 1

บทนำ

1.1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการใช้งานเครื่องจักร Electric Discharge Machine(EDM) ในอุตสาหกรรมโลหะถูกใช้อย่างแพร่หลาย โดยส่วนใหญ่ใช้ในงานต่าง ๆ ที่ไม่สามารถใช้วิธีการผลิตโดยทั่วไปได้เช่นการผลิตแม่พิมพ์เหรียญกษาปณ์ แม่พิมพ์วงจรอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น เครื่องจักร EDM ทำงานโดยการปล่อยกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัสดุที่เป็นตัวนำไฟฟ้าสองชิ้น ได้แก่ ชิ้นงานและอิเล็กโทรด ส่งผลให้เนื้อชิ้นงานถูกกัดเซาะด้วยไฟฟ้า เกิดเป็นรูปทรงตามอิเล็กโทรด ทำให้อิเล็กโทรดเป็นสิ่งสำคัญต่อผลิตภัณฑ์จากกระบวนการ EDM

ในการผลิตอิเล็กโทรดนั้นจะทำด้วยกระบวนการขึ้นรูปทั่วไป โดยอิเล็กโทรดนั้นทำมาจากวัสดุที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ดีไม่ว่าจะเป็นโลหะหรืออโลหะ เช่น กราไฟต์ และ ทองแดง ซึ่งการใช้กราไฟต์เป็นวัสดุทำอิเล็กโทรดนั้น ผลที่ได้รับคืออิเล็กโทรดที่สามารถใช้งานหนักได้เนื่องจากกราไฟต์มีความทนทานต่อการเสีรูปจากอุณหภูมิในการใช้งานสูง ทว่าความสามารถในการกัดให้ได้พื้นผิวที่เรียบนั้น ไม่สามารถทำได้ดีเท่าอิเล็กโทรดจากโลหะอย่างทองแดง และถ้าหากทำอิเล็กโทรดจากกราไฟต์ผสมโลหะ ในปัจจุบันมีต้นทุนในด้านเทคโนโลยีการสร้างวัสดุผสมกราไฟต์และโลหะสูง และเข้าถึงได้ยาก ทำให้ไม่คุ้มค่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การปรับเปลี่ยนชนิดของหัวอิเล็กโทรดระหว่างการใช้งาน โดยเมื่อเปรียบเทียบต้นทุนในการขึ้นรูปอิเล็กโทรดโลหะเช่น ทองแดง ในงานที่ต้องการความละเอียดสูงทำให้มีต้นทุนสูงมากนั้น เมื่อนำต้นทุนมาเปรียบเทียบกับ การขึ้นรูปด้วยกราไฟต์แล้ว ถือว่าไม่คุ้มค่า เนื่องจากปัจจัยที่ตามมาจากการใช้งาน เช่น การเสีรูปจากการใช้งาน แม้ว่าต้นทุนในด้านวัตถุดิบของกราไฟต์จะสูงกว่าทองแดงก็ตาม

ในกระบวนการ EDM ค่าการนำไฟฟ้าของอิเล็กโทรดที่ส่งผลต่อความเรียบผิวชิ้นงานนั้น จะใช้ค่าการนำไฟฟ้าจากวัสดุที่เป็นพื้นผิวนอกสุดของอิเล็กโทรดก่อนเสมอ ดังนั้นจึงเกิดแนวคิดในการเคลือบผิวทองแดงลงบนกราไฟต์ จึงเป็นที่มาของการทำงานวิจัยในการชุบทองแดงลงบนผิว กราไฟต์อิเล็กโทรดนี้ขึ้นมา

1.2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรในการชุบที่มีผลต่อความเรียบผิวของชิ้นงานชุบไฟฟ้าเคมีของทองแดงบนพื้นผิวกราไฟต์
- 1.2.2 เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรจากการชุบไฟฟ้าเคมีของทองแดงลงบนพื้นผิวกราไฟต์ที่มีผลต่อความเรียบผิวของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการ EDM และอัตราการสึกของกราไฟต์อิเล็กโทรดโดยใช้กราไฟต์อิเล็กโทรดที่ผ่านการชุบไฟฟ้าเคมีด้วยทองแดงบนพื้นผิวในกระบวนการ EDM

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 กราไฟต์ที่นำมาชุบเป็นเกรด EDM3 ยี่ห้อ POCO
- 1.3.2 ใช้สารละลาย CuSO_4 ในกระบวนการชุบทองแดงที่มีความบริสุทธิ์ 99.9% ลงบนผิว กราไฟต์
- 1.3.3 ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์อยู่ที่ 0.5 และ 1 Mol
- 1.3.4 วัดผลความเรียบผิวด้วยเครื่อง Surface roughness tester ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น SV-3100
- 1.3.5 ใช้มาตรฐานการวัด JIS 1994 (B0601-1994)
- 1.3.6 วัดขนาดของชิ้นงานด้วยดิจิตอลไมโครมิเตอร์ ยี่ห้อ Mitutoyo
- 1.3.7 ใช้เครื่องจักร EDM ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น EA-8 ในการทดลอง
- 1.3.8 อิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดลองมีขนาด $17 \times 32 \times 5$ มม.
- 1.3.9 ในการออกแบบการทดลองใช้วิธี Taguchi
- 1.3.10 ใช้ตาราง Taguchi orthogonal array L8 ในการออกแบบเงื่อนไขชุดทดลอง
- 1.3.11 ใช้ค่าความเรียบผิวหลังจากชุบของอิเล็กโทรดในการวัดผล
- 1.3.12 ใช้ค่าความเรียบผิวหลังกัดของชิ้นงานในการวัดผล
- 1.3.13 ใช้ขนาดของอิเล็กโทรดก่อนและหลังกัดชิ้นงานในการวัดผลอัตราการสึก

สามารถระบุเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดต่อการสร้างอิเล็กทรอนิกส์จากกราฟด์ซูปด้วยทองแดงที่มีความเรียบผิวและอัตราการสึกที่ต่ำ และสามารถนำมาผลิตชิ้นงานได้ผิวชิ้นงานใกล้เคียงกับชิ้นงานที่ผลิตโดยใช้อิเล็กทรอนิกส์ทองแดง และสามารถนำกระบวนการมาใช้ในการตัดสินใจประกอบการออกแบบเพื่อการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมจริง

ตารางที่ 1.1 สรุปแผนงานและระยะเวลาในการดำเนินงาน

[illegible]

บทที่ 2

หลักการพื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการพื้นฐาน

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาหลักการพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง และได้นำเสนอตามหัวข้อต่อไปนี้

- 2.1.1. หลักการทำงานของเครื่อง EDM
- 2.1.2. การเลือกใช้อิเล็กโทรดสำหรับเครื่อง EDM
- 2.1.3. คุณสมบัติของอิเล็กโทรด
- 2.1.4. การตรวจสอบคุณภาพของอิเล็กโทรดสำหรับเครื่อง EDM
- 2.1.5. กระบวนการชุบไฟฟ้าเคมีด้วยทองแดง
- 2.1.6. กระบวนการออกแบบการทดลอง

2.1.1 หลักการทำงานของเครื่อง EDM[1]

เครื่อง EDM เป็นเครื่องจักรในกระบวนการผลิตรูปแบบหนึ่งในอุตสาหกรรม โดยส่วนมากจะถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ หรือกับงานที่ไม่สามารถทำโดยกรรมวิธีธรรมดาได้ เพราะชิ้นงานมีความแข็งเกินไปหรือต้องการรายละเอียดเล็กๆ โดยเครื่อง EDM สามารถตัดหรือกัดโลหะแข็งโดยไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการส่งผลให้โลหะอ่อนตัวลงเพื่อกัดแล้วส่งผลให้แข็งตัวใหม่อีกครั้ง

เครื่อง EDM ทำงานโดยที่มีหัวอิเล็กโทรด และ ชิ้นงาน จมอยู่ในของเหลวที่เป็นของเหลวไดอิเล็กทริก โดยหัวอิเล็กโทรดและชิ้นงานจะถูกต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟสร้างศักย์ไฟฟ้าระหว่างสองส่วน เมื่อหัวอิเล็กโทรดเข้าใกล้ชิ้นงาน ของเหลวไดอิเล็กทริกจะเกิด Dielectric breakdown ขึ้น ส่งผลให้เกิด Plasma channel และเกิดไฟฟ้ากระโดดเล็กๆระหว่างสองส่วนนี้ โดยส่วนมากจะเกิดประกายไฟขึ้นเพียงประกายเดียวต่อครั้งที่เกิด และโอกาสที่ตำแหน่งอื่นระหว่างหัวอิเล็กโทรดและชิ้นงาน ที่มีลักษณะทางไฟฟ้าเหมือนกันจนสามารถเกิดประกายไฟขึ้นพร้อมกันได้ ในหลายๆทีนั้นมีโอกาสน้อย ประกายไฟเหล่านี้จะเกิดขึ้นหลายครั้งในช่วงเวลาอันสั้นระหว่าง หัวอิเล็กโทรดกับชิ้นงาน โดยเมื่อชิ้นงานถูกกัดจากประกายไฟ ส่งผลให้ช่องว่างระหว่างชิ้นงานและอิเล็กโทรดห่างกันมากขึ้น ตัวเครื่องจักรจะลดตำแหน่งหัวอิเล็กโทรดลงมาอัตโนมัติเพื่อทำการกัดเป็นไปได้อย่างไม่ติดขัด โดยประกายไฟที่เกิดขึ้นในการกัดงานหลายครั้งต่อวินาทีนั้น เป็นตัวกำหนด

ลักษณะการกัดชิ้นงาน ดังนั้นเครื่องจักรจึงสามารถตั้งค่าเพื่อกำหนดคุณลักษณะของประกายไฟได้

ก. การตั้งค่าเครื่องEDM

การตั้งค่าเครื่อง EDM นั้นเป็นการตั้งค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการใช้งาน โดยสามารถปรับตั้งได้หลากหลายตามลักษณะงานที่ต้องการ ส่วนมากระบบของเครื่อง EDM ในปัจจุบันจะใช้หลักการป้อนค่าลักษณะงานที่ต้องการลงไป แล้วเครื่อง EDM จะนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับข้อมูลที่มีอยู่ในเครื่อง แล้วนำค่าที่เหมาะสมที่สุดออกมา ซึ่งค่าที่ถูกนำออกมานั้นจะส่งผลต่องานที่ทำแตกต่างกันออกไป เช่น การตั้งค่า เวลาในการจ่ายไฟฟ้า นั้นจะเป็นตัวกำหนดถึง ความยาวหรือระยะเวลาของประกายไฟ โดยถ้าหาระยะเวลาในการเกิดยิ่งนาน จะได้หลุมบนผิวชิ้นงานที่ลึกขึ้น ส่งผลให้ผิวงานที่ได้มีความหยาบ ในทางกลับกันถ้าเวลาน้อยจะได้ผิวงานที่เรียบ การตั้งค่า เวลาในการตัดไฟฟ้า นั้นจะเป็นตัวกำหนดเวลาระหว่างการเกิดประกายไฟ โดยยิ่งเวลาระหว่างการเกิดประกายไฟแต่ละประกายห่างกันจะมีเวลาให้ของเหลวไดอิเล็กทริกไหลผ่านเข้ามาแทนที่ ชำระล้างเศษชิ้นงานที่ถูกกัดออกมา เพื่อหลีกเลี่ยงไฟฟ้าลัดวงจร การตั้งค่าเหล่านี้สามารถตั้งได้ในระดับไมโครวินาที ทำให้ในแต่ละงานมีค่าที่เหมาะสมกันแตกต่างกันออกไป โดยสามารถสรุปความเหมาะสมในการตั้งค่าในแต่ละค่าภายในเครื่อง EDM ได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การตั้งค่าเครื่อง EDM

E-Condition	ผลกระทบต่อการทำงาน	การปรับตั้ง
Circuit selection (ES) Auxiliary power notch (AUX) Polarity selection (POL) Power setting (IP)	เป็นตัวตัดสินขนาดของพลังงานและค่าความลึกอิเล็กโทรด เมื่อมีการตั้งค่า ORBPTN ค่านี้将无法ปรับตั้งได้	X
Pulse width time (ON) OFF TIME (OFF)	เป็นตัวตัดสินความเร็วในการกัดชิ้นงานรวมทั้งความเสถียร	◎
F circuit (GAP) Jump (JUMP) Jump up distance (JU) Jump down time (JD)	เป็นตัวตัดสินการระบายพลังงานจากการกัด	◎
Condenser selection (PCON) Machining adjustment (GAIN)	เป็นตัวตัดสินความเสถียรของไฟฟ้าในการทำงาน	X
Servo voltage (SV) OP sensitivity (OPAJ)	ค่าไฟฟ้าของอุปกรณ์ในเครื่อง โดยปกติจะมีค่าที่ 0 และ 8	○

หมายเหตุ). ◎ หมายถึงสมควรปรับตั้ง, ○ หมายถึงปรับตั้งได้หากจำเป็น, X หมายถึงปรับตั้งไม่ได้

2.1.2 การเลือกใช้อิเล็กโทรดสำหรับเครื่องEDM[1], [2]

อิเล็กโทรดที่นำมาใช้งานต้องมีรูปร่างเดียวกับชิ้นงานสำเร็จที่ต้องการ โดยการขึ้นรูปอิเล็กโทรดในปัจจุบันนิยมนำก้อนวัตถุดิบมาผ่านกระบวนการขึ้นรูปทั่วไปให้ได้รูปทรงอิเล็กโทรดตามที่ต้องการ ก้อนวัตถุดิบที่นำมาใช้โดยส่วนมากจะผ่านกระบวนการจากผู้ผลิตทำให้ขนาดใกล้เคียงกับรูปร่างที่ต้องมากที่สุดแล้ว โดยกระบวนการที่นำมาขึ้นรูปอิเล็กโทรดนั้นจะแตกต่างกันออกไปตามวัตถุดิบที่นำมาใช้ทำ ทำให้ในการใช้งานเครื่องEDMบางครั้ง มีการใช้อิเล็กโทรดมากกว่า1ชิ้น เนื่องจากชิ้นงานบางชนิดไม่สามารถทำการขึ้นรูปได้ด้วยขั้นตอนเดียว หรือ วัตถุดิบนั้นเมื่อทำเป็นอิเล็กโทรดแล้วไม่สามารถทำงานให้ได้ลักษณะตามที่ต้องการได้ เช่น ความสามารถในการกัดผิวชิ้นงานให้เรียบไม่ดีพอที่จะใช้งาน หรือเมื่อนำมาใช้งานแล้วจะเสียหายจากความร้อนในการใช้งานเป็นต้น ดังนั้นลักษณะงานที่ทำจึงมีผลต่อการเลือกกระบวนการขึ้นรูปอิเล็กโทรดด้วยเช่น งานกัดผิวเรียบต้องการอิเล็กโทรดที่สามารถนำไฟฟ้าได้ดีเช่นทองแดง ทว่าทองแดงไม่สามารถใช้งานหนักได้เนื่องจากจะเสียรูปจากความร้อนในการใช้งาน ดังนั้นจึงมีการใช้อิเล็กโทรดจากวัตถุดิบชนิดอื่นเข้ามากัดผิวชิ้นงานให้ใกล้เคียงกับที่ต้องการก่อนแล้วจึงใช้อิเล็กโทรดทองแดงเข้ามากัดผิวเรียบในตอนสุดท้ายอีกครั้งหนึ่ง

2.1.3 คุณสมบัติของอิเล็กโทรด[3], [4]

อิเล็กโทรดที่นำมาใช้งานนั้น จำเป็นจะต้องมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าและมีจุดหลอมเหลวที่เหมาะสมต่อการใช้งาน โดยคุณสมบัติทั้ง 2 ข้อนั้นจะมีความแตกต่างกันออกไปตามวัตถุดิบที่นำมาใช้ทำอิเล็กโทรด และกรรมวิธีการเตรียมวัตถุดิบที่นำมาขึ้นรูปอิเล็กโทรดเองก็มีผลเช่นกัน

ก. การนำไฟฟ้า

คุณสมบัติที่ดีของอิเล็กโทรดคือการนำไฟฟ้าที่ดีเนื่องจากวิธีการทำงานของเครื่อง EDM นั้นใช้กระแสไฟฟ้า โดยที่ ค่าการนำไฟฟ้ายิ่งสูง อิเล็กโทรดยังสามารถทำงานได้ดี ซึ่งทองแดงมีค่าการนำไฟฟ้าที่ดีมากเมื่อเทียบกับกราไฟต์ ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.2 ค่าการนำไฟฟ้าของวัตถุดิบที่นิยมนำมาทำอิเล็กโทรด

Material	Electric conductivity (σ , S/m)
Copper	5.96×10^7
Graphite	3×10^5

ข. จุดหลอมเหลว

การทำงานแบบ EDM นั้นมีส่วนเกี่ยวข้องกับอุณหภูมิในการทำงาน ดังนั้นเพื่อการที่อิเล็กโทรดสามารถทนได้ต่อการทำงาน จุดหลอมเหลวยังมีค่ามาก อิเล็กโทรดยังสามารถทนต่อการทำงานได้มากขึ้น ซึ่งกราฟไฟต์มีจุดหลอมเหลวที่สูงมากเมื่อเทียบกับทองแดง ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.3 ค่าจุดหลอมเหลวของวัสดุที่นิยมนำมาทำอิเล็กโทรด

Material	Thermal expansion (m/m °C)
Copper	16×10^{-6}
Graphite	$4-8 \times 10^{-6}$

2.1.4 การตรวจสอบคุณภาพของอิเล็กโทรดสำหรับเครื่อง EDM[5]

ในการตรวจสอบคุณภาพของอิเล็กโทรดสำหรับเครื่อง EDM นั้น สามารถตรวจสอบได้โดยใช้หลักการเดียวกับการตรวจสอบเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ใช้ขึ้นรูปในกรรมวิธีอื่นๆ คือการตรวจสอบอัตราการสึกของอุปกรณ์ อัตราการกัดชิ้นงาน และ ความเรียบผิวของชิ้นงานที่ทำ

ก. Tool Wear Rate (TWR)

บ่งบอกถึงอัตราการสึกของอิเล็กโทรด โดยค่าที่มากขึ้นบ่งบอกถึงความสึกในการกัดชิ้นงานของอิเล็กโทรดที่มากขึ้นโดยในการกัดชิ้นงานเดียวกัน แต่ถ้าหากมีอัตราการสึกมากกว่า แปลว่า อิเล็กโทรดสึกจากการใช้งานมากกว่า โดยคำนวณจากความแตกต่างของน้ำหนักของอิเล็กโทรดก่อนและหลังการใช้งาน หาด้วยความหนาแน่นของอิเล็กโทรดกับเวลาที่ใช้ในการกัดชิ้นงานดังสมการที่(2.1)

$$\text{Tool Wear Rate (mm}^3/\text{min)} = \frac{\Delta T}{\rho_t \times t} \quad (2.1)$$

โดย ΔT = ผลต่างของน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์โทรดหรืออุปกรณ์ก่อนและหลังการใช้งาน

ρ_t = ความหนาแน่นของอิเล็กทรอนิกส์โทรดหรืออุปกรณ์มีหน่วยเป็น g/mm^3

t = ระยะเวลาที่ใช้ในการกัดชิ้นงาน

ข. ความเรียบผิว (Surface roughness:SR)

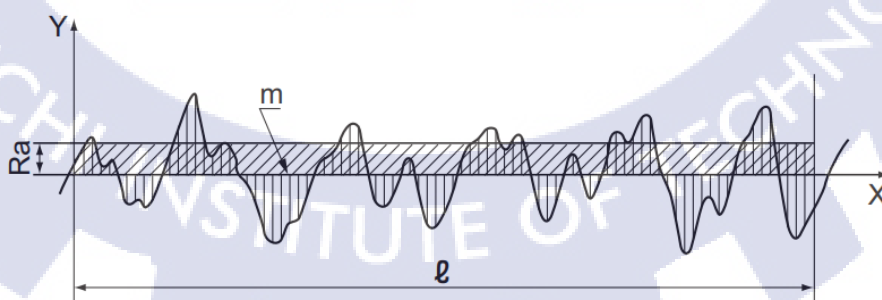
ความหยาบของพื้นผิวชิ้นงาน เป็นคุณสมบัติทางโลหะวิทยา สามารถอธิบายได้จากค่าพารามิเตอร์ตามมาตรฐานที่แตกต่างกันออกไป โดยในการตรวจสอบพื้นผิวจะใช้ค่าพารามิเตอร์แตกต่างกันตามมาตรฐานและลักษณะการใช้งาน ดังนั้นการวัดความหยาบของพื้นผิวชิ้นงานจึงมีวิธีการคำนวณหาจากผลที่วัดได้ที่แตกต่างกันออกไป โดยการวัดความหยาบของพื้นผิวจะใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า Surface roughness tester ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 เครื่อง Surface roughness tester[6]

ค. ความหยาบเฉลี่ยของพื้นผิวตามอนุกรมเลขคณิต (R_a)

ค่าเฉลี่ยนี้สามารถวัดจากกราฟความหยาบผิวที่อยู่บนเส้นอ้างอิงหรือเส้นกึ่งกลาง(m-line) ระยะค่าเฉลี่ยนี้จะอยู่บนกราฟตามแนวแกน x ของเส้นอ้างอิง และแนวแกน y จะเป็นขนาดความหยาบผิวดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ภาพตัวอย่างกราฟการวัดความหยาบเฉลี่ยของพื้นผิวตามอนุกรมเลขคณิต

โดยการคำนวณ Ra นั้นใช้ผลรวมของพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นเหนือเส้นกึ่งกลางและพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นใต้เส้นกึ่งกลางหารด้วยความยาวเฉลี่ยในการวัด ดังสมการที่ (2.2)

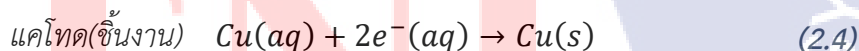
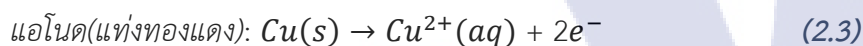
$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l \{f(x)\} dx \quad (2.2)$$

โดย $f(x)$ = ฟังก์ชันคลื่นความหยาบของพื้นผิว

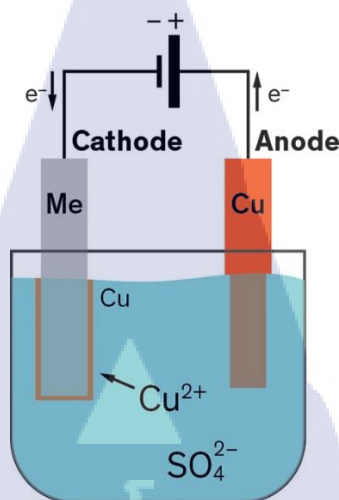
l = ระยะการวัดผิวในแนวนอน

2.1.5 กระบวนการชุบไฟฟ้าเคมีด้วยทองแดง[7], [8]

กระบวนการชุบทองแดงอาศัยหลักการของการกัดกร่อนด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีเข้ามาใช้ โดยอาศัยหลักการสลายพันธะของทองแดงเมื่อได้รับไฟฟ้าในเซลล์กัลวานิก ทำให้สลายออกเป็นอิเล็กตรอนและโมเลกุลทองแดง หลังจากนั้นอิเล็กตรอนที่สลายตัวออกมาจากทองแดงได้เข้าไปจับตัวกับโมเลกุลทองแดงที่อยู่ในสารละลาย ทำให้เกิดเป็นชั้นผิวทองแดงขึ้นบนชิ้นงานที่ต้องการได้โดยมีสมการเคมีดังสมการที่ (2.3) และ (2.4)



อุปกรณ์ที่จะเป็นสำหรับเซลล์กัลวานิกในการชุบทองแดงคือ แหล่งจ่ายไฟ สายไฟ ทองแดง ชิ้นงานที่ต้องการชุบ สารละลายที่ส่วนผสมของทองแดง และบีกเกอร์ โดยสามารถสรุปรูปแบบอุปกรณ์การชุบได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การชุบทองแดง[9]

2.1.6 กระบวนการออกแบบการทดลอง[10], [11]

กระบวนการออกแบบการทดลองนั้นในทางวิศวกรรม มีหลากหลายกระบวนการถูกนำมาใช้ เพื่อให้ได้การวิจัยที่มีถูกต้อง ความน่าเชื่อถือ และสามารถทำซ้ำได้ การออกแบบการทดลองในปัจจุบันนิยมใช้วิธีของ Taguchi อย่างแพร่หลายเนื่องจากสามารถช่วยลดจำนวนการทดลองที่จำเป็นลงได้ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อความถูกต้องของการทดลอง ทว่ามีผลเสียคือสามารถจับวัดผลได้ทีละผลเท่านั้น ไม่สามารถทำการจับวัดผลที่มีความหลากหลายได้ ทำให้กระบวนการ Taguchi-Grey relational analysis (TGRA) ถูกนำมาใช้ โดย TGRA เป็นกระบวนการที่นำวิธีของ Taguchi และวิธีของ Grey เข้ามารวมกันโดยนำข้อดีของทั้งสองวิธีคือ การลดจำนวนการทดลองที่จำเป็นลงโดยไม่ส่งผลกระทบต่อความถูกต้องของข้อมูล และความสามารถในการจับวัดผลที่มีความสัมพันธ์ต่อกันพร้อมกันได้หลากหลายโดยลดปัญหาด้านความเหลื่อมล้ำของข้อมูลเข้ามารวมกัน ทำให้เป็นวิธีการออกแบบการทดลองที่สามารถตอบโจทย์การทดลองที่จำเป็นจะต้องใช้จำนวนการทดลองน้อยที่สุด และ ต้องการจับวัดผลลัพธ์โดยมีเป้าหมายสำหรับผลลัพธ์ของตัวแปรแต่ละตัวที่แตกต่างกันได้

ก. Taguchi orthogonal array L8

ในการออกแบบการทดลองแบบ Taguchi เพื่อที่จะสามารถลดจำนวนการทดลองที่จำเป็นลงได้นั้น ต้องเริ่มจากการคำนวณหาจำนวนการทดลองที่จำเป็นอย่างน้อยเสียก่อน โดยอาศัยสมการที่(2.5)

$$N = (L - 1)F + 1 \quad (2.5)$$

โดย N = จำนวนการทดลอง

L = จำนวนระดับของตัวแปร

F = ระดับของตัวแปร

การทดลองที่น่าเชื่อถือจำเป็นจะต้องทำการทดลองให้เกินหรือเท่ากับจำนวนการทดลองขั้นต่ำ แต่ทว่าวิธีการออกแบบการทดลองของ Taguchi นั้น ได้ใช้หลักสถิติเข้ามาช่วย และได้สร้าง orthogonal array สำหรับการหาจำนวนการทดลองและการกำหนดค่าตัวแปรในการทดลองนั้นๆไว้เป็นระดับทำให้สามารถนำ orthogonal array มาแทนค่าด้วยตัวแปรการทดลองที่เราสนใจได้ดังตัวอย่างเช่น มีการทดลองโดยมีตัวแปร 3 ตัว 2 ระดับ เราสามารถใช้ค่าจาก orthogonal array L8 ได้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ตาราง Taguchi orthogonal array L8 (2^3)

Run no.	A	B	C
1	1	1	1
2	1	1	2
3	1	2	1
4	1	2	2
5	2	1	1
6	2	1	2
7	2	2	1
8	2	2	2

ข. Taguchi method

การวิเคราะห์ข้อมูลตามการออกแบบการทดลองแบบ Taguchi method นั้นจะใช้หลักการจับค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสิ่งรบกวน โดยสิ่งที่สนใจในการทดลองและควบคุมจะถือเป็นสัญญาณ สิ่งที่ไม่สามารถควบคุมได้และไม่สนใจจะถือเป็นสิ่งรบกวน ยิ่งอัตราส่วนมีค่ามาก

แปรว่า สิ่งที่เราสนใจหรือควบคุมมีผลกระทบต่อผลลัพธ์มาก ในทางกลับกันหากอัตราส่วนมีค่าน้อย
แปรว่าสิ่งรบกวนหรือสิ่งที่ไม่สนใจ มีผลกระทบต่อผลลัพธ์มาก โดยสามารถแบ่งการวิเคราะห์ผลลัพธ์ตาม
ลักษณะของผลลัพธ์ออกได้เป็นสามรูปแบบคือ 1.Larger-the-better 2.Smaller-the-better
3.Nominal-the-better โดยแต่ละจะมีหลักการเหมือนกันตามที่ได้อธิบายไปข้างต้น เพียงแต่จะ
แตกต่างกันที่วิธีการวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ออกมาเท่านั้น โดยแต่ละรูปแบบจะมีสมการที่ใช้คำนวณในการ
วิเคราะห์ตามสมการที่ (2.6), สมการที่ (2.7) และ สมการที่ (2.8) ตามลำดับ

$$\frac{S}{N} = -10 * \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{Y_i^2}\right)\right) \quad (2.6)$$

$$\frac{S}{N} = -10 * \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i^2)\right) \quad (2.7)$$

$$\frac{S}{N} = -10 * \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i^2)\right) \quad (2.8)$$

โดย Y_i = ผลตอบสนองของลำดับการทดลองที่ i

n = จำนวนการทดลอง

หลังจากได้ค่า S/N ratio แล้วนำค่ามาทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าผลกระทบ
ของปัจจัยรวมโดยวิธีการทางสถิติต่างๆ แล้วจึงทำการทำนายผลลัพธ์ที่ดีที่สุดโดยอิงจากรูปแบบการ
วิเคราะห์ที่ใช้ในการหา S/N ratio ทั้ง 3 รูปแบบคือ 1.Larger-the-better 2.Smaller-the-better
3.Nominal-the-better โดยสามารถทำนายผลลัพธ์ที่ดีที่สุดได้โดยใช้สมการที่ (2.9), (2.10) และ
(2.11)

$$Y_{optimal} = m + \sum_{j=1}^n [(m_{i,j})_{max} - m] \quad (2.9)$$

$$Y_{optimal} = m + \sum_{j=1}^n [(m_{i,j})_{min} - m] \quad (2.10)$$

$$Y_{optimal} = m + \sum_{j=1}^n [(m_{i,j})_{mean} - m] \quad (2.11)$$

โดย m_i = ผลตอบสนองของตัวแปร j ที่ระดับ i

m = ค่าเฉลี่ยผลตอบสนองของการทดลอง

แต่เนื่องจากการวิเคราะห์ผลลัพธ์สามารถทำได้เพียงที่ผลลัพธ์เท่านั้น ทำให้มีข้อจำกัดในการวิเคราะห์ขึ้น และผลการวิเคราะห์ยังไม่สามารถนำไปใช้กับเงื่อนไขที่อยู่นอกเหนือขอบเขตการทดลองได้แม้ว่าจะเป็นตัวแปรที่เราสนใจก็ตาม เว้นเสียแต่การทดลองจะครอบคลุมทุกรูปแบบการจับคู่ของตัวแปรทุกระดับและทุกตัว

ค. Grey relational analysis

การวิเคราะห์ข้อมูลแบบ Grey relational analysis นั้น จะมีหลักการวิเคราะห์โดยอาศัยผลตอบสนองต่อผลลัพธ์ โดยทำการแปลงผลตอบสนองในรูปของข้อมูลดิบเปลี่ยนให้เป็นอัตราส่วนตั้งแต่ 0 ถึง 1 ตามรูปแบบการวิเคราะห์ 2 แบบคือ 1. Larger-the-better และ 2. Smaller-the-better โดยใช้สมการที่ (2.12) และสมการที่ (2.13) ตามลำดับ

$$x_i^*(k) = \frac{\max y_i(k) - y_i(k)}{\max y_i(k) - \min y_i(k)} \quad (2.12)$$

$$x_i^*(k) = \frac{y_i(k) - \min y_i(k)}{\max y_i(k) - \min y_i(k)} \quad (2.13)$$

โดย $x_i^*(k)$ = ลำดับการอ้างอิงของการประมวลผลในลำดับการทดสอบที่ i

$y_i(k)$ = ลำดับเริ่มต้นของค่าเฉลี่ยของการตอบสนอง

หลังจากนั้นจึงทำการคำนวณหาลำดับความเบี่ยงเบนโดยใช้สมการที่ (2.14)

$$\Delta_{oi}(k) = |x_0^*(k) - x_i^*(k)| \quad (2.14)$$

โดย $\Delta_{oi}(k)$ = ค่าความเบี่ยงเบน

$x_0^*(k)$ = ลำดับที่อ้างอิง

$x_i^*(k)$ = ลำดับที่เปรียบเทียบกับลำดับ

หลังจากนั้นจึงหาค่า Grey relational Coefficient(GRC) เพื่อนำมาประกอบการพิจารณาค่าที่ดีที่สุดโดยสามารถหาได้โดยใช้สมการที่ (2.15)

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{min} + \xi\Delta_{max}}{\Delta_{oi}(k) + \xi\Delta_{max}} \quad (2.15)$$

โดย $\xi_i(k)$ = GRG ของค่าตอบสนองที่ลำดับ i

Δ_{min} = ค่าเบี่ยงเบนต่ำสุด

Δ_{max} = ค่าเบี่ยงเบนสูงสุด

ξ = ค่าสัมประสิทธิ์การบ่งชี้

โดยค่าสัมประสิทธิ์การบ่งชี้หรือค่าความแตกต่าง ξ นั้นถูกกำหนดไว้ในช่วงของ 0 ถึง 1 แต่โดยทั่วไปจะใช้ค่าที่ 0.5 เพื่อให้น้ำหนักกับค่าตัวแปรเท่ากันทุกค่า หลังจากนั้นจึงคำนวณค่า Grey relational grade(GRG) โดยอาศัยการหาค่าเฉลี่ยของ GRG ของค่าตอบสนองในแต่ละตัวแปรโดยใช้สมการที่ (2.16)

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \xi_i(k) \quad (2.16)$$

โดย γ_i = ค่า GRG ของการทดลองที่ i

n = จำนวนรวมของคุณสมบัติที่เหมือนกัน

หลังจากที่สามารถระบุค่าระดับของตัวแปรที่ดีที่สุดได้โดยใช้ GRG ลำดับสุดท้ายของกระบวนการวิเคราะห์คือทำนายผลลัพธ์และยืนยันผลลัพธ์นั้น โดยใช้สมการที่ (2.17)

$$Y_{\text{predicted}} = Y_m + \sum_{i=1}^q Y_o - Y_m \quad (2.17)$$

โดย Y_o = ค่าสูงสุดของค่าเฉลี่ย GRG ที่ระดับของตัวแปรที่ดีที่สุด

Y_m = ค่าเฉลี่ย GRG

q = จำนวนตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าตอบสนอง

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันมีงานวิจัยหลายฉบับที่ได้ทำการทดสอบผลกระทบของปัจจัยต่างๆต่อประสิทธิภาพและเสนอแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการ EDM เพื่อตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วและความต้องการในงานที่มีความละเอียดมากขึ้นในโลกของการผลิต

M. Darsin et al.[12] ได้ทำการทดสอบเพื่อหาค่าที่เหมาะสมต่อการใช้งานอิเล็กโทรดที่ทำจากวัสดุชนิดต่างๆ เช่น ทองแดง กราไฟต์ และเหล็ก AISI 1045 เพื่อใช้กัดงาน เหล็ก AISI 1040 โดยใช้หลักการ Taguchi เข้ามาช่วย โดยในการวิจัยนี้สนใจที่การปรับตั้งค่าของ On time และ กระแสที่ป้อนในการกัด เพื่อให้ได้พื้นผิวที่เรียบที่สุด

M. K. Pradhan et al.[13] ได้ทำการทดสอบเพื่อหาผลกระทบของการตั้งค่าเครื่อง EDM ต่อความเรียบของผิวงาน โดยในการทดลองนี้สนใจค่าการตั้งค่าต่างๆของ EDM ตั้งแต่ค่าความต่างศักย์ ค่ากระแสไฟ ค่า On time ค่า Off time จากการทดลองพบว่าค่าการตั้งค่าทางไฟฟ้าเช่นค่ากระแสไฟ มีผลต่อความเรียบผิว โดยยิ่งค่าทางไฟฟ้ามีค่ามาก ผิวยิ่งหยาบ

M. Hourmand et al.[14] ได้ทำการทดลองหาผลกระทบต่อประสิทธิภาพของกระบวนการ EDM ที่ผสมผงอลูมิเนียมลงในของไหลไดอิเล็กทริก โดยในการทดลองนี้พบว่า MRR ได้รับผลกระทบโดยตรงจากกระแสไฟ และ TWR ได้รับผลกระทบจาก On time และ Off time

A.K. Singh et al.[15] ได้ทำการทดสอบหาผลกระทบของการตั้งค่าไฟฟ้าต่อความเรียบผิวในกระบวนการ EDM โดยในการทดลองได้ใช้ของไหลไดอิเล็กทริกที่ผสมผงกราไฟต์ลงไป ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองพบว่า ผิวชิ้นงานมีอัตราการเกิดลักษณะอันไม่พึงประสงค์น้อยลง และยังสามารถสรุปได้ว่าค่ากระแสและ pulse time มีผลต่อความเรียบผิวชิ้นงานอย่างมาก

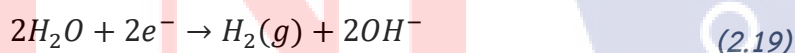
P. M. Lonardo and A. A. Bruzzone[16] ได้ทำการทดลองเพื่อหาผลกระทบของการเปิดของเหลวเพื่อการระบาย และ วัสดุขี้ในการทำอิเล็กโทรด ต่อประสิทธิภาพของกระบวนการ EDM โดยอิเล็กโทรดทองแดงจะมีการสึกมากกว่ากราไฟต์ และการเปิดระบายมีผลต่ออัตราการกัดและสึกของอิเล็กโทรดและความหยาบผิวมีค่ามากขึ้น

นอกจากนี้งานวิจัยที่ได้ใช้กรรมวิธีการ Taguchi-Grey relation analysis เข้ามาช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์เพื่อหาค่าที่ดีที่สุดในการบวนการต่าง ๆ นั้น ก็มึงานวิจัยที่นำมาใช้กับกระบวนการขึ้นรูปด้วย EDM เช่นกัน ดังนั้นจึงได้นำมาใช้เป็นแนวทางสำหรับการดำเนินงานในครั้งนี้ด้วย

V.Vikram Reddya et al.[17] ในงานวิจัยนี้ได้เสนอวิธีการใช้ Taguchi-Grey relation analysis เข้ามาช่วยหาค่าตัวแปรในการตั้งค่าเครื่อง EDM เพื่อให้ได้ค่าที่ดีที่สุดต่อ MRR, TWR และความเรียบผิว โดยผลการทดลองโดยใช้วิธี TGRA นั้นสามารถยืนยันค่าที่ให้ผลที่ดีที่สุด ซึ่งตรงกับเงื่อนไขการทดลองโดยมีความคลาดเคลื่อนจากการทำนายผลอยู่ในช่วง ต่ำกว่า 1.5% ซึ่งผลที่ได้ ออกมานั้น ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการได้ด้วยค่าที่ดีที่สุด

ในด้านของงานวิจัยที่เกี่ยวกับการชุบทองแดงนั้น มีการวิจัยหลายฉบับที่ได้ทำการทดสอบวิธีการและการประยุกต์ใช้เทคนิคและหลักการต่างๆ เข้ามาช่วยให้ได้ผลลัพธ์ในการชุบที่ดียิ่งขึ้นหรือให้ได้ลักษณะงานตามที่ต้องการถึงแม้ว่าจะใช้วัสดุดิบที่แตกต่างกันในบางกรณี

N. N. Le et al.[18] ได้ทำการทดลองเพื่อหาวิธีในการชุบที่ดีที่สุดสำหรับกระบวนการชุบทองแดงบนชิ้นส่วนอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีความยืดหยุ่น โดยในการทดลองได้ใช้สารละลาย CuSO_4 ในการชุบเคลือบชั้นผิวทองแดงขนาด $10\text{ }\mu\text{m}$ โดยผลที่ได้คือค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำสุดที่ $1.899\text{ }\mu\Omega$ และการกระจายตัวของทองแดงบนพื้นผิวที่สม่ำเสมอโดยมี error อยู่ที่ $0.5\text{ }\mu\text{m}$ โดยในงานวิจัยนี้ได้ อธิบายถึงสาเหตุที่เกิดความผิดปกติขณะชุบอันเนื่องจากองค์ประกอบของสารละลายที่มี H_2O เอาไว้ โดยเกิดจากการที่ H_2O ได้รับอิเล็กตรอนจะแตกตัวให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สไฮโดรเจน และไฮดรอกไซด์ 2 อะตอม ดังสมการที่ (2.18), และสมการที่ (2.19)

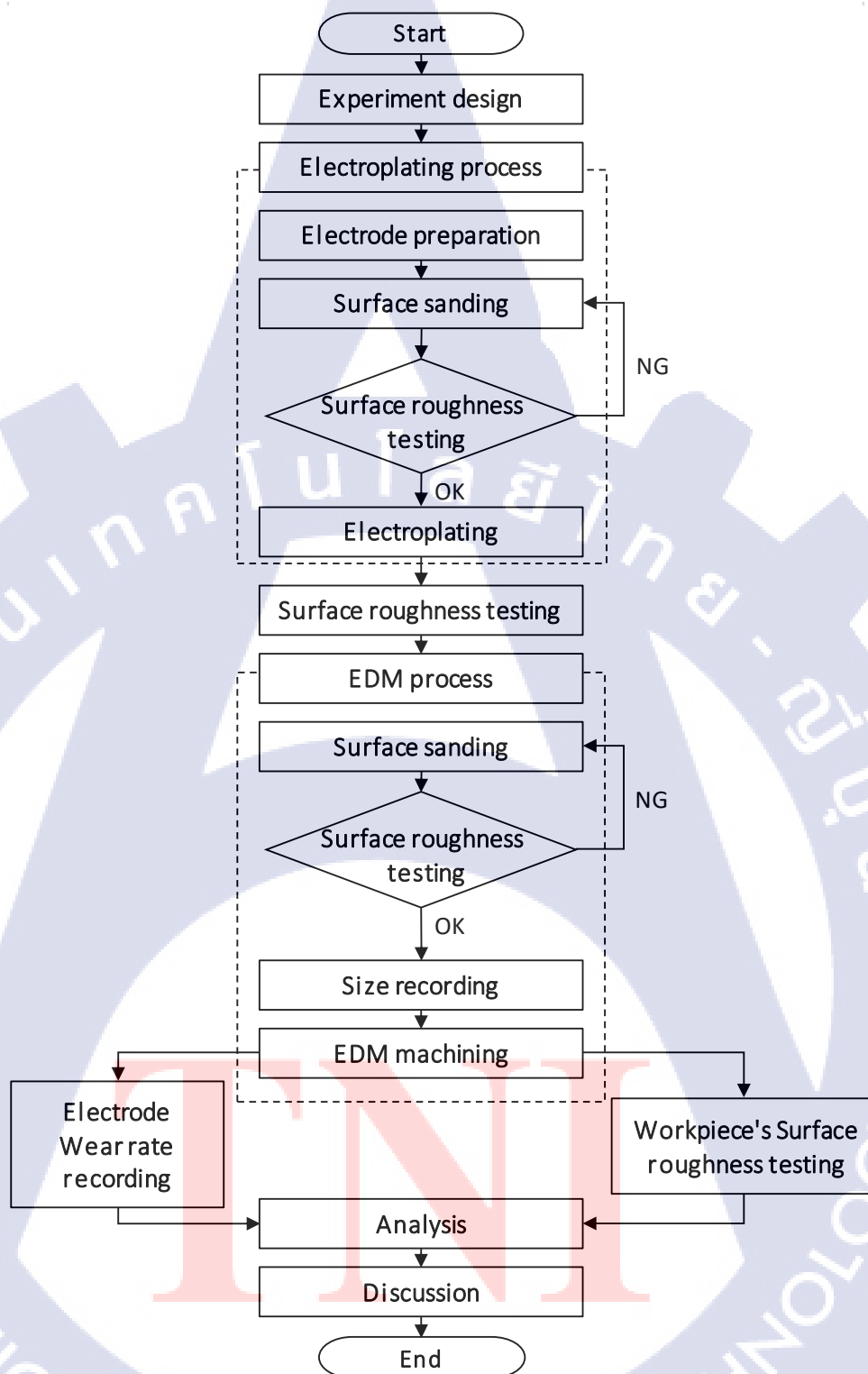


บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 กระบวนการวิจัย

การศึกษานี้ใช้หลักการของ Taguchi grey relational analysis (TGRA) เข้ามาช่วยในการออกแบบการทดลอง โดย TGRA สามารถช่วยลดจำนวนการทดลองที่จำเป็นลง และยังสามารถวิเคราะห์ผลกระทบ รวมทั้งความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรและผลการทดลองที่ออกมาได้หลากหลายค่ามากกว่าการใช้ Taguchi เข้ามาช่วยเพียงวิธีเดียว ในการทดลองนี้ ตัวแปรที่สนใจ คือตัวแปรในการชุบชุบทองแดงลงบนหัวกราไฟต์อิเล็กโทรด ได้แก่ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการชุบ (3.7 และ 5.4 A/dm²) เวลาในการชุบ (3 และ 5 ชั่วโมง) และค่าความเข้มข้นของสารละลาย (0.5 และ 1 Mol) และใช้ Taguchi orthogonal array L8 ซึ่งมีทั้งหมด 8 การทดลอง โดยในการทดลองจะใช้หัวอิเล็กโทรดจากกราไฟต์ 100% ซึ่งถูกเตรียมผิวให้ได้ความเรียบผิวในระดับเดียวกัน และทองแดง 99.9% มาจุ่มในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ CuSO₄ ที่ความเข้มข้น 0.5 และ 1 Mol มีการจ่ายกระแสอยู่ที่ 3.7 และ 5.4 A/dm² นาน 3 ชั่วโมง และ 5 ชั่วโมง ตามที่ได้กล่าวไปข้างต้น แล้วนำอิเล็กโทรดไปวัดค่าความเรียบผิว โดยใช้เครื่อง Surface Roughness tester เพื่อวัดค่าความเรียบพื้นผิวอิเล็กโทรดหลังจากการชุบ จากนั้นนำอิเล็กโทรดที่ผ่านการชุบแล้วไปขัดเตรียมพื้นผิว แล้วตรวจสอบค่าความเรียบผิวของอิเล็กโทรดให้อยู่ในช่วงเดียวกันก่อนจะนำไปบันทึกขนาดก่อนการกัดชิ้นงาน หลังจากตรวจสอบความเรียบผิวและบันทึกค่าแล้วจึงนำอิเล็กโทรดที่ผ่านการชุบไปทำการกัดชิ้นงาน โดยใช้การตั้งค่าของเครื่อง EDM ลักษณะเดียวกันทั้งหมด หลังจากกัดชิ้นงานเสร็จให้นำอิเล็กโทรดมาบันทึกขนาด พร้อมทั้งความเรียบผิวชิ้นงานที่กัดเรียบร้อยแล้ว สุดท้ายจึงวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการของ Taguchi-Grey relational analysis แล้วนำผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์มาเปรียบเทียบกับผลการกัดชิ้นงานด้วยอิเล็กโทรดกราไฟต์และทองแดง



รูปที่ 3.1 กระบวนการทำการทดลอง

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

3.2.1 เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

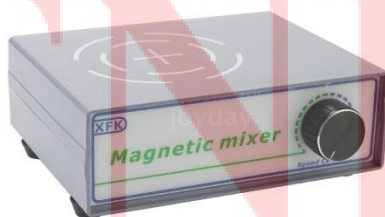
ในการทดลองนี้ ใช้เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ยี่ห้อ UNI-T สามารถจ่ายไฟด้วยความต่างศักย์ 30V และ กระแสไฟฟ้า 5A ในการใช้ทำการทดลองชุบทองแดงลงบนกราฟไฟต์ ดังรูปที่ 3.2



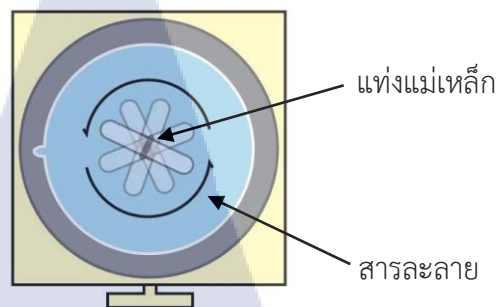
รูปที่ 3.2 เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง [19]

3.2.2 เครื่องกวนสารอัตโนมัติ

ในการทดลองนี้ ใช้เครื่องกวนสารอัตโนมัติ Magnetic Mixer ยี่ห้อ XFK ดังรูปที่ 3.3 โดยใช้แท่งแม่เหล็กเคลือบผิว เพื่อให้สารละลายไม่เกิดการตกตะกอน และเพิ่มการไหลเวียนของสารละลาย ดังรูปที่ 3.4 ในขณะที่ทำการทดลอง



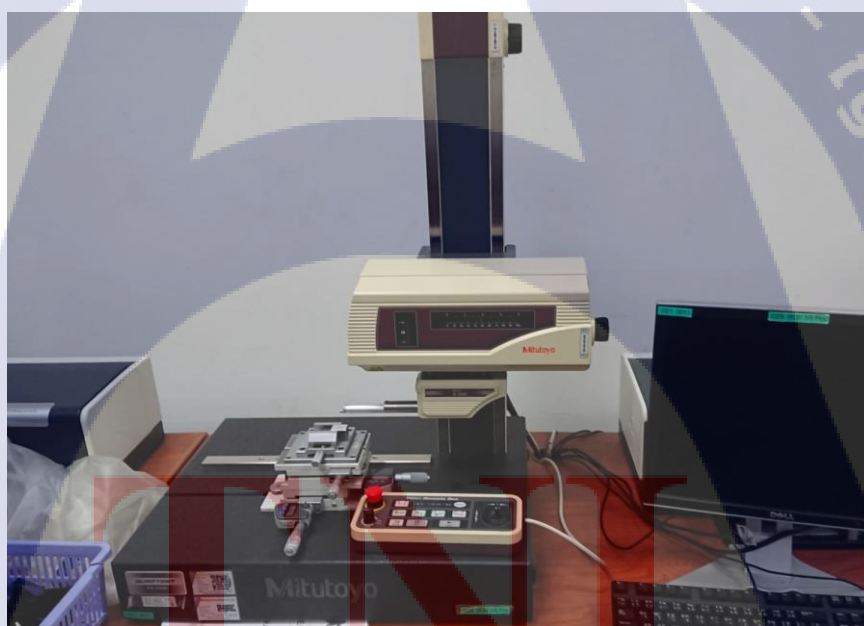
รูปที่ 3.3 เครื่องกวนสารอัตโนมัติ [20]



รูปที่ 3.4 การไหลเวียนของสารโดยใช้เครื่อง Magnetic Mixer [21]

3.2.3 เครื่องตรวจวัด Surface Roughness

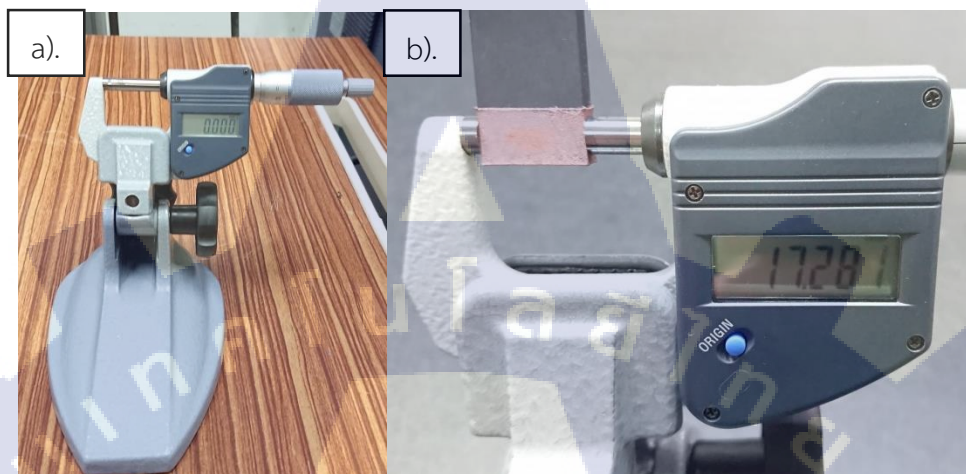
ในการทดลองนี้ ใช้เครื่องตรวจวัด surface roughness tester รุ่น SV-3100 ยี่ห้อ Mitutoyo ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เครื่องตรวจวัด Surface roughness ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.4 ไมโครมิเตอร์

ในการทดลองนี้ ใช้ไมโครมิเตอร์แบบดิจิทัลยี่ห้อ Mitutoyo ในการตรวจวัดค่าขนาดชิ้นงาน ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 a).ไมโครมิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง b).การตรวจวัดขนาด

3.2.5 เครื่อง EDM

ในการทดลองนี้ ใช้เครื่อง EDM ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น EA8 ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 เครื่อง EDM ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.6 เครื่องมือวัด Dial gauge

ในการทดลองนี้ ใช้เครื่องมือวัด Dial gauge ยี่ห้อ VERTEX ความละเอียด 2 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 3.8 ช่วยในการปรับตั้งอิเล็กทรอนิกส์ให้ขนานกับชิ้นงาน ดังรูปที่ 3.9 ในตอนที่ติดตั้งเข้าไปในเครื่อง EDM



รูปที่ 3.8 เครื่องมือวัด Dial gauge ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3.9 การใช้ไดอัลเกจตรวจสอบความขนานของผิวอีเล็กโทรดกับผิวชิ้นงาน

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.1 การชุบไฟฟ้าเคมีด้วยทองแดงลงบนผิวกราฟไฟต์

ในการออกแบบการทดลอง ใช้กระบวนการออกแบบการทดลองของ TGRA เข้ามาช่วยในการออกแบบ เพื่อให้ได้จำนวนการทดลอง และเงื่อนไขในการทดลองเพื่อได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้อง โดยในการทดลอง ตัวแปรที่สนใจคือ เวลาในการชุบ ความเข้มข้นของสารละลาย และ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ รวมทั้งหมด 3 ตัวแปร โดยแต่ละตัวมีแปด แบ่งเป็น 2 ระดับ จึงใช้ตาราง Taguchi orthogonal array L8 ในการวางแผนเงื่อนไขการทดลองการชุบ ในการเตรียมตัวทำการชุบ ควรเตรียมอุปกรณ์ให้พร้อมก่อนทำการชุบ โดยในการชุบให้ใช้กราฟไฟต์อีเล็กโทรดเป็นแคโทดในการชุบ สำหรับจัดเตรียมหัวอีเล็กโทรดให้พร้อมสำหรับการชุบนั่น ก่อนนำหัวอีเล็กโทรดมาทำการทดลองชุบ ต้องทำการเตรียมความเรียบพื้นผิวของอีเล็กโทรดกราฟไฟต์ให้ได้ใกล้เคียงกันมากที่สุด โดยในการทดลองนี้จะใช้เครื่องเจียผิวเข้ามาช่วยในการเตรียมผิว หากทำให้ผิวมีความเรียบในระดับหนึ่งจะสามารถเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส ส่งผลให้ทองแดงสามารถยึดเกาะได้ดีขึ้น หากผิวมีความเรียบน้อยเกินไป จะส่งผลต่อผลลัพธ์ของผิวงานในตอนท้ายสุดได้ ดังนั้นทางผู้ทดลองจึงทำการควบคุมระดับความเรียบพื้นผิวเอาไว้ไม่เกิน $10\text{ }\mu\text{m}$ แล้วจึงนำไปทำการชุบอีเล็กโทรดกราฟไฟต์ด้วยทองแดง จากนั้นจึงนำค่าความเรียบผิวหลังการชุบมาเปรียบเทียบกับ โดยมีเงื่อนไขในการชุบทั้งหมด 8 เงื่อนไข โดยสามารถสรุปตัวแปรได้ ดังตารางที่ 3.1 แล้วจึงทำการต่อกราฟไฟต์เข้าไปที่ขั้วลบ และแท่งทองแดงที่ขั้วบวก นำไปจุ่มในสารละลาย CuSO_4 แล้วทำการตั้งค่าไฟฟ้าในการชุบตามที่กำหนดเอาไว้สุดท้ายจึงเริ่มจ่ายไฟเข้าสู่ระบบ และเริ่มจับเวลาในการชุบ ดังรูปที่ 3.10

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขตัวแปรการชุบผิวทองแดงลงบนกราฟไฟต์

Condition	Plating time (hrs)	Electrolyte concentration (Mol)	Current density (A/dm ²)
1	3	0.5	3.7
2	3	0.5	5.4
3	3	1	3.7
4	3	1	5.4
5	5	0.5	3.7
6	5	0.5	5.4
7	5	1	3.7
8	5	1	5.4



รูปที่ 3.10 การชุบหัวอิเล็กโทรดด้วยทองแดง

3.3.2 กระบวนการ EDM

หลังจากได้ทำการชุบทองแดงลงบนผิวกราไฟต์แล้ว นำอิเล็กโทรดกราไฟต์ไปเตรียมผิวโดยการเจียอีกครั้ง เพื่อนำไปทำการกัดชิ้นงาน แล้วจึงบันทึกค่าความเรียบผิวรวมทั้งน้ำหนัก และขนาดของอิเล็กโทรดก่อนการกัดชิ้นงานไว้ ติดตั้งหัวอิเล็กโทรดกับเครื่อง EDM แล้วตั้งค่าเครื่อง EDM ที่ใช้ในการทดลอง หลังจากนั้นทดลองกัดชิ้นงานด้วยอิเล็กโทรด จากทองแดง 100%, กราไฟต์ 100% และกราไฟต์ชุบด้วยทองแดง ตามลำดับ โดยจะต้องมีขนาดพื้นที่หน้าตัดทรงสี่เหลี่ยมขนาด 75 ตารางมิลลิเมตร เท่ากันทุกชิ้น แล้วนำอิเล็กโทรดทั้งหมดไปวัดค่าความเรียบผิวหลังจากการกัดของผิวอิเล็กโทรดและผิวชิ้นงานที่กัด แล้วจึงนำค่าที่ได้จากอิเล็กโทรดที่เป็นทองแดง 100% และกราไฟต์ 100% มาเปรียบเทียบกับกราไฟต์อิเล็กโทรดที่ชุบด้วยทองแดง

ก. เครื่องจักร EDM

ติดตั้งหัวอิเล็กโทรดที่ต้องการทำการทดลองเข้าไปกับเครื่อง EDM ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น EA8 รวมทั้งติดตั้งชิ้นงาน S50C ลงไป แล้วจึงทำการปรับตั้งศูนย์เครื่องให้เข้ากับอิเล็กโทรดและชิ้นงานโดยใช้เครื่องมือวัด dial gauge เข้ามาช่วยในการปรับตั้งให้พื้นผิวอิเล็กโทรดขนานกับชิ้นงาน ดังรูปที่ 3.9 โดยจะต้องมีความเอียงของพื้นผิวไม่เกิน 20 ไมโครเมตร หลังจากนั้นจึงตั้งค่าการกัดชิ้นงาน

ข. เงื่อนไขในการตั้งค่าของเครื่องจักร EDM

ในการทดลองนี้ได้จัดตั้งเงื่อนไขในการตั้งค่าต่าง ๆ ของเครื่องจักร EDM ไว้ โดยสามารถตั้งค่าได้ด้วยหน้าต่างโปรแกรม ESPER ของเครื่องจักร EDM ดังรูปที่ 3.11 โดยใช้การตั้งค่าดังนี้

1. เลือกการตั้งค่าแบบการกัด Cavity
2. วัสดุของอิเล็กโทรดเลือกเป็นทองแดงหรือกราไฟต์
3. ความเรียบผิวใช้เป็น Ra กำหนดให้ขอบเขตอยู่ที่ 0.6 ไมโครเมตร
4. เลือกกระบวนการ Finishing ผิวชิ้นงานเป็น Glossy mirror
5. เปิดให้ของเหลวในเครื่องเป็นแบบ Emission
6. พื้นที่ผิวการกัดงาน 75 mm²
7. เปิดโหมด INTMCHING
8. ขนาด Undersize 0.12 mm
9. มีรูปแบบ ORBPTN เป็นแบบวงกลม หรือมีรหัส 200

10. ให้ความสำคัญกับค่าอัตราการสึกของอิเล็กโทรดในการกัดงาน

โดยสามารถสรุปการตั้งค่าดังตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.11 หน้าต่างโปรแกรม ESPER ของเครื่องจักร EDM

ตารางที่ 3.2 การตั้งค่า EDM ใน E-condition

MCHNGTYPE	Cavity
Material	Cu-St, Gr-St
Surface roughness(Ra)	0.6
Finishing Process	Glossy mirror
Fluid	Emission
Contact area (mm ²)	75
INTMCHING	ON
UNDERSIZE	0.12
ORBPTN	200
Priority	wear rate

ทำให้ได้ผลลัพธ์การตั้งค่าจากการป้อนค่าข้อมูลลักษณะงานของ M-pack ซึ่งสามารถอธิบายตัวแปรในการทดสอบได้ว่า

1. ใช้กระแสไฟฟ้า ตั้งแต่ 2.3 A แล้วลดระดับลงจนถึง 1.0 A
2. ใช้ Duty cycle ที่ 50% หรือ On time และ Off time เท่ากัน ในกระบวนการกัดแบบหยาบ
3. ใช้ Duty cycle ตามระบบการกัดแบบ Glossy mirror เมื่อเข้าสู่กระบวนการกัดแบบละเอียด
4. ระดับไฟฟ้าขั้นสุดท้ายของการกัดเป็นวงจร Glossy mirror ใช้เวลาในการกัด เป็นเวลา 30 นาที
5. ระยะระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงานใช้เป็นระดับ 11 และ 12 หรือ เมื่อ SV มีค่าเป็น 0 ในกระบวนการกัดหยาบ ซึ่งเว้นระยะ 55 และ 75 μm
6. เมื่อ SV มีค่าเป็น 2 ในกระบวนการกัดผิวเรียบ และเว้นระยะ 73 และ 100 μm ตามลำดับ
7. ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวอิเล็กโทรดเมื่อกัดหยาบที่ระดับ 11 และกัดผิวเรียบที่ระดับ 13 หรือ 2.5 และ 4.0 m/min
8. มีระยะการเคลื่อนหัวขึ้นในกระบวนการกัดผิวเรียบที่ระดับ 5 และกัดหยาบที่ระดับ 4 หรือก็คือ 1.0 และ 0.8 mm
9. มีระยะเวลาการเคลื่อนหัวลงในกระบวนการกัดผิวเรียบที่ระดับ 5 และกัดหยาบที่ระดับ 4 หรือก็คือ 0.25 และ 0.2 sec
10. มีค่า GAIN ตั้งแต่ 50 แล้วลดระดับลงมาถึง 30 ในกระบวนการกัดผิวเรียบ

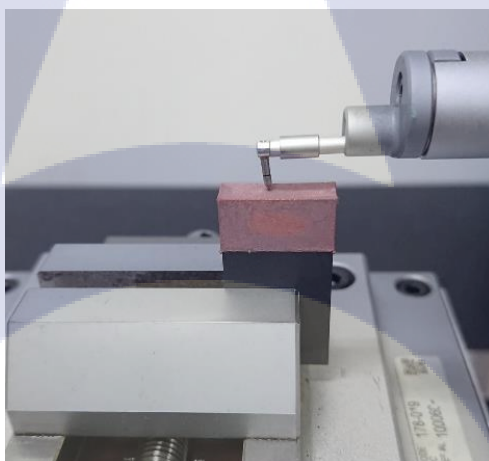
โดยสามารถสรุปได้ดัง ตารางที่ 3.3 และสามารถดูได้จากหน้าต่าง E-Condition ในโปรแกรม ESPER ดังรูปที่ 3.12

3.3.3 เครื่อง Surface roughness tester

หลังจากทำการชุบและกัดชิ้นงานเสร็จแล้ว นำอิเล็กทรอนิกส์และชิ้นงานมาตรวจวัดด้วยเครื่อง surface roughness tester รุ่น SV-3100 ยี่ห้อ Mitutoyo ดังรูปที่ 3.13 โดยใช้เงื่อนไขในการวัดคือ

1. มาตรฐานการวัด JIS 1994
2. ความเร็วการวัด 0.5 mm/s
3. ระยะการวัด 4.525 mm และ
4. ระยะระหว่างจุดการวัด 0.5 μm

แล้วจึงนำค่าความเรียบผิวที่ได้จากการตรวจมาวิเคราะห์ เปรียบเทียบกับอิเล็กทรอนิกส์จากทองแดง 100% และกราไฟต์ 100% โดยใช้ รวมกับค่าความลึกของห้วงอิเล็กทรอนิกส์แล้วจึงนำมาสรุปผล



รูปที่ 3.13 การวัดความเรียบผิว

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

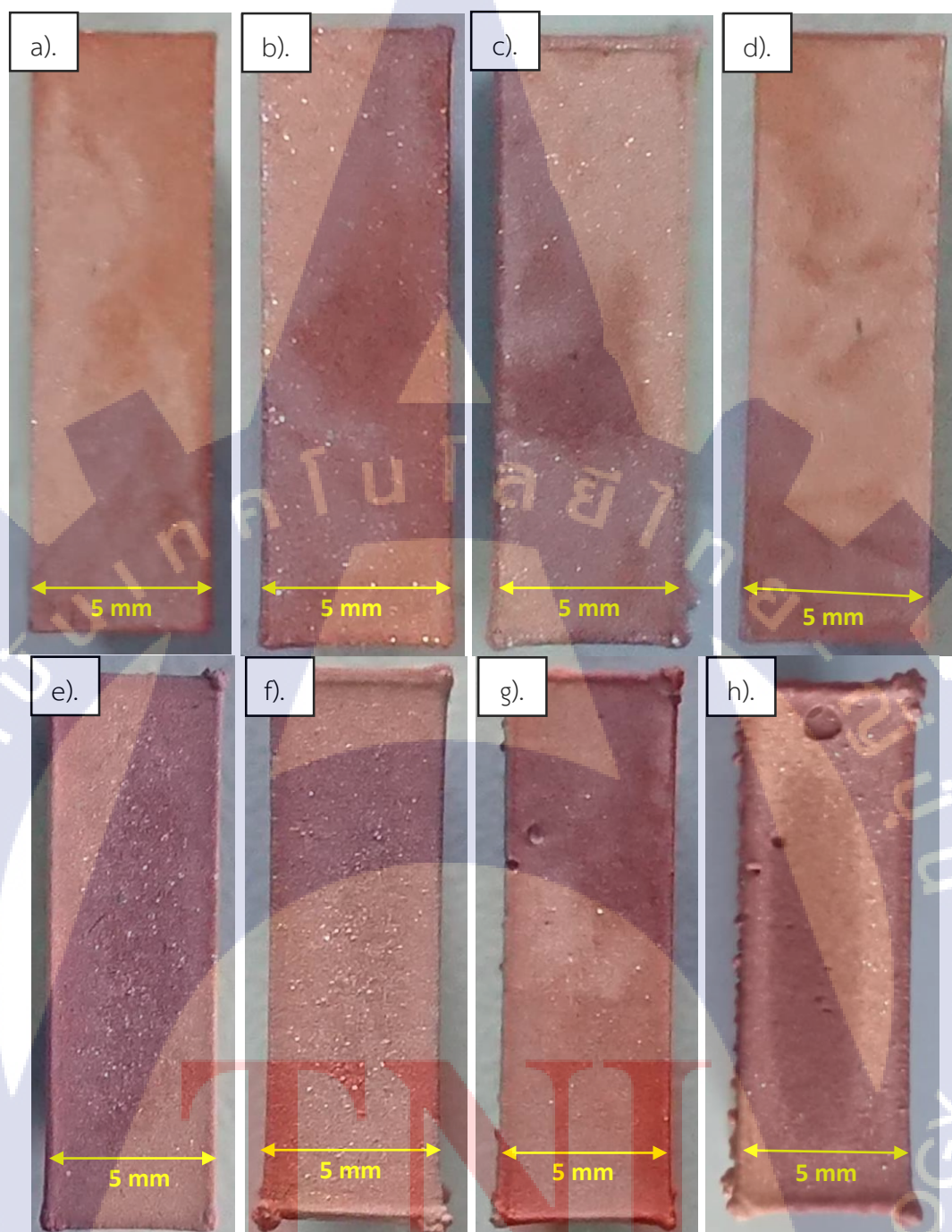
4.1 ผลการทดลองการชุบ

4.1.1 ความเรียบผิวของอิเล็กโทรดหลังจากชุบ

ผลการทดสอบความเรียบผิวของอิเล็กโทรดโดยเปรียบเทียบกับระหว่างก่อนและหลังชุบทองแดงสามารถแสดงผลได้ตามตารางที่ 4.1 โดยอิเล็กโทรดหลังจากชุบมีลักษณะดังรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ความเรียบผิวของอิเล็กโทรดหลังจากชุบ

Conditon	Plating time	Electrolyte concentration	Current density	surface roughness
	(Hrs)	(Mol)	(A/dm ²)	(μ m)
1	3	0.5	3.7	1.624
2	3	0.5	5.4	2.315
3	3	1	3.7	1.965
4	3	1	5.4	3.418
5	5	0.5	3.7	3.759
6	5	0.5	5.4	4.475
7	5	1	3.7	3.282
8	5	1	5.4	4.593



รูปที่ 4.1 ผิวนิเล็กโทรดหลังจากการชุบด้วย a). جهدไขที่1 b). جهدไขที่2 c). جهدไขที่3 d). جهدไขที่4 e). جهدไขที่5 f). جهدไขที่6 g). جهدไขที่7 h). جهدไขที่8

4.1.2. การวิเคราะห์ผลความเรียบผิวของอิเล็กโทรดหลังจากชุบ

a). Taguchi signal-noise ratio

หลังจากได้ผลลัพธ์มาแล้ว ให้ทำการคำนวณหาค่า S/N Ratio ซึ่งค่าของความเรียบผิว ที่ได้จะใช้การวิเคราะห์แบบ Smaller-the-better โดยใช้สมการที่ (2.8) ในการคำนวณ ผลจากการคำนวณที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 Taguchi signal-noise ratio ของความเรียบผิวงานชุบ

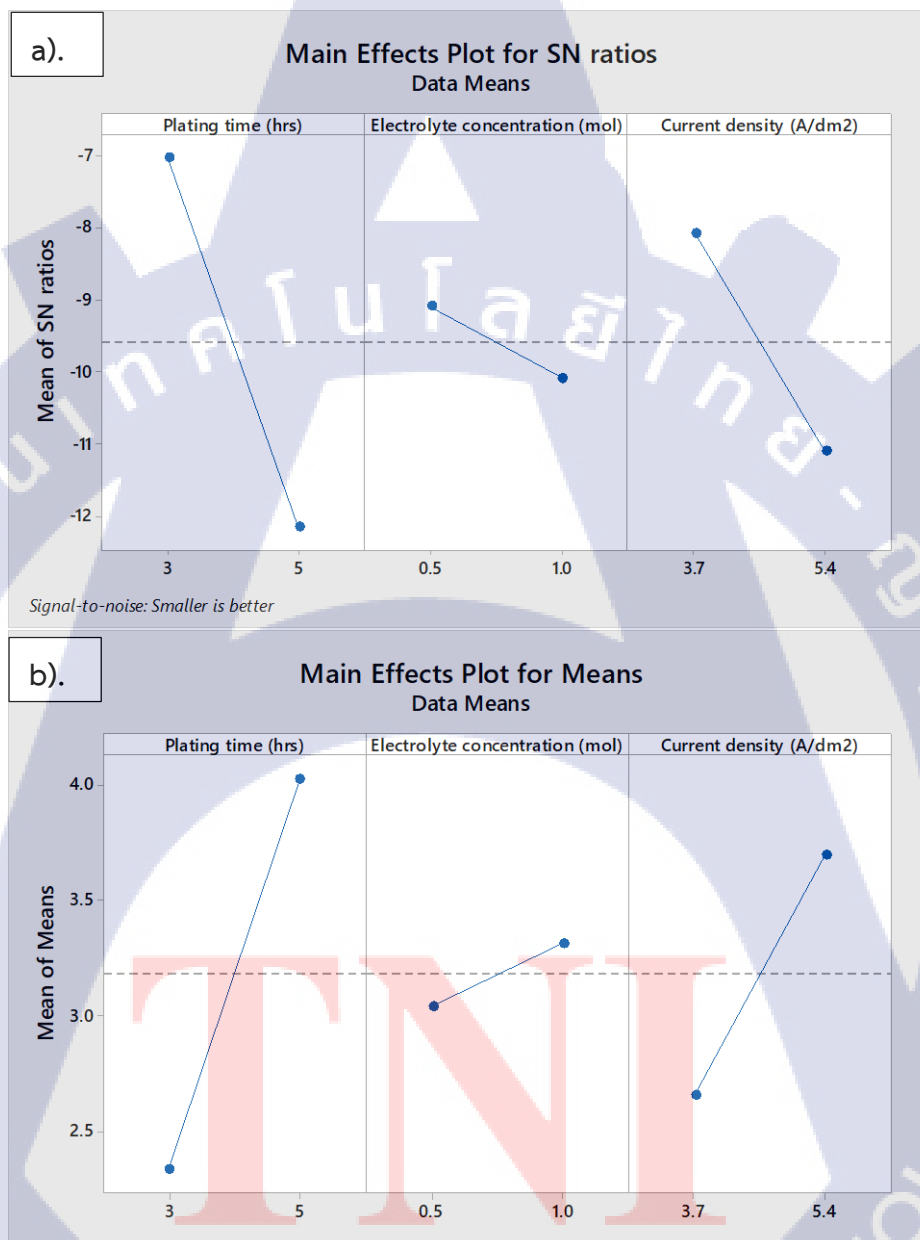
Conditon	Plating time	Electrolyte concentration	Current density	SR	S/N Ratio
	(Hrs)	(Mol)	(A/dm ²)	(μ m)	(dB)
1	3	0.5	3.7	1.624	-4.212
2	3	0.5	5.4	2.315	-7.291
3	3	1	3.7	1.965	-5.867
4	3	1	5.4	3.418	-10.675
5	5	0.5	3.7	3.759	-11.501
6	5	0.5	5.4	4.475	-13.016
7	5	1	3.7	3.282	-10.323
8	5	1	5.4	4.593	-13.242

หลังจากได้ค่า S/N Ratio แล้วนำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยของ S/N Ratio ต่อตัวแปรที่ส่งผลแต่ละตัวทุกระดับ โดยผลที่ได้เป็นไปดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยของ S/N Ratio ของตัวแปรที่ส่งผลแต่ละตัวในทุกระดับ

S/N Ratio Ranking	Plating time	Electrolyte concentration	Current density
1	-7.011	-9.005	-7.976
2	-12.021	-10.027	-11.056
Delta	5.009	1.022	3.080
Rank	1	3	2

จากผลการทดลองหาค่าความเรียบผิว นั่น ค่าเฉลี่ย S/N Ratio และค่าเฉลี่ยผลตอบแทนของ
แต่ละตัวแปรสามารถสรุปผลออกมาเป็นกราฟความสัมพันธ์ของค่า S/N Ratio ค่าความเรียบผิว กับ
ตัวแปรแต่ละตัว ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 a). กราฟค่าเฉลี่ย S/N RATIO ของตัวแปรแต่ละระดับ b). กราฟค่าตอบสนองของตัวแปรแต่ละระดับ

โดยค่าเฉลี่ยผลตอบสนองของแต่ละตัวแปรส่งผลไปในทิศทางเดียวกันกับการจัดอันดับ ผลกระทบของแต่ละตัวแปรและตัวแปรที่จะให้ค่าที่ดีที่สุดก็ต่อเมื่อใช้เวลาในการชุบ 3 ชั่วโมง ความเข้มข้นของสารละลายที่ 0.5 Mol และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้คือ 3.7 A/dm^2 ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ นั้นตรงกับเงื่อนไขระดับตัวแปรที่มีอยู่ในการทดลองเงื่อนไขที่ 1 โดยมีความเรียบผิวอยู่ที่ $1.624 \mu\text{m}$ ดังนั้นจึงทำการหาผลลัพธ์จากการทำนายค่าโดยใช้สมการที่ 2.10 และนำค่าทำนายที่ได้มา เปรียบเทียบกับผลการทดลอง สามารถสรุปผลได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบผลการทดลองกับค่าทำนาย Taguchi

Result	Predict	DOE	Difference
	Lvl 1-1-1	Lvl 1-1-1	
SR	1.674	1.624	3.048%

จากผลค่าทำนายความเรียบผิวด้วย Taguchi เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองแล้ว ค่าการทดลอง มีความแตกต่างอยู่ที่ 3.048% ดังนั้นจึงทำการทดลองเพื่อยืนยันผลลัพธ์การทำนายโดย สามารถสรุปผลการทดลองยืนยันค่าการทำนายได้ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองยืนยันผลการทำนายความเรียบผิวจากการชุบ

Run	Condition			SR
	Plating time	Electrolyte concentration	Current density	
1	3	0.5	3.7	2.134
2	3	0.5	3.7	1.459
3	3	0.5	3.7	1.844

ทำการยืนยันผลด้วย T-test โดยใช้สมการที่ 4.1 แล้วนำค่า t ที่ได้เปรียบเทียบกับค่า t ที่ ระดับนัยสำคัญ 0.05 ของ 3 ตัวแปร มีค่าเท่ากับ 12.706 โดยถ้าหากค่า t ที่ได้มีค่าน้อยกว่า 12.706 จะสามารถยอมรับได้ว่าผลการทดลองกับค่ายืนยันไม่แตกต่างกัน

$$t = \frac{(\bar{X} - \mu)}{\left(\frac{SD}{\sqrt{n}}\right)} \quad (4.1)$$

โดย $\bar{X}$ = ค่าเฉลี่ยของผลลัพธ์ Taguchi

μ = ค่าเฉลี่ยของผลลัพธ์การทดลองยืนยันผล

SD = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการทดลองยืนยัน

n = จำนวนการทดลองยืนยัน

โดยผลลัพธ์ที่ได้ค่า t จากการทดลองยืนยันผลอยู่ที่ 8.562 ซึ่งน้อยกว่า 12.706 ทำให้สามารถยอมรับผลการทดลองว่า ผลการทดลองยืนยันกับค่าที่ทำนายเป็นค่าเดียวกันได้ และสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.6

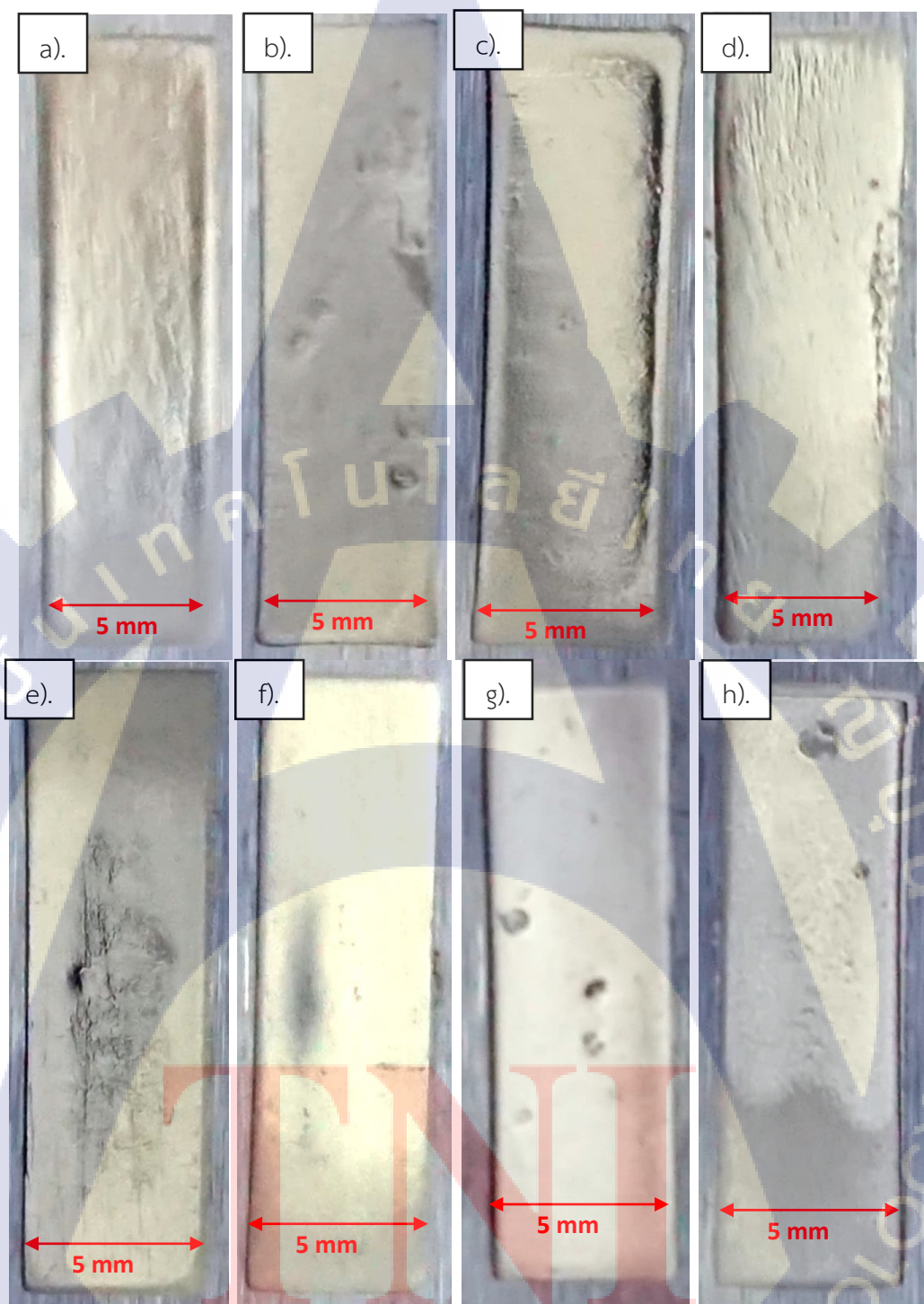
ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบค่า t ของการทดลองยืนยันผล

	SR	t < 12.706	Result
Prediction	1.674	8.562 < 12.706	Acceptable
Confirmation	1.812		

4.2 ผลการทดลองการกีดชิ้นงาน

4.2.1 ความเรียบผิวของชิ้นงาน

ผลการทดสอบความเรียบผิวของชิ้นงานเมื่อนำกราไฟต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ผ่านการชุบด้วยทองแดงตามเงื่อนไขการทดลองแล้วจึงนำมาทดลองกีดชิ้นงานได้ผิวชิ้นงานดังรูปที่ 4.3 และบันทึกค่า ค่าที่ได้สามารถแสดงได้ตามตารางที่ 4.7



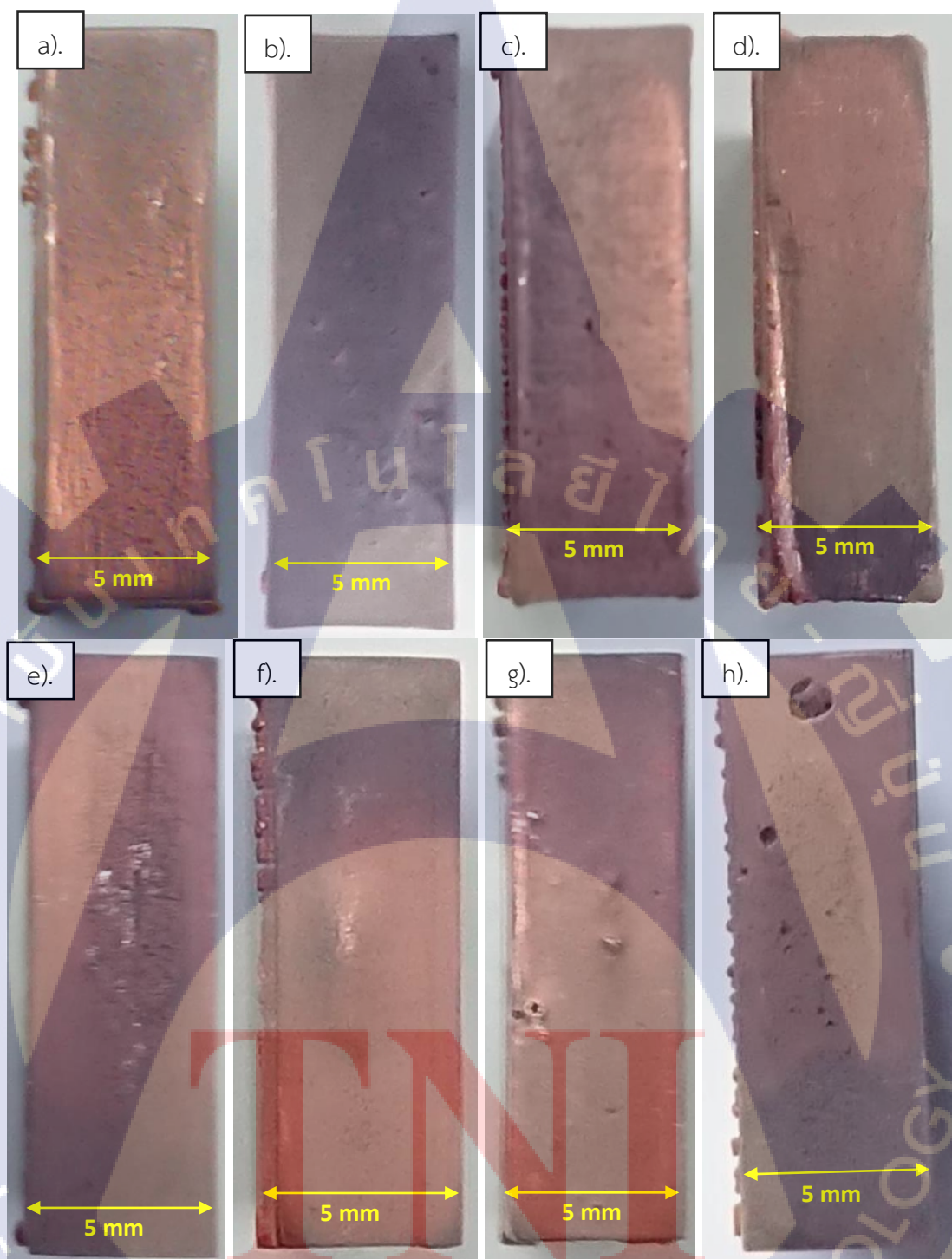
รูปที่ 4.3 พื้นผิวชิ้นงานของ a).เงื่อนไขที่1 b).เงื่อนไขที่2 c).เงื่อนไขที่3 d).เงื่อนไขที่4 e).เงื่อนไขที่5 f).เงื่อนไขที่6 g).เงื่อนไขที่7 h).เงื่อนไขที่8

ตารางที่ 4.7 ความเรียบผิวของชิ้นงาน

Conditions	Plating time (hrs)	Electrolyte concentration (Mol)	Current density (A/dm ²)	SR (μm)
1	3	0.5	3.7	0.171
2	3	0.5	5.4	0.506
3	3	1	3.7	0.2
4	3	1	5.4	0.257
5	5	0.5	3.7	0.427
6	5	0.5	5.4	0.277
7	5	1	3.7	0.203
8	5	1	5.4	0.475

4.2.2. อัตราการสึกของอิเล็กโทรดและอัตราการกัดชิ้นงาน

ผลการทดสอบการกัดโดยเปรียบเทียบขนาดของอิเล็กโทรดก่อนและหลังการกัดชิ้นงาน โดยอิเล็กโทรดมีสภาพผิวหลังการใช้งานดังรูปที่ 4.4 จากสภาพของอิเล็กโทรดสามารถเห็นสภาพพื้นผิวที่มีรูหรือรอยปริ สาเหตุหลักอาจจะมีมาจากช่องอากาศที่เกิดจากการชุบเมื่อได้รับความร้อนจากการใช้งานกระบวนการกัดแล้วเกิดการขยายตัวตันให้เกิดเป็นรอยปริระหว่างการกัดชิ้นงาน โดยอัตราการสึกของอิเล็กโทรดสามารถสรุปได้ตามตารางที่ 4.8



รูปที่ 4.4 ผิวนิเล็กโทรดหลังจากการกัดงานด้วย a).เงื่อนไขที่1 b).เงื่อนไขที่2 c).เงื่อนไขที่3 d).เงื่อนไขที่4 e).เงื่อนไขที่5 f).เงื่อนไขที่6 g).เงื่อนไขที่7 h).เงื่อนไขที่8

ตารางที่ 4.8 อัตราการสึกของอิเล็กโทรด

Conditon	Plating time (hrs)	Electrolyte concentration (Mol)	Current density (A/dm ²)	TWR (mm ³ /min)
1	3	0.5	3.7	2.041×10^{-7}
2	3	0.5	5.4	2.381×10^{-7}
3	3	1	3.7	1.046×10^{-7}
4	3	1	5.4	2.324×10^{-7}
5	5	0.5	3.7	2.479×10^{-7}
6	5	0.5	5.4	2.874×10^{-7}
7	5	1	3.7	1.313×10^{-7}
8	5	1	5.4	2.504×10^{-7}

4.2.3. การวิเคราะห์ผลการกัดชิ้นงานด้วย EDM

a). Taguchi signal-noise ratio

หลังจากได้ผลลัพธ์มาแล้ว ให้ทำการคำนวณหาค่า S/N Ratio ซึ่งค่าของความเรียบผิว และค่าอัตราการสึกของอิเล็กโทรดจะใช้สมการที่ (2.9) ซึ่งเป็นของ smaller-the-better เนื่องจากเป้าหมายมีค่าน้อยยิ่งส่งผลดี โดยผลลัพธ์ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.9

TNI

ตารางที่ 4.9 Taguchi signal-noise ratio ของการกัดชิ้นงาน

Expt. No.	Levels of parameters			S/N Ratio	
	Plating time	Electrolyte concentration	Current density	SR	TWR
	(hrs)	(Mol)	(A/dm ²)	(μm)	(mm ³ /min)
1	3	0.5	3.7	15.34	133.802
2	3	0.5	5.4	5.917	132.464
3	3	1	3.7	13.979	139.613
4	3	1	5.4	11.801	132.677
5	5	0.5	3.7	7.391	132.113
6	5	0.5	5.4	11.15	130.830
7	5	1	3.7	13.85	137.634
8	5	1	5.4	6.466	132.026

b).Grey relational analysis

หลังจากได้คำนวณหาค่า S/N Ratio ของผลลัพธ์แล้ว ให้หาค่าบรรทัดฐานของ S/N Ration เพื่อใช้ในการหาค่าเบี่ยงเบนลำดับโดยใช้ผลลัพธ์จากตารางที่ 4.6 โดยใช้สมการที่ (2.11) สำหรับค่าความเรียบผิว และอัตราการสึกของอิเล็กโทรดเนื่องจากการวิเคราะห์แบบ Smaller-the-better โดยผลลัพธ์สำหรับค่าบรรทัดฐานเป็นไปดังตารางที่ 4.10

TNI

ตารางที่ 4.10 ค่าบรรทัดฐานของ S/N Ratio

Expt. No.	Levels of parameters			Normalized S/N Ratio	
	Plating time	Electrolyte concentration	Current density	SR	TWR
	(hrs)	(Mol)	(A/dm ²)	(μm)	(mm ³ /min)
1	3	0.5	3.7	0.000	0.662
2	3	0.5	5.4	1.000	0.814
3	3	1	3.7	0.144	0.000
4	3	1	5.4	0.376	0.790
5	5	0.5	3.7	0.844	0.854
6	5	0.5	5.4	0.445	1.000
7	5	1	3.7	0.158	0.225
8	5	1	5.4	0.942	0.864

เมื่อได้ค่าบรรทัดฐานแล้ว จึงนำค่าบรรทัดฐานมาใช้หาค่าเบี่ยงเบนลำดับโดยใช้สมการที่ (2.12) ซึ่งผลลัพธ์ค่าเบี่ยงเบนลำดับเป็นไปดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ค่าเบี่ยงเบนลำดับของ S/N Ratio

Expt. No.	Levels of parameters			Deviation sequence	
	Plating time	Electrolyte concentration	Current density	SR	TWR
	(hrs)	(Mol)	(A/dm ²)	(μm)	(mm ³ /min)
1	3	0.5	3.7	1.000	0.338
2	3	0.5	5.4	0.000	0.186
3	3	1	3.7	0.856	1.000
4	3	1	5.4	0.624	0.210
5	5	0.5	3.7	0.156	0.146
6	5	0.5	5.4	0.555	0.000
7	5	1	3.7	0.842	0.775
8	5	1	5.4	0.058	0.136

เมื่อได้ค่าเบี่ยงเบนลำดับมาแล้ว จึงนำค่าเบี่ยงเบนลำดับมาใช้หาค่า GRG โดยใช้สมการที่ (2.13) เพื่อนำไปใช้หาค่า GRG สำหรับการจัดอันดับความสัมพันธ์ของตัวแปร เพื่อนำไปใช้ประกอบการตัดสินใจระดับตัวแปรที่ดีที่สุด และมีผลลัพธ์ดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ค่า GRG และค่า GRG ของผลการทดลอง

Expt. No.	Levels of parameters			Grey Relational Coefficient		GRG	Rank
	Plating time	Electrolyte concentration	Current density	SR	TWR		
	(hrs)	(Mol)	(A/dm ²)	(μm)	(mm ³ /min)		
1	3	0.5	3.7	0.3333	0.5963	0.421	7
2	3	0.5	5.4	1	0.7288	0.8644	1
3	3	1	3.7	0.3688	0.3333	0.3511	8
4	3	1	5.4	0.4447	0.704	0.7162	4
5	5	0.5	3.7	0.7616	0.7739	0.7678	3
6	5	0.5	5.4	0.4738	1	0.6841	5
7	5	1	3.7	0.3726	0.3922	0.4628	6
8	5	1	5.4	0.8956	0.7859	0.8408	2

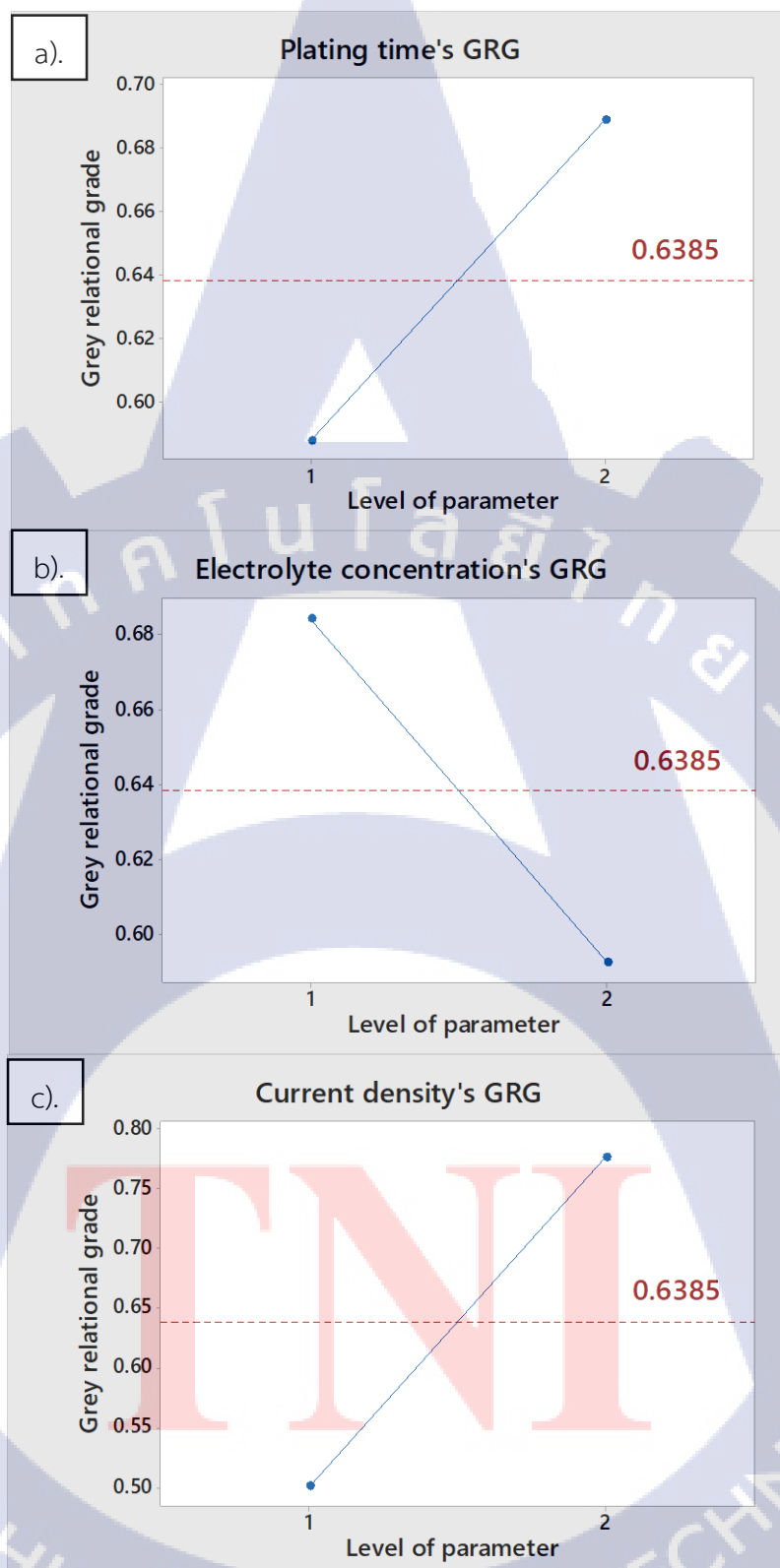
c). Optimal parameters and confirmation

ในการหาระดับตัวแปรที่ดีที่สุดนั้นให้นำค่า GRG มาทำการหาค่าเฉลี่ยโดยอ้างอิงจากระดับของตัวแปรนั้นๆโดยใช้สมการที่ (2.14) แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยจาก GRG ทุกระดับของตัวแปรนั้นอีกทีหนึ่งเพื่อนำมาจัดลำดับผลกระทบของตัวแปรนั้นๆ โดยผลลัพธ์ที่ได้เป็นไปดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 ค่าเฉลี่ย GRG และลำดับผลกระทบของตัวแปร

Symbol	Parameters	GRG		Main Effect (Max-Min)	Rank
		Level 1	Level 2		
A	Plating time (hrs)	0.5882	0.6889	0.1007	2
B	Electrolyte concentration (Mol)	0.6843	0.5927	0.0916	3
C	Current density (A/dm ²)	0.5007	0.7764	0.2757	1

จากผลลัพธ์ค่าเฉลี่ย GRG ของตัวแปรแต่ละระดับ สามารถบ่งบอกได้ว่า ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการชุบมีผลมากที่สุดในการทดลอง ตามมาด้วยเวลาในการชุบและความหนาแน่นของสารละลายตามลำดับ โดยที่ระดับที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดของแต่ละตัวแปรคือ เวลาในการชุบที่ 5 ชั่วโมง (ระดับ2) ความหนาแน่นของสารละลายที่ 0.5 Mol (ระดับ1) และ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการชุบที่ 5.4 A/dm² (ระดับ2) โดยมีค่าเฉลี่ย GRG ของการทดลองอยู่ที่ 0.6385 ตามรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ค่า Grey relational grade ในทุกระดับของตัวแปร a). เวลาในการชุบ b). ความเข้มข้นสารละลาย c). ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

ดังนั้นจึงทำการทดลองโดยใช้ค่าตัวแปรที่ดีที่สุดเพื่อยืนยันผล โดยจะทำการคำนวณหา GRG ของระดับตัวแปรที่ดีที่สุดก่อนโดยใช้สมการที่ (2.15) โดยจะได้ผลลัพธ์ของค่าการทำนายและผลการทดลองเพื่อยืนยันนำมาเปรียบเทียบกับการทำผลการทดลองที่ระดับตัวแปรเดียวกันในการทดลอง โดยมีผลความเรียบผิวและอัตราการสึกตังตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 เปรียบเทียบผลการทดลองกับค่าที่ดีที่สุด

Result	Predict	DOE	Difference
	Lvl 2-1-2	Lvl 2-1-2	
GRG	0.8725	0.6841	21.594%
SR	0.191	0.277	45.026%
TWR	2.111×10^{-7}	2.874×10^{-7}	36.125%

4.3 การหาค่าที่ดีที่สุดและการยืนยันผล

จากผลลัพธ์เมื่อทำการทดลองยืนยันโดยใช้เวลาในการชุบ 5 ชั่วโมง ความเข้มข้นสารละลาย 0.5 Mol และ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5.4 A/dm^2 ค่าผลลัพธ์ที่มีการเพิ่มประสิทธิภาพมากที่สุด คือ ค่าความเรียบผิว รองลงมาคือ ค่าอัตราการสึกของอิเล็กโทรด ทว่าเมื่อนำชุดตัวแปรที่ส่งผลลัพธ์ให้ได้ค่าที่ดีที่สุดของความเรียบผิวจากการชุบมาเปรียบเทียบกับ ผลลัพธ์ค่าชุดที่ดีที่สุดนั้นยังไม่สอดคล้องกันในทั้งสองช่วง ดังนั้นจึงได้นำหลักการ utility concept เข้ามาเพื่อพิจารณาค่าที่ดีที่สุดจากค่ากลางของผลลัพธ์ทั้งสองชุดแล้วจึงนำมาตัดสินใจเลือกชุดค่าตัวแปรที่ดีที่สุด ทำการเฉลี่ยค่าทั้งสองชุดค่าตัวแปร โดยค่ากลางทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบเป็นดังตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 ค่ากลางการทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบ

Symbol	Parameters	Optimal		Utility Concept
		Plating	EDM	
A	Plating time (hrs)	3	5	4
B	Electrolyte concentration (Mol)	0.5	0.5	0.5
C	Current density (A/dm^2)	3.7	5.4	4.55

จากนั้นทำการทดลองด้วยค่ากลางของชุดตัวแปรเพื่อตัดสินหาผลค่าตัวแปรที่เหมาะสมที่สุด โดยผลการทดสอบค่ากลางที่ได้มีผลดังตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 ผลการทดลองค่ากลางของชุดตัวแปร

Run	Condition			Plating	EDM	
	Plating time	Electrolyte concentration	Current density	Tool SR	Workpiece SR	TWR
1	4	0.5	4.55	2.578	0.218	1.792×10^{-7}
2	4	0.5	4.55	1.795	0.322	2.373×10^{-7}
3	4	0.5	4.55	2.441	0.171	1.119×10^{-7}

เมื่อนำผลการทดลองค่ากลางของชุดตัวแปรเปรียบเทียบกับชุดตัวแปรค่าที่เหมาะสมของทั้งสองกระบวนการแล้วผลสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17 ผลการทดลองค่าที่เหมาะสมทั้ง 3 กระบวนการ

Set	Condition			Plating	EDM	
	Plating time	Electrolyte concentration	Current density	Tool SR	Workpiece SR	TWR
1	3	0.5	3.7	1.812	0.171	1.761×10^{-7}
2	4	0.5	4.55	2.271	0.237	2.041×10^{-7}
3	5	0.5	5.4	4.475	0.191	2.110×10^{-7}

จากนั้นจึงทำการหาค่า Overall Utility และค่า S/N Ratio ของ Overall Utility เพื่อนำมาหาค่าตามแบบกระบวนการ Taguchi เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่า S/N Ratio ที่ได้จากชุดตัวแปรทั้งสองกระบวนการ โดยใช้สมการที่ 4.2 สมการที่ 4.3 และสมการที่ 4.4 โดยจะสามารถแสดงผลได้ดังตารางที่ 4.18

$$U = \sum_{i=1}^n W_i P_i \quad (4.2)$$

$$P_i = A \times \log\left(\frac{X_i}{X'_i}\right) \quad (4.3)$$

$$A = \frac{9}{\log\left(\frac{X^*}{X'_i}\right)} \quad (4.4)$$

โดย U = ค่า Utility

W_i = น้ำหนักภายใต้เงื่อนไข

P_i = ค่าที่ต้องการ

A = ค่าคงที่จากค่าที่ต้องการที่ดีที่สุด

X_i = ค่าของการทดลองที่ i

X'_i = ค่าของการทดลองที่ยอมรับได้

X^* = ค่าการทดลองที่ดีที่สุด

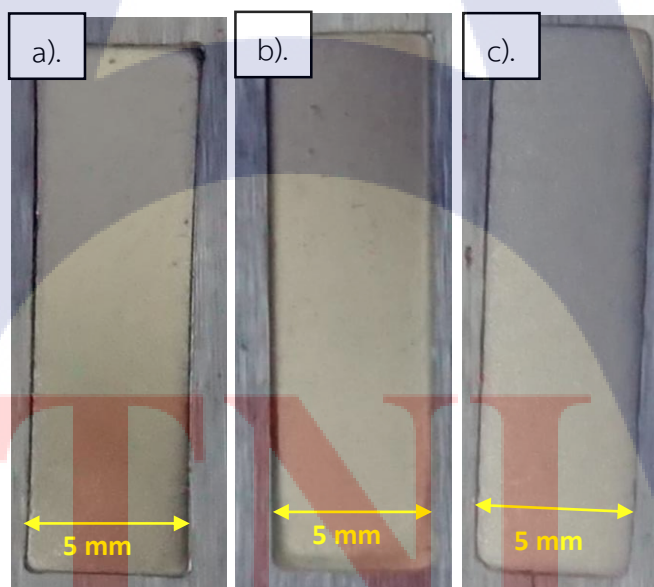
ตารางที่ 4.18 ผลการทดลองค่า utility และ S/N Ratio

Sets	Tool	Work	TWR	Overall	S/N Ratio overall
	SR	SR	Utility	Utility	
	Utility	Utility			
Taguchi analysis	8.348	9.87	9.864	9.361	-19.426
Average level	6.49	7.303	13.637	9.144	-19.222
TGR analysis	0.912	9	9.012	6.308	-15.998

โดยผลจากการเปรียบเทียบของค่ากลางชุดตัวแปรและค่าชุดตัวแปรที่ดีที่สุดทั้งสองชุดนั้น โดยผลการเปรียบเทียบนั้นค่า S/N Ratio ของการทดลองเปรียบเทียบค่าของ TGRA ให้ค่า S/N Ratio มากที่สุด คือ -15.998 จึงสามารถสรุปได้ว่า เงื่อนไขการชุบที่เวลา 5 ชั่วโมง ความเข้มข้น สารละลาย 0.5 Mol และ ความหนาแน่นกระแส 5.4 A/dm² ทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด และจากผลการทดลองที่ระดับตัวแปรที่ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ของอิเล็กโทรด ทองแดง 100% และกราไฟต์ 100% โดยมีผลดังตารางที่ 4.19 และรูปเปรียบเทียบผิวชิ้นงานดังรูปที่ 4.6 และมีสภาพอิเล็กโทรดหลังการกัดชิ้นงานดังรูปที่ 4.7

ตารางที่ 4.19 เปรียบเทียบผลการทดลองกับอิเล็กโทรดทองแดงและกราไฟต์

Result	Optimal	Cu 100%	Gr 100%
SR(μm)	0.191	0.197	0.517
TWR(mm ³ /min)	2.111x10 ⁻⁷	1.580x10 ⁻⁷	1.168x10 ⁻⁷



รูปที่ 4.6 ผิวชิ้นงานเมื่อกัดโดยใช้ a). อิเล็กโทรดกราไฟต์ชุบด้วยทองแดงด้วยเงื่อนไขที่ดีที่สุด b). อิเล็กโทรดทองแดง c). อิเล็กโทรดกราไฟต์



รูปที่ 4.7 สภาพผิวอิเล็กโทรดชุบด้วยเงินไซท์ที่ดีที่สุดหลังจากการกัดขึ้นงาน

จากผลการเปรียบเทียบ อิเล็กโทรดกราไฟต์ที่นำมาชุบด้วยทองแดงมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับอิเล็กโทรดทองแดง 100% ซึ่งอิเล็กโทรดทองแดงให้ผลลัพธ์ของความเรียบผิวดีกว่าอิเล็กโทรดกราไฟต์ 100% [22] ทว่าในส่วนของการสึกกร่อนของอิเล็กโทรดนั้น อิเล็กโทรดจากทองแดงและกราไฟต์ 100% นั้นยังคงดีกว่า สาเหตุคาดว่าในขั้นตอนการชุบทองแดงลงบนกราไฟต์นั้น ใช้สารละลาย CuSO_4 หรือคอปเปอร์ซัลเฟตที่มีส่วนประกอบของ H_2O ทำให้มีโอกาสที่จะมีอากาศปนอยู่ในชั้นผิวทองแดง เนื่องจากเมื่อโมเลกุลทองแดงรับอิเล็กตรอนแล้วจับตัวบนผิวกราไฟต์ โมเลกุลไฮโดรเจนก็สามารถรับอิเล็กตรอนและจับตัวรวมกันได้และ เมื่อ H_2O รับอิเล็กตรอนแล้วสลายตัวเอง เป็นก๊าซไฮโดรเจน 1 อะตอมและไฮดรอกไซด์ 2 อะตอมได้ด้วยเช่นเดียวกันดังปฏิกิริยาเคมีในสมการที่ (2.16) และ (2.17) ดังนั้นเมื่อทำการกัดด้วยเครื่อง EDM แล้วเกิดประกายไฟ จึงมีโอกาสทำให้ชั้นผิวเคลือบด้วยทองแดงหลุดออกมาได้ง่ายกว่าอิเล็กโทรดที่ทำมาจากทองแดง 100%

บทที่ 5

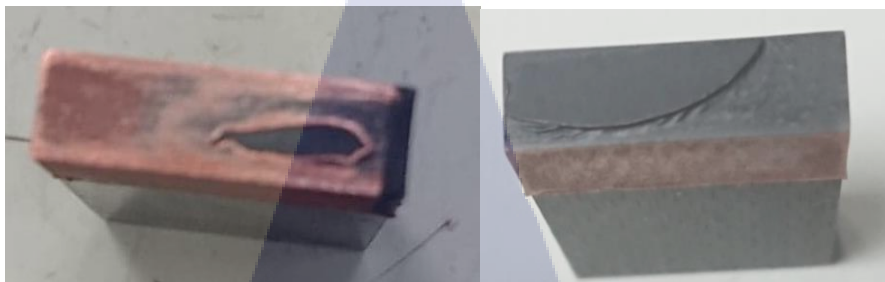
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในการทดลองนี้ได้ใช้ Taguchi L8 array ในการออกแบบการทดลอง ในการหาค่าที่ดีที่สุดในการชุบทองแดงลงบนกราไฟต์ที่จะส่งผลต่อประสิทธิภาพอิเล็กโทรดในกระบวนการ EDM โดยผลของตัวแปรในการชุบที่มีผลต่อคุณภาพของอิเล็กโทรด ในการทดลองนี้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดในการชุบอิเล็กโทรดโดยเพื่อให้ผิวจากการชุบเรียบที่สุด สามารถกัดชิ้นงานได้ผิวเรียบที่สุดและอิเล็กโทรดสึกน้อยที่สุดเมื่อใช้ กระแสในการชุบ 5.4 A/dm^2 ความเข้มข้นของสารละลาย 0.5 Mol และเวลาในการชุบ 5 ชั่วโมง เมื่อทำการกัดตามเงื่อนไขการตั้งค่าการทดลองจะได้ผลลัพธ์ ค่าความเรียบผิวหลังการชุบ $4.475 \text{ }\mu\text{m}$ ค่าความเรียบผิวชิ้นงานที่ $0.191 \text{ }\mu\text{m}$ อัตราการสึกของอิเล็กโทรดที่ $2.111 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{min}$ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับอิเล็กโทรดที่ทำจากทองแดง 100% และกราไฟต์ 100% แล้วนั้น มีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกับทองแดงในความสามารถในการกัดผิวชิ้นงานให้เรียบ เพียงแต่อัตราการสึกนั้นมากกว่าทองแดง โดยทองแดงสามารถกัดผิวโดยใช้เงื่อนไขในการทดลองนี้ให้เรียบได้อยู่ที่ $0.197 \text{ }\mu\text{m}$ และมีอัตราการสึกของอิเล็กโทรดที่ $1.580 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{min}$ โดยสาเหตุหลักมีโอกาสมากจากการใช้สารละลายในการชุบที่มีส่วนประกอบของ H_2O ส่งผลให้เกิดฟองอากาศขณะชุบผิวและทำให้มีอากาศอยู่ในชั้นผิว จึงส่งผลให้เมื่อเกิดการสึกของอิเล็กโทรด ในบางชิ้นจึงมีค่าการสึกสูงกว่าชิ้นอื่นๆ

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ ในขั้นตอนการทดลองอิเล็กโทรดกราไฟต์ที่ชุบด้วยทองแดงมีโอกาสที่ผิวของทองแดงจะเกิดการลอกในระหว่างกระบวนการ EDM ได้ สาเหตุมีโอกาสมากจากความร้อนระหว่างการใช้งานเนื่องจากค่ากระแสที่ป้อนมีค่าสูงเกินไป หรือมีค่ารอบการทำงานที่สูงเกินไป ทำให้ทองแดงเกิดการเสียรูป หรือถ้าหากกระบวนการชุบไม่ดีมีและอากาศอยู่ในชั้นผิวทองแดง อากาศนั้นอาจจะขยายตัวได้ ส่งผลให้เกิดการลอกของผิวทองแดงดังรูปที่ 5.1 ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงตั้งข้อเสนอแนะว่าถ้าหากใช้สารละลายที่ไม่มีส่วนผสมของ H_2O เข้ามาใช้แทนจะสามารถช่วยลดปัญหานี้ได้



รูปที่ 5.1 ผิวทองแดงลอกตัวขณะใช้งาน

อีกทั้งการที่ทองแดงมีค่าการนำไฟฟ้าดีกว่ากราไฟต์ ส่งผลให้ชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการ EDM นั้นมีสภาพผิวที่เรียบกว่า ซึ่งเป็นไปตามงานวิจัยของมาลอส[12] ทำให้ทางผู้วิจัยแนะนำ วิธีการตรวจสอบคุณภาพอิเล็กทรอนิกส์ที่ผ่านการชุบมาแล้วนอกเหนือจากการตรวจสอบด้วยการนำไปใช้งานจริง ด้วยการตรวจ ค่าการนำไฟฟ้าและนำมาเปรียบเทียบกับค่าการนำไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์ทองแดง เพื่อลดเวลาที่ใช้ในการสร้างและทดสอบที่จำเป็นลง รวมทั้งการตรวจสอบแรงยึดผิวของชั้นผิวทองแดงบนผิวกราไฟต์ เพื่อตรวจสอบคุณภาพการชุบที่อาจจะส่งผลให้เกิดผิวลอกระหว่างการใช้งานมีความเป็นไปได้เช่นกัน

TNI

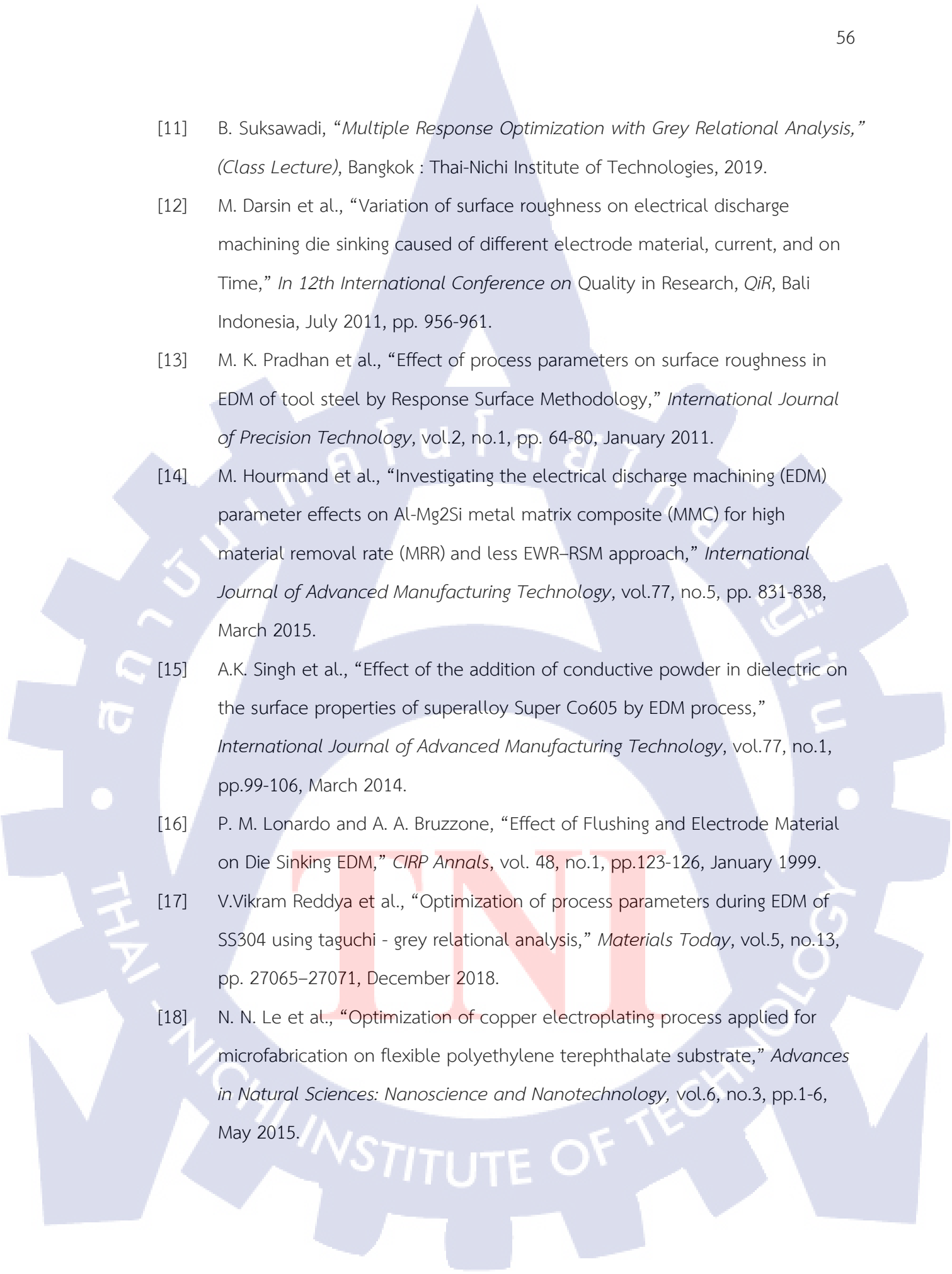
THAI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

บรรณานุกรม

TNI

บรรณานุกรม

- [1] E. Jameson, *Electrical Discharge Machining*, Michigan : Society of Manufacturing Engineers, 2001.
- [2] B. Shrestha, “*Designing an Electrode For Electrical Discharge Machining (EDM)*,” B.S. Thesis (Energy and Materials Technology), Arcada University of Applied Sciences, Helsinki, Uusimaa, Finland, 2014.
- [3] A. Ali Khan et al., “A study of electrode shape configuration on the performance of die sinking EDM,” *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, vol.4, no.1, pp. 19-23, June 2009.
- [4] P. Kumar et al., “Compatibility of copper graphite as an electrode in sinking EDM accordance of electro thermal and mechanical properties,” *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol.4, no.4, pp. 1,219-1,222, April 2015.
- [5] H. Hocheng and H. Y. Tsai, *Advanced Analysis of Nontraditional Machining*, Springer: New York, NY, 2012.
- [6] L. Wei, “*Copper Electroplating Fundamentals*,” Dupont, [Online]. Available: <https://www.dupont.com/electronic-materials/blogs/knowledge/copper-electroplating-fundamentals.html>. [Accessed: October 25, 2019].
- [7] W. Smith, *Principles of Materials Science and Engineering*, 4th ed., New York: McGraw-Hill, 1995.
- [8] M. Schlesinger and M. Paunović, *Modern Electroplating*, New York, NY: John Wiley & Sons, 2011.
- [9] Industry Plaza, “*Mitutoyo High Precision Surface Roughness Tester*,” [Online]. Available: <https://www.industry-plaza.com/surftest-sv-2100-high-precision-surface-p133089860.html>. [Accessed: February 26, 2019].
- [10] B. Suksawadi, “*Taguchi Method For Optimization Problems*,” (Class Lecture), Bangkok : Thai-Nichi Institute of Technologies, 2019.

- 
- [11] B. Suksawadi, “Multiple Response Optimization with Grey Relational Analysis,” (Class Lecture), Bangkok : Thai-Nichi Institute of Technologies, 2019.
- [12] M. Darsin et al., “Variation of surface roughness on electrical discharge machining die sinking caused of different electrode material, current, and on Time,” *In 12th International Conference on Quality in Research, QiR*, Bali Indonesia, July 2011, pp. 956-961.
- [13] M. K. Pradhan et al., “Effect of process parameters on surface roughness in EDM of tool steel by Response Surface Methodology,” *International Journal of Precision Technology*, vol.2, no.1, pp. 64-80, January 2011.
- [14] M. Hourmand et al., “Investigating the electrical discharge machining (EDM) parameter effects on Al-Mg₂Si metal matrix composite (MMC) for high material removal rate (MRR) and less EWR–RSM approach,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol.77, no.5, pp. 831-838, March 2015.
- [15] A.K. Singh et al., “Effect of the addition of conductive powder in dielectric on the surface properties of superalloy Super Co605 by EDM process,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol.77, no.1, pp.99-106, March 2014.
- [16] P. M. Lonardo and A. A. Bruzzone, “Effect of Flushing and Electrode Material on Die Sinking EDM,” *CIRP Annals*, vol. 48, no.1, pp.123-126, January 1999.
- [17] V.Vikram Reddya et al., “Optimization of process parameters during EDM of SS304 using taguchi - grey relational analysis,” *Materials Today*, vol.5, no.13, pp. 27065–27071, December 2018.
- [18] N. N. Le et al., “Optimization of copper electroplating process applied for microfabrication on flexible polyethylene terephthalate substrate,” *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, vol.6, no.3, pp.1-6, May 2015.

- [19] AMR, “UNI-T UTP3315TFL DC Power Supply,” [Online]. Available: <https://www.amr.co.th/uni-t/product/uni-t-utp3315tfl-dc-power-supply-โดยอมรสื่อสาร/>. [Accessed: February 26, 2019].
- [20] Shopee, “Mini Size Professional Magnetic Stirrer Magnetic-mixer with Stir Bar 2400 rpm Ma,” [Online]. Available: <https://shopee.co.th/Mini-Size-Professional-Magnetic-Stirrer-Magnetic-mixer-with-Stir-Bar-2400-rpm-Ma-i.1113397768.22190-07184>. [Accessed: February 26, 2019].
- [21] HSMAG, “Magnetic Stirring,” [Online]. Available: <https://www.hsmagnets.com/blog/magnetic-stirring-bar-selection-use/>. [Accessed: February 26, 2019].
- [22] A. Muttamara et al., “Effect of graphite electrode to surface’s characteristic of EDM,” *MATEC Web of Conferences*, vol.70, no.1, pp.1-4, January 2016.

ภาคผนวก

TNI

ภาคผนวก ก.

บันทึกการวัดผลการชุบ ความเรียบผิวจากการชุบ ความหนาชั้นทองแดง

TNI

ตารางที่ ก.1 ผลการวัดความเรียบผิวจากการชุบไฟฟ้าทองแดงในขั้นตอนการชุบ

R U N	Parameters			Surface roughness (Ra)				
	Electroplating time (Hours)	Electrolyte concentration (Mol)	Current density (A/dm ²)	Sample1	Sample2	Sample3	Mean	
1	3	0.5	3.7	1.688	1.726	1.458	1.624	
2	3	0.5	5.4	2.371	2.306	2.268	2.315	
3	3	1.0	3.7	1.852	1.939	2.104	1.965	
4	3	1.0	5.4	3.412	3.155	3.687	3.418	
5	5	0.5	3.7	2.746	4.586	3.945	3.759	
6	5	0.5	5.4	3.268	5.011	5.146	4.475	
7	5	1.0	3.7	2.501	3.191	4.154	3.282	
8	5	1.0	5.4	4.879	3.915	4.985	4.593	

ตารางที่ ก.2 ผลการวัดความหนาชั้นผิวในขั้นตอนการชุบ

R	Parameters			Copper layer thickness (mm)				
	Electroplating time (Hours)	Electrolyte concentration (Mol)	Current density (A/dm ²)	Sample1	Sample2	Sample3	Mean	
1	3	0.5	3.7	0.143	0.137	0.155	0.145	
2	3	0.5	5.4	0.166	0.177	0.170	0.168	
3	3	1.0	3.7	0.176	0.184	0.193	0.179	
4	3	1.0	5.4	0.191	0.184	0.176	0.188	
5	5	0.5	3.7	0.202	0.195	0.209	0.203	
6	5	0.5	5.4	0.262	0.276	0.284	0.275	
7	5	1.0	3.7	0.324	0.310	0.312	0.315	
8	5	1.0	5.4	0.352	0.339	0.357	0.351	

ภาคผนวก ข.

บันทึกการวัดการก่ดชิ้นงาน อัตราการลืก

TNI

ตารางที่ ข.1 อัตราการสึกของอิเล็กโทรด

R U N	Parameters			Tool wear rate (mm ³ /min)			
	Electroplating time (Hours)	Electrolyte concentration (Mol)	Current density (A/dm ²)	Sample1	Sample2	Sample3	Mean
1	3	0.5	3.7	2.012×10^7	1.983×10^7	2.129×10^7	2.041×10^{-7}
2	3	0.5	5.4	2.449×10^7	2.389×10^7	2.305×10^7	2.381×10^{-7}
3	3	1.0	3.7	1.011×10^7	0.998×10^7	1.128×10^7	1.046×10^{-7}
4	3	1.0	5.4	2.255×10^7	2.284×10^7	2.434×10^7	2.324×10^{-7}
5	5	0.5	3.7	2.641×10^7	2.431×10^7	2.366×10^7	2.479×10^{-7}
6	5	0.5	5.4	2.877×10^7	2.789×10^7	2.956×10^7	2.874×10^{-7}
7	5	1.0	3.7	1.387×10^7	1.254×10^7	1.298×10^7	1.313×10^{-7}
8	5	1.0	5.4	2.631×10^7	2.503×10^7	2.378×10^7	2.504×10^{-7}

ภาคผนวก ค.

การป้อนค่า M-PACK ในเครื่อง EDM

TNI

ตารางที่ ค.1 Input ของการทดสอบอิเล็กทรอนิกส์ชุดพินทองแดง

[illegible]

[illegible]

